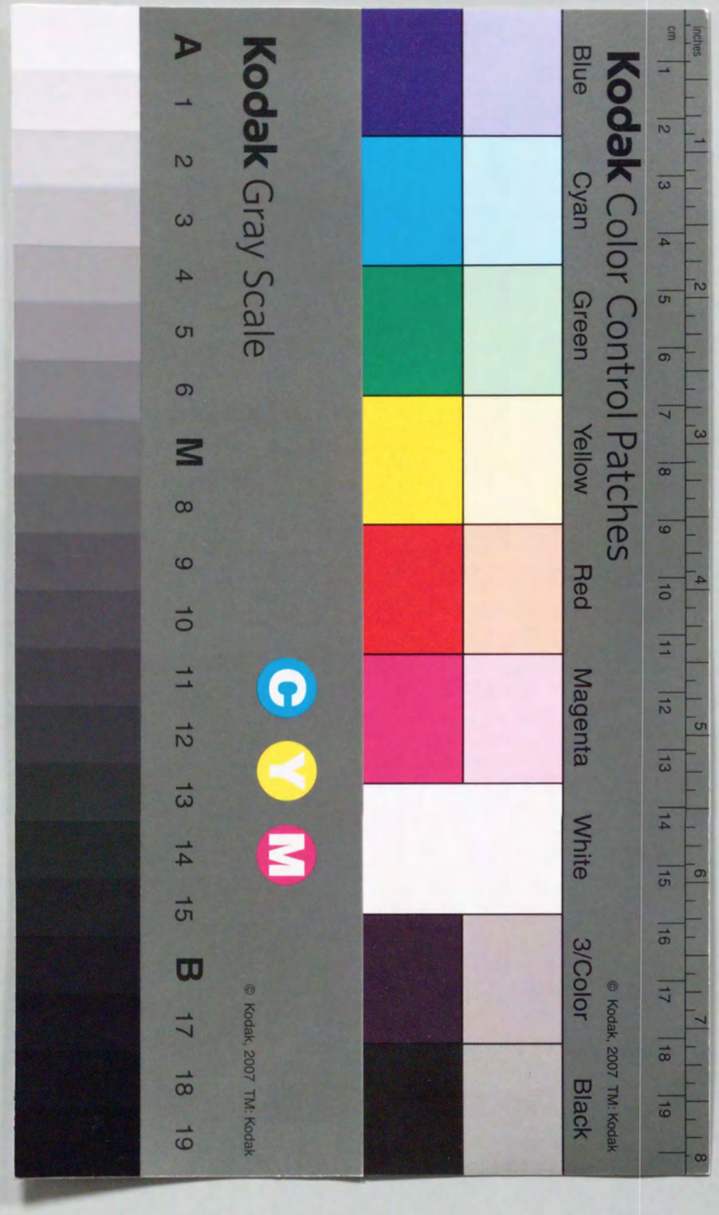
OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	長大吊橋用大型タワーリンクの設計施工に関する研究
Author(s)	村瀬, 佐太美
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155640
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka



長大吊橋用大型タワーリンクの設計施工に関する研究

１９９８年１２月

村瀬　佐太美

①

長大吊橋用大型タワーリンクの設計施工に関する研究

１９９８年１２月

村瀬　佐太美

長大吊橋用大型タワーリンクの設計施工に関する研究

目　　次

第１章　緒　　論

１．１　研　究　の　目　的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　１

１．２　研　究　の　概　要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２

第２章　吊橋補剛桁鉛直支承形式の検討

２．１　は　じ　め　に　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５

２．２　橋梁支承の所要性能　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　５

２．３　吊橋補剛桁鉛直支承が具備すべき条件　・・・・・・・・・・　７

２．３．１　吊橋補剛桁支承の概要　・・・・・・・・・・・・・・　７

２．３．２　併用吊橋補剛桁鉛直支承の設計条件　・・・・・・・　８

２．３．３　吊橋補剛桁鉛直支承における軸受方式の検討　・・　２４

２．４　実機タワーリンク設計・施工上の課題　・・・・・・・・・・　３０

２．５　リンク支承構造(タワーリンク)の提案　・・・・・・・・・・　３１

２．６　ま　　と　　め　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　３３

第３章　タワーリンクシステム確立のための実験的検討

３．１　は　じ　め　に　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　３５

３．２　トライボロジー面からの検討　・・・・・・・・・・・・・・・　３５

３．２．１　トライボロジー設計からの検討方針　・・・・・・・　３５

３．２．２　タワーリンク軸受材料の検討　・・・・・・・・・・　３８

３．３　ピン・ブシュの摩耗試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・　４６

３．３．１　小型模型による基礎試験　・・・・・・・・・・・・・　４６

３．３．２　大型模型による確認試験　・・・・・・・・・・・・・　８０

３．４　ま　　と　　め　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　９８

第４章　実機リンク支承構造に適用するための考察

４．１　は　じ　め　に　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　９９

４．２　試験研究から整理した基本事項　・・・・・・・・・・・・・・　９９

４．３　設　計　基　本　条　件　・・・・・・・・・・・・・・・・・　９９

４．４　実機製作上配慮すべき事項　・・・・・・・・・・・・・・・・１０１

４．５　Stick slip現象に関する考察　・・・・・・・・・・・・・・・１０３
４．５．１　タワーリンクにおけるStick slip現象の考察　・・１０３
４．５．２　球面軸受におけるStick slip現象の考察　・・・・１０５
４．５．３　Stick-slipに関する確認調査・実験の提案　・・・１０７
４．６　ま　と　め　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１０

第５章　トライボロジー設計製作検討の実例

５．１　は　じ　め　に　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１１
５．２　下津井瀬戸大橋のタワーリンク　・・・・・・・・・・・・１１２
５．２．１　概　　要　・・・・・・・・・・・・・・・・１１２
５．２．２　タワーリンクの特徴　・・・・・・・・・・・・・１１３
５．２．３　タワーリンクシステムの構築　・・・・・・・・・１１４
５．２．４　詳細設計の内容　・・・・・・・・・・・・・・・１１５
５．２．５　タワーリンクの製作　・・・・・・・・・・・・・１１９
５．２．６　タワーリンクの架設　・・・・・・・・・・・・・１２５
５．３　下津井瀬戸大橋のエンドリンク
に発生した stick slip 問題　・・・・・・１２６
５．４　ま　と　め　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３２

第６章　結　　論　・・・・・・・・・・・・・・・・・１３３

謝　　辞　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３６

引　用　文　献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３７
投稿論文リスト　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３８
Ａｐｐｅｎｄｉｘ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４０
TRIBOLOGY関係文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４１
Ａ１　トライボロジー用語と定義　・・・・・・・・・・・・・１４２
Ａ２　ＰＴＦＥの特性　・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５６
Ａ３　ＰＴＦＥ支承板の摩擦・摩耗特性（グライト板の摩耗試験）・１６４
Ａ４　球面軸受の摩耗特性
（ハンガーソケット部球面軸受の摩耗試験）・・１７４
Ａ５　本州四国連絡橋主要橋梁のタワーリンク・
エンドリンクの構造諸元　・・・・・１７７

第１章　緒　　論

１．１　研　究　の　目　的

道路鉄道併用長大吊橋における中間支点（主塔部補剛桁）の鉛直支承は、交通活荷重・風・温度変化等により従来に経験していない大きな正負の反力、３次元の回転・変位を受ける部材である。特に連続補剛桁を有する併用吊橋の鉛直支承は、この橋梁形式の成立を支配するほど重要な構造部分である。

従来、道路単独吊橋の鉛直支承には、ピン・ベアリング機構が用いられてきた。この延長線で、道路鉄道併用橋を従来通りの設計法で設計した場合、規模は相当大きくなることが予想される。形式は同じでも大規模な支承の寿命については不明であり、そのような設計で上記の条件に耐えうるかどうか、合理的な設計が可能かどうかの検討が必要である。

本論文は、上記の必要性から吊橋タワーリンク用ピン・ブシュ構造について、その要求性能を明らかにし、摩擦・摩耗・潤滑特性を表すトライボロジー(TRIBOLOGY)[注]面に着目し、適用材料の選定および合理的な構造を設計するために各種調査研究を実施し、材料規格、設計方針を提案するものである。

従来から我が国の長支間吊橋の中間支点鉛直支承には、タワーリンクと呼ばれるピンとブシュによる固体潤滑剤埋込型無給油円筒軸受を有するリンク支承構造が適用されることが多く、本州四国連絡橋（以下、本四橋という）においても基本構造としてこの方式が採用されている。しかしながら、本システムは高荷重・低速揺動を受ける軸受機構であり、構造設計を纏めるには、摩擦・摩耗・潤滑といういわゆるトライボロジー面の検討が必要であるにもかかわらず、この種の研究は皆無に近い状態であった。

一般の支承においては応力設計に関する設計要領は比較的明確に定められている（例えば道路橋支承便覧-日本道路協会）が、トライボロジーについては示方書、橋梁工学書等に示されたものは見られなかった。当時は極一部のメーカーの社内データに基づき設計されてきた経緯がある。にもかかわらず問題を起こすことが稀であったのは、荷重変動、回転、移動量等が設計より遙かに低いものであったためと推定される。

しかし、揺れ易い、変形し易い吊橋、とりわけ道路鉄道併用橋のそれにあっては、移動かつ変動活荷重の影響が直接的に支承部分に現れる。このため、既往の中小橋梁では問題が顕在化しなかった変動荷重の影響が、本四橋・瀬戸大橋では問題となる恐れがある。また、大反力が常時作用している供用中の部材交換は極めて困難な状況であるため、支承部材としては橋の耐用年数と同程度の長期的寿命を保証する必要がある。

以上の背景から、本研究は、大反力・大寸法下において、常時低速揺動運動するリンク支承構造についてトライボロジーに立脚した設計法の確立を目的として行ったものである。

注）トライボロジーの定義については、Appendix Ａ１を参照されたい。

1．2 研 究 の 概 要

本論文は、長大吊橋用大型リンク支承構造(タワーリンク)の軸受部であるピン・ブシュ構造について、その要求性能を明らかにし、吊橋のタワーリンクシステム確立のために行った実験研究を中心に、設計法、実機製作･架設に関する検討事項について取りまとめている。

研究内容は、ピン・ブシュで構成される軸受部のトライボロジー面に着目し、関連既往技術の整理、研究課題の整理、適用材料および合理的な構造を設計するために実施した実験研究結果の総合評価、並びに材料規格、設計方針、製作・架設に対する検討である。

実験研究の主要な具体的項目は、タワーリンク用適用材質の選定を行うために実施した小型模型実験、寸法効果を確認するために行った大型模型実験である。

これらの研究結果から、設計法の確立を行うと共に、実機における設計・製作・架設について各種提案を行い、リンク支承構造である大型タワーリンクシステムが安定して施工できることを示したものである。

本論文は、６章より構成されており、図１．１には論文の構成を示している。以下にその内容を説明する。

第１章は、研究概要であり、本開発研究の背景、目的および本論文の構成について記している。

第２章では、既往吊橋の支承が具備すべき条件(所要性能)について、既往技術に基づいた検討を行う。その上で、吊橋補剛桁鉛直支承の定義、設計条件・要求品質について明らかにし、タワーリンクの軸受方式の選定、実機における設計施工上の課題を明らかにする。

以上の机上検討からリンク支承構造(タワーリンク)を提案する。

第３章では、タワーリンクをトライボロジー面から眺め、軸受部にピン・ブシュの組合せを用いたシステムの設計･施工上からの課題を整理する。次いで、この課題を解決することを目的として各種模型実験を実施する。

まず、軸受材料であるピン・ブシュの適用材質を選定するために小型模型実験を行い、トライボロジー諸特性を確認し、材料・材質の組合せを提案する。

さらに、提案した材質の組合せを用いて大型模型による寸法効果の確認実験を行う。これらの結果を総合的に検討し、タワーリンクシステムの設計基本事項を提案する。

また、実験結果を基に実機での摩耗量を推定し、実機設計に使用できることを明らかにする。

第４章では、リンク支承構造（タワーリンクシステム）に関する設計法、製作の基本方針を提案する。

また、リンク支承構造における付着すべり（Stick slip）現象の分析および対策について述べ、現象の発生の可能性について確認方法を提案する。

第５章では、実橋を例にタワーリンクの採用並びに設計にあたって検討あるいは提案した内容について整理する。

第６章には、本研究の総合的な結論を述べている。

さらに、後付Appendix には、トライボロジーに関する基礎的情報およびタワーリンク実機に関する技術情報を付録として取りまとめている。

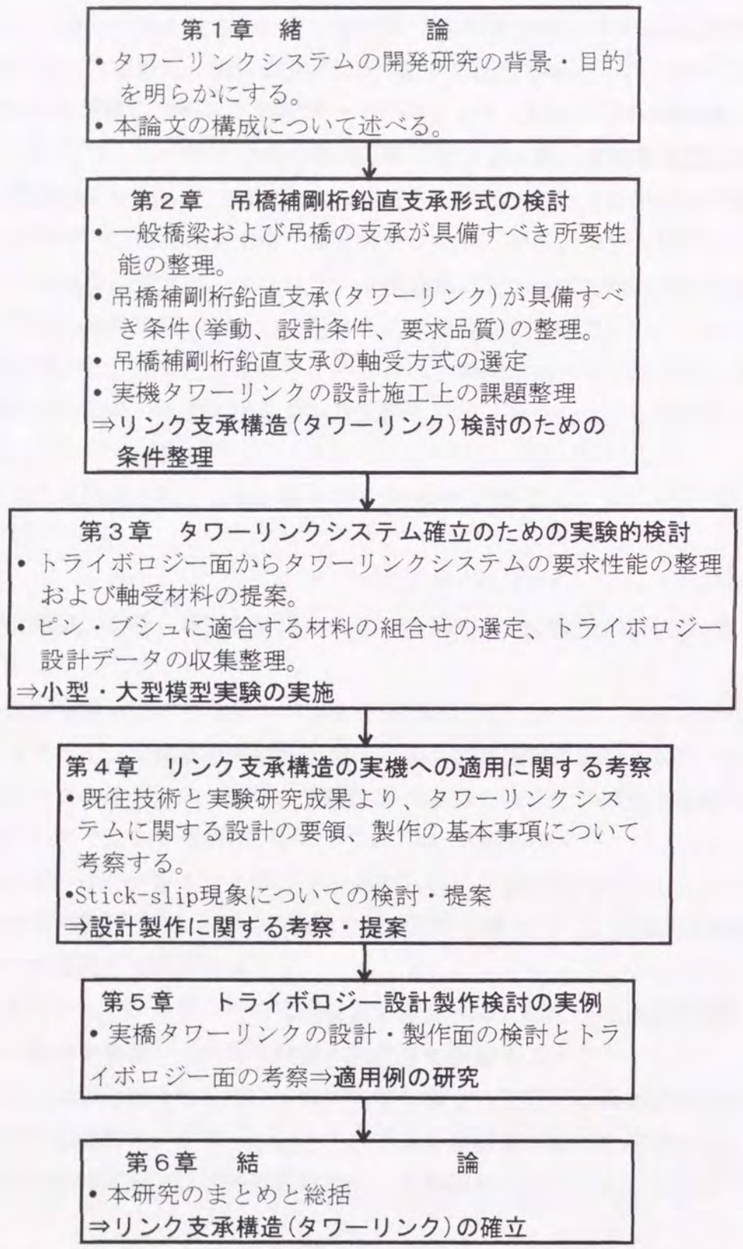


図１．１　本 論 文 の 構 成

第２章　吊橋補剛桁鉛直支承形式の検討

２．１　は　じ　め　に

本章においては、まず、一般橋梁の支承を取り巻く環境、必要とされる機能について述べ、吊橋補剛桁鉛直支承に適用される支承形式の検討を行う。次いで適用可能性のある支承形式のうち、その基本となる軸受方式の選定を行い、リンク支承構造の選定を行う。

次にリンク支承構造を確立するための実機における問題点あるいは課題を整理し、さらにそれら課題の解決方法について検討する。

以上の検討から吊橋補剛桁鉛直支承の形式選定を行う。

なお、本論文での主たる着眼点であるトライボロジー、主たる使用材料であるPTFE(四ふっ化エチレン樹脂)およびリンク支承構造(主にタワーリンク)に関する技術情報については、Appendix　A1 および A2 に整理している。

２．２　橋梁支承の所要性能

（１）　支承が置かれている環境

過去、橋梁建設においては経済性第一優先であり、基礎地盤と支間が決定されると画一的に形式選定が行われていたといっても過言ではない。

神社・仏閣の境内や庭園など特別な理由でもって橋が建設される場合を除いて、公道に設置する橋の形式は、比較的単純な技術手法により決定されてきた。

橋の架設目的は、一般に、異なる地域の連結、橋の鑑賞、滞留(橋からの鑑賞と、橋上での交流)とそれらの組合せに分けられるが、彼岸と此岸を結ぶ連結目的にはこ上記の発想による建設で十分であった。戦後荒廃した国土の基盤（インフラストラクチュア）整備において文化的にはともかく、日本の経済的発展に大いに寄与してきたといえる。

一般的な橋梁形式にあっては、その構造は上部構造である橋桁と下部構造である橋脚あるいは橋台によって構成される。上部構造と下部構造の接点には、通常、支承(または沓)と呼ばれる繋ぎ部材が設けられ、橋梁構造として一体化される。

橋の支承は、橋軸方向の橋の挙動吸収を第一に考え、桁の伸縮と回転を許容する可動支承と、回転のみを許す固定支承の組合せで構成される。この場合、橋軸直角方向は移動が制限される構造である。

しかしながら、現代においては橋の形式には多方面から様々な個性要求があり、従来のように支間が決まれば橋梁形式が決まるということは少なくなりつつある。経済的余裕が出てきた日本でも景観性を重視し、その橋のおかれる地域･場所の自然環境(地象、海象、

気象、地震履歴など）、住環境、歴史的背景、等を考慮した橋が要求され、計画されるようになった。

その結果、橋の支承は、従来の画一的な形式決定では不十分となってきたのである。特に、阪神・淡路大震災以後、都市型、直下型巨大地震の影響を考慮することとなった今日にあっては、従来、「橋の見えない部分」と言われ、その存在さえ忘れられていた支承には、一般ユーザーからも注目されるようになってきている。

すなわち、個別に設計されることが多かった支承は、橋全体の挙動を考慮して、公共輸送手段、国家のライフラインを守る重要部材として考えられるようになった。簡明にいえば、地震・風等自然環境から入力される特定できない方向性を持つ不測の力に対しても安全な設計が要求されるようになったのである。

外力に対し、力でもって頑張る設計思想に反省がもたらされ、全体系で柔な挙動を持つ工夫がなされるようになった。支承は、免震あるいは吸震構造化が指向され、ゴム系が採用され、かつ、その機能が不測時に損なわれることのないよう機能分散することが検討され始めてきている。

（2）一般支承に要求される事項

一般的な支承に要求される事項を以下に示す。

① 耐荷重性：次に示す各種荷重に耐えるものであること。

・死荷重（Dead Load）－固定的荷重。

・交通活荷重（Live Load、自動車、鉄道）－繰返し移動荷重。

・自然荷重（風、地震、温度）－繰返し移動荷重。

上記について橋の３次元的耐荷性が考慮できているか。すなわち、水平面内、鉛直面内、場合によってはそれらの組合せに対して考慮できていること。

② 変位吸収性：次に示す変位（挙動）に対し、吸収できる機能を有すること。抵抗させる場合は発生応力に対し、適切に設計されていなければならない。

・移動（伸縮）－橋軸方向、橋軸直角方向。

・回　転　　－橋軸方向、橋軸直角方向。

長大支間になるほど橋梁設計の支配要因となることが多いが、３次元的配慮は前項①と同様である。

③ 耐食性：支承は、通常取り替え困難な場合が多い。特に、海岸地帯で海塩粒子の影響を受ける場合や工場地帯で亜硫酸ガス等工場排気物の影響が懸念される場合には、計画当初から次項④に示す取替え性も含めてメンテナンス上、防食設計が要求される。

④ 交換性（取替え性）：支承は橋の生命を預かる部材である。しかし、その設置環境は余程配慮しても悪くなることが多い。

主なものとして、設計を超える自然荷重を受けたり、予測を超える下部構造の不同沈下があったり、不測の挙動による機能滅失等により、交換あるいは位置調整の必要が発生することがある。

建設時点から交換作業ができる空間が確保されていて、かつ交換作業がしやすい構造になっていないと、支承が大型化している今日、橋の供用後の交換（部材の搬出入）が非常に困難な事態となる。よって、支承本体にあっては、各部品が交換しやすい構造になるよう設計しておかなければならない。

⑤ 維持補修性：通常、支承が設置される空間は、橋の経済性、安定性等から制限されていることが多い。簡易な塗り替え塗装程度の作業でも困難を極めることがある。

特に周辺環境、経済的施工面から建設段階より周辺空間が狭められることが多いので、維持補修時の検査・作業を考慮した空間を確保しておかなければならない。前項④と同時に検討すべき項目である。

⑥ 経済性：支承が大型化すると、小型部品製造では問題とならなかった製鋼能力を含む材料手配に支障をきたすか、不経済となることがある。予め、市場性に注意した使用材料を決定しなければならない。

２．３　吊橋補剛桁鉛直支承が具備すべき条件

２．３．１　吊橋補剛桁支承の概要

（1）吊橋補剛桁の支承

吊橋の補剛桁の鉛直および水平支承には次のものがある。

鉛直支承：　タワーリンク（tower link）

エンドリンク（end link ）

床組縦桁の支承（stringer shoe）

水平支承：　ウインドシユー（wind shoe）

補剛桁の鉛直支承としては、３径間２ヒンジ吊橋の場合は側径間および中央径間の各桁端部に、連続吊橋の場合は桁端および中間支点に、リンク構造の支承が設けられることが多い。この場合、中間支点の塔部に設けられるのがタワーリンク、端支点に設けられるのがエンドリンクである。

一方、補剛桁の水平支承としては、主に風荷重反力を伝達するウインドシューが設置される。

なお、道路床あるいは鉄道床に非合成床組を有する場合は、一般橋梁の可動・固定支承

と同様に、縦桁の支承が必要である。

（2） 吊橋補剛桁の鉛直支承

吊橋補剛桁の支承は、一般橋梁の支承形式に比べて作用反力が大きく、移動量、回転量が大きく、かつ３次元的な挙動を示す部材である。その結果、支承規模が大きくなることから、一般支承で問題とならなかったことが大きな問題となってくる。

既往の吊橋では、主塔と補剛桁の連結に、両端にピンを設けたアイバーや支柱で吊る構造がしばしば用いられている。一方、本州四国連絡橋の道路鉄道併用吊橋では、列車走行性を確保するため、補剛桁をその中間支点において連続化を図っていることから、次に示すような厳しい条件下にある。

①支点反力が大きく、かつ変動がある。

②支点変位（移動、回転）が大きく、３次元的で複雑である。

③海上橋梁であるため支承が曝される腐食環境が厳しい。

特に、①および②は併用吊橋ということで道路単独吊橋より厳しい要求がある。

２．３．２　併用吊橋補剛桁鉛直支承の設計条件

本項では、吊橋補剛桁のリンク式支承の適用性を検討するにあたり、前提とした設計条件および要求性能について述べる。

（1） 併用吊橋補剛桁鉛直支承に要求される機能

①　本四橋の吊橋には、２ヒンジ補剛桁吊橋と連続補剛桁吊橋がある。

本四橋のうち道路単独吊橋では全て２ヒンジ形式が採用されているが、この形式は中間支点（主塔部）において、自動車荷重や温度変化によって補剛桁に「角折れ」と呼ばれる縦断変形および平面線形の不連続部を生じる。この不連続部は、高速走行時の運転者心理からは無視できないが、自動車の走行にはそれほど問題とはならない。しかし、道路鉄道併用橋の場合には、この部分を列車が通過する際、乗り心地や列車走行性を大きく低下させるばかりか、場合によっては高速通行が不可能となる。これを解消するために不連続部が生じないよう補剛桁を連続化した連続補剛桁吊橋を採用している。

連続補剛桁吊橋では、橋軸方向の移動量は２ヒンジ形式の場合より小さくなるが、支点反力は５倍程度に大きくなり、支承および支承を支持する部材の設計上の負担は大きくなる。このため、橋の端支点および中間支点にはその反力（鉛直および水平方向の）を伝達する機能を有する支承が必要となる。

②　吊橋補剛桁支承検討における桁形式について検討する。

吊橋の補剛桁構造には、一般的にはトラス桁形式と箱桁形式が考えられる。瀬戸大橋においては、併用橋として２層構造とし、その経済性、耐風安定性の確保から、トラス構造が採用されていた。後、大島大橋、来島大橋では箱桁構造が採用されている。しかし、支承構造の検討にあたっては、特に桁形式が異なることにより要求される機能が大きく変わることはなく、箱桁であっても支承の基本構造としては同様であり、システムの支持方法が異なるのみであるため、補剛トラスを検討の前提とする。

③　吊橋はその性質上、補剛桁の支承として表２．１に示す機能が必要である。

中小吊橋では表２．１の注）１および注）２の機能を備えた１個の支承があるが、反力や移動量の大きい長大吊橋、特に併用吊橋の支承では鉛直および水平に分離した方が構造上有利になる。これを機能分散方式と呼んでいるが、破損時の機能復旧上も効率的である。

なお、橋の寿命期間中１、２回起きると推定される暴風時あるいは地震時などで、水平移動量が異常に大きくなった場合に対処するため、桁端にストッパーを設けることによって支承構造を簡易にすることが望ましい。

④　ハンガーあるいは補剛桁の異常変形（ねじれ、衝突等を防止する目的で、中央径間回転中央および側径間端部には、主ケーブルと補剛桁の間にステイあるいはタイを設置することがある。この部材には変形あるいは荷重の大きさが異なることにより多様な形式が選定されることが多いためここでは取り扱わないことにする。

表２．１　補剛桁の支承の機能

		橋軸方向	橋軸直角方向
鉛　直　移　動		V	
水　平　移　動		○	H
	鉛直面内	○	V
	水平面内	○	

注）１．○印は移動または回転を許さなければならない。

２．面外は移動または回転を許してはならない。

３．Ｖ印は移動または回転の拘束を鉛直支承のみが受け持つ。

４．Ｈ印は移動の拘束を水平支承のみが受け持つ。

５．従って、Ｖ印は水平支承で、Ｈ印は鉛直支承でそれぞれ移動または回転を許さなければならない。

（2）支承設計の荷重条件

1）列車荷重強度と走行速度

吊橋の設計に用いる列車荷重は、「上部構造設計基準」[1]に規定されており、吊橋では集中荷重の影響が少ないため、吊橋の補剛桁、主塔およびアンカレイジに対してはいずれの場合も設計を簡易にするため、3.8tf/mの等分布荷重（R_{LR}）を載荷している。

この値は、単位長さ当たりの重量が特に大きい特殊貨車のみによって編成された列車が、これを超えるのみで、貨車総数の約90%はこれ以下であり、また、特殊車両の場合は、吊橋に対しこの規定値以上の影響を与えないように運行規制が行われることが前提となっている。また、新幹線では標準活荷重に300%乗車の場合の換算等分布荷重に相当する。

一方、疲労設計においては、静的検算に用いる余裕を持った活荷重をそのまま採用することは安全側に評価し過ぎるため、平均的な列車荷重に多少の余裕をみた2.7tf/mの等分布荷重（R_{LR}）を用いる方針とされた。

以上の吊橋設計列車荷重から、タワーリンクにおいては、①すべり作用は少ないが、最大の荷重作用を与えるものとして3.8tf/mを、②最も頻繁に走行する列車による荷重およびすべり作用が、軸受部に最も大きな影響を与える常時の荷重状態として、疲労設計と同じ2,7tf/mを採用することとする。

次に、列車の最大載荷長は、上記吊橋用等分布荷重の場合、新幹線で320m（疲労照査の場合は400m），在来線では370mである。

列車載荷位置を瀬戸大橋を例に図２．１に示す。想定された列車の最高速度は表２．２のとおりで、これを基に、支承部での橋軸方向変位速度を判断する参考値の１つとして吊橋補剛桁上を列車が通過する時間を併記した。

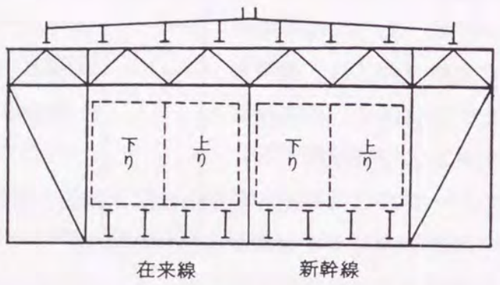


図２．１　列車載荷位置（瀬戸大橋）

2）自動車荷重強度と走行速度

自動車荷重は、上部構造設計基準[1]により、Ｔ２０，ＴＴ４３およびＬ２０を基本とし、支間200mを超える場合のＬ荷重の等分布荷重は道路上の自動車群の実情を考慮して、支間が500mを超えて大きくなるに従い、低減した値としている。

自動車走行速度は最高（設計）速度の80%を考えると、吊橋の通過時間は表２．３のようになる。

表２．２　列車速度と吊橋補剛桁通過時間[2]

列車種別	最高速度 注1）		通過時間（秒）		
	km／h	m／s	大鳴門橋 注2）	下津井瀬戸大橋 注2）	南備讃瀬戸大橋 注2）
新幹線（旅客）	１６０	４４．４	４１	３４	４４
在来線（急行旅客）	１２０	３３．３	５７	４７	６０
〃（急行貨物）	１００	２７．８	６８	５６	７２
〃（普通貨物）	７５	２０．８	９１	７５	９６

注１）最高速度：新幹線は吊橋の性状、線路条件から設定。
在来線（急行）は、運転取扱基準規定で許される最高速度。
在来線（普通貨物）は列車設定上仮定した値
（昭和４９年３月、運転制御設備委員会報告書参照）。
いずれも昭和５０年度当時。

注２）吊橋の長さは、中央径間はケーブル支間を、側径間は補剛桁支間を示す。
ただし、下津井瀬戸大橋では張り出し径間を示す。
大鳴門橋（Ｓ４９．７設計）　326＋870＋326＝1522m
下津井瀬戸大橋（Ｓ４９．６設計）　130＋940＋130＝1200m
南備讃瀬戸大橋（Ｓ４８．５設計）　260＋1100＋260＝1620m
この場合、走行距離は、列車先端が側径間に進入してから列車後端が反対側側径間を出るまでの距離とし、上記の長さに設計上の列車長（新幹線は320m、在来線は370m）を加算した長さで所要時間を計算した。

表２．３　自動車走行速度と吊橋補剛桁通過時間[2]

吊橋名	走行距離（補剛桁支間）(m)	最高速度 (km/h)	走行速度V_H (km/h)	走行速度V_H (m/s)	通過時間 (s)
大鳴門橋	326+ 870+326=1522	100	80	22.2	69
下津井瀬戸大橋	130+ 940+130=1200	100	80	22.2	54
南備讃瀬戸大橋	260+1100+260=1620	100	80	22.2	73
因島大橋	240+ 770+240=1250	80	64	17.8	70

3）載荷繰返し数

① 列　車：N_R

道路鉄道併用吊橋であるＡルート（本四淡路線）およびＤルート(本四備讃線）の列車本数については表２．４が報告されている。（推計の方法で多少の差がある)。

表２．４　推定列車本数[2]　　（本／日／線）

	本四淡路線 新幹線複線	本四備讃線 新幹線複線＋ 在来線複線	
	注１）	注１）	注２）
新幹線（旅客）	７５	１４	１５
在来線（旅客）	―	２９	５７
〃　（貨物）	―	８６	９１

注１）本州四国連絡橋調査報告書（鉄道編）、
本州四国連絡橋公団、昭和４８年４月
注２）本州四国連絡鉄道運転制御設備に関する研究報告書、
日本鉄道運転協会、昭和４９年３月

橋の寿命を100年（36,500日）として列車載荷繰返し数を、大鳴門橋および南備讃瀬戸大橋について計算する。表２．４の注１）欄の通過列車本数を基に疲労設計の際に算出した値は表２．５のとおりである。

表２．５　列車載荷繰返し数[2]　　（回）

吊　橋　名	載荷方法	列車の種別	載荷繰返し数
大　鳴　門　橋	単　線	新　幹　線	$5,250\times10^3$
	複　線	〃	110×10^3
南備讃瀬戸大橋	単　線	在　来　線	$6,830\times10^3$
		新　幹　線	790×10^3
		（計）	$7,620\times10^3$
	複　線	在来線複線	340×10^3
		新幹線複線	4×10^3
		在来線単線＋新幹線単線	560×10^3
		（計）	904×10^3

注１）本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書
別冊２　本州四国連絡橋の疲労設計　昭49.3
、土木学会本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会

②自動車：N_H

自動車走行は、日中は一様走行、夜間はゼロと考え、繰返し数は１日１回、走行速度V_Hは80km/hとし、これに１日午前・午後２回の渋滞（VH=10km/h）を加える。

V_H=80km/hの場合、$N_{H80}=1x365x100=3.65x10^4$　回

V_H=10km/hの場合、$N_{H10}=2x365x100=7.3\ x10^4$　回

③温度：N_T

温度変化は、日単位で、日変化量10℃で１日１回年間200回発生し、年単位で、年変化量60℃年１回発生すると考える。

$N_{Td}=200x100=2x10^4$　回

$N_{Ty}=\ 1x100=\ 100$　回

④風：N_W

摩耗を考慮すべき風は、運転規制基準風速30m/sが年１回発生し、吹送時間6h、横周期12secで補剛桁が振動すると考える。

$N_W=6x3,600/12x100=18x10^4$

⑤地震

耐用年数中の地震発生回数は、すべり距離の長い大規模地震は少なく、発生回数の比較的多い小規模地震はすべり距離が少ない為、反力、面圧の影響以外は考慮しないこととする。

（3）支承部鉛直反力と変位

１）道路鉄道併用吊橋の支承部鉛直反力

併用吊橋である瀬戸大橋３吊橋（下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋）、大鳴門橋および因島大橋の補剛桁支承部鉛直反力を表２．６に示す。

さらに、瀬戸大橋３吊橋における実機タワーリンクの設計反力はを表５．１に示している。表５．１は実機設計の結果であるが、設計外力として設計最大反力は次に示すように整理できる。

①　軸受部およびリンク軸部の設計に使用する設計最大鉛直反力は、中央支間長1000m級・３径間連続補剛トラスを有する道路鉄道併用吊橋（瀬戸大橋）においては、概ね以下の値である。

設計最大正反力　4000～5000tf

設計最大負反力　500～1000tf

②　設計にあたっては同時に、ねじれ及び面外変形に対し吸収性を有しなければならない。すなわち、円筒接触で吸収する方向以外はリンク軸部の弾性により吸収する。

なお、この鉛直反力は、橋梁の部材断面を決めるための全体解析から求められるもので、最悪条件を組み合わせた最大反力であり、トライボロジー設計に用いる反力は次項で求める。

表２．６　補剛桁支承部荷重別鉛直反力集計表[2]

大鳴門橋　　単位：t／片側

着目		荷重	死荷重 前死荷重	死荷重 後死荷重	死荷重 計	近路荷重 等分布荷重	近路荷重 線荷重	近路荷重 ねじれ荷重	近路荷重 計	鉄道荷重 等分布荷重	鉄道荷重 ねじれ荷重	鉄道荷重 計	温度	おもり	合計	番号
エンドリンク	最大時	+30℃	135	269	404	180	63	36	279			305	42		(1019) 1030	1
		−30℃	135	269	404	180	63	36	279			305	− 42		(927) 946	2
	最小時	+30℃	135	269	404	−167	− 9	− 19	−195			−163	42		(100) 88	3
		−30℃	135	269	404	−167	− 9	− 19	−195			−163	− 42		(19) 4	4
タワーリンク	最大時	+30℃	365	1204	1569	764	62	113	939			1041	386		(3927) 3935	5
		−30℃	365	1204	1569	764	62	113	939			1041	−395		(3138) 3154	6
	最小時	+30℃	365	1204	1569	−535	−41	− 30	−606			−687	386		(712) 662	7
		−30℃	365	1204	1569	−535	−41	− 30	−606			−687	−395		(−113) −119	8
下津井離戸大橋																
エンドリンク	最大時	+30℃	1364	392	1756	245	56	34	335	481	145	626	106		2823	9
		−30℃	1364	392	1756	245	56	34	335	481	145	626	−106		2611	10
	最小時	+30℃	1364	320	1684	−147	−15	− 7	−169	−310	− 17	−327	106		1294	11
		−30℃	1364	320	1684	−147	−15	− 7	−169	−310	− 17	−327	−106		1082	12
タワーリンク	最大時	+30℃	1452	1419	2871	572	61	49	682	1175	203	1378	264		5195	13
		−30℃	1452	1419	2871	572	61	49	682	1175	203	1378	−264		4667	14
	最小時	+30℃	1452	1241	2693	−261	−25	− 10	−296	−496	− 41	−537	276		2136	15
		−30℃	1452	1241	2693	−261	−25	− 10	−296	−496	− 41	−537	−276		1584	16
北備讃離戸大橋																
エンドリンク	最大時	+30℃	88	118	206	127	56	10	193	328	69	387	18		814	17
		−30℃	88	118	206	127	56	10	193	328	69	387	− 18		778	18
	最小時	+30℃	88	100	188	−100	− 5	− 6	−111	−128	− 21	−149	21		−, 51	19
		−30℃	88	100	188	−100	− 5	− 6	−111	−128	− 21	−149	− 21		− 93	20
タワーリンク	最大時	+30℃	178	1317	1495	600	56	83	739	1155	344	1499	322		4479	21
		−30℃	178	1317	1495	600	56	83	739	1155	344	1499	−322		3835	22
	最小時	+30℃	178	1007	1185	−413	−32	− 43	−488	−701	− 68	−769	353		705	23
		−30℃	178	1007	1185	−413	−32	− 43	−488	−701	− 68	−769	−353		− 1	24
南備讃瀬戸大橋																
エンドリンク	最大時	+30℃	63	− 6	57	117	37	9	163	264	60	324	15	—	559	25
		−30℃	63	− 6	57	117	37	9	163	264	60	324	− 15	—	529	26
	最小時	+30℃	63	− 6	57	− 98	− 4	− 6	−108	−110	− 17	−127	15	—	−163	27
		−30℃	63	− 6	57	− 98	− 4	− 6	−108	−110	− 17	−127	− 15	—	−193	28
タワーリンク	最大時	+30℃	128	742	870	619	37	78	734	1184	390	1574	333	725	4236	29
		−30℃	128	742	870	619	37	78	734	1184	390	1574	−333	725	3570	30
	最小時	+30℃	128	742	870	−448	−19	− 4	−471	−713	− 46	−759	341	725	706	31
		−30℃	128	742	870	−448	−19	− 4	−471	−713	− 46	−759	−341	725	24	32
因島大橋																
エンドリンク	最大時	+30℃	67	6	73				189				8		270	33
		−30℃	67	6	73				187				− 8		254	34
	最小時	+30℃	67	6	73				−107				8		− 26	35
		−30℃	67	6	73				−107				− 8		− 42	36
タワーリンク	最大時	+30℃	72	6	78				183				9		270	37
		−30℃	72	6	78				181				− 9		250	38
	最小時	+30℃	72	6	78				−105				9		− 18	39
		−30℃	72	6	78				−105				− 9		− 36	40

注1. 前死荷重とは吊橋の補剛トラスが無応力となる死荷重で，後死荷重とは，補剛トラスに応力を生ぜしめる死荷重である。

2. 〔大鳴門橋について〕
   1) 活荷重反力にはimpactを含まない。
   2) 合計欄の( )内は塔形式比較検討時の非線形反力を示す。

3. 〔下津井・北備讃・南備讃瀬戸大橋について〕
   1) 死荷重反力に不等分布を考慮している。
   2) 下津井・北備讃の後死荷重による反力の値は下部構造の移動の影響を含み，最大時・最小時でそれぞれ不利な方に考えている。
   3) 活荷重反力にはimpactを考慮している。
   4) 線荷重による反力の差は，下津井では影響線縦距の差により，南備讃では荷重強度差によるものである。

4. 〔因島大橋について〕
   1) 後死荷重は，添加物（2t／m／Br）のみである。
   2) 道路荷重反力は鉛直反力のみを示した。ねじれ解析をした場合，鉛直反力は若干小さくなり，その場合のねじれ荷重反力の割合は5%前後である。

2）リンク支承構造設計反力（南備讃瀬戸大橋）

表２．６は前述のとおり、橋梁設計で考慮した最悪条件を組み合わせたケースであり、いわば、異常時の反力で、日常的に発生する反力ではない。

支承部においては、荷重が大きくても載荷頻度が低い（繰返し数が少ない）場合がある一方、荷重は低くても載荷頻度が高い（繰返し数が多い）場合がある。支承はその軸受部、ハウジング部その他の部材から構成されるが、そのうち軸受部を設計するにあたっては、荷重のみでなく、荷重速度、すべり量、回転量についても考慮しなければならない。

以下にリンク支承構造を検討するにあたって考慮した反力のケースを示す。

ここでは、瀬戸大橋併用吊橋最大支間長の南備讃瀬戸大橋の場合を代表例として示す。

なお、ここでの試算は、鉛直支承形式を検討する時点での値であり、実機の製造設計における値とは異なる。

①死荷重（D）による反力（R_D）

死荷重（D）による反力を表２．７に示す。

表２．７　死荷重による反力（R_D）　(t)

荷重ケース	前死荷重D1による反力R	後死荷重D2による反力 R
設計最大値	R_{D1d} =128	$_{D2d}$ =742
軽減値	R_{D1di} = 64	R_{D2di} =475
備考	R_{D1di}／R_{D1d}=0.5	R_{D2di}／R_{D2d}=0.64

ここに、R_{D1d}：塔部側径間側、中央径間側の各第１ハンガーまでの前死荷重の1/2

R_{D1di}：負反力を考慮する場合はR_{D1d}の1/2

R_{D2d}　：補剛桁架設完了後に載荷する後死荷重（床版、高欄、公共添架物等）

R_{D2di}：R_{D2d}　のうち、添架物等が無いとして80%、さらに架設誤差等から80%になったとして64%を見込んだもの

②カウンターウエイト（CW）による反力（R_{CW}）

負反力を消す方法として、その箇所にカウンターウエイト（重量コンクリート、鋼塊等）を載荷することがある。その大きさは設計最小反力時に負反力が生じない量で、南備讃瀬戸大橋では 725t を見込んだ。

③自動車荷重（LH）による反力（R_{LH}）

吊橋の反力影響線に載荷する方法で求める。

設計最大値としてLHmax、設計最小値としてLHmin、自動車が連続走行している状態（通常走行状態）としてLH＊／２　の３ケースについて、計算結果を表２．８に示す。

表２．８　自動車荷重による反力（R_{LH}）　(t)

荷重ケース	自動車荷重反力R_{LH}	備　　考
ＬＨmax	R_{LHMax} = 734	ＬＨmax:反力影響線(+)部載荷
ＬＨmin	R_{LHmin} =-471	ＬＨmin:反力影響線(-)部載荷
ＬＨ＊／２	$R_{LH*/2}$ =101	ＬＨ＊／２：反力影響線にＬＨ／２を全載

④鉄道荷重（ＬＲ）による反力（R_{LR}）

③と同様、吊橋の反力影響線に載荷する方法で求める。

載荷繰返し回数としては少ないが、設計最大荷重強度としてLR（単線載荷）および2LR（複線載荷）を、載荷繰返し回数が多いが荷重強度としては小さいLR´の計３ケースについて、計算結果を表２．９に示す。なお、各値には衝撃を含んでいる。

表２．９　鉄道荷重による反力（R_{LH}）　(t)

荷重ケース	鉄道荷重反力		備　　考
	R_{LRRmax}	R_{LRMIN}	
２ＬＲ(3.8t/m)	R_{2LRmax} =1,574	R_{2LRmin} =-759	R_{LRmax}:反力影響線(+)部載荷
ＬＲ(3.8t/m)	R_{LRmax} = 787	R_{LRmin} =-380	R_{LRmin}:反力影響線(-)部載荷
ＬＲ´(2.7t/m)	$R_{LR'max}$ = 559	$R_{LR'min}$ =-270	載荷長１=370m

⑤温度変化による反力（R_T）

設計荷重としては±30℃を考慮するが、これは瀬戸内海地方で年間最大値（標準温度20℃、-10～+50℃）であり、生じやすい温度変化として±20℃（0～+40℃）の２ケースを求める。表２．10に計算結果を示す。

表２．10　温度変化による反力（R_T）　(t)

温度ケース	R_{Tmax}	R_{Tmin}
Ｔ＝±３０℃	R_{T30max} =333	$R_{T-30min}$ =-341
Ｔ＝±２０℃	R_{T20max} =222	$R_{T-20min}$ =-227

⑥軸受（ピン・ブシュ）検討用反力の計算

前項①～⑤に示した各反力は、さらにそれらの組合せにより載荷されるものである。

その組合せは無限にあるが、工学的な判断を加え下記の３ケースを設定した。

Case１は、設計最大反力時で各荷重の最大値を組み合わせたものである。

Case２は、生起する可能性の高い反力を安全側に設定した場合で、鉄道荷重は最大、自動車および温度は日常発生しやすい大きさとする。

Case３は、さらに鉄道荷重も常時生起する荷重とした場合である。

以上３ケースの算出方法を以下に示す。

「Case１設計最大反力」

耐用年数100年間のうちで極まれにしか発生しない、設計上の最大反力の組合せとして各正反力を加算する。

$\Sigma+R_{max1}=R_{D1d}+R_{D2d}+R_{LHmax}+R_{2LRmax}+R_{T30}$

$=128 \quad +742 \quad +734 \quad +1,574 \quad +333 \quad =3,511\ t$

これにカウンターウエイト（CW）を加算する。

$\Sigma+R_{max2}=3,511+725=4,236\ t$

上記と同様に負反力について計算する。

$\Sigma-R_{max1}=R_{D1di}+R_{D2di}+R_{LHmin}+R_{2LRmin}+R_{T-30}$

$= 64 \quad +475 \quad -471 \quad - 759 \quad -341 \quad =-1,032t$

$\Sigma-R_{max2}=-1,032+725=-307\ t$

すなわち、最大反力4,236tで、鉄道荷重により1、574+759=2,333t、さらに温度により333+341=674t変動する。ただし、このケースの反力による繰返し数は極めて少ない。

「Case２生起する可能性の高い反力を安全側に見積もった場合」

鉄道荷重は比較的設計に近い荷重が載荷されるので設計荷重とするが、自動車等の荷重は常時起きやすい荷重とする。

$\Sigma+R_{med1}=R_{D1d}+R_{D2d}+R_{LH*/2}+R_{2LRmax}+R_{T20}$

$= 128 \ + 742 \ + 101 \ + 1,574 \ + 222 \ =2,767\ t$

$\Sigma+R_{med2}=2,767+725=3,492\ t$

$\Sigma-R_{med1}=R_{D1di}+R_{D2di}+R_{LHmin}+R_{2LRmin}+R_{T-20}$

$= 64 \ +475 \ - 0 \ - 759 \ -227 \ =-447t$

$\Sigma-R_{med2}=-447+725=278\ t$

すなわち、最大反力3,492tで、鉄道荷重により1,574+759=2,333tの反力変動で9.04×10^5回繰返し、さらに温度により222+227=449t変動する。

「Case３常時生起すると考えるのがよい場合」

鉄道荷重は常時作用する値として2.7t/m単線載荷とする。死荷重反力は安全側に考えて、正反力では設計値を、負反力では割引した値を用いる。

$\Sigma+R_{ord1}=R_{D1d}+R_{D2d}+R_{LH*/2}+R_{LR'max}+R_{T20}$

$= 128 \ + 742 \ + 101 \ + 559 \ + 222 \ =1,752\ t$

$\Sigma+R_{ord2}=1,752+725=2,477\ t$

$\Sigma-R_{ord1}=R_{D1di}+R_{D2di}+R_{LHmin}+R_{LR'min}+R_{T-20}$

$= 64 \ +475 \ - 0 \ -270 \ -227 \ = 42\ t$

$\Sigma-R_{med2}= 42+725=767\ t$

すなわち、最大反力2,477tで、鉄道荷重により559+270=829 tの反力変動で7.62×10^6回変動し、さらに温度により222+227=449t変動する。

図２．２の上段の図に、温度変化、鉄道荷重による中間支点(タワーリンク位置)反力の変化状況を示す。

ここに、死荷重反力は、R_d＝128+742+725＝1595≒1600ｔであり、この基準温度20℃の死荷重状態を基準に表示した。

この他、鉄道荷重は、　L_R＝3.8/2x1.1＝2.09t/m/ｹｰﾌﾞﾙ、載荷長370mである。

自動車荷重は、$L_{H*/2}$＝0.885t/m/ｹｰﾌﾞﾙ、載荷長は全長載荷である。

温度変化は、０、±３０degree（－１０、２０，５０℃）である。

図２．２の下段の図に、ピン・ブシュ軸受機構によるリンク支承構造を前提とした場合の、通過列車速度をｖ＝100km/h＝27.8m/sとした時の列車進入後のリンク移動量(ピン外径面におけるすべり摩擦振幅)、および回転速度(ピン外径面におけるすべり摩擦速度)を示し

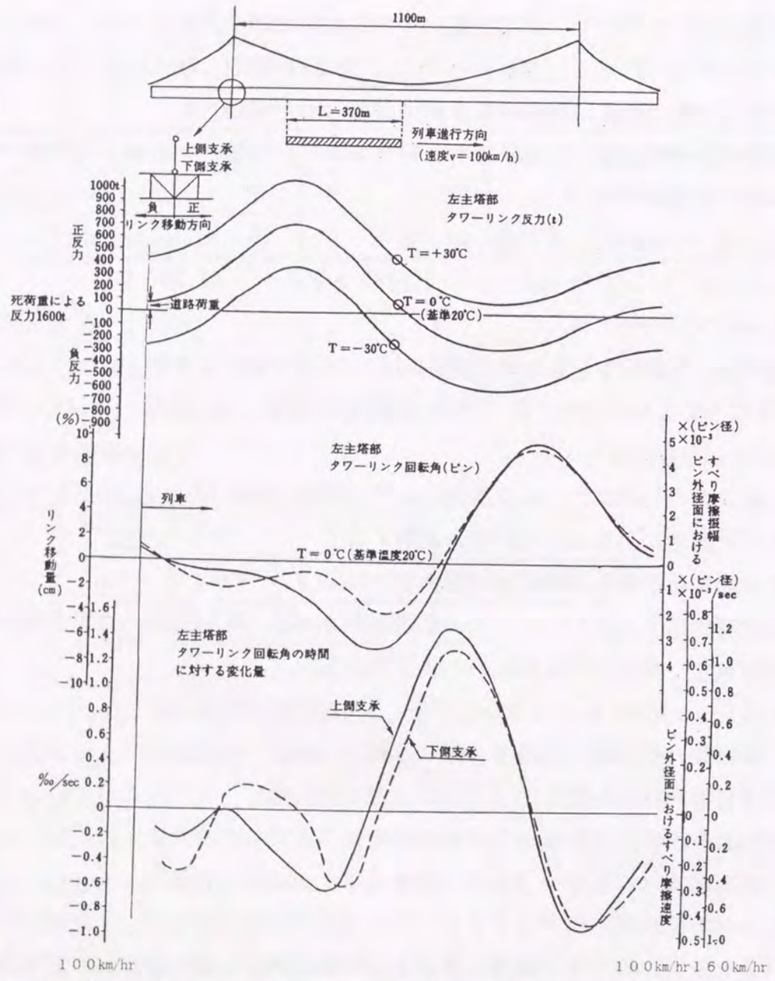


図２．２　リンクピン部の設計反力、回転振幅および回転速度[2]

た。次項で詳細に説明する。

図２．２によると、荷重の影響が大きいのは温度および鉄道荷重であり、最大の影響は列車が中央径間の概ね1/4点に達したときに発生することが分かる。

３）　吊橋補剛桁鉛直支承における揺動運動

吊橋の補剛桁は、載荷荷重、温度伸縮等により、主として橋軸方向に前後進する。

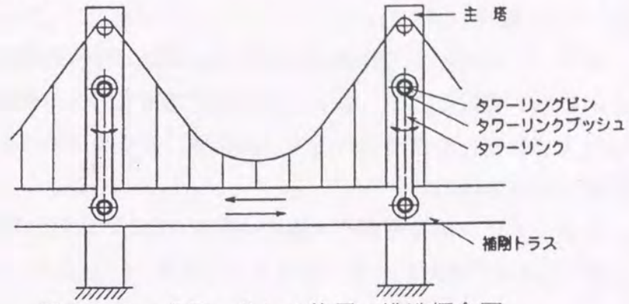


図２．３　タワーリンク位置・構造概念図

図２．３に示すように、補剛桁は、ハンガーで吊られた状態で「行きつ戻りつ」の周期的な移動が発生する。これはあたかも遊園地に見られる遊動円木のような挙動として現れる。そのため、補剛桁の鉛直支承の可動部においては、往復繰返し運動が発生する。

この往復運動により、支承構造がピン機構を有する場合には、ピン部で図２．４に示すような揺動運動を受けることになる。この揺動運動により吊橋鉛直支承におけるベアリング部では、往復すべり(すべり回転)を受ける。この点が支承設計におけるトライボロジー面で留意すべき特徴である。

吊橋の鉛直支承・タワーリンクは、トライボロジー面からいえば、ピン・ブシュの相対する接触面を有するベアリングにおいて、大反力下、高面圧・低速揺動を受ける円筒接触型無給油軸受である。ここで、揺動運動する軸受は摩擦方向が反転し、繰返しすべり摩擦を受ける。一般の機械の回転軸受は、高速・長時間回転運動を伝達する等過酷な条件ではあるが、タワーリンクは耐用年数、運動性状、負荷の変動性、回転速度等で異なる性状を示す。定性的であるが、以下に対比して示す。

＜タワーリンク＞		＜ 一般機械の回転軸受＞
①無給油乾燥摩耗方式の軸受とし、交換なしで100年間(耐用年数) とする。この間、境界潤滑となる恐れがある。	⟺	①流体(潤滑油)潤滑であり、軸受交換可能。耐用年数は十数年のことが多い。
②頻度、強度とも幅広く変動する繰返し交通荷重(負反力含む)が載荷される。	⟺	②一方向すべり(回転運動)で大きな荷重変動はない。
③不特定・過大負荷も予想される。風・地震等自然荷重で制御不可能。	⟺	③設計通りの負荷で変動は少ない。過大荷重は制御可能。
④移動量(すべり振幅)、移動速度(揺動速度)は幅広く変動する。	⟺	④回転量、回転速度とも一定のことがほとんどである。

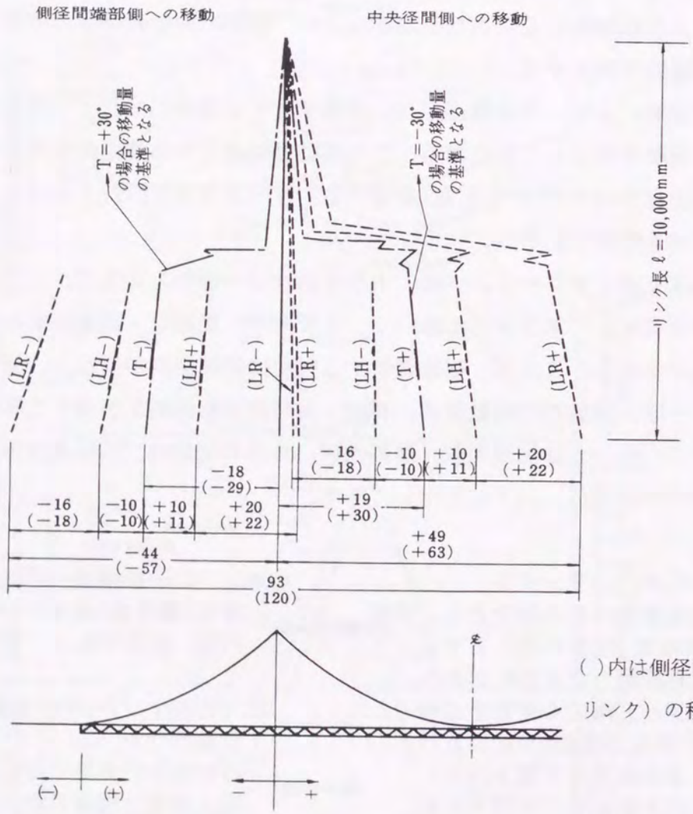
ここで整理した内容は、以後の検討に反映させているが、実機の設計・施工・維持管理において必ず念頭において対応すべき軸受部の特性である。

4） リンク支承構造設計変位(南備讃瀬戸大橋)

① ピン回転角（θ）

タワーリンクピンの鉛直面内回転は、補剛トラス支点部のたわみ角によるものと、橋軸方向の水平変位によるものとの合成作用で発生する。補剛桁の水平変位は、年間の温度変化および日変化を常時受ける中、活荷重により間欠的に変動する。さらに風、地震による影響が加算される。

図２．４に、南備讃瀬戸大橋の中間支点(タワーリンク位置)および端支点(エンドリンク位置)における補剛桁の最大水平変位を示す。



（ ）内は側径間端部（エンドリンク）の移動量を示す。

単位：ｃｍ

図２．４　南備讃瀬戸大橋補剛トラス支点部の水平変位[2]

ここで、ピン回転角は、次式（１）で計算できる。

$$Q=\Delta\delta/L \quad \cdots\cdots\cdots\

a．鉄道荷重による摩擦距離（ι_R）

単線載荷WR＝3.8t/mの場合　$\iota_R=7.62\times10^6\times17\times10^{-3}\times0.675\times2$

$=168\text{x}10^3\text{m}=168\text{km}$

単線載荷WR＝2.7t/mの場合　$\iota_R=7.62\times10^6\times12\times10^{-3}\times0.675\times2$

$=119\text{x}10^3\text{m}=119\text{km}$

複線載荷WR＝3.8t/mの場合　$\iota_R=9\times10^5\times17\times10^{-3}\times0.675\times2$

$=39.8\text{x}10^3\text{m}=40\text{km}$

複線載荷WR＝2.7t/mの場合　$\iota_R=9\times10^5\times12\times10^{-3}\times0.675\times2$

$=28.1\text{x}10^3\text{m}=28\text{km}$

b．自動車荷重による摩擦距離（ι_H）

$\iota_H=7.3\times10^4\times0.6\times10^{-3}\times0.675\times2+1.1\times10^5\times0.1\times10^{-3}\times0.675\times2$

$=57+143=200\text{m}$

c．温度による摩擦距離（ι_T）

日変化分　$\iota_T=2\times10^4\times6\times10^{-3}\times0.675\times2=16\text{m}$

年変化分　$\iota_T=100\times37\times10^{-3}\times0.675\times2=5\text{m}$

d．風による摩擦距離（ι_W）

$\iota_W=1.8\times10^5\times11\times10^{-3}\times0.675\times2=1.34\times10^3\text{m}=1.3\text{km}$

以上を整理すると、累積すべり距離への影響度は以下のとおりである。（　）内は、南備讃瀬戸大橋の場合を示す。

道路鉄道併用橋の場合：①鉄道荷重によるもの(208km)、②風(1.3km)、③自動車荷重(0.2km)、④温度(0.02km)。　$\Sigma\iota=209.52\text{km}$

道路単独橋の場合：①風、②自動車荷重、③温度　$\Sigma\iota=1.52\text{km}$

これは、道路単独橋の場合はすべり距離の影響は考慮する必要がないことを示している。

［考　察］　以上に示したとおり、摩擦(すべり)距離に支配的であるのは、a．の鉄道荷重によるものである。よって、道路鉄道併用橋においては、摩擦現象(すべり挙動)を検討する場合は、温度変化によるすべり位置の変動を考慮した鉄道荷重の影響のみを考慮すればよいことになる。一方、道路単独橋においては、再考を要する課題である。

③ピン・ブシュ間の摩擦(すべり)速度（ν）

図2．2によれば、列車速度V＝100km/hの場合

最大回転角変化　$\theta_{Rmax}=1.48\ {}^0/_{00}/\text{s}$

このときのピン・ブシュ間の摩擦(すべり)速度は

最大摩擦(すべり)速度　$\nu_{Rmax}=1.48\text{x}10^{-3}\times675=1.0\ \text{mm/s}$

1列車が吊橋上を通過する間の回転角変化の速さの平均は

平均回転角変化　$\theta_{Rmen}=0.55\ {}^0/_{00}/\text{s}$

平均すべり速度　$\nu_{Rmen}=0.55\text{x}10^{-3}\times675=0.4\ \text{mm/s}$

回転角変化速度が　0から最大値となり、再び　0になるまでの間の平均値は

最大平均回転角変化　$\theta_{Rmaxmen}=0.92\ {}^0/_{00}/\text{s}$

最大平均摩擦速度　$\nu_{Rmaxmen}=0.92\times10^{-3}\times675=0.6\ \text{mm/s}$

上記の結果は、列車荷重強度を一定とすれば、列車速度に比例する。表2．11に列車速度VRによる摩擦速度を示す。

表2．11　ピン・ブシュ間の摩擦速度(mm/s)　　単線3.8t/mx370m

列車速度 VR(km/h)	最大すべり速度 ν_{Rmax}	最大平均摩擦速度 $\nu_{Rmaxmen}$	平均すべり速度 ν_{Rmen}	備　考
160	1.6	1.0	0.6	列車速度比1.6
100	1.0	0.6	0.4	〃　1.0
70	0.7	0.4	0.3	〃　0.7

（4）　吊橋補剛桁鉛直支承に要求される品質とその確認方法

吊橋補剛桁の鉛直支承は、大反力・低速揺動運動を受ける支承であり、要求される品質には、(2)の荷重条件に対応した(3)に示す耐荷重性および変位吸収性の他に多くの要求事項がある。

具体的には、耐食性、交換性、維持補修性および経済性(市場性)等比較検討すべき項目がある。1）で支承が置かれる環境条件について明らかにし、2）要求事項の解決方法について示す。

これらの項目は、支承形式がローラーあるいはリンク形式を問わず、軸受の検討項目としては共通である。なお、リンク形式に類似のペンデル支承があるが、リンク支承が主に引張力を受ける構造であるのに対し、ペンデル支承は圧縮力を受ける構造として用いられる違いがあるのみで、力学的にもトライボロジー的にも全く同一して良いと考えられる。

1）環境条件

リンク支承が設置される環境は、以下に示すように厳しいものがあり、部材設計時に十分、配慮しておかなければならない。

① 瀬戸内海海上60～90m付近に設置されるため、海塩粒子の付着の可能性があり、鉄鋼構造物として十分な耐食性が要求される。

② 既往資料によれば、瀬戸内海地方における気温は-10～40℃の範囲を見込む必要がある。すなわち、この温度範囲において材料の脆化並びに異常なトライボロジー挙動があってはならない。

③ 架橋周辺沿岸部には大規模工場地帯が存在するが、排出される化学物質に対し、長期

的に安定な材料の組合せでなければならない。

2）要求品質と確認方法

① 吊橋補剛桁鉛直支承の要求品質：

不測の事態に備えて交換できるように対処しておくが、実質的には不可能として基本的には橋体（補剛桁、塔）と同じ寿命を有することが必要条件である。

耐 荷 力　　→構造設計、実験確認
摩擦係数（軸受部）→構造設計、実験確認
摩耗量（軸受部）　→実験確認（実験値から実機における摩耗寸法の推定）
面　　圧　　→与条件として実験確認
すべり距離　　→与条件として実験確認
防錆、化学的安定性→文献等机上検討
交 換 性　　→橋体との取り合いを考慮した構造設計
（反力受け補強、作業空間の確保）

ここに、化学的安定性とは、紫外線、オゾン、工場・自動車排気ガスーCOX,SOX、海塩粒子等に対し、寿命期間中に変質がないことをいう。

② 支承の機能：

鉛直面内の回転および移動の安定性→実験確認

特に実験時はStick slipや微動摩耗の原因となるような振動が発生しないことを確認する。

変位追随性、変形(曲げ、ねじり)追随性→構造設計

③ 支承の摺動方式：

すべり、回転、揺動、転動→実験確認

2．3．3 吊橋補剛桁鉛直支承における軸受方式の検討

吊橋補剛桁の鉛直支承の形式選定には、支承可動部分の軸受方式と、構造部材としての支承形式との二つの面からの検討が必要となる。ここでは、まず、軸受方式の選定について述べる。

(1) 鉛直支承における支承形式の検討

吊橋補剛桁の鉛直支承としては、揺動運動を吸収するためには、図2．5に示すようにリンク形式とローラー形式が考えられる。

一般橋梁であれば、ローラー支承が第一候補に挙がるところであるが、挙動を定性的に

比較した表2．12に示すように移動・回転に対しては差がないが、ねじりの吸収性、負反力抵抗性からリンク（ピン・アイバー）方式が優位である。

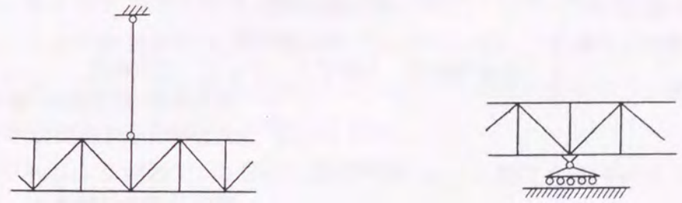
負反力対策の実例としては、ローラー方式に対し図2．6の方法があるが、反力の規模が大きくなると不経済となる。リンク形式でも負反力を受けることは可能である。

以上から吊橋補剛桁の鉛直支承には、円柱ピンと円筒軸受部材すなわちピン・ブシュで軸受が構成されるリンク支承構造を提案する。

ここで、リンク方式には球面軸受方式も考えられるが、(3)に示すように、トライボロジー特性を示すデータの不足と経済性から詳細検討から除外した。

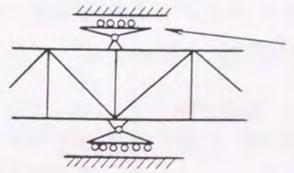
表2．12 支承形式の比較検討

	移 動	鉛直面内回転	水平面内回転	反力抵抗性
ローラー	方向のみ	1面内	不可	正反力のみ可
リンク（ピン・アイバー）	方向のみ	1面内	可（リンクのねじりで吸収）	多少の負反力可

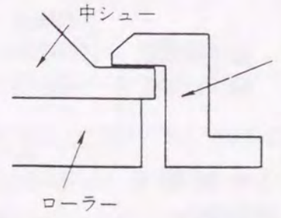


（a）リンク形式　　（b）ローラー形式

図2．5 支 承 形 式



（a）ローラーを使用した場合



（b）浮上り止めを使用した場合

図2．6 負反力対策

（2） すべり軸受と転がり軸受の比較検討

タワーリンク用ピン構造の条件に適合する軸受機構を検討する。

軸受を機構面から検討すると、表２．13に示すように①すべり軸受、と②転がり軸受に大別できる。

この２種類の軸受機構をタワーリンク支承構造の条件に対し比較検討すると、表２．14のようになり、大型部材に対してはすべり軸受の方が適していることが分かる。

表２．13 軸 受 の 分 類[2]

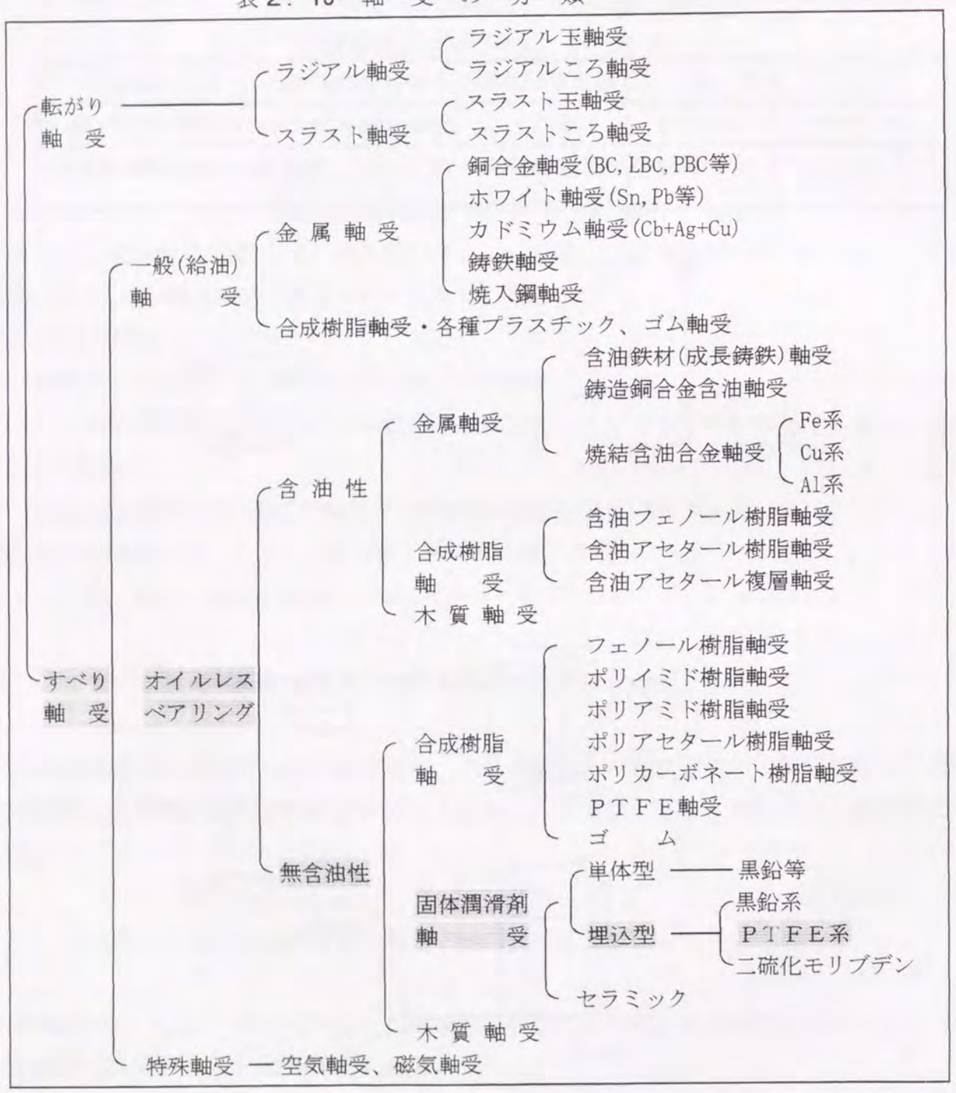


表２．14 すべり軸受と転がり軸受 の比較

	すべり軸受	転がり軸受
占有スペース	小	大
摩擦係数	０．１前後	０．０１前後
微動摩耗	減少させることが可能。	問題あり。
疲労	ほとんど問題ない。	
腐食	条件が厳しいとき、グリース等による保護を要す。	
異物の侵入	多少の侵入は許容できる。	致命的損傷となり易い。
Stick Slip現象発生の可能性	支持部材の剛性が低いと問題。潤滑切れが起きると問題。	転動方向と転がり荷重作用方向が異なると問題。
精度確保	普通の工作機械にて可。場合によっては相手寸法に合せ調整可能。	ピン径、取付け孔径にも高級なハメアイが要求される。
取替性	困難だが場合により可能。	非常に困難。

次に長期間供用を目指す橋梁支承用には、潤滑剤の補充・交換は無い方がよい。支承規模の大きさから、大量の潤滑油の封入にあっては供用中の漏れ、交換時の汚染に対し水密性が確保できること、同時に防火性など検討・対策すべき事項が多くなる。瀬戸大橋の場合、橋桁が二層構造のため条件はさらに厳しくなる。

以上から、タワーリンク用軸受は、無給油（オイルレス）軸受を基本とする。

さらに極力、橋の寿命期間中に支承部品を交換することなく使用したいため、摩耗率が低く、大型軸受に適用可能な無含油性とし、一般の橋梁支承に実績が多い支承板支承、すなわち、固体潤滑剤をベースメタルに埋め込んだものを軸受機構に選定した。リンク本体および支持部材の設計断面力に影響するため、発生する摩擦力を極力小さく抑える目的から、使用する固体潤滑剤には、低摩擦係数が得られるＰＴＦＥ系を選定した。

以上をまとめると、タワーリンク軸受機構の選定順序は、表２．13の網掛けで示したとおりである。

すなわち、無含油性オイルレスベアリングのすべり軸受とし、固体潤滑剤(PTFE)埋込型を採用する。

（3） 円筒軸受と球面軸受の比較検討

三次元的な回転を受けるベアリング継手には、球面軸受（Spherical bearing.一般にはUniversal jointと称されることが多い）が適用されることがある。

1,000m級吊橋である瀬戸大橋においては、連続補剛トラスを補剛桁に採用しているために、活荷重、風荷重あるいは温度荷重により、各支点部においては大きな回転量（鉛直軸

回り、橋軸方向水平軸回り、橋軸直角方向水平軸回り）が発生しており、２次応力発生の主たる要因となっている。

また、橋桁構造ならびにそれを支持する支承構造は、製作・架設誤差を有しており、架設時にはこれを吸収する方策が講じられる事が多いが、適切に処置されていないとこれも２次応力として加算されることになる。

これら２次応力を軽減あるいは、回避する方策として、

① 個々の部材に発生する製作・架設誤差を限りなく小さくする、

② それらの累積誤差発生を緩和する、

等の対策が講じられている。

方策①は、大型部材に適用するには経済性が課題となる。②の方策には、製作・架設(また、それらを構成する細部の工程を含む)の各段階に発生した誤差を次段階までに吸収あるいは低減する方法である。

橋桁の鉛直支承においては、実績が多く施工しやすい方法として、②の方策を採用することが多い。具体例としては、全方向自由な回転を許す球面継手構造がある。

しかし、瀬戸大橋のような大反力作用下で常時運動する鉛直支承であるタワーリンクの軸受機構には、次に示す判断から、球面軸受は別途検討を要する構造として対象外とした。

a) 同一荷重に対し、円筒接触より球面接触の方が最大面圧が大きくなるため、一般的には摩擦抵抗が大きくなる。これは、Herz接触で言えば前者が線接触、後者が点接触であるためである。(実体は、弾性変形、摩耗によるなじみが発生し、反力集中は緩和されるが)。

b) 潤滑剤が常時、十分供給されていれば問題ないが、高面圧下では早期に境界潤滑となり、潤滑切れとなる可能性がある。そうなれば、摩擦係数が大きくなるばかりでなく、４．５節で説明するStick slip現象の発生原因を誘発することにもなる。

c) 設計活荷重（自動車・鉄道活荷重、風荷重）載荷や温度伸縮に起因した移動、回転による変位振幅が広い範囲で発生する場合は、ベアリング設計が非常に難しくなる。
具体的には、固体潤滑剤埋込方式では、広範囲の移動・回転に対応する埋込間隔の確保、すなわちデッドゾーンを回避する配置設計は、製作性、経済性から困難な課題となる。
また、デッドゾーンの許容値を実験的に求めようとするには、トライボロジーに及ぼす各主要因を整理し、広範囲な項目に条件を広げて確認実験を行う必要がある。

d) この軸受を揺動運動を受けるリンクの上下可動部(軸受部)に使用する場合、球面であるため各々に必ず摩耗粉が排出されにくい凹部ができる。この結果、高硬度の摩耗粉が接触面の摩耗を促進し、面を荒らすことにより摩擦係数も高くなる傾向が考えられる。

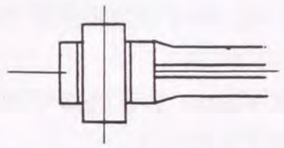
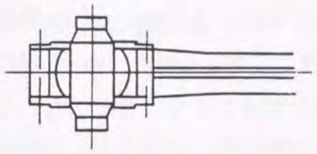
以上から、現時点においては、広範囲な変位振幅に対応させる目的で球面軸受をリンク支承に適用することは、極力、採用を控えるべきであり、三次元的変形に対しては部材のたわみやねじれにより吸収する事を考えた方が合理的な設計が可能と考えられる。しかし

ながら、十分な剛性および潤滑剤の供給が図られる場合には、２次応力低減効果が大きく、特に、製作時の誤差吸収、架設時の芯合わせには有効であるため、今後の研究に期待したい構造である。

表２．15に、瀬戸大橋のリンク支承構造に対するピン軸受と球面軸受の構造特性比較検討結果を示す。

以上の検討結果から、円筒ブシュと円柱ピンを用いた円筒接触方式である円筒軸受を採用することとした。

表２．15 円筒軸受（円筒接触）と球面軸受（球面接触）の構造特性比較

項　目	円筒軸受（円筒接触）	球面軸受（球面接触）
構　造	・簡単である。 	・やや複雑である。 
機　能	・ねじれをリンク軸部の弾性変形で吸収する。	・塔側および桁側の製作誤差、芯狂いを架設時に吸収できる。 ・２次応力を吸収しやすい。
強　度	・単純な構造のため、弾性理論で強度設計が可能である。	・ピン継手に比し、構造は複雑であるが重量的にもほぼ同程度の設計が可能である。 ・この種のデータは殆ど無く、模型実験により強度およびトライボロジー面からの確認が必要である。
潤　滑 設　計	・既往設計の範囲で潤滑剤の寸法、配置設計が可能である。	・球面方向の配置設計が困難になる（配置ピッチを密にする、そのためは潤滑剤寸法を小さくする必要がある。余り小さくすると耐久性の不安がある）。
製　作 組　立	・工数　　小	・工数　　大
経済性	・ベアリング部は経験の延長上にある。 ・リンク軸部ならびにリンクシステムの支持部材は割高となる。 ・システム全体では経済的。	・ベアリング部が非常に高価になる ・リンク軸部ならびにリンクシステムの支持部材は経済的になる。 ・システム全体では割高となる可能性がある。
保　守 点　検	・作用反力が大きく、狭隘場所となるため、架設位置、自重を考慮した保守点検設備・ジグが必要。	左　　同

2．4　実機タワーリンク設計・施工上の課題

吊橋の実機タワーリンクシステム（リンク支承構造）が設計・施工上から要求されている所要性能は、2．3節に述べた外力・環境条件の他、構造設計面で配慮すべき内容を以下に考察する。

① 半永久的寿命が保証されること。

リンク支承は、塔と補剛桁あるいは補剛桁と下部構造とを結ぶ接点に設けられる構造部材である。よって橋梁全体に対する経済性の確保から、設置空間は限定され、狭隘部に設置される大型部材となることが多い。

その結果、狭隘部で大反力を受けながら常時変位している軸受部材の供用後の交換は非常に困難なものになると予想される。

これに対処するためには、長期間(少なくとも設計耐用年数ー本四橋では100年間ー以上)に渡り安定した材料であり、摩擦・摩耗挙動が安定していること、すなわち、材料に化学変化が起きないことはもちろんのこと、低摩擦性、低騒音、滑らかなすべり、定常摩耗で摩耗量が少ないことが保証されなければならない。

② 点検し易い構造であること。

設置後の軸受部の保守点検は、橋の公共交通の使命から、自動車・鉄道交通を規制することなく実施できる外からの目視観察が主体となる。よって、点検しやすい構造体であり、保守点検が出来る空間が確保されていることが必要条件である。

③ 負反力にも対処できること。

吊橋は撓みやすい構造形式であり、かつ、リンク部では活荷重が占める割合が必ずしも小さくなく十分な負反力対策が必要である。

アイバーに類似したリンク部材は、通常、引張力に対して設計されるが、負反力の作用により、圧縮力にも耐える部材応力設計が必要である。さらに正反力から負反力に移行する場合、反力抜けが発生することになる。この時、ベアリング部では、がたつきが発生し、良好なあたりが形成出来ていた接触部が変動する。これらにより定常摩耗から異常摩耗に至ったり、Stick slipの発生による振動あるいは騒音発生を誘起してはならない。要するに正負の反力(荷重)に対し照査が必要であり、かつリンク部材の必要剛性について慎重に検討すべきである。

④ 設置工事は海上工事となるため、適切な部材重量であること。

リンク支承架設工程の前後に使用される塔あるいは桁架設ｸﾚｰﾝで据え付け可能な単品重量およびセット重量でなければならない。

これは経済性の確保、並びに供用中の部材交換性(搬出入を含む)からもクレーン能力は小規模ほど作業性がよいと推定されるためである。

併用吊橋では、リンク支承部材重量は100～120tfであり、支承部品重量はこの範囲に抑えるのがよい。設計反力4,000tf級では、現設計方針では概ね１組の重量が約100tf、１本のピン重量が約20tf、リンク軸部が約60tfである。

⑤ タワーリンクより塔あるいは桁側へ過大な２次応力が付加されないこと。

リンク部材のねじり剛性が高いと、僅かな変位に対し大きな応力が発生することになること、また、リンクの回転運動によりピン取付位置が上下することになるため、このリフト量によりタワーリンクを支持する部材に与える応力的あるいは変位的影響が小さいことが必要である。

ただし、常時すべり振幅がdead zone より小さいとStick slip 発生の危険性がある。

この場合は、すべり方向の剛性確保が最良の対策となるため(4．5節参照)、慎重な対応が必要である。要するにStick slip対策として、すべり方向とその直角方向とで剛性の考え方を分けることも必要である。さらに、設計にあたっては、リンク本体のねじり剛性の影響、各種荷重による影響等を考慮しておかなければならない。

2．5　リンク支承構造(タワーリンク)の提案

これまでに検討してきたように、長大吊橋の補剛桁の鉛直支承は、大反力(高面圧)・低速揺動を受ける軸受部材であり、かつ３次元的変形を受ける構造部材である。トライボロジー面での詳細な検討を行う前提(第３章以降で取り扱う)で、この鉛直支承には、円柱ピンと固体潤滑剤埋込型円筒ブシュの軸受機構を有するリンク支承構造が適切なものとして提案する。

本論文において提案するリンク支承構造(タワーリンク)について、その定義を明らかにしておく。

リンク支承構造とは

支承の両端をピンで受け、上下のブシュ付きボスをリンク部材で結び、ハウジング構造により塔と補剛桁等に取り付けるもの。特に塔部鉛直支承についてはタワーリンク、桁端部鉛直支承についてエンドリンクと称する。　図2．7参照。

ただし、この支承の軸受機構は、円柱ピンと固体潤滑剤(PTFE)埋込型円筒ブシュの円筒接触とする。

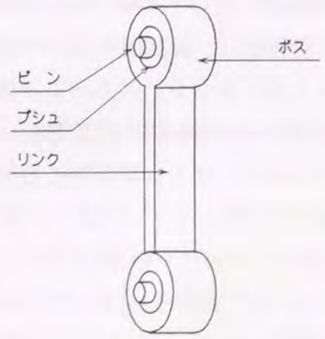


図2．7　リンク支承の構造

本システムの要点を以下に述べる。

① リンク本体は軸部とボス部から構成される。

ボス部には軸受機構として、維持管理性・消防防災上から無給油潤滑機構（乾燥摩耗方式）を採用し、固体潤滑剤埋込型ブシュが嵌合される機構とする。このブシュは、高面圧・低速揺動運動を受ける円柱ピンと円筒ブシュで構成される円筒接触機構の軸受である。

ここに、維持管理性とは、点検し易い構造であり、維持管理を合理的にするために省力化、省エネルギー化を指向することをいう。また、消防防災面では、橋面からの火気、周辺の山火事等による引火がない、すなわち極力油脂類がないもの、また、油脂の散逸により周辺環境の汚染、走行車両、鉄道への飛散の心配がないものとする。

② 塔あるいは桁へのタワーリンクからの荷重伝達は、ブシュを貫通するピン(円筒軸受)を介する。このピンは塔あるいは桁からブラケットにより固定される。図２．８参照。

③ このピンは回転させないで、桁はタワーリンクを介して遊動円木のような揺動運動をする。このため、ピン・ブシュ部ではすべり摩擦が発生する。

塔ﾌﾞﾗｹｯﾄ ←ピン←ブシュ←リンク本体←ブシュ←ピン← 桁ﾌﾞﾗｹｯﾄ

タ ワ ー リ ン ク シ ス テ ム

図２．８ タワーリンクシステムの荷重伝達機構 （←印は荷重方向）

＊ピンの回転防止方法の提案

封入した潤滑剤の摩擦面への安定供給を図るためには、ブシュ側が回転する機構であるため、ピン側に回転止めを施さないと揺動摩擦力によりブシュの回転と共にピンも回転し、摩擦係数が高くなっている金属接触部が常に潤滑剤の供給がないままとなり、初期摩耗状態が継続され、安定したすべり接触が得られないこととなる。

いうまでもなく、この結果は摩擦力の増大、摩耗量の増大となり、支持する部材（リンク本体、補剛桁部材）に設計以上のひずみ・応力が伝達されることになる。

以上から、ブシュ側がその取付上回転側になるため、ピン側に回転止めを設けることを提案する。

２．６ ま と め

吊橋補剛桁の鉛直支承には、その挙動(支承としての移動、回転、すべり)、耐久性等を検討した結果、大きな正負の反力に対処できるリンク支承構造のタワーリンク方式を提案する。以下に提案に至るまでの検討結果を整理する。

まず、鉛直支承(タワーリンク)が設置される環境は次のとおりである。

＜タワーリンクの設置環境＞

- 海上橋梁の部材として厳しい腐食環境に置かれ、交換なしで100年間(耐用年数) 供用される。
- 頻度、強度とも幅広く変動する繰返し交通荷重(負反力を含む)が載荷される。
- 橋の面外方向荷重(風、地震)により支承に面外方向力が作用し、リンク部材は３次元応力場に置かれる。風・地震等自然荷重は制御不可能であり、不特定・過大負荷も予想される。
- 移動量(すべり振幅)、移動速度(揺動速度)は幅広く変動する。

タワーリンクは、一般の機械等の軸受とは異なり、次に示す特徴あるいは課題を有する。

＜タワーリンクの特性＞

- リンク部材により、負反力にも対処できる。すなわち、ＩあるいはH断面で設計可能である。
- ＩあるいはH断面のリンク部材の弾性(曲げ・ねじり剛性)により、３次元的断面力・変位に対応できる。
- タワーリンクは、トライボロジー面からいえば、高面圧・低速揺動を受ける円筒接触型無給油軸受である。揺動運動する軸受は摩擦方向が反転し、繰返しすべり摩擦を受ける。
- 電気的、化学的に安定なPTFEを潤滑剤に使用することにより、摩擦・摩耗・潤滑といういわゆるトライボロジー問題に対処可能である。

  すなわち、４ふっ化エチレン樹脂PTFEを固体潤滑剤として軸受ブシュに埋め込むことにより、自己潤滑型円筒接触(円柱ピンと円筒ブシュの組合せ)軸受が構成できる。
- この軸受機構を採用することにより、長期間安定したすべり(揺動)を確保できる。しかしながら、供用中、揺動振幅が変動するため、境界潤滑となる恐れがあり、適切な潤滑剤の配置設計が必要である。

以上、既往文献、机上検討の結果、道路鉄道併用橋の補剛桁鉛直支承には、以下に示すように、タワーリンクシステムを採用できることを明らかにした。

① ピン・アイバー型リンク形式、すなわち、「リンク形式の部材両端に円柱ピンと円筒ブシュの円筒軸受機構を配置し、これを支持部材により補剛桁、塔あるいは下部構造塔の間に取り付ける」構造形式のものを選定する。

② この円筒軸受には自己潤滑型(無給油潤滑機構)の乾燥摩擦方式を採用する。すなわち固体潤滑剤埋込型ブシュをボス部にはめ込んだ軸受を両端に配置したリンク部材で構成される『リンク支承構造』を吊橋の鉛直支承に採用することとする。

③ この円筒軸受方式が成立する各種条件については、特にトライボロジー面に関しては実機に近い寸法による模型実験的裏付けが必要であり、次章で詳細に検討する。

実験確認を要する主たる項目は、摩擦係数は0.15以内、摩耗量の予測(ピン・ブシュの肉厚変化)および潤滑の長期安定性である。

④ なお、球面軸受は、円筒軸受より３次元的変位に対し対応しやすいが、現時点ではトライボロジー特性を明らかにするデータに乏しく、かつ、大反力下においては経済的に不利である。よって吊橋鉛直支承のリンク支承構造の軸受構造には適用外とする。

第３章　タワーリンクシステム確立のための実験的検討

３．１　は　じ　め　に

タワーリンクシステムを確立するためには、軸受部のトライボロジー特性(摩擦・摩耗・潤滑)を明確にしなければならない。

本章では、タワーリンクピン・ブシュ円筒軸受部におけるトライボロジー面の要求性能および設計条件を整理し、第２章において整理した力学的設計条件を基に模型実験によりトライボロジー特性を明らかにする。まず、ピン径φ60㎜級小型模型による材料選定およびトライボロジー諸特性の確認実験を行い、さらに、寸法効果を確認する目的でφ330㎜級大型確認実験を行う。

なお、揺動運動に着目したφ330㎜級大型試験片による摩耗実験は、800～1000m級吊橋(Appendix A5参照)に相当する実機規模の実験である。

３．２　トライボロジー面からの検討

３．２．１　トライボロジー設計からの検討方針

吊橋の鉛直支承には第２章に示すように、吊構造の鉛直支承に諸条件を満たす合理的なピン・アイバー形式のタワーリンクシステムを採用することにした。

しかしながら、比較的温暖な瀬戸内海が架橋地点とはいえ、厳しい気象・海象条件の中、繰り返し作用する大反力、大変形を吸収するためには、構造設計面並びにトライボロジー面等多方面に亘って要求性能を整理・確認する必要がある。

前章では、タワーリンクシステムが、構造部材設計面から見た各種設計条件について示した。これらを基に、本節においては、トライボロジー面の検討を行うにあたり考慮すべき条件とその対処方針を検討整理する。

(1) トライボロジー設計への条件

本論文で対象とするタワーリンクは、高荷重低速揺動を受ける低摩擦・低摩耗量を特徴とする自己潤滑性の固体潤滑剤埋込型ブシュと円筒ピンの円筒軸受である。

タワーリンクシステムを設計するに当たり、トライボロジー面で考慮すべき条件は以下のとおりである。

① 頻度、強度とも幅広く変動する繰返し交通荷重が載荷される。風・地震等は自然荷重であり、不特定・過大負荷も予想され、かつ制御不可能である。

よってトライボロジー設計にあたっては、そのような荷重に対し、すべり距離、面圧、すべり速度、摩耗量等がピン・ブシュ設計に可能な範囲でなければならない。

② すべり(摩擦)速度が極めて小さく（瀬戸大橋吊橋では2㎜/sec）、揺動（往復すべり）運動を受ける。その揺動運動は安定（滑らか）でなければならない。軸受の寿命を短くする付着すべり(Stick slip)や微動摩耗(Fretting wear)の発生がないこと。

③ 高面圧を受ける部材である。平均面圧で500kgf/㎠、局部応力ではその２倍程度を考慮する必要がある。 →高荷重低速揺動を受ける。

④ 無給油潤滑・乾燥摩耗方式の軸受とし、自己潤滑性の固体潤滑剤埋込型ブシュを採用することにより交換することなく100年間(耐用年数）使用する。すなわち、摩耗量は橋体と同一寿命の100年間（無交換供用）を見込むものとする。

移動量(すべり振幅)、移動速度(揺動速度)は幅広く変動するため、摩耗速度が安定（摩耗の推移が安定）していること。すなわち、長期的に見て急な立ち上がり（摩耗速度の上昇）がなく、異常な摩耗(偏摩耗等)がないこと。

⑤ 摩擦係数は、一般橋梁の支承板支承程度とし、下記を目標とする。

設計上は　0.15以下

実験値上は　0.10以下

上記の範囲であれば、支承部の摩擦力による支持部材への付加応力は通常小さく、部材断面が大きくなることは少ない。また、実験においては試験片製作精度、実験環境等条件が良いため３割程度厳しい条件を課したものである。

⑥ 海上橋梁であることから、腐食環境に置かれるため、耐食性が具備されていなければならない。

⑦ 環境に優しく推移すること。すなわち、低騒音、低振動であって、摩耗粉の逸散がないこと。これには軸受部の製作精度、②に示した付着すべりや微動摩耗の発生も原因となる。

⑧ ピンはその支持方法から面圧と同時に以外に曲げを受ける部材であるため、切り欠きとなるような機械加工、溶接による熱サイクルは避けなければならない。

よって固体潤滑剤を埋め込むためのボーリング加工を施す側、すなわち固体潤滑剤埋込側はブシュ側を前提とする.

（2）トライボロジー性能を確認するための実験の必要性

橋梁部材としての断面設計はいうまでもないが、可動部分については、摩擦(Friction)、摩耗(Wearing)および潤滑(Lubrication)というトライボロジー面からの検証が必要である。

特に、タワーリンクは高荷重・低速揺動すべり条件において100年以上長期の耐食性・耐摩耗性を有し、かつ低摩擦性であることが要求される。

この軸受では通常の回転軸受とは異なり、往復運動のため接触部が一定しておらず、ミクロには毎回新しい接触がおき、それが繰り返されるため、摩擦・摩耗・潤滑というトライボロジーの面からは厳しい挙動が発生することになる。また、トライボロジーの諸特性は、接触部材の材質、すべり速度、面圧等により大きく影響される。

これらの点がタワーリンク構造においてトライボロジー(Tribology)面で留意すべき特徴であり、仮定の妥当性について、各種条件に応じた確認実験が必要である。しかしながら、トライボロジー部門は幾つかの学問の接点になっており、当時、系統だった研究成果が極めて少ない状況であった。特にリンク支承構造では、類似のペンデル支承の施工実績があるものの、開発当時においては、この分野で入手できるデータは殆どない状況であった。

そこで、仮定の妥当性について確認し、既往実績を大きく上回るタワーリンクの設計ディテールを決定するために、以下の確認実験を行って設計仕様策定のための基礎資料を得ることとした。

① ピン・ブシュの材料の組み合わせを変化させφ60㎜級小型実験による材料選定、面圧、クリアランス（径差、径比、嵌合比で表すこともある）の影響調査。

② 世界的に例のないφ330㎜級大型実験により寸法効果・質量効果の影響確認。

実験規模は、既存の摩耗試験機を改造し、載荷可能容量から決定した。

なお、PTFEの特性については、別途、確認実験を行う。

（3） 検 討 の 流 れ

耐摩耗性と低摩擦性については、一般に相反する性質であり、選定の最終判断には経済性、交換性など工学的判断により支承部材の材質の選定、設計条件を確定しなければならない。

本論文では既往の知見および課題の整理を行い、必要な実験を実施した。それらを総合し、本論文の主題である以下の結論を得たものである(詳細は後述)。図３．１にこれらの検討の流れを示す。

この検討の結果、リンク支承(タワーリンク)の軸受部には、『四ふっ化エチレン樹脂（PTFE ： polytetrafluoroethyren）成型粉を固体潤滑剤（solid lubricant）とし、これをベースメタルの高力黄銅鋳物（HBsC4）に埋め込んだブシュと、相手材のピン材質にマルテンサイト系ステンレス鋼鍛鋼品SUS431を選定する。』こととした。

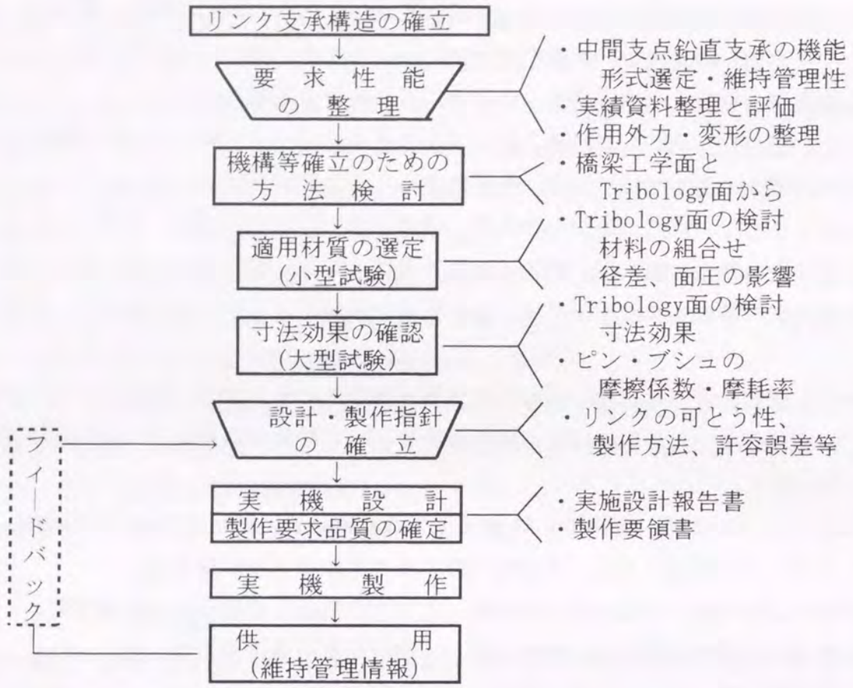


図３．１　タワーリンクシステムの検討の流れ

３．２．２　タワーリンク軸受材料の選定

（１）　材料選定にあたっての基本事項

長大吊橋のタワーリンクシステムを構築するにあたって、ピンおよびブシュ材料に適合する材料(およびその組合せ)を抽出する。

①　長期的に安定した摩耗性を有するか

タワーリンクの軸受部すなわちピン・ブシュ部は、摩擦を受け、摩耗が発生する部分である。何れも少ないほど望ましいが、長期的に安定した摩擦・摩耗状態が得られていることが必要条件である。

ここに、長期的に安定した摩擦・摩耗状態とは、供用中長期に渡り、摩擦係数は上限を超えないで一定値以内で収まっていること、摩耗はその率(あるいは係数)が大きい方に変動しないことである。

②　温度上昇は一定限度内か

純PTFEの結晶融点は327℃、連続使用可能温度は約260℃であるが、諸特性を改善するために各種フィラーの添加を予定しているために、使用限界温度としては約200℃と低く設定した。

③　実験時摩擦係数は妥当か

取付部材あるいは支持部材は支承から摩擦力による２次応力を受ける。現在、一般のすべり支承の摩擦係数はｆ＝０．１５が採用されているが、タワーリンクにおいてもこの程度の大きさであれば支持部材の設計に与える影響は極めて小さい。

実機では２次元あるいは３次元的に揺動しながら滑っているはずであるが、実験では実機の挙動を忠実には再現できない、特に摩擦に及ぼす各種要因を完全に再現できないのが実態である。実験目的が摩耗あるいは寸法変化の小さい材料を模索しているため、摩耗量、表面アラサ等の測定値は、測定値が非常に小さく測定精度が微妙に影響する。また、実験室においては良好な雰囲気が確保されるが、実機は海塩粒子、浮遊粉塵等トライボロジーに対し好ましくない環境に晒される。これらはトライボロジー特性を減退させ、軸受の寿命に大きく影響するものである。

これらの点に配慮して、本検討では設計摩擦係数を0.15程度に想定し、実験値としては0.10程度を目安に検討することとする。見方を変えれば、設計時に想定していない不測の外力、変位に対する余裕を見込んだものである。

この値をねらい値とし、場合によっては材料の組合せの再検討を行う方針とした。

④　材料特性が明確かつ市場性が高い材料か

固有の材料特性が明確で安心して使用できること、将来、交換が必要になった時に代替品が供給できることが重要である。よって使用材料は、類似の構造部材で使用実績があってJIS等その材料規格が明確なものから選定することとする。

⑤　ブシュと相手材との硬度差

摩耗対策としてどちらか一方に硬度差を設けるのが一般的である。通常、摩耗する側は交換可能側とすべきで、タワーリンクは大型部材であるため架設時と逆の工程となる交換作業を考慮してピン側とした。ブシュの交換は冷やしばめで組み立てているためタワーリンク一体毎の交換しか出来ない。しかし、一方では固体潤滑剤を埋め込んだブシュは圧力を受け、摩耗(寸法変化)があって初めて潤滑剤が拡散し、潤滑皮膜を形成するシステムであり、ブシュが摩耗するべきとも考えられる。しかし、硬度のみの評価で柔らかい方が摩耗するとは言い難く、その材料のねばさ、伸び性能等幾つもの要因によるといわれており、それも相手材との組合せで決定されるため、実験で確認しないと明らかにできない課題である。

タワーリンクでは基本的な材料選定では従来の支承の実績経験に立脚しており、ピン側に硬度の低い材料を選定したものである。

以上の内容を整理すると、実験におけるタワーリンク用ピン・ブシュ材料の適用判断条件は以下のとおりである。

①供用中に異常摩耗に至らぬこと。偏摩耗がなく、定常摩耗で推移すること。

②温度上昇は使用材料に変質が起きない適度な範囲であること。

使用材料のうちPTFEの使用限界（変成温度）は約200℃と最も低い。

③摩擦係数は最大でも0.10程度以内であること。

④使用材料は極力JIS等規格が明確な範囲から選定する。

（2） ピン用材料の検討

長大吊橋のタワーリンクピンの材料としては、耐荷重性、耐食性、耐摩耗性があって安定した品質で大型部材が供給できることが必要条件である。

この要求に対し、一般的には鋳鋼品が挙げられるが、大荷重を受ける大型部材の内部品質保証性に欠けるため、鍛鋼品が適当と判断した。鍛鋼品としては一般構造用の炭素鋼鍛鋼品、高強度鋼としての合金鋼、耐食性を重視したステンレス鋼等が考えられる。

以下にピン材質選定の考え方を示す。[3] [4]

① ピン材料の選定に当たっては、部材の経済設計を念頭に置き、それぞれ類似規模の構造材から 表３．１に示す材料を抽出する。

② 表３．１の中から耐摩耗性を重点に考え、硬さ（引張強度）、大型部材の製作性から代表鋼種を選定する。

・炭素鋼からは、高強度大型鍛鋼材料として実績が多く、安定して製造可能な代表的鋼種の炭素鋼鍛鋼品ＳＦ55Ａを選定する。

・合金鋼からは、各鋼種共焼き戻しマルテンサイト組織がが得られ、耐摩耗性の要因である硬さ、金属組織が鍛鋼品と同等と見られ、高強度ボルト用材料など高強度大型調質鋼として実績が多く、安定して製造可能なクロムモリブデン鋼SCM430を選定する。

・ステンレス鋼からは、強度、靭性が合金鋼に同等なマルテンサイト系ステンレス鋼の中から大型材料として熱間鍛造性がよく、耐食性が良好で水門ゲート等で実績が多いSUS431を選定する。

なお、選定した３鋼種は、本節（４）で後述するように異種金属接触腐食に対しては課題が少ないものである。

表３．１ ピン材料に適用が考えられる鉄鋼材料

鉄鋼材料の種類	当該JIS規格名	鉄鋼材料名(kgf/mm²＊)	主 な 用 途
炭素鋼鍛鋼品	JISG3201 炭素鋼鍛鋼品	SF50A （σy≧25）	一般の各種鍛鋼品
		SF55A （σy≧28）	同上
		SF60A （σy≧30）	同上
合金鋼－クロムモリブデン鋼	JISG4105 クロムモリブデン鋼鋼材	SCM430(SCM2, σy≧70)	高強度ボルト (F8T級)
		SCM435(SCM3, σy≧80)	同上 (F10T級)
		SCM440(SCM4, σy≧85)	同上 (F10T級)
		SCM445(SCM5, σy≧90)	同上 (F11T級**)
ステンレス鋼	JISG4303 ステンレス鋼棒	SUS304 （σy≧21）	オーステナイト系の一般用、低温靭性
		SUS316 （σy≧21）	オーステナイト系、SUS304にMoを2～3%添加。耐SSC用圧力容器、支承すべり面、伸縮装置樋
		SUS410 （σy≧35）	マルテンサイト系、支承すべり面
		SUS431 （σy≧60）	マルテンサイト系、SUS410よりC、Crを多く添加し高強度化

＊ σyは各JIS規格寸法材での保証値であり、実体強度ではない。

** ここにF11Tは耐遅れ破壊特性に不安が残る材料として、高力ボルトのJIS規格からは現在では除外されている。

（3） ブシュ用材料の検討

1） 固体潤滑剤の材料検討

埋込型固体潤滑剤の主成分には、橋梁の支承等で黒鉛（grafite）、二硫化モリブデン（Mo_2SO_2）、フッ素樹脂系（代表PTFE）があるが、リンク支承の軸受材料には、摩擦係数が最も小さく、化学的に安定で潤滑雰囲気の中で電位的に安定なフッ素樹脂系のPTFEを採用する。

一般の橋梁においては、支承板支承が類似の接触機構を有すると考えられる。それ等に使用されている固体潤滑剤には、黒鉛系、二硫化モリブデン系、PTFE系等がある。本件におけるピン・ブシュのトライボロジー面からは、既往実績より長期間安定して使用でき、耐摩耗性、低摩擦性が良好なPTFE系が望ましいと判断される。

ベースは、純PTFEであるが、このプラスチック材料は、摩擦係数が0.02以下と極めて小さいが、比較的軟らかな素材であるため摩耗量は多くなり、実用的には課題が大きい。そのため摩擦の影響を受ける部材の応力設計面から許容できる0.10程度までの摩擦係数の上昇を許容することとして充填材を混入させて耐摩耗性を改善することとする。すなわち、混入させる充填材量を調整することにより摩耗量を減らす工夫を行った。

主な充填材の用途は、表３．２に示すとおりである。

表３．２の中から実績を考慮し、グラファイト(約５%)、グラスファイバー(約20%)を混入させた合理化PTFEをタワーリンク用固体潤滑剤とする。

また、同じPTFE系の中にも面的に配置したグライト(Gleit)板方式があるが、側方拘束効果がなくクリープも大きいいため、耐荷重性は平均面圧で約100kgf/mm²程度であり、線荷重を受ける大荷重(反力)部材には設計不可能である。

表３．２　代表的充填材(プラスチック材料)の用途

充填材の種類	用　　途
グラスファイバー	製品の化学的、電気的性質にほとんど影響を及ぼさずに機械的性質特に耐摩耗性を改善する効果がある。
グラファイト	耐摩耗性がよく、化学的、機械的用途に使用される。初期摩耗や始動抵抗を小さくできる。
カーボン	多くの薬品に不活性。耐摩耗性がよく、クリープを減少できる。グラファイトと併用されることが多い。
二硫化モリブデン	PTFEの硬度、耐摩耗性の改善、始動抵抗の減少が図れる。グラスファイバーと併用されることが多い。

2）ベースメタルの材料検討

ベースメタルは、設計面圧に対応できる材質の中から既往支承の実例を勘案し、次に示す理由から高力黄銅鋳物HBsC₄を選定する。[3] [4]

- 耐荷力（支圧強度）80kgf/mm²級の強度が得られる。リンク軸部部材が60～80kgf/mm²級の強度部材となることから、同等程度の強度でないと、部材寸法が軸受部で特別大きくなって、製作・架設性に劣ることになる。　　実機 φ14, φ12（ＴＰ φ9, φ6）
- 防食性については、支承板支承で実績が多く、保証できる。

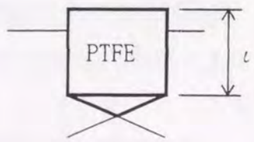


図３．２固体潤滑剤埋込形状

3）固体潤滑剤の埋込方法

固体潤滑剤はその湧出性から摩耗量の多いブシュ側に埋め込むものとする。すなわち、摩耗の進行と共に潤滑剤が滲み出る形式を採用する。図３．２参照。

固体潤滑剤がブシュ側に埋め込まれたところから、ピンの揺動運動により、面圧を受けて湧出（潤滑）することによって自己潤滑型ブシュとなることにより、境界潤滑となるのを防ぐ考え方である。

固体潤滑剤埋込型ブシュの耐荷重性を確保するためには、側方拘束(クリープ防止)が期待できるベースメタル側への埋め込み方式とする。

ここで、固体潤滑剤はピン側に埋め込むことも可能であるが、ピンは大きな曲げ応力を受ける部材であるため、極力切り欠き等の加工は控える方針とし、ブシュ側に埋め込むことを前提に検討を進める。

(4)　異種金属接触腐食に関する検討

支承構造は、相対する２部材の接触機構を有する構造体である。そのため、材料選定にあたっては、注意すべき課題として異種金属接触腐食(電位差腐食、ガルバニ腐食ともいう。Galvanic corrosion, Dissimilar metal corrosion, Bimetallic corrosion)がある。検討対象となる異種金属接触部位は、ピンとブシュ、ピンとその支持金物(ブラケット)である。

表３．３　許容しうる異種金属の組合せ
(MIL-STD-171A：米軍規格 金属および木材の表面処理) [5]

グループ番号	金　属　の　種　類	電極電位 (V)	基準0.25ボルト
1	金又は金めっき，金-白金合金，白金	+0.15	
2	銀めっき，銅素地銀ロジウムめっき	+0.05	
3	銀又は銀めっき，高銀合金	0	
4	ニッケル又はニッケルめっき，モネル合金，高ニッケル鋼合金，チタン	−0.15	
5	銅又は銅めっき，低合金黄銅又は青銅，銀ろう，洋白，高銅ニッケル合金，ニッケルクロム合金，オーステナイト系ステンレス鋼	−0.20	
6	高力黄銅及び青銅	−0.25	
7	高合金黄銅及び青銅，ネーバル黄銅，四六黄銅	−0.30	
8	18%Crステンレス鋼	−0.35	
9	クロムめっき，すずめっき，12%Crステンレス鋼	−0.45	
10	すずめっき，ターンプレート，すず-鉛はんだ	−0.50	
11	鉛又は鉛めっき，高鉛合金	−0.55	
12	ジュラルミン系アルミニウム鍛造合金	−0.60	
13	鋳鉄，ねずみ鋳鉄，可鍛鋳鉄，炭素鋼及び低合金鋼，アームコ鉄	−0.70	
14	ジュラルミン系以外のアルミニウム，鍛造合金，けい素系アルミニウム鋳造合金	−0.75	
15	けい素以外のアルミニウム鋳造合金，カドミウムめっき(クロメート処置)	−0.80	
16	熱浸亜鉛めっき板，熱浸亜鉛めっき鋼	−1.05	
17	電線亜鉛，亜鉛系ダイカスト合金，亜鉛めっき	−1.10	
18	マグネシウム及びマグネシウム合金(鋳造及び鍛練用)	−1.60	

防食 ↑ 貴 rich　　poor 卑 ↓ 腐食

注 (1) 線でながれているグループの金属同士は許容される組合せを形成する。
(2) ○は系列の最も積極的に作用する金属，＊は積極的に作用する金属，矢印は陽極への方向。

文献[5]によれば、表３．３に示すように、ピン材料として検討したSUS431は12%ステンレス鋼グループ番号９、SUS304はオーステナイト系ステンレス鋼グループ番号５であり、ブシュ材料の高力黄銅はグループ番号７に相当する。炭素鋼はグループ番号13である。

ピンとブシュの組合せでは、9vs7より、5vs7の方が電位差が低い。ピンとブラケットでは、5vs13より、9vs13の組合せの方が電位差は小さい。よってステンレス鋼の中では高力黄銅ブシュの相手材としてはSUS431が好ましいと判断できる。

鋼系と黄銅系の接触は電位差が少し大きいが、固体潤滑剤が十分に皮膜を形成しておれば問題は少ないものと考えられる。しかし、Stick slip現象がピンとブシュの異種金属同士の金属接触で発生しているとすれば、電位差が低いピン(SUS431)に腐食が発生し、摩擦係数が上昇することも考えられるので、Stick slip現象が発生しないよう固体潤滑剤が相手金属面を十分被覆していることが必要である。

摩擦係数の増大により、リンク支承の揺動荷重より摩擦力が卓越する場合は回転機能を発揮しないことになるか、あるいは摩擦力を超える荷重が作用して急にすべる(すなわち、Stick slip現象の発生)ことになり好ましくない。

以上の検討から、ブシュに高力黄銅鋳物を使用する場合、ピンにマルテンサイト系ステンレス鋼を採用すれば、異種金属接触腐食は考慮する必要は無いものと考える。その他の金属を採用する場合には後述する腐食対策を実施することとする。

なお、実機設計時には、Stick slip現象の発生原因となる金属接触の有無すなわち、デッドゾーンの大きさについて照査しておかなければならない。

次章で代表的軸受材料を選定し、トライボロジー面の実験を行い特性の最良なる組合せを選ぶこととするが、腐食の心配がある組合せの場合は、腐食対策を施すものとする。

腐食対策としては、文献[13]によれば次の方法がある。

① 使用環境における異種金属の腐食電位の差を小さくすることが有効であり、そのため腐食電位列上で、できるだけ近くにある組合せを選ぶ。

② 面積比の影響を最小にするために、貴(より高電位)な金属に対する卑(より低電位)な金属の面積比をできるだけ大きくとる。塗装する場合には、貴な金属部分だけを塗装して、カソード(cathode、陰極)面積比を小さくする。

③ 両金属間に非導電性の物質を挟んで、両者の電気的接触を完全に断つ。フランジ等接合部に絶縁性のワッシャーを挟む場合は、ボルト、ナット部も絶縁しなければならない。

④ 接触している両金属のいずれよりも卑な第三の金属を、犠牲アノード(anode、陽極)として用いる。金属被覆する場合には、両金属よりも卑な金属で被覆する。

⑤ 接合部の非金属側の一部を取り替え可能な構造にしておき、腐食したら、その部分だけを取り替える方法もある。

⑥ 両金属が浸されている液側に対して、インヒビター(inhibitor、防錆剤、腐食抑制剤)を添加する。特にカソード分極を大きくするようなインヒビターが効果がある。

(５) 微動摩耗に関する検討

吊橋タワーリンクのピン・ブシュ部は、一般の機械等の軸受に比し、著しく低速度で揺動する部材である。さらに、その揺動振幅は設計最大時と比べ常時は極めて微小である。

このようなケースにおいては、微動摩耗*) に対して設計上許容できるかどうか検討しておく必要がある。

＊) フレッチング摩耗(Fretting wear):接触する２固体間に生じる外的な振動に伴う接線方向の、一般には100μm以下の微小な往復すべりに起因した表面損傷。Appendix A1参照。

微動摩耗は、微小振幅の往復すべりに伴って発生する摩耗現象であり、軸受における主たる発生原因は、凝着摩耗と、発生した摩耗粉が接触部から排出されずに留まり、酸化して硬い粒子となってアブレッシブ摩耗を引き起こすことによると考えられる。したがって、凝着摩耗、アブレッシブ摩耗を起こし難い材料の組合せ、すなわち、タワーリンクにおいては固体潤滑剤の部分埋込型乾燥摩擦機構を採用しているため、軸受の寿命期間中、潤滑が滑らかに行われることが必要条件である。

併用吊橋の支承部は、活荷重、主に列車荷重により常時移動回転を起こしているため、潤滑剤は道路単独橋より良好な供給が可能である。タワーリンク構造の前提とした軸受機構は円筒軸受であり、その軸方向には摩耗分の自然排出が期待できる。

また、ピン・ブシュは、同種金属の組合せでなく異種金属の組合せで構成しているため焼き付きの恐れはなく、微動摩耗を減少させるものと期待できる。

3．3　ピン・ブシュの摩耗試験

これまでに述べてきたように、長大吊橋のタワーリンク・ピン部は高荷重・低速揺動運動を長期間受ける部材である。かつ、構造上、軸受部材の交換が困難なことなどから、橋梁設計の計画段階から摩擦・摩耗・潤滑のいわゆるTRIBOLOGY面からの対策を十分考慮すべきである。

すなわち、中央支間長1,000m前後の道路鉄道併用吊橋で連続補剛トラスを用いた場合、軸受部に加わる最大荷重は4,000tf前後に達し、係る高面圧での低速揺動下の摩耗特性に関する調査は少なく、設計データの収集が必要である。[6] [7]

このため、小型試験片による材料選定、トライボロジー諸特性の確認、並びに寸法効果を確認するために実機寸法に近い大型試験片による確認実験[8] [9]を行う。

ここに、採用したピン径φ330㎜はブシュ有効長Ｌ＝500㎜とすると、

Ｐ／Ｄ／Ｌ＝300kgf/cm²　とすれば、Ｐ≒500ｔ

となり、これは、２ヒンジ吊橋では中央支間長800m級に相当する反力規模であり、実機寸法での確認実験を行ったことと同等と判断した。

確認実験においては、温度上昇の程度、摩擦面の摩耗状況（表面粗さの変化、偏摩耗の有無）、摩耗粉の移着状況、潤滑剤の供給状況等について調査・測定を行い、stick-slip現象および微動摩耗の有無について接触面相互の振動状況を確認し考察する。

3．3．1　小型模型による基礎試験

（1）実験目的

ピン径φ60㎜級の小型摩耗試験を行い、タワーリンク・ピン部の摩耗特性に及ぼす①ピン材質の影響、および②軸受部の面圧の影響、さらに③軸受部のクリアランス（ピン・ブシュの径差）の影響について調査する。

なお、試験に際してはタワーリンク・ピン部の摩擦挙動を模型実験において再現するため、新たに摩耗試験装置を製作し本試験に供した。

比較検討に用いた供試ピンの材質は、３．２．２で検討した炭素鋼鍛鋼品、高強度低合金鋼およびマルテンサイト系ステンレス鋼の３種とし、軸受材には高力黄銅鋳物をベースメタルとした固体潤滑剤埋込型ブシュを採用した。

試験規模（ＴＰサイズ）は、トライボロジーにおいては、寸法効果がないといわれているため、新規製作すべき試験装置の製作性、経済性より決定した。今回は、鉛直載荷荷重および揺動荷重の大きさにより装置の規模が大きく変るため、現有試験機が適用できる規模を目指した。結果としてピン径は載荷荷重より決まり、実機の1/20スケールのφ60㎜を

選定した。

（2）摩　耗　試　験　機

ピン部最大荷重を4,000tfと仮定し、長大吊橋タワーリンク・ピン部の特殊な摩擦挙動(揺動運動)を再現できるようにした摩耗試験機の仕様を、実際の設計仕様と比較して表３．４に示す。

面圧設定の詳細は、(６)試験方法１)に示している。

表３．４　小型摩耗試験機の仕様と実機仕様

項　　目	実機タワーリンクピン仕様	試 験 機 仕 様
最大荷重時最大面圧 P_{max}(kgf/cm²)	５２０	５２０（試験面圧）
最　大　荷　重　F(tf)	４、０００	８（試験荷重）
ピ　ン　直　径　D(㎜)	１，３００	６０
軸　受　有　効　長　L(㎜)	９５０	４２
揺　動　振　幅　角　(°)	±　１．９	±１．９
すべり全振幅　(㎜)	±４２．５	±　２
平均 すべり速度　(㎜/s)	～２．１３	２

摩耗試験機の原理を図３．３に示す。半径12㎜のクランク運動をリンク機構でピン揺動運動を作る形式であり、荷重は万能試験機の圧縮力を用いた。

試験中、摩擦力および荷重を随時記録し、荷重のチェックおよび摩擦係数の算出を行った。さらにブシュ材の摩擦面から1㎜かつブシュ端部から10㎜の位置でサーモカップル(図ではＴＣで表示)により温度の常時計測を行った。

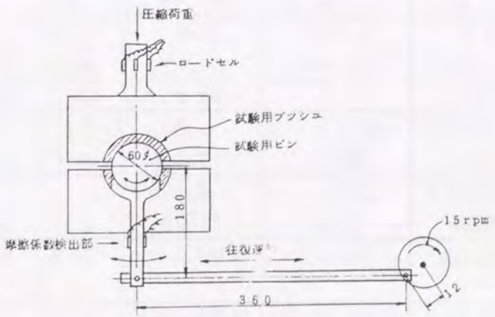


図３・３　小型摩耗試験機原理図

（3）供　試　体

1）試験用ピン

供試ピンの材質には、３．２．２(２)の検討結果より、炭素鋼鍛鋼品としてSF55，高強度合金鋼してSCM430mdyおよび耐腐食性も考慮して高強度マルテンサイト系ステンレス鋼と

表３．５ａ　小型摩耗試験用供試材の化学成分（ピン：SF55, SCM2mdy, SUS431）

ピン 材質	化学成分（レードル分析：wt%） C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al
JIS G3201	≦0.60	0.15 0.50	0.30 1.20	≦.030	≦.030	—	—	—	—	—
SF55A	0.36	0.30	0.55	.014	.012	0.14	0.12	0.19	0.05	.004
JIS G4105 SCM2	0.28 0.33	0.15 0.35	0.60 0.85	≦.030	≦.030	≦0.25	0.90 1.20	≦0.30	0.15 0.30	—
JIS G4105 SCM5	0.43 0.48	0.15 0.35	0.60 0.85	≦.030	≦.030	≦0.25	0.90 1.20	≦0.30	0.15 0.30	—
SCM2mdy	0.43	0.28	0.78	.011	.011	0.23	1.07	0.16	0.22	.007
JIS G4303	≦0.20	≦1.00	≦1.00	≦.040	≦.030	1.25 2.50	15.0 17.0	-	-	-
SUS431①	0.12	0.51	0.70	.011	.011	1.63	16.0	0.13	0.02	.008
SUS431②	0.14	0.35	0.58	.015	.009	1.68	16.2	0.14	0.02	.005

ＪＩＳＧ３２０１-1978炭素鋼鍛鋼品Carbon Steel Forgings for General Use
ＪＩＳＧ４１０５-1979クロムモリブデン鋼鋼材Chromium Molybedenum Steels
SCM2,5はJIS改訂によりSCM430,445に記号変更された。mdyはJIS規格相当材を示す。
ＪＩＳＧ４３０３-1977ステンレス鋼棒Stainless Stell Bars
SUS431①は面圧750kgf/mm^{2}までの試験用供試体（φ６０）用。
SUS431②は高面圧1000kgf/mm^{2}試験用供試体（φ６０）用。

表３．５ｂ　小型摩耗試験用供試材の機械的性質（ピン：SF55, SCM2mdy, SUS431）

ピン 材質	機械的性質（ ）内:N/mm^2 $\sigma_{0.2}$ (kgf/mm^2)	σ_B (kgf/mm^2)	El (%)	RA (%)	Hv	備考（熱処理、吸収エネルギー）
JIS G 3201	55～65 (539～637)	≧28 (275)	≧20	≧35	HB	軸方向
			≧16	≧26	≧152	切線方向
SF55A	31.7	58.0	28.0	48.5	158	850℃・3hrAC
JISG4105 SCM2	≧70 (686)	≧85 (834)	≧18	≧55	HB 241～302	≧11kgf/cm^2 (108J/cm^2)
JISG4105 SCM5	≧90 (883)	≧105 (1030)	≧12	≧40	HB 302～363	≧4kgf/cm^2 (39J/cm^2)
SCM2mdy	69.1	89.3	22.2	62.8	260	850℃・3hrOQ、600℃FC
JISG4303	≧60 (588)	≧80(785)	≧15	≧40	HB≧229	
SUS431①	59.2	76.8	23.6	40.2	206	850℃・3hrAC、650℃AC
SUS431②	60.2	79.3	22.0	41.9	201	

ＪＩＳＧ３２０１-1978炭素鋼鍛鋼品Carbon Steel Forgings for General Use
ＪＩＳＧ４１０５-1979クロムモリブデン鋼鋼材Chromium Molybedenum Steels
SCM2,5はJIS改訂によりSCM430,445に記号変更された。mdyはJIS規格相当材を示す。
ＪＩＳＧ４３０３-1977ステンレス鋼棒Stainless Stell Bars
SUS431①は面圧750kgf/mm^{2}までの試験用供試体（φ６０）用。
SUS431②は高面圧1000kgf/mm^{2}試験用供試体（φ６０）用。

してSUS431をそれぞれ鋼種の代表材として選定した。

表３．５ａｂに供試ピンの化学成分、機械的性質を示す。

製造要領は当該ＪＩＳ規格に準拠し、下記によった。

① ピン素材のうちSF55およびSCM430(2)mdyは、それぞれ10ton塩基性電気炉で溶製した。

ここに、SCM430(2)mdyについては、化学成分分析ではSCM445(5)に合致しているが、Tribology面から特に重要な項目である供試材の表面硬度、機械的性質についてはSCM430(2)に合致しているため、本論文では「SCM430(2)mdy」と表示した。なお、表３．５には分かりやすくするために両規格値を併記した。

② SUS431は、高周波溶解炉で300kg鋼塊を溶製した。

③ これら素材より１tonハンマで80mmφx300mm$_t$の丸棒を鍛造した。

図３．４ａに供試ピンの形状を示す。

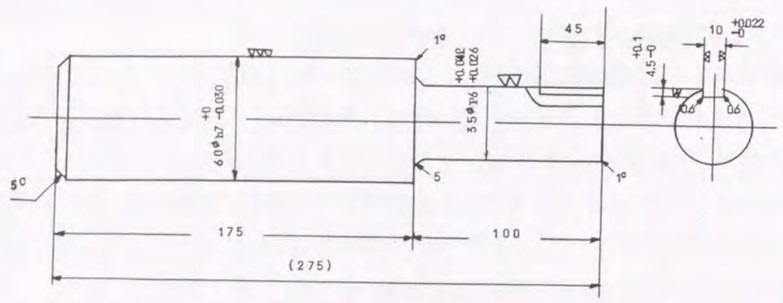


図３・４ａ　供試ピンの形状

２）試験用ブシュ

タワーリンク用埋込型固体潤滑剤は、3.2.2(3)の検討結果により、フッ素樹脂系のPTFEとし、摩擦係数と摩耗量の低減を目的として、純PTFEに軟質金属を充填材として微量混入させ、混練（粘結）材料と組み合わせた合理化PTFEを選定する。

また、ベースメタルは、国内の支承工場において大型のブシュが安定して製造可能であることを前提に、設計面圧に対応できる材質の中から既往支承の実例を勘案し、80kgf/mm²級の強度が得られる高力黄銅鋳物HBsC₄とする。

試験用ブシュ材料および供試体加工については下記に示す。

①固体潤滑剤埋込型軸受は、上記の検討結果よりＰＴＦＥ6㎜φを埋め込んだ高力黄銅鋳物（製品名：オイレス＃500SP･SL4）とした。

②ブシュ表面には、初期摩耗対策(当たり面の確保)として、試験前に固体潤滑剤と同質の潤滑剤を塗布した。

③ブシュは上下載荷の条件および摩耗量測定に便利なように半割り型（上下２分割）とした。すなわち、ブシュ側データは上下２カ所で得られることとした。

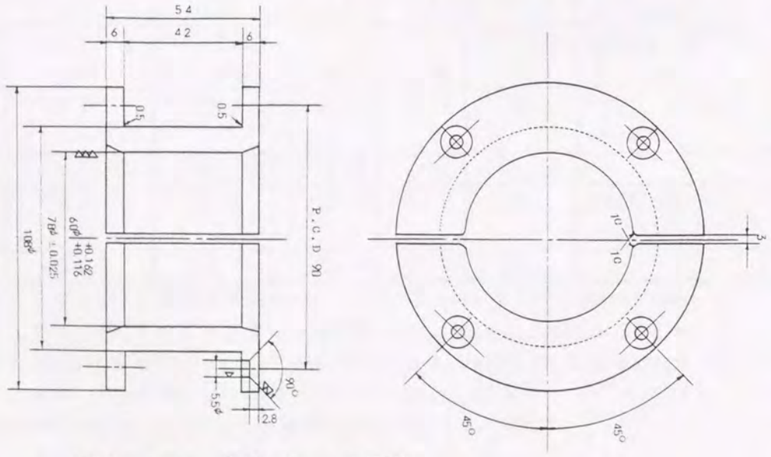


図３．４ｂ　供試ブシュの形状

図３．４ｂに供試ブシュの形状を示す。

表３．６に供試ブシュの化学成分、機械的性質を示す。

製造要領は当該JISに準拠した。

表３．６　小型摩耗試験用供試材の化学成分と機械的性質（ブシュ：高力黄銅）

ブシュ材質	化学成分（レードル分析：wt%）							機械的性質		
	Mn	Cu	Al	Fe	Sn	Pb	Zn	σB kgf/mm²	El %	Hv (HB)
規格(ASTMB22 AlloyE)	2.5/ 5.0	60/ 65	5.0/ 7.5	2.0/ 4.0	≦ 0.2	≦ 0.2	Bal	≧75	≧10	
実　績　1	3.30	63.4	5.43	2.75	< 0.01	< 0.01	24.9	84.9	20.8	247
規格(ASTMB22 Alloy863)	2.5/ 5.0	60/ 66	5.0/ 7.5	2.0/ 4.0	≦ 0.20	≦ 0.20	22.0 28.0	≧77.0	≧12	HB >223
実　績　2	3.39	64.1	5.77	2.98	< 0.01	< 0.01	23.5	-	-	240 (229
JISH5120 -1997注４） CAAC304	2.5 / 5.0	60.0 / 65.0	5.0 / 7.5	2.0 / 4.0	0.2	0.2	22.0 / 28.0	755 N/mm²	≧12	HB >200

注１）ASTMB22において、AlloyEは1973年当時のもの、Alloy863は1974年の規格のもの。
規格名は、BRONZE CASTINGS FOR BRIDGES AND TURNTABLES(1974)である。
表記の他、Ｐ≧0.05、Ｎｉ≦1.0、圧縮耐力≧38.5kgf/mm²、投影面積当り許容面圧＝560kgf/cm²の規定がある。

注２）実績１：面圧750kgf/mm²までの試験用（昭和48､49年度実施）

注３）実績２：高面圧1000kgf/mm²試験用（昭和50年度実施）
なお、引張試験についてはＴＰ採取が不能であったため実施していない。

注４）JISH5120-1997には、表の他、Ni≦0.5,Si≦0.1の規定がある。また、Sn,Pb,Ni,Siは残余成分で、受渡当事者間の協定による許容限度である。

なお、当該ＪＩＳは、1997年に改訂されており、「合金ごとに定められていた規格を廃止し、統合」されている。実質的には記号の組み替えに止まり、高力黄銅鋳物４種CAAC304（旧記号HBsC4)、合金系Cu-Zn-Al-Mn-Fe系と表示されている。注目すべきは、使用例として「低速高荷重を受ける支承・・」と明記されたことである。

（４）試　験　条　件

小型試験に供したブシュ各材料は、以下に示すとおりである。

軸　受　材　：固体潤滑剤埋込型高力黄銅ブシュ
ベースメタル：HBsC₄（高力黄銅鋳物）
固体潤滑剤　：充填材入りPTFE（４フッ化エチレン樹脂成形粉）
ブシュ内径　：φ60mm　　ブシュ有効長：　42mm

(5) 試 験 項 目

ブシュ材質を固定し、相手材(ピン側)材質を変化させて、トライボロジー特性の比較を行った。なお、供試体は小寸法なため、全て充実型とした。

①相手材材質の影響：

SF55（Hv=158、フェライト・パーライト混合組織）

SCM430mdy（Hv=260、焼き戻しマルテンサイト組織）

SUS431（Hv=206、フェライト・マルテンサイト混合組織）

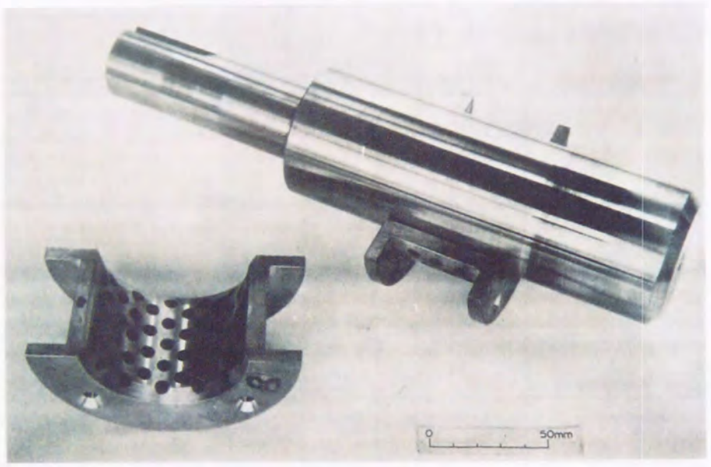


写真３．１試験用ピン・ブシュの組合せ状況

②面圧の影響　：

130, 300, 520, 750,

1000, 1500kgf/cm^2

相手材のピン材質は①で決定した材質を使用する。

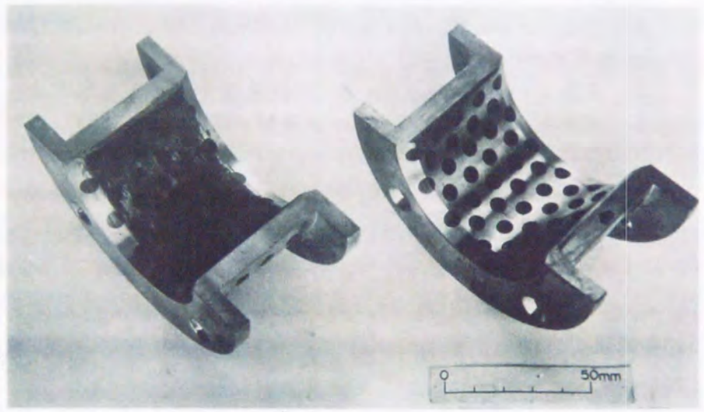


写真３．２ブシュ表面と試験前の潤滑剤塗布状況

③ピン・ブシュ径比（径差：クリアランス）の影響

ピン外径とブシュ内径との径差の影響については、ブシュ内径をφ60㎜一定とし、ピン外径を１，２，３㎜と減じることで与えた。

相手材は①で決定した(SUS431)を使用する。

その結果、径比は下記に示すとおりとなった。

径比＝（ブシュ内径φB／ピン外径φP）：1.017（φ60／φ59）

1.034（φ60／φ58）

1.053（φ60／φ57）

(6) 試 験 方 法

繰返し揺動を与えられる摩耗試験機を製作し、アムスラー万能試験機で圧縮力を載荷した。試験は一定の繰返し数毎に途中計測を行うため断続試験とした。再開の場合は停止前の接触状態を再現するようにマーキング合わせを行った。

載荷状況を写真３．３に、写真３．４に供試体のセット状況、写真３．５に摩擦係数の検出方法を示した。

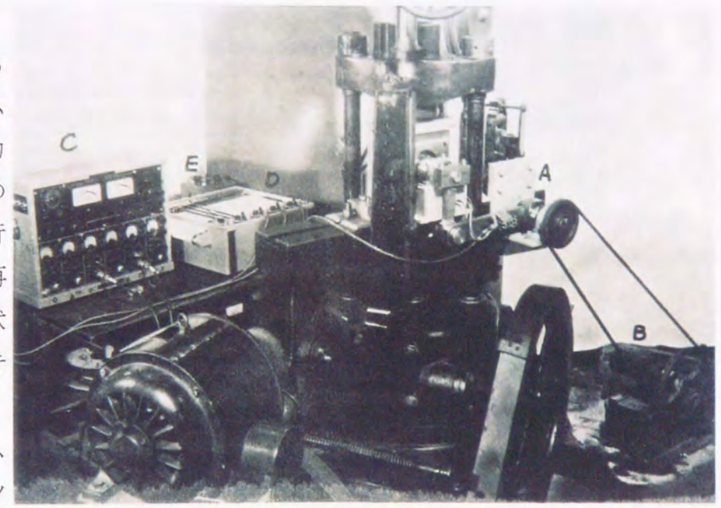


写真３．３　小型試験用摩耗試験機全景

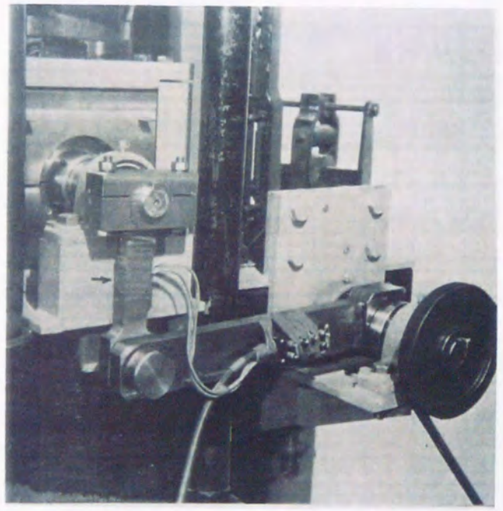


写真３．５　摩擦係数検出部

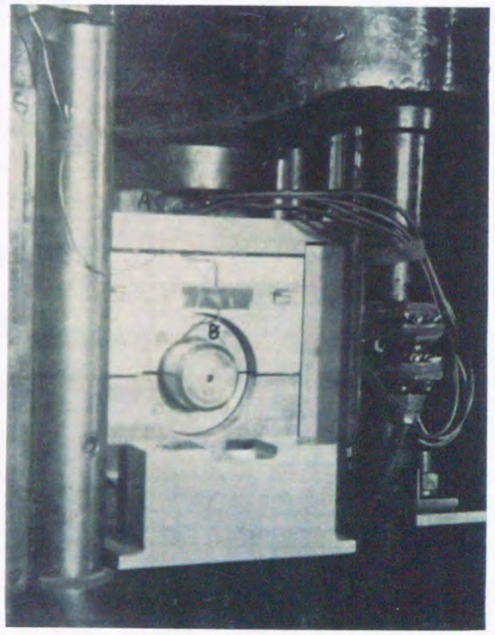


写真３．４　供試体の試験機組込み状況

1） 試験面圧の設定

すべり軸受の摩擦面での面圧の算出方法として実験的、理論的検討が多くなされているが、本試験では余弦面圧分布（180° 余弦分布による90° 有効面圧分布）の最大面圧を採用した。[3] 図３．４参照。

すなわち、荷重F，直径D，有効軸受け長さLとした場合、最大面圧Pmaxは式（1）で与えられる。

$$P_{MAX} = F/DL/\int_0^{\pi/4} \cos^2\phi \, d\phi$$

$$= 1.6F/DL \cdots\cdots (3)$$

試験面圧は、表３．４に示した標準面圧520 kgf/cm²の他、130、300、750kgf/cm²の４条件とした。また、高面圧試験として1,000、1,500 kgf/cm²も実施した。

ただし、ピン・ブシュのの径比に関する試験では標準面圧のときの試験荷重と同じく８tfに設定した。

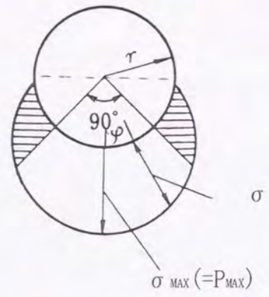


図３．５　面圧余弦分布（円筒接触）

2）　面圧分布の仮定

小型摩耗試験実施段階においては、当時の橋梁関係における円柱と円筒の接触問題において採用されていた180°接触90°有効とする余弦面圧分布を適用して整理することとした。

これは、摩耗後の接触状況、円筒面の弾性変形を考慮して工学的配慮から選定されたものと考えられるが、大型試験以降その後の検討では設計摩耗寸法、クリアランスの影響、軸受の剛性を再考し、90°接触90°余弦分布で整理している。

P_{MAX}＝１．６（1.56）Ｆ／ＤＬ　は、２．１２Ｆ／ＤＬ　と表現するべき所であるが、データの改変に伴う錯誤を防止するために元のまま実験結果を表現し、考察、規定、規格化の際にこの関係に配慮することとした。

よって、実験報告中では投影面積当たりの面圧（平均面圧）$P_{PROJECT}$はピン外径Ｄと有効軸受長さＬ(ブシュの面取り幅を除く)で整理しており問題ないが、最高面圧P_{MAX}を扱う場合は　２．１２／１．６（1.56）＝１．３３（1.36）　を念頭に置く必要がある。

中心角θの範囲に面圧が余弦分布するとしたときの最大面圧P_{MAX}は式（２）で求められる。

$$P_{MAX} = P_{PROJECT} / \int_0^{\theta/2} \cos(\phi \cdot \pi/\theta) \cos\phi \, d\phi \quad \cdots (4)$$

ここに、θ：接触角（中心角）

$$P_\phi = P_{MAX} \cdot \cos(\phi \cdot \pi/\theta) \quad \cdots\cdots\cdots (5)$$

$$P_{PROJECT} = F/DL \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

中心角に対するP_{MAX}／$P_{PROJECT}$の値の計算結果を表３．７に示す。

表３．７　中心角に対するP_{MAX}／$P_{PROJECT}$の値

項目 ＼ 中心角θ	P_{MAX}／$P_{PROJECT}$
３０°	８．６９
６０°	３．０８
９０°	２．１２
１２０°	１．６７
１５０°	１．４２
１８０°	１．２７

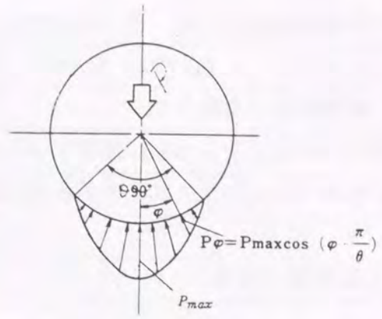


図３．６　面圧余弦分布P_ϕ

∴ θ＝π／２のときは、P_{MAX}＝２．１２$P_{PROJECT}$　となる。

これによると、r_2/r_1≒１．００５で９０°接触しているピンとブシュの場合、平均面圧の２倍の最大面圧が接触面に発生していると考えられる。

なお、一般のピン・アイバーの設計では、φ130mm径差0.5mm以内(径比＝1.004)の条件において180°接触余弦分布が用いられている。

また、既往実験によれば、径比1.005の近傍では、隙間の大きさを多少変えても接触幅は余り変わらないといわれている。

以上を念頭に小型摩耗試験における試験面圧条件とその設定理由を表３．８に示す。

表３．８　　試験面圧条件とその設定理由（小型摩耗試験）

試験面圧（kgf/cm²） （）内：N/cm²	設　定　理　由	計　算　式 P_{MAX}＝１．６Ｆ／ＤＬ
１３０(13.3)	固体潤滑剤PTFE単独の許容面圧	
３００(30.6)	実橋の設計平均面圧 （南備讃瀬戸大橋の設計）	$P_{PROJECT}$＝4,000t／130cm ／95cm＝324kgf/cm² （関門橋実績を参考）
５２０(53.0)	実橋の設計最大面圧 P_{MAX}=1.6$P_{PROJECT}$	P_{MAX}=1.6 x 324＝518
７５０(76.5)	実橋の設計最大面圧の約1.5倍	P_{MAX}=518 x 1.5＝777
１,０００(102.0)	実橋の設計最大面圧の約2倍	P_{MAX}=518 x 2＝1、036

3）　摩耗量の測定

ピン、ブシュの摩擦面の表面アラサの変化を触針式表面アラサ計で軸方向に測定した。

ピンの摩耗量は、直径変化量をマイクロメータで測定し、表面プロフィルから算出し、同時に重量減少量を測定した。

一方、ブシュ肉厚減少量をデプスメータで測定し、これをブシュ摩耗量とし、併せて重

量変化も測定した。

4） 摩擦係数の測定

試験中の摩擦係数を、ピン揺動アームに貼付したトルク検出部から最大摩擦力を検出し、これを荷重で除した見かけ上の最大摩擦係数として求めた。

（7）試験結果と考察

1）摩耗特性に及ぼすピン材質の影響

試験結果を図3．7～3．11に示す。

図3．7aは、ピンの材質別摩耗度合いを評価するために、各繰返し数に対するピン直径の変化量を示したものである。10^5回までの試験範囲では、3鋼種とも定常摩耗域にあるが、SUS431が最小である。

ここに、凡例に示す断続とは、試験機運転途中において摩耗量(直径変化量)を計測するために運転を中断・再開しながら行った試験を示す。、

図3．7bは、ピンと同様、ブシュの材質別摩耗度合いを評価するために、各繰返し数に対するブシュ直径の変化量を示したものである。10^5回までの試験範囲ではピン材質のブシュの摩耗量への影響は特定できない。

図3．8は、ピンおよびブシュの材質別表面粗さの変化を各繰返し数に対して示したものである。$2x10^4$回を過ぎる付近からSCMおよびSFは表面粗さの進行立ち上がりが認められるが、SUSは定常摩耗域と考えられ、4μ前後でほぼ安定して進行している。

図3．9は、ピンの材質別重量変化量を各繰返し数に対して示したものである。ピンの直径変化と同一内容を重量変化で見たもので、明らかにSUSが安定している。縦軸を変えれば図3．7aと同様である。

図3．10は、ピン材質別摩擦係数の変化を各繰返し数に対して示したものである。各材質ともばらつきの範囲とも考えられるが、中でもSUSは各繰返し数において低めである。

図3．11は、ブシュのピン材質別摩擦面温度の変化を繰返し数に対して示したものである。摩耗量、表面粗さの変化が少ないSUSが温度上昇も少ないことを示している。

以上の試験結果を以下のように考察した。

イ. ピン摩耗量に対する材質間の有意差は表3．9に示すように顕著に認められ、SF55→SCM430mdy→SUS431の順に摩耗量は小さくなった。 特に，SUS431の場合、10^6回摩擦後でも極端な摩耗は認められなかった。

10^5回までの繰返し摩耗試験の結果、SCM430mdy、SF55材とも2×10^4回以降で、表面粗さ、摩耗量、温度上昇が大きく、特にSF55では5×10^4回以降急激に増大しており、摩耗

表3．9 長期間繰返し摩擦での摩耗量と比摩耗量 （小型摩耗試験）

材 質	面kgf/圧 cm^2	ピン径mm	繰返し数	摩耗量(上下の平均)mm		比摩耗量 mm／kg/cm^2／m	
				ピ ン	ブシュ	ピ ン	ブシュ
SUS431	520	60	10^6	$18.3_{x10^{-3}}$	$22.5_{x10^{-3}}$	$0.044_{x10^{-7}}$	$0.053_{x10^{-7}}$
〃	〃	〃	10^5	6.7 〃	11.6 〃	0.16 〃	0.28 〃
SF55	〃	〃	〃	29.1 〃	10.8 〃	0.70 〃	0.26 〃
$SCM430_{my}$	〃	〃	〃	10.0 〃	7.1 〃	0.24 〃	0.17 〃

量はSUS431の3～4倍に達した。

詳細に見ると、摩擦挙動と密接な関係にある摩耗面の表面粗さにもピン材質の影響が顕著で、ピン材質によりブシュの初期摩耗状況に差が見られた。試験前の供試体はピンブシュとも表面粗さが異なっており、摩擦が繰り返されることにより表面粗さが一致してくる。表面粗さは一致後はSUS431，SCM430，SF55の順で大きくなった。特にSUS431には10^6回摩擦後も増加の傾向はなく、SF55に急激な立ち上がりが認められたのと対照的であった。

摩耗量の比較では、SUS431はピン＜ブシュである以外、SF55、SCMはピン＞ブシュであり、10^5回までの摩耗量はSUS431に対し、SF55が約4倍、SCMが約2倍であった。

ロ. ＳＥＭ（走査型電子顕微鏡）分析によれば、SUS431はSF55、SCM430mdyに比べ、ベースメタル（高力黄銅）の主成分であるＺｎ，Ｃｕのピンへの移着量が最も少なかった。

ハ. 摩擦係数は相手ピン材質によらず、ほぼ0.06～0.07であった。

これは固体潤滑剤PTFEの効果によると思われる。

ニ. 摩擦面近傍での温度上昇は、$5x10^3$繰返し摩擦後一定となり、室温＋8℃（SF，SCMの場合。SUSは＋5℃）で問題なかった。（摩擦面の温度上昇はPTFEの変成温度である約200℃以下であることが必要である）。

⇒以上より、すべり速度2mm/secでは、ピン材質はSUS431が望ましい。

補足） 本実験における摩耗現象について比較考察しておく。

摩耗度合いは材料表面の硬度が最も大きく影響する。

表3．4および3．6によるとピンおよびブシュのブリネル硬さ(HB)は下記のとおりである。また、参考のため、伸び(El)を併記した。

SUS431 HB=201，206 El=22，23.6

HB_5C_4 HB=240，247 El= -，20.8

揺動により摩耗が僅かでも進むと、いわゆる摩耗粉が発生する。この摩耗粉は加工硬化を受けており、相当硬度が上昇しているものと考えられる。この硬い粒子が軟らかい方の材料(ここではブシュのベースメタル)に埋め込まれるような挙動を示す。硬い粒子が相手

材表面に移着し、掘り起こし(プラウ)現象により摩耗が発生する。エメリー紙で擦られるような摩耗が誕生すると考えられる。一般に軸受材料には硬度差を設けて何れかの材料を摩耗させる設計を行う。同じ硬度であると、いわゆる「共金」と呼ばれるものと同様に「焼付き」を起こすことがある。

この現象については実験結果表３．９に示した摩耗量に現れている。

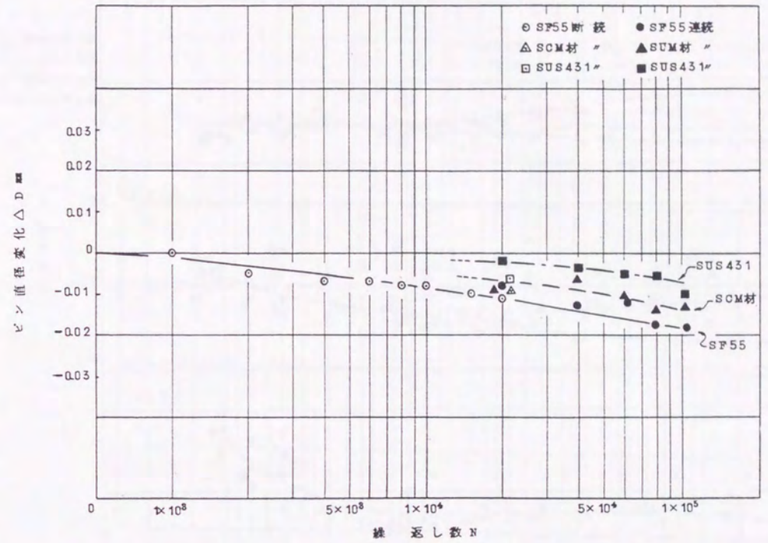


図３．７ａ　摩耗によるピン直径の変化

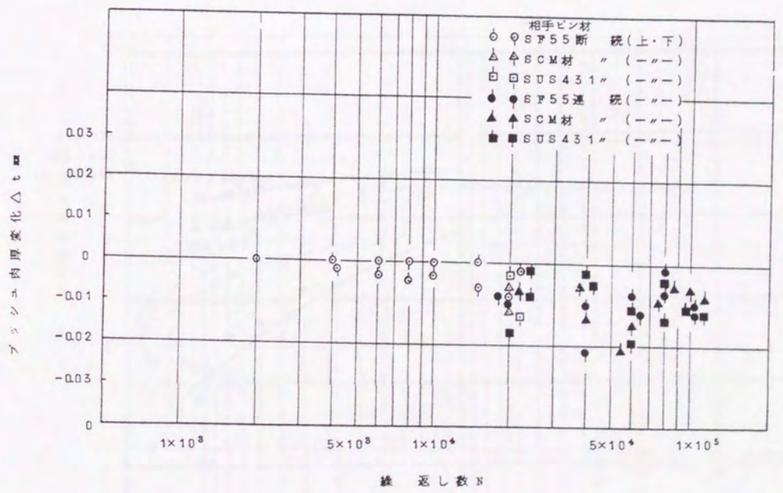


図３．７ｂ　摩耗によるブシュ肉厚の変化

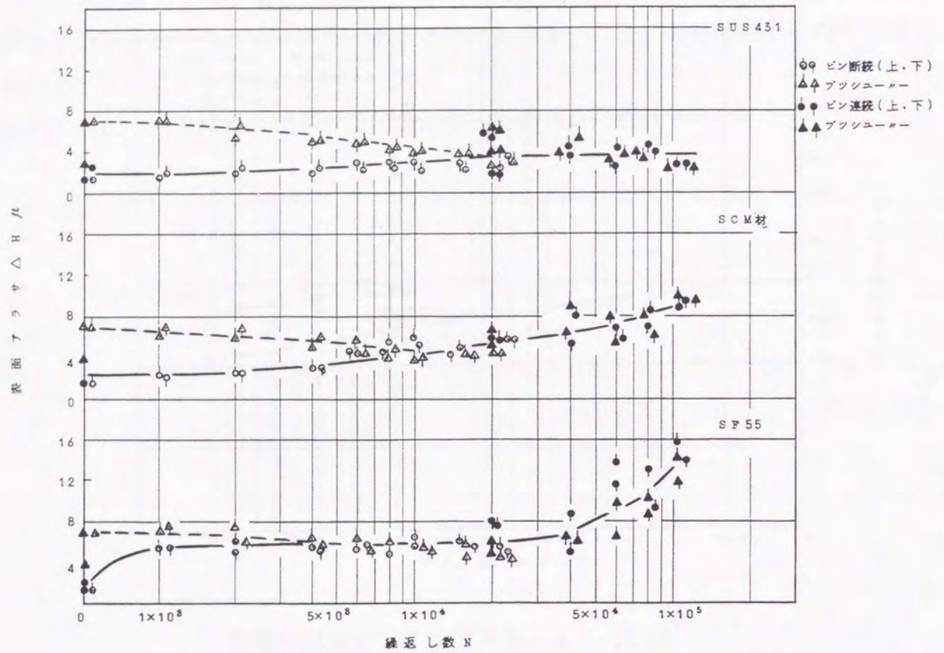


図3．8　繰返し摩耗によるピン・ブシュの表面粗さの変化

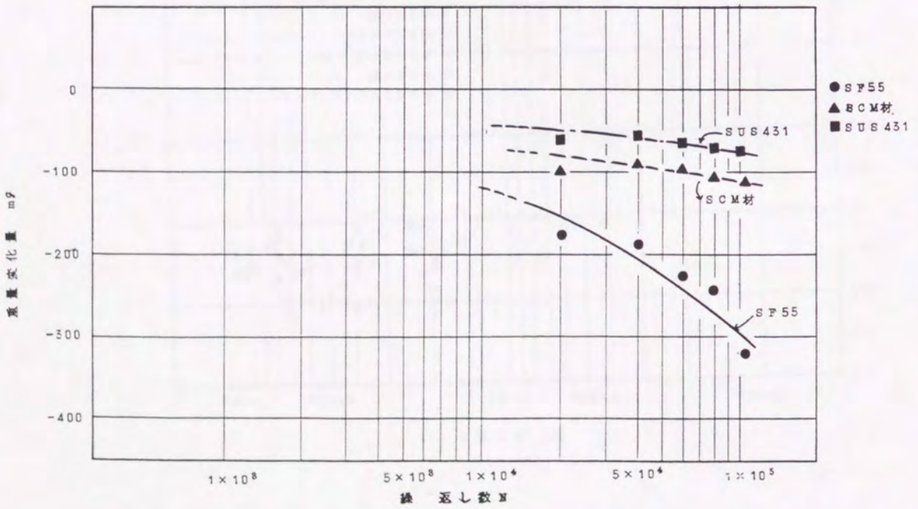


図3．9　摩耗によるピン重量の変化

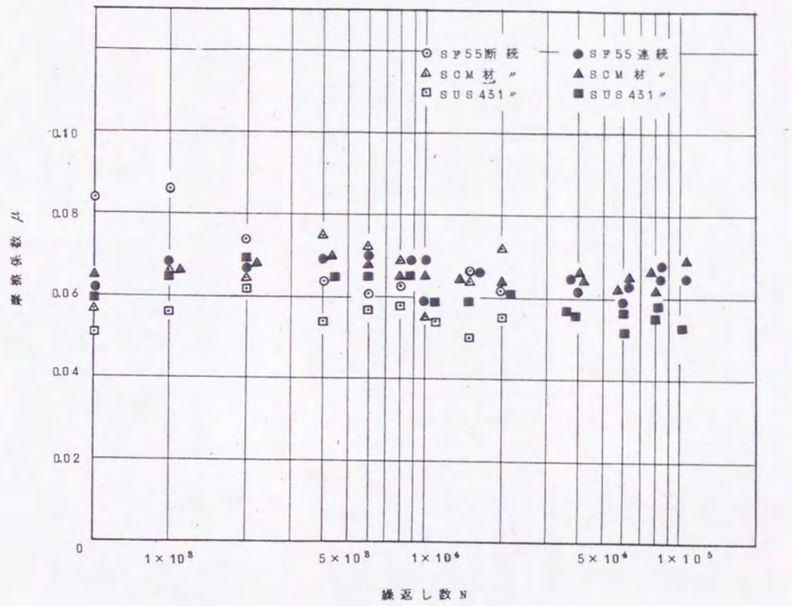


図3．10　繰返し数と摩擦係数の関係

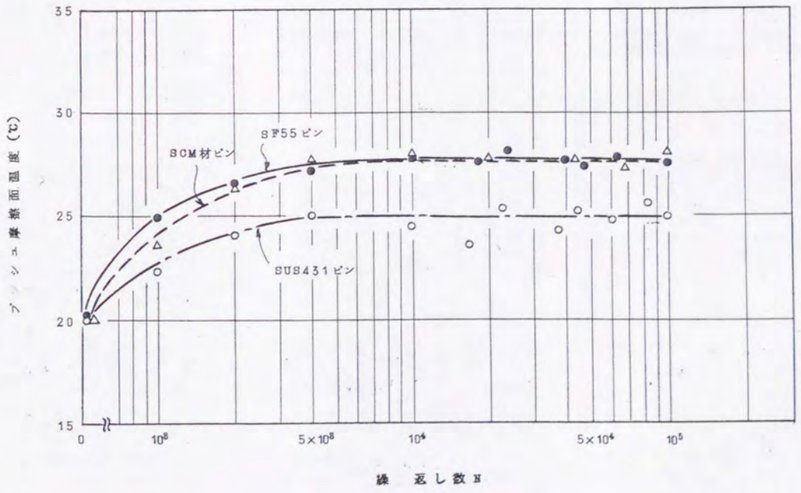
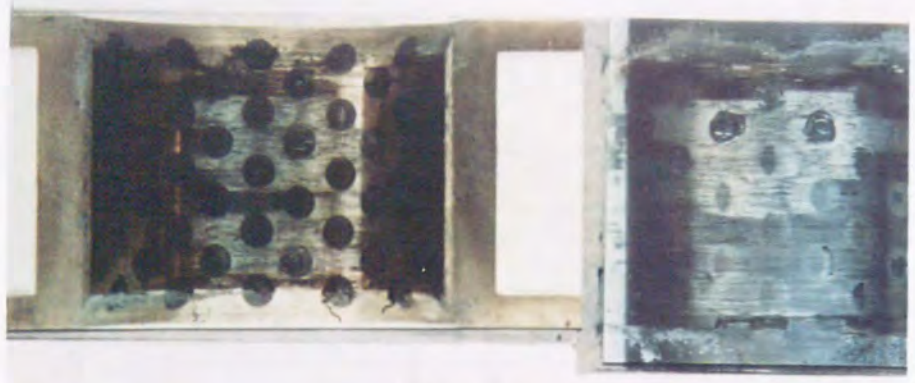
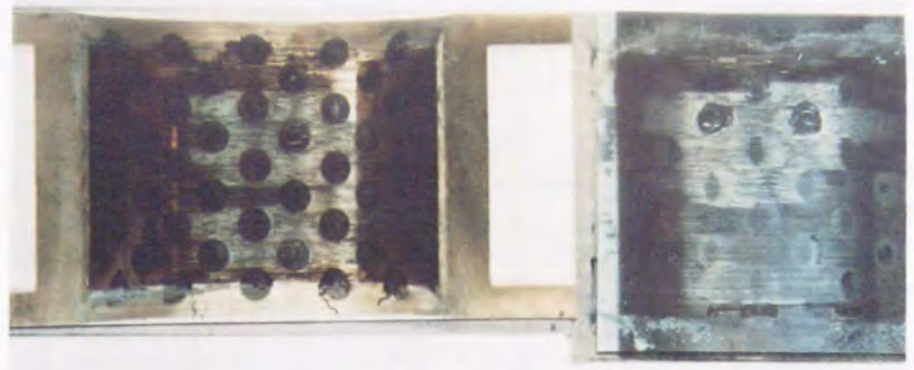


図3．11　摩擦繰返しによるブシュ摩擦面近傍の温度上昇

写真３．６　連続試験後のピン・ブシュ摩耗状況



10^5回



$2x10^4$回

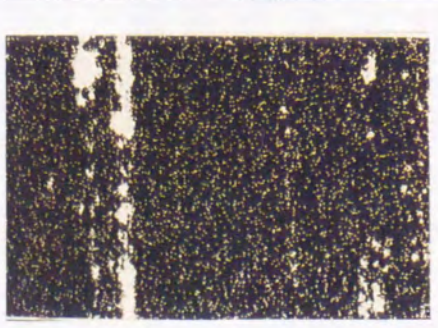
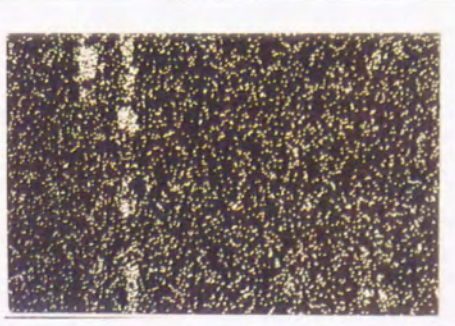
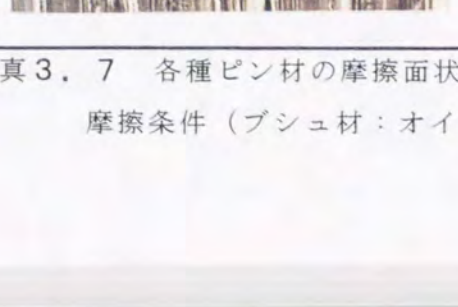
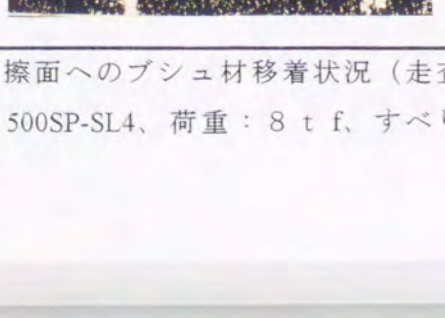
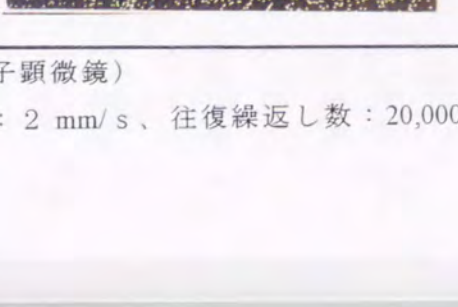
ピン材質	ＳＥＭによる摩擦面観察（２次電子像）ｘ５００	Ｃｕ面分析（左と同視野のＣｕＫα image）	Ｚｎ面分析（左と同視野のＺｎＫα image）
ＳＦ５５			
ＳＣＭ４３０－ｍｄｙ			
ＳＵＳ４３１			

写真３．７　各種ピン材の摩擦面状況と摩擦面へのブシュ材移着状況（走査型電子顕微鏡）

摩擦条件（ブシュ材：オイレス＃ 500SP-SL4、荷重：８ｔｆ、すべり速度：２ mm/ｓ、往復繰返し数：20,000 回）

2） 摩耗特性に及ぼす面圧の影響[6] [7]

前項により、ピン材質をSUS431に限定し、摩耗特性に及ぼす面圧の影響を調査した。

試験結果を図３．12～３．18に示す。

図３．12は、ピンおよびブシュの各面圧別表面粗さ変化量について示したもので、10^6回については概略評価線を記入した。1500kgf/cm^{2}では、粗さが大きく変化しているが、これを除くと最大10μ程度である。

図３．13は、10^6回までの各面圧別ピンの摩耗量を示した。1500kgf/cm^{2}では、摩耗量が多くなっているが、これを除くと最大30μである。

図３．14は、10^6回までの各面圧別ブシュの摩耗量を示した。1500kgf/cm^{2}では、摩耗量が多くなっているが、これを除くと最大40μである。

図３．15は、面圧1500kgf/cm^{2}の場合の各繰返し数における温度上昇について示した。520kgf/cm^{2}の場合より高いが、繰返し進行に伴う温度上昇は見られない。

図３．16は、各面圧における　2x10^3回摩擦後の温度上昇を示したものである。面圧520kgf/cm^{2}までは室温＋2℃程度であるが、面圧750kgf/cm^{2}となると温度上昇は室温＋4℃と高くなる。

図３．17は、各面圧における10^5回摩擦後の摩擦係数を示した。ただし、摩擦係数はすべり抵抗力を載荷荷重で除した見かけの最大摩擦係数を示している。

図３．18は、各繰返し数における摩擦係数の変化を示した。見かけの最大摩擦係数は図３．17に同じである。1500kgf/cm^{2}と面圧が上昇すると共に摩擦係数は下がる傾向であり、最大0.10と見られる。

写真３．８は各面圧における10^5回連続繰返し摩擦後のピン・ブシュ表面状況の拡大写真（ｘ５）を示す。

また、写真３．９ａは10^6回における300、520kgf/cm^{2}の、写真３．９ｂは10^6回における520kgf/cm^{2}の状況（拡大ｘ５）を示す。いずれもブシュに埋め込まれたPTFEがピン表面に移着し、潤滑膜を形成しているのが解る。

以上の結果から、面圧を130～1500kgf/cm^{2}に変化させた場合のピン材質SUS431とブシュの挙動は、以下のとおりであった。

イ．面圧の増加に伴ってピン・ブシュの摩耗量は比例的に増加したが、特定の面圧下で異常摩耗の挙動はなかった。

また、750kgf/cm^2, 10^6回までは異常な摩耗は見られなかった。

面圧の限界値を知るために実施した1500kgf/cm^{2}の試験では、520kgf/cm^{2}の場合に比し、３～４倍と大幅に摩耗量が増加し、実用には無理が認められた。

ロ．摩擦係数は低面圧（100kgf/cm^{2}前後）ほど高い値（高面圧ほど低い値）を示した。[注)]

[注)] これらの結果はPTFEの特性を確認したことに他ならない。

750kgf/cm^{2}以下では０．１以下であるが、1500kgf/cm^{2}では０．１を超えることがあった。これは温度上昇で見ると、750kgf/cm^{2}以下では４℃以下であるのが、1、500kgf/cm^{2}では約12℃の上昇となっていることよりも分かる。

面圧350、520kgf/cm^{2}で10^6回摩擦後の摩擦係数は約0.08であった。高面圧（1500kgf/cm^2）を含めても0.09を超えることはなかった。

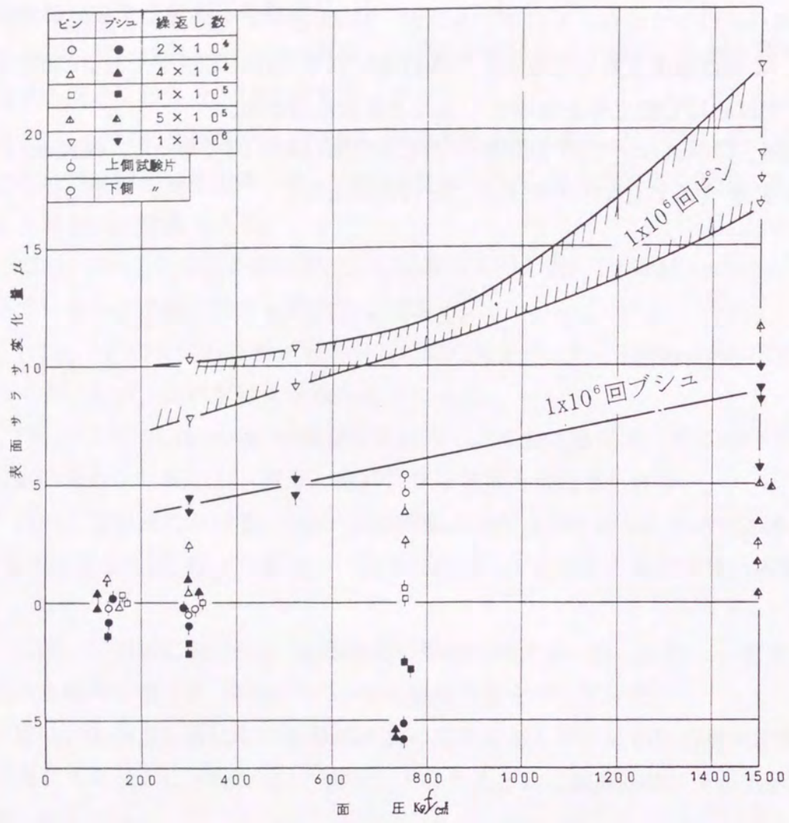


図3．12　各繰返し数における面圧と表面粗さ変化量の関係

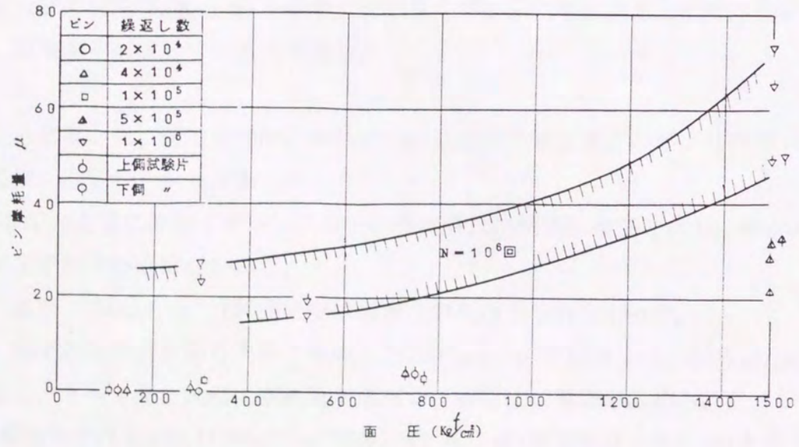


図3．13　面圧とピン摩耗量との関係

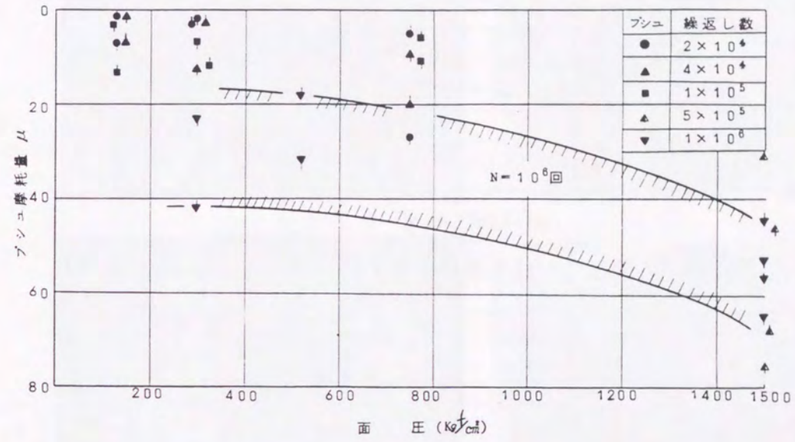


図3．14　面圧とブシュ摩耗量との関係

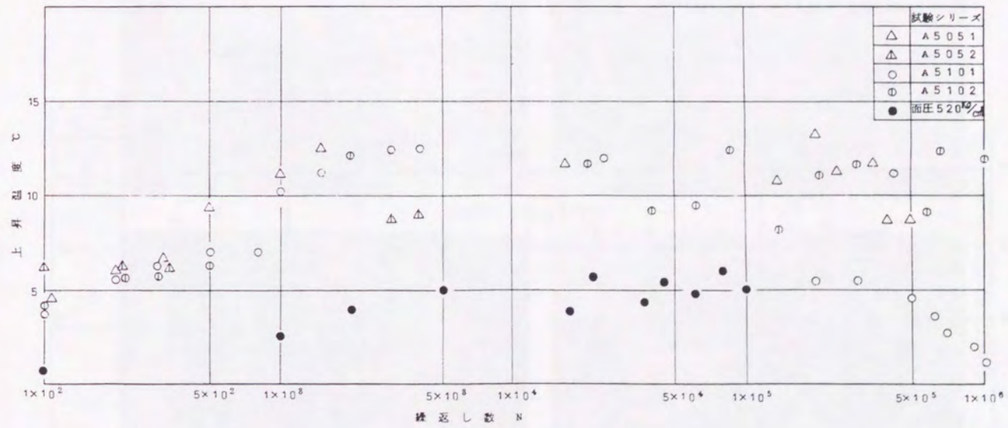


図3．15　各繰返し数における温度上昇
(A5051, A5052：5 x 10^5回試験面圧1500kgf/cm^2
A5101, A5102：10^6回試験面圧1500kgf/cm^2
参考に520kgf/cm^2を併記)

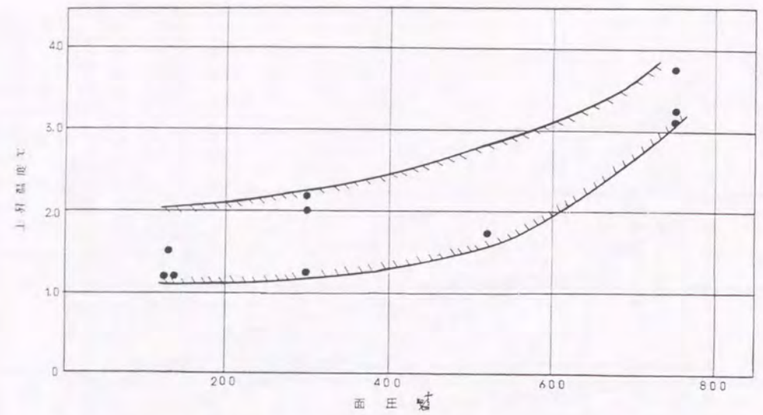


図３．16　各面圧における摩擦面直下の温度上昇（2x10^{3}摩擦後）

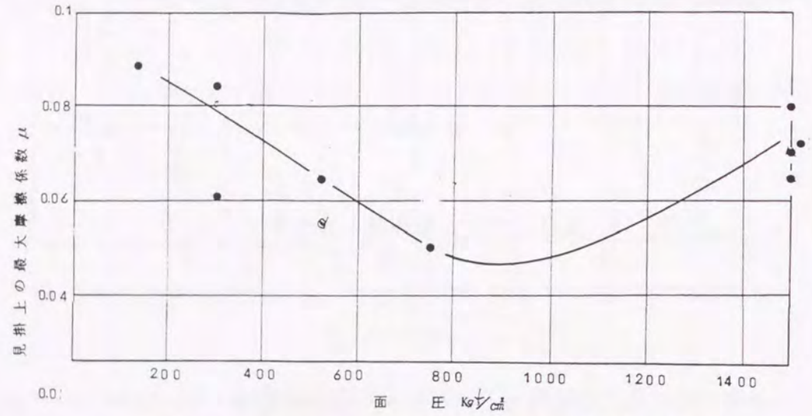


図３．17　各面圧における摩擦係数の変化(10^{5}回摩擦後)

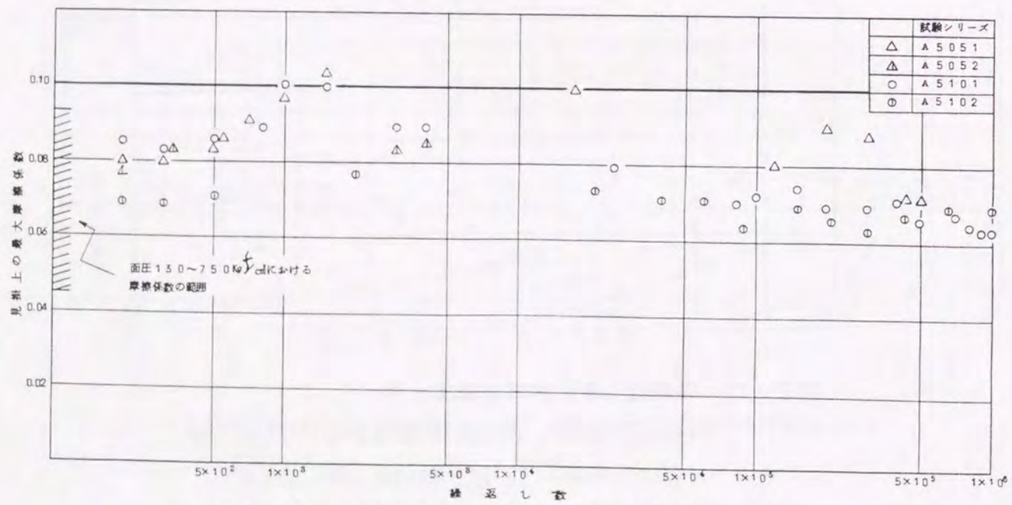


図３．18　各摩擦繰返し数における摩擦係数の変化

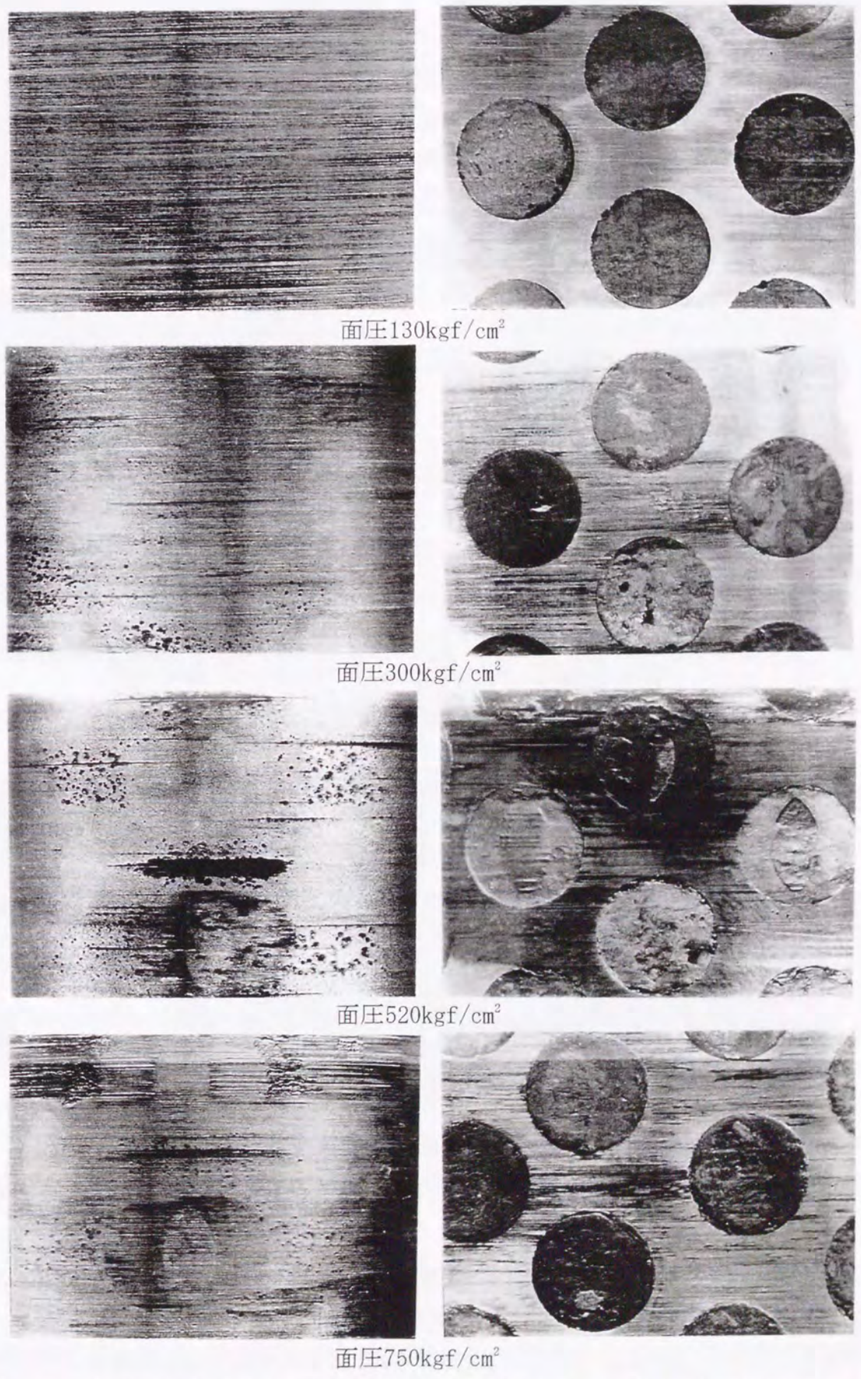
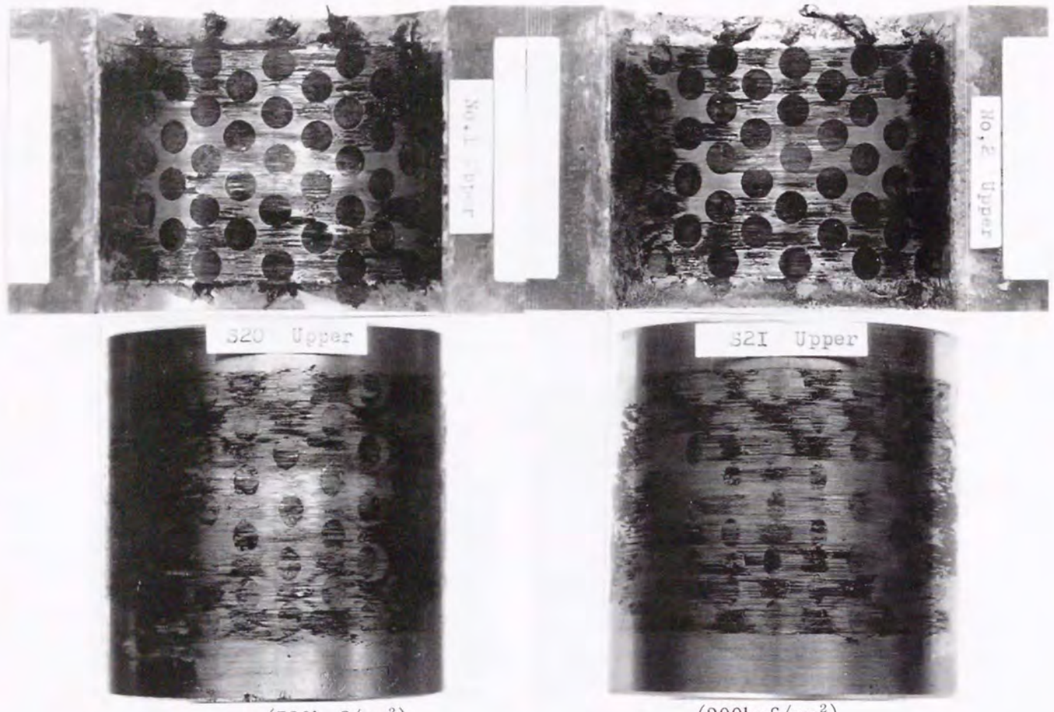
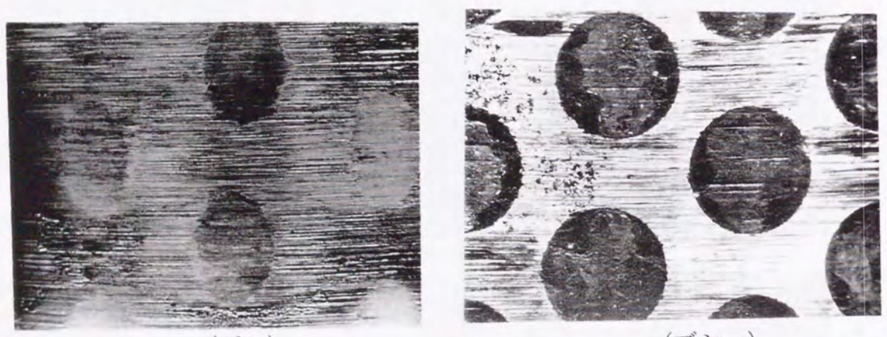


写真３．８　各面圧における10^{5}回連続繰返し摩擦後のピン・ブシュ表面状況（ｘ５）



(520kgf/cm²)　　(300kgf/cm²)

写真３．９ａ　面圧300、520kgf/cm²における10⁶回連続摩擦後のピン・ブシュの摩耗状況



(ピン)　　(ブシュ)

写真３．９ｂ　面圧520kgf/cm²における10⁶回連続摩擦後の
ピン・ブシュの表面状況（ｘ５）

ハ.なお、初期摩耗時には一時的に0.10を超えることがあった。これは、支承組立時に別途初期摩耗対策すれば問題は少ないと考えられる。

⇒以上より、すべり速度２mm/secでは、設計(平均)面圧は500kgf/cm²程度とすることを提案する。

３）摩耗特性に及ぼすすべり速度の影響[10][11]

PTFEの場合は,すべり(摩擦)速度が速くなればなるほど摩擦係数は高くなり、工学的に使用不能となる。筆者が行ったAppendix A３に示す別途試験では、概ね10mm/sec超では摩擦係数は0.1を超えることを確認している。これについては、タワーリンクの開発研究において計画当初は既往データより判断していたが、後に吊橋のスプレイサドルへのPTFE支承板部への適用性で別途実験を行い、その特性を確認したものである。図３．19(Ａ３図Ａ３．２に同じ)参照。今回の試験条件は２mm/sであり、実機において多少の変動があっても問題ないと考える。

その他,PTFEの面圧特性、摩擦特性等詳細はAppendix A３を参照されたい。

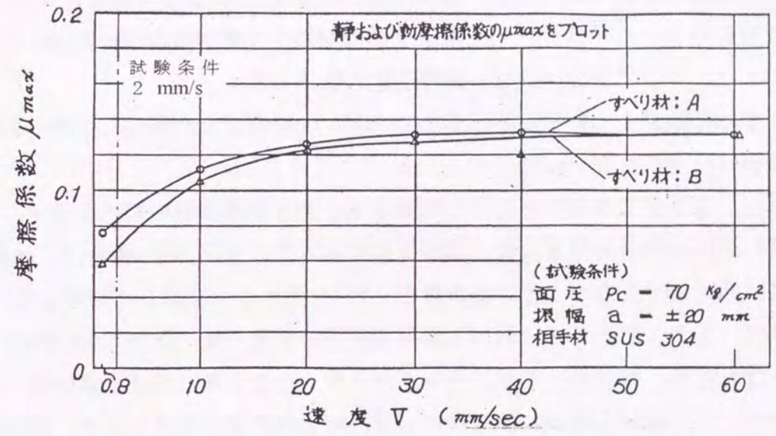


図３．19　摩擦係数に与えるすべり速度の影響(Appendix A３図Ａ３．２参照)

４）摩耗特性に及ぼすクリアランスの影響[6]

クリアランス(径比、径差)の影響確認用供試ピンの形状を図３．20に示す。

試験方法等は前項までの試験と同様である。

なお、径比の定義については**(５)試験項目③**に示した。

試験結果を図３．21～３．27に示す。なお、図３．22、３．23ｂおよび３．27には、材料、面圧特性試験におけるφ60のデータも併記した。

図３．21は、ピン径φ60すなわちクリアランスのない場合の１x10⁵回まで繰返し試験による各面圧における摩擦係数を示す。面圧300kgf/cm²については10⁶回も併記し、520kgf/cm² については10⁶回までを記した。

520,750kgf/cm²の5x10⁵回以上では、繰返し数に関わらずほぼ同等な値で推移している。

図３．22は、各クリアランスにおける摩擦繰返し数と表面粗さの関係を示す。10⁵回までのピン径φ58､57では表面粗さが高くなったため、10⁶回はピン径φ60､59について実験している。

ピン径φ58、57では表面粗さが相当高く、実用には不向きである。ハッチングで示したピン径φ60、59では繰返し数の増大と共に表面粗さは比例的に大きくなる傾向が見られる。

図３．23ａは、クリアランスとピン摩耗量の関係を示す。

ハッチング部分は$N \leqq 10^5$の傾向を大まかに示したもので、ピン径がφ58、57になるとピンの摩耗量は増大することが解る。

図３．23ｂは、クリアランスとブシュ肉厚変化の関係を示す。

図示方法はピント同様であるが、ブシュの場合の方が径差の影響がより大きい。

図３．23ｃは、クリアランスとブシュ重量変化の関係を示す。

ばらつきはあるが、径差が大きくなるとブシュの重量変化は大きくなる傾向である。

図３．23ｄは、クリアランスとピン重量変化の関係を示す。

ピンの重量変化というパラメータでは余り明確な傾向は見られなかった。

図３．23ｅは、クリアランスとピン直径変化の関係を示す。

重量変化では傾向がよく判らなかったため、ピンの直径変化で表示してみたが、クリアランスの影響は、見られなかった。

図３．24は、各クリアランスにおける摩擦繰返し数と摩擦係数の関係を示す。

φ57では2×10^3回付近で非常に高い摩擦係数を示した。φ58、59の場合は、最高値はφ57と同様2×10^3回付近であるが、その後下降し、10^5を超えると安定して推移した。

図３．25は、各クリアランスにおける摩擦面直下の温度上昇（2×10^3回摩擦後）を示す。

ばらつきはあるが、相対的にクリアランスが大きくなると共に温度上昇は高くなった。

図３．26は、ピン直径と摩擦試験後ブシュ表面の接触角度の関係を示す。接触角度は３点の計測値の平均で示した。

径差が大きくなると接触角度が小さくなった。これは言い換えると接触圧力が高くなっていることを示している。

図３．27aは、接触幅測定結果より求めた許容支圧面圧におけるブシュの摩耗量を示す。

これによるとブシュの肉厚変化で表した摩耗量は、面圧の増大と共に比例的以上に大きくなることが解る。

図３．27bは、接触幅測定結果より求めた許容支圧面圧におけるピンの摩耗量を示す。

ブシュの場合と同様な結果を示した。

以上の試験結果から

・ブシュの内径を60mmφと一定とし、SUS431ピンの外径を59、58、57mmφとしたときのピンの摩耗量は、ピン径がφ58、57になると増大する。

・表面粗さは、φ57及びφ58においては摩擦初期の段階で大きく変動し、好ましくない。

10^5回以下では、径比が1.034以上になると見かけ上の面圧増加などにより、摩耗量の増加が著しくなる。特に、径比が1.053の場合、ピン、ブシュの摩耗量とも60mmφピン

の２～３倍となる。

この傾向は、クリアランス増加に伴う接触中心角が減少し、見かけ上の面圧の増加が原因の１つと考えられる。

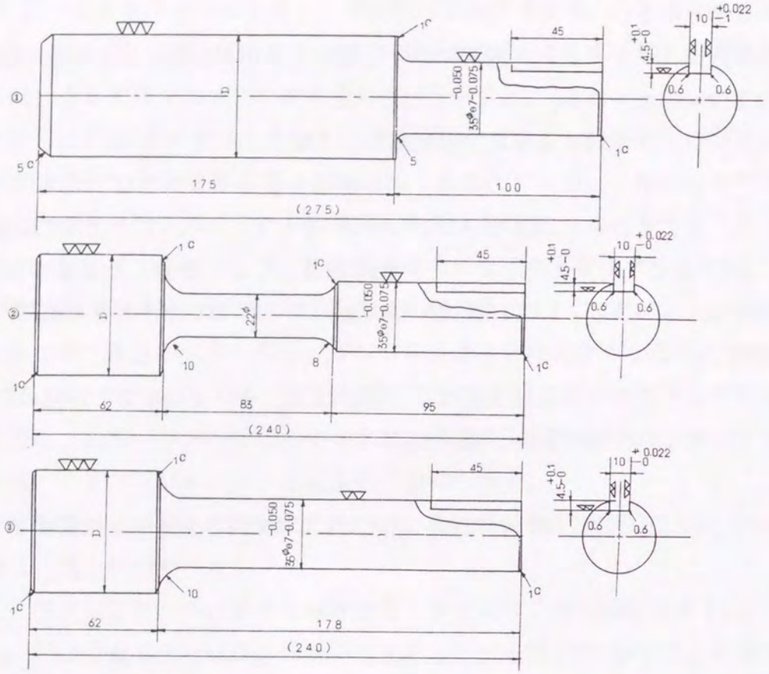
各クリアランスに対する平均接触角度は、下記のとおりである。

クリアランスが１．００３の場合、平均接触角度は７５～９０°（1.0）であった。同様に、１．０１７の場合は４０～５５°（60°として1.45）、１．０３４の場合は３５～４５°（30°として4.1）である。（ ）内は表３．７から計算した面圧の比率である。

・摩擦係数は、φ58及びφ59では最大0.10，φ57のそれは0.15と大きく実用的でないと考えられる。

・各クリアランスにおける温度上昇は、φ60に比し、φ57では＋２℃が認められたが、最高で７℃の増で、径差の影響が現れた。

⇒以上より、すべり速度２mm/secでは、径比は1.034未満とすることを提案する。



試験シリーズ	D
A1002②, A1004②, A1010① A2002②, A2004②, A2010①, 2100② A3100② A4002③, A4004③, A4010③	$60\phi_{h7}{}^{+0}_{-0.030}$
B1002②, B1004③, B1010①, B1100①	$59\phi_{h7}{}^{+0}_{-0.030}$
B2002③, B2004③, B2010①	$58\phi_{h7}{}^{+0}_{-0.030}$
B3002③, 3004③, B3010③	$57\phi_{h7}{}^{+0}_{-0.030}$

(注) ○内数字は試験に使用したピンナンバーを示す。

図3．20　クリアランスの影響確認用供試ピン形状

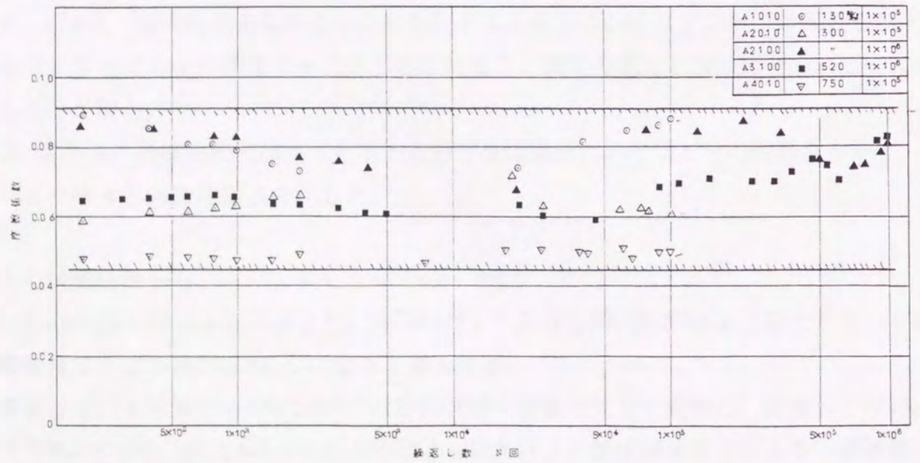


図3．21　各面圧における摩擦係数

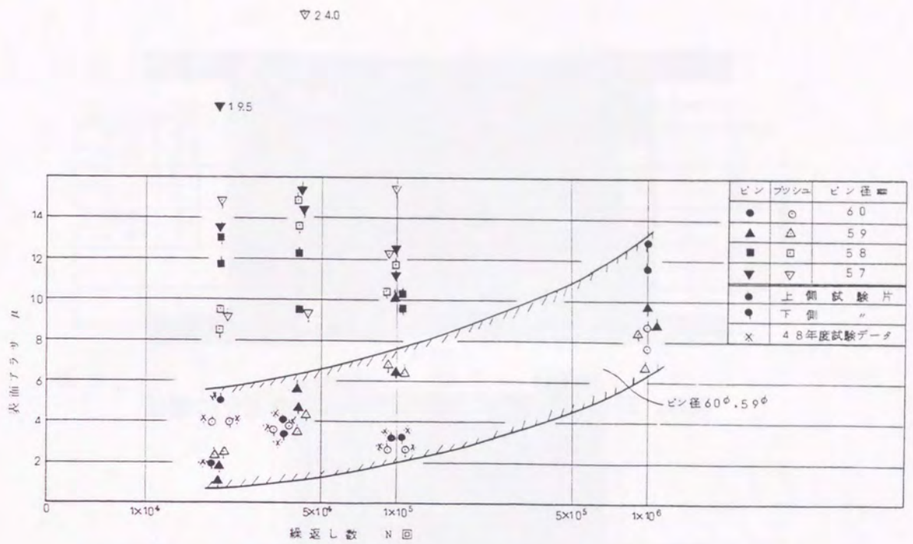


図3．22　各クリアランスにおける繰返し数と表面粗さの関係

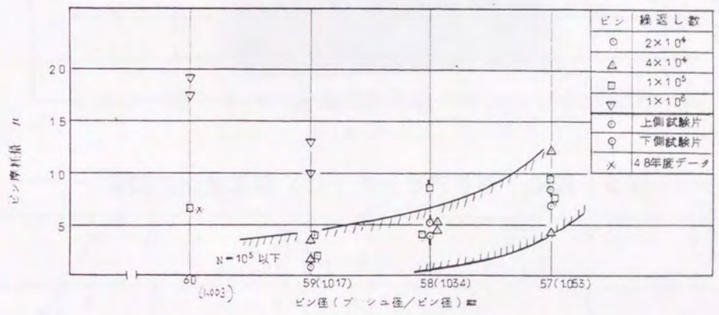


図3．23a　クリアランスとピン摩耗量の関係

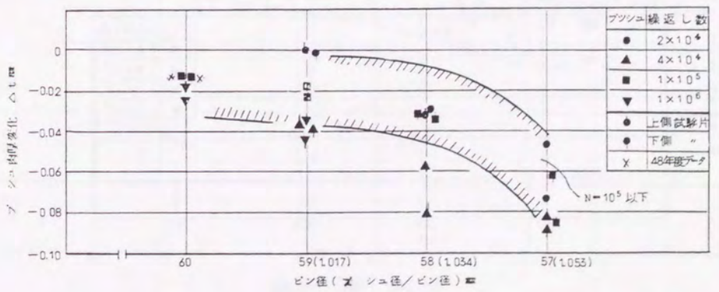


図3．23b　クリアランスとブシュ肉厚変化の関係

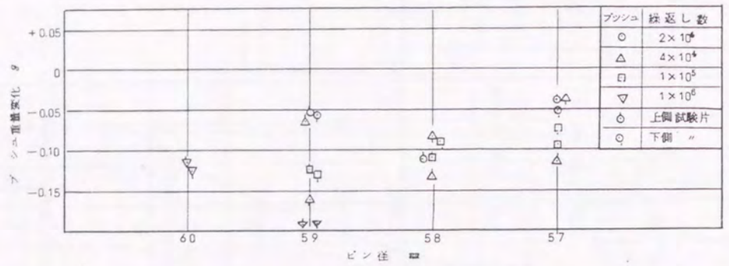


図３．23ｃ　クリアランスとブシュ重量変化の関係

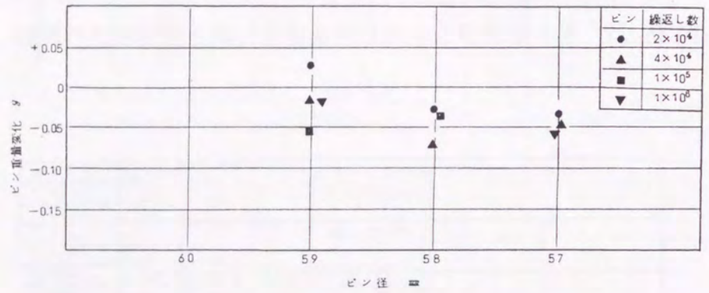


図３．23ｄ　クリアランスとピン重量変化の関係

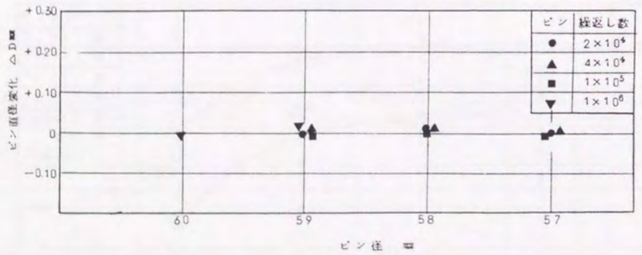


図３．23ｅ　　クリアランスとピン直径変化の関係

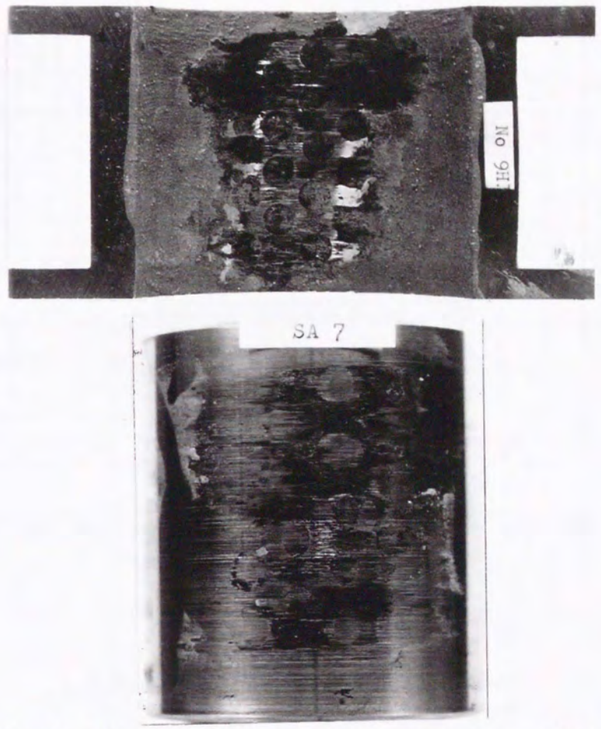


写真３．10　4x10⁴回連続試験後のピン・ブシュ摩耗状況（φ５７）

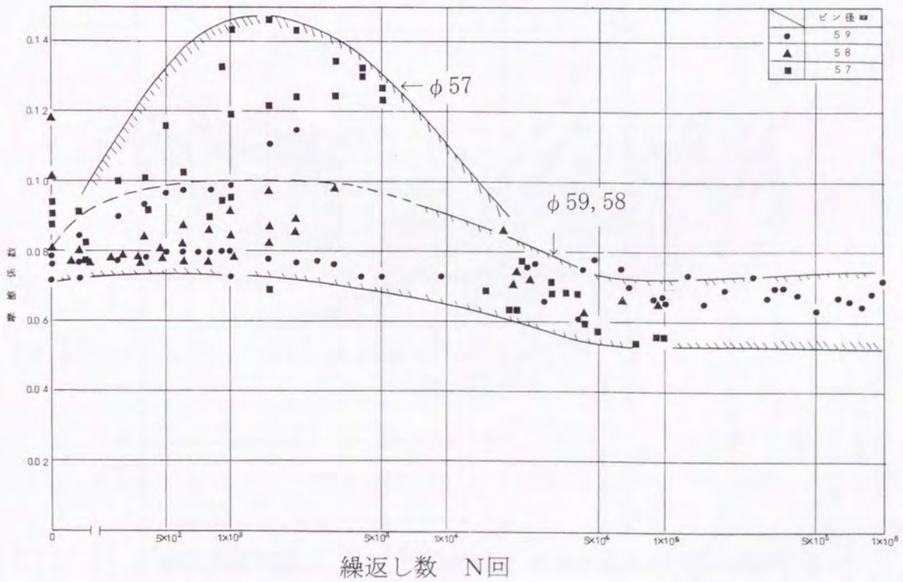


図３．24　各クリアランスにおける繰返し数と摩擦係数の関係

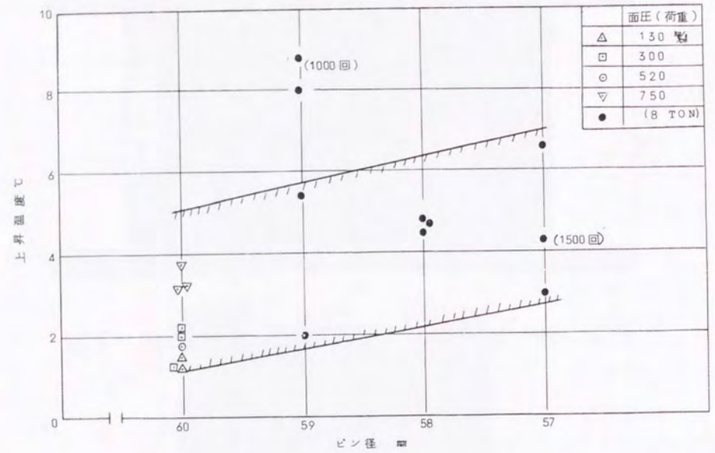


図3．25　各クリアランスにおける摩擦面直下の温度上昇（$2x10^3$回摩擦後）

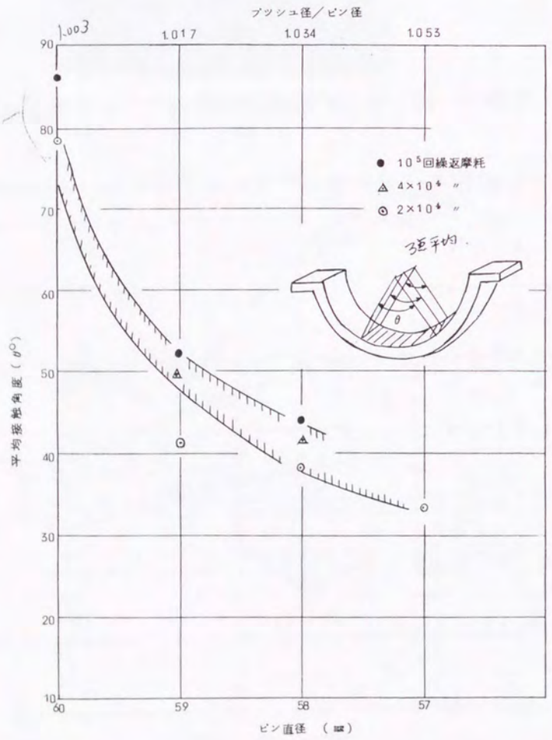


図3．26　ピン直径と摩擦試験後ブシュ表面の接触角度の関係

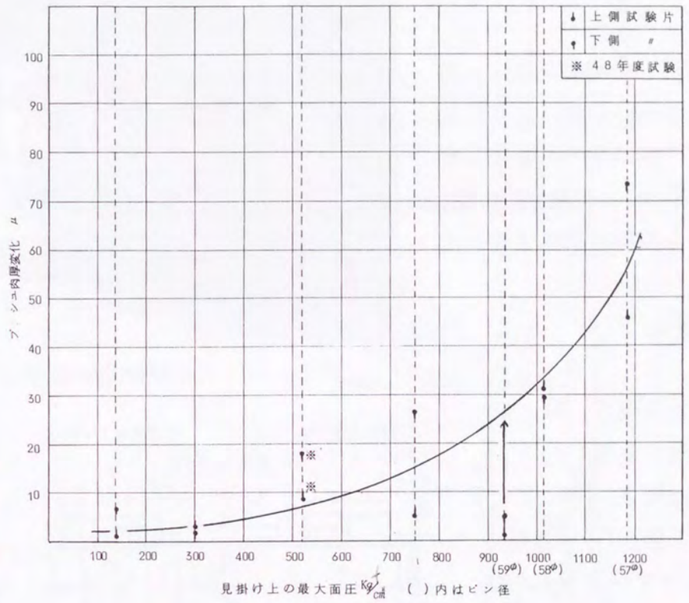


図3．27a　接触幅測定結果より求めた許容支圧面圧におけるブシュの摩耗量
（$2x10^4$回試験、750kgf/cm²以下は接触角$\phi=0\sim\pi/4$として計算）

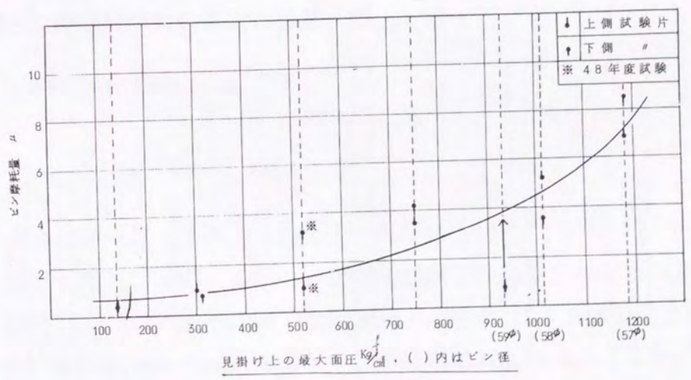


図3．27b　接触幅測定結果より求めた許容支圧面圧におけるピンの摩耗量
（$2x10^4$回試験、750kgf/cm²以下は接触角$\phi=0\sim\pi/4$として計算）

3．3．2 大型模型による確認試験

（1）実験目的

φ60mm小型試験の結果を基に、選定した材料の組み合わせにより摩耗特性に及ぼす寸法効果の影響を調査する目的でφ330mmの試験を行った。

試験結果から実機の摩耗予測を行う。



写真3．11　大型試験用三軸受型試験機

（2）摩耗試験機

大型試験では写真3．11に示す三軸受型試験機を使用した。

この試験機は図3．28に示すように、同時に3箇所(中央載荷点、左右の軸受部)でデータが得られる構造である。載荷荷重は中央載荷点250t、左右支点125tである。

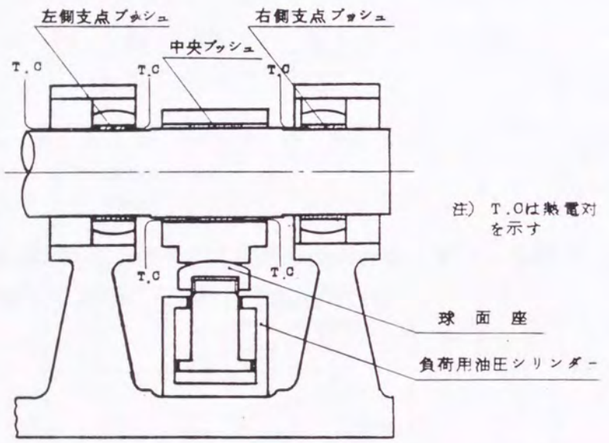


図3．28　載荷方法及び供試体配置図(大型試験)

（3）供　試　体

1）試験用ピン

試験機能力からピン径はφ330mmとし、比較的小径のためピンは充実材を使用した。

表3.10aに供試ピンの化学成分と機械的性質を、図3．29aに試験片形状を示す。

供試体は、中央載荷部をφ330mmとし、軸受部は1mmの径差(径比＝330/329＝1.003)を設けてφ329mmとする。これは、試験機仕様の中で特定の面圧(500、350kgf/cm²)を設定し、最大寸法を採用したものである。

また、試験機の載荷方法より同時に3箇所のデータを採取した。

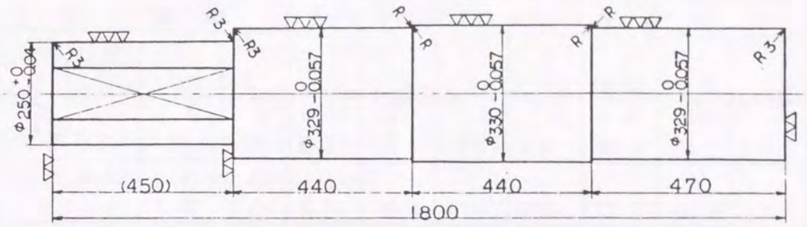


図3．29a　供試体（ピン）の形状(大型試験)

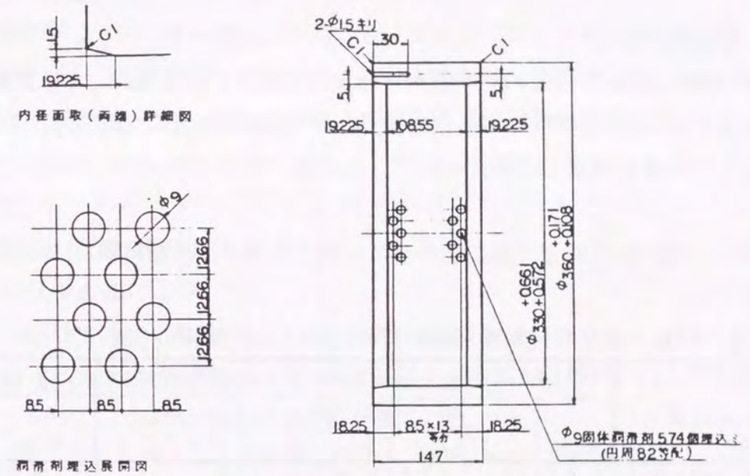


図3．29b　供試体（左右支点ブシュ）の形状(大型試験)

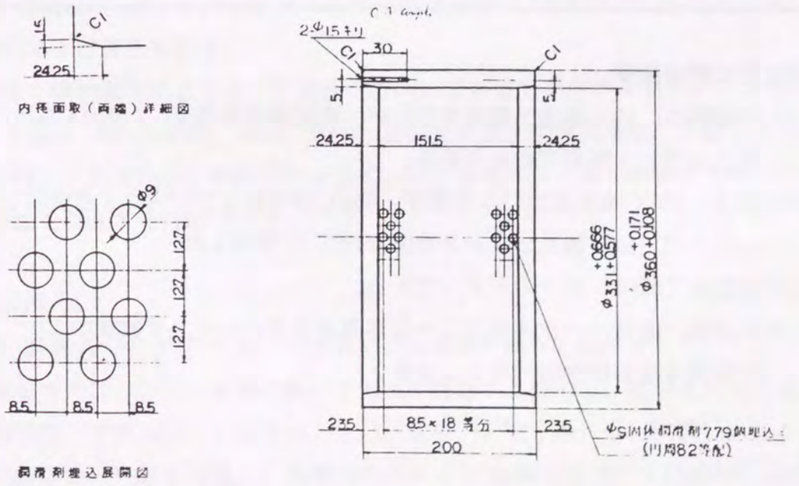


図3．29c　供試体（中央ブシュ）の形状(大型試験)

表３．10ａ　大型摩耗試験用供試材の化学成分と機械的性質（ピン）

ピン	化学成分（レードル分析：wt%）							機械的性質				
材質	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm²	σ_B kgf/mm²	El %	RA %	HB
JISG 4303	≦ 0.20	≦ 1.00	≦ 1.00	≦ .040	≦ .030	1.25 ≦ 2.50	15.0 ≦ 17.0	≧ 60	≧ 80	≧ 15	≧ 40	≧ 229
SUS431③	0.14	0.39	0.72	.029	.013	1.68	16.9	55.1	76.9	25.0	58.9	228
	0.14	0.39	0.72	.029	.013	1.68	16.9	54.3	78.7	24.6	59.0	230

注）ここに、SUS431③は供試体φ330用。
機械的性質の上段はIngotのTop、下段はBottomの値である。

2）試験用ブシュ

表３.10ｂに供試ブシュの化学成分・機械的性質を、図３.29ｂ，ｃに試験片形状を示す。

ピンとブシュのクリアランス（径比）は、小型試験の結果を踏まえ、かつ、製作・試験片組立上の余裕を考慮して約1.005(ブシュ内径／ピン外径＝330.63/329.03=1.00486)とした。

なお、小型試験の場合は組立上から２分割としたが、大型試験では実機と同じ円筒形ブシュとした。

表３．10ｂ　大型摩耗試験用供試材の化学成分と機械的性質（ブシュ：高力黄銅）

ブシュ材質	化学成分（レードル分析：wt%）							機械的性質		
	Mn	Cu	Al	Fe	Sn	Pb	Zn	σ_B kgf/mm²	El %	HB
規格（ASTMB22 Alloy863）	2.5/ 5.0	60/ 68	3.0/ 7.5	2.0/ 4.0	≦ 0.20	≦ 0.20	Bal	≧77.0	≧12	≧ 223
実績３（φ330）	3.44	64. 71	6.14	2.98	0.08	-	22. 65	83.4	16	223

3）供試体の製造要領

ａ．ピンの溶解は、10ｔ塩基性電気炉で行い、真空鋳造を経て、2,000ｔ水圧プレスで鍛造した。鍛造比はピン胴部で約４である。

熱処理は、950℃強制空冷による焼準、635℃空冷および炉冷による焼戻しとした。

ｂ．ブシュについては、製品オイレス#500SP1-SL4を使用した。

主要な製造工程は、以下のとおりである。

材料溶解→鋳造→一次機械加工→固体潤滑剤埋込→仕上げ機械加工
→固体潤滑剤薄膜塗布→ブシュ完成

（4）試　験　方　法

1）試験面圧の設定

試験条件は、設計最大面圧を考慮して中央載荷点でＰ＝500（P_{max}=800）kgf/cm²、左右両支点で常用値Ｐ＝350（P_{max}=560）kgf/cm²を設定した。

250,000kgf／33×15.15＝500kgf/cm²

125,000kgf／32.9×10.855＝350kgf/cm²

2）試験揺動速度の設定

PTFEの速度特性から、すべり速度を上げることは安全側のデータを得ることになる。

速度のオーダーとしては、既往データではほとんど影響がない範囲である。以上から、今回は、試験時間を短縮するため、所要計算値より速い速度で試験を実施する。

3）主要測定項目

本試験における主要な測定項目を以下に示す。

① 負荷荷重：油圧検出器による。

② 摩擦抵抗力：揺動アームに取り付けたロードセルによる。

③ 温　度：ブシュ摩擦面近傍(摩擦面下３mm)温度および室温をC.A熱電対により測定。

④ 摩耗量：ピン・ブシュの試験前後の寸法変化量による。
ピン径はマイクロメータ、ブシュ径はシリンダゲージによる。

⑤ 表面粗さ：試験前後の状況を触針式表面粗さ計により測定。

⑥ 揺動速度および揺動振幅：変位計および揺動振幅指示目盛により測定。

⑦ 摩耗粉：試験終了後、ピン・ブシュの摩耗粉を採取し、外観写真、顕微鏡写真の撮影および重量を測定。

⑧ たわみ量：静的載荷によるピンの軸直角方向たわみ量をダイヤルゲージにより測定。
荷重は、50t、100t、150t、200t、250tとする。本供試体は、実機と異なり、実験上、断面性能の割にピンが長く、トライボロジー面で実験データに与える影響を調査する目的で行う。

4）試験のケース

2.4x105回（試験Ａ）および10^6回（試験Ｂ）の２種類の繰返し試験とした。

異なる接触面での二つのデータを一組のＴＰより採取する目的で、試験ＡとＢの２種類の試験を実施した。ＴＰのセット組立は，Ａの試験後、天地を逆にし、試験Ｂとした。

さらに、試験期間の短縮を考慮し、長期間の試験10^6の試験Ｂについては約20%(2x1.2=2.4mm/s)すべり摩擦速度を増して行った。

表３．11　大型摩耗試験機の仕様と実機仕様（ピン）

	実　機（南備讃瀬戸Ｂr）	φ６０小型試験	φ３３０中央支点 試験Ａ $2.4x10^5$	φ３３０中央支点 試験Ｂ 10^6	φ３３０左右支点 試験Ａ $2.4x10^5$	φ３３０左右支点 試験Ｂ 10^6
最大荷重時最大面圧 P_{max}(kgf/cm²)	520	1,500	800		560	
最大荷重時平均面圧　P(kgf/cm²)	330	940	500		350	
最大荷重　F (t)	4,000	23.6	250		125	
ピン直径　D(mm)	1,300	60	330		329	
軸受有効長Ｌ(mm)	950	42	151.5		108.55	
揺動角度　(°)	3.8	3.8	3.5		3.5	
摩擦全振幅 (mm)	42.5	4	10		9.97	
平均すべり速度 (mm/s)	～2.13	2.0	2.0	2.4	1.99	2.39

実施設計値を基に定めた試験仕様を表３．11に示す。

(5)　試 験 結 果

試験結果の一部を図３．31～３．37、表３．12および写真３．12～３．13に示す。

図３．31に、試験Ｂ(10^6回まで実施)における荷重(上段)、摩擦係数(中段)、温度(下段)の推移を示す。荷重調整を行っているため荷重変動は見られるが、摩擦係数、温度については安定して推移している。試験Ａ($2.4x10^5$回まで実施)も同様であった。

摩擦係数は、試験中断後の再開時(起動時)に立ち上がりが認められるが、最大でも0.10以下である。温度は最大約50℃(室温＋30℃)で室温に併せて変動している。

図３．32は、載荷によって発生するピンの軸直角方向たわみ量を示した。50t刻みで250tまで載荷した場合の鉛直方向(ピン軸直角方向)たわみを表したもので、図３．32ａに試験Ａの結果を図３．32ｂに試験Ｂの測定結果を示す。

実線は増圧時、破線は減圧時の場合で、供試体の設定クリアランスおよび製作誤差により増圧時の方が高い値となっている。

250tの場合には、計算値も併せて示したが、計算値より測定値の方が大きい値を示した。これは、変断面の影響、載荷幅および支点部のバネ定数などが微妙に影響したものと考えられる。

図３．33は、摩擦係数について、小型試験の結果(図３．17)に大型試験の結果をプロットしたものである。

図３．34に、試験Ｂ10^6回後の供試体ピン・ブシュの寸法変化量を各支点毎に示したものである。本図によると、ピン中央部で移着による断面太りが見られる。摩耗粉を無理に

除去すると正常断面を傷め、測定値を大きくするため、そのまま表示をした。

図３．35に、比摩耗量と摩擦距離との関係を示した。

ここに、比摩耗量は次式（７）で示される。詳細は、Appendix A1⑬に示した。

比摩耗量Ws＝摩耗体積W／単位荷重P／単位摩擦距離L・・・・・・・・・・・・（７）

なお、本論文では摩耗体積Wに摩耗寸法(mm)を採用した。これは測定対象量が極小さな値となるため測定精度上から寸法変化量を求め、摩耗断面積を計算した。

図３．36に、比摩耗量と支圧応力度との関係を示した。

表３．12　に大型摩耗試験の結果を示す。

実施した試験Ａ，Ｂについて、摩擦係数、ブシュ上昇温度、軸方向平均摩耗量および各ケース毎の比摩耗量の計算結果を示した。また、比較参考値としてφ６０小型試験の結果も併示した。

試験は、$2.4 x 10^5$回繰返しの試験Ａおよび$1 x 10^6$回繰返しの試験Ｂとも良好な摩耗状態でで推移した。よって写真は$1 x 10^6$回繰返し試験Ｂについて示す。

写真３．12に、試験Ｂにおける試験前と$1 x 10^6$回繰返し試験後のピンの状態を示す。

写真３．13に、試験Ｂにおける試験前と$1 x 10^6$回繰返し試験後のブシュの状態を示す。

以上の結果より、下記の結果を得た。

イ．摩擦係数に及ぼす面圧の影響

10^6回までの面圧を変化させた場合の摩擦係数は、0.07～0.08であり、0.10を超えることはなかった。

また、小型試験の結果と併せて見た場合、多少の試験条件の差異はあるものの、摩擦係数としては充分な結果が得られている。

ロ．試験中の温度変化

摩擦面近傍温度は、室温＋20～30℃で、小型試験時よりは高いが安定状態で推移した。

ハ．面圧と摩耗量（寸法変化）の関係

摩耗量として平均寸法（径）変化量は、ピンで0.03mm，ブシュで0.18mmと少なかった。

ニ．面圧分布形状（ピン・ブシュの接触角）の測定結果

ピンとブシュの接触角は、90±20°程度で、設計で考慮した分布形状に大差無い結果であった。

ホ．試験後の摩擦面の状況変化

試験後の摩擦面の状態は、2.4×10^5回および10^6回の試験結果では、摩擦面の異常、著しい差は認められなく、PTFEの潤滑状況も安定していた。

試験中も試験後の摩擦面の状況からも微動摩耗やStick Slipが発生した模様はない。

(6) 摩耗量の考察

1) 実験から求めた比摩耗量

同一のピンとブシュの組合せであっても、部材の寸法、形状、面圧、摩擦速度、繰返し回数、潤滑方法などの摩擦条件および環境条件などの諸因子の影響を受けて大きな差を生じることがある。条件の異なる摩耗試験の結果は比摩耗量で整理すると摩耗の程度が相対比較できる。

摩耗については諸因子の影響を受けるため、比摩耗量で表し、かつ、そのオーダーで評価するのが妥当である。例えば10^{-7}のオーダーであれば摩耗しにくい材料の組合せと判断できる。今回の試験では、安全側に見積もったケースでも最大0.285($x10^{-7}$mm／kg/cm²／m)程度であり、表3．13に示した既往データに比較して妥当な値と考えられる。すなわち、10^{-8}オーダーのため十分な値と評価した。

この比摩耗量については、摩擦距離が長くなる(設計の想定以上に摩擦繰返し数が多くなった場合どのように変化するかを確認した。図3．35に摩擦距離と比摩耗量について、図3．36に支圧応力度と比摩耗量について示した。摩擦距離A(4784m：A試験)と摩擦距離B(20,000m：B試験)とで心配するような挙動はなく、定常摩耗の領域と考えられる。

これについては、載荷荷重の保持のために行った油圧調整時の中断はあるものの、試験の再始動時にやや高く0.08程度の摩擦係数が現れたが、数時間の連続運転経過後にはやや低くなる傾向が続いていることからも理解できる。これについては、試験片組立時に潤滑剤を塗布した効果が現れたものと考えられる。逆に言えば、なじみがよくなり、固定的な固体潤滑剤の皮膜が形成されるまでは摩擦係数の増大もあるものと推定される。実機施工上も重要な項目である。

ピン径が330mmと60mm(59mmを含む)について得られた比摩耗量Wsの支圧応力度に対する関係を図3．37に示す。

図3．37 から、ピン径60mmについて得られた比摩耗量の方が330mmのものより大きめの所にプロットされているものが多いが、ピン径60mmについては摩擦距離が小さいものが多く、摩擦距離8000mのものについて見れば3点中2点はピン径330mmとほぼ同一な値である。表3．12bには参考に、φ60における計算結果も併せて示しているが、比摩耗量のオーダーには大差ない結果である。従って、ピン径330mmと60mmの比摩耗量の違いが、初期摩耗と定常摩耗における摩耗率の違いによるものか、ピン径差によるものかは今回のデータのみからでは結論付けがたい。しかし、マクロに見て、ピン径が大きくなり、かつ摩擦距離が長くなれば、なじみの点から比摩耗量は増加することなく、ほぼ同一か小さくなる傾向と考えられる。

2) 実機摩耗量の推定

a．摩耗量の概算

摩耗量の予測は、比摩耗量の実験値最大が表3．12bによれば0.285x10^{-7}mm／kgf/cm²／mであり、設計面圧(垂直荷重)500kgf/cm² すべり距離200kmとすれば、以下のようになる。

$W = W_s \times P \times L$ ・・・・・・・・・・・・・・・・(7)

W：摩耗寸法(mm)

W_s：比摩耗量(mm／kgf/cm²／m)

P：垂直荷重(kgf/cm²)

L：すべり(摩擦)距離(m)

よって推定摩耗寸法Wは次のとおりである。

$W = 0.285 \times 10^{-7} \times 500 \times 200,000 \fallingdotseq 2.85$mm

なお、実験値最小は、$0.023 \times 500 \times 200,000 \fallingdotseq 0.23$mm

b．累積摩耗量

変動荷重の影響を考慮した摩耗実験は実施していないが、「耐用年数中の総摩耗量は各反力別摩耗量の算術和となる」ものと仮定し、累積摩耗量を簡易計算(比摩耗量ω2式(7)を採用)により、以下のように算出した。

なお、ここでは最大のすべり距離を与える鉄道荷重を計算対象とした。

複線載荷3.8t/m $0.285 \times 10^{-7} \times 500 \times 40,000 = 0.57$

〃 2.7t/m $0.203 \times 10^{-7} \times 350 \times 28,000 = 0.20$

単線載荷3.8t/m $0.150 \times 10^{-7} \times 250 \times 168,000 = 0.63$ (W_sおよびPは実験から仮定)

〃 2.7t/m $0.100 \times 10^{-7} \times 175 \times 119,000 = 0.21$ (同 上)

累積摩耗量(上記総計) ＝1.61mm ＜2.85mm

以上、本実験から実機ブシュの摩耗設計において、摩耗寸法(厚み)は3mm以上を見込めばよいと考えられる。

表３．12a　大型摩耗試験結果（１／２）　注）△印はマイナスの摩耗量を示す

試験の種類	面圧 (kgf/cm²) 平均面圧 P	面圧 (kgf/cm²) 最大面圧 Pmax	摩擦回数 (回)	摩擦係数 平均	摩擦係数 終了時	ブシュ上昇温度(℃) 平均	ブシュ上昇温度(℃) 終了時	軸方向平均摩耗量 (mm) ピン	軸方向平均摩耗量 (mm) ブシュ	備考
φ60 試験	940	1500	5 x10⁵	0.08	0.07	10	8	0.033	0.039	
				0.08	0.07	8	8	0.026	0.072	
			10⁶	0.08	0.07	8	2	0.069	0.061	
				0.08	0.07	10	12	0.050	0.049	
	325	520	1 x10⁵					0.007	0.012	
	468	750						0.003	0.009	
	325	520	1 x10⁶					0.018	0.023	
	187	300						0.025	0.033	
φ330 試験 A	350	560	2.4 x10⁵	0.07	0.07	20	20	△0.002	0.024	左 支点
	500	800				20	20	0.009	0.068	中央 〃
	350	560				12	12	△0.003	0.034	右 〃
φ330 試験 B	350	560	10⁶	0.07	0.07	18	16	△0.002	0.105	左 〃
	500	800				25	24	0.027	0.181	中央 〃
	350	560				18	18	0.001	0.081	右 〃

表３．12b　大型摩耗試験結果　（２／２）

試験の種類	面圧 (kgf/cm²) 平均面圧 P	面圧 (kgf/cm²) 最大面圧Pmax	比摩耗量 (x10⁻⁷mm／kgf/cm²／m) ピン ω1	ピン ω2	ブシュ ω1	ブシュ ω2	備考
φ60 試験	940	1500	0.044	0.088	0.054	0.102	
			0.032	0.070	0.122	0.191	
			0.058	0.092	0.049	0.081	
			0.038	0.066	0.037	0.065	
	325	520	－	0.27	0.15	0.46	
	468	750	－	0.080	0.10	0.24	
	325	520	－	0.069	0.038	0.088	
	187	300	－	0.17	0.11	0.22	
φ330 試験 A	350	560	－	－	0.023	0.143	左支点
	500	800	－	0.038	0.074	0.285	中央〃
	350	560	－	－	0.038	0.203	右 〃
φ330 試験 B	350	560	－	－	0.048	0.150	左支点
	500	800	－	0.127	0.073	0.181	中央〃
	350	560	－	0.001	0.033	0.116	右 〃

表３．13ｂに示す比摩耗量について以下に整理する。

AppendixＡ１に解説しているように、

比摩耗量＝摩耗体積／単位荷重／単位摩擦距離　・・・・・・・（７）

であり、摩耗寸法が小さい場合は図３．30に示す三日月形の面積が摩耗体積となるとすれば、下記のように計算される。[2]

$$A = 2 C r_1^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

$$C = 1/2 \{\sin^{-1} C_0 - n^2 \sin^{-1} 1/n C_0 + (n-1+k) C_0\}$$

$$C_0 = \sqrt{1 - \left\{\frac{n^2 - 1 - (n-1+k)}{2(n-1+k)}\right\}^2}$$

r_1：ピン外径、r_2：ブシュ内径、

δ：荷重方向の摩耗寸法

$n = r_2 / r_1$ 、$k = \delta / r_1$

よって比摩耗量$\omega 1$は次式となる。

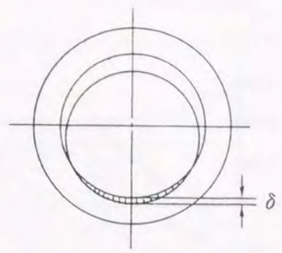


図３．30　摩耗面積の計算

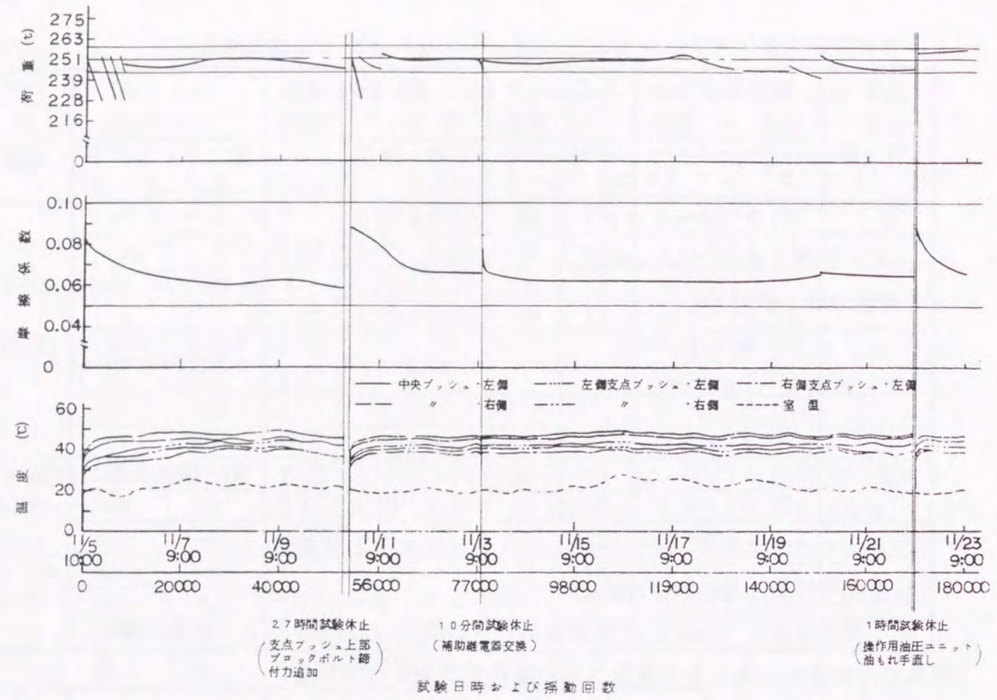
$$\omega 1 = \frac{A \cdot L}{F \cdot \iota} = \frac{A}{2 P_{project} \cdot r_1 \cdot \iota} \quad \cdots\cdots\cdots (9)$$

ω：比摩耗量　(mm／kgf/cm²／m)

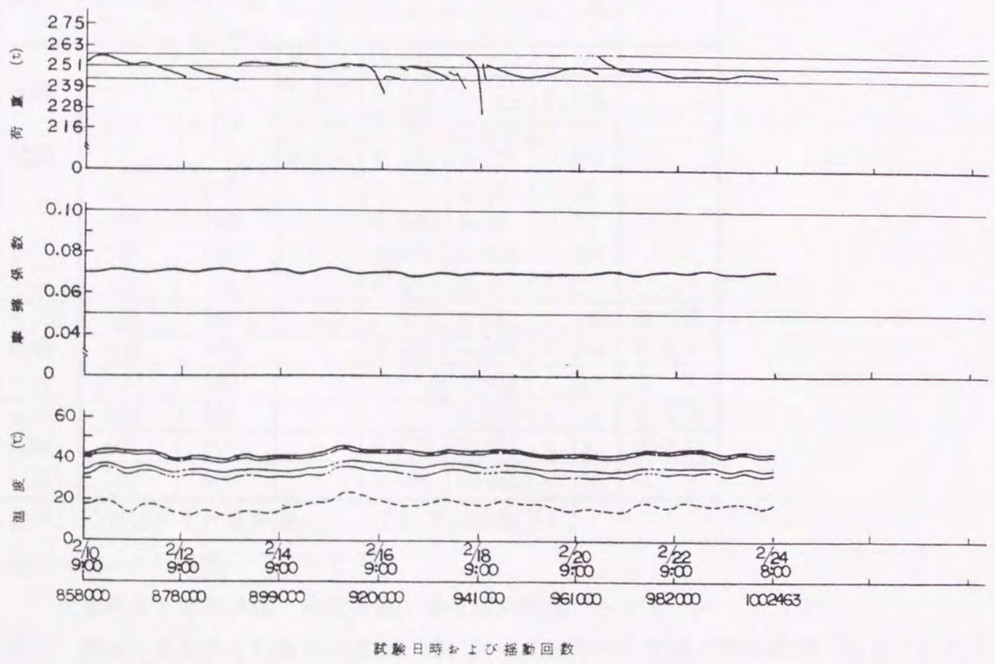
F：荷重(kgf)、$P_{project}$：投影面積あたりの面圧(kgf/cm²)、ι：摩擦距離(m)、

簡易には安全側の値となる荷重方向の摩耗寸法δより求める。

$$\omega 2 = \frac{\delta}{P_{project} \cdot \iota} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$



(a)



(b)

図3．31　荷重、摩擦係数および温度の推移（試験Bの時刻歴記録）

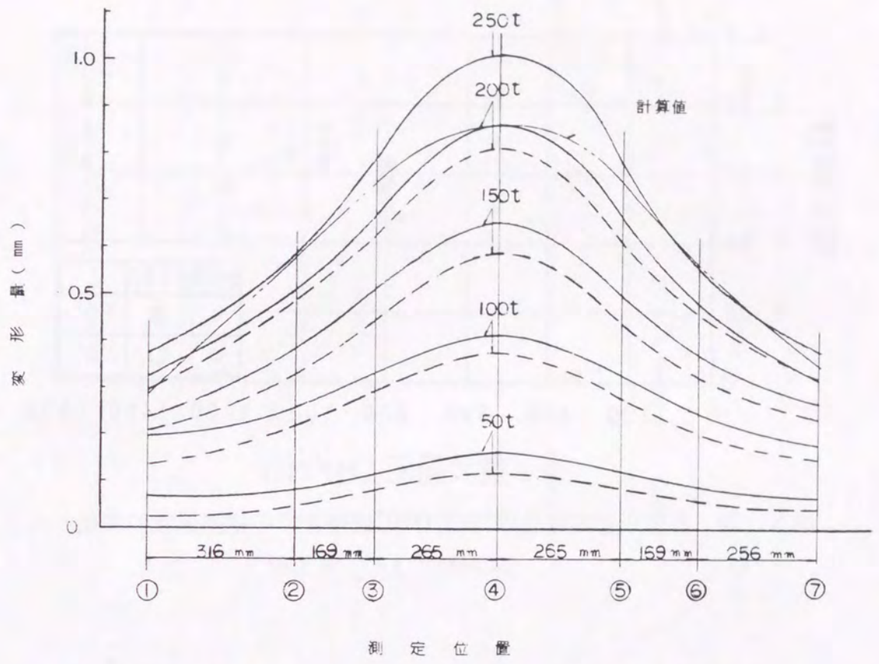


図3．32a　荷重によるピンのたわみ量測定結果（試験A）

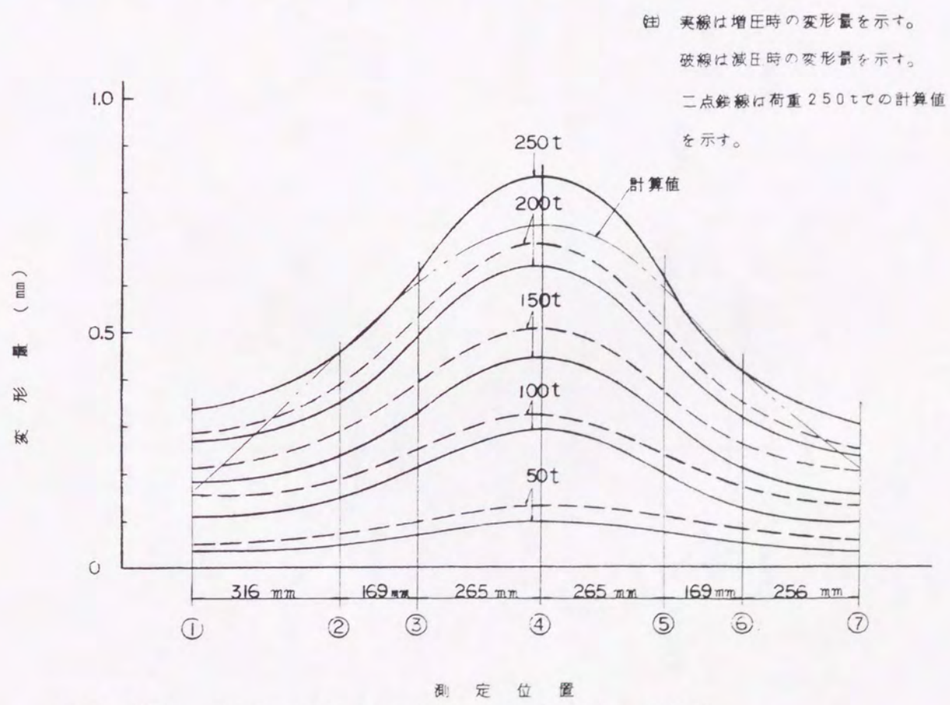


図3．32b　荷重によるピンのたわみ量測定結果（試験B）

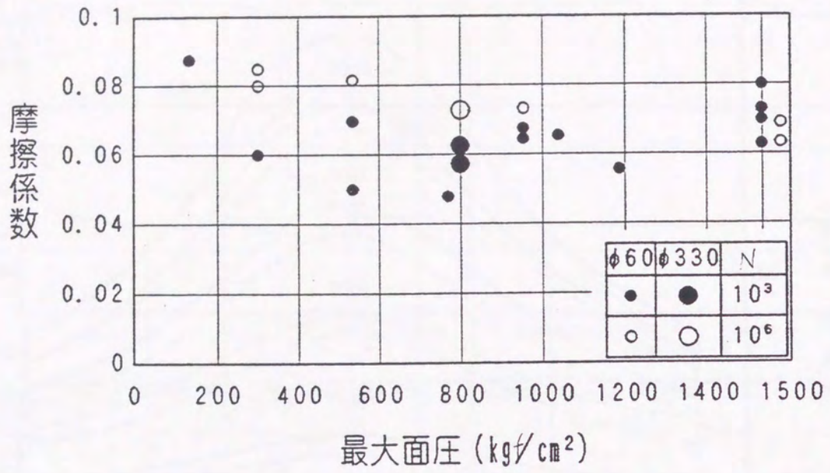


図３．33　各面圧における10^5および10^6回時までの摩擦係数の変化
(SUS431、φ60、φ330)

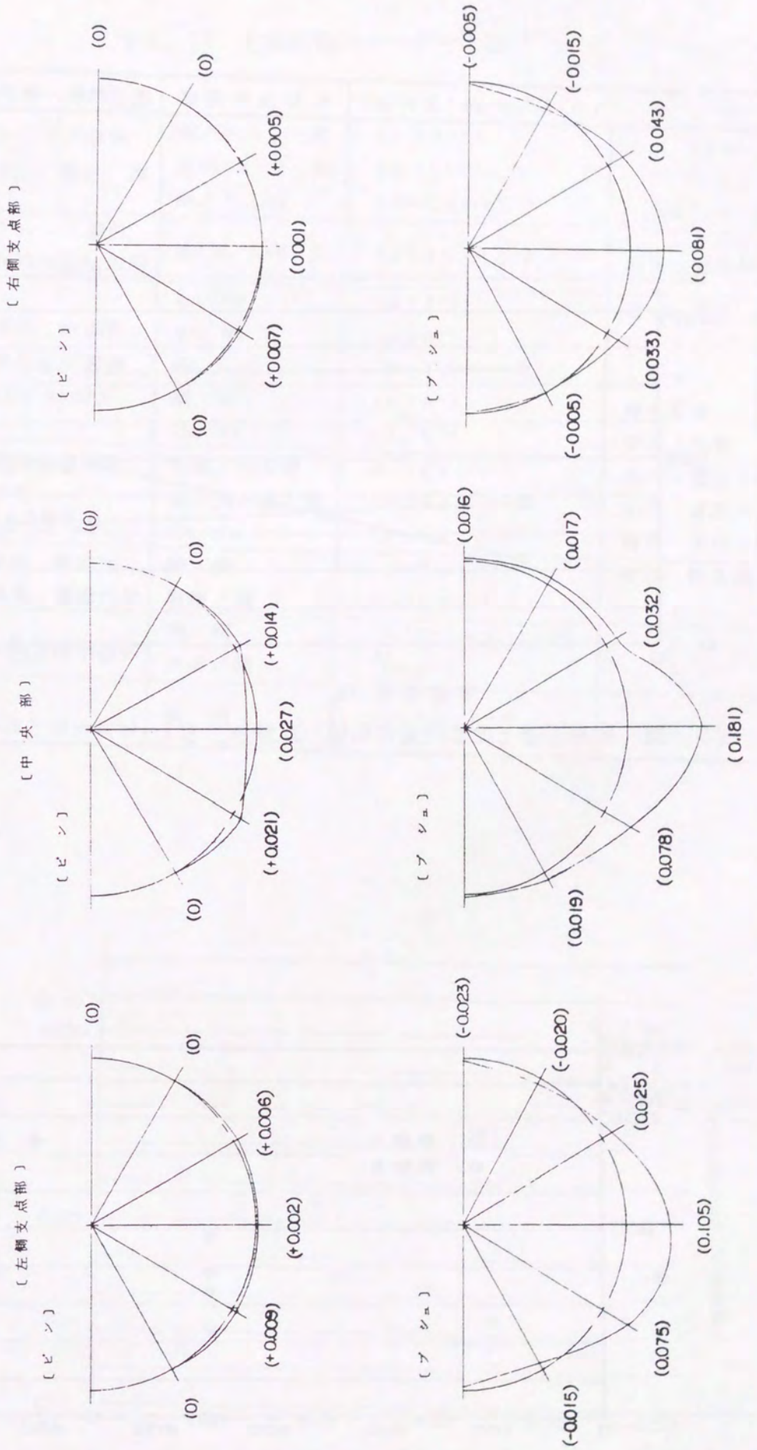


図３．34　1x10^6　回摩擦後の平均寸法変化状況（試験Ｂ、mm）

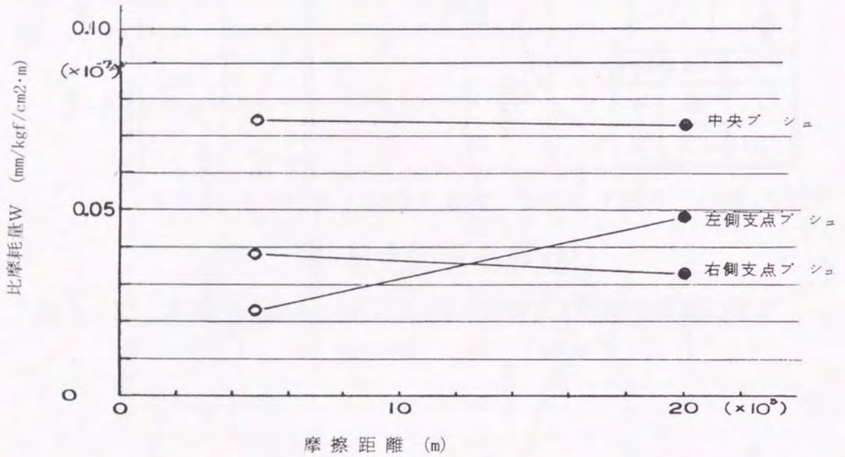


図３．35　摩擦距離と比摩耗量の関係（試験Ａ，Ｂ）

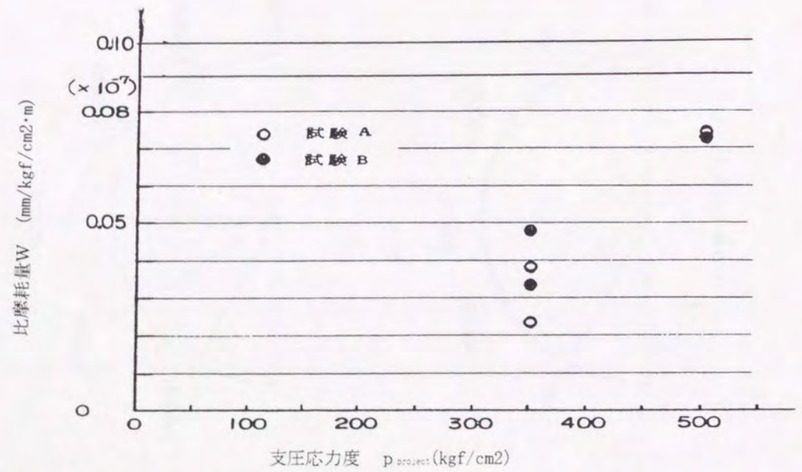


図３．36　支圧応力度と比摩耗量の関係（試験Ａ，Ｂ）

表３．13　比摩耗量のオーダー比較[8]

摩擦条件・摩耗形態	金属の組合せ	比摩耗量（mm/kg/cm・m）	測定者
アブレッシブ摩耗 無潤滑	鋼／エメリー紙 黄銅／エメリー紙 鋼／Al_2O_3	1.6×10^{-3} 4.6×10^{-3} $0.8\sim2.3\times10^{-3}$	Spurr 〃 Khrushchov
アブレッシブ摩耗 無添加鉱油潤滑	焼入鋼／エメリー紙	$0.4\sim1.0\times10^{-3}$	笹田・野呂瀬
凝着摩耗，無潤滑，初期摩耗（付着域，severe wear）	Fe／Fe Mo／Mo Cu／Cu 鋼／鋼 Cu／Fe	1×10^{-4} 1×10^{-4} 1.5×10^{-4} 4×10^{-4} 1×10^{-4}	曽田・笹田 〃 〃 摩耗部会 笹田・大村
凝着摩耗，無潤滑，定常摩耗 （mild wear）	青銅／焼入鋼 焼入鋼／焼入鋼 Cu／Fe	$6\sim10\times10^{-6}$ $1\sim2\times10^{-6}$ $0.3\sim4\times10^{-6}$	大井・笹田・江川 笹田・喜及斗・江川 笹田・大村・野呂瀬
凝着摩耗，無添加，鉱油潤滑，低摩耗域	鋼／鋼 黄銅／鋼	$10^{-10}\sim10^{-11}$ $1\sim2\times10^{-6}$	笹田・野呂瀬 〃
同上，異常高摩耗域	鋼／鋼 黄銅／鋼	$2\times10^{-7}\sim2\times10^{-5}$ 1×10^{-5}	〃 〃
同上 P系極圧剤添加油	鋼／鋼	$10^{-10}\sim10^{-12}$	〃

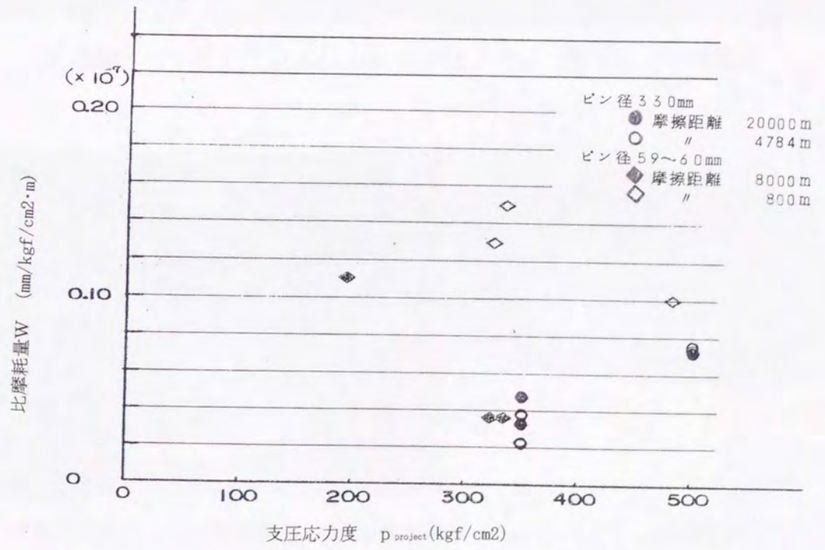
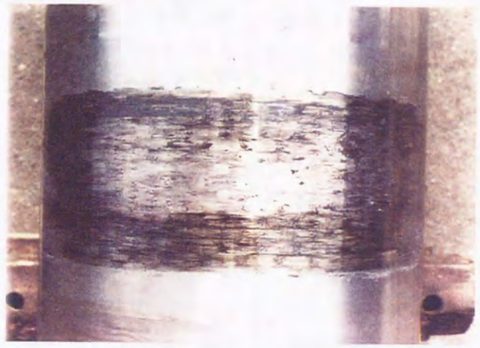
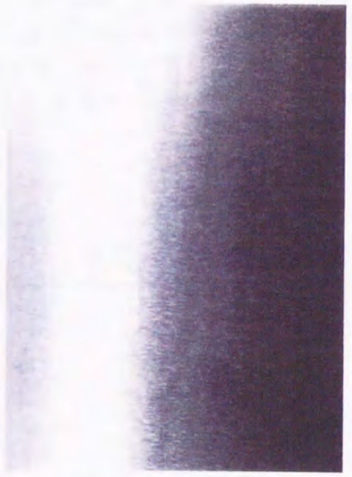


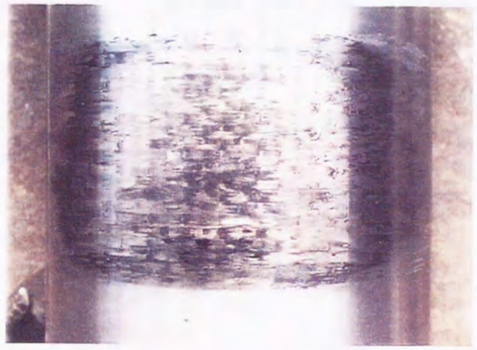
図３．37　ピン径 59、60mmおよび 330mmの支圧応力度と比摩耗量の関係



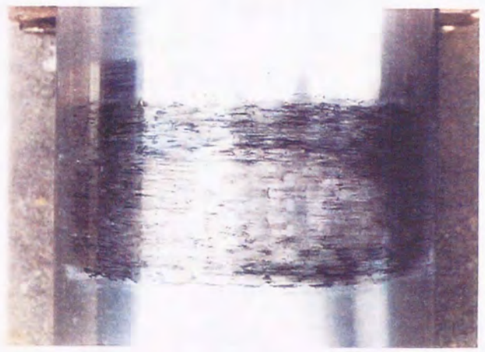
（a）左支点部ピン（試験後）



試験前ピンの状態

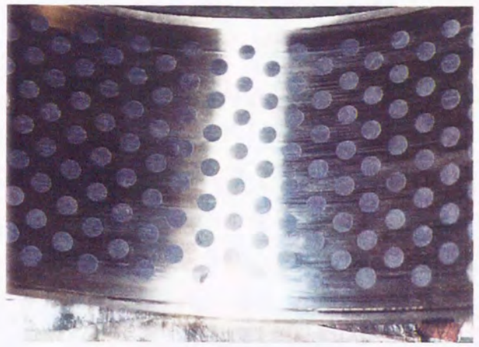


（b）中央支点部ピン（試験後）



（c）右支点部ピン（試験後）

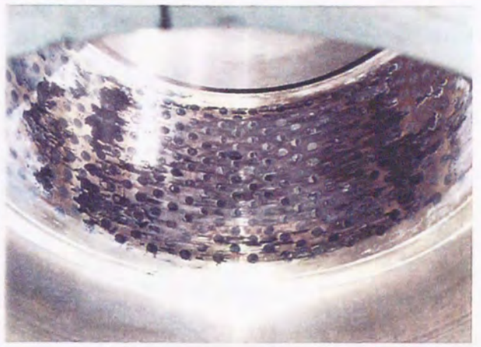
写真３．12 試験Ｂにおける試験前と１ｘ10^6回繰返し試験後のピンの状態



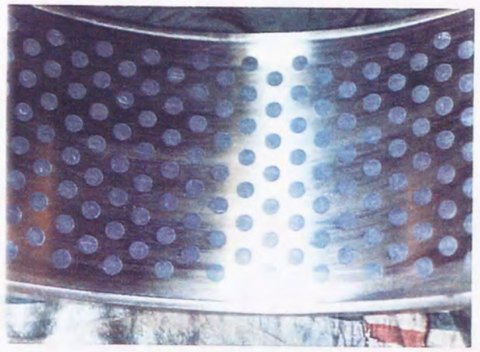


（a）左支点部ブシュ

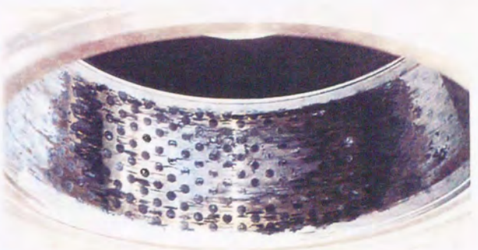




（b）中央支点部ブシュ



（試験前）



（c）右支点部ブシュ　（試験後）

写真３．13 試験Ｂにおける試験前と１ｘ10^6回繰返し試験後のブシュの状態

3．4 ま と め

小型および大型試験結果を検討した結果、以下の結論を得た。

① 円柱ピン材料にマルテンサイト系ステンレス鋼SUS431、円筒ブシュ材料にPTFE固体潤滑剤埋込型高力黄銅鋳物HBsC4 の組合せで安定したトライボロジー特性を示した。

② 比較的高面圧でもトライボロジー面で不都合はない。すなわち、平均面圧Ｐ≧750kgf/cm²においては、摩耗量は摩擦回数に対して比例的ではあるが立ち上がりが認められる。しかし、平均面圧500kgf/cm²の場合でも摩擦、摩耗、潤滑状態は安定である。

③ 摩擦面の荒れ、摩耗量から許容できるクリアランスは、径比（ブシュ内径／ピン外径）で≦1.034である。これは、径差がこの値を超えると温度上昇、摩擦係数が高くなると共に接触面が荒れ、摩耗率が上がるなど不具合が生じたためである。

④ 上記の条件（円筒接触、面圧、速度、径比）においては長時間摩擦後も潤滑状態がよく、微動摩耗及びStick Slipの発生は防止できると推定する。

以上から、リンク支承の軸受部材には、四ふっ化エチレン樹脂(PTFE:polytetrafluoro-ethyren)成型粉を固体潤滑剤（solid lubricant）とし、これを高力黄銅鋳物（HBsC4）に埋め込んだブシュと、相手材のピン材質にはマルテンサイト系ステンレス鋼鍛鋼品SUS431を採用するのがよい。

この場合、ピン・ブシュの径差（クリアランス）は３％以下としなければならない。

また、実験結果に基づいて100年間の摩耗量を推定すれば、タワーリンクブシュ厚みで約３㎜以内であることを示した。

大型タワーリンクの製造設計でこれらの値を確保することは十分可能である。よって、道路鉄道併用吊橋の補剛桁鉛直支承には、円柱ピン・円筒ブシュの円筒接触機構のリンク支承構造(タワーリンク)を採用できる。

end of file

第４章　実機リンク支承構造に適用するための考察

4．1 は じ め に

前章までに、トライボロジー面の各種特性を確認するために小型・大型試験片を用いた実験を行った結果を整理し、実機リンク支承構造の設計・製作に適用するための考察を行うとともに、幾つかの提案を行った。また、技術的背景、実験の成果等に基づき製作・架設上の条件を考慮した後、タワーリンクに関連する指針および規格類策定の考え方について述べてきた。

本章では、設計要領、製作の指針としてトライボロジー面からの要求事項を中心に適用にあたっての留意事項、提案事項について述べる。特に、従来、余り留意されていなかったリンク支承構造におけるStick slip(付着すべり)現象、および Fretting wear(微動摩耗)現象についての検討結果も示した。今後の研究に期待する内容を含んでいるが、設計施工にあたっては円筒ブシュでの検討成果が十分に反映されることが望ましい。

4．2 試験研究から整理した基本事項

吊橋補剛桁のリンク支承構造(タワーリンク)の設計製作のための基本事項は、以下のとおりである。

① 吊橋主塔の鉛直支承は、円柱ピンおよび円筒ブシュを用いた円筒接触(ピン・ブシュ)機構のリンク支承（タワーリンク）方式とする。

球面接触機構の支承形式については、４．５節に示すように対象としていない。

② ピンの材質は、JIS G4303マルテンサイト系ステンレス鋼鍛鋼品のSUS431とする。

③ ブシュのベースメタルは、JIS H5102高力黄銅鋳物のHBsC4とする。

④ ブシュ摩擦面に埋め込む固体潤滑剤は、充填材入り四ふっ化エチレン樹脂(PTFE)成形粉とする。

⑤ 軸受以外のリンク本体（ボス部を含む）は、各橋毎に外力条件、設置空間等が異なるため個々に検討する。

4．3 設 計 の 基 本 条 件

設計における基本的な留意事項を以下に述べる。

① 許容支圧応力度（投影面積当たりの平均面圧）は次による。

常時荷重に対し　$\sigma_{ba}=300kgf/cm^2$

荷重の組合せ・・$R_{ord}=R_D+R_{LH\bullet/2}+R_{LR'}+R_{T20}$

設計最大反力時　　σ_{ba}=500kgf/cm^2

荷重の組合せ・・$R_{max} = R_D + R_{LH} + R_{2LR} + R_{T30}$

R_D　：死荷重反力

R_{LH}　：影響線載荷の道路荷重反力

$R_{LH*/2}$　：1/2荷重を全径間載荷したときの道路荷重反力

R_{2LR}　：影響線載荷(2x3.8t/m)の鉄道荷重反力

$R_{LR'}$　：影響線載荷(1x2.7t/m)鉄道荷重反力

R_{T20}　：温度変化(+20degree)による反力

R_{T30}　：温度変化(+30degree)による反力

② ブシュ内径とピン外径の径差（クリアランス）は0.5%（内径1mに対し5mm）を標準とする。

比較的小径の場合には、製作・架設上の余裕がなく径差は厳しくなる場合がある。一方、太径の場合には、すき間が大きくなりすぎるため、幅のある表現とした。

なお、トライボロジー面からは、ボス側に十分な剛性があれば実験結果より３%まで許容できる。

③ ピンとブシュの設計摩擦係数は0.15とする。

実験結果よりトライボロジー面の安定性からは0.10であるが、これに実験上の精度(試験片製作誤差、実験時測定誤差)、試験の繰返し数(試験片の数量)、実機における材料(表面硬度)・製作誤差(表面粗さ、円筒度、真円度)・架設(軸心ずれ)誤差を見込まれるため、それらの余裕を見込んで0.15とした。

摩擦係数が0.15程度であれば、２次応力として考慮する程度であり、支持する桁部材の設計には余り大きく影響しない見込みである。

④ ボスは、その直角方向の変位が直径の0.5%以内となる剛性を有するものとする。

これはボスの変位をクリアランス内に収め、軸受(ピン、ブシュ)としてのトライボロジー安定性を確保するためである。

⑤ ブシュ摩擦面における固体潤滑剤埋込部の総面積比(埋込率)は、実験条件と同じブシュの有効摩擦面積（有効幅×内径円周）の30～35%とする。また、必ず、摩擦（滑り）方向に対し、直角方向には、隣り合うものが重なり合うよう配置するものとする。すなわち、図４．１に示すように、必ずオーバーラップを設けるものとする。

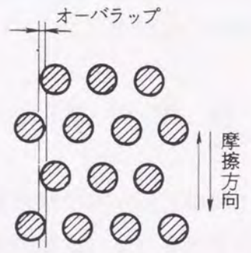


図４．１　固体潤滑剤のオーバーラップ

埋込率の設定値については、支承板の強度と耐久性、デッドゾーンの寸法並びに製品としての経済性等を考慮して決定するものである。

$$\text{埋込率}\gamma = \frac{\pi/4\times d^2/2}{p\times q} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

ここにｄ：潤滑剤外径

ｐ：摺動方向潤滑剤埋込間隔

ｑ：摺動直角方向潤滑剤埋込間隔

デッドゾーン寸法D＝ｐ－ｄ－ａ　・・・・・・・・・・・・・・（１０）

ここに Ｄ：デッドゾーン寸法

ａ：摺動量(摩擦振幅)

揺動（摺動、すべり）方向には、デッドゾーンができないように埋め込みピッチを選定するが、あらゆる載荷（振幅）状態に対し、デッドゾーンがないようにすることは不可能である。これまでの検討では実施していないが、固体潤滑剤が安定して供給されるために、デッドゾーンが無くなる配置(あるいはデッドゾーンの限界値)および潤滑剤の径を検討する必要がある。

これは摩擦・摩耗を含め、安定した潤滑を確保し、金属接触（異常摩耗あるいは焼き付き現象の発生）やStick slipによる騒音・摩耗、あるいは微動摩耗を防止するために、最も重要な今後の課題である。

４．４　実機製作上配慮すべき事項

机上検討および実験検討から、トライボロジー面における実機製作にあたって配慮すべき事項を以下に示す。

① ブシュは、固体潤滑剤PTFEの高温劣化対策上からボス部に冷やし嵌めとする。

これはPTFEが200℃以上では劣化し機能を失う恐れがあるためである。

ここに、純PTFEの融点は327℃、連続使用温度は約260℃であるが、固体潤滑剤固定のための接着剤、温度管理精度等も含めて安全側に配慮して200℃(別の文献では180℃。Appendix A2参照)を検討の上限値とした。

② ピンは、大単重となる場合には、経済性からハイブリット化を図り、中心コア方式とする。一体化のための接合方法は、異種金属同士の溶接は避け、中心コアにスリーブ化したSUS431を焼き嵌めする工法とする。

瀬戸大橋では、中心コアにSF55機械構造用炭素鋼鍛鋼品JISG3201を採用している。ピンとしての必要条件は、表面硬度、表面粗さ(精度)、部材精度(円筒度、真円度)および構造体としての剛性である。高価なSUS431は製造上の最低肉厚が得られれば良く、極力、薄くした円筒状とし、コア部にはより低廉な同強度レベルのSF55を使用してハイブリッ

ド化することでコストパフォーマンスを図ったものである。

なお、異種金属の接触という問題に対し、電位差が問題となるが、オーステナイト系と異なり、マルテンサイト系はほとんど一般の鋼と差がない(文献⑰)ことから腐食電池の生成はないものと考えた。また、ステンレス鋼ということで応力腐食割れ(SCC)の問題が考えられるが、通常、圧力容器、原子力格納器等で問題となるのはオーステナイト系であり、マルテンサイト系はほとんどその恐れはないものと考えて採用した。

③ ブシュ両端には、図４．２に示す面取り $0.05L_e \geqq 30mm$ (L_e:ブシュ有効長)を施し、端部での支圧応力度の集中を緩和する。

大型実験の結果を詳細に見ると、ブシュおよびボスの剛性不足があり、ブシュ端部が一般部より表面粗さの変動が大きかったものがあった(スクラッチング；ひっかき摩耗と考えられる)。

これについては、通常、弾性床上基礎のFEM解析等で判るように端部が反力(応力)集中していることから、支圧応力度の集中緩和を図るために行う必要がある。

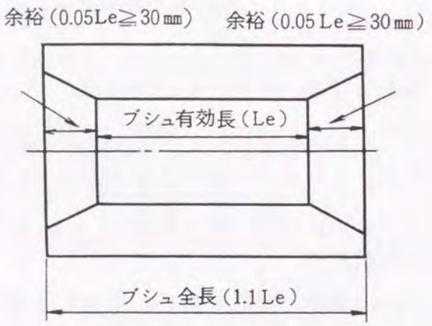


図４．２ ブシュ両端の面取り

④ ピンは揺動運動により回転しないようブシュ接触部から外れた外側に回り止めを施す。

これはピンが回転すると、なじみのない部分への新たな接触が発生し、初期摩耗状態が続く可能性があり、これにより摩擦・摩耗を促進させるためである。

ブシュについては、ボスへ冷やし嵌め（Shrink-fit）されるが、安全のため、機械的な回り止めも施工する。

⑤ 指針は、策定当時実績の多い支承板支承用材料を前提にまとめている。先端技術の発達が著しい今日、高分子材料等より性能の高い新しい適用材料が現れる可能性がある。

よって、今後、より良い材料の開発を阻害しないよう、特にブシュ材料規格の規定では、以下に示す項目について、指針・規格策定の根拠となった試験と同様な摩耗試験で実証されれば、指針で採用した以外の材料でも受け入れられるものとして、その試験条件を明示することとした。

摩擦係数　0.10以下

比摩耗量　$1.0\times10^{-7}mm/kgf/cm^2/m$

ここに、比摩耗量（specific wear）とは、単位荷重あたり・単位摩擦距離あたりの摩耗体積で、$\omega s=W/PL$ （３．３．２(５)の(７)式）で表される。

比摩耗量は、一般に摩耗量の大きさのパラメーターとし使用される値で、リンク支承においても摩耗し易さの目安として設定している。

４．５ Stick slip現象に関する考察

４．５．１ タワーリンクにおけるStick slip現象の考察

(１) Stick slip現象の一般的考察

タワーリンクシステムにおいてStick slip(付着すべり)現象が発生するかどうか、物理現象を主体に整理する。

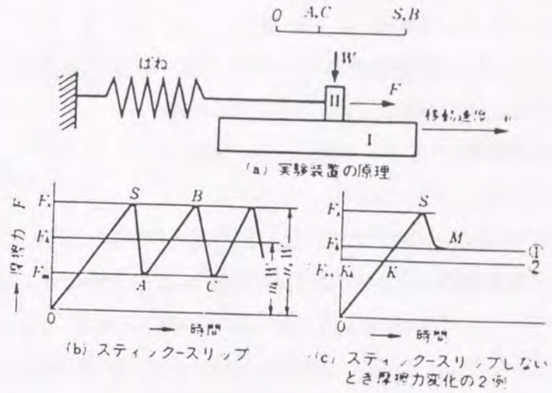


図４．３ Stick slip現象の解説図[12]

① すべり摩擦現象においては、摩擦力が振動的に変化すると物体間にいわゆる摩擦振動が発生する。この振動数が可聴振動数(20～20.000Hz*)であれば発音「なき」**)となる。

時間経過とともに接触する２物体間の摩擦力が変動し、ある振幅で運動を繰り返すこと(振動)がある。これを「Stick slip：付着すべり[12]」という。図４.３参照。

*)低周波数側は20～40Hz、高周波数側は10.000～20,000Hzともいわれている。

**)「なき」とは、摩擦振動による発音をいう。

② 振動させる力は、すべり力とこれに抵抗する摩擦力Ｆであるが、吊橋鉛直支承の場合、すべり力は補剛桁の移動・回転に伴って発生し、摩擦力は支承側のバネκ(剛性EI)で支持される部材が「すべり抵抗力」(反力）として抵抗するものである。

③ Stick slipは、一般的には、動摩擦係数μ_k＜静摩擦係数μ_sの場合に発生する。$\mu_k > \mu_s$の場合は、変位はあっても振動的な運動は起こらない。これは、「すべり速度ｖが大きいほど動摩擦係数が減少する」という特性を持つときである。すなわち、物体が「負の摩擦速度特性[12]」を有する場合にStick slip現象が発生する。図４．４参照。

一般に、Stick slipは軟らかい金属上を硬い金属が一方向に滑る場合に発生し、同種金属同士が滑る場合には発生しないといわれている。ただし、この場合はStick slipが発生しない代わりに「焼付き」の心配がある。

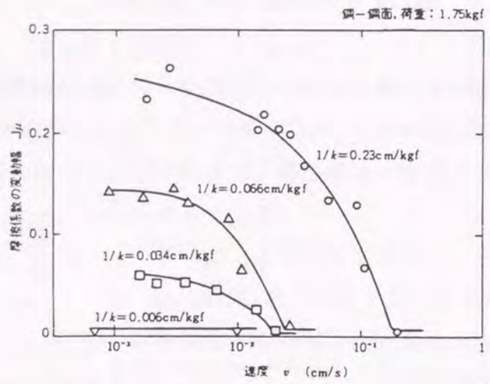
しかし、吊橋の鉛直支承は、補剛桁が活荷重、温度変化、風・地震荷重等により往復運動を受けるため、滑り面では「揺動運動」となり、強制的に滑り方向が変わる。

すなわち、機構上、一種の振動(低周波ではあるが)を受ける部材である。前出図２．３参照。

④ Stick slipの発生は摩擦する固体の種類の組み合わせ、摩擦係数のすべり速度依存性、

移動速度、摩擦系の力学的特性（固有振動数、慣性、
運動部分の摩擦以外のダンパーなどの抵抗）などによって左右される。

以上から、Stick slip現象は、$\mu_k < \mu_s$の負の摩擦速度特性の場合に発生するため、逆に、$\mu_k > \mu_s$「正の摩擦速度特性」を与えればStick slipは発生しないことになる。



[12]

図４．４　Stick slipに及ぼすバネ定数κの影響

要するに、すべり速度が大きくなるほど摩擦係数が増大する場合は発生しない。　この特性を有している材料にPTFE（４ふっ化エチレン樹脂；Polytetra-fluoroethyren）がある。

適切に設計されたPTFEと鋼との接触においては基本的にStick slipは発生しない。

（２）タワーリンクにおけるStick slip現象の整理

以上の考察の結果、吊橋タワーリンクにおいて考えられるStick slip現象は、以下のように整理できる。

① 表面硬さが大きい材料ほどμが最大になるすべり速度は低い。
一般に、低速度でStick slipが発生するのは、負の摩擦速度特性を有するためである。

② よって、負の摩擦速度特性を有する鋼と高力黄銅の金属接触（無潤滑、金属接触）では発生するが、正の摩擦速度特性を有するPTFEの供給が充分であれば発生しないと考えられる。

③ すなわち、固体潤滑剤PTFEを埋め込んだ自己潤滑型軸受設計においては、主たるすべり(揺動)運動時に金属接触がないことが必要条件であるとともに、すべり抵抗力となる軸受支持部材のバネ剛性は充分確保する必要がある。

ここに、注意すべき課題として異種金属接触腐食(電位差腐食、ガルバニ腐食、Galvanic corrosion,Dissimilar metal corrosion,Bimetallic corrosion)がある。検討対象となる異種金属接触部位は、ピンとブシュ、ピンとその支持金物(ブラケット)である。

文献［５］によれば、鋼系と黄銅系の接触は電位差が大きく好ましくないが、固体潤滑剤が十分に皮膜を形成しておれば問題ないものと考えて採用していることを忘れてはならない。Stick slip現象がピンとブシュの異種金属接触部で発生しているとすれば、電位差が低いピン(SUS431)に腐食が発生し、摩擦係数が上昇することも考えられる。

すなわち、リンク支承の揺動荷重より摩擦力が卓越する場合はすべり回転機能を発揮し

ないことになる。摩擦力を超える荷重が作用して急にすべる(すなわち、Stick slip現象の発生)ことになり好ましくない。

３．２．２(４)　表３．３　許容しうる異種金属の組合せ(MIL-STD-171A：米軍規格 金属および木材の表面処理)[5]参照。

４．５．２　球面軸受におけるStick slip現象の考察

（１）一般的考察

固体潤滑剤埋込純ピッチ以上のすべり距離（振幅）があれば自己潤滑状態と推定されるが、そうでなければ塗布潤滑剤の皮膜切れが起きていると考えられ、球面軸受は回転しなくなるか、Stick slip を起こし、「なき」発音が発生しているかもしれない。

⇒ 常時荷重状態で埋込潤滑剤が湧出しない配置では、bearingとして機能しない。

⇒ この場合は、潤滑材配置の変更あるいはリンク軸(本体)部を極端な柔構造(通常の荷重状態では弾性変形で吸収する)か、剛構造(僅かな変位にも軸受が作動する)とすべきであり、摩耗、疲労等で寿命に至れば交換するなど発想の転換を図る。

球面軸受を用いた固体潤滑剤PTFE埋込型支承におけるStick slip発生原因を、以下に述べる。

① 支持部材のバネ定数不足 → 剛性不足 → Stick slip発生

② 設計荷重(変位)が大きく、常用荷重(変位)が小さい → 移動量不足 → 潤滑不足 → 境界摩擦あるいは乾燥摩擦の発生 → Stick slip発生

③ 球面接触 → peak面圧が高い → 潤滑切れ → 境界摩擦あるいは乾燥摩擦の発生 → Stick slip発生

（２） 吊橋以外の設計例（Ｏ橋のペンデル支承）

Ｏ橋は中央支間長215mの鋼５径間連続箱桁斜張橋である。地形の関係から橋脚位置が限定されるため、側径間比の小さい橋で、活荷重の載荷位置によっては端支点には負反力が発生する。吊構造系特有の３次元的に移動・回転運動する支承が必要となる。そのため、桁端鉛直支承には、負反力対策としてリンク支承構造を採用し、球面ブシュを有するペンデル支承が設置されている。

その軸受は、基本的には吊橋のタワーリンクと同じSUS431のピンと、PTFE固体潤滑剤埋込型高力黄銅ブシュの組合せである。本橋は、道路橋であるため比較的活荷重の影響は小さいものの、球面ブシュとStick slipという典型的な課題を有するため、これまで筆者が展開してきた論理により、その構造特性を検証する。

さいものの、球面ブシュとStick slipという典型的な課題を有するため、これまで筆者が展開してきた論理により、その構造特性を検証する。

1）設計条件と移動量

a．設　計　条　件

本橋のペンデル支承(図4．5参照)の設計最大反力(D+L+T30)と桁移動量を以下に示す。

A１側　R11=-364tf　L11=92mm

A４側　R14= 664tf　L14=60mm

b．常時の荷重と移動量

概略値を得るために(D+L/2+T15)を設定した。

A１側　R21=-260tf　L21=46mm

A４側　R24= 422tf　L24=30mm

c．設　計　仕　様

設計仕様を以下に示す。

ピン径:390mm、

球　径:790mm

ピン間距離:3000mm

PTFE径:12mm、

PTFEピッチ:14.66mm

PTFE埋込率:33.5%

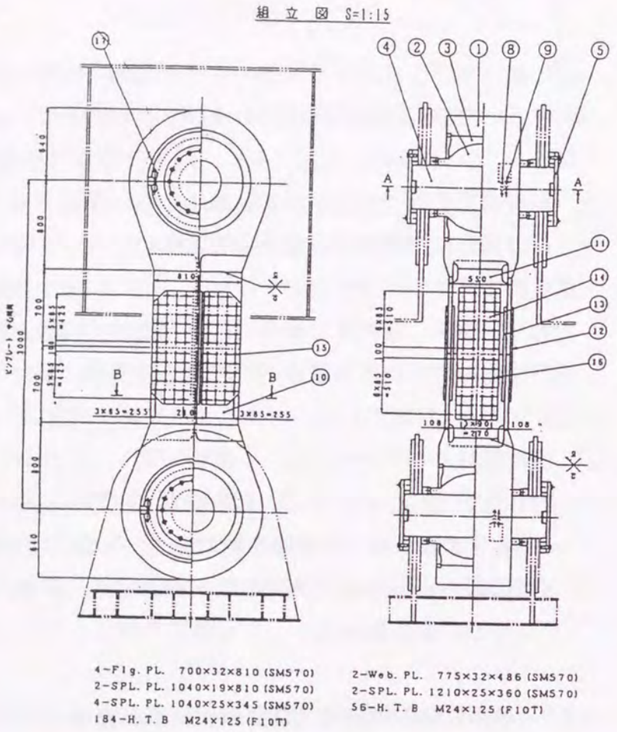


図4．5　ペンデル支承一般図(O橋)

d．すべり移動量(振幅)

各橋台部におけるすべり移動量(振幅)は以下のとおりである。

A１側　ι 11=92/3000x390/2=6.0mm　ι 21=46/3000x390/2=3.0mm

A４側　ι 14=60/3000x390/2=3.9mm　ι 24=30/3000x390/2=2.0mm

e．デッドゾーン

デッドゾーン寸法は次式で計算される。

デッドゾーン寸法D＝摺動方向の潤滑剤埋込間隔－潤滑剤直径－摺動量（すべり移動量）

A１側　D11=14.66x2-12-6.0x2= 5.3mm

D21=14.66x2-12-3.0x2=11.3mm

A４側　D14=14.66x2-12-3.9x2= 9.5mm

D24=14.66x2-12-2.0x2=13.3mm

結果を図4．6に示す。

f．剛　性　検　討

支間Lの片持ち梁にδ=30mm（L24）の変位を与えた場合の水平力Hを算出する。

$\delta = HL^3 / 3EI$=3.0cm

$H = 9EI / L^3$

L=300/2=150cmから

H=9x2.1x106x283568/150^3=1588tf

R=422tf、μ=0.2、$LH = D / 2\mu R$より、摩擦抵抗力Fは,

$F = \mu RD / 2 / L$

=0.2x422x39/2/150

=11tf<<H=1588tf

この結果は、本機が非常に剛性が大きく、わずかな変位量で摩擦力を超えることを示している。

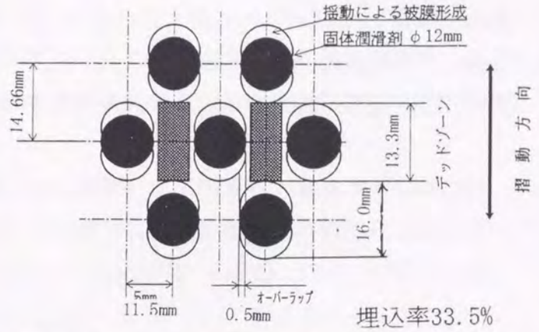


図4．6　PTFEの配置とデッドゾーン(O橋)

2）発　生　予　測

本機は、設計最大荷重時でもデッドゾーンがあり好ましくない。しかし、剛性が非常に大きいため恐らくStick slipは発生しないものと思われる。

ただし、金属接触状態で摩擦係数0.2以上が想定できるため、摩耗量は大きくなると予想され、かつ支持部材に大きな２次応力が発生することになろう。

多少のデッドゾーンに対しては、「揺動運動に伴い潤滑剤が移着を繰り返すことにより潤滑皮膜を形成する」という楽観的な見方がある。この現象は定性的には理解できるが、デッドゾーンの限度、長期間の保証性など不明の点が多い。これらを保証した実績あるいは実験確認の研究報告は見あたらず、今後の課題である。

供用後は異常摩耗の発生に留意し、ガタつき、あるいは「なき」現象が見られる場合は速やかに対策を講ずる必要があろう。

4．5．3　Stick slipに関する確認調査・実験の提案（定量的考察）

永久構造物であり、交換がほとんど不可能であるリンク支承構造(ピン･ブシュ)におい

ては、今後の設計・維持管理のポイントとして、Stick slip現象発生の可能性を照査しておくことを提案する。

Stick slip現象発生の可能性を見極めるために、検討すべき内容を以下に示す。

（1） 既往設計の比較整理

前項までに考察した論理に基づいて既往設計の整理を行う事を提案しておく。

試案ではあるがその要領を以下に示す。

①比較橋梁名： SB, NBB, SBB, HB, IB, ABr, TBr, KBr

②比較項目：A, I_{TT}, I_{LL}, r_{TT}, r_{LL}, l, l/r_{TT}, l/r_{LL}、$3EI_{TT}/l^3$, $3EI_{LL}/l^3$

常時反力、移動速度、

③T.L(E.L)反力比較表の作成：設計最大のみならず、特に、常時の状態に着目する。

すべり速度、設計水平移動量。

ここで、特に着目すべき内容は、常時反力（摩擦力）とバネ特性（EI/l^3）である。

リンクを一端固定、他端自由の片持梁として考察すると、

$\delta = P / 3EI \cdot l^3$ ここに、$P = k \times \delta$

∴見かけのバネ定数 $k = P/\delta = 3EI/l^3$ ・・・・・・・・・（11）

となる。これを著者の独断で「すべり剛比」と仮称する。

④デッドゾーン（Dead zone）の算定：

固体潤滑剤の径（d）およびピッチ（p）、設計移動量（すべり振幅）および常時移動量（不明の場合、設計の半振幅を目安とする）を算出する。

（2）すべり摩擦実験

上記を念頭に、トライボロジー面からの考察を行うために、代表的タワーリンクあるいはエンドリンクについてすべり摩擦実験を実施する。

本実験の着目は、材質による絶対値に差の有無、硬い材料であっても伸び性能（粘り強さ）の大きさである。

①すべり剛比（バネ剛性） k：可変--３種類程度

②すべり速度 v：$10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10^{0}$ cm/s

③PTFE埋込ピッチと径 ：固体潤滑剤の径φ4, 6, 8, 10, 12mmに対して

デッドゾーンを３φ、２φ、φ、(1/2φ)

④繰返し数 N：各ＴＰ、すべり剛性、すべり速度毎に３回

⑤対象材料（すべり材、相手材）：

鋼	vs	鋼
鋼	vs	高力黄銅
SUS431	vs	〃
SUS410	vs	〃
SUS340	vs	〃
PTFE被覆鋼	vs	PTFE被覆高力黄銅

（3）実 橋 調 査

机上検討および実験においては、一つの仮定において行うことになる。そのため、総合的に健全性を評価するために、供用中の各橋のタワーリンクおよびエンドリンクの実態調査を行う。

実態調査項目を以下に提案する。

①発 錆 状 況

②すべり異常の有無：すべり遅れ（回転遅れ）、載荷位置（時間）とすべり開始時期

③摩耗分の排出状況とその成分分析

④Stick slipの有無：振動性状、発音状況

⑤各ピン（ブシュ）における回転角調査：類似の構造である明石海峡大橋のタワーリンク、エンドリンク、ピン定着ハンガーも含める。

4．6 ま と め

本章では、実機の設計・製作にあたって、トライボロジー面からの検討を行った。その結論は次のとおりである。

① 相互に接触するピン・ブシュの適用材料については、摩擦係数、比摩耗量について、それぞれ下記の値を満たせば、本実験研究で採用した以外の材料の組合せも受納できることを示し、今後の新材料の開発にも期待した。

摩擦係数　0.10以下

比摩耗量　1.0×10^{-7}mm／kgf/cm^2／m

ここに、比摩耗量（specific wear）とは、単位荷重あたり・単位摩擦距離あたりの摩耗体積で、ωs=W／P L で表される。

② さらに、支承分野では、従来余り重視されていなかったStick slip(付着すべり)、および Fretting wear(微動摩耗)について検討した。

特に、Stick slipについては、現象の物理的考察の他に、実橋を対象に調査する内容、確認実験法案について提案した。

③ 円筒軸受と球面軸受の比較検討を行い、現時点では、トライボロジー面の設計データが明確となった円筒軸受が望ましいことを示した。さらに球面軸受を用いたタワーリンクの取り扱いについて見解を示した。

ここで取り扱ったタワーリンクは、ピン・ブシュの組合せによる円筒軸受(接触)を前提に検討を実施して、設計・製作の基本事項をとりまとめている。ペンデル支承などに球面軸受の実績があるが、リンク支承としては未調査研究項目が多く、今回は適用範囲外とした。有用性の高いシステムであり、今後の調査研究に期待するところ大である。

④ 揺動（摺動、すべり）方向には、デッドゾーンができないように埋め込みピッチを選定する。ただし、あらゆる荷重状態に対し、デッドゾーンがないようにすることは不可能である。本件については確認された実験結果はなく、固体潤滑剤が安定して供給されるためには、デッドゾーンが無くなる配置(あるいはデッドゾーンの限界値)、および潤滑剤の径を検討する必要がある。

これは摩擦・摩耗を含め、安定した潤滑を確保し、金属接触（Stick slip、異常摩耗あるいは焼付き現象の発生）を防止するためには最も重要な今後の課題である。

これら設計製作に関する条件、実施すべき事項については、下記資料に反映されている。

道路鉄道併用吊橋リンク支承構造設計製作指針 [2]

HBS B4301 道路鉄道併用吊橋リンク支承用ピン 昭51.3 [3]

HBS B1501 道路鉄道併用吊橋リンク支承用ブシュ昭51.3 [4]

本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書 [5]

別冊５ リンク支承構造設計の指針 昭51.3 土木学会

第５章 実機におけるトライボロジー設計製作検討

5．1 は じ め に

タワーリンク設計施工指針に基づいて設計・施工された実機(下津井瀬戸大橋)の設計内容と、主としてトライボロジー面の検討事項を以下に示す。

瀬戸大橋３吊橋における下津井瀬戸大橋の設計条件等位置付けを表５．１に示す。

表５．１ 瀬戸大橋３吊橋タワーリンクの概要比較

項目＼箇所		下津井瀬戸大橋 (SB2P、SB3P)	北備讃瀬戸大橋 (BB2P、BB3P)	南備讃瀬戸大橋 (BB5P、BB6P)
設計最大鉛直反力	正(tf)	4、977	3、903	4、040
	負(tf)	-486	-1，150	-1，286
リンク本体	材質規格	SFVQ2B-SB	SFVQ2B-NBB	SFVQ2B-NBB
	強度規格 σy/σB	46／43～81	44／58～81	44／58～81
	軸部主断面 (mm)	250x1，800	300x1，300	300x1，300
	ピン間距離 (mm)	8，400	8，500	8，500
	全長 (mm)	10，748	10，700	10，820
ピンリーブ	材質規格	SUS431	SUS431	SUS431
	外径 (mm)	φ1，410	φ1，250	φ1，330
ピン中心コア	材質規格	SF55A	SF55A	SF55A
	外径 (mm)	φ1，210	φ1，050	φ1，130
タワーリンク１組当たりの製作重量(tf／組)	リンク本体	59.1	62.0	64.7
	ブシュ	2x2.6	2x2.0	2x2.3
	ピン	2x22.2	2x16.5	2x18.6
	その他	6.2	4.3	4.4
	計	114.9	103.3	110.9
架設方法		105t吊りクリーパクレーン	114t吊りクリーパクレーン	130t吊りクリーパクレーン(５P)130t吊り自立式塔型クレーン(６P)

５．２　下津井瀬戸大橋のタワーリンク

５．２．１　概　　要

タワーリンクシステムは、補剛桁中間支点反力を塔柱に伝達する鉛直支承である。すなわち、塔からリンク機構で桁を吊るいわゆる「遊動円木」の構造で、橋軸方向変位に対して設置される吊橋の鉛直支承である。

一般にタワーリンクの設置位置は補剛桁主構上弦材であるが、瀬戸大橋のそれは既設吊橋と異なり、主構下弦材を吊る下吊り方式としたため、主構上下弦材間の狭い空間に設置される。

これは、連続補剛桁が塔内面を貫通しているため、自動車の衝突防止並びに走行景観上すっきりさせたい配慮から路面上から見えなくする工夫を行った結果である。[14] [15]

その結果、上下弦材間に納めるためにリンク長が短くなり、製作架設誤差、中間支点主横トラスの弾性変形、補剛桁の風荷重による変形等による面外曲げ・ねじり等で、付加曲げがより厳しく作用することになった。

よって、鉛直反力のみでなく、３次元的な方向から外力・変形を受ける複雑な応力・変形場にあり、単純には部材断面は決定されていない。それだけにその軸受には複雑な変位を考慮して設計しなければならない。

特に、下津井瀬戸大橋の場合は、吊橋形式が道路鉄道併用橋であること、かつ、その側径間をハンガーで吊らない「張出し径間付き単径間補剛トラス吊橋」（連続吊橋の一種）であるため、約5000tfという大きな鉛直反力を受ける。この反力はDルートのみならず本四３ルート吊橋中最大であり、その結果、一組のタワーリンク重量は約114tとなっている。

瀬戸大橋３吊橋とも細部を除いて基本的には同一設計思想で施工されているため、本章ではルート中最大設計反力の下津井瀬戸大橋（以下「本橋」という）のタワーリンクについて述べる。

＊最大正反力は4,977tf、最大負反力は566tfである。近将来を含めて世界最大反力と推定される。

本橋のタワーリンクの設計条件を整理する前に、施工を考慮した設計思想を固めた。

① 大きな正負の反力・水平変位が生じる支承としてリンク形式を採用する。

② リンク形式では、補剛桁を吊る位置に主構上弦材を吊る上吊り形式と、主構下弦材を吊る下吊り形式があるが、走行景観性と経済性より下吊り形式を採用する。[14] [15]

③ タワーリンクは疲労を含む過酷な荷重条件、環境条件で使用されるため、主要部材の接合は、品質確保上、ボルト止め等機械的方法とし、熱影響を与える溶接を避ける構造とする。

④ 架設性を考慮して上下ピンは現場で取り付ける。

⑤ リンク本体構造は、主たる設計外力が引張であること、水平面内回転をリンクのねじり変形で吸収すること、および橋軸直角方向の剛性を小さくすることから開断面構造とする。ただし、断面決定においては負反力の影響についても配慮が必要である。

⑥ 軸部の剛性を低く抑えるため一体鍛造品とする。一般にはペンデル支承に見られるように、製作、架設時のハンドリングを考えて上下２分割構造とすることが多いが、継手による剛性ＵＰを抑え、品質確保を優先し一体構造を提案した。



写真５．１　下津井瀬戸大橋
タワーリンクの設置状況

５．２．２　タワーリンクの特徴

本橋のタワーリンク位置図を図５．１に、その形状を図５．２（後出）に、設置状況を写真５．１に示す。本機の特徴を以下に示す。
製作の詳細については、５．２．５で説明する。

（１）　取　付　位　置

連続補剛桁のため塔柱内側配置とし、自動車走行景観の改善と衝突破損防止等を考慮して、下弦材を吊る方式とした。

さらに、リンク長が極端に短くなると移動時のリフト（浮き上がり）量が大きくなり、ハンガーシステムへの不具合が心配され、かつ、運転者への心理的不安を伴う恐れがあるため、極力、リンク長は確保する方針とした。

（２）　リ　ン　ク　本　体

リンク本体に使用する材料は、内部品質が保証された鍛造性の良い60kgf/mm^{2}級高張力鋼で、かつ、高靭性が得られるSFVQ2B（JIS G3204圧力容器用調質型合金鋼鍛鋼品の）をベースとし，本橋梁用に特別に仕様を付加した相当材とした。よって、記号は下津井瀬戸大橋用相当材SFVQ2B-SBとした。

さらに耐疲労、高靭性、可撓性、剛性低減（２次応力の軽減）等からボス部と軸部を（無継手）一体鍛造品とした。これにより、全体の品質保証と軽量化、施工性が改善された。

なお、本体の品質低下防止を考慮して、吊り金具は本体削り出しとした。

（3） ピ　ン

ピン１基で22tfという大単体重量となるため、経済性を考慮して、中心コアにSF55Aを、スリーブにマルテンサイト系ステンレス鋼鍛造品SUS431を焼き嵌めして一体化する構造（ハイブリット構造）とした。

（4） ブ シュ

摺動材には高力黄銅鋳物$HBsC_4$の母材に高温（約200℃）に弱い固体潤滑剤PTFE（φ20mm）を埋め込んだものであるため、高温劣化に配慮してリンクボス部への取付は冷やし嵌めとした。冷やし嵌めはPTFEの保護に配慮し、冷媒にメタノールを使い、ドライアイスで冷却した。ここに、ボス部とは、ブシュがはめ込まれている雌孔部をいう。

5．2．3　タワーリンクシステムの構築

（1）リンクシステムの採用とその取付位置

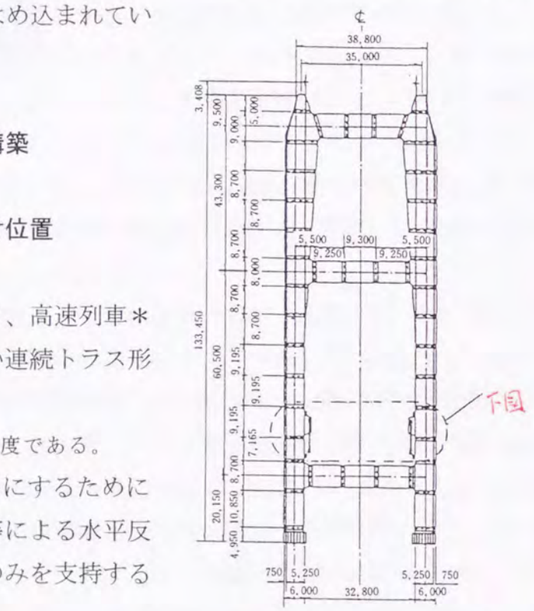
瀬戸大橋吊橋の補剛桁には前述の通り、高速列車＊の走行性から中間支点に角折れの出ない連続トラス形式を採用している。

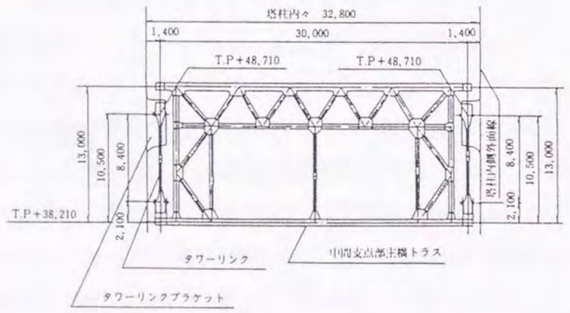
＊建設計画では、新幹線160km/hの設計速度である。

中間支点の支承では、支承構造を簡易にするために機能を分散させる目的から、風・地震等による水平反力を支持するウインド沓と、鉛直反力のみを支持する支承とを別々に設置することが多い。

また、一般の吊橋の鉛直支承では作用する負反力の大小により、既述のとおり、下支えピン・ローラー方式、リンク方式等が用いられる。

しかし、瀬戸大橋吊橋では既述のとおり負反力にも対処が比較的容易なリンクシステムを採用した。このタワーリンクは、架設性と、供用後の補剛桁水平変位時のリンク回転に





(b) SB3P タワーリンク位置

図5．1　下津井瀬戸大橋のタワーリンク位置

よるリフト高上昇の影響を少なくするため、リンク長（ピン間距離）が長く採れる補剛トラスの上弦材吊り（上吊り）方式が採用されるのが一般的である。

これは連続吊橋であっても同様であるが、この他に連続吊橋では、主塔の塔柱間を桁が通過するため、タワーリンクが塔柱の内側配置となり、頗る走行景観を損なうこととなる。

本橋は、瀬戸大橋の岡山側のゲート的存在のため、景観を考慮して斜材のないラーメン形式の主塔が国内長大吊橋で初めて採用された経緯があり、タワーリンクの配置にあってもその趣旨を尊重すべきと考えた。

このような背景から、瀬戸大橋吊橋では、補剛桁主構面内にタワーリンクを収めることができる補剛トラスの下弦材を吊り（下吊り）方式が採用された。 図５．１参照。

下津井瀬戸大橋では、塔柱の第５段が上ピン（タワーリンクブラケット位置）取付位置である。

（2）下津井瀬戸大橋タワーリンクの施工方針

本橋のタワーリンクは、取付精度管理面、大型架設クレーンの操作性および後続する桁架設の作業性から、塔の架設工事で架設するのがよいと判断し、塔の工場製作時に製作した。

製作にあたっては、基本設計では上吊り方式であったこと、設計外力が増大したこと、製作・架設誤差を設計に反映することから詳細設計を実施した。

5．2．4　詳細設計の内容

タワーリンクは吊橋中間支点の支承として機能するため、中間支点主横トラスの変形を考慮し、吊橋全体系から設計断面力を求めた。

また、適用ＪＩＳ等で指針策定後改訂されているものは全て見直しを行った。

なお、指針・規格そのものを改訂すべきＪＩＳ改訂はなかった。

（1）設計外力

表５．２にリンク指針に基づいて算出した設計外力を示す。

同表には、別途考慮した付加荷重（面外曲げモーメント）も併記した。

表５．２　下津井瀬戸大橋タワーリンクの設計外力

荷重の種類		荷重の大きさ	荷重の組合せ
鉛直反力	設計最大正反力	（２Ｐ）４、９７７tf	$R_D+R_{LHmax}+R_{2LRmax}+R_{T30}$
	常時正反力	（２Ｐ）３、６０５tf	$R_D+R_{LH'/2}+R_{LR'max}+R_{T20}$
	設計最大負反力	（３Ｐ）　－４８６tf	$R_D+R_{LHmin}+R_{2LRmin}+R_{T-30}$
	常時負反力	（３Ｐ）　－５６６tf	$R_D+R_{LR'min}+R_{T-20}$
面外曲げモーメント	最大反力時	１６２tf･m	下ピン位置
	常時反力時	１２８tf･m	〃

（２）設計基本方針

本橋タワーリンクの詳細設計においては、リンク指針に規定のない事項を含めて下記の基本方針を設定した。

① 設計断面力は、主塔２Ｐと３Ｐでその差が僅少なため、大きい方の２Ｐ側の値を採用する。（通常では同一になるところ、本橋では縦断勾配の影響で主塔高が異なり、タワーリンクが取り付けられる標高も異なり、いわゆる非対称の影響が出ており、吊橋全体系から求められる外力に微妙な違いが現れる。）

② 主要部材の接合は、品質確保上、ボルト止め等機械的方法とし、熱影響を与える溶接は使用しないこととする。（現在では、多少過大設計であったかもしれないと反省している。）

③ 許容応力度は設計外力の組合せに対し割り増ししない。指針では、異常時と常用時とを当初より分けて考慮されている。

これは、タワーリンクが連続併用吊橋である本橋の重要部材であること、摩擦･摩耗･潤滑というトライボロジー面から決定された設計仕様が多く、寿命中の設計条件の変動に対する応答が推定できるほどのデータの蓄積がないことなどから、設計に余裕を持たす配慮より定めた。

ただし、ボス部の局部応力集中（ＦＥＭ解析）にはピーク応力に対し、一般の構造設計と同様に10%割増まで認める。

④ リンク本体の材質は、60キロ級で、かつ大型部材での内部品質保証性の良い特殊鍛鋼品SFVQ2B-相当材（JISG3204-1982圧力容器用調質型合金鋼鍛鋼品）とし、その許容応力度は次のとおりとする。

特にボス部においては、孔広げ鍛錬により製造されるが肉厚中央の強度保証が必要なため、板厚1/2を考慮した仕様を追加した。当該ＪＩＳの適用板厚を超え、衝撃試験温度を下げているため相当材とし、本橋では記号SFVQ2B-SBとした。

［一般部（ｔ／４）］$\sigma_y \geqq 4{,}600 kgf/cm^2$より　$\sigma_a = \sigma_y / 1.7 = 2{,}700 kgf/cm^2$

（参考　$\sigma_B / 2.2 = 2{,}860 kgf/cm^2$）

［ボス部（ｔ／２）］$\sigma_y \geqq 4{,}000 kgf/cm^2$　　$\sigma_a = \sigma_y / 1.7 = 2{,}350 kgf/cm^2$

⑤ ブシュの材質は、高力黄銅鋳物HBsC4(JISH5102-1979高力黄銅鋳物）のベースメタルに固体潤滑剤（PTFE：四ふっ化エチレン樹脂）を埋め込んだものとし、リンクボス部に冷やしばめ(Shrink-fit)により取り付ける。

許容面圧は、次のとおりとする。

常時荷重に対し　$\sigma_{ba} = 300 kgf/cm^2$

最大反力に対し　$\sigma_{ba} = 500 kgf/cm^2$

なお、冷やしばめは、ブシュに埋め込まれた固体潤滑剤(PTFE)の高温劣化特性から選定した工法である。

⑥ ピンは大単重であるため、経済性を考慮して、中心コアに機械構造用炭素鋼鍛鋼品SF55Aを、スリーブにマルテンサイト系ステンレス鋼鍛鋼品SUS431を使用し、両者を焼きばめ一体化構造（ハイブリット構造）とする。

ただし、指針どおり摩擦・摩耗に対してスリーブ、それ以外の耐力設計には中心コアの材質充実のピンとして機能させる設計とする。

⑦ ブシュのピン摩擦力によるボス内回転止めは、ブシュ１個当たり２ｘ２本とし、ブシュと同材質の高力黄銅棒を、ボス部の応力集中の低い箇所（水平軸より－４５°）に温間圧入(常温にて圧入)する方式とする。

（３）　付加曲げ要因と変形量

設計外力として考慮した付加曲げ要因とそれによる変形量の代表値を以下に示す。

① タワーリンク・ピン受けブラケット・ウインド沓間の遊間：

設計最大負反力時　：４㎜

横力時（風・地震）：６㎜

② 塔架設誤差（鉛直度1/5,000）による水平移動：　１６㎜

③ 塔の水平度（ピン位置）：　1/10,000

④ 両塔柱の高低差　：±４㎜（リンク長の製作架設誤差を含む）

⑤ リンクの製作誤差：上下ボス内面の平行度：3.6/10,000

ブシュ・ピンの円筒度：0.9/10,000

［水平変位及び回転変位の集計］　通常時：4.1㎜、5.5/10,000（RMS値）

異常時(風、地震)：6.1㎜、5.5/10,000

（4）　ＦＥＭによる応力照査

ボス部橋軸方向、リンク本体部橋軸直角方向については、主としてＲ部の応力集中を検証する目的で弾性2D－FEM解析により発生応力の照査を行った。

ボス部最大相当応力 $\sigma_{TR}=2304<2350 kgf/cm^2$ （発生位置：上ピン水平軸より約＋15°）

リンクＲ部最大応力 $\sigma_w=2216<2700\times1.1=2970 kgf/cm^2$（発生位置：下ピン側Ｒ開始点）

（5）ブシュ応力度

最大反力時　$\sigma_b=406<500 kgf/cm^2$

常時反力時　$\sigma_b=296<300 kgf/cm^2$

（6）ピン応力度

ブシュ全強時　$\sigma_p=710<1700 kgf/cm^2$

$\tau_p=411<1000 kgf/cm^2$

ただし、SF55充実断面として評価した。

（7）　詳細設計結果

本橋のタワーリンク形状を図５．２に、構成部品を表５．３に示す。

本橋のリンク形状は、橋軸直角方向の断面変化が大きく、応力集中が厳しいため大きなＲ部を設け応力集中を緩和している。

一方、橋軸方向については断面変化が余り大きくないためテーパ変化させた断面設計とした。

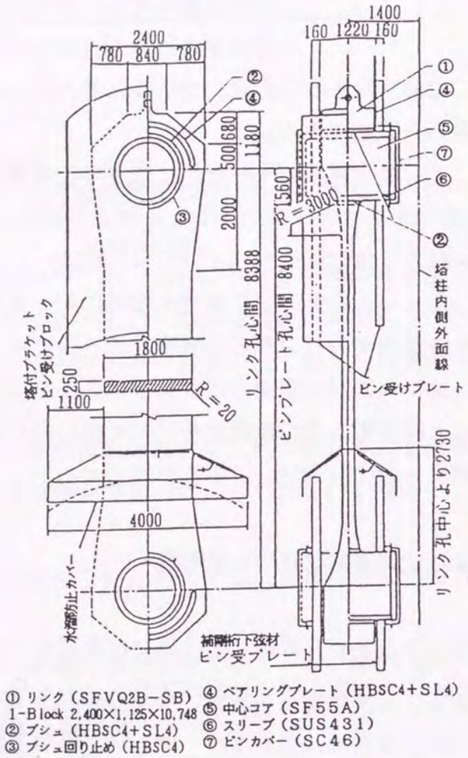


図５．２　下津井瀬戸大橋のタワーリンク形状

これらは、橋軸・橋軸直角方向の設計断面力の割合が異なるためで、南北備讃瀬戸大橋では下津井瀬戸大橋と全く逆の設計となり、橋軸方向にＲ部を設け、橋軸直角方向にテーパ変化させた断面を用いている。

表５．３下津井瀬戸大橋タワーリンク構成部品および付属品

部品名	材質	製作数量		概略重量（tf）		備考
		２Ｐ	３Ｐ	単体	合計	
①リンク	SFVQ2B-SB	2	2	59.1	236.4	2400x1125x10748
②ブシュ	$HB_SC_4+SL_4$	4	4	2.6	20.8	φ1576xφ1416x1125
③ブシュ回り止め	HB_SC_4	１６	１６	－	－	φ30x150
④ベアリングプレート	$HB_SC_4+SL_4$	8	8	0.1	1.6	R1020xR890x30
⑤中心コア	SF55A	4	4	15.9	127.2	φ1210x1760
⑥スリーブ	SUS431	4	4	6.3	50.4	φ1410xφ1210x2010
⑦ピンカバー	SC46	8	8	1.3	20.8	φ1702x165
⑧その他	HTボルト、ピン架設用冶具（１基）、下ピン孔用仮カバー（４基）					

５．２．５　タワーリンクの製作

タワーリンクの製作には、素材精錬から成品まで約８カ月を要した。

図５．３に主要部品の製作フローを、写真５．２に完成状況を示す。

以下に製作時の主要検討内容と主要部品の製作結果を示す。

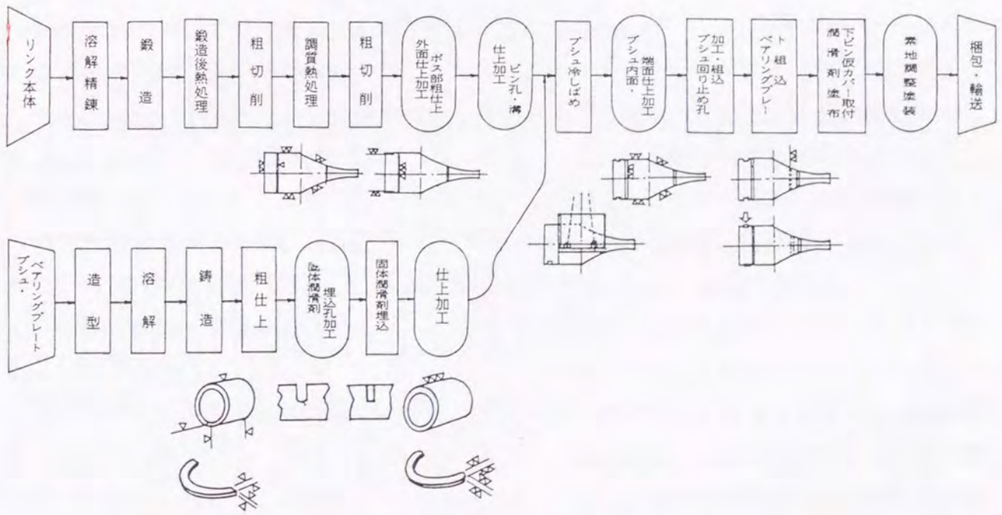


図５．３　タワーリンク主要部材の製作フロー（SB：下津井瀬戸大橋）[16]

（1）　一体鍛造型リンク

従来、タワーリンクはリンクボス部を鍛鋼品、リンク軸部を施工性（架設ブロック重量の軽減と製作架設誤差の吸収性一寸法精度）から高力ボルト継手を有する厚板溶接構造としていた。

しかし、本橋の場合は特に過酷な荷重条件で使用されるため、溶接を極力避け、また、添接によって軸部の剛性を高くしない（フレキシブル性の確保）ために、構造が簡単である「一体鍛造型」を採用することとした。

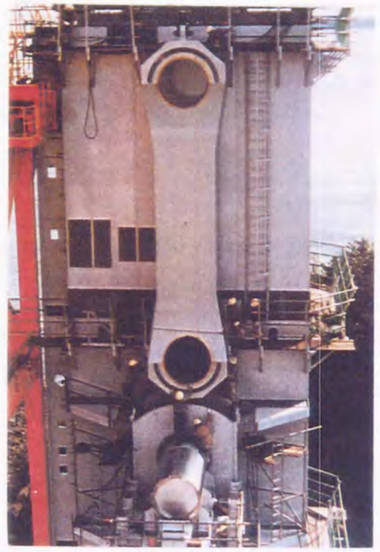


写真５．２ タワーリンク完成写真(SB)

（2）　リンクの要求靭性値と許容欠陥寸法

1）　リンクに要求される靭性値

リンク本体(SFVQ2B-SB)は、強度でSM58(現在のSM570)級の鍛鋼品として選定したが、その要求靭性値は、以下の理由から２㎜Ｖノッチ・シャルピー試験で架設地点環境条件から-15℃における吸収エネルギーを4.8kgf･mと規定した。なお、当該JISの規定温度は+20℃である。

① 超極厚58キロ級鋼としてSM58(50＜ｔ≦75)の規定値($_{2v}E_{-5℃}$≧4.8kgf･m)と同等以上であること。

② 架設地点の過去最低気温（-10℃）において破壊安全度が保証されること。本橋では、設計のトータルバランスから①を規格値、②を参考値とし、3)に示す製作基準に反映した。

以上について、本製作着手前に本体の一部から採取した供試体により、破壊靭性試験、疲労き裂進展速度試験、回転曲げ疲労試験を実施し、破壊安全性解析を行って設定した規定値の妥当性を確認している。

なお、図５．４に板厚t/4、t/2における遷移温度曲線を示した。

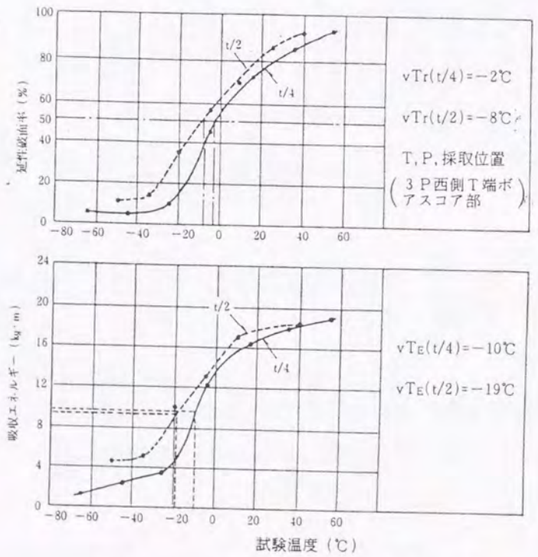


図５．４ SFVQ2B-SBの遷移温度曲線
(t/4, t/2、SB) [16]

$_{2v}E_{-5℃}$（t/4）　＝１２．０kgf･m
$_{2v}E_{-5℃}$（t/2）　＝１３．０kgf･m
$_{2v}E_{-10℃}$（t/4）＝１２．０kgf･m
$_{2v}E_{-10℃}$（t/2）＝１３．０kgf･m

であり、いずれも充分であった。

2）　リンクの許容欠陥寸法

前項で行った破壊力学的検討から「き裂（欠陥）が存在しても進展しない」ための許容き裂寸法は、$_{2v}E_{-5℃}$=4.8kgf･mで７㎜φとなった。

これより、超音波探傷試験よる非破壊検査では、許容欠陥寸法を４㎜φに設定した。

3）　プロジェクト別製作基準の策定

以上のように，JIS規格値の一部変更（衝撃試験）および追加（t/2での機械試験、－10℃での衝撃試験）があること、設計条件を満足させる部材寸法精度、仕上げ精度等を規定するために、別途、本橋タワーリンク独自の材料規格および製作基準を策定した。その詳細は文献[18]に述べられている。ここに、追加規定の－10℃とは、瀬戸内海地方の過去最低記録が－8.6℃であることから設定した。

4）　主要部品の製作結果

1］　リンクの製作

リンク本体の製造方法は次のとおりである。[16] [17]

① 塩基性電気炉により溶解精錬し、鋳込み時に真空脱ガス処理を行い、

② 内部品質を確保するため、鍛錬成型比を実体鍛錬で３Ｓ相当以上とし、鍛造後熱処理（焼入れ＋焼戻し）を行った。

③ 粗切削後約30㎜残し、調質熱処理（焼入れ＋焼戻し）し、

④ 超音波探傷検査のため、約5㎜残しの粗切削を行った。

表５．４に３Ｐ西側の化学成分、機械的性質を示す。

⑤ 仕上げ切削は、ブシュを冷やしばめした後、大型プラノミラーおよび大型横中ぐり盤によって行った。

⑥ 最後にブシュ回り止めの埋込および橋軸方向移動ガイド用のベアリングプレートのはめ込みを行った。

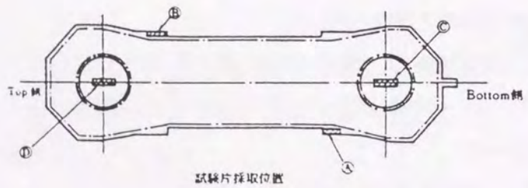
⑦ ブシュ冷やしばめは、冷媒にメタノールを使い、ドライアイスで－60℃に冷却し、冷やしばめ時のすき間約1.5㎜、締め代約0.3㎜の条件で実施した。

表５．４　下津井瀬戸大橋タワーリンクの化学成分・機械的性質（リンク本体）

（対象部材：３Ｐ西側）

化学成分(%)	元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	JIS G3204-1982を適用（とり分析値）
	規格値	≦0.27	≦0.40	0.50～1.00	≦.030	≦.030	0.50～2.00	0.25～1.50	0.25～0.70	≦0.10	
	実績値	0.15	0.26	0.85	.006	.006	1.93	1.01	0.53	0.05	

機械的性質		（A）軸部（平行部）			（C）ボス部（ピン孔）		JIS G3204-1982を準用
試験片採取位置		表面	1/4 t	1/2 t	1/4 t	1/2 t	
0.2%耐力 (kgf/cm²)	規格値	(41)	≧46	(41)	≧46	(41)	（衝撃試験の試験温度の変更）
	実績値	61.0	60.1	59.8	60.1	59.4	
引張強さ (kgf/cm²)	規格値	(57～81)	63～81	(57～81)	63～81	(57～81)	
	実績値	72.0	71.8	71.5	71.9	71.6	
伸び (%)	規格値	(13)	≧14	(13)	≧14	(13)	JIS 14A号
	実績値	26.3	23.2	23.3	22.5	21.6	
絞り (%)	規格値	(32)	≧35	(32)	≧35	(32)	
	実績値	75.0	74.3	74.3	69.0	70.5	
衝撃試験 (kgf・m)	-5℃ 規格値	(≧3.7) ≧4.3	≧4.1 ≧4.8	(≧3.7) ≧4.3	個別≧4.1 平均≧4.8	(≧3.7) (≧4.3)	JIS4号（2mm V）
	(平均) 実績値	24.4	24.3	19.6	11.0	13.8	
	-10℃ 参考値	個別≧3.7 平均≧4.3					
	(平均) 実績値	24.5	25.5	23.0	9.4	8.6	
硬さ (H_B)	目標値	H_B 170～250					参考試験
	実績値	214	209	217	220	212	



Top側　　Bottom側

試験片採取位置

写真５．３は、機械加工中のリンク本体(軸部)を示す。

2］ブシュの製作

ブシュの製作は以下により行った。

①　母材は誘導電気炉・遠心鋳造法により円筒形に鋳込み、

②　粗加工後、成型された固体潤滑剤を埋め込んだ。固体潤滑剤はボーリング孔に特殊接着剤で固定した。

③　ブシュは冷やしばめ時は円筒形のままとし、冷やしばめ後にボス部正規寸法に合わせて仕上げた。これは、冷やしばめ後、温度戻り時の円周反力の不均等による変形を拘束するためである。

写真５．４は、円筒形状に仕上げたブシュを示した。この後、ボス形状に合わせて切り出し・削成を行う。この製作方法では歩留まりは多いが、鍛造工程、後工程の冷やし嵌め作業を考慮すると、その時の一様でない変形を防止するためには必要な工法である。



写真５．３　リンク本体の機械加工(SB)

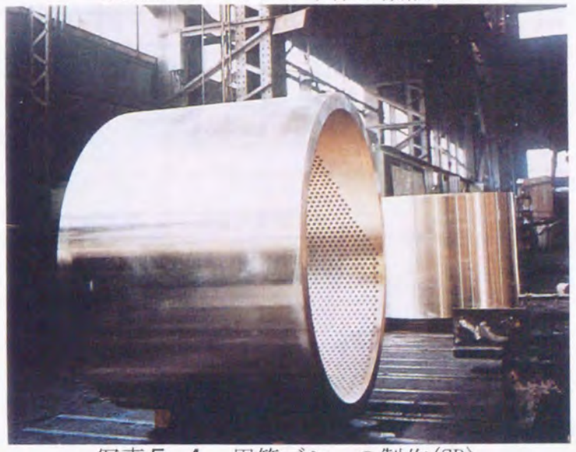


写真５．４　円筒ブシュの製作(SB)

3］ピンの製作

スリーブの製作は以下により行った。

①　塩基性電気炉で真空脱ガス処理された鋼塊を、鍛錬成型比(中空鍛錬)２M以上で鍛造した。

ただし、中空鍛錬の他、穴拡げ鍛錬を併用した。

②　鍛造後熱処理は［焼準＋焼戻し］とした。

③　その後、スリーブを加熱温度約160℃、すき間約1.4mm、締め代約0.6mmで焼きばめし、別に製作した中心コア材と一体化した。

④　ピンの仕上げ切削精度は実

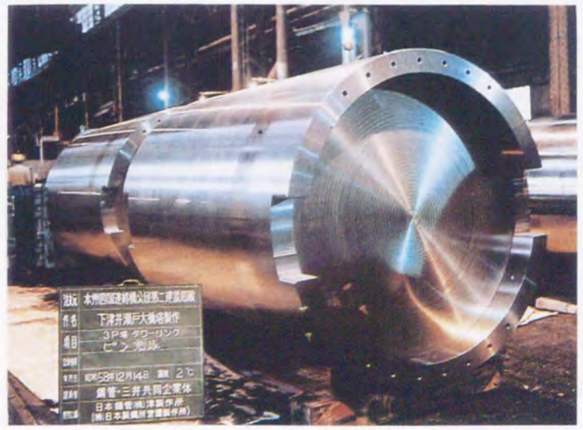


写真５．５　仕上げ加工されたピン(SB)

験時と同じ6.3S以上とした。

写真5．5は、スリーブを中心コアに焼き嵌めした後、仕上げ加工されたピンを示す。

5）タワーリンクの製作精度

タワーリンクの製作精度は、設計計算上の要求値から許容値を設定したが、表5．5（a：リンク本体、b：ピン）に示すとおり充分な成績が得られた。

表5．5．a　下津井瀬戸大橋タワーリンクの製作精度（リンク本体）　(mm)

計測項目		許容値	寸法精度実績値 2P(西)	2P(東)	3P(東)	3P(西)
ピン孔間隔 L1、L2－L（設計値）		±0.8	+0.13:L1 +0.30:L2	+0.54:L1 +0.20:L2	−0.20:L1 −0.30:L2	±0 :L1 ±0 :L2
ピン平行度 L1－L2		0.4	0.17	0.34	0.10	±0
ベアリングプレート間隔 H1，H2－H（設計値）		±1.0	+0.30～ +0.77	+0.60～ +0.90	+0.10～ +0.50	±0～ +0.50
曲がり	δ1	3.0	1.0	0.0	0.1	0.1
	δ2	3.0	1.0	1.0	0.0	0.2
ボス部上下側面ずれ h		0.5	0.5	0.5	0.0	0.0
ブシュ内径 d(実績)-d(設計)		±0.2	−0.13max	−0.17max	−0.17max	−0.14max
〃 内面真円度($r_{max}-r_{min}$)		0.1	0.09max	0.08max	0.04max	0.07max
〃 内面円筒度 $\Sigma r_{max}/5-\Sigma r_{min}/5$		0.1	0.05max	0.09max	0.10max	0.08max

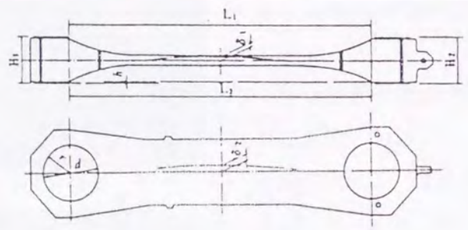


表5．5．b　下津井瀬戸大橋タワーリンクの製作精度（ピン:スリーブ焼きばめ後）(mm)

区分＼項目		外径公差	真円度 注1)	円筒度 注2)	備考
	許容値	±0.20	0.1	0.1	
2P	東側上ピン	+0.11～+0.16	0	0.025	注1) $D_{max}/2-D_{min}/2$
	東側下ピン	+0.04～+0.08	0	0.020	
	西側上ピン	+0.11～+0.16	0	0.025	
	西側下ピン	+0.05～+0.06	0	0.005	注2) $\Sigma D_{max}/8-\Sigma Dmin/8$
3P	東側上ピン	+0.09～+0.13	0.005～0.025	0.03	D:外径
	東側下ピン	+0.07～+0.09	0.01	0.02	
	西側上ピン	+0.12～+0.15	0.01	0.03	
	西側下ピン	0～+0.03	0.01	0.03	

5．2．6　タワーリンクの架設

タワーリンクの架設は、「塔架設工事」の中で、仮受け架台を用いて塔架設クレーンにより行われた。

ピンの挿入は、クリアランス（ブシュ内径とピン外径との径差）が6㎜と厳しいため、精度の高い専用架台にPTFE板を敷き、水平油圧ジャッキによりスライド挿入を行った。この場合の押し込み力は、摩擦係数をμ=0.05とすれば、W=22tより、F=1.1tfである。

写真5．6は、リンク本体の架設状況を示す。また、写真5．7に上側（塔側）ピンの挿入状況を示す。

写真5．8は、タワーリンクが設置された塔完成状況である。

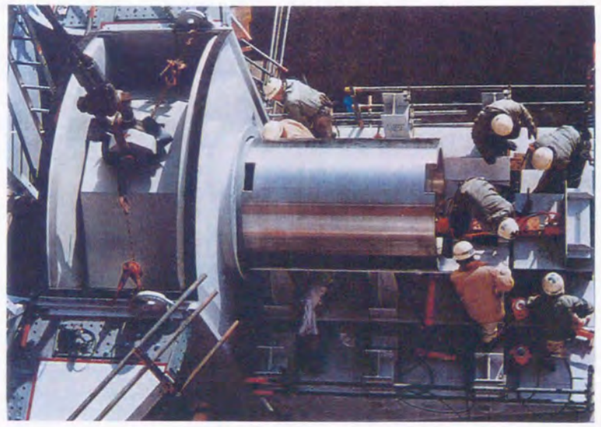


写真5．7　ピンの挿入作業(SB)

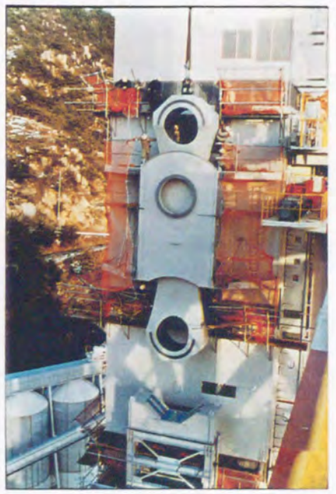


写真5．6　タワーリンクの架設状況(本体吊り込み, SB)

下津井瀬戸大橋のタワーリンクは、塔工事で架設されるため、補剛桁の設計荷重に一部未定項目もあったが、出来る限りの試算を行ってその設計荷重を決定している

一般に、橋梁部材では設計条件が未定な場合、大きめの条件で安全側として設計されることがある。しかし、このような設計方針では、「橋梁支承構造の動く部分の設計」においては４．５節にに示したように、「Stick slipの問題を内在しているため必ずしも安全側とはならない」ことがあることに留意しておく必要がある。

揺動を受けるタワーリンクにおいては「摩擦、摩耗、潤滑」いわゆるトライボロジーから見た厳密な挙動の推定は、既設橋の詳細な調査データが無いことから難しい状況であった。特に本橋では工事工程に余裕が無く、既述の実機規模の確認実験を実施せずに設計を固めている。



写真５．８　塔完成状況
（SBタワーリンク架設済）

以上のような状況において設置された下津井瀬戸大橋のタワーリンクにおいては、供用後は充分な頻度で点検管理し、摩耗、発音、変位等に関する異常の早期発見に努めるべきであろう。

写真５．８は下津井瀬戸大橋の塔完成状況であり、補剛桁側ピンを除きタワーリンクは架設済みである。

５．３　下津井瀬戸大橋のエンドリンクに発生したStick slip 問題

下津井瀬戸大橋エンドリンクの設計製作の基本的な方針は、タワーリンクと同様であるが、タワーリンクより作用反力が小さく、構造が小規模となるため、リンク本体にビルトアップ（鋼板溶接集成）構造、ピンにはＳＵＳ充実断面を採用している。

ここで、リンク本体は、基本設計時には、複雑な方向に変位する部材となるため、全方向に剛な鋼管構造（極厚断面の鋼管構造となるため、遠心力鋳鋼管を採用）とされていたが、実製作にあたって、経済性確保から溶接Ｈ形断面に変更された経緯がある。

この事は、球面継手を採用したことを含めて、別記（４．５参照）したように、Stick slipによる発音現象[19][20]とは無関係ではない重要な事項である。

図５．５に下津井瀬戸大橋のエンドリンクの形状を示す。

（１）Stick slipの概要

下津井瀬戸大橋は「張り出し径間付き単径間吊橋」である。いわゆる連続吊橋の特徴である、側径間比の非常に小さな補剛桁（Lc=940m, Ls=130m, Ls/Lc=0.138。因みに南備讃瀬戸大橋のそれは0.249。明石海峡大橋では0.482）であるために中間支点のみならず、端支点においても荷重の組合せによっては負反力が発生し、鉛直支承は複雑な挙動を強いられる構造部材となる。

本橋では、負反力を受ける荷重条件からリンク支承構造とし、３次元的変位特性から補剛桁を下から支えるピボット（球面軸受）を有するリンク構造が採用された。（いわゆるリンク構造であるが、球面接触であることに別途検討が必要であった）。さらに、経済性から、前述のようにリンク本体構造には極厚断面の鋼管構造を変更し、溶接集成Ｈ形断面柱を採用している。

このエンドリンクの軸受部材は材料的にはタワーリンクの考え方を導入しているが、供用後、約５年後において、高周波衝撃音が発生し、近隣住民より苦情が寄せられた。

公団では、特に音が大きい下津井側のＡ３エンドリンク２基について、特異音軽減の応急対策を実施するとともに、発音の原因調査および根本的特異音軽減対策検討を行っている。

当面の措置として、補助潤滑材注入（強制潤滑）工法による補修工事を実施している。

ここでは、詳細な調査内容、補修工事検討内容については別途報告書[19][20]に譲る事として、トライボロジー面から私見を交え、考察する。

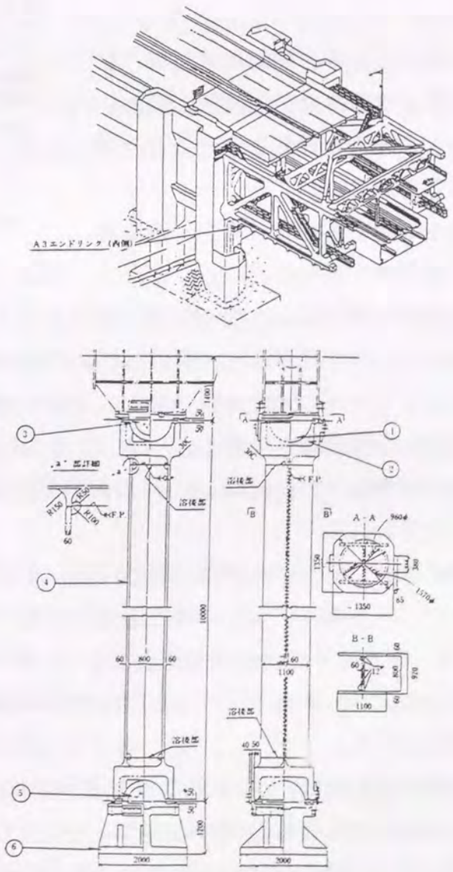
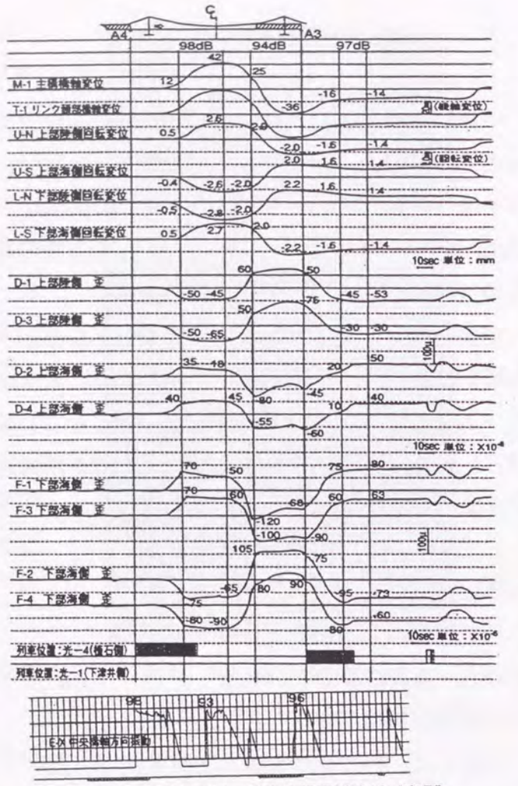


図５．５ 下津井瀬戸大橋のエンドリンク形状[19]

（２）発音現象の発生と応急対策

本州側の橋台ＳＢＡ３のエンドリンク（以下、SBA3エンドリンクという）は、供用後５年経過した1993年

6月頃から低周波の列車騒音に混じって「カーン」という高周波の可聴音(金属性の衝撃音が目立つようになってきた。橋梁部材を音源とする発音としては極めて特異な音であった。この特異音軽減のための原因調査、ならびに根本的改善策を実施するまでの当面の応急対策として、エンドリンク軸部のH断面の開口部を鋼板で囲い、その内部に砂を充填するなどの防音対策を実施した。図５．６参照。



[19]

図５．６　Stick slipによるエンドリンクの発音

（３）原因調査

その後、ひずみ、振動加速度などを載荷状態を考慮しながら計測しており、それらのまとめと私見を述べると以下のとおりである。

① 特定の重荷重列車（貨物、特急寝台）載荷時に発生している。これはある規模の載荷以上になった時、球面軸受において摩擦切れ（摩擦抵抗より強制変位荷重の方が大きい場合）を起こし、急激なリンク支承の弾性的戻り現象によって振動し、発音（構造体が鋼製のため、金属音）となったものと推定できる。

② この現象は、Stick slip（４．５節参照）といい、本橋の場合、以下の発生機構によるものと思われる。

本橋のエンドリンクでは、設計に比し、常用荷重状態では軸受部の移動量が極く小さいため、オス側のブシュに埋め込まれた固体潤滑剤が摺動面に十分供給されず、メス（ウス）側の相手材と金属接触を起こし、摩擦係数が増大し、リンク本体のバネ効果（剛性）により、摩擦が切れるような大きな移動量（荷重）が作用した時に発生していると推定される。

発音そのものは、４．５節に示すように、このような作用が繰り返し行われる吊橋特有の変形性によるものである。

③ すなわち、軸受でいわれる典型的な「なき」現象が、本橋で起き、他橋で発生していない理由は次のように考察される。

本橋のエンドリンクは、最も大きな設計移動量（設計反力）に対し、常時移動量（常時反力）が少ないために、常時はリンク軸部の曲げ剛性で柔軟に受け流しているものと思われ、大きな移動量（水平反力）が作用した時に発生するものと考えられる。

④ また、供用後５年経過後に発生した理由は、以下のように考察できる。

なじみを確保するため、一般の支承と同様、リンク組立工場で組立時にメスオス両側にPTFEを塗布しており*注)、ちょうど５年経過後、この塗布潤滑剤が消耗あるいは脱落したものと考えられる。

すなわち、金属接触の始まりであったと考えられる。この事は、Stick slip現象が下側ブシュ部で発生していることからも了解できる。下側のブシュは上方に凸状に配置されており、本来、被膜を形成すべき潤滑剤が摺動面に保持されなく、脱落するためと考えられる**注)。

＊注）一般の支承と同じで、初期摩耗の軽減と当たり面のなじみをよくするために、すなわち、定常摩耗を早期に確保する目的で施工される一般的作業である。

＊＊注）加工硬化を受けて母材より硬度が高くなった粒子を含む摩耗粉の排出には、凹形の配置では不利である。

なお、Stick slipとは別に、Fretting wearにより初期塗布潤滑剤が脱落し、すべり振幅が固体潤滑剤埋込ピッチより小さいため、金属接触を起こしている可能性もある。

（４）恒久的対策と対策効果

リンク軸部の発生ひずみ計測結果より求めた摩擦係数は、設計値$\mu=0.15$（大型摩耗試験より想定した摩擦係数は$\mu=0.08$）を超える0.16～0.18が計測されている。この事から、摩擦係数低減策を講ずることが有効とし、潤滑剤注入工法を検討した。

まず、ボス外部より内部のブシュ頂部の固体潤滑剤埋込孔に向け、潤滑剤注入用斜孔を削孔し、高圧力下の摺動面にも浸透しうる軽質オイル（Stick slip防止用オイル：極圧用ギヤオイル）を注入した。

その結果、東側エンドリンクでは、補助潤滑剤注入前の摩擦係数0.16～0.17が0.10に、振動加速度87～90ｄBが60ｄBまで低下し、可聴音はおさまっている。西側エンドリンクでは、摩擦係数は0.16～0.18から0.13に低下したが、振動加速度は微減にとどまり、可聴音(一般に20～20,000Hz)発生回数は激減したものの解消には至っていない。特に、低周波振動およびフレッチングの問題については別途検討が必要に思う。

採用した本工法は、乾燥摩擦から境界摩擦(境界潤滑)に転じていたものを強制潤滑に変更したこととなる。なお、東西エンドリンクの発音差は被膜の厚さ、均一性によると思われる。また、潤滑被膜の持続性、摩耗量の変化（増大）にも追跡調査が必要であろう。

（5）今回の対策案の考察

1）金属接触とデッドゾーン

金属接触の発生可能性については、デッドゾーンの有無により判定できる。

デッドゾーンLdは、下記のとおりである。図5．7 参照。Ld＝摺動方向の固体潤滑剤埋込間隔－潤滑剤直径－摺動量（すべり移動量）

∴Ld＝46－14－27＝5mm

デッドゾーンは5㎜あるが、実験[23]および実績によれば、10㎜以下であれば潤滑効果に問題ないと結論付け、許容範囲と考えられた。

しかしながら、根拠とした実験報告は、吊橋ハンガーロープのピン定着部に球面軸受を用いる場合の摩擦特性確認実験の成果（1993.3）[21]である。

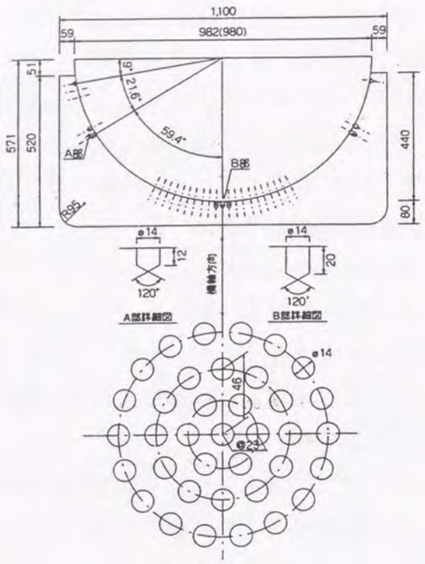


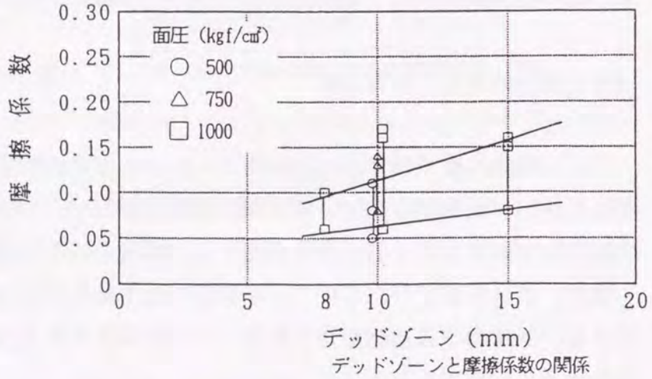
図5．7　下津井瀬戸大橋エンドリンクの固体潤滑剤配置図[20]

さらにこの実験は、補剛桁の風による振動に起因する回転の影響を解明するために実施され、

① N＝10^5までの摩擦係数の確認、

② 橋が供用中であっても部材交換が可能であるため、摩耗に対して　は要求性能とせず、

③ 実験結果の整理にあたって、摩擦係数は実験値0.18を、設計値に0.2と評価している。



デッドゾーンと摩擦係数の関係

図5．8　ハンガーロープＵＪ摩擦試験結果[21]

円筒軸受であるタワーリンクにおいては、N＝10^6まで繰返し実験を行っており、実験値最大摩擦係数0.08に対し、設計値を0.15としたこととは評価に大きな開きがある。

また、実験結果を詳細に分析すると、摩擦試験後のブシュ表面は、金属接触により大きく荒れており、特に球端部では典型的なスクラッチングが発生しており、部材交換が困難な永久構造物には不向きであったことに留意されねばならない。

（ハンガーロープも永久構造物であるが、多数の線材で構成され、かつ、多数本ある部材で、仮に不具合が発生し、極端には極く一部の部材に破断が発生したとしても橋の全体破壊に繋がらないし、供用しながら交換が可能な部材である。支承は、その破壊により橋の機能が損なわれるか、極端な場合には落橋に至る。交換可能なように配慮されてはいるが、現実には非常に困難であるため、設計の考え方も分けて考えるべきである）。

敢えて表現すれば、摩耗の進行に伴い(Stick slipの発生有無は問わない)、bearing部にすき間が拡大することとなり、補剛桁の移動に伴いガタ付きが発生することになる。bearing部分は、耐力的には十分な余裕があることが多いため、まず問題となることはない。しかし、エンドリンクでは、橋梁の端部に位置し、通常陸地にあることが多く騒音問題を引き起こす恐れがある。

以上の考察によれば、橋の耐用年数100年という長期に渡りトライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑）面から安定であるかどうか疑問が残るところである。

2）別対策案の提案

現在採られている対策方案は、将来的には潤滑剤の定期的供給が必要な工法である。

Stick slip現象の低減案としては、

① 摩耗量の増大（寿命の短縮化）という問題を抱かえるが、リンク軸部の剛性をさらに増大させることも必要であろう。この場合、軸受部の寿命は短くなる可能性が高いが、ガタが出始めても耐荷力、回転性等エンドリンクの機能にはほとんど問題はないと推定される。

② また、メンテナンスの省力化を考えると、思い切って流体（強制）潤滑機構とし、オイル潤滑を実施するのが良いと考えられる。ただし、スプレーサドル（固形に近いグリース・オメガ75を欠円ローラー転動部に充填している）で経験したように、その密封性が不完全であると漏れ出しの恐れがあり、施工には留意が必要である。また、オイルには、経年劣化の少ないものを選定すべきである。

3）実施すべき確認実験

リンク支承構造を含め橋梁支承に共通である固体潤滑剤 PTFE 埋込型支承について、Stick slip防止とトライボロジー特性改善の観点から、限界デッドゾーンを判定するため、実験的確認が必要である。既述のように、すべり挙動は、設計(異常時)と実態（常時）とで大きく異なることが多いので、実験条件の決定および結果の評価には難しい面が考えられるが、橋の長期供用を考えると是非解決しておくべき問題である。

5．4 ま と め

これまでに述べてきたリンク支承構造の開発を背景にまとめた設計・製作指針により数々のタワーリンク、エンドリンクに適用され、さらにはハンガーのピン定着構造にも応用されてきた。

リンク支承構造は、それぞれ橋の重要部分に位置しており、伸縮装置を含め橋の数少ない動く部分に使われてきた。全ての橋の設計時に想定した挙動を満足するようにリンク支承構造は設計・施工できないために、ある部分妥協を許さざるを得ないが、開発経緯、実験的確認範囲を前提に、支承構造としての工学的判断などの結果で施工されていることを常に忘れてはならない。

保守管理にあたっては、「動く部分には分からないことが多い」という観点に常に立ち、錆の発生の有無および場所、振動あるいは音の発生の有無および場所、円滑な移動・回転等に着目して生きた情報を掴んでおく必要があろう。

下津井瀬戸大橋のエンドリンクの軸受・球面ブシュで問題となったStick slipについては、第４章にも述べたが、デッドゾーンに関するトライボロジーからの限界値を確認する実験の重要性について述べた。

現在問題となっていない円筒ブシュについても、設計によっては将来的には見直しが必要かもしれないが、少なくとも球面ブシュについては、下津井瀬戸大橋の事例を契機に、各種実験データの蓄積を行い、設計指針の策定が必要な時期と考えられる。今後の研究に期待する内容を含んでいるが、設計施工にあたっては少なくとも円筒ブシュで得られた成果が十分に反映されることが望ましい。

供用後の実構造に対しては、前述のstick-slip現象の有無および微動摩耗に着目し、タワーリンク部材（軸受部およびリンク軸部）の常時振動状況を把握し、潤滑状況、摩耗粉の排出状況、発錆状況等を確認し早めに対策を打てるよう定期点検が重要である。これらトライボロジーの問題は難解に見えるが、簡単な目視点検、体感振動等で相当な情報が得られるはずである。

第６章　　結　　論

吊橋補剛桁の鉛直支承は、大反力、３次元的大変位を受ける橋の重要部材である。特に連続補剛桁を有する道路鉄道併用橋にあっては、負反力を受ける支承になり、この橋梁形式の成立を支配するほど重要な部材である。

この鉛直支承には、形式比較検討の結果、リンク支承構造が適切と考えられる。

ここで、リンク支承構造とは、ピン・ブシュの円筒軸受をその両端に配置したリンク構造のもので、主塔部中間支点に設置されるものをタワーリンクという。

この支承の軸受機構は、トライボロジー面からいえば、高面圧・低速揺動を受ける固体潤滑剤を埋込んだ円筒接触型無給油軸受である。この軸受は、厳しい腐食環境において揺動運動により摩擦方向が反転し、繰返しすべり摩擦を受ける。しかしながら、本州四国連絡橋建設以前は、大反力・大寸法下において、常時低速揺動運動する吊橋補剛桁のタワーリンクの軸受を設計するための技術情報は皆無であった。

そこで、本研究において、タワーリンクの軸受部に着目し、トライボロジーに立脚した材料仕様の整備および設計法の確立を目的として机上検討並びに実験的研究を行ったものである。

まず、要求性能を明らかにし、設計条件、課題等を整理検討した。これらの結果を踏まえ、過去に例のないトライボロジー面に着目した摩耗実験を実施すると共に、設計法、適用材料、製作、架設等広範囲に検討を加え、関連する技術を確立することができた。

本四架橋３ルート全吊橋のタワーリンクは、この技術により建設され、建設後10数年を経た現在、何らの機能障害もなく稼働している。

本論文は、これらの検討、研究内容をとりまとめたものであり、主な結論を以下に示す。

第１章には、本開発研究の背景、目的など研究概要および本論文の構成について記した。

第２章では、吊橋補剛桁鉛直支承が具備すべき条件(所要性能)、設計条件・要求品質および実機における設計施工上の課題について明らかにし、支承形式およびその軸受方式を検討し、リンク支承構造(タワーリンク)を提案した。

タワーリンクは、鉛直面内の回転および橋軸方向の変位をピン・ブシュの円筒軸受で、水平面内の回転・変位はリンクのねじれとたわみで吸収する機構とする。

第３章では、タワーリンクをトライボロジー面から眺め、軸受部にピン・ブシュの組合せを用いたシステムの設計･施工上からの課題を整理した。次いで、この課題を解決することを目的として２種類の模型実験を実施した。

まず、軸受材料であるピン・ブシュの適用材質を決定するために小型模型実験を行い、トライボロジー諸特性を確認し、材料・材質の組合せを提案した。

さらに、提案した材質の組合せで大型模型による寸法効果について、長期繰返し試験を行い、小型模型実験と同等の結果が得られることを確認した。

また、実験結果が定常摩耗であり、これを基に実機での摩耗量を推定し、実機設計に応用できることを明らかにした。

第４章では、タワーリンクシステムに関する設計、製作の基本方針を実験研究成果に基づいて提案した。主要な項目は、実機における摩擦係数・比摩耗量の要求性能、ブシュの冷やしばめ、中心コア・スリーブ方式のハイブリットピン、ブシュの面取り、ピンおよびブシュの回り止め等である。

また、リンク支承構造におけるStick slip現象の分析および対策について述べ、現象の発生可能性の照査方法を提案した。

第５章では、大型タワーリンクの実例を採り上げ、第４章の成果に基づき、実機の設計･製作にあたって検討あるいは提案した事項について整理し、タワーリンク構造が長大吊橋の大型鉛直支承として成立することを示した。

第６章には、本研究の総合的な結論を述べた。

以上の研究の結果、吊橋補剛桁のリンク支承構造に関する総合結論は下記のとおりである。

① 支承形式には、その軸受方式を円柱ピンと円筒ブシュの組合せによる円筒接触方式とした無給油潤滑（乾燥摩擦）機構のリンク支承構造を採用する。

② ピン材料には、マルテンサイト系ステンレス鋼SUS431を使用する。

③ ブシュには､PTFE固体潤滑剤埋込型高力黄銅鋳物HBsC4を使用することにより､軸受が構成できる。

④ 比較的高面圧でもトライボロジー面で不都合はない。すなわち、最大反力時の平均面圧が500kgf/cm^{2}までは摩擦,摩耗,潤滑状態は安定であることを確認した。

⑤ すべり速度が２mm/s程度である場合、本軸受の摩擦係数は、実験値上は０．１０以下であり、設計値として０．１５を採用できる。なお、別途行った実験により、すべり速度10mm/sまではこの値が使用できると考えられる。

⑥ 安定したトライボロジー特性を確保するために、ピン・ブシュの径差（クリアランス）は、３%以下が望ましい。

本開発研究の結果、長大吊橋の大型タワーリンクが施工可能であることが明らかとなった。本研究の成果を基に、本州四国連絡橋全ての吊橋の設計方針がまとめられ、実機の設計・製作が行われている。また、斜張橋、トラス橋の支承にもその基本的なトライボロジー面の研究成果が応用されている。

タワーリンクシステム(ピン･ブシュの円筒軸受機構を有するリンク支承構造)において

は、摩耗現象の長期予測、併用吊橋の複雑な挙動等、難しい問題を解決しているが、より経済的、合理的な設計を行うためには、今後は、設計時に想定した条件との一致性を確認しながらの保守・点検が重要であり、本論文においてもその重要性について言及した。

《 謝　　辞 》

本論文のテーマは、昭和４７年から本州四国連絡橋公団設計第一部に在職した３年９カ月当時の上司であった田島二郎博士(故人。1998年8月12日逝去)の指導により研究を開始したテーマである。後、瀬戸大橋で約１０年間、実際に設計施工を担当し、その間、タワーリンクピン・ブシュの軸受に関するいわゆるトライボロジー面の実験的研究を経て、リンク支承構造の設計仕様を確立させることができた。

本論文をまとめるにあたり、大阪大学接合科学研究所堀川浩甫教授より懇切丁寧なるご指導を賜りました。記して深甚なる謝意を表します。また、大阪大学大学院工学研究科西村宣男教授並びに松井繁之教授には貴重なご意見、ご指導を頂きましたことを深謝申し上げます。

本論文執筆においては接合科学研究所金裕哲助教授には適切な助言を得ました。

本研究については土木学会鋼上部構造委員会故奥村敏恵委員長、支承構造分科会（赤岡純主査）から実験、設計指針案に対して有益な助言、指導を賜りました。

実験にあたっては、タワーリンク小型模型試験においては（株）日本製鋼所大西圭司氏（当時研究室長、現社長）、タワーリンク大型模型試験並びにグライト板模型試験の実施についてはオイレス工業（株）故多田博氏（当時技術部長）他、関係各位には技術面から有意なる提案・助言を頂きました。

本論文執筆にあたっては当公団第二管理局長辰巳正明氏、維持施設部長村田正信氏に執筆のお奨めを頂き、公団の上司、同僚の方々には温かいご協力を得ました。

以上、御指導、御協力賜った各位に対し、記して深甚なる謝意を表する次第です。

最後に、本論文を故田島二郎博士の御霊前に捧げると共に、日夜惜しみない協力を得た愛妻に感謝の意を表します。

引 用 文 献

[1] 本四公団:本州四国連絡橋上部構造設計基準 昭51.3(最新版は平1.4)

[2] 土木学会:本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書
別冊5 リンク支承構造設計の指針 昭51.3

[3] 本四公団・㈱日本製鋼所:タワーリンク用ピンブッシュ摩耗試験装置製作工事及び実験報告書 昭49.3

[4] 田島・村瀬・大西:タワーリンク用ピン・ブシュの摩耗試験
第30回土木学会年次学術講演会 昭50.10

[5] めっき技術マニュアル:(財)日本規格協会編

[6] 本四公団・㈱日本製鋼所:タワーリンク用ピンブッシュ摩耗試験
(摩耗におよぼす面圧ならびにクリアランスの影響) 昭50.3

[7] 本四公団・㈱日本製鋼所:タワーリンク用ピンブシュ摩耗試験
(高面圧における長時間摩耗について) 昭51.3

[8] 本四公団・オイレス工業㈱:タワーリンク用大型ピン・ブッシュ摩耗試験 昭51.3

[9] 村瀬・田島・奥川:タワーリンク用ピン・ブシュの摩耗試験(続報)
第31回土木学会年次学術講演会 昭51.10

[10] 本四公団第二建設局・オイレス工業㈱:PTFE支承板の摩擦・摩耗試験 昭56.1

[11] 村 瀬:PTFE支承板の摩擦・摩耗実験 第36回土木学会年次学術講演会 昭56.10

[12] 田中久一郎 : 摩擦のおはなし、(財)日本規格協会

[13] 腐食防食協会編 : 防食技術便覧、日刊工業新聞社

[14] T.IIJIMA, Y.YANAKA, S.MURASE:The Shimotui-Seto Bridge Construction Project, ROADS IN JAPAN, 1982.4

[15] 飯島、谷中、村瀬:下津井瀬戸大橋の橋梁計画 橋梁と基礎 昭58.4

[16] 奥川・村瀬:下津井瀬戸大橋タワーリンクの設計・製作 本四技報 '85.7

[17] 村 瀬:大型鋳鍛鋼品の製作・架設 橋梁と基礎 88、8

[18] 本四公団第二建設局:下津井瀬戸大橋タワーリンク製作基準 昭58.5

[19] 村卸、渡辺:吊橋エンドリンクの精密点検、本四技報'96.4

[20] 池田、中西:下津井瀬戸大橋A3エンドリンク補修工事報告、本四技報'97.1

[21] 本四公団第一建設局:ケーブルハンガー用ユニバーサルジョイント実験、93.3

投稿論文リスト

No.	論　　文　　名	執　筆　者	掲　載　先	年　月
1	タワーリンク用ピン・ブシュの摩耗試験	田島二郎、村瀬佐太美、大西敬三	第30回土木学会年次学術講演会講演概要集	S50.10
2	タワーリンク用ピン・ブシュ摩耗試験（続報）	村瀬佐太美、田島二郎、奥川淳志	第31回土木学会年次学術講演会講演概要集	S51.10
3	Wear Tests of Solid-Lubricant-embeded Bearings for Tower Link Pins of Suspension Bridge	J.Akaoka, J.Tajima, S.Murase, M.Watanabe, J.Isizaka, H.Tada, Y.Kage	ASLE PROCEEDINGS 2nd International Conference on Solid Lubrication on 1978	S53.8
4	ＰＴＦＥ支承板の摩擦・摩耗試験	村瀬佐太美	第36回土木学会年次学術講演会講演概要集	S56.10
5	下津井瀬戸大橋の橋梁計画	加島聡、田中美宇、村瀬佐太美	第14回日本道路会議論文集	S56.10
6	The Shimotsui-Seto Bridge Construction Project	T.IIJIMA Y.YANAKA S.MURASE	ROADS IN JAPAN	S57.4
7	下津井瀬戸大橋タワーリンクの設計・製作	奥川淳志、村瀬佐太美	本四技報８５．７	S60.7
8	本四架橋の技術的話題	村瀬佐太美他	ＪＳＳＣ VOL.22	S61.1
9	本四架橋技術ｍｉｎｉ事典	村瀬佐太美他	土木施工	S63.4
10	大型鋳鍛鋼品の製作架設	村瀬佐太美	橋梁と基礎	S63.8
11	本州四国連絡橋の技術開発　－大型鋳鍛鋼品	村瀬佐太美他	本州四国連絡橋公団（非売書）	H8.3

No.	論　　文　　名	執　筆　者	掲　載　先	年　月
12	A TRIBOLOGICAL APPROACH TO DESIGNING LARGE TOWER LINK FOR SUSPENSION BRIDGE	K.HORIKAWA, S.MURASE	International Symposium on Design of Metal Structures)	H9.12
13	トライボロジーを考慮した長大吊橋用大型タワーリンクの開発	村瀬佐太美	鋼構造論文集	H10.6
14	下津井瀬戸大橋エンドリンク球面支承部の騒音対策	松本毅、村瀬佐太美、池田定三、中西治	鋼構造論文集（投稿中）	H11、

Ａｐｐｅｎｄｉｘ

Ａ１　トライボロジー用語と定義

Ａ２　ＰＴＦＥの特性

Ａ３　ＰＴＦＥ支承板の摩擦・摩耗特性
（グライト板の摩耗試験）

Ａ４　球面軸受の摩耗特性
（ハンガー定着部の摩耗試験）

Ａ５　本州四国連絡橋主要橋梁のタワーリンク・
エンドリンクの構造諸元

TRIBOLOGY関係文献

Appendix A1～A5文中の＊○№は下記TRIBOLOGY関係文献番号を示す。

① トライボロジー辞典Tribology Dictionary:
(社)日本トライボロジー学会編、㈱養賢堂
② 新材料のトライボロジー:(社)日本潤滑学会編、㈱養賢堂
③ 新しい摩擦の科学ートライボロジー入門:広中清一郎、㈱講談社
④ トライボロジー:H.チコス著、桜井俊男監訳、㈱講談社
⑤ トライボロジー入門 摩擦・摩耗・潤滑の基礎:岡本純三・中山景次・佐藤昌夫、幸書房
⑥ 摩擦と潤滑:曽田範宗、㈱岩波書店
⑦ 摩耗:笹田 直、「機械の研究」vol.23№6からvol.25№2
⑧ 軸受:曽田範宗、岩波全書、㈱岩波書店
⑨ 摩擦の話:曽田範宗、岩波新書、㈱岩波書店
⑩ 潤滑故障例とその対策、(社)日本潤滑学会編、養賢堂
⑪ 金属の摩耗とその対策:佐藤　　、㈱養賢堂
⑫ 摩擦の世界:角田和雄、岩波新書、㈱岩波書店
⑬ 吊橋リンク支承構造設計の指針:本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査
研究報告書別冊5、昭和50年度本州四国連絡橋公団委託、昭和51年3月、土木学会
⑭ TRIBOLOGY DATA HANDBOOK:EDTED BY E.Richard Booser,CRC PRESS
⑮ 潤滑用語解説集:(社)日本潤滑学会編、㈱養賢堂
なお、文献①は、⑮の最新版であるが、「解説」編が省略されている。また、学会名も
(社)日本潤滑学会から(社)日本トライボロジー学会に名称変更されている。
⑯ トライボロジーの歴史:D.ダウソン著、「トライボロジーの歴史」編集委員会訳、
(株)工業調査会
⑰テフロン実用ハンドブック：三井デュポンフロロケミカル（株）、1989年3月

Ａ１　トライボロジー用語と定義

「構造部材用語」

＜リンク支承構造関係＞

①**タワーリンク**：補剛桁中間支点（主塔部）のリンク支承構造の鉛直支承。
②**エンドリンク**：補剛桁端支点のリンク支承構造の鉛直支承。
③**リンク支承**：両端をピンで受け、上下のブシュ付きボスをリンクで結び、補剛桁、塔等に取り付ける支承形式。
④**ピ　　ン**：リンクボス部に挿入され、ボスと補剛桁あるいは塔等を連結し、補剛桁反力をボスに伝達させる円柱状の部材。
⑤**ブ　シ　ュ**：リンクボス部に組み込まれてピンとの相対移動（摺動）に伴う摩擦を低減し、摩耗を減少させるために用いるピン軸受け部材。
⑥**ボ　　ス**：リンク軸部に剛結され、ピンを支持するブシュをはめ込む部材。
⑦**リ　ン　ク**：リンク支承構造の軸部で、上下のピン・ボスを介して連結して荷重を伝達し、ねじれ・たわみ等の変形に対し抵抗（あるいは受け流す）する部材。
⑧**ハウジング**：一般には機械構造部分を取り囲む部材であるが、タワーリンク関係では、ピン・ブシュを取り囲む部分を指す。
⑨**吊橋の鉛直支承**：鉛直面内反力を伝達する機能を有し、水平面内反力は水平支承で分担する。水平面内変位を吸収する。
⑩**吊橋の水平支承**：水平面内反力を伝達する機能を有し、鉛直面内反力は鉛直支承で分担する。鉛直面内変位を吸収する。

＜吊橋関係＞

⑪**道路鉄道併用橋**（略称：**併用橋**）：交通荷重として自動車と列車を１つの橋体構造で通すための橋梁形式。瀬戸大橋では、桁構造を２層式として構成しているが、諸外国の例では同一路面で横断構成されたものがある。列車荷重が大きく、列車走行速度が高い場合は、登坂能力、走行安定性(乗り心地性、脱線安全性)より、縦断線形、平面線形が支配されることがある。また、荷重強度が大きく、列車本数が多い場合には、荷重繰り返し載荷による疲労問題をクリヤする必要がある。
⑫**道路単独橋**：交通活荷重を自動車荷重のみとする橋梁。
　明石海峡大橋は、当初、併用橋であったが、鉄道ルートを別にすることで道路単独橋になった経緯がある。また、大鳴門橋は、道路単独橋で供用されてはいるが、

新幹線鉄道複線を載荷できる構造で建設されている。
⑬**吊橋補剛桁**：吊橋の主橋体を構成するもので、剛性を強化した桁構造とする場合が多く、長径間吊橋ではその断面は耐風安定性で決定されることが多い。本四橋では、トラスおよび箱桁形式を採用している。
⑭**２ヒンジ補剛桁吊橋**：３径間吊橋においては、側径間、中央径間がそれぞれ単独で主塔部で分離され、両端ヒンジで支持される桁を有する吊橋。
⑮**連続補剛桁吊橋**：３径間吊橋においては、側径間と中央径間の桁が主塔部で分離されることなく連続化させ、中間支点での鉛直面内、水平面内の折れ角をなくしている吊橋。併用橋では多用されるが、反面、中間支点反力が大きくなること、とりわけ負反力が大きくなるためその対策が重要となる。

「トライボロジー用語」

①**トライボロジー**（Tribology）：ギリシャ語の$\tau\rho\iota\beta\eta$（摩擦、英語でtribos、triben）と$\lambda o\gamma o\sigma$（言葉）の合成語である。
　当時の英国政府の依頼によるＨピーター・ジョストらの研究調査委員会からのJOSTレポート（1966）［Lubrication(Tribology)］で初めて使われた用語で、「相対運動を行いながら相互作用を及ぼし合う表面、およびそれに関連する実際問題の科学技術＊①」と定義されている。
　原文は、「The science and technology of interacting surfaces in relative motion and of the practices related thereto.」*⑲である。
摩擦、摩耗、潤滑、軸受設計などの分野における総合的な科学技術であるが、本論文では、「摩擦、摩耗、潤滑」と簡略化して使用することとした。
　参考までに記すと、静電気のことを英語では、一般にstatic electrictyと呼んでいるが、triboelectricityともいう。
　なお、Tribologyには他の分野でも以下に示すように使われている。
　geo-tribology（地学）、
　bio-tribology（生体）、
　process-tribology（生産加工）、
　sports-tribology（運動）、
　space-tribology（宇宙空間）、
　micro-tribology（ハードデイスク装置H.D.D）、
　maintenance-tribology（機械システムの保守）、
　eco-tribology（環境問題）

②**摩　擦**［friction］：接触する二つの物体が、外力の作用の下ですべりや転がり運動をするとき、あるいはしようとするときに、その接触面においてそれらの運動を妨げる方向の力が生ずる現象。その力（摩擦力）をいうこともある。＊①

摩擦とは、運動する、または運動しようとする物体が、他の物体の表面にふれることによって受ける抵抗。

発生するときの運動状態から分類すると

静摩擦［static friction］：面に接触している物体に、接触面に平行な外力を加えても、通常はその力の大きさがある限界内であればすべり運動は生じない。

このとき、面から物体に作用して、運動を妨げている力を静摩擦あるいは静止摩擦という。また、すべり出すときの限界の摩擦力を最大静摩擦（limiting static friction）あるいはすべり出しの摩擦（starting friction）と呼ぶ。転がり摩擦においてもほぼ同様な現象が見られる。＊①

静摩擦係数＝静摩擦力（抵抗力）／接触面への作用力

動摩擦［kinetic(kinematic,dynamic)fricyion］：相対すべりをしている接触二面間に運動を妨げる向きに働く力。

運動物体の運動エネルギー損失の原因となる。＊①

動摩擦係数＝動摩擦力（抵抗力）／接触面への作用力

摩擦運動の状態から分類すると

すべり摩擦［sliding friction］：ある物体の表面を他の物体がすべる場合の摩擦または摩擦力。単に摩擦という場合には、すべり摩擦を指すことが多い。＊①

転がり摩擦［rolling friction］：転がり接触をする一対の固体面間に生じる摩擦。本来、転がり運動の抗力を意味するが、すべりを伴う転がり接触においては、伝達力の反作用としての摩擦力を含めていう場合もある。＊①

すべり摩擦に関するアモントンクーロンの法則

（アモントンAmonton(1663～1705)の法則、1699年発表。クーロンCoulomn(1736～1806)の法則、1785年発表。）：荷重や速度が非常に大きい領域と小さい領域を除いてはほぼ成り立ち、次のようになる。

①摩擦力は荷重に比例する。

②摩擦力は、見かけの接触面積に無関係である。（寸法効果なし）。

③摩擦力は、滑り速度に無関係である。（速度特性なし）。

転がり摩擦に関係する原因：

①接触面間の凝着。

②接触表面層に起こる微少すべりや接触による変形。

③表面の凹凸などの表面性状。

摩擦表面の清浄性や表面間の流体の存在などによる摩擦の分類

境界摩擦［boundary friction］：境界潤滑状態における摩擦。流体摩擦、乾燥摩擦と併称される。

摩擦の要因には摩擦面固体間接触部のせん断と油膜のせん断とが考えられるが、大きなせん断を要するのは固体間接触部である。固体間接触部には摩擦によって生じた無機被膜が形成されていることが多い。通常は、潤滑油中の吸着成分が摩擦面に吸着して膜を構成し、荷重を負担することにより固体間接触部を減少させ、境界摩擦を低下させる。このため用いられる添加剤は油性剤、減摩剤などと呼ばれる。＊①

清浄な固体表面上に気体分子が吸着したり、液体によってぬれたりすると、これらの膜の潤滑作用によって、表面同士はすべりやすくなる。この場合の摩擦係数は乾燥摩擦よりかなり小さくなり0.1前後となる。

膜の厚さは、数分子から数十分子の程度で、膜が粘性的な性質、すなわち、流体的なふるまいを示さない程度の厚さである。

また、表面は、局部的に固体接触が生じている場合を含む。

乾燥摩擦［dry(unlubricated) friction］：乾燥すべりにおける摩擦。静摩擦と動摩擦の差が比較的大きく、摩擦抵抗は見かけ接触面積、摩擦速度に無関係で、荷重に比例するというクーロンの法則が大略成立する。

大気中で、乾燥動摩擦係数は同種金属の場合0.5程度となることが多い。乾燥摩擦はほとんどすべての場合、摩耗などの表面損傷を伴う。＊①

厳密には、固体表面の汚れ（酸化膜、水、吸着物質など汚れ）のない完全に清浄な表面同士の摩擦をいうが、普通、工学的には、潤滑作用をする吸着物質や油などのない比較的清浄な表面同士の摩擦をいい、この場合の摩擦係数は0.5～1.5程度である。

流体摩擦［fluid friction］：流体粒子相互あるいは流体と壁との間の相対運動を妨げようとする摩擦力。

レイノルズ数が低い層流状態では、流体の粘性と速度こう配とによって決まる。高レイノルズ数では、流れは乱流に遷移し、粘性の影響よりレイノルズ応力の効果が支配的になり、摩擦は極めて大きくなる。＊①

固体の表面が、気体または液体によって完全にへだてられているときの摩擦で、この場合の摩擦は、液体の粘性すなわち内部摩擦に置き換えられるので、摩擦係数はさらに小さく0.001以下である。

③**摩　耗**［wear, attrition］：摩擦による固体表面部分の逐次減量現象。

普通は、２面から摩耗粉として脱落減量が行われるが、相手摩擦面に表面部分が移着し、あるいは相手から移着された場合や、まれには広く解釈して減量がなくても固体表面の摩擦による変形損傷をも総括して摩耗と呼ぶことがある。

相手面は確定された固体表面であるとは限らず、たとえばエロージョンのように浮遊粒子による摩耗も存在する。＊①

摩耗は、その原因となる摩擦運動によって、すべり摩耗と転がり摩耗に大別される。さらに、すべり摩耗には、凝着摩耗とアブレシブ摩耗がある。

転がり摩耗［rolling wear］：転がり接触により接触面から物質が脱落していく現象。

主として転がり接触面間のすべりおよび垂直荷重の繰り返し負荷による疲れにより生じるとされる。＊①

すべり摩耗［sliding wear］：すべり摩擦による摩耗現象。

凝着摩耗［**接着摩耗**、adhesive wear］：２固体間の真実接触面積を構成する凝着部分が、摩擦運動によりせん断されることに起因して生ずる摩耗現象。

その生成機構は十分明らかではないが、摩耗現象の中の基本的な形態であって、常にあらゆるすべり摩耗現象の一部もしくは大部分を占める。

潤滑油が存在しない場合、摩擦面の表面粗さが小さい場合、２面が類似の金属で凝着しやすい場合には、この摩耗が支配的となる。＊①

２固体の凸部同士の接触している凝着部分が、摩擦によってせん断され、引きちぎられていく現象。

移　着［transfer］：接触している２固体を摩擦するとき、凝着部の破断によって、一方の表面の小部分が他方の表面へ移る現象。

移った固体断片を移着粒子と呼ぶ。移着粒子は、摩擦を繰り返す間にいくつか集合し、脱落して摩耗粉になる。＊①

互いに摩擦し合う２固体のうち、一方の微少部分が相手面に移る現象。

アブレシブ摩耗［abraisive wear］：すべり合う固体表面間において、硬い異物が介在したり、一方の面が硬くて粗い場合あるいは固体表面と粒子が高速で衝突する場合などに、主に切削的に固体表面が摩耗する現象。＊①

すべり合う固体面の間に硬い異物が入り込んだり、一方の面が硬くて粗い場合に、削り取られて摩耗する。

疲労摩耗［fatigue wear］：垂直荷重と摩擦力が繰り返し作用することによる疲労に起因する摩耗。転がり疲れを指す用語であったが、現在凝着摩耗も真実接触部に作用する力による微視的な疲労によるものと考えられている。＊①

摩擦面に繰り返し摩擦力が作用すると、表面の摩擦力が集中する部分に亀裂が発

生することがある。この亀裂が合体して摩耗分として取り去られる現象。ころがり摩耗のほとんどはこの疲労摩耗である。

フレッチング摩耗［**微動摩耗**、fretting, fretting wear, fretting corrosion］：接触する２固体間に生じる外的な振動に伴う接線方向の、一般には100μm以下の微小な往復すべりに起因した表面損傷。

転がり軸受の転動面や圧入部、熱交換機などの支持部などに生じる。巨視的すべりと微視的すべりにより摩耗の形態が変わるが、前者では酸化物摩耗粒子の発生が著しく、摩耗粒子の接触面からの排出速度が摩耗率に影響を与える。＊①

はく離摩耗、フレーキング［flaking, spalling］：転がり軸受が荷重を受けて運転されたとき、転がり疲れによって軌道面や転動体（玉またはころ）の表面がうろこ状にはがれる現象。慣用的にははがれた後の穴をいう。フレーキングの発生をもって転がり軸受の寿命と定義する。

フレーキングが進行すると破壊に至る。フレーキングは接触による材料内部のせん断応力が原因とされてきたが、条件によっては表面が起点となることもわかってきた。＊①

化学摩耗［chemical wear、**腐食摩耗**corrosive wear］：気体や液体雰囲気と摩擦面の化学反応により支配される摩耗。まず化学反応が起こり、次いで機械的作用により生成物が除去される場合と、機械的作用がまず起こり、次いで化学反応を伴った非常に微細な摩耗粒子の形成が起こる場合とがあり、実際にはこの両者が互いに促進し合っているものと考えられる。＊①

雰囲気（大気中の酸素や水蒸気など）や固体間に潤滑剤が存在する場合、これらの化学的作用と摩擦力によって生じる摩耗。

ワイヤウエア［wire　wear、**線状摩耗**］：＊①には定義されていないが、スクラッチングの摩耗形態に同じで、摩耗深さは比較的浅いが長く線状に摩耗したものを指す。

エロージョン［erosion］：イ)流体（液体または気体）に硬い固体粒子が含まれているとき、この流体と相対的な運動をする固体表面が損傷される現象。

ロ)液体、混相流れ（気体ー固体、気体ー液体、液体ー固体）、液滴、固体粒子が材料に繰り返し衝突することにより、衝撃的、機械的な外力を受けた材料表面が損傷を受け、その一部が脱離する現象。＊①

スクラッチング［scratching、**ひっかき摩耗**］：すべり方向に付く、深くて明瞭な線状傷、歯車の歯面の損傷形態の一つで、歯面のバリ、突起、外部からの異物および歯面に埋め込まれた大きい異物などが原因で生じる＊①。

面取り不足、真円度不良なども原因となる。

なじみ運転［running-in］：運転中に接触面の表面損傷が発生しないように、完全な油膜形成を早期に実現するために適正な条件のもとで運転し、表面の粗さを押しつ

ぶして滑らかにするための予備運転。このような状態を単になじみという。＊①

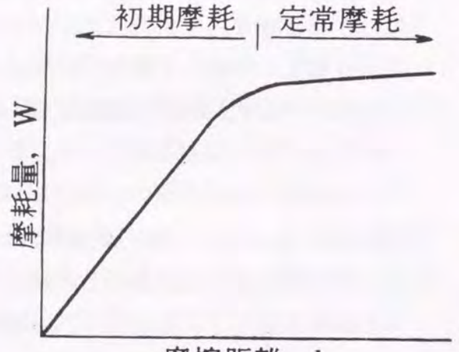
摩耗状態から区分すると、

シビヤ摩耗［severe wear］：摩擦面間で激しい凝着を伴って、著しい移着と粒径の大きい金属片状の摩耗粉を発生する凝着摩耗の一形態。潤滑状態がよくない条件下で起こり、摩擦係数の変動も大きい。マイルド摩耗に対する摩耗形態。＊①

マイルド摩耗［mild wear］：表面損傷が少ない滑らかな表面と、数μm以下の微細な摩耗粉の発生を特徴とする凝着摩耗の一形態。雰囲気物質によって比較的よい潤滑状態が保たれているときに起こり、比摩耗量が低い。シビヤ摩耗に対比する摩耗形態である。＊①

初期摩耗［initial wear］：同一箇所を繰り返して摩擦する場合、摩擦の初期において生じる摩耗率の高い摩耗。乾燥摩耗の場合には、シビヤ摩耗である。油潤滑の場合は、初期幾何学的形状の変化し終えるまでの期間と見られることもある。いずれも焼き付きの危険が大きい。＊①

摩耗初期の段階には、接触部が均一な当たり面でないか、潤滑が十分供給されなくて摩耗が安定（定常）的でなく、摩耗分が相当移着を起こすなど時間経過とともに増加するなど不安定な摩耗状態を呈する。



図Ａ１．１　摩擦距離と摩耗量

定常摩耗［steady-state wear］：繰返し摩耗において、初期摩耗が終わった後に現れる摩耗率の激減した状態。初期から定常摩耗の遷移は、乾燥摩耗の場合シビヤ・マイルド摩耗遷移に起因する。潤滑下では、摩擦面形状変化による潤滑効果の変化がこれに加わる。＊①

初期摩耗状態を過ぎると摩耗の進行が時間経過に拘わらず安定して増加する状態。

正常摩耗［normal wear］：①摩耗率が低く、表面損傷の軽微な状態が維持されている摩耗を示す総称。その判断基準に学術的な根拠はない。②機械の設計時に予測した限度内で起きている摩耗。異常摩耗に対比する用語である。＊①

異常摩耗［abnormal wear］：機械を設計する際に予測した摩耗状態に比べて、はるかに高い摩耗量を示したり、厳しい表面損傷を起こす摩耗状態を指す総称。学術的基準があるわけではなく、摩耗状態を相対的に評価するのに用いる俗語。＊①

接触部へ異物混入あるいは発熱等による材料変動などにより摩耗状態が時間経過に関係なく異常となり、かじり、焼き付きといった現象を伴うことがある。

④潤滑機構［lubrication mechanism］：潤滑作用のメカニズム。潤滑を機構によって分類すると、潤滑剤の粘性を利用して摩擦面に流体膜を介在させ、固体間の直接接触を防ぐことによって潤滑を行う流体潤滑と、固体面上に潤滑剤の吸着膜、反応膜などを作って潤滑を行う境界潤滑に大別される。また、前者は外部から摩擦面に加圧流体を送り込む静圧流体潤滑と、摩擦面の運動によって圧力を発生する動圧流体潤滑に分けられる。＊①

潤滑モードはストライベック曲線（図Ａ１．２）のfとη･V/Wの変化によって次のように分類される。

流体潤滑［fluid (hydrodynamic) lubrication］：十分な厚さの流体膜によって２面が完全に離れている潤滑状態。２面が互いに離れるためには、２面間の流体に負荷を支える圧力が発生する必要がある。その圧力を発生させる要因には、２面の相対運動による動圧作用（くさび作用、スクイーズ膜作用およびストレッチ作用）と圧力をもつ流体の外部からの供給による静圧作用とがある。流体潤滑の諸特性は、レイノルズ方程式に基づいて解析することができる。＊①

弾性流体潤滑［elastohydrodynamic lubrication］：転がり軸受け、歯車、カムなどの潤滑の場合に生じる特異な潤滑現象。点接触、線接触などの集中接触により接触面圧が高圧になるため、弾性変形と油の高圧による指数関数的増加の影響を受け、圧力分布にスパイクが現れる。この問題を数値的に解析したダウソン（Dowson）とヒギンソン（Higginson）により名付けられた。英文の頭文字をとったEHLという略語がよく使われる。後に、弾性変形の影響が現れる潤滑現象を広義に弾性流体潤滑と呼び、狭義にはハードEHLと呼び、弾性係数の小さな表面の場合に油の圧力による粘度増加の現れないソフトEHLと区別される。＊①

境界潤滑［boundary lubrication］：潤滑状態のうち、潤滑面の荷重、すべり速度、潤滑油の粘度などの条件により、油膜による負荷能力が十分でなく、金属間接触が生じていて、摩擦係数が荷重、すべり速度、潤滑流体の粘度に依存しない状態。摩擦係数は流体潤滑状態よりは大きく、0.1程度。通常では、潤滑剤の粘度とすべり速度の影響を受ける混合潤滑の厳しい状態も境界潤滑に含め、境界潤滑膜の影響が大きい状態をいう。潤滑面の表面粗さも関与する。摩擦低減と同時に摩耗の対策も必要となる。＊①

混合潤滑［mixed lubrication］：境界潤滑と流体潤滑が混在していると定義した潤滑状態に与えた呼称。境界潤滑油膜と流体潤滑油膜の働きに関しての力学的定義に依存した考え方。＊①

極圧潤滑［extreme pressure lubrication, EP lubrication］：摩擦面の接触圧力が高く、すべり速度が大きいなどのために、潤滑油膜の破断が起こりやすい過酷な潤滑状態。＊①

これらの潤滑は、潤滑油膜の形成と、これによる潤滑性によって、以下に示すことと密接に関係し、大きく左右される。

①潤滑剤の油膜。

②油膜の厚さと油膜に発生する圧力。

③潤滑油の化学的性質。

④荷重、摩擦速度などの機械的条件。

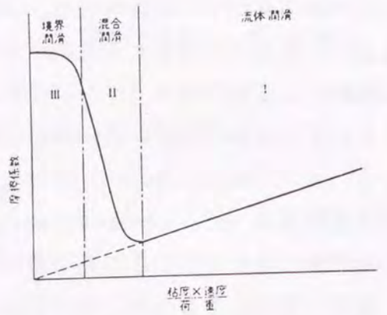
⑤固体の材質。

⑥固体の表面状態

（形状、表面粗さ、変形）

ストライベック曲線［Stribeck curve］：

縦軸に摩擦係数、横軸に軸受け特性数をとった摩擦曲線。一般には、ジャーナルすべり軸受について系統的な摩擦データを出したストライベックの名を取ってこのように呼ばれるが、横軸のパラメータ「軸受特性数」に理論的意味を与えたハーゼイ（Hersey）の名を加えて「ストライベック・ハーゼイ曲線」と呼ぶこともある。＊①



図Ａ１．２　ストライベック曲線＊⑩

グリース潤滑［grease lubrication］：

摩擦部分をグリースで潤滑すること。半固体であるグリースの性質に基づく流落や飛散がしにくい。異物の進入を防止するなどの特徴があり、シール構造が簡素に、また保守管理が容易になるなどの長所がある。＊①

⑤トライボロジー面から見た摩擦運動

すべり［slide、sliding、slip］：接触面の面に平行な相対運動。転がりやスピンを行っている接触面に部分的に生じる微視的なすべり（マイクロスリップ）と対比して、一般の巨視的なすべりをグロススリップということがある。＊①

平面的球面的相対面の移動。

回　転［rotaition］：円筒面あるいは球面接触におけるすべり。

揺　動［osillation］：マクロ的には回転運動であるが、その回転方向が一方向でなく方向転換があって往復すべりを受ける往復回転すべり。

転動（転がり）［rolling］：点（球面）あるいは線（円筒面）接触における一方の部材が回転し、接触位置が移動。

⑥ヘルツ接触［Hertzian contact］について　（＊①,⑯を編集）

２物体が接触して荷重を受けると、接触部分が変形して接触面を生じるとともに、その面内に接触圧が生じる。接触部分が物体に対して十分に小さい場合をヘルツ接触といい、接触面付近は二次曲面であるという仮定のもとに、H.Hertz が Gesammelt Werke Bd. I (1895)で理論的に解いたものである。なお、変形は純弾性的に行われるものとしている。

ヘルツの接触圧力は、線接触においては半だ円分布、点接触においては半だ円体状の分布となる。

最大接触圧力 p_{max} 、接触半幅 b 、または接触円半径 a 、弾性接近量 δ 等を与える諸式：

２円柱の接触：　$p_{max}=(w E'/2\pi R)^{1/2}$

$b=(8 w R/\pi E')^{1/2}$

球と平面の接触：$p_{max}=(3 w'E'^{2}/2\pi^{3} R^{2})^{1/3}$

$a=(3 w'R/2 E')^{1/3}$

$\delta=(9 w'^{2}/4 R E'^{2})^{1/3}$

$$\frac{1}{E'}=\frac{1}{2}\left(\frac{(1-\nu 1)^{2}}{E1}+\frac{(1-\nu 2)^{2}}{E2}\right)$$

ここに、w：単位長さ当たりの荷重、　w'：単位面積当たりの荷重、

R：２円柱の曲率半径、　E'：等価弾性係数

ν1, ν2：物体のポアソン比、　E1, E2：物体の弾性係数

⑦面圧（面圧分布）：接触２面間に発生している圧力分布。相対する２物体が面接触し、相互に荷重作用を受ける場合の圧力（分布）。面には平面、円筒面、球面などが含まれる。

⑧平均面圧［**平均圧力**、average pressure］：荷重を見かけ接触面積で除した値。塑性加工では、加工荷重を工具接触面積で除した平均面圧のことで、たとえば、摩擦のある円柱の圧縮で生じる摩擦丘と呼ばれる面圧分布を平均圧力で代表させることができる。＊①

なお、本論文では、円筒接触問題のみを対象としていることから見かけ接触面積の取り方を明確にするため、ピンの投影幅Ｄ（ピン外径）とブシュの有効接触長Ｌ（面取り部を除く）を基に、荷重Ｆから、

Ｐproject＝Ｆ／Ｄ・Ｌ

を採用している。

ここに、Ｄ・Ｌを有効投影面積（effective project area）という。

⑨**最大面圧**：面圧（圧力）分布における最大値。
　円筒面接触のリンク支承ピン・ブシュでは、余弦分布の最大値を示す。

⑩**摩擦速度**［**すべり速度**、sliding velocity］：すべりにおける相対速度。見かけ上の転がりにおいても、接触部を通過する両面の速度に差がある場合に、その差をすべり速度と呼ぶ。＊①
転動速度［**転がり速度**、rolling velocity］：転がりにおける相対速度。

⑪**摩耗量**［wear amount］：摩耗によって表面から取り去られた固体の体積または重量、希には（棒状摩擦片などの）長さ。摩擦する固体の両方もしくは一方づつについてそれぞれ定義される。＊①
　摩耗体積、摩耗重量、摩耗寸法で表す場合がある。

⑫**摩耗率**［wear rate］：単位すべり距離当たりの摩耗量（体積、または重量）。
摩耗進行速度を意味し、厳密にはｄＶ／ｄｌ（Ｖ：摩耗量、ｌ：すべり距離）であるが、簡単に最初からの摩擦距離に対するそれまでの摩耗量の比Ｖ／ｌで表すことが多い。このほかに①単位時間当たりの摩耗量、②単位繰り返し当たりの摩耗量があり、混同しないように注意する必要がある。＊①
　摩耗前後の摩耗量の比で、体積比、重量比、寸法比で表す。

⑬**比摩耗量**［specific wear amount、**比摩耗率**specific wear rate］：耐摩耗性の表示法の一つ。単位すべり距離当たり、また単位垂直荷重当たりの摩耗体積（または摩耗重量）を意味し、次式で定義される。
　Ｖ／（Ｗ・Ｌ）
ここで、Ｖ：摩耗体積（重量）、Ｗ：垂直荷重、Ｌ：すべり距離　である。＊①
摩耗のし易さ（摩耗量の大きさ）のパラメーターとして使われる。単位荷重当たり、単位摩擦距離当たりの摩耗体積（寸法、重量）で、次式で表される。
　Ｗｓ＝Ｗ／Ｐ／Ｌ
ここに　Ｗｓ：比摩耗量（体積、寸法、重量）
　　Ｗ　：摩耗体積（寸法、重量）
　　Ｐ　：垂直荷重
　　Ｌ　：すべり（摩擦）距離
本論文では、Ｗ（摩耗寸法、mm），Ｐ（kgf/cm²），Ｌ（m）で表しており、Ｗｓは、mm／kgf/cm2／m　に統一して表現している。

⑭**円筒接触に関する用語**
径　差：ブシュ等外側部材（メス側）の内径φBと、ピン等内側部材（オス側）の外径φPとの差：Δφ＝φB－φP
径　比：φB／φP
嵌合比 → **すきま比**［ratio of clearance to diameter, clearance ratio］：ジャーナル軸受の半径すきまとジャーナル半径の比、または直径すきまとジャーナル径の比。ジャーナル軸受の性能を表す重要な因子で、実用の軸受のすきま比は約1/1000である。＊①
　円筒軸受の半径すきまと円筒半径の比、または直径すきまと円筒直径の比。
本論文では、橋梁で使用される「**クリアランス**」に統一して使用している。

⑮**球面軸受**［spherical bearing］：軸受面が球面となっているすべり軸受。軸の回転と傾きが自由にできる。

⑯**金属接触**：
焼付き［seizure］：潤滑された摩擦面において、温度上昇に伴って当初予期した良好な潤滑ができなくなり、固体接触が増加して接触面が激しく傷つけられる遷移現象。＊①
かじり（かじり付き）［scuffing, scoring］**焼損**［burning］：小さい焼付きが集合して表面がかじられたように見える現象。＊①
ワイピング［wiping］：潤滑油膜がぬぐい取られる現象。＊①
片当たり［uneven contact due to alignment error, uneven contact due to poor shaft alignment］：軸の食い違い誤差などのため、歯面の当たりが一様でなくなる状態。片当たりが生じると荷重分布が局所的になるため、損傷が発生しやすくなる。＊①
スクラッチング［scratching］：すべり方向に付く、深くて明瞭な線状傷。歯車の歯面の損傷形態の一つで、歯面のバリ、突起、外部からの異物および歯面に埋め込まれた大きい異物などが原因で生ずる。＊①
スロープボーリング［slope boring］：軸受け穴にテーパを付けること。＊①
摩擦振動：摩擦力が振動的に変化する場合に発生する物体の振動。
な　き：すべり摩擦現象で発生する摩擦振動における発音現象。摩擦振動数が可聴振動数の場合、通称「なき」と表現されている。

⑰Stick slip(**付着すべり**)：固体面間の摩擦による減衰が負である場合に機械的振動系に間欠的に生じる自励振動の一種。トライボロジーの関係する機械要素の主要な振

動および破壊原因の一つであって、相対運動面の潤滑状態および速度、運動系の質量および駆動系のばね定数が主要な影響因子となる。一般に相対速度が減少したり、駆動系のバネ定数が小さくなると生じやすくなる。＊①

時間経過とともに接触する２物体間の摩擦力が変動し、ある振幅で運動を繰り返すこと。

⑱**質量効果**［mass effect］：鋼の質量および断面寸法の大小で焼入れ効果に差異が生じる現象。その差異が大きい場合質量効果が大きいという。また、一般に焼きの入りやすい、すなわち焼入れ性のよい鋼では質量効果は小さい。＊①

⑲**寸法効果**［size effect］：寸法の違いによって性能あるいは性質に差異をもたらす効果。たとえば、同じ熱処理が施されていても、部品の寸法が大きくなると疲労強度が低下するときなどに使われる。＊①

本論文では、上記の意からトライボロジーに対しても使用している。

注）本論文では、質量効果（mass effect）を金属熱処理における効果を示す用語として区別している（＊⑰参照）。

「**軸受材料**」

①**グラファイト**［graphite、**黒鉛**］：大気中で約700℃（短時間なら約1000℃）まで、真空中で約2000℃までの固体潤滑剤として使用される。層状の結晶構造が潤滑効果をもたらす。＊①

PTFE等の潤滑剤の摩擦・摩耗特性を改善するために充填材として使用されることがある。

②**グリース**［lubricating grease, grease］潤滑油（基油）に増ちょう剤を分散させて半固体状にした潤滑剤。種々の特性を付与するために、各種添加剤を含む場合もある。増ちょう剤は基油中で三次元的構造を形成しており、そのためグリースは非ニュートン性とチキソトロピー性を示す。グリースの性質や特性は基油、増ちょう剤の種類によって異なり、用途、目的によって使い分けられている。目的を明確にするため潤滑グリースともいう。＊①

③**四フッ化エチレン**［polytetrafluoroethylene, PTFE］：フッ素樹脂の代表的な材料。摩擦係数が非常に低いのが特徴である。単体では耐摩耗性に劣るが、充填剤を添加すると著しく改善され、軸受などに用いられる。テフロン［Teflon］は商品名である。＊①

④**二硫化モリブデン**［molybdenum disulfide］:化学式MoS2、稠密六方晶の層状化合物。代表的な固体潤滑剤で、グリース、ペースト、油への添加剤、乾燥皮膜、自己潤滑性複合材料の添加物として広く利用される。単体では、大気中より真空中の摩擦係数が低い。＊⑰を加筆修正。

⑤**グラスファイバー**［glassfiber、ガラス繊維］：ガラスを細かく引き伸ばしてつくった繊維。耐酸性、耐風化性、耐熱性、絶縁性に優れる。アルカリ性には侵される。耐摩耗性を改良するため、合成樹脂補強材（充填材）としてグラファイト、二硫化モリブデンと組合せて用いられることがある。＊⑰を加筆修正。

⑥**カーボン**［carbon、炭素］：耐食性があり、高温高荷重下における耐クリープ性を向上させ、耐摩耗性を改良するため、充填材としてグラファイトと組合せて用いられることが多い。＊⑰を加筆修正。

Ａ２　ＰＴＦＥの特性

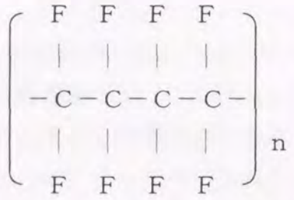
（１）ＰＴＦＥ（Polytetrafluoroethylene、ポリ四ふっ化エチレン樹脂）とは

ＰＴＦＥについて開発経緯、特性、支承関係での使用法等について、下記文献等から加筆編集の上、整理しておく。

「新材料のトライボロジー日本潤滑学会編*②」

「潤滑用語解説集、日本潤滑学会編*⑯」

1938 年、Plunkett によって発見され、アメリカのマンハッタン計画と関連し、原子爆弾製造に必要なウラン 235 の濃縮工程で使用されるふっ素やふっ化水素酸に耐えうる容器材料として、米国企業デュポン DuPont 社で開発された。下記に示すような分子構造を持つ結晶性の高分子材料のふっ素樹脂（商品名テフロン Teflon）で、非常に耐薬品性がよく、ほとんど全ての薬品に侵されない。



図Ａ２．１　ＰＴＦＥの化学構造

PTFE の化学構造は、図Ａ２．１に示すように炭素とふっ素から成り立っており、(－CF2－CF2－)n を構成する Ｆ原子は、電気的陰性度が大きく、分子鎖は熱的にも化学的にも安定である。

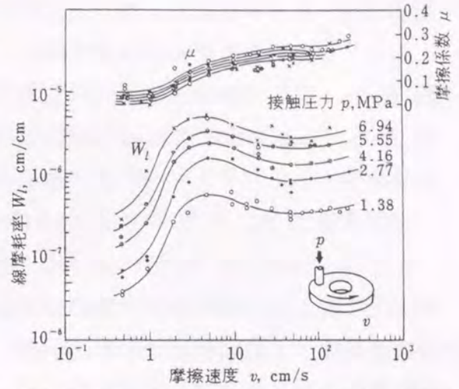
また、他の化合物に対して親和力がきわめて小さい。比重は 2.13 ～ 2.22 であり、分子量は 10^{6}～ 10^{7} ときわめて大きな直鎖状の分子からなっている。

従って、機械的性質なども熱処理により結晶化度を変化させることによって多少変化する。結晶の融点は、プラスチック材料中最も高い 327 ℃であるが、溶融粘度が高いため、融点に達してもすぐ流動状態となることはなく、ある程度の形状を保つ。連続使用可能温度は 260 ℃前後である。

溶融粘度が高いため、成形の場合には射出成形は行われず、圧縮、押出し、ディスバージョンによる含浸、焼付けなどが行われる。また、成形品を切削によって削り出したテープや特殊な方法による繊維、それを織った織物なども出されている。

この樹脂の最も大きな特徴は、表面の粘着性及び低摩擦性である。摩擦係数は速度特性が認められ、0.01cm/sec 前後の低速では 0.04 と、すべての材料の中で最も低い値を示す(ただし、30cm/sec 前後になると 0.2 ～ 0.3 に増大する)。摩耗率に関する速度特性は図Ａ２．２に示すデータがあり、１ cm/sec 前後に大きな勾配が見られ、３ cm/sec を超えると摩擦係数は上昇するが摩耗率はほぼ一定となっている。

しかし、耐摩耗性という点では非常に劣っている。そこでこれを改善するため、ガラス繊維などの充填材を加えたり、焼結金属面に含浸させて用いたり、ポリアセタールなど比較的耐摩耗性のよい材料中に充填材として加えたりなどの方法が講じられている。いずれの場合もあまり高速度は無理で、比較的低速度で潤滑油の汚れを嫌うような箇所では効果がある。



(温度 T＝29°C，相手面：Cr めっきした黄銅板，PTFE ピン：直径 3 mm)

図Ａ２．２　PTFE の摩擦速度 v による線摩耗率 Wi および摩擦係数 μ の変化

低摩擦を応用した例としては、繊維機械などの軸受、ピストンリング、パッキン、橋梁の支承などがあり、非粘着性を利用したものでは、フライパンやアイロンの面などがある。また、最近では化学的に安定な性質を利用して人工血管、電線被覆等が造られている。

（２）ＰＴＦＥの特性

PTFE の特性について、日本潤滑学会（現トライボロジー学会）では、「新材料のトライボロジー」文献②で以下のようにまとめている。

PTFE の結晶は独特なバンド構造をしているが、摩擦によってバンド構造より結晶スライドがトランプのように変形し、ついには分子が引き出されてフィルムを形成する。そのため、PTFE 摩擦面自身のみならず相手面にも潤滑性の優れた移着フィルムを形成する。結晶の融点は 327 ℃と高く、耐熱性に優れている。

しかし、溶融粘度が 10^{11}～ 10^{12} poise ときわめて高く、融点を越えても容易に流動しない。そのため、PTFE の粉末を一度圧縮し、これを融点以上に加熱する焼成工程が採用されている。

関連するその他情報を以下に整理しておく。

１）ＰＴＦＥの各種特性

① 高温特性：融点はプラスチック材料中最も高い 327 ℃、連続使用温度は 260 ℃である。
　　長時間使用可能温度は１８０℃である。

② 低温特性：最低使用温度は-200 ℃。

③ 耐薬品性：あらゆる薬品に対し化学的に安定。ただし、放射線が炭素原子を破壊することがあるため放射線は除く。溶融アルカリ金属にもわずかに反応する。

④ 耐 候 性：屋外で長時間使用しても物性低下はほとんどない。

⑤ 難 燃 性：高温になって流動化あるいは溶けることはあるが、燃えることはない。

⑥ 摩擦特性：全てのポリマーの中で最小の(乾燥)摩擦係数である。

摩擦係数(f)は、V(すべり速度)が遅いほど低く、P(面圧)が高いほど低い。

ただし、500kg/cm ^{2}ほどで saturate。図Ａ２．３参照。

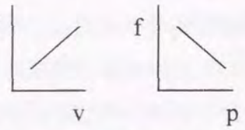
・面圧上昇時より下降時の方が動摩擦係数は低い。

・静摩擦係数より動摩擦係数の方が大きい。

→接触面をなじませる必要がある

→Ｓｉオイルの塗布により初期摩耗を安定化する

(初期摩耗状態では動摩擦係数は特に大きい)。



図Ａ２．３ PTFE の摩擦特性

⑦ 比粘着性：強い撥水性を有する→濡れない→くっつかない

⑧ 電気絶縁性：プラスチック中、最低の誘電率。

⑨ 他のプラスチックに比べ、水分吸着せず、化学的に不活性、長期安定性があり、公害の恐れがない。

⑩ 充填材の配合：純 PTFE に充填材を配合することにより物理的特性、耐摩耗性を向上させうる。PTFE への充填材の種類：グラスファイバー、グラファイト、カーボン、ブロンズ、二硫化モリブデン。

⑪ 成形性：成形が容易で、任意の形状が得られる。

⑫ 周囲を拘束すれば寸法変化量が１／４以下となる。＜側方拘束による変形拘束＞

２）ＰＴＦＥの使用例

人工血管(化学的に安定、拒絶反応がない。有孔性編組管、ミクロ多孔質管)、人工弁、カテーテル(人体用チューブ)、フライパン(剥離性がよく、焦げ付かない)、アイロン(低摩擦で剥離性がよい)、電線被覆（誘電率が低く、化学的に安定)。

３）充填材入りＰＴＦＥの使用限界（裸使用の場合）

一般的な充填材入り PTFE を裸使用する場合の使用限界は以下のとおりである。

P max ＝７０ kg/cm ^{2}

V max ＝　５ m/s

PV max ＝７ kg/cm ^{2}・m/s

４）充填材入りＰＴＦＥの摩耗量

潤滑剤の摩耗量は次式により求められる。

W＝K・P・V・T

W：摩耗の深さ（cm）

K：摩耗係数$\left[\dfrac{\text{cm}^3\cdot\text{s}}{\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{hr}}\right]$（限定された条件下での実験室データとなる。）

P＝平均接触面圧（kg/cm ^{2}）

V＝すべり速度（m/s）

T＝時間（hr）

ここに、V・T＝L，K＝W_s とすれば、W＝W_s x P x L　となり、本論文で採用している式と同義になる。

５）支承（shoe、Lager）への適用法

PTFE を用いた各種支承の開発経緯を以下に示す。

PTFE 関連商品の開発経緯は７）参照されたい。

・DuPont → Eslinger →埋込型（ヨーロッパ式）

→貼付型（アメリカ式）

貼付型：基材（鋼板、ゴム板）に貼付け、cleep 防止を図ったもの。

・Eslinger の定義

ＰＴＦＥ板のみを使用　→ Teflon Gleit Lager

ＰＴＦＥ板とゴムを使用→ Neotopf Teflon Gleit Lager

次に、支承の傾斜対策は以下による。

Teflon：わずかな傾斜変形を吸収。ほとんどは別機構（球面座、円筒座）で吸収。

Neotopf：base metal の変形で吸収。耐久性が課題となる。

許容傾斜角 α（Gleit 支承の場合）

α　［ＰＴＦＥの幅・厚さ］→α＝1/150，B/t＝10

σ b ≦ 450kg/cm ^{2}

・現在の Gleit 板の better 案として

相手材にはポリアミド樹脂被膜（ナイロン等接着に課題はあるが）と硬質クロームメッキ又はステンレスを使用。

＊一定範囲内の表面アラサが確保でき、摩耗・摩擦に有害な発錆がないこと。

＊仕上げが良すぎても摩耗が大きいことがある。

（ＰＴＦＥの相手材への転移｛単分子の coating｝が円滑に行われず初期摩耗が続くため｛定常摩耗に至らない｝）

6）ふっ素樹脂

広義には、分子中にふっ素原子(F)を含有する合成高分子化合物を指すが、狭義には、一般的には商業化されている下記８種をいう。

参考資料：テフロン実用ハンドブック、三井・デュポンフロロケミカル（株）

PTFE：四ふっ化エチレン樹脂（商品名：テフロン＊ PTFE）

PFA ：四ふっ化エチレン・パーフロロアルコキシエチレン共重合樹脂
（商品名：テフロン＊ PFA）

FEP ：四ふっ化エチレン・六ふっ化プロピレン共重合樹脂（商品名：テフロン＊ FEP）

ETFE：四ふっ化エチレン・エチレン共重合樹脂

PCTFE：三ふっ化塩化エチレン樹脂

ECTFE：エチレン・三ふっ化塩化エチレン樹脂

PVDF：ふっ化ビニリデン樹脂

PVF ：ふっ化ビニル樹脂

市販 PTFE 軸受材料について文献②より抜粋して表Ａ２．１に示す。

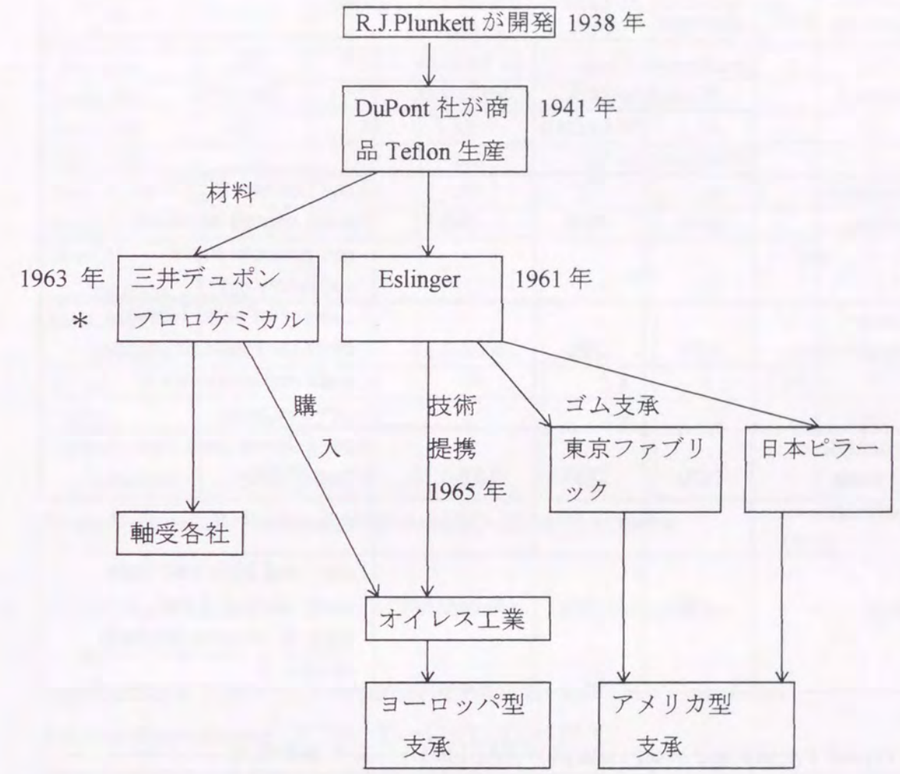
（＊②新材料のトライボロジー：日本潤滑学会編（株）養賢堂）

表Ａ２．１　市販されている PTFE 軸受材料の例

PTFE＋雲母	PTFE と綿の織布＋熱硬化性樹脂と黒鉛（裏金付き）
PTFE＋ガラス繊維	PTFE とガラス繊維織布＋熱硬化性樹脂（裏金付き）
PTFE＋カーボン	充てん材入り PTFE（裏金付き）
PTFE＋黒鉛	PTFE と Pb を含浸した多孔質青銅（鋼の裏金付き）
PTFE＋青銅＋黒鉛	PTFE と織られた青銅メッシュ（裏金付き）
PTFE＋青銅＋酸化鉛	POM＋PTFE 粉末
PTFE＋POB（ポリパラオキシベンゾイル〈エコノール〉）	綿やセルロース強化熱硬化性樹脂に PTFE 粉末，MoS_2 または黒鉛を充てん
PTFE＋POB＋黒鉛	エポキシ＋PTFE 粉末，黒鉛または MoS_2
PTFE＋MoS_2	PPS＋PTFE 粉末＋各種充てん材
PTFE＋MoS_2＋黒鉛	PEEK＋PTFE 粉末
PTFE＋PPS（ポリフェニレンサルファイド）	PEEK＋PTFE 粉末＋黒鉛
PTFE＋PPS＋黒鉛	PAI＋PTFE 粉末＋黒鉛
PTFE＋カーボン繊維	
PTFE＋PI	

7）支承関係商品の開発経緯

著者が関係者にヒヤリングしたＰＴＦＥの開発経過を図Ａ２．４に示す。



＊ 米国デュポン社と三井化学（株）との合弁会社、1963 年設立

＊＊ PTFE 関係商品　三井デュポンフロロケミカル：テフロン TFE
ダ イ キ ン 工 業　：ポリフロン TFE
旭 ICT フロロポリマー　：フルオン TFE

図Ａ２．４　PTFE 支承関係商品の開発経緯

8）各種固体潤滑材中のＰＴＦＥの位置づけ

「TRIBOLOGY DATA HANDBOOK」⑯より抜粋

① 14 Solid Lubricants P157 TABLE1 より抜粋表示

Common Solid Lubricants (In Air)

Material	Acceptable Usage Temperature,℃		Av Friction Coefficient, *f*	Remarks
	Minimum	Maximum		
Molybdenum disulfide, MoS_2	-240	820	0.10-0.25	Low *f*,carries high load, good overall lubricant, can promote metal corrosion
Polytetra-fluoroethylene (PTFE)	-70	290	0.02-0.15	Lowest *f* of solid lubricants,load capacity moderate and decreases at elevated temp
Fluoroethylene-propylene copolymer (FEP)	-70	200	0.02-0.15	Low *f* ,lower load capacity than PTFE
Graphite	-240	540	0.10-0.30	Low *f* and high load capacity in air,high f and wear in vacuum,conducts electricity

② 41 Typical Friction and Wear Data p437 TABLE 1A より抜粋表示

Material	Wear Factor (mm^3 /N-m)	Friction Coefficient	P*V Limit (MPa*m/s)	Temperature (℃)	Velocity (m/s)	Counter-faceMetal
PTFE	4.0E-0.4	0.1	0.049	24	0.5	Carbon steel
PTFE-fabric	4.0E-08		1.23	24	0.5	Carbon steel
PTFE-glass	1.0E-07	0.09	0.53	24	0.5	Carbon steel
PTFE-graphite	6.0E-08	0.07	0.56	24	0.5	Carbon steel

③ 47 Typical Properies of Sliding Contct Materials p494 より抜粋示

Material	Hardness	Specific Gravity	Tensile Strength MN/m^2	Elastic Modulus GN/m^2	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Expansion Coefficient 10^{-6}/℃
Cast iron	180B	7.2	240	160	52	10
Steel,1020	60RB	7.75	400	207	50	11
Steel,1040	540V	7.75	520	207	50	11
Steel,1090	27RC	7.75	840	207	50	11
Steel,4340	350V	7.75	1,720	207	38	14.6
Steel,52100	62RC	7.8	1,640	199	43	12.4
Steel,410 Stainless	135V	7.75	517	196	25	11.7
Steel,440C Stainless	650V	7.5	1,379	200	29	10.8
Nylon	79RM	1.14	79	2.8	0.24	170
PTFE	60SD	2.17	21	0.4	0.24	170
Carbon graphite	75SS	1.7	14	14	17	3.1

Notes:B=Brinell;R=Rockwell;V=Vickers;SD=Shore Durometer

④ 52 Friction,Wear,and PV Limits of Polymers and Their Composites

p558 TABLE1 より抜粋

Representative Tribological Properties of Polymers and Their Composites

Polytetrafluoroethylene（PTFE） T_g=126 ℃,T_m=327 ℃

Filler	Friction Coeff.		Wear Rate (10^{-15} m^3/Nm)	PV Limit (10^{-6} N/ms)
	Static	Kinetic		
None	0.04	0.05	100	0.06
15w%Glass fiber	0.05	0.09	0.14	0.35
None		0.21	300-800	
20w%MoS_2		0.22	5- 40	
15w%Graphite		0.21	4	
20w%Graphite	0.06	0.08	0.22	

Ａ３　ＰＴＦＥ支承板の摩擦・摩耗特性（グライト板の摩耗試験）

(1). は　じ　め　に

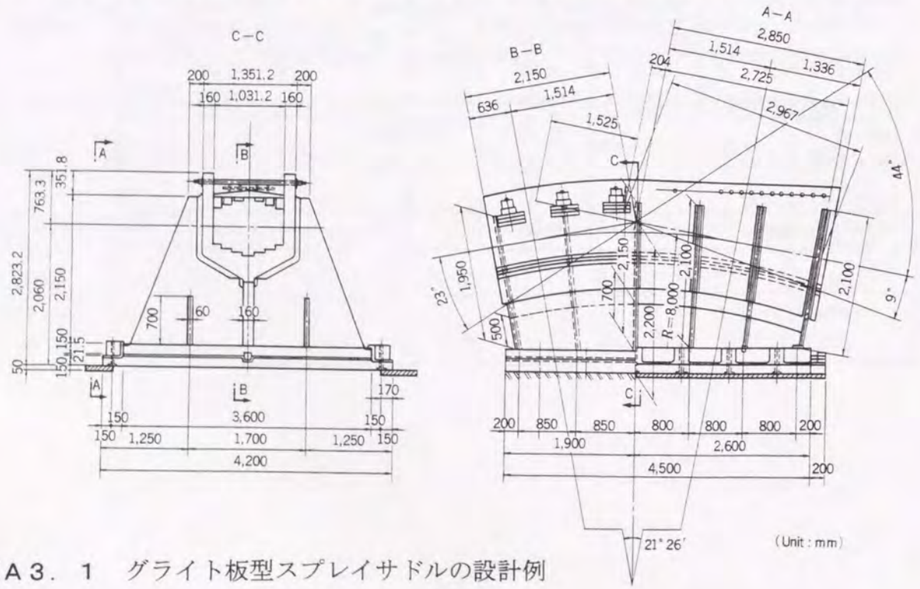
吊橋の象徴的部材である主ケーブルの支承・スプレイサドルは、アンカレイジのアンカースパン内における主ケーブル架設時の荷重および温度による伸縮を吸収するためのセットバック、および完成後の温度伸縮に対して追随させる目的で、架設時から橋梁完成後に至るまで橋軸方向に常時変位している部材(支承)である。

スプレイサドルは、吊橋における架設部材の中では一般的に、分割施工が困難であるため、最大のブロック重量になる部材で、通常、本品の据付のためのみに巨大な陸上あるいは海上クレーンが使用されることがほとんどである。

そのスプレイサドルは常時変位する部材であり、ほとんど負反力を受けないため、その軸受方式には極力摩擦抵抗が小さく、確実に挙動するローラー形式が採用されることが多い。その構成部材のうち、重量的、価格的にウエイトが高いのが、摺動部分であるローラーおよびその相手材である。摺動部分の機構を回転(平板・ローラー線接触)からすべり(平板相互接触)に変換し、ローラー部材を無くすることができれば経済的な施工が可能である。図Ａ３．１参照。

以上の観点から、欠円ローラー型からグライト板(支承板)型への変更可能性を模索した。

しかしながら、1983 年完成した高知県の大渡ダム大橋(中央支間長 238m)のスプレイサドルには、固体潤滑剤(黒鉛)埋込型支承板が採用され、摩擦係数 0.15 で設計された実例はあるが、現在まで長大橋においてはグライト板スプレイサドルの採用実績はない。



図Ａ３．１　グライト板型スプレイサドルの設計例

瀬戸大橋の中でも、特に下津井瀬戸大橋では陸上架設となり、かつ架設サイト周辺が民家に近接するなど大型クレーン架設に必要なヤード確保に厳しい現地条件であった。

このような背景からすべり機構の支承に変更するための研究、特にトライボロジー(摩擦・摩耗・潤滑)面の実験的研究を行ったものである。

この着想は、著者がタワーリンクのピン・ブシュで培った研究成果から得たものである。この成果によれば、タワーリンクにおけるトライボロジー面の諸特性、特に PTFE の基本的性質(摩擦、摩耗、潤滑。特に摩擦における速度特性)について実験的に再確認した項目もある。

瀬戸大橋の起点側吊橋・下津井瀬戸大橋（道路鉄道併用吊橋、中央支間長 940m）のスプレイサドル(図Ａ３．１参照)においては、摩擦・摩耗特性がよく、化学的に長期安定性の優れた充填材*) 入り PTFE（Polytetrafluoroethylene、商品名 Teflon）を用いたグライト板(PTFE の平面貼付型が Gleit 板**) である)を摺動部材に用いることを検討する。

このグライト板は、タワーリンクブシュの固体潤滑剤が接触面全体によく湧出し、皮膜化した状態とも考えられる。　ただし、ここでの相手材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。

しかしながら、PTFE はすべり(摩擦)速度が高くなるに従って摩擦係数が大きくなる特性を有すること、特に地震時のように速い速度のデータはほとんど見られなく、混入される充填材の種類も多く、実際のものでの試験データが国内では少ない状況であった。

そこで、小型および大型模型によるトライボロジー面の実験を実施し、その特性(摩擦・摩耗・潤滑に及ぼす速度、面圧、摩耗特性)を明らかにすることとした。

なお、本論文においては、特に断らない限り、(外力として作用する力を表す)面圧は平均面圧を示し、面内各部の応力度を示す場合は支圧応力度と呼称するものとした。

ただし、トライボロジー設計においては、接触部材の表面接触問題を扱うために、実際的には　面圧＝支圧応力度　で不都合はない。

＊）充填材は主成分である PTFE の特性を保有しつつ物理的特性（摩擦、摩耗）を改善するために混入させる。通常、純 PTFE のみでは摩擦係数は低いが、摩耗が多くて工業的には使いにくいことが多いため、各種の充填材が併用される。

充填材の種類と効果については本文3.3.1(３)２）試験用ブシュに詳述。

＊＊）Teflon は、1938 年に Plankett により発見された後 DuPont 社が商品化しており、埋込型ベアリング材に応用したのが、Leonhardt であり、貼付型へは Esslinnger が 1961 年に開発している。

詳細は Appendix A2 に詳しく説明しているので参照されたい。

（2）. 実橋スプレイサドルのトライボロジー設計条件

前述の背景から、グライト板摺動機構の実用性を確認する目的で、表Ａ３．１に示す実橋設計条件（下津井瀬戸大橋を採用）を基にトライボロジー諸特性の確認試験を実施した。

詳細は筆者らがとりまとめた文献[10]に述べているが、ここではその要点を整理する。

表Ａ３．１　スプレーサドルすべり部の設計条件

			下津井瀬戸大橋 (SB4A)	南備讃瀬戸大橋 (BB7A)
常時	面　　圧	Ｐｃ（kgf/cm^2）	１１０～４０	１１０～２７
	振　　幅	ａ　　（mm）	±１４	±１８
	すべり速度	Ｖ　　（mm/s）	０．８	０．９
地震時	面　　圧	Ｐｃ（kgf/cm^2）	１０５～３８	１１２～２８
	振　　幅	ａ　　（mm）	±　８	±１８
	すべり速度	Ｖ　　（mm/s）	９．５	１７．７

（3）. 試　験　装　置

常時および地震時における一般的特性を調査するための小型模型試験用には、最大水平力± 20tf，すべり速度 0.1 ～ 60mm/s、最大鉛直荷重 50tf の能力を有するすべり試験機を使用した。また、寸法効果を見るための大型模型試験用には、最大水平力± 50tf，すべり速度 0.1 ～ 40mm/s、最大鉛直荷重 200tf の大型振動試験装置を用いた。

（4）. 試験項目とその条件

１）小型模型試験

表Ａ３．１を基に、トライボロジー面に配慮し、速度特性、荷重（面圧）特性、摩擦特性および摩耗特性を確認する目的で平板型小型試験片を用いて以下の試験を行った。

① 速度特性試験：　すべり速度がトライボロジーに与える影響を調査する。

試験面圧は、グライト板として標準的な平均面圧Ｐｃ＝ 70kgf/cm^{2}とし，

摩擦回数は、傾向が判断できるＮ＝ 100 回、

すべり速度は、設計範囲を超えるＶ＝ 0.8 ～ 60mm/s と変化させた。

② 荷重（面圧）特性試験：　地震時において試験面圧がトライボロジーに与える影響を

調査する。

面圧は設計範囲を越えてＰｃ＝ 20 ～ 300kgf/cm^{2}と変化させ、

摩擦回数は、傾向が判断できるＮ＝ 30 回、

すべり速度は、設計値（地震時）のＶ＝ 20mm/s とした。

③ 摩耗特性試験：　寿命期間中のトライボロジー特性の変化に着目した調査を行った。

面圧は、摩擦・摩耗特性を評価するために標準の約２倍のＰｃ＝ 150kgf/cm^{2}とした。

ここに、約２倍とした理由は、片当たり等を考慮して安全側の設定としたことによる。

摩擦回数、すべり速度、摩擦（すべり）距離は、

常時（温度変化時）を考慮したケース

（Ｐｃ＝ 150kgf/cm^2、Ｎ＝ 20,000 回、Ｖ＝１ mm/s、Ｌ＝ 1,600m）

と、地震時を考慮したケース

（Ｐｃ＝ 150kgf/cm^2、Ｎ＝ 150 回、Ｖ＝ 20mm/s、Ｌ＝ 12m）

の２ケースとした。

ここに、Ｐｃ：面圧（kgf/cm^2）、Ｎ：摩擦回数（回）、

Ｖ：すべり速度（mm/s）、Ｌ：摩擦距離（m）

また、振幅は±２０ mm、入力波形は三角波とし、主要測定項目は、摩擦係数μ、供試体温度、摩耗量（寸法減少量、重量減少量）等である。（大型模型試験も同様）。

２）大型模型試験

大型試験においては、供試体の寸法効果がトライボロジー、特に摩耗特性に与える影響、および部材の耐用年数中の摩耗量予測に着目して実施した。

通常、PTFE には寸法効果はないといわれているが、実橋では設置面積が大きく（2 ～ 4 m 四方$^{\square}$）、製作精度等の影響による寸法効果　**注**）が現れる可能性が予想されるため、確認のために行った試験である。

大型試験においては、小型試験に対応させた摩耗特性試験を下記の条件で行った。

Ｐｃ＝ 150kgf/cm^2、Ｎ＝ 10,000 回、Ｖ＝１ mm/s、Ｌ＝ 800m。

なお、ＮおよびＬは、先行して行った小型試験の結果、この面圧条件では摩擦回数が多くなっても変動が少なかったため小型試験の 1/2 とした。

注） 摩耗試験は、接触する材料二物体の挙動(相互作用)を見つけることを目的にしており、単位面積あたりの精度が同じでも、対象面積が広くなれば高い部分同士の接触問題となり、局部圧力が高くなるため、その部分からクリープや摩耗が始まることになる。結果として、PTFE の場合に限定すれば、「摩擦係数が低めに、摩耗量が多めに出る」ことが予想される。一方、小さい試験片では平坦度が出しやすく、実機では反映できないような高精度な試験片を作製することがある。より大きな試験片を作製することが可能であればより実機に近い精度であり、支承本体設計からは安全側(摩耗量を多めに)に評価することになろう。しかし、支持する部材の設計には、

危険側(摩擦係数を小さ目に評価)のデータを提供することになるため要注意である。

(5). 供 試 体

1) すべり材

Gleit 板として実績のある PTFE をベースに、充填材入り PTFE －AおよびBとする。

ここに、純 PTFE はＪＩＳＫ６８９６四ふつ化エチレン樹脂成形粉のＩ－１による。

なお、大型試験片は小型のそれと比較して約 16 倍の面積である。

小型ＴＰ：6ᵗ x60ᵐᵐ x95ᵐᵐ（28 枚）

大型ＴＰ：6ᵗ x300ᵐᵐ x300ᵐᵐ（4 枚）

ここに、PTFE-A とは、摩耗量低減を狙い、充填材にグラスファイバーとグラファイトを使用したもので、PTFE-B とは、摩擦係数低減を狙い、充填材にグラファイトを使用したものである。

なお、通常、支承には多少の摩擦係数上昇を許し、摩耗量の低減を狙ったA材が使用されている。

注)JISK6896 は、実験時と現在の規格では表示が異なるが内容は同じである。

2) 相 手 材

防食性に優れ、市場性の良い、かつ支承板に実績の多いｵｰｽﾃﾅｲﾄ系 SUS304 板(18Cr－8Ni、JISG4304 熱間圧延ステンレス鋼板による)を採用した。準備した試験片の数量は下記のとおりである。

小型ＴＰ：30ᵗ x100ᵐᵐ x197ᵐᵐ（28 枚）

大型ＴＰ：40ᵗ x360ᵐᵐ x470ᵐᵐ（4 枚）

表面粗さはいずれも 6.3S とする。

なお、タワーリンクピンの場合と異なり、グライト板の相手材 SUS304 は、構造材として使用されるステンレス鋼の中では、強度レベルが最も低いステンレス鋼板である。降伏点比較では、SUS431 が 60kgf/cm²に対し、SUS304 は 23kgf/cm²である。一方、グライト板に作用する平均面圧は、タワーリンクの 300 ～ 500kgf/cm²に対し、70 ～ 150kgf/cm²と 1/3 以下であり、表面硬度は SUS431 が $H_B \geqq 229$ に対し、SUS304 は $H_B \leqq 187$ であるので、材料の組合せとしては妥当と判断した。(何れも JIS 規格値で評価した)。

また、SUS304 については、タワーリンクピンが裸使用であるのに比べ、PTFE で被覆されたグライト板であるため、裸使用となる端部の処理を工夫すれば、応力腐食割れ(SCC：Stress corrosion crack)の心配はないものと判断して選定した。さらに、電解質雰囲気中での異種金属接触腐食(電位差腐食)**注)** については、腐食電位差対策として、支持金物に電解質の侵入防止(例えば塗装)を行えば対処可能と考えた。

注) 異種金属接触腐食(電位差腐食、Galvanic corrosion、Dissimilar metal corrosion、Bimetallic corrosion)については、タワーリンクのピン材質 SUS431(マルテンサイト系ステンレス鋼)よりグライト板のベースメタル SUS304(オーステナイト系ステンレス鋼)の方がより電位差が大きく、電解質中で使用する場合には問題があるといわれている。[めっき技術マニュアル（財）日本規格協会] 文献[5]参照。

(6). 試 験 結 果

小型および大型試験の代表的試験結果を図Ａ３．２～Ａ３．７に示す。

図Ａ３．２に、各すべり材毎のすべり速度(V)の影響による摩擦係数(μ)の変化を示した。

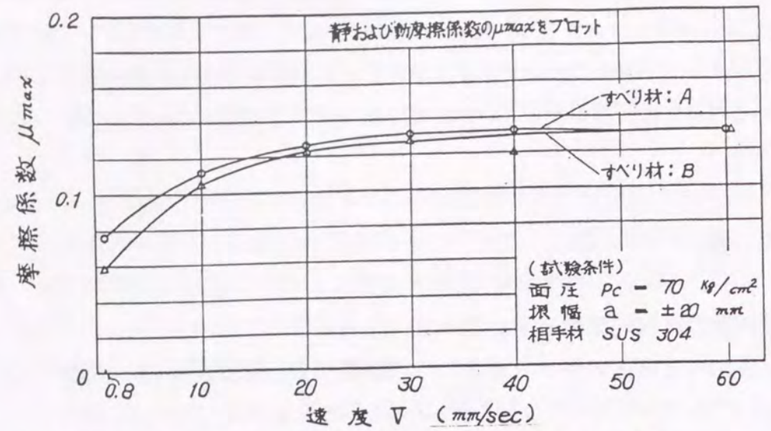
図Ａ３．３に、図Ａ３．２の結果を受けてすべり材をＡとし、摩擦回数(N)に対する摩擦係数(μ)の変化を示した。

図Ａ３．４に、各すべり材毎の面圧(P)の影響による摩擦係数(μ)の変化を示した。

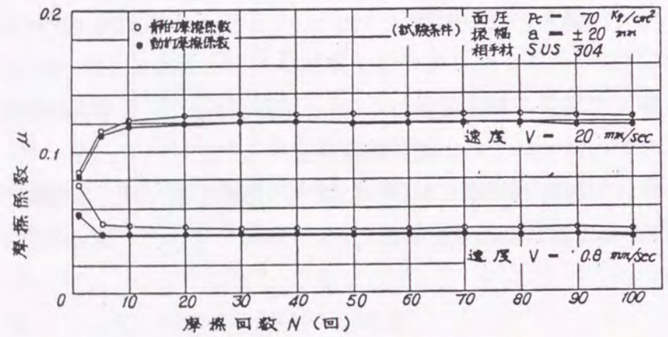
図Ａ３．５に、すべり材Ａの場合の摩擦係数(μ)について小型と大型試験の比較を示した。

図Ａ３．６は、すべり材Ａの場合の摩擦回数(N，ｎ：地震回数)に対する摩擦係数(μ)・摩耗量(W、寸法減少量)の変化についての小型試験結果を示した。

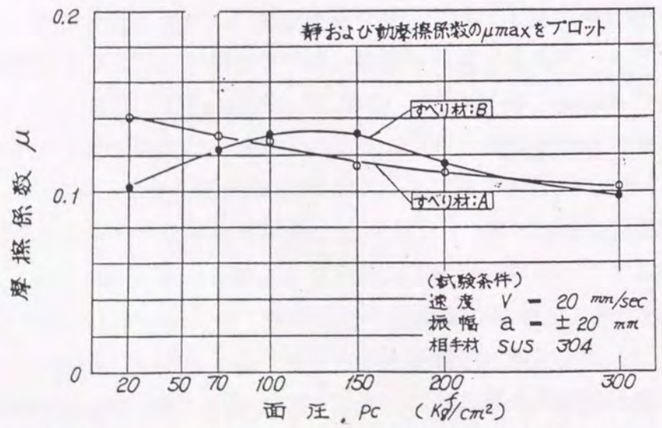
図Ａ３．７は、すべり材Ａの場合の摩擦回数(N)に対する摩擦係数(μ)・摩耗量(W、寸法減少量)の変化についての大型試験結果を示した。



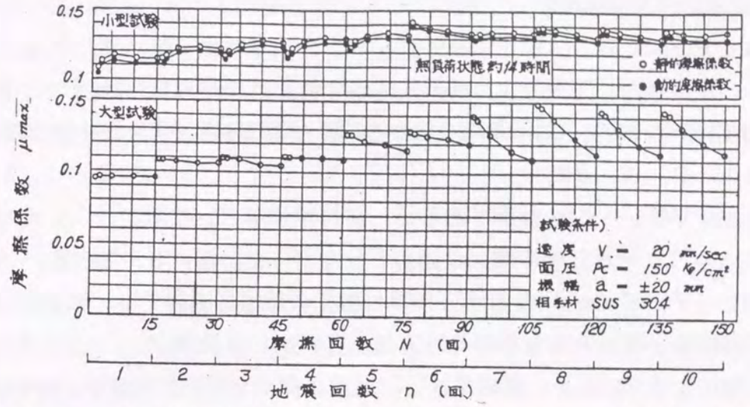
図A３．２　速度特性試験（μ－V）［すべり材：A，B］



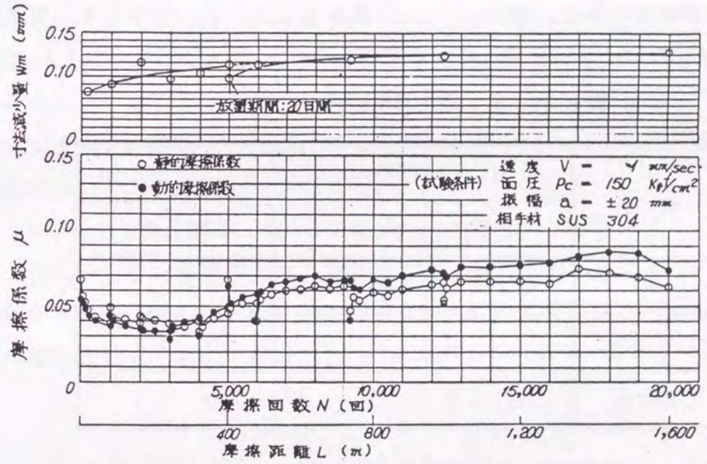
図A３．３　速度特性試験（μ－N）［すべり材：A］



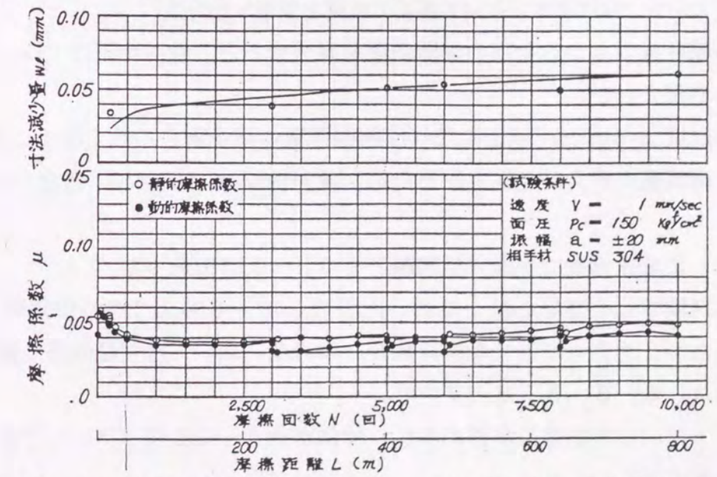
図A３．４　荷重特性試験（μ－Pc）［すべり材：A，B］



図A３．５　摩耗特性試験｛小型、大型｝（μ－N、μ－n）［すべり材：A］



図A３．６　摩耗特性試験｛小型｝（μ－N、W－N，L）［すべり材：A］



図A３．７　摩耗特性試験｛大型｝（μ－N、W－N，L）［すべり材：A］

試験の結果は以下のとおりである。

① 充填材入りPTFE-AおよびBの摩擦係数μおよび比摩耗量ωは、V，Pc，L等によって変化し、速度特性、面圧特性、摩耗特性がそれぞれに認められた。

② 今回の充填材入りPTFE-AおよびBには、摩擦・摩耗特性上大きな相違は認められない。図Ａ３．２、３．３参照。

③ V＝0.8mm/sではμ＝0.08程度であるが、Vが増すほどμは増加し、V＝30mm/sではμ＝0.13となり、それ以後の増大は認められなかった。図Ａ３．２参照。

速度が速く（V＞5 mm/s）なると、初期の数回の摩擦の範囲では、摩擦回数の増大とともに摩擦係数μは大きくなる傾向がある。図Ａ３．３参照。

④ 繰返し摩擦によりPTFE-Aの摩擦係数μには減少傾向が認められるが、PTFE-Bにおいては一部増大する範囲があった。図Ａ３．４参照。

⑤ 常時及び地震時相当条件におけるμ_{max}は表Ａ３．２のとおりであり、支承材料の挙動として特に問題はなかった。図Ａ３．５、３．６、３．７参照。

表Ａ３．２　最大摩擦係数μ_{max}

摩擦条件		μ_{max}(PTFE-A)		μ_{max}(PTFE-B)
		小型ＴＰ	大型ＴＰ	小型ＴＰ
常時		０．０９	０．０６	０．０７
地震時	（10回相当）	０．１４	０．１５	０．１４
	（２回相当）	０．１２	０．１１	０．１２

注） ２回相当とは再現期間150年の場合（耐用年数100年、非超過確率60％）のＭ８、10回相当とはＭ５規模の地震を想定したもの。

⑥ 摩擦係数及び摩耗量の点から今回の実験結果を評価すると、設計面圧は150kgf/cm^{2}程度とすることが望ましい。

図Ａ３．４によれば200kgf/cm^{2}以上になれば摩擦係数の減少割合が低くなること、当然のこととして摩耗量の増大が見込まれるため、設計面圧は150kgf/cm^{2}程度が限度と判断した。

⑦ 地震時を想定した摩擦係数は小型大型試験とも0.1～0.15であった。

一方、繰返し試験では小型で0.03～0.09、大型で0.03～0.06とやや寸法効果と見られる差が見られたが、マクロに見て摩擦係数及び摩耗量においては寸法効果は認められなかった。図Ａ３．５、３．６、３．７参照。

しかし、クリープには寸法効果が認められ、寸法が大きくなるほどクリープ変形量は小さい値を示した。

したがって、実橋における摩擦係数および摩耗量は、本試験結果が適用できるものと考えられる。

⑧ 摩耗量は小型試験で0.12mm、大型試験で0.06mmであった。

実験結果と一桁の誤差を考慮しても、実機での耐用年数中の摩耗量は1 mm程度を見込めばよさそうである。

(7)．　ま　と　め

本試験結果により、吊橋(下津井瀬戸大橋級の設計条件を有する場合)のスプレーサドルに使用するPTFE支承板には、

① 橋体の設計寿命100年間における挙動に対し、M≧８の巨大地震の発生を２回程度考慮しても、トライボロジー面では問題は少ないと予想される。

② 設計面圧150kgf/cm^{2}程度の場合、寿命期間中の最大摩擦係数は$\mu \leqq 0.13$、摩耗厚さは1 mm程度以下となることが期待できる。

③ 充填材は２種類を比較検討したが、有意な差は認めがたいが、永久使用する部品としては摩耗量が少しでも少ないＡ材が好ましい。

以上より、従来から中小橋梁のすべり支承に採用されており、本四タワーリンク設計施工指針にも採用されているものと同一の充填材(グラスファイバー)入りPTFEを使用したグライト板支承を適用して良いと判断した。

Ａ４　球面軸受の摩耗特性
（ハンガーソケット部球面軸受の摩耗試験[21]）

吊橋のハンガーケーブルは、常時、活荷重、温度、風により３次元的に変形を受ける部材である。長尺ものについては、これらの変形に基づく発生応力は微少で問題とはならないが、短尺ハンガーにおいては、曲げ、ねじりにより比較的大きな応力が発生するばかりでなく、振動減少に起因する疲労問題の発生対策が必要である。

これを回避するため、明石海峡大橋および来島海峡大橋では、ソケット定着部に球面軸受を用いることにより解決を図ろうとした。しかしながら、球面接触問題を解決すべきデータは皆無であったため、別途、1/4 縮尺模型(φ 290/4 → φ 73.32)を製作し、トライボロジーの確認実験を行った。

実験の目的は、球面軸受としてのトライボロジー諸特性(摩擦、摩耗、潤滑)を確認することであり、特にデッドゾーン dz の許容(限界)値を求めることを主たるテーマにした実験である。なお、潤滑剤はタワーリンクと同じ組成である。

報告書名：明石海峡大橋ケーブルハンガー用ユニバーサルジョイント実験Ｈ５．３

（１）　限界Dead zone １０mmの提案根拠

同報告書においては、表Ａ４．１に示す実験による摩耗量からｄｚ≦ 10mm であれば、ハンガーソケット部に対しては、摩擦係数が設計範囲に収まるため、合目的的と判断している。

表Ａ４．１　デッドゾーンの摩擦摩耗への影響

ｄｚ（mm）	８	１０	１５	ＳＬ無し	
摩擦係数 f	0.060 ～0.10	0.065 ～0.17	0.075 ～0.16	0.050 ～ 0.24	ＳＬ無しは saturate せず
Ｔ（℃）	３２	４０	３７	３８	室温は２６～２７℃
Ｗｉ（mm）	－.００５	－.００２	－.００５	－.００５	軸受内輪摩耗減量(寸法)
Ｗｏ（mm）	.０００	.０００	－.００５	－.０２０	軸受外輪摩耗減量(寸法)

注）ただし、Ｎ＝5,000 回、初期摩耗対策としてＳＬ４ι コートを実施した。

しかし、このデータを詳細に調査すると以下の点に付いて問題を含んでいる。

①寸法をコンパクトにするため、ＴＬの 500kgf/cm^{2}より大きい 1000kgf/cm^{2}を採用している。高面圧のためＳＬの湧出には良いが面が荒れる傾向になる。

②Ｎ≦５ｘ１０^{5}までの試験では、摩擦係数は落ち着いているが表面荒れ、温度上昇が高い。Ｎが多くなるとさらに増大する可能性を示唆している。

③摩耗の予測がなされていない。長寿命に対して摩耗量を予測することは、繰返し数Ｎが少なく危険であろう。

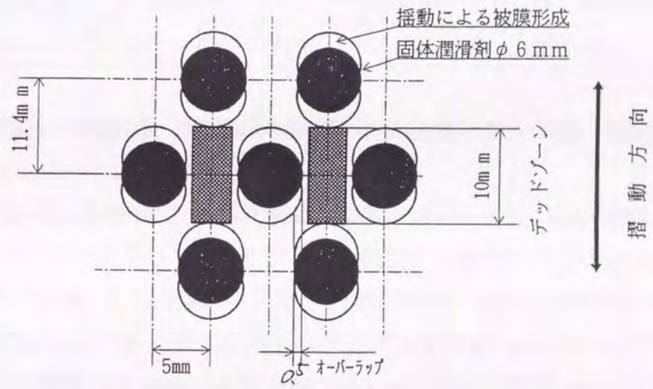
④Ｎが少ない試験でｄｚの TRIBOLOGY への影響を結論づけている。

ｄｚをパラメータにＮ＝１０^{6}回程度で確認の必要がある。

これは、橋梁支承として共通のテーマであり、今後の課題である。

この実験計画で特に留意すべき点は、対象部材の特性があることである。

ハンガーは供用しながら部材交換が可能であるが、タワーリンクは、基本的に交換は不可能であり、永久使用が要求されている。すなわち、ハンガーは、設計時に想定した条件と異なる経過を示したとしても、最悪の場合にも供用しながら部材交換が行えるということからの判断が入っていることである。



図Ａ４．１　PTFE の配置とデッドゾーン(ハンガーソケット球面軸受部)

２）面圧特性試験（ｄｚ＝１０㎜）

デッドゾーンを10㎜一定とした場合の面圧変化によるトライボ特性を調査する。

試験条件：Ｖ＝0.０４２ mm/s(3cpm)、θ＝±５°、Ｎ＝5,０００回、初期ＳＬ４ι コートを実施。ただし、Ｐ＝1,０００ kg/cm^{2}ではＮ＝１０,０００回実施。

試験結果を表Ａ４．２に示す。

表Ａ４．２　面圧特性調査試験結果

面圧(kgf/cm^2)	５００	７５０	1,０００	1,２００	
摩擦係数 f	0.０５０ ～0.１１	0.０８０ ～0.１４	0.０６０ ～0.１４	0.０８０ ～ 0.１４	
Ｔ　(℃)	３２	３２	３３	３６	室温は 26 ～ 27 ℃
Ｗｉ（mm）	－.００５	－.００３	－.０１０	－.００５	軸受内輪摩耗減量
Ｗｏ（mm）	.０００	.００５	－.０１０	－.００５	軸受外輪摩耗減量

ハンガーソケット部に対しては、面圧は750kg/cm^2　以下を妥当と判断している。

3）タワーリンクＴＬ、ハンガーソケットＨＳの試験値と設計値の位置づけ

タワーリンクとハンガーソケット部における実験結果を並べて評価してみると表Ａ４．３のようになる。

表Ａ４．３　タワーリンクＴＬ、ハンガーソケットＨＳの試験値と設計値の比較

構造物の種類	構造物としての供用性	実験			設計値 f	bearing system
		N	TP-size	f		
ＴＬ	永久（交換不能）	10^6	φ３３０	＜0.08	0.15	円筒
ＨＳ	永久（交換可能）	5×10^3	φ６０	0.17	0.20	球面
shoe	永久（交換不能）				0.15	球面
pendel	永久（交換不能）				0.20	球面

①まず、接触機構、運動条件等前提条件（確認実験条件）を無視した適用はしてはならない。

②ＴＬでは、摩擦係数に安全余裕として約２倍を見込んでいるが、ＨＳはその余裕はない。今回の結論はＨＳに限定して使用すべきである。

4）潤滑不良

潤滑不良となった場合を想定して、Ｓ４５Ｃ軸受とＳＣＭ４４０硬質クロームめっき軸の組合せでも確認実験を行っている。結果を表Ａ４．４に示す。

表Ａ４．４　Ｓ４５Ｃ軸受とＳＣＭ４４０硬質クロームめっき軸の組合せ

面 圧 (kgf/cm^2)	1,500		2,000		
摩擦回数 N(回)	0	２３０	0	３０	
摩擦係数　f	0.16	0.47	0.20	0.44	0.44では凝着発生

表Ａ４．４に示す結果によれば、繰返し数が増すにつれ、摩擦係数が増大し、焼き付き等を起こし、回転しなくなることを示唆している。

Ａ５　本州四国連絡橋主要橋梁のタワーリンク・エンドリンクの構造諸元

本州四国連絡道路３ルートにおける主要橋梁のタワーリンク・エンドリンクの構造諸元を表Ａ５．１および表Ａ５．２に示す。

同表における重要な相違点および今後の課題は以下のとおりである。

ここに、s：吊橋、c：斜張橋を示す。

（１）本四橋におけるリンク支承の構造諸元一覧表

各橋においては各支承固有の挙動から適用軸受が異なる。

円筒軸受を用いたタワーリンク：

s 下津井瀬戸大橋、s 北備讃瀬戸大橋、s 南備讃瀬戸大橋、s 大鳴門橋、
s 因島大橋、s 大島大橋、s 来島海峡第一、二、三大橋

球面軸受を用いたタワーリンク：

c 櫃石島橋、c 岩黒島橋、s 明石海峡大橋

円筒軸受を用いたエンドリンク：

c 櫃石島橋、c 岩黒島橋、s 大鳴門橋、s 因島大橋

球面軸受を用いたエンドリンク：

s 下津井瀬戸大橋、s 北備讃瀬戸大橋、s 南備讃瀬戸大橋、c 新尾道大橋

なお、負反力の小さい長大橋においてはリンク支承構造を採用していない。すなわち、多々羅大橋にはタワーリンク・エンドリンクを、来島海峡大橋にはエンドリンクを使用せず、一般支承を採用している。

（２）今後の課題

①　リンク支承設計指針に想定していない球面ブシュを使用した橋がある。

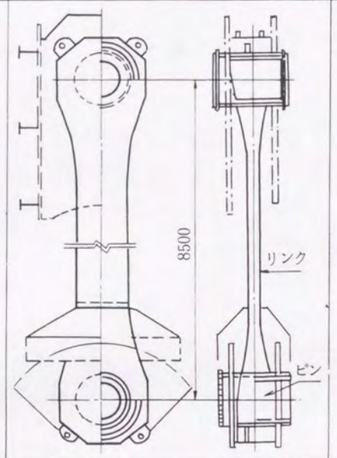
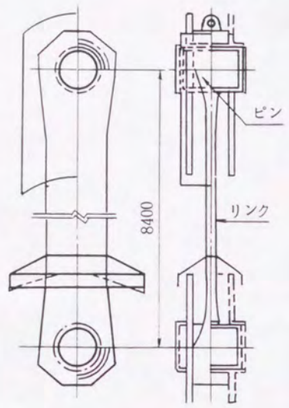
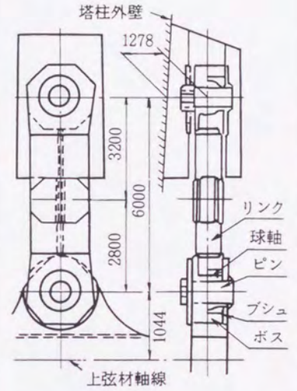
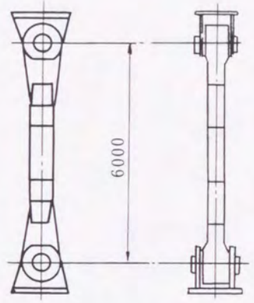
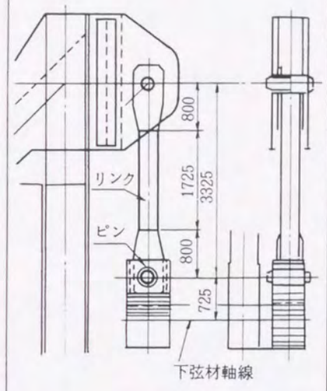
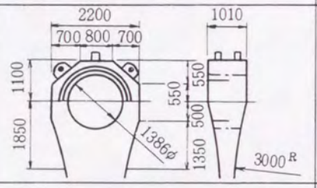
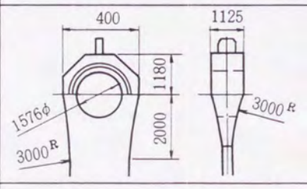
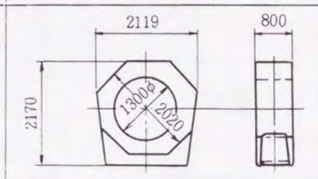
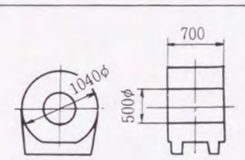
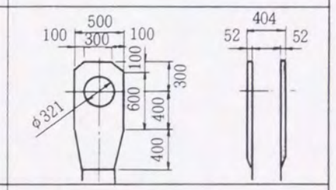
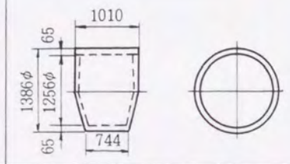
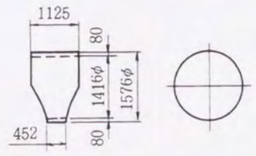
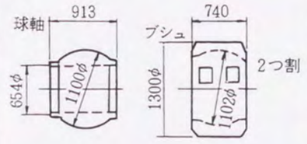
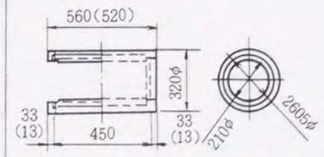
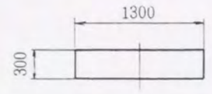
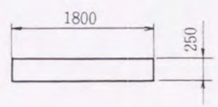
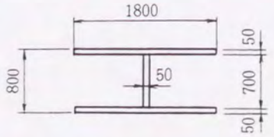
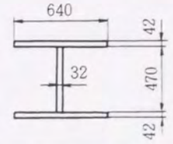
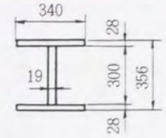
②　瀬戸大橋（下津井、南北備讃）および道路単独橋の明石海峡大橋のエンドリンクには、一般支承で実績の多い SUS410 肉盛り半球型を採用している。

③　各軸受の適用材質は②を除き、いずれもリンク指針に則っているが、リンク軸部の材質には比較的小規模な支承にも大型用の材質が使われている。

今後は、リンク支承構造ピン・ブシュに適用する材質については荷重条件、軸受部の挙動を明らかにし、システム全体について維持管理性、経済性、部材の剛性確保など、より慎重な検討が必要である。

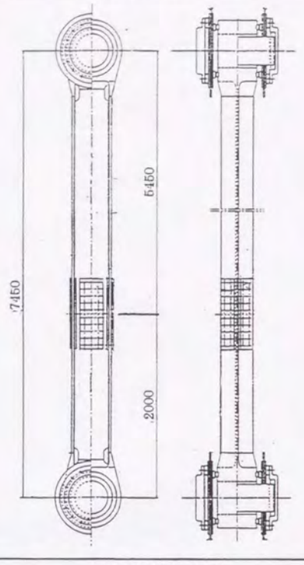
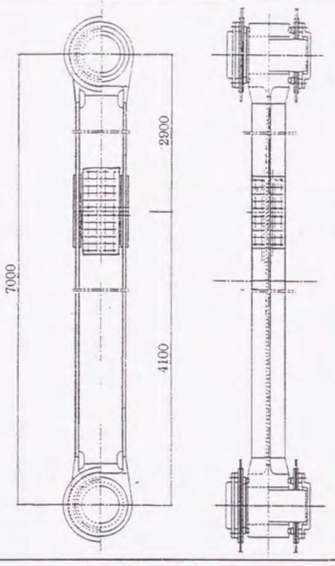
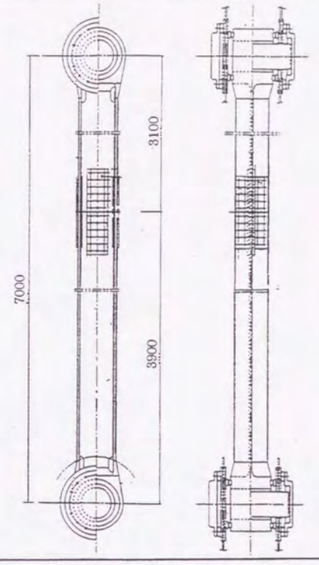
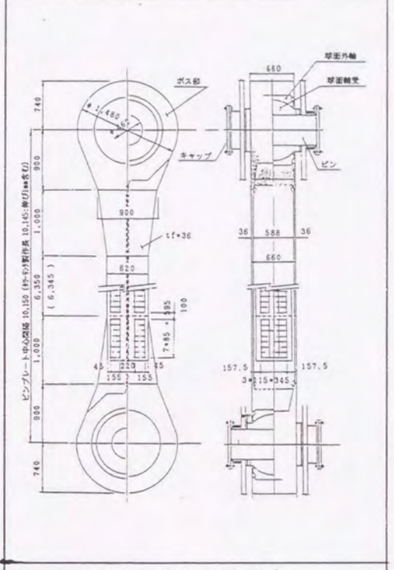
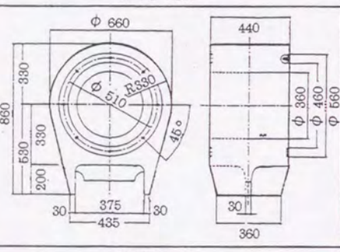
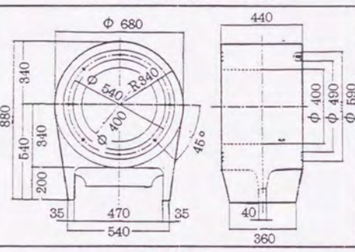
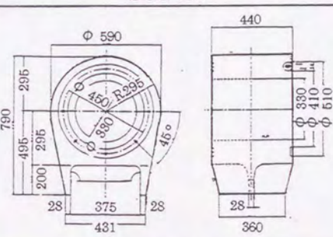
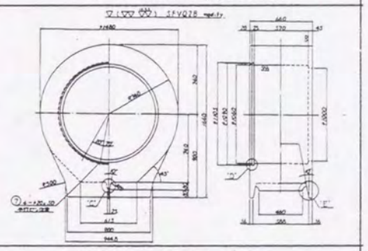
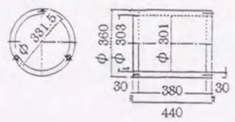
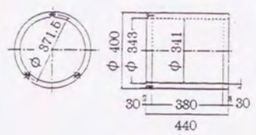
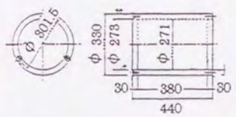
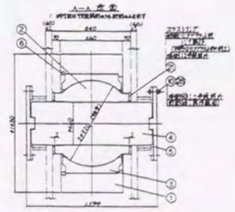
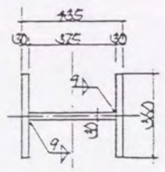
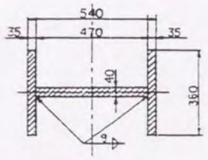
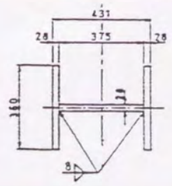
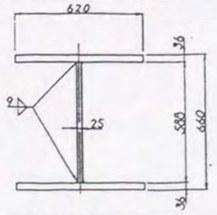
表Ａ５．１ａ　タワーリンク構造諸元表（瀬戸大橋まで）

瀬戸大橋、大鳴門橋、因島大橋

		南北備讃瀬戸大橋	下津井瀬戸大橋	岩黒島橋・櫃石島橋	大鳴門橋	因島大橋
設計反力（t）	最大	南 3,950t　北２Ｐ 3,733t　北３Ｐ 3,508t（引張）	5,000（引張）	2,881（引張）	960 t	321.9（引張）
	常用時	2,400t　2,371t　2,174t（引張）	3,600（引張）	1,977（引張）	630 t	175.4（〃）
	負反力	1,150t　1,095t　1,216t（圧縮）	436（圧縮）	—	－270 t	120.9（圧縮）
全体構造						
ピン	形状	1,250 φ × 1,830（スリーブ形式）	1,410 φ × 2,010（スリーブ形式）	650 φ × 1,338（1,352）	420 φ × 1,050	210 φ × 848（808）
	材質	ＳＵＳ 341 ＋ＳＦ 55	ＳＵＳ 431 ＋ＳＦ 55Ａ	ＳＵＳ 431	ＳＵＳ 431	ＳＵＳ 431
ボス	形状					
	材質	ＳＦＶＱ２Ｂ（Modify）	ＳＦＶＱ２Ｂ（Modify）	ＳＦＶＱ２Ｂ（Modify）	ＳＦＶ２	ＳＭ41Ａ　ＳＳ41
ブシュ（軸受）	形状				外径　500 φ 内径　421 φ ℓ ＝ 600	
	材質	ＨＢｓＣ４	ＨＢｓＣ４	球軸ＳＵＳ431， ブシュＨＢＳＣ４＋ＳＬ		ベアリングブロックＳＣ46 ワッシャＳＵＳ304
リンク	断面					
	材質	ＳＦＶＱ２Ｂ（Modify）	ＳＦＶＱ２Ｂ（Modify）	ＳＭ50ＹＣ	ＳＭ50ＹＣ	ＳＭ41Ａ，ＳＳ41

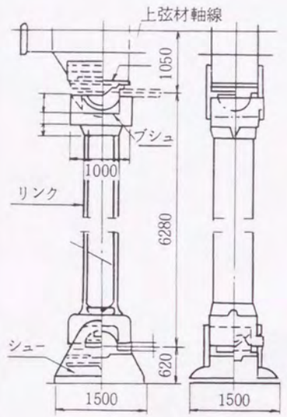
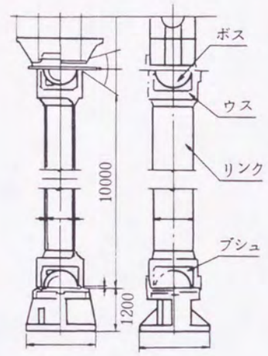
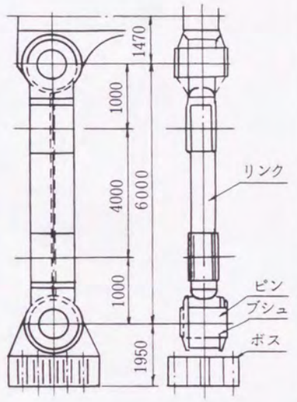
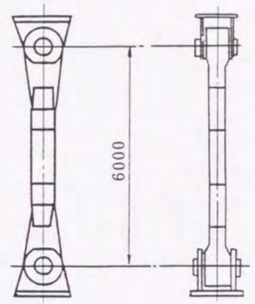
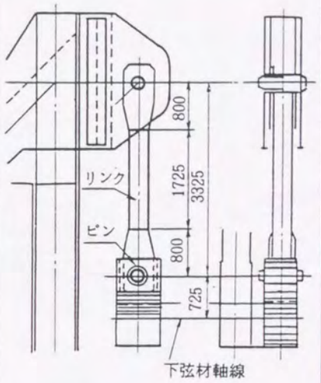
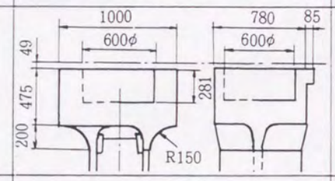
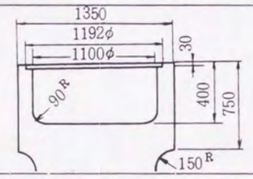
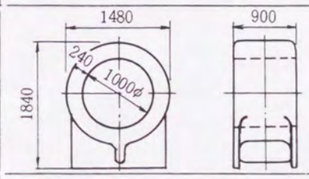
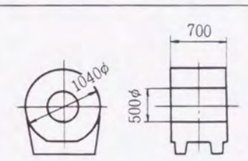
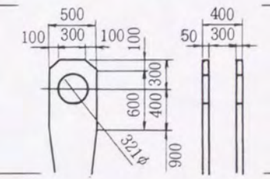
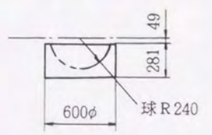
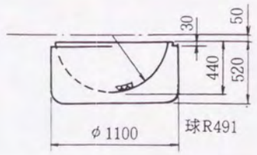
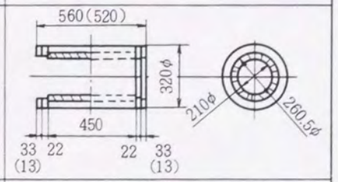
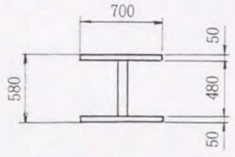
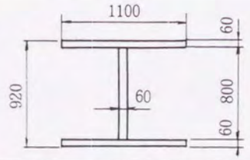
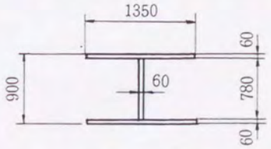
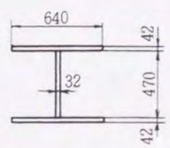
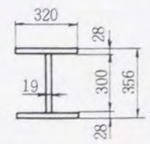
表Ａ５．１ｂ　タワーリンク構造諸元表（明石海峡大橋以降）

明石海峡大橋、来島大橋

		来島第一大橋	来島第二大橋	来島第三大橋	明石海峡大橋
設計反力（t）	最　大	310(485) [引張]	385(475) [引張]	370(350) [引張]	８４０［引張］
	常用時	215　　[引張]	260　　[引張]	250　　[引張]	
	負反力	80(260) [圧縮]	120(205) [圧縮]	140(95) [圧縮]	４００［圧縮］
全体構造					
ピン	形　状	φ300×822(722)	φ340×822(722)	φ270×822(722)	φ４６０×１３００
	材　質	SUS 431	SUS 431	SUS 431	ピン＆球面外輪SUS431
ボス	形　状				
	材　質	SFVQ1A	SFVQ1A	SFVQ1A	ＳＦＶＱ２Ｂ mdy
ブシュ(軸受)	形　状				
	材　質	HBsC4+SL	HBsC4+SL	HBsC4+SL	ＨＢｓＣ４＋ＳＬ
リンク	形　状				
	材　質	SM490Y	SM490Y	SM490Y	ＳＭ５７０

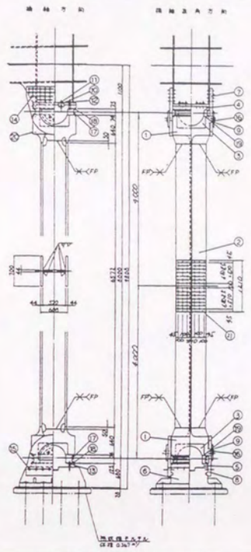
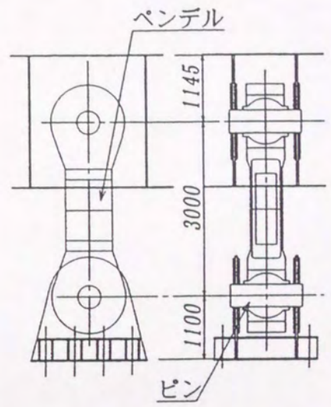
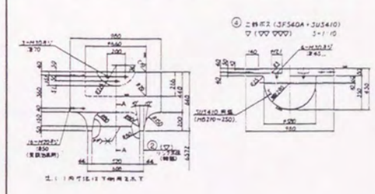
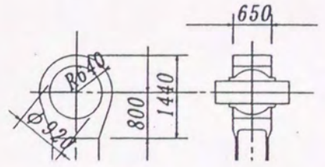
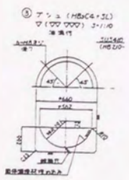
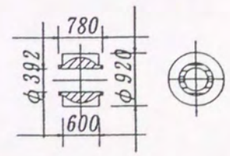
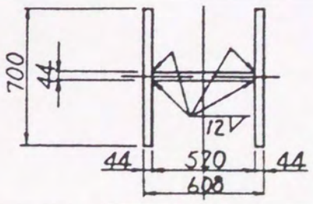
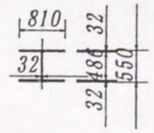
表A５．２a　エンドリンク構造諸元表（瀬戸大橋まで）

瀬戸大橋、大鳴門橋、因島大橋

		南北備讃瀬戸大橋	下津井瀬戸大橋	岩黒島橋・櫃石島橋	大鳴門橋	因島大橋
設計反力（t）	最大	南 1,000 t　北 1,100 t（圧縮）	2,558 t（圧縮）	2,716（圧縮）	1,100 t（圧縮）	341.0（圧縮）
	常用時	600 t　650 t（〃）	2,113 t（〃）	1,936（〃）	710 t（圧縮）	148.1（〃）
	負反力	270 t　350 t（引張）	158 t（引張）	1,299（引張）	440 t（引張）	215.9（引張）
全体構造						
ピン	形状	R 240（半球）	R 490（半球）	900 φ × 1,280（スリーブ形式）	420 φ × 1,050	210 φ × 854（808）
	材質	ボス SF 55 A＋SUS 410 肉盛	ボス SF 55 A＋SUS 410 肉盛	SUS 431＋SF 55 A	SUS 431	SUS 431
ボス	形状					
	材質	SFVQ 1 A　modify	SFVQ 1 A	SCMn 2 A	SFV 2	SM 58
ブシュ（軸受）	形状			外径　1,000 φ 内径　903 φ ℓ ＝　900	外径　500 φ 内径　421 φ ℓ ＝ 600	
	材質		HBsC 4＋SL	HBsC 4＋SL	HBsC 4＋SL	ベアリングブロックSC 46 ワッシャSUS 304
リンク	断面					
	材質	SM 50 YC	SM 50 YC	SM 58	SM 50 YC	SM 41 A

表Ａ５．２ｂ　エンドリンク構造諸元表（明石海峡大橋以降）

明石海峡大橋、新尾道大橋

		明石海峡大橋	新 尾 道 大 橋
設計反力（t）	最 大	９１０（８６０）［引張］	６８４ｔ（圧縮）
	常用時		２７５ｔ（圧縮）
	負反力	３６０（３７０）［圧縮］	６６５ｔ（引張）
全体構造			
ピン	形 状	半球R290	φ390×1244
	材 質	ボスSF540A＋SUS410肉盛	球面外輪SUS431
ボス	形 状		
	材 質	ＳＦＶＱ１Ａ	ＳＦＶＱ２Ｂ ｍｏｄ
ブシュ（軸受）	形 状		
	材 質	ＨＢｓＣ４＋ＳＬ	ＨＢｓＣ４＋ＳＬ
リンク	形 状		
	材 質	ＳＭ４９０Ｙ	ＳＭ５７０