Architectural Institute of Japan

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集　第517号，85-92，1999年3月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 517, 85-92, Mar., 1999

高張力ロッドを用いたテンション構造のシステム化に関する研究

TENSION STRUCTURE SYSTEM USING HIGH-STRENGTH STEEL RODS

竹内　徹*，岩田　衛**，和田　章***

Toru TAKEUCHI, Mamoru IWATA and Akira WADA

Although cables are most popular as material, steel rods are also used as tensile members in tension structures for long time in history. In this paper, required quality for the tension strings and their connections are discussed by defining tension structures as structural-system hierarchy composed of various levels of elements. Their required quality items are chosen through historical review including bridges and glass wall structures, and through their hierarchical studies using parabolic tension elements defined as sub-systems. Several type of connections for high-strength tension rods are proposed and selected for satisfying these requirements, followed by application for practical projects.

Keywords *: Structural system, Steel structure, Tension structure, Steel rod, Connection*
構造システム，　鉄骨構造，　テンション構造，鋼棒，　接合部

1.　序

建築におけるテンション構造の張力部材としては現在ケーブル、すなわち鋼線・鋼索を縒り合わせたものが一般的である。ケーブルを用いたテンション・吊り構造の指針[1]が整備されることにより多くの空間構造にケーブルを用いた架構が適用できるようになり、テンション構造がそのままケーブル構造と呼ばれることも多い。一方、同指針で指摘されているように、実際の設計においてはケーブルだけでなく、鋼製ロッド（鋼棒）やプレート（鋼板）などもテンション材として古くから用いられている[2)-3)]。特にロッドはケーブルとは別の背景による独自の発展をとげ、近年かなり高張力のものも用いられるようになると共にルーブルのピラミッドに代表される多くの特筆すべき建築を生み出してきている[4]。その一方で接合部に関し留意すべき技術的課題が存在することも指摘されている。[5)6)]

我が国におけるケーブル構造は基本的に橋梁技術をその母体としており、初期の基本文献としては日本鋼構造協会発行の「吊構造」(1975年)[7]に遡る。またその後多くの活動と実績、恒久膜構造の発展を経て、1994年には日本建築学会より「ケーブル構造設計指針・同解説」[1]が刊行され、テンション構造の設計を行う上での重要な指針となっている。しかしながらこれらの文献においても高張力を含むロッドについては記述が乏しく、その接合部に対する要求性能に関しても未だ論じられていない点が多い。

筆者らが文献8）で論じた考え方をもとに、テンション構造をメーカー側からの建築生産上の構造システムととらえヒエラルキー上にプロットすると、ケーブルやロッドなどのストリングは部品レベルの構成要素と定義することができる（図1）。ここにストリングとはケーブル・ロッドなどのテンション材の総称を指すものとする[9)-11)]。ストリングを繋ぐ接合部も同じ部品レベルの構成要素と位置づけられ、さらにこの下にストリングおよび接合部を構成する種々の鋼材が材料レベルの要素として位置付けられる。これらを統合してサブシステムとしてのテンション架構ユニットが構成されると考えれば、種々の鋼材を用いたケーブル・ロッド等のストリングおよび接合部を同等レベルの部品として性能評価し、適材適所に使用することが可能になる。現在、テンション構造の設計においてはサブシステムまでを設計者が、部品レベル以下をメーカーが行っている事が多く、必ずしも設計要求に対しバランスの取れた部品設計になっているとは限らない。構造を構成する各要素がレベル間に連続性のある普遍的な要求項目に対し設計され、各項目の性能評価に応えることが可能な部品より構成される事によって、上位の設計と整合性のとれた部品・材料の性能指定が可能になると考えられる。

そこで、本論ではまずテンション構造におけるストリングの要求

* 新日本製鐵㈱　部長代理・工修
** 新日本製鐵㈱　部長・工博
*** 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博

Senior Manager, Nippon Steel Corp., M. Eng.
General Manager, Nippon Steel Corp., Dr. Eng.
Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

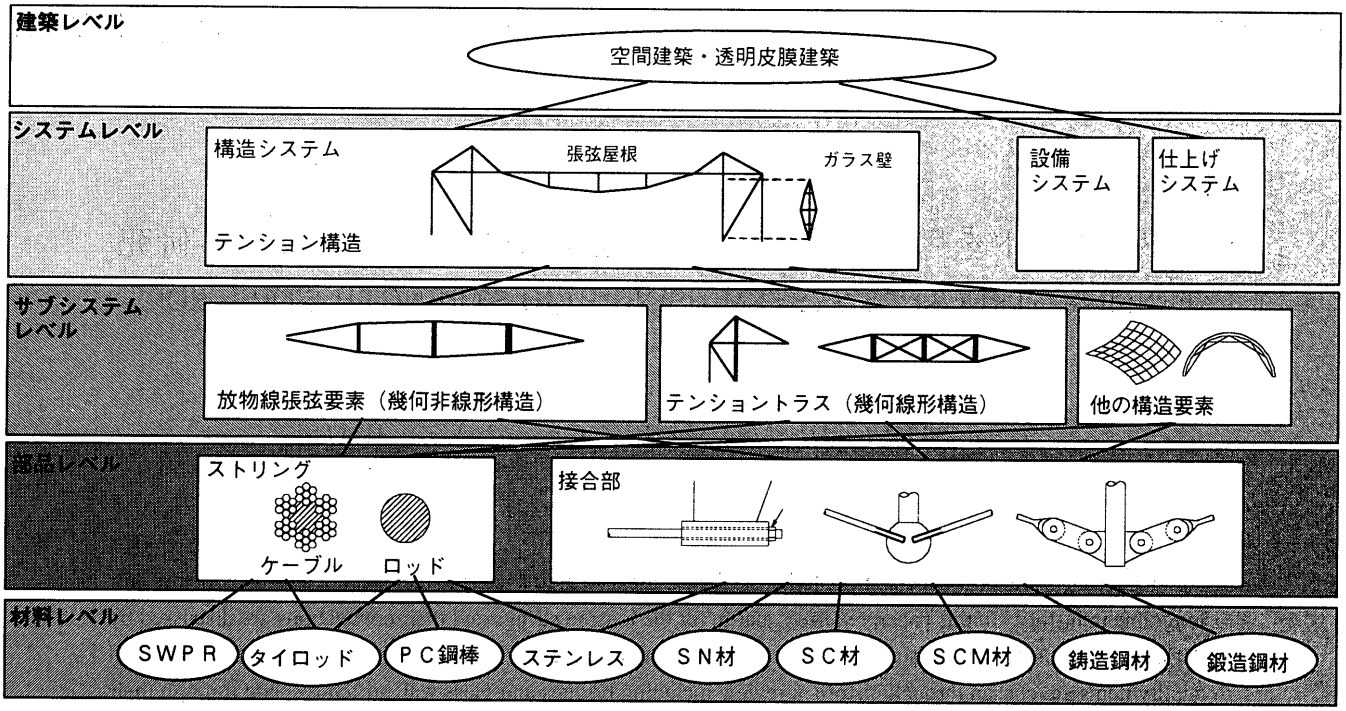


図1　テンション構造におけるシステム・ヒエラルキー

性能項目を歴史的変遷より抽出し、ストリングとしてのロッドの位置づけおよびその特性を明らかにする。この際橋梁等、建築以外の分野をも視野に入れ広範に論じる。その後、得られた要求性能を現代の視点より見直し、汎用的なサブシステムに対する要求性能を導く。これよりストリングおよび接合部に要求される性能を設定し、最終的に高張力テンションロッドに適した接合部の提案・抽出を行うことを目的とする。同時に抽出された接合部の使用実例を通じて具体的な性能評価方法の提案を試みる。

2．歴史的変遷から考えたストリングへの要求性能

テンション構造のストリングへの要求性能を歴史的に拾遺する上で、その範囲を橋梁・建築および透明皮膜・ヨットの分野に拡張し、ロッドの使用例を中心に評価する。全体概要を図2に示す。以下にその内容を記しながら、要求される性能項目の抽出を行う。

2-1）橋梁における変遷

テンション構造による橋梁、即ち吊り橋の分野においては、産業革命後の1818年、Samuel Brownらによりアイバー・チェーンによる吊り橋が実用化され、英国・独国を中心に多くの吊り橋が19世紀末まで同様の方式で建設されている[2)3)]。アイバー・チェーンは練鉄によるピンエンド付きのロッドまたはプレートを多数連結したもので、現在使われているタイロッドと基本的に同じ形状を有する。他方ではやや遅れてフランスを中心にケーブルを使用した吊り橋が発展し、両者の間でその性能をめぐり論争が交わされた[12)]。当時の議論においては強度・本数が多いことによる安全性や、引き抜き過程で品質管理のできるケーブルは一品生産のチェーンに勝り、一方防錆、定着部の弱さの点でチェーンに劣るとされている。しかしながら20世紀以降、吊り橋の径間が長大になるにつれ、大容量化の可能なケーブルがその主導権を握り、チェーンによる吊り橋は以降姿を消している[13)]。以上の事実より、橋梁においては最終的にその強度がストリングに要求される最重要性能であり、剛性・防錆などの性能は付随的なものであったと判断できる[14)]。これらのケーブルの定着は、マスト頂部において鞍状金物を使用し、最短部でコンクリートマスに分散定着する例が一般的となっている。

2-2）建築屋根構造における変遷

建築分野、特に大スパンを構成する屋根構造において、テンション構造は歴史的に多くの適用例が見られる。19世紀以前の事例に見られるテンション部材はロッドが中心であり、その使用用途はアーチ構造のスラストを処理するタイバーおよび張弦梁架構、または屋根・壁面を補剛するブレースが主である[2)15)]。1847年竣工のライム・ストリート駅舎屋根は張弦アーチ構造の一例であり、同種事例の要求性能としては、単に引張りに強い安価な材料ということにとどまっている。従って20世紀に入り型鋼およびRC構造の普及に伴い引張り・曲げに抵抗できる部材が出現するにあたり、これらの架構はトラスやRC梁に置き換わり、ロッドは鉄筋としての使用が主用途となってRCプレストレス材としての高強度化が進行した[16)]。

一方、1960年代に入ると橋梁技術を応用したケーブルによる大空間構造が見られるようになり、F.Otto、坪井、川口、斎藤らにより多くの代表的な空間構造が実現された[17)-21)]。これらの構造における径間は一般的に20～100mであり、ケーブル選択の理由もその強度容量にあるといえる。定着部には初期張力導入の為、リブ先端にソケットを設け、ストリングを通して背後から緊張するディテールが多く用いられている。

その一方で1980年代より欧州を中心に展開されたN.Foster、R.Rogers、R.Pianoらによる建築においてはロッドを主体とした吊り屋根、張弦梁、テンショントラスが多用されている[2)22)-24)]。このロッドには鉄筋用の鋼棒が転用されたが、その選択理由は接合部を含む意匠上の要求や剛性の高さなどによる。この場合、ストリングの平均部材長は2～20m前後のものが多い。日本においても大規模な屋根構造はケーブルが多用される一方で、図2に見るように比較的小規模のテンション構造にロッドが多く使用されている[25)-27)]。ストリングの定着には、先述のリブ付きソケットの他、初期張力不要の箇所にはカプラー付きピンエンドが用いられている例が多い。

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

2-3)透明皮膜・ヨットにおける変遷

高緯度・寒冷地である欧州各国では19世紀中期よりガラス皮膜による温室建築が発達したが、1980年以降に至り省エネルギーの観点より再評価され、視覚的にも高度に意匠化されたガラスのエントランスホール、アトリウム、壁面等が数多く実現された[28)-33)]。その多くに視覚的な透明感・軽快感を得るためにテンション構造が適用され、初期の代表的な実例にI.M.Peiによるパリ・ルーブル宮のガラスのピラミッドが挙げられる[4)]。同構造では強度1000MPa級の高張力ステンレスロッドが用いられており、これは競技用ヨットのマスト支持構造のために開発されたものである。

競技用ヨットにおいてはマストのリギンには永らくステンレスロープが用いられてきたが、1970年代以来ロッドが主流となった。その理由としては、重量・見付け面積に対する剛性の高さがある[34)]。

一方、P.Riceらは1986年パリ、ラ・ビレット公園にテンション構造により支持された32m角のガラスボックスを実現し、支持構造用ストリングとしてステンレスロープを使用している[35)]。こうしたガラス壁を支持するテンション構造はガラスパネルの支持構法と共に日本に導入され、1990年以降多くの事例に適用されると共に、独自の開発が活発に行われた[36)]。代表例として渡辺らが東京フォーラムにおいて実現した高さ60mのガラスホールが挙げられ、同事例では壁構造にはケーブル、屋根にはロッドを使用している[37)]。

この分野においては、各ストリング材1本に要求される平均長さは20m以下であることが多い。また、ロッドと共に多用されているステンレスロープは強度上は通常のケーブルに比べやや劣り、PC鋼棒程度であるため、その要求性能は外観・防錆および剛性を主体としているものと考えられる。外観重視のため、定着部もピンエンド等を使用しコンパクトに納める例が多い[38)39)]。

2-4)要求性能の抽出

以上の概要に沿って拾遺した1)～39)の文献内において、ストリングへの主要な要求性能としての記述を各分野ごとに抽出し、その記述数比率による重要度評価を表1に示す。またヨットを除く各分野におけるケーブルとロッドの使用比率を同表に示す。使用比率の分析対象としては，吊橋は文献14)，建築屋根は文献1)付録，透明皮膜は文献33),35),36)の内，1970年以降の184事例を抽出し使用した。同表は吊橋において強度・耐錆・施工性が絶対条件であるのに対し、建築屋根では剛性・コストが強度に並ぶ要求性能となり、透明皮膜では意匠性(径)および剛性が主要要求性能となる事を示唆している。また現代の吊り橋ではケーブルの使用率が100%であるのに対し，建築屋根では約10%，透明皮膜では約50%程度のロッド使用率が見られる。

表1　ストリングに要求される性能項目

	要求性能項目記述比率								ストリング使用比率		
	文献数	記述数	強度	剛性	耐錆	コスト	径	施工性	事例数	ケーブル	ロッド
吊橋	4	7	43%	0%	29%	0%	0%	29%	77	100%	0%
建築屋根	24	25	36%	20%	8%	16%	12%	8%	79	89%	11%
透明皮膜	12	24	17%	29%	8%	4%	33%	8%	28	50%	50%
ヨット	2	7	29%	29%	14%	0%	29%	0%	–	–	–

3．テンション・サブシステムに要求される性能項目

3-1)サブシステムへの要求性能項目の抽出

上述したテンション構造分野のうち、中小規模の建築屋根および透明皮膜を対象とし、適した構造システムの構築を試みる。

システムを構成するストリングおよび接合部を評価するにあたっては、上位レベルである構造サブシステムの要求性能を明確に定義する必要がある。テンション構造におけるサブシステムとしてはストリングと圧縮材が組み合わさってトラスを形成しているテンショントラスの他に、図3に示す様な放物線ストリングを組み合わせた構造要素が多く用いられる。後者は均等荷重を主体として受けるガ

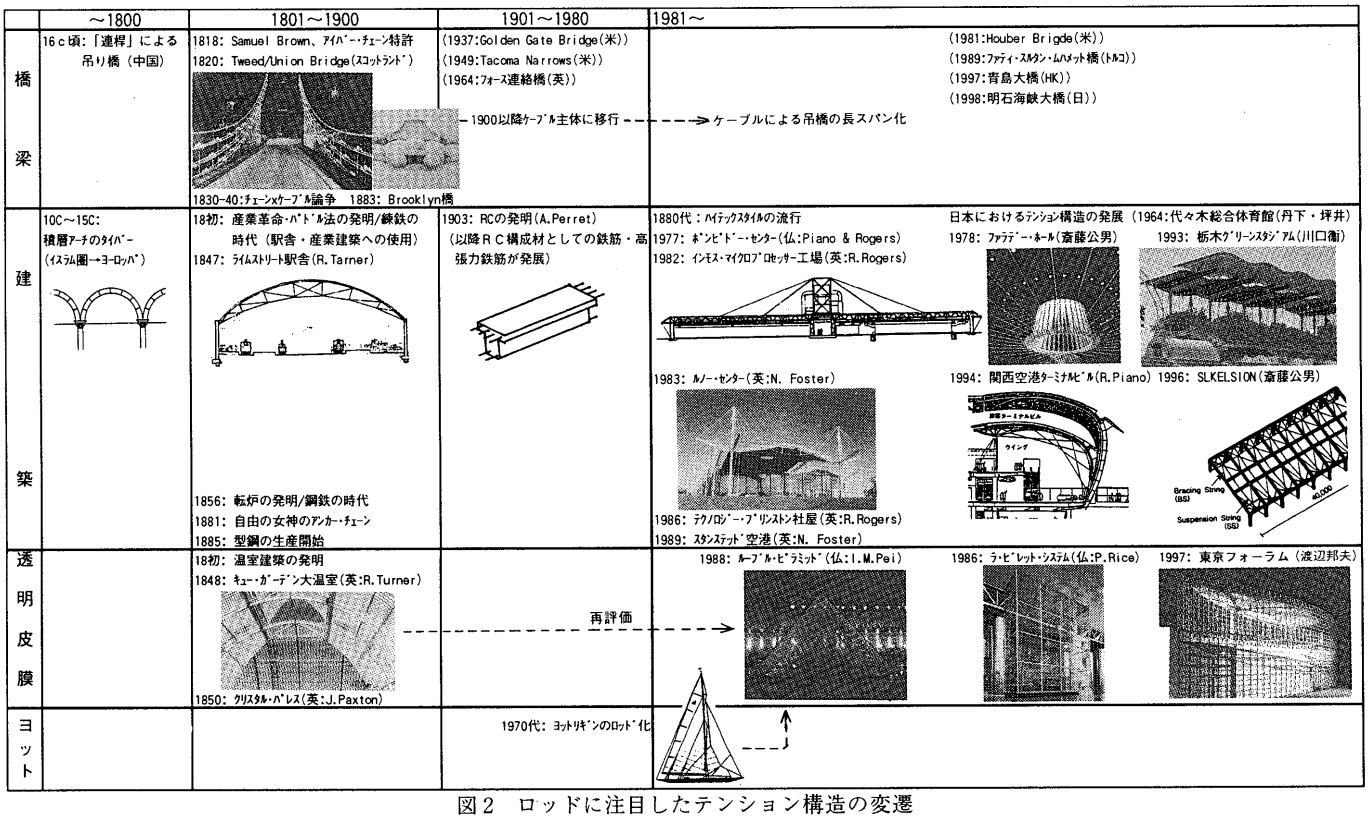


図2　ロッドに注目したテンション構造の変遷

NII-Electronic Library Service

ラスを支持する壁構造や、屋根構造などに多用され、張弦梁の一部もその一種としてとらえることができる。ここでは後者を放物線張弦要素と呼び、接合部の要求性能を抽出するためのサンプルとして使用する。構造システム全体に要求される性能を構造技術者協会の「構造規範」[40]より設定し、これを前項で抽出した項目を中心にテンション・サブシステムへの要求性能に分解すると、以下の様になる。

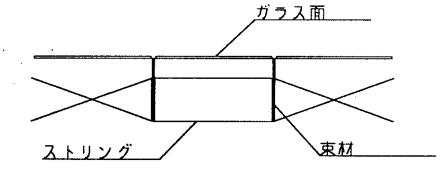
構造システムへの要求性能項目—サブシステムへの要求性能項目

a) 安全性・耐久性 — 強度、耐錆(維持管理)
b) 機能性・居住性 — 剛性
c) 経済性 — 製造コスト、組立施工性
d) 施工性 — 組立施工性
e) 創造性 — 意匠性、納まり適応性

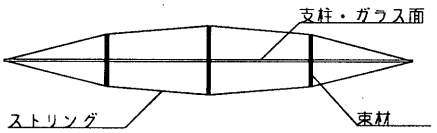
さらにこのサブシステムに対する要求性能から、部材レベルのストリングおよび接合部への要求性能への分解を、放物線張弦要素の力学的性状を参照しながら試みる。

3-2)ストリングへの要求性能項目の抽出

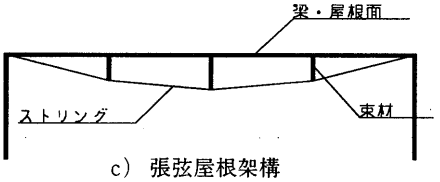
放物線張弦要素は、全面にわたる均等荷重を主体として形状設定されており、各節はトラスを形成していないため、非対称荷重に対しては、微少変形理論で考えると不安定構造といえる。しかしながら初期張力が存在し、幾何学的非線形性を考慮すれば非対称荷重に対しても剛性を有する。その非対称荷重に対する初期剛性は、単純に初期張力と放物線の形状比により決定されるため、このサブフレームの非対称荷重に対する剛性確保の為には初期張力の導入機能が不可欠となる。ここでは放物線張弦要素の構成ストリングには強度・剛性の確保のため初期張力が導入されているものとする。初期張力による軸方向の端部反力は図3 a)の例では外部構造により支持されており、b) c) の例では内部支柱または梁により受けられ、自己釣り合い系を形成している。また、a) b) の例は軸直交方向に対し初期張力を伴う放物線ストリング同士が釣り合っている一方、c) の例では片方の初期張力を伴う放物線ストリングが屋根自重と釣り合っている状態となっている。



a) ガラス支持機構



b) ガラス支持機構



c) 張弦屋根架構

図3 サブシステムとしての放物線張弦要素

2-4)で抽出した要求性能項目を参考に、以上のサブシステムへの要求性能項目から部品としてのストリングへの要求性能項目を導くと以下のようになる。

サブシステムへの要求性能項目—ストリングへの要求性能項目

a) 強度 — ストリング材強度
b) 耐錆(維持管理) — ストリング耐錆性
c) 剛性 — ストリング材剛性
d) 製造コスト — ストリング材コスト、対部品定着コスト
e) 組立施工性 — 定尺長さ、巻き取り性
f) 意匠性、納まり適応性 — ストリング意匠性(径)、塗装性

3-3)接合部への要求性能項目の抽出

放物線張弦要素に付加される初期張力導入機能は現実には接合部・定着部に依存する。また幾何学的非線形性が発現するまでの有意量の節点移動に伴いストリング端部に回転角が生じ、特に高張力ロッドを用いたサブシステムにおいて耐力低下を誘発する危険性が生じるため、幾何非線形性の強い構造に高張力ロッドを使用する場合には回転機能が接合部に要求される。

施工上各サブシステムは現場において部品レベルより組立および寸法調整を行うことを前提とすれば、各接合部は長さ調整機能を保持していることが望ましい。また、接合形式はできる限り標準化され、かつ多様なサブシステム形状に対応可能であることが製造コスト・意匠納まり上要求される。

以上の考察により抽出された、接合部への要求性能項目をに示すと以下の様になる。

サブシステムへの要求性能項目—接合部への要求性能項目

a) 強度 — 接合部強度・回転機能
b) 剛性 — 初期張力導入機能
c) 製造コスト — 接合部製造コスト・接合部数
d) 組立施工性 — 長さ調整機能・初期張力導入機能
e) 意匠性、納まり適応性 — 接合部サイズ・数、納まり適応性

以上構造レベルの要求項目からサブシステムレベル、部材レベルに至る要求性能項目の相関をまとめて図4に示す。

4. ロッドを用いたテンションジョイントの提案

3-2)、3-3)で設定した要求性能に対し部材レベルの設定・選定を行う。

4-1)ストリングの選択

現状日本において利用が可能なストリング用ロッドの緒元を表2にまとめる。また、これらのストリングを単位断面積に対する強度、剛性および接合部を含む製造コストの点からケーブルと比較したものを図5 a),b),c)にそれぞれ示す。a)を見ると、鋼棒はその強度が向上するにつれ、その製造可能最大径が減少し、引き抜きにより製造されるケーブル鋼索は一般的に径10mm以下となる。最大面積と強度の積より一本のストリングの耐力を評価した場合、一本の素線の強度向上は必ずしも耐力の増大につながらないが、ケーブルは高強度素線をまとめることによりその弱点を克服し、ストリングとしての耐力の点でもロッドに対し優位となっている。ただし、b)

NII-Electronic Library Service

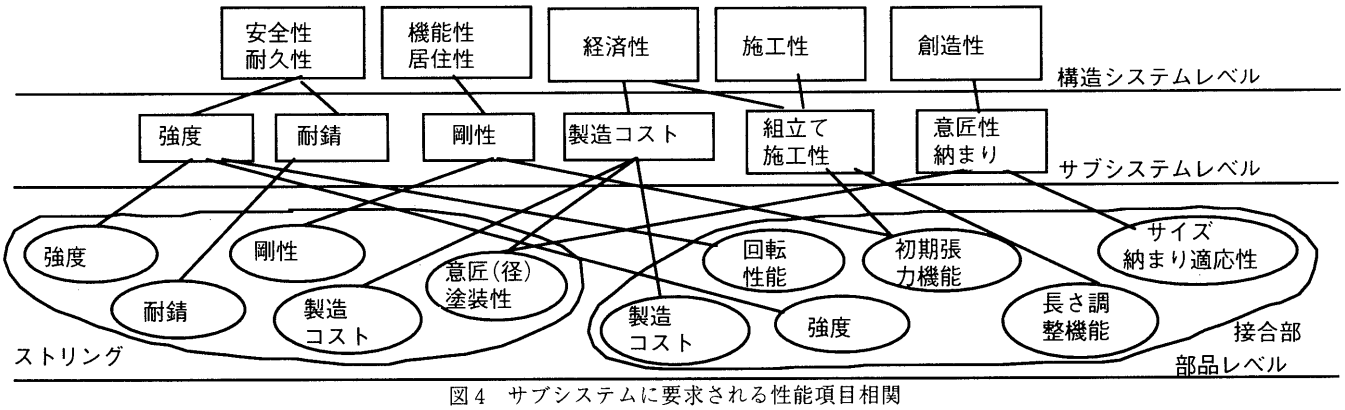


図4　サブシステムに要求される性能項目相関

を見ると、単位見付け断面積当たりの軸剛性は他の鋼棒素線が一定であるのに対し、素線を縒り合わせた空隙によりケーブルではその見かけ上の剛性はロッドに対しやや低くなる。また接合部を含む単位重量あたりの製造価格についてはケーブル・ロッド共に単位長さが短くなるほど高くなるが、相対的にケーブルが高くなる[注1)]。

以上の傾向を総合すると、強度においてケーブルはロッドに対し圧倒的に優位であり、剛性・製造コストの面では一般的にロッドがやや優位となるといえる。他の性能としては、ケーブルがストリング長さの制限を受けないのに対し、ロッドは12m程度の定尺長さ制限があり、また屈曲できないことによる接合部の増加を伴う点に留意する必要がある。

以上の考察と2-4)、3-2)で抽出した要求性能項目を比較すると、高張力ロッド（タイロッド又はＰＣ鋼棒）は中小規模（スパン30m程度以下）の建築および透明皮膜向けのストリングとして適しているといえる。

4-2)接合部形式案の設定

次に、3-3)で抽出した要求項目に対するロッド用接合部の候補として、図6に示すような7タイプのジョイント形式を設定する。タイプAはカプラータイプのジョイントで、定着材に溶接他の方法により接合された鋼管内にストリングを通し、反対側よりセンターホールジャッキ等で初期張力が容易に導入できる定着方法である。タイプBは定着材に雌ねじを切り、ねじ加工したロッドを直接ねじ込んで定着させる方法、タイプCはフレア溶接でロッドをガセットプレートに定着しボルト止めする方法である。タイプDはアップセット加工によりロッド端部に形成したアイエンドとガセットプレートを2枚のスプライスプレートおよびボルトで接合するもので、タイロッドで標準的に用いられている接合形式である。タイプEはソケットタイプの接合部で、立体トラスシステムのノード等とテンションロッドを接合する場合を想定し、ソケット内部の球座により、2°～3°の全方向回転性とともに、ソケットの回転による長さ調整機能を有している。また、外部加力により鋼棒端部をソケット内に引き込み、長さ調整機能を使用することにより、初期張力導入に対応可能な形式である。タイプFは埋め込みタイプの接合部形式であり、ノード内に回転機能を有する球座とこれを抑えるネジ付き蓋部をもち、この蓋部を回転させることにより長さ調整を行うことができ、かつソケットタイプと同じプロセスで初期張力導入が可能となる。タイプGはピンタイプの接合部で、一方向のみに大きな回転性能を持つ。長さ調整機能の為にカプラーを加え、内部ナットまたはルーズホールのピン穴を付加することにより、外部引きこみによる初期張力導入を可能とすることができる。

表2　ストリング用ロッド性能概要

鋼棒	機械的性質			製造可能最大径 (mm)
	降伏点耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	
普通鋼棒・鉄筋(日)	≧325	≧490	≧21	200
ﾃﾝｼｮﾝﾛｯﾄﾞ (英)	≧460	≧610	≧19	95
タイロッド (日)	≧540	≧740	≧20	100
ＰＣ鋼棒 (日)*1	≧1080	≧1230	≧5	40
高張力ｽﾃﾝﾚｽ(米)	≧1000	≧1240	≧8	60

*1:C種１号

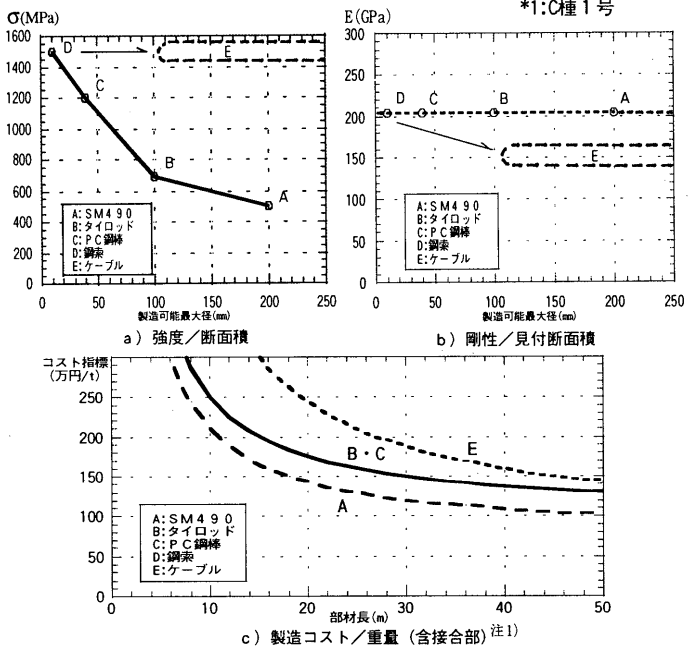


図5　ストリングの性能比較

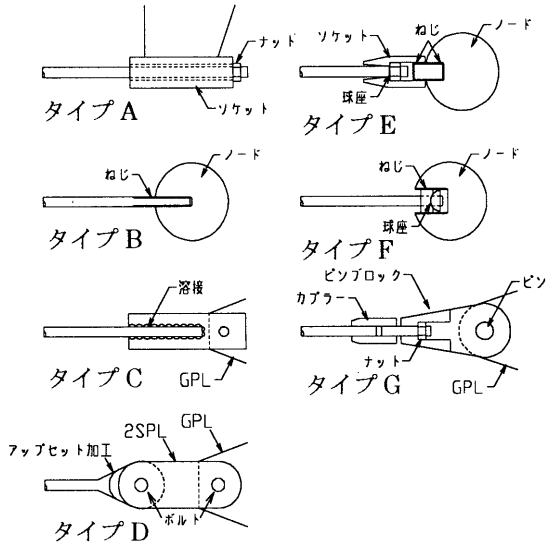


図6　ロッド用接合部形式案

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

4-3)初期張力導入方法の分類

これらのジョイントを適用した場合の放物線張弦要素への初期張力の導入方法としては図7に示す様な方法が挙げられる。

＜サブシステムへの張力導入方法＞

a) カプラーの締め込みによる軸力導入

b) センターホールジャッキによる背後からの引き抜き

c) 境界点移動によるサブシステム全体への張力導入

d-1) 中央節間引き込みおよびたわみ消去による張力導入

d-2) 端部節間引き込みおよびたわみ消去による張力導入

上記のうち、a)はカプラーを人力または油圧により回転させ張力導入するもので、定量的な張力管理が難しく、また導入可能張力に限界がある。b) c)の方法はRC構造へのプレストレス導入などで多用されている方法であり、安定した張力管理が可能である一方、定着部を含む接合部全体の寸法が増大し、多方向からテンション材が一点に集中する構造については適用が困難である。

d-1)、d-2)は張弦要素の一節に油圧ジャッキ等の外力により負の強制変位を与えて周囲のストリングに初期張力を導入し、同節の各接合部に弛緩したテンションロッドを引き込んで長さ調節機構を固定した後に解放することにより、同構造要素全体に同時に張力を導入する方法であり、この場合、導入張力は油圧、変位または構造要素の面外剛性等で管理することができ、また多方向からテンション材が一点に集中する構造についても適用が容易である。

以上の初期張力導入方式を先述した接合部の方式と対応させると、以下のようになる。すなわち接合部タイプB，CおよびDはa)，c)の初期張力方法のみ適用が可能であり、接合部タイプAはb)の方法がこれに付加される。さらに、接合部タイプE，F，Gはa)、c)に加えd-1)、d-2)の方法が適用可能となる。

4-4)接合部形式案の評価

4-2)、4-3)の考察をふまえ、提案したロッド用各接合部の性能評価を3-3)で定義した評価項目につき試みた。評価はテンション構

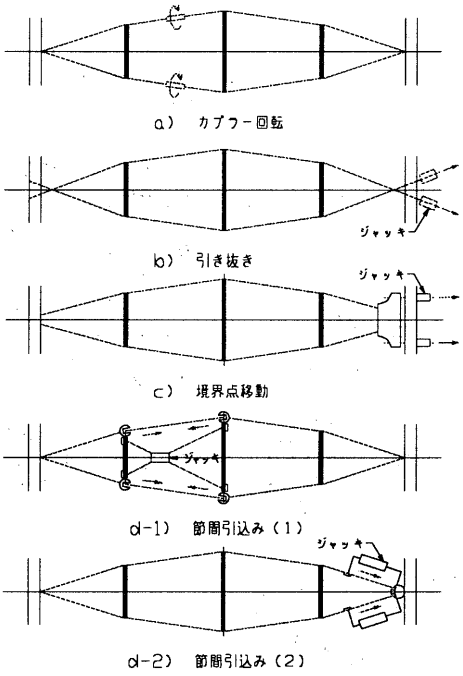


図7 初期張力導入方法

表3 ロッド用接合部の性能評価

タイプ	評価	強度	回転	初期張力	長さ調整	製造コスト	納まり
A	G	⑤		⑤	⑤		①
	R		②			⑤	④
	D		③				
B	G	⑤				④	⑤
	R			①	①	①	
	D		⑤	④	④		
C	G		④			⑤	⑤
	R	③		①	①		
	D	②	①	④	④		
D	G	⑤	⑤				⑤
	R			①	①	⑤	
	D			④	④		
E	G	⑤	④	⑤	⑤		⑤
	R		①			④	
	D					①	
F	G	⑤	⑤	⑤	⑤		⑤
	R					③	
	D					②	
G	G	⑤	⑤	④	④		④
	R			①	①	④	①
	D					①	

G: 良い(Good) R: 普通(Reasonable) D: 良くない(Disadvantageous)、 ○内は評価人数

造を含む20年以上の構造設計実務経験を有し、10名以上の構造設計者を擁する個別組織（構造事務所3、構造設計部1、研究所1）の主宰者5名を選択し、当方より示した性能評価項目に対する各接合部の評価をヒアリング形式で得た。少数のサンプル数であるが得られた評価のばらつきは少なかったため、これを有為な評価として表3に示す。強度に関しては接合部形式タイプCは2次曲げが有りフレア溶接を介しているため評価が低くなっており、回転機能についてはA，Bの評価が低い。また、初期張力導入機能および長さ調整機能の評価は先述の初期張力方式の対応性を反映したものとなり、タイプA，E，F，Gに対し高い評点となった一方，コスト評価の点でB，Cに高い評価となった。納まり適応性は多方向からのテンション材の集中に対する適応性を満足できないタイプAにやや低い評点が与えられている。また、ヒアリング過程で指摘された他の要求性能項目としては、維持管理、がたつきの無いことが挙げられた。

各項目の比重については強度が一義的という点で一致し、その他の項目については個別の設計毎に変化するという回答が支配的であった。また、提案した接合部形式の内、接合形式E、F、Gがテンションロッド用接合部として平均的に高い性能評価を得ていることが解った。

5．実建物への適用における検証

前項で抽出したストリングとしての高張力ロッドと、その接合形式E、F、Gの組み合わせをテンション構造を構成する構造システムと定義し、数件の実建物に適用を試みた。以下に各事例におけるサブシステムの形式の検証および設計上の要求性能とこれに対する接合部システムの保有性能との比較を行うことにより3、4節において定義された構造システムの有効性について評価を行う。

5-1)事例1（写真1）

鉄骨構造オフィスビルのアトリウムに設けられたガラス屋根支持構造である。スパン25 m×奥行25 mの屋根をPC鋼棒φ32をストリングとした張弦梁（サブシステム図3-c)）で支持している。上弦材にH断面、束材に鋼管システムトラス材を使用。ストリング接合部形式はタイプE（ソケット型）を使用した。プレストレスは屋根自重により各ストリング100 tが導入された状態となっている。

NII-Electronic Library Service

5-2)事例2 （写真2）[41)-43)]

オフィスビルに付随した総面積3,600m²のガラス壁支持構造である。ユニットスパン6.4mの放物線張弦要素が構造柱間に水平方向に適用され、間隔2.3m毎に壁面の風圧に抵抗している（サブシステム図3-a)）。ストリングにＰＣ鋼棒φ13を使用。使用接合形式はタイプF（埋め込み型）を使用し、張力導入方式d-1（節間引き込み）により30kNのプレストレスを導入した。各サブシステムの張力管理は油圧により行い、面外剛性により確認した。

5-3)事例3 （写真3）[44)]

博物館に付随したガラス壁支持構造。ユニットスパン12.0m、間隔2.4m（サブシステム図3-b)）の放物線張弦要素が屋根—床間に鉛直に使用され、壁面を面外方向に支持している。ストリングにステンレスワイヤφ19を使用し、接合部タイプはG（ピン型）とした。プレストレスは各ストリング64kNであり、方式d-2（端部節間引き込み）により張力導入を行った。張力管理は油圧に拠る。

5-4)事例4 （写真4）

階段ホールを取り囲むガラス壁の支持構造。放物線張弦要素が階段の側板間に鉛直方向に適用され、ユニットスパン平均6.0m、間隔2.0m（サブシステム図3-a)）の放物線張弦要素により壁を支持。ストリングにＰＣ鋼棒φ13を使用し、接合部タイプはG（ピン型）とした。プレストレスは25kN、張力導入方式はa（カプラー回転）を使用し、張力管理は局部曲げ変位測定に拠る。

5-5)事例5 （図8）

体育館の屋根を支持する張弦梁構造（サブシステム図3-c)）であり、スパン62.2m×奥行68.75mおよびスパン39.6m×奥行31.2m の規模の屋根を支持している。ストリングにタイロッドφ52を使用。接合部タイプG（ピン型）を使用し、張力導入方式d-1（節間引き込み）によりプレストレス150～350kNを導入した。張力管

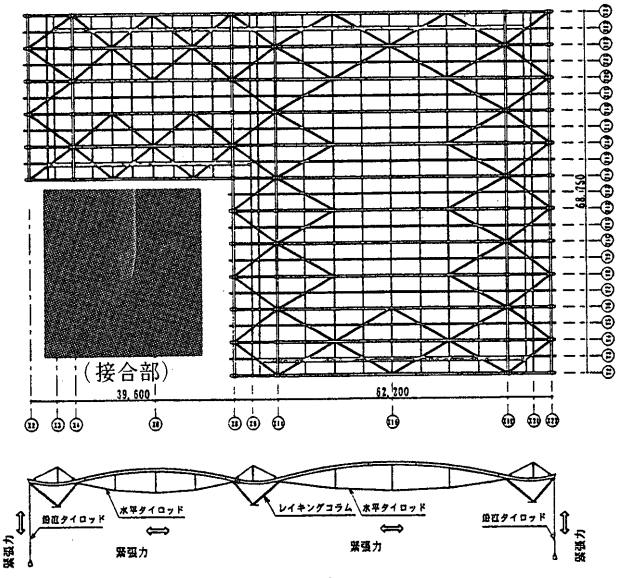


図8：事例5

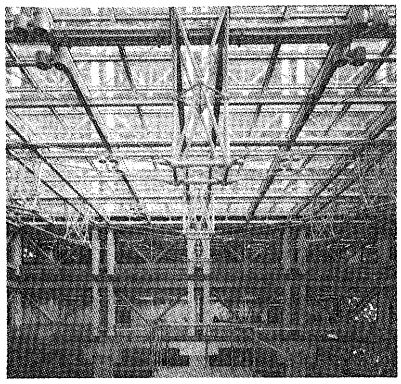
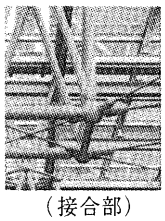


写真1：事例1



（接合部）

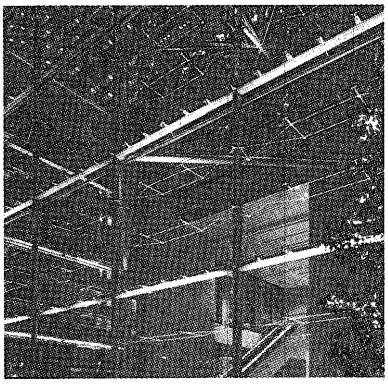
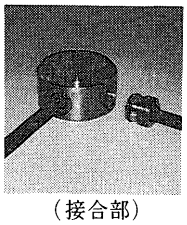


写真2：事例2



（接合部）

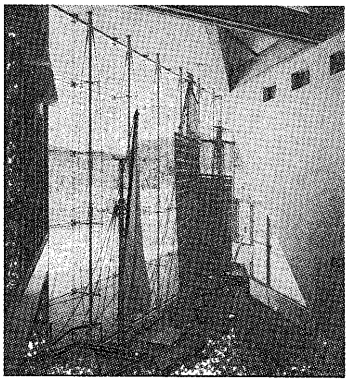
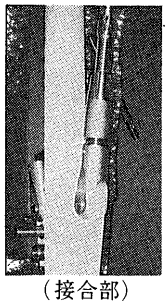


写真3：事例3



（接合部）

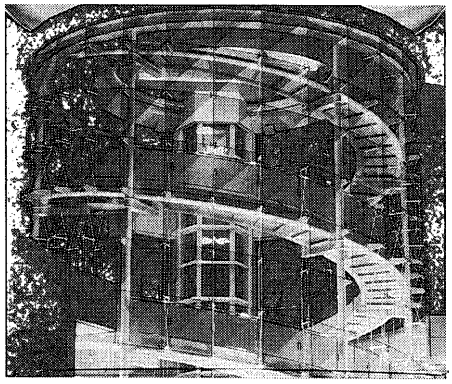
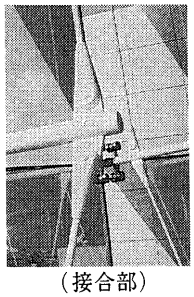


写真4：事例4



（接合部）

表4 適用事例における接合部の性能評価

事例	概要			設計要求値							接合部性能							性能評価					
	竣工年	適用箇所	接合部タイプ	基準材長	設大軸力(kN)	変動軸力(kN)	回転刃(rad)	長さ調整(mm)	ストリング径(mm)	許容応力(Pa)	保有強度(kN)	回転能力(rad)	導入張力(kN)	長さ調整(mm)	接合部長(mm)	接合部幅(mm)	コスト等価長(m)	1 強度	2 回転機能	3 初期張力	4 長さ調整	5 製造コスト	6 納り適応
1	1992	屋根	E	5.25	223	74	0.01	10	32	630	883	0.05	100	10	240	90	30	3.96	5.23	1.35	1.00	0.18	0.36
2	1992	ｶﾞﾗｽ壁	F	2.33	50	20	0.04	3	13	660	186	0.05	30	3	45	45	30	3.72	1.25	1.50	1.00	0.08	0.29
3	1993	ｶﾞﾗｽ壁	G	2.40	120	57	0.03	10	19	660	425	0.05	64	15	160	76	27	3.54	1.67	1.12	1.50	0.09	0.25
4	1996	ｶﾞﾗｽ壁	G	2.00	43	18	0.03	5	13	660	182	0.05	25	10	115	50	30	4.23	1.67	1.39	2.00	0.07	0.26
5	1996	屋根	G	10.9	421	98	0.02	20	52	440	1585	0.05	196	30	280	140	30	3.76	2.50	2.00	1.50	0.36	0.37

性能評価方法
1：強度：接合部保有強度／設計最大軸力
2：回転機能：接合部回転能力／設計回転刃
3：初期張力機能：導入可能張力／設計変動軸力
4：長さ調整能：接合部調整能／設計施工要求値
5：製造コスト：基準材長／コスト等価長
6：納まり適応性：ストリング径／接合部幅

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

理は油圧に拠る。

以上の実例はいずれもサブシステムとして3-1)で定義した放物線張弦要素を使用しており、この要素はサブシステムとしての一般性を有しているものと思われる。それぞれの実例に対し、3-3)で定義した接合部への要求性能項目の評価を，各設計・施工図書より抽出した設計要求性能と実験・試作で得た接合部保有性能との比較により行った結果を表４に示す。各性能項目の評価方法に付いては、同表に付記した定義を使用した。

これらの定義による評価値は、項目１に対し3.5～4.2、項目２に対し1.2～5.2、以下項目３～６に対しそれぞれ1.1～2.0、1.0～2.0、0.07～0.36、0.25～0.36の間に分布している。5例の実例から言えることではあるが、これらの値は同種の接合部を評価する場合においての一つの参考値となるのではないかと考えている。

6．結論

テンション構造を建築生産上の構造システムの一つとしてとらえ，構成要素をヒエラルキー上に分解した上でサブシステムとしての放物線張弦要素に注目した。このサブシステムへの要求性能項目より各部材要素における要求性能項目を歴史的事例を参照しながら抽出し，高張力ロッドに適した接合部の提案を行った上で、実プロジェクトへの適用と考察を行った。以上より以下の点が明らかになった。

1） 1970年以降の事例およびストリングへの要求性能を分析した結果、ロッドの優位性は建築屋根のうち中小規模のものおよび透明皮膜の支持構造において主に見られる。

2） サブシステムとしての放物線張弦要素は、建築屋根および透明皮膜の支持構造として、一般性を有している。高張力ロッドによる放物線張弦要素の適用については要素のスパンにおいて６m～60mの実施例5例において適用が可能であった。

3） ストリングに高張力ロッドを用いた場合，放物線張弦要素への要求性能を満足するための接合部への要求性能項目が示された。サブシステムを構成すべく設定された７タイプの接合部形式の内、抽出されたＥ～Ｇの３タイプの接合部は、設計および施工上汎用的に要求される性能項目を一通り満足することが実施例への適用により確認され、定義された評価式による各項目の評価値はある変動幅内に納まっていることが示された。

3） 建築構造の生産システムを構築するに当たり、構造システムをヒエラルキーにおいて定義し、その要求性能を抽出する手法は、上位レベルの設計と整合性のとれたオープン部材としてのストリングの選択、新たな部材を含む接合部形式の抽出・選択を含むテンションシステムの構築において有効であると思われる。

謝辞

ストリングの歴史およびその性能評価につきご指導を戴きました日本大学教授・斎藤公男博士に深く感謝致します。また、本文中の適用事例の内、事例1,2の建築設計は(株)日建設計、事例3,5は古市徹雄・都市建築研究所およびアラップ・ジャパン、事例4は(株)梓設計によるものです。接合部の性能評価に関しましては、東京理科大学教授・寺本隆幸博士、アラップ・ジャパン・彦根茂氏、梓設計・今井一郎氏にご意見，ご指導を戴きました。またシステム構築の過程において御協力を戴いた高周波熱錬(株)倉重正義、新日本製鐵(株) 原田昭穂，林賢一の各氏に感謝致します。

注1) 1997年10月時点での日本における見積価格(各2社)より以下の式に回帰させた。変動幅は4割程度と思われる。
コストP = A (1 + B/L + C)、
但し A:ストリング単価、L:ストリング長、B:接合部等価ストリング長
C:カプラー等価ストリング長/製造可能長

参考文献

1) 日本建築学会：ケーブル構造設計指針，1994
2) Kurt Axkermann: Building for Industry, Watermark 1991
3) 川口衛：ブルーネルについて、カラム、No.65，1976
4) James S.Russel, John H. Sullivan, III: The Grand Louvre - Rigging, Architectural Record,1988.5
5) 大野隆司：透明被膜の建築技術、日本建築学会建築年報1993
6) 鋼材倶楽部：鉄骨による透明建築の魅力，1994
7) 日本鋼構造協会：吊構造，1975
8) 岩田衛、米田雅子、和田章：鉄骨構造の供給システムに関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.495，1997.5
9) M.Saitoh: Principle of Beam String Structure, World Congress on Shell and Spacial Structure, 20th Anniversary of IASS(Madrid), 1979.9
10) 斎藤公男：張弦梁構造の原理と応用、カラム、No.75，1980
11) 斎藤公男、岡田章：ケーブル構造の計画、建築技術1997.1
12) 成瀬昭男：吊橋史拾遺、カラム、No.107，1988
13) 坪井義昭：ケーブル構造の歴史，建築技術1997.1
14) 本州四国連絡橋公団：The Long-Span Bridges of the World, 1983
15) Derek Sugden: Ein Ruckblick uber Transparentes Bauen in Grosbritannien, Stahl-Informations-Zentrum: Transparents Bauen mit Stahl, 1990
16) 大内俊司：小形棒鋼概論，毎日新聞社，1976
17) 斎藤公男：吊り構造の形と力、カラム、No.18，1966
18) 川口衛：サスペンション構造における諸問題，カラム，No.18，1966
19) 斎藤公男，小堀徹、佐竹克也、今川憲英、黒木二三男、岡田章他：スペース・ストラクチャーのデザイン、カラム、No.83,1982
20) William C. Knudson: Recent advances in the Field of Long Span Tension Structures, Eng.Struct.,1991, Vol.13, April
21) William Addis: Design Revolutions in the History of Tension Structures, Struct. Engineering Review, Vol. 6, 1994
22) Chris Abel: Renault Centre, Architecture in Detail,Architecture Design and Technology Press, 1982
23) Mark Whitby: Stanstead - Keeping it up, The Architectural Review, 1991.5
24) 原田昭穂：海外のケーブル事情、建築技術1997.01
25) 斎藤公男、岡田章：ストリング式骨組み架構の構造特性（その1,2)、大会学術講演梗概集1993（関東）
26) 日本構造技術者協会：作品集／素材感，structure,No.53,1995.1
27) 渡辺邦夫他：屋根の架構マニュアル，建築技術，No.558,1995.1
28) 佐々木宏：鉄とガラスの建築（その1，2)、カラム、No.71-72,1979
29) R.Saxson: Atrium Building - Development and Design, Architectural Press, 1986
30) Thornton & Tomasetti: Exposed Structure in Building Design, Mcgrowhill, 1993
31) Mick Eekhout: Product Dvelopment in Glass Structures, Uitgeverij 010 Publishers, 1990
32) M.Wigginton: Glass in Architecture, Phaidon, 1996
33) 日本板硝子：Glass Architecture in Europe, Space Modulator, 1991.3
34) Dan Spurr: Is Rod Rigging Here to Stay -The Story of Nabtec and its quest for a better mouse trap, Cruising World, 1982.5
注2)(ヨットのロッドリギンの接合部性能を論じたものとして) Tripyramid Structures inc.: NAVTEC Fatigue Test Report", 1989
35) P.Rice, H.Dutton: Le Verre Structurel, Le Moniteur, 1990
36) 斎藤公男：透明なデザインと建築技術，建築技術，No.550,1996.1
37) 渡辺邦夫：東京国際フォーラムガラス棟の設計，鉄構技術，1994.12
38) 竹内徹：ガラス壁面を支えるテンション構造、structure,No.52,1994
39) Alan J. Brookes and Chris Grech: Connections, Butterworth-Heinemann, 1992
40) 日本構造技術者協会：構造設計規範、1991
41) T.Takeuchi, H.Kitamura, K.Higuchi, M.Iwata: A Basic Study on the Tensile Rod Supported Glazing, SEIKEN-IASS Symposium Procedure, 1993 (Tokyo)
42) T.Takeuchi, H.Kitamura, K.Harada, K.Higuchi, A.Harada, M.Iwata: A Practical Design and Construction of Tension Rod Supported Glazing, ASCE-IASS Int.Symposium Procedure, 1994 (Atlanta)
43) 寺本隆幸、北村春幸，原田公明、竹内徹：ＤＰＧ構法を用いたガラスキューブの設計と施工、日本建築学会技術報告集，No.3，1996
44) 松岡祐一、竹内徹、林賢一：クローズド・システムによるガラス支持テンション架構の実施例、大会学術講演梗概集1994（東海）

（1998年２月９日原稿受理，1998年10月15日採用決定）

NII-Electronic Library Service