

引張接合を用いた吊橋主塔の力学特性に関する研究

MECHANICAL PROPERTIES OF LONG TENSION-TYPE BOLTED CONNECTION FOR TOWERS OF A SUSPENSION BRIDGE

大橋治一^{*1}, 谷中幸和^{*2}, 水川洋介^{*3}, 梅田聡^{*3}
 H. OHASHI, Y. YANAKA, Y. MIZUKAWA and A. UMEDA

*1 本州四国連絡橋公団設計部 (〒105東京都港区虎ノ門5-1-5)

*2 本州四国連絡橋公団今治工事事務所 (〒794愛媛県今治市天保山町2-5-1)

*3 川崎重工業株式会社 (〒675-01兵庫県加古郡播磨町新島8番地)

The applicability of a long tension-type bolted connection for towers of a suspension bridge was studied both by numerical analyses and by an experiment. This connection has advantages in workability, safety, construction time saving, ease of maintenance, and aesthetics. The study was conducted by the following procedure: First, structural details such as height of rib, bolts alignment, and connection of bearing plates to skin plate were optimized. Elastic behavior under compressive and tensile loads was analysed. The ultimate strength of the towers with the tension-type connection was also analysed. Finally, a full-scale model was manufactured, tested and compared with numerical analyses.

Key words: tension-type bolt, suspension bridge, full-scale experiment, ultimate strength

1. まえがき

我が国の長大吊橋における主塔の現場継手には、従来からメタルタッチ併用の摩擦接合継手が多く用いられている。この継手は、「主塔に要求される1/10,000の高い鉛直精度を確保するために、その部材端面は高精度の機械切削が行われ、接合部には高い密着度が得られる」ことを想定し、これを製作基準¹⁾で保証するとともに、設計においては圧縮力に対して母材のメタルタッチによる直接伝達を期待している。この設計法によれば、摩擦接合継手に比べて添接板板厚やボルト本数が減少し、合理的な設計が可能となる。

しかし、近年、架設作業の省力化と工程短縮、維持管理の省力化および景観への一層の配慮が望まれるなかで、外面に添接板を設けない継手構造が求められている。引張接合による継手は、主塔内面で引張接合用高力ボルト(以下、引張ボルトと呼ぶ)を用いて連結する構造であり、現場での添接作業が塔内面のみで可能となること、添接部の塗装作業がほぼ無くなること、そして塗膜損傷の原因となるボルト等が少なくなることから、これらの目的に合致した一構造であると考えられる。このような継手は、フォース橋、セバーン橋、第二ボスボラス橋等の主塔に採用されているが、風・地震の設計条件の厳しい日本では導入プレストレス力が大きくなり設計上の困

難が予想される。また、引張力作用時における離反に対する許容範囲や部材断面が厚板主体の構成としている等、設計思想上も違いがみられる。

我が国では引張接合はラーメン橋脚に使用された事例が数例²⁾あるものの、本格的に橋梁に使用されるまでに至っていない。近年、橋梁の架設工事における接合部構造の合理化の観点から引張接合が検討され、その成果が「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)」³⁾として整備されている。また、西脇ら^{4, 5)}は、引張接合の力学的挙動を把握するため、接合部の各構造要素のパラメトリック解析および部分的な実験を行い、これらの要素とボルト付加軸力、接合面での応力分布、離反等との関係に関する基礎的な研究を行っている。しかし、これらは主としてボルトを対称に配置した構造に対するものであり、主塔のようにボルトを塔壁に対して片側にのみ配置する場合には偏心曲げの影響や塔壁の板曲げが生じるため、適用に当たっては別途の検討を行う必要がある。

そこで、中央支間長600mの吊橋主塔の水平継手を対象に、ボルトは片面の配置とし、設計上離反は許容しないものと仮定して、以下の検討を行った。第一に、継手部の合理的な細部構造の選定に関する基礎的な検討を行った。第二に、弾性有限要素解析により圧縮・引張荷重作用時の継手の変形・応力挙動を把握した。第三に、終

局荷重作用時の降伏領域と離反の進展状況を弾塑性有限変位解析により追跡した。第四に、実物大の供試体を製作し、プレストレス導入時の継手の変形・応力挙動を計測し、解析結果との比較を行った。最後に、この引張接合を引張力の更に大きな長大吊橋の主塔に適用する場合の課題を考察した。

2. 引張接合の適用上の課題

吊橋の主塔は、その完成時には死荷重によるケーブル反力によって塔柱断面に圧縮力が卓越するため、活荷重や風荷重の載荷により曲げモーメントが作用しても、継手断面に引張力が生じることは少ない。しかし、主塔架設時およびケーブル架設時のセットバック時には、風荷重により継手断面に引張力が作用する。

また、一方、主塔には座屈に対する設計から、鉛直度の精度として、どの高さにおいても製作時1/10,000、架設後1/5,000の高い精度が要求されている。主塔の設計ではこれを塔頂変位に換算した誤差として考慮し、他の荷重ともあわせ有限変位理論により断面力を算出している。

主塔の有するこのような特性や要求に対して、その現場継手に引張接合を用いる場合の設計上の課題を考察すると、以下ようになる。

- ①引張力に抵抗する合理的な構造の決定
(最小プレストレスで離反抵抗力の高い構造)
- ②偏心曲げによる付加応力が小さいこと
- ③圧縮力に対する接合面での力の伝達性が良いこと
- ④プレストレスによる母材補強が少ないこと
- ⑤変形特性、耐荷力特性が問題とならないこと
- ⑥鉛直精度に悪影響が生じないこと

なお、引張接合としては短締め方式と長締め方式があるが、主塔の継手断面に作用する引張力が大きく短締め方式による設計は困難であること等から、本検討では長締め方式に限った。また、接合面での離反に対しては、架設時に風による振動等の発生が予測されるが、これによるボルトの繰返し応力範囲を小さくすることが好ましいこと、および継手面の防錆からも接合面が密着していることが望ましいことから、離反が起きないように設計することを基本とした。

3. 引張接合の細部構造

引張接合を実構造物に適用する際には、実構造物に対応した細部構造についての検討を要すると考えられる。例えば、吊橋塔柱の引張継手構造では補強リブと縦リブが混在する構造であること、プレスト

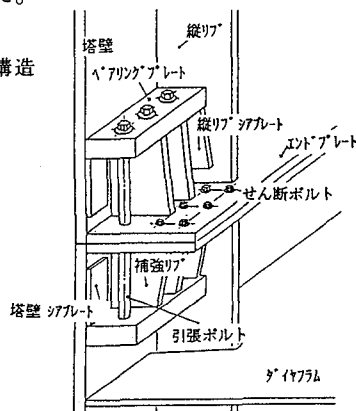


図-1 基本構造

レスは複数の引張ボルトによって与えられ分布が複雑であることなどが考えられる。そこで、この章では、図-1に示すような実構造を考慮した基本構造の特性について述べる。

3. 1 継手構造に要求される特性

引張継手の基礎的な検討を行った結果、以下に述べるような構造特性を有することが必要である。

(1) プレストレスの均等化

接合面近傍の塔壁やリブに対しプレストレスを均等に分布させることは、部分的な許容応力の超過や接触面の局所的な離反を防止する上で有効である。

(2) 外力に対する補強リブの有効化

塔壁や縦リブに作用している外力の一部を補強リブに分担させ、塔壁や縦リブの応力を低減することは、経済的な継手断面を構成する上で有効である。

(3) 偏心曲げの低減

ボルト位置が被締付け部の断面中立軸に対して偏心しているため、被締付け部には図-2に示す偏心曲げモーメントが作用する。この偏心曲げモーメントは、塔壁には引張応力を発生させプレストレスの損失を招き、縦リブや補強リブの先端には圧縮応力を発生させ部材断面の増加の要因となる。従って、偏心曲げモーメントを最小にすることが合理的な継手断面を決定する上で重要である。

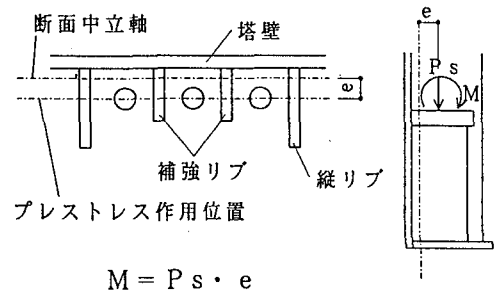


図-2 プレストレスによる偏心曲げモーメント

(4) 板曲げの低減

引張継手構造は塔内面にのみ設けられるため、プレストレスを導入した場合に塔壁に板曲げによる応力が発生する。この板曲げ応力は、接合部断面を構成するにあたって様々な弊害を生じさせるので、引張接合を実構造物に採用する際には、この応力の低減が大きな課題である。

(5) ボルト付加軸力の低減

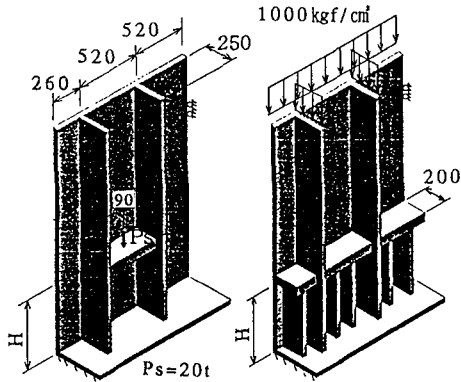
長締め方式の引張接合は、てこ作用を生じないのでボルトの付加軸力を小さく抑えられるという特徴がある。ボルトの付加軸力は、ボルトの伸び剛性、母材の圧縮剛性、ベアリングプレートの曲げ剛性が相互に関係して与えられる⁴⁾ことから、継手の断面を構成する際には、前述の特徴を損なわないよう留意しなければならない。

3. 2 細部構造の決定

3. 1 で述べた要求特性を満たす継手構造とするため細部構造に対する検討を行った。それらの検討方法および検討結果について以下に述べる。

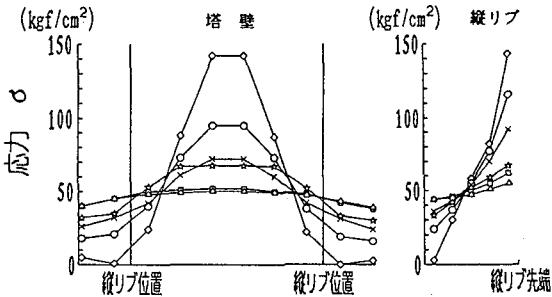
(1) 補強リブ構造とリブ高

プレストレスの均等化や外力に対する補強リブの有効化に対しては、継手部の構造高すなわち補強リブ高が大きく影響する。この補強リブ高が低い場合には、プレストレスの分布が著しく不均等になり、また補強リブも外力による応力をほとんど分担しないことが予想される。

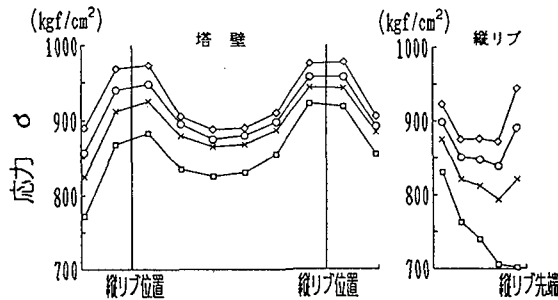


プレストレス用モデル 外力用モデル

図-3 解析モデル



(a) プレストレス



(b) 外力

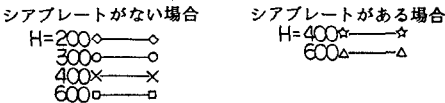


図-4 接合面近傍の応力分布

しかし、一方では、補強リブ高をあまり高くすると経済性・施工性の面で問題となる。このようなことから、適切な構造高を決定することが必要である。そこで、有限要素解析により、補強リブ高を変化させた場合のプレストレス及び外力による応力の分布状況を調べた。そのときの解析モデルを図-3に示し、プレストレスおよび外力による接合面近傍の応力分布をそれぞれ図-4(a)、(b)に示す。プレストレスの分布には、後の項で述べるシアプレートを採用した場合についても同時に示した。以下に結果について考察する。

a) プレストレス分布

この解析では、プレストレスの塔壁と縦リブに対する分布状況のみに着目したため、縦リブを補強リブとみなし、補強リブを設けずに解析を行った。その結果、図-4(a)から明らかなように、補強リブ幅(=縦リブ幅250mm)の2倍以上の高さが確保できれば接合面ではプレストレスはほぼ均等な状態になるといえる。

また、シアプレートを設けることはプレストレスの均等化に対しても有効であることが明らかになった。ただし、補強リブ幅の2倍を越える構造高を確保した場合(例えば図のH=600mmの場合)には、シアプレートの効果は顕著には現れない。

b) 外力に対する補強リブの有効性

補強リブ高が低い場合には、外力による塔壁や縦リブの応力の減少はほとんど見られない。補強リブ幅(200mm)の3倍の高さを確保すると、縦リブ間の中央部付近に応力の低減が見られるが、縦リブ近傍での低減量は中央部付近に比べ少ない。しかし、補強リブ高が大きくなるにしたがって、塔壁及び縦リブの応力は低減されており、補強リブを経由して応力伝達がスムーズに行われていることがわかる。

(2) ボルト配置

偏心曲げを低減するためには、ボルトを被締付け部の断面中立軸に配置することが有効である。しかし、被締付け部の断面中立軸は塔壁近傍にあることが多いため、ボルトの締付け機の制約上ボルトを断面中立軸位置に配置できない場合が多い。従って、偏心曲げの低減のためには、ボルトの細径化およびボルトを塔壁に近づけて締付け可能な機械を使用し施工することが効果的である。

また、プレストレスの均等化に対しては、ボルト間隔は補強リブ高と同様に重要な役割を果たすため、慎重な配慮を要する。

(3) シアプレートの効果

図-5に示すシアプレートは、ベアリングプレートからの力をせん断力として塔壁に伝達し、塔壁の板曲げを低減する。このシアプレートの効果を調べるために弾性有限要素解析を行った。図-6は、シアプレートを設けた場合と設けない場合での塔壁に発生する曲げ応力の分布の違いを示したものである。図より明らかなように、シアプレートを設けた場合に塔壁に発生する最大曲げ応

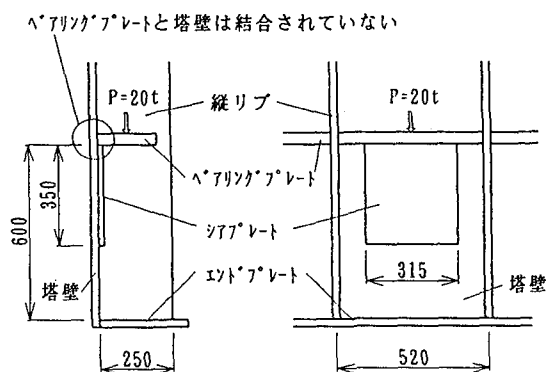


図-5 シアプレート検討モデル

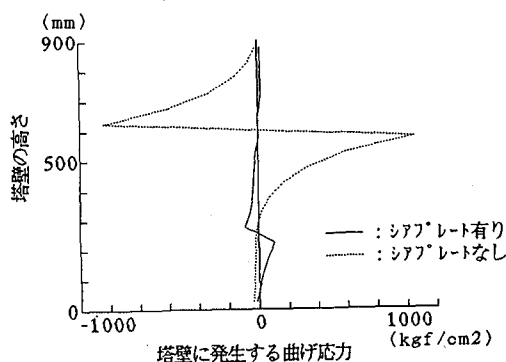


图-6 板曲げ応力分布

力は、シアプレート設けない場合に発生する最大曲げ応力の1/10程度となり、断面を構成する上で問題のない値まで板曲げ応力を低減できることがわかった。

またシアプレートは、多大な溶接量を必要とするベアリングプレートと塔壁の溶接をなくし、溶接熱による塔壁の変形を防止する上でも効果がある。

4. 引張接合の変形・応力挙動

引張接合を実構造物に適用するには、継手の部分的な特徴を把握するだけでなく、継手全体の特性、さらには、主塔全体に与える影響等を把握することが重要である。

これらの観点から、この章では、継手全体の変形及び応力挙動、主塔全体の耐荷力に着目して検討した。

4. 1 接合部の変形・応力解析

継手全体の変形及び応力挙動を把握するため、弾性有限要素解析を実施した。

(1) 解析のモデル化

解析モデルは、継手全体の1/4モデルとし、引張ボルトが疎に配置されている継手（モデルA）とボルトが密に配置されている継手（モデルB）の2種類の継手をモデル化した。これらの継手モデルは、中央支間長600mの実橋における塔柱の上部と下部に採用されたものと同じ配置とした。また、引張荷重を載荷する解析ケースでは、接合面の離反性状についても検討する必要があるため、上側ブロックと下側ブロックの連結にギャップ要素（圧

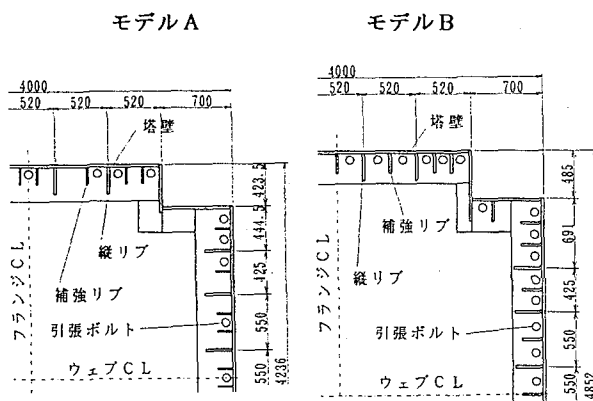


図-7 ボルト配置

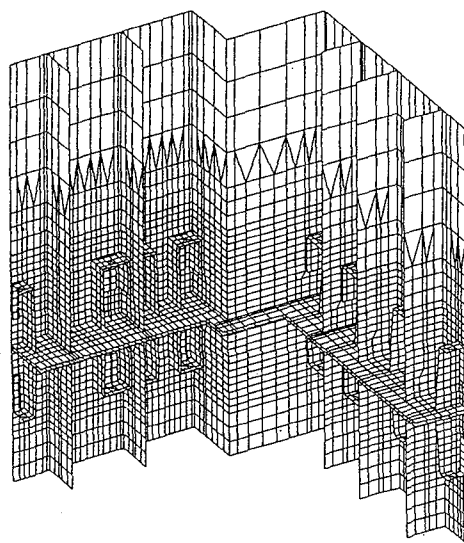


図-8 解析モデル(モデルA)

縮力には抵抗するが引張力には抵抗しないという性質を持つ)を使用し、塔壁の離反分布を求めた。

図-7に各継手のボルト配置を示し、図-8に解析モデルAを示す。

また、荷重ケースは以下の3ケースとした。

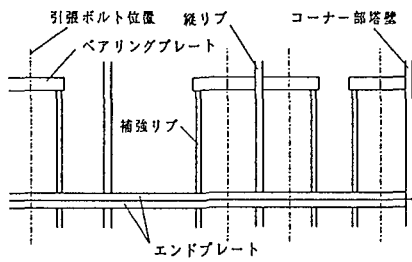
- a) プレストレスのみ荷重
- b) プレストレス+圧縮荷重荷重
- c) プレストレス+引張荷重荷重 (ギャップ要素使用)

プレストレスはボルトに温度荷重で与え、圧縮荷重・引張荷重は、前述の実橋の継手位置に作用する外力から算出した応力をそのまま分布荷重としてモデルの上端に与えた。

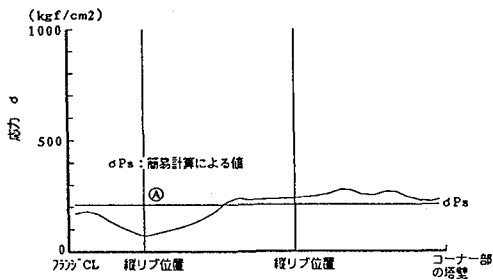
(2) 解析結果

上記の3ケースについて、フランジ面の接合面近傍の応力分布と接触面の離反分布をモデルA、Bについてそれぞれ図-9(a)、(b)に示す。また、この図には、簡易計算法による値を併記し、FEM解析結果と比較した。なお、この簡易計算法は、図-10に示すように、接合部の引張ボルトと補強リブ構造をバネに置換したモデルを、釣合条件と変形の適合条件をもとに解く方法である。

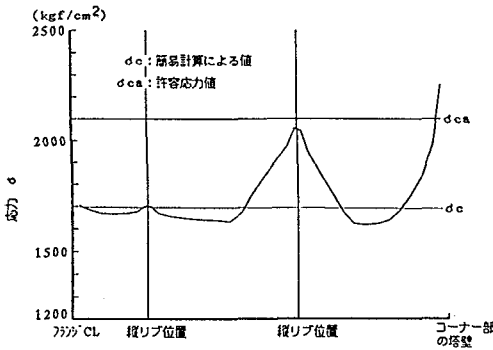
(a) モデルA



プレストレスによる応力分布



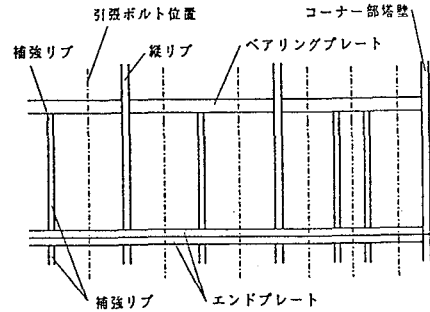
プレストレス+圧縮荷重による応力分布



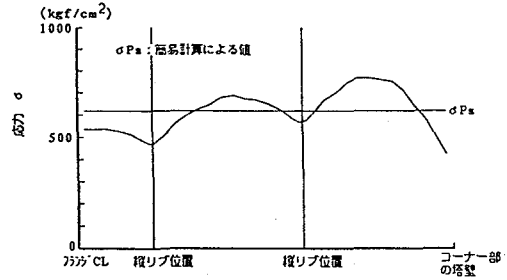
プレストレス+引張荷重による離間量の分布



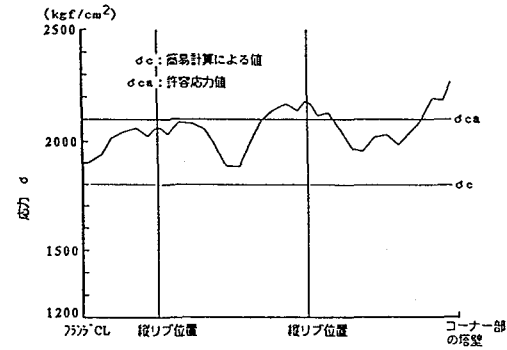
(b) モデルB



プレストレスによる応力分布



プレストレス+圧縮荷重による応力分布



プレストレス+引張荷重による離間量の分布

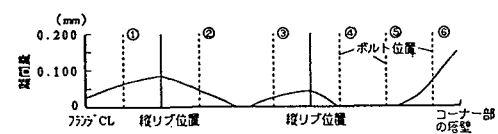


図-9 応力および離間の分布

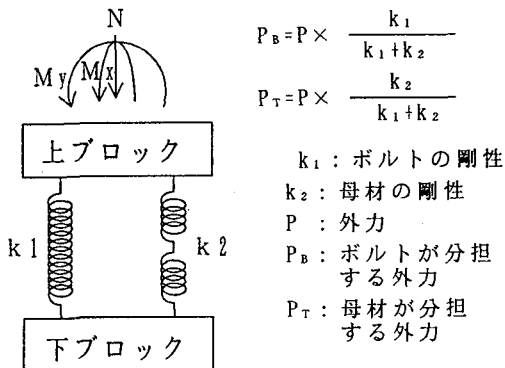


図-10 簡易計算のモデル

表-1 ボルトの付加軸力

単位: tf

ボルト番号	①	②	③	④	⑤	⑥
プレストレスのみ載荷時のボルト軸力	82.234	81.545	81.612	82.087	81.749	82.639
引張荷重の作用時のボルト軸力	85.553	85.874	85.640	86.521	84.947	88.175
付加軸力	3.319	4.329	4.028	4.434	3.198	5.536

a) プレストレスの分布

モデルAのプレストレスによる応力分布は、ボルト間隔の広い部分の縦リブ位置（図中の④）で大きく減少している。このような縦リブ位置での応力の減少はモデルBにも現れている。またモデルBでは、各ボルトのプレストレスが重なり合う部分で、圧縮応力が大きくなる傾向にある。しかし、モデルA、モデルBの両者とも全般的な分布は簡易計算値とほぼ同じである。

b) プレストレス+圧縮荷重による分布

この場合には、モデルA、モデルBとも縦リブ近傍の塔壁において、簡易計算値よりも応力が高くなる傾向にある。これは、補強リブが溶接されている箇所の塔壁の圧縮荷重による応力が補強リブに流れて低減されることに對し、縦リブ近傍の塔壁や縦リブの応力はあまり補強リブに流れないことが原因と考えられる。

c) プレストレス+引張荷重による離反性状

プレストレスが導入されている接合面に引張外力が作用した場合に、モデルBでは局部的には最大0.16mmの離反が確認されたが、これはモデルBのプレストレス量が設計上必要なプレストレス量を下回っている部分が多いためと考えられる。しかし、この時のボルトの軸力は、表-1に示すように、ほとんど付加軸力が発生しておらず簡易計算結果とほぼ同じ値であることから、離反によって引張接合の機能は失われていないと判断される。

4. 2 主塔の弾塑性有限変位解析

引張接合を有する塔柱の終局荷重作用時の降伏領域と離反の進展を検討するために、主塔を3次元骨組モデル化した弾塑性有限変位解析を実施した。また、この塔柱と継手がないとした仮想塔柱（以下、継手のない塔柱と呼ぶ）との終局耐力の比較を行った。

(1) 解析のモデル化

a) 解析モデル

引張力が作用した場合の接合面の離反、圧縮力が作用した場合のボルトの遊び（無応力長に達した状態）を、それぞれ評価できるように、解析のモデル化を行った。以下、具体的に説明する。

母材とボルトからなる継手部の荷重と変形の関係を図-11に示す。引張ボルトによるプレストレスが母材に作用して釣り合った初期状態をP- δ 図の原点とすると、継手に引張力が作用した時には、初期の段階では母材とボルトの両方で抵抗するが、プレストレスに見合った引張力が作用した時点で母材は離反し、その後ボルトのみで抵抗する。一方、圧縮力が作用した場合には、ボルトの軸力は抜け、母材には圧縮力が付加される。さらに圧縮力が作用すると、ボルトは無応力長に達した後、外力に抵抗しなくなる。なお、ボルトが無応力長になる状態と母材が圧縮で降伏する状態のいずれに早く達するかは、ボルトのプレストレスの大きさによる。このような挙動を評価するために、引張接合部のモデル化においては、

ベアリングプレート間に格点を設け、要素としては、塔壁およびリブ（縦リブと補強リブ）、ボルトを個々に評価できる多重要素を用い、各要素ごとに、引張ボルトによるプレストレスや溶接による残留応力を考慮できる、応力-歪曲線を設定した。具体的には、図-12に示すように、ボルトでは、通常の離反のみを考慮した応力-歪曲線をプレストレス量だけ歪軸方向にシフトさせ、応力軸との交点を解析初期状態とする。母材については、さらに、溶接による残留応力を考慮するために、その残留応力分だけ離反側の曲線を応力軸方向にシフトして離反から降伏までの応力変動幅を調整している。この時、溶接による残留応力が引張、圧縮のいずれかにより、シフトする正、負の方向が異なり、応力-歪曲線を使い分ける必要がある。

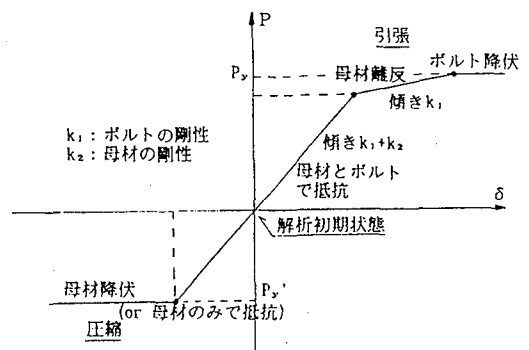
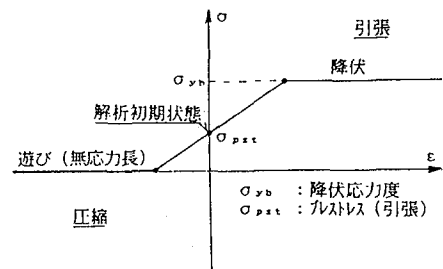
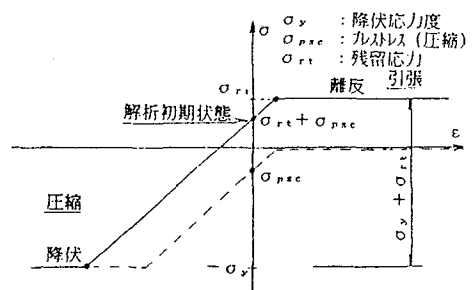


図-11 P- δ 図



(a) ボルト



点線：九折のみ考慮
実線：九折と残留応力を考慮

(b) 母材（引張の残留応力存在時）

図-12 応力-歪曲線

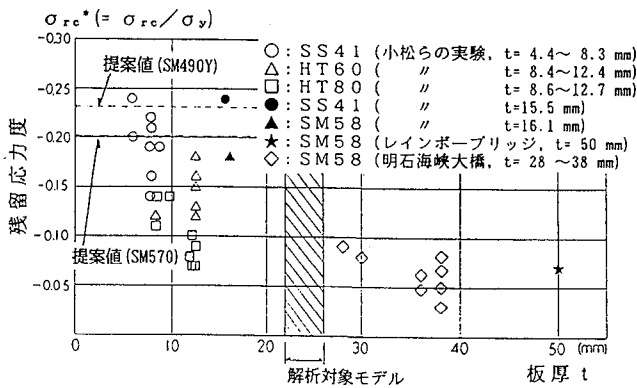
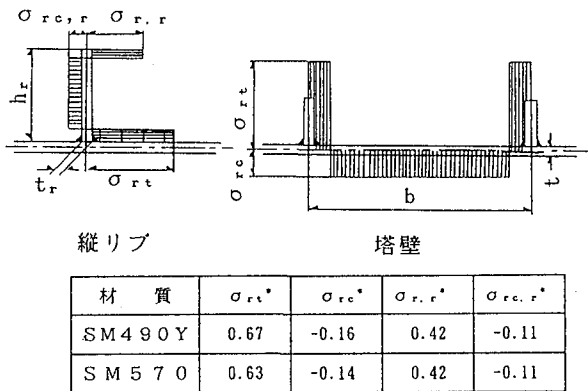


図-13 板厚と溶接による圧縮残留応力度の関係



注. *は σ_y (降伏応力度) で割った値を示す。

図-14 溶接による残留応力度

b) 初期不整の設定

耐荷力解析では、溶接による残留応力度を考慮する必要があるが、従来の解析では小松らの提案値を用いていた⁶⁾。しかし、明石海峡大橋等の主塔の実測データをみると、提案値よりかなり低い値となっている。このような差を生じた原因は、厚板では薄板に比べて単位断面積当たりの入熱量が少ないためと考えられる。本来ならば、単位断面積当たりの入熱量で残留応力を評価することが望ましいが、入熱量を直接評価しにくいことなどから、ここでは、板厚をパラメータとして残留応力度を算出した。具体的には、図-13に示すように、実験値と実橋計測値の板厚と、母材の降伏応力度に対する残留応力度の割合 σ_{rc}^* の関係をプロットし、本主塔の塔壁の板厚より、残留応力度の割合を推定した。図より、小松らの提案値の5割程度と推定できたが、実際には安全側をみて、提案値の7割の値を用いた(図-14)。

また、塔頂付加変位として、次の値を橋軸方向の塔頂に付加する。

支点移動の影響SD : $\delta = 0.02L$ および回転角

L は中央支間長

製作・架設誤差の影響E : $\delta = h_r/2,000$

h_r は塔基部からケーブル理論頂までの高さ

c) 解析ケース

解析ケースとして、活荷重載荷時、暴風時、渦励振発生時の解析を実施したが、接合面の離反・降伏発生時の終局耐力を把握しておく必要があることから、ここでは、終局耐力時塔柱に大きな引張力が作用する吊橋完成系暴風時(橋軸直角方向)について詳細に述べる。今回の解析時の荷重条件は以下のとおりであり、風荷重(下線部分)を増分させた。

$$D + \alpha W_{IT} + T(15^\circ) + SD + E$$

ただし、D:死荷重、 W_{IT} :風荷重、T:温度荷重、SD:支点移動の影響、E:製作・架設誤差の影響、 α :荷重倍率

(2) 終局時の荷重と降伏・離反の進展

表-2に崩壊時の最大塔頂変位と荷重倍率 α を示す。この結果を見ると、暴風時で塔頂水平変位が、約1.6mになると崩壊に至ることがわかる。この時の風荷重は、塔高65%補正值で102 m/secの風速(設計風速56m/sec)に相当する。

次に、崩壊時における引張接合部ごとの母材、ボルトの降伏、離反率を図-15に示す。図中、上段、下段はそれぞれ、母材、ボルトの各総断面積に占める降伏・離反の割合を示している。例えば、J13の母材は母材全断面の

表-2 暴風時の解析結果

解析ケース	最大塔頂変位(m)	荷重倍率 α
暴風時	1.60	3.24

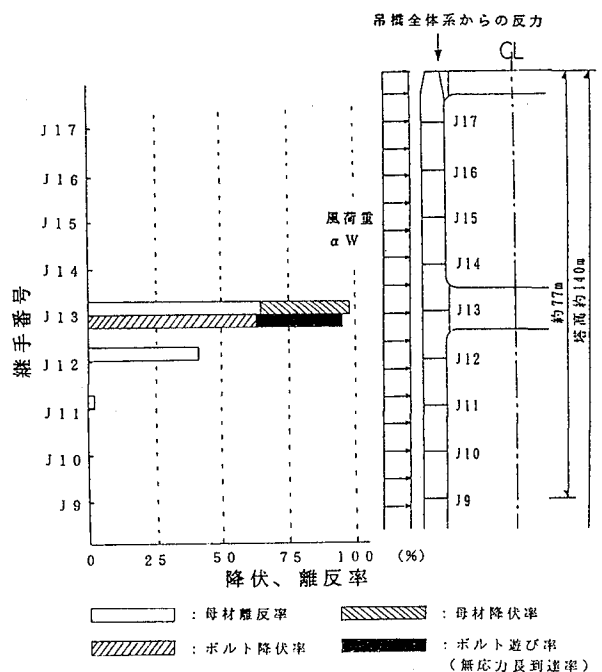
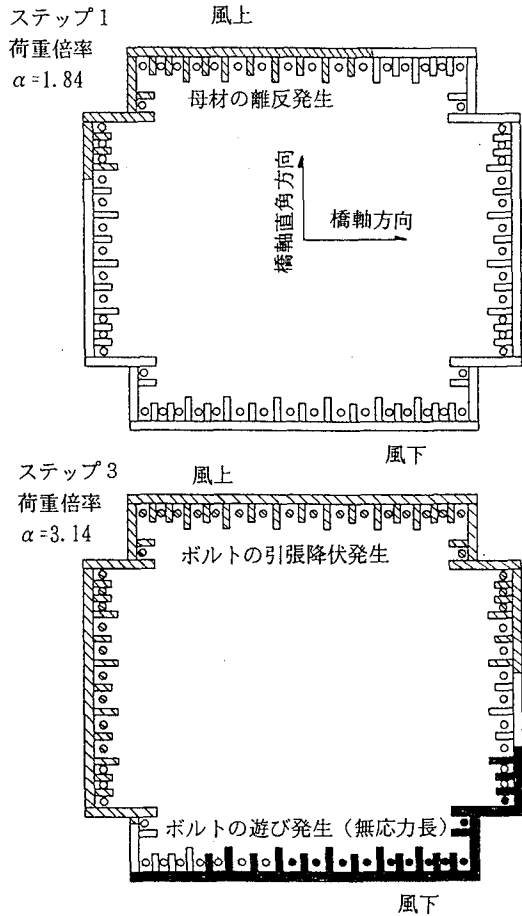


図-15 引張接合部の降伏率と離反率

約65%が離反しており、約30%が圧縮降伏していることを示している。この結果より、崩壊時において引張接合部の母材の圧縮降伏、離反はJ13に集中しており、J11からJ13を除くと全く降伏・離反が生じていないことがわかる。また、J13では、ボルトの引張降伏や、ボルト軸力が抜け無応力長に達した状態が生じている。

次に、崩壊時の降伏、離反率が最も大きな引張接合部J13に着目して、風荷重倍率の増加につれて母材の離反・圧縮降伏、ボルトの引張降伏・遊びがどのように進展するかを検討した。実際の解析では、ステップごとに荷重を増分させ、20ステップ程度で崩壊に至っているが、ここでは、代表的な4ステップについて図-16に示す。図中、塔壁、リブそしてボルトの各要素を表現しており、黒塗り及び斜線の要素は、それぞれ圧縮、引張降伏に至っていることを示している。なお、塔壁、リブの引張降伏とは離反を、またボルトの圧縮降伏とは無応力長に達していることをそれぞれ示している。次に、ステップを追って母材とボルトの降伏、離反の進展状況を概説する。

- ステップ1：塔壁とリブの離反が発生している。
- ステップ2：塔壁とリブの離反が拡大し、一方、反対側の塔壁とリブで圧縮降伏が発生している。



- ステップ3：引張側では、ボルトが引張降伏になり、また、圧縮側では、ボルトが無応力長に達しボルトの遊びが発生している。ステップ2からステップ3でボルトの降伏が急激に進展しており、塔壁の離反後にはボルトのみで抵抗する挙動を示している。
- ステップ4：ほぼ継手部の全断面に離反もしくは降伏が生じており、結果として塔全体が崩壊したことを示している。

このように、風荷重の増分につれて、まず母材の離反、次に母材の圧縮降伏、そして、ボルトの引張降伏及び遊びが発生しており、一連の崩壊過程を再現できていると思われる。

(3) 継手のない塔柱との比較

引張接合では、塔柱に大きな引張力が作用すると、母材が離反しボルトのみで抵抗するため、継手のない塔柱に比べて終局耐力が低下する可能性が考えられる。そこで、大きな引張力を生じる暴風時について、継手のない塔柱の解析を実施し、両者の結果を比較した。表-3、図-17に示すように、両者の荷重倍率、崩壊時の主塔全体の降伏状態に差異はほとんど見られない。このような結果となった要因として次のことが考えられる。

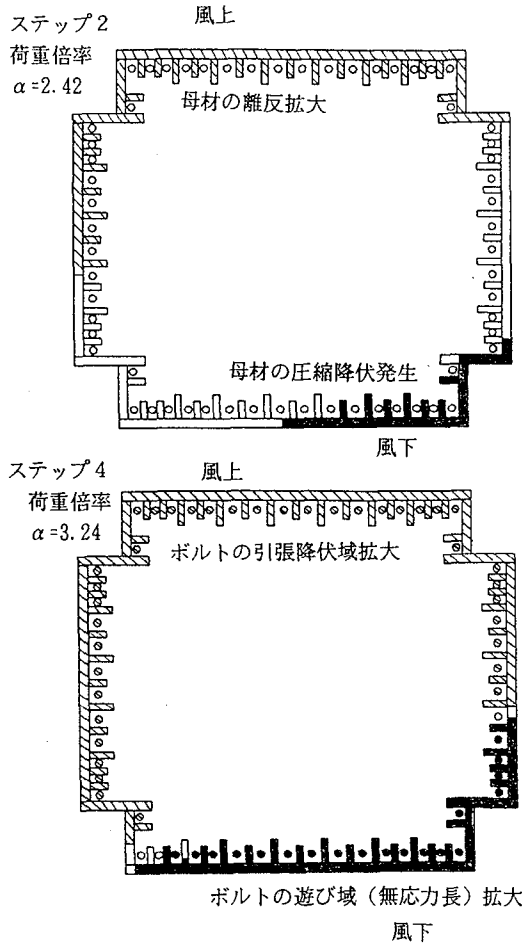


図-16 引張接合部の降伏と離反の進展状況

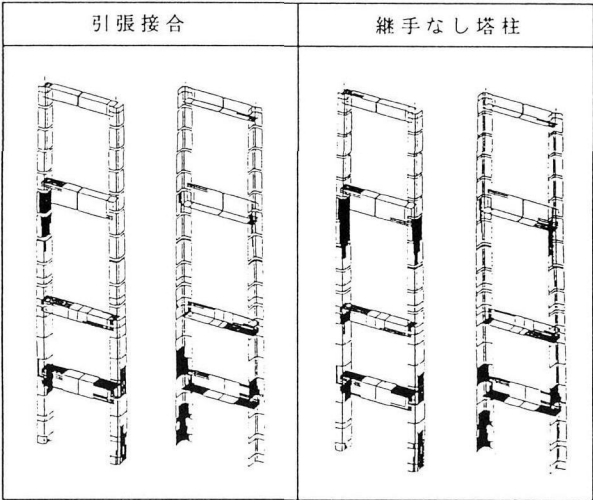
曲げによる引張でボルトが降伏するのは継手部の一部である。そのため、離反や降伏が生じても、急激に継手部の降伏域が拡大し、そのまま崩壊に至ることはなく、継手付近長手方向への応力の再分配が生じると推測できる。つまり、離反、降伏による継手部の剛性の低下が主塔全体の耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

このように、主塔の弾塑性有限変位解析を用いて、両者の終局耐力の評価を行った結果、引張接合を有した塔柱でも適切なボルト配置とボルトのプレストレスの導入を行えば、主塔全体の耐力力上、継手部が弱点となることはなく、継手のない塔柱と同等の終局耐力を有すると言える。

表－3 継手のない塔柱との比較

解析ケース	最大塔頂変位(m)	荷重倍率 α
引張接合	1. 6 0	3. 2 4 (1.0)
継手なし	1. 8 1	3. 3 4 (1.03)

注. () 内は引張接合を考慮したケースを1.0とした時の比を示す。



注. 黒くなっている部分は母材の降伏を示す。

図－17 降伏領域の比較

5. 実験

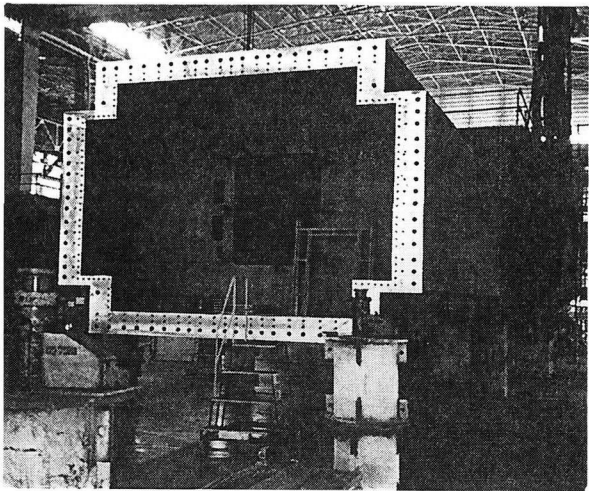
5. 1 実験内容

(1) 供試体の概要

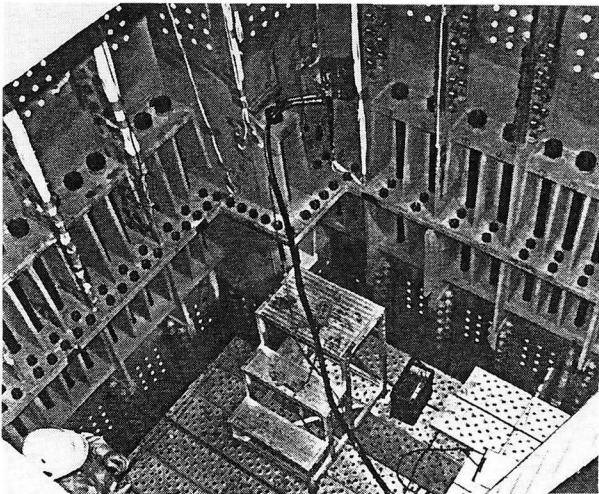
実験は、ボルトが密に入った継手部を対象に吊橋主塔の実塔柱を利用し、その端部に引張継手構造を組込んだ供試体によって行った。この供試体は、単品切削、パネル切削、ブロック切削など実構造物と全く同じ製作手順を経て製作され、溶接施工、切削加工、仮組立等についても検討した(写真－1, 2)。

(2) ボルト軸力の導入と軸力計測

ボルト軸力の導入は、トルク法によってボルトを締付



写真－1 供試体の継手面



写真－2 供試体の引張接合部

けるトルクレンチによって行われ、1回目の締付けですべてのボルトに50%の軸力を導入し、2回目の締付けですべてのボルトに100%の軸力を導入した。その後、超音波軸力計により所定のプレストレスが導入されていることを確認した。

さらに、この実験では、超音波軸力計の精度を確認するために、また、締付け時にボルトに曲げやねじりによる応力が付加されていないかを確認するために、10本のボルトに対してひずみ計測を行い応力を算出した。

(3) ひずみ計測

有限要素解析や簡易計算によって得られたプレストレスの分布性状および塔壁の板曲げ応力について、実構造物における応力性状との整合性を調べるために、供試体のひずみ計測を行った。計測点は、継手部全体の1/4の部分に集中して測定し、他の部分はプレストレス分布の対称性を見るために数箇所の計測を行った。

5. 2 実験結果

(1) プレストレスによる応力分布

計測したひずみから応力を算出し、プレストレスの分

布をグラフにしたものを図-18に示す。この分布性状は簡易計算結果とよく一致している。また、縦リブや補強リブには偏心曲げの影響が現れている。

(2) ボルトの応力

超音波軸力計により測定したボルト軸力とひずみ計測により測定したボルト軸力との間には最大5%の誤差が確認されたが、平均すると1%程度の誤差であり、超音波軸力計の精度には問題のないことがわかった。また、ボルトに発生する曲げ応力およびねじり応力の平均値はそれぞれ 249kgf/cm^2 , 182kgf/cm^2 であった。これらの応力値は、ボルトの許容応力値と比較しても問題のない小さい値である。さらに、実験では、ボルトの軸力低下を測定するため、全ボルト締め付け完了後も30分おきにボルト軸力の測定を行ったが、図-19に示すように、ボルト軸力の変動は見られなかった。

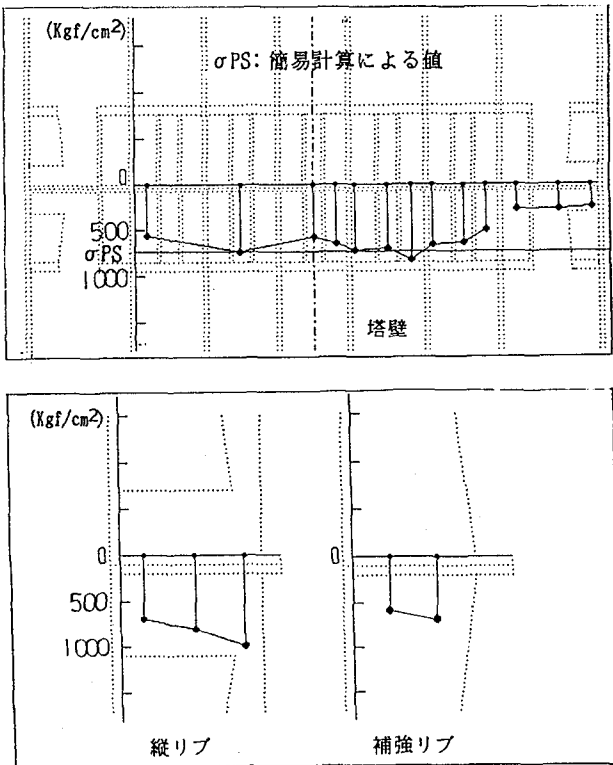


図-18 供試体のプレストレス分布

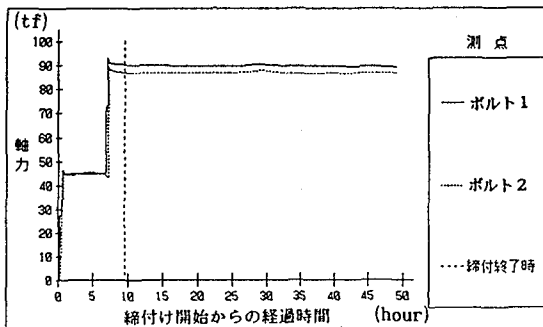


図-19 ボルトのリラクセーション

5. 3 有限要素解析との比較

有限要素解析のモデルと今回の供試体とは、ボルトの配置等が若干異なるが、両者の結果を比較すると、プレストレスの分布の傾向はほぼ同じ傾向にあるといえる。このことは、有限要素解析でのモデルが実構造物の特性に合致していたことを示すものである。

6. 長大吊橋への引張接合の適用上の課題

長大吊橋の主塔においては、塔高が高くなるため風による架設作業への影響を一層受け易くなることが予想される。引張接合継手の採用は、これらを改善する一つの方法と考えられるが、一方では風荷重による引張力が大きくなるため設計上の工夫が必要となる。

スパン600m, 1,000m, 2,000mの吊橋主塔(図-20参照)について、継手に作用するプレストレスを計算したものを図-21に示す。図-20, 21によると、基部から塔高の1/3程度の範囲においては、スパンの長大化にともないボルトの負担する引張力が大きく断面構成が困難となるが、これより高い区間になると設計は容易となる。

また、図-21には、風速25m/s以下の風に対して離反を部分的に許容した場合についても示しているが、この考えを用いれば、ボルト一本当たりの必要プレストレスは離反を全く許容しない場合の1/2以下となり、基部に近い位置の継手に対しても引張継手の採用が構造的に可能となる。このようなことから、継手の離反に対する荷重条件を緩和することにより、引張継手の合理的な設計の適用範囲が拡張されることが考えられる。いずれにしても、スパンの長大化はボルトの導入軸力の増大につながることから、高強度ボルトの適用、締め付け法の開発等を行うことが必要と考えられる。

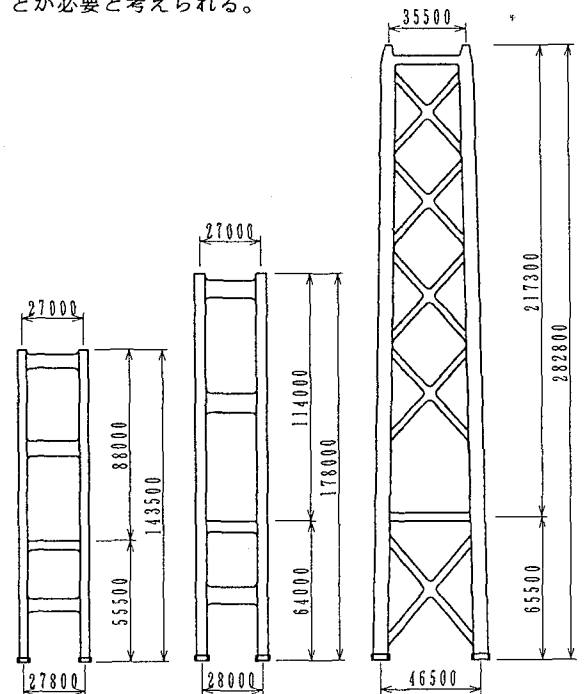
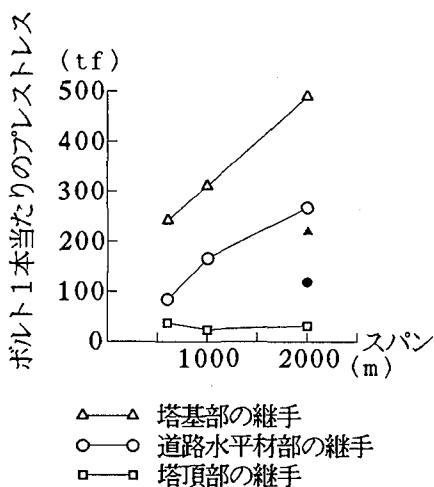


図-20 塔の形状と高さ



- : スパン2000mの道路水平材部の継手において、風速25m/sを越える風に対して離反を許容した場合のプレストレス
- ▲ : スパン2000mの塔基部の継手において、風速25m/sを越える風に対して離反を許容した場合のプレストレス

図-21 スパンとプレストレス

7. 結論

長締め方式の引張接合を吊橋塔柱の現場継手に適用する場合の構造選定と力学特性に関して、数値解析および実験から、以下の結論が得られた。

(1) ボルトが片面にのみ配置されることから、母材には偏心曲げと板曲げが作用し、これが設計上の大きな問題となる。偏心曲げを減少させるためには、ボルトの高強度化と締付け機の工夫が効果的である。ベアリングプレートとの溶接部近傍の塔壁には、局部的に板曲げによる大きな応力が発生するが、シアプレートを用いることにより問題ないレベルまで減少させることが可能である。また、このシアプレートは、プレストレスを母材に均等に伝達する効果もある。

(2) 接合部にシアプレートを用いた構造においては、プレストレスによる母材の応力の均等化に必要な補強リブ高はリブ幅の約2倍である。

(3) 離反を許容しないとして簡易計算により設計された継手断面に対して、弾性有限要素解析を行った。その結果によると、プレストレスによる応力はボルト近傍に集中する傾向がみられるが、全般的な分布としては簡易計算結果とほぼ合致している。ただし、圧縮力に対し

ては、母材と補強リブの応力分担は簡易計算で仮定(断面剛性の比率)した結果に比べて、補強リブの分担割合は50%少ない。また、引張力に対しては、外面に局部的に最大0.16mmの離反が発生するが、この時のボルト付加軸力は平均5%と小さく、簡易計算結果とほぼ同程度の値である。

(4) 荷重増分した場合の継手各要素の挙動を再現するために多重要素モデルを用いた弾塑性有限変位解析を行った。その結果より、暴風時風荷重を増分するにつれて、先ず母材の離反が発生し、次に母材の圧縮降伏、最後にボルトの引張降伏が生じることがわかった。

(5) 継手のない仮想塔柱と比較すると、終局時の荷重倍率にはほとんど差がみられない。

(6) 実験において、プレストレスによる母材、補強リブ、シアプレート、ボルトに生じる応力は解析結果とほぼ一致する。

(7) ボルト軸力の36時間後の経時変化は1%程度と小さな値である。

今後、中央支間長1,000m以上の長大吊橋に引張接合を適用する上での課題としては、引張力の増大に伴いボルトが太径・長尺化することに対して、設計法として高強度ボルトの適用、離反に対する荷重条件の緩和および離反の部分的な許容等を考慮するほか、施工法としては、コンパクトな締付け機の開発をすすめることが必要と考えられる。

参考文献

1. 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準，1989.
2. 田島・阿部・大宮他：引張ボルト接合によるラーメン隅角部に関する実験的研究，土木学会誌，1967.
3. 日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)，1993.
4. 西脇・黒田・増田・鈴木：高力ボルト引張接合・長締め形式におけるばねモデルによるボルト付加軸力，土木学会論文集，第416号，pp.403~410，1990.
5. 西脇・黒田・増田：高力ボルト引張接合・長締め形式の接合部長とボルト配置について，土木学会論文集，No.437，pp.115~123，1991.
6. 小松・牛尾・北田：補剛桁の溶接残留応力度及び初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文集，No.265，pp.25~35，1977.

(1994年9月14日受付)