
三次元有限要素法を用いた長大橋ケーブルバンドの設計

Design of Cable Bands for Long Suspension Bridge by Three-Dimensional Finite Element Method

長井 豊博(Toyohiro Nagai) 寺内 久司(Hisashi Terauchi) 洗川 睦也(Mutsuya Araiawa) 岩田 武夫(Takeo Iwata) 新中 博昌(Hiromasa Niinaka)

要旨：

道路鉄道併用橋で世界最大級の南備讃瀬戸大橋は、主ケーブルもその直径が1 mを超える。主ケーブルに固着し、橋桁を吊り下げ、さらに橋桁の長手方向の揺れを防止するセンターステイティバンドは、ケーブルへのなじみ性から薄肉円筒状となり荷重も大きいので苛酷な応力状態になる。これは三次元有限要素解析(MASTRAN)を適用し、バンドの構造の適性確認と応力の評価を行った。この結果、(1)ステイロープ定着構造は鞍がけ方式が最適である。(2)形状変化部における応力集中の発生はない、(3)応力評価は従来の設計式で求まる軸直角断面応力に、ステイ力により発生する一様なせん断力を合成して行うことができることが明らかとなった。

Synopsis：

The center stay bands of Minamibisan-Seto Bridge are fixed to the large diameter cables of a long suspension bridge and hold the hanger ropes for bridge girders and stay ropes. The center stay bands are manufactured as two sides of a cylindrical shape with a thin shell, and must fit the cables precisely while bearing a heavy load and undergoing severe stress. The structure and stress distribution of the center stay bands are evaluated by the three-dimensional finite element (NASTRAN). The main points obtained by the evaluation are as follows: (1) The saddle type is optimal as a structure; (2) concentrated overstress is not generated at any point on the bands; (3) the stress is evaluated using the figures which have been obtained by adding stress developed in tightening of the bolts to uniform shearing stress caused by the stay force.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Design of Cable Bands for Long Suspension Bridge by Three-Dimensional Finite Element Method



長井 豊博
Toyohiro Nagai
知多製造所 設備部設
備技術室 主査(掛長)



寺内 久司
Hisashi Terauchi
知多製造所 設備部設
備技術室



洗川 隆也
Mutsuya Araiawa
エンジニアリング事業
部 製鉄・プラント技術
部プラント技術室 主
査(部長補)



岩田 武夫
Takeo Iwata
知多製造所 設備部設
備技術室 主査(部長
補)



新中 博昌
Hiromasa Niinaka
知多製造所 製造部鑄
造管理室 主査(課長)

要旨

道路鉄道併用橋で世界最大級の南備讃瀬戸大橋は、主ケーブルもその直径が1mを超える。主ケーブルに固着し、橋桁を吊り下げ、さらに橋桁の長手方向の揺れを防止するセンターステイバンドは、ケーブルへのなじみ性から薄肉円筒状となり荷重も大きいので苛酷な応力状態になる。これに三次元有限要素解析 (NASTRAN) を適用し、バンドの構造の適性確認と応力の評価を行った。

この結果、(1) ステイロープ定着構造は鞍がけ方式が最適である、(2) 形状変化部における応力集中の発生はない、(3) 応力評価は従来の設計式で求まる軸直角断面応力に、ステイ力により発生する一様なせん断力を合成して行うことができることが明らかとなった。

Synopsis:

The center stay bands of Minamibisan-Seto Bridge are fixed to the large diameter cables of a long suspension bridge and hold the hanger ropes for bridge girders and stay ropes. The center stay bands are manufactured as two sides of a cylindrical shape with a thin shell, and must fit the cables precisely while bearing a heavy load and undergoing severe stress. The structure and stress distribution of the center stay bands are evaluated by the three-dimensional finite element (NASTRAN).

The main points obtained by the evaluation are as follows: (1) The saddle type is optimal as a structure; (2) concentrated overstress is not generated at any point on the bands; (3) the stress is evaluated using the figures which have been obtained by adding stress developed in tightening of the bolts to uniform shearing stress caused by the stay force.

1 緒 言

本州四国連絡橋児島・坂出ルートでは、現在3本の吊橋の架設工事が進んでいる。これら3橋はいずれも世界的に有数の長大橋で、道路鉄道併用橋でもあることから、橋にかかる荷重はこれまで例のない大きさとなる。3橋のなかでも最長の吊橋となる南備讃瀬戸大橋のケーブルバンドの設計・製作を昭和59年7月に住友金属・川崎製鉄共同企業体により本州四国連絡橋公団より受注し、昭和61年4月全量納入完了した。

設計検討では、桁の橋軸方向の揺れを防止するためのセンターステイバンドについて、本橋はもとより他の長大橋の設計指針ともなりうる設計手法の確立を念頭におき、最適基本構造から詳細設計方法に至る検討を実施した。本検討にて三次元有限要素法による詳細な応力把握を行ったことにより、センターステイバンドの応力解析および具体的な設計手法を見いだすことが可能となった。

2 ケーブルバンドの種類と機能

本橋は Fig. 1 に示すように全長1723m、支間長1100mの吊橋で、断面を Fig. 2 に示す。吊橋は補剛桁全体をその両側に定着されたハンガーロープを介して、主ケーブルで吊る構造であり、主ケーブルはアンカレッジと主塔によって支えられている。補剛桁を吊るハンガーロープと主ケーブルは、半割形状のケーブルバンドによって固定されている。補剛桁を吊るためのケーブルバンドは機能面から一般バンドとセンターステイバンドの2種類となる。ケーブルバンドは、ボルト締付力によって得られるバンド内面と主ケーブル表面の摩擦抵抗力により、主ケーブル傾斜角とハンガー張力によって生じるスリップ力に対して、主ケーブル上を滑ることなく、主ケーブルと補剛桁の相対位置を一定に保つ役割をもっている。以上の機能を満足させるため、ケーブルバンドには次の性能が要求される。

* 昭和61年11月7日原稿受付

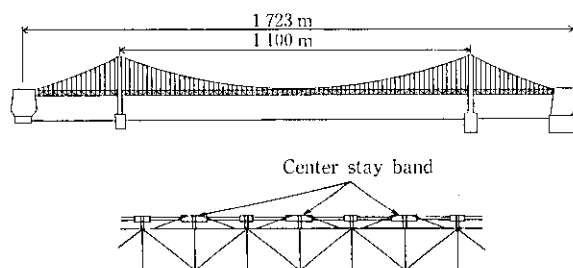


Fig. 1 General view of Minamibisan-Seto Bridge

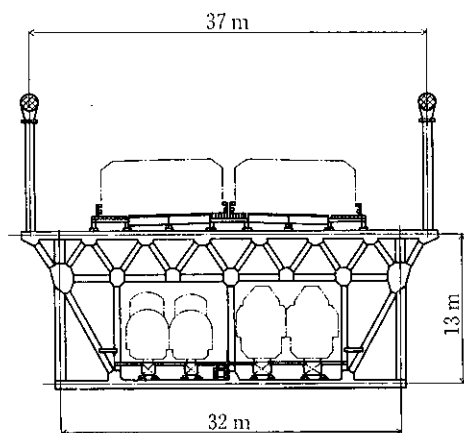


Fig. 2 Cross section of Minamibisan-Seto Bridge

- (1) 摩擦抵抗力を確保するために必要なボルト締付力により発生する応力に対して、十分な強度を有すること。
- (2) 主ケーブルに損傷を与えることなく、均一な締付圧力を得るため主ケーブル形状によくなじむこと。
- (3) 完成後、締付力低下を補うための保守、点検作業が容易に行える形状であること。

センターステイバンドでは補剛桁の橋軸方向の揺れを防止するためのステイロープが接続されるが、このステイロープを通じ数個（今回は6個）のステイバンドで全補剛桁の揺れを防止するため、一般バンドに比べ著しく厳しい負荷を受けることになる。

したがって一般バンドに要求される性能に加え、センターステイバンドは次の性能が必要となる。すなわち、ステイロープ張力に耐え、ステイ荷重をスムーズに主ケーブルに伝えるステイロープ定着部が、メンテナンス作業を阻害しない形状であることが要求される。

3 従来のケーブルバンド設計方法

3.1 すべり抵抗力の算出

ケーブルバンドに作用する荷重は Fig. 3 に示すようにハンガー張力およびステイロープ張力（センターステイバンドのみ）である。ケーブルバンドが滑らないための条件は Fig. 3 に示す荷重の釣合を考えればよいから、(1) 式の成立となる。

$$T_j \cos \phi + T_h \sin \theta \leq m \mu N_1 n_B \quad (1)$$

ここで、 T_j : ステイロープ張力

T_h : ハンガーロープ張力

ϕ : 主ケーブルに対するステイロープ傾斜角

θ : 主ケーブルに対するハンガーロープ傾斜角

m : バンドの内圧分布状態に関する係数 ($m=2.8$)

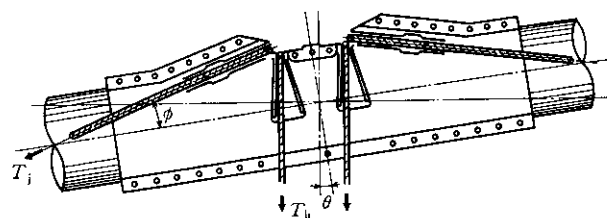


Fig. 3 Loads on the cable band

Table 1 Friction coefficient between the cable and inner surface of the band

Bridge	Friction coefficient (μ)
Kanmon Br.	0.174
Wakato Br.	0.161
Delaware Riv. Br.	0.200
Koln-Rodenkirchen Br.	0.162

μ : バンドとケーブルの橋軸方向の摩擦係数

N_1 : ボルト締付荷重（ボルト1本当たり）

n_B : ボルト本数

(1) 式でボルト締付荷重を大きくすれば、ボルト本数を減少させバンド長さを短くすることができるが、バンドの内圧制限によりバンド長さは一定値以上必要となる。バンド内面とケーブル間の摩擦係数については、Table 1¹⁾ に示すように条件により変化するものの、0.174~0.20の範囲となるが、今回は安全側の0.15を採用した。

3.2 ケーブルバンドの内径

ケーブルバンド内径はあらかじめ主ケーブル径を予想し決定する必要があるが、架線工法、素線径などによりケーブル径は変化する。バンド内径とケーブル径が一致しない場合は、バンド締付時に径の差に相当するたわみが発生し、バンドに曲げ応力が発生する。したがってバンド強度の面から径の差を最小にすることが望ましい。

主ケーブル径については(2)式²⁾を用いて決定している。

$$D = \sqrt{\frac{n}{1-K}} \times d \quad (2)$$

ここで、 D : スクイズ後の主ケーブル径

n : 素線本数

d : 素線径

K : 空隙率

ここで空隙率 K は、Table 2¹⁾ に示す実績があるが、今回プレハ

Table 2 Percentage of voids K

Bridge	Diameter of cables D (mm)	Percentage of voids K (%)	Cable spinning method ^{*1}
Golden Gate Br.	919	19.0	AS
George Washington Br.	911	20.9	AS
Verrazano Narrows Br.	911	20.5	AS
Delaware Riv. Br.	762	20.3	AS
Kanmon Br.	664	19.0	PWS
New Port Br.	387	18.5	PWS

^{*1} AS : Air spinning method

PWS: Prefab parallel wire strand method

ブ・パラレルワイヤストランド (PWS) 工法であることを考慮し、18% を標準とし $\pm 4\%$ の誤差に対応できる仕様となった。バンド内径は空隙率 18% の場合の主ケーブル径とした。

3.3 ケーブルバンド強度照査方法

ケーブルバンド強度照査は、バンド締付ボルト軸力により発生する (3) 式のフープ応力 σ_1 を基準としている。

$$\sigma_1 = \frac{N}{2lt} \leq \frac{1}{3}\sigma_y \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N : ボルトの全締付力

l : バンド長

t : バンド肉厚

σ_y : バンド材料の降伏応力

また、(4) 式に示すボルトの偏心により生じる曲げ応力 σ_2 および (5) 式に示すバンドが締め付けられケーブルの形状になじむことによって生じる曲げ応力 σ_3 がある。

バンド内径とケーブル径が一致している場合

$$\sigma_2 = \frac{3Ne}{lt^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 e : ボルト偏心距離

バンド内径がケーブル径と一致していない場合

$$\sigma_3 = Et \left(\frac{1}{D_c} - \frac{1}{D_B} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 E : バンド材料のヤング率

D_c : ケーブル直径

D_B : バンドの直径

以上の応力状態を Fig. 4 に示す。上記の 3 応力において、基準となるフープ応力 σ_1 と曲げ応力 σ_2, σ_3 の各合成値が材料の降伏応力の 1.2 倍以下であることが従来の設計方法となっている。

$$\sigma_1 + \sigma_2 < \sigma_a = 1.2\sigma_y$$

$$\sigma_1 + \sigma_3 < \sigma_a = 1.2\sigma_y$$

ここで、 σ_a : 許容応力

σ_y : 材料の降伏応力

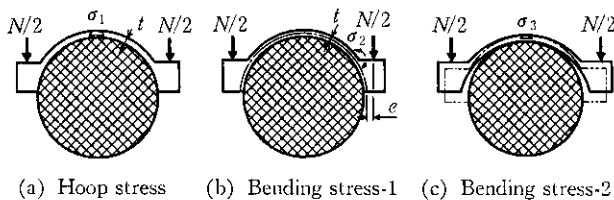


Fig. 4 Stress in the cable band

4 センターステイバンドの設計

センターステイバンドについては、ステイロープの定着構造が橋により異なることもあり、一般バンドに示されたような明確な設計手法はない。

一方、バンドは内径に対してとくに肉の薄い円筒となるが、この薄肉円筒構造に対して、バンド締付ボルト荷重とは方向の異なるステイ力が作用する。今回このステイ力がバンド薄肉胴部に及ぼす影響 (局所的な応力集中など) を定量的に把握すると同時にステイロープ定着方法として最も有利な構造を決定するため三次元有限要素法による応力解析を実施した。

4.1 基本構造の検討

ステイロープ定着方法の代表的な構造として Fig. 5 に示す 3 案が考えられ、各案について長所と短所を比較検討した。

第 1 案: 鞍がけ方式 (Fig. 5 (a)) ステイロープ 1 本 (片側) を U 字形に使用する。

第 2 案: ソケット方式 (Fig. 5 (b)) ステイロープ端部にソケットを使用し、ロープは両サイドにそれぞれ 1 本配し、片側 2 本として使用する。

第 3 案: 側面鞍がけ方式 (Fig. 5 (c)) ステイロープを両サイドでそれぞれ 1 本 U 字形に使用する。

ソケット方式は剛性の高いステイロープ定着用ブロックが、ボルト締付用フランジ部と直交して、バンド胴部にある点で他の 2 案と基本的に異なる。このブロック部が、ボルト締付時におけるバンドと主ケーブルのなじみ性やバンド胴部応力分布 (とくに付根部の応力集中) に及ぼす影響が問題となる。そこで鞍がけ方式 (側面鞍がけ方式も同断面形状) とソケット方式について軸直角断面の二次元有限要素解析法により、変形状態および応力分布を調査した。

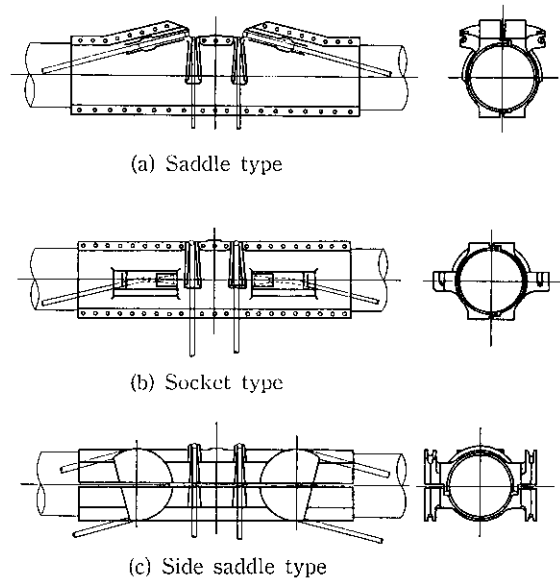


Fig. 5 Structure of the center stay band

(1) バンド内面変位

Fig. 6 にバンド内面変位を示す。主ケーブル最小径に対して、鞍がけ方式ではバンド内面がケーブルにくい込むだけの変形をしているが、ソケット方式ではステイロープ定着用ブロック近傍でケーブルと接触しない部分が発生する。一方、バンドは主ケーブルの寸法変化に対してなじむ機能が要求されるが、この点ソケット方式は不利であると言える。

(2) 応力分布

Fig. 7 にバンド内外面の応力分布を示す。鞍がけ方式に対してソケット方式は応力変動が大きく、かつ最大応力値も鞍がけ方式の約 1.5 倍となっている。したがって、バンドの主ケーブルとのなじみ性、バンド胴部応力分布の点から、鞍がけ方式および側面鞍がけ方式が構造的に有利である。

(3) ステイロープ定着方法の決定

ケーブルバンドは架設後素線の再配列などにより、ボルト軸力低下が発生するため一定の期間でボルトの増締作業が必要である。この作業性が側面鞍がけ方式の場合、ステイロープと増締装

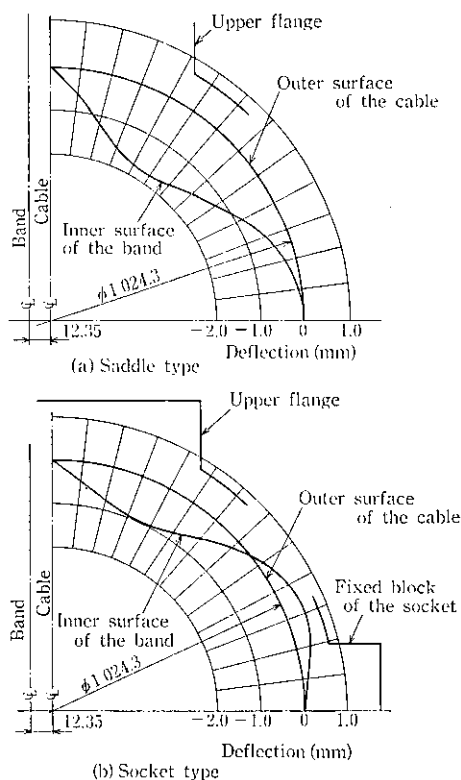


Fig. 6 Deflection of the inner surface of the band

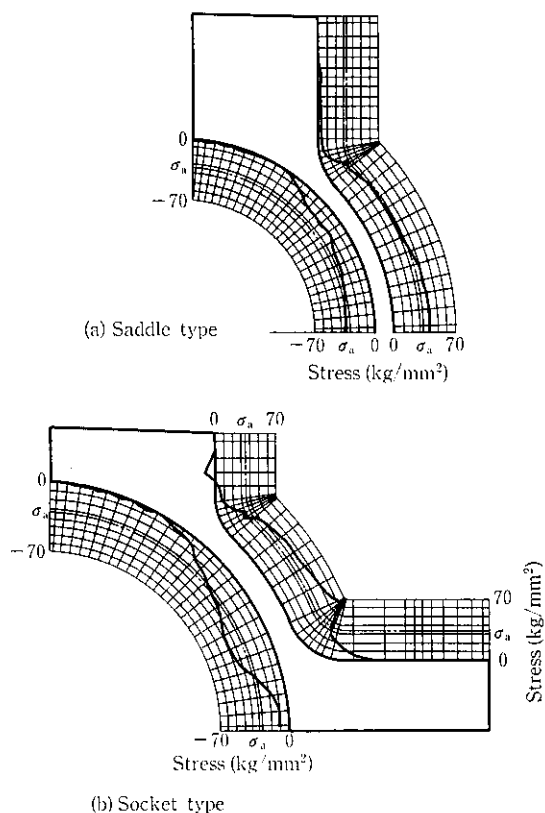


Fig. 7 Distribution of principal stresses in the inner and outer surface of the band

置の干渉で困難となる。増縮作業が一般バンドと同等であること、また後述の三次元有限要素解析結果に示されるように、ステイ荷重をスムーズに主ケーブルに伝達可能であることを考慮して鞍がけ方式と決定した。

4.2 三次元有限要素法による応力解析

4.2.1 解析モデルの設定

モデル形状は Fig. 8 に示す 1/2 モデルとし、フランジ部については応力的に影響が小さい外部コーナー部を除外した。またステイロープ溝については U 形溝とし、ハンガーロープ溝は矩形で近似し溝間の距離がバンド肉厚に比べ大きく、溝の有無により相互の応力に影響を及ぼさない点を考慮してステイロープ、ハンガーロープ溝とも 1 箇所のみとした。

要素形状は 6 面体ソリッド要素とし総節点数 1152、要素数 590 のモデルとした。

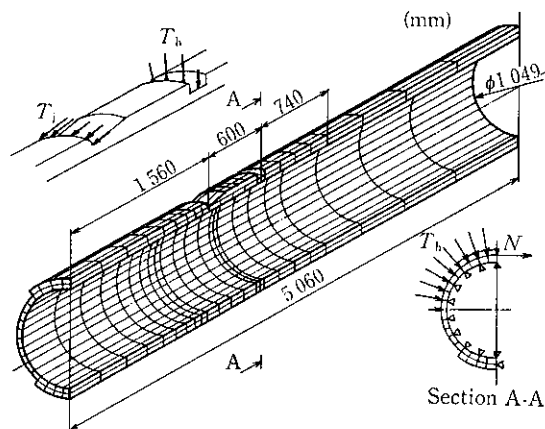


Fig. 8 Finite element model of the center stay band for 3 dimensional analysis

4.2.2 外力

センターステイバンドに作用する外力は、次のものがある。

- (1) ステイロープ張力
- (2) ハンガーロープ張力
- (3) ボルト締付軸力
- (4) バンド内面と主ケーブル間の摩擦力

ここで、ステイロープ張力およびハンガーロープ張力については 1 箇所のバンドに対して、補剛桁の橋軸方向の揺れを防止する際に発生する荷重 300t と吊上荷重 420t をそれぞれ溝部接点に等価集中荷重として加えた。ボルト締付軸力については、バンドと主ケーブル間の摩擦係数を 0.15 とし、滑りに対する安全率が 3.0 以上確保されるに必要な荷重として加えた。またバンドと主ケーブル間の摩擦力については、ボルト締付荷重によるバンド平均内圧より、摩擦係数を 0.15 とした場合に滑りを防止するに必要なバンド長さを求め、この摩擦力作用範囲がステイ張力作用点に対して前後に等しいものとした。

4.2.3 拘束条件

拘束条件で問題となるのは、線径 5.12mm の鋼線の集合体である主ケーブルによるバンド内面の拘束を、どのようなモデルとするかであるが、ここではステイ張力による応力を調査することを目的として以下のように仮定した。

- (1) バンド内面拘束

主ケーブル直径とバンド内径に差がある場合の応力については、主ケーブルの締付時の変形もこの差に含め、別途後述の軸直角断面応力で考慮するものとし、これら寸法が一致し、かつ主ケーブルを完全剛体と仮定し、内面全節点の半径方向の変位を拘束した。

(2) 軸方向拘束

ステイ力と摩擦力が釣り合うことになり拘束する必要はないが、釣合誤差による剛体変位を防止するため片端面内側の節点につき軸方向変位を拘束した。

(3) 円周方向拘束

ボルト軸力に対しては、下部フランジボルト締付部を、円周方向拘束とした。

4.2.4 解析結果

全荷重を加えた場合の応力分布ベクトルを Fig. 9 に、ステイ軸力のみ（ボルト締付力を除く）による応力分布ベクトルを Fig. 10 に示す。

Fig. 9 より、フランジ端面のボルト荷重点、矩形溝部のハンガー荷重点およびフランジ切欠斜面に加えたステイ力荷重点で局部的に高い応力が発生しているが、その他の部分では、円周方向に一樣な引張り応力が作用することがわかる。一方、Fig. 10 においても各荷重点で局部的に高い応力が発生しているものの、その他の部分では一樣なせん断応力が作用するのみであることがわかる。フランジ部と胴部の境界における肉厚変動部および溝近傍においてとくに応力集中に起因するような高い応力もみられない。

Fig. 9 と 10 の応力分布を比較することにより次のことが明らかとなる。Fig. 10 でバンド胴部で発生しているせん断応力は Fig. 9 では見られず、円周方向の引張応力のみ発生しているように見える。これは、ボルト締付力の影響がステイ力に比較してきわめて大きいことを示すものである。

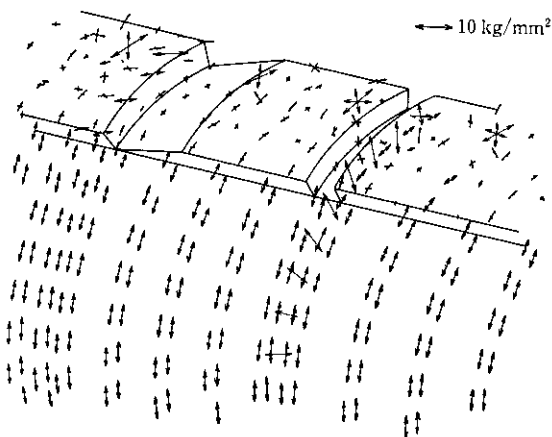


Fig. 9 Distribution of principal stress in the band (full load)

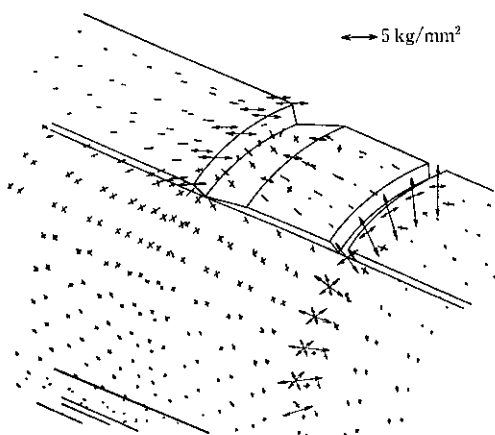


Fig. 10 Distribution of principal stress in the band (except the bolt tension)

ステイ力によるせん断応力は最大 1.5 kg/mm^2 程度で、この応力はボルト締付力による引張り円周応力 6.5 kg/mm^2 に比較して低い値となっている。Fig. 9 でステイ力の影響を認めることができないのは、この応力の比率によるものである。ボルト締付力が全体で 3100 t に対して、ステイ軸力が 300 t という低い荷重であることを考えれば当然の結果とも考えられる。

以上の結果、セーターステイバンド胴部の応力は、ボルト締付力に起因するものが大きく、軸直角断面応力をメインに考えるべきであることが明らかとなった。

軸直角断面応力については、主ケーブル仕上り径の大小によりバンドに曲げ応力が加わるが、今回の三次元解析ではこれを除外した。したがって詳細な応力解析を実施する場合に、この条件を含めた応力解析を行うべきである。しかし、ステイ力による応力が小さいことから二次元の軸直角断面応力を解析すればよいことになり、ステイ力の影響は下記の考え方で断面応力に加えればよい。

ステイ力の反力として作用する摩擦力が有効に作用する範囲を考え、平均せん断応力の 2.0 倍をステイ力による応力とする。

4.3 セーターステイバンド強度

三次元有限要素解析結果により、セーターステイバンドの各部の強度照査を以下のように実施した。

4.3.1 下部フランジ部強度

ボルト締付位置がケーブルに近く、曲げの影響が比較的小さい下部フランジ部近傍のバンド必要肉厚を調査するため、バンド肉厚と応力の関係をまとめると Fig. 11 となる。Fig. 11 で破線は材料の降伏応力の 1.2 倍に相当する許容応力、一点鎖線は製作肉厚公差を考慮した場合のボルト偏心による曲げ応力とフープ応力の合応力を示す。ボルト偏心による曲げ応力はバンド肉厚の減少とともに増加し、肉厚公差を考慮すると 40.6 mm 以上の肉厚が必要であることを示している。またバンド内径とケーブル直径の差によるバンドのたわみによる応力は、肉厚が 58.5 mm 以上となると許容応力を上回ることから、肉厚は 58.5 mm 以内とする必要がある。

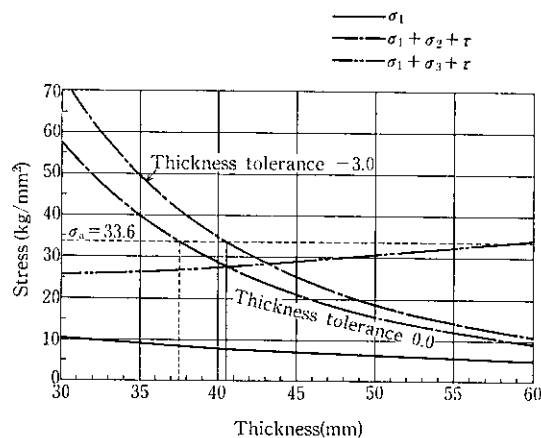


Fig. 11 Relation between thickness and stress of the main shell of the band

4.3.2 上部フランジ部強度

上部フランジ部ではステイロープ溝の関係で、ボルト偏心量が 260 mm となることから、このボルト偏心の影響をより詳細に検討する必要がある。

そこで、上部フランジ部については、軸直角断面の応力解析を別途実施した。Fig. 12 に示すようにボルト偏心量が最大の位置とし、

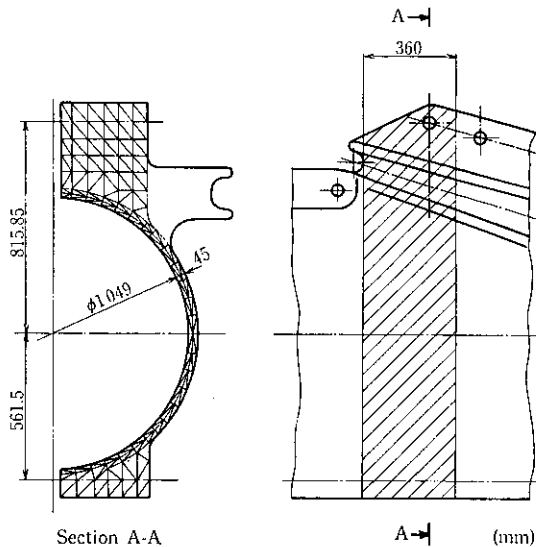


Fig. 12 Finite element model of the center stay band for 2 dimensional analysis

ボルトにより締め付けられるバンド幅は隣接するボルトの中央およびステイロープ溝下部に囲まれる幅として 360 mm とした。

拘束条件は、主ケーブルとセンターステイバンド内面にすき間があるものとし、変形過程を次の 2 ケースに分けた。

(1) 変形状態 1

仮止め状態からボルト軸力の導入により、バンド内面全域がケーブルに接触するまでの状態を変形状態 1 とする。

(2) 変形状態 2

変形状態 1 から所定の軸力を導入し最終状態に至るまでの状態を変形状態 2 とする。このときバンドはケーブルに沿って滑ろうとし、同時にケーブルの反力も増加する。

上記 2 つの変形状態における応力を合成した結果を Fig. 13 に示す。全体として応力値は許容値以下となっているものの、一部許容応力に近い部分が存在している。この軸直角断面最大応力値にステイ力によるせん断応力を加えると、最大応力は 33.6 kg/mm^2 に達しボルト偏心量の大きい上部フランジ側胴部については、45 mm 以上の肉厚が必要となる。

4.3.3 センターステイバンド胴部肉厚の決定

下部フランジ側胴部の最小肉厚は、41 mm 以上必要であることが

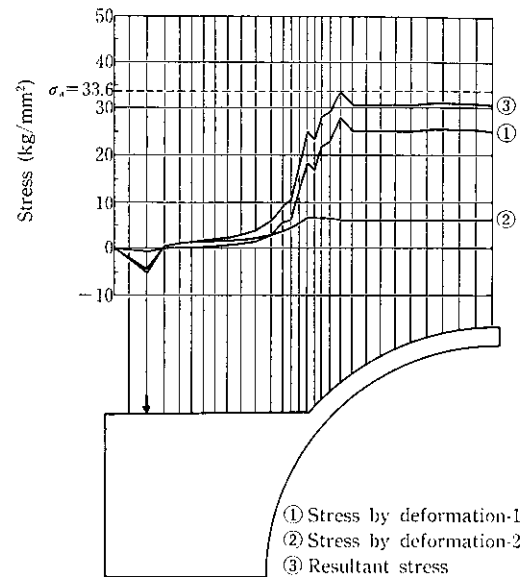


Fig. 13 Distribution of principal stress in the outer surface of the band

明らかになった。

一方、軸直角断面応力解析結果より上部フランジ側胴部については、45 mm 以上の肉厚が必要であることが示された。

以上の結果より、本橋のセンターステイバンド胴部肉厚は 45 mm とした。

5 結 言

本橋クラスのセンターステイバンドとしては、鞍がけ方式のステイロープ定着方法が最も有利であり、その強度照査方法は、三次元有限要素解析結果より、軸直角断面の応力を主とし、この応力にステイ力によってバンド全体に発生すると仮定したせん断応力を加えればよいことが明らかとなった。

今回の検討方法は、本ルート以外の吊橋、北備讃瀬戸大橋、下津井瀬戸大橋のセンターステイバンド設計にも生かされた。

なお、この解析に関しては本州四国連絡橋公団第二建設局坂出工事事務所の関係各位のご指導とご協力に負うことが大きく深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会 本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会 ケーブル分科会：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 2）、「吊橋のケーブルに関する検討」，(1978)，pp. 149-178
- 2) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡ケーブルバンド設計要領（案），(1977)