

鋼床版合成トラス斜張橋の主構弦材および 鋼床版応力の実用算定式

THE CALCULATION METHOD FOR CHORD AND DECK STRESSES OF CABLE STAYED BRIDGES
WITH COMPOSITED TRUSS GIRDERS

西村宣男・ 昼間康裕・ 石崎 浩・ 小松定夫

By Nobuo NISHIMURA, Yasuhiro HIRUMA, Hiroshi ISHIZAKI and Sadao KOMATSU

The stress distributions in the chord members and steel deck plates of the truss girders composited with steel deck systems under vertical loads are investigated by the finite element method.

It is made clear that the rigidity of floor beams has remarkable effects on the stress distribution of such structural members in the neighborhood of the joints.

And, the conventional calculation method of working stresses including the local stress nearby the joints is proposed, which is combined 2D-frame analysis in the practical design.

1. まえがき

近年、鋼床版と主構弦材を結合した形式のトラス橋、あるいはこの形式の主桁トラスを有する斜張橋の計画並びに建設が続いている。実務設計段階において鉛直荷重による主構部材および鋼床版の応力を算定する際には、この種の橋梁の嚆矢である六甲大橋¹⁾の設計で考案された実用計算法が基本として採用されている。

²⁾六甲大橋の床組構成は図-1aに示すように2.25m間隔のI型断面横リブと0.34m間隔のバルブプレート縦リブで構成された比較的簡素な形式で、弦材の等価剛性として鋼床版の有効幅を考慮して鋼床版の剛性効果を評価し平面骨組解析により全体解析が行われている。また格点から導入されるケーブル力や主構斜材力(以下格点導入力と称する)の鋼床版への分散過程はせん断応力の分散角度³⁾を考慮して算定されている。

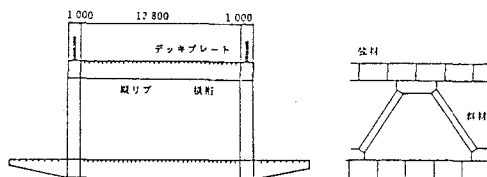


図-1a 六甲大橋

これに対し最近計画されている鋼床版合成トラスの鋼床版構成には多様化の傾向があり、これに伴い主構弦材や鋼床版応力の実用計算法も鋼床版構造の特性を反映した見直しが必要とされている。

-
- * 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)
 - ** 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻前期課程 (〒565 吹田市山田丘 2-1)
 - *** 工修 阪神高速道路公団工務部 (〒541 大阪市東区久太郎町4-68)
 - **** 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科, 大阪大学名誉教授 (〒574 大東市中垣内 3-1-1)

本研究では図-1bのような両側主構弦材格点間に剛性の高い閉断面横桁を配置した鋼床版合成トラス桁を対象とし、格点部に配置される横桁剛性により鋼床版および弦材の格点近傍の応力特性が異なることに着目して主荷重による主構部材応力および鋼床版応力の実用計算式を提案することを目的とする。

まず有限要素解析により鋼床版有効幅、弦材軸力、2次曲げモーメントおよび鋼床版応力の分布特性を明らかにし、続いてこの応力特性を踏まえて弦材および鋼床版応力の実用計算式を示し、最後に鋼床版合成トラス形式の長大斜張橋への適用例を示す。

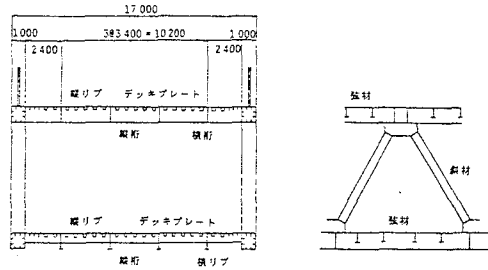


図-1b 閉断面横桁を有する鋼床版合成トラス桁

2. 単純支持トラス桁の力学的特性

(1) 解析モデル

対象とする解析モデルは剛性の高い横桁を有する鋼床版合成トラス斜張橋計画案の主桁トラスの数パネルを取り出し両端単純支持したもので、主構の骨組構成を図-2に、鋼床版の断面構成を図-3に示す。鋼床版には4本の縦桁が配置されそれらの間に5本のトラフリブが配置されている。このような立体構造を再現するために、オフセットビーム要素と四辺形平面要素を用いた有限要素モデルを作成した。図-4のように鋼床版の中立面に設けた節点を独立節点とし、縦桁、縦リブ、横桁および横リブの重心に設けた節点は鋼床版節点の従属節点とした。鋼床版は1節点3自由度の長方形平面膜要素を、弦材、縦桁、縦リブ、横桁および横リブは、1節点6自由度のはり要素を適用して解析した。

(2) 荷重状態

鋼床版の有効幅を検討するためにスパン中央弦材格点に集中鉛直荷重を作用させた場合(荷重状態1)と上弦材全格点に鉛直荷重を作用させた場合(荷重状態2)を考慮した。また、格点導入力による局部応力を検討するために図-5に示すような橋軸方向集中荷重を作用させた場合(荷重状態3)を対象とする。

荷重状態3においては、初等トラス理論によると荷重作用点間の弦材のみに外力と同じ大きさの圧縮力が生じるのみで、他の部材力は生じない。実際には剛節トラスの効果により斜材および他の弦材にも部材力は生じるが、それらは無視できるほどの大きさである。また主構面内2次曲げモーメントも僅少であり、荷重作用点以外の格点導入力も僅少であるので、この荷重状態は着目格点のみに格点導入力が入力した状態に等しいものと考えられる。

(3) 鋼床版の有効幅

まず弦材の伸縮に対する鋼床版の有効幅を求める。トラス桁が鉛直集中荷重あるいは分布荷重を受ける場合について、支間中央

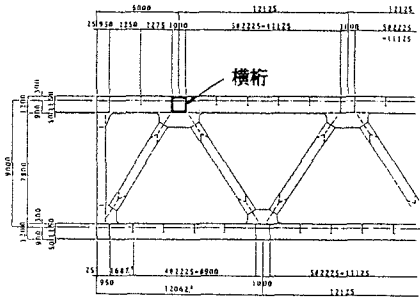


図-2 主構の骨組構成

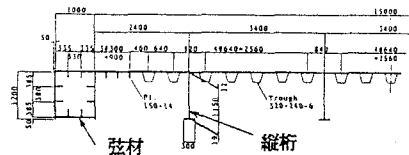


図-3 鋼床版の断面構成

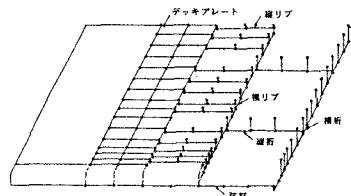


図-4 鋼床版モデル

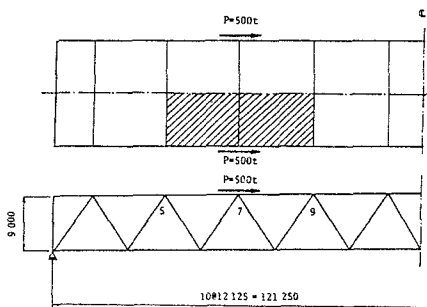


図-5 橋軸方向集中荷重(荷重状態3)

の主構格点の鉛直変位および中央上弦材の軸力による垂直応力に着目して鋼床版有効幅と主構パネル数の関係を調査した。この両者から求めた有効幅比 λ/b とモデルのパネル数あるいは形状比 b/λ の関係は道路橋示方書の有効幅規定 8.3.4は鋼床版合成トラス桁の鋼床版有効幅に対しても適用できることが明かになった。

次に弦材の面内2次曲げに対する鋼床版の有効幅について検討する。図-7は8パネルモデルの荷重状態1について支間中央付近の弦材の面内2次曲げ応力を示したものである。図中の○印は有限要素解を表し、実線は道路橋示方書の有効幅規定 8.3.4に基づいて鋼床版の有効幅を考慮した弦材剛性を用いた平面骨組解析の結果を示している。ここで等価支間長 λ は面内曲げモーメントの同符号間を採用した。これより、道路橋示方書の有効幅規定 8.3.4は弦材の面内2次曲げに対しても準用できることが確認された。

(4) 弦材応力分布

集中荷重を受ける場合の主構弦材応力より軸力成分を分離しスパン中央部2パネルについて図-8に○印でその分布状態を示す。軸力による弦材応力は鋼床版との相互作用によりパネル間で一定とはならず部材軸方向にほぼ直線的に変化している。

(5) 主構弦材の面外2次曲げ応力

剛性の高い横桁を有する鋼床版合成トラス桁の場合、図-9に示すような面外2次曲げ応力が発生する。この面外2次曲げ応力には以下のような特徴がある。

- 1) 格点部で大きく、格間では減衰する。
- 2) 格点導入力の大きい格点においてこの応力が顕著に現れる。
- 3) 格点の両側で異符号である。

上記の特徴からこの応力の発生原因は次のように考えられる。格点導入力が鋼床版へ分散する際に一方が引張、他方が圧縮領域となり、弦材は引張領域では鋼床版側に引き込まれ、圧縮領域では外側に押し出される。従って格点には鉛直軸回りに微小な回転変位が生じるが、対象モデルの格点部に配置されている剛性の高い箱形断面横桁が抵抗するために格点付近に面外2次曲げモーメントが発生する。このことから面外2次曲げには横桁剛性が関与していると考えられる。

(6) 鋼床版応力の分散特性

主構格点部における格点導入力の前後の鋼床版への分散特性を明らかにするために10パネルモデルを対象として荷重状態3で解析した。また格点導入力の鋼床版への分散過程には横桁の剛性が顕著な影響を与えることが予測され、この効果を定量的に明らかにするために閉断面横桁を有する場合と六

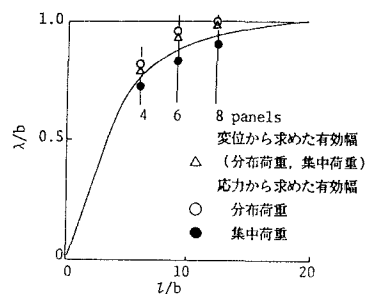


図-6 弦材の平均軸力に対する鋼床版の有効幅

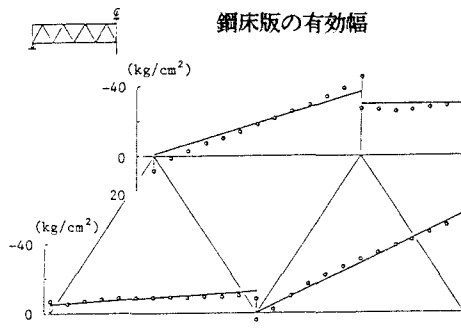


図-7 面内2次曲げ応力分布

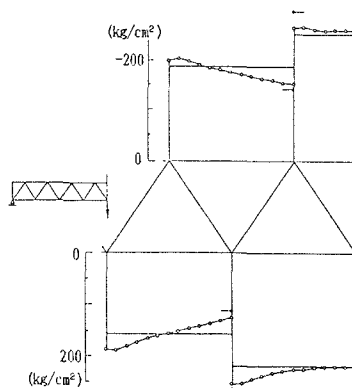


図-8 軸力による弦材応力分布

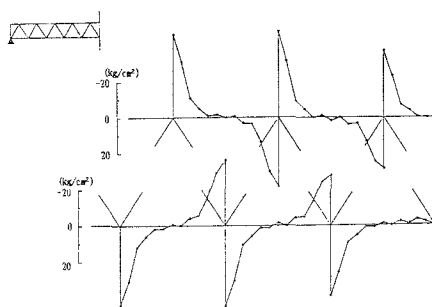


図-9 弦材の面外2次曲げ応力分布

甲大橋のような開断面横桁を有する場合を比較した。

1) セン断応力

図-10に鋼床版内の面内せん断応力の分布状態を示す。開断面横桁の場合、格点導入力の鋼床版分担分は弦材と鋼床版の接合辺からせん断応力として鋼床版に伝達する。このせん断応力は弦材から離れるに従い逐次垂直応力に変わり、橋面の中央線で0になる。せん断応力の分布は格点導入力の作用点で鋭角的に尖った極大値を持つ。

これに対して剛性の大きい閉断面横桁の場合、鋼床版のせん断応力の分布には開断面横桁に見られるような格点導入力作用点付近の鋭角的な尖りは見られない。これは格点導入力の一部が横桁のせん断力として鋼床版の内部にまで伝達されるためである。

横桁のせん断応力の伝達範囲は弦材側からみた鋼床版の第1トラフリブないしは第2トラフリブの間で、それより内側の鋼床版のせん断応力は両者はほぼ同レベルになっている。せん断応力の橋軸方向の分布は、格点導入力の作用断面を中心として対称になっている。また、実務設計において鋼床版への格点導入力によるせん断応力の分散線を仮定する方法を採用する場合、せん断応力の分散角度は左右対称と考えても良いと思われる。

2) 橋軸方向垂直応力

図-11に橋軸方向垂直応力の分布を示す。せん断応力の分布と同様に格点導入力作用点の近傍を除いては

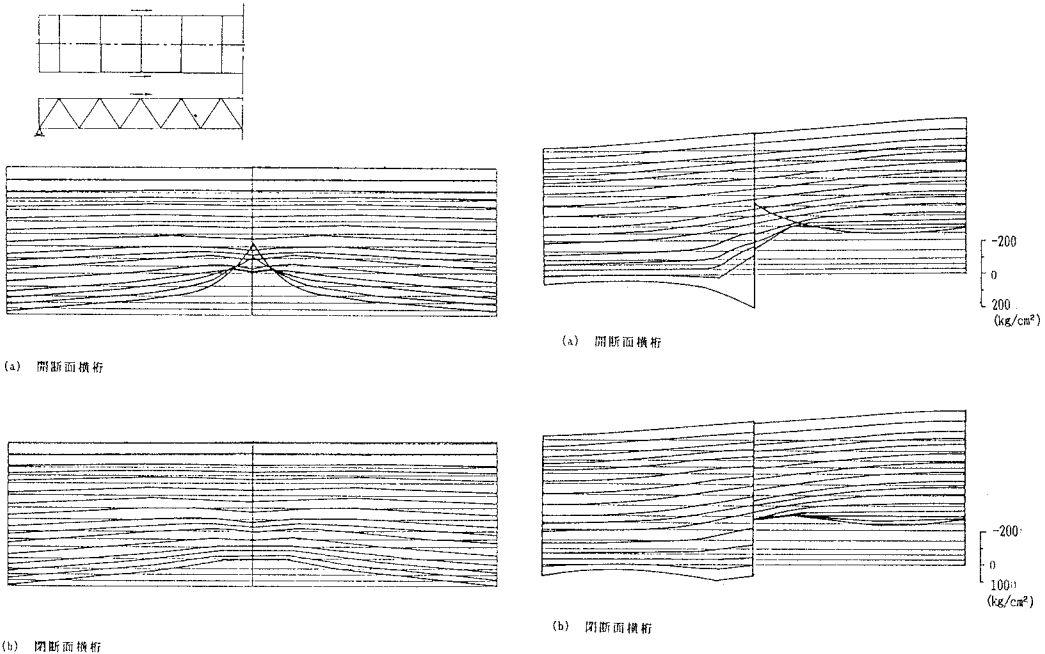


図-10 鋼床版せん断応力分布

図-11 鋼床版橋軸方向垂直応力分布

両者の応力分布には大きな差はみられない。格点導入力の作用点から支点側のパネルに伝達したせん断応力は鋼床版内で垂直応力に変わって、再びスパン中央側に伝達していく。その結果、格点導入力の作用断面の鋼床版の平均垂直応力は格点導入力の鋼床版分担分による平均応力のほぼ 1/2程度になっている。

3. 主構弦材および鋼床版応力の実用算定式

前述の立体有限要素モデルを対象とした解析結果により明かとなった鋼床版合成トラス桁の応力特性を、実務設計に用いられる平面骨組解析によって求められる隣接弦材の軸力差（格点導入力）と横桁剛性に着目

して主構弦材および鋼床版応力の実用算定式を作成した。

(1) 弦材応力

1) 軸力による応力

図-8中の実線は前述の鋼床版の有効幅を考慮した弦材の換算剛性を用いた骨組解析によって求めた平均軸力による弦材応力を表している。また格点両端に示される破線は平面解析によって求められる格点導入力をも格点の両側の弦材の伸び剛性に応じて分配して平均軸力成分に加算したもので、図からも明らかなように有限要素モデルによって求めた弦材応力の部材端における値を精度良く評価していることがわかる。

2) 面外2次曲げ応力

横桁剛性の大きい場合には、格点部に面内2次曲げ応力と同程度の面外2次曲げ応力が発生する。平面骨組解析ではこのような応力を補足できないので、平面解析で得られる格点導入力を用いて以下のような面外2次曲げモーメントの簡易式を作成した。

$$M^* = \frac{2E I_o I_b \alpha^2 \beta}{2B I_o + \alpha I_b} \bar{u} \quad (1)$$

$$\bar{u} = \frac{\Delta N a}{2E A^*} \quad (2)$$

ここに $\alpha = \sqrt{k^*/4E I_b}$ $\beta = \sqrt{k/4E I_o}$ $k^* = 4E t_d/a$ $k = 2E t_d/b$

ただし I_b : 横桁面外剛性 I_o : 弦材面外剛性 M^* : 面外2次曲げモーメント

a : 主構格間長

ΔN : 格点導入力

b : 主構間隔

A^* : 弦材の有効断面積 t_d : 鋼床版板厚

この関係式を用いると容易に弦材の面外2次曲げモーメントおよび2次応力を求めることができる。図-12は簡易計算式によって求めた面外曲げモーメント M^* と有限要素解析によって求めた面外曲げモーメント M の関係を示しているが、良好な相関が認められる。

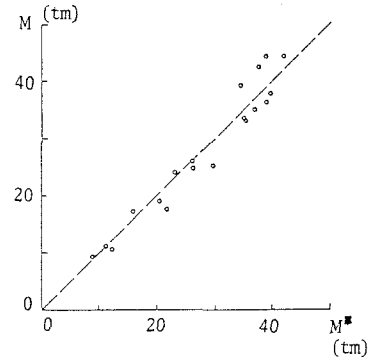


図-12 簡易式と有限要素解の比較
(面外2次曲げモーメント)

(2) 鋼床版応力

1) セン断応力の簡易計算式

(a) 鋼床版せん断応力分布のモデル化

せん断応力の簡易算定式を作成するにあたり、以下の仮定に従ってモデル化を行った。

I: 橋軸直角方向の応力分布は鋼床版中央で0、弦材との接合部でその絶対値が最大となる三角形分布とする。

II: 橋軸方向の応力分布は有効幅(ガセット幅)を考慮した位置から45°のせん断応力分散線を仮定し、その線を境に鋼床版の両端からその線上までを一樣な傾きを持つ直線分布、線に囲まれた領域では一定の分布とした台形型の分布形状とする。

III: 格点付近は横桁の剛性が影響する応力急変部であり、有限要素解析結果に基づいた応力算定式を与える。

(b) 鋼床版の領域分割と領域内の応力分散特性

鋼床版のせん断応力を算定するに当たって図-13のように鋼床版を3つの領域に分割する。

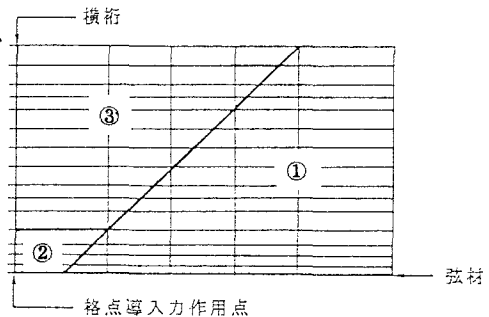


図-13 鋼床版の領域分割

第①領域: 橋軸方向はせん断応力分散線から隣接格点の横桁線まで、幅員方向は弦材接合線から幅員

方向中心線で囲まれる領域。この領域内で応力は仮定Ⅱに従い一様な傾きを持つ直線分布となる。

第②領域：橋軸方向は着目格点横桁線からせん断応力分散線まで、幅員方向は弦材接合線から第1トラフリブで囲まれる領域。この領域は横桁剛性の影響する応力急変領域である。

第③領域：橋軸方向は着目格点横桁線からせん断応力分散線まで、幅員方向は第1トラフリブから幅員方向中心線で囲まれる領域。この領域内で応力は仮定Ⅱに従い一定分布となる。

(c) 領域①の応力算定式

無次元表示したせん断応力(τ/τ_0)は式(3)で近似することができる。

$$\tau/\tau_0 = -0.2059(A_d/A^*) (x/a - 1.146) (z/B) \quad (3)$$

$$\tau_0 = \Delta N / H \cdot t_d \quad (4)$$

ここで a : 格間長 ΔN : 格点導入力 t_d : 鋼床版板厚
 B : 主構間隔 H : ガセットプレート全幅

(d) 領域②の応力算定式

格点付近の応力急変部(領域②)の応力特性について、解析により以下のことが明らかになった。

I : 格点付近では横桁剛性により応力分布は明らかに異なるが、次第に一定な分布に収束する。

II : 図-14は横桁の鉛直軸回りの断面二次モーメント I_b を弦材の鉛直軸回りの断面二次モーメント I_c で除した無次元パラメータ(I_b/I_c)の対数を横軸にとり、格点部の最大せん断応力を縦軸に取って両者の関係を示したもので、ほぼ直線分布となる。さらに応力の無次元パラメータを用いると式(5)で回帰できる。

$$\tau_{\max}/\tau_0 = -0.0468(A_d/A^*) (\ln(I_b/I_c) + 0.154) \quad (5)$$

ここに $\tau_{\max}$: 最大せん断応力 I_b : 横桁面外剛性 I_c : 弦材面外剛性

III : 格点付近の応力は第一トラフリブ(一番外側)にて収束し横桁の面外剛比が(I_b/I_c) ≥ 0.0526 であるような閉断面横桁の場合、式(6)で横桁線上の鋼床版せん断応力を近似できる。

$$\tau/\tau_0 = C_1 (A_d/A^*) (z/B) + C_2 \quad (6)$$

$$C_1 = -0.1752 \cdot \ln(I_b/I_c) + 0.2175 \quad (7)$$

$$C_2 = 0.1433 \cdot \ln(I_b/I_c) - 0.05719 \quad (8)$$

IV : 橋軸方向の影響範囲は第一横リブまでとすることができる。

この領域内のせん断応力は、式(6)による横桁線上の応力と、式(3)で与えられる領域①との境界線上の応力とにより直線補間により求める。

(e) 領域③の応力算定法

領域③は分散線上の応力がこの領域で橋軸方向に一定値をとる。

3) 鋼床版橋軸方向垂直応力の簡易算定式

(a) 応力分布のモデル化

応力分布のモデル化に当たって以下の仮定を行うものとする。

I : 微小要素の釣合式(9)より応力の橋軸方向の分布は

$$\partial \tau / \partial z = \partial \sigma_x / \partial x \quad (9)$$

式(10)で表現されるような放物線分布となる。

$$\sigma_x/\sigma_0 = C_1 (x/a)^2 + C_2 (x/a) + C_3 \quad (10)$$

II : せん断応力分散線で囲まれる領域では一定勾配をもつ直線分布とする。

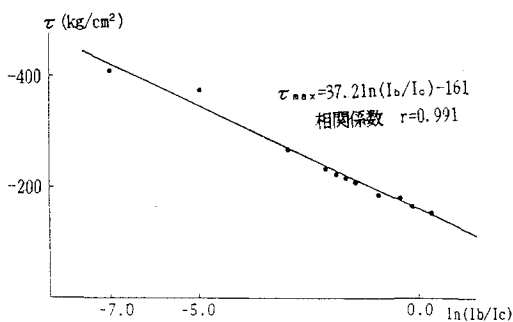


図-14 弦材と横桁の剛比と最大せん断応力の関係

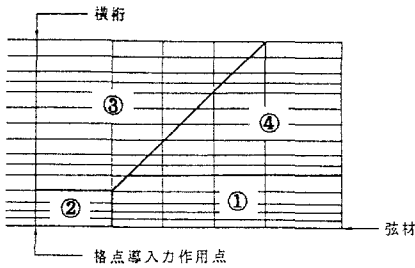


図-15 鋼床版の領域分割

Ⅲ：横桁の剛性が関与する応力急変部は橋軸方向に第1横リブまで、横断方向に第2トラフリブまでとする。

(b) 鋼床版の領域分割

応力を算定するに当たって図-15のように鋼床版を分割する。

第①領域：橋軸方向は第1横リブから隣接格点横桁線上まで、幅員方向は弦材接合線から第2トラフリブで囲まれる領域。

第②領域：橋軸方向は着目格点横桁線から第1横リブまで、幅員方向は弦材接合線から第2トラフリブで囲まれる領域。この領域は横桁剛性の影響する応力急変領域である。

第③領域：橋軸方向は着目格点横桁線からせん断応力分散線まで、幅員方向は第2トラフリブから幅員方向中心線で囲まれる領域。この領域では仮定Ⅱに従い応力は橋軸方向に直線分布する。また幅員方向には一定分布となる。

第④領域：第①・②・③領域を除く領域。この領域は仮定Ⅰに従い応力は放物線分布となる。

(c) 領域①の応力算定式

領域①では応力は乱れるので橋軸方向の応力分布を別途に求めると無次元表示した応力(σ_x/σ_0)は式(11)で近似することができる。

$$\sigma_x/\sigma_0 = C_1(x/a)^2 + C_2(x/a) + C_3 \quad (11)$$

$$C_1 = 21.62(z/B)^2 - 31.15(z/B) + 10.60 \quad (12)$$

$$C_2 = -28.37(z/B)^2 + 40.18(z/B) - 13.23 \quad (13)$$

$$C_3 = 8.285(z/B)^2 - 10.65(z/B) + 3.967 \quad (14)$$

$$\sigma_0 = \Delta N / A^* \quad (15)$$

ここに a ：格間長 ΔN ：格点導入軸力 A^* ：有効断面積

(d) 領域②の応力算定式

有限要素解析より格点付近の応力急変部（領域②）について以下のことが明らかになった。

図-16は(I_b/I_c)の対数を横軸にとり、格点部の最大垂直応力を縦軸に取って両者の関係を示したもので、圧縮応力および引張応力はほぼ直線で近似できる。このうち格点部の最大圧縮応力は次式で近似することができる。

$$\sigma_{x\max}/\sigma_0 = -0.0915 \cdot \ln(I_b/I_c) + 1.435 \quad (16)$$

ここに $\sigma_{x\max}$ ：格点部に生じる鋼床版最大垂直応力 I_b ：横桁面外剛性

I_c ：弦材面外剛性

さらに横桁上の鋼床版垂直応力は次式により近似できる。

$$\sigma_x/\sigma_0 = C_1(z/B)^2 + C_2(z/B) + C_3 \quad (17)$$

$$C_1 = -7.993 \cdot \ln(I_b/I_c) + 9.000 \quad (18)$$

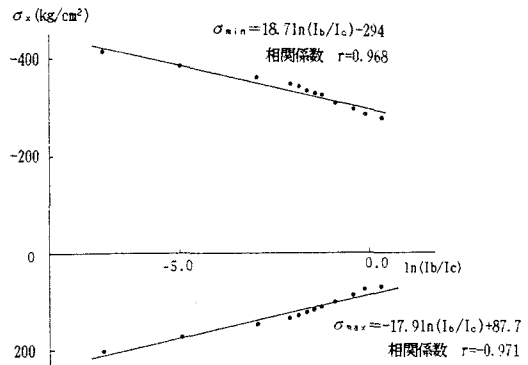


図-16 弦材と横桁の剛比と垂直応力の関係

$$C_2 = 13.17 \cdot \ln(I_b / I_c) - 12.28 \quad (19)$$

$$C_3 = -5.328 \cdot \ln(I_b / I_c) + 4.656 \quad (20)$$

2B: 鋼床版全幅

(e) 領域③の応力算定法

横桁線上の応力は式(17)で与えられる領域②との境界上の応力が幅員方向に一定値をとる。その応力と式(21)または、式(11)で与えられる分散線上の応力とを橋軸方向に直線補間してこの領域内の応力を求める。

(f) 領域④の応力算定式

領域④の応力は仮定 I をに基づき以下のように近似する。

$$\sigma_x / \sigma_0 = 0.2059 C_1 \{ -(x/a)^2 + 2.292(x/a) + C_2 \} \quad (21)$$

$$C_1 = a \cdot A_d / 2 B t_d \cdot H \quad (22)$$

$$C_2 = 0.4025(z/B) + 0.05480 \quad (23)$$

ここで A_d : リブ等も含めた鋼床版総断面積

4) 橋軸直角方向鋼床版垂直応力の算定式

(a) 垂直応力分布のモデル化

垂直応力分布のモデル化を以下の仮定に従い行った。

I: 橋軸直角方向の応力分布は微小要素の釣合式(24)より式(25)で表現されるような放物線分布となり、格点付近を除く弦材接合線上で0、鋼床版中央でその絶対値が最大となり、せん断応力分散線で囲まれる領域では幅員方向に一様分布とする。

$$\partial \tau / \partial x = \partial \sigma_z / \partial z \quad (24)$$

$$\sigma_z = C_1 (z/B)^2 + C_2 (z/B) + C_3 \quad (25)$$

II: 横桁の剛性効果の影響する範囲は幅員方向については格点～第2トラフリブ、橋軸方向については格点～第1横リブまでとする。

III: 橋軸方向の応力分布はIIを除く部分で弦材接合線上では0、その他の部分で放物線とする。

(b) 鋼床版の領域分割

応力を算定するに当たって図-17のように鋼床版を分割する。

第①領域: 第②・③領域を除く領域。この領域は仮定 I に従い応力は幅員方向に放物線分布する。

第②領域: 橋軸方向は着目格点横桁線から第1横リブまで、幅員方向は弦材接合線から第2トラフリブで囲まれる領域。この領域は横桁剛性の影響する応力急変部である。

第③領域: 橋軸方向は着目格点横桁線からせん断応力分散線まで、幅員方向は第2トラフリブから幅員方向中心線で囲まれる領域。この領域は仮定 I に従い応力は幅員方向に一様分布する。

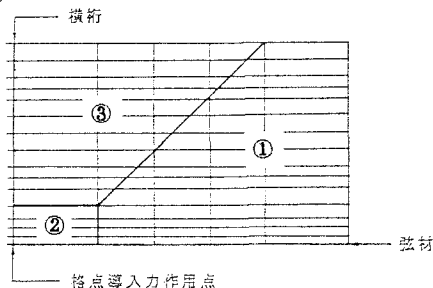


図-17 鋼床版の領域分割

(c) 領域①の応力算定式

領域①内の応力は次式で近似することができる。

$$\sigma_z / \sigma_0 = C_1 (z/B)^2 + C_2 (z/B) + C_3 \quad (26)$$

$$C_1 = 1.836(x/a)^2 - 1.035(x/a) - 0.6339 \quad (27)$$

$$C_2 = -2.546(x/a)^2 + 1.903(x/a) + 0.2142 \quad (28)$$

$$C_3 = 1.248(x/a)^2 - 1.436(x/a) + 0.5517 \quad (29)$$

$$\text{ここで} \quad \sigma_0 = \Delta N / A^* \quad (30)$$

ΔN : 格点導入軸力 A^* : 有効断面積

(d) 領域②の応力算定式

横桁の剛性が影響する格点部の応力急変部(領域②)を解析したところ以下のことが明らかになった。弦材との接合線上の応力は、格点部に生じる応力値と第1横リブでの応力値(0とみなす)を直線で結んだ三角形形状に近似できる。

格点部に生じる最大垂直応力は次式で近似できる。

$$\sigma_{z\max}/\sigma_0 = -0.03205 \ln(I_b/I_0) + 0.3723 \quad (31)$$

ここで $\sigma_{z\max}$: 格点部に生じる鋼床版最大垂直応力 I_b : 横桁面外剛性

I_0 : 弦材面外剛性

さらに、横桁線上の応力は次式で近似できる。

$$\sigma_z/\sigma_0 = C_1(z/B)^2 + C_2(z/B) + C_3 \quad (32)$$

$$C_1 = -2.653 \ln(I_b/I_0) + 2.891 \quad (33)$$

$$C_2 = 4.360 \ln(I_b/I_0) - 3.873 \quad (34)$$

$$C_3 = -1.758 \ln(I_b/I_0) + 1.336 \quad (35)$$

$2B$: 鋼床版全幅

式(26)で与えられる領域①との境界線上の応力と式(32)で与えられる応力とを橋軸方向に直線補間して領域内の応力を求める。

(e) 領域③の応力算定法

式(26)で与えられる分散線上の応力および領域②との境界線上の応力がこの領域内で幅員方向に一定値をとる。

5) 簡易式と有限要素解の比較

以上述べた鋼床版応力簡易式の精度を確認するために有限要素解との比較を行った。図-18~20にせん断応力、橋軸方向垂直応力および橋軸直角方向垂直応力の分布を比較して示した。図中の実線は有限要素解を○印は簡易式の値を表している。簡易式はほぼ安全側に且つ精度良く有限要素解と対応している。

4. 鋼床版合成トラス斜張橋への適用例

(1) 解析モデルと荷重状態

1) 解析モデル

解析の対象となった斜張橋のモデルは図-21に示すように、中央径間長485m、側径間長200mの対称な斜張橋で12段のハープ型ケーブルが配置され、側径間の第6、7段ケーブル定着点間の主構下弦材格点が中間橋脚で支持されている。鋼床版の諸元は2のトラス桁の解析で用いたものと同一である(図-3)。

2) 荷重状態

本橋の力学特性を調べるために、構造的に特徴のある箇所を6点選定した。

1) 最上段ケーブルの側径間定着部(着目断面力: ケーブル力, 着目部材: 上弦材2)

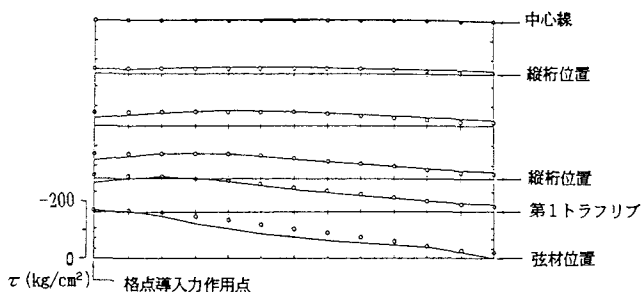


図-18 有限要素解と簡易式解の比較(せん断応力)

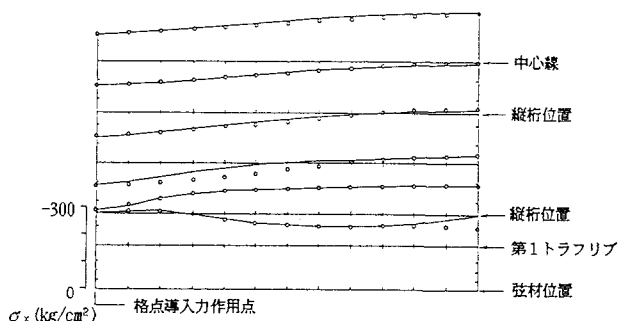


図-19 有限要素解と簡易式解の比較(橋軸方向垂直応力)

- 2) 中間橋脚上の上弦材格点 (着目断面力: 上弦材力, 着目部材: 上弦材7)
- 3) 主塔位置中間支点の上弦材格点 (着目断面力: 上弦材力, 着目部材: 上弦材17)
- 4) 主塔位置中間支点の下弦材格点 (着目断面力: 下弦材力, 着目部材: 下弦材18)
- 5) 第4段ケーブルの中央径間定着部 (着目断面力: ケーブル力, 着目部材: 上弦材30)
- 6) 中央径間中央の上弦材格点 (着目断面力: 上弦材力, 着目部材: 上弦材37)

上記の6箇所における着目断面力が最大になるように影響線解析から集中および分布活荷重の載荷範囲を決定した。

(2) 部材応力の成分比較

鋼床版合成トラス桁では、主桁としての軸力および曲げモーメントによって生ずる弦材および鋼床版の軸方向応力 (平均軸力による応力) の他に、剛節構造に起因する面内2次曲げ応力、格点導入力による格点付近の局部応力 (面外2次曲げ応力を含む) が作用することを明らかにした。鋼床版合成トラス斜張橋の設計においてはこれらの応力成分の割合を把握する必要がある。

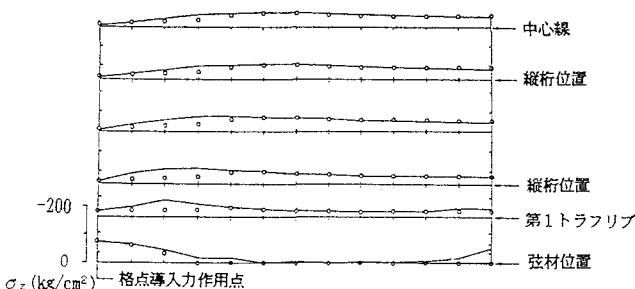


図-20 有限要素解と簡易式解の比較 (幅員方向垂直応力)

1) 弦材応力

表-1は各荷重状態について各々1本の弦材に着目し、弦材断面の4つの隅角点の最大応力について成分比較した。これらの弦材応力においては平均軸力による応力成分が卓越しているが、格点導入力による成分が最大で21%、面内2次曲げ応力成分は最大40%、面外2次曲げ応力は最大14%程度になっている。

2) 鋼床版応力

主桁作用による鋼床版応力としては平均軸力による橋軸方向垂直応力の他、弦

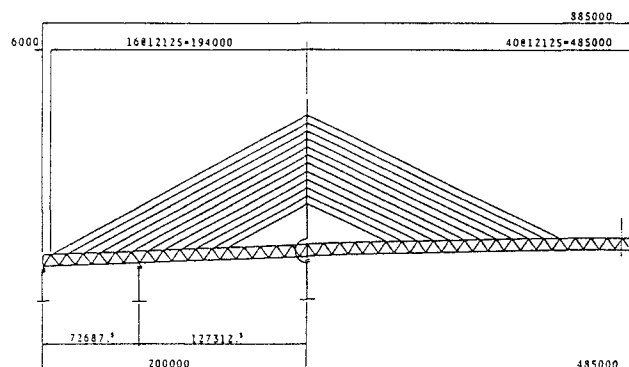


図-21 斜張橋の一般図

材の近傍では面内2次曲げおよび格点導入力による鋼床版面内応力が作用する。表-2では平面骨組解析と局部応力算定式によって求めた応力成分を比較し、合計応力を有限要素解と比較している。これらの鋼床版応力も弦材応力と同様、平均軸力による応力が卓越しているが、格点導入力による応力が最大で42%、面内曲げによる応力が最大で61%程度を占め、平均軸力による応力と同程度あるいはそれ以上の応力を生じる場合がある。

5. 結論

以上、鋼床版合成トラス桁の鉛直荷重による応力特性に対する横桁剛性の影響を立体有限要素モデルを用いて調査した。そして、実務設計で用いられる平面骨組解析によって得られる格点導入力と横桁面外剛性に着目した主構弦材および鋼床版応力の簡易算定式を提案し、有限要素解析結果と比較してその妥当性を明らかにした。

本研究で得られた知見を要約すると以下ようになる。

- 1) 鋼床版の合成効果を評価するために、鋼床版の有効幅を考慮した換算剛性を用いること。軸力および面内曲げに対する鋼床版の有効幅は道路橋示方書8.3.4を準用できることが確認された。
- 2) 剛性の高い横桁を持つ場合、格点の弦材に面内2次曲げ応力に匹敵する面外2次曲げ応力が発生する。
- 3) 剛性の低い開断面横桁を有する場合、剛性の高い閉断面横桁を有する場合と異なり格点付近で鋼床版応力の急変現象が認められるように横桁剛性により格点付近での鋼床版の応力特性が異なる。
- 4) 平面骨組解析で得られる格点導入力を用いて弦材および鋼床版の応力を算定できる簡易計算法を作成した。

表－1 弦材応力の成分比較

部 材	荷重 case	平均軸力 による応力	格点導入力 による応力	面内曲げ による応力	面外曲げ による応力	合計応力	有限要素解
上弦材 2	i	1	- 8.1	- 12.3	- 22.6	- 53.2	- 45.4
	j		- 8.1	48.9	7.7	82.7	96.9
上弦材 7	i	2	- 475.6	- 167.9	- 48.7	- 807.0	- 838.6
	j		- 475.6	- 122.4	- 29.9	- 711.6	- 742.6
上弦材17	i	3	384.8	101.3	21.5	593.1	562.9
	j		384.8	3.0	262.9	664.7	665.3
下弦材18	i	4	- 1115.4	- 0.9	- 494.7	- 1614.7	- 1628.6
	j		- 1115.4	- 73.2	- 30.6	- 1293.9	- 1250.3
上弦材30	i	5	- 384.5	- 33.3	- 9.4	- 471.4	- 453.9
	j		- 384.5	31.2	- 21.8	- 387.5	- 435.9
上弦材37	i	6	- 885.4	- 62.6	- 61.7	- 1088.8	- 1049.6
	j		- 885.4	- 6.5	- 71.4	- 995.3	- 992.4

unit:kg/cm²

表－2 鋼床版応力の比較

部 材	荷重 case	平均軸力 による応力	格点導入力 による応力	面内曲げ による応力	合計応力	有限要素解
上弦材 2	i	1	- 8.1	- 14.1	- 13.9	7.4
	j		- 8.1	55.8	55.4	40.8
上弦材 7	i	2	- 475.6	- 199.6	- 723.9	- 684.1
	j		- 475.6	- 139.7	- 645.2	- 637.7
上弦材17	i	3	384.8	276.4	648.3	678.9
	j		384.8	8.2	655.9	315.1
下弦材18	i	4	- 1115.4	- 3.0	- 842.0	- 773.1
	j		- 1115.4	- 250.0	- 1348.3	- 1152.4
上弦材30	i	5	- 384.5	- 41.6	- 435.5	- 415.0
	j		- 384.5	39.0	- 367.3	- 459.1
上弦材37	i	6	- 885.4	- 78.2	- 1025.3	- 978.9
	j		- 885.4	- 8.1	- 964.9	- 997.8

unit:kg/cm²

6. 参考文献

- 1) (財)災害科学研究所・神戸市港湾局：六甲アイランド連絡橋の構造解析に関する研究1975
- 2) 三井造船技報第 131号別刷：鋼床版を合成したトラス橋－高速大黒大橋の設計－1987
- 3) 小西一郎編：鋼橋設計編 I 1975

(1987年10月16日)