

鋼床版合成トラス斜張橋の力学的特性に関する研究

Mechanical Properties of Cable-Stayed Composite Truss Bridge with Steel Deck

小松 定夫
Sadao Komatsu

Synopsis:

A summary is given below of the results of a recent detailed study on the mechanical properties of long span cable-stayed composite truss bridge consisting of orthotropic steel deck and framework.

Bridge deck is proportioned and detailed primarily for the stress state of continuum, so the emphasis here is on the stress distribution in the steel deck near the nodal point where the stream of stress is abruptly disturbed.

Some simplified formulae for practical design purpose are presented on the basis of some numerical results obtained by means of FEM, and applied to the design of a big bridge with span length of 480m being constructed in the eastern part of Kobe City, Japan.

1. はじめに

鋼床版合成トラス斜張橋の鉛直面内荷重による応力評価法を図-1に示す。実務設計計算に

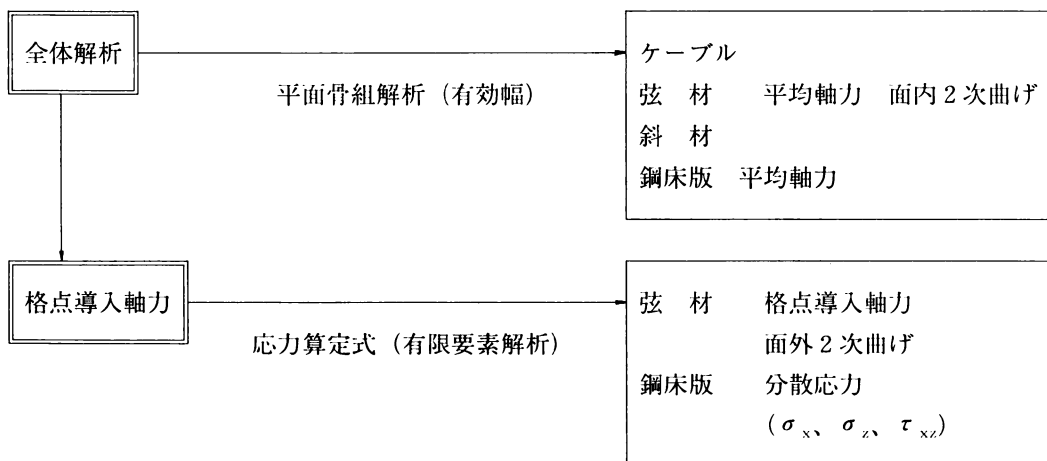


図1-1 面内鉛直荷重に対する応力評価法の流れ

において全体解析を平面骨組解析（トラスは剛節）によって行くと、その計算結果より直接求められる主構トラスの応力は主構格点付近の局所的な応力を除いた平均的な弦材応力、鋼床版応力ならびに弦材の主構面内2次曲げ応力である。

主構格点から弦材および鋼床版に導入されるケーブル力および主構斜材力の橋軸方向水平成分（以下、格点導入力と称する）による局所的応力の評価には、骨組解析によって求められた隣接した弦材の軸力差として与えられる格点導入力に着目する。

鋼床版合成トラスの数パネルを対象とした部分構造の有限要素モデルを用いて、格点導入力の弦材および鋼床版への分散特性を明らかにし、その特性を踏まえて、分散応力および格点近傍の弦材に生ずる2次的面外曲げ応力の評価法をまとめた。今回は鋼床版デッキプレートの面内応力の評価法について述べる。

2. 鋼床版応力分布

2-1 概 説

格点導入力によって生ずる主構および鋼床版デッキプレート内の応力分布特性を明らかにするために、10パネルの鋼床版合成トラス桁モデルを対象とし、上弦材の2つの格点に対向した橋軸方向水平集中荷重を作用させた状態について有限要素解析を行った。

ここでは格点導入力によって生ずる鋼床版内の応力分布特性について考察し、実務設計計算においてこの分散応力を簡単に評価することを目的とした応力算定法（3節）の基礎となる鋼床版面内最大応力と力学パラメータの関係を求める。

2-2 解析モデル

対象とする構造モデルは東神戸大橋計画案の主構トラスである。主構の骨組構成を図2-1

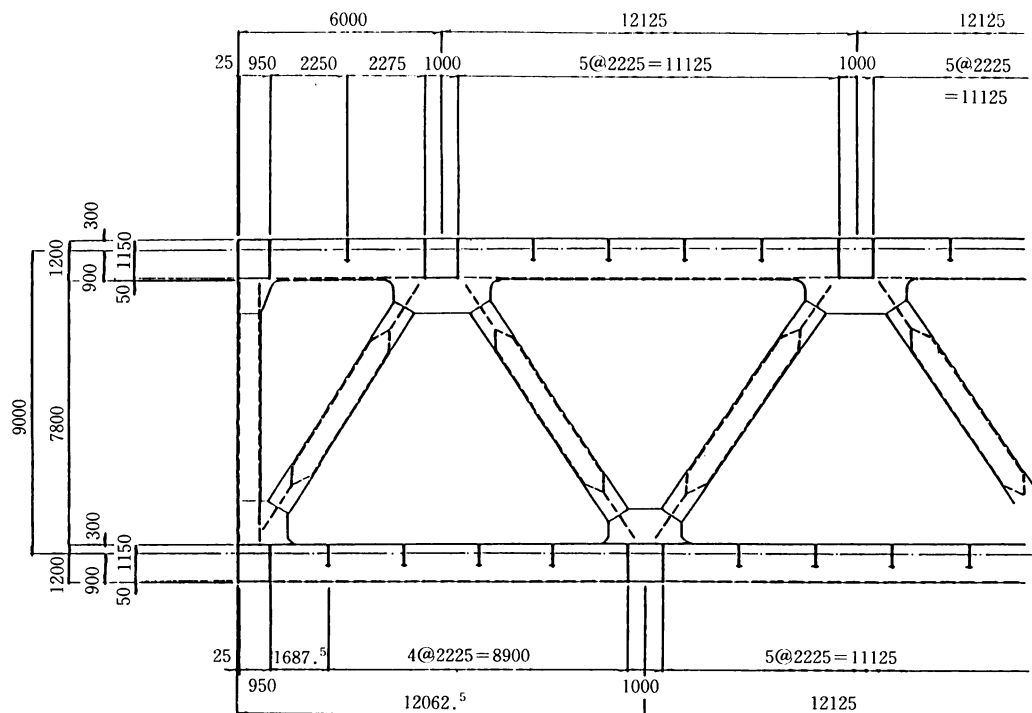


図2-1 主構トラスの構成

に、鋼床版の断面構成を図 2-2 に示す。

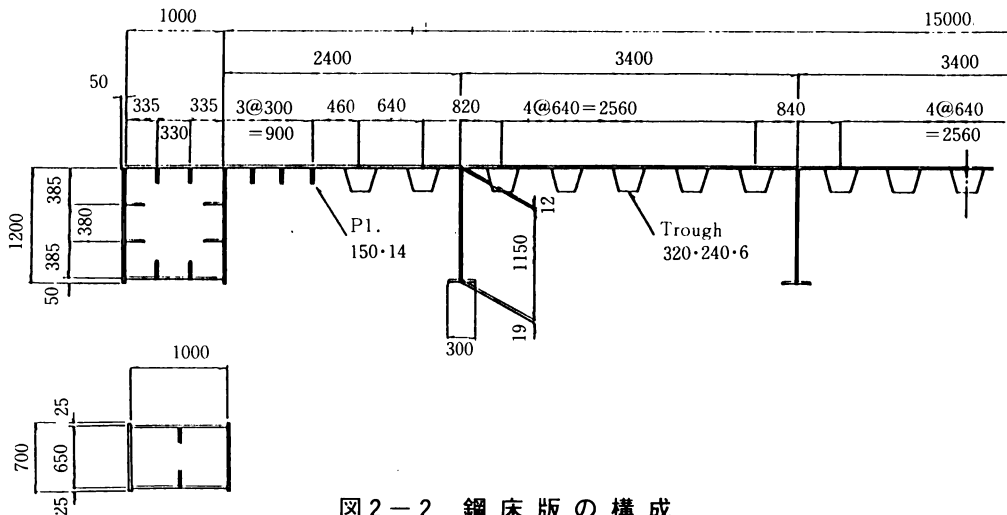


図 2-2 鋼床版の構成

鋼床版には 4 本の縦桁が配置され、それらの間に各 5 本のトラフリブが、縦桁と弦材の間には 2 本のトラフリブと平鋼リブが配置されている。横断方向には各主構格点部には閉断面横桁が、その間に 4 本の開断面横リブが配置されている。

このような鋼床版構造を可能なかぎり忠実にモデル化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 2-3 は鋼床版部の有限要素モデルを表している。デッキプレート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デッキプレート節点の従属節点としている。また弦材とデッキプレートとは弦材上縁の隅角部に設けた従属節点で結合している。

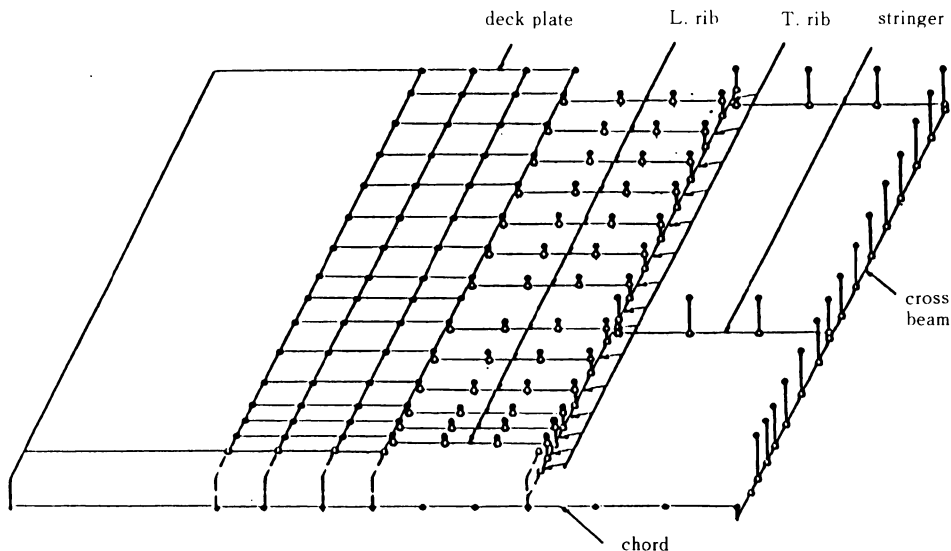


図 2-3 鋼床版の有限要素モデル

弦材、縦桁、縦リブ、横桁および横リブは全て棒要素を適用した。デッキプレートには長方形平面膜要素を適用した。板曲げを考慮していない。横断方向の要素分割は縦リブおよび縦桁

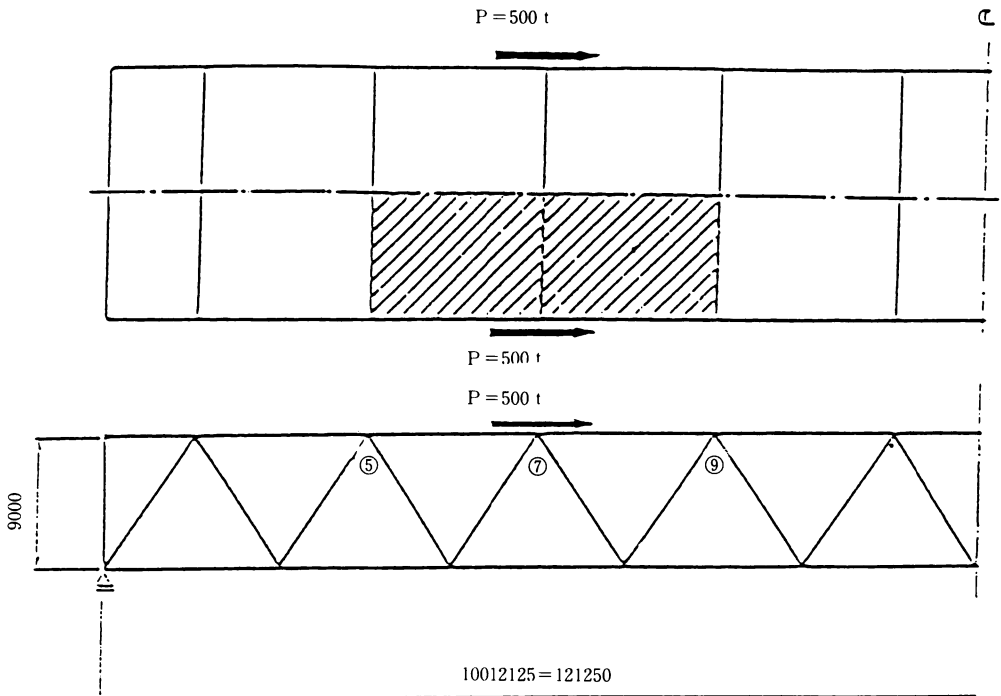


図 2 - 4 解析モデルの寸法と荷重位置

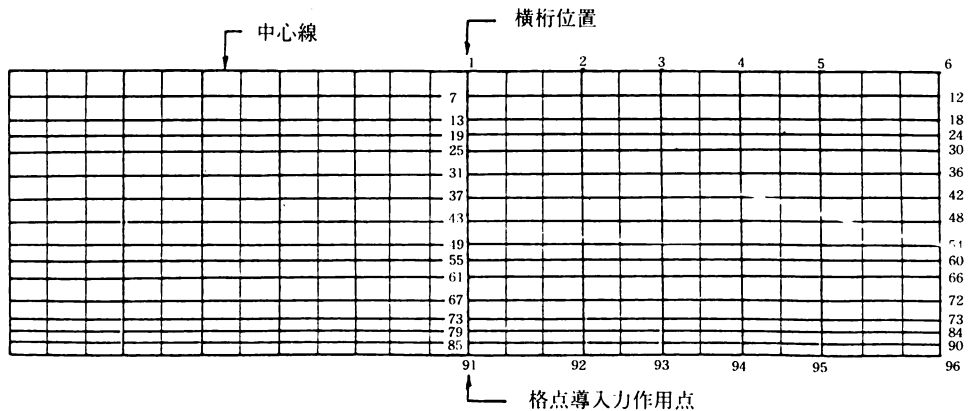


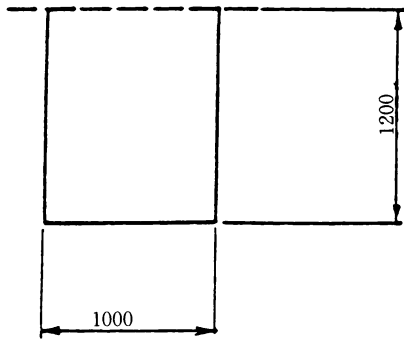
図 2 - 5 デッキプレートモデル図

位置とし、縦断方向には横リブ間で 2 分割、横桁と横リブ間で 3 分割した。(図 2 - 5)

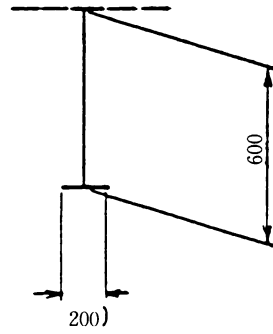
図 2 - 4 は対象とした 10 パネル鋼床版合成トラス桁モデルの構成と荷重状態を表している。構造の対称性を考慮してスパン方向および横断方向にそれぞれ 2 分割した 1/4 モデルを解析範囲としている。

この荷重状態においては初等トラス理論によると荷重作用点間の上弦材のみに外力と同じ大きさの圧縮力が生ずるのみで、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下弦材にも僅かな部材力を生ずるが、それらは無視できるほどの大きさである。またこの荷重状態の主構面内 2 次曲げモーメントも僅少である。

従って、対象とした荷重状態で外力として作用させた橋軸方向水平力は斜張橋主構トラスの 1 つの格点に作用するケーブル力および斜材力の水平成分である格点導入力と等価なものであ



(a) 閉断面横桁



(b) 開断面横桁

図 2-6 横桁断面図

と考えることができる。

予備的な解析によると格点導入力の鋼床版への分散特性に対して格点部に配置された横桁の剛性が大きく影響することが明らかになっている。そこで図 2-6 に示すように東神戸大橋計画案に用いられている剛性の大きい箱形断面の横桁および六甲大橋に用いられるような開断面横桁（横リブと同一断面）を用いた場合を解析して、鋼床版応力の分布特性の相違を明確にすることにした。

2-3 数値計算結果

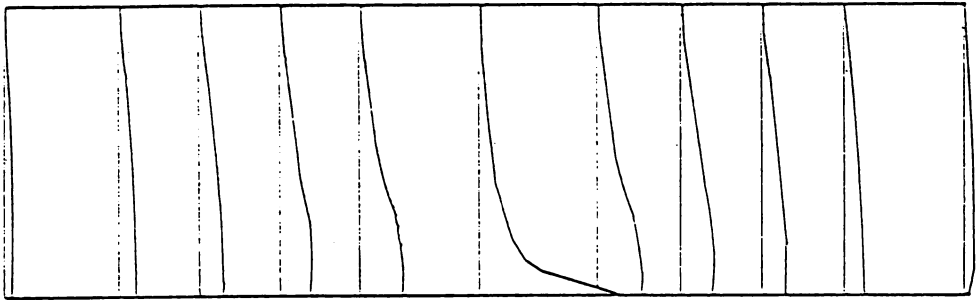
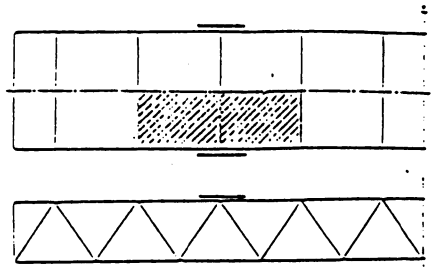
(1) セン断応力

主構弦材格点に作用した格点導入軸力は主構の 1 パネル分を経過した隣接の格点部において弦材と鋼床版とにその有効断面に応じて分担される。

図 2-7 にデッキプレート内の面内せん断応力の分布状態を開断面横桁と閉断面横桁について示した。開断面横桁の場合、格点導入力の鋼床版分担分は弦材とデッキプレートの接合辺からせん断応力として、デッキプレートに伝達する。このせん断応力は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。

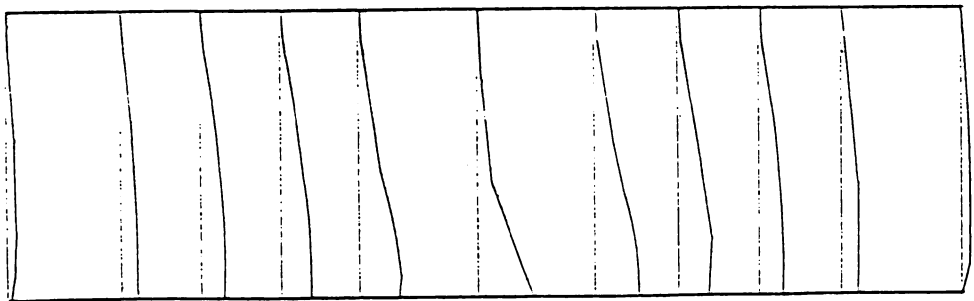
これに対して剛性の大きい閉断面横桁の場合デッキプレートのせん断応力の分布には開断面横桁に見られるような格点導入力作用点付近の鋭角的な尖がりは見られない。これは格点導入力の一部が横桁のせん断力として、鋼床版の内部まで伝達されるため、デッキプレートの局所的なせん断応力の集中が避けられている。なお横桁の上フランジに相当するデッキプレート部には応力が追加されることに注意を要する。横桁のせん断力の伝達範囲は、弦材側からみた鋼床版の第 1 トラフリブないしは第 2 トラフリブの間で、それより内側のデッキプレートのせん断応力は、開断面横桁の場合と閉断面横桁の場合とでほぼ同レベルになっている。せん断応力の橋軸方向の分布は、格点導入力の作用断面を中心として、対称になっている。

実務設計計算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力の分散角度は左右対称と考えてもよいものと思われる。また、開断面横桁と閉断面横桁の場合の橋軸方向分布せん断力の、格点と第 1 横リブの間とでは大きな相違が現れることあるがその外部では両者の相違は僅少である。



(a) 開断面横桁

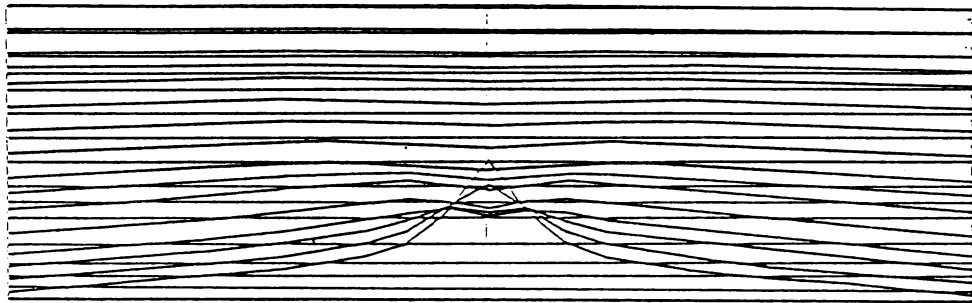
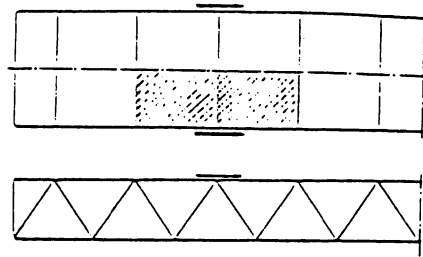
0 — 2000
(t/m²)



(b) 閉断面横桁

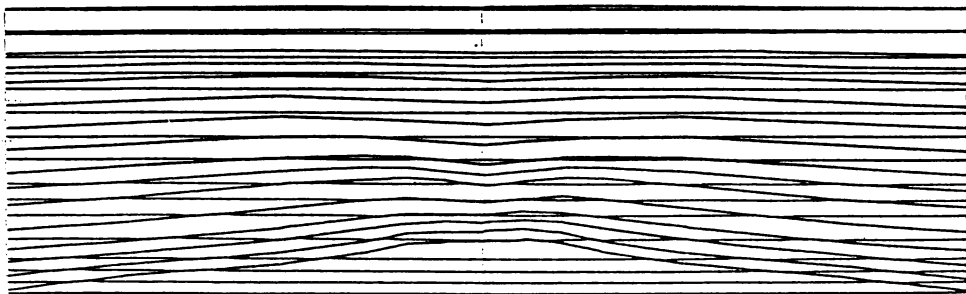
0 — 2000
(t/m²)

図 2-7-a 鋼床版面内せん断応力分布図



0 — 2000
(t/m²)

(a) 開断面横桁



0 — -2000
(t/m²)

(b) 閉断面横桁

図 2 - 7 - b 鋼床版面内せん断応力分布図

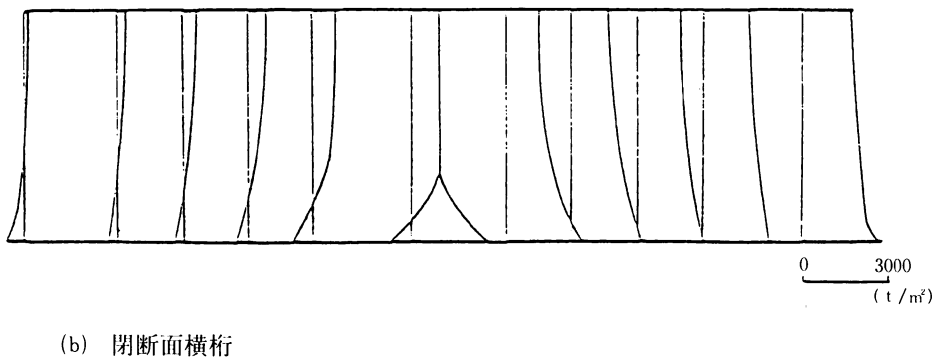
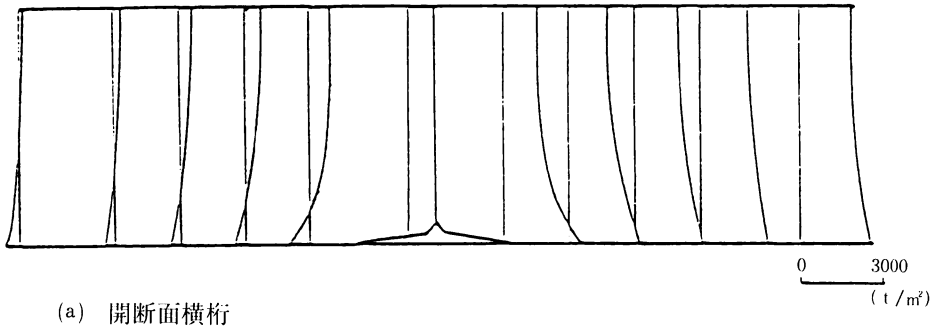
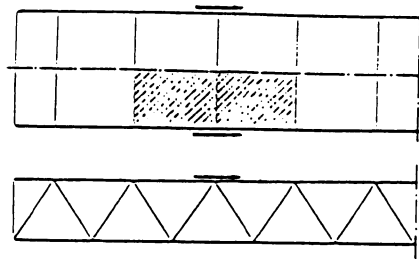


図 2 - 8 - a 鋼床版橋軸方向垂直応力の分布

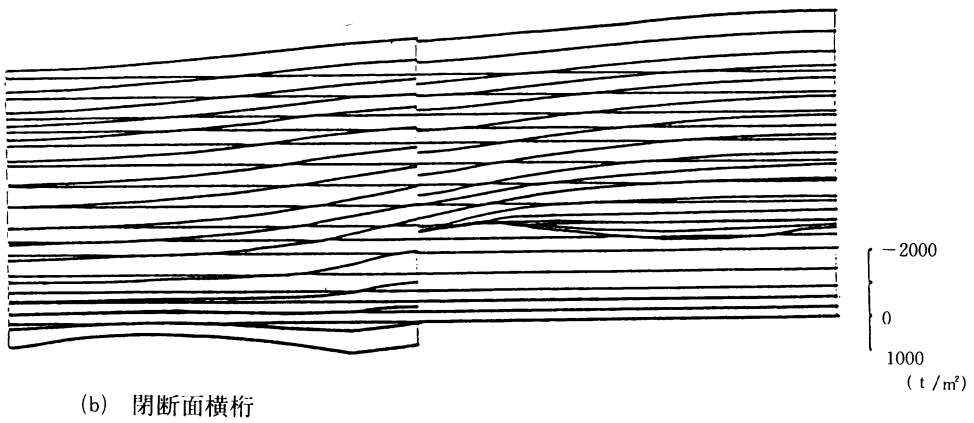
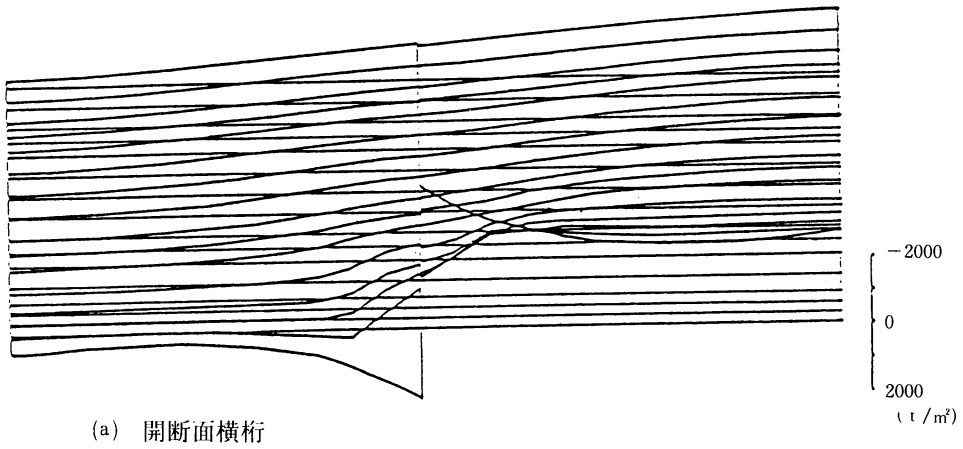
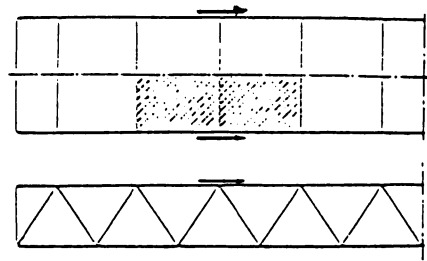


図 2 - 8 - b 鋼床版橋軸方向垂直応力の分布

(2) 橋軸方向垂直応力

図2-8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、格点導入力作用点の近傍を除いては、開断面横桁と閉断面横桁を用いた場合の応力分布に大きな差は見られない。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デッキプレート内で圧縮応力に変わって、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デッキプレートの平均圧縮応力は、格点導入力の鋼床版分担分による平均圧縮応力のほぼ1/2程度になっている。

2-4 横桁剛性を考慮した鋼床版最大応力算定式

前述の如く、格点導入力作用点近傍の応力分布には横桁の剛性が顕著に影響する。そこで実務設計計算において、使用できるような実用的応力算定式の基礎とするために、せん断応力および垂直応力と横桁剛性の関係を詳細に調べた。

横桁の鉛直軸まわりの断面2次モーメント I_b を弦材の鉛直軸まわり断面2次モーメント I_c で除して無次元パラメータとした。

図2-9では格点導入力作用点近傍のせん断応力とパラメータ I_b/I_c の関係を表している。この関係は横軸を対数にとると図2-9-bに示すようにほぼ直線で表すことができる。

$$\tau_{max} = 371.5 \cdot \ln(I_b/I_c) - 1606 \quad (2-1)$$

(単位：t/m²)

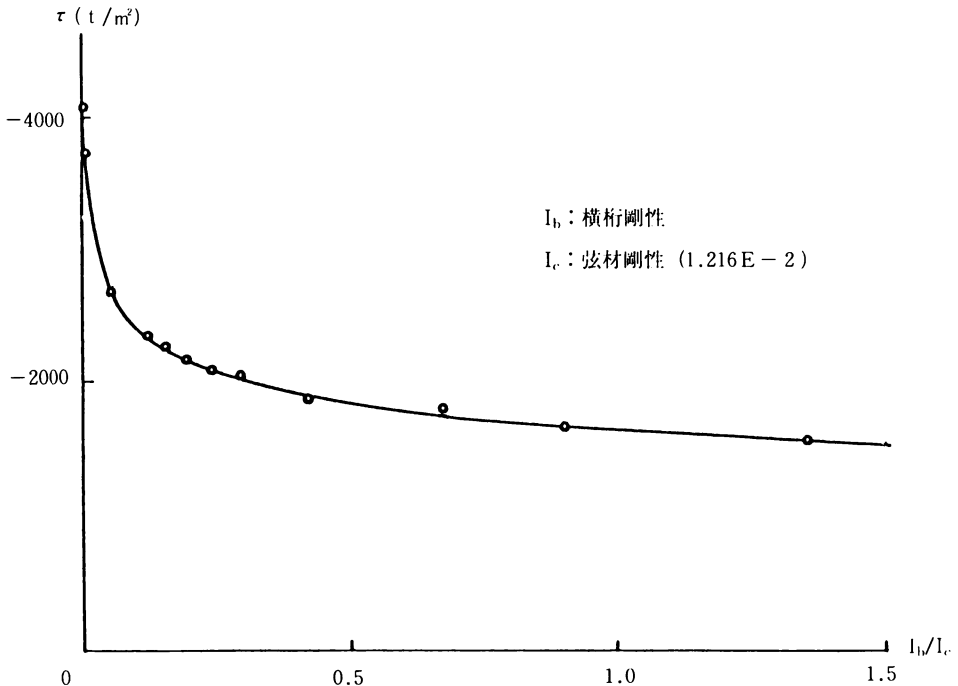


図2-9-a 弦材と横桁の剛比と最大せん断応力の関係

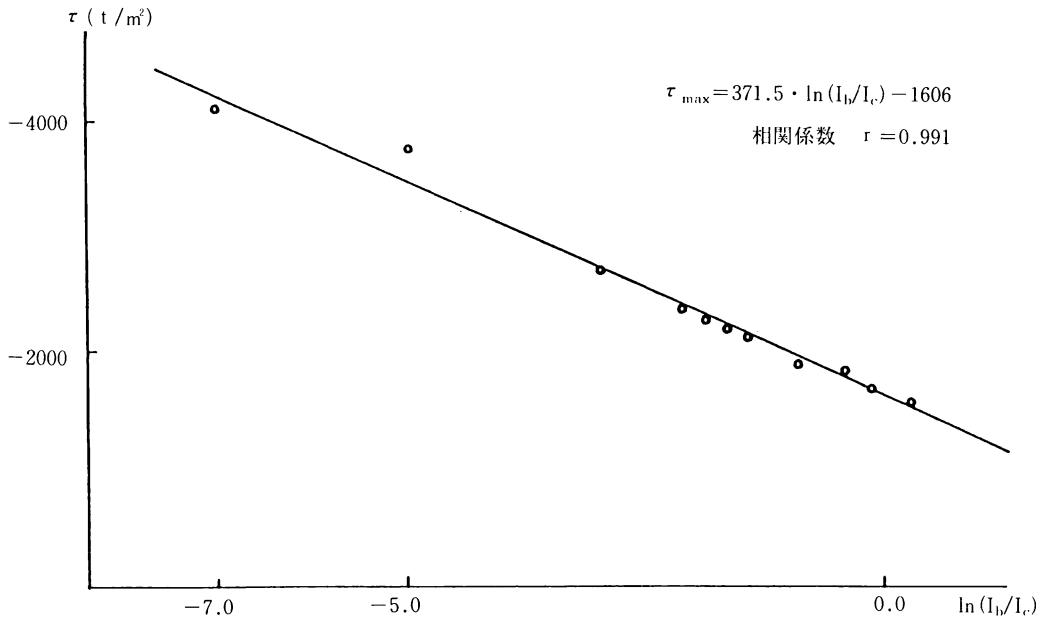


図 2-9-b 弦材と横桁の剛比と最大せん断応力の関係

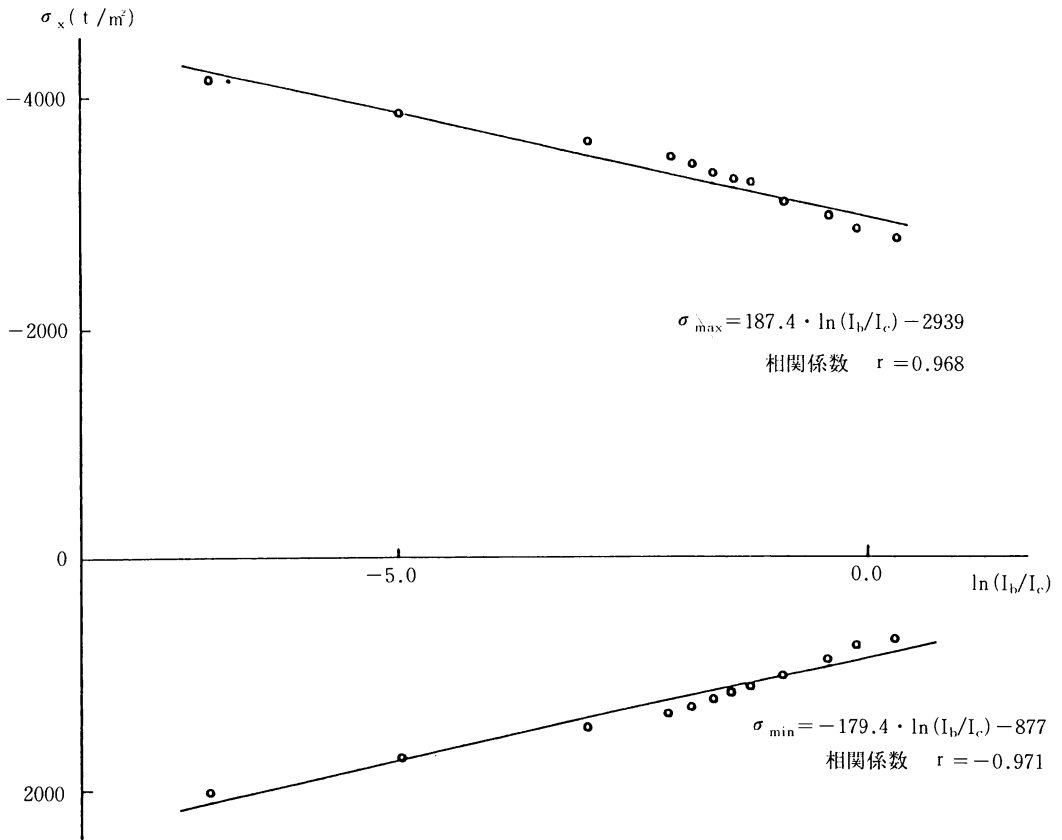


図 2-10-b 弦材と横桁の剛比と最大垂直応力の関係

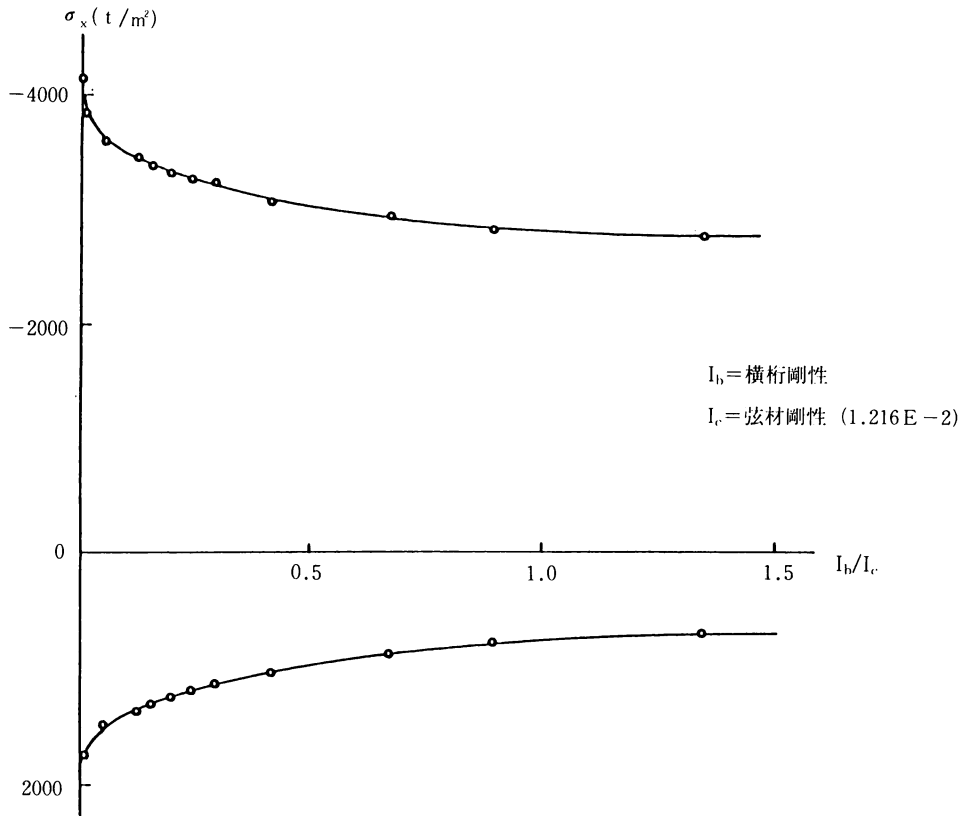


図 2-10-a 弦材と横桁の剛比と最大垂直応力の関係

同様に格点導入力の作用点の橋軸方向垂直応力とパラメータ I_b/I_c の関係を図 2-10-a に示す。図中の 2 つの曲線は格点導入力作用点の作用荷重の圧縮側と引張側の値である。垂直応力についても横軸を対数表示すると図 2-10-b に示すよう直線式で回帰できる。

圧縮応力

$$\sigma_{\max} = 187.4 \cdot \ln(I_b/I_c) - 2939 \quad (2-2)$$

(単位: t/m^2)

引張応力

$$\sigma_{\min} = -179.4 \cdot \ln(I_b/I_c) - 877 \quad (2-3)$$

(単位: t/m^2)

3. 鋼床版応力の簡易算定式

鋼床版合成トラスの有限要素モデルの主構弦材格点に橋軸方向集中荷重を作用させた場合の解析結果より、集中力を作用させた格点から鋼床版への応力の分散過程を詳細に調べた。実務設計において用いられる骨組解析によって求められる格点導入水平力を用いて、有限要素解析によって得られた鋼床版内への応力分散特性を精度良く評価するための簡易計算法を以下に述べる。ここで対象とする応力成分は主構作用による鋼床版面内の 3 成分 σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz} とする。

3-1 鋼床版せん断応力簡易算定式

(1) 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、前述の有限要素解析によって得られた応力分布特性に沿ってモデル化を行った。

- ① 橋軸直角方向の応力分布は鋼床版中央で0、弦材との接合部で最小とする三角形分布とする。
- ② 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。
- ③ 格点付近は横桁の剛性が影響する応力急変部であり、この領域と外部の領域を分けて取り扱う。

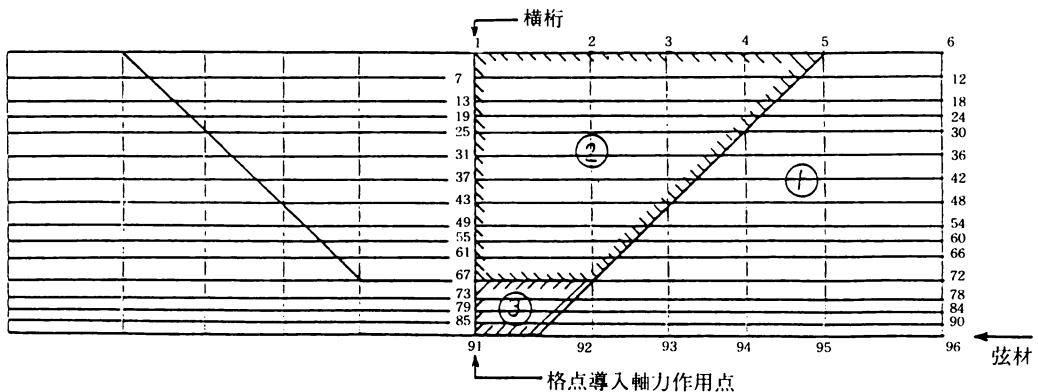


図 3-1 鋼床版せん断応力に関する計算領域区分

(2) 横桁の剛性効果

格点付近の応力急変部の応力特性について、有限要素解析により以下のことが明らかになった。

- ① 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。
- ② 格点部における最大せん断応力は式（3-1）で近似することができる。

$$\tau_{\max} / \tau_{\theta} = -0.0357 \cdot \ln(I_b / I_c) + 0.154 \quad (3-1)$$

(相関係数 $r = 0.991$)

$$\tau_{\theta} = \Delta N / H \cdot t_d \quad (3-2)$$

τ_{\max} : 最大せん断応力

ΔN : 格点導入軸力

t_d : 鋼床版板厚

B : 主構間隔

H : ガセットプレート全幅

I_b : 横桁面外剛性

I_c : 弦材面外剛性

- ③ 格点付近の応力は第1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(3-3)～(3-5)で横桁線上の鋼床版せん断応力を近似できる。

$$\tau / \tau_{\theta} = C_1(z/B) + C_2 \quad (3-3)$$

$$C_1 = -0.1752 \cdot \ln(I_b/I_c) + 0.2175 \quad (3-4)$$

(相関係数 $r = -0.997$)

$$C_2 = 0.1433 \cdot \ln(I_b/I_c) - 0.05719 \quad (3-5)$$

(相関係数 $r = 0.997$)

④ 橋軸方向の影響範囲は第1横リブまでとすることができる。

(3) せん断応力算定式

(2) 以外の範囲においては、鋼床版のせん断応力は式(3-6)で近似することができる。

$$\tau / \tau_{\theta} = -0.1571 \cdot (x/a - 1.146)(z/B) \quad (3-6)$$

a: 格間長

(4) せん断応力の計算過程

以上により鋼床版のせん断応力は以下の手順を用いて算定する。

1) 横桁剛性の影響範囲外についての応力を式(3-6)にて算定する。

ここでいう影響範囲は以下のことを意味する。

橋軸方向 格点～第1横リブ

橋軸直角方向 格点～第1トラフリブ

ただし仮定②を用いる。

2) 横桁の影響範囲内については、まず横桁線上のせん断応力を式(3-1)～(3-5)

で求め、その他の部分については(1)で求めた応力と直線補間して算定する。

3-2 鋼床版橋軸方向垂直応力の簡易算定式

(1) 垂直応力分布のモデル化

垂直応力のモデル化に当たって以下の仮定を用いるものとする。

① 微小要素の釣合式(3-7)より垂直応力の橋軸方向の分布は

$$\partial \tau / \partial z = -\partial \sigma_x / \partial x \quad (3-7)$$

(3-8)式で表現されるような放物線分布となる。

$$\sigma_x / \sigma_{\theta} = C_1(x/a)^2 + C_2(x/a) + C_3 \quad (3-8)$$

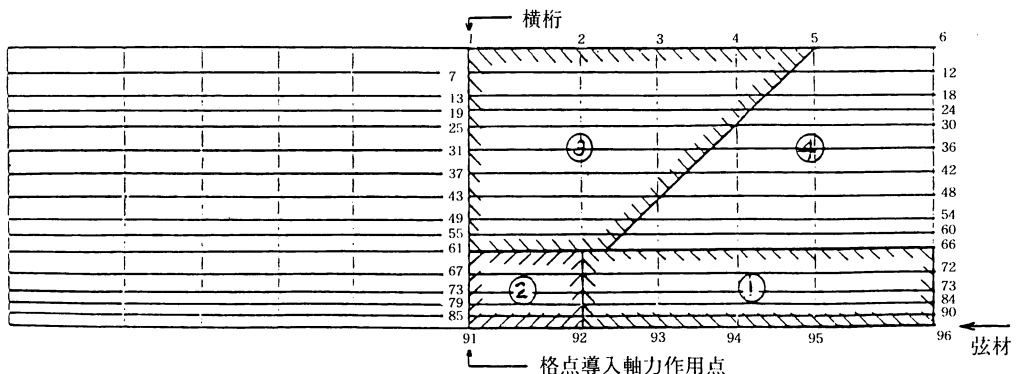


図3-2 鋼床版橋軸方向垂直応力に関する計算領域区分

- ② せん断応力分布の仮定②における分布角を仮定した線で囲まれる領域では一定勾配をもつ直線分布とする。
- ③ 格点部付近に横桁の剛性が関与する応力急変部がある。

(2) 横桁の剛性効果

有限要素解析より格点付近の応力急変部について以下のことが明らかになった。

- ① 格点部付近では横桁の剛性の相違によって応力分布は明らかに異なるが次第に収束し一定値をとる。

- ② 格点部における最大垂直応力は式(3-9)で近似することができる。

$$\sigma_{x_{\max}}/\sigma_{\theta} = -0.0915 \cdot \ln(I_b/I_c) + 1.435 \quad (3-9)$$

(相関係数 $r=0.968$)

$$\sigma_{\theta} = \Delta N/A \cdot \quad (3-10)$$

$\sigma_{x_{\max}}$: 格点部に生じる鋼床版最大垂直応力 (t/m^2)

ΔN : 格点導入軸力 (t)

A : 有効断面積 (m^2)

I_b : 横桁面外剛性 (m^4)

I_c : 弦材面外剛性 (m^4)

- ③ 格点部付近の応力分布においてその分布形状は第2トラフリブで収束し横桁面外剛比が $(I_b/I_c) \geq 0.15$ であるような閉断面横桁の場合式(3-11)～(3-14)で横桁上の鋼床版垂直応力を近似できる。

また第2トラフリブからの鋼床版垂直応力は一定となる。

$$\sigma_x/\sigma_{\theta} = C_1(z/B)^2 + C_2(z/B) + C_3 \quad (3-11)$$

$$C_1 = -7.993 \cdot \ln(I_b/I_c) + 9.000 \quad (3-12)$$

(相関係数 $r=-0.992$)

$$C_2 = 13.17 \cdot \ln(I_b/I_c) - 12.28 \quad (3-13)$$

(相関係数 $r=0.991$)

$$C_3 = -5.328 \cdot \ln(I_b/I_c) + 4.656 \quad (3-14)$$

(相関係数 $r=-0.990$)

$2B$: 鋼床版全幅

- ④ ③の領域では垂直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橋軸方向においては第1横リブ～第4横リブ橋軸直角方向においては弦材接合線より第2トラフリブによって囲まれる領域の鋼床版垂直応力分布は以下の式(3-15)～(3-18)で近似することができる。

$$\sigma_x/\sigma_{\theta} = C_1(x/a)^2 + C_2(x/a) + C_3 \quad (3-15)$$

$$C_1 = 21.62(z/B)^2 - 31.15(z/B) + 10.60 \quad (3-16)$$

$$C_2 = -28.37(z/B)^2 + 40.18(z/B) - 13.23 \quad (3-17)$$

$$C_3 = 8.285(z/B)^2 - 10.65(z/B) + 3.967 \quad (3-18)$$

a : 格間長

(3) 鋼床版の垂直応力算定式

せん断応力分布の仮定①の分布角線で囲まれる領域外の鋼床版の応力は(1)の仮定①を用いて

$$\sigma_x / \sigma_\theta = 0.1571C_1 \{ -(x/a)^2 + 2.292(x/a) + C_2 \} \quad (3-19)$$

$$C_1 = a \cdot A \cdot / 2 B t_d \cdot H \quad (3-20)$$

$$C_2 = 0.4025(z/B) + 0.05480 \quad (3-21)$$

(相関係数 $r=0.967$)

(4) 垂直応力の計算過程

以上により橋軸方向鋼床版垂直応力は以下の手順を用いて算定する。

1) 領域を次のように分割する。

第1領域 橋軸方向は第1～第4リブ、橋軸直角方向は弦材接合線～第2トラフリブで囲まれた部分

第2領域 横桁線上の弦材接合線～第2トラフまでの部分

第3領域 せん断応力分布の仮定①による分布角線で囲まれる領域から第1・第2領域を除く部分

第4領域 鋼床版から第1～第3領域を除く部分

2) 以下の領域の垂直応力を求める

第1領域：式(3-15)～(3-18)

第2領域：式(3-9)～(3-10)

第4領域：式(3-19)～(3-21)

3) 第3領域においては直線補間する。

3-3 橋軸直角方向鋼床版垂直応力の算定式

(1) 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った。

① 橋軸直角方向の応力分布は微小要素の釣合式(3-22)より(3-23)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、鋼床版中央で最小となり、せん断応力分布の仮定①の分布角線で囲まれる領域では橋軸直角方向に一様分布とする。

$$\partial \tau / \partial x = -\partial \sigma_x / \partial z \quad (3-22)$$

$$\sigma_x / \sigma_\theta = C_1(z/B)^2 + C_2(z/B) + C_3 \quad (3-23)$$

② 横桁の剛性効果の影響する範囲は橋軸直角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。

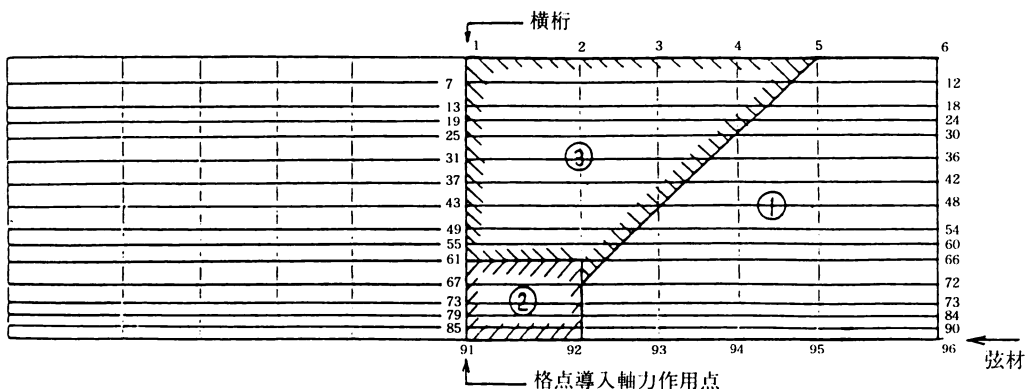


図3-3 鋼床版橋軸直角方向垂直応力に関する計算領域区分

③ 橋軸方向の応力分布は②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。

(2) 横桁の剛性効果

横桁の剛性による格点部の応力急変部を解析したところ以下のことが明らかになった。

- ① 格点部付近では横桁の剛性の相違によって応力分布は明らかに異なるが次第に一定値となる。
- ② 橋軸方向の急変応力の分布は格点部に生じる応力値と第1横リブの応力値（0とみなす）を直線で結んだ三角形に近似できる。
- ③ 格点部に生じる最大垂直応力は式（3-24）で近似できる。

$$\sigma_{zmax} / \sigma_{\theta} = -0.03205 \ln(I_b / I_c) + 0.3723 \quad (3-24)$$

(相関係数 $r = -0.956$)

ここに $\sigma_{\theta} = \Delta N / A \cdot$

σ_{zmax} : 格点部に生じる鋼床版最大垂直応力

ΔN : 格点導入軸力

I_b : 横桁面外剛性

I_c : 弦材面外剛性

$A \cdot$: 有効断面積

- ④ 格点付近の応力は第2トラフリブで収束し、そこから一定値をとると仮定することができ、横桁の面外剛比が $(I_b / I_c) \geq 0.15$ であるような閉断面の場合式（3-26）～（3-29）で横桁線上格点～第2トラフリブの応力を近似できる。

$$\sigma_z / \sigma_{\theta} = C_1 (z/B)^2 + C_2 (z/B) + C_3 \quad (3-26)$$

$$C_1 = -2.653 \ln(I_b / I_c) + 2.891 \quad (3-27)$$

(相関係数 $r = -0.998$)

$$C_2 = 4.360 \ln(I_b / I_c) - 3.873 \quad (3-28)$$

(相関係数 $r = 0.998$)

$$C_3 = -1.758 \ln(I_b / I_c) + 1.336 \quad (3-29)$$

(相関係数 $r = -0.997$)

$2B$: 鋼床版全幅

また第2トラフリブ～鋼床版中央の応力は一定値とすることができる。

(3) 鋼床版の垂直応力算定式

第1横リブ～第4横リブによって囲まれる領域からせん断応力分布の仮定①による分布線に囲まれる領域と(2)の領域を除く部分に生じる垂直応力は式（3-30）～（3-33）で近似することができる。

$$\sigma_z / \sigma_{\theta} = C_1 (x/a)^2 + C_2 (x/a) + C_3 \quad (3-30)$$

$$C_1 = 1.836 (x/a)^2 - 1.035 (x/a) - 0.6339 \quad (3-31)$$

$$C_2 = -2.546 (x/a)^2 + 1.903 (x/a) + 0.2142 \quad (3-32)$$

$$C_3 = 1.248 (x/a)^2 - 1.436 (x/a) + 0.5517 \quad (3-33)$$

(4) 橋軸直角方向垂直応力の計算過程

- 1) 横桁線上及び弦材接合線上の応力を式（3-24）～（3-29）及び(2)④を用いて計算

する。

- 2) 第1横リブ～第4横リブによって囲まれる領域からせん断応力分布の仮定①による分布線に囲まれる領域と(2)の領域を除く部分の応力を式(3-30)～(3-33)で近似する。
- 3) (2)によって近似した分布線上の応力はせん断応力分布の仮定①による分布線に囲まれる領域において橋軸直角方向に一定値をとる。
- 4) その他の部分については直線補間する。

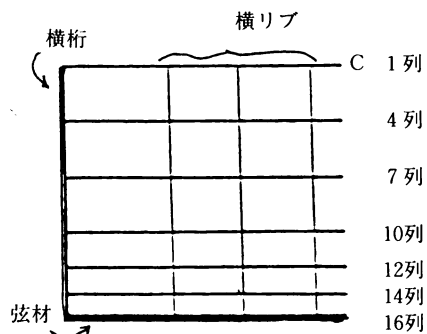
4. むすび

近年湾岸地域の軟弱地盤上に吊橋に代って長大斜張橋が建設されるようになったが、耐風安定性の観点から鋼床版トラス主構を有する新しい形式の斜張橋が注目を浴びつつある。

本研究においては、この種の橋梁の強度設計において重要な課題である格点付近での直交異方性鋼床版の面内応力の攪乱状態を明らかにすると共に、鋼床版の寸法決定ならびに構造詳細設計において問題視される垂直応力およびせん断力を算定するための実用計算公式を提供することができた。その成果は世界における最大級の斜張橋である東神戸大橋の強度設計に役立っている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり大阪産業大学産業研究所から特別研究費の補助を受けることができた。学校法人大阪産業大学当局ならびに産業研究所関係各位に対して深甚の謝意を表する次第である。



付表 3-1 有限要素解と簡易式によるせん断応力の比較

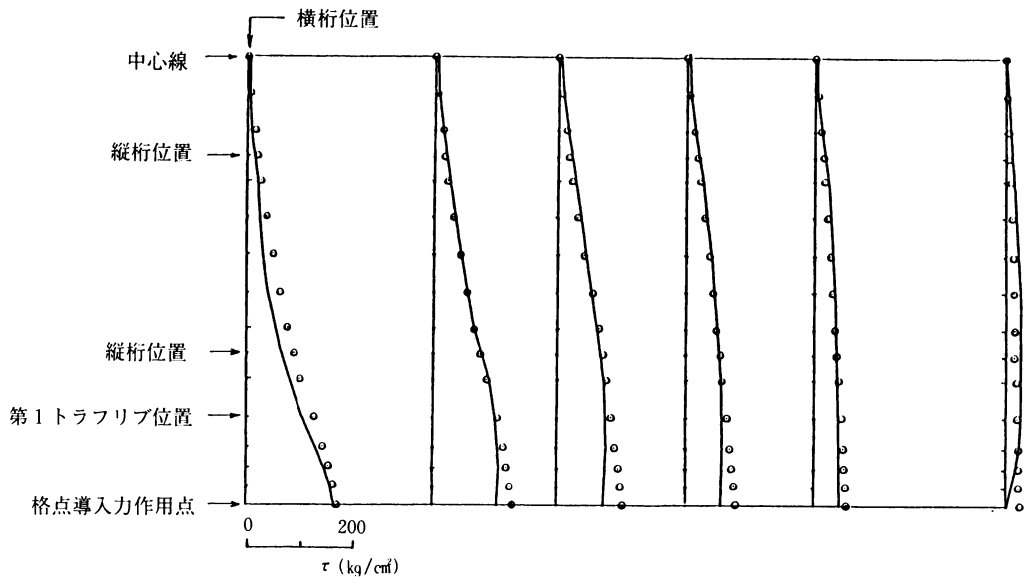
| 列 | 有 限 要 素 解 | | | | 簡 易 式 解 | | | |
|----|-----------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|--------|
| | 1 | -44.4 | -51.6 | -50.3 | -43.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4 | -141.2 | -223.1 | -252.1 | -228.4 | -186.7 | -186.7 | -186.7 | -186.7 |
| 7 | -294.4 | -497.1 | -520.9 | -445.1 | -476.6 | -476.6 | -476.6 | -410.7 |
| 10 | -645.9 | -888.6 | -787.8 | -604.4 | -871.4 | -871.4 | -821.0 | -616.7 |
| 12 | -1,016.1 | -1,136.4 | -894.9 | -646.9 | -1,260.0 | -1,182.6 | -988.8 | -742.8 |
| 14 | -1,454.9 | -1,229.2 | -892.4 | -644.9 | -1,508.5 | -1,386.6 | -1,111.1 | -834.1 |
| 16 | -1,663.0 | -1,194.6 | -839.1 | -620.8 | -1,663.0 | -1,507.2 | -1,207.7 | -906.6 |

unit : t/m²

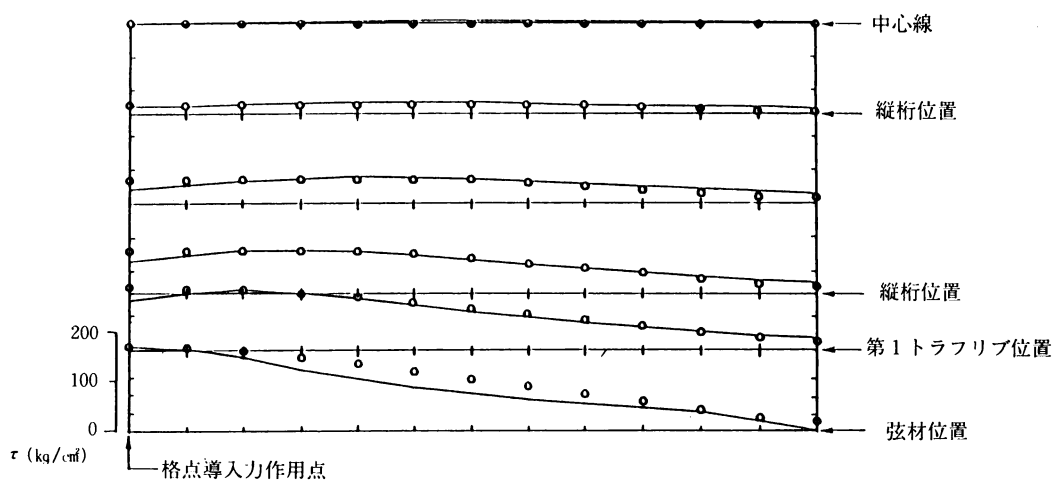
付表 3-2 有限要素解と簡易式による橋軸方向垂直応力の比較

| 列 | 有 限 要 素 解 | | | | 簡 易 式 解 | | | |
|----|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | -984.9 | -1,182.1 | -1,367.9 | -1,545.0 | -998.1 | -1,181.0 | -1,330.4 |
| 4 | -998.6 | -1,195.9 | -1,397.3 | -1,581.6 | -998.1 | -1,207.1 | -1,377.7 | -1,548.4 |
| 7 | -926.2 | -1,257.5 | -1,509.7 | -1,702.7 | -998.1 | -1,224.1 | -1,408.7 | -1,644.7 |
| 10 | -1,036.4 | -1,514.7 | -1,771.9 | -1,921.5 | -998.1 | -1,222.6 | -1,451.3 | -1,765.8 |
| 12 | -1,287.9 | -1,890.5 | -2,057.3 | -2,117.4 | -1,281.2 | -1,899.5 | -2,045.1 | -2,134.8 |
| 14 | -1,971.5 | -2,310.1 | -2,282.5 | -2,244.3 | -1,995.0 | -2,318.4 | -2,271.8 | -2,258.4 |
| 16 | -2,815.1 | -2,739.2 | -2,460.2 | -2,330.7 | -2,960.5 | -2,739.1 | -2,460.6 | -2,328.6 |

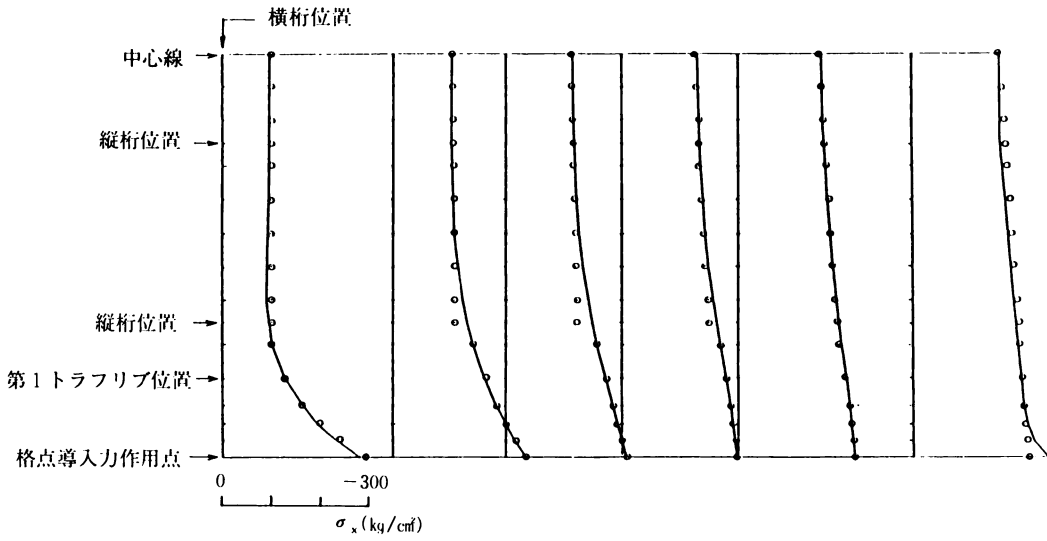
unit : t/m²



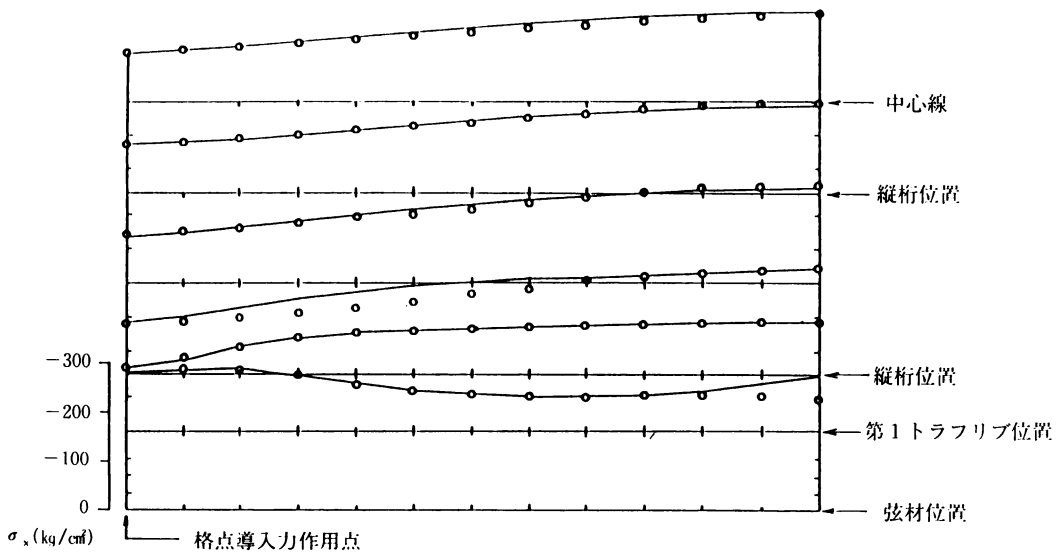
付図 3-4-a 有限要素解と簡易式によるせん断応力の比較



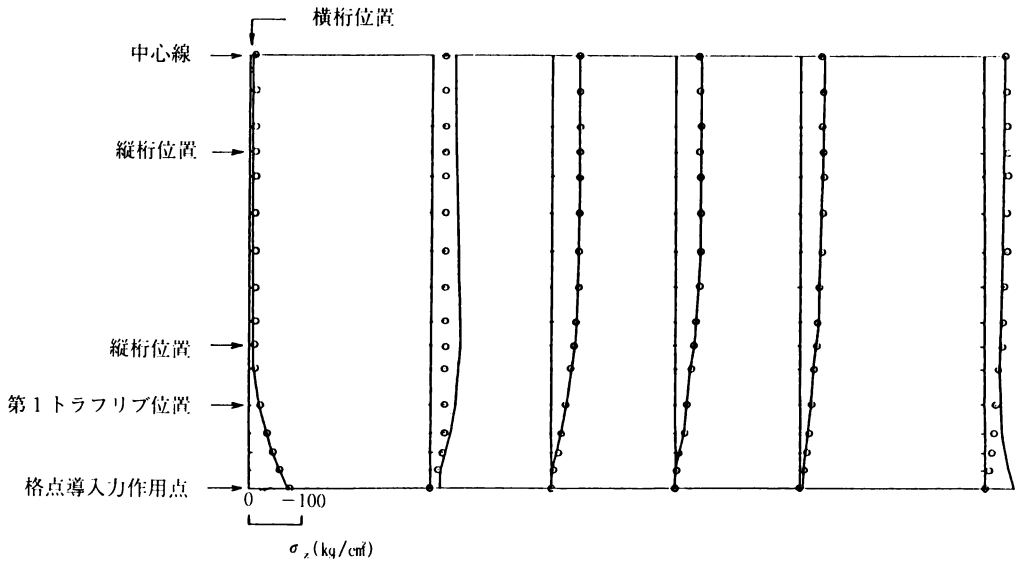
付図 3-4-b 有限要素解と簡易式によるせん断応力の比較



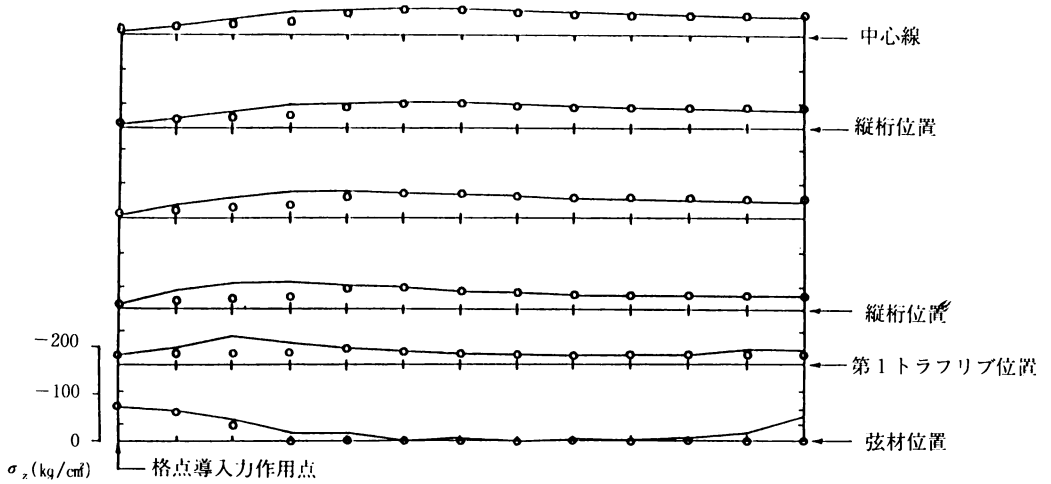
付図 3-5-a 有限要素解と簡易式による橋軸方向垂直応力の比較



付図 3-5-b 有限要素解と簡易式による橋軸方向垂直応力の比較



付図 3-6-a 有限要素解と簡易式による橋軸直角方向垂直応力の比較



付図 3-6-b 有限要素解と簡易式による橋軸直角方向垂直応力の比較