

一定せん断流パネルを用いた鋼・コンクリート合成桁の解析方法

Analytical Method Using "the Constant Shear Flow Panels" for Composite Girder Bridges

明橋 克良*, 熊谷 和人**, 尾下 里治***

Katsuyoshi Akehashi, Kazuto Kumagai and Satoji Oshita

* 工修 (株)横河ブリッジ 技術本部研究所 (〒261 千葉県千葉市美浜区新港88番地)

** (株)横河技術情報 橋梁エンジニアリング事業部 (〒273 千葉県船橋市山野町27番地)

*** 工博 (株)横河ブリッジ 橋梁本部技術部 (〒273 千葉県船橋市山野町27番地)

Composite girder bridges are analyzed using the constant shear flow panels in this paper. Elastic connections between concrete slab and steel girders are modeled as the constant shear flow panels with the edge members which transfer the linear axial forces.

For simple supported composite girder bridges, the validity of the proposed method is discussed in comparison with theoretical values. A tentative design of composite twin girder bridge is conducted to verify a practical use of this proposed method.

Key Words: the constant shear flow panel, composite girder bridges

1. まえがき

合成桁に代表されるような鋼とコンクリートとの合成部材からなる構造物を解析する際、コンクリート断面をヤング係数比によって鋼断面に換算した合成断面を用いて計算されることが多い。クリープや乾燥収縮あるいは床版コンクリートと鋼桁との温度差による荷重などの影響を1合成部材として解析する場合、コンクリートのヤング係数を変化させた剛度を用いる煩雑な計算が必要になる。そこで、合成部材を1部材で代表させずに、コンクリート部材と鋼部材とを独立した2部材でモデル化すれば、こうした計算は簡単なものになり、コンクリート部材と鋼部材の部材力が直接求められるという利点がある。しかし、これまでのオフセットビームなどを用いた解析法では問題が多く、実用的ではないとされていた¹⁾。

本文で提案する方法は、これまで鋼床版のモデル化に用いてきた“一定せん断流パネル”を、コンクリート部材と鋼部材との間に挿入して合成部材を解析するものである。オフセットビームを用いる場合に比べて、粗い要素分割でも応力変化が滑らかで精度の高い結果が得られるため、実務設計に対しても十分に適用可能なものとなっている。また、本解析法は次のような多くの利点を有する。

- (1) 一定せん断流パネルのせん断剛性を変化させることにより、コンクリート床版と鋼桁との弾性的な結合状態を評価できる。つまり、不完全合成桁や断続合成桁の解析が可能となる。
- (2) ずれ止めに作用する水平せん断力を直接算出できる。

- (3) コンクリート床版面も一定せん断流パネルを用いて立体的にモデル化すれば、床版のせん断遅れやそり応力なども厳密に評価できる。

本文では、まず、単純支持の不完全合成桁を計算例として取り上げ、理論値²⁾との比較を通じて本解析法の基本的な精度や実用性を確認する。

次に、実橋を想定した広幅員2主桁橋に本解析法を適用して、道路橋示方書³⁾に準じた設計荷重を考慮して試設計を行う。そして、中間支点部の負曲げ領域における床版の評価法、床版のせん断遅れ、ずれ止めに作用する水平せん断力など、設計上の諸問題に対して本解析法の有効性を確認する。

2. 一定せん断流パネルを用いた解析法

2.1 解析法の概要

本解析法では、コンクリート床版と鋼桁との図心間に一定せん断流パネルを挿入し、そのパネルの四辺には線形に変化する軸力を伝える縁部材を取り付ける。一定せん断流パネルは、床版と鋼桁間に働く水平せん断力を伝達し、一方、四辺に取り付けた縁部材は曲げに伴う垂直応力に対して抵抗するとともに床版と鋼桁との間隔を保持する。したがって、一定せん断流パネルの板厚を変化させることにより、上下部材間の結合の度合いを評価することが可能となる。

本解析法と同様に床版と鋼桁とを2部材で代表させて合成桁を解析するものとしては、両者を直接剛体棒で連結する方法⁴⁾やオフセットビーム要素⁵⁾を用いる方法な

どがある。しかし、このような方法では、部材両端部に節点力が集中的に作用するため、偏心によって生じる軸力や曲げモーメントは不連続に変化する。すなわち、部材中央点での値のみが正解となり、精度を上げるためには節点間隔を密にしなければならず実用的に問題がある。

これに対して、一定せん断流パネルと縁部材を用いた方法では、通常の変位法では存在しないせん断流という要素力が導入されており、変位法での適用にあたっては、応力法におけるたわみ性マトリックスを適当な変換を行うことによって求めた剛性マトリックスを使用している。一定せん断流パネルの四辺に取り付く縁部材の軸力が、i端とj端との間で線形に変化するので、離散的な節点力は生じず、軸力や曲げモーメントは節点位置で連続したものとなる。よって、通常の骨組解析で行われる横桁間隔程度の粗い要素分割でも十分な精度が得られる。定式化については文献6)、7)を参照されたい。

ただし、1パネル内のせん断流は一定となるため、水平せん断力が急変する支点部ではある程度細かい要素分割が必要となる。

2. 2 モデル化(図-1 参照)

- (1) コンクリート床版および鋼桁の梁部材は、それぞれの図心位置で一定せん断流パネルの縁部材としてモデル化され、それらの剛性には断面積と断面2次モーメントを考慮する。
- (2) コンクリート床版と鋼桁との図心を結ぶ縁部材の剛性には、断面積(仮想の大きな値)のみを考慮し、両端はピン結合とする。
- (3) 橋軸方向の要素分割は横桁あるいは対傾構間隔を基本とし、水平せん断力が急変する支点部および集中荷重載荷点のみある程度細分化する。
- (4) コンクリート床版と鋼桁との弾性結合の影響は、一定せん断流パネルの板厚 t として以下の様に求めることができる。

コンクリート床版と鋼桁間に水平せん断力 H (tf/m)が作用したときのずれ量は、

$$\delta = \frac{H}{C} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 C : 弾性結合のバネ定数(tf/m²)
一定せん断流パネルにせん断力 H が作用した場合のせ

ん断変形量は、

$$\delta = \frac{H \cdot h}{t \cdot G} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 h : 鋼桁とコンクリート床版との図心間隔(m)
 G : 一定せん断流パネルのせん断弾性係数
(=8.1×10⁶tf/m²)。

(1), (2)式より

$$t = \frac{C \cdot h}{G} \quad \dots\dots(3)$$

3. 不完全合成桁の解析

3. 1 解析モデル

実橋における合成桁あるいは非合成桁では、コンクリート床版と鋼桁との間に弾性的な橋軸方向ずれが生じるので、両者の合成の度合いはずれ止めの剛性によって変化する。この合成度の評価に対して、次式で示されるフレキシビリティ一定数 S が一般的によく使われている⁸⁾。

$$S = \sqrt{\frac{k_0}{C}} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 k_0 : 基準バネ定数(=2.0×10⁵tf/m/m)。

文献2)で示されている弾性合成桁の理論値と本解析法による解析値とを比較するため、この S を以下の3種類に変化させて解析した。一定せん断流パネルの板厚は、(3)および(4)式から求めて、弾性結合の度合いを評価している。

$$S = \begin{cases} 0.6 \cdots \text{実橋の合成桁程度} (t=96.5\text{mm}) \\ 2.0 \cdots \text{実橋の非合成桁} (t=8.69\text{mm}) \\ 7.0 \cdots \text{文献8)において理論上の非合成桁とされている値} (t=0.71\text{mm}) \end{cases}$$

解析モデルは1/2モデルの単純合成桁($l=30\text{m}$)とし、以下の二種類の荷重について解析を行った(断面諸元は図-2内に示す)。

- a) スパン中央に集中荷重 $P=20\text{tf}$ を載荷
- b) 床版と鋼桁との温度差 ΔT (=10°C)に相当する荷重として床版部材に軸方向荷重 P_1 を載荷

$$P_1 = E_c \cdot \epsilon_t \cdot A_c \quad \dots\dots(5)$$

$$\epsilon_t = \alpha \cdot \Delta T \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 E_c : 床版のヤング係数(=3.0×10⁶tf/m²)

A_c : コンクリート床版の断面積

α : 線膨張係数(=12×10⁻⁶/°C)。

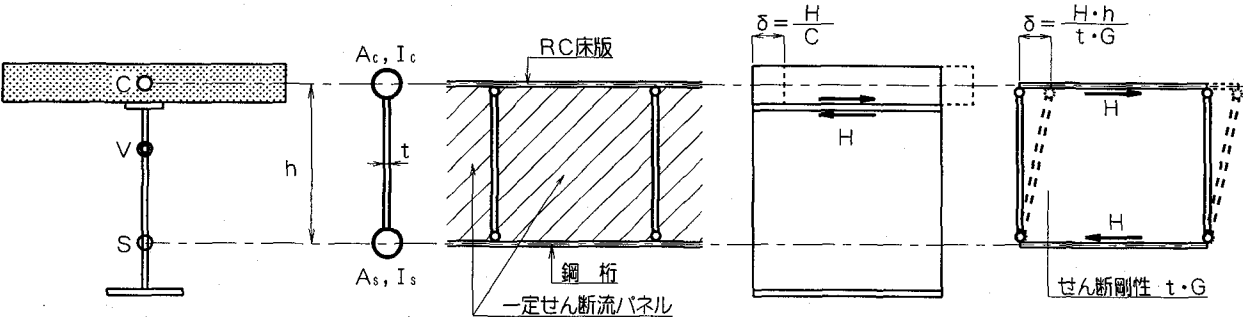


図-1 合成桁のモデル化

3. 2 解析結果

本解析法によって求めた部材軸力 N 、水平せん断力 H および鋼桁・床版の曲げモーメント M_s 、 M_b と文献2)の方法で求めた理論値とを比較したものを図-2に示す。同図には、対象とした合成桁の断面諸元も付記する。この図から、以下のことがわかる。

- 1) 合成の度合いが低い解析値 ($S=2.0, 7.0$) は、いずれの断面力も理論値と良好な一致を示している。
- 2) 合成の度合いの高い解析値 ($S=0.6$) は、温度差荷重において断面力が急変する箇所 (荷重集中点) で理

論値よりやや大きめの値を示しているものの全体的には良好な一致を示している。

3) 実橋の非合成桁 ($S=2.0$) だけでなく、文献8)で述べられている理論上の非合成桁 ($S=7.0$) でさえ、水平せん断力や軸力の値は大きいことがわかる。

4) 実橋の非合成桁は合成桁とほぼ同程度の合成度を有していることから、鋼桁に対しては安全側の設計となるものの連続非合成桁の中間支点付近の床版に対しては合成桁と同程度の設計上の配慮が必要である。

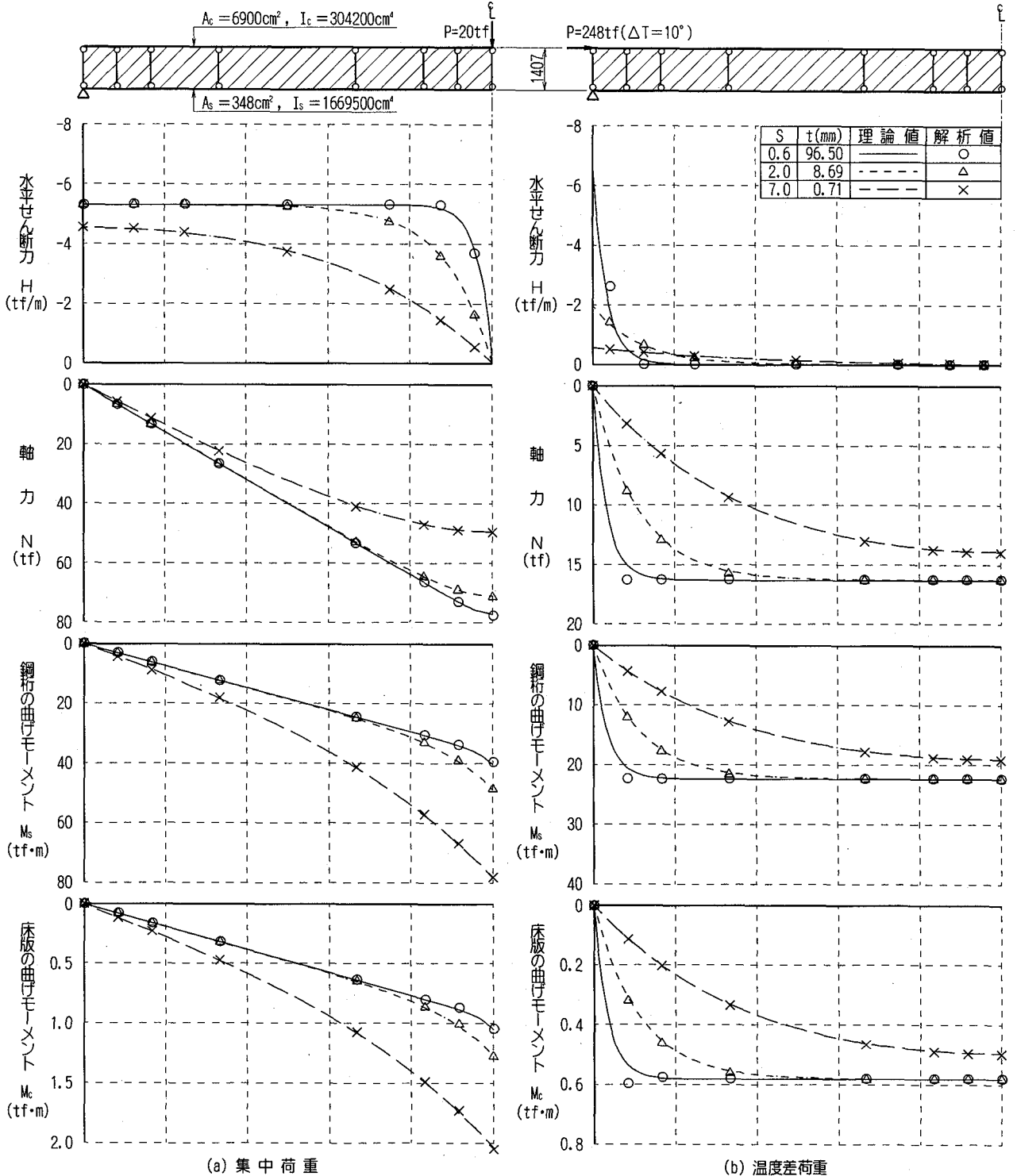


図-2 理論値²⁾と本解析結果との比較

4. 実橋モデルの試設計

本解析法を用いて広幅員2主桁の3径間連続活荷重合成桁橋の試設計を行う。橋梁諸元については主に大阪市の吾彦大橋⁹⁾を参考にして決定した。一般図を図-3に示す。本橋は約20年前に施工された連続合成桁であるが、広幅員橋に対して2主桁を採用した点や、2.5m間隔に配置された横桁でRC床版を支持して橋軸方向を主鉄筋方向とする点など、当時としては先進的な設計思想のもとに画期的な経済性を実現した。今回は、床版に合成床版を用いることを前提として横桁間隔を5mに広げている。

4. 1 設計条件

- 型式：プレストレスト3径間連続活荷重合成桁
- 橋格：B活荷重
- 橋長：195.000m
- 支間：59.600m+74.600m+59.600m
- 幅員：7.250m(車道)+2.000m(能車道)+2.000m(歩道)
- 床版：合成床版 225mm厚(床版支間方向…橋軸)
- 舗装：アスファルト舗装(車道75mm, 歩道50mm厚)
軽量コンクリート(自歩道150mm厚)

4. 2 解析モデル

床版のせん断遅れの影響を解析的に評価することと、

活荷重を立体的な影響面を用いて厳密に載荷することなどを目的として、解析は立体モデルを用いることとする。モデル化に際して、鋼桁および鋼桁と床版をつなぐ一定せん断流パネルについては前節で述べた平面モデルと同様に行っている。ただし、鋼桁の断面変化位置では、図心位置が変化し、解析モデル上鋼桁部材が不連続となるため、このような位置では、鋼桁部材間を剛棒で連結することにより対処している(図-4参照)。

床版のモデル化は、幅方向に6分割し、縁部材で4辺を囲まれた一定せん断流パネルを配置する。床版の断面積と曲げ剛性は縁部材に分担幅分の床版断面積と曲げ剛性とを与えることで評価し、床版のせん断剛性については、一定せん断流パネルのせん断弾性係数と板厚(床版厚)とによって評価する。

また、横桁についても同様なモデル化を行い、床版と合成させている。解析モデル図および各部材の剛度を図-5に示す。

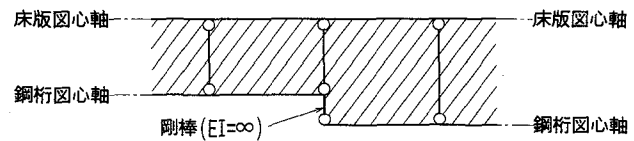


図-4 断面変化位置のモデル化

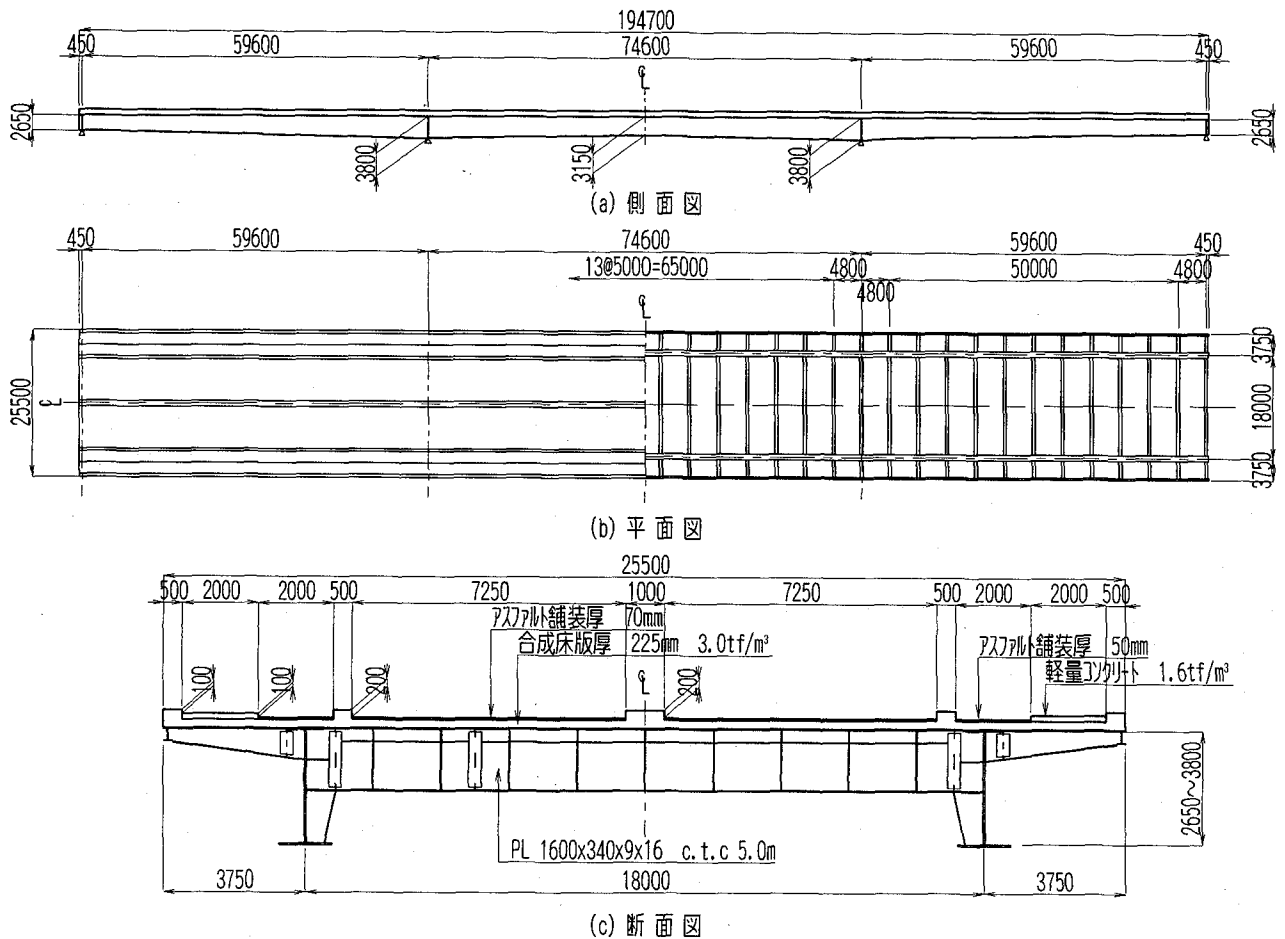


図-3 実橋モデルの一般図

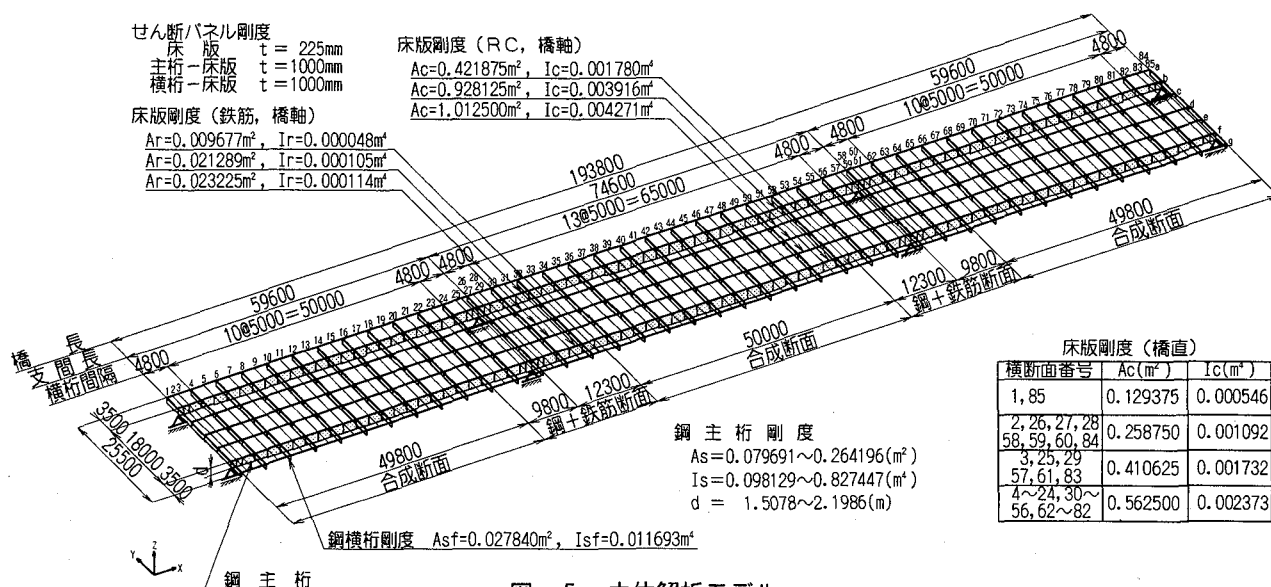


図-5 立体解析モデル

4.3 設計要領

解析対象橋梁はプレストレスしない活荷重合成桁として設計を行う。解析に際しての仮定剛度および各荷重の載荷方法は、EUROCODE¹⁰⁾を基に作成された文献¹¹⁾を参考にして以下のように決定した(図-6参照)。

(1) 仮定剛度

中間支点を挟んで各支間の0.15L付近における床版は軸方向鉄筋のみの剛度とし、その他はコンクリートの剛度を入力する。すなわち、正曲げ領域ではコンクリート床版と鋼桁の合成断面として抵抗し、負曲げ領域では、鉄筋+鋼桁断面で抵抗するものとする。また、各荷重ケースにおける床版のヤング係数およびクリープ係数は表-1の値を用いる。ただし、合成前死荷重載荷時の床版剛度は0とする。

(2) 合成前死荷重 d_1 、後死荷重 d_2 、活荷重 $L_{\max, \min}$

通常の設計で行う立体解析と同様であるが活荷重については各部材断面力の影響線を作成し、最大・最小値を算出する。

(3) 温度差荷重

床版と主桁との温度差が全橋に渡って $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ あるものとする。すなわち、中間支点を挟んだ0.15Lの区間は、橋軸方向鉄筋と鋼桁、その他の区間では床版コンクリートと鋼桁とに温度差を生じるものとする。ただし、解析上は以下に示すプレストレス荷重を各床版部材に導入する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{合成断面} \quad P_{1c} = E_c \cdot \varepsilon_t \cdot A_{ci} \\ \text{鋼+鉄筋断面} \quad P_{1R} = E_s \cdot \varepsilon_t \cdot A_{Ri} \end{array} \right\} \quad \dots (7)$$

ここに、 A_{ci} : 分担幅相当の床版断面積

A_{Ri} : 分担幅相当の鉄筋断面積

(4) 乾燥収縮

床版のコンクリートが有効な区間(合成断面)のみ乾燥収縮するものとする。また、解析上の載荷方法は温度差荷重と同様に、次式に示すプレストレス荷重

を各床版部材に導入する。

$$P_2 = E_c \cdot \varepsilon_s \cdot A_{ci} / n_2 \quad \dots (8)$$

ここに、 ε_s : 最終収縮度 $(= 20 \times 10^{-5})$

$$n_2 = n(1 + \phi_2/2) \quad \dots (9)$$

ϕ_2 : クリープ係数 $(= 4)$

(5) クリープ

合成後死荷重の解析結果を用い、床版に作用している軸方向圧縮力の持続荷重 P_2 をプレストレス荷重として各床版部材に導入する。ただし、引張力については載荷しない。

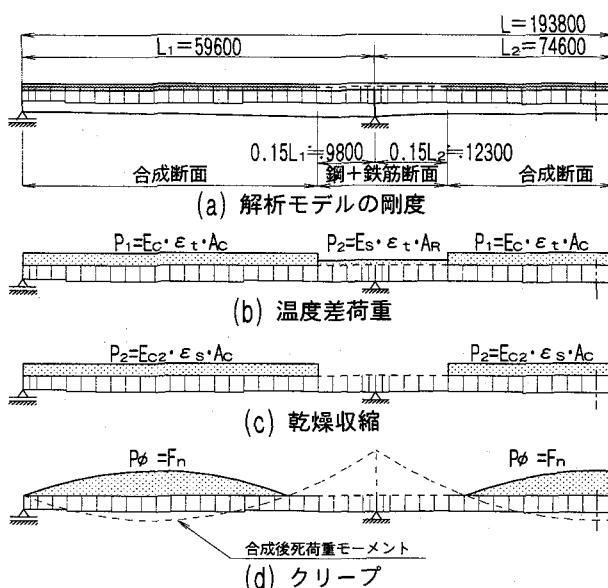


図-6 解析モデルの剛度および荷重載荷要領

表-1 各荷重ケースにおける床版のヤング係数

荷重ケース	ヤング係数 $E_c\text{ (tf/m}^2\text{)}$	ヤング係数比 n	クリープ係数
a) 支点降下	3.0×10^6	7	—
b) 温度差荷重	3.0×10^6	7	—
c) 乾燥収縮	1.0×10^6	21	2
d) クリープ	1.5×10^6	14	4

4. 4 解析結果

上述の設計要領にしたがい、本解析法を用いて算出した鋼桁の曲げモーメント M_s および軸力 N を図-7に、水平せん断力 H および鉛直せん断力 Q を図-8に示す。

各荷重ケースにおいて M_s は、軸方向鉄筋と鋼桁が抵抗する区間（中間支点付近）で絶対値が大きくなり、逆に N は小さくなっている。解析に際して与えた条件をよく再現していることがわかる。

温度差荷重および乾燥収縮による水平せん断力は、道路橋示方書³⁾で述べられているように連続桁においても端支根部のみに卓越している。一方〔合成後死荷重+活荷重〕によって作用する水平せん断力のピークは、中間支点上から0.2L程度離れた位置となる。鉛直せん断力とあまり相関性をもたない理由としては、中間支点付近の床版を鉄筋断面としたことが考えられる。中・側径間の

支間比にもよるが、中間支点付近の床版にひび割れが生じ、鉄筋+鋼桁断面で抵抗する場合、この近傍に作用する水平せん断力は、この様な分布を呈するものと判断できる。

4. 5 垂直応力分布

端支間、中央支間および中間支点上における垂直応力分布を各荷重ケースごとに図-9に示す。同図には、有効幅を考慮した合成断面で平面解析を行った結果（慣用計算法）も付記する。各荷重ケースごとの特徴を以下に示す。

(1) 合成前死荷重+合成後死荷重+活荷重

すべての断面において、床版張出部の床版上側応力は鋼桁上でのそれよりやや大きめの値を示している。これは、活荷重の偏心載荷によって生じるそり応力も

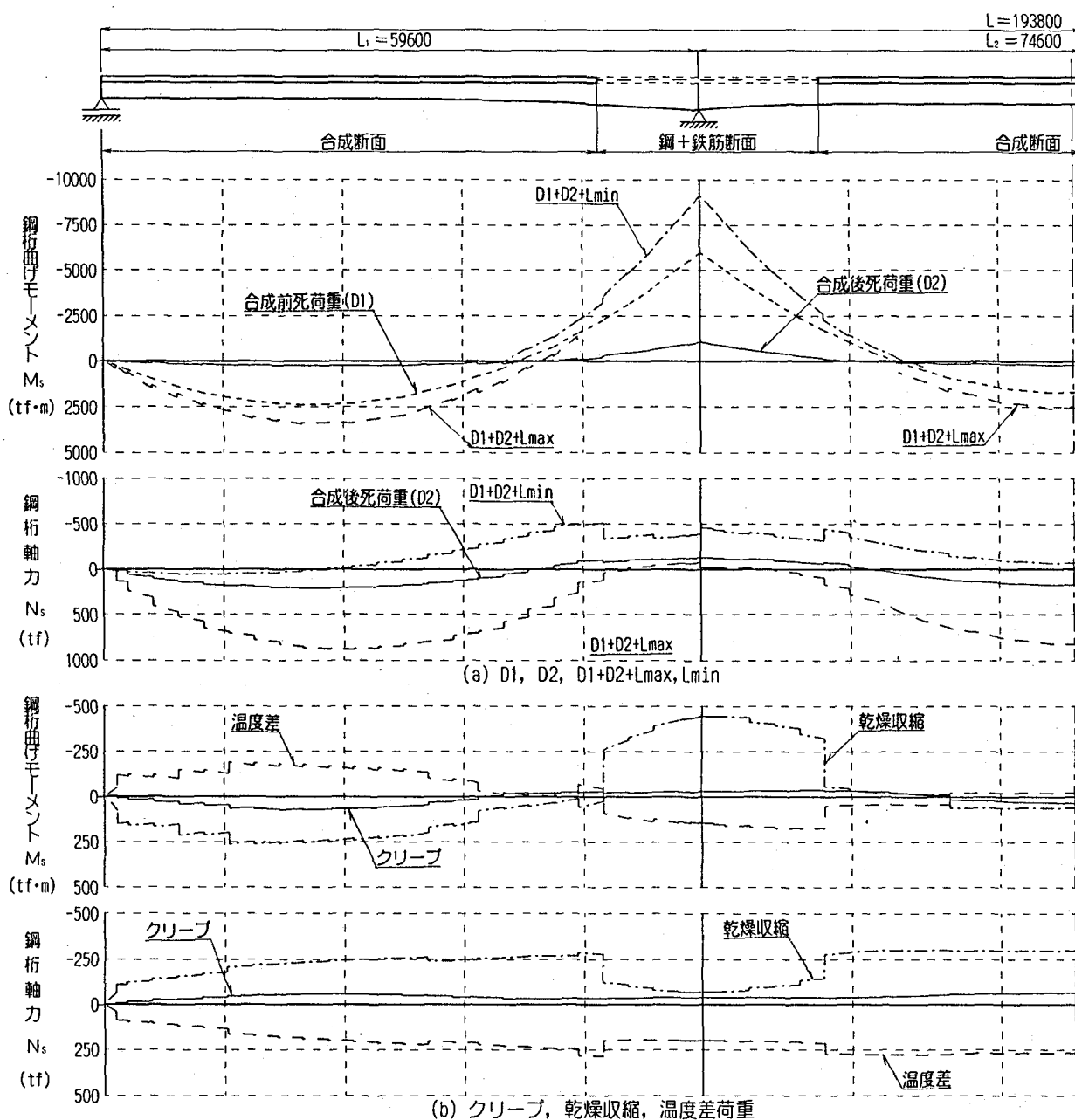


図-7 断面力図 (その1)

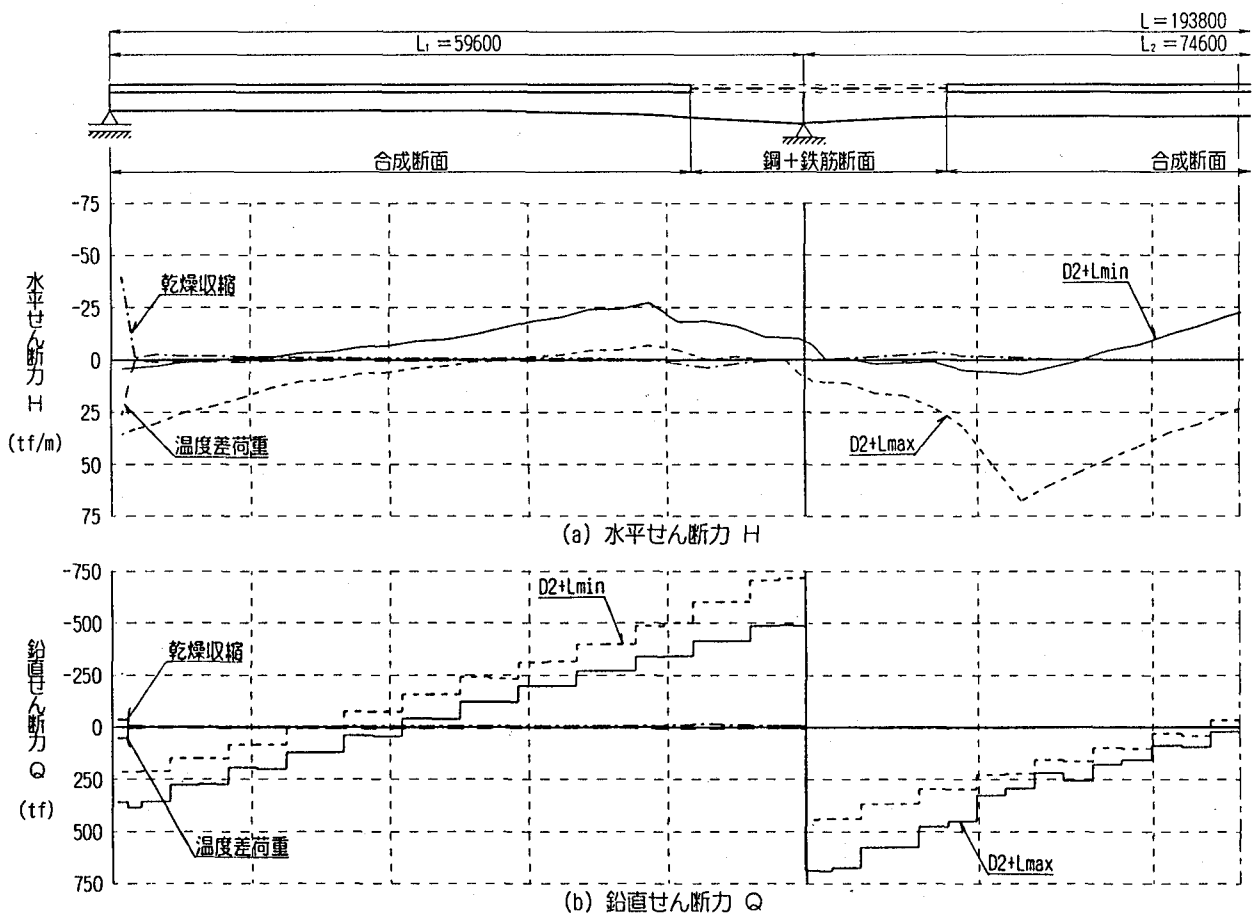


図-8 断面力図 (その2)

同時に評価しているためである。今回解析対象とした様な広幅員の橋梁ではその応力の影響は大きく、せん断遅れの影響と足し合わせても鋼桁上の床版応力より大きくなることがわかった。

また、有効幅を考慮した慣用計算法の結果と比較した場合、支間部の値は床版、鋼桁とも同程度の値となる。中間支点部では床版の有効幅は、想定したものより大きめの幅で抵抗しており、床版（軸方向鉄筋）・鋼桁とも慣用計算法より小さな応力となっている。

(2) クリープ

支間部における主桁直上の床版および鋼桁の応力度は、有効幅を考慮して求めた応力度とほぼ同じ傾向を示している。床版の有効幅を考慮する慣用計算法でも、床版のせん断遅れの影響を評価できている。一方、中間支点では、負曲げ領域にあるため床版にプレストレスは入力していないこともあり、鉄筋応力は小さくせん断遅れ現象もほとんど生じていない。

(3) 乾燥収縮

合成断面で行った平面解析は全断面有効の剛度でかつ、全幅の床版が収縮するものとしている。支間部の床版および鋼桁応力度はこの平面解析結果とほぼ一致しており、せん断遅れは生じていないことがわかる。一方、中間支点部の鉄筋応力度は断面中央で最大の引張応力が発生している。床版の中央では鋼桁に拘束さ

れないため床版の縮み量が増え、この部位の鉄筋が鋼桁部よりも大きく引っ張られたためと思われる。

(4) 温度差

平面解析とほぼ一致した結果を示しており、これもせん断遅れの影響はほとんど見られない。中間支点部では乾燥収縮の場合とは異なり、中間支点部の鉄筋は均一な応力分布を示している。これは、鉄筋についても鋼桁との温度差荷重を与えたため両側の床版にひきずられなかったものと思われる。

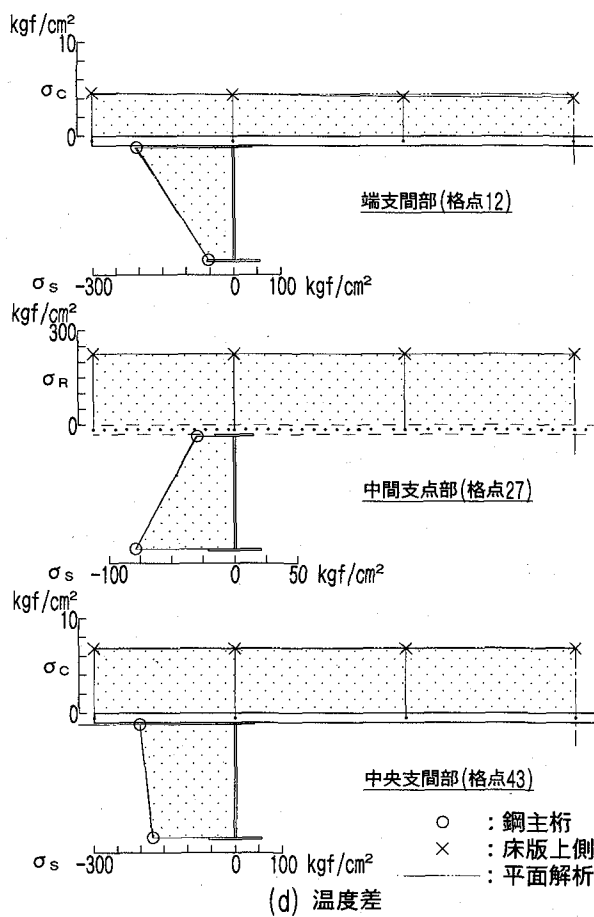
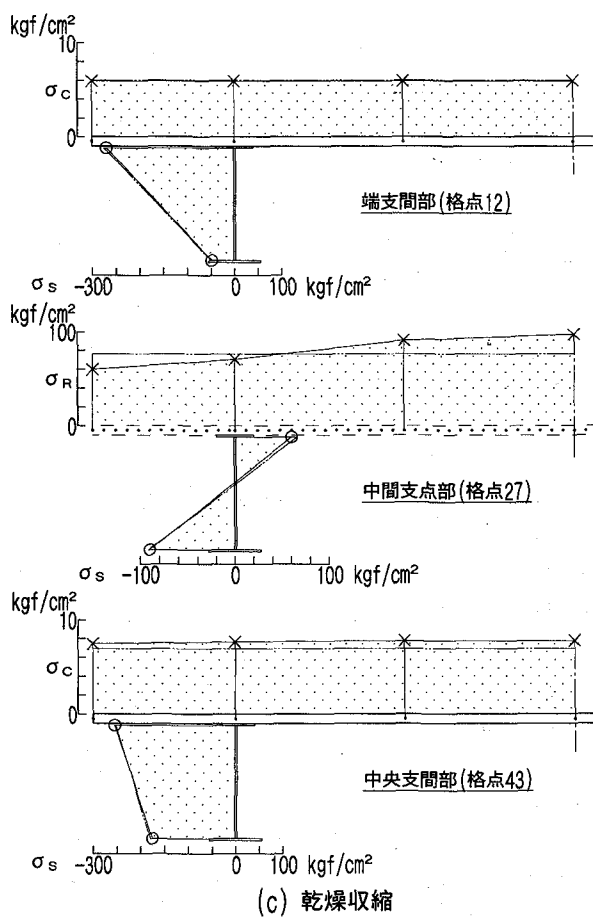
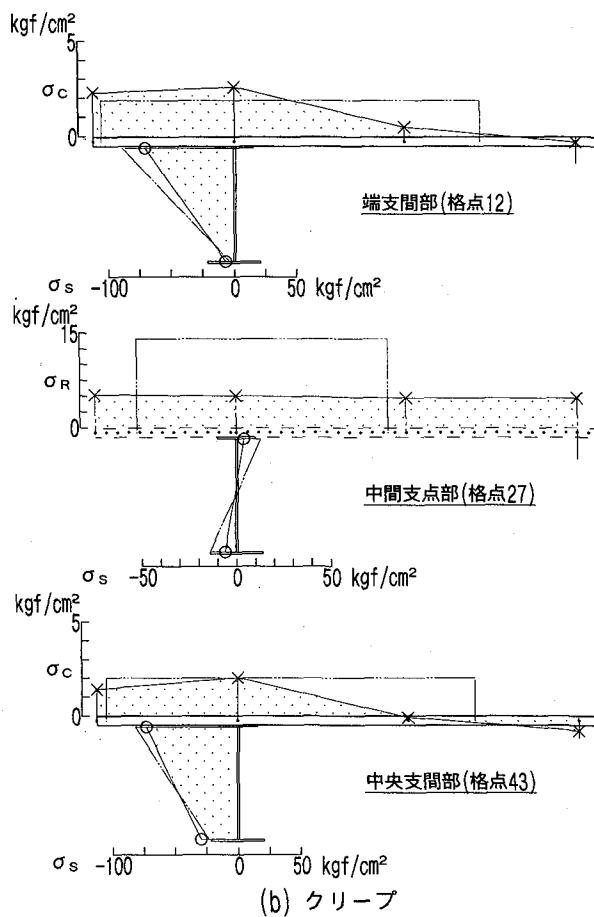
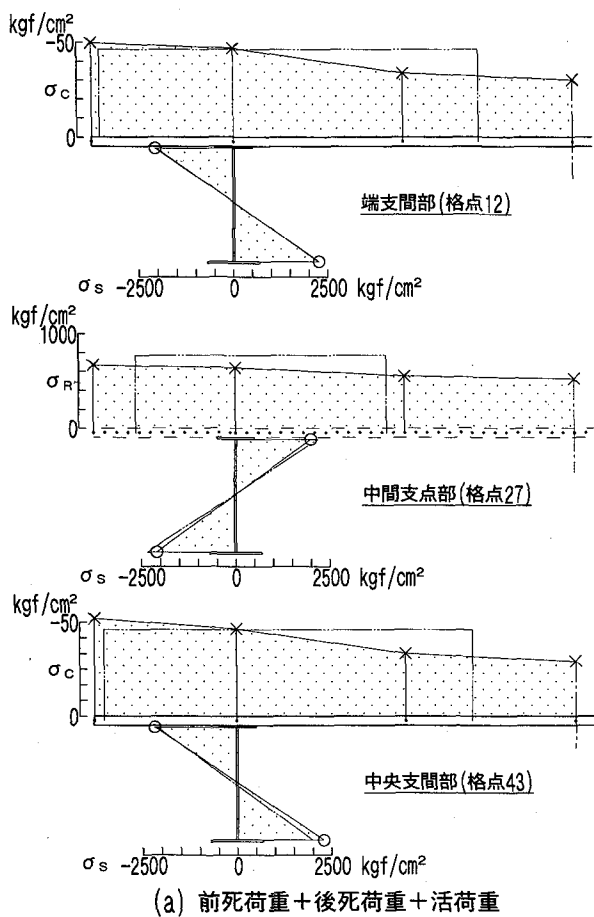
4. 6 断面照査

本解析法を用いた場合、図-9で示したように床版・鉄筋・主桁の応力度を個々に直接算出でき、クリープ、乾燥収縮および温度差を考慮しても別途煩雑な断面計算を行うことなく評価できる。

また、ずれ止めの設計に際しても、図-8に示した解析結果をそのまま用いることにより、スタッドジベルの本数、間隔を決定することが可能となる。

5. まとめ

本文において単純支持の不完全合成桁を計算例として取り上げ、理論値との比較を通じ、本解析法の基本的な精度や実用性を確認した。また、実橋モデルに対してコンクリート床版面を一定せん断流パネルでモデル化した



○ : 鋼主桁
× : 床版上側
— : 平面解析

図-9 各断面の垂直応力分布

立体解析により、実設計においても床版のせん断遅れやそり応力なども厳密に評価できることがわかった。

また、連続桁における温度差荷重、クリープおよび乾燥収縮に対する通常の設計では、各断面計算の結果からこれらの荷重によって発生する曲げモーメントを算出した後、その値を用いて別途不静定モーメント ΔM を求めなければならない。本解析法では、こうした煩雑な計算が不要となり、不静定モーメントによる応力も同時に求めることができる。

本解析法は、他に断続合成桁や合成斜張橋の構造解析に対しても威力を発揮すると考える。

[参考文献]

- 1) 星埜：鋼・コンクリート合成部材を含む骨組構造物のクリープ解析，橋梁と基礎，pp.28～33，1994.6
- 2) A. ハウネック/O. シュタインハルト：鋼橋の理論と計算，橘・小松共訳，山海堂，1957.12
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1994.2
- 4) 明橋・佐々木・御子柴・大谷：部分取替可能なプレキャスト・プレストレス床版に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.40A，1994.3
- 5) 尾下・金子：直線，曲線および斜角の合成 I 桁橋の立体解析，土木学会論文集，第374号／I-6，1986.10
- 6) J.S. シェムスキー：マトリックス構造解析の基礎理論，培風館，1971.
- 7) 尾下・江川：鋼床版合成形式橋梁の解析方法に関する一提案，土木学会論文集 No.516/VI-27，1995.6
- 8) 小松・佐々木：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について，土木学会論文報告集，No.329，1983.1
- 9) 中川・石田：吾彦大橋の設計について，大阪市土木局業務研究論文集，1977.3
- 10) EUROCODE No.4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, Revised Draft March 1992
- 11) 連続合成桁ワーキンググループ：PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁，設計要領(案)，1995.

(1996年9月6日受付)