

【論文・報告】

長大吊橋の合成鋼床板に関する研究

Study on Composite Steel Plate Deck
of Long Span Suspension Bridges

中崎俊三*
Shunzo NAKAZAKI

内海靖**
Yasushi UCHIUMI

木本輝幸**
Teruyuki KIMOTO

題等について報告するものである。

1. 緒論

橋梁の伸縮継手は、非常に多くの輪荷重の作用を直接かつ頻繁に受けるとともに、風雨にも直接さらされるため、地域によっては他の部材に比べ寿命が非常に短かくなっているものもある。また、これまでに多くの損傷例が報告されており¹⁾、その結果生ずる補修費と補修時の交通障害は無視できないものとなっている。一方、伸縮継手は運転者に対して走行上、不快感を与える。

このような背景に基づき最近では、伸縮継手のない橋梁の開発が盛んに行われている^{2),3)}。

その中で、補剛トラス形式の吊橋の鋼床版においても同様の理由により、伸縮継手のない、すなわち鋼床版を連続して補剛トラスと合成した構造（合成鋼床版）の開発が大いに望まれている。現在までのところ、補剛トラス形式の吊橋で鋼床版を連続合成化した例としてエメリッヒ橋とマタディ橋が挙げられる。しかし、これら2橋の上路部は開孔部を設けず、鋼床版で完全に覆われているものである。

そこで今回は、長大吊橋において耐風安定性のために、グレーチング等で上路部に開孔部を設けなければならぬ場合の、合成鋼床版を対象にして数値解析を中心に検討した。

すなわち、合成方法は鋼床版を補剛トラスの上に乗せるものと、補剛トラスと一体とするものの2案を考え、

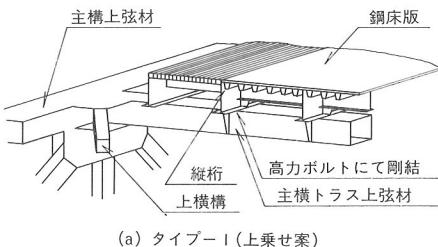
- ① 合成に伴って生じる鋼床版等の各部の応力状態
- ② 変形量に対する合成效果

の各項目に対して、暴風時、部材間に温度変化がある場合、および當時について検討した。

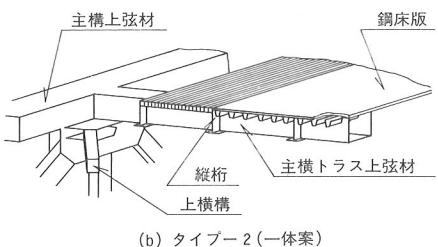
本文は、これらの検討結果についての考察、今後の課

2. 鋼床版の合成方法

鋼床版の合成方法案を図-1に示す。



(a) タイプー1(上乗せ案)



(b) タイプー2(一体案)

図-1 鋼床版の合成方法

(1) 合成方法の一般的特徴

a) タイプー1, 2 の共通の特徴

- ① 鋼床版と主横トラス上弦材を、一体とすることにより合成する方法である。ただし、上横構は後述する⑥の理由により従来通り残す。
- ② 径間全長にわたって鋼床版を連続合成とするので、非合成時に必要とされる伸縮継手、および、縦桁支承は不要である。このことは走行性・メンテナンス上有利である。
- ③ 鋼床版が完全に合成されるものとすると、桁の面

*川田工業機技術本部設計部次長 **川田工業機技術本部設計部長大橋課

外剛性および捩り剛性は約20%増加する。

- ④ 縦桁下フランジと上横構の交差部で、両者を連結することにより、上横構の座屈長が約1/3になるので、上横構の経済設計が可能となる。
 - ⑤ 鋼床版の他に別個、上横構があるので面材架設においては従来の技術の延長で架設できる。また、架設時の耐風安定性から鋼床版半載の必要がある場合でも、上横構があるので振りに対して安定した系が保たれる。

b) タイプ-1 の特徴

- ① 本州四国連絡橋の既往の形式と全く同じである。
鋼床版が主横トラス上面に位置するので、合成のための連結構造に工夫がいる。
 - ② 形式は従来と同じであるので、空気力特性および施工性は従来の伸縮継手を持つものと、ほぼ同じと思われる。
 - ③ 維持管理はタイプ-2より容易である。

c) タイプ-2の特徴

鋼床版の位置が、低い分だけ受風面積が減少する。空気力特性は、従来の形式と異なると思われる。

(2) 力学的特徴と検討課題

a) 力学的特徴 (図-2 参照)

- ① 主横トラス上弦材は、鋼床版と主構との結合部材であるので、力学的にはずれ止めの役割をする。
 - ② 上横構は主構上弦材と共にトラス構造を形成するので、面外荷重による主構上弦材の二次応力の発生を、小さくすることができる。したがって力学的に重要な部材となるため、この部材を省略しない方がよい。

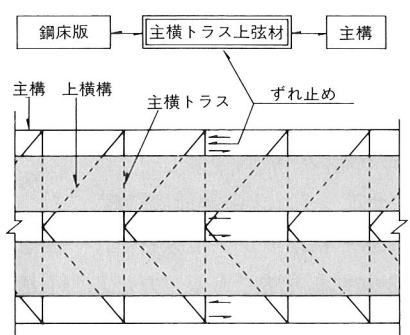


図-2 ずれ止めとしての主横トラス上弦材

b) 檢討課題

完全合成の場合、鋼床版は主構と橋軸方向に連続して直接、連結されるが、本形式(タイプ-1,-2)の場合、鋼床版と主構は主横トラス上弦材を介して間接的に連結される。

本形式の合成効果をみるために、以下の項目について数値解析により検討する。

- ① 合成に伴って生じる、鋼床版等の各部の応力状態
 - ② 変形量等に対する合成効果
 - ③ タイプ-1（上乗せ案）の場合の縦桁と主横トラス上弦材間の連結構造案

3. タイプー1（上乗せ案）の検討

(1) 対象とする吊橋

図-3に示す中央径間1,000m級の吊橋を対象とする。
補剛桁は、2ヒンジ単純支持とする。

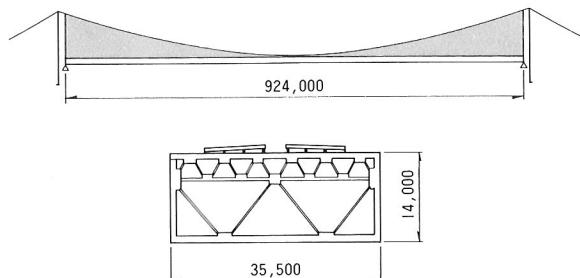


図-3 対象とする吊橋

(2) 解析方法および解析モデル

解析は暴風時および主構と鋼床版との温度差がある場合の2ケースについて行う。

a) 暴風時（面外荷重）の解析方法

データ作成の煩雑さを避けるため、図一4に示すように吊橋系解析を桁系解析に変換する。まず桁を棒モデルとしたモイセフの吊橋系の面外解析により、ハンガーの面外伝達力Sを求め、それを補剛桁に直接かかる荷重Wとともに、桁系に載荷して計算する。

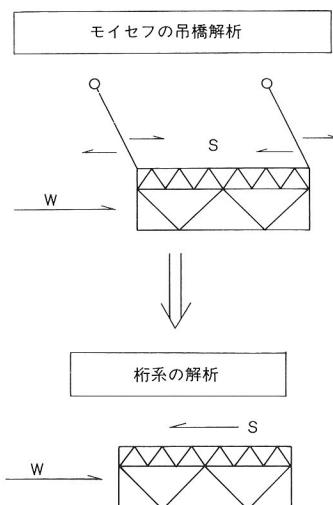


図-4 解析系モデルの変換

b) 温度差がある場合の解析方法

鋼床版と主構との間に温度差があり、端主横トラス上弦材の面外剛度が小さいと中間主横トラス上弦材には、大きい面外変形と面外断面力が生じる。しかしながら、本検討では端主横トラス上弦材は、面外に剛としたので中間横トラスの応力上の問題は、少いと思われるが確認

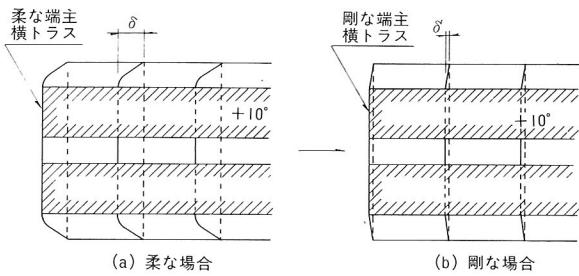


図-5 端主横トラス上弦材の面外剛性の影響

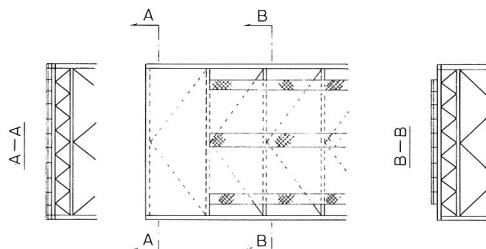


図-6 橋端を剛とする方法

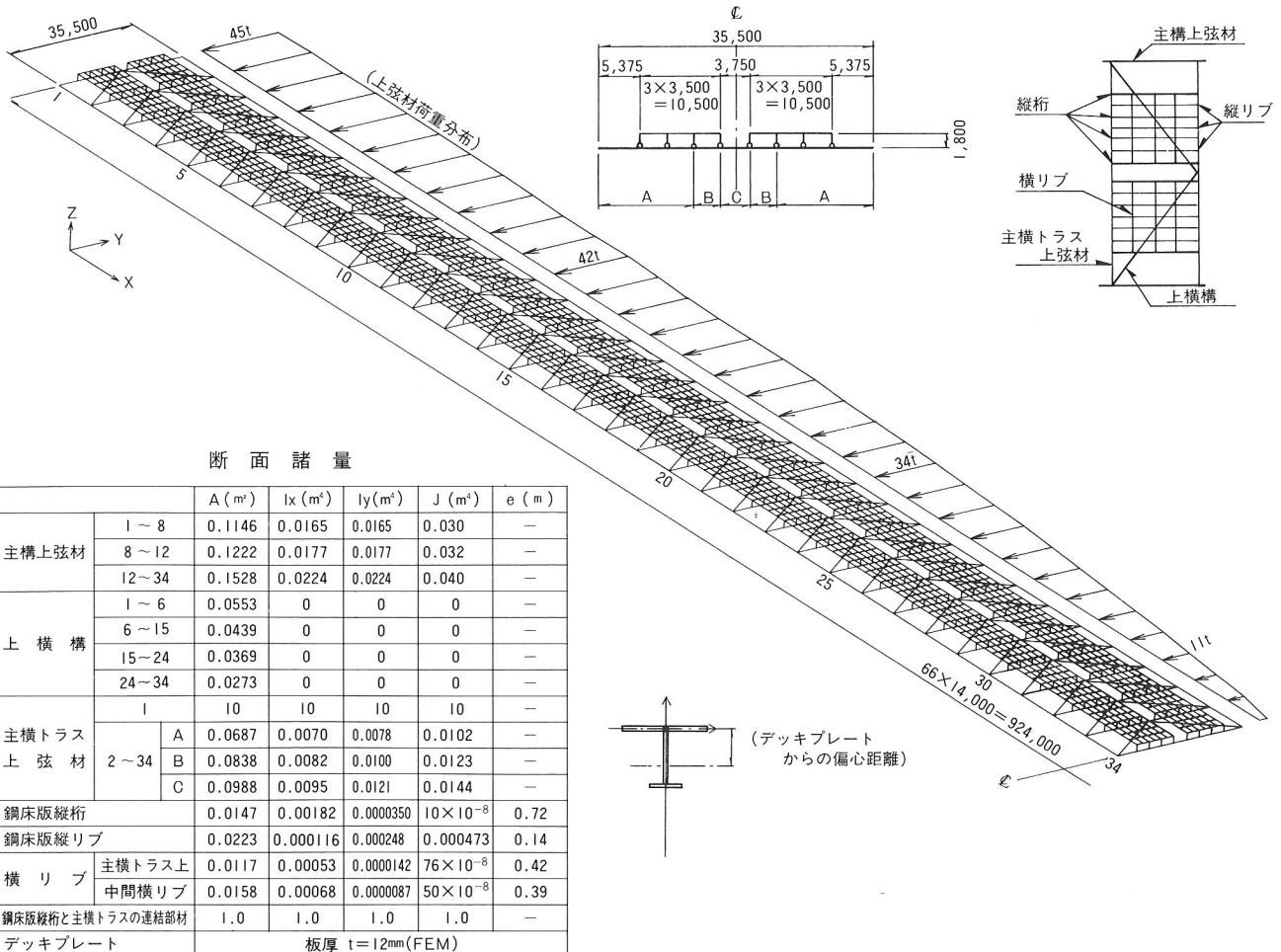


図-7 タイプ-1(上乗せ案)の計算モデル

するものとする。

橋端を剛とする方法として、図-6のように端パネルの鋼床版と主構を一体とすることが考えられる。

c) 解析モデル

モデル図を図-7に示す。モデルは主構上弦材、上横構、主横トラス上弦材および鋼床版から成る立体骨組とする。鋼床版は板(デッキプレート)と棒(縦桁、縦リブ、横リブ)の集成部材とする。

鋼床版と主横トラスとの連結は、デッキプレートと主横トラス上弦材を連結する棒部材にて行う。連結部材の下端はその構造特性から橋軸方向軸回りを自由、橋軸直角軸回りを固定とする(図-8参照)。

材部データは1,000m級吊橋の既往データの平均的な値とした。使用プログラムはNASTRANである。

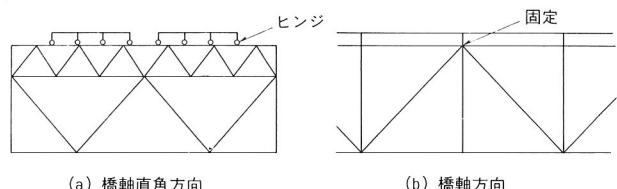
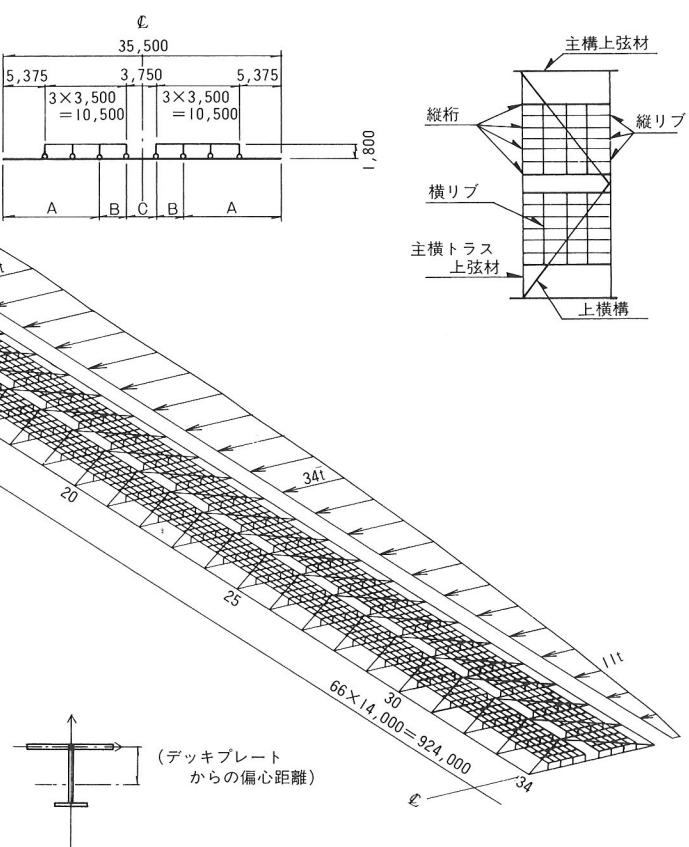


図-8 縦桁と主横トラス上弦材の連結条件



(3) 解析結果

a) 鋼床版の応力

図-9(a)に暴風時の鋼床版応力を示す。鋼床版応力(実線)は、主構上弦材応力と中立軸とを結んだ線上(破線)にはほぼのっているので、平面保持の法則に従っていると思われる。

鋼床版の最大応力は、 $1,400 \text{kg/cm}^2$ (常時換算)である。

また、図-9(b)に主構と鋼床版の温度差による鋼床版

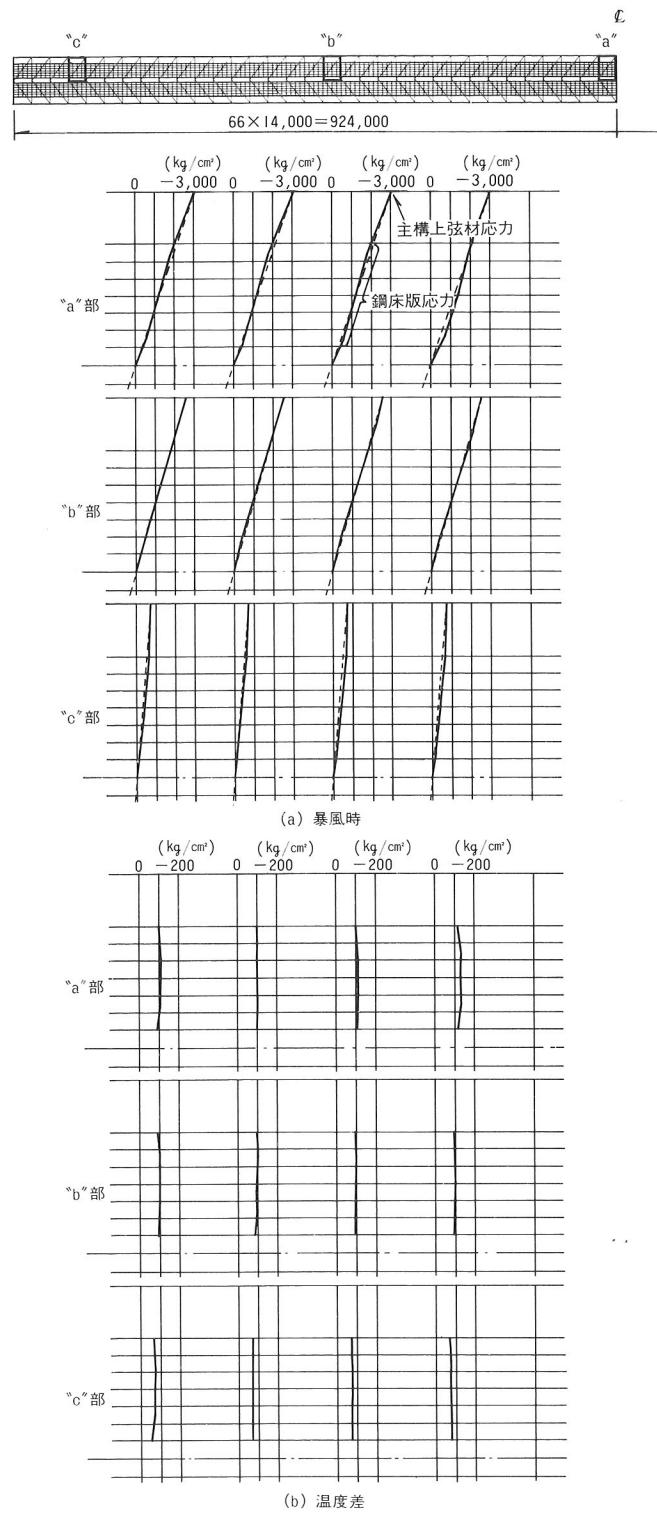


図-9 タイプー1の鋼床版橋軸方向応力(常時換算なし)

の応力を示す。これらは橋端を拘束したことによる応力であり、橋軸方向および橋軸直角方向にはほぼ一定である。なお、値そのものは暴風時に比べてかなり小さい。

b) 主横トラス上弦材の面外曲げモーメント

図-10に曲げモーメント図を示す。端主横トラスには温度差、暴風時とも大きな面外曲げモーメントが生じるが、中間主横トラスでは急激に、特に温度差において小さくなる。中間主横トラスの最大曲げモーメント313tmが発生する箇所の常時換算応力は、 $1,300 \text{kg/cm}^2$ 程度である。

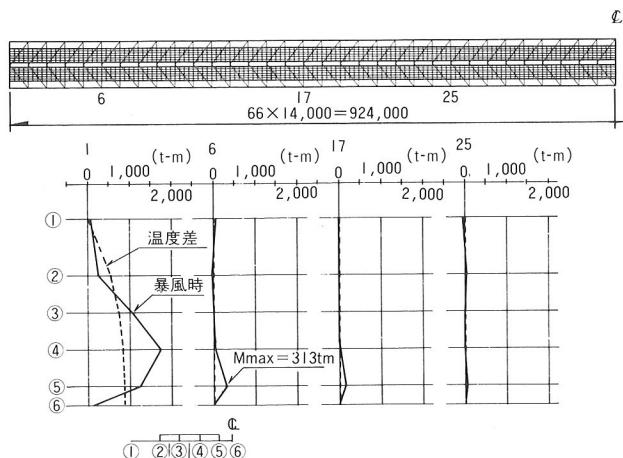


図-10 タイプー1・主横トラス上弦材の面外曲げモーメント(常時換算なし)

c) タイプー1の合成効果

図-11(a), (b)に面外変位、主構上弦材軸力について合成・非合成の比較を示す。桁の剛度そのものでは20%アップであるが吊橋系の変位で10%，軸力で6%の効果である。軸力の効果が小さいのは剛性の増加に伴って断面力も増加する吊橋の特性によるものと思われる。

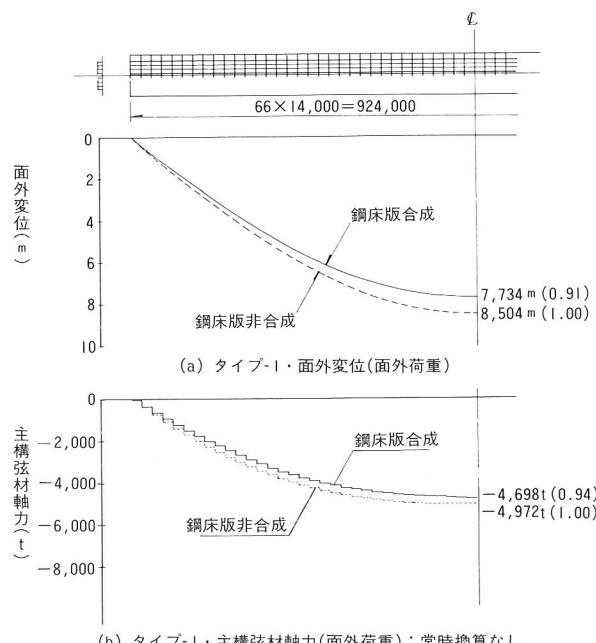


図-11 タイプー1の合成効果

d) 上横構と鋼床版のせん断力の分担

図-12に全せん断力に対する上横構と鋼床版の分担状況を示す。上横構のせん断面積は端部から14パネルは平均的に 0.1m^2 に対し、鋼床版のそれは 0.25m^2 で、鋼床版が上横構の2.5倍である。一方、図-12の分布図では1.2~1.5倍であるから鋼床版のせん断力に対する効果が相対的に低下しているといえよう。

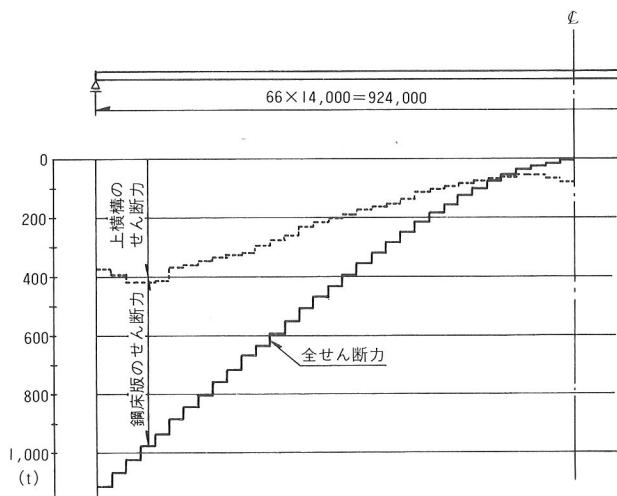


図-12 タイプー1・せん断力に対する上横構と鋼床版の分担：常時換算なし

e) 縦桁と主横トラス上弦材の連結部断面力

連結部の断面力（橋軸方向水平力、曲げモーメント）を図-13に示す。

面外荷重による水平力は、内桁のG 4 桁の橋端付近が特に大きい[図-13(a)参照]、曲げモーメントも同様な傾向である[図-13(c)参照]。

温度差については各桁とも同様な傾向であり、桁端が特に大きい（図-13(b), (d)参照）。

中間主横トラスの中での連結部最大断面力は水平力で243ton, 曲げモーメントで184tmである。これに対応する連結構造を図-14に示す。水平力に対しては高力ボルト摩擦接合で、曲げモーメントに対してはロッドによる引張力で抵抗させるものとする。

(4) 常時における検討

a) 連結部の橋軸方向水平力

連結部には上記の暴風時および温度差がある場合以外に、常時における面内せん断力 Q によっても断面力が生じる。

面内せん断力Qによる連結部の橋軸方向水平力Hは、次式によって求められる。

ここに、 G は総断面の中立軸に関する鋼床版の断面一次モーメントであり、 I は総断面二次モーメントである。

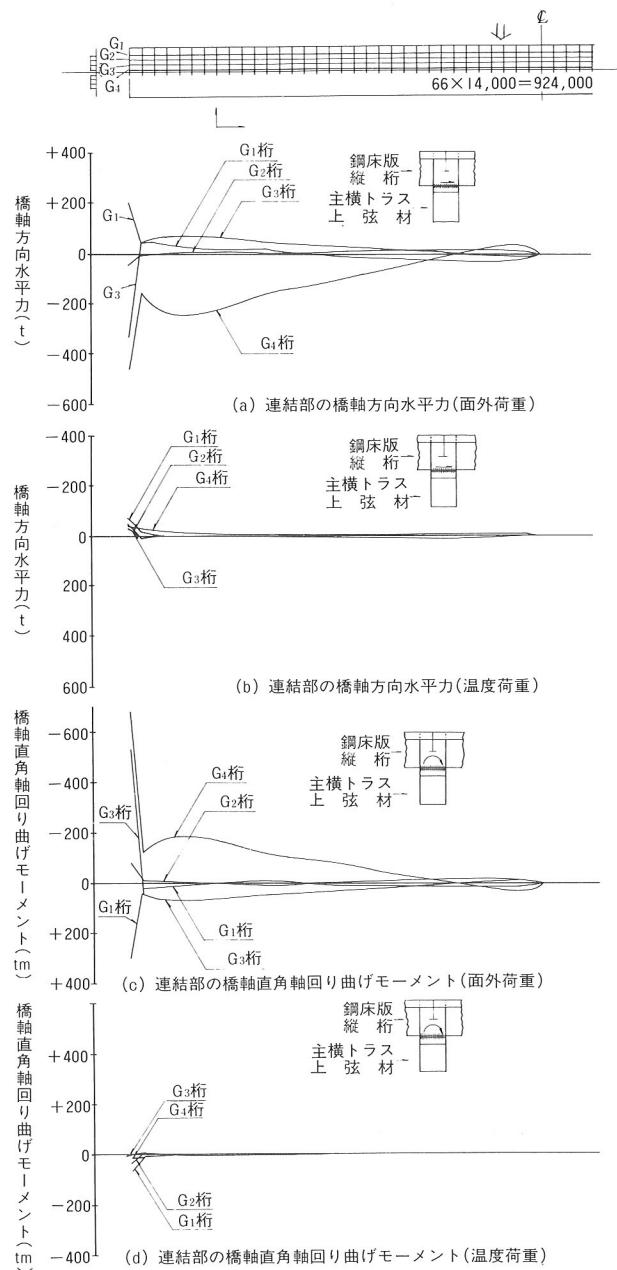


図-13 タイプ-1の連結部断面力(常時換算なし)

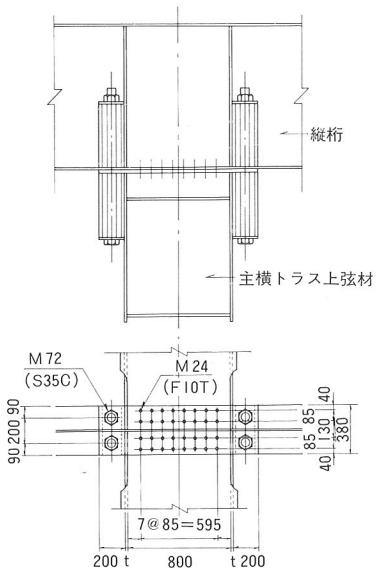


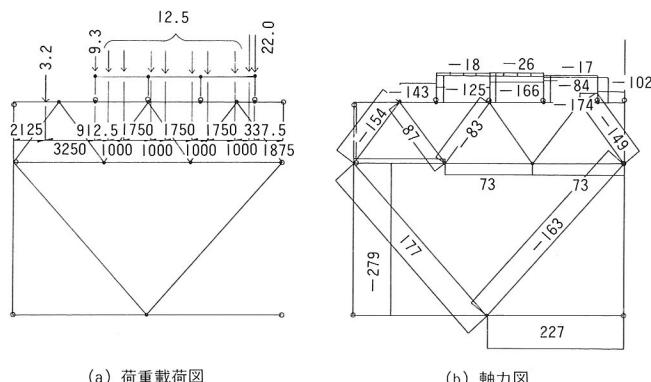
図-14 タイプ-1 の連結構造案

せん断力Qは1,000m級吊橋で、最大500ton/片主構程度であるが、その場合の1連結箇所当たりの水平力は約70tonで、暴風時の常時換算水平力(243ton/1.5=162ton)よりかなり小さい。

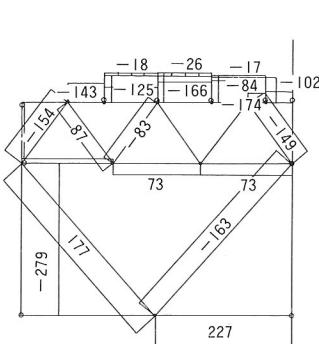
b) 主横トラス系の照査

鋼床版縦桁を主横トラス上弦材に図-14のように連結すると、主横トラスと鋼床版は一体挙動を示す。そのため鋼床版には輪荷重による直接的な応力の他に連結に伴う応力も同時に生じる。

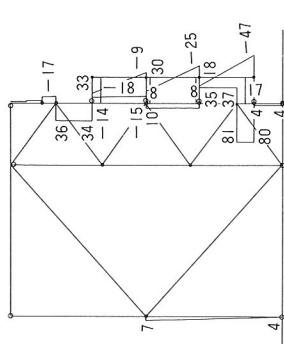
その結果を図-15に示す。図-15(a)は輪荷重の載荷図である。図-15(b)は軸力図であるが鋼床版横リブに生じる断面力は最大-26tonで、問題になるほどの大きさでない。このように比較的小さいのは縦桁の下部連結部がヒンジであり、縦桁の面外剛性が小さいためと思われる。



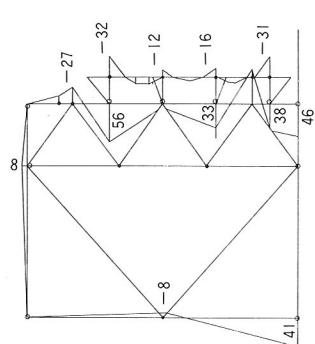
(a) 荷重載荷図



(b) 軸力図

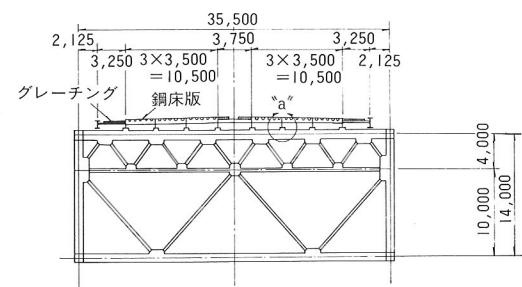
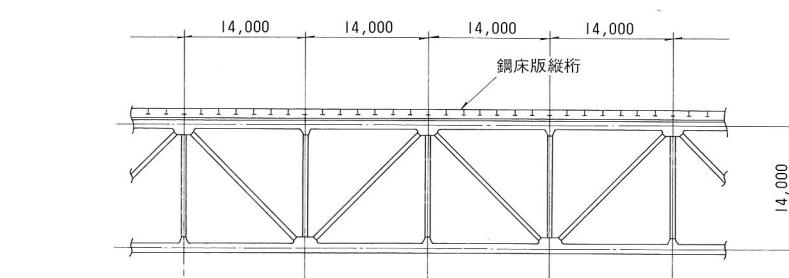


(c) せん断力図



(d) 曲げモーメント図

図-15 タイプー1・主横トラス系の断面力 (単位: ton, tm)



"a"部詳細図

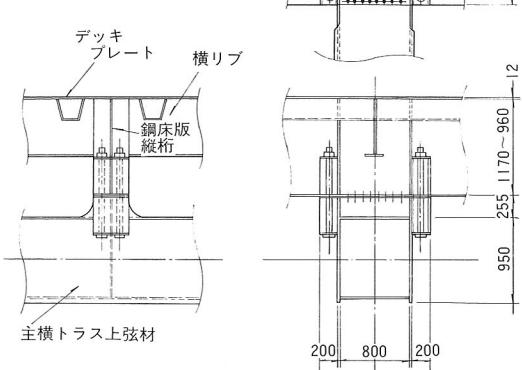
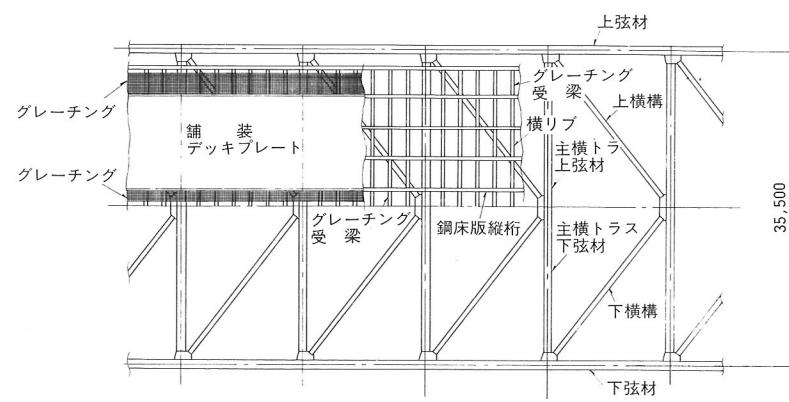


図-16 タイプー1(上乗せ案)

4. タイプー2(一体案)の検討

(1) 解析モデル

対象とする吊橋および荷重は、タイプー1と同じである。一体案であるので鋼床版と主構上弦材、上横構は同一面上にある。

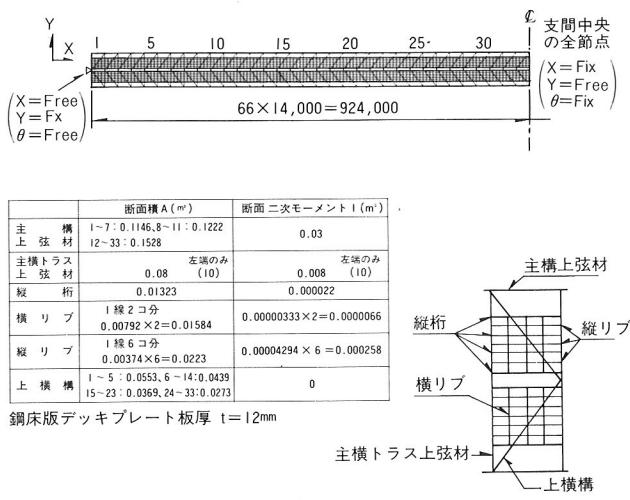


図-17 タイプー2(一体案)の計算モデル

(2) 解析結果

a) 鋼床版の応力

図-18に暴風時の鋼床版の橋軸方向の応力を示すが、平面保持性はほぼタイプー1と同じである。

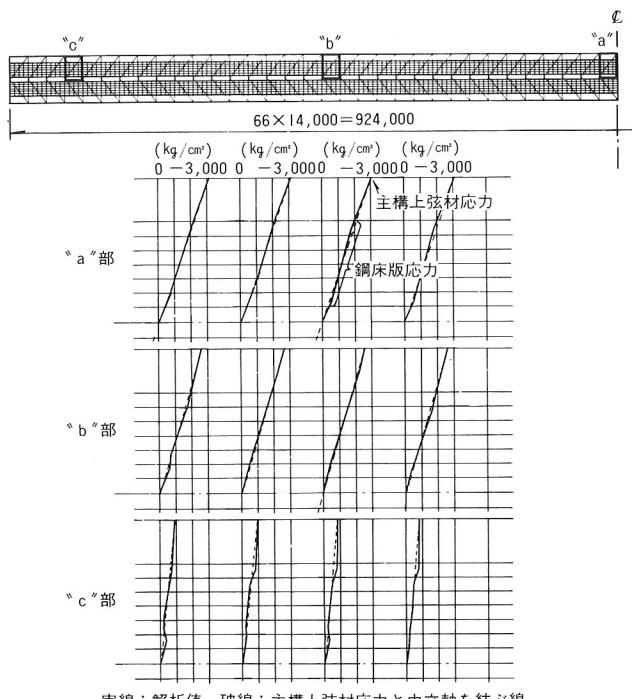


図-18 タイプー2の鋼床版橋軸方向応力(常時換算なし)

b) タイプー2の合成効果

図-19に面外変位と主構弦材軸力に関して鋼床版非合成と合成の比較を示すが、合成効果はタイプー1とほと

んど同じであることがわかる。このことは裏を返せば、タイプー1のように鋼床版を主横トラス上にのせても、一体案と変わらない程度の合成効果が得られることを示すものである。

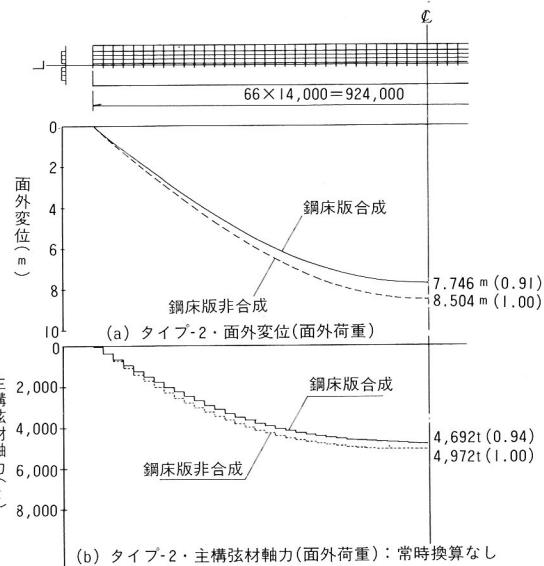


図-19 タイプー2の合成効果

c) 上横構と鋼床版のせん断力の分担

図-20に全せん断力に対する上横構と鋼床版のせん断力分担状況を示すが、タイプー1に比較してわずかであるが、鋼床版の効果が大きいと考えられる。

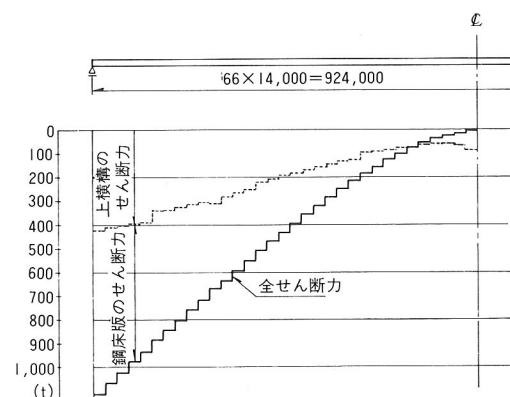


図-20 タイプー2・せん断力に対する上横構と鋼床版の分担: 常時換算なし

図-21にタイプー2の参考例を示す。鋼床版縦リブを主横トラス上弦内に通す構造としたので、弦材内は非密閉となることから箱内はタール塗装とする。

また、デッキプレートの現場溶接箇所を主横トラス上弦材のすぐそばとしたので、デッキプレートを主横トラス上弦材の上フランジ上に重ね一体化させる。その際、デッキプレートからボルト頭が出ないように、それらの板に座グリを行う。本案の場合、主横トラス上弦材内のメンテナンスが厄介である。

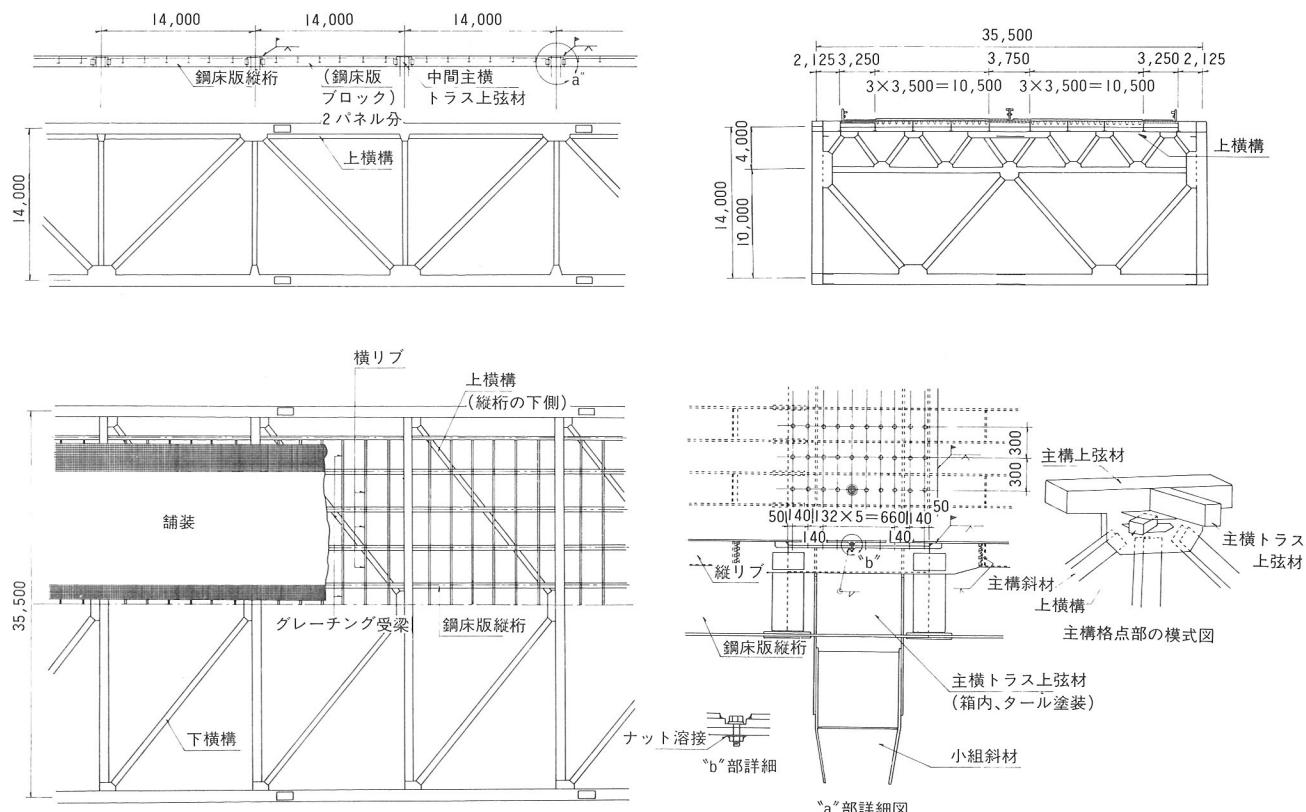


図-21 タイプ-2(一体案)参考例

5. 結論

本文は、従来の本州四国連絡橋の補剛トラス形式を基本として、鋼床版を主横トラス上弦材と一体とする、合成方法の可能性を検討した。その結果、次のことが判明した。

- ① 面外荷重による鋼床版応力には大きな乱れはない、ほぼ平面保持の法則に従っていた。その他の部材の静的応力についても何ら、問題がないことがわかった。
- ② タイプ-1と2を比較した場合、応力特性にはほとんど差がないのでメンテナンス上、タイプ-1（上乗せ案）が有利と思われる。なお、タイプ-2の場合、主横トラス上弦材をI形断面にすれば、メンテナンス上容易となるが、トラベラークレーン反力に対する断面検討が必要となろう。
- ③ 今後の課題としては、合成構造とすると座屈耐力上、鋼床版縦桁は補強する必要があるが、その経済的な補強方法とタイプ-1の連結構造のより詳細な検討が、必要と思われる。

参考文献

- 1) 篠崎：日本道路公団における伸縮継手の現況と補修、橋梁と基礎、Vol.17, No.8, 1983.
- 2) 藤井・梶谷・駿河・青野：伸縮継手のない橋梁・高架の提案、橋梁と基礎、Vol.21, No.6, 1987.

3) 小畠・藤原：伸縮装置に関する検討 一埋設ジョイントの適用について—高速道路と自動車、第30巻、第9号、1987.

4) 中崎・内海・野村：長大吊橋における鋼床版合成方法の基礎的研究、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、1987.