

# 鋼鉄桁とダブルRC床版による複合橋梁の開発研究（その1）

## Development of a Steel/Concrete Composite Bridge with Steel I-Girders and Double RC Decks :(Part 1)

内田 智文\*<sup>1</sup> 佐藤 徹\*<sup>2</sup> 能登 宥愿\*<sup>3</sup>  
Tomofumi UCHIDA Toru SATO Hiroyoshi NOTO

### Summary

With the aim of developing a bridge structure that has economy and mechanical rationality, steel-concrete composite bridges have been studied actively in recent years. Here the authors propose a steel-concrete composite rigid frame plate girder bridge with double RC decks as a new type for medium span bridges. In this paper, the structural features of such a bridge, the result of analytical investigation for characteristics of the structure by FEM analysis and economic comparison with conventional bridge types are reported. And feasibility of application to an actual bridge is also described.

キーワード：複合ラーメン橋，ダブルRC床版，FEM解析，試設計

### 1. はじめに

近年、経済性と力学的合理性を兼ね備えた橋梁構造の開発を目指し、鋼とコンクリートによる合成複合橋梁の研究が積極的に行われてきた<sup>1)</sup>。例として、鋼上部構造とRC橋脚を剛結する複合ラーメン構造は、ラーメン形式とすることにより、耐震性の向上が図れ、中間支点部や橋脚の断面力低減や支承の省略により初期コストとともに維持管理も低減されることが期待されている。また連続箱桁橋の圧縮領域となる中間支点部の下フランジ側にコンクリート床版を設ける二重合成箱桁橋は、コンクリートの特性を有効利用する合理的な構造として、研究が行われてきた背景がある<sup>2)</sup>。筆者らはこれまでに建設されたこれらの複合橋梁の特徴を研究し、中規模スパン橋梁としてより経済性・施工性・景観などに優れる新たな橋梁構造の検討を進めてきた。その結果、複合ラーメン鋼桁橋の中間支点部下フランジ側にもコンクリート床版を配置して合成させた構造（以下、新形式橋梁と記す）が、コスト縮減、支間の長大化、床版の耐久性向上などの観点から有望な構造であると考えた。

ここでは支間長80～100m程度の中規模スパン橋梁への適用を想定した複合鋼桁橋を提案し<sup>3)</sup>、この橋梁形式

の実橋への適用へ向けて実施したFEM解析による力学的特性の検討、試設計による経済性の比較および現場施工方法の検討結果について報告する。

### 2. 新形式橋梁の構造と特徴

ここで提案する新形式橋梁は、鋼鉄桁と鉄筋コンクリート橋脚とを柱頭部で剛結し、かつ中間支点部下フランジ側にもコンクリート床版を配置して合成させた構造である。この橋梁構造では、橋脚コンクリートとこの下床版とは一体化し、橋脚が柱の先端部で主桁方向へ連続的に広がるような形状となることから、外観上の大きな特徴である。橋梁構造のイメージを図-1に示す。

この新形式橋梁では、下床版は中間支点付近の圧縮領域のみに配置し、部材断面の剛性に寄与しない支間中央付近の引張領域までは延長しない。そのため、下床版のコンクリートは常時圧縮部材となり、コンクリート断面を有効に活用することができる。従来形式である非合成鋼桁橋と比較すると、新形式橋梁の中間支点付近では鋼桁と下床版との合成作用により、鋼桁の断面構成を大きく変えることなく中間支点部の断面構成が可能となる。また、下床版は中間支点の近傍のみに配置し、かつ橋脚

\*<sup>1</sup>技術本部技術研究所技術開発課

\*<sup>2</sup>技術本部技術研究所技術開発課課長

\*<sup>3</sup>技術本部技術研究所所長

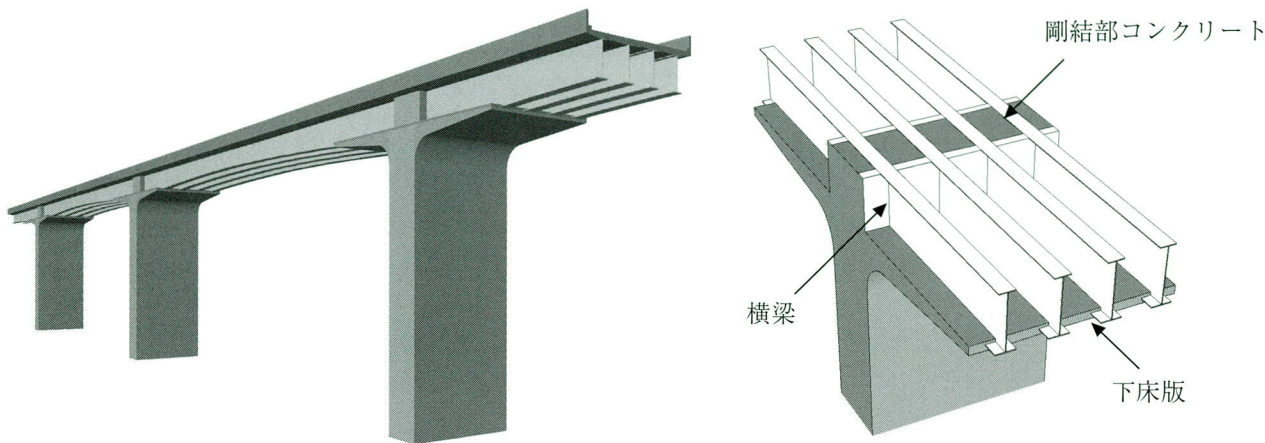


図-1 新形式複合橋梁の構造イメージと剛結部構造

と一体化することから、床版自重により上部工に作用する曲げモーメントは小さく、支間中央部の曲げモーメントも従来形式と比較して小さくできる。したがって、新形式橋梁の適用支間長を、従来形式の橋梁に対して大幅に伸ばすことが可能となる。そのほか、本構造は以下の特長を有すると考えている。

- ① 上部工と下部工の剛性のバランスが適切であれば、ラーメン構造として優れた耐震性を発揮する。
- ② 同じくラーメン構造であることから、主桁の剛性を高めることなしに活荷重たわみを低減できるため、低桁高化も可能となる。
- ③ 複合ラーメン構造の剛結部の応力伝達が、下床版により円滑となる。

このような橋梁構造を実橋に適用することができれば、従来形式と比較して経済的で機能的な橋梁の建設が可能となるものと考えられる。

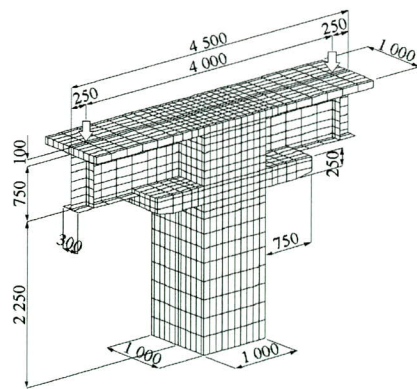
### 3. FEM 解析による力学的特性の検討

#### (1) 解析の概要

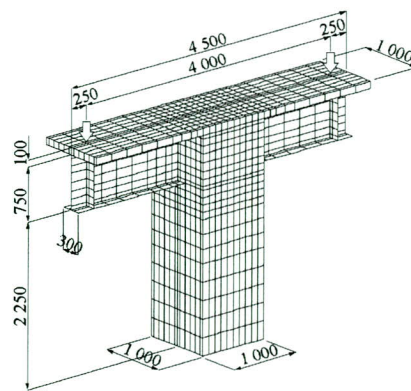
本研究では、現在のところ荷重試験の実施を計画中であることから、事前検討として試験供試体をモデル化した3次元FEM解析を先行して行った。解析のモデルは図-2に示すように下床版を有するモデル (Type-1) と下床版のないモデル (Type-2) の2種類のモデルを用いた。両者のモデルの比較検討から、下床版の影響による構造物の耐荷特性の変化を確認する。

本解析には汎用有限要素法プログラム「MSC. Marc Version2001」を使用し、鋼板は4節点平面シェル要素、

鉄筋はトラス要素、コンクリートは材料の非線形を考慮した8節点ソリッド要素を用いてモデル化を行っている。なお、鋼板とコンクリートの要素同士は節点を共有せず完全に付着している条件とした。解析モデルは実橋の1/4程度のスケールで縮小した形状を想定しており、荷重は片側49kNづつ漸増荷重を行っている。



(1) Type-1



(2) Type-2

図-2 解析モデル図

## (2) 解析結果とその考察

解析結果の例として、下床版のないType-2の下フランジが降伏した $P = 588\text{kN}$  荷重時におけるデータを用い、考察を行うものとする。まず、荷重-変位関係については、下床版の効果によって桁の剛性が高まり、変位性状が改善されていることがわかる。また、終局耐力も向上している。(図-3)

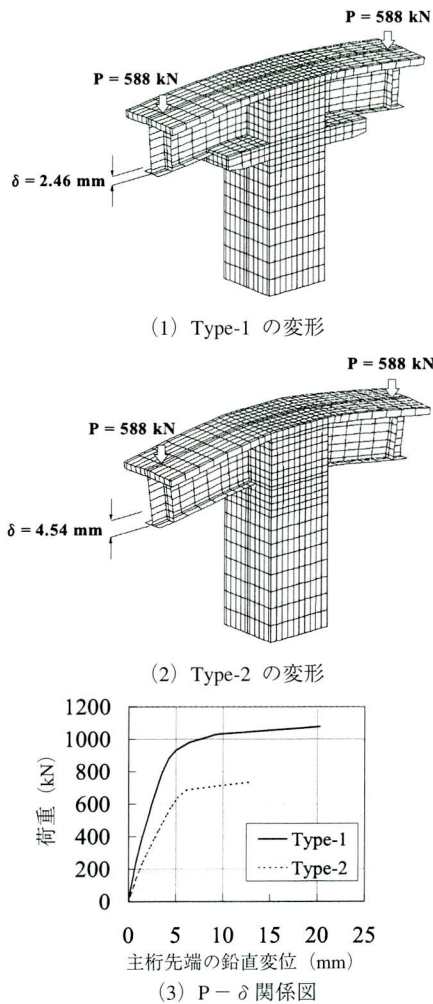


図-3 モデルの変形形状と荷重-変位 関係図

次に、同一荷重においてひずみ性状を比較した場合、Type-1のフランジひずみはType-2に対して小さく、特に鋼桁の下フランジひずみは橋脚近傍での応力集中が緩和され、滑らかに分布している様子がわかる。このとき、上床版でも剛性の違いによる影響が現われており、Type-1のコンクリートの引張りひずみは低下している。したがって、上床版のひびわれが抑制されることになり、実橋では床版の耐久性も向上するものと考えられる。なお、下床版には特に大きなひずみは生じていない。フラ

ンジのひずみ分布を図-4に、コンクリひずみコンター図を図-5に示す。このように、下床版を設けることにより、桁の耐荷特性および終局耐荷力の向上とともにひずみ性状も改善され、剛結部の円滑な応力伝達が行われることが期待できる。ただし、解析条件において鋼部材とコンクリートとは終局状態まで完全付着が保たれるものとしているため、設計または施工段階において、鋼とコンクリートとのずれ止めに十分な配慮を行う必要がある。

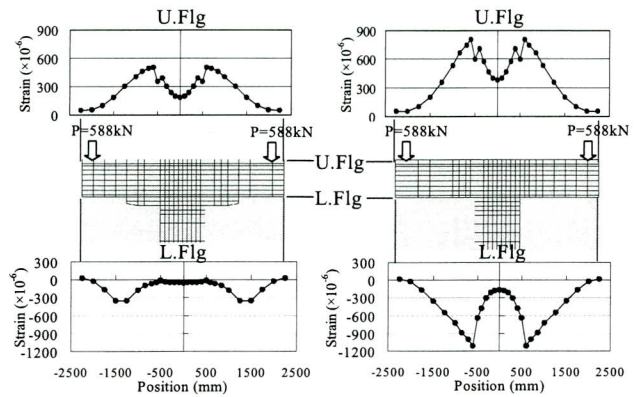
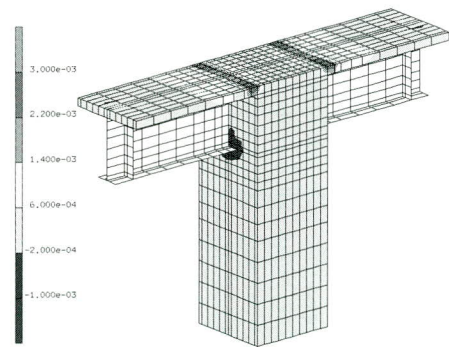
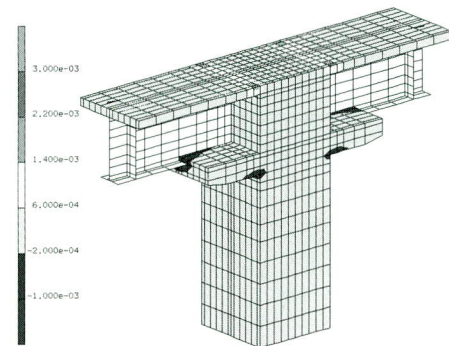


図-4 フランジの軸方向ひずみ分布



(1) Type-1



(2) Type-2

図-5 コンクリート要素主ひずみコンター図

#### 4. 実橋への適用に向けた検討

##### (1) 試設計による検討

###### 1) 試設計の概要

提案する新形式橋梁について試設計を行い、従来形式と比較することでその経済的特徴を明らかにしようと試みた。比較対象となる従来形式は、連続非合成鈹桁と連続合成鈹桁とした。設計計算は概略自動計算プログラムを用いて、概算費用の算出までを行った。新形式橋梁は連続合成鈹桁としての設計計算を基に、ラーメン構造であることは考慮せず断面力を同一と仮定して、中間支点上の断面のみを下床版の断面を有効とした断面の照査を行った。このとき下床版はその施工時期を上床版と同時期と仮定することで、後死荷重と活荷重については下床版を含めた合成断面で、前死荷重は鋼桁のみの断面で受け持つこととして応力度を算出し、クリープおよび乾燥収縮の影響は考慮していない。試設計の構造一般図を図-6に、主な設計条件を表-1に示す。

これまでに建設された橋梁の事例によれば、従来形式の適用支間長は60m～70m程度が一般的とされている。今回の試設計では新形式の構造がその適用支間の前後の

支間長での傾向を把握するために、支間長Lは40, 60, 80, 100mと4種類の場合について検討を行った。また下床版を設ける範囲については、連続合成鈹桁の設計において床版コンクリートを有効としない範囲である支間長の15%の範囲としている。

表-1 試設計の設計条件

橋梁形式	従来形式		新形式橋梁
	連続非合成鈹桁橋 : Type-A	連続合成鈹桁橋 : Type-B	連続合成複合鈹桁橋 : Type-C
支間長	0.8L : L : 0.8L : L=40,60,80,100 (m)		
主桁本数	4 (主桁間隔=2900mm)		
床版形式	鉄筋コンクリート床版 (t=250mm)		
活荷重	道路橋示方書 B活荷重 (日本道路協会)		

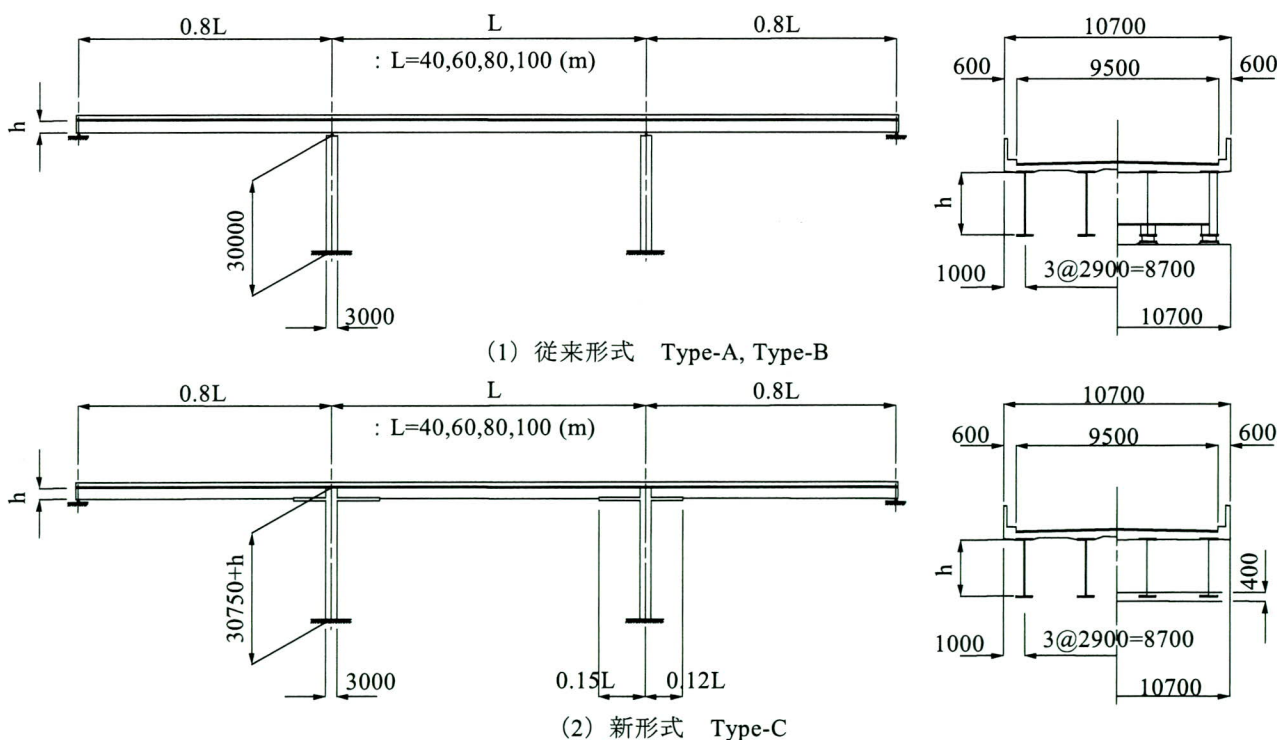


図-6 試設計の構造一般図

## 2) 試設計結果とその考察

試設計における断面構成の例として、支間長80mでの中間支点上外主桁断面を表-2に示す。従来形式であるType-A, Type-Bでは輸送幅の制限を考慮して腹板高を3.0mと設定したが、合成桁として設計しているType-Bでは、上側床版内の鉄筋を有効とする計算によりフランジ厚を小さくした断面構成となっている。さらに下側床版のコンクリート断面を有効とするType-Cでは、腹板高を10%低くした断面構成とし、フランジ断面は縮小できている。また、このような傾向はその他の支間長においても同様であった。

次に各橋梁形式の概算数量と概算工費の算出結果について、支間長との関係についてまとめたグラフを図-7および図-8に示す。算出結果は連続非合成桁 (Type-A) との比較としており、それぞれの支間長においてType-Aを1.0としたときの他形式との比で表している。はじめに、橋面積あたりの鋼重について述べる。表-2で示したように、新形式橋梁Type-Cは断面構成において鋼桁断面を従来形式よりも小さくできることから、橋面積あたりの鋼重もType-Aと比較して10~18%、連続合成桁であるType-Bとの比較では5~10%鋼重減となった。Type-B, Cとも支間長80m以上においては減少率は大きくないが、この検討では 支間長/腹板高 の比を一定とせず腹板高を3.0mに制限していることによる影響と考えている。次に橋面積あたりの工事費は、支間長の拡大とともに鋼重とは異なる傾向が現れており、新形式の場合、長支間での工費が減少している。今回は下部工を除き支承や下床版および、剛結部コンクリートまでを含む内容であることから、従来形式の支承の費用が反力に比例して増加するのに対し、剛結部コンクリートは変化

量が小さく全体的なコンクリート施工費の増加割合は小さいことが影響しているものと思われる。したがって経済性の観点からは、支間長が長い場合、より経済性が高まる傾向となるものと考えられる。

以上より新形式橋梁では鋼桁断面の縮小により、鋼重の減少、工事費の低下といった特徴が明らかになった。この橋梁形式を最も合理的なものとするためには、下床版厚の設定は重要であると考えており、

- ① 下床版厚を支間長に応じて変化させる
  - ② 下床版厚を下フランジ断面に応じて変化させる
- などの検討を行う必要があると考えている。

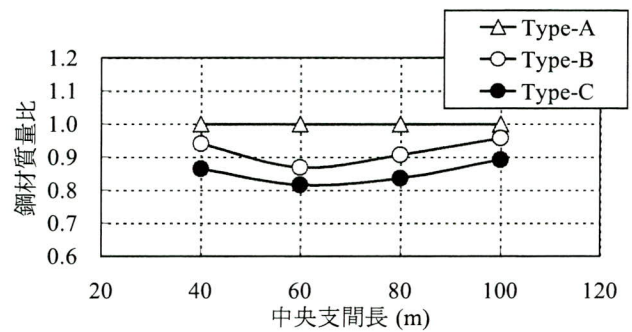


図-7 支間長-鋼材質量比 関係

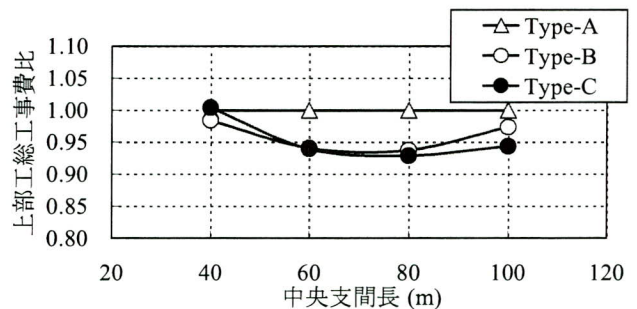


図-8 支間長-総工事費 関係

表-2 中間支点上断面構成の例

	連続非合成桁: Type-A	連続合成桁: Type-B	新形式橋梁: Type-C
中央支点断面構成 (中央支間80m)	<p>U.Fl: 1000×52 Web : 3000×15 L.Fl: 1000×55</p>	<p>U.Fl: 1000×46 Web : 3000×15 L.Fl: 1000×51</p> <p>D19 @100</p>	<p>U.Fl: 900×55 Web : 2700×13 L.Fl: 850×43</p> <p>下床版厚 400 (mm)</p> <p>D19 @100</p>
鋼桁断面積 (Type-A比)	1520 cm <sup>2</sup> (100)	1420 cm <sup>2</sup> (93.4)	1212 cm <sup>2</sup> (79.7)

## (2) 現場施工法の検討

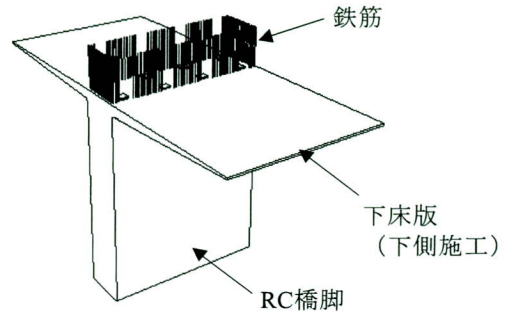
中間支点部の施工に関しては、橋脚および下床版の構築方法、鋼桁の架設要領、主桁と下床版コンクリートとの合成、剛結部コンクリート施工など、型枠支保工の計画も含めて検討すべき課題が多い。一般的には、上部工をトラックレーンベント工法で架設した後、下床版部のコンクリート施工を鋼桁からの吊り型枠を用いて行う方法が考えられるが、ここではより建設コストを縮減できると考えられる施工方法の案を以下に示す。

提案する施工方法（図-9）は、下床版の一部を橋脚とともに先行して施工する方法であり、上部工の現場施工時には、下床版施工に伴う足場や型枠作業を大幅に軽減することができると考えている。この方法は、はじめに橋脚と下床版の一部として鋼桁下フランジ位置より下側まで、先行して中間支点部を構築する（図-9(1)）。次に剛結部から鋼桁を順次架設し（図-9(2)）、先行施工した下床版の一部を型枠代わりとして下床版コンクリートを施工する（図-9(3)）。鋼桁と下床版の合成の後、剛結部のコンクリート施工を行い（図-9(4)）、その後上床版の施工となる。

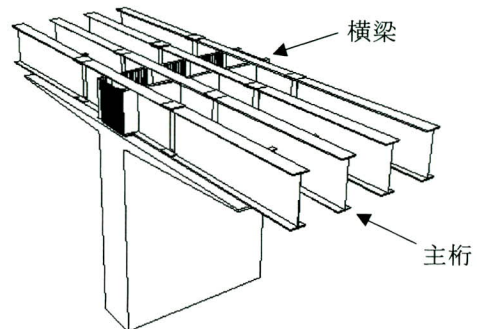
以上のように、この新形式橋梁の建設は十分に可能であると考えているが、前述の課題とともに、架橋地点の環境や地形などの条件に応じた検討も必要であるため、今後は施工要領の整備なども進めていきたいと考えている。

## (3) 下フランジずれ止め構造の検討

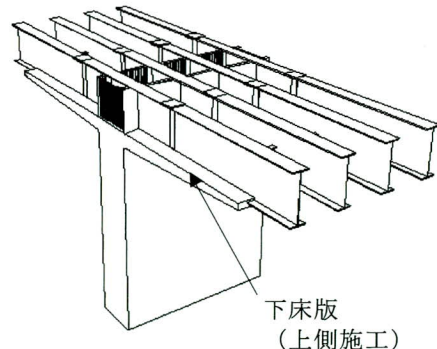
試設計および現場施工法で示したように、下床版コンクリートは下フランジを巻き立てるように配置することを基本と考えている。これは主に建設コストを抑制する観点から、下床版の下側コンクリートを先行施工することにより、後施工コンクリートの型枠を不要とすることを目的としている。下床版を主桁と合成するためのずれ止めは、通常はスタッドなどのシアコネクタを取り付ける方法が一般的と思われるが、図-10(1)に示すようなフランジに孔をあけ、孔あき鋼板ジベルを兼用させる構造も可能であると考えている。孔をあけることによる下フランジ応力度への影響は、図-4のFEM解析結果に示したように、フランジとコンクリートとが一体化している限り問題ないと考えられる。またこの場合、後施工コンクリート打設時の下フランジ裏側へのコンクリート充填性も良好となるものと思われる。その他、ウエブ下側の孔あき鋼板ジベルによる方法（図-10(2)）、ス



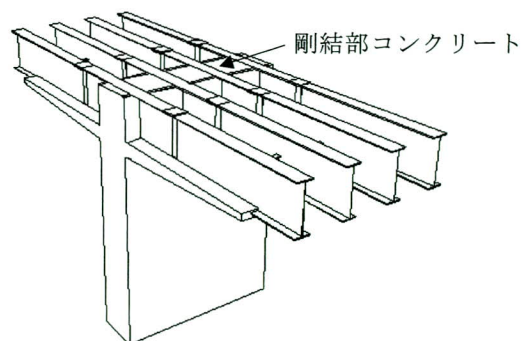
(1) 中間橋脚の構築



(2) 鋼桁架設



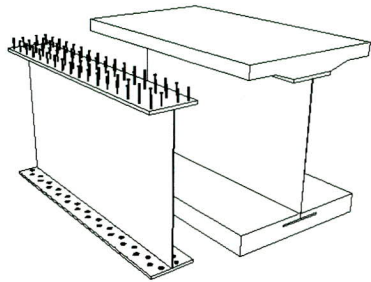
(3) 下床版コンクリート施工



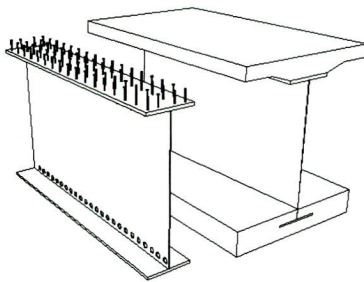
(4) 剛結部コンクリート施工

図-9 中間支点部の施工手順（案）

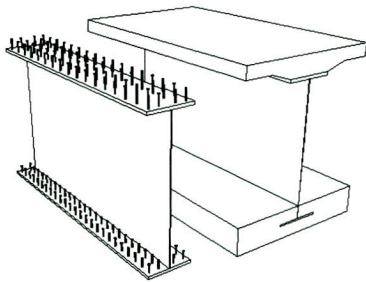
タッドによる方法（図-10(3)）も考えられるが、ジベル位置またはその高さの関係から、フランジに孔をあける場合と比較してコンクリートを厚くする必要があり、経済性に劣ることになる。これらずれ止め構造の選定に関しては、実験等による性能確認を行って検討したいと考えている。



(1) フランジ孔あきジベル案



(2) ウェブ孔あきジベル案



(3) スタッド案

図-10 下床版側のずれ止め構造（案）

## 5. まとめ

これまでの研究より得られた知見を以下にまとめる。

- ① 下床版を設けることにより、構造物の耐荷性状が向上する。
- ② 従来形式の橋梁構造と比較して、適用支間長の長大化、または低桁高化が可能である。
- ③ 上床版の引張応力度が低下するため、プレストレスを導入することなく、コンクリートのひび割れ発生

が抑制され、床版の耐久性が向上する。

- ④ 鋼主桁断面構成、橋脚および基礎断面の縮小により、建設コスト縮減に寄与する。

ここで提案した新形式橋梁は、力学的特性や構造形態が合理的であり、十分に実橋に適用可能であると考えている。しかしながら前述の下フランジずれ止め構造に加えて、下床版の厚さと橋軸方向に設ける範囲、設計計算におけるクリープや乾燥収縮の影響、下床版と鋼桁との合成時期に伴う荷重分担分の変化など、設計上の検討項目の追加とともに、施工要領の整備も行っていく必要がある。これらを解決することにより、この新形式橋梁によって経済的かつ機能的な橋梁建設に貢献できると考えている。

なお、本稿は鋼構造シンポジウム等に発表した論文<sup>3)~5)</sup>をまとめたものである。

最後に、本研究を実施するにあたり、日本鋼構造協会の鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会、鋼橋の高性能化研究小委員会（委員長：中村俊一 東海大学教授）の委員の方々には、貴重なご助言を頂きました。ここに記して深謝いたします。

## <参考文献>

- 1) 橋梁と基礎：特集ハイブリッドの時代，2002 vol. 36 No.8，平成14年8月号，建設図書
- 2) 例えば，大山，栗田，渡辺：鋼コンクリート二重合成連続箱桁橋の断面構成比がクリープおよび乾燥収縮挙動に及ぼす影響，構造工学論文集 vol. 46A，pp. 1685-1692，2000年3月，土木学会
- 3) 内田，佐藤，中村，入部：鋼I桁とダブルRC床版による複合ラーメン構造に関する研究，鋼構造年次論文報告集第11巻，pp. 277-282，2003年11月，日本鋼構造協会
- 4) Sato, T. Nakamura, S. Noto, H. : A NEW STEEL-CONCRETE COMPOSITE RIGID-FRAME BRIDGE WITH STEEL I-GIRDERS AND DOUBLE RC DECKS, Proceedings of The 6th Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges (JSSB-JK6), pp. 507-514, 2001
- 5) 佐藤，中村，入部，三浦：中スパンへの適用を目指した鋼-コンクリート複合鋼桁橋の提案，第56回土木学会年次学術講演会論文集，CS2-002，pp. 84-85，平成13年10月，土木学会

2004. 1. 3 受付