

鋼・コンクリート合成床版（SCデッキ）の曲線開断面箱桁への適用

Application of Steel-Concrete Composite Deck (SC-DECK) to Curved Open Box Girder Bridge

*水野 浩, *木本輝幸, **香川公昭, ***池田弘文, *** 斉木浩二
Hiroshi Mizuno, Teruyuki Kimoto, Masaaki Kagawa, Hirohumi Ikeda, Koji Saiki

* 川田工業株式会社橋梁事業部大阪技術部 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)
** 川田工業株式会社橋梁事業部四国工場橋梁部 (〒764-8520 香川県仲多度郡多度津町西港町 17)
*** 川田工業株式会社橋梁事業部大阪工事部 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

In recent years, open-box girder bridges have been increasing in number for rationalization and cost minimizing of steel bridge. Shimoyamaguchi bridge is applied to open-box girder bridge because construction cost of this bridge is reduced. This bridge's plane curve is small with the radius of 150m. A curved open-box girder bridge may have caused overall and local buckling when it was constructed because open-box girder bridge has small rigidity of torsion. Then slab of Shimoyamaguchi bridge was applied to steel-concrete composite deck (sc-deck). In the sc-deck, a role as upper lateral bracing of the steel plate was given by having suggested the structure, which joined steel girder and the steel plate. FE analysis was carried out in order to let the plate of sc-deck function as upper lateral bracing. In addition, safety of this bridge improved by applying the sc-deck because this bridge is over Chugoku highway. In this paper, a part of structure examinations, construction examinations, and experiment results are reported.

Key-Word: open-box girder bridge, steel-concrete composite deck, overall-buckling, local-buckling

1. はじめに

近年、鋼橋の合理化・コストミニマム化を目的として開断面合成箱桁を採用するケースが増加してきている。本橋も当初発注形式は閉断面非合成箱桁であったが、実施工事ではコスト縮減を目的に鋼・コンクリート合成床版（以下合成床版と略す）を用いた開断面箱桁が採用されている。

一方、開断面箱桁は架設時の断面照査に注意を要する橋梁形式である。本橋のような曲率の小さい曲線桁に用いる場合、開断面箱桁はねじり剛性が極端に小さい事、またせん断中心が下フランジより下方に下がる事から、全体座屈を引き起こしやすく特に注意が必要である。本橋ではこれらの問題に対して、合成床版の下鋼板（以下、下鋼板と略す）を主桁作用に有効に作用させる事で、耐荷力、経済性の向上を計ったものである。

本報告では、開断面箱桁と合成床版下鋼板の、結合構造の妥当性確認のために行ったFEM解析、実橋計測の結果を報告する。また、今回のような合成床版を用いた曲線開断面箱桁の一括架設施工は国内でも実績が少なく、今後の同種工事の参考資料として、現場施工時の諸検討事項について紹介する。

工事概要

路線名 : 兵庫県道高速北神戸線（東伸部）
工事名 : 下山口工区（東行）鋼桁工事
工事場所 : 兵庫県西宮市山口町下山口付近（図-1）
発注者 : 阪神高速道路公団
請負者 : 川田・トピー建設工事共同企業体
構造概要 : 図-2 参照

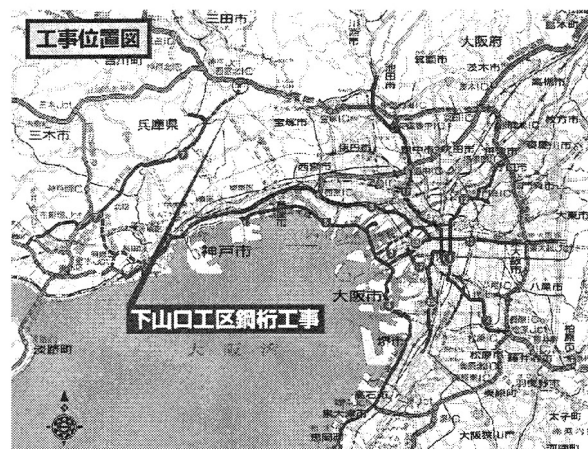


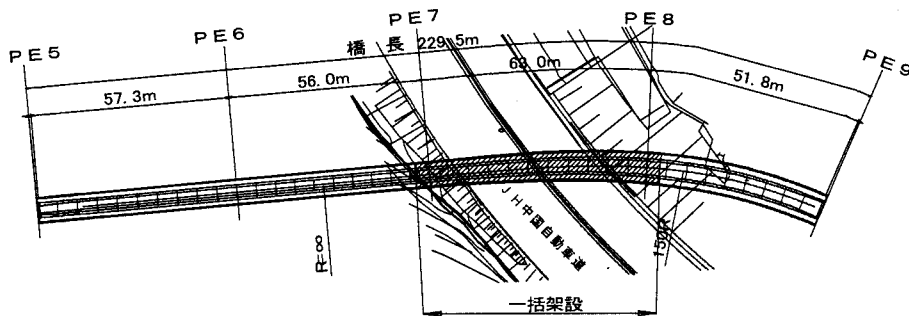
図-1 工事位置図

2. 合成床版を有する開断面箱桁の構造概要

今回、開断面箱桁橋に下鋼板を取付けることで「擬似箱桁」を形成し、ねじり剛性を高め、全体座屈耐力を向上させている。場所打ちPC床版などであれば、擬似箱桁を形成するために上横構を設置していたが、合成床版では上横構が不要となる。一方合成床版を有する開断面箱桁形式では、ねじり剛性確保のための合成床版と主桁の結合方法の妥当性や、主桁作用による下鋼板の座屈耐力の照査がポイントとなる。

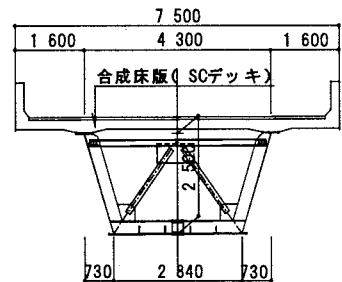
(1) 合成床版の構造概要

合成床版の概要を図-3に示す。合成床版は、鋼板とコンクリートを、頭付スタッドジベルを介して合成させた床版形式である。



平面図

図-2 橋梁概要図



一般部断面図

コンクリート打設までは、鋼板と横リブが抵抗し、コンクリート硬化後は、鋼板とコンクリートの合成断面で抵抗する。また下鋼板の継手は、高力ボルト摩擦接合継手を用いている。

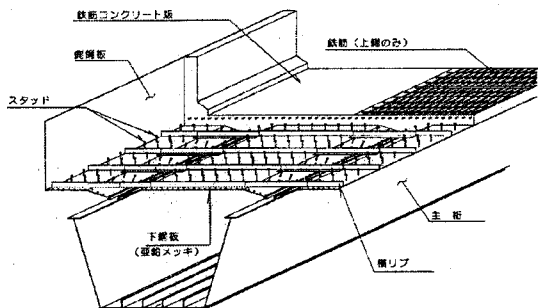


図-3 合成床版概要

(2) 合成床版と主桁の結合構造

方法①

方法②

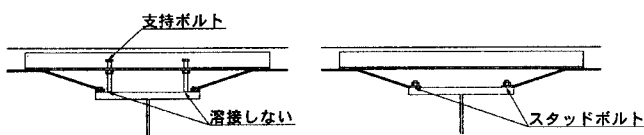


図-4 これまでの主桁と合成床版の結合方法

これまでの主桁と合成床版の結合方法を図-4に示す。②の方法では、合成床版に応力が入りすぎるため合成床版の座屈の危険性がある。また①ではねじり剛性の確保が出来ない。今回、ねじり剛性確保と、下鋼板に発生する主桁作用応力の緩和を主目的に図-5に示す結合構造を適用した。これは、逆U字型の台座（以下Uチェアと略す；特許出願番号 2004-017789）を主桁上フランジに配置する事で、橋軸方向にはラーメンフレームとしての柔なバネ、直角方向には剛なバネとして挙動する事になる。その結果、ねじりモーメントには下鋼板と開断面箱桁が一体となって抵抗し、主桁作用としての曲げモーメントには下鋼板の抵抗を低減する事が可能な構造である。

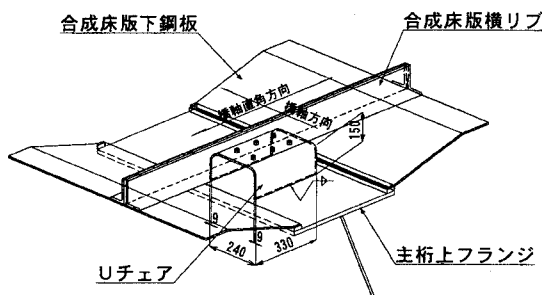


図-5 合成床版と主桁の結合構造

この結合構造の妥当性を確認するために、部分モデルによる下鋼板の座屈解析、全体モデルによるFEM解析および実橋計測を行った。

3. FEM解析

(1) 全体モデルによるFEM解析

全体FEMモデルにて、下鋼板の全体座屈耐力への寄与度を把握するために、静的解析、線形座屈解析を行った。

一括架設部（PE7～PE8）の主桁、合成床版を、シェル要素にてモデル化を行った。モデル概要を以下に示す。

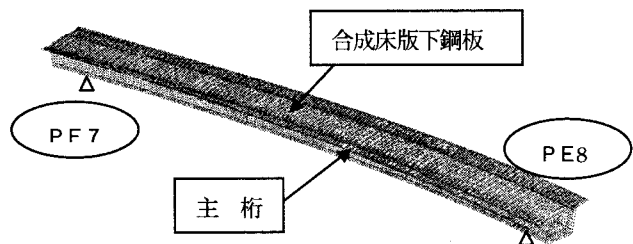


図-6 全体FEMモデル概要

Uチェアによって下鋼板を取付けた場合〔ケース1〕と、結合し無い場合（図-4の方法①）〔ケース2〕について解析を行った。表-1に支間中央における、ケース1・2のFEM解析結果をまとめる。

座屈解析の結果より、ケース1が載荷荷重の0.41倍で全体座屈を起すのに対して、ケース2は載荷荷重の10倍以上の荷重を載荷しても全体座屈を起していない。従ってUチェアにより結合することによって全体座屈に対する耐荷力が大きく向上することが解かった。

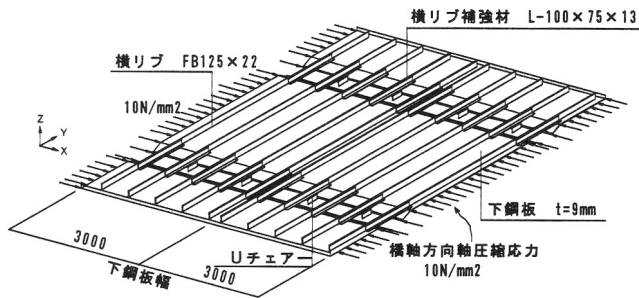
また、静的解析結果より、下鋼板は後述3.(2)で得られた許容座屈応力 ($\sigma_{pa}=73.5\text{N/mm}^2$) を超過していない事が解かった。

表-1 FEM解析結果

支間中央の結果		ケース1	ケース2
構造	荷重	鋼桁+下鋼板+付属	鋼桁+下鋼板+付属
	下鋼板	-60.1	0
応力	上フランジ	-91.3	-174.7
	ウェブ上縁	-82.0	-161.2
	ウェブ下縁	93.4	90.1
	下フランジ	100.3	105.1
変位	鉛直(mm)	157.0	196.2
	回転(10^{-3}rad)	6.0	66.6
座屈固有値		10以上	0.41

※デッキ、上フランジ、ウェブ、下フランジ応力はそれぞれ左右の平均値を示す。
※応力度の単位は N/mm^2 であり、(+)を引張として表す。

(2) 合成床版部分モデルによる非線形座屈解析

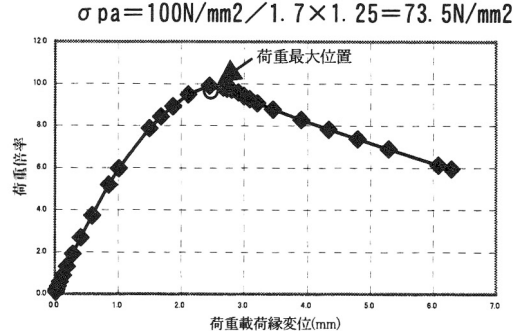


図－7 非線形座屈解析モデル図

上記モデルに橋軸方向軸圧縮応力を与え、初期不整（線形座屈解析の1次モードを適用し、大きさは最大値を製作における許容誤差である $L/150$ =横リブ間隔 $650\text{mm}/150$ とした。）を考慮した非線形座屈解析を行った。

図－8に縦軸に初期荷重 10N/mm^2 の荷重倍率 P 、横軸に荷重載荷位置（下鋼板端部）の変形量 δ とした P - δ 図を示す。下鋼板の作用荷重が 50N/mm^2 までは、変位と荷重は線形的に変化するが、作用荷重が 50N/mm^2 以上については非線形的に変化している。作用荷重最大値は初期荷重の10倍である 100N/mm^2 程度となった。

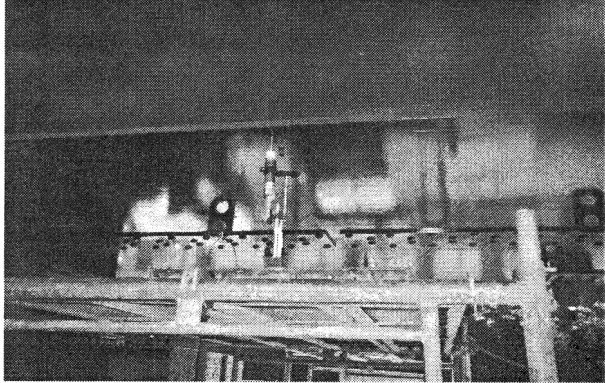
上記結果より、下鋼板の座屈応力は 100N/mm^2 であることが分かった。基準降伏点からの安全率1.7、架設時割増係数1.25を考慮し、合成床版の許容座屈応力 σ_{pa} を以下とした。



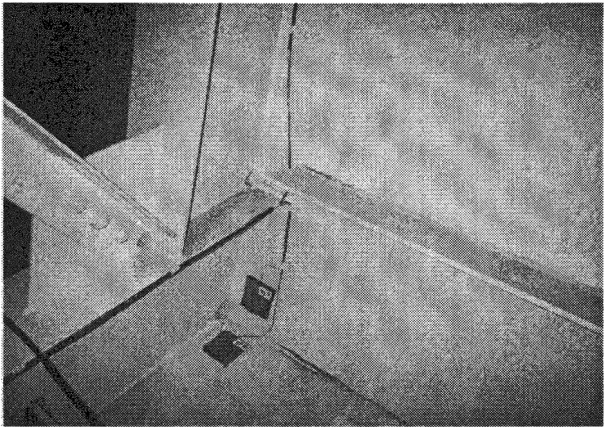
図－8 荷重－変位図

4. 実橋計測

3. (1) で述べた FEM 解析により求めた応力度および変位に対して、一括架設前、現場ヤードでの地組時に支点支持状態を再現し、主桁、下鋼板のひずみ、変位の計測を行っている。



写真－1 変位計測状況



写真－2 ひずみ計測状況

表－2に支間中央の実橋計測結果を示す。表－1の「ケース1」の結果と比較すると、下鋼板の寄与度が解析値に比べて小さいものの、おおむね一致している。これよりねじりモーメントが卓越する曲線桁に対してUチェア-が有効に寄与していた事が解かり、結合構造の妥当性を確認した。

表－2 計測結果

支間中央の結果		GL	GR	平均値
応力度	下鋼板	-50.0	-44.1	-47.1
	上フランジ	-115.1	-103.9	-109.5
	ウェブ上縁	-109.1	-97.5	-103.3
	ウェブ下縁	105.7	71.0	88.4
	下フランジ	103.1	80.9	92.0
変位	鉛直(mm)	186	172	179
	回転(10^{-3}rad)	4.27		

※応力度の単位は N/mm^2 であり、(+)を引張として表す。

5. 現場施工について

(1) 架設概要

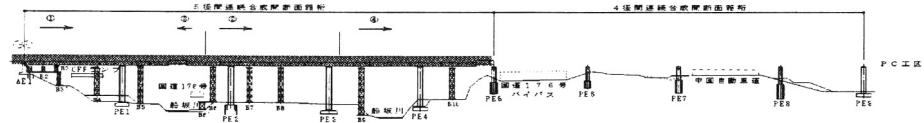
本橋は、JH中国自動車道上を跨ぐため、合成床版の下鋼板等すべて設置し1200t クレーンによる大ブロッケー一括架設を採用している。合成床版を用いることによって、床版施工時の規制日数低減に寄与している。今回のような合成床版を用いた曲線開断面箱桁の一括架設施工は国内でも実績が少なく、今後の同種工事の参考資料として、現場施工時の諸検討事項について紹介する。

(2) 輸送・地組立てについて

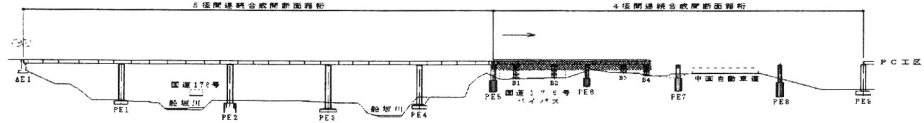
本橋では、主桁を2分割し写真－3のように主桁を寝かせた輸送荷姿とした。これは、輸送部材長を極力長くすることで、部材数低減に努めた。輸送時、荷取時の安定性の確保に配慮するため、仮設材として形状保持材（アングル）を設置した。

大ブロッケー一括架設部（P7～8）は、写真－4のように現場ヤードに地組立て架台を設置し、主桁、合成床版、付属物など設置可能なものについては全て地組立て時に設置を行った。

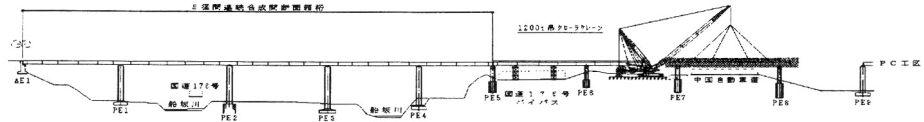
1) 5 径間架設 (360t吊H/C)



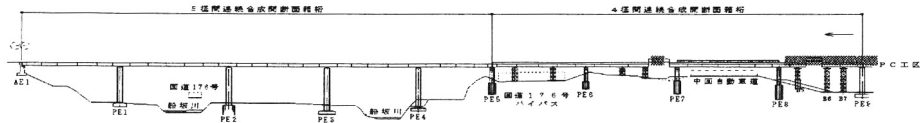
2) 4 径間 (PE5～PE7間) 架設 (200t吊H/C)



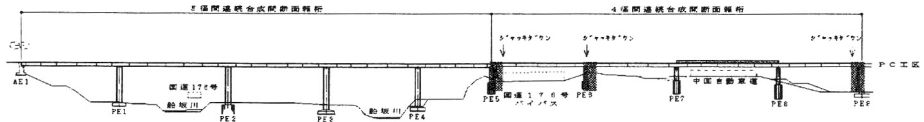
3) JH上一括架設 (1200t吊C/C)



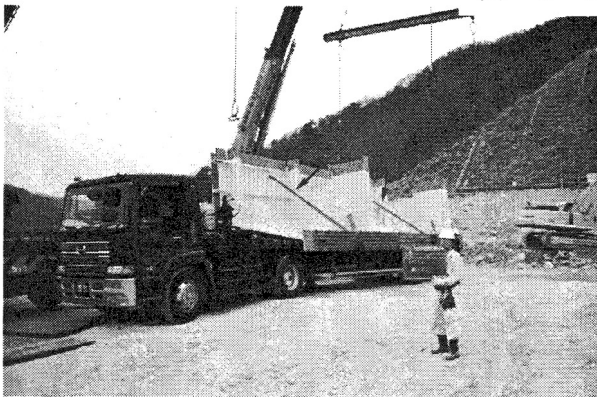
4) PE8～PE9間架設 (360t吊H/C)



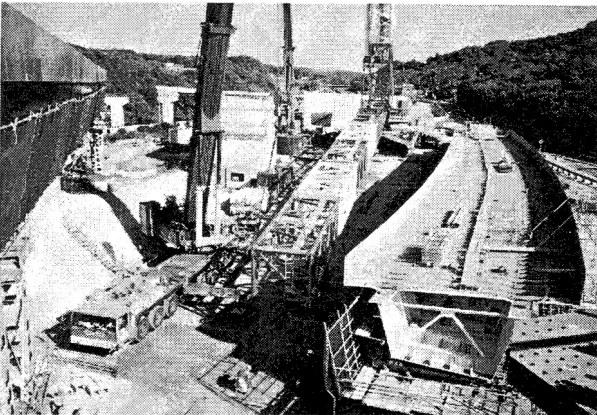
5) PE5, PE6, PE9 支点部ジャッキダウン



図－9 架設概要図



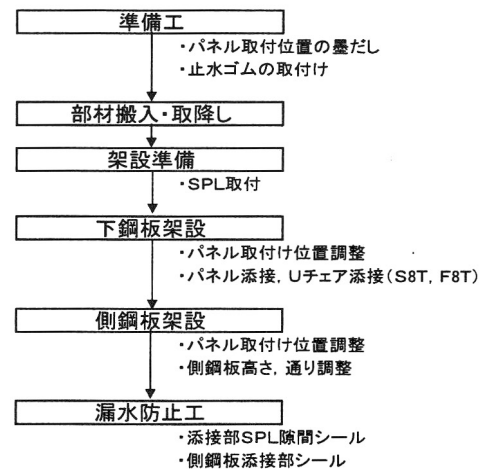
写真－3 輸送荷姿



写真－4 地組立て状況

(3) 合成床版の架設について

合成床版の施工フローを図-10 に示す。合成床版は主桁との取合部にはゴムパッキンを設置し、また継手部にはシーリング材を施工することにより止水に配慮を行っている(図-11 参照)。JH中国自動車道上の一括架設部では架設時の漏水やコンクリート漏れに特に配慮を行い、シーリング施工後、水張り試験を実施し水漏れに対して問題無いことを確認している。



図－10 合成床版施工フロー

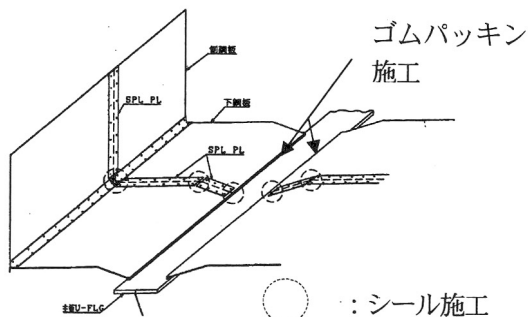


図-11 合成床版止水

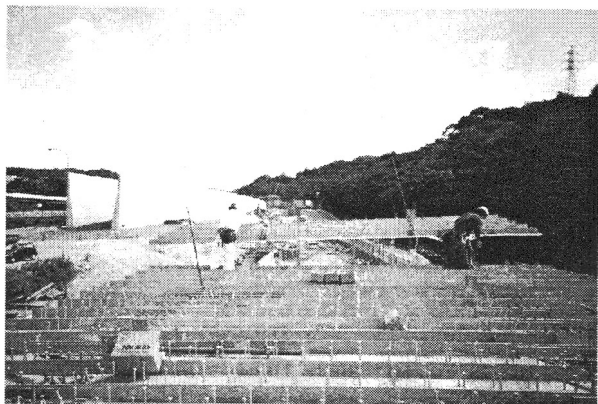


写真-5 合成床版架設状況

(4) JH上一括架設について

JH中国自動車道上の架設概要を図-12に示す。JH中国自動車道は交通量が多いため、交通規制を最小とする架設工法を選定する必要があった。そのため、1200tクレーンを用い、1夜間で大ブロック一括架設を行う方法を採用している。

1200tクレーンを使用するにあたって、盛土を行い施工ヤードの造成を行っている。このとき、平板載荷試験を実施し、地耐力が十分あることを確認している。

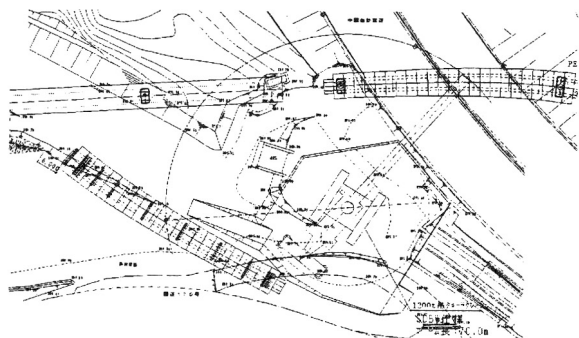
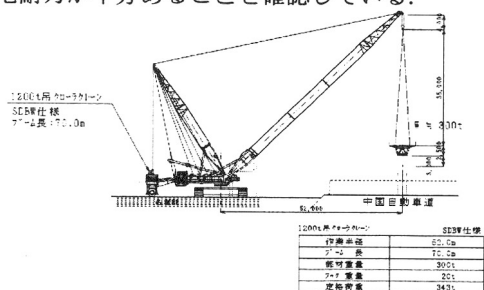


図-12 一括架設概要

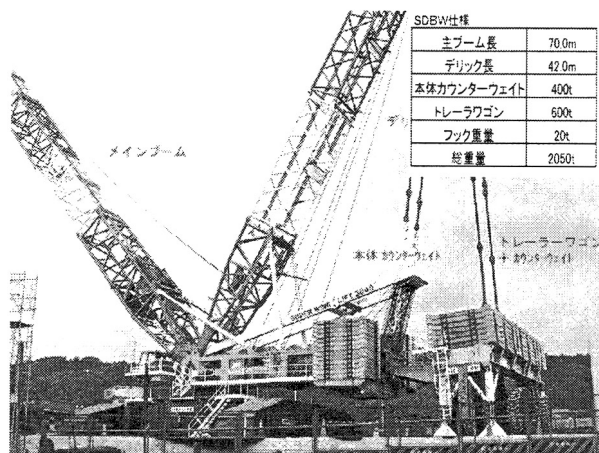


写真-6 1200t クレーン



写真-7 一括架設（吊上げ時）

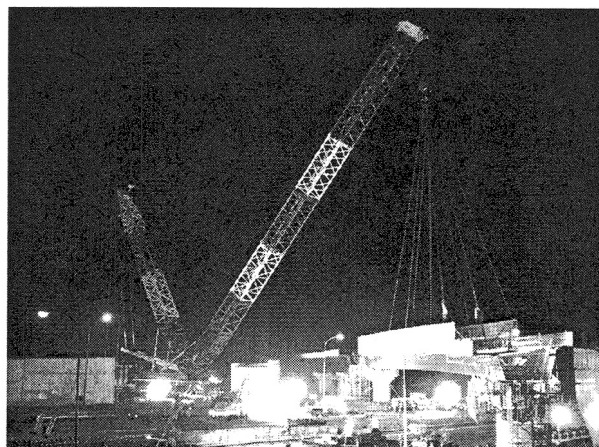


写真-8 一括架設（架設完了）

(5) 曲げモーメント連結について

図-13に曲げモーメント連結の概要を示す。一括架設部分は、架設直後は単純桁として挙動する。従って架設時に一時的に発生する応力に対して照査を行い、主桁断面補強を行っている。しかし、架設系の応力を完成系に残すと不経済な断面設計となるため、曲げモーメント連結を行うことによって完成系の設計では連続桁としての設計を行っている。

工程上P5～P7は一括架設前に架設を行う必要があった。そのため、ジャッキダウン量をあらかじめ算定、バント高さの調整を行い、併合部の1ブロックを残し架設を

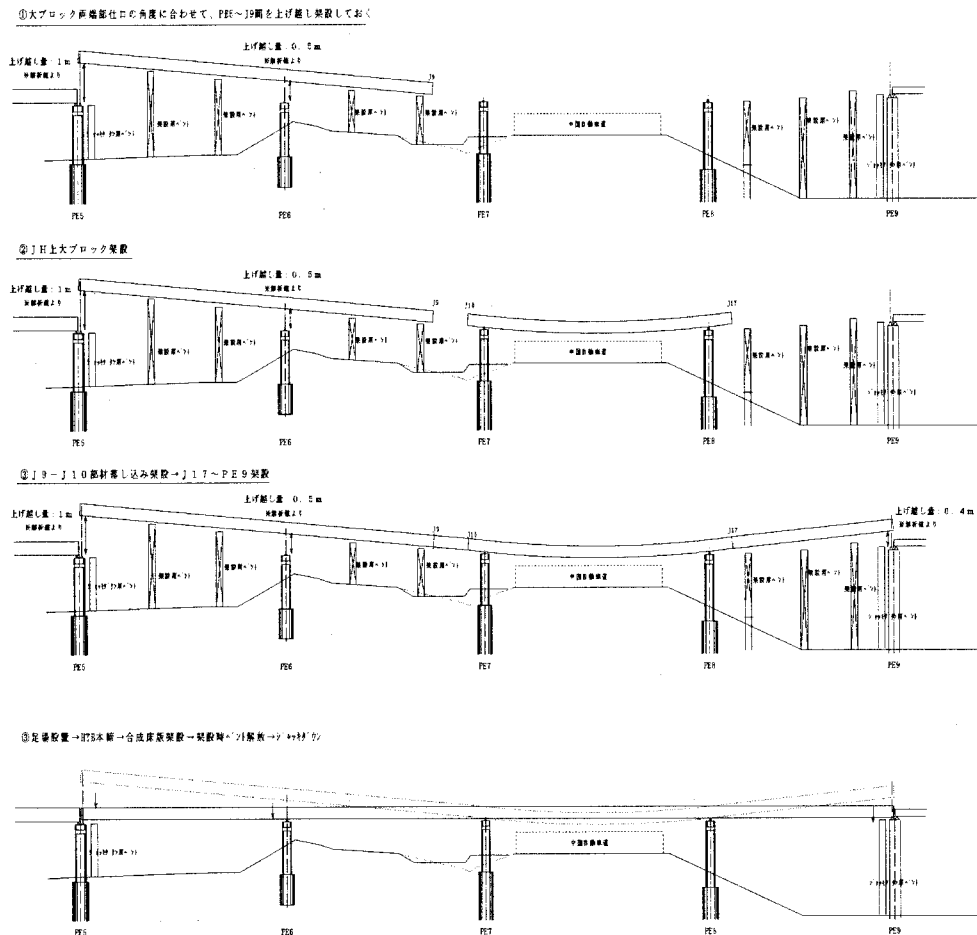


図-13 曲げモーメント連結概要

行った。ジャッキダウン量の想定には、全体FEM解析から得られた変位結果を用いた。一括架設後、仕口角度を計測し、先行架設ブロックの高さ調整を行った後、併合部の落込み架設を行った。ジャッキダウン後の測量結果、また床版打完了後、完成時の出来形測量結果も良好であった。

6. おわりに

今回行った一連の検討、実橋載荷試験によって、以下について明らかとなった。

- ① 部分モデル非線形FEM解析の結果から、合成床版（SCデッキ）の座屈強度は73.5N/mm²である。
- ② 全体モデルFEM解析結果から、Uチェアを用いることによって、開断面箱桁の全体座屈耐力は大幅に向上する。
- ③ 全体モデルFEM解析結果から、合成床版の発生応力は、座屈強度を上回らない。
- ④ 実橋載荷試験とFEM解析結果を比較すると、概ね一致しており、Uチェアを用いた構造の妥当性が確認された。

今後、Uチェアの間隔、剛性などをパラメータに、曲線開断面箱桁における座屈強度算定式を作成していく必要があると考えている。

最後にご指導を賜った、阪神高速道路公団および川田・トビー建設工事共同企業体の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺 滉, 街道 浩, 水口和之, 村松竹司, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版の開発と実橋への適用について, 第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1994年11月。
- 2) 土木学会: 鋼構造物設計指針 Part B 合成構造物, 丸善, 1997年5月。
- 3) 阪神高速道路公団: 曲線桁設計の手引き(案), 1988年10月。
- 4) 伊藤 剛, 渡辺 滉, 橘 吉宏, 街道 浩, 松井繁之, 栗田章光: 鋼・コンクリート合成床版を適用した連続合成げたの静的載荷試験(その2) - コンクリート上面のひび割れに関する考察 -, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, CS7-041, 2001年。
- 5) 街道 浩, 渡辺 滉, 橘 吉宏, 武田芳久, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版(SCデッキ)の疲労耐久性評価について, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, CS-268, 2000年。
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(鋼橋編), 丸善, 1996年12月。
- 7) 川田工業株式会社: SCデッキ設計・施工マニュアル(案), 1999年8月。