

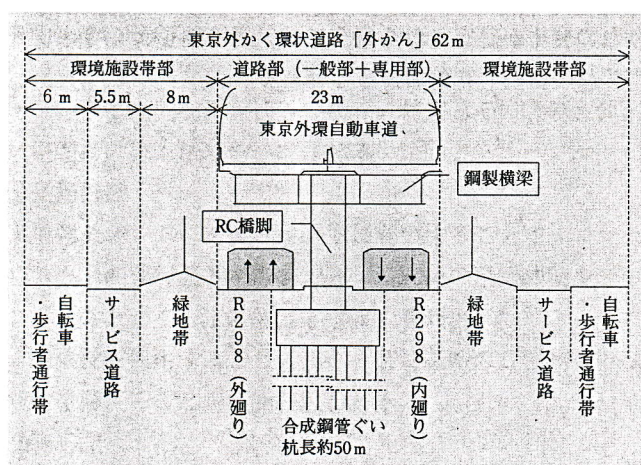
鋼 2 主鈑桁とRC橋脚の剛結構造の設計および施工

—東京外環自動車道（三郷JCT～三郷南IC）—

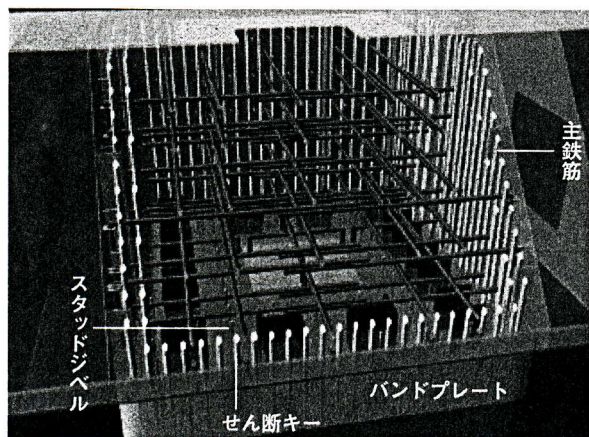
日本道路公団 東京建設局 築山有二 東京建設局 田中伊純 東京建設局 長瀬博紀 東京建設局 志村泰広

1 —はじめに

東京外環自動車道の三郷JCT～三郷南ICは、一般国道298号と併設した連続高架橋区間であり、鋼製横梁を介して上下部一体構造とした複合ラーメン形式を採用している（図1）。この構造により、高架橋は連続ラーメン橋となり、耐震性に優れ、支承の省略による維持管理の軽減が図られ、下部構造の規模を小さくできる等経済的な構造となる。上部構造は、現場打ちPC床版を有する主桁間隔6mの鋼連続2主鈑桁であり、上下線の主桁を支点部において鋼製横梁により1本のコンクリート橋脚で支持する構造である。また、剛結部の構造は、高流動コンクリートを充填した鉄筋貫通定着形式を採用した（図2）。



●図1——標準横断面図



●図2——剛結内部構造

今回採用した形式に対しては、下記①～③の問題等が考えられた。

- ①脚柱コンクリート角部に発生する圧縮応力が大きくなる。
- ②剛結部内の高流動コンクリートの充填性を確認し、剛結部の細部構造等を検討する必要がある。
- ③横梁上および横梁近傍部のPC床版は、剛性の高い横梁の拘束を受けることから、プレストレス導入量の低下が懸念される。

本報文では、①～③の問題等に対して実験やFEM解析を実施したので、その結果に基づく設計および施工について報告する。

2 —剛結部の構造検討

2.1 目的

鉄筋貫通定着形式では、力の伝達機構として、鈑桁→横梁→剛結部内コンクリート→鉄筋→橋脚となっている。また、横梁から剛結コンクリートおよび脚柱コンクリートへの応力伝達は、基本的にはスタッドに応力伝達を期待せず、拘束効果（支圧力）により行われる。このような構造に対しては、下記の問題が考えられたため、FEM解析を行い、細部構造の検討を行った。

- (1) 2方向曲げを受けるため脚柱コンクリート角部に大きな圧縮応力が発生する。
- (2) 支圧により力を伝達するため、鋼部材には板曲げ応力が発生し、下フランジには板厚方向のせん断力が作用する。
- (3) 横梁と剛結コンクリートとの境界面に引張応力が作用した場合、離れが生じる。また、横梁下フランジと脚柱コンクリートとの境界面に応力が作用した場合、開口が生じる。

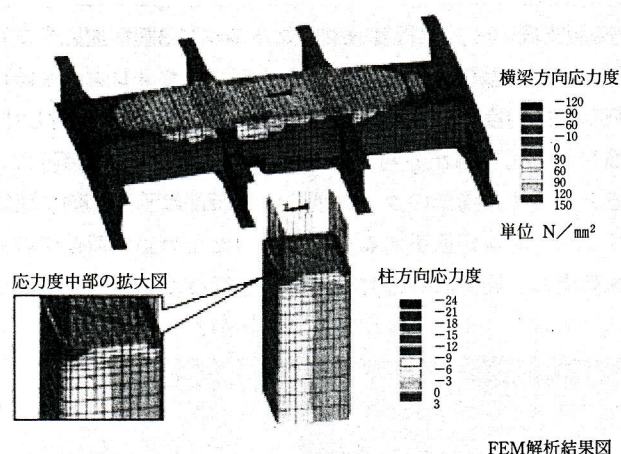
2.2 FEM解析モデル

解析モデルは、3次元FEM解析モデルとし、使用した要素は、鋼部材はシェル要素、コンクリートはソリッド要素、主鉄筋はビーム要素とした。また、剛結部の横梁とコンクリートとの結合条件は、せん断2方向は非拘束とし、垂直方向は拘束とするが境界面に引張力が作用した場合には非拘束とした。

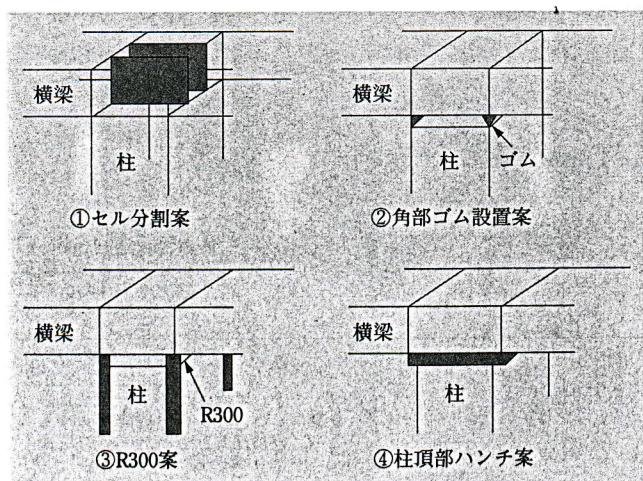
2.3 解析結果および構造決定

FEM解析結果を図3に示す。

- (1) 脚柱コンクリートの角部に大きな圧縮応力が発生した。そのため、①横梁の3セル構造、②角部にゴムの設置、③角部の形状変更(R300)、④脚柱コンクリートにハンチ設置の4つの対策を検討した(図4)。その結果、各ケースとも応力度の低減は見られるが、効果、経済性および施工性を考慮し、角部をR300にすることとし、母材と同厚のバンドプレートを設置することとした。
- 更に、脚柱コンクリート角部の割裂破壊に対して照査した結果、バンドプレート長を600mmとした。また、剛結コンクリートのせん断破壊に対して照査をした結果、鉄筋比で0.12%のせん断補強筋を配置することとした。
- (2) 横梁断面は、鋼製橋脚隅角部のせん断遅れを考慮した断面計算により決定し、更に下フランジは鉄筋貫通孔の断面欠損を考慮したため、FEM解析においても応力度は許容値を越えなかった。



●図3——解析結果 PICK UP参照



●図4——対策検討

- (3) 横梁と剛結コンクリートとの境界面に最大で1mmの離れと横梁下フランジと脚柱コンクリートとの境界面に最大0.2mmの開口が生じたため、離れおよび開口を防止する意味からもスタッドジベルを配置することとした。

3——剛結部内の高流動コンクリート充填

3.1 目的

剛結部へのコンクリート打設は、密閉・狭隙部の施工になるため、通常のコンクリートでは締め固めが不十分となり、品質低下を招くことになる。したがって、高い流動性、充填性、材料分離抵抗性を有する高流動コンクリートを採用した。

各種部材が複雑に入り組んだ剛結部内で、密実にコンクリートが充填されているかを確認し、またコンクリートが硬化するまでに側圧がどの程度作用するかを検証するために、コンクリート充填実験を行った。

3.2 コンクリートの配合と実験体モデル

コンクリートの配合を表1に示す。

実験体は充填状況を目視確認できるようアクリル製とし、剛結部上フランジ側をモデル化した上層試験体と、下フランジ側をモデル化した下層試験体の2体で行った。

3.3 実験結果

コンクリートの充填性については、2体とも実験体の隅々にまで廻っており問題はなかった。しかし、フランジ下面のコンクリート面には気泡が認められた。

これは、鋼部材とコンクリートの支圧により断面力を伝達する構造であることを考えると好ましいものではない。そこで気泡の発生を抑制する必要がある、下記のような構造を設計および施工に反映させた。

- ①フランジ、せん断キール、水平リブなどに適切な空気孔を設けた。
- ②フランジ空気孔を実験時の24.5φより大きい30φとした。
- ③フランジ空気孔から十分コンクリートを排出させた段階で打ち込み完了とする管理を行うこととした。
- ④コンクリート打設を自由落下無しで行った方が良好な状態であったため、自由落下無しで施工することとした。
- ⑤コンクリートが硬化するまでにかかる側圧は、水と同様な三角形分布であり、その側圧を荷重として考慮することとした。

●表1——コンクリートの配合

材令28日における圧縮強度 (N/mm²)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	単位量 (kgf/m³)							
			水	セメント	石灰石微粉末	膨張材	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE補助剤
30	68±5	4.5±1.5	170	285	285	30	731	795	7.2	4.8
36	68±5	4.5±1.5	170	340	230	30	740	795	7.5	4.8

4—— 横梁上のPCプレストレス導入

4.1 目的

横梁上および横梁近傍部のPC床版は、剛性の高い横梁の拘束を受けることから、プレストレス導入量の低下等の問題があり、また鋼部材の拘束によりコンクリートのクリープ・乾燥収縮といった経時変化挙動に留意する必要がある。

事前検討のために行った3次元FEM解析においても、クリープ・乾燥収縮を考慮した場合、一般的なPC構造物の「直後プレストレス」と「有効プレストレス」の関係以上にプレストレスが低下することが判明した。

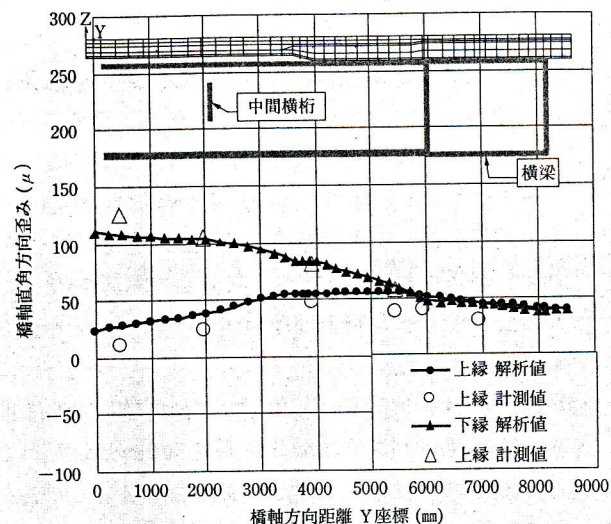
そのため、2/3縮尺モデルにて、PC床版プレストレス導入実験を行い、検証することとした。

4.2 実験結果および対策

緊張直後プレストレス量に対しては、横梁の拘束（プレストレスが横梁に流れる）により、軸力換算で一般部の約7割程度のプレストレスが導入される結果となった。また、PC緊張後約2カ月で、橋軸方向クラック（ひび割れ幅最大0.16mm）の発生（図5）・橋軸直角方向の乾燥収縮クラック（ひび割れ幅0.2～0.1mm程度）が確認された。

橋軸方向クラックの原因は、日照による床版上下面の温度差に起因する床版そり変形の鋼横梁による拘束と横梁上PC鋼材の偏心配置に起因する曲げクリープ変形と考えられる。そのため、床版上下縁の鉄筋量を増加し、横梁上PC鋼材の偏心をなくして軸力配置とし、横梁上および横梁近傍部の床版コンクリートを打ち下ろした。

その結果、床版上下面にほぼ均等にプレストレスが導入される結果となり、横梁上の床版上下面のひずみ分布が平均化し、計測値とFEM解析値との良好な一致が見られた（図6）。



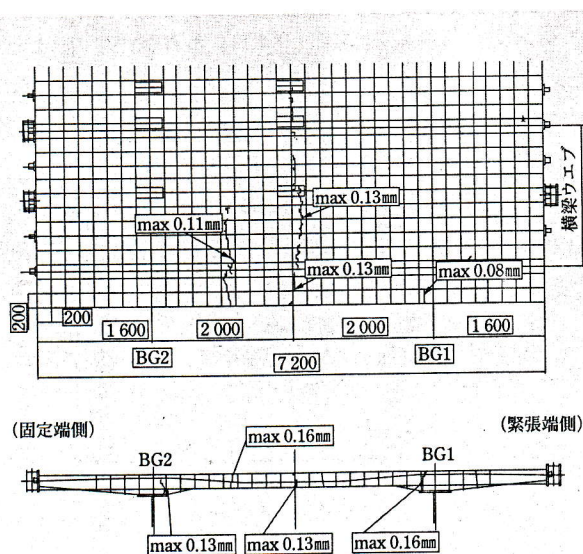
●図6—— 支間中央部のひずみ分布

4.3 PC床版の設計・施工方針について

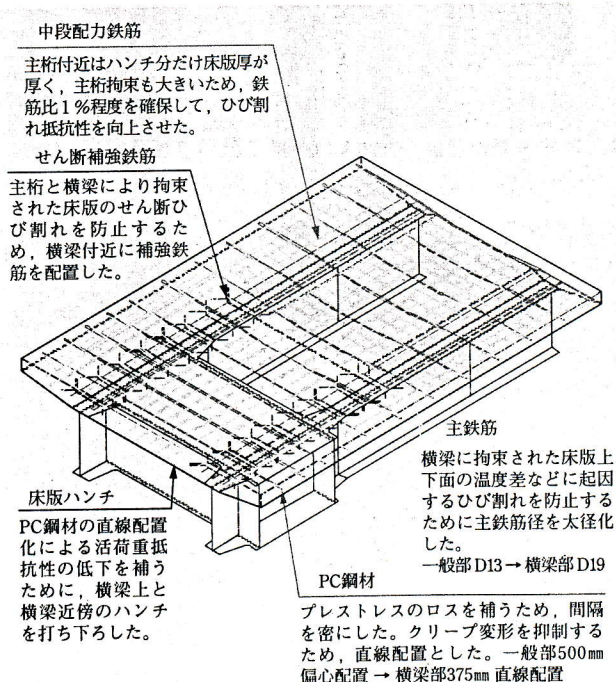
実験およびFEM解析を通じて確認された上記問題点を反映して、以下の方針にて設計を行うこととした（図7）。

4.3.1 プレストレス導入効率

実橋中間支点部のモデルにより、①導入低下範囲の決定（床版支間の3/4程度→プレストレスを3割増加させる）、②横梁部および横梁近傍部におけるプレストレス導入時の死荷重応力度低減係数の算出を行い、同様な形状に対して、簡易の応力度算出を可能とした。ただし、FEM解析によると、横梁近傍部のウェブ近くの床版部は、局部的に床版プレストレスが低下する結果となったため、活荷重の載荷を考慮し、局部的な応力度の照査を行った。



●図5—— ひび割れ状況



●図7—— PC床版の構造概要図 PICK UP参照

4.3.2 床版断面

横梁上および横梁近傍部（主桁間の1/2まで）は、床版を打ち下ろすこととし、床版そり変形拘束に対するひび割れ抵抗性より、主鉄筋径を実験モデルの縮尺および計算からD19とした。

4.3.3 床版コンクリート配合

乾燥収縮低減の観点から、膨張材の添加とともに、高性能AE減水剤を添加した。また、若材齢のひび割れ抵抗性確保の観点から早強セメントを採用した。

4.3.4 補強鉄筋配置

橋軸方向鉄筋については、相対的な乾燥収縮量の低減を図る目的で、約1.4%程度の鉄筋量の確保を図った。また、合成桁的な挙動を想定し、水平せん断力に対して、端支点および中間支点部にジベル補強鉄筋（D16）を配置した。中間横桁部では、スタッドジベルの引き抜き力に対して、コーン破壊防止の補強鉄筋（D13）を追加した。

5 — スタッドジベル配置

5.1 目的

前章で行った実験において、中間横桁直上の床版支間側スタッドジベルに大きな引張ひずみが発生した。そのため、主に中間横桁部の上フランジ近傍に着目し、その応力状態および床版コンクリートと上フランジの離間状況を把握するため、FEM解析を行うこととした。

5.2 解析手法

5.2.1 解析モデル

解析モデルは、中間横桁部を中心に前後1mを取り出した立体モデルとした。2mは、現行のスタッドジベルの設計に用いている有効範囲に準拠したものである。各部材の要素としては、床版コンクリートをソリッド要素、鋼桁部をシェル要素、スタッドジベルを梁要素でモデル化した。床版コンクリートと主桁上フランジの境界部には、接触を考慮するため、GAP要素を採用した。

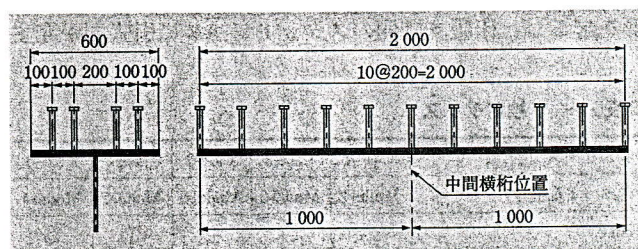
5.2.2 スタッドジベル配置

PCプレストレス導入実験時のスタッドジベル配置（図8）と下記の変更をしたスタッドジベル配置（図9）で解析した。

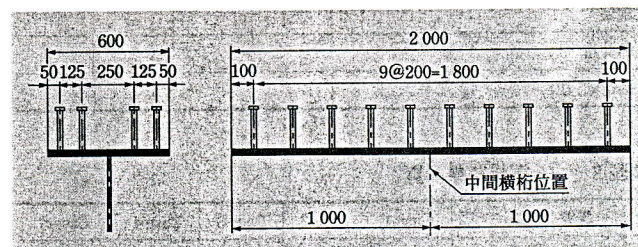
- ①橋軸方向の配置は、スタッドジベルへの応力集中を防ぐため、垂直補剛材直上を避けた（垂直補剛材直上から100mm離して設置）。
- ②フランジ端部のスタッドジベルは、床版と上フランジの離間を抑制するため、極力外側へ配置した（フランジ外縁から50mmの位置）。

5.2.3 荷重

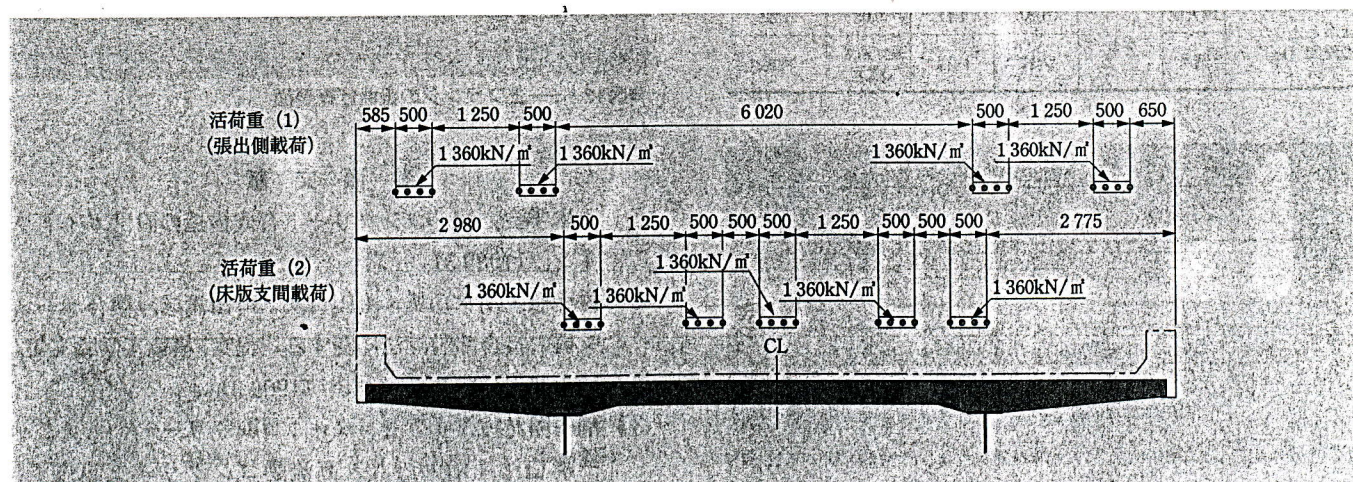
荷重は、全死荷重（床版自重、舗装、壁高欄等）、プレストレスおよび活荷重を考慮した。プレストレスは、実際のPC鋼材の配置を考慮して棒要素でモデル化（橋軸方向に500mmピッチで配置）し、温度荷重で载荷した。活荷重については、床版張出側の最も不利な位置に载荷したケース、床版支間側に载荷したケースの2ケースとした（図10）。



●図8——実験時のスタッドジベル配置（Model-1）



●図9——見直したスタッドジベル配置（Model-2）



●図10——荷重の载荷位置

5.2.4 検討ケース

検討ケースを表2に示す。

5.3 解析結果および考察

5.3.1 解析結果

解析結果の最大値とその発生箇所を表3に示す。

5.3.2 スタッドジベルへの作用力

垂直補剛材直上を避けてスタッドジベルを配置したことにより、スタッドジベルへの作用力を大きく低減することができた。

5.3.3 床版と上フランジの離間

離間を抑制するためフランジの外縁に近づけてスタッドジベルを配置したが、床版支間側の垂直補剛材直上においては離間が生じる結果となった。よって、この部位には止水工を施す必要がある。また、床版支間側に載荷したケースでは、主桁ウェブ直上に離間が生じる結果となったため、最終的に図11のようなスタッドジベル配置を採用した。

5.3.4 主桁上フランジの板曲げ

床版張出側に載荷した場合、主桁上フランジに大きな板曲げ応力度が発生した。この原因は、荷重により床版が変形を起こし、床版支間側のスタッドジベルに引張力が発生

するが、上フランジは垂直補剛材により拘束されて、局所的に変形を起こしたためと考えられる(図12)。

しかし、今回使用した解析モデルは中間横桁部付近の2m範囲のみを着目したものであるが、実際には下記を考慮すれば、応力度は減少すると考えられる。

- ①橋軸方向の分配効果が考慮できるように、解析モデルを橋軸方向へ更に伸ばす。
- ②今回の検討には荷重しか考慮していなかった高欄をソリッド要素としてモデル化する。

6 おわりに

本報文では、鋼製横梁を介して上下部一体化構造とした複合ラーメン形式についての実験および解析について報告した。その他に、ゲルバー構造の掛違い部や断面寸法が異なる箇所についてのFEM解析も実施している。また、PC床版の施工を考慮した温度解析や実橋の計測を行い、各検討についてとりまとめを行う予定である。更に、主桁上フランジの板曲げについても解析モデルを見直し、検討を引き続き行っている。その報告は、また別の機会にしたいと考えている。

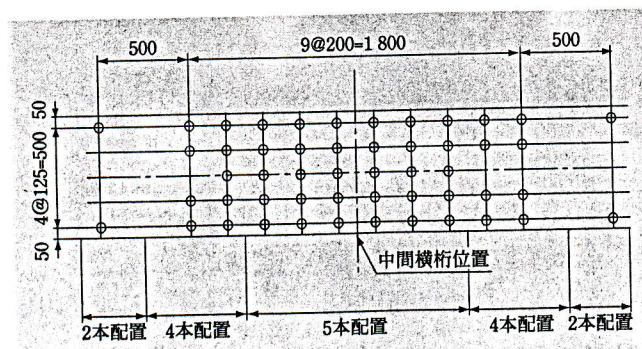
最後に、本橋で取り組んでいる対策が、今後の剛結構造を有するPC床版鋼2主桁橋の設計および施工において一助になれば幸いである。

●表2——検討ケース

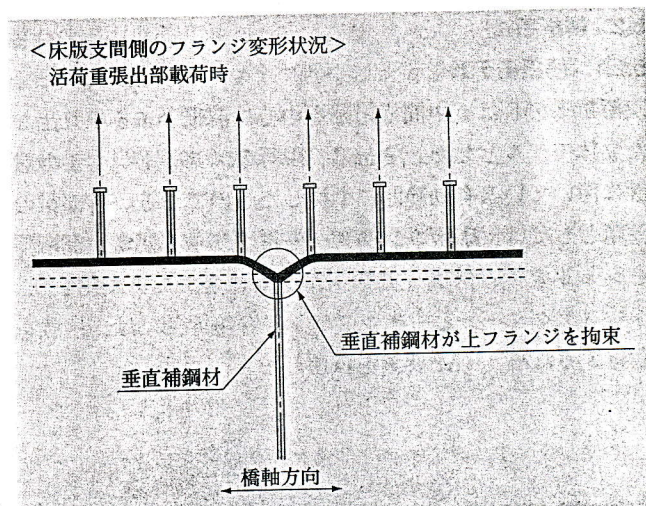
荷重ケース	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
スタッド配置	Model-2	Model-2	Model-2	Model-2	Model-1
床版	○	○	○	○	○
プレストレス	○	○	○	○	○
壁高欄+遮音壁+外装板		○	○	○	○
舗装		○	○	○	○
活荷重 (1)			○		○
活荷重 (2)				○	

●表3——解析結果一覧

荷重ケース	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
スタッド軸方向 最大値	0.4	55.0	307.0	24.5	578.9
個所	内側端	内側端	内側端	外側中	内側端
床版と上フランジ の離間 (mm)	最大値	0.20	1.11	0.08	1.22
個所	なし	内縁	内縁	ウェブ直上	内縁



●図11——最終的なスタッドジベルの配置



●図12——上フランジの板曲げ概要図

参 照 文 献

- 1) 土木学会. 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン. (1989.3)
- 2) 佐藤徹・清水功雄・太田貞次・町田篤彦. 複合ラーメン橋の接合部設計法に関する一提案. 構造工学論文集. Vol.145A, pp.1431-1438, (1999.3)
- 3) 沿岸開発技術研究センター: コンクリートサンドイッチ構造沈埋函の設計と高流動コンクリートの施工. (1996.11).

- 4) 緒方紀夫, 木曾茂, 岩立次郎. 鋼連続合成桁の中間支点部床版に生じるひび割れに関する実験. 第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集. pp.25-29, (1995)
- 5) 猪熊康夫, 本間淳史, 庄子宗男, 河西龍彦. 実物大試験体の横桁位置に発生した床版のひび割れについて(第二東名高速道路 藁科川橋). 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集. (2001.10)
- 6) 本間淳史, 長谷俊彦, 河西龍彦, 林暢彦, 松村寿男. 床版と鋼桁のずれ止めに関するFEM解析検討(第二

- 東名高速道路 藁科川橋). 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集. (2001.10)
- 7) 済藤英明, 大垣賀津雄, 中蘭明弘, 安川義行, 稲葉尚文. 合成2主桁橋の中間横桁部における頭付きスタッド配置に関する実験研究. 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集. (2001.10)
- 8) 江田徹, 石毛立也, 山本晃久, 布施光啓, 池田隆成. 鋼2主桁橋(姿川橋)におけるスタッド配置と垂直補剛材上端形状の検討. 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集. pp.650-651, (1999.9)



築山 有二
東京建設局
構造技術課
課長代理



田中 伊純
東京建設局
構造技術課



長瀬 博紀
東京建設局
浦和工事事務所



志村 泰広
東京建設局
浦和工事事務所