

合成構造ハイピアーの開発

High Pier of Steel Element Composite Structure

片山 猛^{*(1)} 小松 章^{*(2)} 西海 健二^{*(3)} 平田 尚^{*(4)}
Takeshi KATAYAMA Akira KOMATSU Kenji NISHIUMI Hisashi HIRATA
 久我 昂^{*(5)}
Takashi KUGA

抄 録

RC構造が主流の橋脚に直線矢板を工夫した鋼製エレメントを鉄筋代替として用いた合成構造ハイピアーとした。鋼製エレメントとコンクリートとの一体化のために直線矢板に開口部を設けたが、この合成構造の付着性能、曲げ耐荷機構、せん断耐荷機構について模型実験により明らかにし、RC構造と同等以上の耐震性を確認した。さらに、日本道路公団との共同研究の一貫として、上信越自動車道での試験施工を実施し、施工工期がRC構造に比べて75%になることを実証した。またこの実績をもとに高さ60m程度の高橋脚に対して試算を実施し工期短縮が可能なることを検証したのでその概要を報告する。

Abstract

As compared with the bridge pier mainly of reinforced concrete structure, a high pier of a composite structure has been developed with using steel elements newly devised by straight sheet piles as an alternate material for reinforcing steel bars. For this development, the straight sheet piles are perforated to integrate the steel elements with concrete, and its bonding property and mechanisms of its bending load resistance and shearing load resistance have been clarified by experimental simulation. It is made clear from the test results that the developed high pier of steel element composite structure is more excellent in earthquake-proof than the RC structure. Further, as a part of joint researches with Japan Highway Public Corporation, a test execution was carried out on Joshin-etsu Highway and it has been demonstrated that the term of works is reduced to 75% comparing with that of the RC structure. On the basis of this actual results, a trial calculation for a high bridge pier being about 60 meters in height was also executed and a possible reduction in the term of works has been verified, which are described in this paper.

1. はじめに

日本道路公団の高速道路建設は、山岳部を通過する横断道路及び第二東名・名神の建設へと展開している。前者は狭い日本列島特有の急しゅんな山岳部を横断するため、必然的に橋脚高さが大きくなり、後者は全延長の約40% (約200km) が橋梁であり、このうち橋脚高40m以上の橋梁が30%を占めている。

また、労働力の面からみると、労働者不足や熟練工の高齢化が進み、質・量ともに労働力を確保することが困難になってきており、今後も更にこの傾向は進むといわれている。

以上のような背景から、急速施工すなわち工期の短縮や施工の省力化、機械化を目的とした橋脚の新施工方法の開発が必要であると考えられる。そこで、新日本製鐵においては、1992年度から日本道路公団試験研究所と“鋼製エレメントによる高橋脚の施工法の開発”の共同研究を行ってきた。また、鋼製エレメントの剛性を利用し

た型枠の施工法については大林組(株)と共同研究も手掛けてきた。

RC(鉄筋コンクリート)橋脚の場合、高橋脚になるほど構造上必要な鉄筋や支保工、組立筋が増大し、施工が大変はん雑になる。鋼製エレメントは、RC構造における鉄筋の代替材料であり、橋脚躯体の施工から鉄筋加工・組立作業の省力化を実現するものである。今回は、鋼製エレメントを用いた合成構造(以下“合成構造”と略す。図1、写真1参照)の力学特性、施工方法及び橋脚に実際に用いた試験施工について述べる。

2. 鋼製エレメント合成構造の概要

2.1 鋼製エレメントの概要

鋼製エレメントは、直線矢板を基本として、これに必要に応じて平鋼や形鋼などの鋼材を組み合わせて工場製作し、一つの鋼製エレメントはその両側に図2に示すように嵌合継手を有する構造である。これを現場に搬入し、鋼製エレメントの建込み時に嵌合継手が隣接

*⁽¹⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 部長代理

*⁽²⁾ エンジニアリング事業本部 鉄構海洋事業部 海洋鋼構造エンジニアリング部 部長代理

*⁽³⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

*⁽⁴⁾ 建材営業部門 建材開発技術部

*⁽⁵⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 担当部長

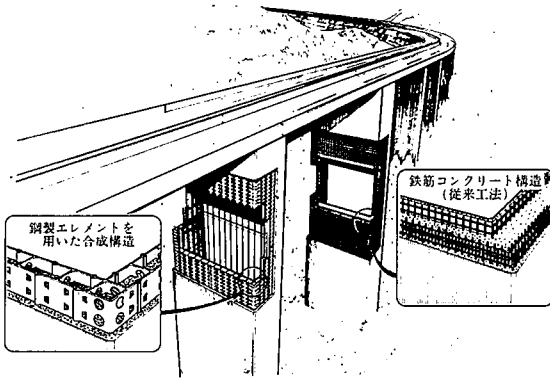


図1 合成構造ハイビアーの概念図

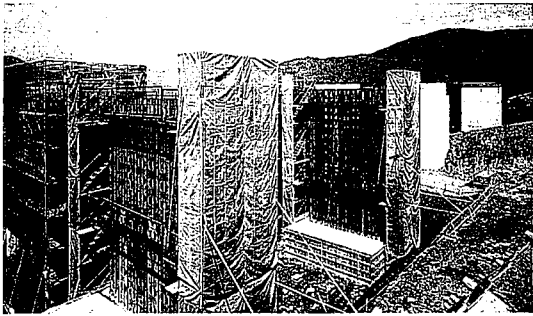


写真1 入田橋での試験施工状況

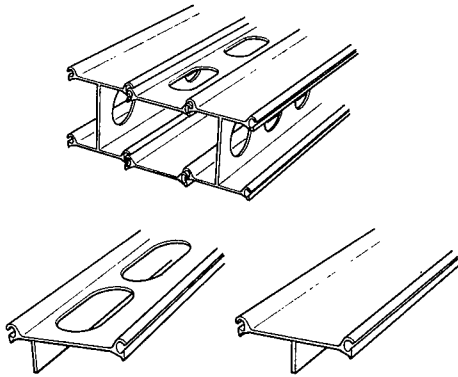


図2 ハイビアー用鋼製エレメント

する鋼製エレメントのガイドとなり、建込み後は横方向に鋼製エレメント同士を連結する。また、鉛直方向には、高力ボルトにより連結させる。

橋脚用の鋼製エレメントとして、建込み性とコンクリート打設時のモルタル成分の充填性を改善した矢板を開発した。この嵌合継手は、合成構造としての降伏後のじん性の向上のため、モルタル成分充填後の嵌合強度(約200t/m以上)も確保している。今回実用化した橋脚用直線矢板の諸元を表1に示す。

2.2 鋼製エレメントによる合成構造橋脚の特長

鋼製エレメントの特長は、直線矢板に開口部を設ける点にある。この開口部を通じて被り部分にコンクリートを送るとともに、被りコンクリートと内部コンクリートはこの開口部により一体化されている。

この開口部及び鋼材表面により、コンクリートとの付着をとるこ

表1 YSP-FLW8の断面諸元(案)

ウェーブ厚み (mm)	断面積 (cm ²)	単位重量 (kg/m)	断面二次モーメント (I×cm ⁴)	断面係数 (Z×cm ³)
8	63.76	50.05	161	38

とができ、通常のRC構造における鉄筋と同等の機能を有している。この合成構造の施工上の特長としては、下記の事項などが挙げられる。

- (1) 全て、工場製作であり、現場加工ヤードを必要とせず、仮置きできるだけのスペースがあればよい。
- (2) 1本の鋼製エレメントは、鉄筋に換算した場合、数本の主鉄筋に相当することから部材数が少なく、また、隣接する鋼製エレメントをガイドとして建て込むことから、位置決めが容易であり、急速施工が行える。
- (3) 鋼製エレメントは横方向鋼材の機能も兼ね備えており、帯鉄筋等もなく、コンクリート剥落防止用の溶接金網を設置するだけでよい。
- (4) 鋼製エレメントは、その剛性が大きく、自立するため、これを用いて型枠や足場設置が容易にできる
- (5) 中空式橋脚の内側の鋼材の場合、鋼製エレメントを型枠兼用部材として利用できる。

以上のように、鋼製エレメントを用いた場合は、鉄筋のような加工、組立は不要であり、施工の省力化、簡略化及び工期の短縮が可能である。

3. 鋼製エレメント合成構造の力学特性

3.1 力学特性解明の検討項目

鋼製エレメント合成構造に関する力学特性を明確にするため、これまで下記に示すさまざまな実験を行い、検討を行ってきた。

- (1) 合成構造の曲げ耐力及びじん性
- (2) 鋼製エレメントとコンクリートとの付着性能
- (3) 合成構造のせん断耐力
- (4) 嵌合継手のモルタル充填性及び引張耐力
- (5) 被りコンクリートのひび割れ分散性能
- (6) 乾燥収縮に対する耐久性

ここでは、主要な力学特性である(1)～(3)について紹介する。

3.2 曲げ耐力及びじん性

今回の兵庫県南部地震での橋脚の被災例にみられるように、橋脚はじん性が確保された構造でなければならない。鋼製エレメントを用いた合成構造橋脚のじん性を把握するため橋脚模型実験を実施した。図3に示すように、橋脚模型の柱頭部に死荷重反力相当の鉛直力を載荷しながら水平方向に繰り返し交番載荷を実施した。比較試験体として合成構造橋脚模型における断面寸法、鋼材量(鋼製エレメント量と同等の鉄筋量)を等しくしたRC構造橋脚の実験も実施した。更に円形橋脚への適応性を検討するため円形供試体についても比較実験を実施した。なお、合成構造については、後述する耐久性向上のために設けることにしている金網筋は設けていない。

- (1) じん性(図3～図5参照)

矩形模型における合成構造試験体とRC試験体を比較すると、最大耐力がほぼ等しく、最大耐力に達するまでに、両者ともほぼ同等の挙動を示しているが、それ以降は、合成構造の方がRC構造に比べて

荷重低下が緩やかである。橋脚基部の鋼製エレメントあるいは鉄筋が降伏したときの水平方向荷重を降伏荷重、そのときの橋脚頭部の水平変位を降伏変位と定義する。水平荷重が一度降伏荷重を超え、再び降伏荷重と等しくなった点を終局と定義した場合、この点における水平変位を降伏変位で除した値がじん性率となる。このようにじん性率を算定すると、合成構造は5.5、RC構造では4.8となり、合成構造のじん性率は、RC構造と同等程度以上であるといえる。

また、円形の合成構造の場合も最外縁の鋼材の降伏を降伏荷重と定義すると、じん性率7.14となり、耐震性に優れた構造形式といえる。

(2) 軸方向ひずみ

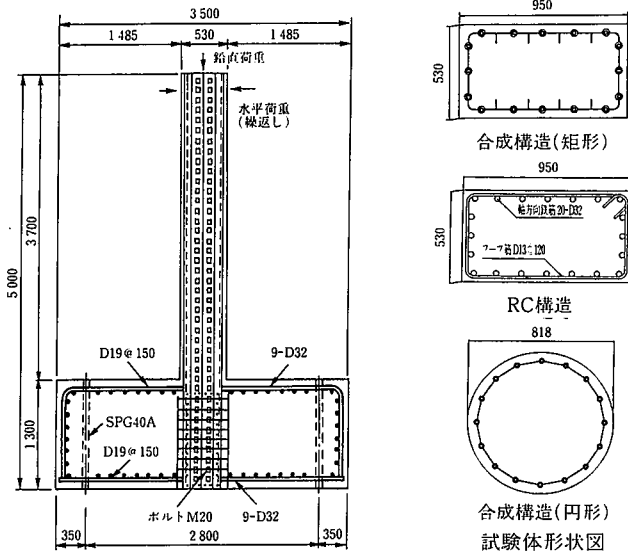


図3 橋脚模型実験

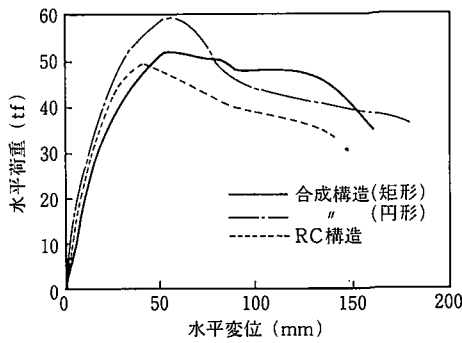


図4 橋脚模型実験結果

図6に軸方向ひずみを示す。合成構造とRC構造は、橋脚頭部水平変位が降伏変位レベル22mm及びじん性率4の88mmのときにおいても、良く一致しており鋼製エレメントがRC構造において主鉄筋の役割を果たしているといえる。

(3) 設計方法

合成構造の設計方法としては、鋼材を鉄筋に換算するRC方式と累加強度方式があるが累加強度方式は模型試験での最大荷重の76%と過小評価しすぎ、RC方式では、88%で、RC方式が良く適合している。

3.3 せん断耐力

合成構造は、横方向に嵌合継手を用いて連結されているが、嵌合継手には、施工余裕(ガタ)があるため、横方向鋼材が不連続となると考えられる。そこでこのような構造のせん断耐力を確認するための梁型のせん断試験を行なった。横方向に不連続な鋼材が側面に配置されることで、全く鋼材が無いよりは、せん断耐力が向上することが確認されたが、横方向鋼材が連続しているとして算出したせん断耐力よりは小さくなっており、鋼材が横方向に不連続ではRC構造のような設計ができないことが判明した。

そこで、せん断耐力に対してRC構造と同様の設計をするためには、嵌合部で引張力を伝達できる構造とするため、嵌合部のガタを無くす必要があり、嵌合継手内部にモルタルが充填され、引張力を伝達できる構造としている。またこの場合の嵌合部の引張強度については、実験を実施し、帯鉄筋の耐力以上であることを確認している。嵌合継手の引張試験状況及び結果を写真2及び図7、8に示す。

3.4 附着性能

鋼製エレメントには、被り側へのコンクリート充填性のための開口を設けている。またこの開口は、コンクリートとの附着に対し、

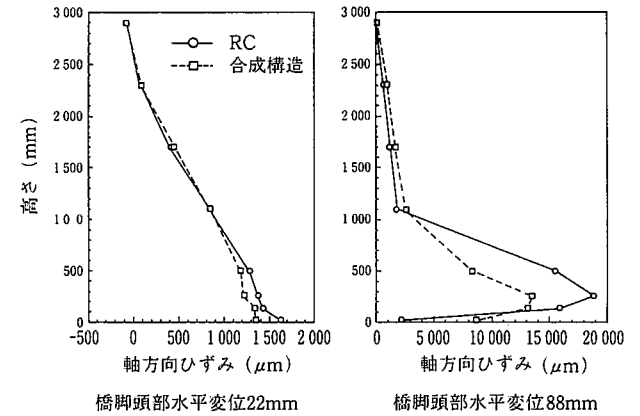


図6 軸方向ひずみ

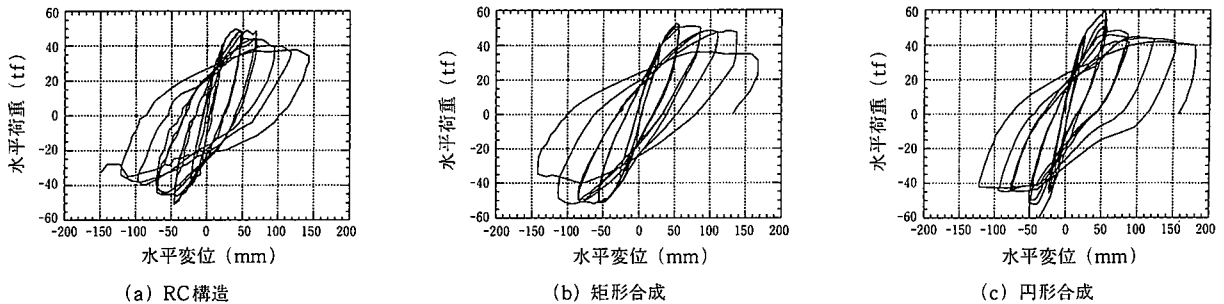


図5 水平荷重-水平変位曲線

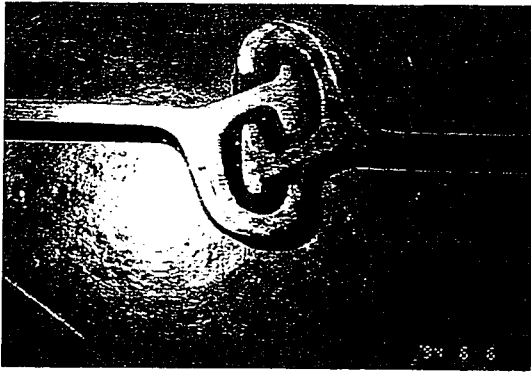


写真2 嵌合部引張試験供試体

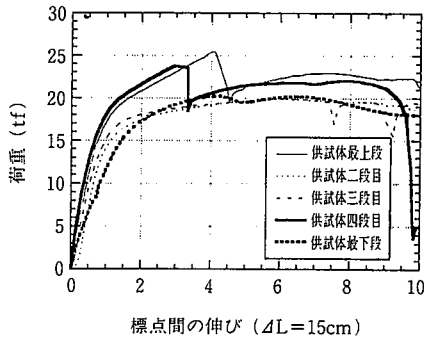


図7 嵌合部引張試験結果

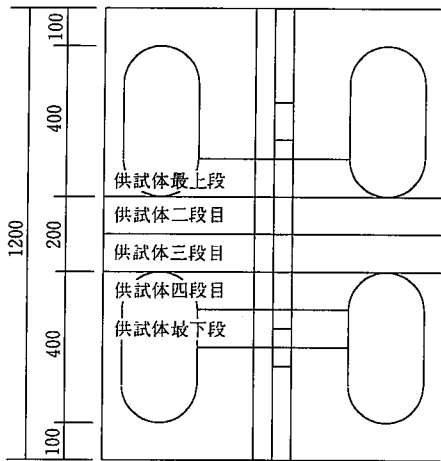


図8 試験体の切り出し

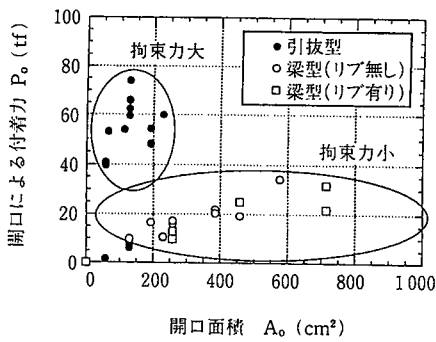


図9 開口面積-開口による付着力関係

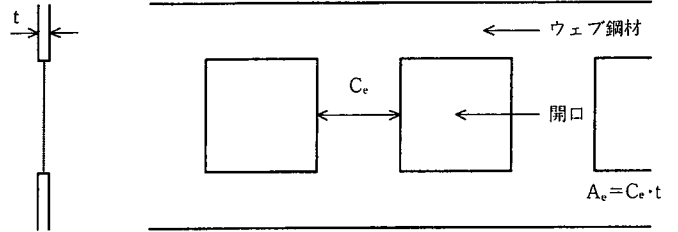


図10 Aeのとり方

鋼材表面の付着力とともに共同して働くものと考えられる。

そこで鉄筋の付着試験に準じた試験を行い、鋼製エレメントとコンクリートとの付着力を把握した(図9, 10参照)。

試験の結果、鋼製エレメントを拘束している被りコンクリートの厚さすなわち拘束の度合いにより付着力が異なること、全付着力は、開口と鋼材表面の付着力の和で表されることが明らかとなり、付着力の算定には下記に示す式を用いることとした。

$$\tau = \tau_s + \tau_0 \quad \dots(1)$$

τ : 鋼製エレメントの付着力

τ_s : 鋼材表面の付着力

$$\tau_s = 0.01F_c \cdot A_s \quad \dots(2)$$

τ_0 : 開口による付着力

拘束小の場合(フランジ部: 図11参照)

$$\tau_0 = 0.13F_c \cdot A_0 \quad \dots(3)$$

拘束大の場合(ウェブ及びリブ部: 図12参照)

$$\tau_0 = \text{Min}(\tau_{01}, \tau_{02}) \quad \dots(4)$$

$$\tau_{01} = 2A_e \cdot \tau_{sn} \cdot F \quad \dots(5)$$

$$\tau_{02} = 2.25F_c \cdot A_0 \quad \dots(6)$$

F_c : コンクリート圧縮強度, A_s : 鋼材表面積

A_0 : 開口面積, A_e : 開口間の鋼材横方向断面積,

τ_{sn} : 鋼材の許容せん断力, F : 安全率

4. 施工方法

鋼製エレメント合成構造橋脚は、現場作業の省力化及び工程短縮を最大の目標としており、鉄筋に比較して合成の高い部材の特長を活用した建方及びコンクリートの打設方法を検討している。

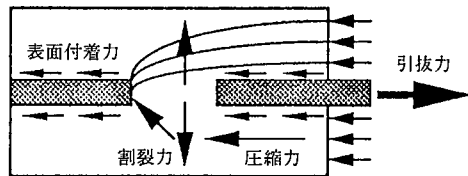


図11 支圧割裂破壊モデル(拘束力小)

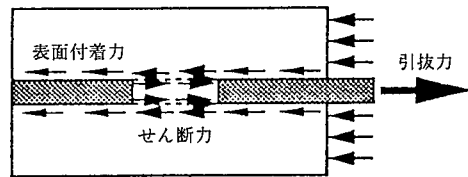


図12 せん断破壊モデル(拘束力大)

4.1 鋼製エレメントの建方

合成構造の施工方法を図13に示す。まずフーチング下筋を設置した後、鋼製エレメントを建て込むための据え付け架台を設置する。コーナーエレメントは、剛性が大きいので、まず、このエレメントを建て込み、鉛直性を確保する。その後、各コーナーエレメント間の中間エレメントを隣接するエレメントの嵌合継手をガイドとして順次建て込む。

こうして1段目の鋼製エレメントを建て込んだ後、鋼製エレメントと据え付け架台のボルト締めを行い、フーチング上筋を設置し、鋼製エレメントの下端を堅固なものとするためフーチングのコンクリートを打設する。

2段目以降の建て込みについては、1段目同様コーナーエレメントを建て込み、鉛直性の確保、中間エレメントの建て込み、下段鋼製エレメントとのボルト締め作業を所定の高さ（段数）になるまで繰り返す。

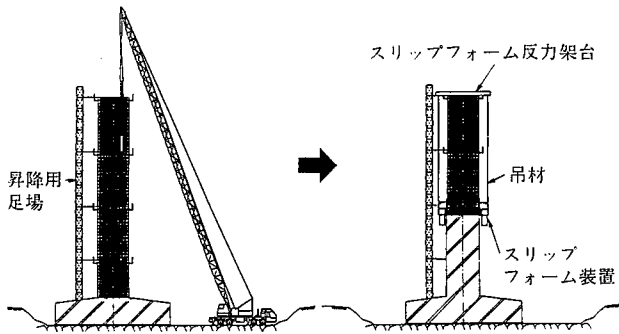


図13 合成構造の施工

4.2 コンクリートの打設

鋼製エレメントによる橋脚の施工方法は、工期短縮を目的として開発しているので建て込みのみならずコンクリートの打設についても工期の短縮をめざしている。中空橋脚の場合、内側の鋼製エレメントは型枠兼用部材となるため、従来のRC構造では必要であった内部型枠の構築が不要となり、工程が短縮される。

更に、高橋脚の場合はスリップフォームを使用することで大幅な工期短縮が可能となる。RC構造と比較して、上端でスリップフォームの反力をとることは、鋼製エレメントの剛性が大きいことや施工段階での構造特性から容易である。

5. 試験施工

5.1 試験施工の目的¹⁾

鋼製エレメントを実橋脚に用いた場合の適応性及び事前に検討した施工方法で建設できるかどうかの確認を目的に、日本道路公団との共同研究の一環として日本道路公団の実橋脚で試験施工を実施した。

5.2 試験施工対象橋梁概要

試験施工対象橋梁の概要を下記に示す。

道路名	上信越自動車道
橋梁名	入田橋
橋種	RC 3径間連続中空床版+PC 5径間連続ラーメン橋
支間割	(17.6+18.0+18.4)+(37.8+60.0+2 @80.0+53.8)=367m
橋脚	P1, P2 (上り線)

橋脚高さ 11.95m(P1), 13.20m(P2)

5.3 施工概要

鋼製エレメントを用いた橋脚の施工方法の開発は、高橋脚を対象としているが、今回試験施工を行なった橋脚の高さは、12~13mと比較的小さな構造物である。この程度の橋脚高さであれば、鋼製エレメント1段で施工可能であるが、将来の高橋脚への適用を考慮し鋼製エレメントを上下2段に分け、上下鋼製エレメントの連結における施工性についても確認を行なっている。

施工方法を図14に示す。ならしコンクリートを打設した後、フーチング下筋を配置し、据え付け架台を設置する(写真3参照)。足場を取り付けたコーナーエレメントを4隅に建て込む(写真4参照)。鉛直性をチェーンブロックやジャッキで確保した後、コーナー足場間に中間足場を設置する(写真5参照)。この足場を利用し、中間エレメントの建て込みを行なう。(写真6, 7参照)。1段目の鋼製エレメントをすべて建て込んだ後(写真8参照)、鉛直性を補正し、フーチング上筋を鋼製エレメントの開口を通るように配置する。この後フーチング部のコンクリートを打設する(写真9参照)。

2段目の鋼製エレメントについても1段目同様コーナーエレメントから建て込み、1段目の鋼製エレメントとボルト接合により連結していく。すべての鋼製エレメントが建て込まれた後、鋼製エレメント表面にひび割れ防止筋を配置(写真10参照)しながら型枠を組み、コンクリートを打設する。

5.4 省力化の効果

今回の試験施工の現場において、鋼製エレメントを利用することで省力化になることを確認するために試験施工での上り線と従来のRC構造との歩掛り比較調査を実施した。1段目の組立は、両構造において大きく変わりはないが、2段目では、鋼製エレメントの工期短縮及び省力化の効果が現れている。

鉄筋及び鋼製エレメントの組立、建て込みに関して、足場・仮設工を含めた工程及び人工は表2に示すようにRC構造に対して合成構造は、日数で74%、人工で94%となる。

2段目のみに着目してみると、日数では、RC構造が8日必要としているのに対し、合成構造では5日(63%)となっている。人工では、同様にRC構造が47人日、合成構造が34人日(72%)となっている。今回の場合、橋脚高が小さく、2段しか鋼製エレメントがないが、高橋脚になり、鋼製エレメントの段数が増えてくると、効果が顕著に現れてくる。また鋼製エレメントを用いた橋脚のはじめての施工ということもあり、現場で調整しながらの施工であったことを考慮すると、今回の試験施工の結果を踏まえ、更に省力化が可能となることが期待できる。

6. 高橋脚への適用性の試算

高橋脚での工程短縮効果と経済性について、相隣の高さ62mと52mのピアーの同時施工となった場合の検討を実施した。設計断面力及びRC構造との検討結果を表3及び表4に示す。高橋脚での施工においては架設時の風荷重が支配的であるが、本橋脚においては最大風速40mでの断面照査において一括して鋼製エレメントを先行して立ち上げることが可能であった。このため鋼製エレメント15m長を1ブロックとして4~5段で先行建て込みの計画が可能である。

また、鋼製エレメントの4隅はコーナーエレメントとして、ボックス柱を用いて15m毎に内側に内切梁(H300程度)を組み込んだ。本構造において架設時(風荷重、コンクリート打設荷重)にも抵抗

鋼製エレメント施工図 (P₁ P₂)

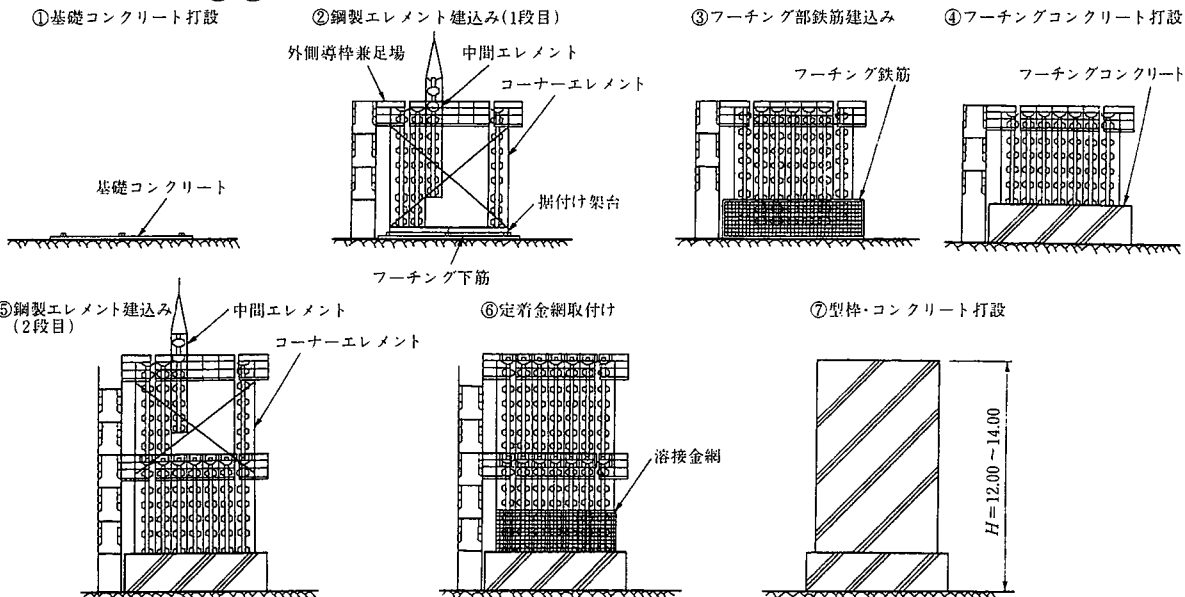


図14 入田橋施工図

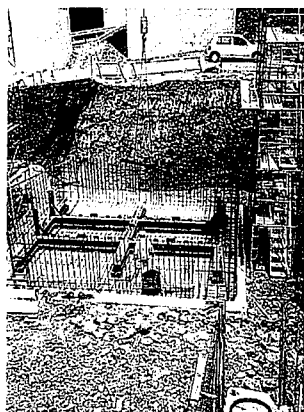


写真3 据え付け架台設置

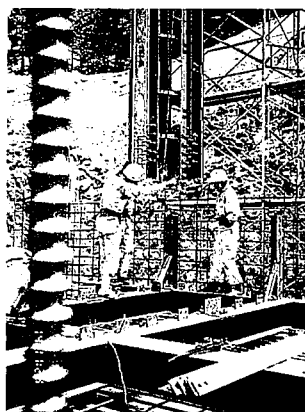


写真4 コーナーエレメント建込み

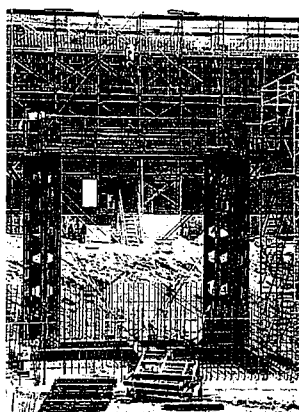


写真5 コーナーエレメント設置状況

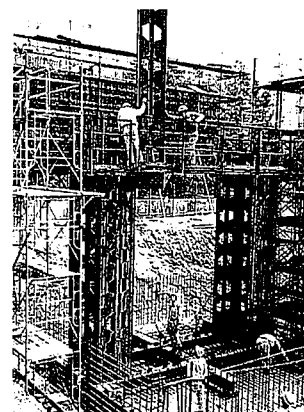


写真6 中間エレメント建込み



写真7 中間エレメント建込み(継手嵌合)

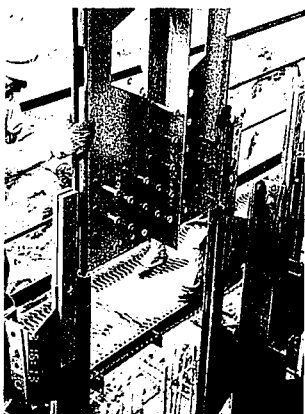


写真8 閉合エレメント建込み

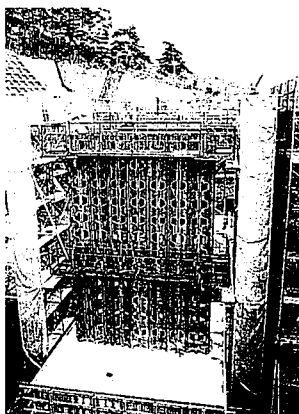


写真9 鋼製エレメント建込み完了

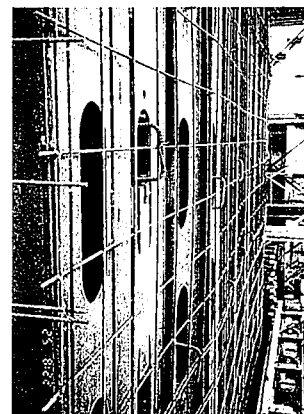


写真10 ひび割れ防止筋設置状況

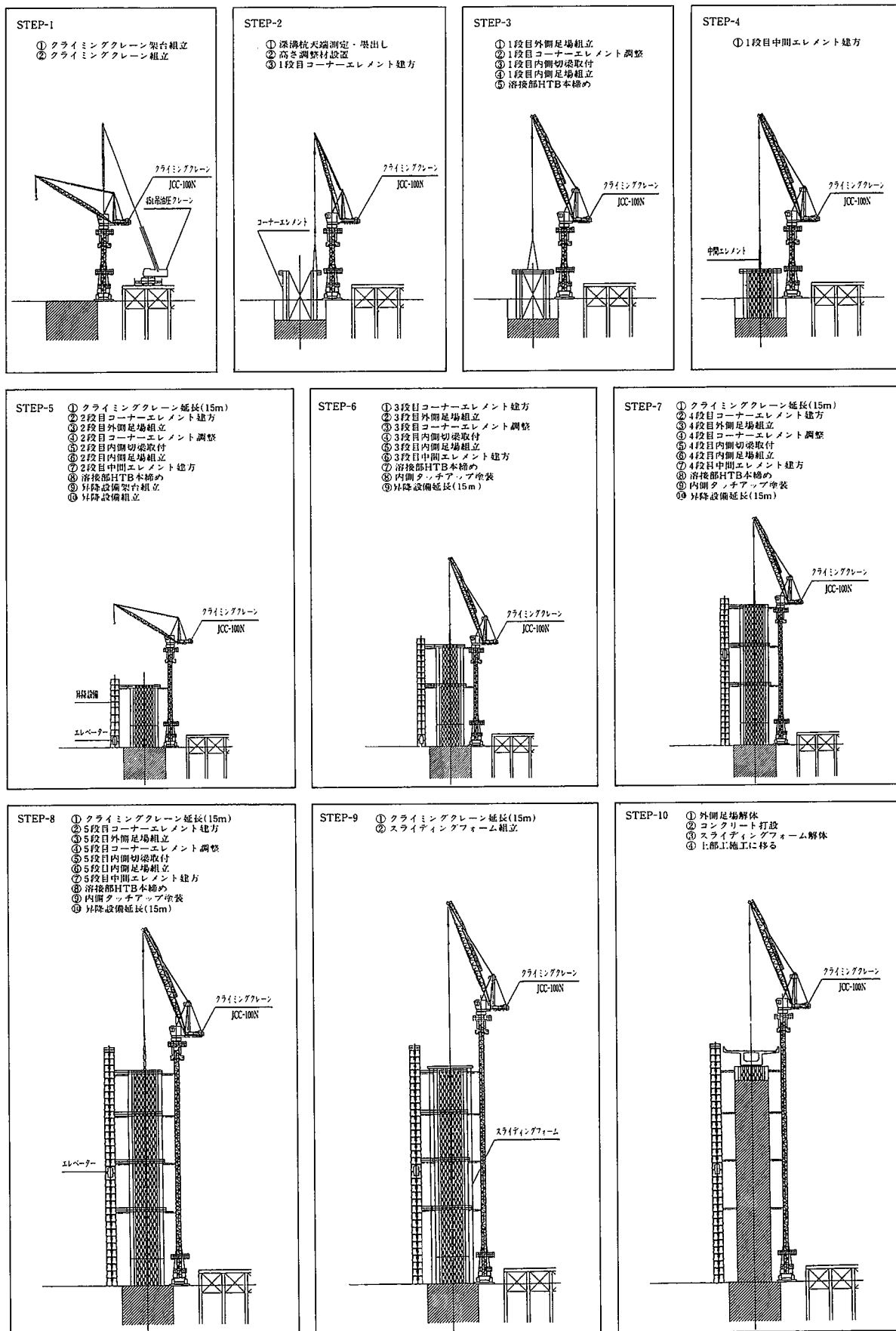


図15 合成構造ハイピアー施工要領

表 2 工期短縮及び省力化の効果

		R C 構造	合成構造
全 体	日数	19(100%)	14(74%)
	人日	97(100%)	91(94%)
2 段 目	日数	8(100%)	5(63%)
	人日	47(100%)	34(72%)

表 3 高橋脚の検討前提

		P1橋脚 (高さ62m)		P2橋脚 (高さ52m)		
		橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	
設計 断面 力	頂部	軸力 (tf)	3 150	2 840	2 830	3 010
		せん断力 (tf)	870	640	470	1 040
		曲げモーメント (tf・m)	14 670	290	14 200	1 220
	基部	軸力 (tf)	17 200	17 600	17 400	17 190
		せん断力 (tf)	3 040	1 590	3 850	2 320
		曲げモーメント (tf・m)	43 320	65 800	64 800	96 040

表 4 高橋脚の設計・工程検討結果

	鋼製エレメント合成構造		RC構造	
	P1	P2	P1	P2
設計数量	390t	380t	372t 主鉄筋 D22~D51	443t 主鉄筋 D25~D51
工程検討	98日	91日	120日	120日

できるように設計しており、コンクリート打設時のスリップフォームの支持柱・桁を兼ねた構造としている。

このため工程的には、従来の RC 構造が橋脚部のみの施工で120日に対して、合成構造は90日の施工となり（稼働率0.7）、75%の工程短縮となる。検討した施工概要を図15に示す。

また、鋼材量的にも、P1、P2の合計で、RC構造で815tに対して合成構造は778tと削減できることが明確にできた。

7. おわりに

従来、地下の土留壁の構築工法のひとつとして、鋼製連壁と称して RC 連壁の鉄筋代替と用いられていた NS-BOX の BH タイプの直線矢板を、嵌合部のモルタル成分の流入をはかるよう改善し、RC 構造としてのせん断力を負担できるようにしたことで橋脚分野への適応を可能とすることができた。

1992年から1994年の3年間の短期間に、日本道路公団試験研究所橋梁研究室の指導のもと基礎的な付着試験から曲げ耐荷機構とせん断耐荷機構の解明と耐久性の検討を実施し、また1994年には、上信越自動車道入田橋での試験施工を通じて、鋼製エレメント合成構造橋脚の優れた施工特性を確かめることができた。

入田橋の試験施工は充実断面の橋脚の試験施工であり、現在中空タイプ適応した場合の合成構造ハイピアーの保有耐力の検討を実験を通じて検討しているため、別の機会に報告したい。

現在実用化できている鋼製エレメント用の直線矢板は、ウェブ厚みの 8 mm のみであり断面力に応じた設計のため、補剛部材の肉厚で対応している。今後は鋼製エレメント用直線矢板の断面性能の種類を増し、断面力に応じた最適設計に対応できる予定である。

鋼製エレメントを用いた合成構造ハイピアーは、従来の橋脚に利用されている RC 構造が直面している熟練工の不足や建設労働者の高齢化などの事態に 대응する工法であり、今後実橋脚での適応を通じて設計施工上の工夫を積み重ね、より経済性を向上させていきたい。また、この工程短縮による全体建設費の削減効果も取り組んだ提案もしていきたいと考えている。

最後に、“鋼製エレメントによる合成構造橋脚の開発”に関する技術検討会の中で、終始熱心に御審議いただいた、池田尚治委員長（横浜国立大学教授）、園田恵一郎教授（大阪市立大学）、前川宏一助教授（東京大学）、日野伸一助教授（九州大学）をはじめ、日本道路公団の関係者、並びに入田橋の試験施工において貴重な助言をいただいた佐田建設・北野建設 JV の関係者に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 村山陽, 林泰三, 西海健二: 土木施工. 36(1), 57(1995)