

鋼-RC複合ラーメン橋の設計・施工（横浜緑IC・Dランプ橋）

Design and Construction of a Hybrid Rigid-Frame Bridge (D-Ramp Bridge at Yokohama Midori Interchange)

澁谷 敦*¹ 永見 研二*² 高橋 亘*³ 安中 順策*⁴
Atsushi SHIBUYA Kennji NAGAMI Wataru TAKAHASHI Junnsaku ANNAKA

Summary

The girders and piers of multiple-span continuous rigid-frame bridges are almost always made of a single material. The D-ramp bridge at the Yokohama Midori Interchange, however, is a hybrid rigid-frame structure in which steel girders and RC piers are rigidly joined at the tops of the piers. The intention is to provide the required structural performance as economically as possible by using appropriate materials in appropriate applications. This paper describes the method of designing joints between steel girders and RC piers and the construction of the D-ramp bridge.

キーワード：剛結構造，複合構造，高流動性コンクリート

1. まえがき

東名高速道路 横浜緑IC（仮称）は、東名川崎IC～横浜町田IC間に新設されるインターチェンジである。このインターチェンジの特徴は、インターチェンジ全体が高架橋構造で構成され、さらに将来のメンテナンス等を考慮して主桁と橋脚を剛結させた多径間連続ラーメン構造を採用していることである。

多径間連続ラーメン構造の場合、これまでは桁と脚とを同一材料で構成することがほとんどであったが、横浜緑IC・Dランプ橋（以下Dランプ橋）では、鋼桁とRC橋脚とを橋脚頭部で剛結させた鋼-RC複合ラーメン構造を採用した。この構造は、材料を適材適所に用いて構造物に要求される性能を最も経済的に満足させようとするもので、日本道路公団および阪神高速道路公団において数橋の施工実績がある。

本文では、Dランプ橋における鋼桁とRC橋脚の結合部の設計・施工方法について報告する。

2. 橋梁概要

道路規格 1級A規格（IC区分）
橋梁形式 7径間連続複合ラーメン橋
桁 長 275.400m
幅 員 7.000m

図-1にDランプ橋の橋梁一般図を示す。PD9～PD5橋脚は剛結構造とし、PD4橋脚は温度変化時の下部工に与える影響を検討した結果から可動支承を設ける構造とした。

3. 結合部の設計

(1) 結合部の構造

1) 結合部の結合方式

鋼桁とRC橋脚との結合方法として、

- ①鉄筋をコンクリート中に定着させる方法（RC方式）
- ②プレストレスによる方法（PC方式）
- ③スタッド等のずれ止めによる方法
- ④鋼桁より連続した鋼材をRC橋脚に埋め込む方法（SRC方式）

などがある。

Dランプ橋は、基本設計の段階ではPC方式で計画されていた。このPC方式は、山形自動車道笹谷IC阿古耶橋で採用されたが、PC鋼材の緊張作業の難点等が課題とされた。本橋のように鋼桁が箱桁構造の場合は、PC鋼材の緊張作業が箱桁内部となり、最大の断面力が生じる橋脚上で鋼桁の上フランジを大きく開口して作業空間を確保しなければならない。さらに緊張作業後に現場溶接で開口部を塞ぐことになり、現場溶接による残留応力が大きく鋼桁の設計として好ましくない構造となる。

*1技術本部先行技術研究室

*2技術本部技術部技術課

*3技術本部技術部長

*4技術本部工事部工事課課長

また、当社では埼玉大学との共同研究¹⁾でRC方式を用いた複合構造の研究を進めており、RC方式の耐久性と荷重伝達機構を実験的に解明してきた。RC方式は、橋脚より延長した主鉄筋を鋼桁の下フランジを貫通させ、結合部のコンクリートに定着するという単純な結合方法であるが、鉄筋の定着長が確保できれば降伏に至るまではほぼ剛結といって差し支えない性能を示すことが実験結果より明らかになっている。

以上のことから、鋼桁が鉸桁・箱桁いずれの場合にも適用できるRC方式に変更した。表-1にPC方式(基本設計時)とRC方式(詳細設計時)の構造の比較を、図-2にDランプ橋の結合部の構造を示す。

2) 結合部の荷重伝達機構

図-3-a, bに示す供試体を用いた実験¹⁾から明らかになった荷重の伝達機構は下記の通りである(図-4)。

- ① 結合部の隅角部の一方には、RC橋脚からの圧縮力(C)、およびこれと直角方向より鋼桁下フランジからの圧縮力(Cf)が作用する。この圧縮力は、合成されて斜め方向の圧縮力(圧縮ストラットCs)となり結合部コンクリートによって受け持たれる。
- ② 一方、圧縮と反対側の隅角部には、鋼桁上フランジから引張力(Tf)が伝えられ、これと直角方向から、RC

橋脚の引張力が鉄筋の定着力によって結合部コンクリートを介して伝えられる。これらも合成されて斜め方向の引張力(Ts)となり、鋼桁ウェブと結合部コンクリートによって受け持たれるが、結合部コンクリートにひび割れが発生した後は、鋼桁ウェブのみによって受け持たれる。

- ③ 結合部のスティフナーは、鋼桁上下フランジと共に結合部コンクリートを取り囲み、この回転を拘束する。それと同時にRC橋脚からの力の一部を、圧縮力(Cd)は直接的に、また引張力(Td)は間接的に負担する。
- ④ 鋼桁下フランジの上下面に配置したスタッドジベルは、引張軸力を受け、鋼桁とRC橋脚の接合面に大きなひび割れ(口開き)の発生を防ぐと同時に、接合面に作用するせん断力を伝達する役割もある程度果たしている。
- ⑤ 鋼桁ウェブにスタッドジベルを配置すれば、結合部コンクリートに伝達された力を分散して鋼桁ウェブに伝達する上で効果的である。ただし、結合部のスティフナーおよび鋼桁上下フランジの剛性が高い範囲内では、スタッドジベルの有無は全体の挙動に大きな影響を及ぼさない。
- ⑥ 引張鉄筋比が0.9%以下であれば結合部コンクリートに特別な補強を要しない。

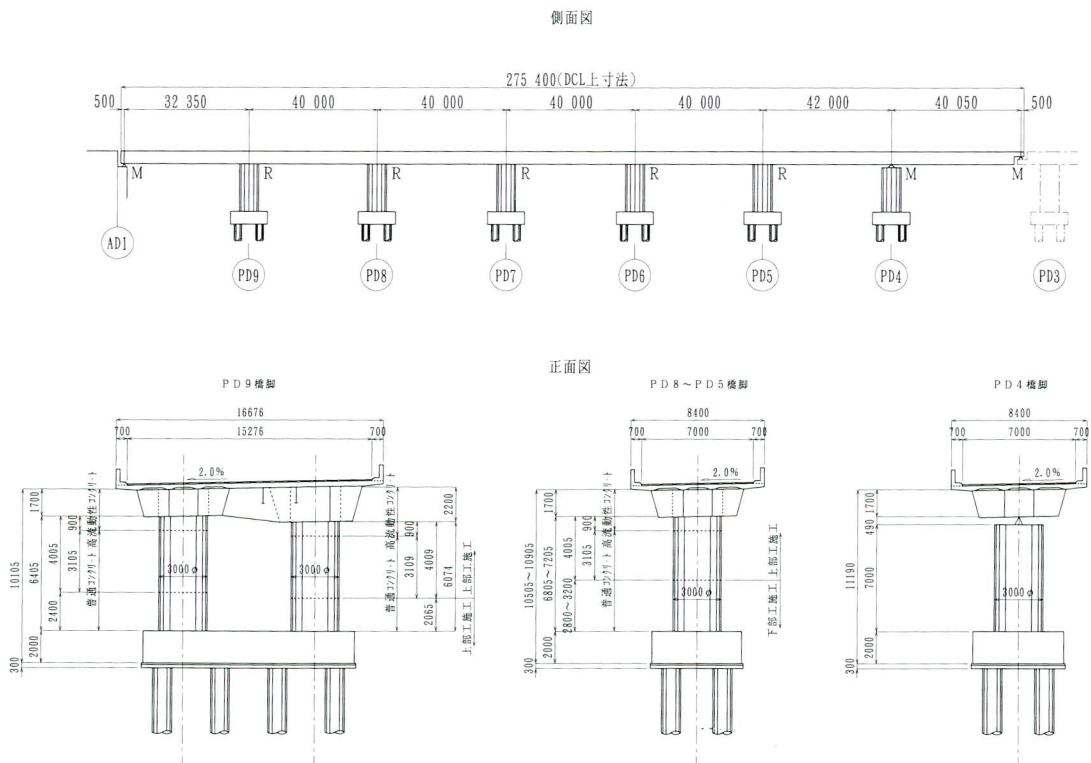
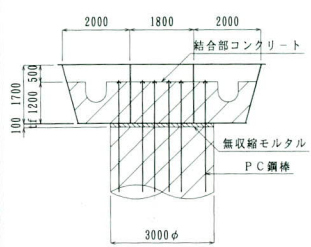
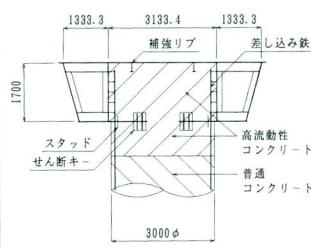
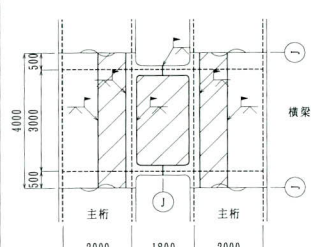
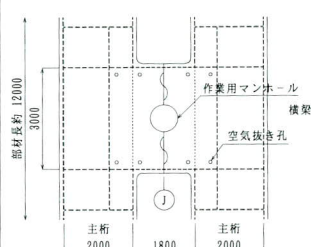
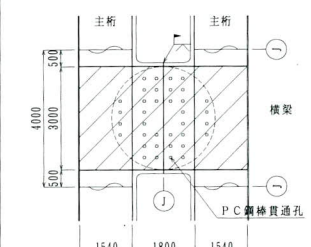
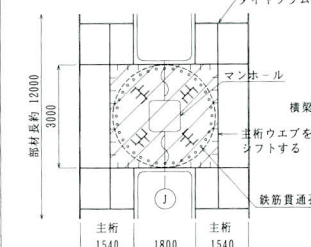


図-1 Dランプ橋 橋梁一般図

表-1 PC方式とRC方式の構造比較

PC方式 (基本設計時)		RC方式 (詳細設計時)	
<p>結合部概要図</p> 	<p>1. 結合方法 コンクリートで充填された鋼桁をPC鋼橋で橋脚と緊結する方法。</p> <p>2. 結合部の構造 ・橋架全域にコンクリートを充填するため、主桁ウェブにより結合部が3セルになる。 ・結合部の充填コンクリートおよび橋脚のコンクリートには普通コンクリート ($\sigma_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$) を使用。また、鋼桁と橋脚の接合面に無収縮モルタルを使用。 ・PC鋼材の緊張作業のために鋼桁上フランジに開口を設け、作業後に現場溶接により開口を塞ぐ。 ・橋架下フランジにPC鋼橋貫通孔を設ける。</p>	<p>結合部概要図</p> 	<p>1. 結合方法 橋脚より延長した主鉄筋を鋼桁のしたフランジを貫通させ、結合部の充填コンクリートに定着する方法。</p> <p>2. 結合部の構造 ・橋架内の主桁ウェブを600~700mm程度主桁内側へシフトし、橋脚直上の1セルにコンクリートを充填する。 ・結合部の充填コンクリートおよび鋼桁下フランジより下方900mmは高流動性コンクリートを使用し、これ以下の橋脚のコンクリートは普通コンクリート ($\sigma_{ck}=240 \text{ kgf/cm}^2$) を使用。 ・橋架上下フランジに作業用マンホールを設ける。 ・橋架下フランジに鉄筋貫通孔を、橋架上フランジに充填コンクリート打設時の空気抜き孔を設ける。 ・鋼桁とRC橋脚間の荷重伝達機構としてスタッド、ベルおよびせん断キーを配置。</p>
<p>橋架上フランジ</p> 		<p>橋架上フランジ</p> 	
<p>橋架下フランジ</p> 		<p>橋架下フランジ</p> 	

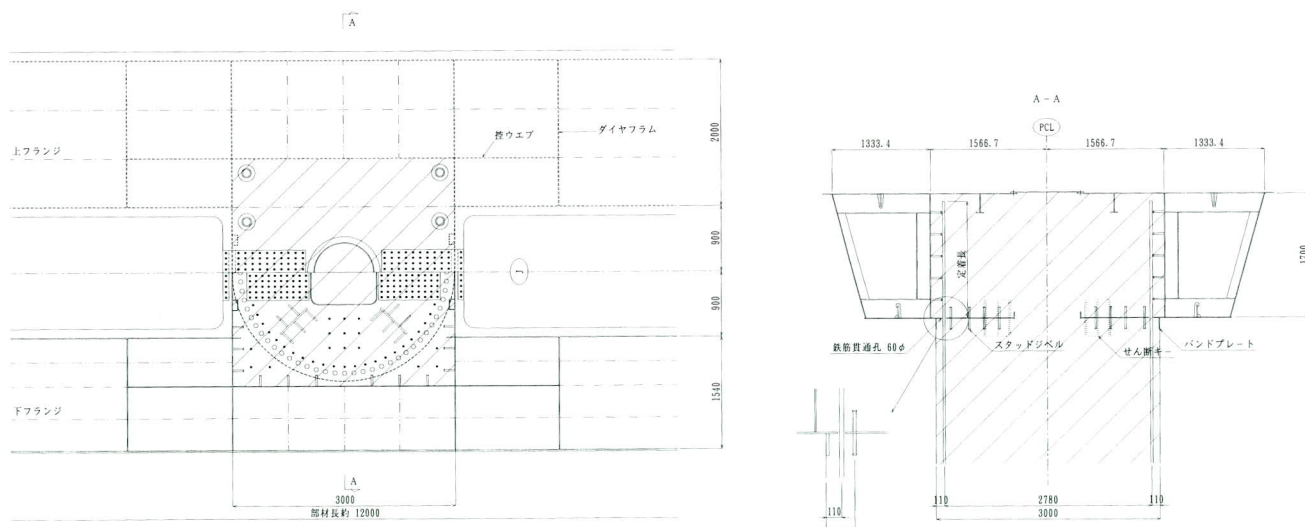


図-2 結合部の構造

(2) 構造解析

本橋は、主桁と橋脚が横梁を介して橋脚頭部に剛結さ

れた多径間連続ラーメン構造であることから、上部工および下部工をモデル化した立体解析を行った。部材のモデル化は下記のように行った。

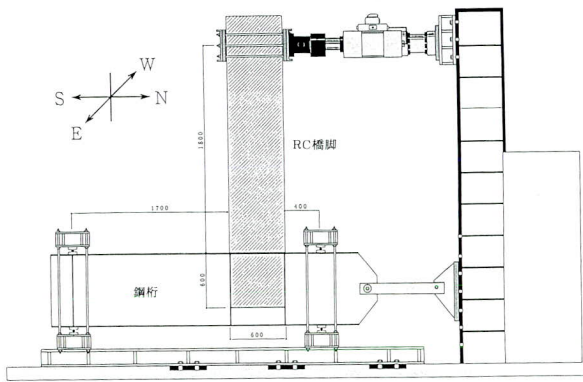


図-3-a 供試体概要

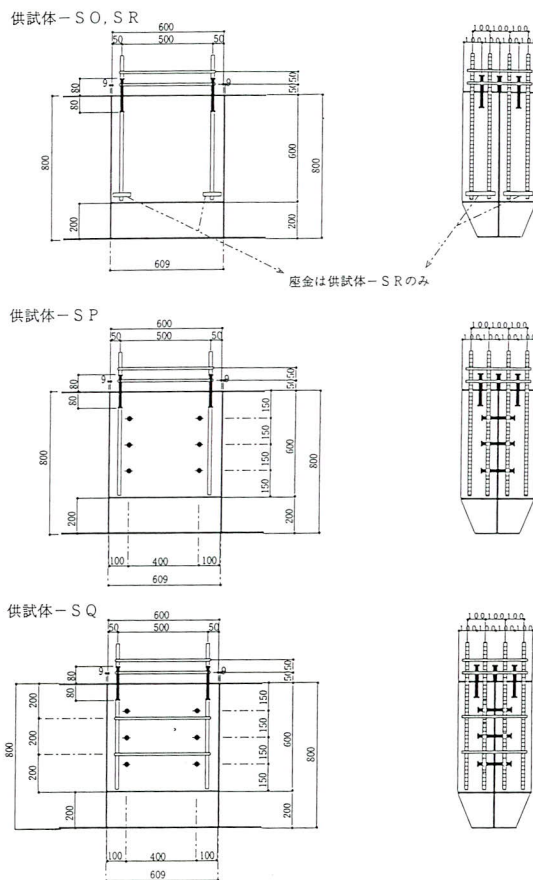


図-3-b 結合部詳細

- ・軸心（骨組線）の位置は、部材の図心とした。
- ・杭基礎であることから基礎バネを考慮した。
- ・鋼桁は鋼桁の剛度を、RC橋脚は鋼材の影響を無視し、コンクリートの全断面を有効とした剛度とした。
- ・鋼桁とRC橋脚の結合部には剛域を設定した。

(3) 鋼桁の設計

1) FEM解析

結合部の鋼桁を設計するにあたり、鋼桁内にコンク

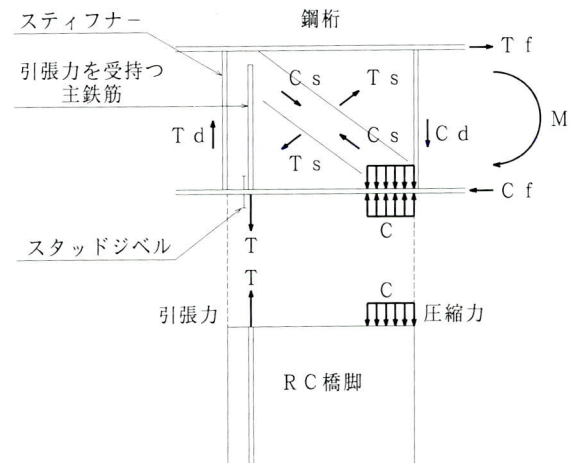


図-4 結合部の荷重伝達機構

リートが充填されることにより、鋼桁の応力分布の性状がどのようになるかFEM解析を行い検証した。図-5に解析モデルを示す。鋼桁には板要素を、コンクリートにはソリッド要素を使用し、以下の2ケースについて解析を行った。

- ・結合部の充填コンクリートを考慮 (CASE1)
- ・結合部の充填コンクリートを考慮しない (CASE2)

図-6-a, bに鋼桁上フランジの主応力を示す。両ケースとも主桁と横梁の交差部で応力集中が見られるが、CASE1の方がその値は小さい。これは結合部の充填コンクリートによりフランジのせん断遅れが発生しにくくなったためであると考えられる。

また、両ケースとも横梁に発生する応力は小さい。これは横梁の長さが短く脚柱の一部が主桁に割り込んでくるという今回の構造に起因し、横梁に作用する断面力が小さいためと考えられる。

2) 鋼桁の設計

結合部の鋼桁の設計は以下に行った。

- ①主桁の設計は、横梁中心位置を中間支点として主桁フランジの有効幅を算出し、中間支点上の主桁の断面力を用いて梁理論により設計した。
- ②横梁の設計は、上下フランジを全幅有効とし、橋脚中心位置の横梁の断面力を用いて梁理論により設計した。ただし、フランジに設ける作業用マンホールの開口は断面欠損として扱った。
- ③主桁および横梁の断面計算では、結合部内の充填コンクリートを無視し、鋼桁のみの断面で行った。また、結合部の鋼桁は梁として設計する以外に、以下の照査を行った。
- ④下式により合成応力度の照査を行った。

$$(\sigma/\sigma_a)^2 + (\tau/\tau_a)^2 = 1.0$$

⑤結合部の主桁ウェブ（控ウェブ）および横梁ウェブの板厚は下式以上とした（図-7）。

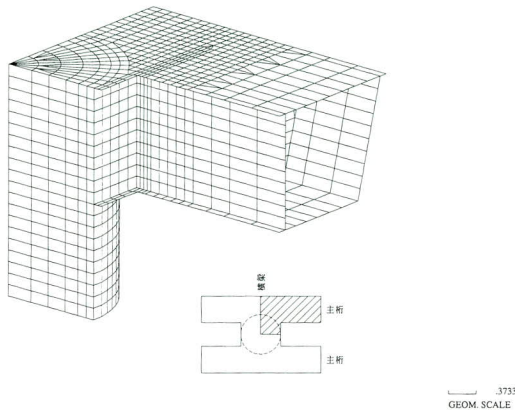


図-5 FEM解析モデル

$$t_w = A_1 / (1.2 \times D)$$

$$t_D = A_2 / (1.2 \times B)$$

t_w, t_D : 主桁、横梁ウェブの板厚 (cm)

A_1, A_2 : 主桁、横梁の引張フランジの総断面積 (cm²)

D, B : 結合部の充填コンクリートに接するウェブの長さ (cm)

⑦結合部の充填コンクリートに接する主桁および横梁のウェブは、コンクリート打設時の側圧の照査を行った。充填コンクリートには、後述する高流動性コンクリートを使用するため側圧を液圧とし、ウェブのはらみ量 δ を下式以下とした（図-8）。

$$\delta \leq h / 1000$$

δ : ウェブのはらみ量 (mm)

h : ウェブ高 (mm)

(4) 結合部の設計

1) 実験結果をもとにした鋼桁とRC橋脚の結合部の設計

① 鋼桁ウェブに300~400mmの間隔でD22×150のスタッドジベルを配置した。

② 結合部コンクリートの補強鉄筋は、鉄筋比を0.1%とし

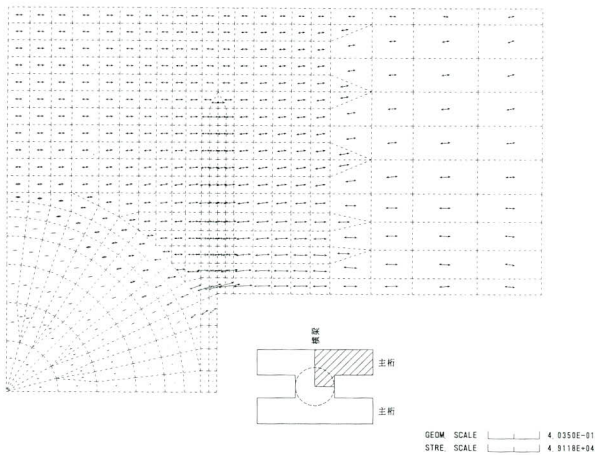


図-6-a CASE1主応力図

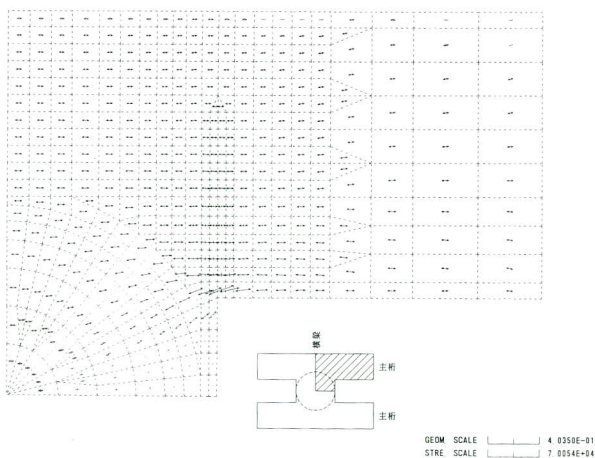


図-6-b CASE2主応力図

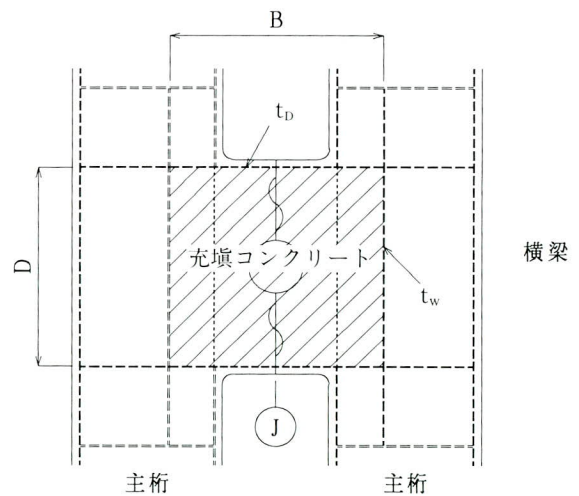


図-7

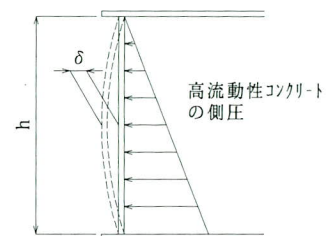


図-8

て鉄筋量を算出した（図-9）。

③軸方向主鉄筋の必要定着長は下式によって求めた（図-10）。

$$l_{req} = (\sigma_{sa} / \tau_{0a}) \times d$$

必要定着長 $l_{req} = (\sigma_{sa} / \tau_{0a}) \times d$
 σ_{sa} : 鉄筋の降伏応力度
 τ_{0a} : コンクリートの付着応力度
 d : 鉄筋径

④結合部内における主鉄筋の引張鉄筋比は、0.9%以下とした。本橋の引張鉄筋比は0.38%であった。

2) 鋼桁とRC橋脚の接合面の詳細構造

鋼桁とRC橋脚の接合面では、鋼桁下フランジが連続しているため、鋼桁内の充填コンクリートとRC橋脚のコンクリートが不連続となる。このため、鋼桁とRC橋脚の接合面の口開き、RC橋脚のコンクリートの圧壊、およびせん断力の伝達方法の問題があり下記の対策を行った。

①鋼桁とRC橋脚の接合面の口開き防止として、鋼桁下フランジの上下面にスタッドジベル（D22×150）を配置した。実験ではスタッドジベルを主鉄筋間に配置したが、本橋の場合、主鉄筋間にスタッドジベルを配置すると、主鉄筋とスタッドジベルのあきが粗骨材の最大寸法の4/3倍を犯すため、主鉄筋の内側に配置した（図-2）。

②RC橋脚の圧壊防止として、鋼桁下フランジ下面にバンドプレートを設けた（図-2）。

③鋼桁とRC橋脚の接合面におけるせん断力の伝達機構として、

- A. 鋼板とコンクリートの付着力および摩擦力
- B. スタッドジベルによる押し抜きせん断耐力
- C. 差込鉄筋による鋼材のせん断耐力
- D. せん断キーによるせん断耐力

などが考えられるが、これらの伝達機構は同時に有効となるわけではなく、作用するせん断力によって生じる変形の大きさにより変わってくる。概念的には、A→D→B→Cの順になると考えられる。本橋の設計では、鋼桁とコンクリートの付着力および摩擦力については、合成桁の設計と同様に安全側に考え無視するものとし、上記の変形性能からせん断力の伝達機構として最も有効と考えられるせん断キーを設け、これにより接合面に作用するせん断力およびねじりモーメントに抵抗するものとした（図-2）。

(5) 橋脚の設計

RC橋脚の設計は以下のように行った。

- ①RC断面の応力照査は、柱下端および柱上端（鋼桁とRC橋脚の接合面）で行った。
- ②柱上端（鋼桁とRC橋脚の接合面）では、「死荷重+活荷重」および「死荷重+温度変化時」にコンクリートにひび割れが発生しないよう、コンクリートの曲げ引張

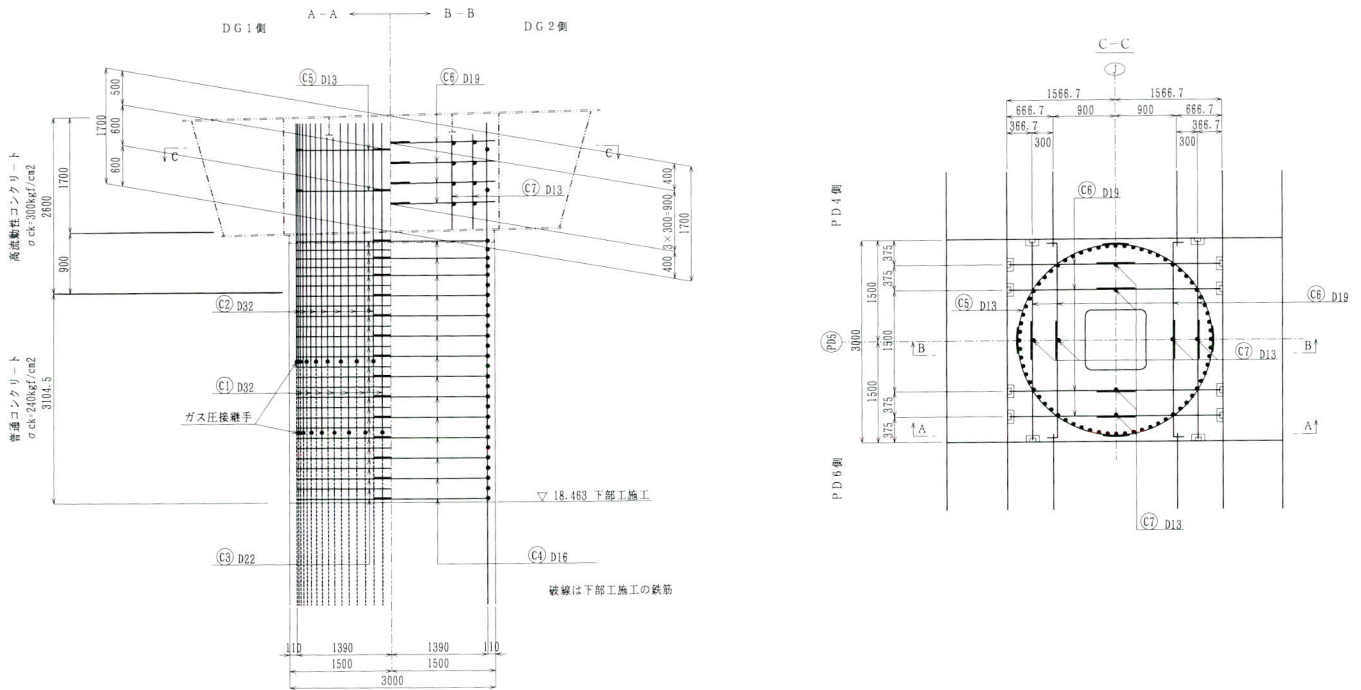


図-9 結合部配筋図

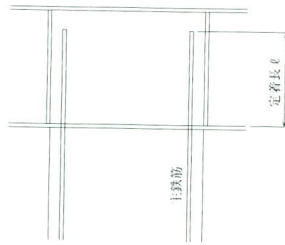


図-10

応力度の照査を行った。コンクリートの曲げ引張応力度 σ_t は下記の値以下とした。

「死荷重+活荷重」 $\sigma_t \leq 27 \text{kgf/cm}^2$

「死荷重+温度変化時」 $\sigma_t \leq 35 \text{kgf/cm}^2$

- ③ ②の「死荷重+温度変化時」のケースについては、RC床版の剛度を考慮して構造解析を行い、算出された断面力でコンクリートの曲げ引張応力度の照査を行った。ただし、温度変化量は $\pm 25^\circ\text{C}$ とした。
- ④帯鉄筋は、柱下端から柱上端まで一定量で配置した。
- ⑤軸方向主鉄筋の継手は、鉄筋相互を直接接合するガス圧接継手とした。
- ⑥復旧仕様に従い地震時保有水平耐力の照査を行った。

4. 結合部の施工

(1) 結合部の施工手順

図-11に結合部の施工手順を示す。また、施工にあたっては、以下について考慮した。

- ①下部工の鉄筋精度を確認し、鋼桁下フランジの鉄筋通孔の位置を決定した。

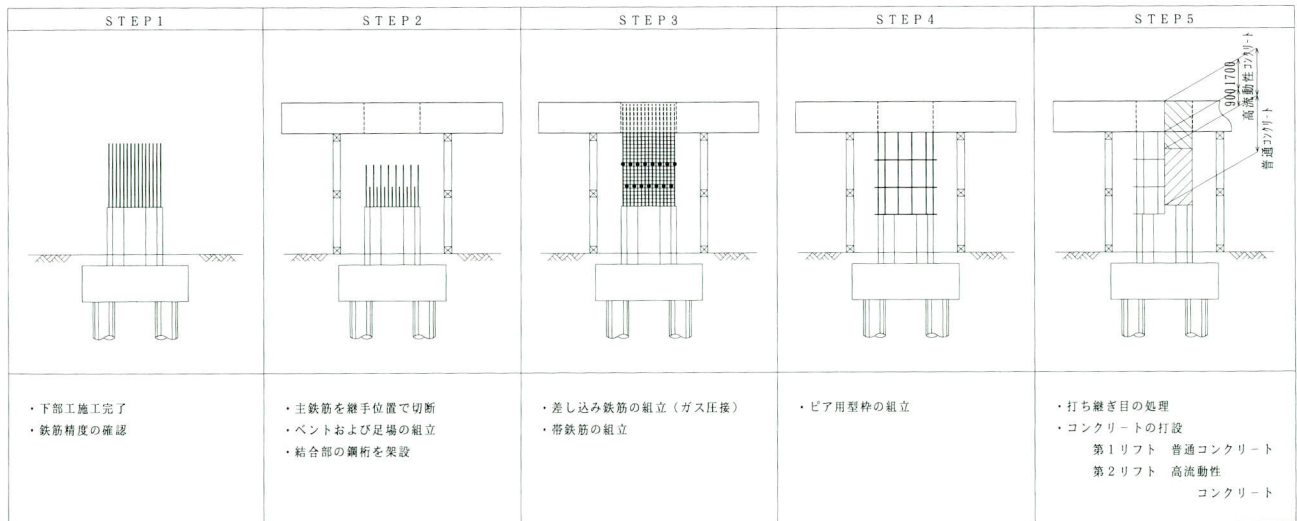


図-11 施工手順

- ②主鉄筋のガス圧接箇所は、全数非破壊検査を行った。
- ③型枠にはピア用型枠を使用し、コンクリート打設時の側圧に耐えられるよう締付けバンドおよびクランプで固定した (写真-1)。

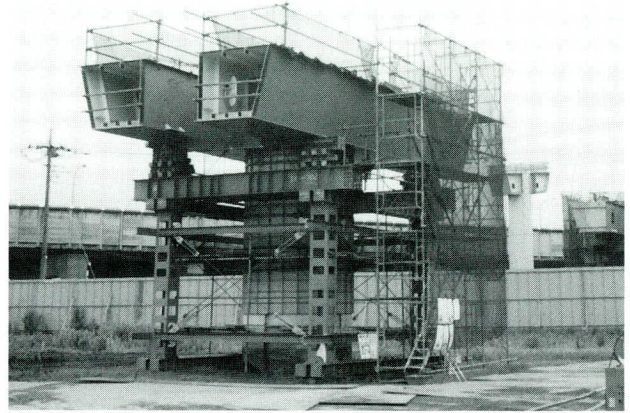


写真-1

- ④鋼桁フランジのマンホールよりコンクリートの打設を行った。経済性および作業性を考慮して鋼桁下フランジの下方900mmまでは普通コンクリートを使用し、それ以上は高流動性コンクリートを使用した。

(2) 高流動性コンクリートの施工

1) 結合部コンクリートの選定

結合部の構造上、鋼桁下フランジとRC橋脚の接合面および結合部の鋼桁内へ確実にコンクリートを充填する必要がある。しかし、コンクリート打設時の環境は、橋脚に型枠が設置され、鋼桁がその上に架けられているため

コンクリートの均しおよび締め固めが十分に行えないと予想された。したがって、結合部のコンクリートには下記の条件を満足する高流動性コンクリートを採用した。

- ①ノンバイブレータでも十分充填可能な流動性があること。
- ②鋼桁との付着性がよいこと。
- ③コンクリートとして材料分離がないこと。
- ④長時間作業性のあるコンクリートであること。
- ⑤耐久性に信頼できること。
- ⑥できるかぎりノンブリージング性を持っていること。

表-2に高流動性コンクリートの品質条件を示す。

2) 試験練り

試験練りを行い高流動性コンクリートの各種品質を確認した。試験項目を以下に、配合および試験結果を表-3に示す。

①スランプフロー

土木学会基準「コンクリートのスランプフロー試験方法(案)」によった。また、経時保持性は30分おきに計測した(写真-2)。

②空気量

JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気室圧力方法」によった。

③U型充填試験

中央部に鉄筋(3本または5本)および仕切り板を配置したU型容器の一方にコンクリートを詰め、1分後に仕切り板を開放し、コンクリートの上昇量および開放から上昇停止までの時間を計測した(写真-3)。

④圧縮強度試験

JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準じて、経時60分計測時に供試体を作成し、JIS

表-2 高流動性コンクリートの配合条件

項目	条件
温度条件	25~30°C
施工時期	6月下旬~7月上旬
設計基準強度	30N/mm ²
スランプフロー	65±5cm
空気量	4.5±1.5%
50cmフロータイム	4~10秒
U型充填試験	30cm以上
経時保持性	90分

表-3 配合確認試験結果

水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)					混和材(%)		
		水	セメント	細骨材	粗骨材	エクスパンドポリマー	レオビルドSP-8HR	マイクロエア775S	
35.0	52.0	175	500	815 (652) (163)	765	30	0.5	P×1.65 (8.745kg)	P×0.009 (0.048kg)

スランプフロー(cm)	フロータイム(秒)	空気量(%)	U型充填試験		温度(°C)	圧縮強度(N/mm ²)		
			充填高さ(cm)	停止(秒)		材齢7日	材齢14日	材齢28日
0分	7.6	4.6	—	—	29.0	37.4	52.3	67.3
62.0×60.5	33.7	—	—	—	29.0	41.6	50.9	65.6
30分	9.2	4.3	—	—	28.5	41.5	50.6	66.5
61.5×60.5	55.0	—	—	—	28.5	(40.2)	(51.3)	(66.5)
80分	7.4	4.1	36.0	32.0	28.5	—	—	—
66.0×64.0	52.9	—	—	—	—	—	—	—

A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」によって材齢7、14、28日に試験した。

3) 高流動性コンクリートの打設

高流動性コンクリートの打設は以下のように行った。

- ①ブーム式ポンプ車で鋼桁フランジのマンホールより筒口を挿入し、コンクリートの自由落下を極力押さえるよう注意しながら行った。
- ②鋼桁下フランジ下面および鋼桁内に空隙が生じないようにするため、コンクリートの打設速度を遅くし連続して打設を行った。コンクリートの打設速度は1.8m/hである。



写真-2

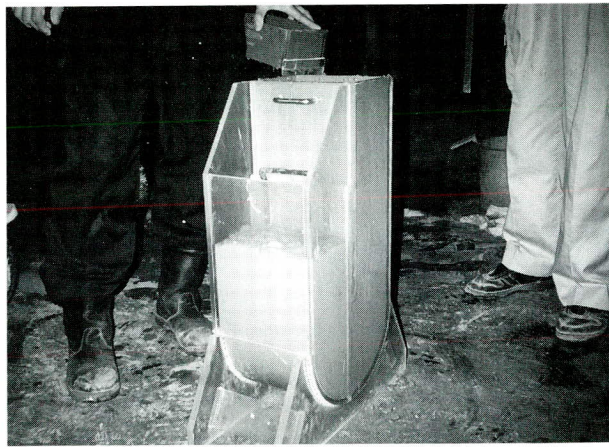


写真-3



写真-4



写真-5 施工完了

- ③鋼桁上フランジのマンホールに高さ500mmのヘッドを設け、圧力差によりコンクリートの充填を行った。
- ④鉄筋貫通孔および空気抜き孔からコンクリートが出てくるのを目視により確認した（写真-4）。

5. あとがき

横浜緑IC・Dランプ橋で採用された複合ラーメン構造の結合部の設計・施工方法について報告を行った。横浜緑IC・Dランプ橋は平成9年10月に無事竣工をむかえた（写真-5）。なお、設計に際しては埼玉大学町田教授をはじめ日本道路公団 東京第一建設局の方々より多大なご指導を頂いた。紙面を借りてお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 埼玉大学：鋼桁を鉄筋コンクリート橋脚に剛結した複合構造に関する研究，宮地鐵工所・埼玉大学共同研究成果，1995, 3
- 2) 高橋，澁谷：鋼-RC複合ラーメン構造に関する2・3の考察，宮地技報No. 13, 1997
- 3) コンクリート工学協会：混合構造研究委員会報告書，1991, 12
- 4) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン
- 5) 森河，伊東：鶴見航路橋の主塔結合部構造に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol 39A, 1993, 3
- 6) 合成柱研究会：合成橋脚とその計算例・解説，現代工学出版

1997. 10. 31 受付

グラビア写真説明

多摩都市モノレール鋼軌道桁

多摩都市モノレール事業は、急務となっている多摩地域の南北交通の基盤となる新しい路線です。立川北駅（立川市）～上北台駅（東大和市）の路線は、平成10年の先行開業に向けて最終段階に入りました。当工区（その2-19）は軌道桁2連で、芋窪街道とすずかけ通りの交差点上に架かるため、安全性及び工期の短縮等の観点から地組・一括架設とし、一夜で架設しました。次期開通予定の立川南駅（立川市）～多摩センター駅（多摩市）間についても急ピッチで工事が進んでいます。

将来は八王子市や町田市など、多摩地域の各都市間を結ぶ基盤交通として計画されており、地域の期待も高まっています。

（松本）