

鉄道における最近の複合構造の適用例

津吉 毅^{*1}・山内 俊幸^{*2}・鷹野 秀明^{*3}・栗原 啓之^{*4}

1. はじめに

鉄道構造物を改良・新設する場合に、保守・維持管理の省力化、騒音・振動問題等に配慮し、都市部においては、コンクリート構造物を適用する機会が多い。また、鉄道工事では、特に都市部においては営業線に近接した工事が多く、その作業性が大幅に制約されるため、最近では、その構造特性に重点を置くのみならず、施工の省力化等を考慮し、例えば、鋼管を柱の型枠と横方向補強材として用いるなど、コンクリートと鋼を複合させて適用する事例が増加しており、施工性、経済性、工期等の観点からこのような事例はますます増加するものと思われる。

本文では、現在施工中の東京駅中央線重層化工事における事例を中心に、最近の鉄道における複合構造の適用例についてその概要を報告する。

2. 中央線重層化

2.1 概要

現在、東京駅では、1998年の長野オリンピックの開催にあわせ、北陸新幹線の乗り入れに関連する工事が施工中である。北陸新幹線用のホームは、在来線の5番ホームを改良転用することとなるため、在来線ホームが1面不足することとなり、そのため中央線の重層化工事も合わせて施工中である(図-1)。これにより、中央線



写真-1 完成予想図

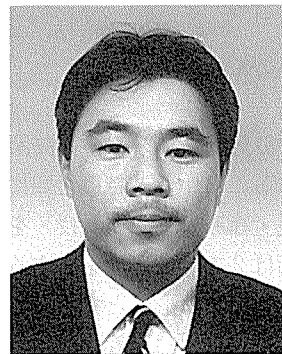
は日本橋川付近から新設される高架橋上を走行することとなる。図-2は、その高架区間の概要である。高架区間は、スパンの比較的長い呉服橋(単純桁)を除き、R7~R9の3ブロックのラーメン構造とした。本高架橋は、図-1に示すように片側の柱が歩道橋境界に設けられることとなることから、柱本数をできるだけ少なく、かつ、細くすることが求められた。そこで、跨道橋部を除く縦梁をPRC構造とすることにより、スパンを鉄道ラーメン橋としてはやや長めの20m前後を基本とすることで柱本数を低減し、歩道橋境界に設けられる柱は、鋼管巻き軸方向鉄筋比10%程度の高密度配筋のRC柱とすることにより断面をスレンダーなものとした(図



*1 Takeshi TSUYOSHI
東日本旅客鉄道(株)
建設工事部構造技術PT



*2 Toshiyuki YAMAUCHI
東日本旅客鉄道(株)
東京工事事務所
工事管理室 係長

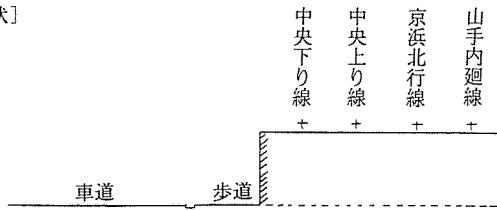


*3 Hideaki TAKANO
東日本旅客鉄道(株)
東京工事事務所
工事管理室

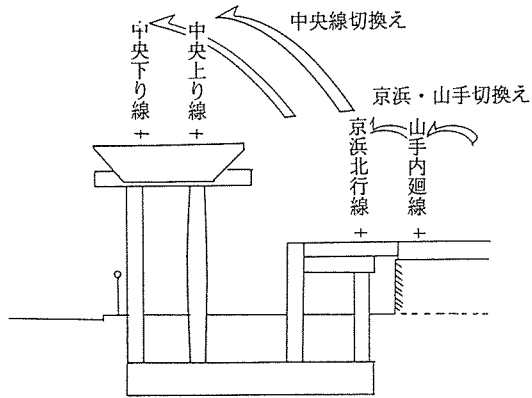


*4 Hiroyuki KURIHARA
JR東日本コンサルタンツ
(株) 技術第一部企画課
課長

〔現 状〕



〔中央線仮線共用〕



〔工事完了〕

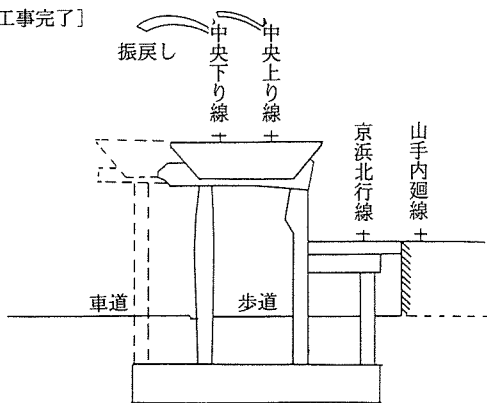


図-1 中央線重層化施工順序

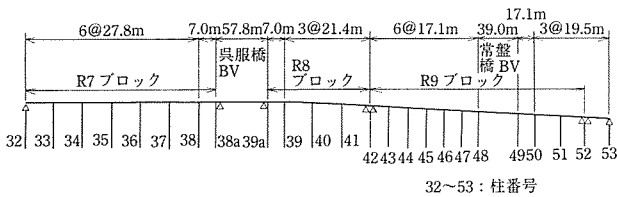


図-2 高架区間概要

3). 写真-1は、高架橋の完成予想図である。本高架橋は、丸の内側の正面に位置することから、特に景観に配慮し景観検討委員会（委員長・篠原東京大学教授）を設け検討した結果、縦梁の断面は2方向に曲線を有する箱型断面とし、柱、横梁等も特徴のある形状とすることとした。

本文では、高密度配筋の鋼管巻き RC 柱の適用に関して行った実験概要、その設計施工、鋼橋（常磐橋）を含めてラーメン化される R 9ブロックの設計施工の概要

について述べる。

2.2 鋼管巻き RC 柱の適用

景観設計から、本ラーメン橋の道路側の柱は、メタルのテクスチャーを持つエンタシス柱（柱上下端の径が絞られた葉巻形）とすることとなった。また、この柱は歩道橋境界に設けられることから、道路管理者との協議の結果、歩行者の通行をできるだけ阻害しないように、幅を1.0 m以内とすることが定められていた（図-3）。したがって、構造設計ではこれらの柱の外観および形状寸法を前提とした検討を行った。

一方、高架橋全体構造は、RC 構造を基調に考えることとした。これは、道路と線路に挟まれた狭隘なスペースで部材を構築しなければならない箇所があり、鋼構造または鋼とコンクリートとの合成構造などでは、比較的大きくなる鋼製部材の取廻しの面から施工が困難となるためである。

これらを条件にこの柱の構造を考えると、外側に鋼管を用いることから、コンクリート充填鋼管構造、鋼管を外装材に用いた RC 構造などが候補にあげられる。このうち、鋼管に応力を持たせる構造では、部材断面が決定する柱上下端の地震時最大応力発生箇所での接合方法が問題となる。すなわち、前述したように高架橋は RC 構造を基調としており、この柱の上端と接合する横梁についても断面を絞ったスレンダーな RC 構造とすることとしたため、鋼管を合成構造として接合部に納めると、鋼管の埋込み長さの確保や、横梁主鉄筋の合理的な配置が困難となる。したがって、鋼管を外装材に用いた

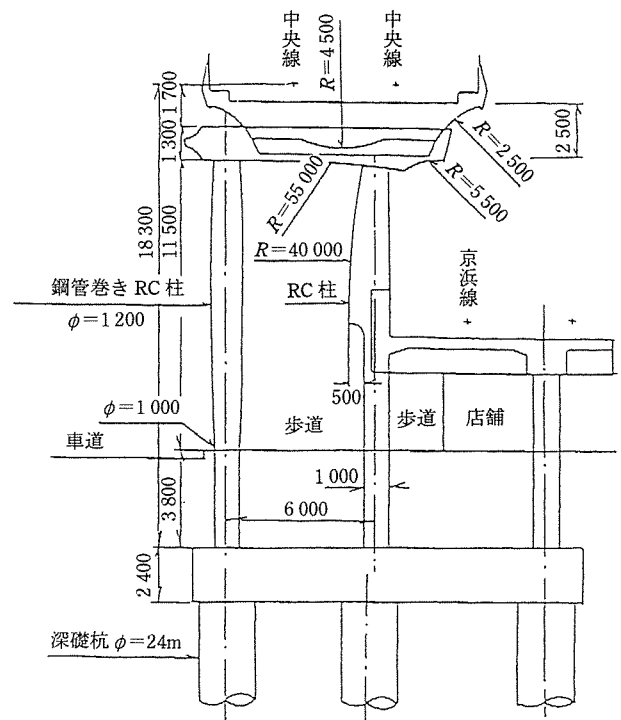


図-3 高架橋横断面図

RC 構造を検討することとした。

(1) 部材の検討

部材の外側に用いる鋼管を単なる外装材として用いることは経済的に不利であるため、型枠兼横方向補強材として用いることのできる板厚の鋼管を使用し、断面の引張応力は鉄筋にもたせる構造（以下、鋼管巻き RC という）とすることとした。図-4 にその断面図を示す。

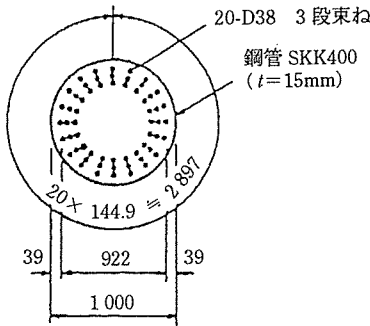


図-4 鋼管巻き RC 柱断面図

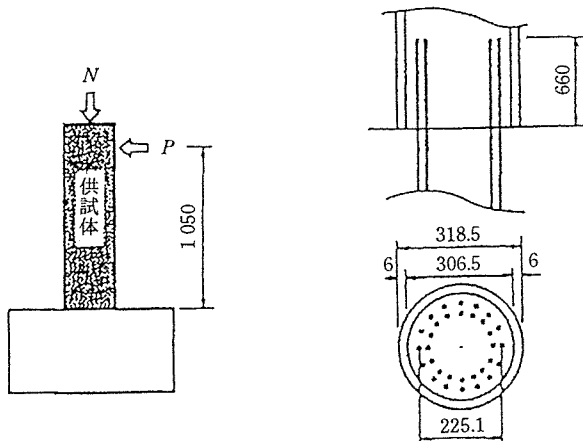


図-5 供試体概要

この柱は、地震時に所要の曲げ耐力を得るために必要な軸方向引張鉄筋比が約 9% となり、非常に鉄筋量が多いため、主に、耐震性能を確認するための模型試験を行った。実験は、鋼管巻き RC 柱とフーチングの接合部に着目し、最適な接合方式と断面の耐力、部材の変形性能などについて、図-5 に示すような供試体を用いて水平交番荷荷による実験を行った¹⁾。この実験から、

- ① 高密度配筋の鋼管巻き RC 柱は、十分なじん性率（供試体では 10 以上）が得られる。
- ② 鋼管巻き RC 柱の最大耐力は、鋼管断面を曲げ剛性の等しいコンクリート断面に置き換えて、鉄筋コンクリート断面として計算すると、実験結果との整合性が比較的よい。

などの結果が得られ、実設計に取り入れた。

(2) 接合部の検討

鋼管巻き RC 柱と上層横梁との接合部の位置は、柱

ごとに上層横梁縁端からの離れが変化しており、最も縁端距離の少ないものを想定して、約 1/3 縮尺の模型供試体による水平交番荷荷試験を行った²⁾。この結果をもとに、梁と柱との接合部の補強筋を含めた配筋を決定した。補強筋の配筋例を図-6 に示す。

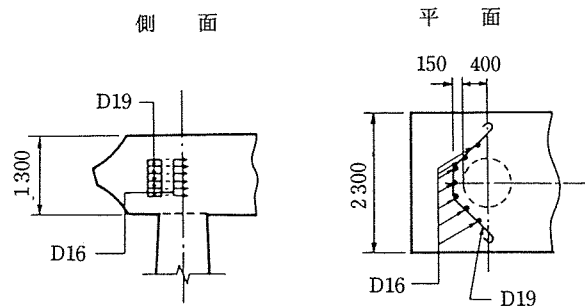


図-6 柱・梁接合部の補強筋

(3) 全体構造の検討

RC 構造の部材は主に引張鉄筋比、断面寸法、作用軸力の大きさ等によって、作用モーメントと剛性の関係が異なる。本高架橋に用いた柱は、線路側と道路側とで断面寸法、断面形状が大きく異なっており、さらに、RC と鋼管巻き RC の異種構造を用いている。したがって、単独の門型橋脚とした場合に、大きな面外の水平力が作用すると、橋脚天端の変位量の違いによって大きなねじりが生じることとなる。このため、多径間のラーメン構造とすることによって、構造系全体の平面的なねじりに対する剛性を高め、しかも、橋脚の応力に対して有利な形態とした。

(4) 鋼管巻きの RC 柱の施工

鋼管は上下 2 分割とし（写真-2）、下側鋼管は柱中心に設置した支柱（H 形鋼）をガイドとし、建込み精度

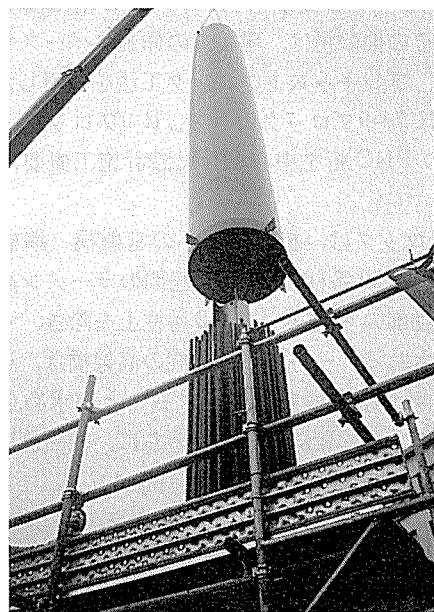


写真-2 鋼管の建込み

表-1 コンクリートの配合例

セメントの種類	S/a (%)	呼び強度 (kgf/cm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	フロー値 (cm)	水セメント比 (%)	単 位 量 (kgf/m ³)					記 事
						セメント	水	粗骨材	細骨材	混和剤	
普通	52.3	400	25	55±5	40	400	160	858	916	10.0	混和剤：高性能 AE 減水剤

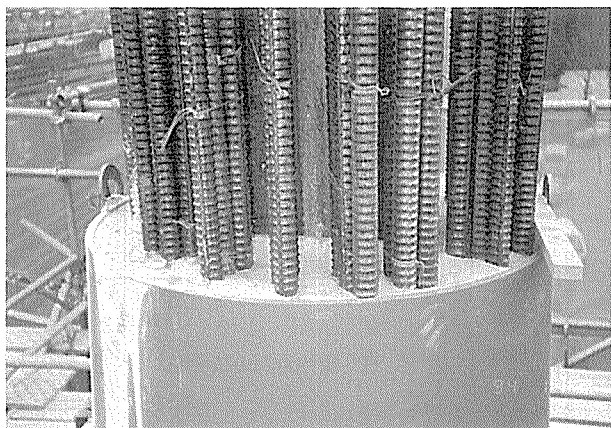


写真-3 軸方向筋の配置状況

を確保した。また、上側鋼管は、上下鋼管を4か所の拘束板で仮固定しながら溶接にて下側鋼管と接続した。軸方向鉄筋の継手は、柱中央付近に設け、熱間押し抜きガス圧継手または機械式継手を用いた。

また、本部材は、高密度配筋である(写真-3)ため、表-1に示すような配合の流動性の高いコンクリートを採用した。

なお、鋼管は、景観を考慮し、メタリックの緑青色に塗装することとしている。

2.3 桁のラーメン化 (R9ブロックの設計・施工)

PRC桁は、型枠の転用等を考慮し4種類のスパンとした。このうち、32番柱～38番柱のスパン28mの桁と、50番柱～53番柱のスパン19mの桁は場所打ち施工され、その他の桁は、現場での作業スペースや工期等を勘案し、プレキャストブロック工法を併用した³⁾。ここでは、R7～9ブロックのうち、R9ブロック上層縦梁(箱桁)のPRC桁を中心とした設計施工概要について述べる。

R9ブロックは、桁長39mの常磐橋(鋼橋)を挟み、42番柱～52番柱までの10径間のラーメン高架橋であり、可動部の42番柱上と52番柱上を除き、すべて橋脚と剛結される。一方、この区間の高架橋は、道路上空の縦断占有面積を極力少なくすることが求められたため、単純桁として仮線供用したのちに、線路側に振り戻してラーメン化することとなる(図-1)。

表-2にPRC桁の基本的设计条件を、図-7にスパン17mの桁の構造一般図を示す。桁断面は、4つのU形桁と現場打設される上スラブからなり、主方向はPRC構造、横方向はRC構造である。このような構造とし

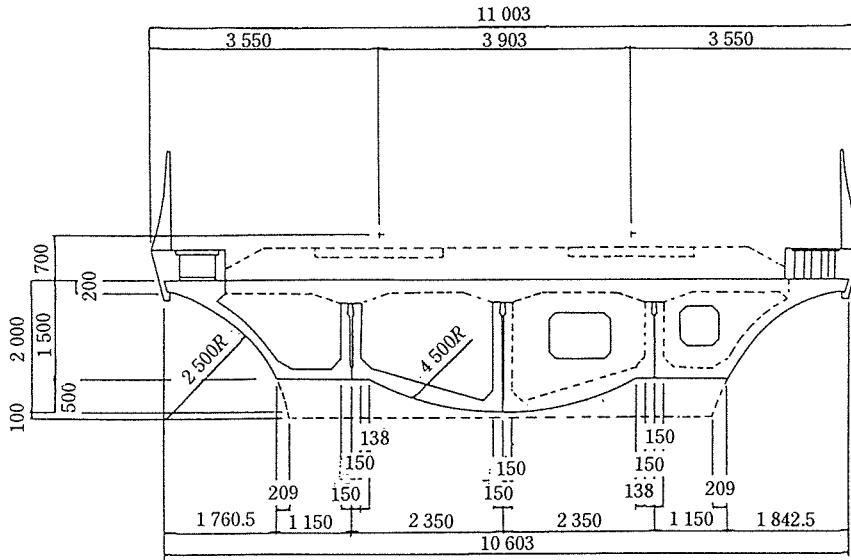
表-2 基本的设计条件

軌道形式	バラスト軌道		
列車荷重	EA-17		
設計水平震度	0.25		
コンクリート	クリープ係数	応力度計算：3.0 変形・不静定力計算：2.6	
	乾燥収縮度	応力度計算：400×10 ⁻⁶ 変形計算：200×10 ⁻⁶	
	設計基準強度	400 (kgf/cm ²)	
	永久荷重時	許容曲げ圧縮応力度	160 (kgf/cm ²)
許容曲げ引張応力度		-21 (kgf/cm ²) (支座位上側 0 (kgf/cm ²) [設計荷重時])	
許容斜め引張応力度		-21 (kgf/cm ²)	
P C 鋼材	鋼材種別	SWPR 7 B	
	強度	引張強度：190 (kgf/mm ²) 降伏強度：160 (kgf/mm ²)	
	許容応力度	プレストレス中	144 (kgf/mm ²)
		プレストレス直後	133 (kgf/mm ²)
鉄筋	設計荷重時	133 (kgf/mm ²)	
	鉄筋種別	SD 345	
	強度	引張強度：5 000 (kgf/cm ²) 降伏強度：3 500 (kgf/cm ²)	
耐久性に対する許容ひび割れ幅	0.005 C C：かぶり 乾燥収縮度：150×10 ⁻⁶		
外観に対する許容ひび割れ幅	0.3 (mm) 乾燥収縮度：300×10 ⁻⁶		
荷重の組合せ	破壊：単純桁時	1.7×(死+列(複)+衝)	
	地震時：ラーメン時	死+列(単)+1.5×(地震の影響)	
	ひび割れの検討	死+{0.2×(列(単)+衝)}+[プレストレス+乾燥収縮+温度]	
	疲労の検討	死+列(単)+0.75×衝+[プレストレス+乾燥収縮+温度]	

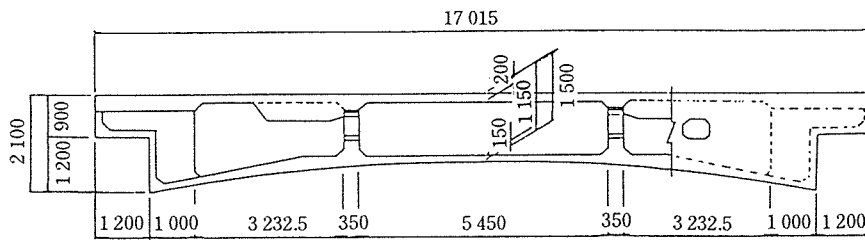
{ }：耐久性に対する検討 []：不静定力

たのは、景観上好ましくない軸直角方向の目地を作らないこと、運搬上の重量制限(40 t)を満たすこと、横締めなどの線路上空での作業を極力少なくすることなどを配慮したためである。また、U形桁は、重量制限を満たすために部材厚さを15 cmと非常に薄くしており、このため、コンクリートの充填性等を十分に確保できるよう高流動コンクリートを採用した⁴⁾。

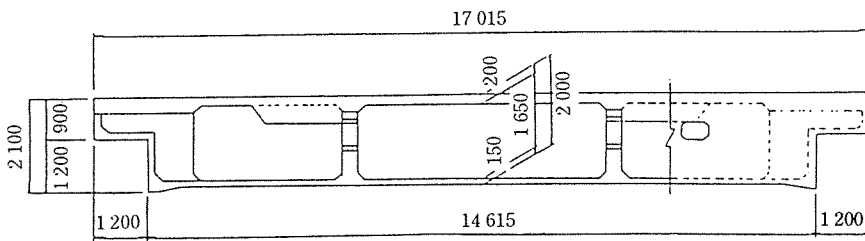
U形時には、上スラブ打設までの荷重に対して、曲げひび割れが発生しないように、全断面有効として計算したコンクリートの縁引張応力度を設計引張強度以下に制限しており、部材厚の関係からシングルストランドのみを断面内に配置している。図-8は、そのケーブル配



(a) 断面図 (スパンセンター)



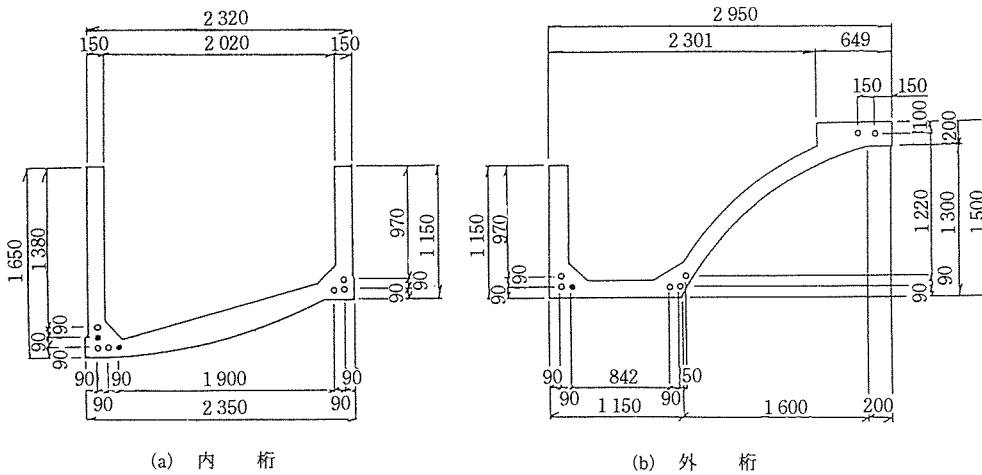
(b) 側面図 (端部)



(c) 側面図 (中央)

図-7 構造一般図

● : 搬出直前に緊張



(a) 内 桁

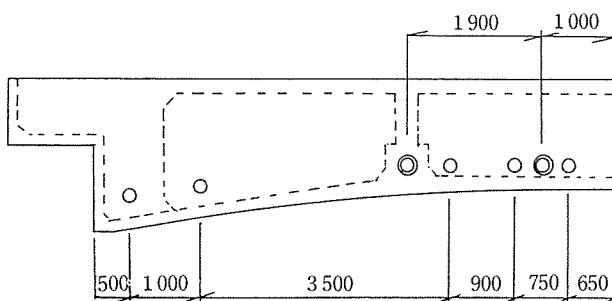
(b) 外 桁

図-8 シングルストランドの配置

置である。U形時に内桁・外桁にその差が発生すると、架設時の接合作業が困難となるばかりか、接合による強制変形により大きな付加応力が発生するので、その差をできるだけ少なくする必要がある。そのため、ストランドは、U形桁自重作用時の上下左右縁の応力度ができるだけバランスするように、その配置・緊張順序を定めた⁵⁾。写真-4は、U形桁の架設状況である。U形桁は転倒防止等を考慮し、ほぼ対象断面である内桁2連を最初に架設し、線路側、道路側の順に外桁を架設した。内・外のU形桁のその差はほとんどなく、せん断キーを軽く勤合させ、締めつけボルトで締めつけるこ



写真-4 U形桁の架設状況



○ : 引寄せボルト ⊙ : せん断キー
図-9 せん断キー・接合ボルトの配置

とにより、比較的容易に接合作用は施工できた。図-9に、せん断キーと締めつけボルトの配置図を示す。

U形桁架設、上スラブ打設後、橋面荷重、列車荷重に対して不足するプレストレスを外ケーブルにて導入する。外ケーブルは、フレシネー外ケーブルシステムを用い、内・外桁にそれぞれ2ケーブルずつ配置し、今回は、取替えを前提としていないため、定着部は二重管構造としていない。また、ケーブルシースにはPE管を用い、セメントグラウトを充填した。写真-5は、デビエーター部における外ケーブルの配置状況である。デビエーター部では、ケーブルの折れ角を防止するため2重管構造とし、外管には端部をトランペット状に加工した鋼管を用いた。設計上は、外ケーブルは有効プレストレスを外力として取り扱い、引張鋼材としては、鉄筋と部材断面内に配置したシングルストランドのみを考慮し、単純桁としての断面力に対して、ひび割れ、疲労、破壊の検討を行った。なお、外ケーブルの緊張管理は、荷重計示度と伸びにより行った。

本橋は、仮線として供用後、横移動し、ラーメン化する。横移動は、短時間に最大約6.5m行う必要があるため、盛替えの必要ないダブルツイングジャッキを用いて行う(図-10)。写真-6に支承部の構造を示す。支承



写真-5 外ケーブルの配置状況

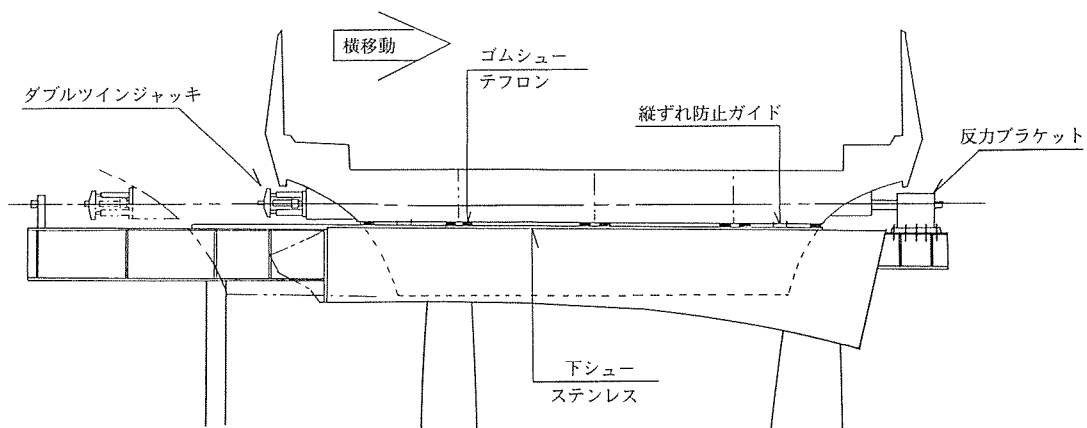


図-10 桁横移動概要

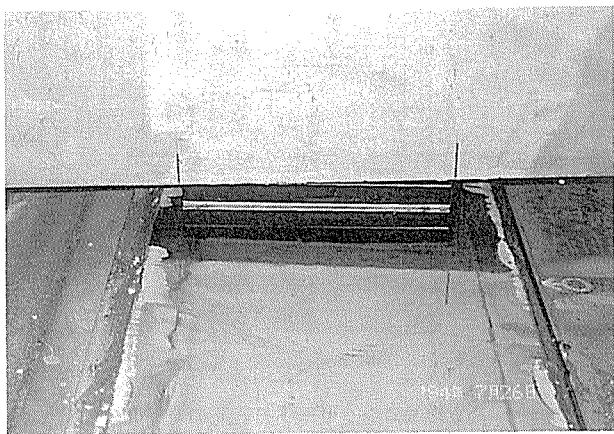


写真-6 支 承 部

は、ステンレスのすべり板のうえを表面をテフロン加工したゴムシューがすべる構造となっており、外桁には縦方向のずれを防止するためガイドを取り付けている。横移動に必要な最大水平力は、過去の実績等を勘案し、ステンレスとテフロンの摩擦係数を $\mu=0.10$ として算定した。なお、仮線時は、直角方向には鋼製仮ストッパーを設置し、軸方向に対しては橋脚上層横梁と桁かかり部が衝突しないように木製のくさびを打ち込んだ。

桁横移動終了後、柱頭部と桁かかり部の遊間にあと埋めコンクリートを施工し、PC鋼材にて連結する。支点部は列車荷重時に引張応力が発生しないよう応力度を制

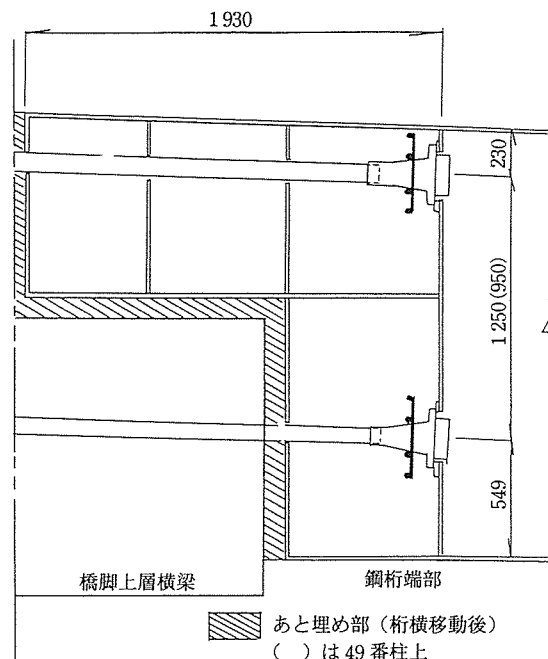


図-12 鋼桁の連結ケーブル配置

限し、地震時破壊の検討を行った。図-11は、PRC桁の連結ケーブルの配置、図-12は、鋼桁の連結ケーブルの配置を、図-13には柱頭部での配置断面図を示す。鋼桁端部では、ダイヤフラムに支圧板、トランペット管、シースを工場にて固定し、桁送り出し後に現場にてコン

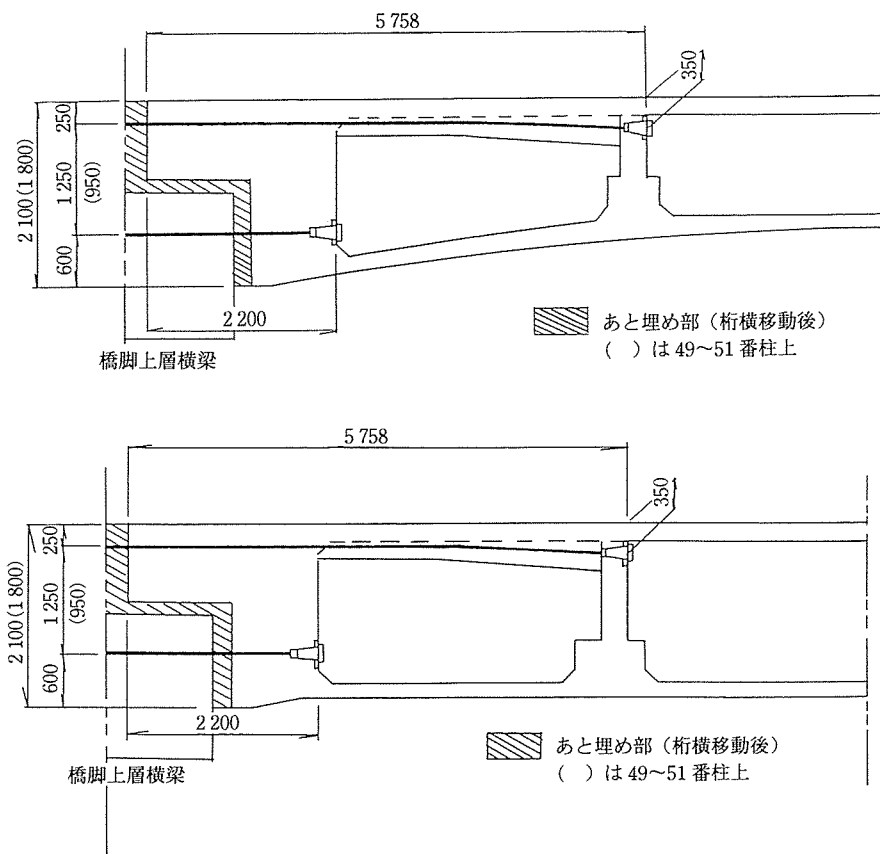
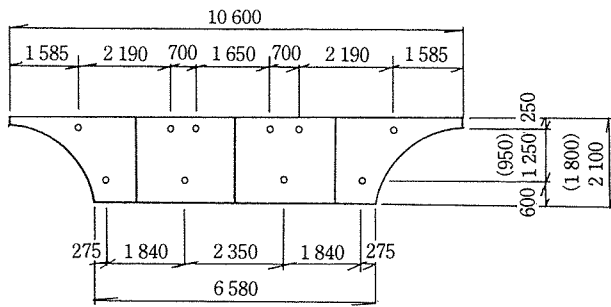


図-11 PRC 桁の連結ケーブル配置



()は49～51番柱上

図-13 柱頭部の連結ケーブル配置

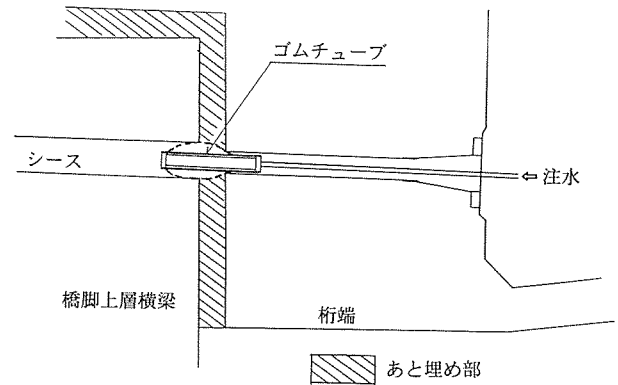


図-14 あと埋めコンクリート打設時のシースの防護

クリートを打設する。プレストレスは、充填されたコンクリートを介して柱頭部に伝達される構造としている。ケーブルは、付着あるケーブルとして設計しているが、狭隘な箱桁内での緊張作業となることから、シングルストランドジャッキにてストランド1本ずつを緊張できるフレッシュEシステムを用いた。表-3に各断面ごとのケーブルの配置本数を示す。PC鋼材は、柱頭部でシースを連結、遊間のあと埋めコンクリートを施工後、ストランドを挿入、緊張、グラウトを行う。なお、あらかじめ部材内に埋設されるシースには、防錆を考慮して異形ステンレスシースを用い、下段のシース接続部ではシースの接続作業ができないため、図-14のようにシース穴を治具で防護したうえであと埋めコンクリートを施工することとし、橋脚上層横梁にあらかじめ埋設しておくシースは、施工誤差等を勘案し若干大きめの径とした。

また、ストランドは桁横移動後、橋面から挿入すると作業が非常に困難であるため、防錆処理を施したうえで、桁内に保管することとした。

本高架橋は、平成7年夏に仮線供用され、その後、平成8年冬に横移動、ラーメン化作業が施工される。これらの施工結果等についても、機会があれば紹介したいと考えている。

3. 綿糸町駅構内跨道橋

墨田区画街路第2号線は錦糸町駅構内東京方を南北に線路下を横断する。道路の総幅員は $B=15.0$ mであり、南北の現状の道路への取付けとなることから、線路下の土かぶりを極力少なくするためPCR工法を採用した。本工法では、PCルーフの両端に主桁を設ける下路桁形式が多く採用されてきたが、この形式では3線程度の横断が限界であるため、駅構内の横断となる今回は、箱形トンネル形式を採用することとした(図-15)。その構造は、PCスラブ桁をU形の門形橋台で支持する形式としており、側壁・上スラブ接合部はヒンジとしている。図-16にその詳細図を示す。この構造形式では、圧入したPCエレメント相互間をPC鋼材で一体化するた

表-3 連結ケーブルの配置

		43番柱～47番柱	48番柱	49番柱	50番柱～51番柱
内	上段	2×7 E 15.2	2×12 E 15.2	2×19 E 15.2	2×7 E 15.2
	下段	1×7 E 15.2	1×12 E 15.2	1×12 E 15.2	1×8 E 15.2*
外	上段	1×7 E 15.2	1×12 E 15.2	1×12 E 15.2	1×7 E 15.2
	下段	1×7 E 15.2	1×12 E 15.2	1×12 E 15.2	1×8 E 15.2*

* 12 E 15.2の定着具にストランドを8本使用する。

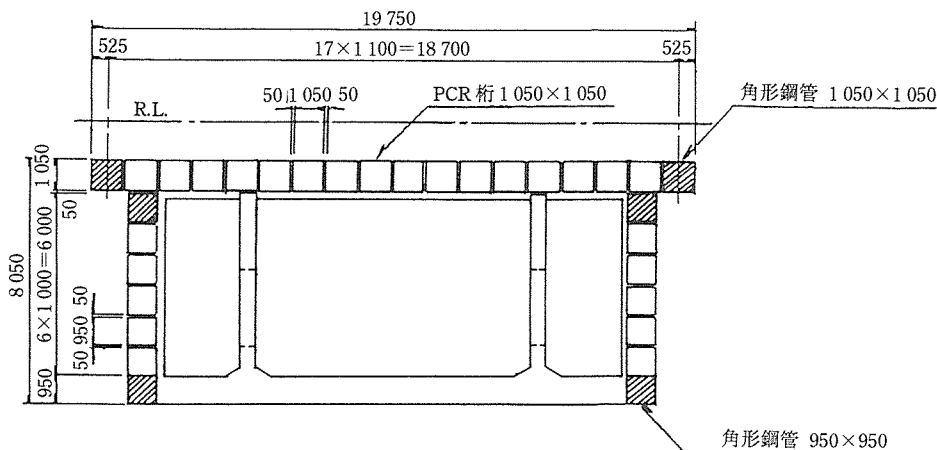


図-15 PCR箱形トンネル断面図

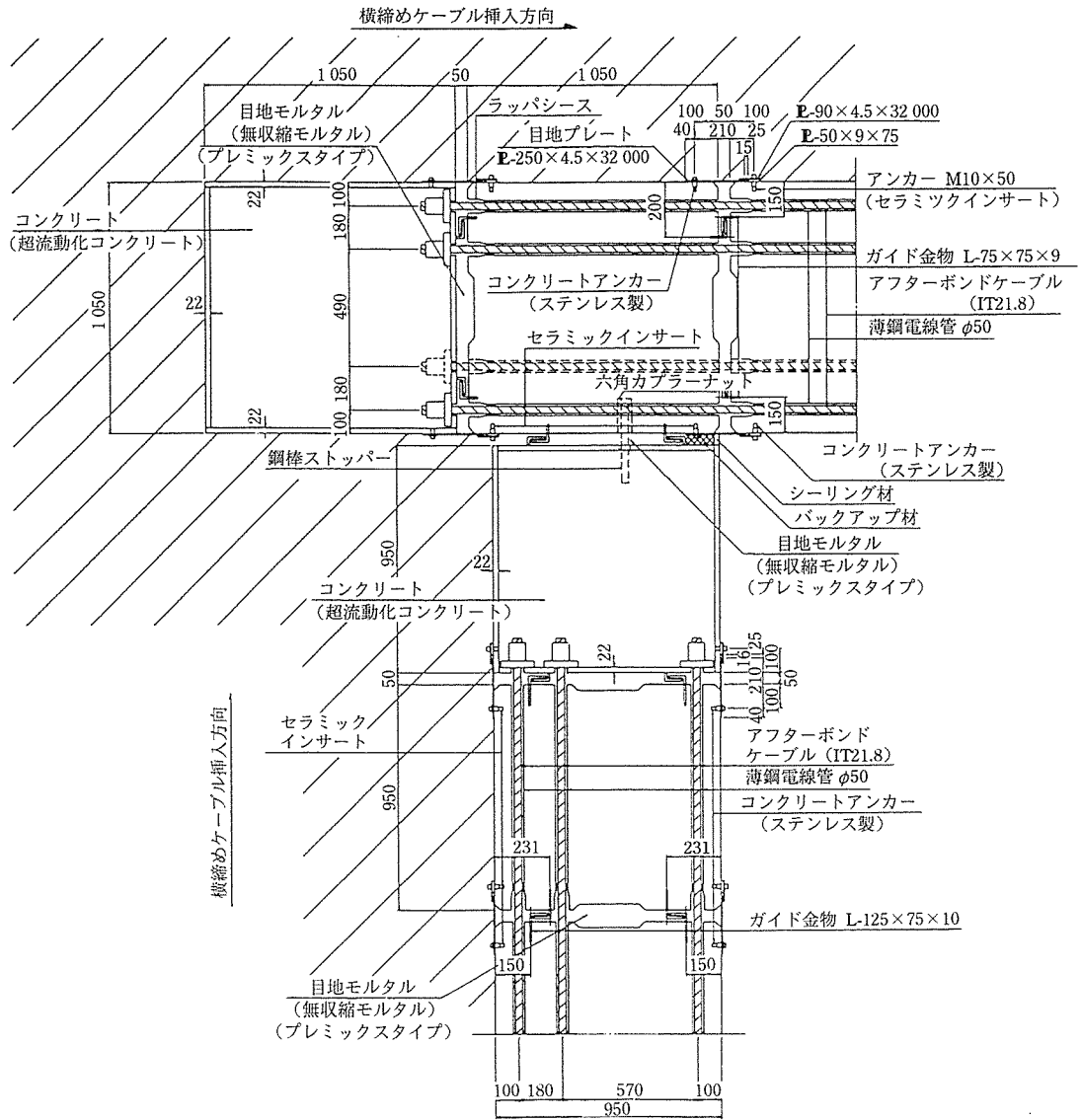


図-16 上スラブ・側壁接合部詳細図

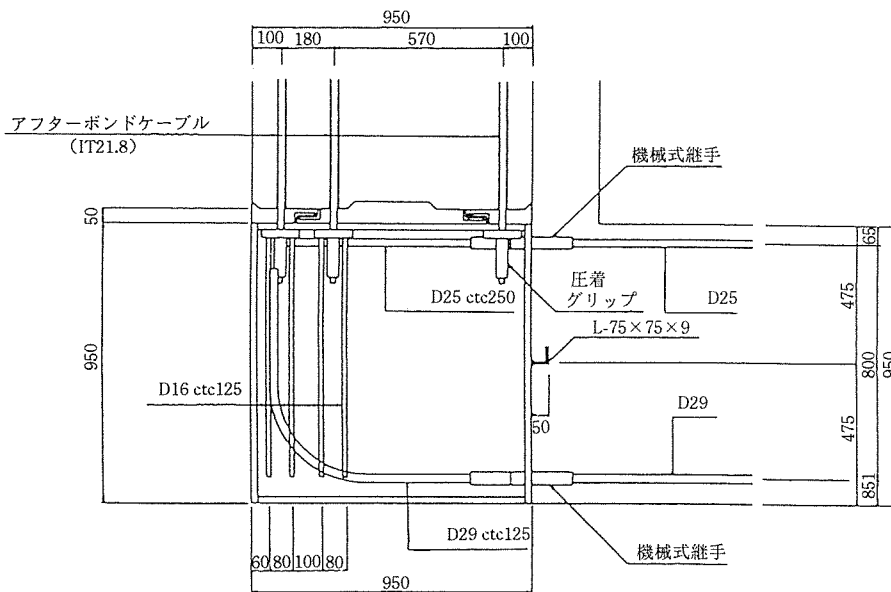


図-17 隅角部断面図

めに鋼製エレメント（角形鋼管）を配置し，その中からPC鋼材の挿入緊張を行う。鋼製エレメントは，図-15に示す配置としており，側壁下端の鋼製エレメントは，そのままラーメン隅角部を形成することとなる。この隅角部の構造および補強法については，その耐力，変形性能，剛性評価を行うために静的荷重試験を実施し⁶⁾，経済性，作業性にすぐれた図-17に示した構造を採用することとした。

なお，エレメント相互の継手には，目地モルタルを充填するが，鋼材の耐久性を考慮し，PC鋼材としてアフターボンドケーブル（1 T 21.8）を使用することとしている。

4. 渋谷駅埼京線ホーム連絡通路

渋谷駅埼京線ホーム連絡通路は，ラーメン構造による柱までが鋼で，フーチング以下がRCの複合構造である（図-18）。

鋼管柱とRCのフーチングの接合部は，アンカーフレームをフーチングに埋め込みアンカーボルトで定着するアンカーフレーム方式が一般的である。しかしながら，この方式では，営業線に近接した施工となる場合には作業性に若干の問題があり，また，アンカーフレーム製作のためコスト面でも不利となる。そこで今回は，柱に軸引張力が作用しないことから，フーチングから鉄筋を定着長分出し，鋼管を建て込んだあと，接合部にコンクリートを充填する接合構造を採用することとし，耐力と変形性能を確認する試験を行った⁷⁾。試験は，軸力と，鋼管とコンクリートの付着性状をパラメーターとし，通常の鋼管，リブ付き鋼管，付着のない鋼管の3種類の鋼管に対して，軸力あり（永久荷重+群集荷重作用時を想定）となしで行った。鉄筋の定着長は約 $40\phi^8)$ と

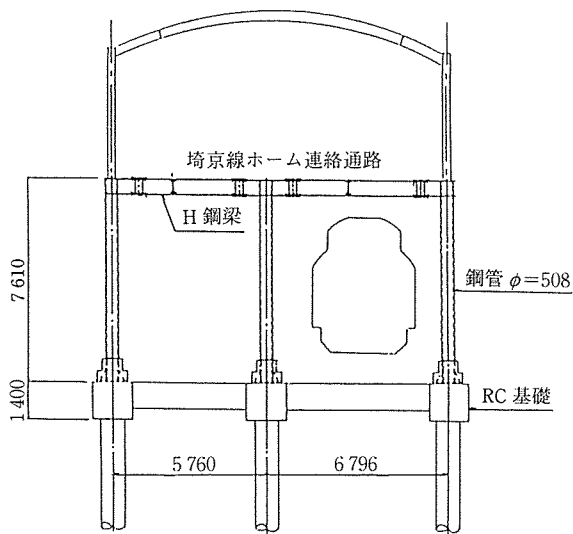


図-18 渋谷駅埼京線ホーム連絡通路

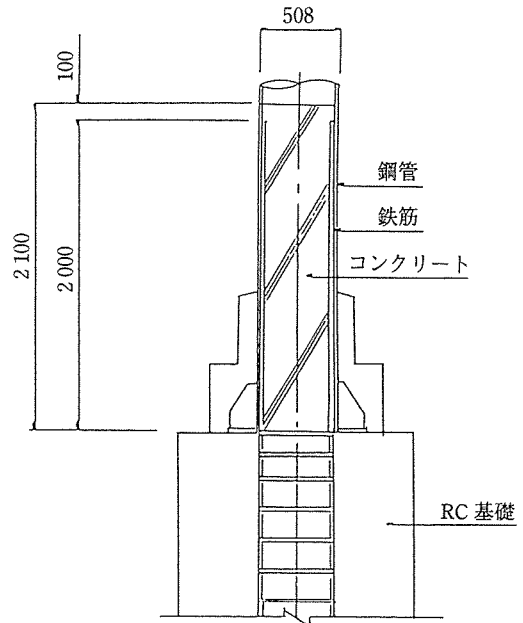


図-19 柱とRC基礎の接合部

して，コンクリートは，鉄筋端から50mmのかぶりを確保する位置まで充填した。試験の結果，いずれの場合も十分な変形性能を有しており，接合部はRC柱としてほぼ妥当に耐力を評価できることが確認できた。

なお，コンクリートと鋼管の付着性状の影響は，今回の場合，顕著に現れなかったため，実構造物には通常の鋼管を用いることとした。

図-19は，今回採用した接合部の構造である。接合部では，鋼管が横方向補強材と型枠を兼ねるため，施工も比較的容易である。

5. 武蔵野線紙敷新駅

武蔵野線紙敷新駅建設予定地は，複線の盛土区間であり，列車を運行させながら，盛土を撤去し高架化することとなる。このような場合，夜間の列車間合で，線路内に杭や工事桁を施工しながら高架橋工事を行うのが一般的であったが，この方法では，安全性・作業性が問題となる。そこで，今回は，盛土側面に仮盛土を行い，線路を仮盛土上に切り替えた後，ラーメン高架橋を盛土内に施工，線路を高架橋上に振りもどしたあと，盛土を撤去しホームを施工することとした（図-20）。

この方法によると，徐行や夜間作業が少なくなり工期の短縮がはかれ，効率的で安全な工事が可能となるが，地中において柱や梁を構築することとなる。これらの部材は，地中で施工した後に表面に現れることになるので，柱はコンクリート充填鋼管柱，梁は埋設し型枠を用いたRCとすることとした。柱と梁，あるいは杭の接合方式は，主鉄筋を鋼管に溶接する方法や鋼管をRCに埋め込む方法（図-21）を採用する予定であり，合理的

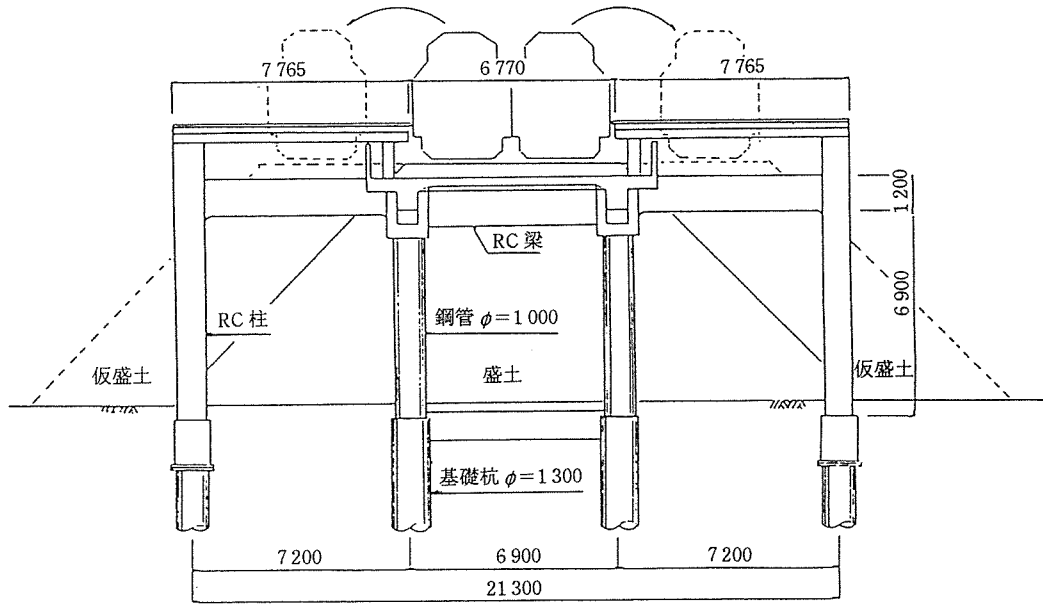


図-20 紙敷新駅

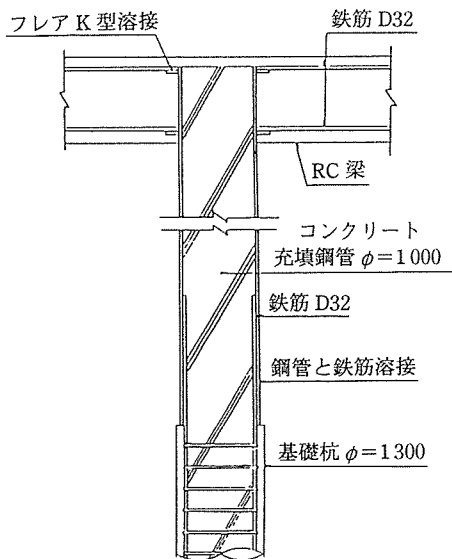


図-21 柱の接合方式

な接合方法を得るため、現在、1/3 モデルの供試体による試験を行っている。

なお、本高架橋は、地中梁が最初から施工できないため、線路直角方向の地中梁のみ盛土撤去後に施工することとし、上層梁、柱、杭の負担をやや大きくする設計としている。また、コンクリート充填鋼管は、鋼管とRCの耐力をそれぞれ独立してとらえ、部材としての耐力は累加強度方式で評価している。

6. おわりに

JR 東日本における最近の複合構造の採用事例について東京駅中央線重層化工事を中心に紹介した。その概要のみの記述となってしまったが、本文が多少なりとも参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 吉田, 石橋, 梅田, 工藤: 繰り返し曲げを受ける合成鋼管柱の変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, 1993年
- 2) 石橋, 古谷, 細川, 山内: 景観を考慮した中央線重層化工事の設計・施工, コンクリート工学, Vol. 32, No. 12, 1994年
- 3) 石橋, 津吉, 細川, 古谷: 中央線重層化—PRC 高架橋の設計と施工—, プレストレストコンクリート, Vol. 37, No. 1, 1995年
- 4) 東山, 細川, 津吉, 佐藤: 高流動コンクリートの PC プレキャスト構造物への適用, 第4回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1994年10月
- 5) 津吉, 細川, 中山, 石橋: 外ケーブルを併用した PRC 鉄道橋の設計, 第4回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1994年10月
- 6) 高藤 寛, 栗原啓之, 今井昌文, 手塚正道: PCR 工法箱形トンネル形式における隅角部補強に関する実験的研究, プレストレストコンクリート技術協会・第3回シンポジウム論文集, 1992年11月
- 7) 鷹野, 鎌田, 金子: 鋼管と RC 部材の接合部を鋼管鉄筋コンクリートとした構造の耐力と変形性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, 1994年
- 8) 鉄道構造物等設計標準同解説・コンクリート構造物, 鉄道総合技術研究所編, 丸善, 1992年

【1994年12月15日受付】