

# CFT柱を用いた新しい鉄道高架橋の開発

河西 寛<sup>1</sup>・佐野祐一<sup>2</sup>・先森昭博<sup>3</sup>・平田大三<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

<sup>3</sup>正会員 (株)鴻池組 大阪本店土木設計部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)鴻池組 大阪本店土木設計部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

柱をCFT構造とし、軌道を直接支持する縦梁を用いた鉄道ラーメン高架橋の開発を行った。高強度で高靱性のCFTを柱に用いるとともに、上部工重量の軽量化により、線路方向の柱間隔の伸長が可能となる。また、本高架橋構造に採用する目的で定着プレート方式の柱・梁接合構造を考案した。本接合構造の性能確認試験を実施したところ、耐荷力および継手性能において十分な性能を有していることを確認した。

**キーワード：**ラーメン高架橋，コンクリート充填鋼管，軌道支持梁，柱・梁接合構造

## 1. はじめに

鉄道高架橋は、コンクリート床版を梁と柱で支えるビーム・スラブ形式が一般的に用いられているが、兵庫県南部地震においては甚大な被害を受けた。これを契機に鉄道構造物の耐震設計は大規模地震を想定した設計法に改定され、従来よりも部材断面が増大する傾向は避けることができない状況になっている。一方、近年の厳しい社会・経済情勢下では、より合理的で経済的な構造物の設計・施工が強く求められている。こうしたニーズに対応すべく、耐震性能に優れ、コスト縮減と工期短縮が可能な「CFT柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋」の設計・施工技術を開発した<sup>1)</sup>。

本報告では、本高架橋構造の概要、CFT柱とRC梁との接合に関して新たに考案した定着プレート方式の接合構造の概要とその性能確認実験結果について紹介する。さらに、施工法の概要、本高架橋構造を適用した場合のコスト・工期の試算例についても紹介する。

なお、本技術の開発は(財)鉄道総合技術研究所、住友金属工業(株)と共同で行い、学識経験者、鉄道建設公団および鉄道事業者の専門家で構成される委員会(委員長：埼玉大学町田教授)による指導・審査のもとに進められた。この成果は「CFT柱と軌道

支持梁による鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針<sup>2)</sup>にとりまとめられ、発刊に至っている。

## 2. 構造の概要

本構造は、図-1に示すようにCFT(コンクリート充填鋼管)構造の柱、軌道の直下で列車荷重を支持する縦梁(以降、軌道支持梁と呼ぶ)、およびこれらと直交する横梁で構成される立体ラーメン構造を基本とする。ここでは、本高架橋の主要構造部材であるCFT柱、軌道支持梁および基礎の構造概要について述べる。

### (1) CFT柱

CFT柱は、鋼管の内部にコンクリートを充填し、鋼管とコンクリートを力学的に一体化させることにより、断面寸法に比して大きなせん断および曲げに対する耐荷力と優れた変形性能を有する部材である。また、コンクリート打設時に鋼管が型枠の役割を果たすため、施工条件の厳しい列車近接工事には有利である。

### (2) 軌道支持梁

軌道支持梁は軌道直下で列車荷重を直接支持する部材であり、ノンバラストの直結軌道を採用するこ

とによって、部材断面のミニマム化を図ることができる。さらに、RC ホロー梁や鋼とコンクリートの合成構造を採用することにより、軌道支持梁の重量の軽量化と列車荷重によるたわみやねじれに対する安全性の両立が可能となる。

### (3) 基礎

基礎に関しては特に制約がなく、地盤条件、施工条件および地震の影響等を考慮して選定する。図-1に示すような地中梁のない一柱一杭方式の杭基礎構造の場合には、場所打ちコンクリート杭の杭頭部分に外殻鋼管を設置し、その内部のコンクリートと一体化させた鋼管コンクリート杭を用いる。これにより、地震時断面力の大きい杭頭部付近の耐荷性能を向上させるとともに、施工が簡易なソケット方式による柱と杭の接合構造とすることができる。

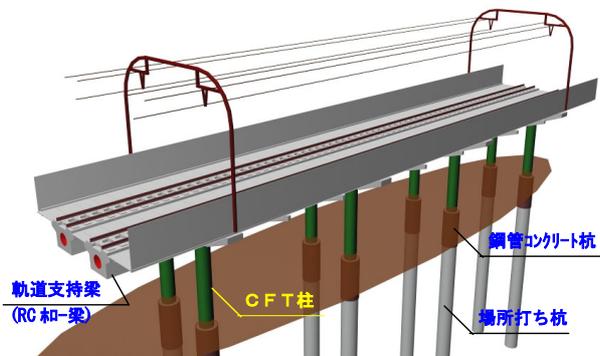


図-1 CFT 柱を用いた新しい鉄道高架橋の概念図

## 3. CFT 柱と RC 梁との接合

本高架橋構造の適用にあたって、1. に示した CFT 柱等の構造部材については部材特性が解明されており、既往の指針類に基づき設計が可能である。しかしながら、柱と梁の接合部は大きな断面力が作用する箇所であり、また、CFT 柱と RC 梁との異種部材接合でもある。そのため、力の伝達性に優れるとともに、耐震性能にも優れた構造を選択あるいは考案することが、本高架橋の開発上、最も重要な技術的課題であった。

### (1) 接合構造の概要

立体ラーメン構造における柱と梁接合部は、構造的に大きな曲げモーメントやせん断力が生じる箇所であり、RC 梁には多数の鉄筋が配置されている。このため、従来のような埋込み方式や鉄骨鉄筋差込み方式では、三次元的に存在する軌道支持梁と横梁の鉄筋を避けて CFT 柱や接合用鋼材等を配置し、かつ鉄筋の連続性を保持することは極めて困難である。

そこで、図-2に示すような定着プレート方式による接合構造を考案した。これは、柱を梁に埋込み、柱と梁主筋が重なる部分において、鋼管に取付けた定着プレートを介して梁主筋を連結させることを特徴とする接合構造である。

この定着プレートの採用により、柱に梁主筋を貫通させる、あるいは梁主筋を曲げて柱部を交わすことなく、梁主筋の軸力を伝達することができる。さらに、梁主筋と定着プレートとの接合部分に機械継手を採用することにより、運搬および組立作業を容易にすることができる。

本接合構造は柱を梁に埋め込むため、その耐荷力特性や変形性能は埋込み接合方式のそれと類似しているものと考えられる。しかし、埋込み部から梁端面までの距離が短いことや定着プレートの影響により、その耐荷力特性や変形性能が設計標準<sup>3)4)</sup>に示されている埋込み方式のものとは異なる可能性がある。

そこで、本接合方式が設計で求められる性能（部材の終局耐力を伝達し、部材に十分な塑性変形が生じるまで破壊および大きな損傷を生じない<sup>3)</sup>）を満たすことを確認するために静的交番載荷試験を実施した。また、定着プレートと主筋との接合部分における継手について、各種耐力性能試験を実施してその性能を確認した。

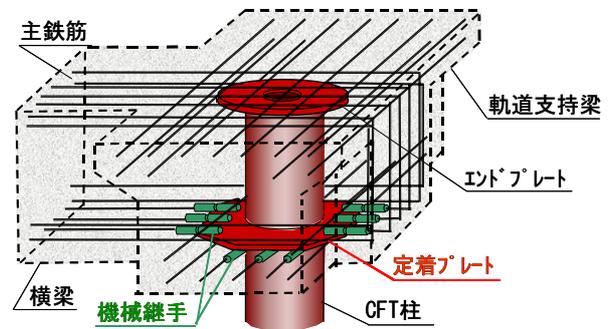


図-2 定着プレート方式による柱と梁の接合部の概要

### (2) 柱・梁接合部の耐荷力性能確認実験<sup>5)</sup>

#### a) 実験概要

本実験における試験体は実物の約 45%の縮尺とし、実験ケースは線路直角方向（試験体 1）および線路方向載荷（試験体 2）の 2 種類とした。

試験体形状は図-3(a)および(b)に示すように試験体 1（線路直角方向）が柱と横梁による L 形の形状、試験体 2（線路方向）が柱と両側の縦梁による T 形であるが、試験体は実構造物とは天地逆の状態で設置した。なお、試験体 1 は縦梁を 525mm だけ含む。

部材の形状寸法を図-4 に、使用材料の強度特性を表-1 にそれぞれ示す。試験体の各部材断面は、おの

おのの曲げ耐力の比率が実橋の試設計で定めた比率に一致するように設定した。試験体 1（線路直角方向荷）においては、横梁端部に水平可動の回転支承を、縦梁端部に回転支承をそれぞれ設けて、柱上端を油圧ジャッキにて水平方向に加力する方法によった（図-3(a)参照）。試験体 2（線路方向荷）においては、梁両端部に回転支承を設け、柱上端を油圧ジャッキにて水平方向に加力した（図-3(b)参照）。

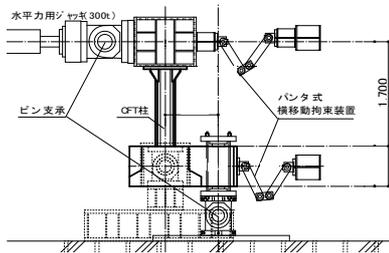
荷重パターンは柱頭部における降伏変位  $\delta y$  を基準とし、降伏変位の整数倍を各サイクルの最大変位とした変位制御による正負交番荷重を部材に破断が生じるまで行った。なお、降伏変位  $\delta y$  は、水平力作用方向に対して  $45^\circ$  の位置における CFT 柱鋼管の引張ひずみが降伏ひずみに達した時点の変位と定義した<sup>4)</sup>。本実験における計測項目を表-2 に示す。

表-1 使用材料の強度特性（単位：N/mm<sup>2</sup>）

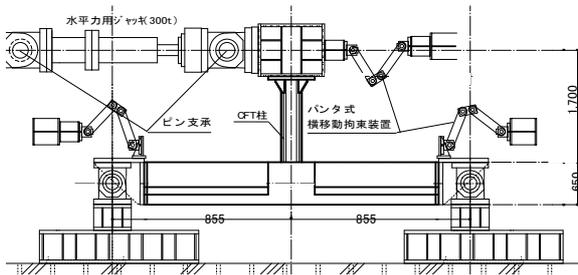
コンクリート	圧縮強度	鋼材	規格	降伏点	引張強度	
試験体1	柱	59.8	柱鋼管	STK490	459	593
	梁	39.6	鉄筋D19	SD345	379	550
試験体2	柱	55.8	鉄筋D16	SD345	359	550
	梁	37.3	鉄筋D10	SD345	393	568
			定着プレート	SM490	504	574
			エンドプレート	SM490	504	574

表-2 計測項目

計測項目	計測内容	計測項目	計測内容		
荷重	載荷荷重	ロードセル荷重	柱鋼管	鋼管表面の軸方向および周方向ひずみ	
	変形	柱端部変形角	水平変位鉛直変位	ひずみ	梁鉄筋
梁端部回転角		"	定着プレート	半径方向ひずみ	
柱拔出し		"	損傷	柱鋼管	柱鋼管の変形性状をスケッチ
梁変形		"		梁コンクリート	主なひび割れ幅を適宜測定 コンクリート表面の状況をスケッチ
柱縮み		"			

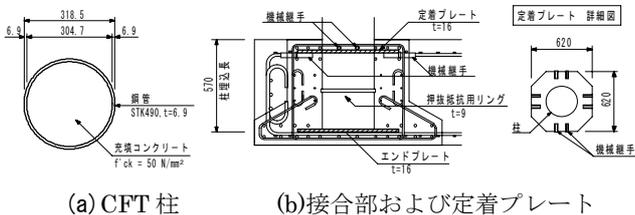


(a) 線路直角方向(試験体 1)



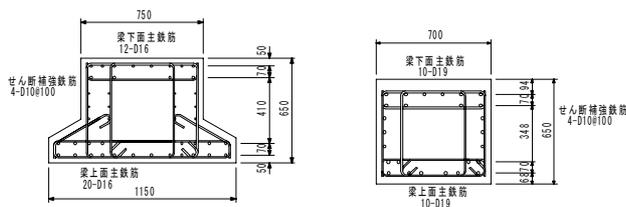
(b) 線路方向(試験体 2)

図-3 交番荷重実験の荷重装置（寸法単位：mm）



(a) CFT 柱

(b) 接合部および定着プレート



(c) 縦梁

(d) 横梁

図-4 部材断面諸元（寸法単位：mm）

### b) 実験結果

水平荷重と柱上端における水平変位との関係を図-5 に示す。試験体 1（線路直角方向）では CFT 柱は水平変位 24mm で降伏し、最大荷重は降伏変位の 4 倍（ $\pm 4 \delta y = \pm 96\text{mm}$ ）の荷重サイクルにおいて生じ、 $\pm$ 約 250kN を示した（この時点を超えて最大耐力時とする）。以降の荷重サイクルにおいて CFT 柱の局部座屈により最大荷重が徐々に減少し、 $+9 \delta y$  の荷重時に局部座屈箇所にて柱鋼管部が破断し、実験を終了した。試験体 2（線路方向）においても、降伏変位がやや小さくなるものの、同様の荷重履歴となった。

また、 $4 \delta y$  荷重時を境として紡錘型の履歴ループから逆 S 字型の履歴ループに移行した。これは柱鋼管の局部座屈に起因するものであり、荷重の極性が変化する近傍で顕著な剛性低下が見られないことから、梁や接合部におけるスリップ現象はほとんど生じていないものと推察される。

柱降伏時および最大耐力時における接合部全体の変形角とその成分を表-3 に示す。また、図-6 に変形角の成分と計測値との関係を示す。表に示すように、両ケースとも柱降伏時および最大耐力時において、変形角と比較して梁端部の変形角、接合部のせん断変形角が小さいことから、接合部分はほぼ剛体的な挙動を呈したものと考えられる。

柱端（梁コンクリート面）における曲げモーメントと柱の拔出し角（埋込み部鋼管の伸縮による柱端部の回転角）の関係を図-7 に示す。曲げモーメントと柱の拔出し角の関係は、柱降伏時（ $\pm 1 \delta y$ ）を境に弾性的な挙動から塑性的な挙動に転じ、最大柱端曲げモーメントが発生する  $4 \sim 5 \delta y$  の荷重時に拔出し角が最大値に達した。

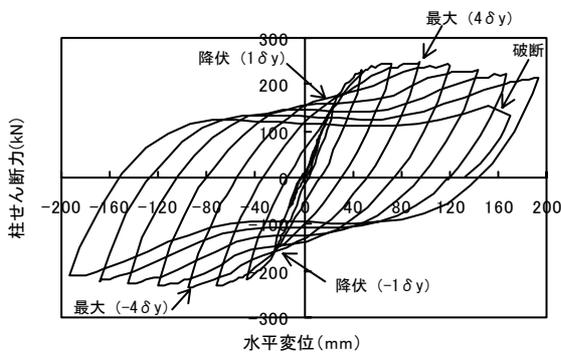
柱降伏時および最大耐力時において柱鋼管に発生

した軸ひずみの鉛直方向分布を図-8に示す。試験体1および2ともに同様の結果となっており、ここでは試験体1（線路直角方向載荷）について、柱断面内の引張側0度と45度位置における計測結果を示す。鋼管に生じた軸ひずみは、柱降伏時においては、柱部および埋込み部とも、梁コンクリート面の位置において最大値（約0.25%）を示し、ほぼ直線的な分布を呈した。

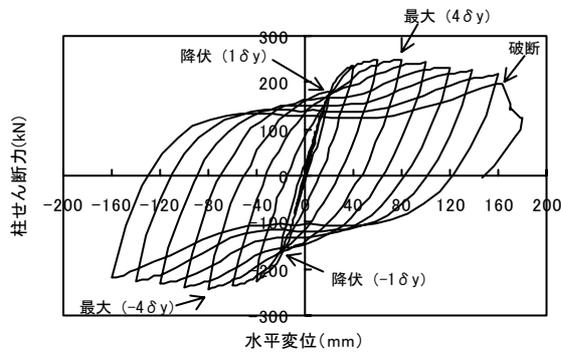
一方、最大耐力時には、梁コンクリート面から約10cm上方にわたって2%を超える軸ひずみが生じており、塑性ヒンジの形成を示唆している。埋込み部のひずみは梁コンクリート面から約-10cmの間で急激に減少し、-10cm以深における発生ひずみは、柱降伏時におけるひずみの2倍程度の大きさに収まった。なお、定着プレートが梁コンクリート面から7cmの深さに設置されており、以深の鋼管の発生ひずみを抑えた可能性が考えられる。

試験体の横梁と縦梁との境界付近などに曲げひび割れが、また、柱埋込み部を中心とする放射状のひび割れが生じたが、いずれもひび割れ幅が0.2mm以下の軽微なものであった。

これらのことより、本載荷試験では接合部が柱の終局耐力を伝達し、柱に十分な塑性変形が生じるまで大きな損傷を生じないことを確認した。



(a) 試験体1（線路直角方向）



(b) 試験体2（線路方向）

図-5 荷重一変位履歴曲線

表-3 接合部の変形角とその成分(単位:  $10^{-3}$  rad)

	試験体1(線路直角方向)			試験体2(線路方向)		
	変形角 R	梁端部変形角 $r_B$	接合部せん断変形角 $r_C-r_B$	変形角 R	梁端部変形角 $r_B$	接合部せん断変形角 $r_C-r_B$
柱降伏時	9.8	0.2	0.0	7.9	0.0	-0.1
最大耐力時	40.5	2.5	-2.2	39.6	0.6	-0.1

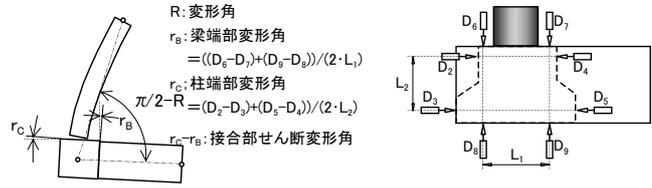


図-6 変形角の成分と計測値との関係（試験体1）

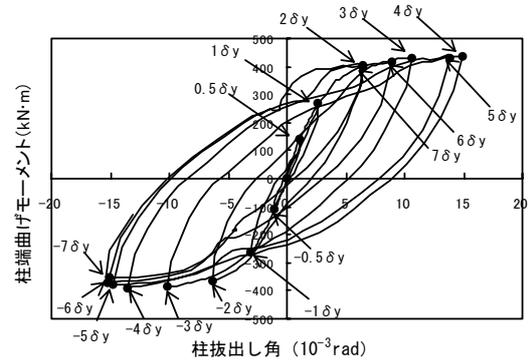


図-7 曲げモーメントー拔出し角関係（試験体1）

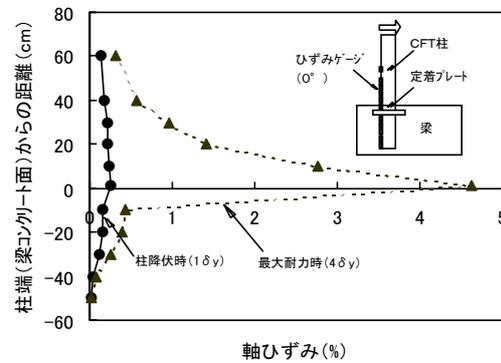


図-8 柱鋼管引張側軸ひずみ（試験体1）

#### (4) 定着プレート方式による継手の耐力性能試験<sup>6)</sup>

##### a) 実験概要

定着プレート方式における鉄筋とプレートとの接続は、プレートに取付けた鉄筋機械継手を用いるものとするが、機械継手とプレートを溶接した継手部の基本的な特性は明らかではない。このため、鉄筋機械継手を表裏に溶接したプレートを一对の鉄筋で連結した供試体（図-9）を製作し、土木学会「鉄筋継手評価指針(案)」に基づいて、①静的耐力性能試験、②高応力繰返し耐力性能試験および③高サイクル繰返し(疲労)耐力性能試験を実施することにより、継手性能を確認した。

## b) 実験結果

①静的耐力性能：呼び径 D16, D25 および D32 の鉄筋を用いた試験結果は、表-4 に示すようにすべての判定基準を満足した。また、目視観察では溶接部の亀裂等は認められなかった。

②高応力繰返し耐力性能：呼び径 D16 と D32 の鉄筋を用いた試験結果は、表-5 に示すようにすべて判定基準を満足した。

③疲労耐力性能：呼び径 D16 と D32 の鉄筋を用いた試験結果は、図-10 に示すように、200 万回の疲労強度の判定基準（全振幅強度 100N/mm<sup>2</sup>）を満足するとともに、すべての試験値は設計で用いられている圧接継手の疲労強度（母材の 70%強度）を上回る結果となった。

以上より、プレートに鉄筋機械継手を溶接した継手の静的耐力、高応力繰返し耐力および疲労耐力に関する試験値は、いずれも土木学会「鉄筋継手評価指針(案)」の判定基準に合格し、十分な継手性能を有していることを確認した。

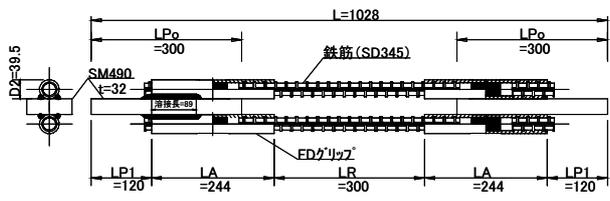


図-9 継手の耐力試験に用いた供試体(D16 鉄筋の場合)

表-4 静的耐力

呼び径 NO.	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )		
	D16	D25	D32
1	543	505	551
2	546	502	551
3	540	500	549
平均	543	502	550
判定基準	≥490N/mm <sup>2</sup>		

表-5 高応力繰返し耐力

呼び径 NO.	剛性比率 E <sub>50</sub> /E <sub>1</sub> (%)		
	D16	D25	D32
1	91		94
2	93		87
3	96		96
平均	93		92
判定基準	≥85%		

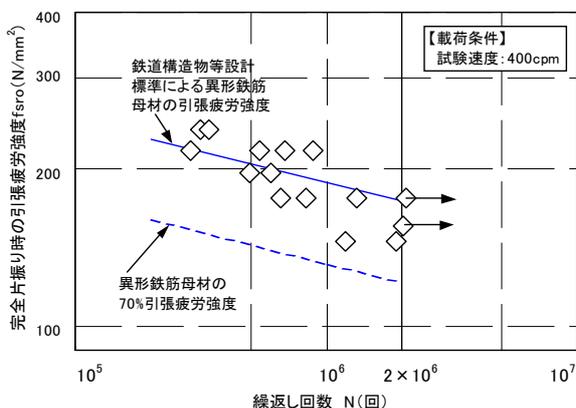


図-10 疲労耐力 (D32)

## 4. 施工法の概要

### (1) 施工手順

提案形式の高架橋の施工法は、基本的には従来形式の場合と同様である。図-11 に地中梁を省略した場合の施工の概略手順を示す。

### (2) 杭と柱の接合部の施工

杭と柱の接合部の施工では、鋼管コンクリート杭と CFT 柱の一体化と CFT 柱の建て込み精度が重要である。そこで、以下のような施工法を考案した(図-12)。

①高さ調節後、固定アングルでガイドを固定し、コンクリートを打設する。

②硬化前に撤去用アンカーを設置する。

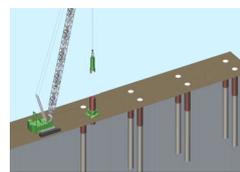
③杭頭の余盛り部分をガイドとともに撤去する。

④杭芯誘導金物により杭芯の位置を調整する。

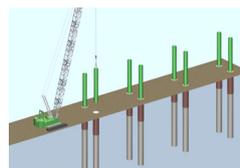
④アジャスターと固定用鋼材で柱角度を調整する。

⑥杭頭部にコンクリートを充填する。

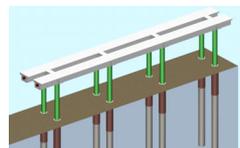
この考案した施工法を同種の実工事に適用した。その結果、考案した施工法は施工性に優れており、所定の建て込み精度を容易に確保できることを確認した。



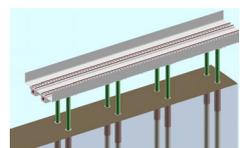
①基礎杭の構築



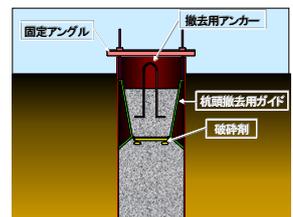
②CFT 柱の建て込み



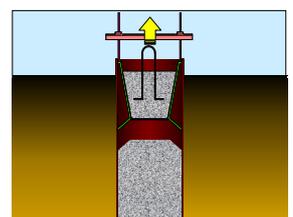
③上部工 (梁) の構築



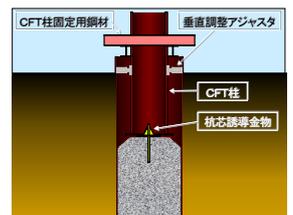
④軌道・防音壁・検査路の設置



①撤去用ガイドの設置



②杭頭処理



③柱の鉛直制度の確保

図-11 施工手順

図-12 杭・柱接合部の施工

## 5. 建設コスト・工期の試算例

本章では、提案構造を適用した高架橋の建設コストと工期が従来構造の場合と比較してどの程度コスト縮減、工期短縮につながるか、共通の条件で試設計し、それに基づいて積算した例を紹介する。

高架橋の試設計では、地盤条件、列車荷重、ブロック間の接続形式および地表面から梁上面までの高さを共通として行った。設計条件と設計された構造部材諸元を表-6に示す。

設計された高架橋の建設コストと工期は、表-7に示す積算条件で行った。その結果、提案構造を適用した場合には、表-7に示すように従来構造の場合より建設コストを12%縮減するとともに、工期も32%短縮できることが判明した。

表-6 設計条件と構造部材諸元

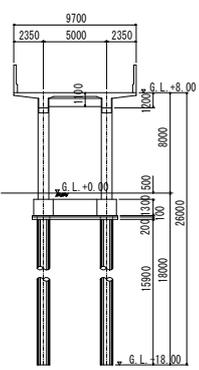
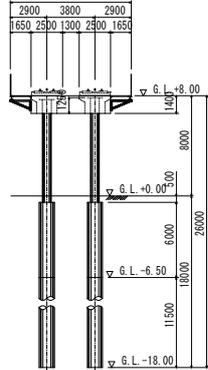
	従来形式の高架橋	新形式の高架橋
一般図		
地盤種別	G3地盤	
列車荷重	EA-17	
接続形式	張り出し式	
軌道構造	複線、バラスト軌道	複線、直線直結軌道
基礎構造	1柱1杭基礎(地中梁あり)	1柱1杭基礎(地中梁なし)
橋長	46m(3.0°+5@8.0°+3.0°)	66m(3.0°+5@12.0°+3.0°)
スラブ	t=300mm	(検査路:軽量プレキャスト版)
縦梁	1200×750mm	1400×1600mm(ホロー)
横梁	1200×750mm	1400×1500mm
柱	850×850mm	φ700, t=16mm (CFT)
地中梁	1300×750mm	
基礎杭	RC場所打ち杭: φ1100mm, L=16.2m	場所打ち杭: φ1100mm, L=17.5m 上部: 鋼管コンクリート杭(t=10mm, L=6.0m) 下部: RC場所打ち杭(L=11.5m)

表-7 建設コストおよび工期

	従来形式の高架橋	新形式の高架橋
積算条件	用地条件	側道はあるが作業には使えない
	施工方法	1ブロックを複線同時に施工する
	積算範囲	検討対象の高架橋間を張出し方式で連結した1ブロック(施工延長約130m)あたりの軌道工・高欄工を除く土木工事
	準拠基準	直接工事費:平成12年度旧建設省積算基準 経費率:同種工事の実績に従って設定
建設コスト	金額比	1.0
	内訳	0.88(1m当りの比)
工程	日数	3ブロック(138m) 451日
	日数比	0.88(1m当りの比)

## 6. おわりに

CFT柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋では、耐荷力と変形性能に優れたCFT柱の採用と上部工重量の軽量化によって、大規模地震に対応した高い耐震性能の確保が可能である。また、条件によっては地中梁を省略した基礎構造でも成立するため、建設コスト縮減、工期短縮のメリットばかりでなく、厳しい施工条件下での高架化工事にも適用可能である。

最後に、本技術の開発にあたって貴重な意見や助言を賜った設計施工委員会の委員各位ならびに適切な指導・協力を頂いた(財)鉄道総合技術研究所および住友金属工業(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 山田富夫, 先森昭博, 涌井 一, 高田啓一: CFT柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋構造とその柱梁接合部の交番載荷試験, 第55回土木学会年次学術講演概要集, CS-60, 2000.9.
- 2) 鉄道総合技術研究所: CFT柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針, 2000.6.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 鋼とコンクリートの複合構造物, pp.497-509, 1998.7.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, pp.167-175, 1999.10.
- 5) 佐野祐一, 河西寛, 藤井睦, 松本信之: 定着プレート方式のCFT柱とRC梁との接合部の耐荷性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, 2000.6.
- 6) 岡田 茂, 山田富夫, 先森昭博: プレートに鉄筋機械継手を溶接した継手の耐力性能, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集 CS-56, 2000.9.