

プレキャスト部材を用いた地下空間利用への 多柱多径間ラーメン高架橋に関する設計

野口健幸¹・萩野幸男²・小嶋一夫³
渡辺 浩⁴・篠田 薫⁴・北浦 実⁴

¹正会員 都修 横浜市交通局 高速鉄道建設部 (〒231-0017 横浜市中区港町 1-1)

²正会員 横浜市交通局 高速鉄道建設部 (〒231-0017 横浜市中区港町 1-1)

³ 横浜市交通局 高速鉄道建設部 (〒231-0017 横浜市中区港町 1-1)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 鉄道部 (〒163-0730 新宿区西新宿 2-7-1)

近年、工期短縮、工事の省力化のためプレキャスト部材を用いる工法の研究開発が進められている。従来から我が国の鉄道構造物は、ラーメン高架橋という建設費の安い独特の構造形式がある。しかしながらラーメン高架橋にプレキャスト部材を採用するにあたっては、プレキャスト部材間の接合方法に課題があり、採用が困難であった。そこで本設計では、この点を改善しプレキャスト部材同士をPCポストテンション方式により一体化し、さらに地下空間利用に適したラーメン高架橋の設計手法を提案したので、ここに報告するものである。

キーワード：ラーメン高架橋、プレキャスト部材、工期短縮

1. はじめに

(1) プレキャスト部材の採用

横浜市都筑区川和町の鶴見川沿いに建設される横浜環状鉄道の川和車両基地は、鶴見川の遊水地と一体の構造を有している。遊水地は車両基地内の留置線の地下部分を有効活用するものである。遊水地の中からみるとその上部は、留置線として利用する人工地盤とそれを支える柱があり、留置線から見るとその地下空間が遊水地となる。本設計は、遊水地構造物にプレキャスト部材を用いたラーメン高架橋を採用したので、その設計手法を報告するものである。

プレキャスト化に取り組んだ背景には、遊水地と車両基地との一体整備の構想が、当初から計画されたものでなく、後から遊水地の同時整備要望が付加し、これに応えたものである。一体整備にあたっては、遊水地工事を車両基地の工事工程に支障しない程度まで、工期短縮する必要が生じた。しかしながら遊水地の工事を従来のような施工方法（例えば、工事現場において地下ラーメン構造で建設する方法）とすると、工事工程を短縮することができないため、本設計はプレキャスト化に着目したものである。

遊水地という地下構造物にラーメン高架橋を採用した理由は、近年の建設費縮減要望から考案したものである。我が国独特の技術となる鉄道ラーメン高架橋は、経済的なメリットに優れており、地下空間利用ではあるが、遊水地に高架構造の条件を当てはめれば適用可能と考え、設計および構造形式を工夫したものである。

(2) 本設計の特徴

本設計の特徴には、ラーメン高架橋にプレキャスト部材を用いた点と、地下空間にラーメン高架橋を適用した点にある。

プレキャスト部材の適用については、ラーメン高架橋のうち、縦梁と横梁を全てプレキャスト部材とした。スラブは、プレキャスト部材とその上部の現場打ちコンクリートとの合成構造とした。柱はプレキャスト部材とし、接合については、縦梁および横梁をPC鋼材で連結することにより、地震時にも耐えられるように設計した。

土圧を受ける側壁（地下連続壁）と人工地盤とを分離構造とすることで、遊水地の人工地盤と柱とをラーメン高架橋として設計した。

なお、このように本設計は上部構造系と地下構造

系を併用したため、地震時の安全性の確認は、動的解析を行うことで対応した。

(3) プレキャスト部材のラーメン高架橋への適用例

近年のプレキャスト部材を用いた工事には、例えば共同溝や道路橋でのプレキャスト製品使用や港湾でのケーソン使用などがあり、我が国では JIS 製品に選定されているプレキャスト製品は各種ある。一方、鉄道構造物では、工期短縮要望がある時に用いられているようであり、例えば PCI 桁のブロック工法などがあるが、鉄道のラーメン高架橋では、まだ事例は少ない。

一方、諸外国まで含めてプレキャスト部材の使用をみると、プレキャスト部材が選定されている事例が見受けられる。この事から何故、我が国でラーメン高架橋へのプレキャスト部材の適用が少ないのかを推測してみると、とくにプレキャスト部材同士の連結に課題があるためと考えられる。

また、ラーメン高架橋のプレキャスト化に近いものとして、ハーフプレキャスト工法¹⁾、プレキャスト型枠工法²⁾、CFT 柱と梁とを接合する工法³⁾などがある。

本事例は、型枠兼用のスラブ版として JIS 規格の 2 主桁式 PC プレキャスト版を使用していること、柱、梁部材をプレキャスト化したこと、プレキャスト部材同士を PC 鋼線で結合したことで、他の工法と相違している。

m は嵩上げして対応した。

プレキャスト化した部材を次に整理した。

①柱はプレキャスト RC (鉄筋コンクリート) 部材

②縦梁は、架設時は RC 部材、完成時は場所打ちコンクリートとの合成 PRC (プレストレスト鉄筋コンクリート) 部材

③横梁は、架設時はプレテンション PC 部材 (以下、プレテン部材と呼ぶ)、完成時は場所打ちコンクリートとの合成断面 PRC 部材

④スラブ版は、架設時はプレテン部材、完成時は場所打ちコンクリートとの合成断面 PRC 部材

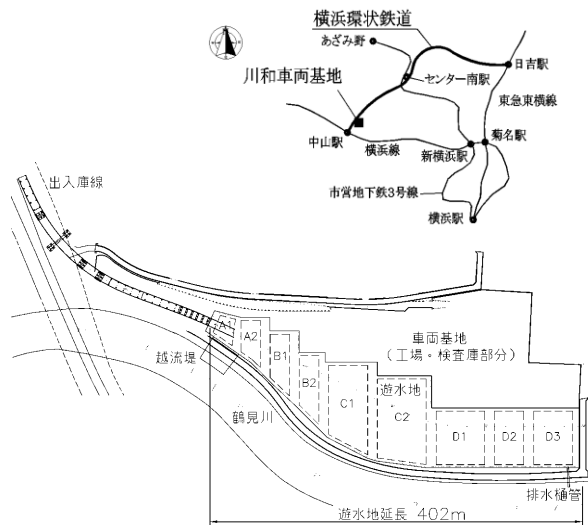


図 2-1 平面図

2. 遊水地の概要

(1) 遊水地の工事概要

車両基地の工事は、遊水地部 (面積約 2.6 ha) と遊水地以外 (面積約 3.3 ha) とから構成され、総面積は約 5.9 ha である⁽⁴⁾。

遊水地構造物は、図 2-1 のように 9 ブロックに分割して設計し、最大 6 柱 10 径間のラーメン高架橋である。

遊水地の貯留容量は約 12 万 m³ で、自然排水方式を採用した。遊水地の主要な工事数量は、掘削量が約 19 万 m³、地下連続壁が約 1.2 万 m²、場所打ち杭が 230 本、プレキャスト部材は、柱部材が約 200 本、梁部材が約 390 本、スラブ版が約 850 本である。

表 2-1 に本設計の部材寸法および材料特性を示した。図 2-2 および図 2-3 にラーメン高架橋に使用したプレキャスト部材の略図を示した。

遊水地の高さは構造部材を入ると約 9m 必要となり、本設計では、地下を約 7m 使用し、地上約 2

表 2-1 部材寸法および材料特性

コンクリートの材質		寸 法	設計基準強度	最大水セメント比	粗骨材の最大寸法
ス ラ ブ		t= 250 mm	30 N/mm ²	55%	20または25mm
スラブ版(プレキャスト)		h= 500 mm	40 N/mm ²	55%	20または25mm
はり(プレキャスト)		1200×1200	40.50 N/mm ²	55%	20または25mm
柱(プレキャスト)		1200×1200	27 N/mm ²	55%	20または25mm
下 床 版		h= 1500 mm	27 N/mm ²	55%	20または25mm
内 壁		t= 200 mm	21 N/mm ²	55%	20または25mm
場 所 打 ち 杭		φ 1800 mm	30 N/mm ²	50%	20または25mm
地下連続壁		t= 800 mm	36 N/mm ²	55%	20または25mm
鉄 筋 の 材 質		種 別	設計引張強度	設計引張降伏強度	
スラブ		SD 345	490 N/mm ²	345 N/mm ²	
はり・柱・下床版・杭		SD 390	560 N/mm ²	390 N/mm ²	
地下連続壁		SD 390	560 N/mm ²	390 N/mm ²	
鋼材の 品 質	材 質	スラブ版		は り	
		PC鋼より線 (1S12.7B)		P C 鋼より線 (12S15.2B)	
		SWPR7B		SWPR7B	
	引 張 強 度	1855 N/mm ²		1880 N/mm ²	
	引 張 降 伏 強 度	1580 N/mm ²		1600 N/mm ²	
	リラクセーション	5%		5%	
	断面位置	は り	柱	下床版	杭
断面形状					

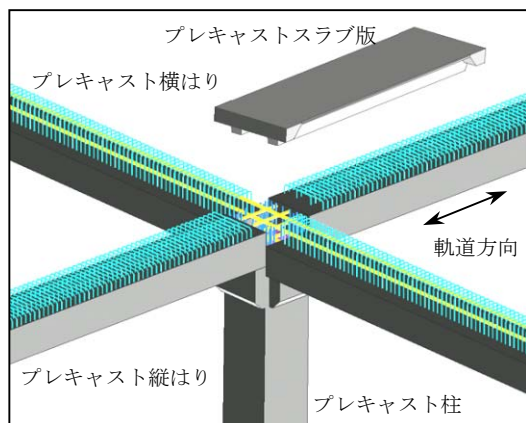


図 2-2 プレキャスト部材のイメージ図

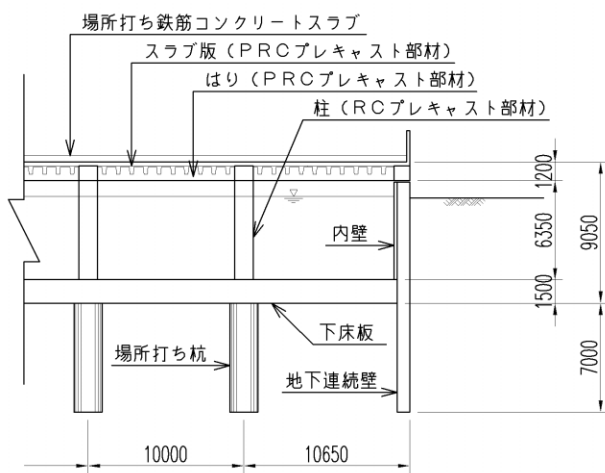


図 2-3 プレキャスト部材略図

(2) 地質概要

地質は、支持層の上総層群まではN値小さく、上総層群は均質な土丹層の中に細砂層が一部介在し、この細砂層が GL-2.0m 程度の被圧水頭を持つことが確認されている (図 2-4 参照)。また地質構成を地表面から順に記載すると、埋土層 (F) が層厚 1.0~3.0m の分布、有機質粘土層 (Ac1) が 0.5m~3.0m の分布 (N 値 0~4 程度)、粘性土層 (Ac2) が 0.5m~4.0m の分布 (N 値 0~3 程度)、砂質土層 (As) が層厚 0.0~4.0m の分布 (N 値が 3~36 程度)、砂礫層 (Ag) が層厚 0.4m~4.0m の分布 (N 値 6~41 程度)、となっている。

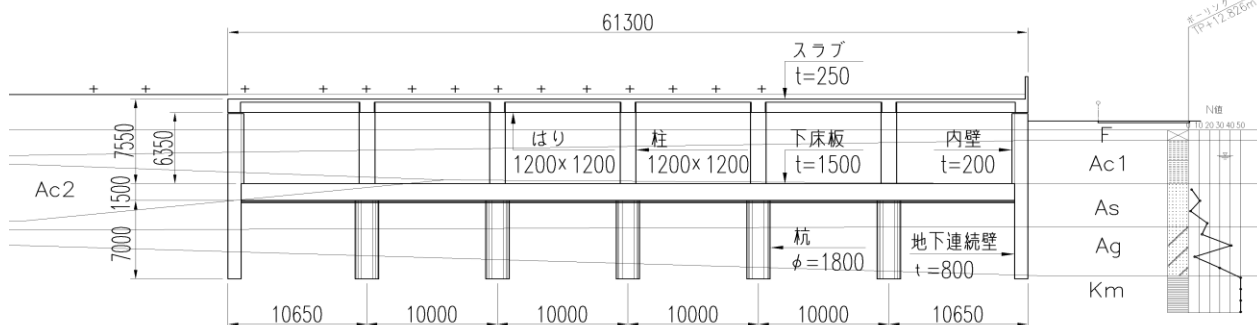


図 2-4 横断図

(3) 施工順序概要

図 2-5 に遊水地の施工順序を示した。このうち、STEP4 の完了後に、軌道工事などに引き渡しを行うことで、STEP5 以降に、上部で軌道工事や電気工事を行い、遊水地内部から土木工事 (下床版のコンクリート打設工事や、地下連続壁の後打ち工事) ⑤を行い、基地全体工事と遊水地工事とを平行して進めることにより大幅な工期短縮を図った。

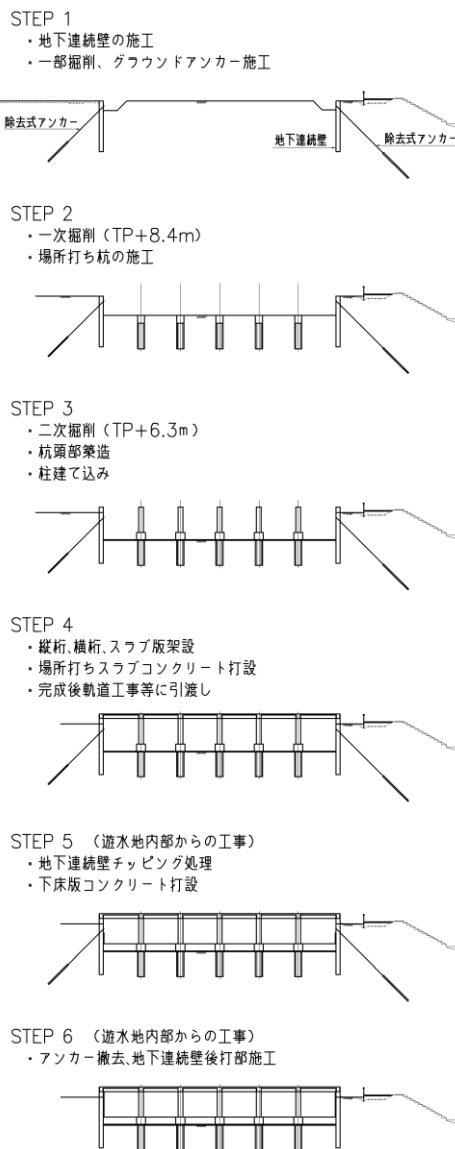


図 2-5 遊水地の施工順序

3. 部材のプレキャスト化と接合法

(1) スラブ版

スラブ版は、型枠兼用プレテン部材を採用した。スラブ版の架設時期は、横梁の架設後となる。またスラブ版は2方向版として設計した。スラブ版の接合面にジベル筋を配置し、場所打ちコンクリートスラブ（ $t=250\text{mm}$ ）との合成床版構造とした。

スラブ版と横梁は、スラブ版からの定着鉄筋で横梁に一体化させた（図 3-1 参照）。

(2) 上層横梁・縦梁

横梁は、スラブ版を架設するため、縦梁に比べスラブ版の桁かかり分だけ断面が小さくなることから架設時の荷重に耐えうるようにプレテン部材とした。

縦梁は、場所打ちコンクリートスラブ部分以外をプレキャスト部材とした。

横梁および縦梁の主鉄筋は、柱頭部でスリーブ継手を用いた接合とした（図 3-2 参照）。

プレキャスト部材内にシースを配置しておき、場所打ちコンクリートスラブ打設後、ポストテンション方式でプレストレスを導入するようにした（図 3-3 参照）。

(3) 柱

柱をRC部材とした理由は、軸力が卓越する部材であることおよび地震時の損傷状況が明確なためである。柱と下床版との結合は、それぞれに主筋をつなぐ継手を相互に半分づつ埋め込んでおき、柱立てこみ後モルタルを充填する方法を採用した^{4), 5)}。

この結合部の施工精度を高めるため、柱および基礎部の鉄筋を形状保持プレートで固定し、位置、間隔を保持するようにした（図 3-4、図 3-5 参照）。

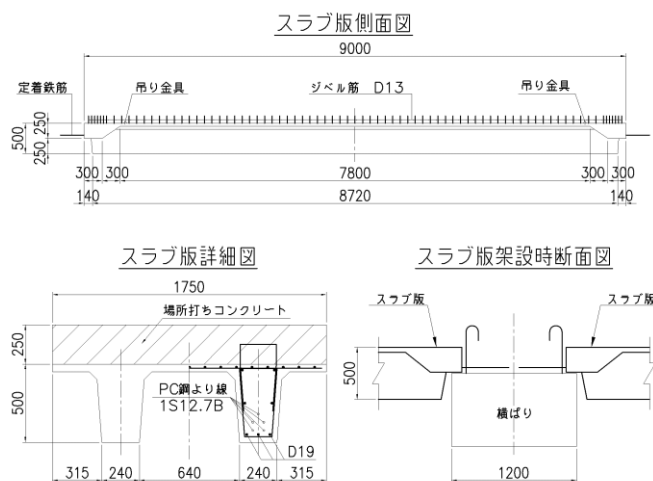


図 3-1 プレキャストスラブ版構造図

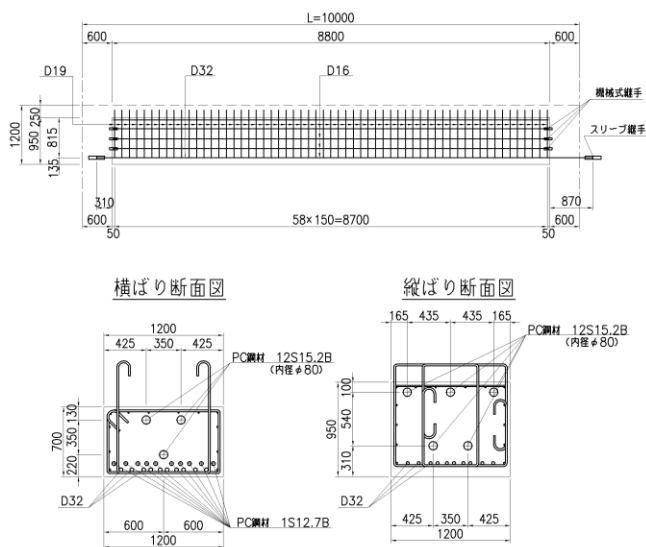


図 3-2 プレキャスト梁構造図

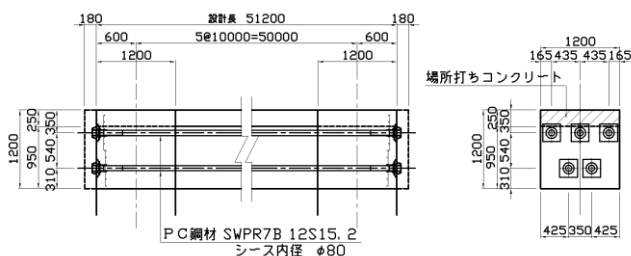


図 3-3 縦ばり PC 鋼材配置図

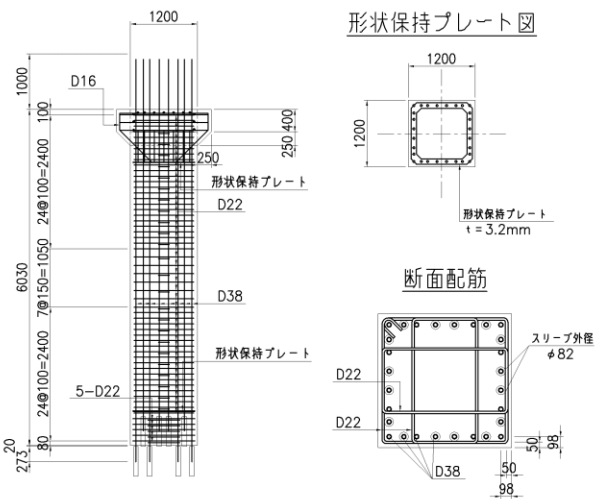


図 3-4 プレキャスト柱構造図

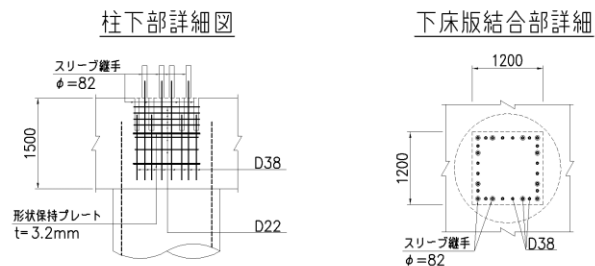


図 3-5 基礎配筋図

4. 解析方法^{6),7),8)}

(1) 設計手順

本設計の設計手順を図 4-1 に示した。遊水地の構造物は耐震性能Ⅱを確保するように設計した。耐震性能⁶⁾と部材の損傷レベル⁷⁾の制限値を表 4-1 に示した。

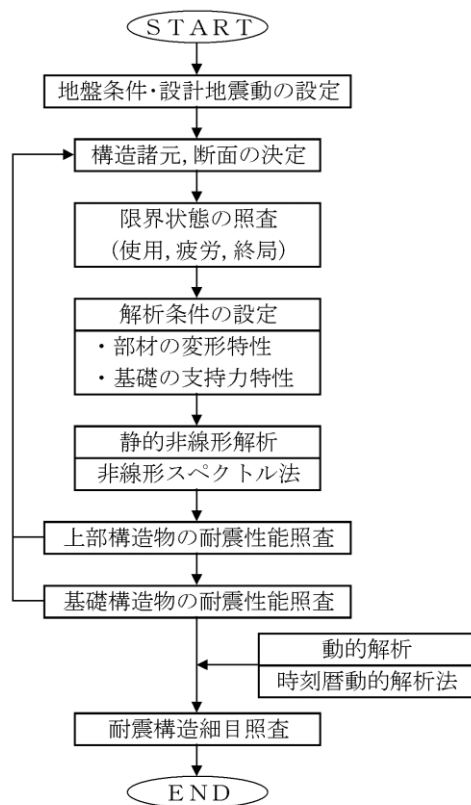


図 4-1 設計手順図

表 4-1 耐震性能と部材の損傷レベルの制限値表⁶⁾

構 造 物		耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
部材の 損傷レベル	上層梁	1	2	3
	下床版, 杭	1	2	3
	柱	1	3	3
基礎の安定レベル		1	2	3

(2) 解析モデル

遊水地の構造物は、留置線等の鉄道荷重を受けるため鉄道基準により設計した。当該構造物の特徴は、杭基礎を有する U 型擁壁とビームスラブ式の高架橋が併設されるため、高架構造物と抗土圧構造物が合体している点にある。

解析手法は、限界状態設計は線形解析で行い、耐震設計は非線形解析で行った。

高架構造物は、地盤に支持される U 型擁壁で囲まれたラーメン高架橋として解析し、抗土圧構造物は、

高架構造物の慣性力と地震時主働土圧が作用する U 型擁壁としてそれぞれ解析した (図 4-2 参照)。

解析モデルは、ラーメン高架橋と地中連続壁とを一体構造物とし、部材を線材に、地盤を部材に取り付くバネとする平面骨組モデルとした (図 4-3 参照)。

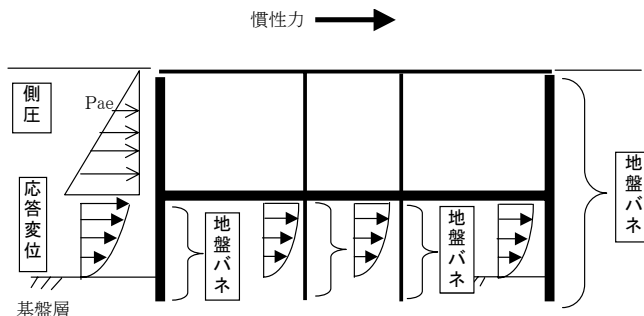


図 4-2 解析モデル概念図

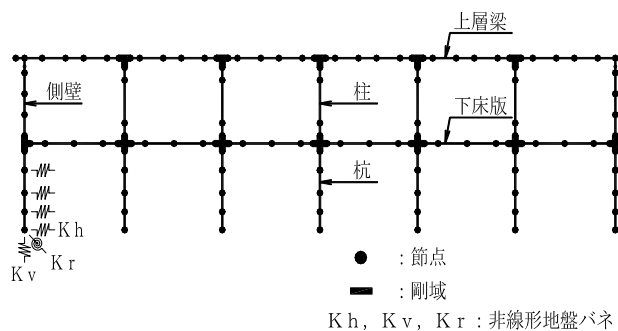


図 4-3 解析平面骨組みモデル

(3) 部材の非線形特性

耐震設計で用いる部材の非線形特性は、柱は部材端曲げモーメントと部材角 ($M \sim \theta$) で表し、梁、側壁、下床版、杭部材は部材断面の曲げモーメントと曲率 ($M \sim \phi$) で表し、テトラリニアモデルで評価した (図 4-4 参照)。P R C 部材である梁は、常にプレストレス力 (先行応力) を受ける R C 部材として非線形特性を与えた。

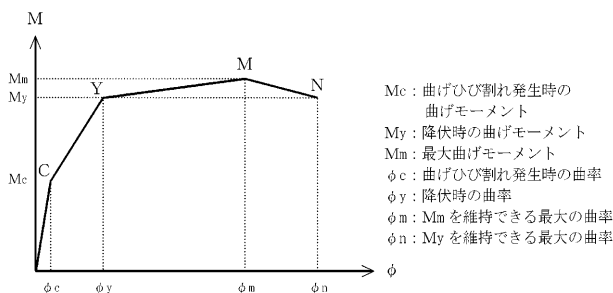


図 4-4 部材断面の曲げモーメントと曲率の関係図⁶⁾

図 4-5 は、上層梁、柱、下床版、杭の平面骨組みモデルの接合部を拡大して示したものである。図中の白丸は部材要素の材端ばねを表し、図 4-4 で示した非線形特性をこの材端ばねに与えた。

上層梁の非線形特性は、プレストレスが導入されるため軸方向鋼材の抜出し効果は考慮していない。柱は、接合部に回転ばね要素を与え、下床版、杭の接合部の部材要素は、軸方向鋼材の抜出しを考慮した非線形特性を与えた。

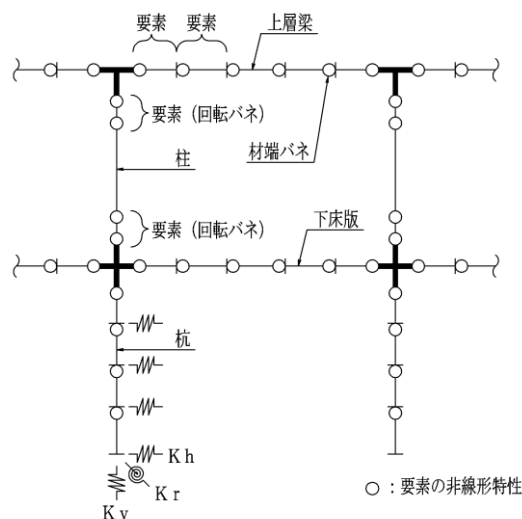


図 4-5 部材の要素分割説明

(4) 構造系の変化と構造解析

プレキャスト部材を用いる場合、その構造系は施工段階により単純梁、多径間ラーメンと変化するとともに、部材有効断面や荷重状態も変化する。そのため、プレキャスト部材を用いる不静定構造物では、場所打ち鉄筋コンクリート構造物と異なり、施工段階を考慮した構造系、有効断面、作用荷重、不静定力を考慮して解析する必要がある。各施工段階で考慮しなければならない不静定力を以下に整理した⁹⁾。

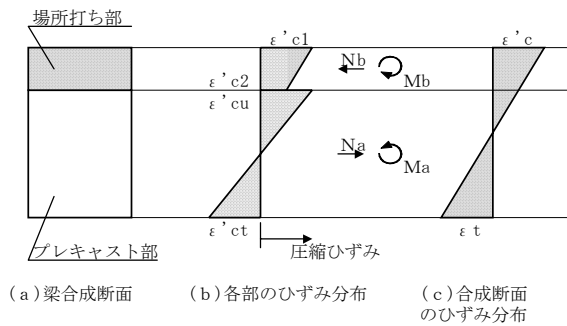
- ① 構造系が単純梁からラーメン構造に変化するため梁のクリープ変形が拘束され不静定力が発生すること。
- ② 不静定構造にプレストレス力を作用させると、プレストレスによる変形が拘束されるため不静定力（プレ 2 次力）が発生すること。
- ③ プレキャスト部材と場所打ちコンクリートの部材間に材令差があるため、乾燥収縮・クリープによる不静定力（2 次力）が生じること。

今回の設計で考慮した横梁の施工段階における有効断面と作用荷重を図 4-6 に示した。STEP 1～4 の構造系は単純梁、STEP 5～7 はラーメン構造となる。

検討時	有効断面	作用荷重
STEP-1 導入直後 (プレテン) 構造系： 単純梁		・ 横梁自重 ・ 導入直後プレストレス力
STEP-2 運搬 構造系： 単純梁		・ 横梁自重 ・ 衝撃 ($I=0.3$) ・ プレストレスト力
STEP-3 スラブ版架設時 構造系： 単純梁		・ 横梁自重 ・ スラブ版荷重 ・ 有効プレストレスト力
STEP-4 RC 床版施工時 構造系： 単純梁		・ 横梁自重 ・ スラブ版荷重 ・ スラブ荷重 ・ 有効プレストレスト力 ・ クリープ、乾燥収縮
STEP-5 プレストレス導入 構造系： ラーメン構造	(正曲げ) 	・ 横梁自重 ・ スラブ版荷重 ・ スラブ荷重 ・ 有効プレストレスト力 (プレテン) ・ 導入直後プレストレスト力 (ボステン) ・ プレ 2 次力 ・ クリープ、乾燥収縮とその 2 次力
STEP-6 版上荷重載荷時 構造系： ラーメン構造	(負曲げ) 	・ 横梁自重 ・ 有効プレストレスト力 (プレテン) ・ スラブ版荷重 ・ スラブ荷重 ・ 有効プレストレスト力 (ボステン) ・ プレ 2 次力 ・ 版上荷重 ・ 列車荷重 ・ 温度変化による影響 ・ クリープ、乾燥収縮とその 2 次力
STEP-7 クリープ、乾燥収縮終了 構造系： ラーメン構造		・ クリープ、乾燥収縮とその 2 次力

図 4-6 横梁の施工段階における有効断面と作用荷重

プレキャスト部材と場所打ち鉄筋コンクリート部材の合成構造における乾燥収縮差およびクリープ差により発生する 2 次力の解析上の取扱いを図 4-7、図 4-8 に示した。図の (b) は各部材が単独である場合に生じるひずみ分布を示している。断面が合成されることによりこれらのひずみは拘束されるので、内力 M_a, M_b, N_a, N_b が生じ、合成断面のひずみは (c) のようになる。このひずみを発生させるような軸力、曲げモーメントを平面骨組みモデルに作用させ 2 次力を計算した。クリープおよび乾燥収縮は、時間の経過とともに増加し、プレストレス 2 次力は時間の経過とともに減少する。そこで、今回の解析では、設計断面力の最大値がどの時点で発生しているかを検証するために図 4-6 の STEP6～7 をさらに 4STEP に分割し、不静定力を計算した。



(c)のひずみ分布となるような軸力、曲げモーメントを作用させる。

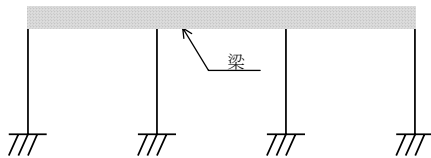
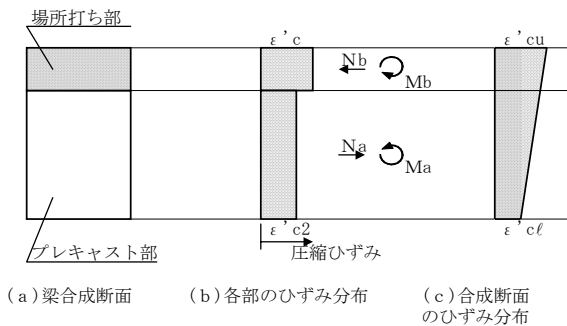


図 4-7 クリープ差による 2 次力解析



(c)のひずみ分布となるような軸力、曲げモーメントを作用させる。

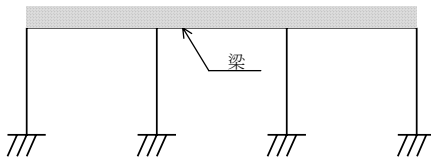


図 4-8 乾燥収縮差による 2 次力解析

5. 解析結果

図 5-1 に耐震設計における各部材の非線形特性と解析最大応答値を示した。本設計で設定した構造物の耐震性能Ⅱに対し、柱の損傷レベルは 3、梁、側壁、下床版および杭の損傷レベルはそれぞれ 2 で要求性能を満足している（表 4-1 参照）。

一例として、図 5-2 に終局限界状態における横梁の曲げモーメント分布を示した。図中の記号は、◆は正曲げおよび負曲げの最大断面力、●は STEP7 におけるクリープと乾燥収縮による不静定力、▲は STEP7 におけるプレストレス 2 次力およびプレクリープによる不静定力を示している。この図から設計断面力に占める不静定力の割合は支点部において最大で 40%に達している。そのため、不静定力を十分に解析し、設計断面力に組込むことが重要となる。

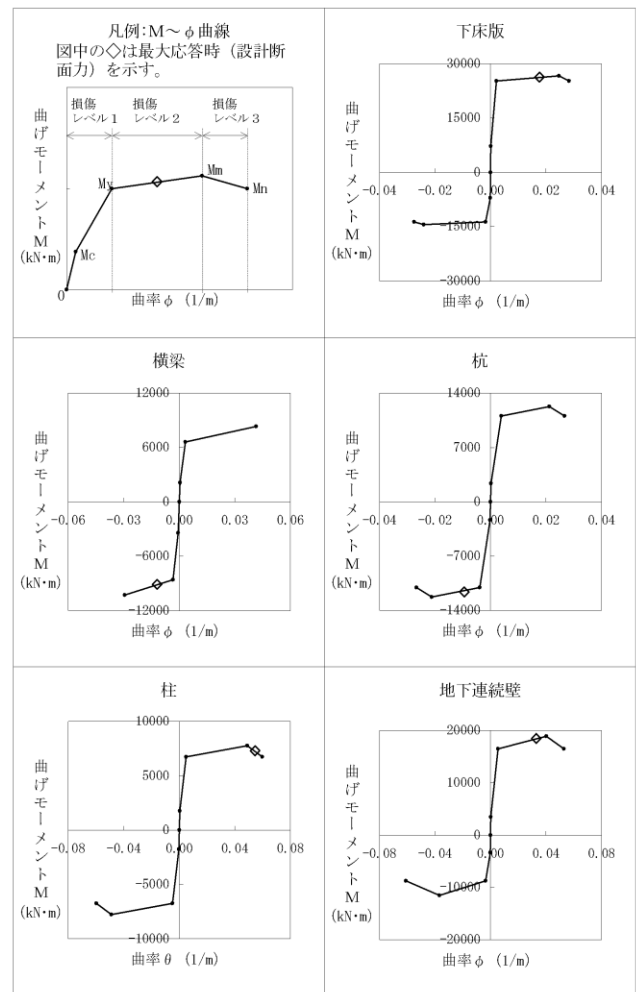


図 5-1 部材の非線形特性と解析最大応答値

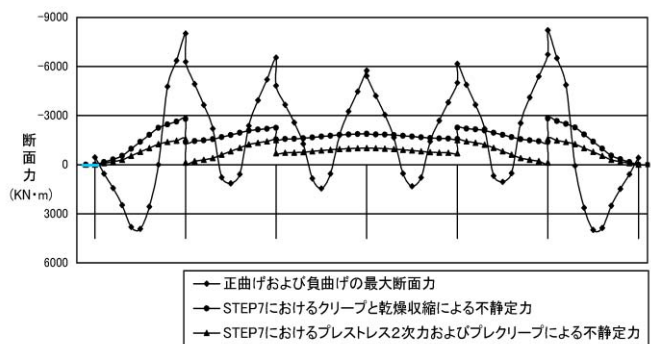


図 5-2 横梁の設計断面力

6. まとめ

本設計は、プレキャスト部材を P C ポストテンション方式で一体化させることで、プレキャスト部材を用いた鉄道ラーメン高架橋の設計を行った。併せて、U 型擁壁とビームスラブ式高架橋の併設としたことで、地下空間にラーメン高架橋を適用した。

以下に、新たな知見を整理した。

- ① P C 鋼材および鉄筋の配置を十分に検討すれば、プレキャスト部材の結合には P C 鋼材が有効であること。
- ② 施工段階で断面、構造系が変化する梁部材は、その工程を考慮した解析を行う必要があること。

しかしながら、今後の課題として、不静定構造物では、コンクリートのクリープ・乾燥収縮およびひび割れを原因とする断面力の再配分と、それらに伴う曲げ剛性の低下による不静定力の変化の現象を解析できる計算ソフトが完全ではない。そのため、今回の解析では、ひび割れによる断面力の再配分は考慮していない。ひび割れの発生は断面力を再配分するので、今回の解析は安全側の評価になっていると考えられるが、今後、この部分の解析を行えるようにする必要がある。

最後に、地下空間にプレキャスト部材を用いたラーメン高架橋を建設することは、一体整備のメリットのほかに事業費縮減の観点からも、都市鉄道事業者と河川事業者の双方に有益となった。本事業に限らず、事業費縮減の観点、複数事業の一体整備、社会資本の早期建設要望などの外的要因に応えるため、プレキャスト部材の活用は多くなるものと考えている。

謝辞：本設計を進めるにあたり、鉄道総合技術研究所コンクリート構造および基礎・土構造研究室の皆様には、貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

補注

- (1) 横浜環状鉄道は、横浜市の基本計画「ゆめはま 2010 プラン」で、市内の副都心を連結する都市鉄道として位置づけられている。現在、横浜環状鉄道のうち、日吉～中山間を高速鉄道 4 号線として、先行して整備している。
- (2) 鶴見川は東京都市圏の 1 級河川であり、国土交通省と神奈川県により「鶴見川新流域整備計画」として計画され、この計画の一環として整備している。

当初、川和町近傍に遊水地が計画されており、この計画が変更されたものである。

- (3) 遊水地とは、鶴見川の洪水対策のための貯留池である。鶴見川は上流にダム等がなく市街化が進行したために、洪水対策が早期に望まれている。
- (4) 車両基地は、遊水地を含めて既に土木工事は発注済みである。
- (5) 地中連続壁は、仮設時には厚さが 800mm 必要であり、本設時には厚さが 1000mm 必要となる。そこで、200mm は遊水地の中から掘削後に施工するようにした。この方が一度に 1000mm 造るよりも建設費が安くなる。
- (6) 耐震性能⁶⁾とは、
耐震性能Ⅰ：地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない。
耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる。
耐震性能Ⅲ：地震により構造物全体系が崩壊しない。
- (7) 部材の損傷レベル⁶⁾とは、
損傷レベル 1：無損傷
損傷レベル 2：場合によっては補修が必要な損傷
損傷レベル 3：補修が必要な損傷

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：ハーフプレキャスト工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針，1999. 3
- 2) 鉄道総合技術研究所：プレキャスト型枠工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針，1999. 3
- 3) 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
- 4) 土木学会：鉄筋継手指針，1982. 2
- 5) 吉田正，宮武一郎，吉永弘志：コンクリート二次製品利用による施工合理化，土木技術資料 Vol. 38, N02, 1996
- 6) 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 1999. 10
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，1999. 10
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説基礎構造・抗土圧構造物，2000. 6
- 9) H. リュッシュ・D エンケルト：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，鹿島出版会