

鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法の開発

Development of Construction Method with Precast System to RC Frame Viaduct

小西 哲司

Tetsushi KONISHI

川田建設(株)工事本部技術部技術課課長

渡邊 佳

Kei WATANABE

川田建設(株)工事本部技術部技術課

得能 達雄

Tatsuo TOKUNOU

川田建設(株)工事本部製品開発部部長

森谷 久吉

Hisayoshi MORIYA

川田建設(株)工事本部技術部次長

服部 尚道

Hisamichi HATTORI

東急建設(株)技術研究所土木研究部

玉井 真一

Shin-ichi TAMAI

(財)鉄道総合技術研究所

Many companies are undertaking the planning and constructing of railway viaducts. Because they must maintain the facilities of transportation for the commuter, they are restricted to limited work space and time schedule.

To facilitate this process we undertook the development of a new economical construction method for railway viaducts. The structural method that was developed is very durable in earthquakes. The method, a half-precast system is applied to construct the deck plate and main beams. The precast member in this system is used for falsework and concrete on it, after hardening the structure, can be a durable hybrid flame.

This paper shows an outline of this method and result of experiment in beam and slab with half-precast plates.

Key words: precast system, half-precast segment, hybrid flame, partially prestressed concrete structure, RC flame railway viaduct

1. はじめに

過密化する都市空間において交通網の改善を図るため、複々線化や立体交差化による鉄道高架橋の建設が各方面で計画・施工されている。従来、このような工事は、既設路線の安全確保を優先するために時間的・空間的制約のもとで行わなければならない、大規模支保工を用いた場所打ち工法により施工されていた。このため、作業効率の低下、騒音・振動対策、作業空間・資材ヤードの確保などが問題となっていた。

筆者らは、これら諸問題を解決するため、経済的で耐震性に優れたラーメン形式の鉄道高架橋を、工場製作したプレキャスト部材を用いて組立て施工する「鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法」の開発を行った。プレキャスト化は柱、梁、スラブを対象としており、各部材は軽量化や支保工の簡略化を図るため型枠支保工機能を有するハーフプレキャスト部材とした。また、ハーフプレキャスト部材は構造部材の一部として機能させるものとし、現場で打設する場所打ちコンクリートと合成し一体となって荷重に抵抗することを前提として解析を行っている。本文は本工法の概要を紹介するほか、解析仮定の整合性を確認するとともに、ハーフプレキャスト部材と場所打ちコンクリートとの合成部材の挙動を把握することを目的として行ったいくつかの実験についても

その概要を報告する。

2. 本工法の概要

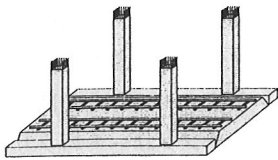
(1) 施工手順および各部材の構造概要

本工法は、あらかじめ工場製作した柱、梁、スラブのハーフプレキャスト部材を現場で架設および接合し、場所打ちコンクリートと一体化してラーメン高架橋を構築するものである。図1に本工法の施工順序を示す。同時に各部材の構造についても概要を示す。

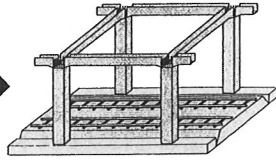
STEP-1

まず、基礎上にハーフプレキャスト柱部材を架設した後、軸方向鉄筋の配置および接合と柱基部における帯鉄筋の配筋を行い、鉄筋のかぶりを確保する根巻きコンクリートと中空部分を充填する中詰めコンクリートを打設してRC構造の柱を構築する。ここで、図2 a)に示すように、ハーフプレキャスト柱部材は中空断面形状であり、軸方向鉄筋位置にあらかじめシースが配置され、シースの周囲には型枠支保工を兼用するため帯鉄筋が配置されている。なお、後挿入する軸方向鉄筋はグラウト²⁾³⁾により固定する。また、打継面には一体性を確保するため円形の凹凸を設けており、凹凸の寸法はコンクリート強度比を考慮した表面積が凹部と凸部で等価となるように、その高さは4～5 mm、その間隔は40～50 mmとしている。

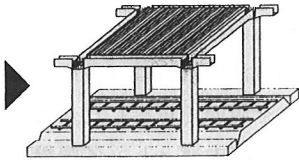
STEP-1 柱部材の建込み



STEP-2 梁部材の架設



STEP-3 スラブ部材の架設



STEP-4 高架橋の完成

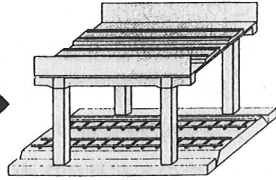


図1 本工法の施工順序

STEP-2

次に、ハーフプレキャスト梁部材を架設後、柱梁接合部の配筋を行い、中詰めコンクリートを打設する。

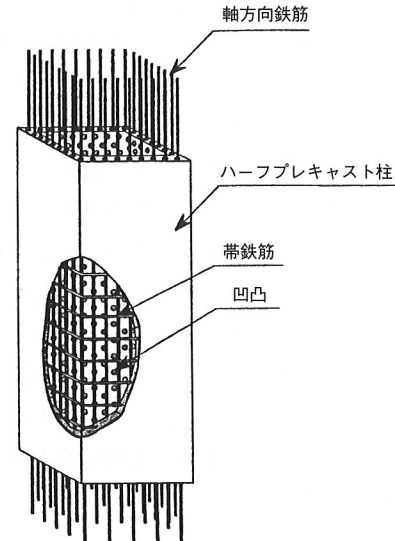
ここで、図2 b)に示すように、ハーフプレキャスト梁部材はU形断面形状であり、支間方向(部材軸方向)にPC鋼材、下縁側軸方向鉄筋、側方鉄筋およびスターラップが配置されている。また、施工中は単純支持され、自重および場所打ちコンクリート重量などによる正の曲げモーメントに対して支保工なしで抵抗できるようにプレストレスを導入しており、完成後に載荷される荷重に対してはひび割れを許容するPRC構造となる。なお、打継面には一体性を確保するため円形の凹凸を設けており、寸法と配置はハーフプレキャスト柱部材の凹凸と同様である。

STEP-3

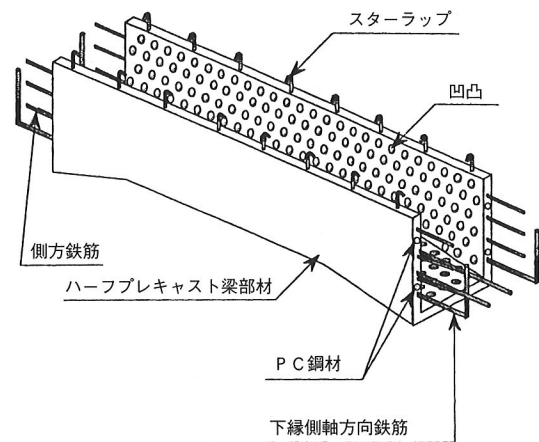
さらに、ハーフプレキャストスラブ部材を架設後、上縁側鉄筋の配置を行いスラブコンクリートを打設する。ここで、図2 c)に示すように、ハーフプレキャストスラブは上縁側に突起を持つ凸断面形状であり、ハーフプレキャストスラブ支間直角方向のPC鋼材、下縁側鉄筋および支間直角方向の下縁側鉄筋が配置されている。ハーフプレキャストスラブ支間直角方向の突き合わせ部における下縁側鉄筋は施工性を考慮してループ継手を用いている。また、施工中、ハーフプレキャストスラブ支間方向は一方方向スラブとして単純支持され、自重および場所打ちコンクリート重量などによる正の曲げモーメントに対して支保工なしで抵抗できるようにプレストレスを導入している。完成後、ハーフプレキャストスラブ支間方向はPRC構造、支間直角方向はRC構造となる。なお、打継面には一体性を確保するため帯状の凹凸を設けており、寸法と配置はハーフプレキャスト柱部材の凹凸と同様である。

STEP-4

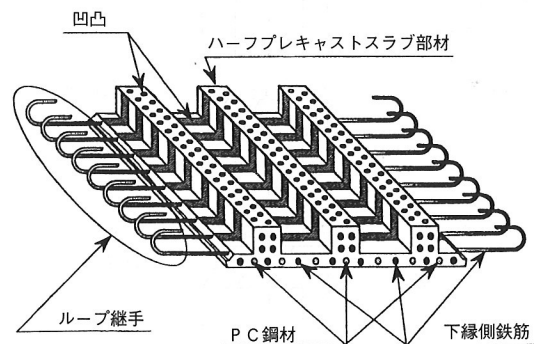
最後に、橋面工の施工を行い高架橋が完成する。



a) ハーフプレキャスト柱部材



b) ハーフプレキャスト梁部材



c) ハーフプレキャストスラブ部材

図2 ハーフプレキャスト部材の形状

(2) 構造解析

「(1)施工手順および各部材の構造概要」で示したように、本工法は、支保工の簡略化を図るために型枠支保工機能を有するハーフプレキャスト部材を用いたことに加えて、ハーフプレキャスト部材を構造部材の一部として機能させて荷重に抵抗することを大きな特徴としている。

場所打ちコンクリートのみからなる部材またはハーフプレキャスト柱と場所打ちコンクリートを合成した断面では、ある荷重の組合せにより生じる応力度は、荷重の総和が一度に断面に作用するものとして求めることができる。しかし、ハーフプレキャスト部材を架設し、場所打ちコンクリートにより順次結合または一体化して構築するプレキャスト工法は、各施工段階で構造系、荷重および断面の構成が変化する。このため、部材には、各施

工段階で載荷される荷重の総和である永久荷重および変動荷重が作用し、部材断面に生じる応力度もこれらの個々の荷重により生じる応力度の和となる。実際の断面計算においては個々の荷重により生じる応力度をハーフプレキャスト部材、中詰めコンクリートのような断面の構成要素ごとにプレストレス力、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響等も考慮して算定し、構成要素ごとに積算していくこととなる。

このことから、ラーメン高架橋に生じる断面力の算定は表1に例示する施工順序に従った適切な構造解析モデルを用いて行う必要がある。本工法の解析は「汎用クリープ・乾燥収縮解析プログラム」を用いて算出した永久荷重時までの各部材の応力度を初期応力度とし、各限界状態の断面計算は各構成断面要素の特性を考慮できるファ

表1 施工段階を考慮した構造解析例

施工段階	構造系	荷重	断面	応力度		
				発生応力度		合成応力度 ^{注)}
				U形ハーフプレキャスト	中詰め・スラブ	
1	ハーフプレキャスト 梁製作 →架設	単純梁	ハーフプレキャスト 梁自重 +プレストレス	U形断面		
↓	クリープ 乾燥収縮 (1～2までの 期間を考慮)	単純梁	クリープ 乾燥収縮の影響	U形断面		
2	中詰めコンクリート 打設	単純梁	中詰めコンクリート 重量 +作業荷重	U形断面		
3	ハーフプレキャスト スラブ架設 →場所打ち コンクリート打設	ラーメン：梁・柱のみ	ハーフプレキャストスラブ自重 +場所打ちコンクリート重量 +作業荷重	矩形断面		
↓	クリープ 乾燥収縮 (3～4までの 期間を考慮)	ラーメン：全断面	クリープ 乾燥収縮の影響	T断面		
4	橋面部施工 →完成	ラーメン：全断面	永久荷重 (橋面荷重も 含む)	T断面		
↓	クリープ 乾燥収縮 (4～5までの 期間を考慮)	ラーメン：全断面	クリープ 乾燥収縮の影響 (終了まで)	T断面		
5	供用開始時	ラーメン：全断面	永久荷重 (応力度制限の照査) 永久荷重 変動荷重 (ひび割れ幅の照査)	T断面		

注) 合成応力度については、——がU形ハーフプレキャスト梁およびスラブの応力度分布を、-----が中詰め部の応力度分布を示す。

イバーモデル計算を用いて行っている。

3. 実験概要報告

(1) 合成梁の載荷実験

a) 実験の目的

型枠支保工を兼用するU形のハーフプレキャスト梁（以下U形梁）部材の打継面に前述の凹凸を設け、場所打ちコンクリートを打設して一体化した合成梁の解析結果の妥当性の確認および挙動の把握を目的として、静的載荷実験を実施した。

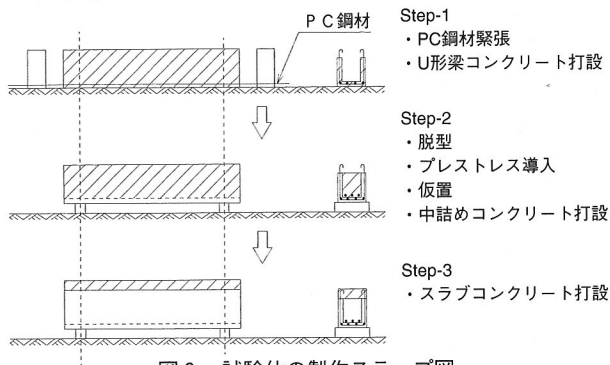


図3 試験体の製作ステップ図

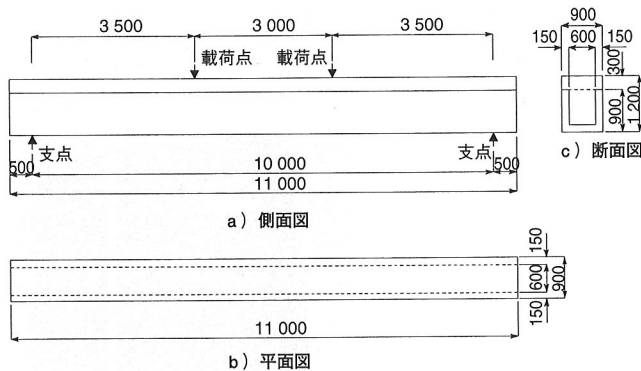


図4 試験体一般図

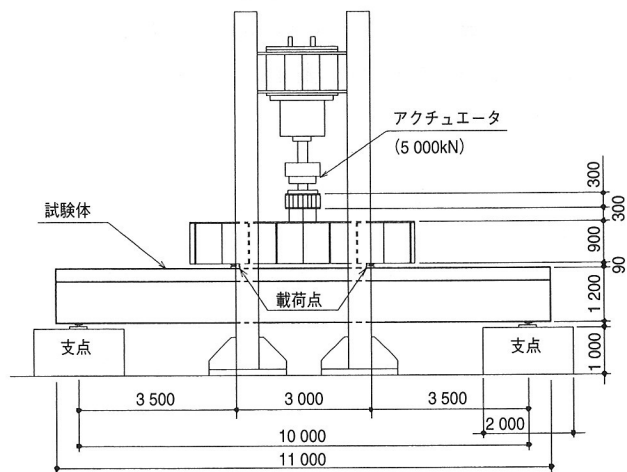


図6 載荷実験装置

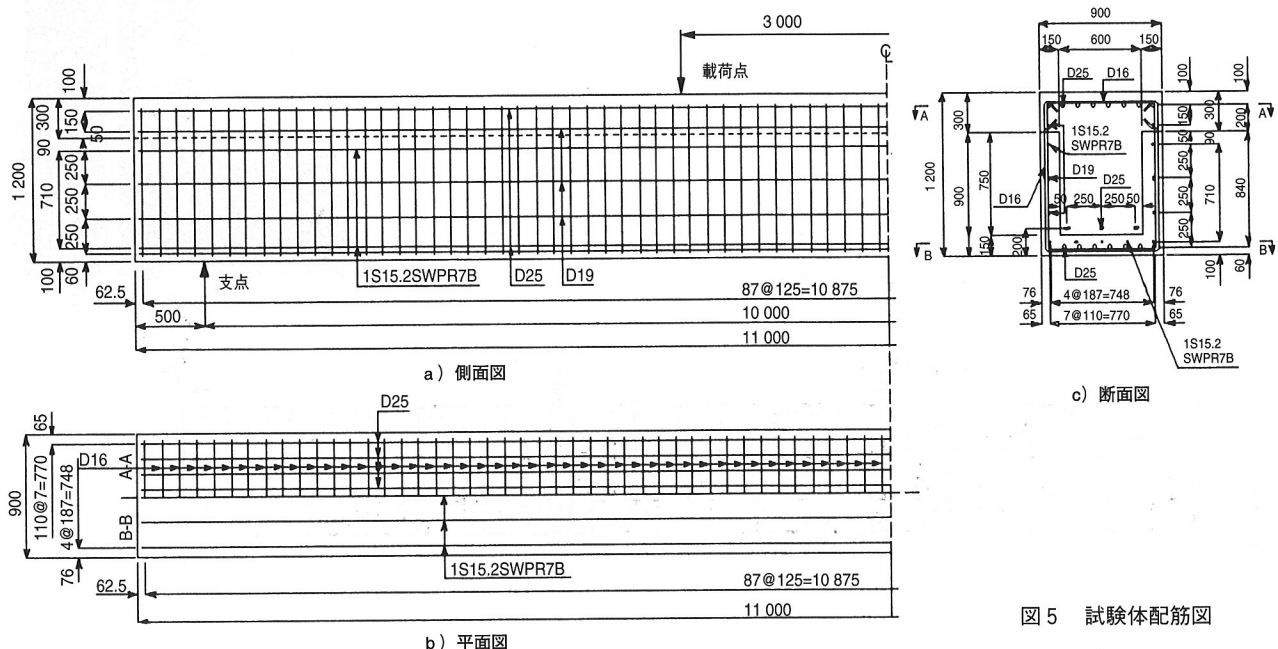


図5 試験体配筋図

b) 実験概要

実験は、川田建設(株)那須工場にて製作したラーメン梁支間部の断面を有する実物大U形梁を用いて行った。試験体の製作は、実際の施工段階に従った。試験体の製作ステップを図3に示す。まず、U形梁部材の製作を行い、コンクリートが所定の強度に達した後、プレストレスを導入した。さらに、U形梁部材を載荷時の支点位置で支持し、中空部に鉄筋を配筋後中詰めコンクリートを打設した。ここで、打継面には凹凸を設けた。さらに、スラブ鉄筋配筋後スラブコンクリートを打設した。中詰めコンクリートとスラブコンクリートの打継面は粗面仕上げとした。なお、スラブの幅は梁幅とした。

製作に伴って施工中から完成に至るまでの断面構成の変化する部材に発生する断面内ひずみを測定した。その後、一定期間養生後、クリープ・乾燥収縮による応力度の発生を待ってから載荷試験を行い、断面内ひずみを測定し解析値との比較を行うとともに、挙動を把握した。載荷は図4に示すように、支間長を10 000mm、等曲げ

表2 鉄筋の材料試験結果 (N/mm²)

鉄筋の種類	降伏強度	引張強度	弾性係数
D25 (SD345)	368	577	1.90×10^5
D19 (SD345)	371	571	1.91×10^5
D16 (SD345)	360	553	1.92×10^5

表3 PC鋼材の仕様 (N/mm²)

種類	降伏強度	引張強度	緊張応力度
IS15.2 SWPR7BN	1 746	1 912	1 411

表4 コンクリートの圧縮試験結果 (N/mm²)

部位	プレストレス導入時	載荷試験時
U形梁部	38.5 (材齢4日)	61.2
中詰め部	—	42.8
スラブ部	—	44.1

区間を3 000mm、せん断スパンを3 500mm、せん断スパン比は3.07とした。載荷は二点一方向載荷とした。試験体の配筋を図5に載荷実験装置を図6に示す。使用材料については、表2に鉄筋の材料試験結果、表3にミルシートによるPC鋼材の仕様、表4にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

c) 実験結果および考察

① 施工中～完成までのひずみ計測結果

図7に施工中から完成までにおける施工段階ごとのスパン中央における断面内ひずみ分布図を示す。同図より、載荷点断面のひずみ分布においては計測値にややばらつ

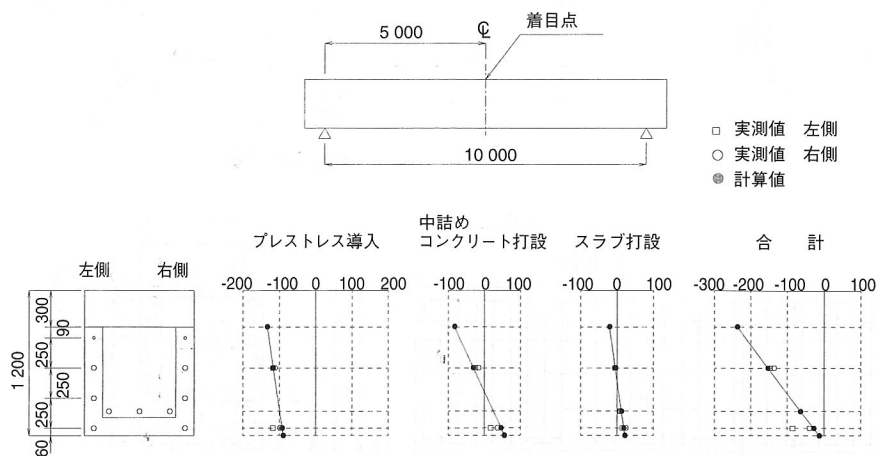


図7 スパン中央における断面内ひずみ分布

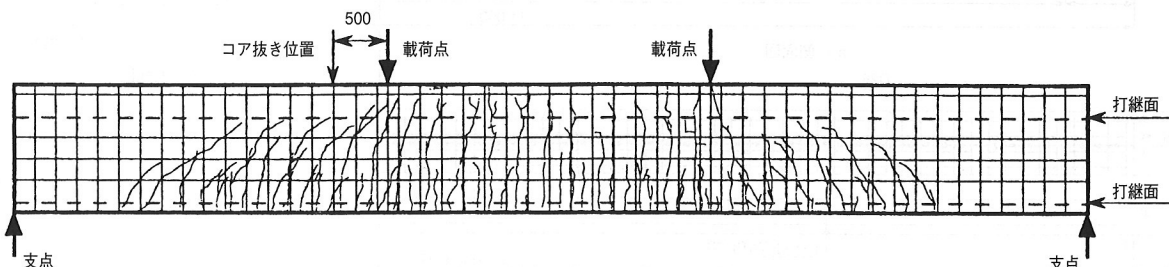


図8 最終ひび割れ状況

きがあるものの、解析値にはほぼ一致した直線関係にあることがわかる。

② 曲げ載荷実験のひずみ計測結果

載荷時の試験体の状態は、荷重約451kNで等曲げ区間中央のU形梁下縁側に曲げひび割れが発生し、荷重約549kNで中詰め下縁側にひび割れ発生が確認された。その後、荷重約2 078 kN で等曲げ区間の曲げひび割れが上部打継面位置を貫通するとともにU形梁下縁側軸方向鉄筋が降伏後、荷重約2 196 kN で支点部の曲げ圧縮破壊に至った。図8に最終ひび割れ状況を示す。同図より、打継面に沿うひび割れは発生しなかった。また、写真1に載荷終了後の、図8に示す位置のコア抜き供試験体を示す。これより曲げひび割れは打継面位置を貫通していることが確認できた。以上、打継面に沿うひび割れは確認されなかったことから、場所打ちコンクリートとハーフプレキャスト部材の一体性は終局状態まで確保されていることが確認できた。

次に、図9 a), b) に支間中央断面における最外縁引張鉄筋の荷重～ひずみ関係を示す。図9における解析値は、「汎用クリープ・乾燥収縮解析プログラム」により算定した初期応力度を、各構成断面要素の特性を考慮できるファイバーモデルに取り込んで算定したものである。図9 b) は図9 a) における初期載荷状態を示した図であるが、初期載荷状態における荷重～ひずみ関係に

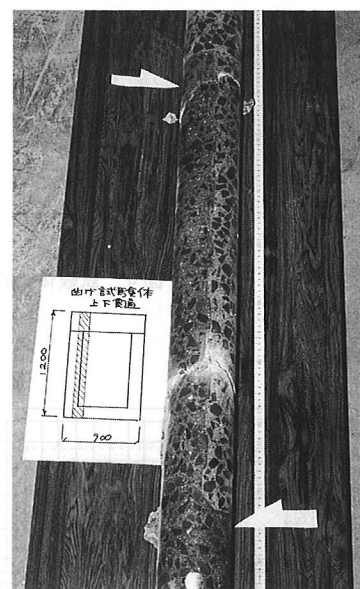
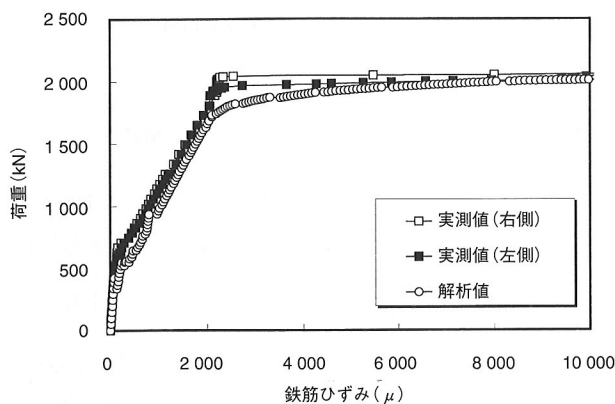
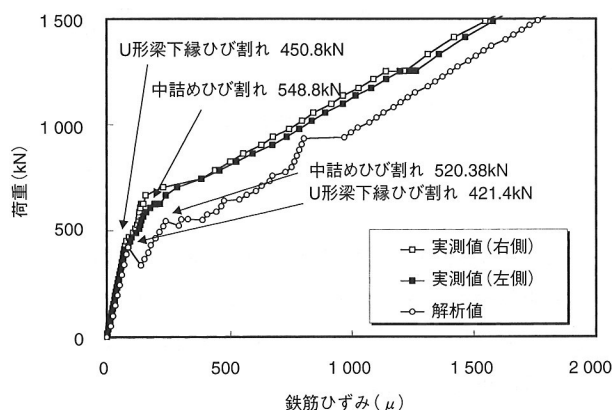


写真1 コア抜き供試験体



a) 荷重～ひずみ関係



b) a) の荷重 $P=150$ tf までの荷重～ひずみ

図9 最外縁引張鉄筋の荷重～ひずみ関係

表5 曲げ終局耐力の実験値と予測値

実験値 (kN)	予測値 (kN)	実験値/予測値
2 196	2 135	1.03

において、U形梁および中詰め部下縁のひび割れ発生荷重は、実測値と解析値ではほぼ一致することが確認できた。このことより「汎用クリープ・乾燥収縮解析プログラム」を用いて求めたクリープ・乾燥収縮の影響を考慮した初期応力度の妥当性が確認できた。なお、解析値の推移が乱れているのは、断面高さ方向に分割したファイバー層に発生する引張応力が制限値を超えた場合、そのファイバー層を無視する構成則を取り入れているためである。

また、表5に曲げ終局耐力の実験値と予測値を示す。

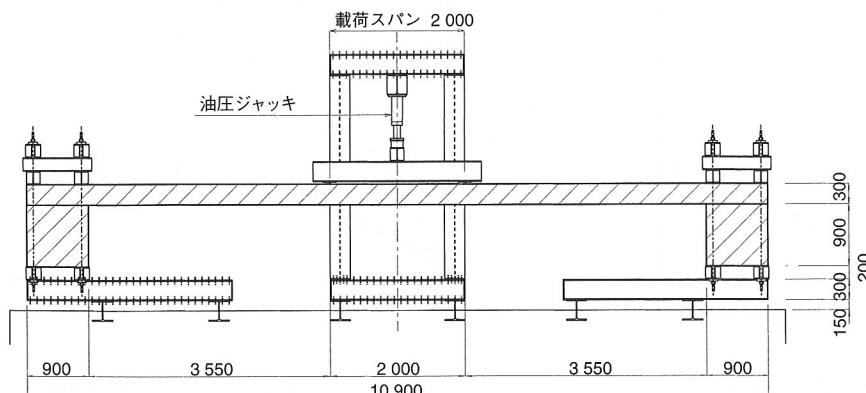


図10 荷重試験装置

ここで、予測値はプレストレスによるPC鋼材の初期ひずみを考慮したもので、終局状態はコンクリートの圧縮縁ひずみが0.0035に達した時点とした。その結果、実験値は予測値を若干上回る安全側の結果となった。

(2) 合成スラブの荷重実験

a) 実験の目的

一般の場所打ちスラブの場合、現場で組み立てた支保工上で、鉄筋を組み、コンクリート打設を行う。このため脱型時から二方向スラブとしてそれぞれの方向に荷重が分担される。この場合、一般には荷重分担の割合はスラブを等方性と仮定し、支間長の違いによる剛比をもとにそれぞれの方向の曲げモーメントを算出している。しかし、本工法で取り扱っているスラブの構造は型枠支保工の機能を兼用するため支間方向にプレストレスを導入したハーフプレキャストスラブであり、これを施工の完了した梁の上に架設し、場所打ち部分の鉄筋組み立て後、スラブコンクリートを打設して完成する。このため、一方向がPRC構造、支間直角方向がRC構造の異方性スラブである。

そこで、ハーフプレキャストスラブを用いた合成スラブモデルの挙動を把握し、二方向スラブとしての設計の適用性を検討することを目的として荷重実験を行った。

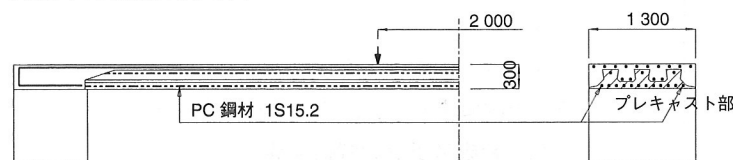
b) 試験体および実験概要

実験は、完成後のスラブから、単位幅（ハーフプレキャストスラブ幅に相当する1.3m）を切り出し（以下PC合成スラブモデル）、実構造物と同じ支持条件となる両端固定で荷重を載荷した。また、PC合成スラブモデルと直角方向の、ループ継手を用いたRC構造スラブの単位幅を、同じく切り出したモデル（以下ループ継手モデル）を同様の支持条件で荷重載荷し、それぞれのわみ性状と、コンクリートおよび鉄筋のひずみを測定した。

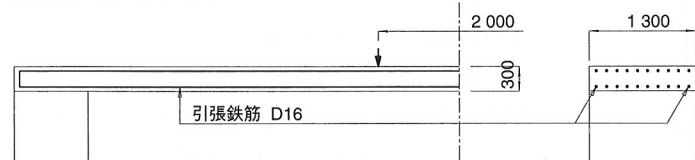
また、ループ継手の性能を確認するために、通常の重ね継手を用いたRC構造の標準モデル（以下RCスラブモデル）を製作し、同様に載荷を行った。試験体は川田建設（株）那須工場にて製作した。図10に載荷試験装置を、図11に各試験体の形状を示す。

載荷は載荷スパン2.0mとし、2点1方向載荷とした。

試験体 1 : PC合成スラブモデル



試験体 2 : RCスラブモデル



試験体 3 : ループ継手モデル

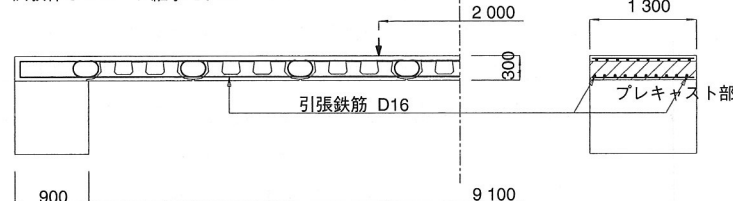


図11 各試験体の形状

なお、表6、表7にそれぞれ使用した鉄筋の材質、PC鋼材の仕様を、表8にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

c) 実験結果および考察

① 荷重～ひずみ履歴関係

図12に各スラブモデルの支間中央断面位置における荷重～ひずみ履歴関係を示す。RCスラブモデルは載荷荷重約53.9kNで下縁側にひび割れが発生し、鋼材のひずみが増加している。また、ループ継手モデルは、ひび割れ発生までの初期載荷時は、やや挙動が異なるが、それ以降はRCスラブモデルとはほぼ一致した荷重～ひずみ関係にある。終局時の破壊形態は、いずれの試験体も支間部および支点部の引張鉄筋が降伏に達した後、支点部下縁側コンクリートの圧壊で終了した。

一方、PC合成スラブモデルは約245kNでひび割れが発生した。ひび割れ発生以降はRCスラブの接線剛性に、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみとも比較的良く一致し

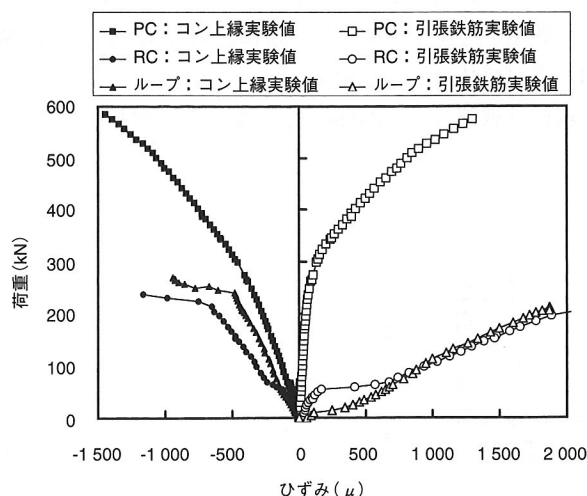


図12 各スラブモデルの荷重～ひずみ履歴

ている。終局時の破壊形態は、RC試験体と同様に支点部の引張鉄筋が降伏した後、支点部下縁側コンクリートの圧壊で終了した。支間部の引張鋼材(PC鋼材)は降伏ひずみには達していなかった。

② 荷重～たわみ履歴関係

図13に各スラブモデルの支間中央位置における荷重～たわみ履歴関係を示す。ループ継手モデル、RCスラブモデルの荷重～たわみ履歴は良く一致している。一方、PC合成スラブモデルは、ひび割れ発生直後はハーフプレキャストスラブの突起内に配置したPC鋼材や、場所打ち部の引張鉄筋による影響と考えられるが、剛性変化は緩やかである。

しかし、荷重が300 kNを超えるあたりからの接線剛性はループ継手モデル、RCスラブモデルと良く一致している。このことから、X、Y方向のひび割れの有無は、荷重～変形挙動に差異を生じるが、両方向ともひび割れが発生した状態で荷重が載荷された場合は、接線剛性に

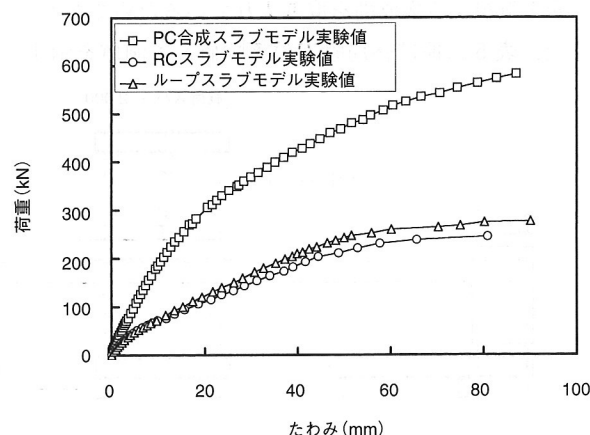


図13 各スラブモデルの荷重～たわみ履歴

表6 鉄筋の材質

鉄筋の種類	材質
D22, D16, D13	SD345

表7 PC鋼材の仕様 (N/mm²)

種類	降伏強度	引張強度	緊張応力度
1S15.2 SWPR7BN	1 746	1 912	1 411

表8 コンクリートの圧縮強度試験結果 (N/mm²)

スラブモデル	部位	圧縮強度
PC合成	プレキャスト部	51.9
	場所打ち部	40.4
ループ継手	プレキャスト部	47.4
	場所打ち部	37.0
RC	全 体	33.5

大きな差異がなく、等方性スラブとして扱えることが確認できた。

本工法で提案しているハーフプレキャストスラブはスラブ完成までの荷重を分担させ、ひび割れの発生を許容しない程度のプレストレスを与えるPRC構造としており、スラブ完成時の両方向の応力度が同程度と考えられる。したがって、スラブ完成後に載荷される荷重に対してはRCスラブと同様の挙動を示すと考えられることから、完成後に載荷される橋面荷重、変動荷重等に対しては、両方向とも断面剛性の等しい等方性版として二方向スラブの計算を適用しても良いと考えられる。

③ 荷重～たわみ分布関係

図14にループ継手モデル、RCスラブモデルの荷重～たわみ分布図を示す。設計曲げモーメント発生荷重(70.6 kN)までは両試験体ともほぼ同じたわみ量であるが、さらに荷重が大きくなるとRCスラブモデルの方がたわみ量が大きくなる。これは、ひび割れ発生後、ルー

プ継手部の鋼材量が多いことによる剛性差が影響していることが考えられる。また、ループ継手部の角折れ等の異常も特に見受けられなかったことから、ループ継手部の機能には特に問題は発生していなかったと思われる。

なお、ループ継手モデルとRCスラブモデルは、荷重～ひずみ関係、荷重～たわみ履歴関係、荷重～たわみ分布関係のいずれと比較してもほぼ同様の挙動を示しており、一般のRC構造と同等の取り扱いができると考えられる。

4. あとがき

本報告はプレキャスト工法の鉄道ラーメン高架橋への適用に関する研究成果の一部を示したものであり、研究は平成4年から東急建設(株)と川田建設(株)が共同で進めている。

その研究成果として平成10年3月には、(財)鉄道総合技術研究所にご指導をいただきながら作成していた「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」も完成しており、各方面から引き合いが来ている。鉄道構造物の建設に関する優れた技術を有する東急建設(株)と、川田建設(株)のPC構造物、プレキャスト構造物建設に関するノウハウが、高いレベルで融合できた結果と考えている。加えて、対象はもちろん鉄道ラーメン高架橋であるが、各種実験や検討で得られた知見はハーフプレキャスト部材と場所打ちコンクリートにより構成された合成構造物に適用でき、幅広い分野での活用が期待できると考えている。

最後に本工法の開発に当たり、適切なお助言、ご指導を頂いた関係各位に感謝するとともに、本工法が今後広く採用されることと、本報告文が今後の土木構造物の発展に寄与することを願っている。

参考文献

- 1) 岡本大・玉井真一・渡邊弘子・服部尚道：プレキャストRC柱の耐震実験，第19回コンクリート工学年次講演論文集19-2，pp.1359-1364，1997.6.
- 2) 玉井真一・増田芳久：コンクリート中にグラウトにより定着された鉄筋の付着特性，第17回コンクリート工学年次講演論文集17-2，pp.1207-1212，1995.6.
- 3) 増田芳久・玉井真一：プレキャストブロックRC梁の曲げ性状，第17回コンクリート工学年次講演論文集17-2，pp.25-40，1995.6.
- 4) 王 肇明・小西哲司・服部尚道・渡邊 佳：ハーフプレキャスト合成スラブの2方向スラブへの適用に関する検討，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，V-401，1998.10.

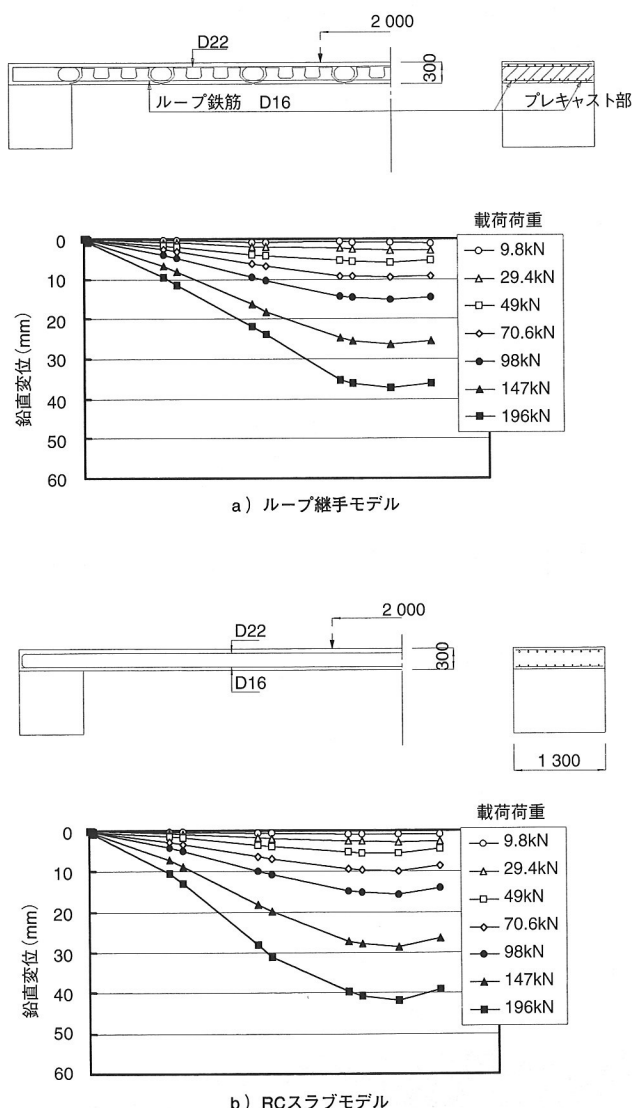


図14 荷重～たわみ分布