

鉄道高架構造物へのプレキャスト型枠の適用に関する研究 -プレストレスを導入したハーフプレキャストスラブの無支保化工法-

山 田 尚 義 福 山 雅 典
原 夏 生 三 島 徹 也
大 屋 戸 理 明*¹ 谷 村 幸 裕*¹

要 旨

鉄道高架構造物の合理化施工法として、著者らはプレキャスト型枠工法の開発を財団法人鉄道総合技術研究所と数年にわたり共同研究として実施している。現在までに、鉄道高架橋下部工に関しては、実験および実施工において、大幅な施工合理化が可能であることが確認されている。

本研究は、鉄道高架橋スラブにハーフプレキャスト部材を適用し、施工の合理化を図ることを目的としている。ハーフプレキャスト部材の適用にあたり問題となる継手部に着目した試験を行い、十分な継手耐力および疲労耐久性を有していることが確認された。また施工面からの検討を目的に、鉄道ラーメン高架橋をモデルとした実大スケールの施工試験を実施した。これにより、工期短縮についての試算を裏付ける知見を得ることができた。

キーワード 鉄道高架構造物／ハーフプレキャスト部材／無支保化工法／継手部／疲労耐久性

目 次

- | | |
|--------------|---------|
| 1. はじめに | 4. 試験施工 |
| 2. スラブの施工合理化 | 5. まとめ |
| 3. 構造性能の確認 | |

STUDY ON THE APPLICATION OF PRECAST FORM TO RAILWAY VIADUCT -THE SUPPORTLESS METHOD OF CONSTRUCTION WITH THE HALF PRECAST SLAB WHICH IS PRE-STRESSED INTRODUCED-

Takayoshi YAMADA	Masanori FUKUYAMA
Natsuo HARA	Tetsuya MISHIMA
Michiaki OYADO	Yukihiro TANIMURA

Synopsis:

We have been developing the constructing method of rigid frame elevated bridge using pre-cast form to rationalize construction with Railway Technical Research Institute. It was checked by the experiment and real construction that large construction rationalization is possible about rigid frame pier.

The purpose of this study is the rationalization of construction of rigid frame elevated bridge using half precast slab. We made sure that the basic quality and the fatigue strength have sufficient performance by the experimental results of the specimen which has the half precast slab and joint. And we constructed full scale rigid frame model bridge. By this construction test, we obtained the knowledge about construction speed.

* 1 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 コンクリート構造担当

1. はじめに

都市部では鉄道需要の増加にともなう複々線化、あるいは道路の渋滞緩和、踏み切り事故防止などを目的として、営業線の連続立体交差化事業が積極的に推進されている。しかし、一般に営業線沿線は都市化が進み、事業に必要な工事用地が十分に確保できず、工事は営業線を切り回しながら、常に営業線との近接状況下で進められているのが現状である。また、き電停止後の夜間に工事が集中して実施されることも多い。これらのことから、鉄道高架構造物の施工には工期短縮と安全な工事の実施を目指した合理的な工法の開発が強く求められている。

このような背景を考慮し、鉄道の高架橋に一般的に用いられている RC ラーメン高架橋に対して、耐震性能および経済性に優れた工法の開発を目的として、著者らはプレキャスト型枠工法を適用した合理化施工法の開発を数年にわたり行っている。現在までに、鉄道高架橋下部工に関して、高耐久性埋設型枠を使用した構造実験および実大施工実験により、大幅な施工合理化が可能であることが確認されている^{1),2)}。これらの成果は、JR 北海道新琴似高架橋において採用され、在来工法と比較して、脚柱部の工期が約 60%に短縮できることが確認されている。さらに、配筋の複雑さ故、鉄筋のユニット化等の施工合理化を阻害している部材接合部に関して、鋼繊維補強コンクリートを適用することで配筋を簡略化した構造形式を提案し、十分な定着性能が得られることを確認している³⁾。

総合的な鉄道高架橋構造物の合理化施工法を提案する上で残された課題の一つとしてスラブの施工合理化が挙げられる。著者らはスラブにハーフプレキャスト部材を適用した工期および工費の試算を行っており、施工合理化が可能であると報告¹⁾しているが、試算を裏付ける施工性能

および構造性能については未確認であった。

そこで本研究は、鉄道高架橋のさらなる施工合理化を目指し、鉄道高架橋スラブにハーフプレキャスト部材の適用を、構造性能および施工性能の両面から検討するものである。

2. スラブの施工合理化

2.1 スラブの施工方法

図-1 にハーフプレキャスト部材を適用したスラブの施工方法の概念を示す。

線路直角方向に分割したハーフプレキャスト部材を用い、中間スラブに関しては、線路直角方向にプレストレスを導入することにより、無支保でスラブの施工を実現するものである。

2.2 ハーフプレキャスト部材

本工法で使用するハーフプレキャスト部材を写真-1 に、ハーフプレキャスト部材に組み込まれたトラス鉄筋を写真-2 に示す。また、その特徴は以下のとおりである。

- ① トラス鉄筋により、施工時の外力に耐えうる薄肉のハーフプレキャスト部材を可能にし、場所打ちコンクリートとハーフプレキャスト部材との間のせん断力を伝達させる。また、現場配筋時の確実なスペーサーとしても使用できる。
- ② 線路方向にループ継手を配置することにより、2 方向スラブとして設計可能である。
- ③ 線路直角方向にプレテンション方式でプレストレスを導入することにより、ハーフプレキャストスラブ架設後の作業を、無支保で型枠・足場兼用として施工可能である。

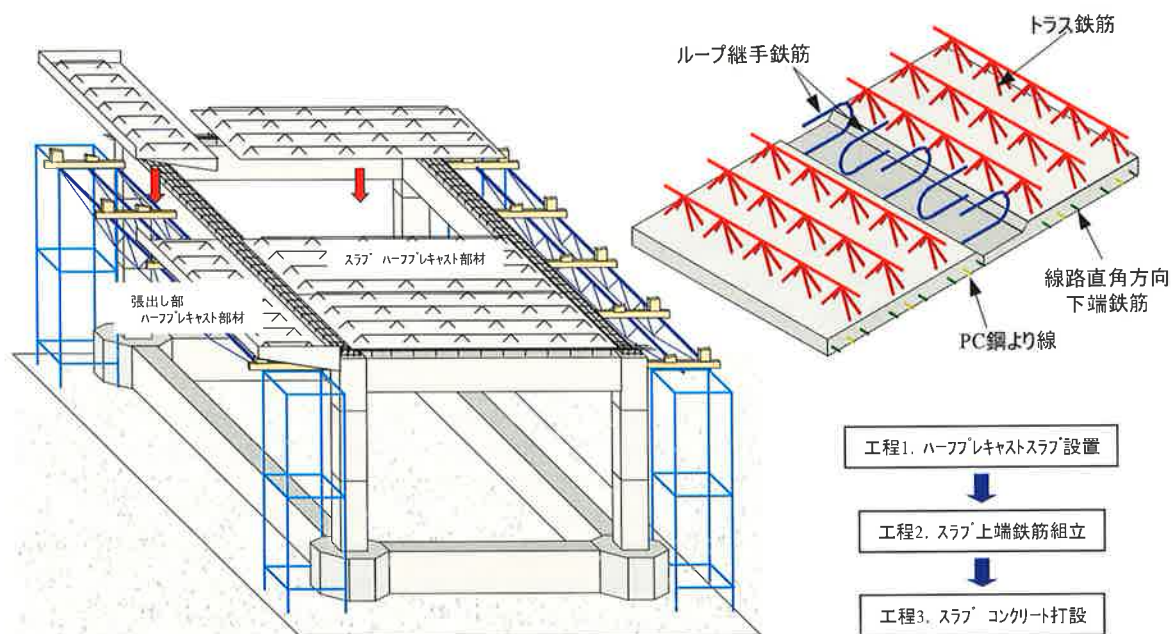


図-1 スラブ施工方法概念



写真-1 ハーフプレキャストスラブ

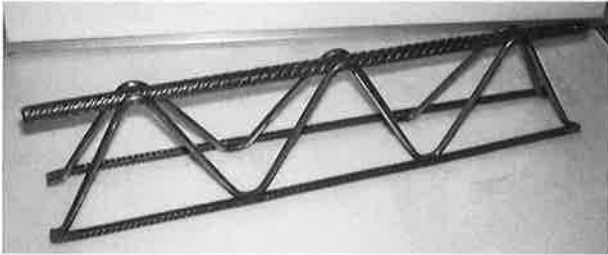


写真-2 トラス鉄筋

3. 構造性能の確認

3.1 ハーフプレキャスト部材を適用する上での課題

通常、鉄道 RC ラーメン高架橋の中間スラブは、四辺が線路方向の梁と線路直角方向の梁で支持される2方向スラブとして設計される。そのため、ハーフプレキャストスラ

ブを線路直角方向に分割する場合、その継目の接合方法が問題となる。そこでここでは、鋼道路橋で実績があり、DIN1045 にその設計方法が示されている RC ループ継手を板-板ジョイントに適用した場合の、耐力および疲労耐久性について検討した。

3.2 静的載荷試験

(1) 試験概要

試験体は、鉄道 RC ラーメン高架橋スラブを模擬したものである。図-2 に試験体配筋図を示す。試験パラメータは以下に示すような継手部の補強方法である。

- L1: 鋼橋脚で適用実績のあるループ内に補強鉄筋および線路直角方向の主鉄筋として鉄筋を配置する方法
- LF05: 今回新たに提案する方法であり、ループ内の補強鉄筋の代わりに、継手部に鋼繊維補強コンクリート(体積混入率 0.5%)を適用する方法

載荷方法は、2 点静的単調載荷で荷重の低下が認められるまで順次荷重を増加させた。なお、本試験では継手部の構造性能に着目したため、ハーフプレキャストスラブを用いず一体打ちコンクリートで製作しており、トラス鉄筋も使用していない。また、鉄筋が降伏する前にループ継手部

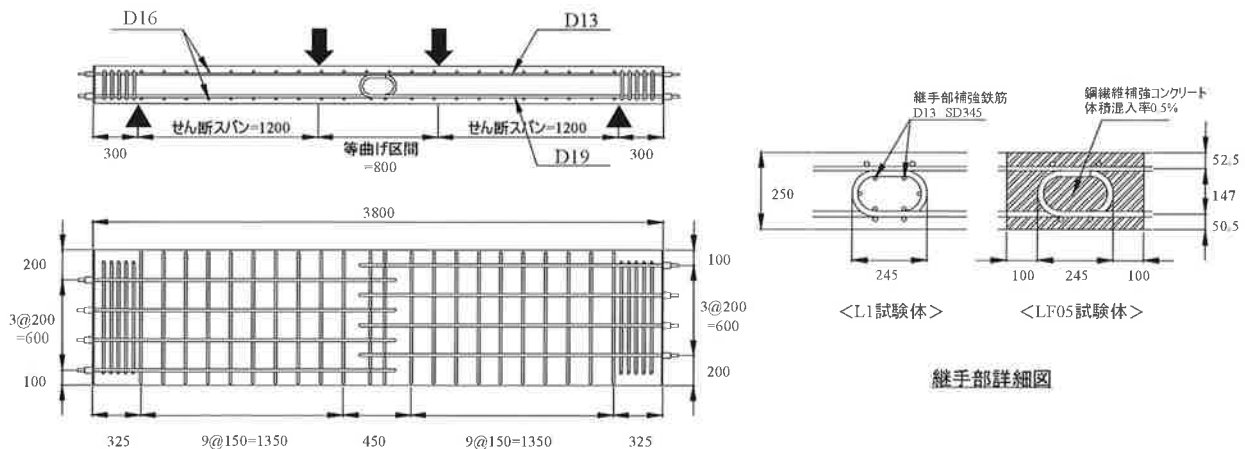


図-2 試験体図<静的載荷試験>

表-1 試験結果<静的載荷試験>

試験体	材料強度			計算値				実験値		
	コンクリート強度 (N/mm ²)	継手鉄筋		ひび割れ発生荷重 (kN)	曲げ耐力			ひび割れ発生荷重 (kN)	継手破壊耐力 (kN)	最大耐力 (kN)
		鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)		SD345降伏相当耐力*1 (kN)	主筋降伏耐力 (kN)	終局耐力 (kN)			
L	23.9	D19	712.2	14.9	59.5	118.1	119.8	22.1	72.2	83.8
F	24.1			15.0	59.4	118.2	119.9	24.5	94.4	103.3

*1:計算値は、載荷試験当日のコンクリート強度を用いてループ継手を全強として算定した。

・表中の耐力の各値はせん断力である。

*1:主筋応力が345N/mm²の時のせん断力。

で継手破壊し、耐力が低下するよう継手鉄筋には D19-USD685 を使用した。

(2) 試験結果

表-1 に試験結果一覧を、図-3 に荷重-変位関係を示す。

試験体は、どちらの補強方法も主鉄筋が降伏する前に継手部において破壊した。継手破壊耐力は、継手を考慮せず全強と仮定した断面における SD345 降伏相当耐力(主鉄筋 345N/mm²時の荷重)以上であり、一般部配筋における降伏時の耐力以上であると考えられる。また、継手破壊耐力までは、いずれの補強方法においても、継手部において角折れなどの異常な変形は見られず良好であった。

以上のことから、今回採用したループ継手およびその補強方法は、いずれも一般部における SD345 降伏耐力以上の一体性が確保されており、耐力、変形性状ともに問題ないものと思われる。

3.3 疲労耐久性試験

(1) 試験概要

試験体は 4 体で、試験パラメータは疲労寿命(繰返し回数)およびループ継手の補強方法である。継手の補強方法は静的荷重試験と同様である。

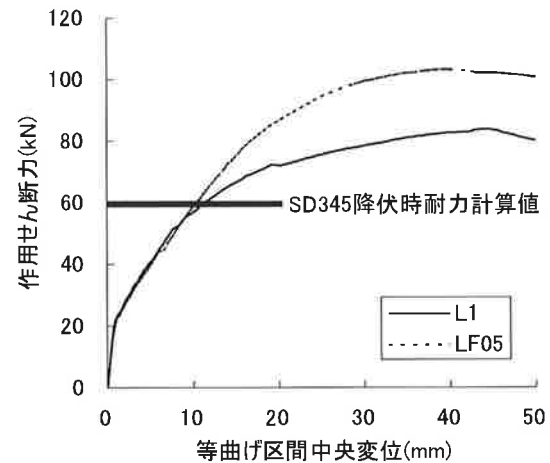


図-3 荷重-変位関係

本試験においては、ハーフプレキャスト部と場所打ちコンクリート部に分けて打設を行った。それにともないトラス鉄筋は配置したが、プレストレスの導入は行っていない。なお、打ち継ぎ面の処理は、ほうき目荒し程度とした。図-4 に疲労耐久性試験に用いた試験体を示す。

荷重方法は、アクチュエーターによる 2 点対称荷重(せん

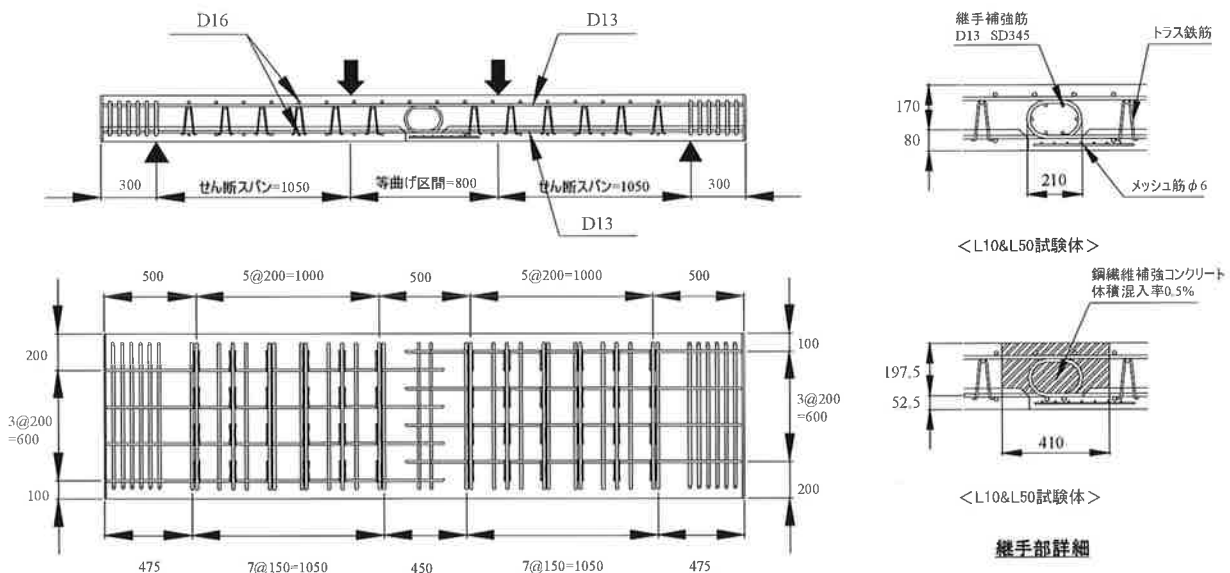


図-4 試験体<疲労耐久性試験>

表-2 試験結果一覧<疲労耐久性試験>

試験体	材料強度				下限応力*2 σ_{min} (N/mm ²)	疲労 振幅強度*2 f_{sr} (N/mm ²)	繰返し回数(回)	
	コンクリート*1		ループ継手鉄筋				計算値	実験値
	コンクリート 種類	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋径	引張強度 (N/mm ²)				
L10	普通 コンクリート	42.1	D13	539.4	66.9	354.4	77350	650340
L50		37.7			66.3	303.2	286912	2000000超*
F10	鋼繊維補強 コンクリート 体積混入率0.5%	32.5			68.4	357.7	69727	707010
F50		33.2			68.5	293.7	359821	2000000超*

*1: ループ継手の場所打ちコンクリート

*2: ループ継手は考慮せず全強であると仮定して、実作用荷重を用いてファイバーモデルにより算定

*3: 試験日材料強度を用いて二羽らの式により算定

*4: 繰返し回数200万回を越えても破壊に至らなかった。

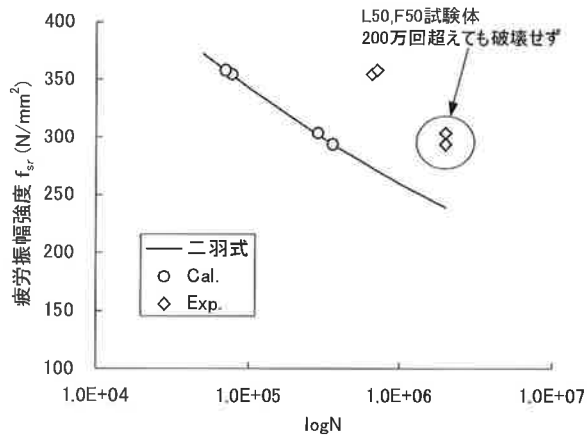


図-5 S-N関係

断スパン 1050mm, 等曲げ区間 800mm)とし, 設計繰り返し回数は, それぞれ 10 万回および 50 万回として, 疲労振幅荷重を決定した。また, 荷重波形は sin 波形, 周波数は 1Hz とした。

(2) 試験結果

①疲労耐久性

試験結果の一覧を表-2 に, 繰り返し回数と疲労振幅強度の関係を図-5 に示す。

実験値の最大モーメント作用時の鉄筋応力を, ループ継

手を考慮せず全強と仮定したファイバーモデルにより算定し, それを疲労振幅強度 f_{sr} とした。その値を用いて, 式 [1] に示す二羽らの異形鉄筋の疲労強度算定式⁴⁾を適用して繰返し回数を算定し, 実験値と比較することで疲労耐久性を評価した。

$$\text{疲労振幅強度: } f_{sr} = \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_{su}}\right) \frac{10^{\alpha}}{N^k} \quad [1]$$

$\sigma_{\min}$: 鉄筋の下限応力(N/mm²)

f_{su} : 鉄筋の引張強度(N/mm²)

$$\alpha = k_0 (3.17 - 0.003D) \quad [2]$$

N : 繰返し回数

ただし $N \leq 200$ 万回

D : 鉄筋径(mm)

k_0 : 鉄筋の節の形状に関する係数 1.02

L シリーズにおいては, ハーフプレキャストパネル間の継目付近の鉄筋の疲労破断により, F シリーズにおいては, 場所打ち部における鋼繊維補強コンクリートと普通コンクリートの境界面付近の鉄筋の疲労破断により破壊にいたった。なお, L50 および F50 試験体は, 繰返し回数 200 万回を超えても疲労破壊に至らなかった

いずれの補強方法を用いた試験体も, 計算値と比較して

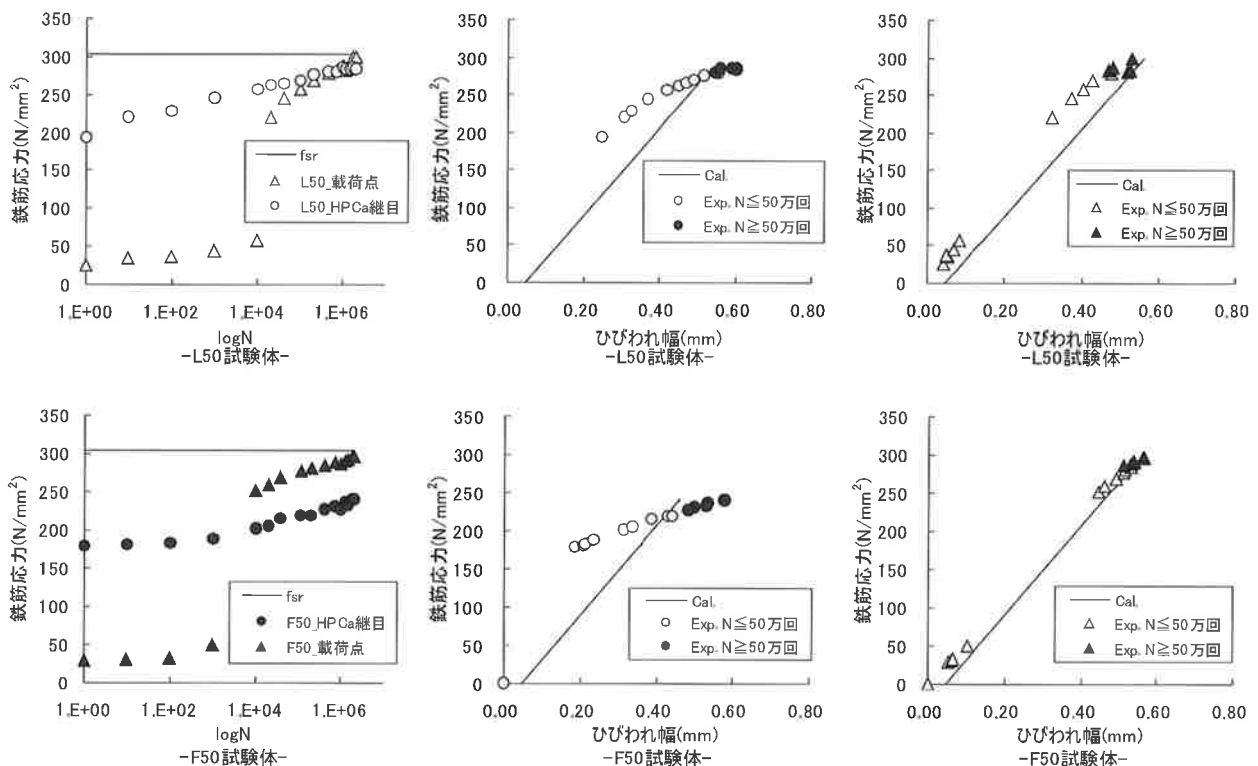


図-6 継手鉄筋応力の遷移

—ハーフプレキャスト間の継目位置—

—載荷点位置—

図-7 ひびわれ幅と鉄筋応力の関係

安全側の結果となり、十分な疲労耐久性を有しているものと思われる。また、目視によりハーフプレキャスト部材と場所打ちコンクリート部との境界部で剥離現象などは確認できなかったことから、疲労限界状態においてもスラブの一体性は保たれていると考えられる。

②ひびわれ幅

図-6 に振幅荷重ピーク時におけるループ継手鉄筋の応力の遷移を示す。図は、L50 および F50 試験体のハーフプレキャストスラブ間の継目位置と載荷点のループ継手鉄筋ひずみの実測値から求まる鉄筋応力である。

繰り返し回数が増加するにつれ、ひずみから求まる鉄筋

応力は疲労振幅強度 f_{gr} に漸近していく。これは、付着に起因するコンクリートの引張応力負担が減少するためと考えられ、およそ 100 万回で定常状態となったといえる。しかし、鋼繊維補強コンクリートにより補強してある区間 (F50 試験体のハーフプレキャスト間継目部) の鉄筋応力は、200 万回相当に達しても疲労振幅強度に漸近しなかった。これは、鋼繊維による引張力の負担、および鋼繊維のひびわれ抑制効果に起因する鉄筋とコンクリートの付着性能の向上が考えられる。

π ゲージによるひびわれ幅実測値と鉄筋ひずみから求めたひびわれ幅計算値の鉄筋応力との関係を、図-7 に示す。なお、ひびわれ幅は土木学会コンクリート標準示方書に準じて算定した³⁾。図より、いずれの補強方法においても、定常状態におけるひびわれ幅の検討は既往の算定式で概ね評価できるといえる。また、懸念されたハーフプレキャスト間の継目部においても、疲労寿命の計算値相当までは、既往のひびわれ幅算定式により安全側に評価できることが確認された。

4. 試験施工

4.1 試験概要

図-8 に試験施工のモデル構造物を示す。モデル構造物は、一般的な 2 柱式 RC ラーメン高架橋であり、中間スラブの線路方向純スパンは 7.3m、線路直角方向純スパンは 4.3m である。

図-9 に本試験施工で使用したハーフプレキャスト部材

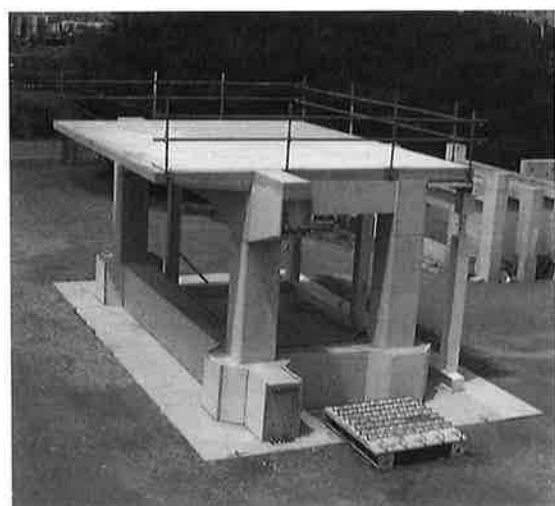


写真-3 試験施工完成状況

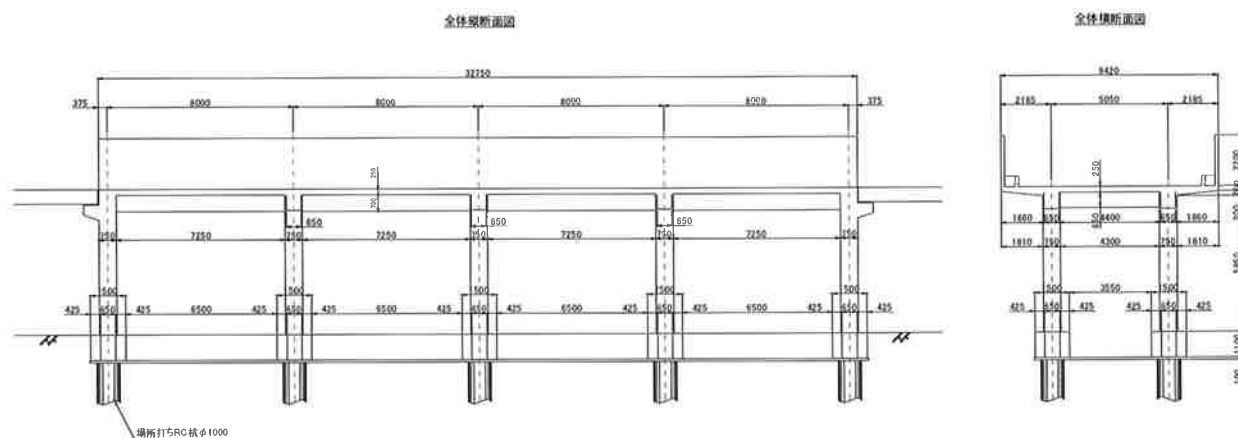


図-8 モデル構造物

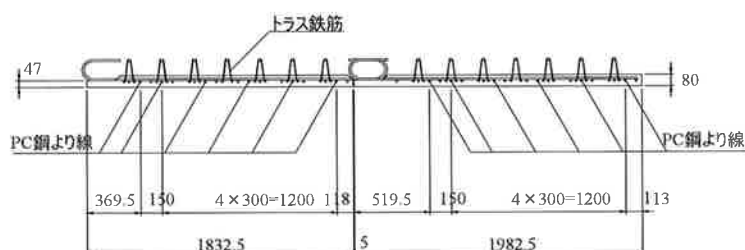


図-9 ハーフプレキャスト部材



①張出しスラブ支保工組立



②中間スラブ設置



③パネル間継目処理



④張出しスラブ設置



⑤スラブ上端鉄筋組立



⑥コンクリート打設

写真-4 施工状況

(中間スラブ)を、表-3 にその諸元を示す。中間スラブは、線路方向に4分割し、線路直角方向にプレテンション方式でプレストレスを導入した(写真-5)。なお、プレストレス量は、平面保持を仮定し、トラス鉄筋の受け持つ応力度も考慮して算定した。また、プレストレス緊張時の管理はPC鋼より線の伸びにより行った。

4.2 施工結果

写真-3 に試験施工の完成写真を、写真-4 に施工状況を示す。各施工ステップの詳細および得られた知見を以下に示す。

表-3 ハーフプレキャスト部材諸元(中間スラブ)

線路方向 mm	断面諸元		プレストレス		脱型時 コンクリート 強度 N/mm ²
	線路直角 方向 mm	部材厚 mm	PC鋼より線 規格	緊張時応力 N/mm ²	
1787.5 ~1982.5	4400	80	JIS G 3636 SWPR 7BN	1326.7	43.5



写真-5 プレストレス導入状況

す。

①張出しスラブ支保工の設置

線路方向の柱間において支保工を施さなければ、重機等の出入りは可能であると考え、本試験施工において、張出し部に関してはH鋼(300×300)により支保を行った。重機等の出入りを可能とすることで、無支保である中間スラブのスペースを有効に活用できると考える。

②④ハーフプレキャスト部材の設置

ハーフプレキャスト部材の設置は、クレーンおよび高所作業車により施工したため、足場の組立・解体が不要であった。また、中間スラブに関しては、プレテンション方式によるプレストレスを導入しているため、支保工の組立・解体も不要である。そのため、大幅な合理化を実現できることが確認できた。

中間スラブ架設時には、ハーフプレキャストスラブ継手部において、一部継手鉄筋がパネルコンクリートと干渉した。そのため、人力ではハーフプレキャスト部材間の隙間を塞ぐことが出来ず、4枚のパネルを架設終了後、レバーブロックを用いてスラブ間の隙間を塞いだ。さらなる施工能率向上のためには、ハーフプレキャスト継手部の製作時の管理規準等を整理する必要があると思われる。

③パネル間継目処理

耐久性を考慮して、鉄筋のかぶり厚確保のため、ハーフプレキャストスラブ間の継目には、クロロブレンゴムとエ

ポキシ樹脂系接着剤により処理を行った。ハーフプレキャスト部材の継目処理方法概念を図-10に示す。また同様に、ハーフプレキャストスラブと上層梁の接合面においても、止水テープおよびエポキシ樹脂系接着剤により処理を行った。そのため、打設時にコンクリートが漏出することにはなかった。また、クロロプレンゴム等の厚さにて誤差吸収することも効果的であると思われる。

⑤スラブ上端鉄筋組立

架設したハーフプレキャスト部材がそのまま型枠兼用足場となる。また、トラス鉄筋天端にスラブ上端鉄筋を配置することで、そのまま設計位置となり、スペーサー等が不要であるため、作業が容易であった。

⑥コンクリート打設

設計上ハーフプレキャスト部材には、プレストレス導入時に所定の偏心量を与え5.3mmの上げ越しを設けている。これは打設コンクリートの自重によるたわみ量を考慮したものである。コンクリート打設終了後、スパン中央部のたわみ量は5mm程度であり設計値と概ね一致したが、製造段階での上げ越し量の誤差による部材間の目地違いが見られた。ハーフプレキャストは板状の薄肉の部材であるため、プレストレス導入時および養生環境に影響を受けやすいと考えられる。製作・養生・運搬を含めた管理規準をまとめる必要があると考えられる。

継手部補強方法に関して、鋼繊維補強コンクリートを適用する場合も行ったが、継手部の打設のみでは、施工の合理化がはかれるとは言いがたいが、柱・梁部材接合部の鋼繊維補強³⁾と同時に打設することで全体の合理化を得ると考える。

著者らは、モデルケースを設定して、工期・工費についてプレキャスト型枠工法と在来工法を想定した試算を行っている¹⁾。その中には、ハーフプレキャストスラブの

適用も含まれている。本試験施工の結果から、その試算は概ね評価できることが確認できた。

4. まとめ

本研究は、さらなる鉄道高架橋の合理化施工を目指し、プレストレスを導入したハーフプレキャストスラブの無支保工法を適用を検討したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① ループ継手部の耐荷性状を確認するため、継手部の補強方法を実験変数とした静的載荷試験を行った。新たに提案した鋼繊維補強コンクリートによる補強においても、継手部の耐力は、一般部のSD345降伏相当耐力以上であることが確認された。
- ② 疲労耐久性試験において、実験値と計算値の比較により、ループ継手を有するハーフプレキャストスラブの疲労耐久性は問題なく、疲労限界状態まで部材の一体性が確保されることが確認された。またひびわれ幅に関して、既往の算定式により評価可能であること、パネル間の継目においても過大とならないことが確認された。
- ③ 試験施工の結果から、プレストレスを導入したハーフプレキャスト部材を適用することにより、鉄道高架橋スラブの施工を無支保で行うことができ、さらなる合理化が可能であることが確認された。

謝辞：本研究は、(財)鉄道総合技術研究所と前田建設工業(株)の共同研究として実施したものです。また、本研究のうち、疲労耐久性試験については前田建設工業(株)と(株)日本カイザーによって、(財)鉄道総合技術研究所へ委託したものです。関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中島ら：鉄道高架構造物へのプレキャスト型枠の適用に関する研究－工法の概念と施工性確認試験－，前田建設技術研究所報 Vol.39，pp25～32，1998.9
- 2) 小原ら：鉄道高架構造物へのプレキャスト型枠の適用に関する研究－ステンレス鋼繊維混入プレキャスト型枠を適用した部材の構造性能－，前田建設技術研究所報 Vol.39，pp33～40，1998.9
- 3) 近藤ら：鉄道高架構造物の施工の合理化に関する研究，前田建設技術研究所報 Vol.41，pp1～8，2000.9
- 4) 二羽淳一郎ほか：異形鉄筋の疲労強度算定式，土木学会論文集，第354号/V-2，1985年2月
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成8年制定〕設計編，1996.8

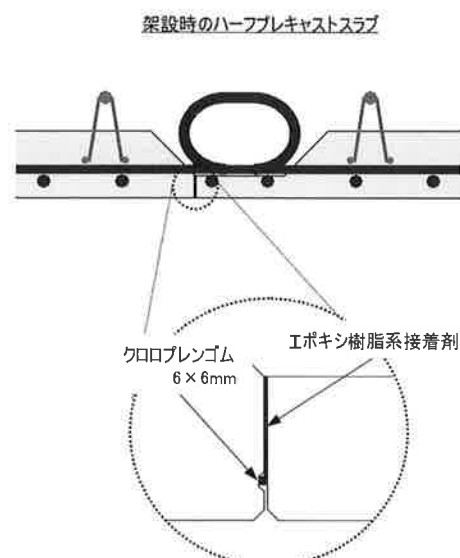


図-10 ハーフプレキャストスラブ継目処理方法概念