

ハーフプレキャスト単純合成スラブ桁の実用化に対する研究

川田建設 (株) 技術部技術課

正会員 ○渡邊 佳

川田建設 (株) 技術部

正会員 小西 哲司

東急建設 (株) 土木技術設計部

服部 尚道

(財) 鉄道総合技術研究所

正会員 佐藤 勉

ジェイアール西日本コンサルタンツ (株)

北後 征雄

1. はじめに

工場にて製作されたハーフプレキャストスラブを現場へ架設した後、場所打ちコンクリートを打設して一体化させて用いる合成スラブ桁は、①部材の軽量化、②現場における工期短縮、③一定した品質確保が図られるとともに、桁上面が場所打ちコンクリートであるため、④桁高の範囲内で高さ調整が可能である等の特長を有している。そのため、桁高制限の厳しい軌道直結型の鉄道橋などへの適用にも有利であると考えられる。

そこで、本文は、本構造形式のスラブ桁の実用化を念頭に、実物大モデルによる疲労載荷実験を行ったのでその報告ならびに、スパン毎の標準断面について検討した結果を報告するものである。

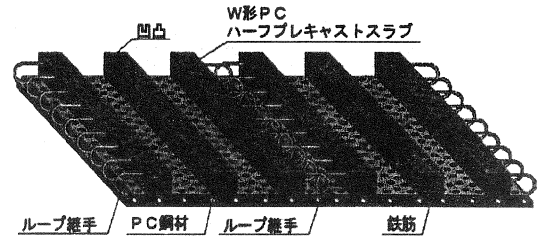


図-1 ハーフプレキャストスラブの構造

2. ハーフプレキャスト合成スラブの構造

ハーフプレキャスト合成スラブ (以下 HPCa 合成スラブ) は、図-1 に示すようなハーフプレキャストスラブ (以下 HPCa スラブ) に場所打ちコンクリートを打設して硬化後、一体となって橋面荷重や活荷重に抵抗するものである。

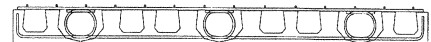
また、HPCa スラブの構造は、支間方向は型枠・支保工の簡略化を目的として、プレテンション方式によりプレストレスを導入したPC構造、同直角方向はRC構造としている。HPCa スラブ直角方向突き合わせ部における下縁側鉄筋は、施工性を考慮してループ状の重ね継手構造 (以下ループ継手) を採用している。なお、打継面には一体性を確保するため円形の凹凸 (高さ 4~5mm, 径 40~50mm) を設けている。

図-2 に HPCa 合成スラブ橋の施工概念図を示す。

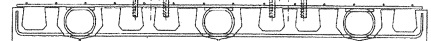
① HPCa スラブ架設



② 上側鉄筋組立



③ レール敷設



④ コンクリート打設

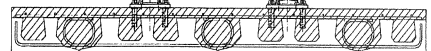


図-2 HPCa 合成スラブ橋の施工概念

3. ハーフプレキャスト合成スラブの疲労載荷実験

上記構造を有する HPCa 合成スラブの(1)ループ継手部の疲労性状確認および、(2)繰返し荷重を受ける HPCa 合成スラブにおいて HPCa スラブと場所打ちコンクリートの打継面の一体性を確認することを目的として、実物大試験体による疲労載荷実験を行った。

3. 1 試験体形状および実験概要

(1) ループ継手部の疲労性状確認実験 (以下 series-1)

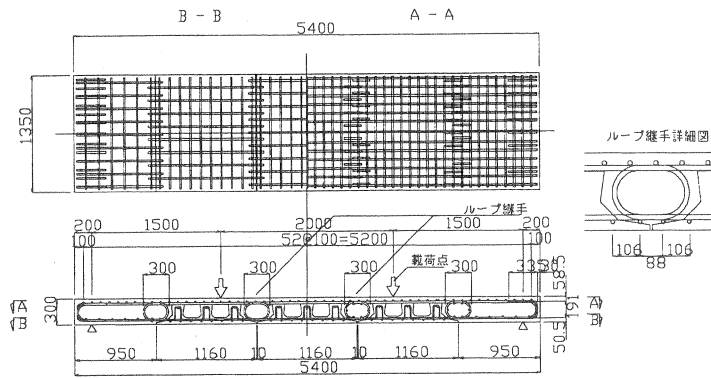


図-3 ループ継手試験体構造図 (No.1~4)

図-3に試験体構造図を示す。荷重の載荷は、二点一方方向載荷とし、等曲げ区間内にループ継手を2箇所配置した。試験体は、形状、配筋および使用材料仕様を同一にして4体製作した。各試験体の載荷要領を表-1に示す。荷重 (1.0Pd=107.8kN) は設計列車荷重 (EA-17) 載荷時とした。

表-1 載荷荷重および載荷要領(series-1)

試験体 No.	No.1	No.2	No.3	No.4
載荷方法	静的載荷	繰返し載荷		
載荷ステップ	1.0Pd×3回 2.0Pd×3回 3.0Pd×3回 ・ 破壊まで	I 1.0Pd×27,000回 II 196kN×~破壊	1.5Pd×~破壊 -	1.0Pd×2,000,000回 196kN×~破壊

(2) 水平打継面の一体性確認実験 (以下 series-2)

図-4に試験体構造図を示す。HPCa 合成スラブの支間方向に、HPCa スラバー一枚幅分を切り出した梁モデルとし、形状、配筋および使用材料仕様を同一にして2体製作し、載荷要領は表-2に示すとおりである。荷重の載荷は、ループ継ぎ手試験体同

表-2 載荷荷重および載荷要領(series-2)

試験体 No.	No.5	No.6
載荷方法	静的載荷	繰返し載荷
載荷ステップ	I 1.0Pd×3	1.0Pd×2,000,000
	II 1.25Pd×3	1.25Pd×1,500,000
	III 1.5Pd×3	1.5Pd×835,273
	IV 2.0Pd×3	静的載荷にて破壊まで
	V ~破壊まで	-

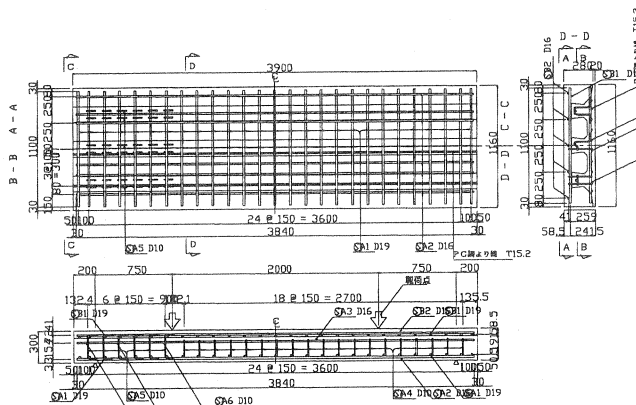


図-4 水平打継面の一体性確認実験試験体構造図 (No.5,6)

様に二点一方向荷重で行い、荷重 (1.0Pd=293.3kN) は設計列車荷重載荷時とし、設計繰返し回数は曲げモーメントによる被害度 (修正マイナー則による) を考慮して荷重ステップを決定した。

3.2 実験結果および考察

(1) ループ継手部の疲労性状確認実験(series-1)

表-3に試験結果を示す。静的荷重実験において降伏荷重および最大荷重の実験値はいずれも解析値にほぼ一致しており、解析方法は適当であったと考えられる。また疲労荷重実験においてはいずれの試験体においても一般部主鉄筋の疲労破断であり、ループ継手部の鉄筋破断や引き抜きは見られなかった。

図-5にNo.4試験体の荷重-変位図を示す。設計荷重載荷時の荷重回数200万回でも発生変位は解析値を下回っており、また、継手部における角折れは観察されなかった。

表-3 試験結果(series-1)

試験体No.	No.1		試験体No.	No.2	No.3	No.4			
荷重方法	静荷重		繰返し荷重						
	解析値	実験値	載荷荷重 (kN)	下限值		9.8			
	259.7	275.0		上限値	107.8	196.0	166.6	107.8	196.0
降伏荷重 (kN)	30.3	34.2	解析値	応力振幅 (N/mm ²)	—	2779	2379	—	2787
降伏変位 (mm)	302.8	320.0		載荷回数 n	27,000	26,900	321,200	2,000,000	17,600
最大荷重 (kN)	212.1	—		疲労寿命 N	573,000	27,000	321,200	573,000	27,000
最大変位 (mm)	—	—		被害度 n/N	0.004	0.996	1	0.349	0.651
破壊形態	曲げ圧縮破壊			実値	応力振幅 (N/mm ²)	—	2433	2047	—
				載荷回数 n	27,000	202,850	419,610	2,000,000	225,000
				破壊形態	全て引張鉄筋一般部の疲労破断				

図-6にNo.2~No.4試験体鉄筋の完全片振時疲労強度をS-N線図上にプロットした結果を示す。

実測値による完全片振時の疲労強度は、当該ステップ処女荷重時の下限および上限荷重載荷時の鉄筋ひずみをもとにグッドマン線図により求めた。いずれの試験体においても実測値および解析値は鉄道標準²⁾により与えられる疲労強度をそれぞれ2~14%, 5~25%程度上回っているが、二羽らの式³⁾により与えられる疲労強度に対しては解析値がほぼ等しい値となった。実測値は鉄筋の疲労破断位置に近いループ鉄筋のひずみをもとに推定したものであることから実際の破断位置における鉄筋の変動ひずみは解析値に近いと思われる。

(2) 水平打継面の一体性確認実験(series-2)

表-4に試験結果を示す。なお、No.6試験体は繰返し荷重ステップ (I~III) 終了時点で破壊に至らなかったため、静的破壊まで荷重を行った。表-4に示すようにNo.5, No.6試験体ともせん断破壊した。破壊荷重はHPCaスラブ突起内に配置されたせん断鉄筋を考慮して算出した解析値を約6%程度上回っており、試験

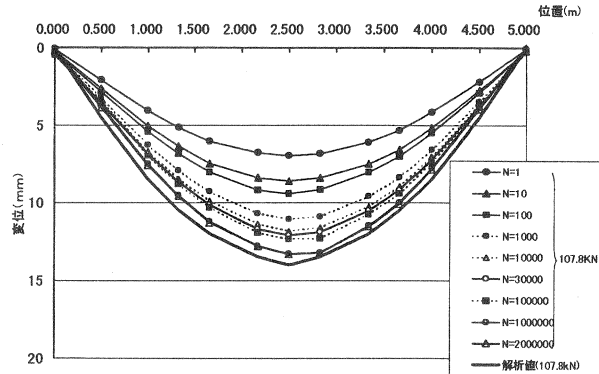


図-5 No.4試験体荷重-変位図

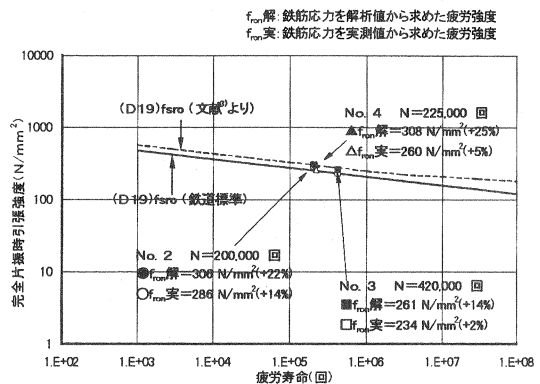


図-6 S-N線図

体コンクリート強度と比例関係にあると考えられる。

図-7に示す No.6 試験体のひび割れ発生状況より、ひび割れは試験体全般に渡って発生しており、ひび割れ分散性は良いと考えられる。HPCa スラブと場所打ちコンクリート間の打継面

表-4 試験結果(series-2)

試験体No.		No.5		No.6	
終局荷重 (kN)		解析値	実験値	解析値	実験値
曲げモーメント着目		967		999	
せん断力着目	せん断鉄筋無視	521	898	582	972
	せん断鉄筋考慮	849		910	
最終破壊形態		-	せん断破壊	-	せん断破壊

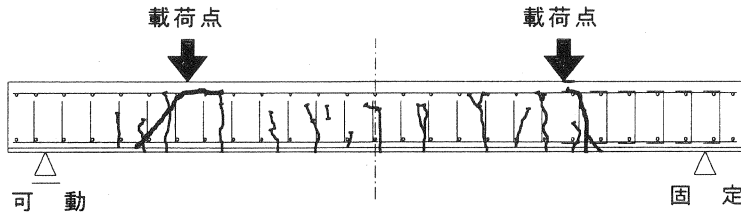


図-7 No.6 試験体ひび割れ図

に沿ったひび割れは確認されなかった。

図-8に No.6 試験体のせん断スパン部の断面内鉄筋ひずみ分布を示す。同一断面内の鉄筋ひずみ分布は、ややばらつきはあるものの、ほぼ直線関係にあると考えられる。

3.3 実験結果のまとめ

本実験により、以下のことが確認できた。

(1) ループ継手部の疲労性状確認実験(series-1)

1) 繰返し载荷により引張鉄筋は疲労破断したが、一般部において生じており、また全ての試験体でループ継手における鉄筋の破断や引き抜きは生じていない。

2) 曲げひび割れは HPCa スラブの突起の位置に関係なく分散して発生している。また、HPCa スラブと場所打ちコンクリートの打ち継ぎ面に沿ったひび割れは確認されなかった。

3) 载荷回数の増加に伴ってたわみは増加する傾向にあるが、ループ継手部での角折れは見られなかった。

4) 実载荷回数から得られた鉄筋の疲労強度は、鉄道標準²⁾により与えられる設計疲労強度を上回っている。

(2) 水平打継面の一体性確認実験(series-2)

1) 繰返し载荷後の同一断面内の鉄筋のひずみ分布は直線である。また、実験後に試験体から採取したコアの状況を確認したが、ひび割れは打継面を貫通しており、打継面でのせん断ずれは生じていなかった。以上より、打継面の一体性は繰返し载荷後も保たれていると考えられる。

以上、今回の実験結果から、提案したループ継手構造は、疲労性状に関して所要の性能を有していること、また、繰返し载荷によって HPCa スラブ・場所打ちコンクリート間において、せん断ずれが曲げおよびせん断破壊に先行して生ずることはないことが確認できた。

4. ハーフプレキャストスラブ橋の標準化に対する検討

以上の結果をもとに本 HPCa スラブの標準化に対して検討を行った。

適用対象構造物は図-9に示す単純スラブ桁橋である。

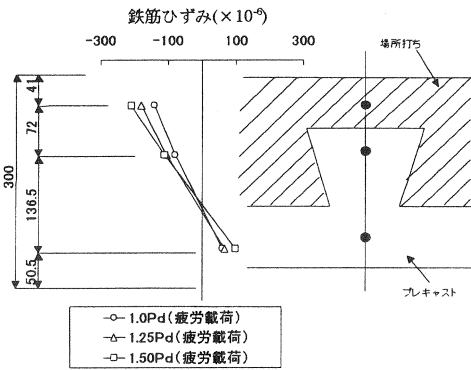
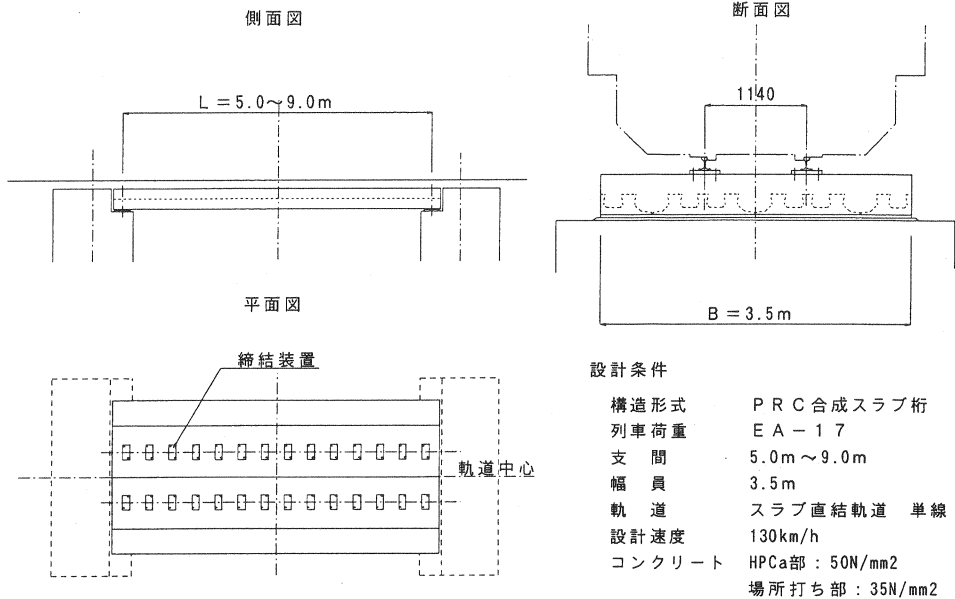


図-8 断面内鉄筋ひずみ分布



設計条件

構造形式	PRC合成スラブ桁
列車荷重	E A - 1 7
支間	5.0m ~ 9.0m
幅員	3.5m
軌道	スラブ直結軌道 単線
設計速度	130km/h
コンクリート	HPCa部: 50N/mm ² 場所打ち部: 35N/mm ²

図-9 単純スラブ桁橋一般図

4.1 断面計算方法

HPCa 部材を構造部材の一部として機能させる場合、施工ステップに応じて変化する HPCa 部材および場所打ち部分の応力度を累積し、ひび割れの有無などを評価しなければならない。

そこで、2方向多種類のひずみ分布が考慮できるファイバーモデル⁹⁾を用いて断面計算を行った。なお、クリープ、乾燥収縮によるコンクリート、鋼材の応力度は、ファイバーモデルに変動ひずみを直接与え、鋼材との内部応力のつり合いをもとに算出した。

計算ステップを表-5に示す。

4.2 計算結果および標準化案について

計算結果を表-6に、また、標準化案の桁高-スパン関係を図-10に、HPCa スラブ断面図を図-11に示す。

計算は表-5に示すように、ステップI~IIIの荷重等に対してはHPCa スラブ断面で、ステップIV~Vの荷重等に対しては、HPCa 合成スラブ断面で抵抗するものとして行った。

標準化案については、永久荷重による HPCa スラブ断面の応力

表-5 計算ステップ

断面	考慮する荷重および内部変動ひずみ
I	・プレストレス ・HPCaスラブ自重
II	・クリープ、乾燥収縮
III	・場所打ちスラブ ・コンクリート重量
IV	・構面荷重 ・クリープ、乾燥収縮
V	・変動荷重(列車荷重)

表-6 計算結果

		スパン(m)	5	6	7	8	9	
		合成スラブ最小厚(mm)	300	360	450	520	600	
		HPCa スラブ厚: h3(mm)	230					310
終局	曲げ	$M_d(tf \cdot m)$	22.3	30.7	41.4	52.4	65.1	
		$M_{ud}(tf \cdot m)$	51.1	66.3	88.7	105.8	125.7	
		$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud}$	0.52	0.56	0.56	0.59	0.62	
	せん断	$V_d(tf)$	20.6	23.0	25.5	28.6	30.7	
		$V_{yd}(tf)$	36.3	39.6	43.9	46.9	50.0	
		$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd}$	0.68	0.70	0.70	0.73	0.74	
疲労	P C	$\sigma_{prd}(N/mm^2)$	48.8	59.7	58.2	38.9	56.8	
		$f_{prd}(N/mm^2)$	64.6	70.3	75.1	74.4	75.0	
		$\gamma_i \cdot \sigma_{prd} / (f_{prd} / \gamma_b)$	0.83	0.93	0.85	0.58	0.83	

ただし、 $\gamma_i=1.2$ (終局限界状態)、 $\gamma_i=1.2$ (疲労限界状態)、 $\gamma_b=1.0$ とする。

度, 列車荷重による鋼材変動応力度とスラブ全厚の関係等のバランスを考慮しながら設定した。

また, HPCa スラブ標準化にあたっては, 底版厚さ (h1) と端部形状 (h2) のみを変化させ, 突起部の形状寸法を固定することで型枠を併用し, HPCa スラブ製作時の効率化が図られるように考慮した。

以上の検討結果より, スパン5~7mをタイプ1, スパン8~9mをタイプ2とした2種類の標準化断面を提案した。

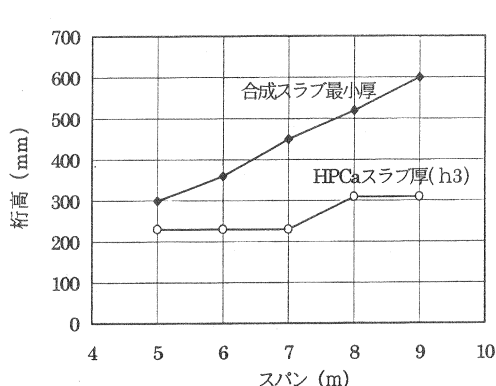
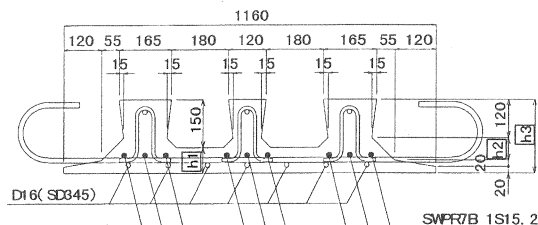


図-10 桁高-スパンの関係



スパン(m)	5	6	7	8	9
断面種類	タイプ1			タイプ2	
h1(mm)	80			160	
h2(mm)	70			150	
h3(mm)	230			310	

図-11 HPCa スラブの標準化断面

5. おわりに

従前からフルプレキャスト PC 部材を鉄道橋に用いた例は数多くあったが, 高速における良好な走行性確保の面から, クリープによるそりおよび列車荷重によるたわみ制限等の問題も一方では生じていた。また軌道面と桁下空頭の制約条件により桁高が制限される場合などにおいては, レールレベルを固定した上で桁高の高さ調整ができれば構造上非常に有利であると思われる。

今回提案した HPCa 合成スラブ桁は, 冒頭で述べたようにクリープによるそりが少ない PRC 構造であり, また桁上面が場所打ちコンクリートであるため, 最小スラブ厚を確保した上でレールレベルにあわせてスラブ厚を調整できることから, 短スパンのスラブ桁ではあるものの軌道縦曲線を変更することなく構造物の構築ができ, 架け替え工事を含めて有効であると考えられる。

また, これまで HPCa 合成部材は計算が煩雑となるため一般に簡略法が用いられていたが, これに対しても筆者らが提案した解析手法を用いることで, 施工ステップに応じた各断面の応力度等を精度良く算定できるとともに, 適用範囲を PRC 構造に広げた上で HPCa 合成部材の実用化への提案ができたと考えている。

良好な品質管理の元で製作された HPCa 部材を用いた本構造は, コンクリート構造物の耐久性の向上と, LCCの低減にも寄与するものと考えている。

【参考文献】

- 1) 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, 鉄道総合技術研究所, 1993.3
- 2) 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, 1992
- 3) 二羽, 前田, 岡村: 異形鉄筋の疲労強度算定式, 土木学会論文集, No.345/V-2, 1985.2
- 4) 王, 野田, 小西, 玉井ら: ハーフプレキャスト合成スラブの疲労載荷実験, 土木学会一プレキャストコンクリート部材の力学的特性に関するシンポジウム講演論文集, pp.45-52, 2001.6
- 5) 服部, 増田, 得能, 玉井: U形ハーフプレキャスト部材を用いた合成梁の曲げ性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.781-786, 1999.7