

論文 高性能軽量コンクリートを用いた PC 定着部の耐荷特性

田村 聖*1・濱田 謙*2・前堀 伸平*3・二羽淳一郎*4

要旨: 軽量コンクリートは、普通コンクリートと比較して引張強度特性が低下することが知られている。そこで、高性能軽量コンクリートを用いた PC 定着部の耐荷特性を実験的に検証した。供試体の寸法や配筋等は、3次元弾性 FEM 解析により決定した。その結果、通常より支圧面積の大きい低強度用定着板を用いて適切に補強筋を配置することにより、定着体直下に発生する割裂応力度および支圧応力度は抑制され、ひび割れ特性および割裂補強筋に作用する応力度を飛躍的に改善できることが明らかとなった。

キーワード: 高性能軽量コンクリート, PC 定着部, 定着板, 支圧強度

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート（以下、PC と称す）橋梁の軽量化を図ることを目的とし、構造面および材料面からの技術開発が積極的に進められている。構造面においては、波形鋼板ウェブ PC 橋等の複合構造の適用が考えられ、材料面では、人工軽量骨材を用いたコンクリートの適用が考えられる。

最近、従来とは異なり、高強度で低吸水性を示す高性能軽量骨材（以下、HLA と称す）が開発され注目されている¹⁾。さらなる PC 橋梁の軽量化を図るため、この HLA コンクリートと波形鋼板ウェブを組み合わせて用いると、PC 橋の死荷重は通常の PC 箱桁橋と比較して 54% にまで低減されることが試設計の結果として検証されている²⁾。桁重量がこの程度まで低減されると、基礎および下部構造に対する負担も飛躍的に低減することができ、下部工の建設コストを大幅に削減することができる。また、PC 橋の適用支間長を拡大することも可能となる。

しかしながら、軽量コンクリートの割裂強度、

支圧強度等の力学的特性は普通コンクリートと比較して低下することが知られているので、HLA コンクリートを PC 構造に適用するに際しては、PC 鋼材定着部の耐荷特性を十分に検討しておく必要がある。

そこで、本研究では、HLA コンクリートを用いた PC 鋼材定着部の耐荷特性を明らかにすることを目的として、供試体上面に定着体を取り付けた定着部モデル供試体の支圧載荷試験を行った。また、供試体の形状寸法や配筋等を決定するために 3次元弾性 FEM 解析を行い、割裂応力の発生状態などを実験結果と比較検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの物性

実験では、普通コンクリートおよび HLA コンクリートの 2 種類を用いた。どちらのコンクリートも、材齢 28 日での目標圧縮強度を 50N/mm^2 と設定した。

使用した材料の物理特性と示方配合を表-1

*1 ドーピー建設工業（株）技術センター 研究員（正会員）

*2 ドーピー建設工業（株）技術センター 主任研究員 工修（正会員）

*3 太平洋セメント（株）研究本部 清澄研究所 研究員 工修（正会員）

*4 東京工業大学教授 工学部 土木工学科 工博（正会員）

表-1 使用材料の物理特性

使用材料	種類	密度 (g/cm ³)	物性または成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.13
細骨材	S	大井川産川砂	2.62 ^{*1}
	G	大井川産川砂利	2.65 ^{*1}
粗骨材	HLA	造粒型高性能人工軽量骨材	1.23 ^{*2}
			最大骨材粒径15mm 24時間吸水率 2.06%
AE剤	AE		
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

*1: 表乾状態 *2: 絶乾状態

表-2 コンクリートの示方配合

呼名	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
				W	C	S	G	HLA		
NC ^{*1}	48.0	44.0	4.5	155	323	804	1034	---	0.6	0.004
HLA ^{*2}	32.9	54.1	3.6	147	446	957	---	381	0.65	---

*1: 普通コンクリート *2: HLAコンクリート

表-4 供試体の概要

供試体 No.	コンクリート種別	支圧板タイプ	標準区間 L (mm)	補強区間 L' (mm)	割裂補強筋 (径, 間隔)	
					A _{s1}	A _{s2}
TYPE-1	NC ^{*1}	標準 ^{*3}	L=L'=1600		A _{s1} =A _{s2} =D19@100	
TYPE-2	HLA ^{*2}	標準 ^{*3}	800	800	D19@100	D22@50
TYPE-3	HLA ^{*2}	低強度用 ^{*3}	700	900	D19@100	D19@75
TYPE-4	HLA ^{*2}	低強度用 ^{*3}	1200	400	D19@100	D19@50

*1: 普通コンクリート *2: HLAコンクリート *3: 表-5参照

使用した材料の物理特性と示方配合を表-1 および表-2 に示す。HLA コンクリートの粗骨材には絶乾密度 1.2(g/cm³)の HLA を用い、細骨材には川砂を用いた。また、50N/mm² 以上の高強度を得るため、水セメント比(W/C)は 32.9%とした。

材齢 28 日で実施したコンクリートの強度試験結果を表-3 に示す。圧縮強度は、目標に達している。HLA コンクリートの単位重量は 19.1(kN/m³)であり、軽量化が図られている。

2.2 供試体の概要

(1) 寸法と配筋

供試体の寸法および配筋図を図-1 に示す。また、供試体の概要を表-4 に示す。実験パラメーターとしては、前項で示したコンクリートの種類、支圧板のタイプ、補強鉄筋量とし、合計 4 体の供試体を作製した。

すべての供試体の形状寸法は、幅 800mm、高さ 1600mm、厚さ 400mm とした。厚さは、定着部材の最小厚さである。幅および高さは、発生する局部応力が供試体の大きさに影響を

表-3 コンクリートの物性

呼名	コンクリート強度 (N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)	単位重量 (kN/m ³)
	圧縮強度 f' _c	引張強度 f _t		
NC ^{*1}	53.4	3.47	34.9	23.4
HLA ^{*2}	69.6	3.31	27.8	19.1

*1: 普通コンクリート *2: HLAコンクリート

表-5 支圧板形状寸法

標準タイプ			低強度用タイプ		
A	B	t	A	B	t
240	240	40	310	310	36

A) 支圧板の辺長 B) プレート厚さ 単位: mm

t: プレート厚さ

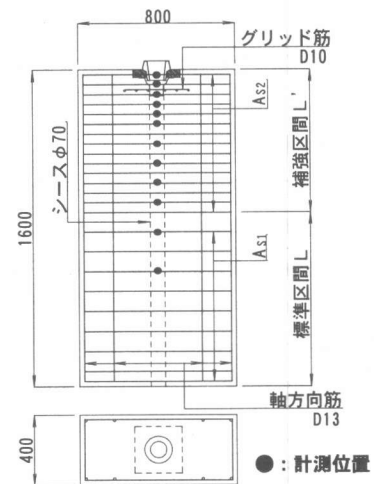


図-1 供試体概要図

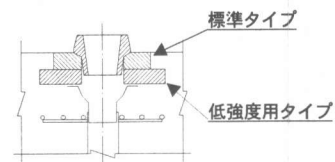


図-2 支圧板概要図

受けないことを 3 次元弾性 FEM 解析で確認し決定した。また、シースには、内径 70mm のスパイラルシースを使用した。

(2) 支圧板

実験で用いた支圧板の形状寸法を表-5 に示す。支圧板の種類は、実構造物において使用頻度の高い SWPR7B12S12.7mm を対象とし、フレシネーコーン 12T13M220 を採用した。TYPE-3 および TYPE-4 供試体においては、

低強度コンクリート用に開発された支圧板³⁾を用いた。支圧板の概要図を図-2に示す。この支圧板は、局部圧縮力を受けるコンクリートの支圧面積を大きくするため、標準タイプの支圧板の背面に表-5に示す形状の支圧板を重ねて使用するものである。

(3) 補強鉄筋量

各供試体の割裂応力度に対する補強鉄筋量は、図-1に示す標準区間(L)と補強区間(L')で変化させた。補強区間(L')は、3次元弾性FEM解析を実施して割裂応力の分布状況を把握したうえで、PC定着部の施工性等を考慮して決定した。

すべての供試体の標準区間(L)に配置する割裂補強鉄筋量(A_{s1})およびTYPE-1供試体の補強区間(L')に配置する割裂補強鉄筋量(A_{s2})は、PC橋梁のウェブに一般的に配置される鉄筋量に相当する配筋とするため、異形鉄筋D19($A_s=286.5\text{mm}^2$, $f_{py}=526\text{N/mm}^2$)を100mm間隔で配置した。その他の供試体の補強区間(L')に配置する割裂補強鉄筋量(A_{s2})は次のように決定した。

TYPE-2供試体は、割裂補強鉄筋量をTYPE-1供試体の約3倍程度の鉄筋量とするため、異形鉄筋D22($A_s=387.1\text{mm}^2$, $f_{py}=507\text{N/mm}^2$)を50mm間隔で配置した。これは、軽量コンクリートのひび割れ状況を普通コンクリートとほぼ同程度にするためには、普通コンクリートの約3倍の補強鉄筋量を配置する必要があるという既往の研究結果⁴⁾を参考にしたものである。TYPE-3およびTYPE-4供試体は、3次元弾性FEM解析に基づき、 $1.2f_{pu}$ 荷重載荷時(f_{pu} :鋼材の引張強度)の補強筋の応力度が、TYPE-2供試体と同程度の 150N/mm^2 となる鉄筋量になるよう、異形鉄筋D19($A_s=286.5\text{mm}^2$, $f_{py}=526\text{N/mm}^2$)をTYPE-3供試体では75mm間隔に、TYPE-4供試体では50mm間隔で配置した。

軸方向鉄筋は、すべての供試体において異形鉄筋D13($A_s=126.7\text{mm}^2$, $f_{py}=507\text{N/mm}^2$)を

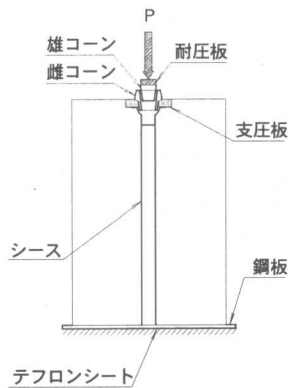


図-3 載荷方法の概要図

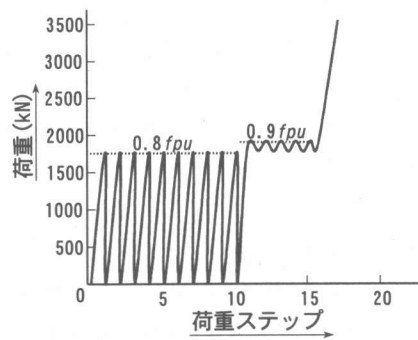


図-4 載荷パターン

8本配置した。

グリッド筋については、異形鉄筋D10($A_s=71.3\text{mm}^2$, $f_{py}=517\text{N/mm}^2$)を用いた。なお、グリッド筋はTYPE-2供試体で3段配置⁴⁾とし、その他の供試体は1段配置とした。

2.3 載荷および測定方法

荷重の載荷方法と載荷パターンを図-3および図-4に示す。載荷方法は、定着板に雌コーンおよび雄コーンを挿入し、5000kN圧縮試験機を用いて雄コーンに直接圧縮力を加える方式とした。また、供試体と載荷台との摩擦の影響を低減させるため供試体底面にテフロンシートを設置した。

荷重の載荷パターンは、まず、コンクリート標準示方書〔設計編〕⁵⁾(以下、標準示方書と称す)のPC鋼材応力度の制限値の規定を参考とし、最大荷重を $0.8f_{pu}$ とした繰り返し載荷を10回行った。その後、最小荷重を $0.8f_{pu}$ 、最

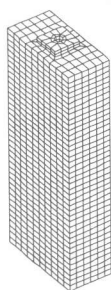
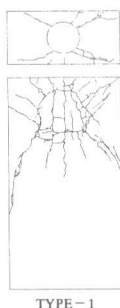
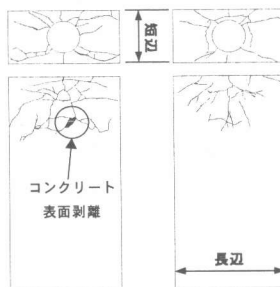


図-5 解析モデル図

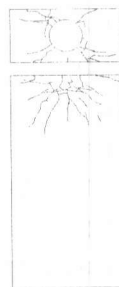


TYPE-1



TYPE-2

TYPE-3



TYPE-4

図-6 ひび割れ状況図

大荷重を $0.9f_{pu}$ とした繰り返し載荷を5回行い、破壊に至るまで載荷した。

図-1 に示す計測位置において、コンクリート表面のひずみ、 π ゲージによるコンクリート表面のひび割れ幅、および割裂補強鉄筋のひずみの計測を行った。

2.4 FEM 解析方法

本検討では、供試体の寸法や配筋等を決定するために、3次元弾性 FEM 解析を行った。解析モデル図を図-5 に示す。解析では、コンクリートおよび定着板を3次元ソリッド要素にてモデル化し、シーす内部は忠実に空隙部とした。荷重は、雄コーンと雌コーンが接する定着板上面の円周線上に集中荷重を分散して載荷した。

3. 実験結果および考察

3.1 載荷時のコンクリート強度

載荷実験時に実施したコンクリートの強度試験結果を表-6 に示す。実構造物におけるプレストレス導入時期を考慮して、載荷実験は材齢7日以内に行った。HLA コンクリートの平均圧縮強度は、 $49.6(\text{N}/\text{mm}^2)$ となり平均単位重量は $19.1(\text{kN}/\text{m}^3)$ であった。

3.2 ひび割れ特性

(1) ひび割れ状況

載荷終了時のひび割れ状況を図-6 に示す。標準タイプの定着板を用いた TYPE-1 および

表-6 コンクリートの物理特性

供試体 No,	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	単位重量 (kN/m^3)
TYPE-1	4	27.5	2.40	30.5	23.2
TYPE-2	5	50.4	3.01	24.3	19.1
TYPE-3	6	49.4	2.69	25.1	19.2
TYPE-4	7	49.0	2.90	26.3	19.1

表-7 ひび割れ発生荷重

供試体 No,	実験値 (kN)	解析値 (kN)	実験値/解析値
TYPE-1	1300	1290	1.01
TYPE-2	1500	1430	1.05
TYPE-3	1400	1350	1.04
TYPE-4	1600	1520	1.05

TYPE-2 供試体の初期ひび割れは、供試体の載荷面より底面部に向かってシーすに平行して発生した。その後、供試体の長辺側面方向にひび割れ本数が増加し、TYPE-2 供試体においてはコンクリート表面が一部剥離したが、ひび割れ本数は TYPE-1 供試体より若干少なかった。一方、低強度用定着板を用いた TYPE-3 および TYPE-4 供試体の初期ひび割れは、定着板よりほぼ 45° 方向に向かう位置で発生した。その後も、傾斜したひび割れが発生したが、ひび割れ本数は、TYPE-2 供試体よりもさらに少なくなった。

目視および3次元弾性 FEM 解析により求めた初期ひび割れ発生荷重を、表-7 に示す。3次元弾性 FEM 解析により求めた初期ひび割れ発生荷重は、実験値を精度よく評価している。また、HLA コンクリートを用いた供試体では、ひび割れ発生荷重の実験値と解析値の比率がほぼ同じであった。

(2) ひび割れ幅

各供試体の最大ひび割れ幅を表-8に示す。

また、ひび割れ幅と载荷パターンの関係を図-7に示す。図-7に示すひび割れ幅は、各荷重ステップでの最大値を示す。

$0.8f_{pu}$ 载荷時における TYPE-1 および TYPE-2 供試体のひび割れ幅を比較すると、TYPE-2 供試体は、補強鉄筋量を3倍程度に増加させたため、TYPE-1 供試体とほぼ同様なひび割れ幅が得られている。

また、低強度用定着板を用いた TYPE-3 および TYPE-4 供試体のひび割れ幅は、標準タイプを用いた TYPE-1 および TYPE-2 供試体と比較して大幅にひび割れ幅が抑制されていることが分かる。

3.3 コンクリートおよび補強鉄筋のひずみ

(1) コンクリートのひずみ

$0.8f_{pu}$ 载荷時(荷重ステップ10)におけるコンクリート表面のひずみ分布を図-8に示す。HLAコンクリートを用いた供試体のひずみは、普通コンクリートを用いた供試体のひずみと比較して载荷面より約400mmまでの範囲では小さくなり、それ以降のひずみはほぼ同様な挙動を示している。

(2) 補強鉄筋のひずみ

割裂補強鉄筋のひずみと载荷パターンの関係を図-9に示す。図-9に示すひずみは、各荷重ステップでの最大値を示す。

ひび割れ幅と同様に低強度用定着板を用いた TYPE-3 および TYPE-4 供試体は、標準タイプを用いた TYPE-1 および TYPE-2 供試体と比較して大幅に割裂補強鉄筋のひずみが抑制されていることが分かる。

$1.2f_{pu}$ 载荷時および最大荷重時における割裂補強筋のひずみ(最大値)を表-8に示す。TYPE-3 および TYPE-4 供試体は、 $1.2f_{pu}$ 载荷時の補強筋の応力度が TYPE-2 供試体と同程度となるよう補強筋を配置したが、若干小さい値を示している。また、TYPE-2 供試体の割裂

表-8 最大ひび割れ幅および補強筋ひずみ

供試体 No.	最大ひび割れ幅		補強筋のひずみ	
	$0.8f_{pu}$ (mm)	$0.9f_{pu}$ (mm)	$1.2f_{pu}$ (μ)	最大荷重時 (μ)
TYPE-1	0.153	0.179	886	-----*
TYPE-2	0.139	0.204	797	4928
TYPE-3	0.041	0.057	639	1428
TYPE-4	0.072	0.092	574	1144

*1: 未計測

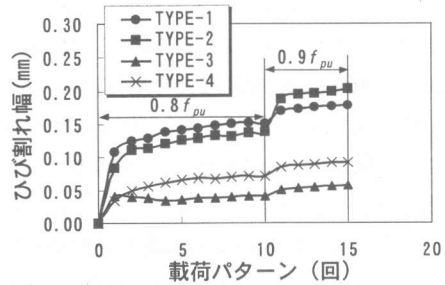


図-7 ひび割れ幅と载荷パターンの関係

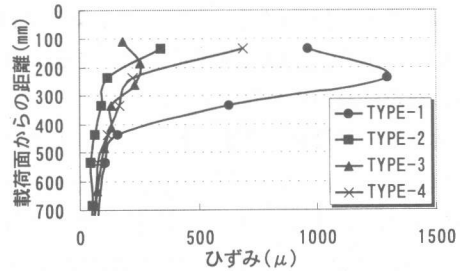


図-8 コンクリートのひずみ分布

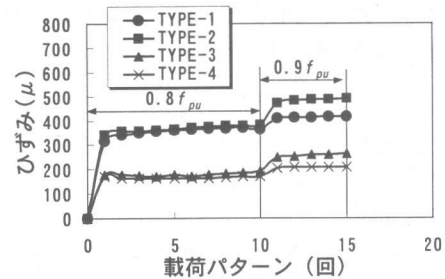


図-9 補強筋ひずみと载荷パターンの関係

補強筋は降伏しているが、TYPE-3 および TYPE-4 供試体の割裂補強筋は降伏に至っていない。

以上より、ひび割れ本数やひび割れ幅などのひび割れ特性および割裂補強鉄筋のひずみは、低強度用定着板を用いることにより、飛躍的に抑制されることが明らかとなった。こ

れにより、補強鉄筋量を3倍程度にまで増加させる必要がなくなり、低強度用定着板を用い適切に補強鉄筋を配置することで、施工現場での作業性は確実に向上すると思われる。

3.4 破壊性状

各供試体の最大耐力を表-9に示す。TYPE-1 供試体は、定着板が完全に陥没し、その後耐力を失った。しかし、TYPE-2~TYPE-4 供試体は、圧縮試験機の最大容量付近の4800kNまで载荷を実施したが、供試体は最終的な破壊に至らなかった。TYPE-2 供試体は、定着板は陥没して、かぶりコンクリートも一部剥離したが、最大荷重到達後も耐力を保持した。これは、多量の割裂補強鉄筋を配置したことにより起因する、コンクリートの拘束効果によるものと考えられる。なお、TYPE-3 および TYPE-4 供試体では、最大荷重時においても、定着板の陥没は認められなかった。

供試体の計算耐力を表-9に示す。表中の計算値は、式(1)により算定した支圧強度に基づいて算出したものである。標準示方書において、軽量コンクリートを用いた場合の支圧強度は、同一の圧縮強度を有する普通コンクリートの70%と規定している。しかし、本検討ではこの低減率を乗じていない。

$$f'_{ak} = \eta \cdot f'_{ck} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \eta = \sqrt{A/A_g} \leq 2$$

ここに、

A : コンクリート面の支圧分布面積
($A=311505\text{mm}^2$)

A_g : 支圧を受ける面

TYPE-1 供試体の最大耐力(P_{max})は、計算耐力(P_{cal})の約1.4倍の耐力となった。TYPE-2 供試体は、定着板は陥没しているが4800kNの時点で耐力を保持していたため、計算耐力(P_{cal})と比較し、同等の耐力であったと考えられる。TYPE-3 および TYPE-4 供試体は、PC 鋼材

の引張強度の約2.2倍に相当する最大耐力($P_{max}=4800\text{kN}$)を载荷しても供試体が破壊に至らなかったため、十分な安全性を保有していると考えられる。

表-9 最大耐力

供試体 No.	f'_{ck} (N/mm ²)	A_g (mm ²)	f'_{ak} (N/mm ²)	P_{cal} *1 (kN)	P_{max} *2 (kN)
TYPE-1	27.5	49105	55.0	2701	3845
TYPE-2	50.4	49105	100.8	4950	4800*3
TYPE-3	49.4	87605	93.2	8161	4800*3
TYPE-4	49.0	87605	92.4	8095	4800*3

*1: $P_{cal} = f'_{ak} \cdot A_g$ *2: 最大耐力 (実測値)

*3: 破壊せず

4. まとめ

- (1)HLA コンクリートを用いた PC 鋼材定着部の割裂応力度および支圧応力度は、低強度用定着板を用いて適切に補強筋を配置することによって抑制され、ひび割れ特性および割裂補強筋に作用する応力度は飛躍的に改善された。
- (2)HLA コンクリートおよび低強度用定着板を用いた供試体は、PC 鋼材の引張強度の約2.2倍以上の耐力を保有しており、破壊に対して十分安全である。

【参考文献】

- 1)岡本享久ほか：超軽量コンクリート，コンクリート工学，vol.36，No.1，pp.48-52，1998.1
- 2)Niwa,J., et al. : Ultimate Shear Capacity of Concrete Beams Using High Performance Lightweight Aggregates, Proceedings of fib Symposium ,Prague, pp.241-246, Oct.1999
- 3)極東鋼弦コンクリート振興(株)：FKK フレシネー工法施工基準，pp.226-227，1999
- 4)宮本征夫ほか：人工軽量骨材コンクリートを用いた PC 桁定着部の補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.10，No.3，pp.189-194，1988
- 5)土木学会：コンクリート標準示方書・〔設計編〕，1996