

論文 高性能軽量コンクリートを用いた PC 定着部の耐荷性状

福田 一郎^{*1}・宇津木 一弘^{*2}・柳井 修司^{*3}・坂田 昇^{*4}

要旨：高性能軽量コンクリートを用いたPC定着部の性能を把握するために、コンクリートの圧縮強度および鉄筋量をパラメータとして定着部をモデル化した部分試験体の載荷実験を行った。比較のため、普通コンクリートを用いた試験体についても実験を実施した。

その結果、高性能軽量コンクリートを用いたPC定着部は、使用荷重時においては、普通コンクリートを用いた場合と同等の耐荷性能を示した。終局時の最大耐力については、普通コンクリートの8割程度であったが、コンクリートの圧縮強度を増大すること、適切な補強筋配置を行うことにより、同等以上の最大耐力を得られることが明らかとなった。
キーワード：軽量コンクリート、PC定着部、支圧強度、プレストレストコンクリート

1. はじめに

橋梁上部工重量の軽減方法の1つとして、人工軽量骨材コンクリートの採用が考えられる。従来の人工軽量骨材は、非造粒型がほとんどであり、吸水率が非常に大きかったため、ポンプ圧送性などの施工上の課題や、凍結融解抵抗性などの耐久性が問題となっていた。近年、吸水率が低く、かつ高強度の造粒型軽量骨材(以下、高性能軽量骨材)が開発され、施工性・耐久性が良好な軽量骨材コンクリート(以下、高性能軽量コンクリート)を製造できるようになってきた¹⁾。

ここ数年、高性能軽量コンクリートに関する研究は進んできたが、構造面からの研究は十分でなく、局所応力に対する補強方法などは未解明な点が多い。既往の研究から、コンクリートの圧縮強度が比較的低い場合には、軽量コンクリートと普通コンクリートの支圧強度に大差はないが、高強度になるとその差が大きくなることが知られている²⁾。そのため、設計においては支圧強度を普通コンクリートの60~80%とするのが一般であり³⁾、補強鉄筋量を増加させて

いる例も見られる⁴⁾。以上のことから、高性能軽量コンクリートをプレストレストコンクリート(以下、PC)橋梁上部工に適用するにあたっては、局所応力が作用する部材であるPC定着部の性能を把握しておく必要がある。

そこで、高性能軽量コンクリートのPC定着部の性能に関する基本特性および適切な補強方法を把握することを目的として、コンクリートの圧縮強度および補強筋量をパラメータとして載荷試験を行い、耐荷性能の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

PC橋梁上部工において、一般的に主ケーブル用として用いられるリブキャストアンカータイプ12S12.7を対象として実験を行った。実験で使用した試験体諸元・形状寸法・計測位置を図-1に示す。試験体は箱抜きを有する540mm×360mmの矩形断面で高さを1,300mmとした。定着具の周りには螺旋状のスパイラル筋、その周りにフープ状の用心筋を配置し、シースには内径70mmの鋼製シースを使用した。試験方法は

*1 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 研究員 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 東京支店 (正会員)

*3 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 構造・海洋グループ 研究員 工修 (正会員)

*4 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ グループ長 工博(正会員)

土木学会の方法⁵⁾に準拠して行った。

2.2 試験体配列

試験体配列を表-1に示す。N-40は、普通コンクリートを用いた基準試験体である。コンクリートの圧縮強度は標準的なPC構造物を想定して40N/mm²とした。文献⁶⁾に従い、スパイラル筋としてD13を45mm間隔、用心筋としてD13を55mm間隔で配置した。L-40, L-60はN-40と同じ配筋とし、それぞれ圧縮強度40N/mm², 60N/mm²の高性能軽量コンクリートを用いて圧縮強度が定着性能に与える効果を検討した。L-40S, L-40SRは、コンクリートの圧縮強度を基準試験体と同じ40N/mm²とし、補強鉄筋量を変化させた。補強鉄筋量は以下の要領で決定した。土木学会の指針⁵⁾の定着部の設計方法に準じて、定着具背面に生じる引張力を算出し、過去の実験結果を参考に⁷⁾, 1.0Pu 荷重載荷時 (Pu: PC鋼材の規格引張荷重: 2,196kN) の鉄筋の許容応力度を50N/mm²に制限した。L-40SRは、必要鉄筋量を確保するようスパイラル筋にD19を40mm間隔、用心筋にD16を45mm間隔で配置し、L-40Sはスパイラル筋のみ変更した。

2.3 使用材料

コンクリートの配合を表-2に示す。高性能軽量コンクリートの粗骨材には絶乾密度1.2g/cm³の高性能軽量骨材を用い、細骨材には川砂を用いた。

2.4 載荷要領

載荷試験は5,000kN圧縮試験機を用いて、PC鋼材を通さずに、載荷治具を用いて直接圧縮力を加力して行った。試験状況を図-2に示す。載荷は2段階で実施し、第1段階では、プレストレス導入時におけるひび割れおよび定着体の

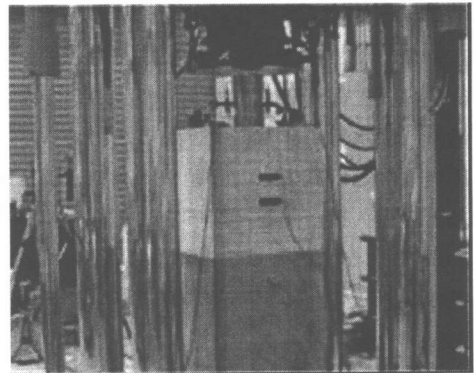
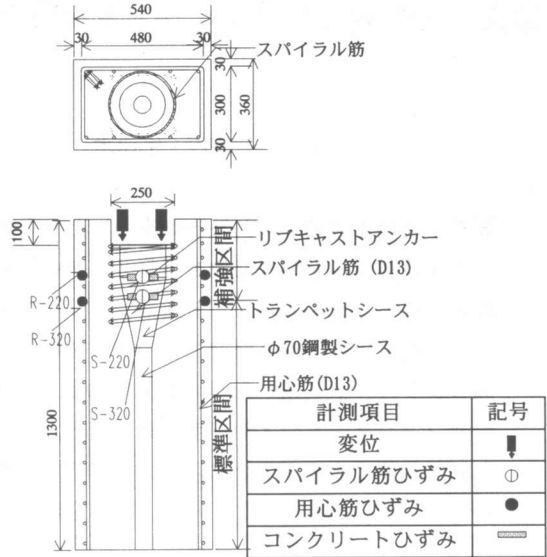


図-2 実験実施状況

表-1 試験体配列

試験体	コンクリート		スパイラル筋	用心筋
	種類	圧縮強度 配合 No.	(径, 間隔)	(径, 間隔)
N-40	普通	N1	D13@45	D13@55
L-40	軽量	L1		
L-40S		L2	D19@40	D16@45
L-40SR		L2		
L-60		L3	D13@45	D13@55

表-2 コンクリートの配合

配合 No.	圧縮強度 (N/mm ²)	Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (l)	s/a (%)	単位量				単位容積質量 (kg/m ³)
								W	C	S	G ^{注1}	
N1	40	20	12±2.5	4.5±1.5	38.1	396	36.5	180	473	593	1,057	2,128
L1	40	15	21±1.5	6.0±1.5	45	340	48.6	160	356	844	415	1,747
L2	40	15	55±5*1	6.0±1.5	38	320	49.7	165	435	828	397	1,827
L3	60	15	21±1.5	6.0±1.5	35	350	46.5	155	443	770	427	1,857

L1: 普通コンクリート L1~L3: 高性能軽量コンクリート *1: スランブフローの値

表-3 コンクリート強度試験結果

配合 No.	圧縮強度 (N/mm ²)		引張強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)		単位容積質量 (kg/m ³)
	第1段階時	第2段階時	第1段階時	第2段階時	第1段階時	第2段階時	
N1	31.5	39.5	2.73	3.38	28.4	29.3	2,128
L1	32.4 (1.03)	37.8 (0.96)	2.12 (0.77)	2.39 (0.71)	19.2 (0.67)	20.6 (0.70)	1,747 (0.82)
L2	29.2 (0.93)	39.5 (1.00)	2.57 (0.94)	2.66 (0.79)	19.1 (0.67)	21.1 (0.72)	1,827 (0.86)
L3	56.0 (1.78)	60.4 (1.53)	2.46 (0.90)	3.07 (0.91)	23.9 (0.84)	24.3 (0.83)	1,857 (0.87)

()内は N1 を 1.00 としたときの比率

性状を把握するため、プレストレス導入時の許容値である $0.9P_y=1,685\text{kN}$ (P_y : PC 鋼材の規格降伏荷重)の張力に相当する荷重を載荷した。第2段階では、実構造物の強度発現時を想定し、第1段階終了後に荷重を一旦除荷した後、コンクリートの目標強度に達した時点で、破壊に至るまで載荷した。すなわち第1段階で使用限界状態、第2段階で終局限界状態における部材性能を評価した。

2.5 計測方法

計測項目は定着体のめり込み量、鉄筋のひずみ、試験体表面のコンクリートのひずみ、ひび割れ幅およびひび割れ発生状況とした。めり込み量は、円筒状の載荷治具(剛体)の左右両側に変位計を設置して、コンクリート上縁との相対変位を測定し、その平均をめり込み量とした。鉄筋のひずみおよび試験体側面のコンクリートのひずみはひずみゲージで測定し、ひび割れ幅はクラックゲージを用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの試験結果

表-3に、各試験段階でのコンクリートの強度試験結果を示す。

3.2 破壊性状

表-4に各試験体の実験結果を示す。荷重と定着具のめり込み量の関係について、コンクリートの圧縮強度をパラメータとした N-40, L-40, L-60 を図-3に、鉄筋量をパラメータとした N-40, L-40S, L-40SR の結果を図-4に示す。

全ての試験体で、 $0.6P_y$ 前後に(荷重 $1,123\text{kN}$)コンクリート表面にひび割れが発生した。図-3, 図-4 から明らかなように、第1段階終了

表-4 試験結果 (単位: kN)

試験体 No.	ひびわれ発生荷重	W=0.1mmを越えた荷重	スパイラル筋降伏荷重	最大荷重
N-40	1,112	2,416	2,855	2,870
L-40	1,112	2,198	2,196	2,299
L-40S	1,309	2,416	2,711	3,017
L-40SR	1,309	2,636	2,840	3,148
L-60	1,112	2,855	2,855	3,052

W: ひび割れ幅

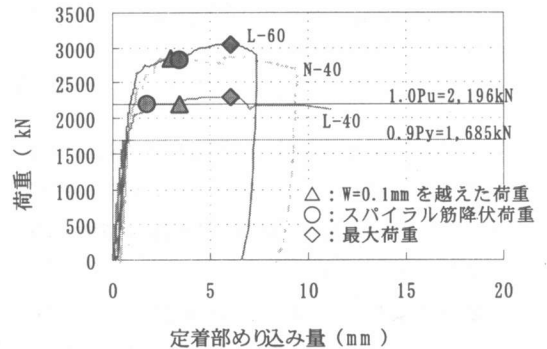


図-3 コンクリート強度の影響

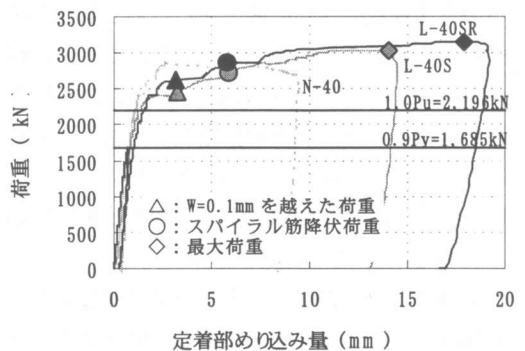
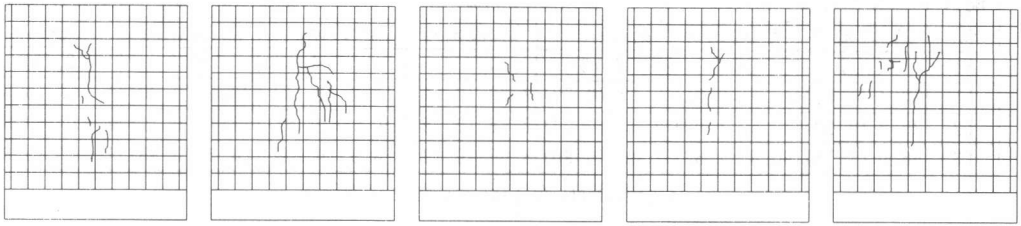


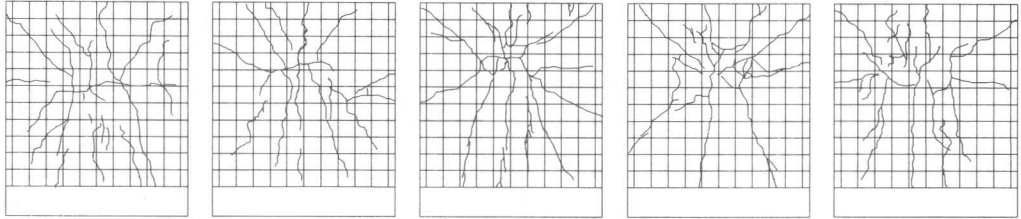
図-4 鉄筋量の影響

時の $0.9P_y$ では、各試験体で有意な差は認められず、定着体に有害な変形、めり込み等は見られなかった。第2段階は、全ての試験体で荷重の増加に伴いスパイラル筋のひずみが進行し、スパイラル筋の降伏と同時にめり込み量が急増

第1段階終了時



終局時



N-40

L-40

L-40S

L-40SR

L-60

図-5 ひび割れ状況

縁辺距離が短い側面 1マス5cm

して破壊に至った。特に、L-40では1.0Puの一定荷重を載荷している最中にスパイラル筋が降伏し、ひび割れ観察中にめり込み量が増え続けて破壊に至った。

表-4より、L-40とN-40の最大荷重を比べると、L-40はN-40の約8割であった。これは、軽量コンクリートの支圧強度が普通コンクリートの支圧強度の6~8割であるという既往の研究結果と同様の傾向を示した。これに対しL-60はN-40と同等以上の最大耐力を示しており、高性能軽量コンクリートの圧縮強度を増大させることで最大耐力が向上していた。N-40、L-40S、L-40SRを比較すると、L-40S、L-40SRともにN-40と同等以上の最大耐力を示した。L-40SとL-40SRを比較すると、最大耐力に有意な差は認められない。これらのことから、鉄筋による耐力の向上効果は、スパイラル筋が支配的であると考えられ、スパイラル筋の補強量を増加させることで最大耐力を向上できることを確認した。

3.3 ひび割れ性状

図-5に第1段階終了時および終局時におけるひび割れ状況を示す。ひび割れ状況は、各試

験体で有意な差は認められず、いずれの試験体も試験体上縁から約20~25cm下った位置(リブキャストアンカー下端リブ付近)に水平なひび割れが入り、これが両側に伸展した。その後、定着体のめり込みに伴いこの位置がはらみ出し破壊に至った。

図-6に、最大ひび割れ幅と荷重の関係を示す。全ての試験体で、第1段階終了時の最大ひび割れ幅は0.06mm以下であり、基準⁸⁾に示されている「きびしい環境下、補修を必要としない

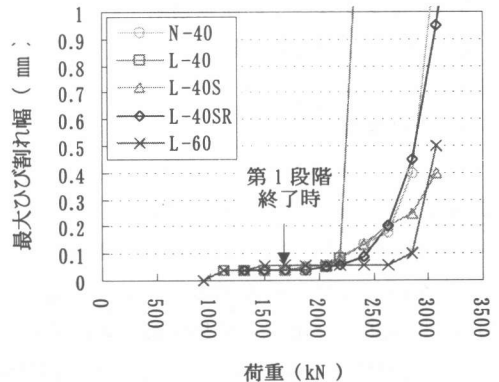


図-6 ひび割れ幅進展状況

ひび割れ幅 0.1mm 以下」という規定を満足していた。

ひび割れ幅の進展状況について、L-40 は 1.0Pu を、L-60 は 1.2Pu をそれぞれ超えた時点から急激に進展する脆性的な挙動を示した。これは、粗骨材自体の強度が低いために、モルタル部分が破壊すると同時に、ひび割れが骨材を貫通して急激に破壊に至るためと考えられる。

これに対し、L-40S, L-40SR のひび割れ幅は N-40 と類似した履歴を示していた。以上のことより、補強筋量を増大させることで、靱性を付与できる可能性が示された。

コンクリートのひび割れに関しては、引張強度をヤング係数で割ったものがひび割れ発生ひずみの 1 つの指標になると考えられる (以下 ϵ_{ce})。表-3 より ϵ_{ce} の値を求めると表-5 のようになる。高性能軽量コンクリートの ϵ_{ce} は普通コンクリートと同程度になっており有意な差は認められない。高性能軽量コンクリートの引張強度が低いにもかかわらず、ひび割れ発生荷重が普通コンクリートとほぼ同じなのは、このことも影響しているものと考えられる。

3.4 鉄筋のひずみ分布状況

荷重と鉄筋ひずみの関係の例として、図-7 に、L-40SR の荷重と鉄筋ひずみ分布の関係を示す。グラフ中の記号は、S がスパイラル筋、R が用心筋を、数字が試験体上縁からの距離をそれぞれ表す (図-1 参照)。図-7 から用心筋と比べて、スパイラル筋に大きなひずみが生じていることがわかり、定着具背面に発生する割裂引張力の大半を近傍のスパイラル筋が分担していることが確認できる。

表-6 に、各載荷段階のスパイラル筋ひずみ (S-220) を示す。L-40 のスパイラル筋が 1.0Pu で降伏しているのに対し、L-40S, L-40SR は 430 μ , 363 μ とひずみが大幅に低減されていた。降伏荷重についても、前述の表-4 に示したように、N-40 とほぼ同等まで改善されていた。

これらのことから、定着具背面のコンクリートに発生している割裂引張力に対して、スパイ

表-5 ϵ_{ce} の値 (単位: $\times 10^{-6}$)

	第1段階時	第2段階時
N1	96	115
L1	110	116
L2	135	126
L3	103	126

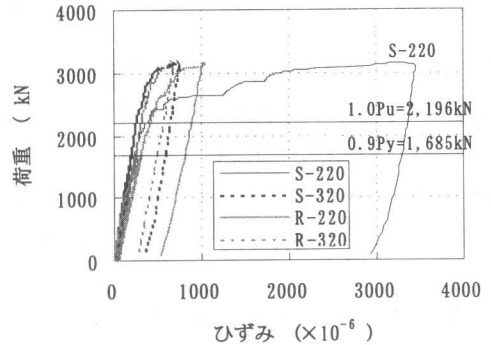


図-7 鉄筋ひずみ分布

表-6 スパイラル筋ひずみ (単位: $\times 10^{-6}$)

	0.9Py	1.0Pu	1.2Pu	最大荷重時
N-40	254	394	867	5,223
L-40	420	3,126	—	6,127
L-40S	283	430	1022	4,074
L-40SR	222	363	927	3,321
L-60	227	384	487	4,110

スパイラル筋降伏ひずみ: 2,000 μ

ラル筋を補強することで耐力を向上させることができるものと考えられる。

3.5 解析による評価

(1) 解析概要

実験結果から、定着具背面に発生する割裂引張力の大半をスパイラル筋が負担していることが確認された。そこで、スパイラル筋で拘束されている範囲のコアコンクリートに発生している割裂引張力に対して、コンクリートの引張強度を超える引張力をスパイラル筋が負担すると考えて、線形 FEM 解析による検討を行った。以上の検討方法のイメージおよび解析モデル図を図-8 に示す。解析では、コンクリートをシェル要素でモデル化し、荷重は定着具に相当する部分に等分布荷重として載荷した。

(2) 鉄筋応力度の算出

解析結果をもとに、最大引張要素の部分に配置したスパイラル筋に発生する引張応力度について、前述の考え方に従い式(1)で算出した。

$$\sigma_s = \Sigma \sigma_{ci} \cdot A_c / A_s \quad (1)$$

σ_s : スパイラル筋応力度

σ_{ci} : コアコンクリート内に発生しているコンクリートの引張強度を超える引張応力

A_s : 着目している部分のスパイラル筋断面積

A_c : 着目している部分のコンクリート断面積

表-7に、L-40とL-40Sの計算結果を示す。計算値は実験値と概ね一致しており、本解析手法でも前述した耐力の向上メカニズムが確認された。本解析手法は、2次元線形解析モデルを用いており、今回の実験の範囲内では、必要鉄筋量の算出に簡便な手法であるが、大容量の定着体等に関しては、更なる検討が必要である。

4. まとめ

高性能軽量コンクリートを用いたPC定着システムの耐荷性能を把握することを目的に、定着部をモデル化した部分試験体の載荷実験を行った。その結果を以下にまとめる。

(1) 使用限界状態では、高性能軽量コンクリートを用いたPC定着システムの耐荷性能は、普通コンクリートの場合と比較して有意な違いは認められなかった。

(2) コンクリートの圧縮強度を同じ(40N/mm²)にした場合、高性能軽量コンクリートの終局時の最大耐力は普通コンクリートの場合の約8割であったが、1.5倍(60N/mm²)にした場合には、普通コンクリートの場合と同等以上であり、コンクリートの圧縮強度を上げることで高性能軽量コンクリートの支圧強度は改善される傾向にある。

(3) リブキャストアンカータイプ12S12.7の鉄筋

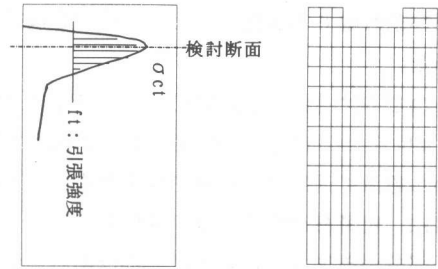


図-8 検討イメージ、解析モデル図

表-7 鉄筋の作用引張応力度

	実験値	解析値	解析値/実験値
L-40	降伏	降伏	-
L-40S	88.5	104	1.18

による補強は、スパイラル筋の補強が有効であり、スパイラル筋径を上げることで、従来の定着システムを採用することが可能である。

参考文献

- 1) 岡本亨久ほか: 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) 奥島正一ほか: 人工軽量骨材コンクリートの支圧強度に関する研究, セメントコンクリート, No. 238, pp. 564-568, 1966. 12
- 3) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, コンクリートライブラリー第56号, 1985. 6
- 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. 189-197, 1988
- 5) 土木学会: プレストレスコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリー第66号, 1989. 3
- 6) 住友電気工業株式会社: ディビダークストランド工法設計施工マニュアル,
- 7) 福田一郎ほか: 高性能軽量骨材コンクリートのPC定着部試験, コンクリート工学年次論文報告集, vol. 22, No. 3, pp. 883-888, 2000
- 8) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, pp. 6-7, 1987