論文 圧着型 PC 梁の塑性ヒンジ機構に関する実験的研究

中川 明徳*1·中塚 佶*2·大西 広朗*3

要旨:丸形および異形 PC 鋼棒によって柱に圧着した,プレストレストコンクリート梁の塑 性ヒンジがどのような耐荷・変形機構を有しているかを,PC 鋼材の付着特性,塑性ヒンジ部 のひび割れ性状,圧縮部コンクリートのめり込み挙動および応力-ひずみ特性などから調べ, PC 部材の性能評価型設計法に有用なマクロモデルに不可欠な基礎知見を明らかにした。 キーワード:圧着型 PC 梁,塑性ヒンジ機構,付着特性,めり込み挙動,応力-ひずみ特性

1. はじめに

近年, 我国の耐震設計に導入されつつある性 能評価型の設計法では, 柱・梁部材や架構全体 の荷重-変形関係を部材・構成材料の損傷状況 に関連づけて推定できることが不可欠である。

筆者らは既報^{1,2)}において, 圧着型 PC 梁の荷 重-変形関係をコンクリートの圧縮縁ひずみと 関連づけて推定できるマクロモデルを提案し, 数種の梁部材について実験値と解析値が精度良 く対応することを示した。しかし,解析におけ る必要データが実験値に基づいているため,次 のような特性値の定量化が課題であった。すな わち,グラウト材と PC 鋼材の付着特性,曲げ 圧縮部コンクリートのめり込み挙動,応カーひ ずみ特性などにおよぼす諸要因の影響を明確 化・定量化することが課題であった。

本研究は, 圧着型 PC 梁の単調載荷実験を行い, 以上の諸特性について考察を行ったもので

ある。

2. 実験概要

PC 梁の塑性ヒンジ機構は,梁のひび割れ性状 に影響を与える緊張材の付着特性,横補強筋量, シアスパン比,ならびに圧縮部コンクリートの 中立軸深さと関係する PC 鋼材量などの影響を 受けると考えられる。したがって,本研究にお ける梁試験体では,表-1に示すように,PC 鋼 材の付着特性(丸形鋼棒,異形鋼棒およびグラウ ト強度),横補強筋量(0.2,0.4%),シアスパン比 (3,2)および鋼材係数(0.1,0.2,0.3)を実験要因とし て採用し,試験体名称は図-1のように与えた。 なお,圧縮部コンクリートの力学特性を検討す る目的で,一辺が 170mm の正方形断面を有す る,高さが 315 および 215mm で梁試験体と同 じプレーンコンクリートならびに横補強筋をも つコンファインドコンクリートの単軸圧縮試験

用の角柱試験体も製作した。

図-2 に代表的な試験体 梁部の配筋を例示する。ま た,使用したコンクリート の調合を表-2 に,材料の 力学特性を表-3 および表 -4 に示す。なお,試験体 No.1~No.3 に使用した目

	表-1	梁試験体	Ւ概	要
--	-----	------	----	---

試験1本			1	可看性状	细灯区粉。	细封插別	横 補強筋比	シアスバン比	
シリーズ	No.	名称	PC鋼材	グラウト強度Fg	꾀찌기가 가자 32.4	则则们们们主力门	Pw (%)	a/D	
Ι	1	MA3-02R1			0.10	C−¢21			
	2	MA3-02R2	丸鋼	迺 淮	0.20	C− <i>ϕ</i> 26	0.2		
	3	MA3-02R3			0.30	C− <i>φ</i> 32			
Ш	4	MA3-02D1	異形	标中	0.10	C-D 19		2	
	5	MA3-02D2			0.20	C-D 25		5	
	6	MA3-02D3			0.30	C-D 32			
	7	MA3-02d2		弱	0.20	C-D 25			
	8	MA3-04D3			抽准	0.30	C-D 32	0.4	
	9	MA2-02D2		17:17	0.20	C-D 25	0.2	2	

*1 NTT ファシリティーズ (正会員)

*2 大阪大学 助教授 工学研究科建築工学専攻 工博 (正会員)

*3 大阪大学 大学院生 工学研究科建築工学専攻

-721-

地モルタルおよびグラウト の特性値は試験結果を得る ことができなかったので, 試験体 No.4~No.6 の結果 を参考値として示している。

載荷は、図-3に示す片 持ち梁形式による方法で, 500kN ジャッキを用いて行 った。



図-2 試験体配筋例およびゲージ貼付位置



W:水,C:普通ポルトランドセメント,S:細骨材,G:粗骨材 SP1:高性能減水剤,SP2:AE剤

図-3 載荷方法

表-3 角形供試体の力学特性

試験体				角形ブレーン	ノコンクリ-	-ト		角形コンファインドコンクリート						
		170mi	m × 170mr	m × 215mm	170mm × 170mm × 315mm			170m	m × 170mı	m×215mm	170mm × 170mm × 315mm			
No.	夕称	Fo	63	Eo	Fo	63	Eo	Fo	63	Eo	Fo	63	Eo	
	. 131小	(MPa)	(%)	$\times 10^4$ (MPa)	(MPa)	(%)	×10 ⁴ (MPa)	(MPa)	(%)	×10 ⁴ (MPa)	(MPa)	(%)	× 10 ⁴ (MPa)	
1	MA3-02R1													
2	MA3-02R2	58.5	0.333	0.55	53.1	0.272	0.92	58.2	0.307	0.33	50.3	0.268	1.08	
3	MA3-02R3													
4	MA3-02D1									61.9	0.336	1.13		
5	MA3-02D2	68.3 0.354		0.73	63.0	0.293	1.10	65.8	0.399 0.42					
6	MA3-02D3													
7	MA3-02d2							57.5	0.313	0.28	53.6	0.287	1.24	
8	MA3-04D3	56.1	0.324	0.53	50.8	0.246	1.06	59.6	0.338	0.30	55.3	0.295	1.28	
9	MA2-02D2							57.5	0.313	0.28	53.6	0.287	1.24	

コンクリート(Fo: 圧縮強度, co: 圧縮強度時ひずみ, Eo: 応力下降勾配)

表-4 PC 鋼材、横補強筋、目地モルタル、グラウトの力学特性

試験体 PC鋼材							横	補強筋			目地モル	タル	グラウト						
No.	. 名称	Тру	εру	Tpu	Ep	Ep'	φ	σwy	εwy	Es	Fo	6 G	E	Fo	6 ع	E			
		(kN)	(%)	(kN)	× 10 ⁵ (MPa)	× 10 ³ (MPa)	(mm)	(MPa)	(%)	× 10 ⁵ (MPa)	(MPa)	(%)	×10 ⁴ (MPa)	(MPa)	(%)	$\times 10^4$ (MPa)			
1	MA3-02R1	410	0.600	445	1.97	3.61													
2	MA3-02R2	630	0.600	686	1.98	4.24					【49.8】	【0.335】	【2.13】	【32.3】	[0.317]	【1.20】			
3	MA3-02R3	920	0.576	1019	1.99	5.16	5.05												
4	MA3-02D1	344	0.593	374	2.02	6.75		5.05	5.05	5.05	5.05	465	0.231	2.02					
5	MA3-02D2	600	0.595	654	1.99	8.68						49.8	0.335	2.13	32.3	0.317	1.20		
6	MA3-02D3	914	0.580	1025	1.98	8.04													
7	MA3-02d2	600	0.595	654	1.99	8.68								7.1	0.347	0.28			
8	MA3-04D3	914	0.580	1025	1.98	8.04	7.14	433	0.220	1.97	62.2	.2 0.354	4 2.35	25.7	0.241	1.02			
9	MA2-02D2	600	0.595	654	1.99	8.68	5.05	465	0.231	2.02				33.7	0.341	1.05			

PC鋼材(Tpy:降伏荷重, εpy:降伏ひずみ, Tpu:引張荷重, Ep:PC鋼材弾性時のヤング係数, Ep':PC鋼材塑性化後のヤング係数) 横補強筋(φ :鉄筋径 , σwy:降伏応力度 , εwy:降伏ひずみ , Es:ヤング係数)目地モルタル・グラウト(Fo:圧縮強度 , εo:圧縮強度時ひずみ , E:ヤング係数)

測定は, 塑性ヒンジ機構の考察で必要となる データを得るため,以下の項目について行った。 ①載荷直前の PC 鋼材張力, ならびに載荷時に おける柱スタブ内,梁内の材軸方向の PC 鋼材 ひずみ・張力分布性状,および付着応力度(τ) - すべり量(S)関係を調べるため,図-2に示す 各位置に検長 2mm の箔ひずみゲージを鋼材周 方向の対称位置に貼付した。②塑性ヒンジがそ の領域に含まれると予想される範囲(約 1.5D, D:梁せい)での圧縮縁ひずみ度,中立軸位置, めり込み変形量ならびにせん断変形量などは, 図-4(a)に示すように第1区間(検長110mm) および第 2~4 区間(検長 150mm)において, かぶり部分でコンクリートと縁が切れ、梁幅方 向に貫通したネジ棒を介して取り付けた変位計 により測定した。③圧壊以前のコンクリートひ ずみを測定するため, 図-4(b) に例示するよう な位置に検長 60mm のワイヤーストレインゲー ジを貼付した。また、圧縮縁における梁部のス タブへのめり込み変形を図-4(a)の拡大図に示 す方法で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 PC 鋼材の付着特性

図-5(a), (b)は MA3-02R2 および MA3-02D3 試験体において圧着面からスタブ内へ 130mm, 230mm および 330mm 入った位置で測定した PC 鋼材の付着応力度(τ)-すべり量(S)関係をま とめて示したものである。なお,図-5(b)中の



+印は各位置でPC鋼材が降伏した時点を示す。 同図によれば、同一部材のスタブ内での τ -S



図-5 スタブ内各位置での *t*-S 比較

関係は、その測定位置によらずほぼ同じ性状を 示すことがわかる。また、異形鋼棒を用いた MA3-02D3 試験体では、PC 鋼棒が降伏する前後 で τ_{max} を示し、このことは既報³⁾と同様、降伏 によって τ が顕著に低下することを推測させる。

図-6 は、鋼材係数の等しい MA3-02R2, MA3-02D2 および MA3-02d2 試験体において、 スタブ内に 130mm 入った位置で測定した PC 鋼 材の τ -S 関係を比較したものである。同図に よれば、丸鋼 (MA3-02R2) の τ -S 関係は約 1.3MPa の付着強度をこえると徐々に低下する。 また、グラウト強度が低い異形鋼棒 (MA3-02d2) の τ -S 関係は、丸鋼の場合より若干付着強度 は高く、 τ -S 関係の応力下降域もゆるやかな ものである。これらに対して、普通強度のグラ ウトをもつ異形鋼棒 (MA3-02D2) の τ -S 関係 は、鋼材降伏時と対応する τ_{max} が 13.8MPa と他 の 2 体に比べ著しく大きく、その時のすべり量 も 0.37mm と大きい。また、鋼材降伏以降では 付着応力の低下が大きいことなどがわかる。



図-6 鋼材係数が等しい部材での *t* - S 比較

3.2 梁試験体の荷重(P)-部材角(R)関係

図-7に、各試験体の荷重(P)-部材角(R)関係を示す。同図中の+および*は PC 鋼棒が降 伏および破断した時点を表す。なお、MA3-02D1 試験体では圧着面位置での鋼材ひずみの測定値 を得ることができなかったので降伏時は示して いない。同図によると、丸鋼圧着型では、部材 角 1/200 前後から顕著に剛性低下する傾向が認 められる。これは鋼棒のひずみ分布から低い付 着強度と付着劣化によるもので、その結果、部 材角0.018をこえるまでPC鋼棒の降伏は起こら なかった。これに対し、普通強度のグラウトを もつ異形鋼棒圧着型では、部材角 0.005~0.01 の間で PC 鋼棒が降伏した。また、中立軸位置 が浅く引張鋼材のひずみが大きくなりやすい鋼 材係数が 0.2 以下の部材では部材角が 0.04, 0.05 および 0.06 で PC 鋼棒が破断した。次に、異形 鋼棒だがグラウト強度が低くて、その τ – S 関 係がむしろ丸鋼のそれに近い MA3-02d2 試験体 の P-R 関係は、丸鋼の MA3-02R2 と異形鋼棒 で MA3-02D2 の中間的なものとなり、PC 鋼棒 破断も生じなかった。



3.3 ひび割れ状況

図-8(a)~(c)に、MA3-02R2、MA3-02d2 お よびMA3-02D3 試験体の部材角1/30の時におけ る塑性ヒンジ領域でのひび割れ状況を比較して 示す。同図によれば、付着強度が低いMA3-02R2 およびMA3-02d2 では圧着面におけるひび割れ のみが顕著に開口し、また、梁部では曲げひび 割れは発生するものの、曲げせん断ひび割れへ の進展およびせん断ひび割れの発生は認められ ない。一方、MA3-02D3 では鋼材の付着が良い ために、曲げせん断ひび割れへの進展およびせ ん断ひび割れの発生が見られる。



3.4 圧縮部コンクリートの力学特性

3.4.1 圧縮縁ひずみ度 *ε* c の評価法

梁圧縮部の第1区間における圧縮縁コンクリ ートひずみ(ϵ c)は、同区間の変形測定値から、 (梁部のスタブへのめり込み変形+目地部変形) 測定値(図-4(a)参照)を差し引いた値を第1区 間のコンクリート部分の長さで除すことによっ て得られる。図-9は、コンクリートの圧壊開 始のためにワイヤーストレインゲージ(WSG)に よる測定が不能となる以前での、 ϵ c と ϵ wsG を比較した例であるが、両ひずみはほぼ一致し、 この ϵ c 推定法は妥当であると考えられる。

3.4.2 めり込み変形推定法

図-10 は、(めり込み変形+目地部変形)測定 値から目地部変形を差し引くことによって求め ためり込み変形 △lcb を、横軸に 3.4.1 で述べた 推定 ε c をとって示したものである。ここで、 目地部変形はコンクリートと目地の 1/3 割線弾 性係数の比を用いて近似的に求めた。同図によ ると、かぶりコンクリートに圧壊が見られる付 近でのめり込み変形は 0.3mm 程度であること がわかるが、めり込み変形はその測定方法から

図-10 ⊿lcb-εc関係

圧壊以降ではその信頼度が低くなり、測定不能 ともなる。それゆえ、本研究では、今井・是永 等が提案する⁴⁾図−11に示す方法でめり込み変 形を推定することとした。すなわち、梁圧縮部 のめり込み変形はストレスブロックの重心位置 k₂Xn でのめり込み変形δjによって評価され、 その大きさは支圧面での平均応力k₁k₃Foに比例 するとするものである。また、3.4.1 で必要とな る圧縮縁でのめり込み変形⊿lcbは、同変形が中 立軸位置から直線分布すると考えると、式(1)で 与えられる。

3.4.3 k₁k₃Fo- ε c 関係

図-12(a)~(c)は、MA3-02R2、MA3-02D3 および MA3-02d2 試験体において貼付した各種 ひずみゲージ測定値から求められる圧縮側およ び引張側 PC 鋼材の張力、および圧縮鉄筋の分 担力、ならびに力の釣り合い条件から算出され る,梁の曲げ圧縮部コンクリートの平均応力(曲 げ圧縮ストレスブロック係数 k₁k₃とコンクリー ト強度 Fo の積)を、横軸に 3.4.1 節で述べた推定 ϵ c をとって示したものである。また、同図中には 170mm×170mm×215mm および 170mm×170mm×315mmの寸法をもつ角形コンファインドコンクリートの単軸圧縮試験結果に基づいて求めた k_1k_3 Fo- ϵ c 関係も、それぞれ実線および点線で示す。なお、角形供試体の k_1k_3 の算定においては、上昇域は 2 次曲線、下降域は圧縮強度点と (2×圧縮強度時ひずみ)点の間を近似した直線および大ひずみ域での一定応力直線からなる応力度-ひずみ度関係を仮定した。

同図によると、いずれの試験体の k₁k₃Fo- ε c 関係も、標準的に用いられる高さ・一辺長さ比 がほぼ 2 である高さ 315mm の角形コンファイ ンドコンクリートの同関係とは大きく異なり、 高さ・一辺長さ比がほぼ 1 である高さ 215mm の角形コンファインドコンクリートのそれと同 等かそれ以上の粘り強い性状を示すものであっ た。これらの結果は、曲げ圧縮部コンクリート の応力-ひずみ特性が、引張側ひび割れと関連 する圧壊領域コンクリートの周辺拘束状況に影 響されることを示唆⁵⁾していると思われる。

4. まとめ

得られた主な結果を以下に示す。

(1)スタブ内の $\tau - S$ 関係は、その測定位置に関わらずほぼ同じである。また、その $\tau - S$ 関係の性状は、PC 鋼材の種類およびグラウト強度に

よって大きな影響を受ける。

(2)PC 鋼材の付着特性は,梁部材の荷重-部材 角関係における剛性,PC 鋼棒の降伏時変形およ び破断,ひび割れ性状に大きな影響を与える。 (3)梁圧縮部コンクリートの平均応力(k_1k_3Fo) – 圧縮縁ひずみ度(ϵ c)関係は,高さ・一辺長さ比 が約2の標準的な角柱試験体の同関係とは大き く異なり,高さ・一辺長さ比が約1の角柱試験 体のそれと同等かそれ以上の粘り強い性状を示 すものであった。

【謝辞】本研究に対して,本学卒業生 小坪幸恵氏(現 住友林業),PC 付着研究会(構成者:オリエンタル建設, 高周波熱錬,神鋼鋼線工業,住友電エスチールワイヤ ー,ドーピー建設工業,ピーエス三菱,大阪大学・中 塚),ピーエス三菱兵庫工場ならびに高周波熱錬から多 大なご助力をいただいた。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 中塚佶,阿波野昌幸:丸形 PC 鋼棒圧着型片持ち PC 梁の荷重-変形関係のマクロモデルによる推 定,日本建築学会構造系論文報告集,555 号, pp.141-148,2002.5
- 中塚佶,阿波野昌幸,中川明徳:異形 PC 鋼棒圧 着型片持ち梁の荷重-変形関係推定のためのマク ロモデル,日本建築学会構造系論文報告集,562 号,pp.123-128,2002.12
- 中塚佶,阿波野昌幸:接合形式(圧着型・一体型) と PC 鋼材種(丸形・異形)の異なる片持ち PC 梁 の耐荷・変形機構と力学特性に関する実験的考察, コンクリート工学論文集,第 11 巻,第 3 号, pp.97-110,2000.9
- 今井和正, 是永健好, 瀧口克己: めり込みを考慮 した RC 部材端部の回転変形解析法, 日本建築学会 構造系論文報告集, 562 号, pp.99-106, 2002.12
- 5) 中川明徳, 中塚佶, 阿波野昌幸, 菅田昌弘: 幅と 高さ比が異なるプレーンおよびコンファインドコ ンクリートの強度・変形特性, 日本建築学会大会 学術講演梗概集(北陸), C-2, 構造IV, pp.15-16, 2002.8

