

[75] 接合部を含むPC部材の復元力特性に関する研究

正会員 六車 照（京都大学工学部）
 正会員 角 徹三（豊橋技術科学大学建設工学系）
 正会員 ○本岡 俊夫（清水建設設計部）
 鈴木 伸治（豊橋技術科学大学大学院）

1. 序論

コンクリートとPC鋼材間に付着を与えないPC部材は、グラウトにより付着を与えたPC部材に比べ、主として曲げ破壊耐力が低減するという差異がみられる。¹⁾しかしながらPCラーメン架構では、柱はり接合部内は通し配筋とするのが一般的であり、これに地震時繰り返し水平力が作用すると、付着を与えない部材では、初期の荷重段階より接合部内からPC鋼材が抜け出すという現象を伴う。この影響により接合部に連なるPC部材は、付着を与えたPC部材に比べ、耐力のみならず剛性にもかなりの差異を生じるものと予想される。本研究では外部および内部接合部を含むPC部材の（正負交番）繰り返し載荷試験を行い、付着の有無による復元力特性の差異を比較検討することを目的とする。

2. 実験概要

2-1 供試体 本実験ではグラウトにより付着を与えたもの、および表面アスファルト塗布をほどこしたアンボンドPC鋼材を用いて付着を与えないものを、外部接合部ではそれぞれ3体づつ、内部接合部では2体づつ、計10体について行った。供試体諸性状を表1に、また形状・配筋を図1に示す。接合部内は十分なせん断補強を行い、はり部材の曲げ破壊先行をねらった。PC鋼材は上下対称配筋とし、φ13 PC鋼棒 ($E_s = 2.03 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_y = 14200 \text{ kgf/cm}^2$) を用いた。

コンクリート配合はW/C=0.53、C:S:G(W)=1:1.8:2.4である。またグラウト用セメントペーストはW/C=0.41とした。

2-2 載荷・測定 図2に示すように柱軸力24tonf (50kgf/cm²) 程度を導入することにより供試体を固定し、はり自由端側に繰り返し載荷を行った。そして荷重・載荷点位置変位・接合部近傍でのはり回転角・接合部内PC鋼棒ひずみ・材端部PC鋼材緊張力変化量・接合部パネルのせん断変形等を測定した。

3. 実験結果と考察

3-1 曲げ耐力 表1に実験結果の一覧を示す。Bシリーズを除いては付着を与えない部材は付着えた場合に比べ、約85%に曲げ耐力が低下している。Bシリーズにおいて両者の耐力に差異がみられなかった要因は、正負繰り返し載荷による付着性能の喪失にあると思われる。またコンクリート強度差の考慮を行っても、付着の有無を問わず内部接合部を含む場合は外部接合部を含む

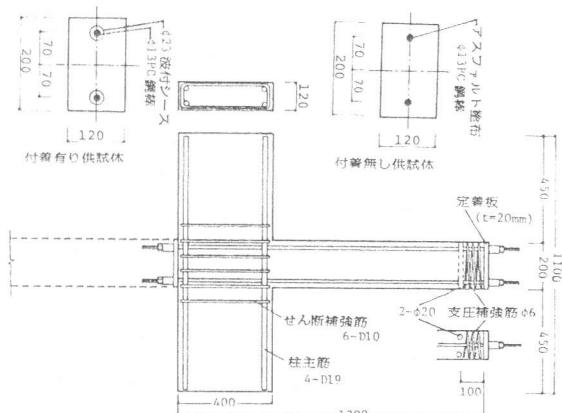


図1 供試体形状・配筋

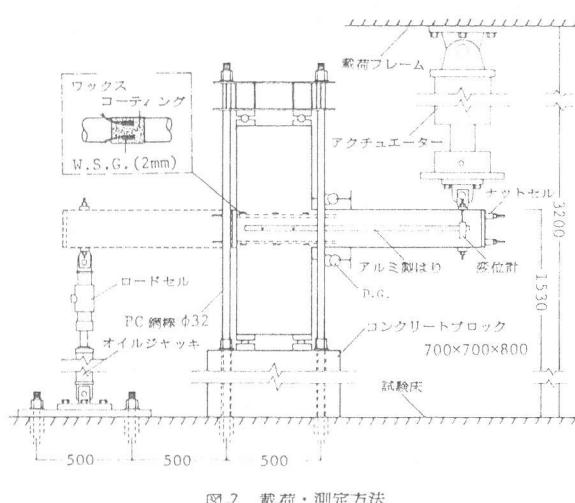


図2 載荷・測定方法

表1 供試体諸性状および実験結果一覧

シリーズ	供試体名	供試体種別		有効強度 P_e (tonf)	f_{ct} (kgf/cm ²)	$E_c (f_e/f_c)$ (kgf/cm ²)	載荷方向	曲げ耐力(実) (ton·m)		曲げ耐力(算) (ton·m)		
		接合部	付着					N はり	S はり	完全付着	付着劣化	
A	EB1	外端	有り	7.93×2	359.1	35.6	2.20×10 ⁵	一方向	1.84	2.68	2.18	
	EU1		無し	7.82×2					1.60		1.54	
B	EB2	外端	有り	8.44×2	465.1	33.0	2.55×10 ⁵	正負交番	2.13	2.81	2.39	
	EU2		無し	8.42×2					2.13		1.72	
C	EB3	内部	有り	8.30×2	463.4	41.3	2.70×10 ⁵	一方向	2.50	2.81	2.39	
	EU3		無し	8.50×2					2.14		1.72	
D	IB1	内部	有り	8.63×2	404.3	35.7	2.55×10 ⁵	正負交番	2.04	1.99	2.75	2.08
	IU1		無し	8.69×2					1.65	1.67	1.58	
E	IB2	内部	有り	8.85×2	430.2	33.8	2.35×10 ⁵	正負交番	2.08	2.03	2.78	2.11
	IU2		無し	8.82×2					1.76	1.73	1.61	

場合に比べ耐力が低下している。

3-2 載荷点位置の荷重-変位関係

以下では測定された変位量からパネルのせん断変形による変位成分を除いた値を載荷点位置変位とする。

図3にB・Dシリーズの荷重-変位関係を

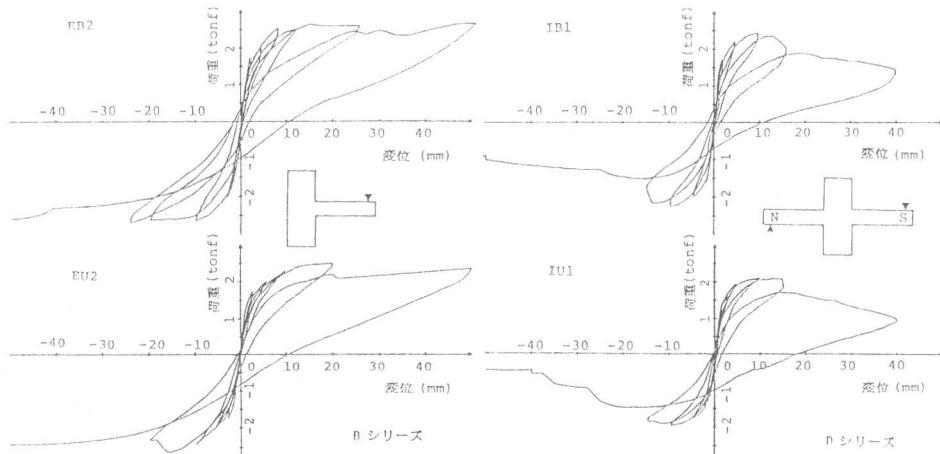


図3 載荷点位置の荷重-変位関係

示す。付着を与えない部材は、ひび割れが生じた（荷重1.5 tonf付近）後の剛性低下がより著しいこと、および変位10 mm ($R=1/80$) 以下の範囲内での繰り返しにおいて履歴ループ面積が小さくなることが特徴的である。内部接合部を含む場合は外部接合部に比べ最大荷重到達後の負勾配が急激で韌性に欠けることがわかる。

3-3 付着を与えた部材の付着性能の劣化

図4は処女荷重経験時における内部接合部内P C鋼材のひずみ変化の分布を示したものである。付着を与えたIB2の曲げ圧縮側P C鋼材は、低荷重時では圧縮のひずみ変化であるが、高荷重時では接合部内の付着劣化が反対側の引張力によって強調されるため、引張のひずみ変化に反転している。これに対し、外部接合部を含む場合ではそのような性状を示していない。この曲げ圧縮側P C鋼材が反対部分の引張力の影響を受け引張のひずみ変化に転じる現象は、前述の内部接合部を含む場合の曲げ耐力低下や最大荷重到達後の負勾配の増大の一因になっているものと思われる。

図5は図4のIB2での鋼材ひずみ分布を用いて接合部端位置曲げ引張側鋼材ひずみ変化量 ϵ_{est} と接合部内平均付着応力 τ_{av} との関係を示したものである。同図より τ_{av} は $\tau_{av}^{max} = 1.2 \text{ kgf/mm}^2$ に達した後は頭打ちとなり、以後は τ_{av}^{max} を保ち続けていることがわかる。外部接合部を含むIB3でも同様の傾向がみられ、この場合 $\tau_{av}^{max} = 1.4 \text{ kgf/mm}^2$ であった。

図6にEB2が正負繰り返し載荷を受けることにより付着劣化が進展し、しだいに付着のない状態に移行していく様子を示した。同供試体は繰り返しが進むに従って部材端部にまで付着劣化が進展していき、最終ループにおける端部緊張力の変化量はEU2の値とほぼ一致している。これよりEB2は最終的に、部材全長にわたり付着性能の喪失が生じていると思われる。（EU2については繰り返しの影響がほとんど見られなかったため包絡線で示した。）以上より、グラウトにより付着を与えた部材でも、接合部およびその近傍において容易に付着劣化が生じ、また繰り返し載荷を受ける際には劣化が部材全長に及んでいると考えられる。そのことが本実験において付着の有無による復元力特性の差異が顕著にみられなかったという現象（特にBシリーズ）を説明づけてお

り、従って付着性能の劣化は付着を与えたP C部材の復元力特性にかなりの影響を及ぼすものと予想される。

4. 曲げ耐力・載荷点位置の荷重-変位関係の計算

実験結果をより深く考察するため、曲げ耐力および単調載荷時荷重-変位関係の計算を行った。

4-1 基本仮定 計算

は断面切断法により断面の $M-\varphi$ 関係を求め、部材の変位は材軸方向曲率分布の積分値として求めた。計算にあたっての基本仮定を便宜上外部接合部を対称として以下のように定めた。

- (1) P C鋼材・コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係は図7のとおりとする。
- (2) 圧縮縁コンクリートひずみが 0.3 % に達した時をもって曲げ破壊とする。
- (3) 接合部パネルコンクリートは剛とする。
- (4) 付着を与えた部材では以下のように 3段階に分けて計算を行う。

CASE1：接合部、はり部材共に付着を完全とする。

CASE2：はり部材の付着は完全とし、接合部内引張側のみに付着劣化が生じ、それによる鋼材の接合部からの抜け出しによる影響を考慮する。（この場合、実験結果より得られた $\Delta\varepsilon_{st} - \tau_{av}$ の関係を使用する。→図8参照）

CASE3：接合部内の付着劣化のみでなく図9のようにはり部材の付着劣化も考慮し、はり部材内で引張鋼材位置コンクリートの伸び量とP C鋼材伸び量が等しいとする変形の適合条件を用いる。

- (5) 付着を与えない部材では CASE3と同じ方法によるが、その時の付着応力は全部材にわたり全く生じないものとする。（CASE4）

なお内部接合部においては、図10のように接合部内曲げ引張側鋼材の付着劣化は反対側はり部分にも直接影響するものとする。

4-2 計算結果と考察 曲げ耐力の計算結果は実験結果と共に表1に列挙した。付着を与えた部材では、はりの付着を完全とする仮定を用いた場合実験値を大きく上回り、実験結果より得られた τ_{av}^{max} による付着劣化を考慮しても（CaSE3）なお実験値を上回った。得られた τ_{av}^{max} は繰り返し回数 1~3 回で得られたものであるため、さらに繰り返しの進んだ終局時には τ_{av}^{max} は測定した値よりもより低下しているものと思われる。

付着を与えない部材ではいずれも計算値が実験値を下回る結果となった。また計算値どうしを比較した場合、完全付着と付着応力ゼロとではかなりの差異がみられた。

図11・12に荷重-変位曲線の外部接合部における計算結果を示す。付着を与えた場合では耐力・剛性の低

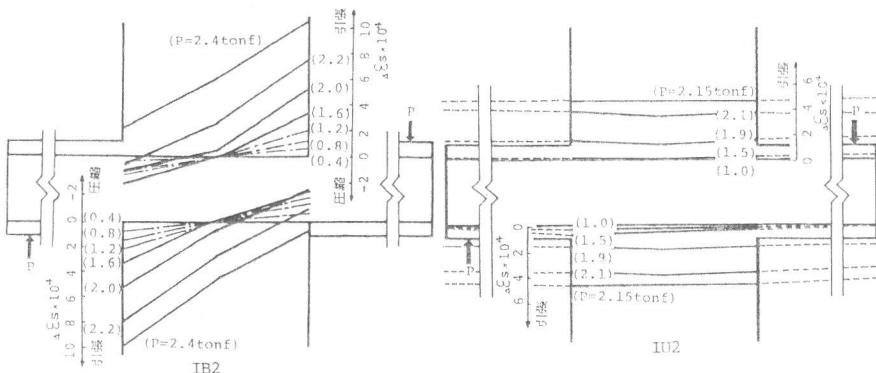


図4 接合部内P C鋼材ひずみ分布変化(内部接合部)

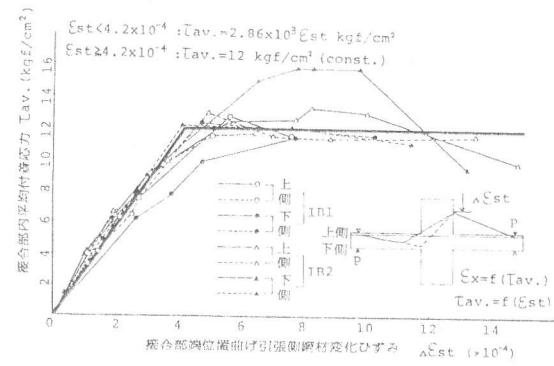


図5 $\Delta\varepsilon_{st}-\tau_{av}$ 関係

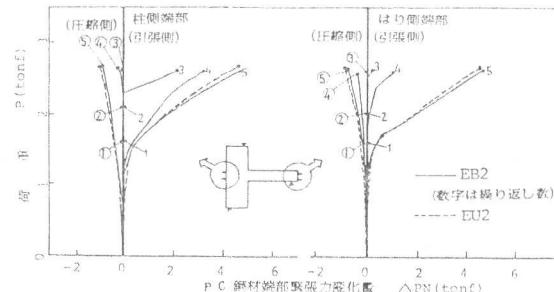


図6 荷重-P C鋼材端部強張力変化量関係(Bシリーズ)

（注）①柱側端部（引張側）
②はり側端部（引張側）
③柱側端部（引張側）
④はり側端部（引張側）
⑤柱側端部（引張側）
EB2 (数字は繰り返し数)
EU2

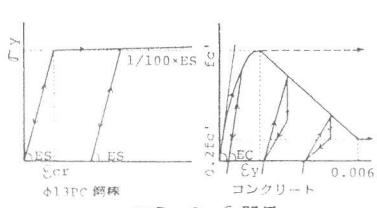
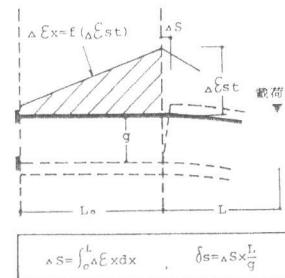


図7 σ-ε関係



$$\Delta S = \int_0^L \Delta \varepsilon x dx, \quad \delta_S = \Delta S \times \frac{L}{g}$$

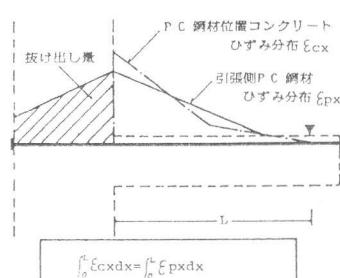


図9 付着劣化を考慮した変形の適合条件

下を考慮した CASE3 が最もよい近似を示している。そして鋼材の抜け出しによる付加たわみが、計算ではかなりの割合を占めていることもわかる。付着を与えない場合でも CASE4 ではかなりよい近似が得られた。

図 12 の破線の部分は、モーメント勾配のある場合の曲げ破壊時コンクリート圧縮縁ひずみ ε_{cu} の増大を考慮し、図 7 のコンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 曲線を破線のように μ_1 を保ちつつひずみが増大するとして求めたものである。 ε_{cu} の増大の限度を定めるという問題が残されているが、荷重・変位の増加がみられ、より広く実験値を追跡できることがわかる。

5. 結論

計算結果によれば、接合部を含む P C 部材の復元力特性は付着の有無により耐力ばかりでなく、剛性にもかなりの差異がみられる。しかしながら、グラウトにより付着を与えた P C 部材では接合部およびその近傍を中心に容易に付着劣化が生じ、そのため実験結果からは計算結果ほどの顕著な差異はみられなかった。

付着を与えた P C 部材では、付着劣化にともなう鋼材の抜け出しに起因する付加変位を考慮することにより、単調載荷時の荷重-変位関係がより正しく計算できるようになった。また付着を与えない P C 部材についても、コンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 曲線の仮定に若干の問題が残っているもののより広い荷重-変位関係の追跡が可能となった。

(参考文献)

- 1) 坂・六車「付着のない P C はりの曲げ破壊耐力」日本建築学会論文報告集 60 号 S33.10
- 2) 角・本岡他「接合部を含む P C 部材の付着劣化に関する研究」日本建築学会大会梗概集 S 57.9
- 3) 角・鈴木他「接合部を含む P C 部材の付着特性と変形挙動に関する研究」日本建築学会大会梗概集 S 58.2
- 4) 森田・角「鉄筋コンクリート柱はり接合部におけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて」日本建築学会大会梗概集 S 47.10
- 5) A.H. Mattok 「Rotational Capacity of Hinging Regions in R.C. Beam」 Flexural Mechanics of R.C., International Symposium, ACI-ASCE, Miami, Nov. 1964

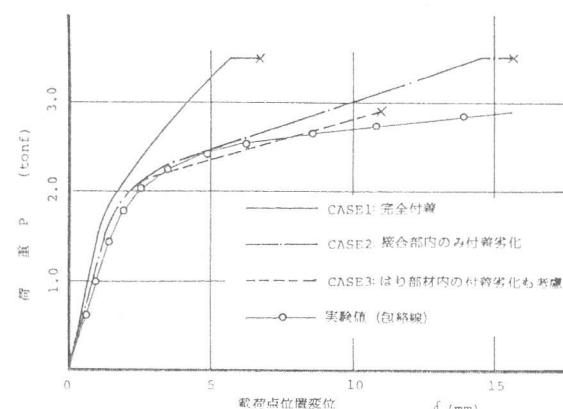


図11 付着有り 外部接合部 荷重-変位関係の計算

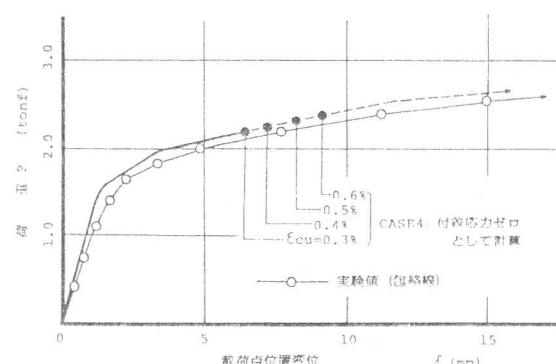


図12 付着無し 外部接合部 荷重-変位関係の計算