# 論文 強度の異なるコンクリートを打ち分けた RC 梁の付着性状

濱田 明俊<sup>\*1</sup>·石川 裕次<sup>\*2</sup>·飯田 正憲<sup>\*3</sup>·平林 聖尊<sup>\*4</sup>

要旨:ハーフプレキャスト (PCa) 梁による施工合理化を目的として,梁のトップコンクリートをスラブと同 じ低強度のコンクリートに打ち分けた RC 梁の構造性能,特に,トップコンクリートのコンクリート強度が RC 梁と比較して低い場合に,最も懸念される付着性状を把握するために実験的研究を行った。梁上端筋の付 着強度に対するスラブの影響に着目し,実験変数はスラブの無い矩形断面梁,ハーフ PCa スラブおよび在来 工法による一体打ちスラブを有するT形断面梁とした。実験結果はそれぞれ異なる破壊性状を示しており, RC スラブが取り付くことで,梁主筋の付着強度が増加することを確認した。 キーワード:付着強度,設計用付着応力度,梁,スラブ,異強度コンクリート

# 1. はじめに

RC 造建物においては、梁と床スラブに異なる設計基 準強度のコンクリートを用いた設計を行う場合がある。 その場合,現場打設となる梁上部とその両側のスラブの コンクリートを打ち分ける必要があるため、打分け部の 躯体品質に問題が発生しやすくなるとともに、施工効率 が低下する要因となっている。そこで、著者らは、梁ト ップコンクリートを床スラブと同じ強度のコンクリート とする異強度コンクリートを有する梁の研究開発を行っ てきた。トップコンクリートの強度が低い場合には、梁 上端筋の付着強度の低下等について適切に評価する必要 がある。スラブの効果を含めた付着性能に関して、藤沢 らによってハーフ PCa 板を用いた T 形梁の付着性能の研 究 <sup>1)</sup>がなされているが、異強度コンクリートを有する梁 主筋の付着強度に対するスラブの影響に着目した実験的 研究は少ない。そこで、本研究では、現行の設計指針に 考慮されていないスラブの効果についても合わせて検討 するために,付着割裂破壊を誘引した試験体を作成し, RC 梁に取りつく RC スラブが梁主筋の付着強度に及ぼ す影響および靱性保証型耐震設計指針<sup>2)</sup>における設計用 付着応力度の妥当性について検討を行った。

試験体		F10	F11	F12	
keyword		スラブなし	ハーフPCa 合成スラブ	ー体打ち スラブ	
梁断面:B×D [mm]		250×400			
スラブ厚:t[mm]		_	50 + 70	100	
トップコンクリート厚:t[mm]		100	120	100	
[梁断面に占める割合]		[25%]	[30%]	[25%]	
コンクリート圧縮強度 f'c [N/mm <sup>2</sup> ]	上	24.7	27.1	30.6	
	Т	70.1	74.4	65.0	
梁主筋(種別)[Pt]		4-D22(SD980) [1.71%]			
せん断補強筋(種別) [Pw]		2-D6@40(SD785) [0.64%]			
スラブ筋(種別)			D6@80 (SD295A)		
梁上端 付着割裂強度 <sup>*</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{bu}$	2.71	2.78	2.86	
	$\tau_{\mathrm{f}}$	5.94			
	$\tau_{bu}^{}/\tau_{f}^{}$	0.46	0.47	0.48	
梁下端 付着割裂強度 <sup>*</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{bu}$ '	3.62	3.69	3.54	
	$\tau_{\rm f}$	5.94			
	$\tau_{bu}{'}/\tau_{f}{'}$	0.61	0.62	0.60	
打継面 せん断強度 <sup>**</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{\rm xy}$	2.79			
	$\tau_{\rm u}$	5.12			
	$\tau_{xy}\!/\!\tau_u$	0.55			

\*靱性保証型設計指針式 <sup>2)</sup>, \*\*現場打ち同等 PCa 構造設計指針式 <sup>3)</sup>



# 表-1 試験体諸元

#### 2. 実験概要

# 2.1 実験変数, 試験体

表-1に試験体諸元を,図-1に試験体形状および配筋 詳細を示す。試験体は実大の約 1/2 スケールとした。実 験変数は、スラブの無い矩形断面梁、ハーフ PCa スラブ および在来工法による一体打ちスラブを有するT形断面 梁の3体であり、いずれも靱性保証型耐震設計指針<sup>2)</sup>に おける付着信頼強度 τ<sub>hu</sub>を設計用付着応力度 τ<sub>f</sub>で除した 付着余裕度が 1.0 を下回る試験体である。表中の値は, 表-2 に示す鉄筋の材料試験結果を用いて算出した。ス ラブは実大スケールで梁両側 1m 程度を有効とする考え に基づいて設定している。コンクリートの圧縮強度は上 部 24.7~30.6N/mm<sup>2</sup>,下部 65.0~74.4N/mm<sup>2</sup>であり,低強 度コンクリートが梁断面に占める割合は 25%~30%で ある。試験体主筋には付着割裂破壊を誘引するために SD980 を, せん断補強筋には SD785 を使用し, コンクリ ートは梁上面側から打設を行った。また、図-2 に鉄筋 歪みの計測位置を示す。せん断補強筋の歪みゲージは梁 の材軸方向に表裏一対に貼付し、付着割裂破壊が生じた 主筋が水平方向に滑動することにより、せん断補強筋に 作用する局所的な曲げ変形を計測できるよう計画した。

# (1)試験体 F10(実験変数:スラブなし)

試験体 F10 はスラブの無い矩形断面梁である。上下主 筋の付着余裕度はそれぞれ 0.46, 0.61 である。

# (2) 試験体 F11 (実験変数:ハーフ PCa スラブ)

試験体 F11 はハーフ PCa スラブを有する T 形断面梁で ある。スラブはホロコアスラブ(板厚は 70mm)と一体 打ちスラブ(板厚は 50mm)から構成されている。上下 主筋の付着余裕度はそれぞれ 0.47, 0.62 である。

# (3) 試験体 F12(実験変数:一体打ちスラブ)

試験体 F12 は一体打ちスラブを有する T 形断面梁である。一体打ちスラブの板厚は 100mm であり,上下主筋の付着余裕度はそれぞれ 0.48, 0.60 である。

# 2.2 加力方法

図-3 に加力装置を示す。試験体はスタブを反力床に PC鋼棒で固定し、反力フレームに取り付けたオイルジ ャッキ (5000kN) によって、モーメント分布が逆対称に なるように、正負交番繰返載荷を行った。実験では左右 のスタブから試験体中央部の鉛直変位  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ を計測し、 その平均値  $\delta$  (= ( $\delta_1 + \delta_2$ )/2) を試験体内法長さ *l* で 除した部材角 R=  $\delta/l$ により制御した。図-4 に加力サ イクルを示す。載荷履歴は、部材角 R=1.0, 2.0, 3.3, 5.0, (2.0)、7.5, 10, (5.0)、15, 20, 30, 40×10<sup>-3</sup>rad まで正 負交番繰返載荷を行い、最後に+50×10<sup>-3</sup>rad まで押し切 り載荷を行った。R=2.0, 5.0×10<sup>-3</sup>rad については各 10 サ イクルを、R=30, 40×10<sup>-3</sup>rad については各 1 サイクルを 行い、その他の部材角については 2 サイクルの載荷を行

#### 降伏点 ヤング係数 引張強さ 種別 使用箇所 / [N/mm<sup>2</sup> $E_s [N/mm^2]$ [N/mm<sup>2</sup>] SD980 (D22) 992 1055 主筋 1.96×10<sup>5</sup> SD785 (D6) 1082 891 1.88×105 せん断補強筋 SD295A (D6) 406\* $1.81 \times 10^{5}$ 523 スラブ筋 \*0.2%オフセット耐力 主筋歪み Ō 打継ぎ位置 $\pm^{10}$ mm せん断補強筋歪み 鉄筋歪みの測定位置 図-2 1200 2600 1200 ÷ $(\Phi)$ . . . . 2500/5000kN ロードヤル 正加力 2500/5000kN 800 PC鋼棒4-Φ32 800 1300 1300 PC鋼棒8-Φ26 m 試験体 2200 2100 図-3 加力装置図 単位[mm] 60 40 rad.) 20 R (1/1000 510 $\sim$ 水平変形角 -3.32 -510 -20 30(1) ※〇の数値は繰り返し回数を示す。 -60 図-4 加力サイクル

った。() 内のサイクルは,履歴特性を把握するために各 変形後の小サイクルを想定した。ただし,試験体 F10 は, 付着割裂破壊による損傷度合を考慮し, R=15, 20× 10<sup>-3</sup>rad の載荷を各1サイクルとした。

#### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊性状と履歴特性

図-5, 8, 11 に各試験体のせん断力および等価粘性減 衰定数-部材角関係を,図-6,9,12 に部材角 R=10, 20,30,40×10<sup>-3</sup>rad における各試験体の損傷状況を示す。 また,図-7,10,13 には各試験体の部材角 R=15×10<sup>-3</sup>rad におけるひび割れ図を示す。図中の実線および破線は, 正加力時および負加力時のひび割れをそれぞれ示す。 図-5,8,11 の下段における等価粘性減衰定数は,同一 変位における繰り返し載荷の履歴特性に基づいて算定を 行った(等価ポテンシャルエネルギーは,各変位までの 最大耐力から算定した)。

### 表-2 鉄筋の材料試験結果



















すべての試験体について, R=1.0×10<sup>3</sup>rad の載荷サイ クルにおいて, 梁端部から 1.0D (D:梁せい)の範囲に 曲げひび割れが発生し, その後, R=5.0×10<sup>3</sup>rad までに せん断ひび割れおよび梁端部から 2.0D の範囲において 曲げひび割れが発生した。

### (1)試験体 F10 (スラブなし)

試験体 F10 では, R=7.5×10<sup>-3</sup>rad 時に梁端部から 2.5D の範囲に付着ひび割れが発生し, R=10×10<sup>-3</sup>rad 時には部 材中央部まで付着ひび割れの発生が確認できた。R=  $15\times10^{-3}$ rad 時には, 梁上端筋側面に付着ひび割れが全長 にわたって発生し, R= $20\times10^{-3}$ rad 時にはそのひび割れ幅 が 0.2mm となった。R= $30\times10^{-3}$ rad 時に梁上端筋の側面 かぶりコンクリートが剥落し,最大耐力に至った。また, 打継面の一部にひび割れが確認できた。その後, R=  $40\times10^{-3}$ rad 時に主筋が降伏した。なお,最大耐力以降の 耐力低下は 13%であった。

# (2)試験体 F11 (ハーフ PCa スラブ)

試験体 F11 では, R=7.5×10<sup>-3</sup>rad 時に梁下部に生じた 曲げひび割れが部材中央部にまで発生し, R=15×10<sup>-3</sup>rad 時には梁下端筋の側面かぶりに付着ひび割れが発生した。 また, 圧縮縁のかぶりコンクリートの剥落が確認できた。 R=20×10<sup>-3</sup>rad 正加力時には梁のスパン中央部において, 梁とスラブの界面にひび割れが発生し,負加力時にはホ ロコアスラブと一体打ちスラブの打継位置において,材 軸方向に打継面ひび割れが発生した。R=30×10<sup>-3</sup>rad 時に 最大耐力となり, R=40×10<sup>-3</sup>rad 時には,梁上端筋近傍の 側面かぶりコンクリートが剥落したが,耐力低下に至ら なかった。R=50×10<sup>-3</sup>rad 時に最大耐力の 82%の耐力を 示し,梁下端筋の側面かぶりコンクリートが剥落した。

# (3)試験体 F12(一体打ちスラブ)

試験体 F12 では, R=7.5×10<sup>-3</sup>rad 時に梁下端の曲げひ び割れが部材中央部に発生し, R=15×10<sup>-3</sup>rad 時には梁下 端筋の側面かぶりに付着割裂ひび割れが発生した。R= 20×10<sup>-3</sup>rad 時に梁下端の圧縮縁コンクリートが剥落,梁 下端筋が降伏し,最大耐力に至った。R=30×10<sup>-3</sup>rad 時に は,梁下端筋の側面かぶりコンクリート,スラブ下面の かぶりコンクリートが剥落した。その後,R=50×10<sup>-3</sup>rad 時に最大耐力の 78%の耐力を示した。

#### 3.2 最大耐力

表-3 に最大耐力(実験値)と梁曲げ終局強度(計算値)の比較を示す。実験値は正負サイクルの平均値である。計算値は,RC規準式<sup>4)</sup>により,スラブ付き試験体の 梁曲げ終局強度にはスラブ筋の耐力を付加している。 それぞれの実験値/計算値は,試験体 F10 は 0.76,試験 体 F11 は 0.88,試験体 F12 は 1.05 という結果であり,ス ラブを有する試験体の最大耐力はスラブを有しない試験 体の耐力を上回る結果となった。また,コンクリートの 有効スラブ厚が大きいほど、その効果が高いことが確認 できる。試験体 F10 と F12 を比較すると、一体打ちスラ ブによって、低強度側である梁上端の付着割裂破壊が防 止され、梁下端の付着割裂強度以上に梁上端の付着割裂 強度が上昇したことになる。

# 3.3 梁主筋応力度分布

図-14の上段に各試験体の梁主筋応力度分布を,下段 に部材両端部の主筋応力度の差を示す。主筋応力度の差 を示す指標として,引張応力度 $\sigma_{st}$ に対する圧縮応力度  $\sigma_{sc}$ の比率 $\sigma_{sc}/\sigma_{st}$ を図上()内にその絶対値を併記した。 なお,グラフ直上に示す数値は,降伏応力度を超えた主 筋応力度の値を示している。主筋に貼り付けた歪みゲー ジ位置を最上段に示し,主筋歪みのデータは,鉄筋の表 裏に貼付した歪みゲージの平均値を用いた。部材角が大 きい R=30×10<sup>-3</sup>rad については,計測された値のみプロ ットした。

全ての試験体で部材角が大きいほど,主筋の応力度も 大きくなり,部材両端部(圧縮縁側と引張縁側)の差が 大きくなる傾向が見られた。いずれの試験体も引張縁側 の主筋応力度の方が大きいことが確認できた。

朝性保証型耐震設計指針<sup>2)</sup>では,降伏ヒンジを計画し ない場合,設計用付着応力度  $\tau_f を求める際に,部材両端$  $部の主筋の応力度の差<math>\Delta \sigma \ \epsilon \ 2\sigma_y \ (\sigma_{sc}/\sigma_{sr}=1.0)$ として 求めることとなっている。本実験では,試験体 F10, F11 の梁主筋は, R=30×10<sup>-3</sup>rad 時において降伏応力度  $\sigma_y$ に 至っており,両端部の応力度比は試験体 F10 で 0.16~0.40, 試験体 F11 で 0.01~0.38 であった。試験体 F12 の梁主筋 は, R=20×10<sup>-3</sup>rad 時において降伏応力度を超える値と なっており,主筋の降伏が確認された。両端部の応力度 の比は 0.23~0.31 であった。

#### 3.4 平均付着応力度分布

貼り付けた歪みゲージの歪み量から式(1)により,主筋 の平均付着応力度を求めた。

$$\tau = (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) E_s A_s / \psi \Delta L_i \tag{1}$$

ここで、 $\varepsilon_i$ :梁左端からi番目の歪み計測値、 $A_s$ :鉄筋の断面積、 $\psi$ :鉄筋の周長、 $\Delta L_i$ :歪みゲージ間隔

図-15 に正加力時の各部材角における梁上端筋およ び下端筋の平均付着応力度を示す。図の縦軸は、平均付 着応力度τを付着信頼強度τ<sub>bu</sub><sup>2)</sup>で無次元化した値である。 平均付着応力度は、部材角が大きくなるほど大きくなり、 試験体 F10 では、R=20×10<sup>3</sup>rad 時に梁上端筋の平均付着 強度が梁部材中央で付着信頼強度を上回る結果となり、 破壊モードも上端筋の付着割裂破壊であった。試験体 F11 では、R=10×10<sup>3</sup>rad 時に上端筋、下端筋とも平均付 着応力度が梁部材中央で付着信頼強度を上回る結果とな ったが、上端筋の方がその値は大きく、下端筋の2倍近 い値であることが確認できる。R=30×10<sup>3</sup>rad 時におい

表-3 曲げ終局強度と実験値の比較

試験体		F10	F11	F12
有効スラブ厚 [mm]		0	50	100
計算值 <sub>cal</sub> Q <sub>mu</sub>	[kN]	456.1	467.3	467.3
実験值 <sub>exp</sub> Q	[kN]	348.0	413.0	490.3
実験値/計算値	expQ/calQmu	0.76	0.88	1.05
破壊モード		上端筋の 付着割裂破壊	上端筋および 下端筋の 付着割裂破壊	曲げ降伏後の 下端筋の 付着割裂破壊



部材角 [rad] 部材角 [rad] (c) 試験体 F12 ※()内は σ<sub>sc</sub> / σ<sub>st</sub> の値を示す。

図-14 梁主筋応力度分布と部材両端部の主筋応力度の差





て、梁上端筋側面であるスラブ打継面位置においてひび 割れが発生しており、最終的な破壊モードは上端筋およ び下端筋の付着割裂破壊と判断した。試験体 F12 では、 R=20×10<sup>-3</sup>rad 時に上端筋、下端筋とも平均付着応力度が 梁部材中央で付着信頼強度を上回る結果となり、その値 は同程度であったが、最終的な破壊モードは下端筋の付 着割裂破壊であった。これは、梁上端に RC スラブが取 りつく影響によるものと推測される。

#### 3.4 梁せん断補強筋歪み

図-16 に各試験体のせん断補強筋歪み一部材角関係 を示す。せん断補強筋歪みゲージは図-17 に示すように 上部コンクリート側に設置し, 歪みデータは鉄筋の表裏 (梁の材軸方向に一対) に貼付した歪みゲージの平均値 を用いた。図中には降伏歪み  $\varepsilon_y$ を併記している。部材角 が  $\mathbf{R}=30\times10^3$ rad を超えると, 歪みが正しく計測できな い箇所も見受けられたため,計測された値のみ記載する。

上端筋の付着割裂破壊が生じた試験体 F10 および F11 では、部材角が R=20×10<sup>-3</sup>rad を超えると、負側(圧縮 側)にも大きな歪みが生じ始める。これは梁主筋が水平 方向に滑動することにより、せん断補強筋に局所的な曲 げ変形が生じていると考えられる。一方、上端筋の付着 割裂破壊が確認されなかった試験体 F12 では、付着割裂 破壊に至った F10 や F11 のような現象は見られなかった。



図-17 せん断補強筋の R=50×10<sup>-3</sup> [rad]時変形状況

# 4. まとめ

強度の異なるコンクリートを打ち分けた RC 梁に取り つく RC スラブが,梁主筋の付着強度に及ぼす影響を把 握するために,スラブの無い矩形断面梁,ハーフ PCaス ラブおよび在来工法による一体打ちスラブを有するT形 断面梁の静的載荷実験を実施し,以下の知見が得られた。

- (1) RC スラブが取りつく場合,梁主筋の付着強度が増加 することを確認した。また、コンクリートの有効ス ラブ厚が大きいほど、梁主筋の付着強度が増加する ことを確認した。
- (2)付着割裂破壊が生じる試験体における部材両端部 (圧縮縁側と引張縁側)の主筋応力度は、引張縁側 の方が大きく、その値は主筋の応力度が大きいほど 大きくなる傾向があることを確認した。

#### 参考文献

- 藤沢正規ほか:梁の靱性確保に関する研究(ハーフ PCaシリーズ),HFW研究開発プロジェクト研究開発 報告資料,1989
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証
  型耐震設計指針・同解説,1999
- 日本建築学会:現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針,2002
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説,2010