

論文 打込み型枠を用いた合成梁構造の実験的研究

小柳光生*1・中根 淳*2・吉岡研三*3・小林 譲*4

要旨：施工の省力化のために梁用の薄肉プレキャスト打込み型枠工法を既に開発している。このプレキャスト材を合成梁とする目的で、せん断スパン比や鉄筋比を変えた曲げせん断実験を行い、構造性能を調べた。その結果、比較用の一体打ち梁と同等以上の構造性能を有しており、特にせん断特性に優れていた。既往の強度算定式が適用出来ることを確認するとともに肌分かれの問題についても検討した。

キーワード：打込み型枠、合成梁、薄肉プレキャスト、せん断強度

1. はじめに

施工の省力化や環境保護の観点から、梁用打込み薄肉プレキャスト型枠(PCa材)工法を開発し、既に多くの使用実績を持つが、現在、更に構造体の一部とみなすことの出来る改良タイプを開発している[1]。ここではその改良タイプを用いた合成梁を使って曲げせん断に関する一連の構造実験を行い、在来型の一体打ち梁と同等以上の構造性能を有することを確認した。

2. 実験概要

2. 1 実験目的

合成梁という点を考えると、界面部分の一体性の確保が重要となる。つまり、外力作用時に界面部分で肌分かれし、通常の一体打ち梁に比べて、曲げ性能やせん断性能を損なうことがあれば問題となる。そこで一体打ち梁と合成梁について比較した構造実験を行い、同等以上の構造性能を有することを確認し、合成梁の設計法に関する実験資料を得ることを目的とする。

2. 2 実験概要

PCa材は平らなベッド上で打込んだ高強度コンクリートを折曲げることで形成する梁用型枠材であり、その仕様、調合表を図-1、表-1に示す。界面に砂利コッターを造作したのが改良点である。このPCa材の曲げ強度はひび割れ時 8.1N/mm^2 、最大曲げ強度 11N/mm^2 、圧縮強度 90N/mm^2 で、その曲げ強度-たわみ関係の一例を図-2に示すが、PCa材は初期ひび割れ後も靱性が高い。梁試験体の一覧を表-2に示す。主な実験変数はせん断スパン比、主筋量、せん断補強筋

表-1 PCa板調合

								(kg/m ³)
W/C (%)	単位水量	セメント量	細骨材	粗骨材	収縮低減剤	ピニロン	高性能AE減水剤	
29.0	269	928	689	346	8	26	25	

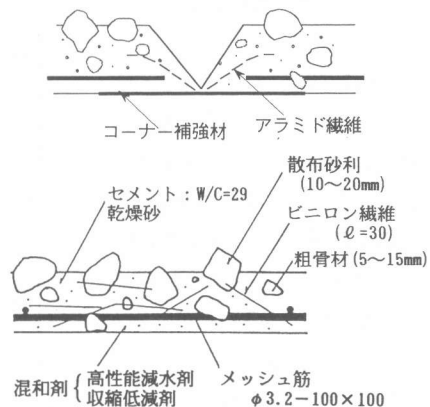


図-1 PCa板の仕様

*1 (株)大林組技術研究所、建築第二研究室、主任研究員、工博(正会員)

*2 同、建築第二研究室、室長、工修(正会員)

*3 同、構造第三研究室、室長、工博(正会員)、 *4 同、構造第三研究室、研究員

の強度とその量とし、在来梁と比較した。また界面部の剥離剤塗布の有無もパラメータとしたが、これは界面の接着力を消失させて砂利コッターのせん断特性を調べるものである。試験体形状、配筋図を図-3に示す。梁せい50cm、幅30cmの梁断面で、上端部はスラブ厚10cmを想定した。後打ちコンクリートの目標強度は $F_c=27\text{N/mm}^2$ で、試験時で実強度 $27.3\sim 29.6\text{N/mm}^2$ で

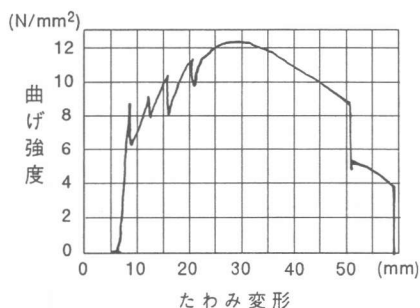


図-2 PCa板荷重変位

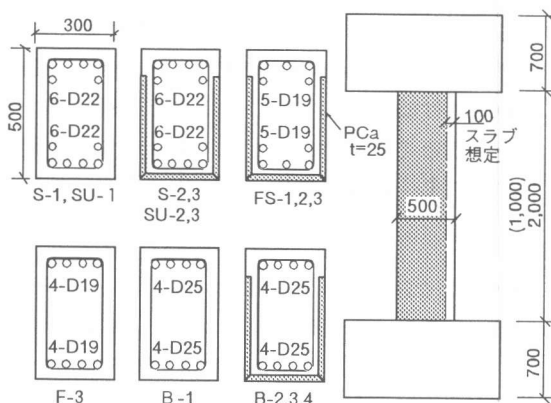


図-3 試験体形状と配筋

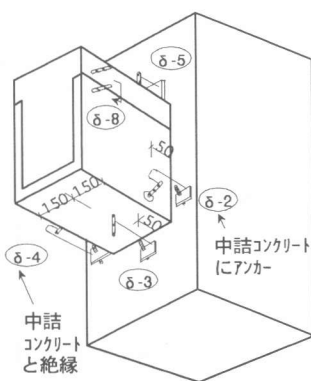


図-4 肌分かれ測定方法

あった。割裂強度は $2.37\sim 2.84\text{N/mm}^2$ であった。加力方法は建研式短柱試験装置を使って、正負交番繰返し載荷とする。載荷履歴は、曲げひび割れ荷重で各1回、部材角 $1/200, 1/100, 1/50$ で各2回づつの加力をし、最終的に $1/33$ の変形を加えることとした。なお、プレキャスト部材側に向かって試験体上部を押し方向を正加力とした。

計測内容は①肌分かれの測定：梁接合部の抜きし変形(PCa材のずれ)を調べるため図-4に示すよ

表-2 試験体一覧

試験体記号	実験変数			試験体諸元		
	製造方法	剥離剤の有無	せん断補強筋	M/QD	主筋量	破壊モード
S-1	RC	—	2-D10 @200	1.0	6-D22 $p_t=1.84\%$ SD 345	主筋降伏前せん断破壊
S-2	合成梁	無	$P_w=0.24\%$			
S-3		有	SD 295			
SU-1	RC	—	ウルボン	2.0	5-D19 $p_t=1.15\%$ SD 345	降伏後せん断破壊
SU-2	合成梁	無	2-U6.4 @150			
SU-3		有	$P_w=0.133\%$			
FS-1	合成梁	無	端部 2-D10 @70 $P_w=0.68\%$	2.0	5-D19 $p_t=1.15\%$ SD 345	降伏後せん断破壊
FS-2			中央部 2-D10 @140 $P_w=0.34\%$			
FS-3		無	端部 3-D10 @70 $P_w=1.02\%$			
F-3	RC	無	2-D10 @140 $P_w=0.34\%$	2.0	4-D19 $p_t=0.87\%$ SD 345	曲げ破壊
B-1	RC	—	4-D10 @70 $P_w=1.36\%$ SD 295			
B-2	合成梁	無	2-U 9.2 @80 $P_w=0.53\%$			
B-3		有	$\sigma_{wy}=1300\text{ N/mm}^2$			
B-4	合成梁	無	4-D10 @100 $P_w=0.95\%$	2.0	4-D25 $p_t=1.54\%$ SD 345	降伏後付着破壊

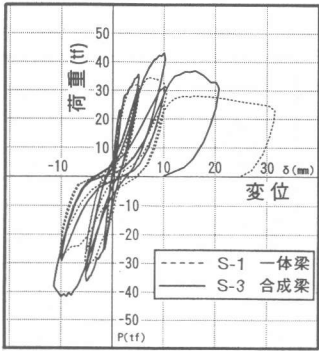
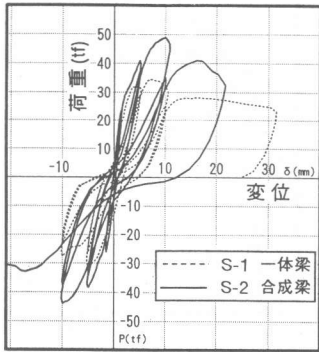


図-5 Sシリーズ荷重-変位

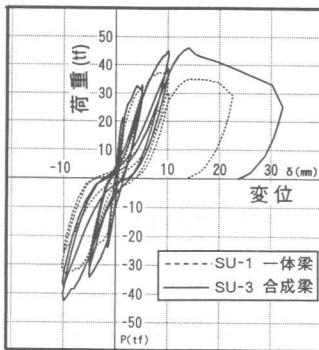
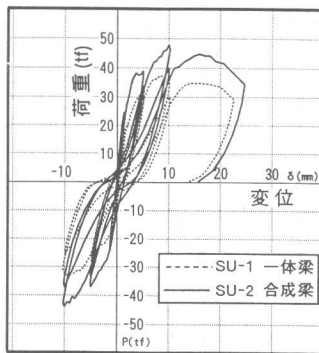


図-6 SUシリーズ荷重-変位

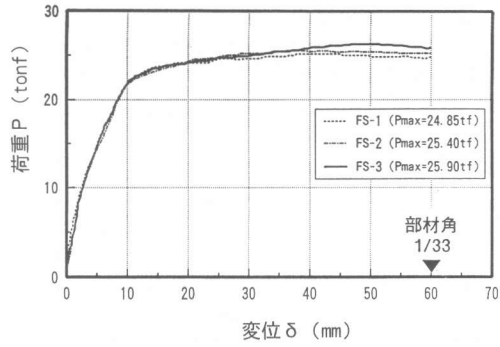


図-7 FSシリーズ荷重-変位包絡線

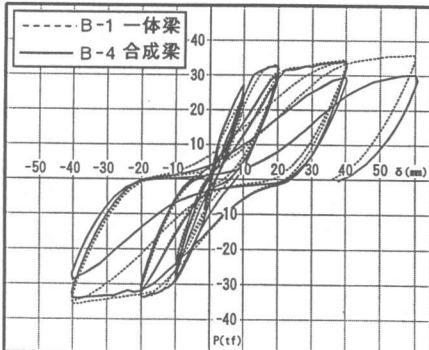
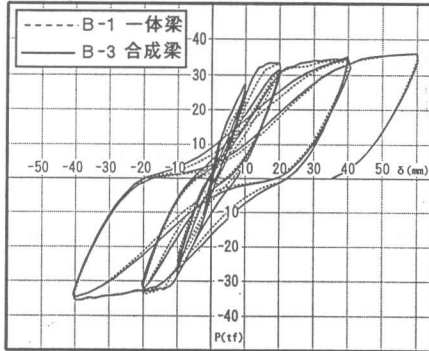
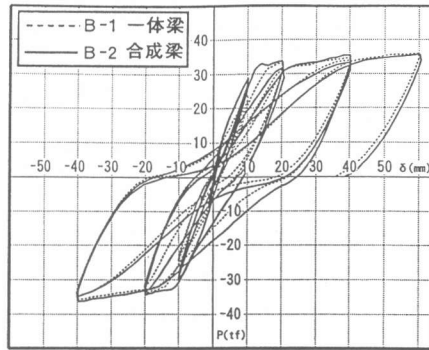
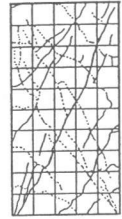
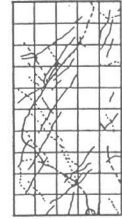


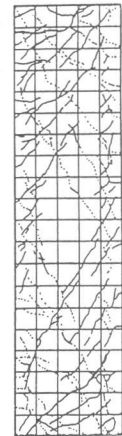
図-8 Bシリーズ荷重-変位



S-1



S-2



B-1



B-2

図-9 ひび割れ状況

表-3 実験結果一覧

試験体記号	種類	初期ひび割れ強度 (tonf)	最大強度 実験値 (tonf)	シリーズ間強度比	肌分かれ強度 (tonf)	破壊形式
S-1	RC	17.0	34.45	1.00	—	主筋降伏前せん断破壊
S-2	合成梁	32.5	49.00	1.42	32.0	
S-3		23.1	43.15	1.25	28.0	
SU-1	RC	18.0	37.30	1.00	—	
SU-2	合成梁	24.5	47.60	1.28	38.0	
SU-3		21.5	46.25	1.24	24.0	
FS-1	合成梁	10.0	24.85	—	24.0	曲げ降伏後せん断破壊
FS-2		10.0	25.4	—	25.0	
FS-3		9.0	25.9	—	25.0	曲げ破壊
F-3		9.5	20.8	—	20.0	
B-1	RC	7.5	36.05	1.00	—	曲げ降伏後せん断破壊
B-2	合成梁	10.0	35.75	0.99	33.5	
B-3		10.0	36.10	1.00	27.0	
B-4		10.5	34.70	—	28.0	

に測定する。 δ -2は後打ち部にアンカーし、 δ -4はずれ変形を測るために後打ちコンクリート部と縁を切った。 δ -8はPCa側板と後打ちコンクリートとのずれ変形を測定する。
②鉄筋歪み測定：主筋およびせん断補強筋。

3. 実験結果

3. 1 荷重-変位関係とひび割れ状況

実験結果の一覧を表-3に示す。全体の荷重-相対変位関係を図-5~8に示す。S-1, SU-1, B-1は、それぞれの合成梁シリーズとの比較用一体型の梁試験体であるが、せん断で破壊が決まるタイプ(S, SUシリーズ)は、在来の一体打ち梁と比較して1.2~1.4倍の最大強度を有し、せん断耐力の面で優れていることが確認された。曲げで破壊が決まるタイプ(Bシリーズ)はほぼ同程度の耐力を有することが分かった。全体的な破壊状況を示す。S, SUシリーズはせん断ひび割れを多数生じ、部材角1/50で耐力低下を起しており、全てせん断破壊を生じた。FSシリーズとF-3およびBシリーズのB-1~3

は、部材角1/33までは耐力低下もなく曲げ破壊と考えられるが、B-4は上端主筋に沿ったひび割れを多く発生し靱性がやや劣ったため付着割裂破壊といえる。最終部材角時のひび割れ状況をS, Bシリーズについて図-9に示す。

3. 2 肌分かれの状況

S-2, S-3の接合部ずれ変形について図-10に示す。S-2は最大荷重までずれ変形はないが、S-3(剥離剤塗布)は10tonf(98KN)前後でずれ変形を生じ始めた。しかし接合部ずれ変形はこ

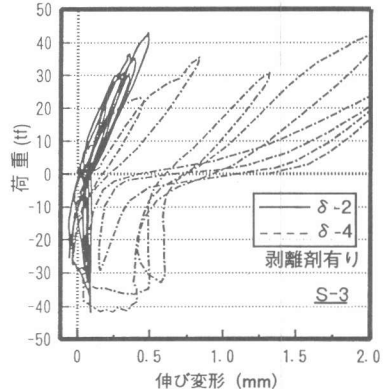
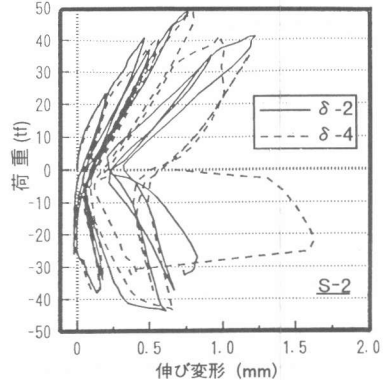


図-10 接合部ずれ変形

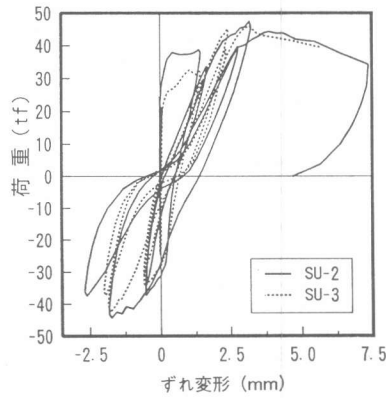


図-11 梁側面ずれ変形(δ -8)

く局部的な肌分かれである。梁側面のずれ変形の結果の一部を図-11に示す。この側面ずれ変形(δ-8)が、全体的な肌分かれ現象を表現しているが、SU-2の場合、SU-1(在来梁)の最大荷重程度まで一体性は良好である。表-3に肌分かれ荷重をまとめて示すが、この荷重は梁側面で0.5mm以上のずれ変形を生じた時点と定義した。この表からせん断破壊タイプでも合成梁(剥離剤無し)は在来梁の最大荷重に近い荷重まで肌分かれの恐れがないことを確認した。なお、界面せん断強度は、別途行った材料実験[1]から2.3N/mm²、剥離剤塗布タイプでも1.58N/mm²と大きかった。これは砂利コッターが効果的に作用したためと思われる。

4. 計算値との比較検討

4.1 せん断強度に対する検討

計算値は終局強度設計指針[2]を参考に求め、この設計法への合成梁の適用性を検討した。せん断強度計算式：

$$V_u = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_p / 2 \quad (1)$$

ここに $\tan \theta = \{ \sqrt{[(L/D)^2 + 1]} - L/D \}$

$$\beta = \{ (1 + \cot^2 \phi) p_w \cdot \sigma_{wy} \} / (\nu \cdot \sigma_p)$$

なお記号の説明は省略する。S, SUシリーズは曲げ降伏前のせん断破壊を計画した。実験結果を計算値と比較して表-4に示す。在来の梁の場合、計算値②は実験値とほぼ合うが、合成梁の場合、1.2~1.4倍と大きい。これはPCa板の高強度の影響と考えられるため、合成梁の場合、等価強度という考えを使い再検討した。試験時の後打ちコンクリート強度をFc=270、PCa板強度をFp=90N/mm²と設定する。後打ちコンクリート、PCa材の断面積をそれぞれAc、Apとすると、等価強度：Fc'=(Ac×Fc+Ap×Fp)/(Ac+Ap)を使って、Fc'=38N/mm²が得られる。(1)式からせん断強度を再計算しその結果③を同表に示すが、実験値と良く適合した。なお、SUシリーズの高強度せん断補強筋の強度は25σ_Bとして計算したが、実験結果からも妥当であった。

4.2 曲げ強度に対する検討

F-3、FS-1~3試験体は、曲げ強度計算法の適用性を確認する目的で、曲げ降伏するように計画した。曲げ強度計算値の算定は以下の略算式を用いて曲げ終局強度Muを算出する。

$$M_u = 0.9 A_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (2)$$

表-4に実験値と比較するがその比は1.2~1.3であった。計算値は略算式のためやや安全側であるが、その妥当性が確認された。

4.3 付着強度に対する検討

B-1~B-4試験体は、主筋降伏後、付着破壊するように計画し

表-4 最大強度実験値と計算値

試験体名称	最大強度 実験値 ① (tf)	せん断強度 計算値 ② (tf)	せん断強度 計算値 ③ (tf)*	曲げ強度 計算値 ④ (tf)	肌分れ強度 計算値 ⑤ (tf)	実/計			肌分れ強度 実験値/ 計算値
						①/②	①/③	①/④	
S-1	34.45	36.6	43.9	65.3	—	0.94	—	—	—
S-2	49.00				34.5	1.39	1.11	—	0.93
S-3	43.15				23.7	1.22	0.98	—	1.18
SU-1	37.30	37.4	44.7	65.3	—	1.00	—	—	—
SU-2	47.60				34.5	1.27	1.06	—	1.10
SU-3	46.25				23.7	1.24	1.04	—	1.01
FS-1	24.85	26.9	—	20.0	—	—	—	1.24	—
FS-2	25.40				—	—	—	1.27	—
FS-3	25.90				—	—	—	1.30	—
F-3	20.80	46.7	—	17.1	—	—	—	1.22	—
B-1	36.05	41.9	—	30.3	—	—	—	1.19	—
B-2	35.75				—	—	—	1.18	—
B-3	36.10				—	—	—	1.19	—
B-4	34.70				35.0	—	—	—	1.15

* 等価強度使用

た。付着破壊すれば、十分な靱性（塑性変形能力）を確保出来ない恐れがある。加力試験の結果、B-1～B-3は、付着ひび割れ損傷の様相は認められるが、部材角 1/33 の時点でも耐力低下はなく、十分な塑性変形能力を有していた。合成梁は在来の一体打ち梁（B-1）と同等以上の付着応力度を保持していた。一方、B-4はせん断補強筋量がやや少ないこともあり、部材角 1/33 の時点で耐力が最大値の 0.86 に低下し、明らかに脆性破壊を生じた。これらの違いを考察する。付着強度の算定

終局強度設計指針 [2] から設計用付着応力度 τ_f は下式で表わされる。

$$\tau_f = db \cdot \Delta \sigma / \{4 (L - d)\} \quad (3)$$

また同解説によると最終付着強度 τ_{bu} は、全割裂の場合には以下の式で表わされる。

$$\tau_{bu} = \{60pw \cdot b (Ns + 2) / (Nt \sum db) + 0.4\} \sqrt{\sigma_B} \quad (4)$$

計算の結果、B-1～B-3では τ_f と τ_{bu} がほぼ等しかったが、B-4の場合、最終付着強度 τ_{bu} が若干低く、このことが付着破壊に影響したのではないと思われる。

なお、B-4の破壊状況を観察すると、パネル側の損傷は目立たずあくまでスラブ側つまり上端側の付着破壊であった。このことは、高強度パネルで囲まれた下端側は付着破壊に対して抵抗性能が大きいことを意味する。

以上のことから、終局強度型の付着設計法を用いて付着破壊のチェックを行えば、合成梁についても構造上、問題無いことを確認できた。

4.4 肌分かれ強度に対する検討

平均せん断強度計算式を以下のように表わし、

$$\tau = Q/bh \quad (5)$$

(Q: 荷重、b: 断面幅、h: 断面せい)

前述の材料実験値を使うと表-4に示すように良く一致した。梁の耐力がせん断強度で決まる場合、通常のせん断補強筋レベルでは問題ないが、せん断補強筋が多いような時は、一応、肌分かれのチェックを行うことが望ましい。その時の計算式は、式 (5) を利用できる。

5. まとめ

高強度PCa材を有する合成梁は、在来の一体打ち梁と同等以上の構造性能を有することを確認した。特にせん断破壊タイプは比較用在来梁に対して1.2～1.4倍の最大荷重を有し、合成梁はせん断耐力向上に有効であることが分かった。また終局強度型設計法を使って検討し、この設計法の適用が可能であることを確認した。肌分かれの問題に関しては、界面の砂利コッターの効果で、余り問題になることはないが、一応、肌分かれのチェックを行うことが望ましいこと、またその時の計算式を提案した。

参考文献

- (1) 小柳光生, 中根淳, 関根正孝: 梁部材に使用する打込み型枠の一体性に関する実験報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, PP.95～100, 1995
- (2) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990