

論文 200N/mm² 級繊維補強コンクリートを用いた外殻プレキャスト柱の復元力特性に関する実験的研究

村上 裕貴*¹・菅野 俊介*²・和泉 信之*³・白井 一義*⁴

要旨：本研究は 200N/mm² 級のコンクリートを建築構造に適用する事を目的としており、本論文では UFC (超高強度繊維補強コンクリート) を外殻に用いたプレキャスト合成柱の復元力特性試験結果を述べる。曲げ圧縮破壊した試験体においては、最大耐力到達後の耐力低下も緩やかで高い変形能力を有した。また、せん断圧縮破壊した試験体に関しては、せん断ひび割れにより耐力低下し、圧縮軸力が高い為に圧縮により試験体ははらみ、主筋の座屈・横補強筋の破断に至った。鋼繊維の効果としては、UFC が引張応力 σ_T を負担し、引張応力と等しいせん断応力 $\tau_F (= \sigma_T)$ を保持する事で曲げ耐力・せん断耐力共に上昇した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート (UFC), 外殻プレキャスト, 鋼繊維

1. はじめに

本研究は設計基準強度 200N/mm² 級の超高強度コンクリートの建築構造への適応性の検討をする事を目的としており、ここでは新しいコンクリート系材料である UFC (超高強度繊維補強コンクリート) の利用に着目している。

UFC を用いた部材は高温蒸気養生の必要性から現場製作が困難な為、プレキャスト工法が現実的である。超高層建物にプレキャスト工法を用いる場合、ヒンジの発生する柱には UFC フルプレキャスト柱、潜在ヒンジの発生する柱には厚肉の外殻プレキャスト合成柱、ヒンジの発生しない柱には薄肉の外殻プレキャスト合成柱とする工法が考えられる。この工法では、柱の軸力や応力条件に応じて UFC の外殻厚さ、コアコンクリート強度を合理的に変化させる設計が必要になる。

そこで、外殻部分に圧縮強度 200N/mm² 級の UFC、コア部分に圧縮強度 30 N/mm²・60N/mm² 級のコンクリートを用いた外殻プレキャスト合成柱の水平力下における復元力特性及び最大耐

力の評価法を検討する為の復元力特性試験を実施した。本論文は、実験結果と鋼繊維の効果等についてまとめたものである。

2. 実験計画

2.1 実験因子

実験因子は、軸力比 (2 水準)、外殻厚さ比 (2 水準)、横補強筋比 (4 水準)、コアコンクリート強度 (2 水準) とした。本実験では、コンクリート強度を UFC とコアの面積に応じた、等価コンクリート強度とした。

2.2 試験体の設計

試験体は実大柱の 1/3 スケールで全 5 体とし、曲げ破壊先行型 (以降 F 型) が 2 体、せん断破壊先行型 (以降 S 型) が 3 体となっている。試験体形状及び配筋図を図-1 に示す。図-1 に示したように外殻部分とコア部分の接合面にシヤーキーを設け一体化を図り、また、F 型がダブル配筋 (横補強筋を 2 本を束ね等間隔に配筋)、S 型がシングル配筋となっている。試験体一覧を表-1 に示す。曲げ終局強度時せん断力、せん

*1 広島大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 戸田建設 (株) 構造設計部 主管 工博 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社 中央研究所 ダクトル技術開発チ-ム 工博 (正会員)

断信頼強度を示す。S型試験体では、鋼繊維によるせん断耐力の増大を考慮し、ばらつきを考え、せん断余裕度を0.4程度とした。付着に関しては、付着応力度が付着信頼強度を下回り、02H30では、付着破壊を考慮したせん断信頼強度の検討により、付着破壊は生じないと想定した。

2.3 使用材料

本研究で使用した UFC はプレミックス粉体（セメントを基材とし、珪砂、反応性微粉末等をあらかじめ混合したもの）を 2254kg/m^3 、専用の高性能減水剤 27kg/m^3 、水 153kg/m^3 、および鋼繊維 157kg/m^3 からなる。鋼繊維は靱性の付与

を目的とし、直径 0.2mm、長さ 15mm のものを使用した。F 型試験体には主筋に SD685D13 を 12 本、横補強筋に SD785 の高強度鉄筋を使用し、S 型試験体には主筋に SD685D16 を 12 本、横補強筋に SD295 の鉄筋を使用している。使用鋼材の機械的性質を表-2 に示す。

2.4 加力方法

戸田建設技術研究所所有の島津サーボパルサージャッキシステムを用い、一定軸力下の逆対称正負交番繰り返し载荷とした。変形角 $1/25\text{rad}$ に到達しても軸力を保持し、最大耐力の 8 割まで低下しない場合は、押し抜きを行った。

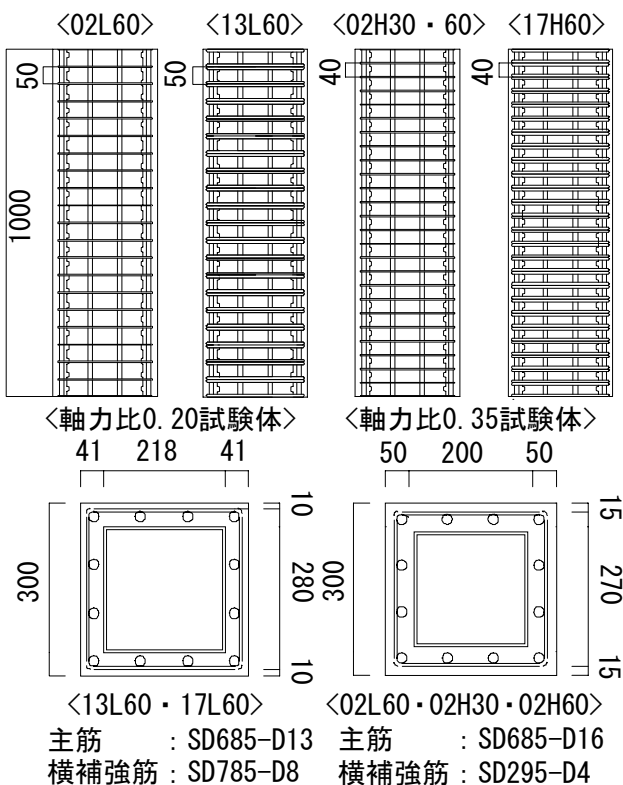


図-1 試験体配筋図

3. 実験結果

3.1 破壊経過・破壊形式

曲げ破壊先行型試験体においては、軸力比 0.2 の試験体 13L60 で、1)主筋の曲げ圧縮降伏、2)UFC の圧壊、3)最大耐力、4)曲げ圧縮破壊の順で破壊が進行し、変形角 $1/25\text{rad}$ まで繰り返し水平力を加えたが、終局に至らず押し抜きを行った。軸力比 0.35 の試験体 17H60 では、1)UFC の圧壊、2)主筋の曲げ圧縮降伏、3)最大耐力、4)曲げ圧縮破壊の順に、終局破壊に至った。

表-2 鉄筋材料試験

鉄筋種類	降伏強度 σ_y (N/mm^2)	降伏時 歪度 ϵ_y (μ)	引張強度 σ_u (N/mm^2)
SD685-D13	692	4807	883
SD685-D16	677	3835	860
SD785-D8	1002	6082	1225
SD295-D4 ³⁾	358	1855	570

表-1 試験体一覧

試験体名	軸力比 η	横補強筋比 p_w (%)	曲げ終局強度時 せん断力 Q_{mu} (kN)	せん断 ¹⁾ 信頼強度 V_u (kN)	付着 ¹⁾ 応力度 τ_f (N/mm^2)	付着 ¹⁾ 信頼強度 τ_{bu} (N/mm^2)	付着破壊 ¹⁾ を考慮した せん断 信頼強度 V_{bu} (kN)	V_u / Q_{mu}	予想 破壊 形式
02L60	0.20	0.18	824	334	6.2	10.5	583	0.41	S
13L60		1.33	703	1009	7.7	28.0	1104	1.44	F
02H30	0.35	0.24	948	342	7.5	5.5	425	0.36	S
02H60			1014	360	6.1	6.9	479	0.36	S
17H60		1.68	891	1070	7.6	16.2	752	1.20	F

<試験体名> (横補強筋比) (L:軸力比0.2, H:軸力比0.35) (コアコンクリート強度)

<破壊形式> S:せん断破壊先行型, F:曲げ破壊先行型

せん断破壊先行型試験体においては、軸力比 0.2 の 02L60 で、1)横補強筋の降伏・最大耐力、2)主筋の曲げ圧縮降伏、3)せん断圧縮破壊による主筋の座屈・横補強筋の破断の順に、軸力比 0.4 の 02H30 では、1)最大耐力、2)主筋の曲げ圧縮降伏、3)横補強筋降伏、4)せん断圧縮破壊による主筋の座屈・横補強筋の破断の順に、02H60 では、1)主筋の曲げ圧縮降伏・横補強筋の降伏後最大耐力に到達、2)せん断圧縮破壊による主筋の座屈・横補強筋の破断の順に終局破壊に至った。

写真-1 に試験体の破壊状況を示す。F 型の 13L60, 17H60 は試験体柱頭・柱脚が圧壊し、カバコンクリート剥落後、最大耐力に到達した。終局状態においては共に柱頭・柱脚部の圧壊が進展し、試験体とスタブの肌分かれが見られた。高軸力の 17H60 においては、柱頭・柱脚部での圧壊が特に激しく、大きくはらんでいた。

S 型の 02L60, 02H30, 02H60 においては、3 体とも、主筋・横補強筋の降伏の後にひび割れが一気に発生し最大耐力を迎えた。更に変形が進むと、高軸力の為に圧縮により試験体ははらみ、終局時には縦ひび割れが開き、主筋の座屈・横補強筋の破断が確認された。

3.2 荷重変形関係

図-2 に各試験体の履歴曲線を示す。F 型の

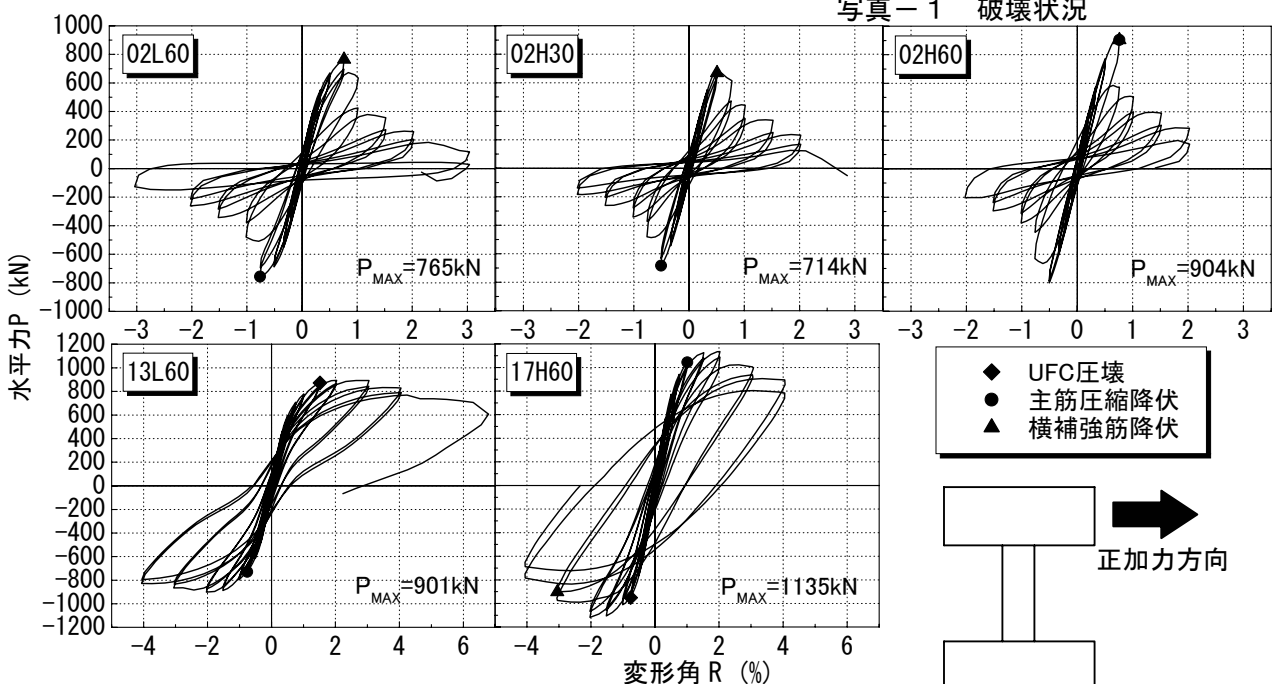


図-2 履歴曲線

13L60, 17H60 では、最大耐力到達後の耐力低下も緩やかで、軸力保持能力を有し、安定した履歴ループを示した。13L60 においては、軸力が小さく、UFC の圧壊が進展しなかった為、逆 S 字型の履歴を示した。S 型の 02L60, 02H30, 02H60 では、最大耐力到達後、急激な耐力低下を起し、軸力保持能力を喪失した。

4. 実験結果の検討

4.1 最大耐力

表-3 に実験結果一覧を示す。耐力算定において鋼繊維の効果は、金久保らの研究³⁾、木村らの研究⁴⁾において提案された、以下の 2 点とした。

(I) UFC が引張応力度 σ_T を負担する

(II) UFC 断面において引張応力度 σ_T と等価なせん断応力度 τ_F を保持する ($\sigma_T = \tau_F$)

せん断耐力においては、靱性保証型設計指針に

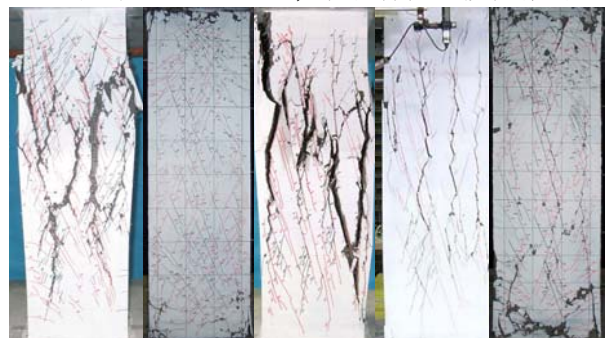


写真-1 破壊状況

よるせん断信頼強度 V_u に(II)を付加した以下の式により算出した。

$$F V_u = V_u + A_{UFC} \cdot \tau_F \quad (1)$$

A_{UFC} は UFC 断面積を表す。文献 1)における V_u の算出の際に用いたコンクリート強度は、靱性保証型設計指針に適合させる為に、図-3に示す圧縮領域でコンクリートの圧縮強度を定義し、横補強筋の拘束効果⁵⁾を考慮した等価拘束コンクリート強度 $e f_c$ とし、以下に式を示す。

$$e f_c = F_c (1 + C_a \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} / F_c) \quad (2)$$

(F_c : $0.85 e \sigma_B$, $e \sigma_B$: 図-3に示す, C_a : 補正係数, p_w : 横補強筋比, σ_{wy} : 帯筋の降伏強度)

曲げ耐力算出においては、かぶり部分も圧縮力を負担すると考えられるので、図-4に示した等価コンクリート強度 $m f_c$ を使用した。また、図-5に示す等価ストレスブロックを仮定し、応力の釣り合いより算出²⁾した中立軸

$$X_n = \frac{(N + \sigma_T \cdot d_c (3D - 2d_c))}{(k^2 \cdot m f_c + 2 \sigma_T \cdot d_c)} \quad (3)$$

(N : 軸力, σ_T : UFC 引張強度, d_c : かぶり厚さ, D : 断面せい, k : UFC の応力ブロック係数 0.736 ⁵⁾) を用い、表-3中に示す終局曲げ耐力 M_u に中段筋と UFC の引張応力 σ_T を加え算出した。条件として平面保持を仮定し、表-4の本実験の材料特性試験結果を用いた。(コア部分の材料特性は最大応力後の応力は一定とする。) UFC 引張強度 σ_T は、鋼繊維の体積混入率が等しく、同等の圧縮強度を持った金久保らの研究³⁾

表-3 実験結果一覧

試験体名	限界変形 R_u (%)	最大荷重 P_{max} (kN)	鋼繊維考慮なし		実験値 / 計算値		鋼繊維考慮		実験値 / 計算値		破壊形式 ⁷⁾
			曲げ終局強度時せん断力 Q_{mu} (kN)	せん断信頼強度 V_u (kN)	P_{max} / Q_{mu}	P_{max} / V_u	曲げ終局強度時せん断力 $F Q_{mu}$ (kN)	せん断信頼強度 $F V_u$ (kN)	$P_{max} / F Q_{mu}$	$P_{max} / F V_u$	
02L60	1.01	765	740	329	1.03	2.32	906	774	0.84	0.99	II
13L60	5.48	901	822	1083	1.10	0.83	836	1541	1.08	0.58	I
02H30	0.76	714	924	320	0.77	2.23	987	849	0.72	0.84	II
02H60		904	997	347	0.91	2.60	1060	876	0.85	1.03	II
17H60	3.35	1135	946	1095	1.20	1.04	1003	1637	1.13	0.69	I

<破壊形式> I: 主筋圧縮降伏後の曲げ圧縮破壊, II: 主筋圧縮降伏後のせん断圧縮破壊

$M_u = N(1 - \beta_1/2) x_n + \sigma_y \cdot a_t (d - d_c) + N(d/2 - x_n)$ ²⁾ (N : 軸力, β_1 : 応力ブロック係数, x_n : 中立軸までの距離, σ_y : 主筋の降伏強度, d : 有効せい, d_c : 側面から主筋中心までの距離)

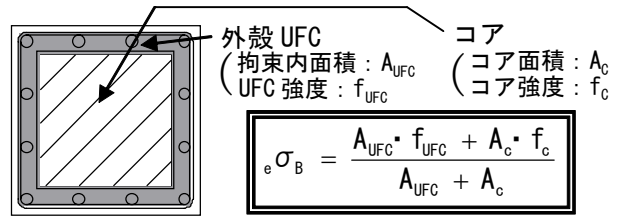


図-3 等価拘束コンクリート強度算出時の $e \sigma_B$

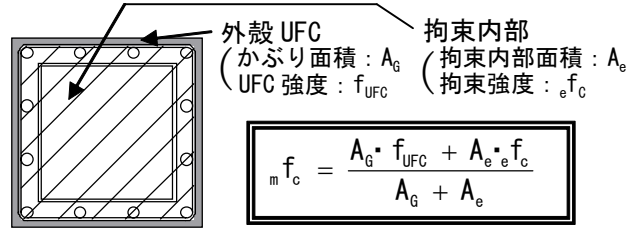
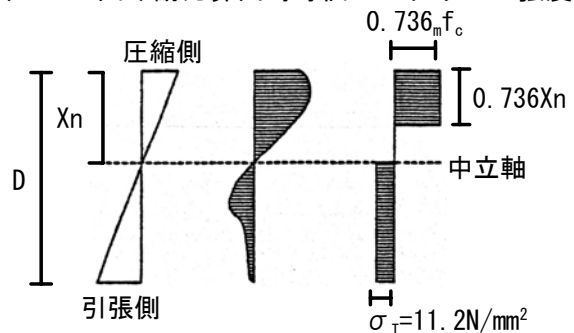


図-4 曲げ耐力算出時等価コンクリート強度 $m f_c$



歪分布 応力分布 等価ストレスブロック

図-5 等価ストレスブロック

表-4 材料試験結果

試験体名	外殻UFC		コアコンクリート	
	圧縮強度 $p \sigma_B$ (N/mm^2)	圧縮強度時歪度 $p \epsilon$ (μ)	圧縮強度 $c \sigma_B$ (N/mm^2)	圧縮強度時歪度 $c \epsilon$ (μ)
02L60	219	4061	85	2540
13L60	203	3799	78	2378
02H30	219	4061	38	1514
02H60			78	2415
17H60	200	3605	76	2320

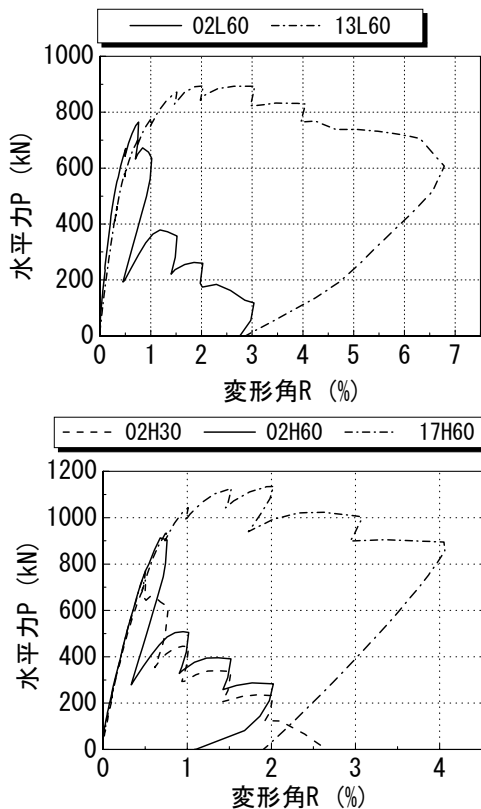


図-6 包絡線による比較

の4点曲げ載荷試験法による材料試験結果の、 $\sigma_T=11.2\text{N/mm}^2$ を用いた。F型試験体の13L60, 17H60において曲げ耐力を發揮し、計算値とも対応が比較的良好であった。よって、鋼繊維の曲げ耐力に及ぼす効果としては、金久保らの研究³⁾によるUFCの引張応力 σ_T を用いると誤差10%程度で評価できる。また、S型試験体の02L60, 02H60においては、計算値は

実験による最大値との誤差は5%以内で、正確に評価する事ができた。02H30において対応が良好でなかったのは、コアコンクリートが 30N/mm^2 で早期に圧縮強度時歪に達し、軸力を負担できず、外殻UFCの軸力負担が増加した為、計算値が過大評価となった為と考えられる。

4.2 変形能力

図-6に同軸力比の試験体における包絡線の比較を示す。ここで、限界変形角は最大耐力後、水平力が最大耐力の0.8倍に至った点、及び急激に耐力低下した場合は、1サイクル前のピーク時の変形角とした。曲げ圧縮破壊した13L60, 17H60は変形能力に優れ、最大耐力到達後の耐力低下も緩やかであった。これは、外殻UFCの圧壊があまり進まなかった為と考えられる。また、せん断圧縮破壊した、02L60, 02H30, 02H60では最大耐力付近で主筋・横補強筋が降伏し、ひび割れが進展し、大きく耐力低下を起こした。また、載荷終了時には軸力保持能力を喪失し、主筋の座屈・横補強筋の破断が見られた。図-6のグラフより、せん断圧縮破壊を起こした試験体は、最大耐力付近までは曲げ圧縮破壊を起こした試験体とほぼ同程度に耐力上昇し、急激に耐力低下を起こしている事がわかる。しかし、コアコンクリートの圧縮強度の小さい02H30の方が02H60より先に耐力低下を起こした。

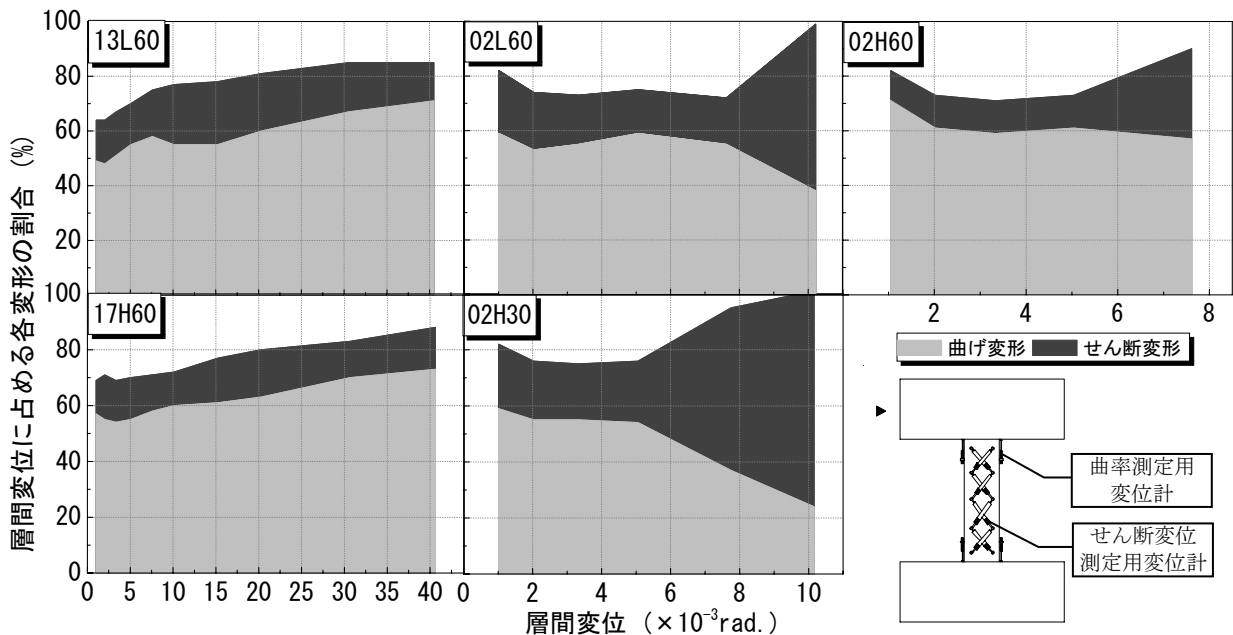


図-7 変形成分

4.3 変形成分

図-7 に変形成分と変位計設置状況を示す。曲げ変形は曲率測定用、せん断変形は背面のせん断変位測定用変位計測定値を用い算出した。

F 型試験体の 13L60, 17H60 ではせん断変形の割合がほぼ一定で、変形が進むに連れ曲げ変形の割合が増加している事が分かる。また、S 型試験体の 02L60, 02H30, 02H60 では、変形角の小さな範囲では、曲げ変形の割合が大きい、最大耐力付近から曲げ変形の割合が低下し、せん断変形の割合が急激に増加している事が分かる。

4.4 等価粘性減衰定数

図-8 に全試験体の等価粘性減衰定数を示す。等価粘性減衰定数は、実験より得た履歴曲線から各サイクルの正負の和として算出した。変形角 1/1000rad.付近で S 型試験体の減衰が大きい。初期のループを見ても、S 型試験体の方が吸収面積が大きい、今のところ明確な理由は不明である。また、全試験体において、主筋あるいは横補強筋の降伏後、曲げ・せん断ひび割れが多数発生し、エネルギー吸収が増加している事が分かる。特に変形角 1/100rad.以降において差が大きい、低軸力・高軸力共に、S 型試験体の方が早期にひび割れ（主にせん断）が発生し、横補強筋も降伏している事が原因と考えられる。

5. まとめ

UFC を用いた外殻プレキャスト合成柱の復元力特性試験により以下のことが分かった。

(1)破壊パターン

実験計画通り、13L60・17H60 では曲げ圧縮破壊を、02L60・02H30・02H60 ではせん断圧縮破壊を起こした。

(2) 鋼繊維の効果

鋼繊維混入により、曲げ耐力・せん断耐力共に上昇した。

(3) 曲げ耐力の評価

鋼繊維の効果により、UFC が引張力を負担するとし算出した曲げ耐力と実験値との整合性は、曲げ耐力においては安全側に評価されており、

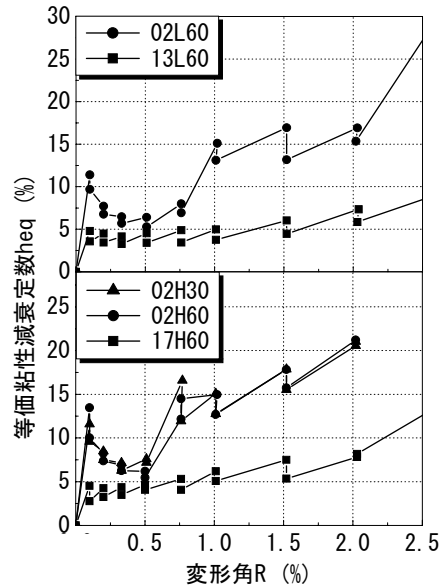


図-8 等価粘性減衰定数 h_{eq}

10%程度の誤差で推定できる。

(4)せん断耐力の評価

せん断耐力においては、コア強度が 60N/mm^2 の場合、正確に推定できた。コア強度が 30N/mm^2 の場合、計算値が過大評価となった。

(5) 復元力特性・変形能力

曲げ圧縮破壊した試験体では、安定したループを描き、高い変形能力を示した。せん断圧縮破壊した試験体では、最大耐力に到達するまでは曲げ圧縮破壊試験体とほぼ同程度の耐力上昇が見られたが早期に急激な耐力低下に至り、変形能力に乏しく、軸力保持能力を喪失した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型設計指針・同解説，1999，8，
- 2) 嶋津孝之，福原安洋，佐藤立美：新しい鉄筋コンクリート構造，森北出版株式会社，
- 3) 金久保利之ほか：超高強度繊維補強コンクリートを用いた梁部材の曲げせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.2，pp.1339 - 1344，2005
- 4) 木村秀樹ほか：鋼繊維を混入した高強度コンクリート RC 柱部材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.25，No.2，pp.235 - 240，2003
- 5) 建築技術：NewRC プロジェクトの概要，2002，7，pp.134 - 139，株式会社建築技術
- 6) 北風野歩：圧縮強度 200N/mm^2 級超高強度コンクリートを用いた柱の耐震性能に関する研究，広島大学大学院，平成 15 年度修士論文
- 7) 東洋一ほか：鉄筋コンクリート柱の崩壊防止に関する総合研究について，コンクリート工学，p2 - 17，Vol.13，No.1，1975，6