

報告 フライアッシュ人工骨材を用いた高強度RC柱の耐震性能

松下 哲郎*1・衣笠 秀行*2・福山 洋*3・石川 嘉崇*4

要旨: フライアッシュを主原料とする高強度人工骨材（以下、FA 骨材）を用いた高強度 RC 柱部材（コンクリート強度 60N/mm^2 ）の耐震性能の把握を目的とした逆対称繰返し載荷実験結果を報告する。せん断補強筋比と軸力比を変動させた柱部材試験体を、FA 人工骨材と普通骨材でそれぞれ 6 体ずつ（合計 12 体）作製し、耐力・変形能力・ひび割れ性状についての比較考察を行った。この結果、ひび割れ性状に多少の違いがあるものの FA 人工骨材を用いた RC 柱部材は普通骨材を用いたものと同程度の耐震性能を有することを確認することができた。

キーワード: 人工軽量骨材, フライアッシュ, RC 柱部材, 高強度コンクリート

1. はじめに

石炭灰の発生量は火力発電所の新設・増設により今後増大することが予測されている。この石炭灰の発生増大に対して、現在の有効利用の主流であるセメント・コンクリート分野における利用可能量は今後大幅な増大が望めない状態にある。また一方では、環境破壊の問題等から、良質な天然骨材の確保がますます難しくなっており、一部の地域では既に骨材不足が現実の問題となってきた。

このような背景をもとに、フライアッシュを主原料とする高強度人工骨材（以下、FA 骨材）が新たに開発された。FA 骨材の主な特徴は、絶対密度が約 $1.8(\text{kg/l})$ と軽量なことで、FA 骨材を用いたコンクリートの設計基準強度 F_c が $100(\text{N/mm}^2)$ 程度の超高強度域まで対応可能なことである。本報では FA 骨材を粗骨材として用いた RC 柱部材の、耐震性能把握を目的として行った逆対称繰返し載荷実験の結果を報告するものである。本報では、FA 骨材が高層 RC 建築物に使用されることを想定し、コンクリート圧縮強度 $60(\text{N/mm}^2)$ の RC 柱部材を、せん断補強筋比と軸力比を変動要因として、FA 骨材と普通骨材それぞれについて 6 体ずつ合計 12 体を作成し耐震性能の比較を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体実験変数

試験体諸元一覧を表-1 に、代表的な試験体形状および配筋($P_w=0.8\%$)を図-1 に示す。なお、表-1 中の試験体名は、最初のアルファベット N が普通骨材、TL が FA 骨材を用いた試験体を意味し、それに続く数字は順に、せん断補強筋比、軸力比を示している。試験体形状(断面寸法 $b \times D=300 \times 300(\text{mm})$ 、内法高さ $h_0=1200(\text{mm})$ 、シアスパン比 $M/QD=2$)、コンクリートの設計基準強度 $F_c=60(\text{N/mm}^2)$ 、主筋 D16(SD390)、主筋比 ($P_t=0.88\%$) は全試験体で共通とし、せん断補強筋比 ($P_w=0.4, 0.8, 1.2\%$ の 3 水準) と軸力比 ($\eta=0.15, 0.3, 0.45, 0.6$ の 4 水準) を変動要因として、普通骨材と FA 骨材それぞれについて 6 体ずつ総計 12 体の試験体を作製した。また、表-1 にあるように、全ての試験体は曲げ破壊がせん断破壊に先行して起こるように、せん断余裕度が 1 以上になるよう設計してある。以下では、普通骨材を用いた試験体を N 試験体、FA 骨材を用いた試験体を TL 試験体と呼ぶ。

コンクリートの調合表を表-2 に、材料試験の結果を表-3、表-4 に示す。各試験体のコンクリートの圧縮強度は $60(\text{N/mm}^2)$ を目標としたが、実験時のコンクリート圧縮強度は、TL 試験体は

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学助教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 独立行政法人 建築研究所 工博 (正会員)

*4 電源開発 茅ヶ崎研究センター (正会員)

表-1 試験体諸元一覧

試験体	コンクリート		主筋(SD390)		せん断補強筋(SD685)		軸力比	せん断余裕度 せん断耐力 ³⁾ / 曲げ耐力 ¹⁾
	粗骨材	Fc (N/mm ²)	配筋	Pt (%)	配筋 (mm)	Pw (%)	η	
N-0.8-0.15	普通骨材 (碎石)	60	12-D16	0.88	D6 @53	0.8	0.15	1.80
N-0.8-0.3							0.3	1.43
N-0.8-0.45							0.45	1.47
N-0.8-0.6							0.6	2.03
N-0.4-0.15					D6 @107	0.4	0.15	1.15
N-1.2-0.15					D10 @79	1.2	0.15	2.01
TL-0.8-0.15	FA骨材	60	12-D16	0.88	D6 @53	0.8	0.15	1.90
TL-0.8-0.3							0.3	1.55
TL-0.8-0.45							0.45	1.61
TL-0.8-0.6							0.6	2.21
TL-0.4-0.15					D6 @107	0.4	0.15	1.22
TL-1.2-0.15					D10 @79	1.2	0.15	2.12

表-2 調合表

調合名	粗骨材	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		単位容積質量 (kg/l)
				W	C	S	G	減水剤(kg/m ³)	AE調整剤(g/m ³)	
N試験体	普通骨材	4.15	37.5	170	453	852	843	6.23	5.89	2.33
TL試験体	FA骨材	3.50	37.5	170	453	810	645	6.07	5.89	2.06

※細骨材は全試験体で普通骨材を使用

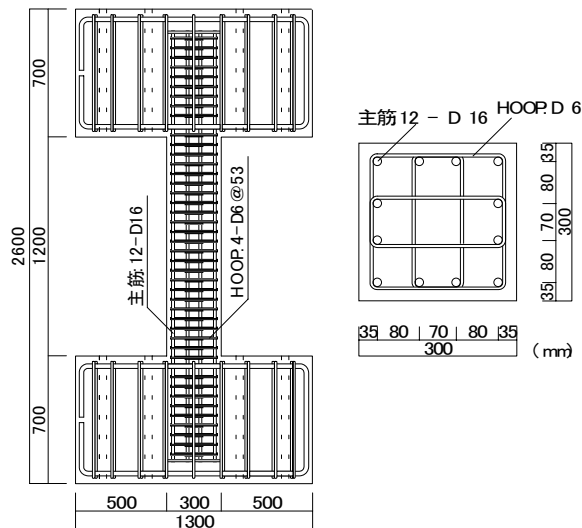


図-1 試験体形状および配筋

ほぼ 60(N/mm²)であったが、N 試験体は多少大きめの強度である。また、FA 骨材を用いたコンクリートの単位容積質量は 2.06(kg/l)であり、普通骨材より 10%程度小さな値を示している。

2.2 载荷および計測方法

加力装置は、図-2 に示す建研式加力装置を用い、4 本の鉛直アクチュエータの変位を同一に保ちながら試験体に一定軸力を加えた状態で、ストロークを同調させた 2 本の水平ジャッキにより逆対称モーメント方式の正負繰り返し载荷を行った。载荷履歴は、変形角 $R=\pm 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25$ (rad) の 1.5 回正負繰り返し载荷である。実験は、耐力が最大耐力の 80%まで低下した状態で終了とした。なお、1/25(rad)での繰り返しで 80%耐力低下が生じなかった試験体については、繰り返し载荷後 80%耐力低下が生じるまで正方向に単調载荷した。また、耐震性比較のため、各試験体についてゲージによる鉄筋歪みの計測、変位計による変位量の計測、各サイクルのピーク時および除荷時でのひび割れ幅の計測、写真による破壊性状の記録などを行った。図-3 に変位計取付図を示す。

表-3 コンクリートの材料特性

骨材	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
普通骨材	68.7	4.12	3.64×10^4
FA骨材	59.9	4.09	3.30×10^4

表-4 鉄筋の材料特性

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D6	808	939	1.80×10^5
D10	807	1014	2.09×10^5
D16	439	576	1.94×10^5

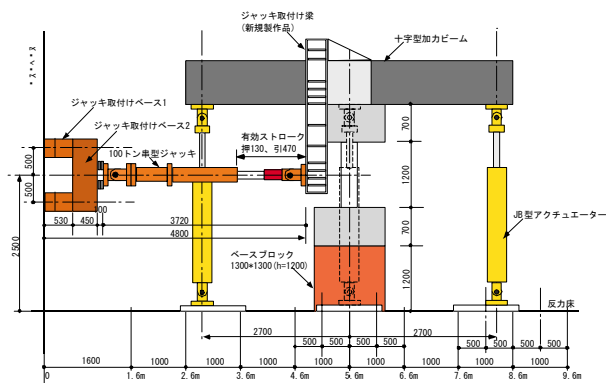


図-2 加力装置図 (建研式加力)

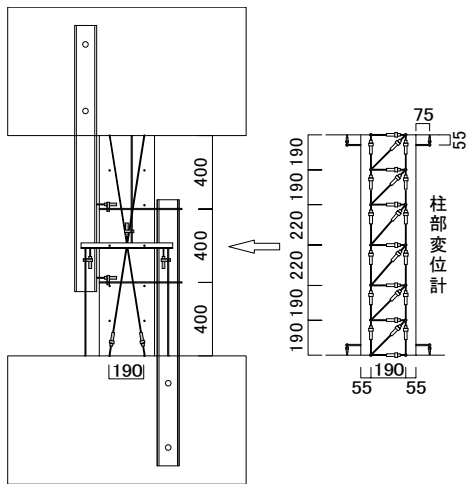


図-3 変位計取付図

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

図-4 に、各試験体の耐力が 80% に低下し、荷重を終了したときの最終的な破壊性状を示した。全ての試験体の破壊形態は曲げ破壊であり、実験終了時に柱頭および柱脚隅角部のコンクリートの圧壊が観察された。軸力比が 0.6 の試験体 N-0.8-0.6 と TL-0.8-0.6 では主筋の引張降伏が発生しなかったが、それ以外の全ての試験体で主筋の引張降伏が観察された。このことから、軸力比が 0.6 の試験体では曲げ圧縮破壊、その他の試験体では曲げ引張降伏先行型の曲げ圧縮破壊により耐力低下したものと考えられる。N 試験体と TL 試験体の破壊進展を比較した場合、軸力比が 0.3, 0.45 の試験体で多少 TL 試験体の主筋引張降伏が早く発生しているが、それ以外は両者に特に大きな差異は認められなかった。

N 試験体と TL 試験体のひび割れ性状について比較すると、80% 耐力低下したときのサイク

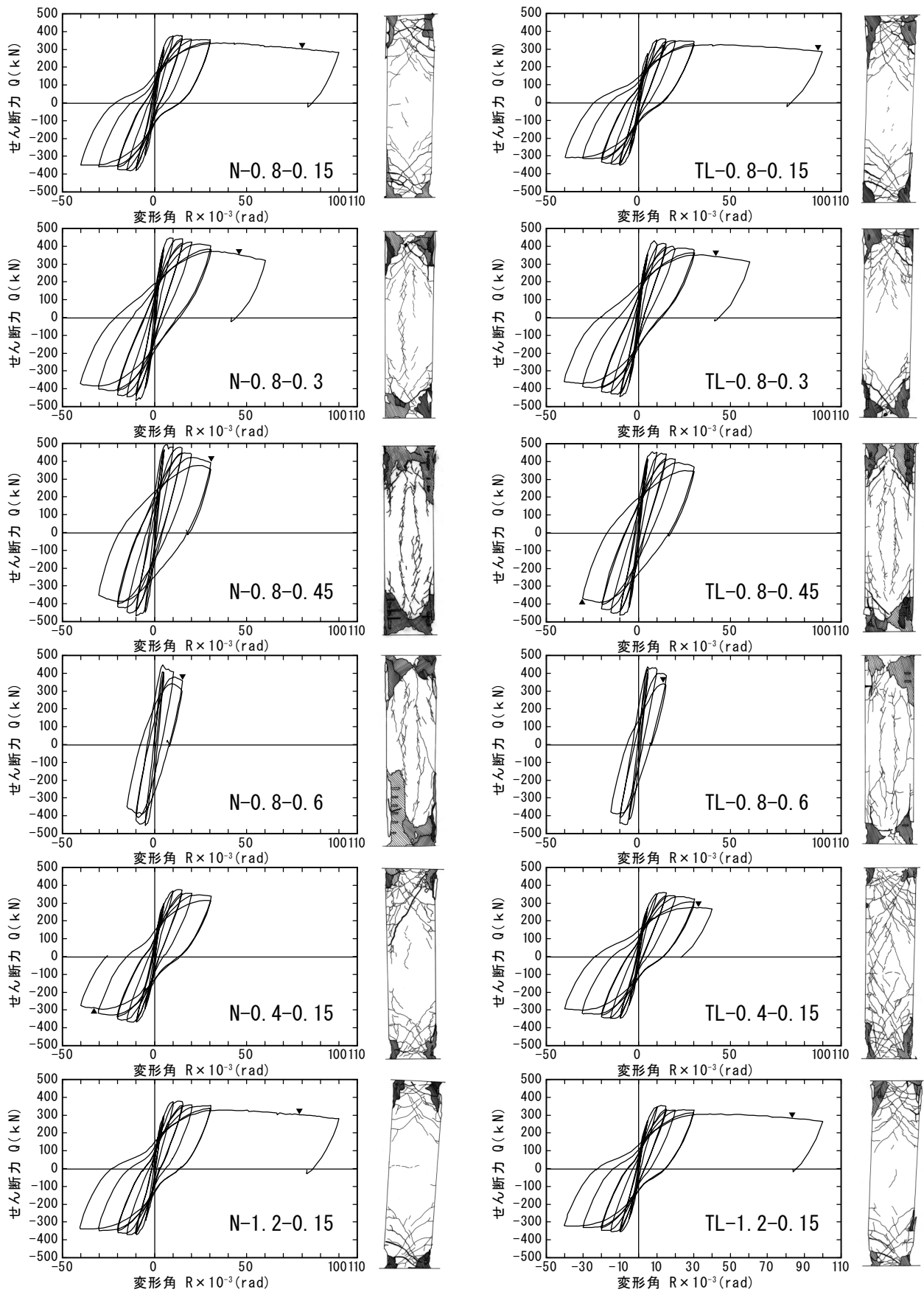
ルはほとんどの試験体で同じであるが、軸力比 0.15 でせん断補強筋量を変化させた TL-0.4-0.15, TL-0.8-0.15, TL-1.2-0.15 では、ひび割れが対応する N 試験体より広範囲に生じており、このことはせん断補強筋量の少ない TL-0.4-0.15 でより顕著に現れている。一方、軸力比を変化させた TL-0.8-0.3, TL-0.8-0.45, TL-0.8-0.6 のひび割れ性状には、対応する N 試験体と特に大きな差異は認められなかった。

3.2 せん断力-変形角関係

図-4 に、実験により得られた各試験体のせん断力 Q と変形角 R の関係および最終破壊性状を示した。なお、せん断力 Q は水平変形増に伴い発生する軸力アクチュエータの水平力寄与分を補正して求めた、試験体に実際に作用したせん断力である。前述したように実験は 80% 程度耐力低下が生じた時点で荷重終了とした。図-4 に示した Q - R 関係から、N 試験体と TL 試験体は全試験体を通して、ほぼ同等の変形能力を有していることが分かる。また、両者のループ形状にも特に大きな差異はなく、エネルギー吸収性状についても同等の性能を TL 試験体は有していると言える。

3.3 最大耐力およびひび割れ荷重

表-5 に、実験により得られた各試験体の最大耐力、表-6 に曲げひび割れ強度・せん断ひび割れ強度を示した。また、両表中には、実験値と計算値の比較も示してある。最大耐力に関して N 試験体と TL 試験体を比較すると、全ての試験体において N 試験体が TL 試験体より若干大きくなっていることが分かる。前述したように、N 試験体のコンクリート強度は、TL 試験体と比較して若干大き目であり、この強度差を反映させた曲げ耐力計算値は、N 試験体、TL 試験体ともによく実験値と一致しており、TL 試験体で特に実験値が計算値を下回ることはない。このようなことから、N 試験体の耐力が TL 試験体を多少上回っているのは、コンクリート強度差が原因であり、N 試験体と TL 試験体は同等の曲げ耐荷性能を有していると考えられる。



※図中の▼は耐力の80%低下した点を表す。

図-4 せん断力-変形角関係および最終破壊性状

表-5 最大耐力の実験値および計算値

試験体	実験値		計算値		実験値/計算値 Q/Qm
	最大耐力 Q(kN)	曲げ強度 ¹⁾ Qm(kN)	せん断強度		
			大野・荒川mean式 ²⁾	終局指針A式 ³⁾	
			Qs1(kN)	Qs2(kN)	
N -0.8-0.15	378.0 (11.9)	393.6	408.1	707.8	0.96
N -0.8-0.3	446.9 (8.4)	494.9	479.8	707.8	0.90
N -0.8-0.45	492.7 (6.8)	480.1	551.5	707.8	1.03
N -0.8-0.6	447.6 (4.5)	349.2	623.2	707.8	1.28
N -0.4-0.15	376.9 (13.6)	393.6	366.7	450.9	0.96
N -1.2-0.15	378.7 (12.4)	393.6	449.2	790.7	0.96
TL-0.8-0.15	358.5 (13.2)	367.6	379.0	700.3	0.98
TL-0.8-0.3	430.5 (8.5)	452.6	441.5	700.3	0.95
TL-0.8-0.45	454.9 (7.4)	435.9	504.0	700.3	1.04
TL-0.8-0.6	435.6 (4.9)	317.0	566.6	700.3	1.37
TL-0.4-0.15	358.9 (13.6)	367.6	337.7	448.7	0.98
TL-1.2-0.15	353.8 (12.4)	367.6	420.1	777.9	0.96

※最大耐力の()はその時の変形角 $R \times 10^{-3}$ (rad)を表す。

表-6 ひび割れ荷重の実験値および計算値

試験体	曲げひび割れ強度 ⁴⁾			せん断ひび割れ強度 ⁵⁾		
	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値/計算値	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値/計算値
N -0.8-0.15	136.8 (1.3)	120.6	1.13	221.7 (2.7)	156.1	1.42
N -0.8-0.3	316.5 (3.2)	197.9	1.60	348.4 (3.9)	156.5	2.23
N -0.8-0.45	380.1 (3.3)	275.2	1.38	461.4 (4.9)	156.8	2.94
N -0.8-0.6	408.1 (4.3)	352.5	1.16	-	157.2	-
N -0.4-0.15	62.6 (0.4)	120.6	0.52	209.1 (2.3)	156.1	1.34
N -1.2-0.15	116.4 (0.9)	120.6	0.97	296.9 (5.0)	156.1	1.90
TL-0.8-0.15	136.9 (1.4)	107.8	1.27	175.4 (2.0)	145.7	1.20
TL-0.8-0.3	196.6 (1.8)	175.2	1.12	321.3 (4.0)	146.0	2.20
TL-0.8-0.45	354.7 (3.7)	242.6	1.46	416.3 (5.0)	146.3	2.84
TL-0.8-0.6	407.3 (4.3)	310.0	1.31	-	146.6	-
TL-0.4-0.15	127.6 (1.3)	107.8	1.18	265.9 (4.6)	145.7	1.82
TL-1.2-0.15	128.1 (1.3)	107.8	1.19	233.8 (3.6)	145.7	1.60

※実験値の()はその時の変形角 $R \times 10^{-3}$ (rad)を表す。

また、表-5中の最大耐力の覧には最大耐力時の変形角Rが()内に示されているが、これにもN試験体とTL試験体で大きな差がないことが分かる。

実験により得られた曲げひび割れ荷重・せん断ひび割れ荷重と計算による曲げひび割れ強度・せん断ひび割れ強度を表-6に示したが、N試験体とTL試験体のひび割れ発生荷重の大小に関する全試験体を通しての一定の傾向を見いだすことは出来なかった。

3.4 ひび割れ幅の比較

図-5は、軸力比0.15の試験体における各サイクルで荷重を除荷した時の最大残留せん断ひ

び割れ幅の推移を示したグラフである。グラフから、N試験体のひび割れ幅がTL試験体より全体的に大きくなっていることが分かる。これは、破壊性状にも現れていたが、TL試験体のひび割れがN試験体と比較して広範囲に分散して発生することに起因すると考えることができる。なお、軸力比の大きい試験体でも、実験途中までは多少同様の傾向が見られたが、かぶりコンクリートの剥離などにより全ての試験体で実験終了時まで、ひび割れ幅を計測することができなかったため、この傾向を明確に把握することができなかった。

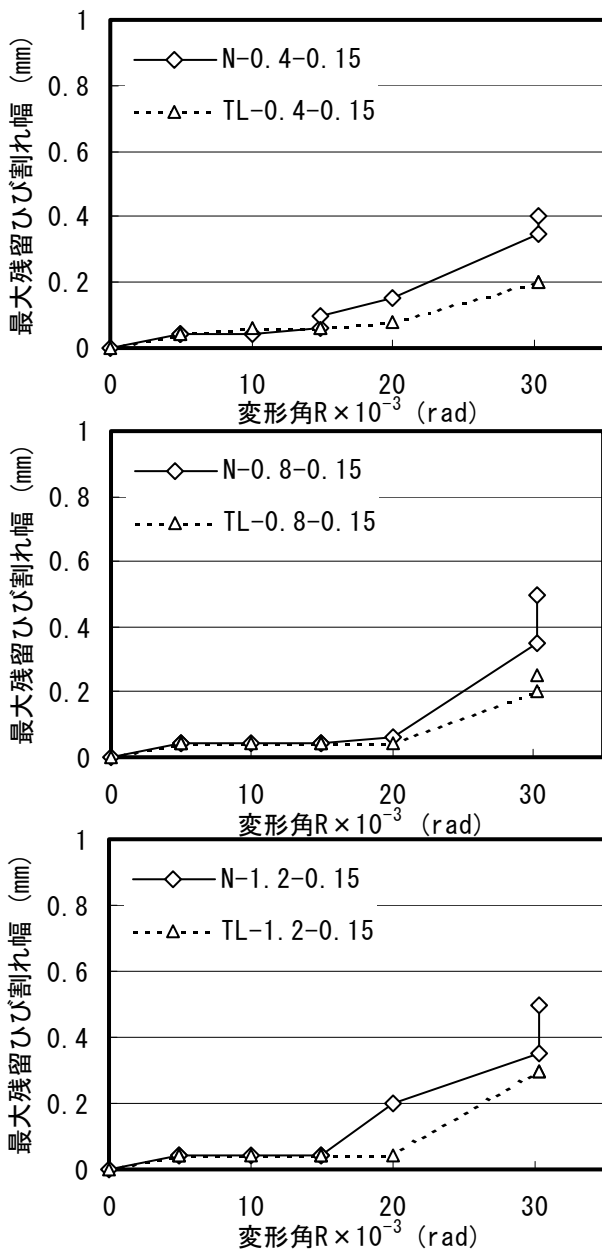


図-5 最大残留せん断ひび割れ幅の推移

4 まとめ

フライアッシュを主原料とする高強度人工骨材を粗骨材として使用したコンクリートの RC 柱部材についての耐震性能把握のための実験を行い以下のような知見を得た。この実験では、試験体形状(断面寸法 $b \times D = 300 \times 300(\text{mm})$), 内法高さ $h_0 = 1200(\text{mm})$, シアスパン比 $M/QD = 2$, コンクリートの設計基準強度 $F_c = 60(\text{N}/\text{mm}^2)$, 主筋 D16(SD390), 主筋比($P_t = 0.88\%$)は全試験体で共通とし、せん断補強筋比($P_w = 0.4, 0.8, 1.2\%$ の3水準)と軸力比($\eta = 0.15, 0.3, 0.45, 0.6$ の4水準)を変動要因とした。

1)FA 人工骨材コンクリートを用いた柱部材は、普通骨材コンクリートのものとほぼ同等の変形能力とエネルギー吸収性状および耐力を有していることが確認できた。

2) 軸力比が $\eta = 0.15$ の試験体の場合、FA 人工骨材コンクリートを用いた柱部材は、普通骨材コンクリートのものより多少広い範囲にひび割れが発生する傾向があり、このことは、せん断補強筋量の少ない $P_w = 0.4\%$ の試験体で特に顕著に現れた。

3) 軸力比が $\eta = 0.15$ の試験体の場合、FA 人工骨材コンクリートを用いた柱部材は、普通骨材コンクリートのものより残留ひび割れ幅は小さくなる傾向にあった。これは、上記のひび割れが広範囲に発生する現象と関連していることが推察された。

謝辞

本研究は、「高強度人工骨材コンクリート研究会」内に設けられた「高強度人工骨材コンクリート建築構造性能検討委員会」において実施されたものである。協力をいただいた委員の皆様へ謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会関東支部:鉄筋コンクリート構造の設計, 1992
- 2) 日本建築学会:高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, 1992
- 3) 日本建築学会: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
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 1988
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料シリーズ18 鉄筋コンクリート柱の強度と靱性(その2:強度, 剛性), 建築雑誌, Vol.95, No.1171, 1980.10
- 6) 石川嘉崇・早川光敬・笹原厚・安田正雪:石炭灰を主原料とした高強度人工骨材を用いた硬化コンクリートの性質, 日本コンクリート工学協会「軽量コンクリートの性能の多様化と利用拡大に関するシンポジウム」論文集