コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，1994

論　文

[2059]　超軽量人工骨材を用いたRC梁部材の構造性能評価に関する実験研究

吾郷 明人[*1]・松崎 育弘[*2]・斉藤 豊[*3]・河内 武[*4]

1．はじめに

人工軽量骨材ｺﾝｸﾘｰﾄ(以下，軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ)は単位容積重量が普通ｺﾝｸﾘｰﾄに比べ小さいことから、高層建築物のｽﾗﾌﾞ等に多数利用されてきたが、近年、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄの部材としての構造性能に関する実験が多数実施され、その結果、剛性、ひび割れ強度、各終局強度等の構造性能は普通ｺﾝｸﾘｰﾄと同様に評価できる[1]。

本実験はこれらの結果をふまえ、従来以上の軽量化、高強度化をはかるべく開発された人工軽量骨材(以下，NL骨材)を用いたNLｺﾝｸﾘｰﾄ[2]の実用化へ向けての一連の研究の中で、構造部材としての特性、すなわち曲げ、せん断、付着割裂性状等について、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ及び従来の人工軽量骨材ｺﾝｸﾘｰﾄ1種(以下，軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ)梁[3]～[10]との比較検討を行い、NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁の構造性能評価を行うことを目的とした。

2．実験概要

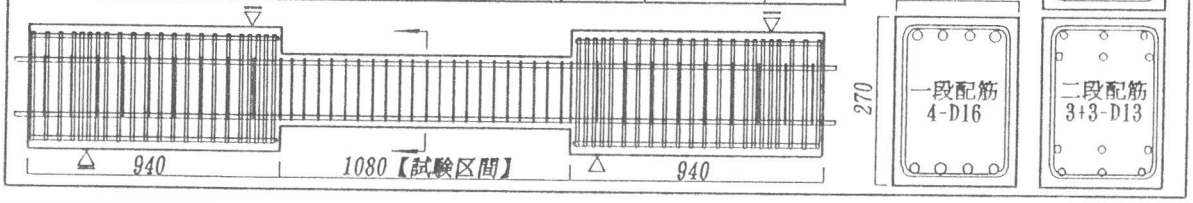
2．1　試験体

試験体要因一覧及び試験体形状図を表-1に示す。

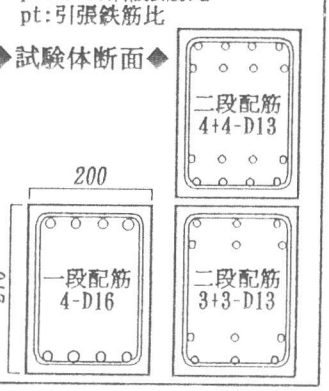
表-1 試験体要因一覧及び試験体形状図

	ｺﾝｸﾘｰﾄ Fc (kgf/cm²)	ｺﾝｸﾘｰﾄ 目標比重 ρ	せん断補強筋 鉄筋種 [D6]	せん断補強筋 pw[間隔] (%)[(mm)]	主筋 鉄筋種	主筋 配筋形状 pt(%)	ｺﾝｸﾘｰﾄｼﾘｰｽﾞ
第1ｼﾘｰｽﾞ	360	1.4	SD785	0.20[160], 0.43[75] 0.64[50], 0.91[35] 1.07[30]	SD785 [D13]	二段配筋 4+4-D13 2.25(%)	360-Ⅰ
		1.2		0.43[75], 0.91[35]			360-Ⅱ
		1.6		0.43[75], 0.91[35]			360-Ⅲ
	900	1.7		0.20[160], 0.43[75] 0.64[50], 0.91[35]			900-Ⅰ
		1.9		0.20[160], 0.43[75] 0.64[50], 0.91[35]			900-Ⅱ
第2ｼﾘｰｽﾞ	360	1.4	SD295	0.32[100], 0.64[50] 1.07[30]	SD345 [D16]	一段配筋 4-D16 1.65(%)	360-A
			SD785	0.64[50]			360-B
			SD295	0.64[50]	SD345 [D13]	二段配筋 3+3-D13 1.69(%)	
				0.64[50]	SD490 [D13]		
				1.07[30]			360-C
			SD785	0.64[50], 1.07[30]			

■共通要因■
せん断ｽﾊﾟﾝ比：a/D=2.0
試験区間断面：b×D=200×270(mm)
有効梁せい：
一段配筋 d=242(mm)
二段配筋 d=226(mm)
主筋間距離：
一段配筋 jt=213(mm)
二段配筋 jt=181(mm)
せん断補強筋：溶接閉鎖型
※ Fc:ｺﾝｸﾘｰﾄ設計基準強度
ρ:ｺﾝｸﾘｰﾄ比重
pw:せん断補強筋比
pt:引張鉄筋比



◆試験体断面◆



＊1　東京理科大学大学院　工学研究科建築学専攻、工修(正会員)
＊2　東京理科大学教授　工学部建築学科、工博　(正会員)
＊3　清水建設　設計本部、工修
＊4　清水建設　技術研究所、工修

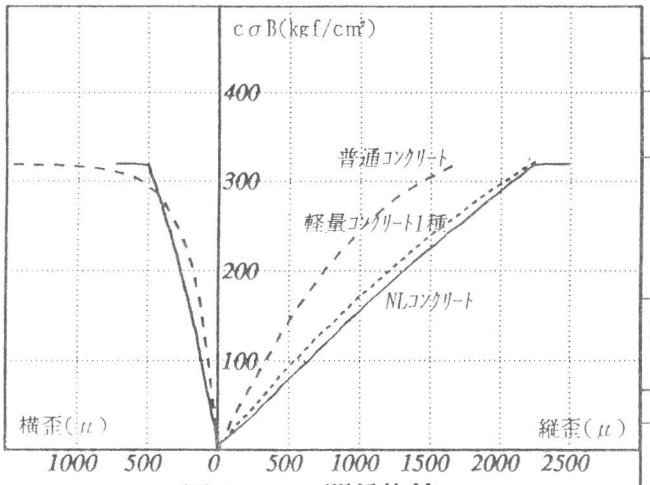


図-1 σ－ε関係比較

NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁の曲げ、せん断性状の把握を目的としｺﾝｸﾘｰﾄ強度(cσB)、せん断補強筋比(pw)、ｺﾝｸﾘｰﾄ比重(ρ)、載荷履歴を変動要因とした第1ｼﾘｰｽﾞ17体、付着割裂性状の把握を目的としせん断余裕度、付着余裕度を変動要因とした第2ｼﾘｰｽﾞ9体を計画した。

２．２　材料試験結果

材料試験結果一覧を表-2に,NL,普通,軽量ｺﾝｸﾘｰﾄのσ－ε関係比較を図-1に示す。

cσB=360kgf/cm²級において、ｺﾝｸﾘｰﾄ比重はNLｺﾝｸﾘｰﾄが1.35～1.62、文献[3]の普通ｺﾝｸﾘｰﾄが2.2～2.5、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄが1.87である。一方、ﾔﾝｸﾞ係数は軽量ｺﾝｸﾘｰﾄと同様に普通ｺﾝｸﾘｰﾄの約70%程度である。また、σ－ε関係においてNLｺﾝｸﾘｰﾄは軽量ｺﾝｸﾘｰﾄと同様に直線的な傾向を示す。

２．３　加力方法

加力は大野式逆対称ﾓｰﾒﾝﾄ形式とした。

載荷履歴は、第1ｼﾘｰｽﾞで360－Ⅰ～Ⅲと900－Ⅰのpw=0.20～0.64%及び900－Ⅱのpw=0.20,0.43%は一方向単調載荷とし、900－Ⅰのpw=0.91%は部材角(R)=1/25radで3回、900－Ⅱのpw=0.64,0.91%はR=1/50,1/33,1/25radで各1回、そして最後は共に正側のR=1/12rad程度までの載荷とした。第2ｼﾘｰｽﾞは全て、第1ｻｲｸﾙは曲げ耐力略算値(cQmu)の80%もしくはR=1/200rad時の変形の先行到達点、以降R=1/100,1/50,1/33radで各2回、R=1/20radで1回、そして最後は正側のR=1/12rad程度までの載荷とした。

表-2 材料試験結果一覧

【ｺﾝｸﾘｰﾄ材料試験結果】

	ｺﾝｸﾘｰﾄｼﾘｰｽﾞ	比重 ρ	cσB (kgf/cm²)	cσt (kgf/cm²)	E×10⁻⁵ (kgf/cm²)	ν
第1シリーズ	360－Ⅰ	1.50	330	20.6	1.63	0.23
	360－Ⅱ	1.35	360	14.2	1.40	0.26
	360－Ⅲ	1.62	350	22.5	1.55	0.19
	900－Ⅰ	1.87	900	32.8	2.60	0.19
	900－Ⅱ	1.95	920	34.7	2.63	0.21
第2	360-A	1.48	330	20.1	1.53	0.24
	360-B	1.49	343	21.5	1.54	0.21
	360-C	1.45	324	18.3	1.43	0.21

【鉄筋材料試験結果】

		鉄筋種		σy (kgf/cm²)	εy (×10⁻⁶)	E×10⁶ (kgf/cm²)
第1	補強筋	D6	SD785	9200	5000	1.87
	主筋	D13	SD785	8000	4400	1.88
第2シリーズ	補強筋	D6	SD295	4600	2600	1.77
			SD785	9300	4800	1.94
	主筋	D16	SD345	3700	2000	1.85
		D13	SD345	3800	2100	1.81
			SD490	5800	3300	1.76

※ cσB:ｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮強度　σy:鉄筋降伏強度
cσt:ｺﾝｸﾘｰﾄ割裂強度　εy:鉄筋降伏歪
E:ﾔﾝｸﾞ係数　ν:ﾎﾟｱｿﾝ比

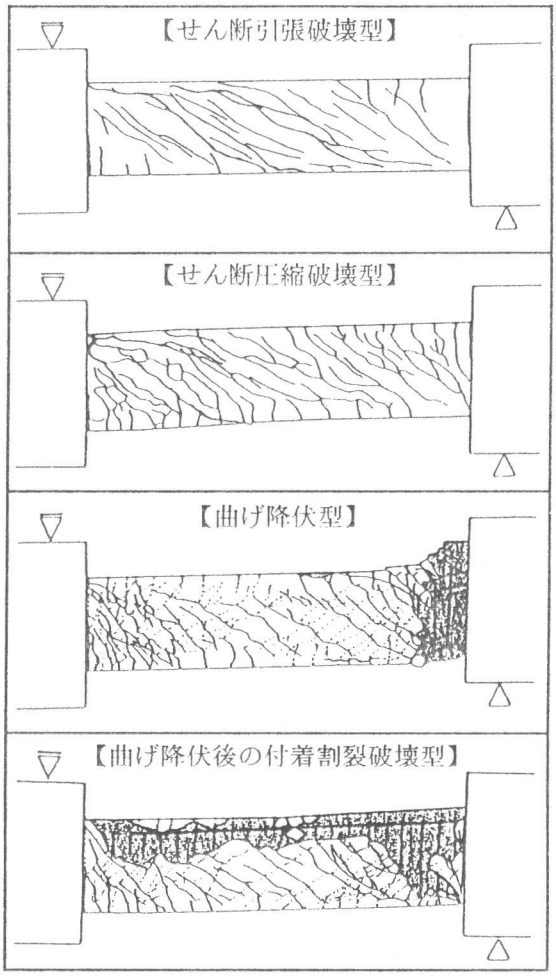


図-2 破壊状況の一例

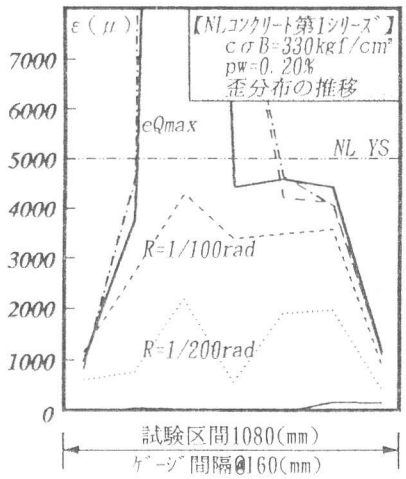


図-3 せん断補強筋歪分布

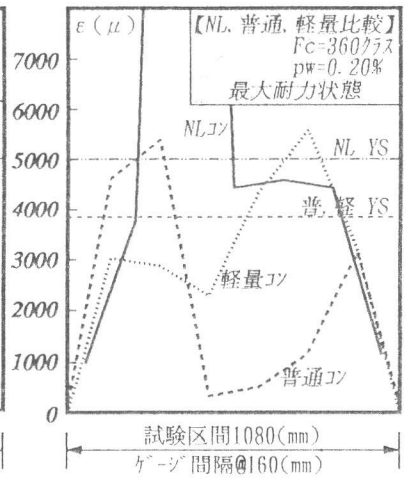


図-4 補強筋歪分布比較

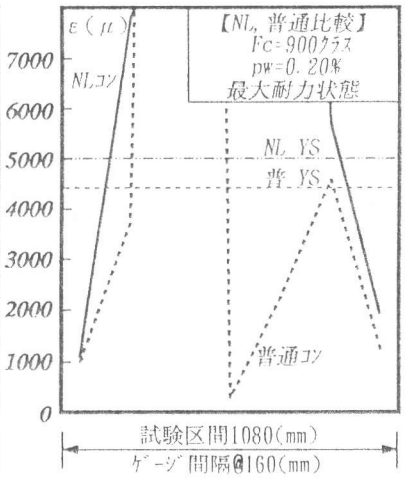


図-5 補強筋歪分布比較

3．実験結果及び検討

3．1　破壊性状

破壊状況の一例を図-2に、せん断補強筋歪分布の一例を図-3～5に示す。

NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁は普通、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁に比べ、試験区間全域に渡り多数のせん断ひび割れが分散し発生する傾向にあり、せん断補強筋は比較的低い荷重より一様に歪み、全試験体において図-3に示す様に、R=1/100rad程度でせん断応力再分配が確認できた。

また、図-4,5に示す、cσB=315kgf/cm²の普通、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁[3]、cσB=1370kgf/cm²の超高強度普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁[4]との最大耐力時におけるせん断補強筋の歪分布比較では、NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁は普通、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁に比べ、試験区間全域に渡り一様歪む傾向が見られた。尚、900クラスにおけるcσB=1370kgf/cm²の普通ｺﾝｸﾘｰﾄのﾃﾞｰﾀは、図-9において耐力が同等であるため比較に用いることとした。

3．2　変形性状

せん断力(Q)-相対変位(δ)関係を図-6～12に示す。

（1）曲げ、せん断性状(第1ｼﾘｰｽﾞ)

図-6より、360-Ⅰはpwの増加に伴い、最大耐力(eQmax)及び最大耐力時の相対変位(eδmax)は増加する傾向にある。図-7よりｺﾝｸﾘｰﾄ比重の違いによる差は見られなかった。

また、図-8より、共にpw=0.64%で圧縮破壊

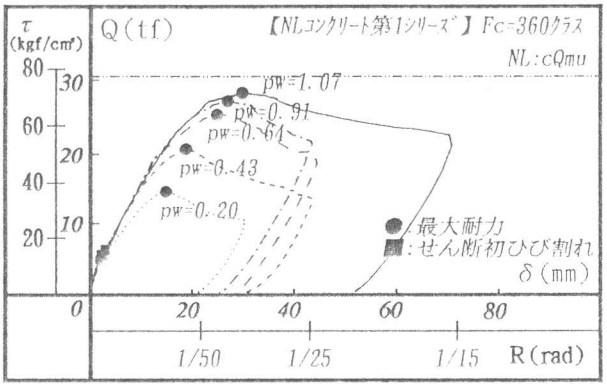


図-6 Q-δ関係

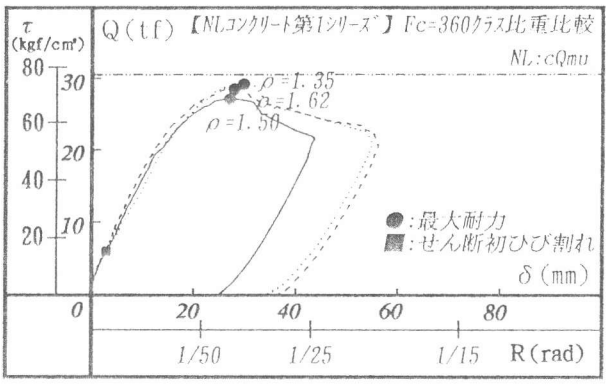


図-7 Q-δ関係

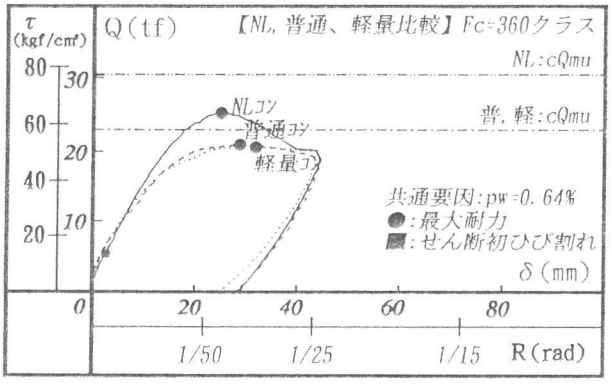


図-8 Q-δ関係

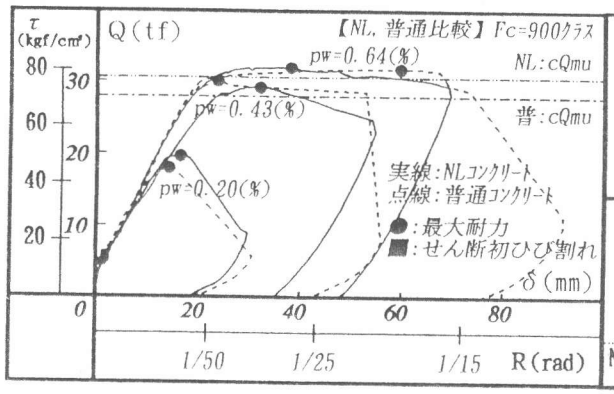


図-9 Q-δ関係

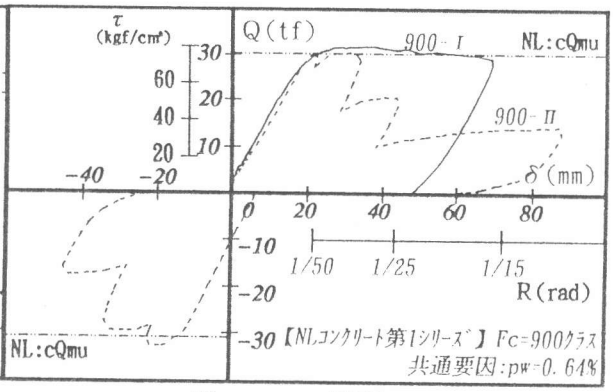


図-10 Q-δ関係

型の普通、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁[3]との比較では、概ね、同傾向と言える。図-9より、900-Ⅰはpwの増加に伴い、eQmax及びeδmaxは増加する傾向にある。繰返し載荷の試験体については、終局強度型耐震設計指針のせん断終局耐力算定式のA法靭性式(Rp=1/50)の計算値(cQsu2)を本実験のcQmuで除した値(cQsu2/cQmu:せん断余裕度)で検討する。図-10のpw=0.64%の試験体は共にせん断余裕度0.74で、一方向単調載荷の900-ⅠはR=1/15radまで安定した挙動を示し、900-ⅡはR=1/33rad以降+3ｻｲｸﾙより耐力低下を生じた。図-11のpw=0.91%の試験体はせん断余裕度0.91,0.93で、900-Ⅰは+1ｻｲｸﾙのR=1/25radまで安定した挙動を示し、+2ｻｲｸﾙのR=1/25radで耐力が低下したが、900-Ⅱは耐力低下を起こすことなく、安定した挙動を示した。また、図-9より超高強度普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁[4]との比較では、概ね、同傾向と言える。

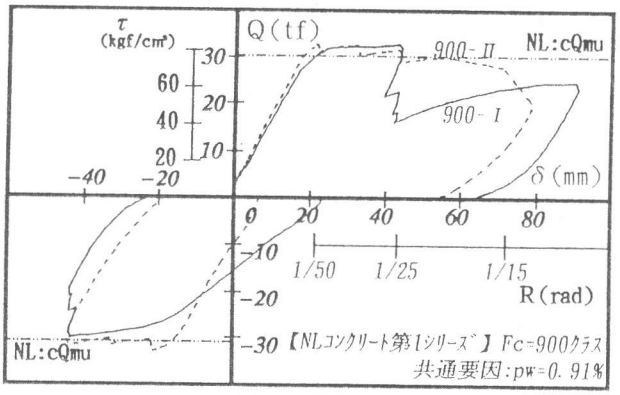


図-11 Q-δ関係

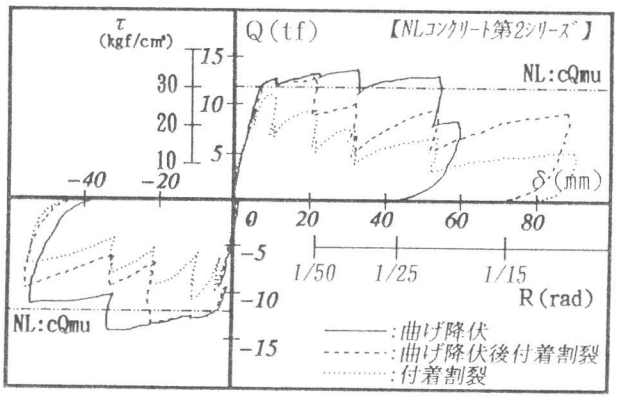


図-12 Q-δ関係

（２）付着割裂性状(第2ｼﾘｰｽﾞ)

付着割裂破壊型、曲げ降伏後付着割裂破壊型、曲げ降伏型のQ-δ関係を図-12に示す。付着割裂破壊型の試験体は部材が曲げ降伏する前に主筋に沿った付着割裂ひび割れが多数発生し、その後、被りｺﾝｸﾘｰﾄの剥落により耐力低下を起こした。曲げ降伏後付着割裂破壊型の試験体は主筋に沿ったひび割れが発生するが、部材の曲げ降伏以降も耐力を維持し、R=1/50rad以降で耐力低下が見られ最後は被りｺﾝｸﾘｰﾄの剥落に至った。曲げ降伏型の試験体は、曲げ降伏後も安定した挙動を示した。

３．３　最大耐力

最大耐力(eQmax)-せん断補強筋量(pw・σwy)関係を図-13,14に示す。

図-13より、360-Ⅰはpw・σwyの増加に伴いeQmaxは上昇する傾向にあるが、pw=0.64%(pw・σwy=58.9kgf/cm²で破壊ﾓｰﾄﾞがせん断引張破壊からせん断圧縮破壊に移行しており、eQmaxの上昇率が変化していることがわかる。また、普通、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁[3]との比較では、同傾向と言える。

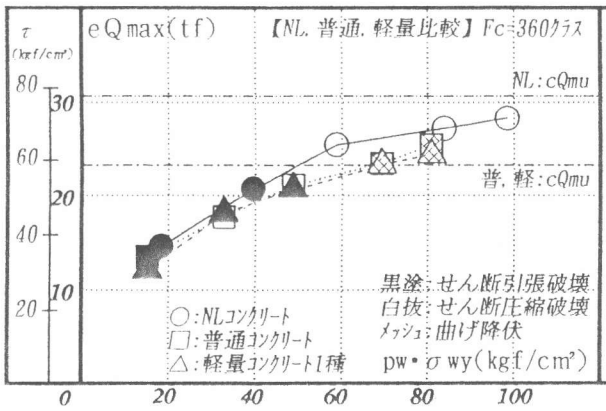


図-13 eQmax-pw・σwy関係

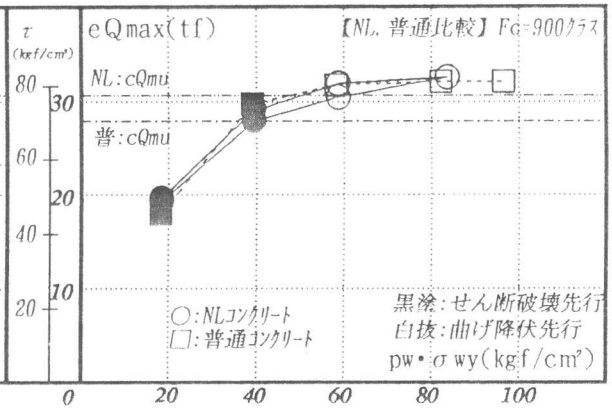


図-14 eQmax-pw・σwy関係

図-14より、900-Ⅰ,Ⅱは、pw・σwyの増加に伴いeQmaxは上昇するがpw・σwy=36.9～58.9kgf/cm²の間のcQmu近傍で部材が曲げ降伏に至り、以後のeQmaxはcQmuと同程度であり、NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁の曲げ耐力も既往の計算式での評価が可能であることが確認できた。また、超高強度普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁[4]との比較では、同傾向と言える。

3．4　既往の計算式との比較

文献[3]～[10]より引用したcσB=315～1370kgf/cm²、σwy=3980～14400kgf/cm²のNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁26体、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁63体、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁10体の計99体について比較検討を行い、NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁の既往の計算式への適合性を見る。終局強度型耐震設計指針のせん断終局耐力算定式のA法非靭性式の計算値(cQsu1)、靭性式(Rp=1/50)の計算値(cQsu2)と最大耐力の比較を図-15,16に示す。

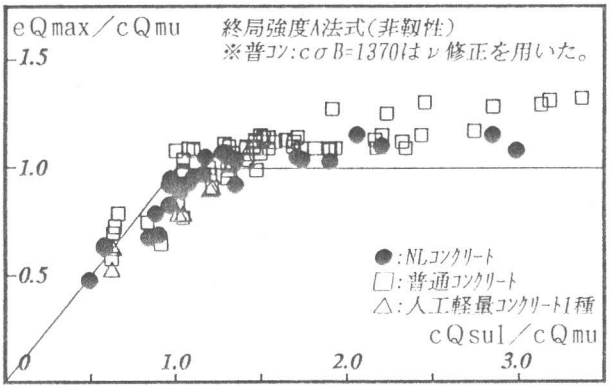


図-15 eQmax/cQmu-cQsu1/cQmu関係

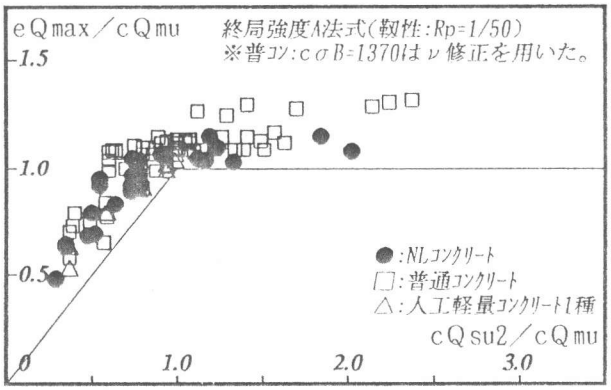


図-16 eQmax/cQmu-cQsu2/cQmu関係

尚、両値ともcQmuで除して基準化してあり、以下、横軸の計算値をせん断余裕度、縦軸の実験値を最大荷重比と称する。また、cσB=1370kgf/cm²の超高強度普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁はｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮強度有効係数νを修正し、$\nu=3.68\cdot c\sigma B^{0.667}/c\sigma B$[11]とした。そして、せん断強度の適合性を見るには、せん断余裕度が1以下の部分の1:1の直線が基準となる。図-15の指針式A法非靭性関係では、せん断余裕度がNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.16、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.00、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.31以降で部材が曲げ降伏に至り、せん断破壊先行型の試験体のせん断余裕度に対する最大荷重比はNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.77～1.11、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.71～1.20、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.74～0.99であり、その平均値はNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.92、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.89、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.81である。図-16の指針式A法靭性(Rp=1/50)関係では、せん断余裕度がNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.74、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.60、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁0.94以降で部材が曲げ降伏に至り、せん断破壊先行型の試験体のせん断余裕度に対する最大荷重比はNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.21～1.84、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.13～1.99、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.13～1.67であり、その平均値はNLｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.48、普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.48、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁1.34である。

3．5　付着割裂破壊の判定

付着割裂破壊の有無の判定をするために、せん断余裕度(cQsu2/cQmu)と、文献[1]より引用した、(1)式による付着割裂強度計算値cτbuを(2)式による主筋降伏時の平均付着応力度cτfで除し基準化した値(cτbu/cτf:以下,付着余裕度)について検討を行った。尚、検討に用いた試験体は、文献[3]～[10]の中で繰返し載荷を行った試験体のみとした。図-17にcQsu2/cQmu-cτbu/cτf関係を示す。NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁は付着余裕度0.83以下で付着割裂破壊を起こし、0.98以上では付着割裂破壊を起こさなかった。普通ｺﾝｸﾘｰﾄ梁は付着余裕度0.87以下で付着割裂破壊を起こし、0.97以上では付着割裂破壊を起こさなかった。軽量ｺﾝｸﾘｰﾄは付着余裕度0.97以上で付着割裂破壊を起こさなかった。一方、せん断余裕度に関しては付着割裂破壊との因果関係は見られなかった。以上より、NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁は普通、軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ梁と同様に付着割裂破壊の判別が可能である。

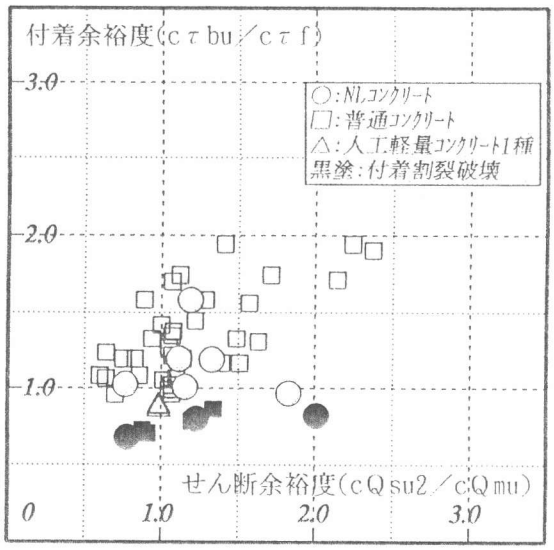


図-17 cQsu2/cQmu-cτbu/cτf関係

$$c\tau bu = c\tau co + c\tau st \qquad (1)$$

$$c\tau f = db \cdot \Delta\sigma / \{4(L-D)\} \qquad (2)$$

$c\tau co = (0.4bi + 0.5)\sqrt{c\sigma B}$

$c\tau st = \{(20/Nt + 5Nu/Nt + 15Ns/Nt)pw \cdot b\sqrt{c\sigma B}\}/db$

bi:min{(2√2dc-db)/db,(b-Σdb)/Σdb}
dc:隅角部主筋中心からのかぶり厚さ(cm)
db:主筋径(cm)
Nt:一列に配筋されている主筋本数
Nu:直接補強筋のかかっていない主筋本数
Ns:直接補強筋のかかっている主筋本数
$\Delta\sigma$:部材両端部の主筋の応力度差 $2\times\sigma sy$(kgf/cm²)

4．まとめ

本研究における材料強度の範囲において、曲げ、せん断、付着割裂性状等の構造性能面に関して、NLｺﾝｸﾘｰﾄ梁は普通ｺﾝｸﾘｰﾄ及び従来の人工軽量骨材ｺﾝｸﾘｰﾄ1種梁と同等に評価できることを明らかにした。

[謝辞] 本実験を行うにあたり、実験を担当した平成5年度東京理科大学工学部第1部建築学科卒業生一柳成幸君、弥久保元治君に深く感謝いたします。

[参考文献]

(1)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、1993.11　(2)中西正俊他:抗火石微粉末の焼成骨材を使用した超軽量ｺﾝｸﾘｰﾄの圧縮強度と水セメント比との関係、ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集、12-1、pp.727-732、1990　(3)田野健治・松崎育弘他ほか:高強度鉄筋の開発に関する研究-その24 高強度人工軽量ｺﾝｸﾘｰﾄを用いたRC梁のせん断実験-、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、PP527～528、1992.8　(4)小森淳・松崎育弘他:cσB=1200(kgf/cm²)級の超高強度ｺﾝｸﾘｰﾄを用いたRC梁部材のせん断性状に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.407～408、1993.9　(5)高坂信・松崎育弘他:人工軽量骨材と13000(kgf/cm²)級の高強度せん断補強筋を用いたRC梁部材のせん断性状に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.531～532、1992.8　(6)三田卓・松崎育弘他:水平打ち継ぎを有するRC梁部材の曲げせん断性状に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.609～610、1993.9　(7)辰濃達・松崎育弘他:高強度材料を使用したRC梁部材のせん断性状に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.411～412、1993.9　(8)平川勝基・松崎育弘他:高強度電炉鉄筋の開発に関する研究-その15梁の靭性能に関する研究主筋にSD490を用いた場合-、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.115～116、1993.9　(9)平川勝基・松崎育弘他:鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ梁部材の靭性評価に関する実験研究-せん断余裕度の評価方法と靭性との関係-その1 実験概要及び結果、日本建築学会学術講演梗概　(10)渡辺英義・松崎育弘他:鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ梁部材の靭性評価に関する実験研究-せん断余裕度の評価方法と靭性との関係-その2 靭性能の定量化、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.735～736、1992.8　(11)南宏一・渡辺史夫:RC耐震部材のせん断設計式の開発-日本建築学会RC耐震設計小委員会せん断WGの考え方-、RC耐震壁のﾏｸﾛﾓﾃﾞﾙとFEMﾐｸﾛﾓﾃﾞﾙに関するﾊﾞﾈﾙﾃﾞｨｽｶｯｼｮﾝ論文集、pp.21～39、1988.1　(12)金久保利之・園部泰寿:高強度人工軽量骨材ｺﾝｸﾘｰﾄを用いた鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ部材の耐震性能に関する研究-曲げ性能に影響される部材の強度と変形能-、日本建築学会論文報告集、NO.441、pp63～72、1992.11　(13)金久保利之・園部泰寿:高強度人工軽量骨材ｺﾝｸﾘｰﾄを用いた鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ部材の耐震性能に関する研究-破壊形式と靭性能-、日本建築学会論文報告集、NO.453、1993.11　(14)服部由二・松崎育弘他:超軽量骨材を用いた高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ構造の開発(その4:梁の曲げせん断実験①)、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.33～34、1993.9　(15)吾郷明人・松崎育弘他:超軽量骨材を用いた高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ構造の開発(その5:梁の曲げせん断実験②)、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.35～36、1993.9