

論文 特殊混和剤による高流動コンクリートを用いた RC 部材の曲げせん断実験

井上和政^{*1}・和泉意登志^{*2}・宮内靖昌^{*1}・三浦義雅^{*3}

要旨：筆者らは、材料コストを極力低く抑え、一般強度レベルでの実現を目指した新規混和剤による高流動コンクリートを開発し、その物性を報告してきた。このコンクリートは同一圧縮強度レベルの普通コンクリートと比較して、割裂引張強度が若干低下する傾向にある。今回、普通コンクリートと同等の構造性能を付与するための基礎資料を得る目的で、この材料物性が構造性能に及ぼす影響度合を把握した。

そして、この新規高流動コンクリートを用いた RC 部材での曲げせん断実験の結果、普通コンクリートとほぼ同等の構造力学的性能を有することが確認できた。

キーワード：高流動コンクリート、混和剤、RC部材、せん断実験、せん断ひび割れ

1. はじめに

高流動コンクリートは、1997年の JASS 5 改訂によって新しく取り入れられ、広く一般建築物に用いられる体制が整備された¹⁾。しかし普通コンクリートと比較して粗骨材量が少ない高流動コンクリートの材料物性に関する研究報告は多いものの、構造部材性能に関する研究報告は極めて少ない^{2),3)}。構造性能については、二羽らがひび割れ伝播における破壊エネルギーの相対的比較から、粉体系高流動コンクリートの引張抵抗性の低下と曲げ強度の低下傾向を示唆している³⁾にすぎない。

筆者らは、材料コストを極力低く抑えた一般強度レベルでの高流動コンクリートの実現を目指して、専用の一液混和剤（以下混和剤 A）を開発し、これを用いた高流動コンクリートの基礎物性を報告⁴⁾してきた。このコンクリートは同一水セメント比、単位水量の普通コンクリートと比較して、使用材料によっては、割裂引張強度が若干低下する傾向にある。このため、同一圧縮強度の普通コンクリートに置き換えて使用する場合、ひび割れ抵抗性が若干低下するだけでなく、構造部材として同等の性能が得られない可能性がある。

そこで今回、普通コンクリートと同等の構造性能を付与するための基礎資料を得る目的で、同一圧縮強度レベルの普通コンクリートとの構造性能の差異を検討した。本報では、

コンクリートの引張強度低下の影響が、より顕著に現れることを想定した、柱および壁部材の曲げせん断実験結果について報告する。

表-1 柱の曲げせん断実験の試験体概要

試験体名	構造種別	断面	主筋	帯筋	せん断補強筋比	特徴
24-SW	RC	350×350	10-D16	D6□φ60	Pw=0.30%	高流動コンクリート
24-NC			Pt=0.65%			普通コンクリート

注)使用材料：主筋はD16(SD390)、帯筋はD6(SD295A相当)

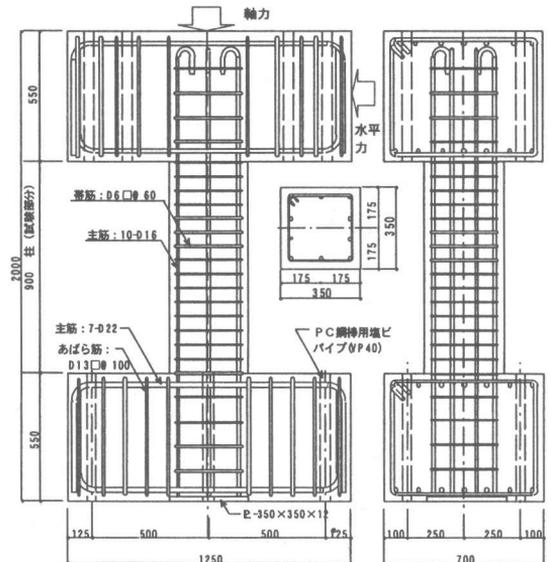


図-1 柱試験体寸法および配筋図

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部 研究員

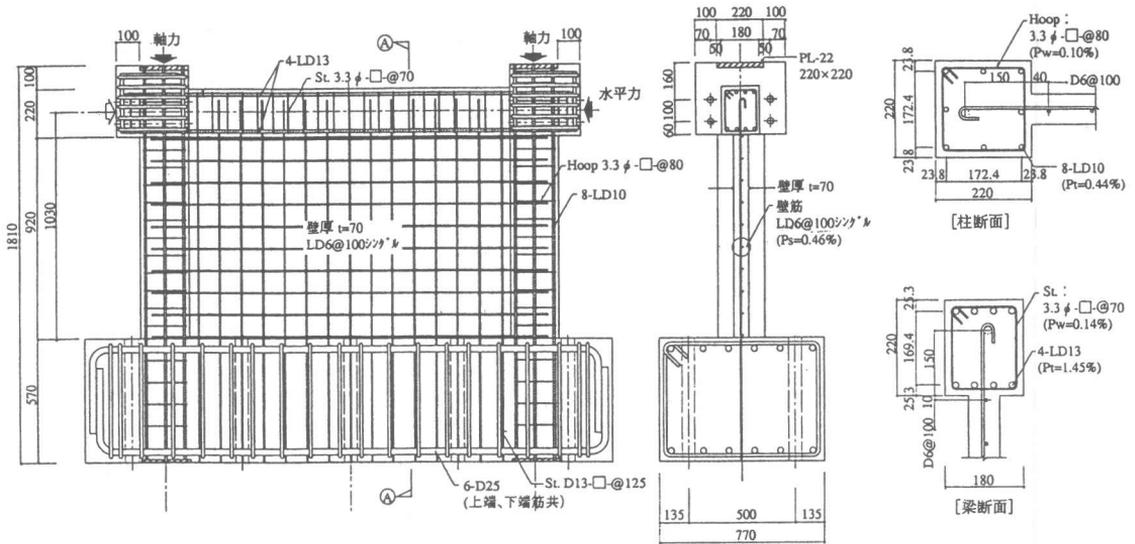


図-2 壁試験体寸法および配筋図

表-2 コンクリートの使用材料

セメント	M社製普通ポルトランドセメント, 比重=3.16
細骨材	鹿島産陸砂(60%)+葛生産砕砂(40%), 比重=2.58
粗骨材	鬼怒川水系川砂利, $G_{max}=10mm$, 比重=2.61
混和剤	T社製高流動コンクリート用混和剤A N社製AE減水剤標準形

表-3 コンクリートの調合表

コンクリートの種類	記号	水セメント比 (%)	単位置 (kg/m ³)				空気量 (%)	混和剤 (C* %)
			W	C	S	G		
高流動	24-60	55	183	333	918	812	4.5	2.60*
普通	24-18	55	183	333	808	924	4.5	0.25**

*: 混和剤A, **: AE減水剤

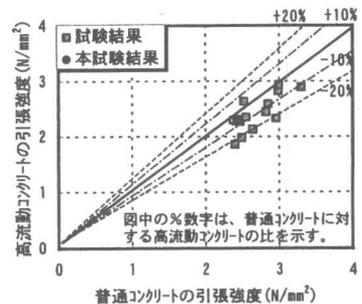


図-3 高流動コンクリートと普通コンクリートの引張強度の比較

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1および図-1に柱試験体の断面とその形状を示す。柱試験体は約1/2スケールを想定し、断面 $B \times D = 35 \times 35cm$ とした。割裂引張強度の影響が顕著に現れるよう、柱長さ h は90cm(せん断スパン比 $M/QD = 1.3$)とした。主筋は10-D16(引張鉄筋比 $Pt=0.65\%$)、帯筋は2-D6@60(帯筋比 $Pw=0.30\%$)とした。

図-2に、壁試験体の断面および形状を示す。壁部材試験体は、約1/3スケールを想定し、壁厚 t を7cm、柱断面 $B \times D = 22 \times 22cm$ とした。壁の配筋は、通常の鉄筋量となるようD6をピッチ10cmで、シングルに配筋($Ps=0.46\%$)した。

2.2 使用材料

コンクリートの使用材料を表-2に示す。粗骨材には、最大径10mmの豆砂利を使用した。粗骨材以外の材料は、出荷工場で通常に使用しているものである。混和剤は、高流動コンクリートには混和剤Aを、普通コンクリートにはAE減水剤標準形を用いた。

実験に用いたコンクリートの調合を表-3に示す。柱部材実験での比較用の普通コンクリートは呼び24-18(N)相当で、高流動コンクリートはこれと単位水量および水セメント比を同一とした。高流動コンクリートの粗骨材かさ容積は、 $0.51m^3/m^3$ 、普通コンクリートでは $0.58m^3/m^3$ とした。

コンクリートの材料試験結果は、表-4に示す通りであった。高流動コンクリートと

表-4 コンクリートの材料試験結果

試験 部材 種類	コンクリート の種類 (記号)	スラング フォー または スラング (cm)	空気量 (%)	C.T. (°C)	材齢 4 週の強度試験結果 (N/mm ²)				載荷時強度試験結果 (N/mm ²)			
					標準水中養生		現場封緘		載荷 材齢	現場封緘養生		
					圧縮強度	引張強度	圧縮強度	引張強度		圧縮強度	ヤング係数	引張強度
柱	24-60	SFL=55.0	4.7	19.0	31.3	2.31 (1/14)	4.19 (1/8)	32.3	32日	33.6	2.60×10 ⁴	2.01 (1/17)
	24-18	SL=18.5	4.5	18.0	30.5	2.43 (1/13)	4.01 (1/8)	28.9	30日	29.0	2.46×10 ⁴	2.14 (1/13)
壁	24-60	SFL=53.0	4.2	22.0	34.6	2.40 (1/14)	4.52 (1/8)	32.5	102 日	38.8	3.18×10 ⁴	3.10 (1/13)

()内は、圧縮強度に対する各強度の比を示す。

普通コンクリートを比較すると、圧縮強度および曲げ強度はほぼ同等で、割裂引張強度は、高流動コンクリートの方が普通コンクリートに比べて若干小さい。圧縮強度に対する引張強度の比も、高流動コンクリートの方が小さく、特に現場封緘養生した供試体の強度比は、普通コンクリートが 1/13 であるのに対して、高流動コンクリートは 1/17 とかなり小さかった。図-3 は、筆者らによる高流動コンクリートと同一単位水量で同一水セメント比の普通コンクリートの引張強度を比較した既往の実験結果⁴⁾であるが、今回の使用材料は、これらの結果に対して、概ね平均的な関係にあると判断できる。引張強度低下の原因を考察する目的で測定したポアソン比は、高流動コンクリートの場合 0.19 で、普通コンクリートの 0.20 に比べて若干小さかった。

2.3 試験体の作製方法

コンクリートは、容量 3.0m³の強制練り 2 軸ミキサを用いて、練り量 1.5m³で製造した。練混ぜ時間は、通常通りの全材料投入完了後 45 秒練りとした。製造後、打設現場までアジテータ車で輸送し、ホッパーで打設した。高流動コンクリートは、締固めを一切行わず、また普通コンクリートは棒状パイプレータを用いて十分に締固めて、試験体を作製した。

2.4 加力方法

柱の曲げせん断実験での加力は、柱高さ中央に反曲点がくる建研式加力装置を用いて行い、0.25×σ_B (表-4 中の載荷時のコンクリート圧縮強度)相当の一定軸力を載荷後、正負繰り返しの逆対称曲げせん断力を載荷した。加力サイクルは、柱脚に対する柱頭の水平変位 δ を柱長さ h で除した柱の変形部材角 R (=δ/h) による変形制御とした。

壁部材のせん断実験での加力は、柱に一定の軸力を載荷した後、架構の部材角 (層間変形角) R を制御変位として、正負繰り返しの水平力 (せん断力) を加えた。水平力の載荷には片側のジャッキによる押し荷重と反対側ジャッキによる引き荷重を同時に加えた。なお、柱の載荷の軸応力度 σ₀ は、σ₀=0.15σ_B とした。

3. 柱試験体の実験結果および考察

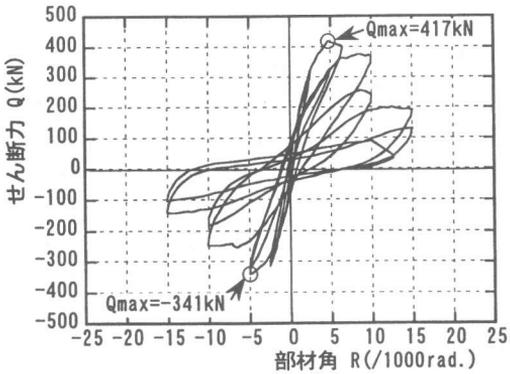
3.1 破壊性状および荷重-変形関係

高流動コンクリートの柱試験体は、部材角 R=+0.53/1000rad. 時および-0.61/1000rad. 時に曲げひび割れが、+2.79/1000rad. 時および-1.72/1000rad. 時に曲げせん断ひび割れが、+3.89/1000rad. 時および-2.92/1000rad. 時にせん断ひび割れが、それぞれ発生した。そして+4.70/1000rad. 時および-5.02/1000rad. 時に最大耐力に達し、その後せん断ひび割れと圧壊が進行し、柱主筋が座屈して軸力を保持できなくなった。これらの破壊性状は普通コンクリートと全く同じであった。

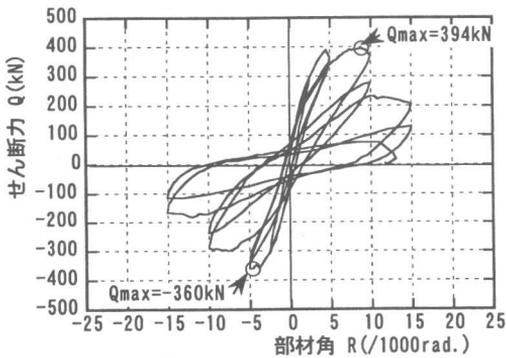
普通コンクリートと比較するために、せん断力-部材角曲線を、包絡線を含めて図-4 に示す。初期剛性、最大耐力および荷重-変位関係は、両試験体ともほぼ同等であった。ほぼ最大耐力時に相当する、5/1000rad. 時のひび割れ状況を写真-1 に、15/1000rad. 時の最終ひび割れ状況を写真-2 に示す。5/1000rad. 時には、ひび割れの発生状況に若干の差異が見られた。高流動コンクリートの方が、普通コンクリートよりもひび割れ本数は若干多く発生した。しかしながらモルタルの場合²⁾のように、大きなひび割れによって破壊が集中することはなかった。

15/1000 時の最終破壊状況では、いずれのコンクリートもひび割れは柱全面に分散して発生し、図-4中の包絡線に示すように、最大耐力以降についても、両者は同様の耐力低下性状を示した。

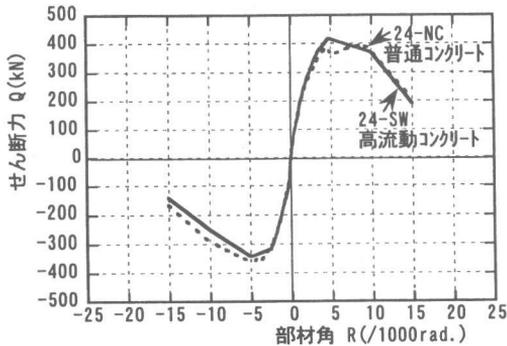
最大荷重および各種ひび割れ発生時荷重とその時の部材角を表-5に示す。正方向処女載荷時において、高流動コンクリート試験



a) 高流動コンクリート (24-SW)



b) 普通コンクリート (24-NC)



c) 包絡線による比較

図-4 柱の曲げせん断実験結果 (せん断力-部材角関係)

体の方が、普通コンクリートの試験体よりも曲げひび割れが若干早く発生した。しかしながら、負方向載荷時の曲げひび割れ発生時、それ以外の正負両方向での各ひび割れ発生時、および最大荷重時の荷重と部材角については、両者の間に差異は見られなかった。

3.2 無次元化耐力による比較

次にコンクリート圧縮強度の違いを考慮するため、曲げひび割れ発生時の引張縁応力 σ_t およびその他のひび割れ発生時のせん断応力 τ を、載荷時のコンクリート実圧縮強度で無次元化した値 $\sigma_t / \sqrt{\sigma_c}$ および $\tau / \sqrt{\sigma_c}$ を求めて比較した。表-6に示すように、各ひび割れ発生時の高流動コンクリートの無次元化応力は、普通コンクリートの場合よりも若干小さい程度であった。

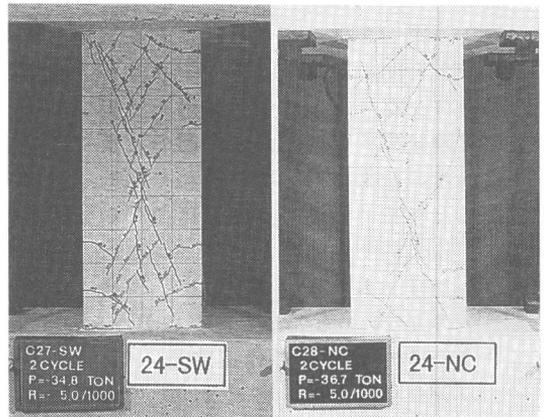


写真-1 柱の曲げせん断実験結果 (部材角 5/1000rad. 時)

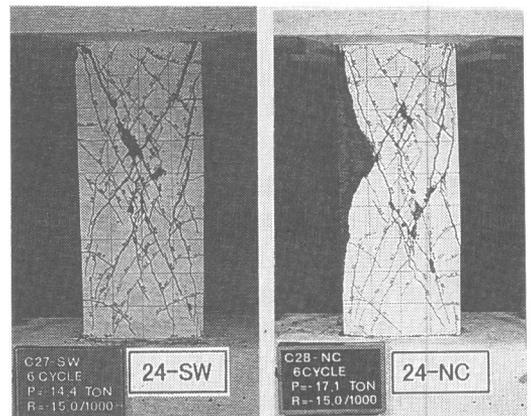


写真-2 柱の曲げせん断実験結果 (部材角 15/1000rad. 時)

表-5 曲げせん断実験結果一覧

試験体		曲げひび割れ発生時		曲げせん断ひび割れ発生時		せん断ひび割れ発生時		最大荷重時	
		荷重Q	部材角R	荷重Q	部材角R	荷重Q	部材角R	荷重Q	部材角R
24-SW	正	103	0.53	338	2.79	388	3.89	417	4.70
	負	-139	-0.61	-255	-1.72	-297	-2.92	-341	-5.02
24-NC	正	160	0.87	326	3.02	387	4.56	394	8.91
	負	-139	-0.65	-306	-2.48	-317	-2.78	-360	-4.64

注)単位：荷重Q(kN)，部材角R(1/1000 rad.)

表-6 実強度による無次元化せん断応力の比較

試験体		曲げひび割れ発生時		曲げせん断ひび割れ発生時		せん断ひび割れ発生時		最大荷重時	
		σ_t	$\sigma_t/\sqrt{\sigma_B}$	τ	$\tau/\sqrt{\sigma_B}$	τ	$\tau/\sqrt{\sigma_B}$	τ	$\tau/\sqrt{\sigma_B}$
24-SW	正	6.48	3.57	2.76	1.52	3.17	1.75	3.40	1.87
	負	-8.77	-4.83	-2.08	-1.15	-2.43	-1.34	-2.79	-1.53
24-NC	正	10.07	5.97	2.66	1.58	3.16	1.87	3.22	1.91
	負	-8.77	-5.20	-2.50	-1.48	-2.59	-1.53	-2.94	-1.74

注)引張線応力 $\sigma_t=Qh/(2 \times BD^2/6)$ ，せん断応力 $\tau=Q/(B \times D)$ (N/mm²)
 σ_B は載荷時のコンクリートの実圧縮強度を示す。但し $\sqrt{\sigma_B}$ で応力単位とした。

表-7 各種計算式と実験値の比較

試験体名 (記号)	コンクリート強度 (N/mm ²)	軸力 (kN)	$Pw \cdot \sigma_y$ (N/mm ²)	終局せん断耐力 計算値 ¹⁾ (kN)	終局せん断耐力A法 計算値 ²⁾ (kN)	曲げ耐力時の せん断耐力 ³⁾ (kN)	実験値 ⁴⁾ (kN)	最終破壊 状況
24-SW	33.6	1030	0.99	350	334	470	417	せん断
24-NC	29.0	889	0.99	322	314	429	394	せん断

注：1] 文献5)の荒川 mean式による計算値を示す。

2] 文献6)による計算値を示す。

3] 文献7)による終局曲げ耐力時のせん断力の計算結果を示す。

4] 実験値は、正負最大荷重のうち大きい方の値を示す。

3.3 各種計算式による比較検討

表-4に示したコンクリートの実圧縮強度より、高流動コンクリートの場合の短期許容せん断応力は、文献7)から1.24N/mm²となる。これに対して、表-6中の曲げせん断ひび割れ発生時のせん断応力は正・負両方向ともに十分大きく、現行の普通コンクリートの設計式⁷⁾を用いることができるものと考えられる。

次に最大耐力に関して、各種計算式を用いて実験値との比較検討を行った。計算結果と実験値の比較を表-7に示す。実験値は、荒川・mean式および終局せん断耐力A法による計算値に対して、いずれも1.2倍程度であった。このことから、本高流動コンクリートを用いたRC柱部材のせん断耐力は、普通コンクリートと同じ計算式で、計算できるものと考えられる。

4. 壁試験体の実験結果および考察

4.1 破壊性状および荷重-変位関係

壁試験体は、高流動コンクリートについてのみ実験を行った。せん断力-層間変形角関係の実験結果を図-5に、ひび割れ状況の例を、写真-3、4に示す。試験体は、

+0.17/1000rad.時および-0.11/1000rad.時に、各々壁に初せん断ひび割れが発生した。続いて正負とも1~2/1000rad.時に、柱脚部、柱頭部の順で柱に曲げひび割れが発生した。さらに、+3.96/1000rad.時および-2.53/1000rad.時、柱にせん断ひび割れが発生した。そして、5/1000rad.時に圧壊が開始して、6/1000rad.時に正負とも最大耐力となった。最大耐力時層間変形角での繰返し3回目に、柱頭および壁コーナー一部が破壊して、耐力が低下したため、実験を終了した。6/1000rad.時、壁の横

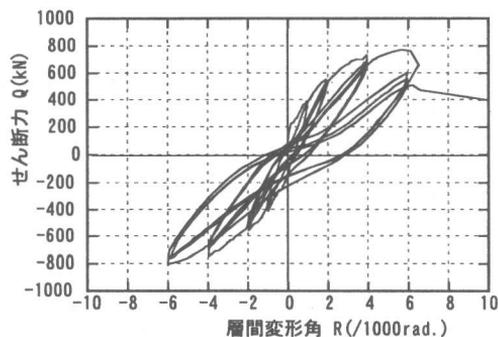


図-5 せん断力-層間変形角関係

筋はほぼ降伏していたが、縦筋は未降伏のため、破壊モードはせん断型と判断される。

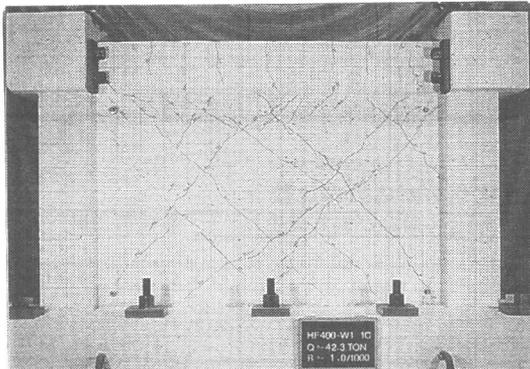


写真-3 ひび割れ状況 (-1/1000rad.時)

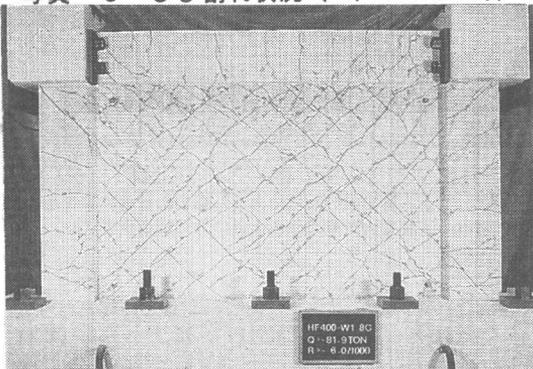


写真-4 ひび割れ状況 (-6/1000rad.時)

4. 2 せん断ひび割れ発生時および最大耐力に関する考察

表-4の実圧縮強度より、高流動コンクリートの短期許容せん断力⁷⁾は、 1.32N/mm^2 である。これに比べて、せん断ひび割れ発生時のせん断応力は正負両方向とも十分に大きく、壁部材も現行の設計式⁷⁾を用いることができるものと考えられる。但し、文献7)に示されているせん断初ひび割れ発生時の変形角が平均 $0.25 \times 10^{-3}\text{rad.}$ であることと比較すると、実験結果 $0.17 \times 10^{-3}\text{rad.}$ は若干小さい。

最大耐力の実験値と各種計算式の比較結果を表-8に示す。実験値は各計算値に対して、1.23倍および1.02倍であった。文献5)の計算値が実験値より小さいのは、圧縮強度の適用範囲の違いによるものと推測される。以上より、本高流動コンクリートを用いた壁部材の最大耐力は、設計耐力に比べて十分であり、文献8)の計算値に良く対応することから、同式での設計が可能と考えられる。

表-8 壁試験体のせん断実験結果

	せん断ひび割れ発生時			最大荷重時			
	荷重Q	応力 τ_{ci}	変形角R	荷重Q	変形角R	計算値1 ⁵⁾	計算値2 ⁸⁾
正	224	1.88	0.17	762	6.12	622	744
負	-257	2.16	0.11	-803	-6.01		

注)単位：荷重Q(kN)，部材角R(1/1000rad.)，応力 τ (N/mm²)

5. まとめ

新規開発の一液混和剤による高流動コンクリートを用いた、RC柱および壁部材の曲げせん断実験の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 柱部材での各ひび割れ発生時の荷重は、高流動コンクリートの方が普通コンクリートよりも若干小さい。
- 2) 壁部材のせん断ひび割れ発生時の変形角は、通常よりも若干小さい。
- 3) 柱部材の初期剛性、最大耐力および変形性能は、同一単位水量、水セメント比の普通コンクリートの時とほぼ同等である。
- 4) 柱部材、壁部材はいずれも設計耐力を十分満足し、普通コンクリートと同様に、各種算定式による、せん断耐力の推定・設計が可能である。

謝辞

本研究にあたり、(株)竹中工務店の藤村雅彦氏と総武産業(株)印旛工場の皆様には、多大なご協力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説，1997.1
- 2) 岩橋司・毛井崇博・宮内靖昌・太田義弘：鉄筋コンクリート柱の補修・補強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.18，No.2，pp.1499-1504，1996.6
- 3) 二羽淳一郎，Somnuk Tangtermsirikul：高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートの破壊力学特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.117-122，1997.6
- 4) 和泉意登志・井上和政ほか：新タイプの高流動コンクリートの開発(その1～その14)，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，A，pp.81-98，1996.9およびpp.209-218，1997.9
- 5) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，1990
- 6) 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，1990.11
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説，1991
- 8) 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(案)・同解説，1997.7