

超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート立体耐震壁の構造性能

熊谷 仁志 塚越 英夫 戸沢 正美 黒瀬 行信
(技術研究所) (技術研究所) (設計本部) (設計本部)

Structural Performance of Reinforced Concrete Shear Wall with Ultra-high Strength Materials

by Hitoshi Kumagai, Hideo Tsukagoshi, Masami Tozawa and Yukinobu Kurose

Abstract

A structural system using reinforced concrete core wall makes architectural free planning possible since the core wall can bear most of seismic force and relieve the load of columns. In this study, lateral loading tests on the reinforced concrete shear wall with 120N/mm^2 compressive strength concrete and uni-axial compression tests on the model extracted from the shear wall have been conducted. The test results reveal that its structural performance is greatly affected by axial compression behavior of the compression zone in the shear wall. Scale effect and lateral confinement effect should be considered appropriately in applying this structural system.

概 要

建物のコア部分に鉄筋コンクリート立体耐震壁を設けた構造を採用すれば、地震力の大半が立体耐震壁によって負担され、柱の負担が小さくなり、自由度の高い空間を実現することができる。本研究では、設計基準強度 $F_c=120\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート立体耐震壁の曲げせん断実験、およびその一部を取り出した試験体を用いて中心圧縮実験を行った。その結果、鉄筋コンクリート立体耐震壁の構造性能は、圧縮部コンクリートの応力度－ひずみ関係に大きく影響を受けることが明らかになった。実建物の設計においては、圧縮部コンクリートに対する寸法効果および横補強筋による拘束効果を適切に考慮することが重要である。

§ 1. はじめに

最近、大都市部における超高層集合住宅の建設が盛んである。筆者らは60階建、高さ200mクラスの超高層集合住宅を実現するため、設計基準強度 $F_c=120\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱および柱・梁架構に関する研究を行ってきた^{1),2)}。

一方、フリープランやスケルトン・インフィル方式など設計自由度の高い空間、特に居室部の柱ができるだけ少ない空間へのニーズが高まってきている。建物のコア部と居室部を区画する壁を鉄筋コンクリート立体耐震壁とすると、地震力の大半が立体耐震壁によって負担され、柱の負担が小さくなり、こうした自由度の高い空間を実現することができる^{3),4)}。

本研究では60階建、高さ200mクラスの超高層集合住宅において、こうした自由度の高い空間を実現する

ため $F_c=120\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートおよびUSD685の高強度鉄筋を用いた立体耐震壁の曲げせん断実験を行った。その結果、立体耐震壁の構造性能は、圧縮部コンクリートの挙動に大きく影響を受けることが明らかになった。そこで、立体耐震壁の一部を取り出した試験体の中心圧縮実験を行い、超高強度コンクリートの圧縮破壊における寸法効果や横補強筋による拘束効果についても検討した。

§ 2. 立体耐震壁の曲げせん断実験

2.1 試験体および使用材料

試験体の形状および寸法を図-1(a)に示す。試験体は実際の1/7～1/10の縮小モデルである。C型断面試験体は水平力の作用方向(0、45、90°)を変化させた3体である。L型断面試験体は45°方向加力の1体であ

る。壁厚は100mm、加力点高さは1500mmで共通である。断面および配筋の詳細を図-1(b)に示す。C型断面試験体の短辺は450mm、長辺は900mmで、L型断面試験体の各辺は450mmである。縦筋には2-D10(USD685)を50mm間隔に配しているが、端部および隅角部にはD13(USD685)を用いて実際の立体耐震壁と鉄筋比の分布を合わせている。横筋にはD6(SD345)U字筋を50mm間隔に配し、壁板中央での重ね継手としている。図-1(b)に示す位置に、幅止筋D6フープを100mm間隔に配している。

使用材料の力学的性質を表-1に示す。壁部には $F_c=120\text{N/mm}^2$ (シリカヒュームセメントを使用、水セメント比20%、粗骨材最大寸法20mm)のコンクリートを用いた。実験時の圧縮強度($\phi 100\times 200$ の円柱供試体、現場封緘養生)は 134N/mm^2 であった。

図-1(c)のような関係で軸力と水平力を作用させた。L-45はC-45、C-90の2倍の軸力比となっているが、断面積が1/2であるため上下限軸力(圧縮4800kN、引張-960kN)は共通である。C-0は一定軸力(960kN)である。軸力用および水平力用のアクチュエータは試験体断面の図心線に取り付いている。C-0とC-45については図心とせん断中心がずれているため、水平力用に直交する方向の2台のアクチュエータを用いて面外変形およびねじれを拘束した。

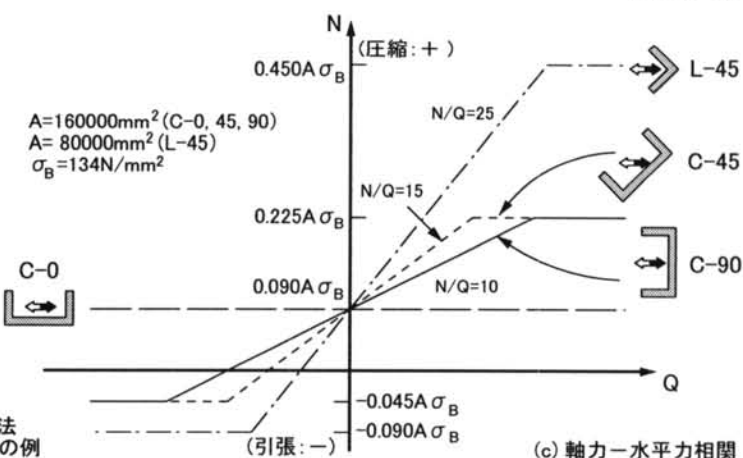
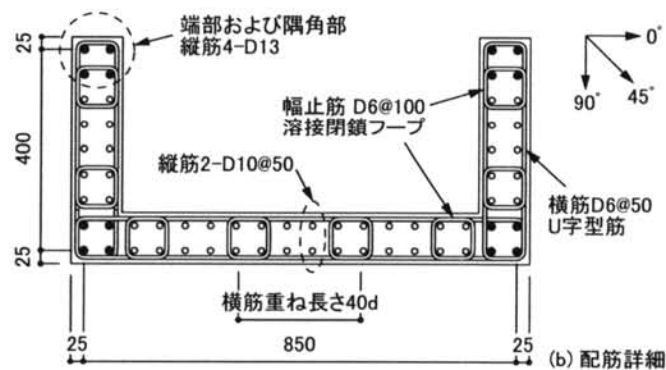
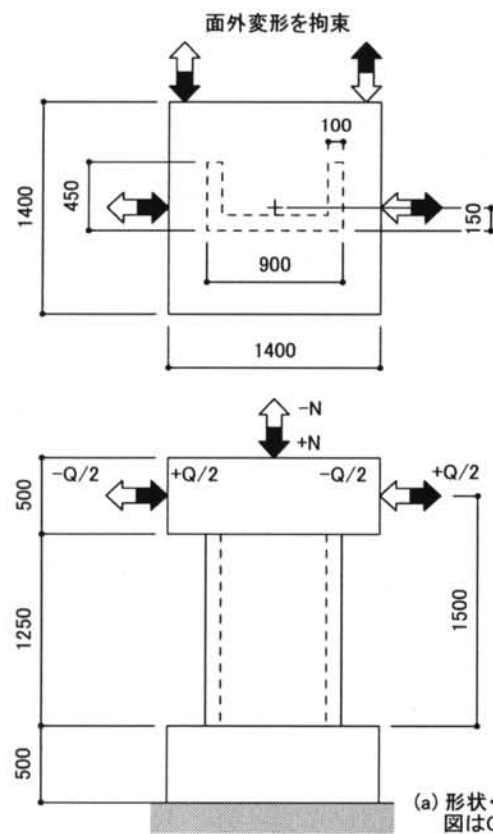


図-1 立体耐震壁試験体

2.2 実験結果

実験結果一覧を表-2に、せん断力と部材変形角の関係を図-2に、試験体の最終破壊状況を図-3に示す。強軸方向に加力したC-0は、長辺壁横筋降伏($R=+0.4\%$)、短辺壁縦筋圧縮降伏($+0.9\%$)、引張降伏($+1.0\%$)と破壊が進展し、 $R=+1.4\%$ で長辺壁がせん断破壊した。45°方向に加力したC-45は、隅角部縦筋圧縮降伏($R=+0.7\%$)、端部縦筋引張降伏($+0.8\%$)と破壊が進展し、 $R=+1.7\%$ で曲げ圧縮破壊して縦筋が座

(1) コンクリート

使用部位	圧縮強度 N/mm^2	強度時歪 %	弾性係数 N/mm^2	引張強度 N/mm^2
壁部	134	0.339	46600	4.1
上スタブ	112	0.308	44200	3.6
下スタブ	112	0.321	43600	4.4

注) 弾性係数は1/3割線剛性、引張強度は割裂試験結果

(2) 鉄筋

使用部位	呼称	降伏強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	伸び %
縦筋	D13	739	968	13.0
	D10	721	875	18.8
横筋	D6	379	491	27.2

注) D13、D10の降伏強度は0.2%オフセット

表-1 使用材料の力学的性質(立体耐震壁試験体)

屈し、軸力を保持できなくなった。弱軸方向に加力した C-90 は、 $R=+1.0\%$ で短辺壁縦筋が引張降伏した後、 $R=+1.7\%$ で長辺壁のかぶりコンクリートが圧壊して荷重が低下した（軸力は保持していた）。L-45 は、隅角部縦筋圧縮降伏（ $+0.7\%$ ）、引張降伏（ -0.8% ）と破壊が進展し、 $R=+2.1\%$ で曲げ圧縮破壊して縦筋が座屈し、軸力を保持できなくなった。

表－2 のせん断耐力計算値は高強度コンクリートでも適用できる NewRC 式(1)を用いて求めた。

$$Q_u = t_w L_{wb} p_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w L_{wa} v \sigma_B / 2 \quad \text{---(1)}$$

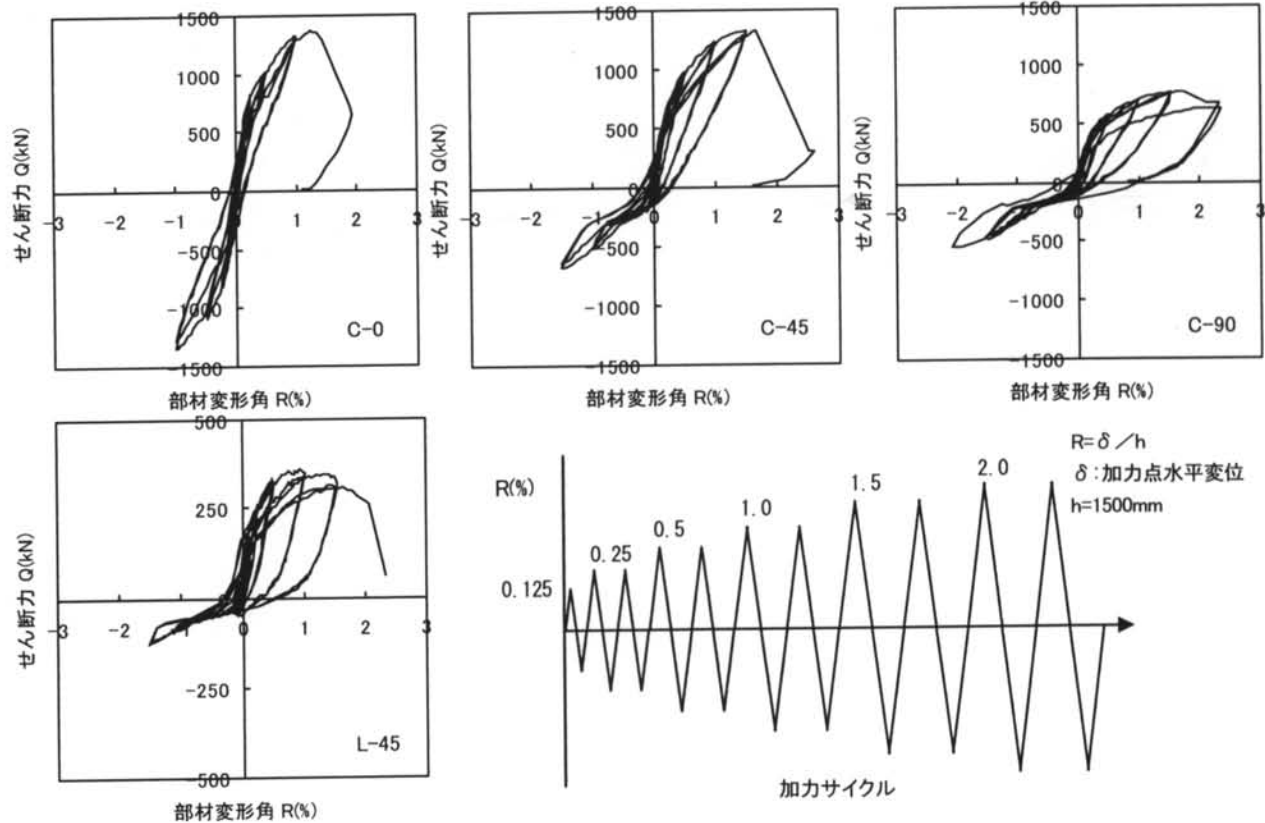
ここで $\cot \phi = 1.5$ で一定、 $v \sigma_B = 1.7 \sigma_B^{-1/3}$ である。詳細については文献 5) を参照されたい。せん断補強量 $p_s \sigma_{sy}$

について原式では上限値 4.1 N/mm^2 が定められているが、文献 6) の検討を参考に $p_s \sigma_{sy}$ が全て有効であるとした。立体壁の場合、側柱ではなく直交壁が取り付けられている。直交壁の負担せん断力についてはまだ不明な点が多い。そこで今回は直交壁の効果を考慮せず L_{wa} および L_{wb} は壁全長（長辺 900mm、短辺 450mm）とした。C-0 については、実験結果は計算値の約 1.3 倍となっており、直交壁もある程度せん断力を負担していると思われる。非常に限られたデータではあるが本研究のような超高強度コンクリートを用いた場合でも NewRC 式(1) を用いてせん断耐力を安全側に評価できるものと考えられる。

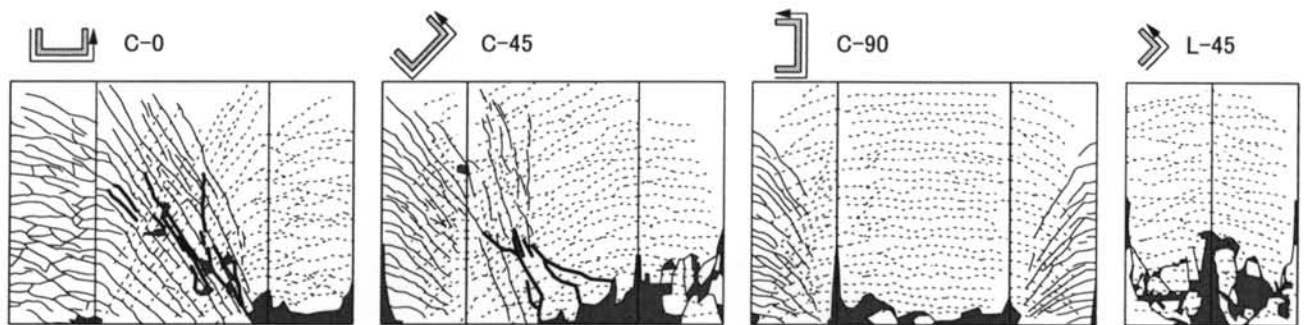
試験体	最大耐力 kN		最大耐力時部材角 %		限界部材角 %	曲げ耐力解析結果 kN		せん断耐力計算値 kN
	正加力	負加力	正加力	負加力		正加力	負加力	
C-0	1368 [1391]	-1346 [-1366]	1.25 [1.25]	-1.02 [-1.02]	1.44 せん断破壊	1602	-1602	1009
C-45	1327 [1403]	-674 [-660]	1.50 [1.67]	-1.51 [-1.51]	1.67 曲げ圧縮破壊	1488	-834	1309
C-90	758 [843]	-549 [-531]	1.71 [1.75]	-2.06 [-2.06]	2.33 以上	702	-478	843
L-45	358 [411]	-125 [-110]	0.94 [1.42]	-1.52 [-1.52]	2.12 曲げ圧縮破壊	276	-98	596

注) [] 内は軸力による P-Δ 効果を考慮したもの
C-45 および L-45 のせん断耐力計算値は個々の壁板の面内せん断耐力のベクトル和とした

表－2 実験結果一覧（立体耐震壁曲げせん断実験）



図－2 せん断力－部材変形角関係（加力方向）



図－3 最終破壊状況（実線は正加力，点線は負加力時のひび割れ）

曲げ耐力および変形性能については4章で詳細に検討する。

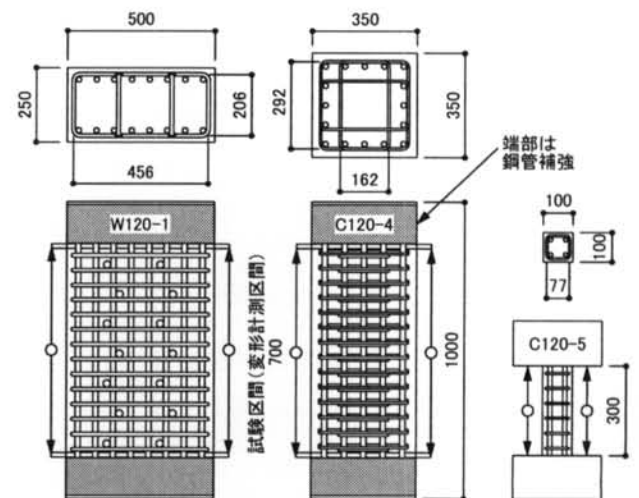
～1/3 の縮小モデルであるが、配筋詳細は実際にできるだけ合わせている。断面は350mm×350mm、250mm×500mmの2種類で、高さは1000mmである。コンク

§ 3. 中心圧縮実験

3.1 試験体および使用材料

2章の試験体C-45、L-45では、圧縮部コンクリートの圧縮破壊によって耐力および変形性能が決定している。しかし、これらの試験体は1/7～1/10の縮小モデルであり、鉄筋比は合わせているものの配筋詳細は模擬していないため、必ずしも実際の立体耐震壁の構造性能を評価しているとは言えない。そこで、立体耐震壁の一部を取り出した試験体の中心圧縮実験を行い、超高強度コンクリートの圧縮破壊における寸法効果や横補強筋による拘束効果について検討する。

試験体および実験結果の一覧を表－3に、試験体の形状および寸法の代表例を図－4に示す。試験体は1/2



図－4 中心圧縮実験試験体

試験体	円柱強度 N/mm ²	断面 mm	主筋	外周帯筋	副帯筋 幅止筋	最大荷重 MN	計算値1 MN	計算値2 MN	最大荷重 時歪 %
C120-0	124	350×350	無	無	無	12.5	12.5	—	0.348
C120-1			16-D16 [740]	D10@50 [360]	無	13.1	14.4	10.9	0.408
C120-2				D10@50 [360]	⊕ D6@50 [731]	12.6	14.4	11.5	0.443
C120-3				D6@50 [731]	⊕ D6@50 [731]	12.2	14.4	11.1	0.417
C120-4				D6@50 [1392]	⊕ D6@50 [1392]	13.2	14.4	11.5	0.503
C120-5		100×100	4-D13 [739]	D6@50 [379]	無	1.37	1.48	1.06	0.334
W120-0		250×500	無	無	無	11.8	12.4	—	0.229
W120-1			16-D16 [740]	D10@50 [360]	2I -D10@100 [360]	12.4	14.4	11.6	0.269
C60-0	74	350×350	無	無	無	7.53	7.69	—	0.253
C60-2			16-D16 [448]	D10@50 [360]	⊕ D6@50 [731]	8.78	9.11	7.34	0.466
C60-3				D6@50 [731]	⊕ D6@50 [731]	9.44	9.06	6.98	0.215
C60-5		100×100	4-D13 [375]	D6@50 [379]	無	0.82	0.91	0.65	0.297
W60-0		250×500	無	無	無	7.69	7.66	—	0.204
W60-1			16-D16 [448]	D10@50 [360]	2I -D10@100 [360]	9.04	9.02	7.24	0.215
W60-2				D10@50 [360]	2C -D10@100 [360]	9.57	9.02	7.24	0.227

注) 円柱強度はφ100×200の円柱供試体(現場封緘養生)による

[]内は鉄筋の降伏強度、単位 N/mm²

計算値1 はかぶりコンクリートを考慮、計算値2 はかぶりコンクリートを無視したもの

表－3 試験体および実験結果一覧（中心圧縮実験）

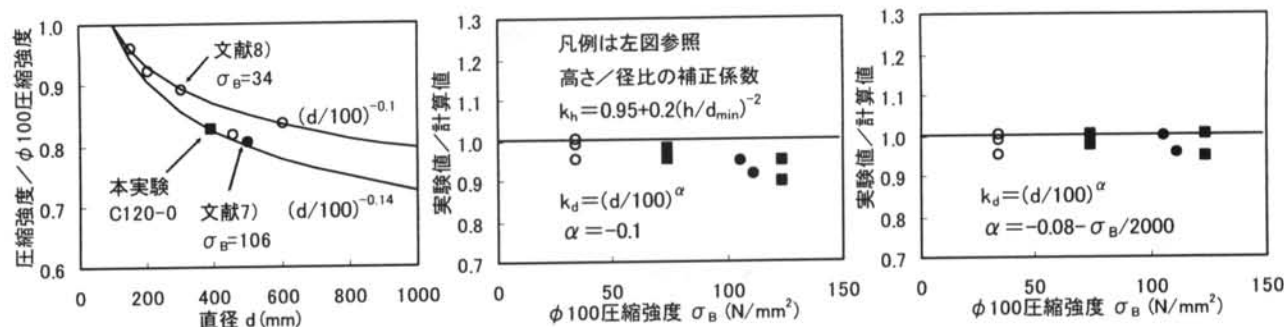


図-5 圧縮強度に対する寸法効果（無筋コンクリート）

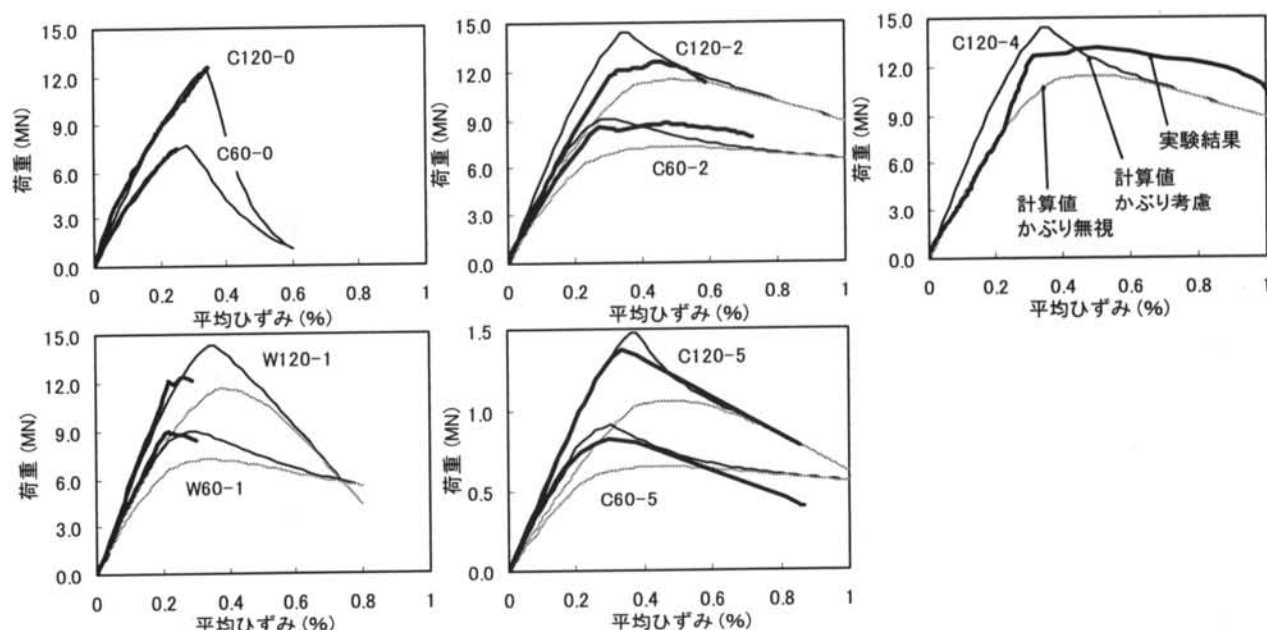


図-6 荷重-平均ひずみ関係

リート設計基準強度は $F_c=60, 120\text{N/mm}^2$ （実験時の $\phi 100 \times 200$ 円柱供試体の圧縮強度はそれぞれ $74, 124\text{N/mm}^2$ ）の 2 種類である。 $F_c=120\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートの調査は 2 章の立体耐震壁試験体と同様で、粗骨材の最大寸法は 20mm である。主筋 (16-D16) には SD390、USD685 を用いている。横補強筋については副帯筋の有無、径および強度 (D10 は SD345、D6 は USD685 と SBPD1275 の 2 種類) をパラメータとしている。幅止筋には 180° フックおよびヘッド付の 2 種類を用いている。断面が $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の試験体は立体耐震壁試験体の要素試験として行ったものである。

試験体が破壊に至るまで単調に圧縮力を作用させた。試験区間（高さ 700mm ）の長さ変化を変位計で測定し、平均ひずみを求めた。

3.2 実験結果

図-5 に示すように普通強度コンクリートの円柱圧

縮強度は概ね直径の 10 乗根に反比例して低下することが知られているが、本実験および文献 7) のような超高強度コンクリートではさらに寸法効果による強度低下が大きいことがわかる。C120-0 と同じものから採取した $\phi 100 \times 200$ コア供試体の圧縮強度は 120N/mm^2 と現場封緘養生供試体と同等であり、これは養生方法や温度履歴の影響ではないと言える。そこで寸法効果による圧縮強度低下率を式(2)のように定義する。

$$k_d = (d/100)^\alpha \quad \alpha = -0.08 - \sigma_B/2000 \quad \text{---(2)}$$

ここで $d(\text{mm})$ は断面積が等価な円柱の直径であり、 $\sigma_B(\text{N/mm}^2)$ は $\phi 100 \times 200$ 円柱供試体の圧縮強度である。図-5 に示すように $\alpha = -0.1$ で一定とした場合よりも式(2)を用いたほうが実験結果を良く表している。

図-6 に荷重と平均ひずみの関係の代表例を示す。拘束コンクリートの応力度-ひずみ関係に孫・崎野らの式⁹⁾、無筋コンクリートに Fafitis 式¹⁰⁾（いずれも式(2)によって寸法効果を考慮）、鉄筋に材料試験結果を用いて計算した結果を併せて示している。鉄筋コンク

リート試験体では理想的な均一ひずみとはならず、平均ひずみ 0.2%程度から局部的にかぶりコンクリートを圧壊した。したがって実験結果はかぶりコンクリートを考慮した場合と無視した場合のほぼ中間となっているが、概ね本計算方法で評価できるものと考えられる。W シリーズの試験体ではかぶりコンクリートの剥落と同時に、直接横補強筋のかかっている主筋が座屈して急激に耐力が低下したため、幅止筋の効果や形状による差異は認められなかった。

§ 4. 断面解析

4.1 立体耐震壁実験結果の評価

2章の立体耐震壁実験の曲げ耐力を、平面保持を仮定した断面解析によって求める(表-2)。試験体断面を加力方向に200要素に分割し、さらにそれぞれの要素を横筋(U字型筋)および幅止筋(フープ)による

拘束コンクリートと無拘束コンクリートに分割した。3章の検討結果を踏まえ、拘束コンクリートの応力度-ひずみ関係には孫・崎野らの式を、無拘束コンクリートにはFafitis式を用いた。立体耐震壁試験体の壁厚は100mmであるため、寸法効果は考慮しない。

壁脚曲げモーメントと曲率の関係を図-7に、曲げ圧縮破壊時の壁脚断面ひずみ分布を図-8に示す。実験結果の曲率は壁脚部に取り付けた変位計から求めた。C-90、L-45の曲げ耐力および曲げ圧縮破壊時曲率(▽は実験結果、▼は解析結果)については、実験結果と解析結果はほぼ一致している。C-45の曲げ耐力については、解析結果は実験結果を若干過大評価している。壁脚断面のひずみ分布を見ると、C-90、L-45については実験結果と解析結果がほぼ一致している。C-45については圧縮縁と引張縁ではひずみが一致しているが、中間部では実験結果のひずみが小さく、平面保持は成立していないようである。試験体の面外変形を拘束しているため、面外に曲げモーメントが作用しているこ

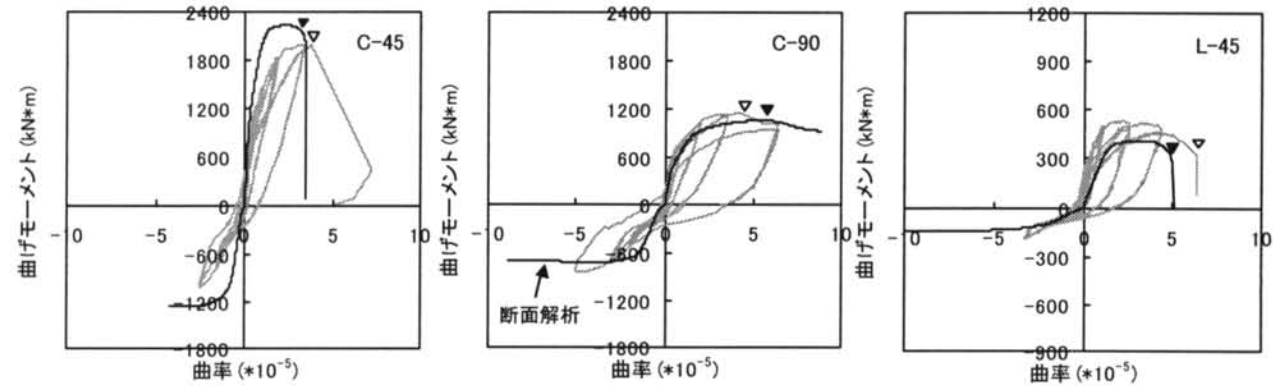


図-7 壁脚曲げモーメントー曲率関係 (実験結果と解析結果の比較、▽▼は曲げ圧縮破壊時)

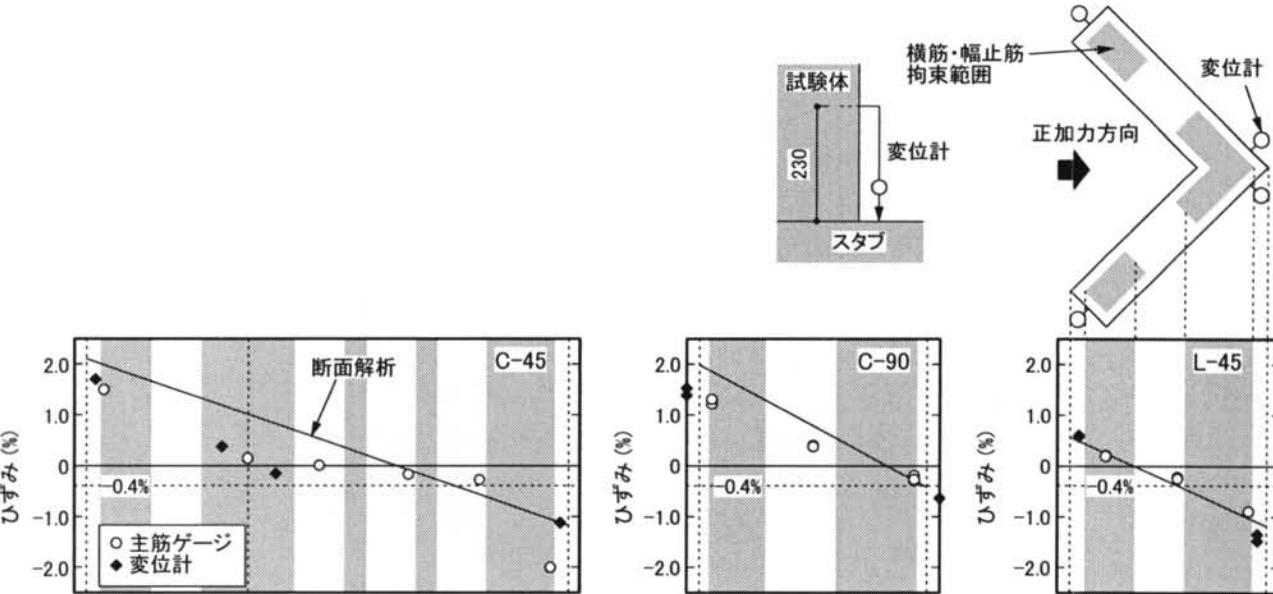


図-8 曲げ圧縮破壊時の壁脚断面ひずみ分布 (実験結果と解析結果の比較)

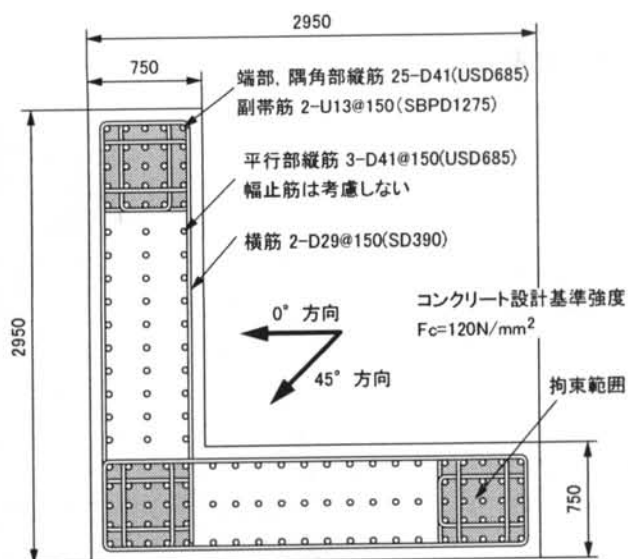


図-9 断面解析対象モデル

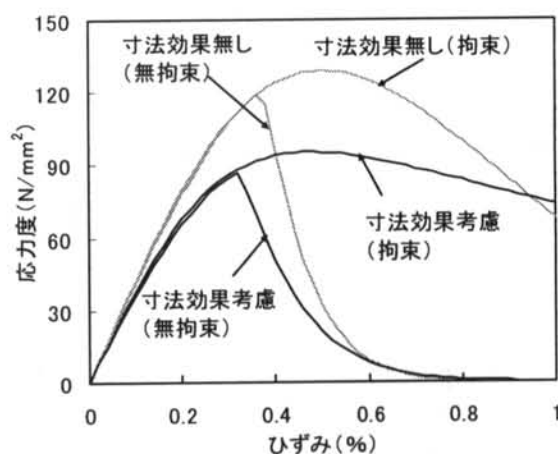


図-10 解析に用いた応力度－ひずみ関係

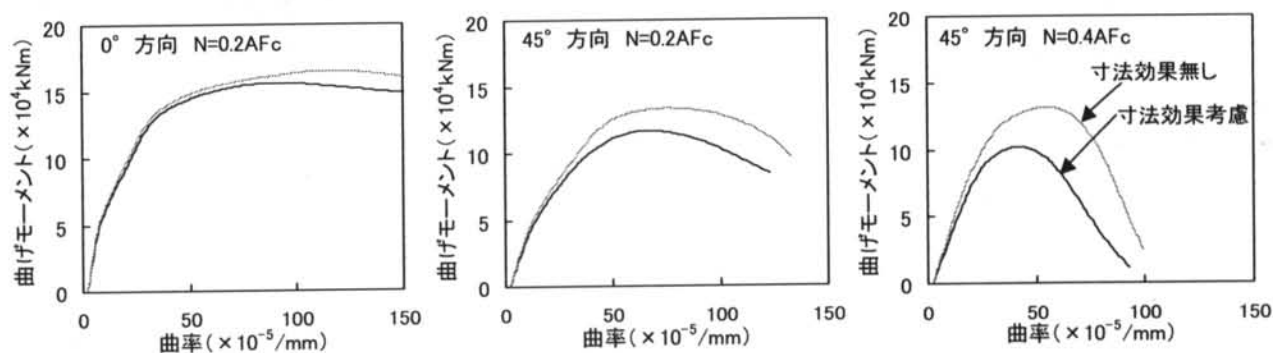


図-11 実大モデルの断面解析結果

とが原因として考えられる。いずれの試験体も曲げ圧縮破壊時に、無拘束コンクリートの圧縮ひずみが約0.4%に達していることがわかる。このことは断面解析でも良く表されている。C-90では中立軸が圧縮縁に近く、かぶりコンクリートの占める割合が大きいため、かぶりコンクリートが圧壊した時点で耐力が緩やかに低下している。

4.2 実大モデルの評価

次に実建物の低層部分を模擬した図-9のモデルを用いて、断面解析を行う。拘束コンクリートの応力度－ひずみ関係に孫・崎野らの式、無筋コンクリートにFafitis式を用い、式(2)による寸法効果を考慮した場合と考慮しなかった場合の比較検討を行う。圧縮部の寸法としては壁厚である750mmを用いた。実際には曲率が存在するため、圧縮部の寸法として壁厚全部をとるのは安全側の仮定である。解析ケースは0°方向加力（軸力は0.2AFc、Aは全断面積、Fc=120N/mm²）、45°方向加力（軸力は0.2AFcと0.4AFcの2ケース）である。

図-10に解析に用いた応力度－ひずみ関係を、図-11に解析結果を示す。寸法効果によって圧縮強度は約73%に低下している。0°方向加力の場合、曲げモーメント－曲率関係に寸法効果の影響は顕著には見られない。45°方向加力の場合、寸法効果を考慮すると曲げ耐力は、軸力比0.2では約87%、軸力比0.4では約77%に低下している。

§ 5. まとめ

Fc=120N/mm²の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート立体耐震壁の曲げせん断実験を行い、耐力および変形性能について検討した。その結果、せん断耐力についてはNewRC式で安全側に評価することができた。また、曲げ耐力および曲げ圧縮破壊時の曲率については、横補強筋による拘束の領域を考慮した断面解析によって評価することができた。

立体耐震壁の一部を取り出した試験体を用いて中心圧縮実験を行った結果、Fc=120N/mm²の超高強度コン

クリートの場合、寸法効果による圧縮強度の低下は普通強度コンクリートよりも大きくなるため、コンクリート強度を考慮した寸法効果による圧縮強度低下率を提案した。また、拘束コンクリートの応力度-ひずみ関係は孫・崎野らの式で、無筋コンクリートは Fafitis 式で表すことができた。

立体耐震壁の曲げ耐力および変形性能は、特に斜め方向加力を受ける場合、圧縮部コンクリートの応力度-ひずみ関係に大きく影響を受ける。したがって実建

物の設計においては、圧縮部コンクリートに対する寸法効果および横補強筋による拘束効果を適切に考慮することが重要である。

謝辞

本研究の中心圧縮実験では日本大学理工学部の 30MN 大型構造物試験機を使用させていただきました。末筆ながら関係各位に深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 熊谷仁志, 中澤春生, 塚越英夫, 黒瀬行信: “超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の構造性能”, 清水建設研究報告, 第 74 号, pp.43-53, 2001.10.
- 2) 中澤春生, 熊谷仁志, 塚越英夫, 黒瀬行信: “超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱梁接合部の構造性能”, 清水建設研究報告, 第 74 号, pp.55-63, 2001.10.
- 3) 熊谷仁志, 佐武直紀, 西田朗, 中島秀雄: “RC コアウォールシステムの開発と実証”, 日本建築学会技術報告集, 第 3 号, pp.151-156, 1996.12.
- 4) 丸田誠: “鉄筋コンクリート造立体耐震壁の地震時弾塑性性状に関する研究”, 千葉大学学位論文, 2001.1.
- 5) 建設省総合技術開発プロジェクト: “鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発/平成 4 年度構造性能分科会報告書”
- 6) 高木仁之: “高強度鉄筋コンクリート耐震壁のせん断補強筋の補強限界に関する研究”, コンクリート工学論文集, Vol.12-2, pp.13-26, 2001.5.
- 7) 香田伸次ほか: “中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する実験研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.C, pp.751-752, 1989.10.
- 8) R. F. Blanks and C. C. Mcnamara: “Mass Concrete Tests in Large Cylinders”, Journal of ACI, pp.280-303, Sept.-Oct. 1935.
- 9) 孫玉平・崎野健治: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の靱性改善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.15-2, pp.719-724, 1993.
- 10) A. Fafitis and S. P. Shah: “Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns”, ACI SP-87, pp.213-232, 1985.