

# 論文 鉄筋コンクリート造実大壁フレーム構造の変形集中性状の検討

真田 靖士\*1・壁谷澤 寿海\*2

**要旨** : 実大鉄筋コンクリート造建物の3次元震動破壊実験で用いられる6層壁フレーム構造を対象に非線形解析を行った。本研究では、耐震壁のせん断軟化性状が建物の終局域の応答性状に与える影響、とくに耐震壁の曲げ降伏後のせん断軟化に起因する下層階への変形集中性状に着目して検討した。その結果、震動実験試験体が終局域で下層に変形集中することが解析的に予測された。また、耐震壁のせん断軟化は、コンクリートの2軸構成則と耐震壁内の不均一な応力負担に起因する現象であることを確認した。

**キーワード** : RC, 層崩壊, 耐震壁, せん断軟化, 予備解析, 2軸構成則, 応力分布

## 1. はじめに

文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の下、防災科学技術研究所、兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）における「実大6層鉄筋コンクリート（以下、RC）建物の振動台実験」の計画、準備が2006年1月の実施に向けて進められている<sup>1)</sup>。本論文では、上記プロジェクトの一環として実施した予備解析について報告するとともに、解析結果から得られた知見について論ずる。RC耐震壁のせん断軟化性状が壁フレーム構造の終局域の応答性状に与える影響、とくに耐震壁の曲げ降伏後のせん断軟化に起因する下層階への変形集中に着目して検討した。

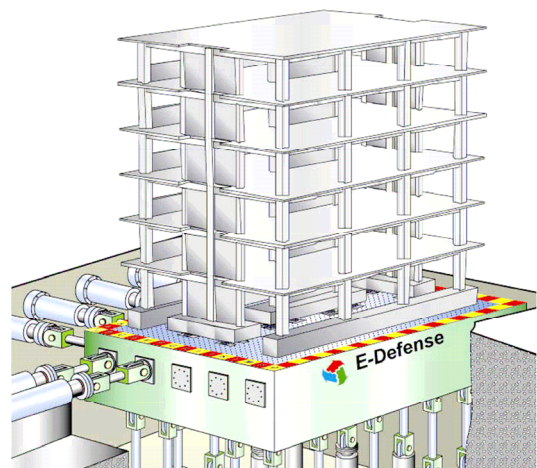
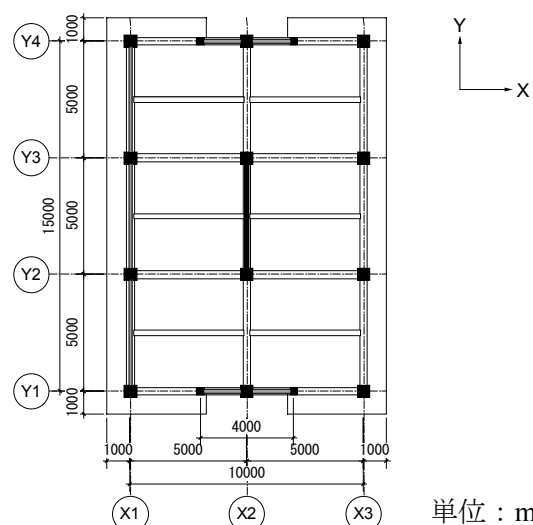


図-1 外観図

## 2. 解析対象建物

本研究の解析対象建物は、実大RC建物の3次元震動破壊実験<sup>1)</sup>で用いられる6層壁フレーム構造である。図-1～3に建物の外観図と基準階伏図および各構面の立面図をそれぞれ示す。本試験体は、1)X2構面に連層耐震壁を有する、2)X1構面にのみ腰壁を有するためY方向に対して偏心を有する、3)Y1, Y4構面に袖壁を有するため比較的大きな捩れ剛性を有する、4)一部の基礎下に荷重計測用の多軸ロードセルを有する、



単位 : mm

図-2 基準階伏図

\*1 東京大学 地震研究所助手 博(工) (正会員)

\*2 東京大学 地震研究所教授 工博 (正会員)

などの特徴がある。上部構造重量は 1 層あたり 1.23MNである。表-1 に鉛直部材の断面詳細を示す。設計時のコンクリート強度は  $18\text{N/mm}^2$ ，鉄筋強度はD19 以上が  $345\text{N/mm}^2$ ，D19 未満が  $295\text{N/mm}^2$ である（ただし，下記解析では実強度を想定し，コンクリート  $24\text{N/mm}^2$ ，D19 以上の鉄筋  $380\text{N/mm}^2$ ，D19 未満  $365\text{N/mm}^2$ と仮定した）。

表-1 柱，耐震壁の断面詳細

柱		耐震壁	
B×D	500×500	厚さ	150
主筋	8-D19	縦筋	D10@300double
補強筋	D10@100	横筋	D10@300double

単位：mm

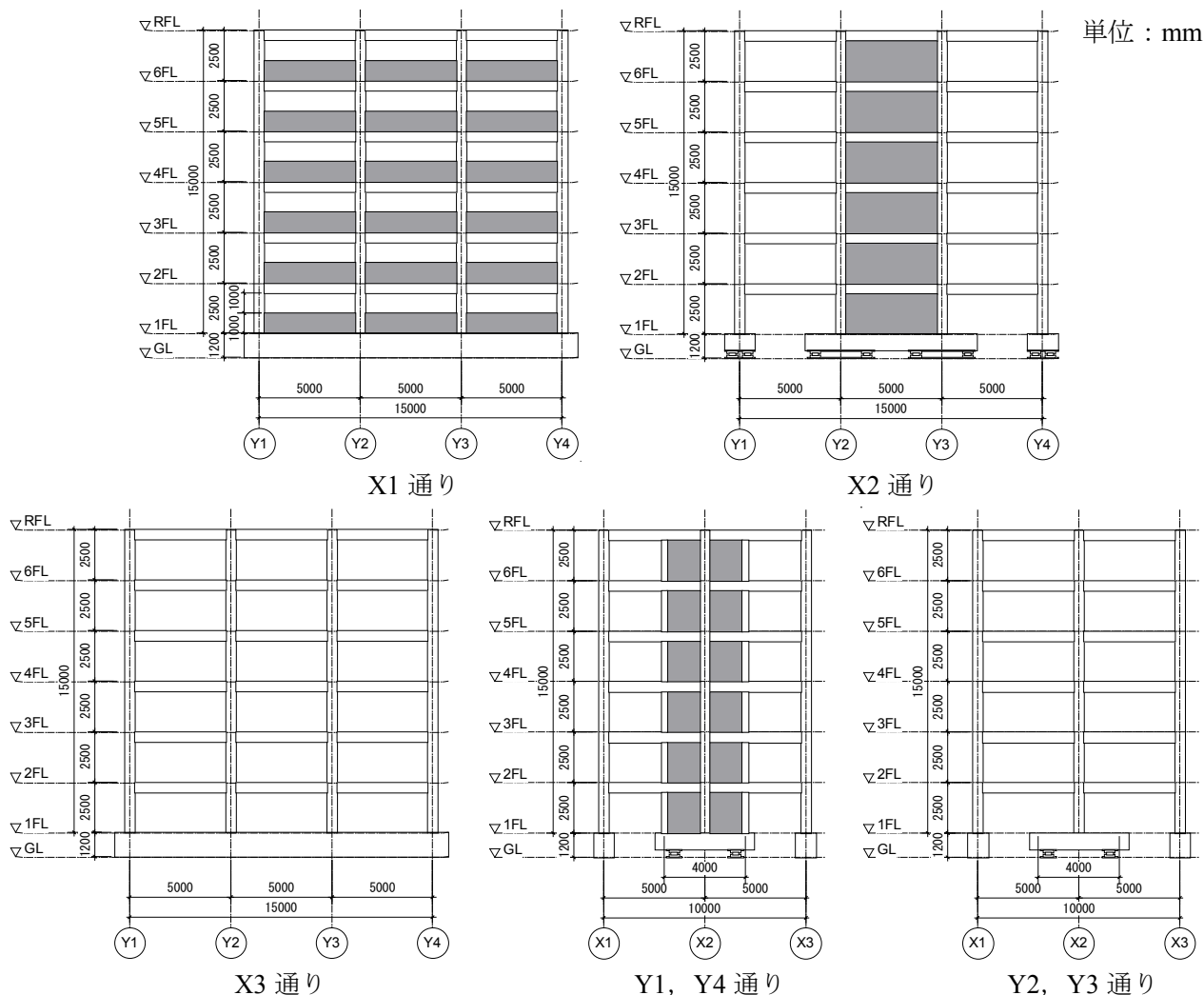


図-3 立面図

### 3. 解析方法

#### 3.1 柱のモデル化

柱は，曲げと軸力の相互作用を考慮するため，ファイバーモデルによりモデル化した。図-4 にモデル化の詳細を示す。曲げおよび軸方向変形を算定するための材軸方向の柔性分布は部材端部と中央を線形に結ぶ分布を仮定した。危険断面を 9 つのコンクリート要素と 8 つの鉄筋要

素（配筋位置に配置）に置換し，各材料の応力度-歪度関係を評価した。図-5，6 にコンクリートと鉄筋の復元力特性モデルを示す。せん断変形は弾性変形のみ考慮した。本モデルの妥当性は文献 2)を参照されたい。また，図-2，3 中 X1 構面の腰壁は柱の下部に腰壁高さまで剛域を設けることで考慮し，Y1，Y4 構面の袖壁は後述の梁同様，材端曲げ塑性バネモデルに置換した。

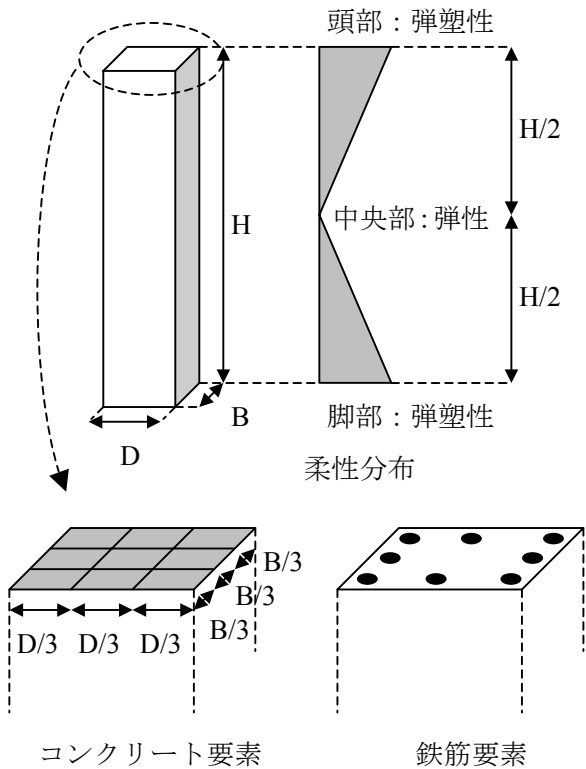
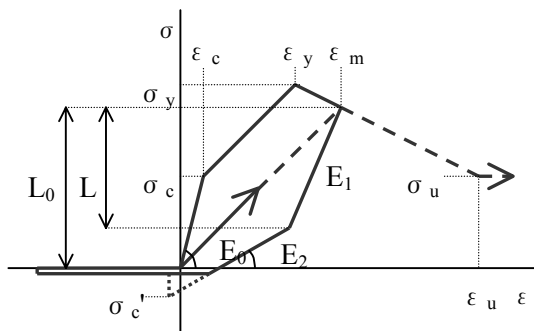
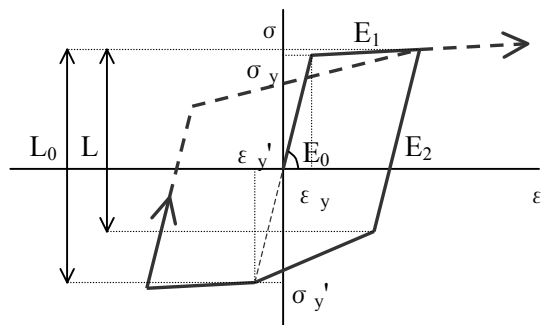


図-4 柱のモデル化



$$L = 3/4 \times L_0, E_1 = E_0 \times (\epsilon_y / \epsilon_m)^{1/2}, E_2 = E_1 / 4$$

図-5 コンクリートの復元力特性モデル



$$L = 0.75 \times L_0, E_1 = 0.01 \times E_0, E_2 = E_0$$

図-6 鉄筋の復元力特性モデル

### 3.2 梁のモデル化

梁は材端曲げ塑性バネモデルに置換した。用いた復元力特性モデルはDegrading Trilinearモデルである。梁の曲げ剛性、曲げ耐力の算定では、スラブの協力幅を  $0.1 \times$  スパン長さとして仮定し<sup>3)</sup>、その影響を考慮した。せん断変形と軸方向変形は弾性変形のみ考慮した。

### 3.3 耐震壁, スラブのモデル化

耐震壁は文献 4)で提案された 4 節点アイソパラメトリック要素モデルを用いてモデル化した。図-7に示すように、本モデルは、壁パネルをモデル化した 1 つの平面要素と、側柱をモデル化した 2 つの鉛直線分要素を、上下の梁をモデル化した水平線分要素により並列結合することで構成される。水平線分要素は軸方向剛性のみを考慮し、曲げに対しては剛である。平面要素内で材料の応力度-歪度関係を評価するガウス積分点は同図中に示す通りである。

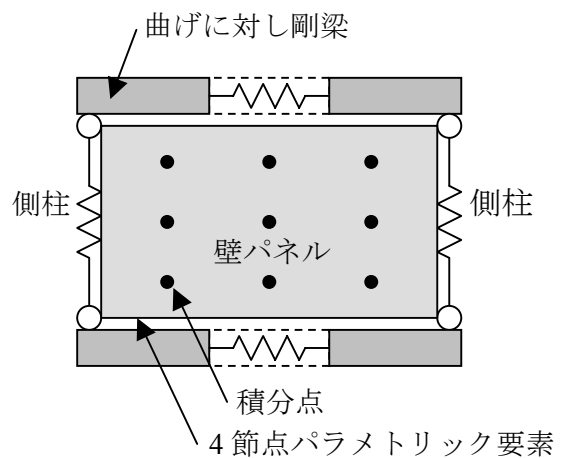


図-7 耐震壁のモデル化

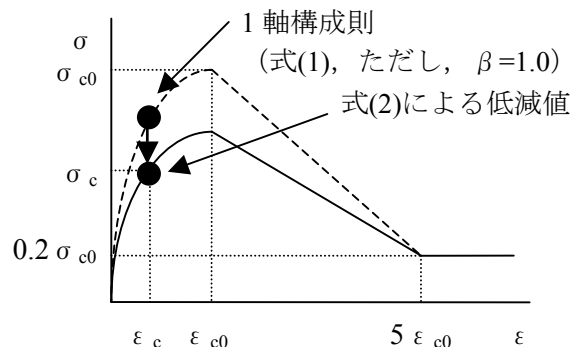


図-8 2 方向応力下でのコンクリートモデル

図-8 に平面要素内で用いたコンクリートの応力度-歪度関係を示す。原点から圧縮強度までのスケルトンカーブを式(1)によりモデル化し、また、平面要素内では 2 方向応力状態となることを考慮し、コンクリートの 1 軸圧縮強度を式(2)により低減した<sup>5)</sup>。本モデルの詳細や妥当性については文献 4)を参照されたい。

$$\sigma_c = \beta \sigma_{c0} \left\{ 2(\varepsilon_c / \varepsilon_{c0}) - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c0})^2 \right\} \quad (1)$$

$$\beta = 1.0 / \{ 0.8 - 0.34(\varepsilon_t / \varepsilon_{c0}) \} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_c$  : 圧縮強度、 $\beta$  : 圧縮強度の低減係数、 $\sigma_{c0}$  : 1 軸圧縮強度、 $\varepsilon_c$  : 圧縮歪度、 $\varepsilon_{c0}$  : 圧縮強度時歪度、 $\varepsilon_t$  : 直交方向引張歪度である。

一方、スラブは耐震壁モデルの壁パネル部分と同様にモデル化した。

### 3.4 荷重方法

本論文では RC 耐震壁の終局挙動が建物の応答に与える影響を検討することを目的とするため、建物 Y 方向 (図-2, 3 の Y1⇒Y4 方向) に荷重した結果のみを掲載する。荷重方法は静的漸増荷重である。建物高さ方向の外力分布には、建物の塑性化に伴うその変化を想定して、逆三角形と等分布の 2 通りを設定した。各層に作用する水平外力は当該層各節点到支配床面積に比例させて分配した。建物の重量も同様に各節点到に分配し、鉛直部材の初期軸力として考慮した。

## 4. 解析結果

### 4.1 耐震性能の推定

実大 RC 建物 3 次元震動破壊実験の試験体の耐震性能を推定した結果を示す。図-9, 10 に解析より得られた荷重-変形関係および高さ方向の変形分布の推移を示す。逆三角形分布、等分布いずれの外力分布下においても、試験体は耐震壁脚部の曲げ降伏とともに全体降伏機構を形成した。機構形成後も変形角およそ 1/50 までは曲げ変形が卓越する挙動を示したが、その後、

下層に変形が集中し始めた。その際、等分布外力下では耐力低下も生じている。変形集中は 1 層あるいは 2 層で生じたが、層間変形は 2 層で最も大きくなった。これは後述する耐震壁への入力せん断力の大きさに起因するものと考えられる。

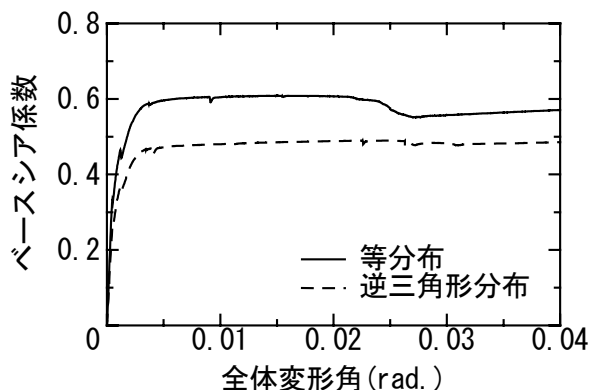


図-9 試験体の荷重-変形関係

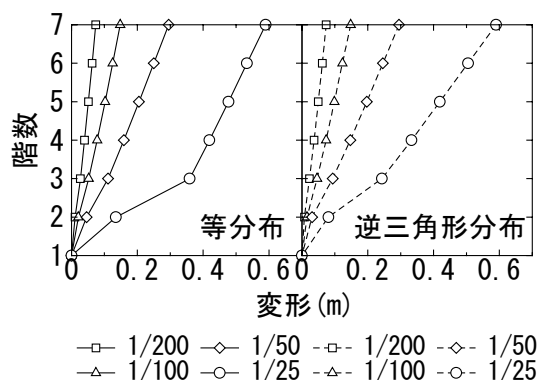


図-10 試験体高さ方向の変形分布の推移

図-11 では 1 階柱および 1, 2 階耐震壁のせん断力-全体変形角関係を試験体への全入力 (図-9) と比較して示す。同図では等分布荷重の場合の結果のみを示したが、逆三角形分布の場合も同様の傾向である。1 階のせん断力分布に着目すると、本試験体は X1 構面に短柱を有するため柱の負担せん断力が曲げ降伏時でおおよそ 60%程度となった。また、1, 2 階耐震壁のせん断力分布では、全体変形角約 1/50 まで 2 階耐震壁への入力が 1 階耐震壁を大きく上回ることが確認できる。2 階耐震壁は変形角 1/50 を越えた付近で大きく軟化しており、これが 2 層への変形集中を引き起こした原因と判断される。

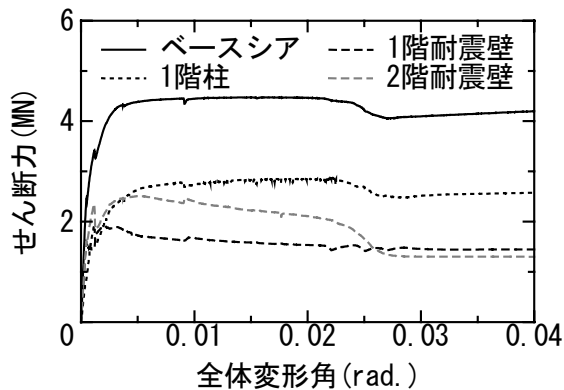


図-11 下層柱，耐震壁のせん断力分布

続いて，1階柱の内，最も大きなせん断力を記録したX1-Y4柱の荷重-変形関係を図-12に示す。同図には文献6)によるせん断耐力を併せて示している。本解析では，柱はせん断に対して弾性を仮定したが，部材角1/100程度で入力せん断力が耐力の計算値を上回ることが確認できる。本稿では掲載を割愛したが，1階の他の短柱についても，せん断力レベルには違いがあるものの，同様の結果が得られた。従って，実際には，建物が耐力に達し大きく塑性化する程度の入力に対し，1階短柱はせん断破壊すると考えるのが妥当であろう。1階短柱のせん断破壊は1階の層剛性を大きく低下させることは明らかであることから，本解析では2層への変形集中が最も大きくなる結果が得られたものの(図-10)，実際には1層で最も大きくなる可能性は十分に考えられる。

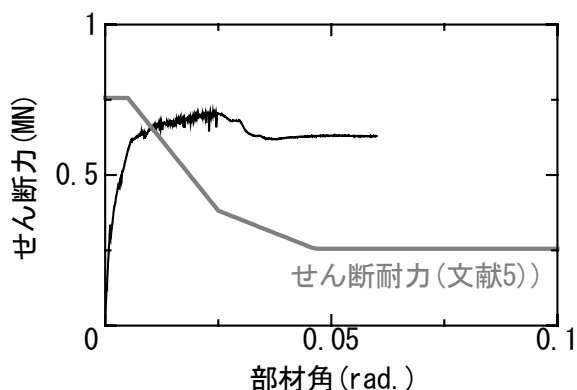


図-12 1階X1-Y4柱のせん断力-部材角関係

#### 4.2 耐震壁のせん断軟化に関する考察

上記の解析結果に見られた耐震壁のせん断軟化性状について解析的な考察を加える。筆者らが文献7)で既に報告したように，こうした耐震壁の劣化現象は2軸応力下におけるコンクリートの構成則の影響を大きく受けていると考えられる。これを検証するため，コンクリートの2軸構成則(式(2))を考慮しない場合の解析を別途行い，前述の解析結果と比較した。図-13には等分布外力下における試験体高さ方向の層間変形角分布の推移を示す。

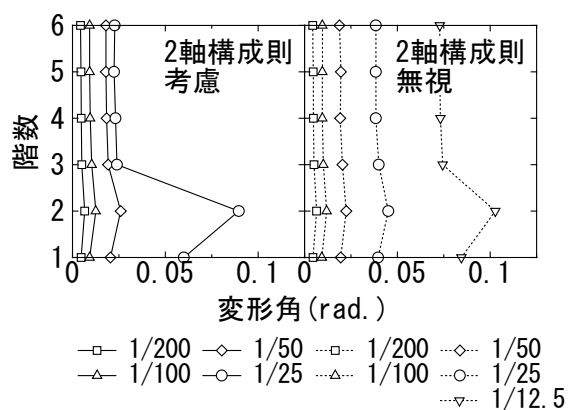


図-13 層間変形角分布の比較

試験体全体変形角1/50までの分布形状は両解析結果がほぼ対応したが1/25では2軸構成則を考慮した解析のみ2層に大きく変形集中したことから，前述の考察が裏付けられたことがわかる。しかし，一方で，2軸構成則を考慮しない解析についても，より変形が大きい領域では2層に変形が集中する結果が得られた。すなわち，耐震壁の劣化現象はコンクリートの2軸構成則の影響を大きく受けるものの，2軸構成則のみに支配される現象ではないことを意味している。図-14には2軸構成則を考慮しない解析において，2階耐震壁のパネル要素内のコンクリートの破壊過程(コンクリートの応力度-歪度関係が評価される各ガウス積分点においてコンクリートが圧縮強度に達した順)を示す。同図より水平力を受ける耐震壁の応力分布は平面，立面的に均一ではなく，圧縮側ほど早期に損傷を受け

る（応力が集中する）傾向があることが確認できる。耐震壁への入力せん断力は曲げ降伏によりほぼ上限に達しているが、曲げヒンジの回転により断面の中立軸が圧縮側にシフトすると同時に、せん断応力度、圧縮応力度が圧縮域に集中した結果、圧縮側コンクリートがその強度に達して耐震壁の軟化が生じたものと考えられる。以上より、耐震壁の劣化現象にはコンクリートの2軸構成則に加え、局所的な応力集中も影響することが解析的に示されたが、こうした応力集中現象は、筆者らが実施した耐震壁の平面的な力の分布に着目した実験結果<sup>8)</sup>とも整合する。

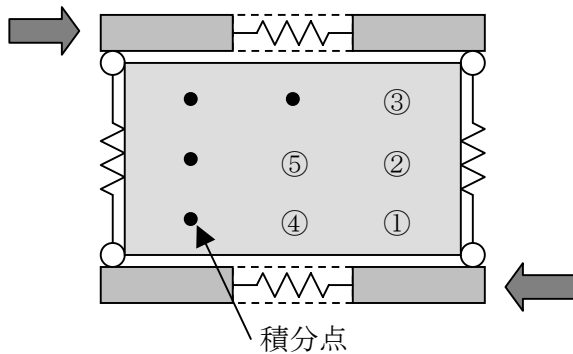


図-14 壁パネル内のコンクリートの破壊過程

## 5. まとめ

本論文では、実大 RC 建物の3次元震動破壊実験で用いられる試験体を対象に予備解析を実施した結果を報告するとともに、RC耐震壁のせん断軟化性状について解析的に検討した。得られた結果は下記の通りである。

- (1) 震動実験試験体は耐震壁脚部の曲げ降伏とともに全体降伏機構を形成し全体変形角1/50まで曲げ卓越型の挙動を示した。しかし、その後、下層に変形集中することを確認した。
- (2) 下層への変形集中は連層耐震壁脚部のせん断軟化に起因し、その影響は2層で最も大きくなった。本解析では1階短柱のせん断変形を弾性と仮定したが、解析結果による入力せん断力は耐力を大幅に上回った。従って、実際には1層の剛性が大きく低下することが予想され、1層に変形集中する可能性を指摘できる。

- (3) コンクリートの2軸構成則の有無をパラメータとした解析から、耐震壁のせん断軟化は、2軸構成則のみではなく、部材内における局所的な応力集中との複合作用により生じる現象であることを確認した。

## 謝辞

本研究では解析対象の詳細資料を防災科学技術研究所、松森泰造研究員をはじめとする関係各位より提供いただいた。また、本稿後半の解析は文部科学省科学研究費補助金（若手研究(A)、課題番号：16686033）の一環として実施した。

## 参考文献

- 1) Kabeyasawa, T., Matsumori, T., Katsumata, H. and Shirai, K.: Design of the Full-Scale Six-Story Reinforced Concrete Wall-Frame Building for Testing at E-Defense, Proceedings of the First NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures, pp. 23-45, July 2005
- 2) 真田靖士, 壁谷澤寿海: 梁の軸方向変形を考慮した鉄筋コンクリート造建物の応答に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.37-42, 1998.6
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999.11
- 4) Chen, S. and Kabeyasawa, T.: Modeling of Reinforced Concrete Shear Wall for Nonlinear Analysis, 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper No. 1596, Jan. 2000
- 5) Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol. 83, No. 2, pp. 219-231, Nov.-Dec. 1986
- 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) 真田靖士, 壁谷澤寿海, 倉本洋: 耐震壁を有するRC造ピロティ構造の動的実験に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.37-42, 2001.6
- 8) 真田靖士, 村瀬正樹, 壁谷澤寿海: 鉄筋コンクリート造耐震壁の局所せん断力・軸力の計測実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.451-456, 2005.6