

# 鉄筋コンクリート造耐震壁の FEM 解析における要素数の影響に関する研究

静的荷重実験      材料構成則      要素分割      1220143      船本 昂郁\*1  
 荷重-変位関係      最大主ひずみ      損傷指標      指導教員      鈴木 卓

## 1. はじめに

複雑な形状の構造体に様々な荷重を受ける場合の挙動および耐力を評価するうえで有限要素法（以下、FEM）は有効な手段である。地震時荷重を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁のFEM解析を行う際のモデル化や材料構成則に関して適用性に富む提案がなされている<sup>1)</sup>。現在、FEM解析を行う際の基準として参考にされている論文においてモデル化等もこの結果を参照して行われている。

文献1)では耐震壁にFEM解析を適用する際の要素数は1層あたり50程度が良いとされている。しかし、当該研究の行われた当時からコンクリートの応力-ひずみ曲線は異なるモデルが構築されている<sup>2)</sup>。また、当該文献では単調荷重による解析が行われているため、地震動を考慮する正負繰り返し荷重の場合に妥当な解析結果を得られない可能性がある。すなわち、既往の研究で提案された耐震壁のモデル化手法について再検討の余地が残されている。

そこで本研究では、文献3)に示された鉄筋コンクリート造耐震壁の静的加力実験を対象として2次元FEM解析を実施し、モデル化の際の要素分割数の影響を検討した。併せて、解析から得られる主ひずみなどから試験体の損傷状況を確認する方法を検討した。

## 2. 静的荷重実験<sup>3)</sup>

検討対象は文献3)に示される耐震壁試験体WASである。図1に試験体形状を、表1に部材断面の詳細を、表2にコンクリートの材料特性を、表3に鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。当該試験体は6層壁フレーム形式建築物を想定し、連層耐震壁の下部2層を取り出した1/3縮尺のモデルである。耐震壁の寸法は、側柱断面が200mm角、梁は1層上部の梁が幅150mm、せいが200mmで2層上部の梁が幅、梁せいともに200mmである。また、壁板は1層が内法高さ800mm、2層は内法高さが600mmである。1層と2層の内法長さは1600mm、壁厚は80mmである。せん断スパン比は1.38である。

荷重装置を図2に示す。試験体は反力フレームにPC鋼棒で固定し、水平力の正負繰り返し荷重は反力壁に取り付けたオイルジャッキ（1,000kN）によって行われた。さらに、反力フレームに鉛直に取り付けた2台のオイルジャッキ（2,000kN）により想定する6層の鉄筋コンクリート造建物の軸力に相当する442kNを試験体に作用させると同時に所定のせん断スパン比となるように付加モーメントを作用させた。実験は、試験体頂部の水平変位（ $D$ ）を計測

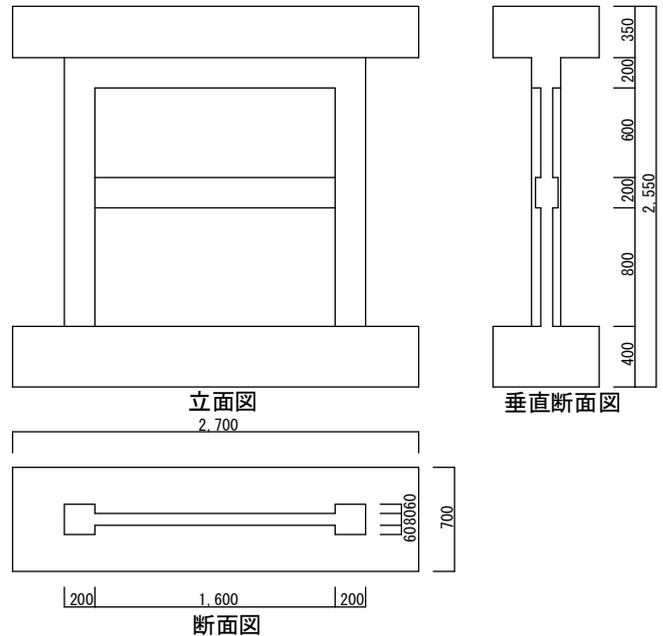


図1 試験体形状

表1 部材断面詳細

		1階	2階
柱	$B \times D$	200 × 200	
	主筋	12-D13 ( $\rho_f=3.8\%$ )	
	帯筋	2-D6@60 ( $\rho_w=0.53\%$ )	2-D6@50 ( $\rho_w=0.64\%$ )
	副帯筋	2-D6@120 ( $\rho_w=0.27\%$ )	-
梁	$B \times D$	150 × 200	200 × 500 (上部スタブ内300mmに埋込)
	主筋	2-D10 ( $\rho_f=0.54\%$ )	
	帯筋	2-D6@100 ( $\rho_w=0.42\%$ )	
壁板	壁厚	80	
	縦筋	D6@100 ( $\rho_s=0.4\%$ )	2-D6@100 ( $\rho_s=0.8\%$ ) (上部400mm)
			D6@100 ( $\rho_s=0.4\%$ )
	横筋	D6@100 ( $\rho_s=0.4\%$ )	

表2 コンクリートの材料特性

試験体	部位	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
試験体 WAS	1層壁部	26.0	25.4
	2層壁部	27.9	26.0

高さ ( $h=2000\text{mm}$ ) で除した部材角  $R=D/h$  で制御した。荷重計画は表4に示すとおりである。

表 3 鉄筋の材料特性

種別・使用部位	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D6 (SD295A)	309	166
D10 (SD295A)	343	180
D13 (SD390)	440	174

表 4 载荷計画

サイクル (回)	1	1	2	2	2	2	2
部材角 (rad)	$\frac{1}{1600}$	$\frac{1}{800}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{133}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{67}$

### 3. FEM解析

#### 3.1 解析モデル

解析は2次元でモデル化した。コンクリートは四面体要素でモデル化し、鉄筋は全て埋め込み鉄筋として定義した。下スタブと耐震壁の浮き上がりを考慮するため離散ひび割れを用いてモデルを作成した。境界条件は下スタブ下端の変位を拘束した。

図3に要素分割を示す。解析変数は要素の分割数である。柱・梁せいの200mmを基準として200mmを1分割から4分割の計4種類で要素一片の長さを設定した。要素分割の大きさから1分割としたモデルをsq200、2分割としたモデルをsq100、3分割としたモデルをsq66、4分割としたモデルをsq50と呼称する。ここで、文献1)で推奨されている要素分割数の下限がsq200と対応している。

コンクリートと鉄筋の材料特性は表2及び表3の値を使用した。コンクリートのヤング係数は以下の式により求めた。この時コンクリートの単位体積 $\gamma=24$ とし、 $\sigma_B$ に関しては表2の値を用いた。

$$E_c = 33500 \left( \frac{\gamma}{24} \right)^2 \left( \frac{\sigma_B}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

また、コンクリートの引張強度は圧縮強度から以下の式を用いて計算した。

$$\sigma_{cr} = 0.33\sqrt{\sigma_B} \quad (2)$$

本解析では実験と同様のせん断スパン比を再現するため、上スタブの上端から想定加力高さまで仮想のスタブを定義し、仮想スタブ上端の中央部分の節点に強制変位を与えた。軸力は上スタブ上端に分布荷重として与えた。解析は実験と同じく強制変位による変位制御で行った。両試験体とも部材角が $R=1/67\text{rad}$ の2サイクル目終了までで解析を終了した。なお、解析には非線形解析ソフト「FINAL」を使用した。

#### 3.2 材料構成則

コンクリートの応力-ひずみ構成モデルは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現した。ひび割

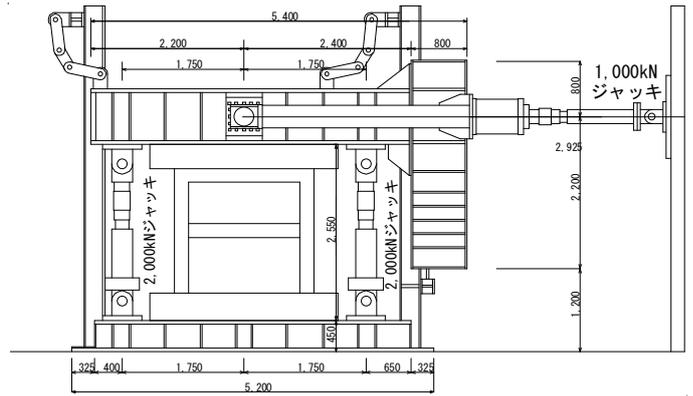


図 2 载荷装置

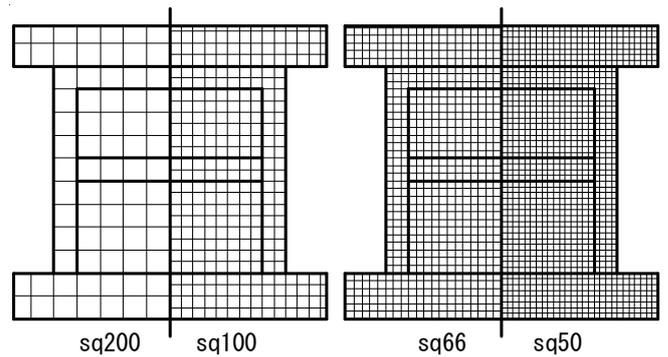


図 3 要素分割

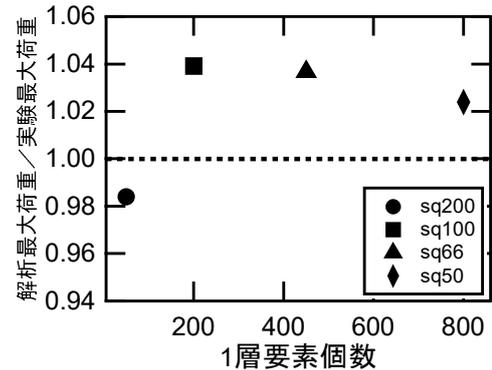


図 4 最大荷重の比と要素数の関係

れは分布ひび割れである。

コンクリートのテンションスティフニング特性は長沼・山口のモデルとし、柱のみ出雲らのモデルで係数を $C=1.0$ とした。コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線と破壊条件は修正Ahmadモデルを用いた。コンクリートの圧縮軟化域特性と強度時ひずみは中村・桧貝モデルを用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性は長沼の提案モデルを用いた。鉄筋の履歴特性モデルは直線モデル、ひずみ硬化則は等方硬化則を用いた。また、仮想スタブ部分のコンクリートは弾性とした。離散ひび割れのせん断特性として、第1せん断方向の変位を0.05、応力を4.9とし、摩擦係数は1.0とした。

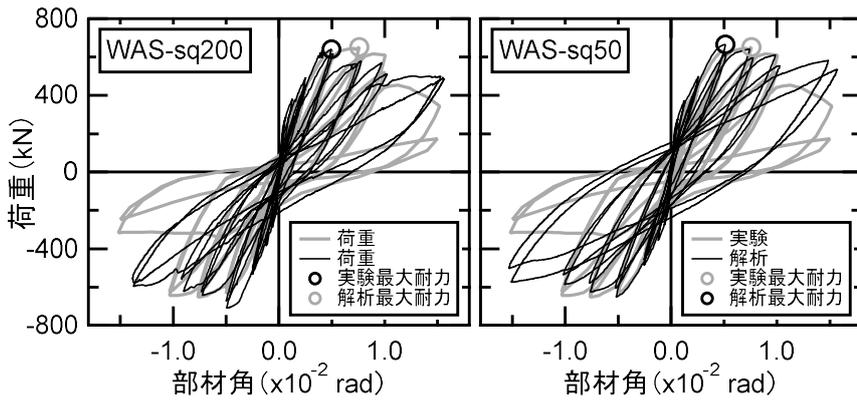


図5 荷重-部材角関係

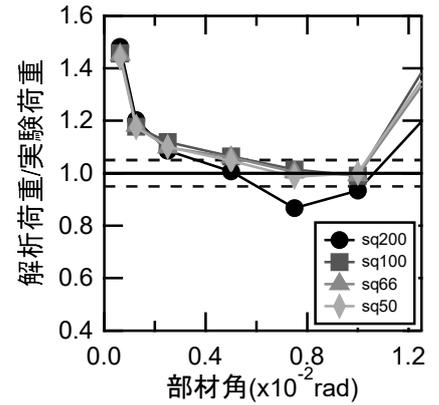


図6 解析荷重の比

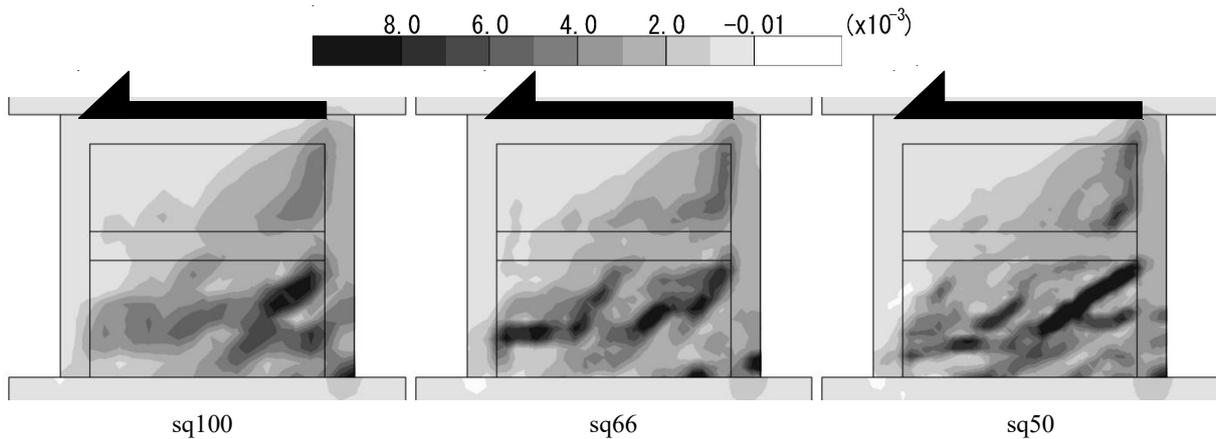


図7 最大耐力時の最大主ひずみ分布

4. 解析結果

4.1 実験結果と解析結果の比較

図4に試験体WASの各モデルの実験最大荷重に対する解析最大荷重の比と1層あたりの要素数の関係を示す。また、sq200とsq50の要素分割モデルを例とした荷重-部材角関係を図5に、全モデルの部材角ごとの実験荷重に対する解析荷重の比を図6に示す。

実験では $R=1/133\text{rad}$ の時に最大耐力に達しているものの、両解析は $R=1/200\text{rad}$ で最大耐力に達している。また、 $R=1/67\text{rad}$ では解析のせん断力は実験のものとは比べて高くなる。これは実験において同部材角でせん断破壊に至ったためである。

sq200では最大耐力付近から計算の安定性が低いに対して、sq50では最終サイクルまで計算が安定している。また、sq200では実験と解析の最大荷重の比の対応は良好である。しかし、解析では $R=1/133\text{rad}$ から耐力低下がみられた。以上のことから、今回の解析では文献1)に示される要素数では不足しているものと判断される。

sq100からsq50は最大荷重の実験値に対する比が大きいものの、これらのモデルの解析の最大荷重に顕著な差は認められなかった。さらに、最大荷重の解析と実験の比はsq100から要素数の増加に伴い1.0に収束する傾向がみられる。このことから、本研究の範囲では、1層の要素数を

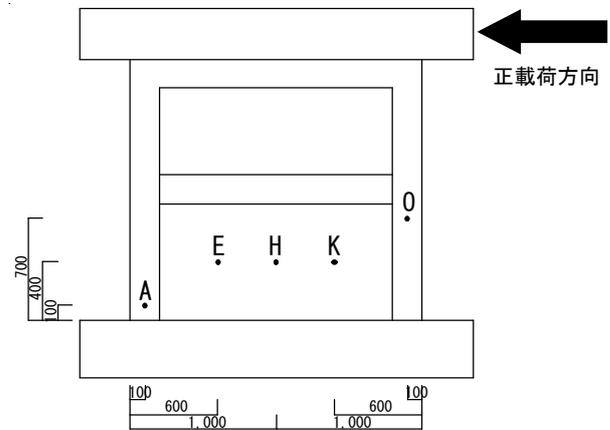


図8 抽出点

200以上とした解析モデルは実験の荷重-部材角関係と対応するものと判断された。

図7にsq100からsq50における最大耐力時の最大主ひずみ分布を示す。各試験体ともに1層の壁板右上隅角部付近および右側柱脚部に高い引張りひずみの発生が確認される。このことから、要素数の多いモデルほどひずみ分布は詳細となるものの、高いひずみの発生する箇所に大きな差は認められない。

4.2 損傷評価

図8に損傷評価を行うひずみの抽出点を示す。損傷評価

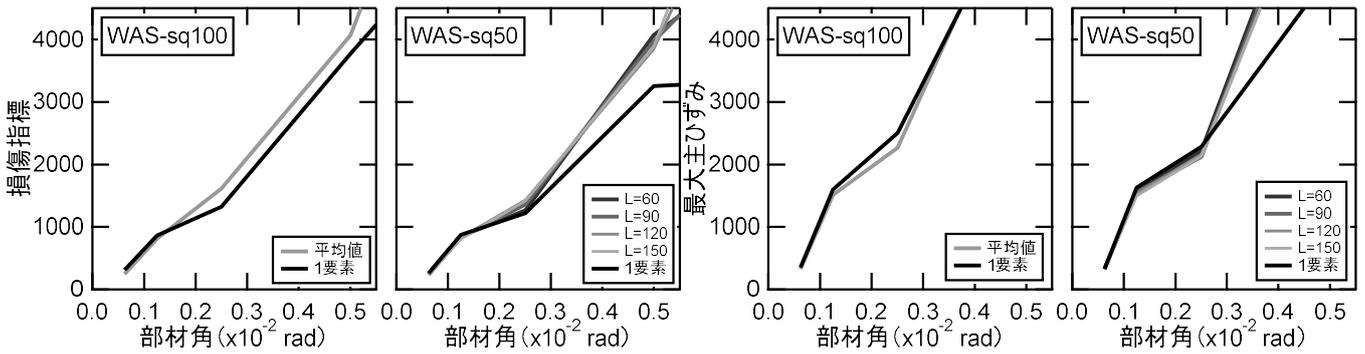


図9 損傷指標および最大主ひずみの推移

は抽出点の周辺の要素における各部材角初回ピーク時のひずみを用いて式(3)に従い算出した<sup>4)</sup>。

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

また、損傷指標および最大主ひずみの各抽出点に対する平均化処理を式(4)を用いて行った。

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i r_i t_i}{\sum r_i t_i} \quad (4)$$

ここで、 $D_i$ ：各要素の損傷指標や最大主ひずみ、 $t_i$ ：要素の厚さ、 $r_i$ ：距離による重みであり式(5)に従い算出、 $l$ ：抽出点から要素の中心までの距離、 $L$ ：平均をとる範囲を決める円の半径であり、本論では60mmから150mmまで30mm間隔の値である。

$$r_i = 1 - l/L \quad (5)$$

式(3)と式(4)より算出した損傷指標および最大主ひずみの最大値の推移を図9に示す。凡例中の1要素は各抽出点に最も近い要素の値である。なお、sq100では、平均を取る円の半径を変えても含まれる要素数に変化がなかった。

損傷指標および最大主ひずみともに1要素の値は平均化処理をしたものと比べて低くなる箇所がみうけられる。これは、図8に示すように抽出点を特定したためである。いずれの推移も1/1600radから1/800radにかけて曲げひび割れによる値の上昇がみられる。しかし、1/800radから1/400radにかけての増加量はそれ以前のものに比べて小さい。その後、1/400radから両モデルともに壁板右上隅角部における壁縦筋の降伏によるせん断ひび割れの拡幅に伴い両指標の急激な増加が認められる。また、sq50において損傷指標と最大主ひずみともに本論において設定した平均化処理の半径の違いによる値の大きな差異は認められなかった。

以上のことから、損傷指標と最大主ひずみの上昇傾向は同じ部材角で確認されるため、本論に示す試験体におけるコンクリートの損傷は両指標から評価できるといえる。平均化処理の半径Lの違いによる値に大きな差は認め

られなかった。sq100とsq50の平均化処理を行った値は同程度であり、本論に示す要素分割モデルによる推移の差は小さいと判断される。

## 5. まとめ

本研究は鉄筋コンクリート造耐震壁の2次元FEM解析を行い、要素分割数の違いが解析の荷重一部材角関係およびひずみの状況に及ぼす影響を検討した。本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 文献1)に示される要素分割数下限値とした解析モデルでは、最大耐力付近から計算の不安定化が認められた。一方で分割数を下限値の倍以上とした解析モデルは実験の荷重一部材角関係を概ね再現した。
- 2) 分割数を下限値の倍以上とした解析モデルでは、最大主ひずみ分布に大きな差異はみられなかった。
- 3) 曲げひび割れの発生およびせん断ひび割れの拡幅に伴う損傷指標と最大主ひずみの増加傾向が確認された。
- 4) 本論に示す範囲では要素分割数および指標平均化半径の違いによる損傷指標と最大主ひずみの推移の傾向に大きな差異は認められなかった。

## 参考文献

- 1) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その2）、日本建築学会構造系論文報告集、第431号、pp.7-16、1992.1
- 2) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp.163-170、1995.8
- 3) 秋田知芳、倉本洋、松井智哉、島崎伸彦：鉄筋コンクリート造耐震壁の静的加力実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.2、2004.7
- 4) 斎藤成彦、牧剛史、土屋智史、渡邊忠朋：土木学会論文E2(材料・コンクリート構造)、Vol.67、No.2、166-180、2011.4