

# 論文 R C 造建物を対象とした圧縮ブレース補強法の耐震性能改善効果に関する解析的研究

中原 浩之<sup>\*1</sup>・北島 幸一郎<sup>\*2</sup>・崎野 健治<sup>\*3</sup>

要旨：著者らが提案している圧縮ブレースによる耐震補強法の効果を定量的に把握するため、既存不適格の3階建てRC造学校建築を模擬した構造モデルを作成し、これに提案した補強法を適用した際の構造特性について静的および動的解析により調べた。補強を施すスパン数と位置をパラメータとして、解析を実行したところ、耐震性能を大幅に改善できる補強計画を得ることが出来た。

キーワード：既存不適格, 学校建築, 全体崩壊機構, 層崩壊

## 1. はじめに

著者らは、文献1)において圧縮抵抗型ブレースを用いた鉄筋コンクリート造架構の耐震補強法を開発し、その力学性能を実験により検証している。本論では、この補強法をRC造建物に適用した際の、補強効果について解析的な検討を行う。解析対象としたのは、既存不適格の3階建てRC造学校校舎を模擬した構造モデルである。九州各県の耐震診断の実施状況を纏めた文献2), 3)によると、2004年までで大分県では約600棟、福岡県・鹿児島県では約400棟の診断が行われている。大分県の診断対象となった物件についての統計調査をした文献4)によると、対象物件のうち最も多いのが3階建ての小学校であった。本研究では、耐震診断の対象となる頻度が最も多い建物を取り上げて、本補強法の具体的な適用法について考察する。

ブレースが圧縮力を負担するとブレースが柱頭に取り付く柱には引張力が導入されることになる。ここで、柱の引張降伏をブレースの座屈に先行させる補強設計を行

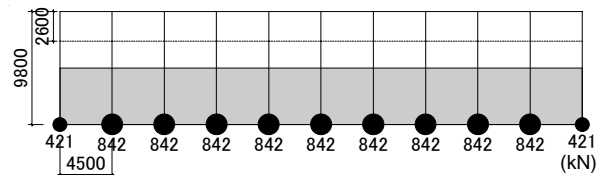


図 - 2 1階軸力図

い、最大耐力以降の変形性能を確保することが、本研究の特徴である。柱の引張降伏を先行させるためには、鉛直および水平荷重時の柱軸力と柱主筋の配筋を考慮する必要があり、補強計画によって建物の力学特性が大きく変化することが予想される。本研究では、6つの建物モデルを用いて耐震補強効果について解析的な検討を行う。

## 2. 解析対象建物モデルの概要

本研究で解析対象とする建物の立面図及び1階平面図を図-1に示す。この建物は3階建ての学校校舎を模擬しており、長辺方向10スパン、短辺方向1スパンとした。1教室あたり桁行2スパン、梁間1スパンを想定したこ

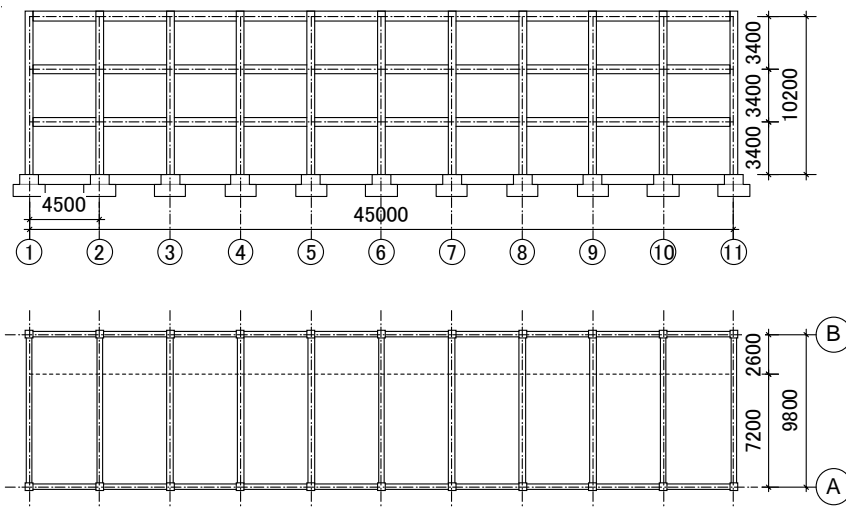


図 - 1 1階平面図, 立面図

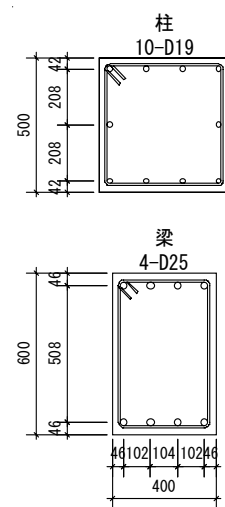


図 - 3 断面詳細図

\*1 九州大学大学院人間環境学研究院 准教授 博士(工学) (正会員)  
 \*2 九州電力土木部原子カグループ 九州大学社会人大学院生 (正会員)  
 \*3 九州大学大学院人間環境学研究院 教授 工博 (正会員)

表 - 1 解析モデル

補強モデル	ブレース本数		
	1層	2層	3層
Model-0	0	0	0
Model-1	2	0	0
Model-2	2	2	0
Model-3	2	2	2
Model-4	2	2	2
Model-5	4	4	4

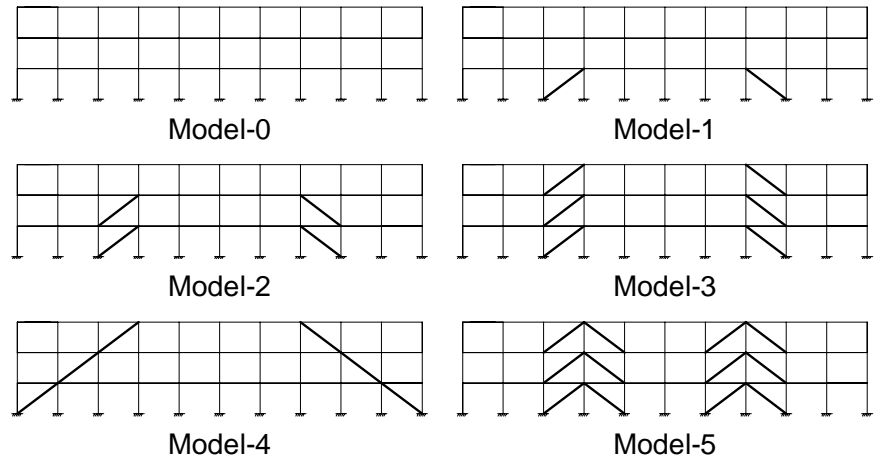


図 - 4 架構モデル

のタイプの平面計画は、耐震診断の統計調査を行った文献4)の研究において最も頻度が多いものに対応する。図 - 2 に 1 階柱の軸力図を示す。この建物モデルの重量は  $13\text{kN/m}^2$  としスラブの支配面積に応じて配分している。本研究では、A 通りについてのみ解析を行う。図 - 3 に柱および梁の断面図を示す。柱は  $500\text{mm} \times 500\text{mm}$  の正方形断面で、梁は、せいを  $600\text{mm}$  で幅を  $400\text{mm}$  とした。柱の配筋は、主筋 10-D19、主筋比  $p_g=1.1\%$  とし、帯筋は  $12 @ 150$  で帯筋比  $p_{wc}=0.3\%$  とした。梁の配筋は、上端筋および下端筋ともにそれぞれ 4-D25 で、引張鉄筋比  $p_t=1.10\%$  とした。柱と梁は各階全て同一の断面とした。鋼材の降伏強度は  $295\text{MPa}$  で、コンクリートの圧縮強度は  $18\text{MPa}$  と仮定した。これらは、1971 年から 1981 年の間に建設された建物を想定して決定した。

1981 年以前に建設された学校建築の震災事例では、柱や壁などの鉛直部材の破壊が先行するケースが多い。これを便宜的に考慮するために、解析モデルでは図 3 の梁主筋の断面積を 2 倍として梁の剛性と耐力を上昇させている。

表 - 1 に本論で検討する建物モデルの一覧を示す。無補強建物に対応する Model-0 を基本モデルとして、表に示すように著者らが提案する圧縮ブレースを各層に配置して、合計 6 つのモデルを作成した。図 - 4 の立面モデルにブレースの配置計画を示す。Model-1 ~ Model-3 は、3 - 4 スパンと 8 - 9 スパンにそれぞれ 1 本のブレースを設置して、これを順次各層に加えてゆくことで補強を行った例である。本研究で提案しているブレースは圧縮のみに作用するため、各層最低 2 本のブレースが必要となる。Model-4 は、Model-3 のブレース配置のみを変更したモデルである。Model-5 は、Model-3 の 2 倍のブレースを設置した場合を示している。なお、ブレースは

$300 \times 300 \times 16$  の STKR490 の角形鋼管に  $70\text{MPa}$  のコンクリートを充填した角形 CFT と同等の軸圧縮剛性を有する無筋コンクリート断面を用いており、ブレースに引張力が作用しない接合部の詳細を模擬している。

本論で対象とした学校建物の震災被害例では柱梁接合部の破壊は少ないことから、この部分を剛体と仮定している。また、基礎については固定条件としており、この部分の考察は行っておらず、今後の課題とした。

### 3. 静的解析

本論での数値解析は、ファイバーモデルで断面の応力状態を表現する手法を用いて梁要素の剛性マトリクスを作成し、これを組み込んだ有限要素法プログラム<sup>5)</sup>を使用する。材料の構成則は、鋼材は完全弾塑性、コンクリートは Popovics モデル<sup>6)</sup>を用いた。

線材要素となる柱と梁には、それぞれ剛域とヒンジ領域を設けている。剛域は図 - 1 の建物モデルにおいて柱梁接合部となる部分に設けた。塑性変形の集中を表現するヒンジ領域は柱では柱せいの半分、梁では梁せいをその領域長さとした。

静的解析では、地震層せん断力の建築物の高さの分布として広く使用されている表 - 2 の  $A_i$  分布に従う外力分布を仮定し、水平力を全柱梁節点に分配して一方向に漸増载荷した。表中の  $W_i$  は  $i$  層の重量で、 $i$  および  $A_i$  については建築基準法施行令を参照されたい。

各層の荷重 - 変形関係を図 - 5 に示す。図の縦軸は、各層の層せん断力を A 通り架構モデルの全重量で除して無次元化した値としている。横軸は、各層の相対変形角である。全層の平均層間変形角が、それぞれ  $0.5\%$ 、 $1.0\%$ 、 $1.5\%$ 、 $2.0\%$  に達した時点での各層の変形を  $\gamma$  や  $\times$  などの印で示している。また、全層の平均層間変形角が  $2\%$  の時の降伏ヒンジの発生状況を図 - 6 に、その時の変形状況を図 - 7 に示す。図 - 6 では、降伏ヒンジの発生点を  $\gamma$  で、柱の引張降伏を矢印で表している。また、

表 - 2  $A_i$  分布

層 $i$	$W_i$ (kN)	$\Sigma W_i$ (kN)	$\alpha_i$	$A_i$
3	2809	2809	0.33	1.35
2	2809	5618	0.67	1.14
1	2809	8428	1.00	1.00

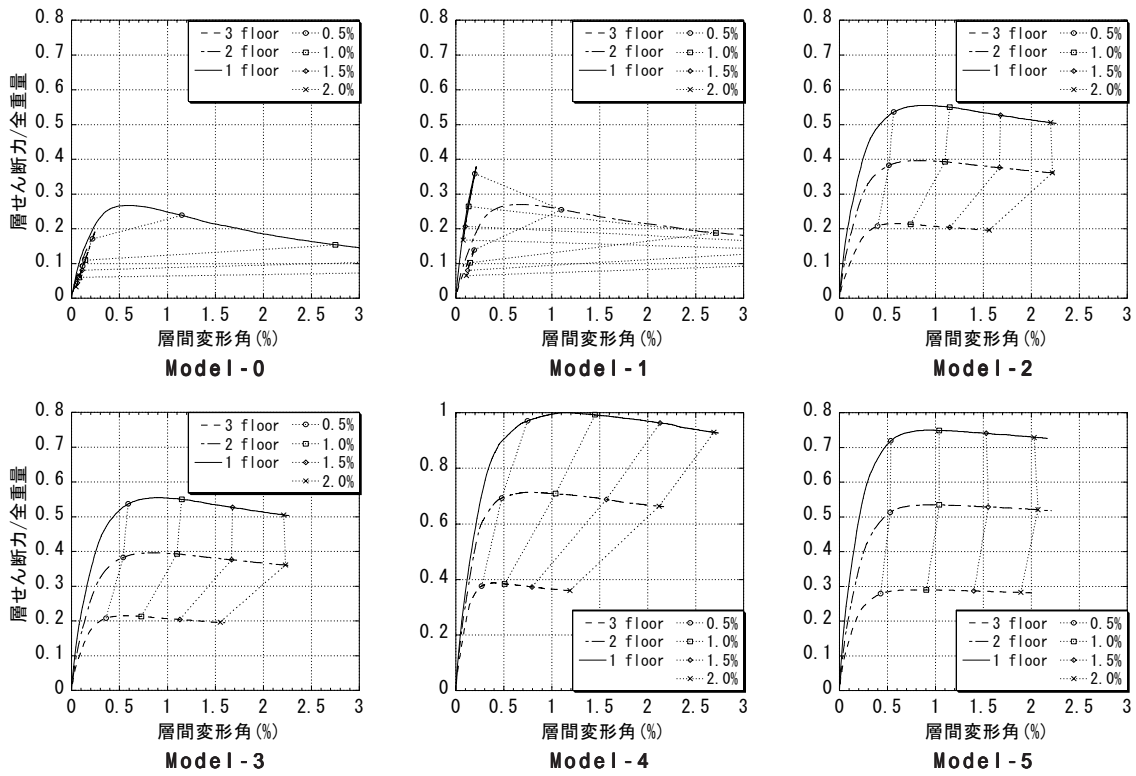


図 - 5 層せん断力 - 層間変形角関係

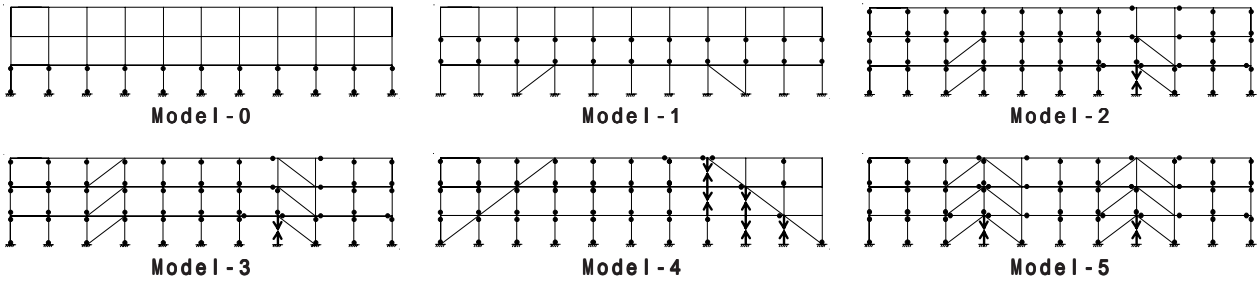


図 - 6 平均層間変形角2%時におけるヒンジ発生状況

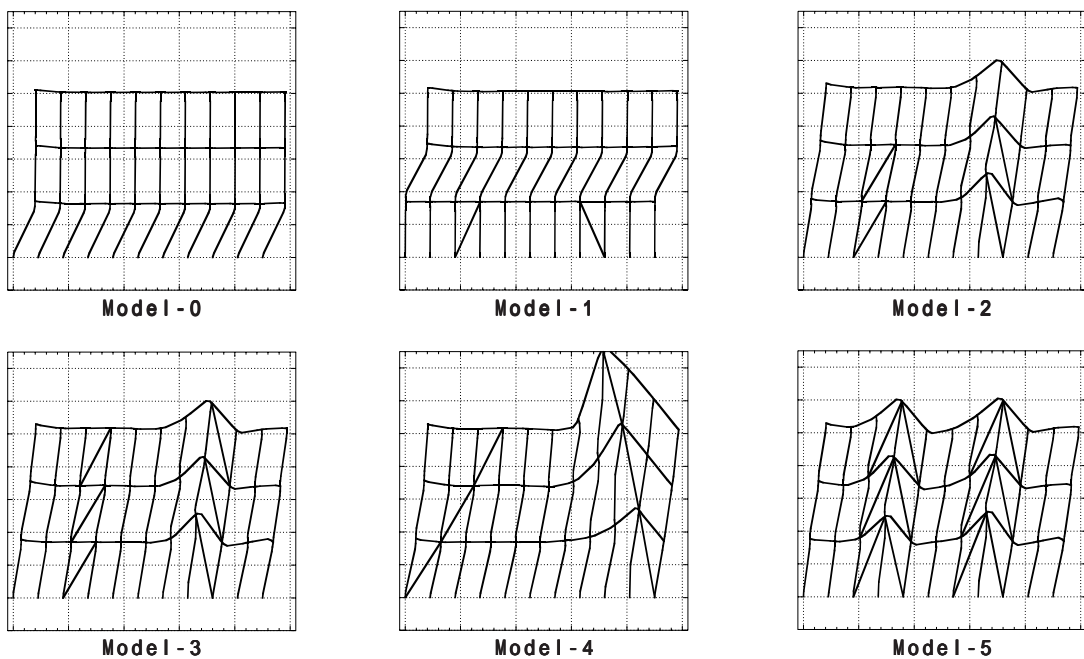


図 - 7 平均層間変形角2%時における変形図

表 - 3 各層の耐力係数  $q_{ui}$  の一覧

補強モデル	$q_{ui}$ ( $q_{ui}/C_{TU}$ )		
	1層	2層	3層
Model-0	0.27 (1.00)	0.25 (0.69)	0.23 (0.45)
Model-1	0.38 (1.41)	0.36 (1.00)	0.33 (0.65)
Model-2	0.56 (2.07)	0.52 (1.44)	0.48 (0.94)
Model-3	0.55 (2.04)	0.52 (1.44)	0.48 (0.94)
Model-4	1.00 (3.70)	0.94 (2.61)	0.86 (1.69)
Model-5	0.75 (2.78)	0.70 (1.94)	0.64 (1.25)
	$C_{TU}$		
Model-0*	0.27	0.36	0.51

図 - 7 は計算された変形を 20 倍して表現している。

図 - 5 のような表現では各層の負担せん断力を単純に比較することが出来ない。そこで表 - 3 に次式で示す  $q_{ui}$  の値を纏めて示す。

$$q_{ui} = \frac{Q_{ui}}{A_i \cdot \sum_{j=1}^3 W_j} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{ui}$  は静的解析で得られた  $i$  層の最大せん断力であり、 $W_j$  は  $j$  層の重量である。 $A_i$  は表 - 2 の値を用いた。

Model-0\* のみは、各層の保有耐力に対応する値で、耐震診断における 2 次診断法の  $C_{TU}$  に相当する<sup>7)</sup>。表には、 $q_{ui}$  の値を  $C_{TU}$  で除した値を括弧内に示している。これらは、補強によって得られる水平耐力の増加分を割合であらわしたのとなっており、耐震診断<sup>7)</sup> に利用できる。

図 - 5 ~ 7 より、Model-0 では、1 層柱の柱頭と柱脚に塑性ヒンジが形成され、想定どおり 1 層部分の層崩壊により水平耐力が決定している。その時の  $q_{ui}$  は 0.27 に留まった。本解析法では、柱のせん断破壊を表現できないので、最大耐力以降の耐力低下はそれほど顕著なものとなっていない。しかしながら、実際の学校建築物では腰壁などの影響で脆性的な鉛直材が数本あることを加味すると、靱性指標  $F$  は 1.0 ~ 1.5 程度となるのが通常で、解析対象建物の構造耐震指標  $I_s$  は 0.6 を下回ると考えられる。また、Model-0 の 2 層と 3 層の  $q_{ui}$  は、Model-0\* の  $C_{TU}$  を下回る。これは、本解析では特定層の破壊が先行すると他の層の保有耐力は発揮されないことを示している。

Model-1 において、1 層の  $q_{ui}$  は  $C_{TU}$  を上回るが、補強を施さない 2 層の  $q_{ui}$  は  $C_{TU}$  に達して、図 - 6 のように 2 層の層崩壊となる。なお、3 層の  $q_{ui}$  は  $C_{TU}$  を下回っている。これらは、上記の特定層破壊と  $q_{ui}$  と  $C_{TU}$  の比の関係に対応している。

1 層のみを補強した Model-1 では 2 層が層崩壊するが、1 層と 2 層のみ補強した Model-2 では、全体降伏型

表 - 4 ブレース断面の設計例

補強モデル	$N_{max}$ (kN)	CFT断面	
		角形鋼管	$F_c$ (MPa)
Model-1	2230	□100 × 100 × 6	50
Model-2	3650	□175 × 175 × 12	50
Model-3	3650	□175 × 175 × 12	50
Model-4	8735	□250 × 250 × 16	90
Model-5	3650	□175 × 175 × 12	50

の破壊モードとなった。Model-2 では、3 層の  $q_{ui}$  が  $C_{TU}$  の値よりも小さいが、これは下の階を補強したために、3 層の崩壊メカニズムが変化して、3 層の保有耐力が低下したためである。

Model-3 は、Model-2 と同様に全体降伏型となった。図 - 6 と図 - 7 に示すとおり、Model-2 と Model-3 はブレースが取り付け 8 通りの柱が引張降伏しており、8 - 9 スパンが回転する破壊形式となっている。これらは、連層耐震壁が挿入された RC フレームと基本的な挙動は同じで、落階を防止しつつ主筋の降伏に伴うエネルギー吸収が期待できる。Model-2 と Model-3 の 1 層の  $q_{ui}$  は Model-0\* の  $C_{TU}$  の 0.27 から 0.56 と 0.55 と上昇し、ブレース補強によって水平耐力はおおよそ 2 倍となった。

Model-4 は、Model-3 と同じ数のブレースで補強したものであるが、1 層の  $q_{ui}$  が 0.55 から 1.0 へ大幅に耐力が増大している。これは、Model-4 が、Model-3 に比してブレースが柱頭に取り付く柱の軸方向力が大きくなることで、柱の引張降伏が遅延され、ブレースに導入される軸力が大きくなるためである。但し、Model-4 は、図 - 7 より分かるように、鉛直方向の変形が過大となる傾向がある。このように、本補強法は、ブレースの配置によって構造特性が大きく変化することが分かる。

Model-5 は、補強ブレース数が最も多いモデルで、Model-4 に比して 1 層の最大耐力が若干小さいものの、最も剛性が高く、鉛直方向の変形が抑えられている。

本解析では、前述の通り 300 × 300 × 16 の STKR490 に 70MPa のコンクリートを充填した角形 CFT と同等の軸圧縮剛性をもつ部材をブレースのモデルとしている。これは、本論の全ての解析においてブレースが圧縮降伏しないために必要な断面であり、実際の適用ではこれよりも断面を小さく出来る可能性がある。本解析においてブレースに作用した最大の軸力  $N_{max}$  とこれを負担できる CFT 断面を纏めたものを表 - 4 に示す。但し、ここではブレースの座屈は考慮しておらず、ブレースの座屈補剛等の詳細については、今後の課題としたい。表から分かるように、Model-2、Model-3、Model-5 では、175 × 175 × 12 の断面で補強できることが分かる。勿論、ブレース断面を変更すると軸剛性が変化するため図 - 5 と同一の荷重 - 変形関係は得られないが、ほぼ同様な傾向となることを別途解析で確認している。

一方, Model-4は他よりも負担軸力が大きく, 図 - 5 の荷重 - 変形関係を得るには  $250 \times 250 \times 16$  の STKR490 と  $F_c=90\text{MPa}$  のコンクリートを使用する必要がある。このように, プレースの配置によって使用するプレースの大きさが変化するので, 図 - 5 と表 - 4 の両方を考慮して実際の補強計画を立てる必要がある。

上記の結果, 建物の靱性に期待できる場合は Model-2 や Model-3 でも層崩壊を防ぐことで, ある程度の補強効

果が得られると考えられる。しかしながら, 脆性部材が支配的な場合は Model-4 や Model-5 を採用して, 1 層と 2 層の大幅な耐力増強を行うことが望ましい。但し, Model-4 では, 他よりも大きな断面が必要となることを留意する必要がある。

本研究で対象とした 6 つのモデル以外にも様々な補強計画が考えられる。経済的な側面も含めた最適な補強計画に関する研究は今後の検討課題とする。

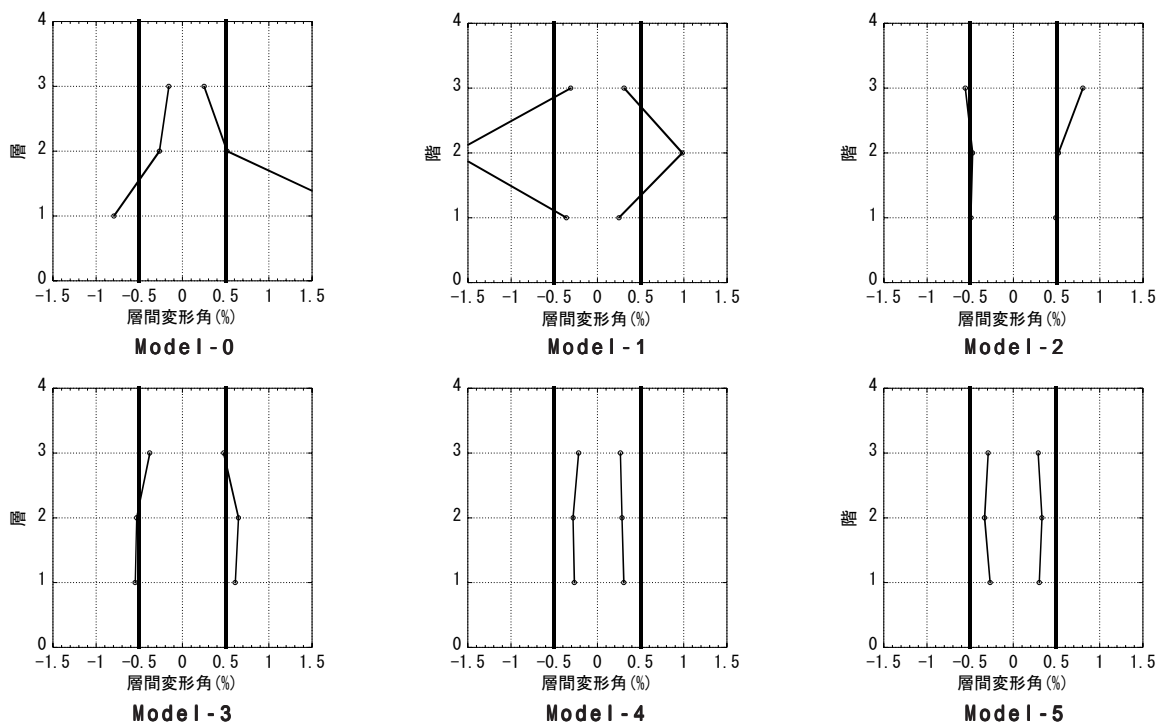


図 - 8 El Centro 波による層間変形角の最大応答値

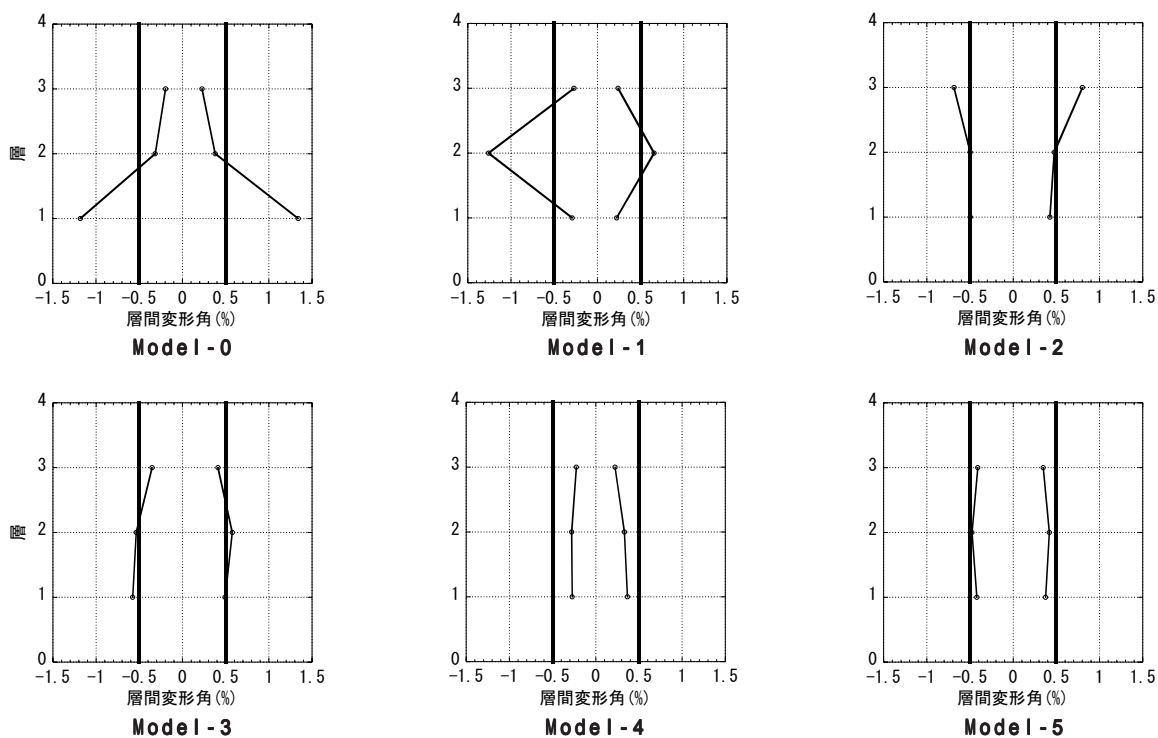


図 - 9 Taft 波による層間変形角の最大応答値

#### 4. 動的解析

解析モデルの地震時の挙動を比較するために、Newmarkの法を用いて時刻歴の動的応答解析を行う。減衰は2%のRayleigh型とする。入力波は、El CentroのNS成分とTaftのNS成分の2波で、これらの最大速度を50kineに増幅して用いた。図-8と図-9にそれぞれの地震動に対する応答結果を示す。図の縦軸は層数で、横軸は層間変形角の最大応答値である。なお、せん断柱の限界変形角を0.5% (=1/200rad)と仮定して図に示し、変形量の目安としている。

静的解析の結果より推察できるように、Model-0は1層の層崩壊、Model-1は2層の層崩壊が危惧される結果となった。表-3において、Model-2とModel-3の3層の $q_{ult}$ は0.48で同じとなっているが、動的解析の場合ではEl Centro波とTaft波の両方でModel-2の3層の最大応答変形角が0.5%を若干上回り、補強対象建物が脆性的な場合は、Model-3を採用するべきと考えられる。Model-4とModel-5を比較すると、El Centro波の場合は、両者とも各層同程度の最大応答変形となったが、Taft波では、Model-5の方がModel-4よりも全体的に変形角が大きい。これは、地震動と建物モデルの周期特性の影響を強く受けたものと考えられる。動的解析の結果は全体的に静的解析の結果を反映したものとなったが、Modelによっては静的解析で説明できない動的性状も得られる結果となった。今後、地震波を増やして解析を行うことで、補強計画の定性的な方針が得られるものと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、著者らが提案している圧縮抵抗型ブレースを建物に適用した際の耐震補強効果を静的および動的解析により調べた。解析対象とした建物は、3階建の既存不適格RC造学校校舎を模擬したもので、これの構造モデルを基本として、5通りの耐震補強計画を施した構造モデルを作成した。合計6つの構造モデルを用いた解析結果より、以下の結論を得た。

- 1) 既存不適格建物を模擬した構造モデルにおいては、1層の水平耐力がベースシア係数で0.27となり、プッシュオーバー解析では1層の層崩壊現象を起こした。
- 2) 上記の構造モデルを提案している圧縮ブレースで1層と2層を補強した建物モデルは、プッシュオーバー解析で全体降伏機構を形成し、1層の水平耐力は、ベースシア係数で0.27から0.56に増加した。
- 3) 建物の全層を補強した構造モデルは、全て全体降伏機構を示し、水平耐力を大幅に増やすことが出来る補強計画を示すことが出来た。

- 4) 上記の補強に必要な部材は、角形CFTブレースを想定するとSTKR490-175×175×12の鋼管に $F_c=50\text{MPa}$ のコンクリートを充填した断面が標準となり、本補強法の施工は比較的簡易なものとなることが示唆された。但し、小径断面を使用した際の座屈防止等については、今後の課題とした。
- 5) El Centro波とTaft波を50kineに増幅した地震動を入力した動的応答解析の結果、無補強および1層のみを補強したモデルは特定層に変形が集中し、最大層間変形角が1.0%以上の応答となった。一方で、全層を補強したモデルは応答変位が各層ほぼ一定となるとともに最大層間変形角もおよそ0.50%以下の応答に留まり、補強によって耐震性能の上昇を定量的に評価することが出来た。

#### 謝辞

本研究の解析は、九州大学4年生の西田裕一君の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 北島幸一郎, 下畠啓志, 中原浩之, 崎野健治: 圧縮抵抗ブレースを用いたRC骨組の耐震補強方法に関する研究(その1)~(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.549-552, 2007.8.
- 2) 日本建築学会九州支部沖縄支部, 日本建築学会九州支部構造委員会: 「建築物の耐震診断・補強」の沖縄セミナー, 2001.9.
- 3) 日本コンクリート工学協会九州支部, 既存RC建物の劣化調査委員会: 九州・沖縄地区における既存鉄筋コンクリート建物の劣化調査報告書, 2005.11.
- 4) 日本コンクリート工学協会九州支部, 九州・沖縄の地域特性に配慮したRC造建築物の恒久・応急的な耐震補強法の開発研究に関する研究専門委員会: 九州・沖縄地区における既存鉄筋コンクリート建物の耐震性能と耐震補強法開発, 2004.2.
- 5) Kawano, A, Griffith M. C., Joshi, H.R. and Warner, R.F.: Analysis of the Behavior and Collapse of Concrete Frames Subjected to Seismic Ground Motion, Research Report No.R163, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, Australia, 1998.11.
- 6) Popovics, S.: Numerical Approach to Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973.
- 7) 日本建築防災協会: 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001.10.