

BiD フレーム工法 D タイプ (直付け型) 補強建物の解析モデル Analysis Model of Seismic Retrofit Method by BiD Frame of Direct Attachment Type

山崎 康雄* 小林 孝至*
Yasuo Yamasaki Takayuki Kobayashi
高橋 孝二*
Koji Takahashi

要 約

耐震性能の劣る建物に制振フレームを直付けする制振補強工法「BiD フレーム工法 D タイプ」を開発した。本工法による補強建物の耐震性能の確認は地震応答解析によるが、解析モデルは建物と制振フレームとの3次元立体モデル、および建物は質点系モデルとし制振フレームを取付けたモデルの両方を採用できるものとした。

本報では、BiD フレーム工法 D タイプの概要および地震応答解析モデルの構築について述べ、6階建ての共同住宅を想定した建物で、地震応答解析モデルの検証結果について述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 本工法の概要
- § 3. 設計用解析モデルの構築
- § 4. 解析モデルの妥当性確認
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

耐震性能の劣る建物の制振補強工法として、バルコニー側や廊下側の片持ちスラブが取付く構面に、粘弾性ダンパーと軸力伝達機構からなる AFT ダンパーシステムを内蔵した制振フレームを構築し、増設スラブを介して建物と一体化するアウトフレーム型の BiD フレーム工法 (以下、アウトフレーム型と称す) を開発し、2012 年 1 月に日本建築総合試験所にて建築技術性能証明を取得した。

既にアウトフレーム型の実大フレーム実験の結果¹⁾と共同住宅への補強設計・施工事例^{2,3)}を報告している。

本報では、工法の適用拡大のため、建物の片持ちスラブがない構面に制振フレームを建物に直付けするタイプ・BiD フレーム工法 D タイプ (以下、本工法と称す) について示す。本工法は、2014 年 6 月に建築技術性能証明を取得した。

本工法で補強した建物の耐震性能の確認は、地震応答解析による。アウトフレーム型の制振フレームは、増設

スラブを介して建物と接合させるため、増設スラブに生じる面内応力や面外変形等を把握できる平面応力要素やビーム要素とした。そのため、建物のモデルは3次元立体モデルとする必要がある。しかし、本工法は増設スラブがないことから、解析モデルの単純化や解析時間の短縮のため、質点系モデルの適用を試みた。その際、制振フレームのモデルに工夫が必要となる。本報では、その概要と提案した解析モデルの妥当性の確認についても述べる。

§ 2. 本工法の概要

本章では、本工法の適用範囲と設計フローなどについて記す。

本工法のイメージを図 1 に示す。制振フレームは補強対象建物の梁部分に直接取付き、制振フレーム内のダンパーシステムは粘弾性ダンパーのみで構成される。

以降、補強対象の建物を既存建物、既存建物に靱性補強などを施したものを基本建物、基本建物に制振フレー

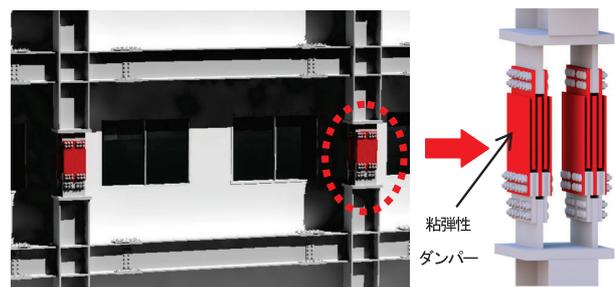


図 1 本工法のイメージ

* 本社建築設計部構造1課

ムを取付けたものを補強建物と称す。

2-1 適用範囲

(1) 適用対象建物

本工法を適用できる既存建物は、原則として高さ 45 m までの RC 造および SRC 造のラーメン構造であり、コンクリート推定強度は 18 N/mm² 以上とする。

(2) 接合部

基本建物と制振フレームの接合方法を図 2 に示す。接合部は、「既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル」⁴⁾ の接合法を採用した。本工法では、基本建物と制振フレームとの一体性を確保するため、あと施工アンカー、頭付きスタッド、スパイラル筋、構造体モルタルなどを用いて制振フレームを基本建物の梁側面に制振フレームを接合する。

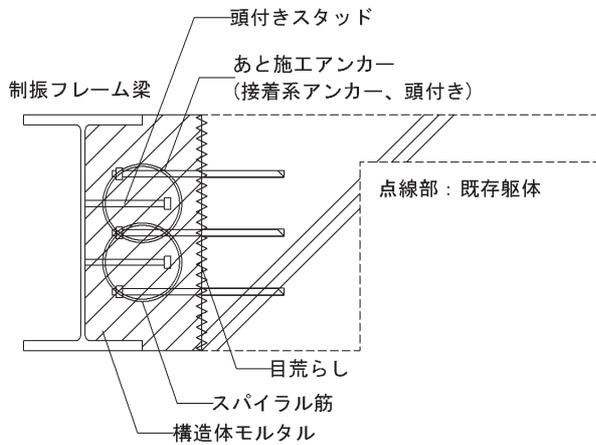


図 2 接合方法

(3) ダンパースystem

本工法の制振効果は、基本建物の変形がダンパーに伝わることで発揮される。本工法の場合、ダンパーに水平方向と同時に僅かな鉛直方向の変形が生じる可能性がある。そこで、面内二方向加力時の性能が明らかな粘弾性ダンパーを採用した。また、地震時に制振フレームの梁に生じるせん断力の殆どが既存建物の柱へ軸力として流れるため、アウトフレーム型に必要な軸力伝達機構を必要としない。

2-2 設計フロー

本工法の設計フローを図 3 に示す。設計フローは、大きく三段階とした。

第一段階は、既存建物の耐震診断結果から耐震性能を確認する。耐震補強が必要と判断した場合、強度補強やスリットなどの靱性補強を施した基本建物の静的荷重増分解析を行う。そこでせん断破壊しない範囲を確認し、その範囲内で設計クライテリアとなる層間変形角を設定する。

第二段階は、基本建物の地震応答解析モデルを作成し、

時刻歴地震応答解析を実施する。その解析モデルは 3 次元立体モデルまたは、質点系モデルのいずれかを選択できる。モデルの選択基準および各モデルに関する詳細は 3-2 にて述べる。補強建物モデルは基本建物モデルに配置形状などを仮定した制振フレームを平面フレームモデルとして取付けて作成し、地震応答解析を行う。

第三段階は、地震応答解析結果から各部の設計を行う。応答結果が設計クライテリアなどを満足しない場合は、第二段階の制振フレームの計画を見直して、再度、地震応答解析を行う。満足した場合は、接合部に必要なあと施工アンカーなどの各部の設計を行う。

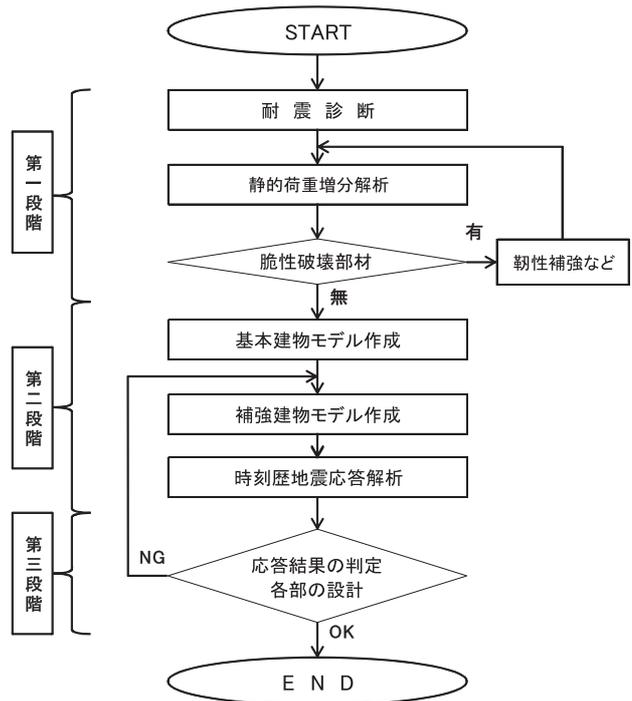


図 3 設計フロー

§ 3. 設計用解析モデルの構築

本章では、設計用解析モデルの構築について記す。

3-1 制振フレーム

本工法の制振フレームの解析モデル概要を図 4 に示す。制振フレームの解析モデルは既報¹⁾ に倣っている。

制振フレームの各節点には、制振フレームの自重と接合部の重量を考慮した。

制振フレームの鉄骨柱・梁とも材端にバネモデルを付加した弾性ビーム要素とし、材端バネモデルの復元力特性は、降伏強度で折れ曲がる剛塑性とした。

本工法の制振フレーム内の粘弾性ダンパーは水平と鉛直の二方向の特性を与えた。水平方向は、振動数、振幅、速度、温度などの各種の依存性を弾性要素 K1、弾塑性要素 K2、粘性要素 C の三要素で表現した三要素モデルとし、鉛直方向は、粘弾性ダンパーの厚みに対す

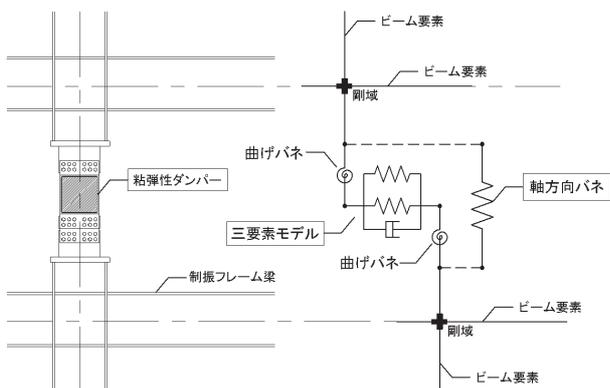


図4 制振フレームの解析モデル

る10%ひずみ時の弾性モデルとした。また、本工法でも粘弾性ダンパーと鉄骨部を接続させるため、粘弾性ダンパー取付部には、アウトフレーム型の実大実験結果¹⁾から得られたダンパーシステムが傾くことによる変形ロスを考慮した曲げバネを付加する。具体的には、粘弾性ダンパー取付部の回転による水平剛性を断面二次モーメントに変換し、ビーム要素の曲げバネとしている。

3-2 補強建物

補強建物モデルは、基本建物モデルに制振フレームモデルを取付けたモデルである。補強建物モデルの概要を図5に示す。

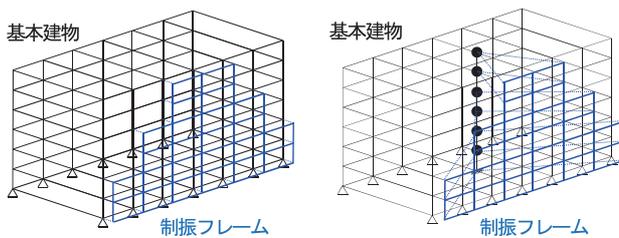
本工法では、基本建物のモデルを3次元立体モデルまたは、質点系モデルのいずれかを選択できる。3次元立体モデルを採用する基準は以下の通りである。

- (1) 基本建物が立体的および平面的に不整形な場合
- (2) 基本建物の偏芯率が0.15を超える場合
- (3) 補強建物の偏芯率が0.15を超える場合
- (4) 制振フレームから基本建物の柱に流れる軸力が、基本建物の復元力特性に影響を与える場合

本工法で、地震時に制振フレームの梁に生じるせん断力の殆どが基本建物の柱へ軸力として流れる。これは粘弾性ダンパーと基本建物の柱の鉛直軸剛性では、後者の方が非常に大きいためである。

そこで、基本建物モデルを質点系とする場合は、制振フレームの柱の上下節点間に制振フレームが取付く基本建物の柱軸剛性を考慮したトラス要素を配置することとした。補強質点系モデルの詳細を図6に、柱軸剛性を考慮したトラス要素の復元力特性を図7に示す。

制振フレームが取付く基本建物の柱の断面積を考慮した剛性で、復元力特性は引張および圧縮側とも弾性とした。なお、トラス要素は、制振フレームから基本建物の柱に流れる軸力の確認のために利用する。



a) 補強立体モデル b) 補強質点系モデル

図5 補強建物モデル

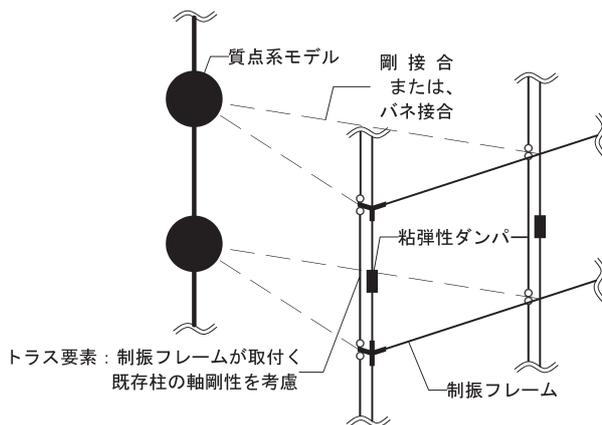


図6 補強質点系モデルの制振フレーム詳細

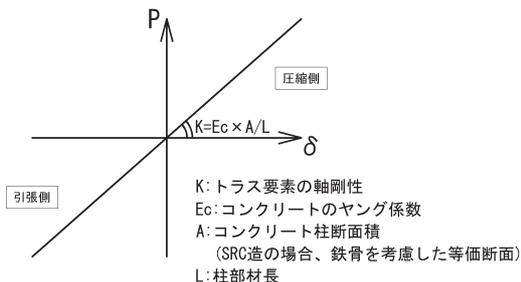


図7 トラス要素の復元力特性

3-3 接合部

基本建物と制振フレームとの接合部の剛性は、非常に高いため、剛接合を基本とする。補強建物モデルは、基本建物モデルを3次元立体モデルまたは、質点系モデルにモデル化するため、剛接合の境界条件の設定が異なる。3次元立体モデルの場合は、同一高さにある基本建物と制振フレーム各節点の水平・鉛直変位を従属とし、各軸周りの回転は自由とする。

質点系モデルの場合、同一高さにある質点と制振フレーム各節点の水平方向を従属させ、鉛直変位と各軸周りの回転は自由とする。

接合部のモデル化は剛接合以外に、あと施工アンカーのせん断耐力を許容変形値(2mm)で除したバネ値を用いても良い。3次元立体モデルの場合は、同一高さにある基本建物と制振フレーム各節点に水平・鉛直の二方向バネを配置し、質点系モデルとした場合は、質点と制振フレーム各節点に水平バネのみを配置する。

§ 4. 解析モデルの妥当性確認

本 § では、基本建物を共同住宅を想定した建物とし、基本立体モデルと基本質点系モデルにそれぞれにモデル化する。各基本建物モデルに同形状の制振フレームを剛接合により接合し、補強立体モデルと補強質点系モデルを作成する。その両者の応答結果を比較することで、補強質点系モデルの妥当性を確認する。

4-1 建物概要

基本建物の概要を以下に示す。

- 階数：地上 6 階
- 用途：共同住宅 (36 戸)
- 延べ床面積：2128 m²
- 高さ：17.9 m (基準階高 2.8 m)
- 構造種別：鉄筋コンクリート造
- 構造形式：X 方向 ラーメン構造
Y 方向 耐震壁付きラーメン構造
- 基礎形状：杭基礎

基本建物の主な部材を表 1 に、制振フレームの部材を表 2 に示す。基本建物に制振フレームを取付けた補強建物の概要を図 8 に示す。粘弾性ダンパーは 4 枚タイプを使用し、ダンパー厚さは 15 mm とした。

ここで、制振フレームの配置は、補強建物の最大層間変形角が 1/100 rad. 程度となることを目標に決定した。

4-2 解析モデル

(1) 基本立体モデル

基本立体モデルの各部材モデルを表 3 に示す。柱・梁をビーム要素とし、それぞれの弾塑性特性を柱はファイバーモデル、梁は材端弾塑性バネモデルとする。壁はエレメント要素とする。

表 1 基本建物の部材リスト

表 1 基本建物の部材リスト		
使用材料	コンクリート	1F ~ 6F : 21 N/mm ²
	主筋	D22 : SD345
	せん断補強筋	D10 : SD295A
部材断面	柱	1F : 750 × 750 2F : 700 × 700 3F ~ 4F : 600 × 600 5F ~ 6F : 550 × 550
	大梁	2F ~ RF : 350 × 800

表 2 制振フレームの部材リスト

	鉄骨部材	材質
梁	H-700 × 300 × 14 × 25	SN490
柱	H-600 × 400 × 16 × 28	

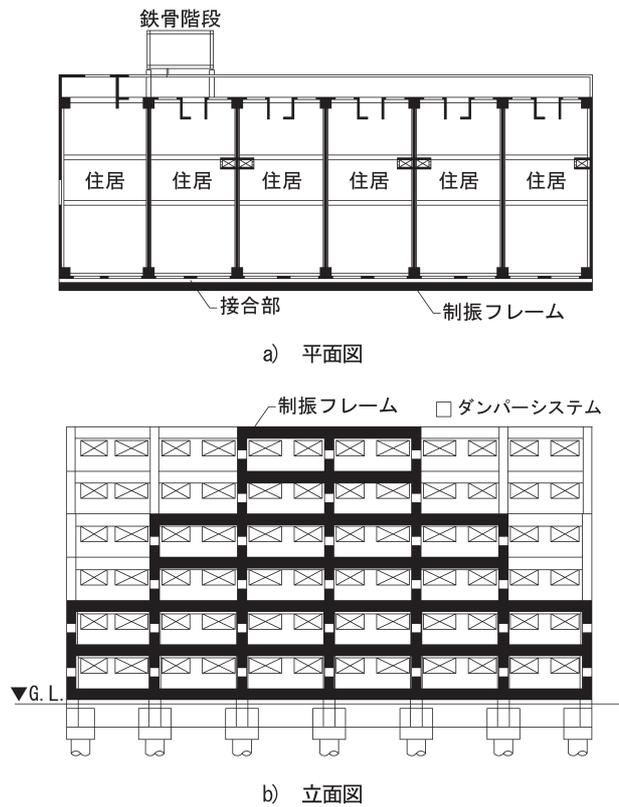


図 8 補強建物概要

表 3 基本立体モデルの各部材モデル

部材	要素	成分	モデル	復元力特性・構成則
梁	ビーム	曲げ	材端バネ (M-θ型)	トリリニア (Takeda モデル)
		軸方向	—	—
		せん断	水平バネ	弾性
柱	ビーム	曲げ	ファイバー型	コンクリート : NewRC モデル
		軸方向		鉄筋 : バイリニア
		せん断	水平バネ	弾性
壁	エレメント	曲げ	ファイバー型	コンクリート : NewRC
		軸方向		鉄筋 : バイリニア
		せん断	水平バネ	トリリニア (原点指向型)

(2) 基本質点系モデル

基本立体モデルを静的荷重増分解析し、得られた層せん断力—層間変形角関係より基本質点系モデルの復元力を設定した。

各階重量と層せん断力を表 4 に示す。層せん断力は、ある層の層間変形角が 1/50 rad. に達した時のものである。

表4 各階重量と層せん断力

階	構造	Wi [kN]	ΣWi [kN]	Ai	Ci	Qi [kN]
6	RC	3093	3093	1.83	0.37	1131
5	RC	3437	6530	1.50	0.30	1960
4	RC	3560	10090	1.33	0.27	2678
3	RC	3587	13678	1.20	0.24	3288
2	RC	3749	17427	1.10	0.22	3818
1	RC	3835	21262	1.00	0.20	4252

基本質点系モデルは、各層重量を基本建物の各床位置に集約し、層せん断力-層間変形角関係を曲げ変形成分とせん断変形成分に分け、曲げは弾性、せん断はトリリニア型の復元力特性に置換し、等価曲げせん断モデルとする。

トリリニア型への置換の模式を図9に示す。まず、初期剛性に対して0.8倍の割線剛性と、スケルトンカーブとの交点Aにおける変位 δ_1 を求め、初期剛性から δ_1 に対する第1折れ点①のひび割れ発生時のせん断力Q1を求める。次に、層間変形角が1/100 rad. となる時の変形 δ_3 におけるスケルトンカーブ上の点を③とし、その接線を第三剛性とする。また、 δ_3 までの包絡面積が元のスケルトンカーブの包絡面積に等しくなるよう第2折れ点②を定める。これより②における降伏時のせん断力Q2が求まる。以上のように置換した、各層のトリリニア型の復元力特性を図10、その諸元を表5に示す。なお、復元力の履歴特性には武田モデル ($\gamma = 0.4$) と

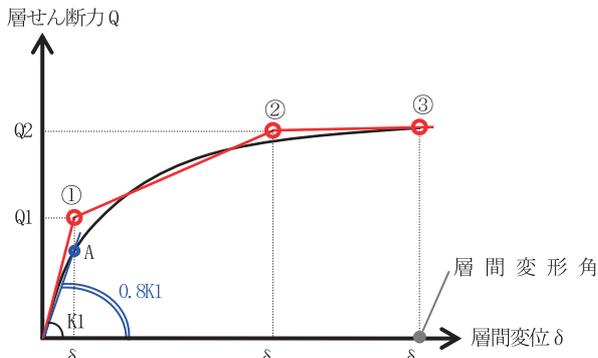


図9 トリリニア型への置換の模式図

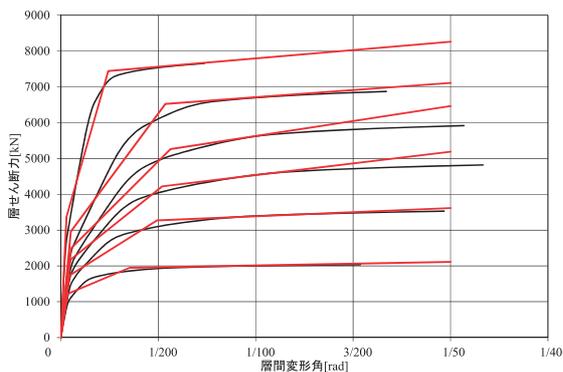


図10 作成したトリリニア型の復元力特性

表5 各階の復元力特性の諸元

階	EI [kNm ²]	GA [kN]	K1 [kN/m]	Q1 [kN]	α_2	Q2 [kN]	α_3
6	1.01E+11	3.37E+06	1.23E+06	1220	0.068	1947	0.003
5	2.78E+10	3.85E+06	1.39E+06	1733	0.089	3269	0.006
4	2.46E+10	4.35E+06	1.55E+06	2176	0.100	4224	0.015
3	2.28E+10	4.65E+06	1.64E+06	2495	0.117	5265	0.018
2	2.39E+10	5.73E+06	2.01E+06	2961	0.128	6526	0.007
1	2.53E+10	1.17E+07	3.17E+06	3362	0.163	7442	0.004

した。

(3) 補強モデル

作成した基本立体モデルと基本質点系モデルに制振フレームを剛接合により取付け、補強立体モデルと補強質点系モデルを作成する。

4-3 解析諸元

(1) 入力地震波

入力地震波波形の諸元を表6に示す。入力地震波は、観測波3波をレベル2相当の最大速度を50 cm/sec に基準化した。

表6 入力地震波形諸元

入力地震波名	最大加速度 [cm/sec ²]	最大速度 [cm/sec]	継続時間 [sec]	備考
EL CENTRO NS	510.8	50.0	50.0	1940年 Imperial Valley地震 EL CENTRO NS記録
TAFT EW	496.8	50.0	50.0	1952年 Kern County地震 TAFT EW記録
HACHINOHE NS	330.1	50.0	50.0	1968年十勝沖地震 八戸港湾事務所NS記録

(2) 地震応答解析条件

地震応答解析の条件を以下に示す。

- ・内部粘性減衰は、初期剛性比例型とし $h = 2\%$ とする。初期剛性は、制振フレームの剛性を含めた値とする。
- ・時刻歴応答解析は、直接積分法 (ニューマーク β 法 平均加速度法 $\beta = 0.25$) とする。
- ・積分時間刻みは、 $\Delta t = 0.0005$ 秒 (1/2000) とする。
- ・粘弾性ダンパーにおける設定温度は、 20°C とする。

4-4 地震応答解析結果

(1) 固有値解析結果

基本建物モデルと補強建物モデルの1次から3次までの固有値解析結果を表7に示す。両者に大きな差異はない。

表7 固有値解析結果 (単位: sec)

次数	基本立体モデル	基本質点系モデル	補強立体モデル	補強質点系モデル
1	0.349	0.348	0.354	0.353
2	0.119	0.127	0.121	0.129
3	0.069	0.081	0.070	0.083

(2) 基本建物モデルでの比較

立体モデルと質点系モデルの地震応答解析結果を図 11 に示す。

中間層において層間変形角では大きな差となるが、変形角が最大となる層は 3 層～4 層であり、最大値をとる層は殆ど変わらなかった。

(3) 補強建物モデルでの比較

立体モデルと質点系モデルの応答解析結果を図 12 に示す。

両モデルの応答結果は、基本建物と同様に、変形角が最大値となる層は同じであった。

(4) 制振フレームからの付加軸力

質点系モデルの場合、制振フレームの隅柱が取付く基本建物の柱軸力を確認することは困難である。

ここでは、立体・質点系の両モデルで最大応答を示した EL CENTRO_NS での結果を用いて検討する。

基本建物の 1 階隅柱の軸力を補強質点系モデルで確認する場合、EL CENTRO_NS での応答せん断力の分布形状で、基本建物の立体モデルを静的荷重増分解析する。ある層が最大応答層間変形角となるまで荷重を増分し、その時の 1 階隅柱の軸力に、補強質点系モデルに取付けたトラス要素に生じる軸力を合算し、地震時の柱軸力として評価した。1 階隅柱の軸力の検討結果を表 8 に示す。補強質点系モデルでの評価値は、補強立体モデルの応答値を包含し、安全側となっている。

トラス要素を配置することで、補強質点系モデルの場合でも、補強立体モデルと同様に制振フレームが取付く柱に生じる軸力を評価でき、設計に有用であると判断できる。

表 8 1 階隅柱の軸力検討結果 (単位: kN)

	補強立体モデル 応答値 A	補強質点系モデル 評価値 B = C+D	基本立体モデル 荷重増分解析 C	補強質点系モデル トラス要素軸力 D
引張側	234	477	-395	872
圧縮側	-2134	-2634	-1762	-872

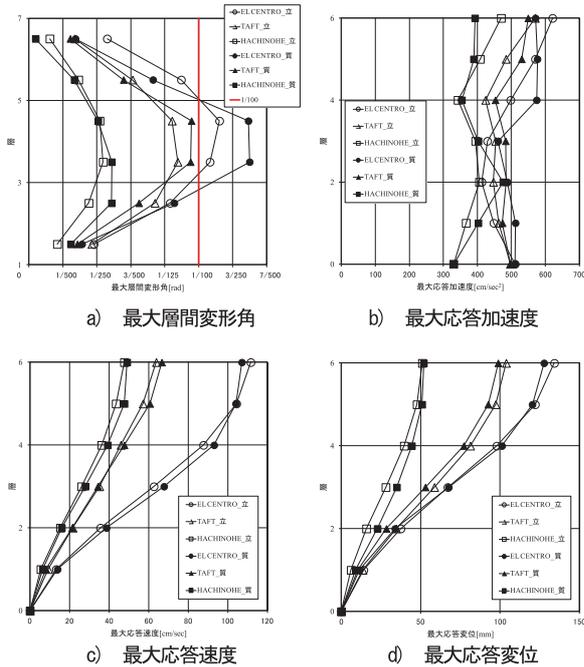


図 11 基本建物の応答結果

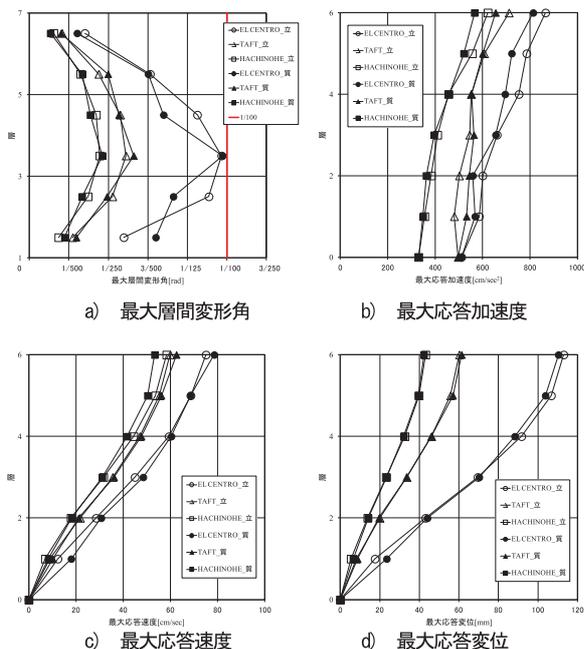


図 12 補強建物の応答結果

§5. まとめ

本報では、BiD フレーム工法 D タイプの概要と設計方法および地震応答解析モデルの概要を示した。制振補強を行う建物の解析モデルは、3次元立体モデルまたは質点系モデルとするとしたが、質点系モデルに制振フレームを取付ける場合は、制振フレームが取付く基本建物の柱を模擬したトラス要素を配置することで、基本建物柱に生じる軸力を評価でき、3次元立体モデルと同等であることを確認した。

参考文献

- 1) 泉澤喬, 他 2 名: ダンパーを柱に内蔵するアウトフレーム型制振補強工法に関する研究, 西松建設技報, vol.35
- 2) 高橋孝二, 他 3 名: BiD フレーム工法による共同住宅の耐震補強, 西松建設技報, vol.36
- 3) 高橋孝二, 他 5 名: BiD フレーム工法による共同住宅の設計・施工事例, 西松建設技報, vol.37
- 4) 既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル, 日本建築防災協会, 2002.09
- 5) 小林孝至, 他 2 名: 直付け型 BiD フレーム工法, 西松建設技報, vol.37
- 6) 山崎康雄, 他 4 名: ダンパーを柱に内蔵するアウトフレーム型制振補強構法に関する研究 (その 9) 直付けタイプの概要と解析モデルの検討, 2014 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp. 599-600, 2014.09