

BiD フレーム工法による共同住宅の耐震補強 Seismic Retrofitting of Apartment Buildings by BiD Frame Construction Method

高橋 孝二* 郡司 康浩*
Koji Takahashi Yasuhiro Gunji
山崎 康雄* 泉澤 喬*
Yasuo Yamasaki Takashi Izumizawa

要 約

当社で開発した制振補強工法である Built-in Damper (BiD) フレーム工法は、外付けフレームの柱に制振ダンパーを内蔵しているため、補強構面の開放性に優れていることが最大の特徴である。本報告は、実在する6階建の鉄筋コンクリート造建物にBiDフレーム工法を適用した設計例を紹介する。対象とした建物は昭和56年に竣工した旧耐震基準の建物であり、耐震診断の結果、補強が必要であることが確認された。工法の設計手順、地震応答解析結果等を示し、BiDフレーム工法の制振補強効果に対する有効性を述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 建物概要
- § 3. 補強概要
- § 4. 設計概要
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

耐震性能の劣る既存の共同住宅に対して、耐震補強の必要性は認識されているが、室内工事による一時退去や補強後の採光確保、バルコニーにブレースが設置され景観の悪化等の理由により、なかなか補強工事がされないのが現状である。さらに、中高層の共同住宅では、一般的な補強の強度や靱性を向上させる補強工法では対応が難しい場合もある。そこで、これらの問題を解決するために外付けフレームの柱の中にダンパーシステム（制振ダンパーと軸力伝達機構を備えた）を内蔵した制振補強工法「Built-in Damper (BiD) フレーム工法」（以下、本工法）を開発した。

本工法の最大の特徴は、地震時のエネルギーを吸収する制振ダンパーを外付けフレームの柱の中に組み込むことで、他の制振補強工法に見られるブレースや間柱といったダンパーに建物の変形を伝えるための取り付け部材が存在しないところにある。さらに、補強工事が建物の外だけで完結することから、居ながらの施工も可能にし

ている。

本工法は、既に実物大フレームの静的載荷実験¹⁾やダンパーシステムの動的載荷実験²⁾を実施し、工法の耐震性能と設計法に対して、建築技術性能証明（GBRC 性能証明 第11-20号）を取得している。

本報告は、旧耐震基準で設計された実在する6階建の共同住宅に対して、本工法を適用した設計例を紹介する。

§ 2. 建物概要

対象建物は、昭和56年に竣工した鉄筋コンクリート造6階建の共同住宅であり、旧耐震設計基準で設計された建物である。概要は以下の通り。建物の外観を写真一に示す。

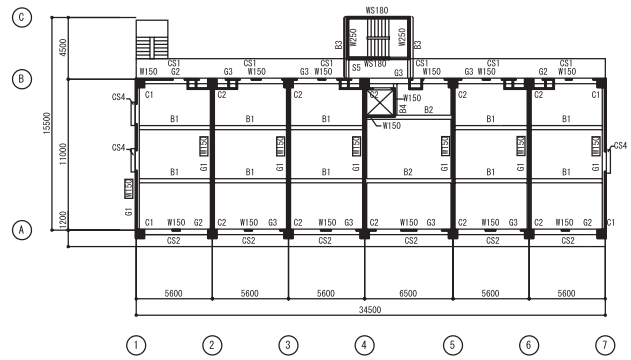


写真一 建物外観

* 建築設計部構造課

所在地：神奈川県横浜市
 建設年：昭和56年（築31年）
 総戸数：30戸
 延べ面積：2758.485 m²
 軒高さ：17.77 m
 構造：耐震壁付ラーメン構造
 基礎：直接基礎

基準階伏図を図一1に、バルコニー側の軸組図を図一2に示す。



図一1 基準階伏図

§3. 補強概要

3-1 調査結果

耐震診断に先立ち実施した建物調査結果を以下に示す。現地調査は、主に目視による設計図書との照合調査、履歴外観調査、ひび割れ等の損傷状況調査を行った。また、コンクリート材料調査として、コアコンクリートを各階3本採取し、圧縮強度および中性化深さ試験を実施した。

(1) 設計図書照合調査

設計図書は、新築時の構造図、意匠図が現存しており、現地にて建物と照合した結果、開口寸法等については、概ね既存図面と一致していたが、1階において開口位置の変更、設備開口の追加、コンクリートブロックによる開口閉塞が見られた。

(2) コンクリート圧縮強度試験

合計18ヶ所から採取したコア供試体の圧縮強度試験結果を表一1に示す。なお、耐震診断採用強度は、全ての測定値ならびに各階の推定強度が25.7N/mm² (1.25×設計基準強度20.6 N/mm²)を上回ったことにより、全ての階で25.7 N/mm²を採用した。

(3) 外観目視調査

不同沈下に関するひび割れや柱、梁、壁のせん断ひび割れは認められず建物外部、内部に散見されたひび割れは、手摺の水平ひび割れを除き、全てが0.3 mmを下回る軽微なひび割れであることから構造的に問題となるひび割れは無いと考えられる。

(4) コンクリート中性化試験

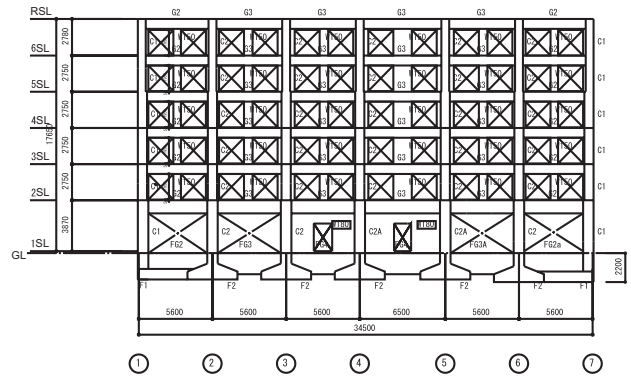
測定結果の一部では30 mmを若干超えているが、全体の平均値は屋内の打ち放し面で25 mm、屋内の塗装面で26.6 mm、屋外塗装面で14.5 mmであるので中性化深さは問題ないレベルである。

3-2 診断結果

建物の調査結果に基づき耐震診断を実施した。桁行方向(X)および梁間方向(Y)の耐震診断結果(2次診断)を表一2に示す。

(1) 桁行方向

桁行方向の構造耐震指標Is値は、1階から5階が判定指標値のIso=0.6を下回り0.4~0.5である。保有水平耐



図一2 軸組図 (A通りバルコニー側)

表一1 圧縮強度試験結果

階数	調査記号	圧縮強度 (N/mm ²)			判定	1.25×設計基準強度*2 (N/mm ²)	耐震診断採用強度 (N/mm ²)	
		測定値	平均値	標準偏差				
6階	6-1	42.2	35.0	6.32	31.8	25.7	25.7	
	6-2	30.4						
	6-3	32.4						
5階	5-1	36.7	34.4	2.02	33.4			25.7
	5-2	33.3						
	5-3	33.1						
4階	4-1	43.0	39.7	2.84	38.3	25.7		
	4-2	38.3						
	4-3	37.9						
3階	3-1	38.5	37.0	1.34	36.3		25.7	
	3-2	36.0						
	3-3	36.4						
2階	2-1	33.8	34.5	0.76	34.1	25.7		
	2-2	34.3						
	2-3	35.3						
1階	1-1	30.5	29.6	0.82	29.2		25.7	
	1-2	29.4						
	1-3	28.9						

*1 推定強度：「平均値-0.5×標準偏差」より算出

*2 設計基準強度：20.6 N/mm²

力に関わる指標 C_{TU}・S_D の値は全ての階で判定値の0.3を上回っている。この方向は、袖壁付柱が支配的な靱性型の耐震特性であるが、強度が乏しく所要の耐震性能を満たしていない。

(2) 梁間方向

梁間方向の構造耐震指標 Is 値は、1階のみが判定指標

表一 耐震診断結果

判定指標値 Iso = 0.6, CTu・SD ≥ 0.3

階	T	桁行 (X) 方向					梁間 (Y) 方向				
		SD	F	Is	CTu・SD	判定	SD	F	Is	CTu・SD	判定
6	0.95	1.00	1.00	0.65	0.69	OK	1.00	1.00	2.82	2.97	OK
5	0.95	1.00	1.00	0.44	0.46	NG	1.00	1.00	1.74	1.83	OK
4	0.95	1.00	1.50	0.44	0.30	NG	1.00	1.00	1.35	1.42	OK
3	0.95	1.00	1.27	0.40	0.33	NG	1.00	1.00	1.19	1.26	OK
2	0.95	1.00	1.40	0.41	0.31	NG	1.00	1.00	1.08	1.14	OK
1	0.95	1.00	1.00	0.50	0.53	NG	0.67	1.00	0.45	0.47	NG

赤字：判定指標値を下回っている箇所を示す。

値の Iso = 0.6 を下回り 0.45 である。保有水平耐力に関する指標 $C_{TU} \cdot S_D$ の値は全ての階で判定値の 0.3 を上回っている。この方向は、耐震壁が支配的な強度型の耐震特性であるが、1階はピロティとなっており強度が乏しく、また偏心率による形状係数の減点により所要の耐震性能を満たしていない。

3-3 補強方針

梁間方向の補強計画は、耐震診断の結果から偏心率の改善で所要の耐震性能が得られるため1階の7通りに壁を増設する計画とした。壁を補強した状態で再度、耐震診断を行った結果、SD値が0.67から1.0に改善したことによりIs値は0.45から0.79となった。一方、桁行き方向の補強計画は、制振補強工法であるBiDフレーム工法を採用した。耐震性能の確認方法は、「建築物の耐震改修の促進に関する法律（平成7年法律第123号、改正平成17年法律第120号9）」でいう、「地震の振動および衝撃に対して倒壊、または崩壊する危険性が低い」とされる範囲であることを時刻歴応答解析にて確認する。

3-4 BiD フレーム工法の概要

本工法に用いるダンパーシステムの概要を図-3に示す。ダンパーシステムは、地震のエネルギーを吸収する粘弾性ダンパーと、柱の軸力を伝達する機構から構成されている。既存建物の外側に設けた鉄骨フレームの柱に上記のダンパーシステムを内蔵し、既存建物と鉄骨フレームの一体性は、鉄筋コンクリートスラブ等を増設することにより接合する。本工法の設計フローを図-4に示す。設計フローは、大きく分けて三つの段階に分けられる。第一段階は、既存建物に対し耐震診断および静的荷重増分解析を実施して耐震性能を把握する。それらの結果を総合的に判断して、設計クライテリアの設定を行う。第二段階は、外付けフレームの配置計画やダンパー数を仮定し、各部の部材の断面を仮定する。第三段階は、その仮定に基づいて地震応答解析に用いる解析モデルを作成し、設定した地震波に対して応答解析を実施し、耐震性能の判定を行う。

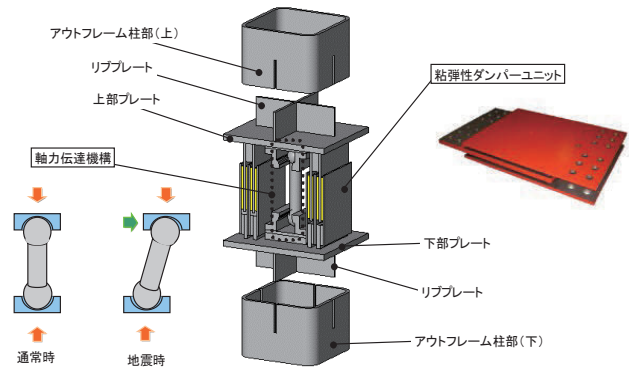


図-3 ダンパーシステムの概要

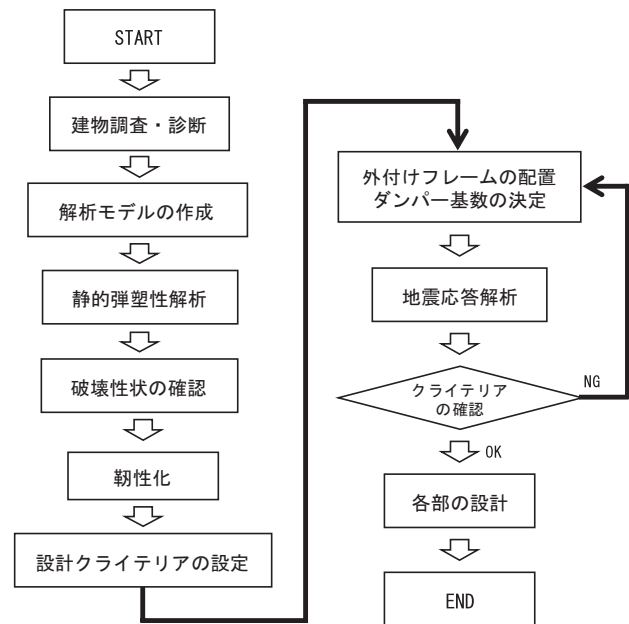


図-4 設計フロー

3-5 静的荷重増分解析

制振補強工法では、地震応答解析時に目標とする最大応変形角以上の変形性能を確保(脆性破壊部材が無い)した建物にする必要がある。そこで、既存建物の静的荷重増分解析を実施し、目標とする層間変形角の降伏状況を確認する。一般的に、脆性部材がある場合は、スリット補強や、繊維巻き補強などにより適宜、靱性補強をする。既存建物の各層が層間変形角が1/100に達した時のヒンジ図を図-5に示す。一部の柱と壁にせん断破壊が

生じているので、各層で1/100以上の変形性能の確保のため、スリット補強を行った。1階については、既存の耐震壁が抵抗要素として大きく寄与していることから増設壁による補強とした。解析に使用するプログラムはSuper Build/SS3ユニオンシステム(株)を用いた。

§ 4. 設計概要

4-1 外付けフレーム配置およびダンパー配置

外付けフレーム配置ダンパーの配置位置を図-6に示す。柱は□-600×600×25(BCP325)、梁はH-700×300×14×25(SN490B)を用いる。鉄筋コンクリート造の増設スラブは、全て共通で厚み250mm($F_c=27\text{ N/mm}^2$)とする。ダンパーシステムは、減衰力の調整として粘弾性ダンパーユニットが4ユニット内蔵と2ユニット内蔵の2タイプとし、粘弾性体の厚みは共通で15mmを用いる。図に示すようにダンパーシステムは、バルコニー側に20基、廊下側に8基の計28基とした。

4-2 解析方法および補強目標

(1) 解析モデル

地震応答解析に用いる全体の解析モデルを図-7に示す。本工法の制振補強効果(応答低減効果)は、外付けフレームの剛性や既存建物と外付けフレームの一体性が大きく影響することから個々の部材の変形や応力が把握できるよう詳細なモデルが必要になる。そこで、既存建物および外付けフレームとも、部材レベルの立体モデルに置換する。特に増設スラブは、既存建物と外付けフレームの間に平面応力要素や、ビーム要素を配置し、生じる面内応力や面外変形等を把握する必要がある。外付けフレームおよび増設スラブの重量は、全て外付けフレームで負担するとして外付けフレームの各節点に考慮する。

ダンパーシステム部の解析モデルを図-8に示す。粘弾性ダンパー部の解析モデルは、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³⁾を用いる。弾塑性要素の履歴ルールを図-9に示す。軸力伝達機構部は、その水平変形時の傾きによる影響が考慮できるようトラスモデルに置換する。その他、三要素モデルの上下には、ダンパーユニット取り付け部の曲げ変形による変形ロスを考慮するため曲げバネを配置する。

(2) 設計用入力地震動

検討に用いる入力地震動は、告示第1461号に規定される極めて稀に発生する地震動波形(以下、告示波)3波および既往の観測波を50kineに基準化した、ELCENTRO-NS, TAFT-EW, HACHINOHE-NSの3波の計6波とした。入力地震動の諸元を表-3に示す。

(3) クライテリアの設定

前節3-5の静的荷重増分解析において、各層1/100以上の変形性能を確保したことから、時刻歴応答解析に

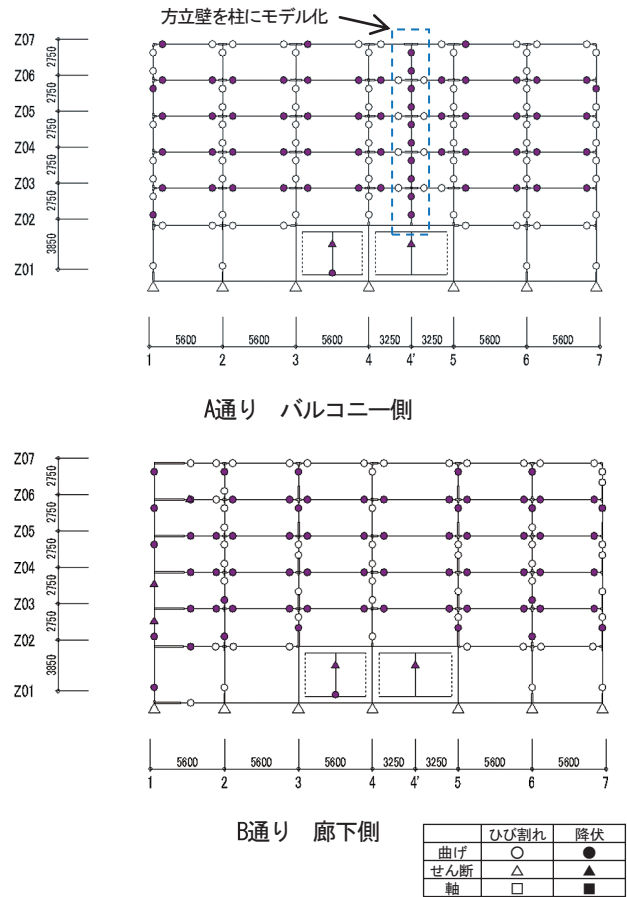


図-5 ヒンジ図

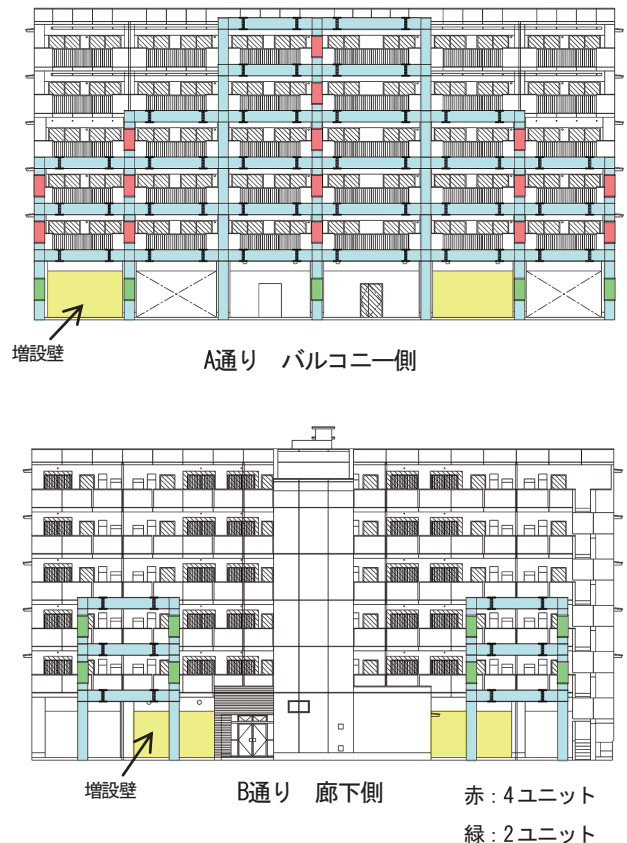


図-6 外付けフレームおよびダンパー配置

おける層間変形角のクライテリアを各層で1/125以下とした。1層は壁構造としていることから1/500以下に設定した。

(4) 解析諸元

時刻歴応答解析法は、直接積分法ニューマークβ法 ($\beta = 0.25$) を用い、積分時間刻みは $\Delta t = 0.0005$ 秒とする。減衰は初期剛性比例型とし、減衰定数 $h = 2\%$ とする。粘弾性ダンパーの設定温度は、ダンパー温度を 20°C を基本とし、最大応答を記録した波に対して 0°C 、 40°C の計3ケースを検討した。解析に使用するプログラムは RESP-F3T (株)構造計画研究所とした。

4-3 応答解析結果

(1) 応答結果

補強前（既存建物）と補強後（制振補強）の最大応答層間変形角（ 20°C の結果）の比較を図-10に示す。また、その応答値を表-4に示す。なお、告示波に対する応答値は、観測波に比べると小さいため、本報告では省略する。補強前の最大はTAFT-EWにおける4層の1/61である。補強後の最大はELCENTRO-NSにおける5層の1/139である。層間変形角で1/2程度の補強効果が見られた。ELCENTRO-NSにおけるダンパー温度を変化させた場合の最大応答変形角の比較を図-11に示す。 0°C および 40°C とも 20°C の結果と概一致していて、この範囲の温度変化では、応答結果への影響が小さいことがわかる。

(2) 耐震性能の判定

既存建物および外付けフレーム各部の性能上のクライテリアの確認結果を表-5に示す。本検討は、補強建物の応答解析結果が最大となるELCENTRO-NSの結果を用いるが、粘弾性ダンパーの温度依存性のため温度条件を 0°C 、 20°C 、 40°C のそれぞれに対して、厳しい条件で検討した。

4-4 各部の設計

(1) 増設スラブの設計

外付けフレームと既存建物の接合例を図-12に示す。図のように鉄筋コンクリート造のスラブを増設することにより外付けフレームと既存建物に生じるせん断力を伝達させる。既存躯体の梁と増設スラブの接合は、あと施工アンカーにて接合し、外付けフレームと増設スラブは、

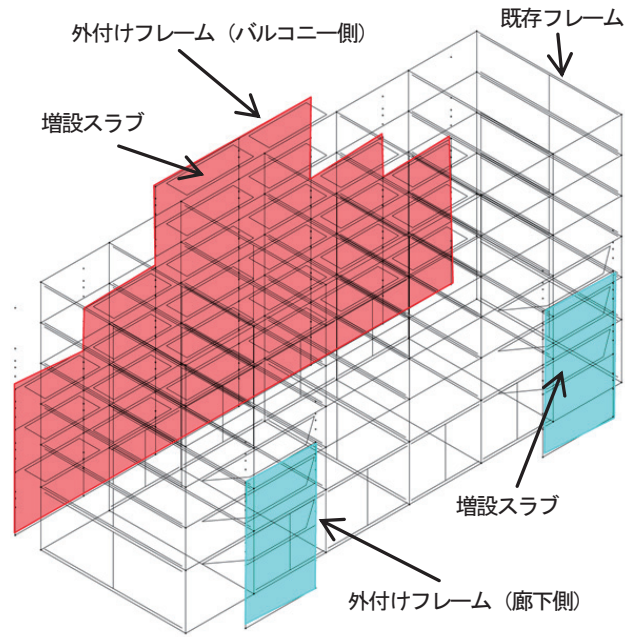


図-7 全体の解析モデル

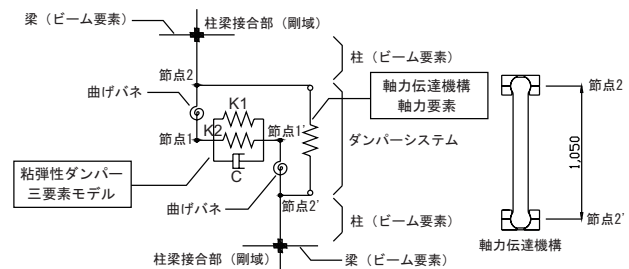


図-8 ダンパーシステム部解析モデル

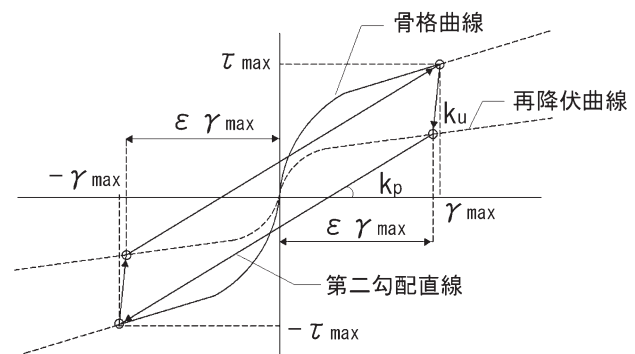


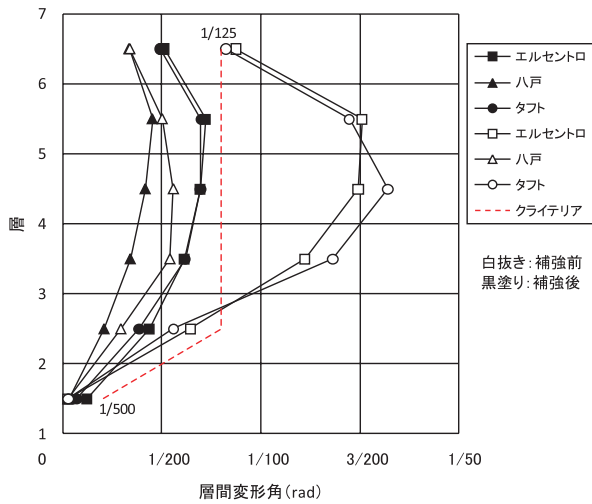
図-9 弾塑性要素の履歴ルール

表-3 入力地震動の諸元

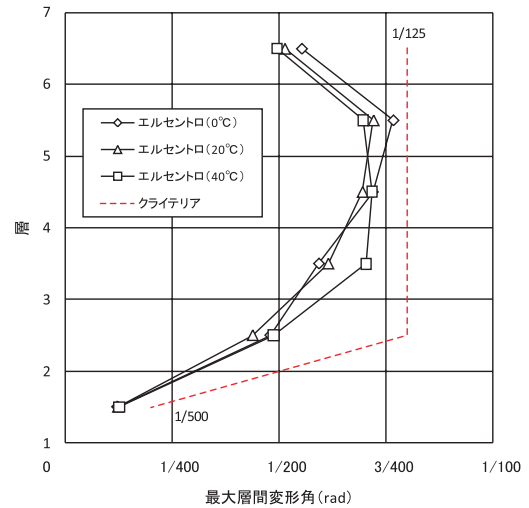
波形名称	最大加速度 (cm/sec ²)	最大速度 (cm/sec)	解析時間 (sec)
EL CENTRO NS (1940)	511	50	50
TAFT EW (1952)	497	50	50
HACHINOHE NS (1968)	330	50	50
告示波 (EL CENTRO NS)	378	42	60
告示波 (JMA 神戸 NS)	379	51	160
告示波 (乱数)	377	53	120

表-4 最大応答層間変形角

層	補強前			補強後		
	ELCENTRO	HACHINOHE	TAFT	ELCENTRO	HACHINOHE	TAFT
6	1/114	1/295	1/121	1/195	1/297	1/203
5	1/66	1/199	1/69	1/139	1/220	1/143
4	1/67	1/179	1/61	1/144	1/239	1/144
3	1/82	1/185	1/73	1/163	1/291	1/161
2	1/155	1/340	1/179	1/228	1/475	1/259
1	1/3608	1/3618	1/3457	1/810	1/3065	1/1413



図一〇 最大応答層間変形角の比較



図一一 ダンパー温度の比較

表一五 時刻歴応答解析結果の判定

項目	設計クライテリア		解析結果	条件	判定
最大応答層間変形角	1/125 以下	>	1/131	0°C	OK
		>	1/139	20°C	OK
		>	1/139	40°C	OK
部材塑性率 (既存建物)	4.0 以下	>	2.36		OK
ダンパーシステム軸力	長期圧縮 2000 kN 以下	>	706 kN		OK
	短期圧縮 3000 kN 以下	>	2189 kN	0°C	OK
	短期引張 2000 kN 以下	>	1796 kN	0°C	OK
粘弾性体最大歪	200% 以下 (t = 15 mm に対して)	>	92%	40°C	OK
増設スラブ面内せん断応力度	0.1 Fc 以下 (0.1 Fc = 2.7 に対して)	>	1.2 N/mm ²	0°C	OK

鉄骨梁のウェブにスタッドボルトとコ形の補強筋を溶接して、コンクリートと一体性を確保する。

(2) 基礎の設計

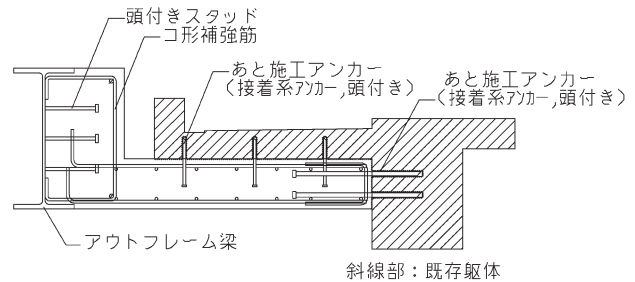
新設の外付けフレームは強固な基礎で支持させるが、地震時の水平力により作用する軸応力に対しては、既存建物の基礎ともに抵抗させる。圧縮軸力は、原則として新設の基礎で負担させるが、負担できない場合はあと施工アンカーを用いて既存基礎と共に負担させる。引張軸力については、あと施工アンカーを介して既存基礎に負担させる。その際に外付けフレームの構面外に生じる応力に対しても安全性を確認した。

§5. まとめ

本報告は、旧耐震基準で設計された実在する6階建の共同住宅に対して、BiD フレーム工法を適用した場合の設計例を報告した。本工法の応答低減効果に対する有効性が、時刻歴応答解析により確認された。

参考文献

1) 泉澤喬, 高橋孝二他: 軸力伝達機構を有する粘弾性ダンパーシステムを用いた工法開発に関する研究



図一二 増設スラブの接合例

(その2. ダンパーシステムを柱に内蔵した実大フレームの静的載荷実験), 日本建築学会技術報告集 No. 39, pp. 483-488, 2012. 6.

2) 泉澤喬, 高橋孝二他: 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4. 粘弾性ダンパーシステムの実大動的実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造IV, pp. 329-330, 2012. 9.

3) 谷翼, 辻聖晃他: 高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までのひずみ・振動数依存性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No. 629/II-99, pp. 1079-1086, 2008. 7.