

高層集合住宅の制震改修設計法と設計クライテリア

— 奈良北団地への適用事例 —

Criteria of Seismic Retrofit Case with High-rise Reinforced Concrete Housing
- The Application of Seismic Retrofit for Nara Kita Danchi -

久保田 雅春^{*1} 阿部 隆英^{*2} 前川 康雄^{*3}
Masaharu Kubota Takahide Abe Yasuo Maekawa

【要旨】

本報告は、1970年代に代表される高層RC造の集合住宅における耐震補強、ここでは制震補強についての設計方法、補強目標である設計クライテリアの設定方法について述べている。制震補強は一般的な耐震補強と異なり、建物を時刻歴応答解析により建物の地震に対する性能を評価するもので、建物の変形能力などを適切に評価する必要があり、その検討方法の一つを報告するものである。また、空き住戸の柱・梁架構内にトグル制震装置を設置することで居住者が通常の生活を行いながら住みながらの補強が可能となった。

【キーワード】 耐震補強 設計クライテリア トグル制震 住みながら補強

1. はじめに

1997年の阪神・淡路大震災における甚大な建物被害を受け、「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行された。それ以降、耐震性が不足していると診断された建物の改修が進められており、特に、集合住宅の耐震改修工法の採用にあたっては、居住者への影響を極力軽減する補強方法と施工方法が求められている。

今回、1971年に竣工された共同住宅と施設階を有する建物(以下、本建物)の耐震補強において、補強方法の採用条件として、「住みながらの工事」が可能であることと、工事中における居住者の通常の生活の影響を考慮し、居住者への迷惑、負担を極力軽減することができる工法が求められた。ここでは、トグル制震補強により本建物に要求される耐震性能を十分に満足し最小限の補強で、かつ居住者の生活に配慮された共同住宅の耐震補強の設計例を報告する。

1970年代に数多く建設されたニュータウンの集合住宅は耐震改修が必要な状況にあり、本報告の制震改修の設計法と設計クライテリアの設定方法は、これらの集合住宅の改修のモデルケースとして位置づけられるものと考えている。

2. 耐震性能指向型補強の概要

2.1 耐震性能目標と補強工法の選定

本建物は、2006年に第2次耐震診断を行っており、その結果、構造耐震指標 I_s 値、CT・SDの不足により、建物のX方向(長辺方向)の2階以上が、補強必要と判定されている。

今回適用する補強方法の選定において、人命保護、機能維持、財産保全及び強度・靱性の向上といった耐震性

能目標を満足すること、かつ、次に示す「住みながらの工事」における居住者、施設利用者の方への配慮が重要な選定項目となった。

- 1) 改修工事中の居住者及び施設利用者への配慮がなされること → 騒音・振動の低減、安全性の確保、短工期等
- 2) 改修工事後の居住者への影響が少ないこと → 使用性の維持・向上、意匠性の維持・向上、耐久性の向上等

これらの項目を総合的に判断し、トグル制震装置¹⁾を既存建物の柱・梁架構内で部屋内に取付ける補強方法(以下、本工法)を採用した。

本工法は応答制御型の制震補強工法²⁾であり、特に改修後において、「設置された架構内ブレース補強位置で、通常時及び地震時ともに、居住者に事故が発生しないよう配慮する」とし、居住上の安全性の確保を図った。

また、建物構造体に関する設計要求を満足することとして、「地震の震動及び衝撃に対して倒壊、または崩壊しない」ことを設計の必須条件とした。

2.2 目標値の設定

本建物は1階のピロティー階が既に強度型のK型ブレースにより補強されているため、1階は強度型補強、2階以上を本工法による靱性型補強とし、それぞれの層に対し設定する設計クライテリアを満足することを目標とした。また、入力地震動は観測波3波、告示波3波、それと地域性を考慮したサイト波2波の合計8波を採用し、これら入力地震動に対して応答層間変形角を設計クライテリアとした(表-1)。

ここで、Y方向(短辺方向)は耐震壁架構となってお

1. 建築事業本部 トグル事業部 2. 建築事業本部 トグル事業部 トグル設計G 3. (株)E&CS トグル制震事業部

り、耐震診断の結果でも十分な耐震性能を有しているため補強は行わないものとし、今回の検討も対象外とした。

表－1 設計用入力地震動と設計クライテリア

入力地震動	設計クライテリア
<ul style="list-style-type: none"> 観測波3波(最大速度:50cm/s) El Centro 1940 NS (エルセントロNS) Hachinohe 1968 NS (八戸NS) Taft 1952 EW (タフトEW) 告示波 乱数位相, 海溝型地震位相, 内陸型地震位相 サイト波 立川断層, 多摩直下 	<ul style="list-style-type: none"> 最大応答層間変形角 1階 1/250rad以下 2～11階 1/125rad以下 設計クライテリア以前に梁, 柱及び耐震壁にせん断破壊を生じさせない トグル腕, 回転支承; 許容応力度以内 油圧ダンパーの最大減衰力と変位 TGK850タイプ; 850kN: ±100mm

3. 建物の概要

本建物は、地上11階建ての共同住宅・施設で、1階が施設階で2階から11階が住宅階である。図－1に建物の完成イメージを示す。また、X方向1階ピロティー部分は既に強度型の補強がなされている。



図－1 完成イメージ図(バルコニー手摺は透かし)

3.1 建物概要

階数：地上11階, 塔屋2階 軒高：29.5m
 構造：鉄骨鉄筋コンクリート造(1階～4階),
 鉄筋コンクリート造(5階～11階)
 建築面積：1,143.88m² 延床面積：9,999.70m²
 架構形式：X方向 ラーメン構造,
 Y方向 耐震壁ラーメン構造

3.2 構造種別とコンクリート強度

構造種別は1階から4階(5階の床, 梁)までが鉄骨鉄筋コンクリート造(SRC造), 5階から11階までが鉄筋コンクリート造(RC造)となっており、普通コンクリート強度はSRC造の1階から5階までが34.9N/mm², RC造の6階から8階までが32.6N/mm², 軽量コンクリート強度はRC造の9階から11階までが27.0N/mm²となっている。

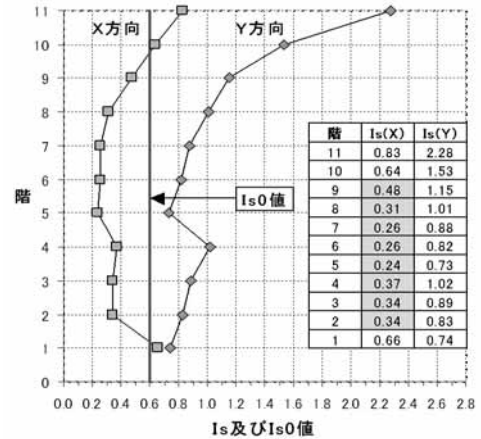
4. 既存建物の性能と改修の経緯

4.1 既存建物の性能

本建物の耐震診断は、X方向(長辺方向)1階ピロティー階が既に強度型補強されている状態で2006年に実

施されており、図－2に示す第2次耐震診断の結果のようにX方向については2階から9階までがIs値0.6を下回る結果となっている。

また、Y方向(短辺方向)に関しては全階でIs値0.6を満足する結果となっている。



図－2 現状の建物第2次診断結果

4.2 制震補強設計方針

本建物は、一文字型板状の主フレームに対し中央部の板状外側に階段室が取り付け形状となっている。

第2次耐震診断の結果に基づき、X方向は2階から11階の住宅階の補強を行うものとし、Y方向は十分な耐震安全性を有していることより補強は行わないものとする。以下に補強設計方針を示す。

1) 変形性状と崩壊形の確認

X方向における骨組立面形状と構造断面から、主フレーム各層の変形性状はせん断型変形とし、梁両端ヒンジ曲げ降伏先行形による全体崩壊形となっていることを確認する。

2) 脆性部材の改善

廊下側のY0架構の柱は極短柱となっているため、構造スリットを設けることで解消する。

3) 外部階段・エレベーター室の検討

平面中央廊下側外部に取り付いている階段・エレベーター室による耐震性の影響についての検討を行う。

4.3 設計クライテリア

予備解析(静的漸増増分解析等)において本建物の崩壊メカニズム、柱・接合部の靱性、強度を精査し、建物の変形能力を確認した結果、2階以上の最大層間変形角は、

- a) 柱, 梁せん断破壊が生じていないこと
- b) 柱の曲げ降伏は, 1階柱脚と最上11階柱頭以外生じていないこと

c) 柱の帯筋の間隔が125mmであること等を考慮して、レベル2地震動において1/125rad.とした。

これらを保証するために、柱部材の終局時の層間変形角、軸耐力及び靱性指標と柱・梁接合部の靱性指標から、梁や接合部が十分な回転能力を有していることの確認を行う。

図-3に崩壊メカニズムによる層間変形角とF指標との対応の概念図を示す。

これより、崩壊メカニズムが曲げ梁支配型柱や曲げ柱であることを確認することにより層間変形角を1/125程度と設定することが可能である。

ただし、最大層間変形角を1/125rad.と設定した場合、F指標としてF=1.5を満たしていることが必須となる。また、1階の最大層間変形角は、以下のことよりレベル2において1/250rad.とした。

- a) ピロティ一部分に、既に強度型補強のK型ブレースが5枠設置されていること
- b) 耐震壁、非構造部材への被害が少ないとされる層間変形角であること

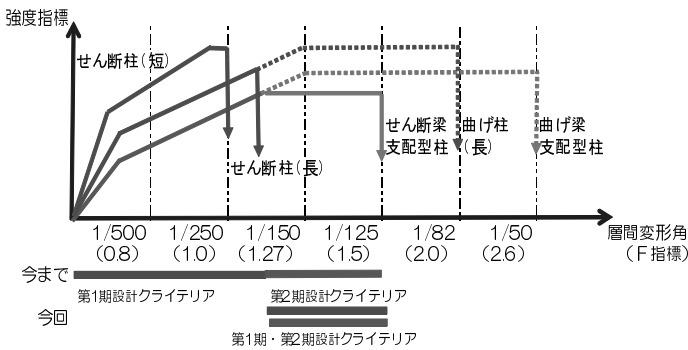


図-3 崩壊メカニズムによる層間変形角とF指標のイメージ

5. 補強計画の概要

5.1 補強計画のポイント

建物の地震時に対する耐震性能を向上させる補強方法として、建物に減衰性能を付加させ、地震エネルギーを吸収する油圧ダンパーを用いた制震構法がある。

そこで、層間変形を「てこ(梃子)とリンク機構」を応用し、油圧ダンパーのストローク速度と変位量を増幅させ、エネルギー吸収効率を向上させるトグル制震構法³⁾を採用した。

トグル制震装置は、X方向のラーメン構造で靱性を期待できる2階から10階に配置し、1階は既補強を考慮した強度型補強とし、不足する場合はK型ブレースを増設する。

また、居住者に迷惑をかけないよう室内での取り付けとし、廊下での作業を極力減らすようにした。

5.2 解析方法

解析方法は、既存建物を多質点系せん断バネモデルに

置換し、トグル制震装置のダンパー減衰を減衰マトリクスに付加し、直接積分法による弾塑性立体応答解析プログラムによる時刻歴応答解析⁴⁾を行った(表-2)。

表-2 建物解析条件

振動モデル	既存建物	11質点の等価せん断型モデル					
	制震装置	既存建物架構内制震装置:柱の両端をピン(軸剛性のみを考慮)としたフレームモデル					
	全体	既存建物と既存建物架構内制震フレームを剛床で連結					
固有周期(s)	制震装置	油圧ダンパー:マクスウェルモデル 腕及びピン支承:スリッパモデル	X方向		Y方向		
			補強前 (スリッパ施工後)	補強後	補強前 (スリッパ施工後)	補強後	
			T ₁	0.503	0.506		
			T ₂	0.207	0.208		
T ₃	0.128	0.129					
復元力特性	既存建物	平面骨組弾塑性増分解析により得られた各層のせん断力と層間変位の関係を基に設定し、履歴法則はDegrading Tri-Linear型(武田モデル)とする。					
	制震装置	減衰マトリクスは瞬間剛性比例型の内部粘性減衰マトリクスとし、減衰定数は1次振動系に対して3%とする。制震装置(油圧ダンパー)の減衰係数Cは折れ線型(逆行型)モデルとし、直接減衰マトリクスに加える。					
耐震性能目標	地震動レベル	既存建物		制震装置			
	極めて稀に発生する地震動	最大層間変形角 1/125以下(2~11階) 1/250以下(1階)		油圧ダンパー最大減衰力 850kNダンパー:850kN以下 油圧ダンパー最大変位 100mm以下			

5.3 解析モデル

地震応答解析用のモデルとして、鉄骨枠内にトグル制震装置を設置した場合を線材置換した解析モデルを図-4に示す。また、既存建物の振動モデルを多質点系にモデル化し、その質点系の既存建物と水平変位が剛床で連結され、軸応力が伝達できる平面架構にトグル部材を各住戸に配置した全体系のモデル(図-5)により地震応答解析⁵⁾を行った。

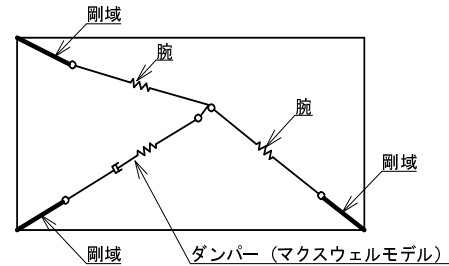


図-4 トグル制震ブレースの線材置換モデル

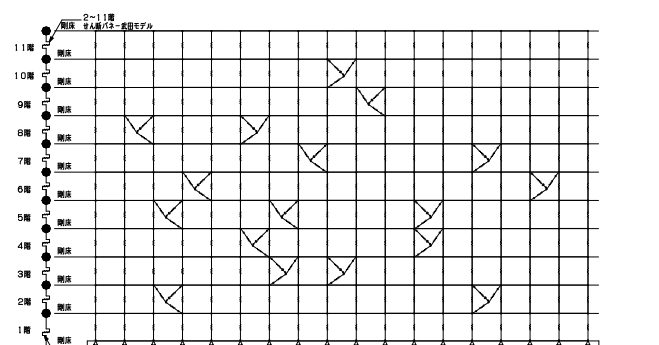


図-5 既存建物とトグル配置モデル

(1) 既存建物とトグル部材の解析モデル

既存建物解析モデルは、静的漸増増分解析を行い各層の復元力特性を設定し、質点系にモデル化した。

トグル制震構法を構成するトグル部材の解析モデルを以下に示す。

- a) トグル腕、油圧ダンパーを実際の形状で入力した。
- b) トグル腕と鋼管とガセットプレートの軸剛性を考慮した。
- c) ピン穴とピンシャフトのクリアランスを、スリップモデルとした。
- d) 油圧ダンパーは、性能実験により得られたバネを含んだマックスウェルモデルとした。

(2) 復元力特性

- a) 2階から11階の復元力特性は、修正武田モデルとした。
- b) 1階に設置されている鉄骨K型ブレースの復元力特性は、バイリニアモデルとした。

(3) その他の部材条件

- a) SRC造部鉄骨材のラチス材を考慮した。
- b) 梁についてはスラブの有効幅、せん断スパン比などを考慮した。

5.4 トグル制震装置の特徴

トグル制震装置は、「てこ（挺子）とリンク機構」を応用した増幅機構型の制震ブレースで、図-6に示すように2本のトグル腕と1本の油圧ダンパーを回転支承（鍛造品）で回転可能に接合し、鉄骨枠内に屈曲させて設置した装置である。トグル制震装置の各部材の構成、名称を図-7に示す。

また、各部材をピン接合することで、主に軸応力により増幅倍率を得ることが可能となる⁹⁾。

制震性能の特徴は、建物構造の層間の変位をトグルの増幅機構により拡大し油圧ダンパーに伝達させることで、変位増幅と力の分散機構により地震エネルギー吸収効率を高め建物に大きな減衰を付与し建物の地震応答を低減することである。

この増幅倍率の設定が設計上建物に大きな減衰を付与するための重要なパラメータとなり、増幅倍率は施工性も考慮し、通常2.0~3.0の値を設定している。

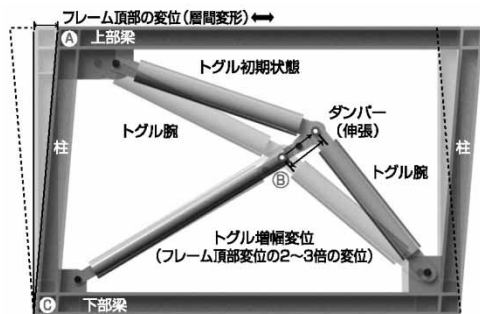


図-6 トグル制震装置のしくみ

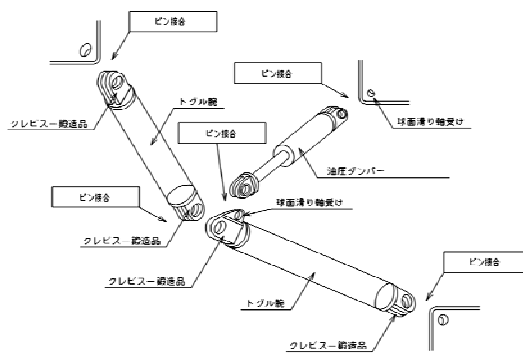


図-7 トグル制震装置の装置構成

5.5 補強位置の検討

トグル制震装置は、補強計画より空き部屋となっている部屋を中心に適宜配置し、地震応答解析の結果に応じ、建物中央の階段室の左右バランスにも考慮した配置とする。

配置については、図-8に住宅階として4階の伏図を、図-9に軸組図を示す。

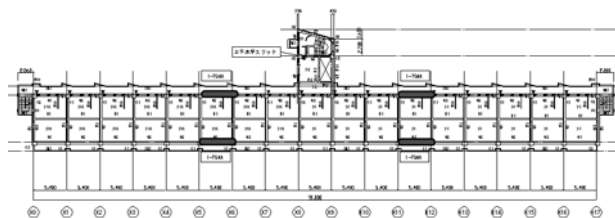


図-8 補強後の伏図(4階平面)

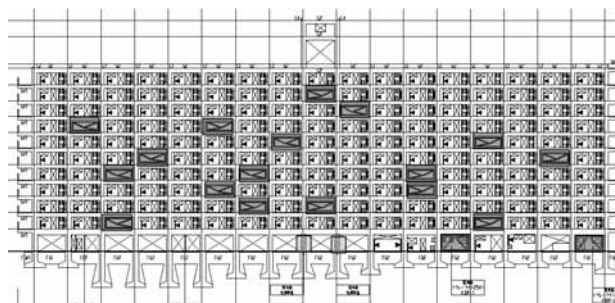


図-9 補強後の軸組図(廊下側)

5.6 設計用入力地震動

設計用入力地震動の大きさは、本建物が過去に受けたことのある地震動のうち最強と考えられるもの、および将来において受けることが予測される最強の地震動レベルとした。

表-3に入力地震動一覧を示し、地震動波形の一部として、サイト波の時刻歴波形と加速度応答スペクトル(トリパタイト表示)を図-10に示す。

(1) 想定する工学的基盤

建設地点の地盤特性および地震活動を考慮し、観測波は地表面、告示波とサイト波(検討対象地点の地震活動を考慮した地震動)は工学的基盤(せん断波速度が約

400m/s 以上の基盤)として設定した。なお、本建物は、せん断波速度が 700m/s 程度の土丹層に直接支持されているため、入力地震動は基盤波としている。

表-3 設計用入力地震動と大きさ

種類	数量	規定位置	地震動の特徴	加速度 (cm/s/s)	強度レベル
観測波	3波	地表面	観測記録 ・ El Centro NS ・ Hachinohe NS ・ Taft EW	—	最大速度振幅 50cm/s
				510.8	
				333.7	
				496.5	
告示波	3波	工学的基盤	位相特性 ・ 海溝型地震 ・ 内陸型地震 ・ 一様乱数	—	告示第 1461 号に規定された「極めて稀に発生する地震動」の加速度応答スペクトルに適合する
				341.1	
				364.3	
				351.4	
サイト波	2波	工学的基盤	・ 海溝型地震(多摩直下地震) ・ 内陸型地震(立川断層地震)	319.5	
				290.1	

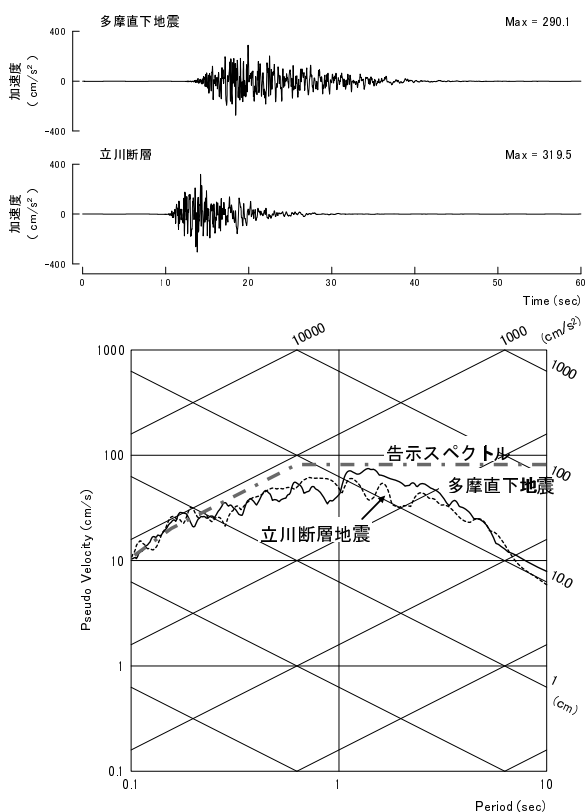


図-10 サイト波の時刻歴波形と加速度応答スペクトル

(2) 採用する地震波

設計用入力地震動として以下の3種類の地震動を設定する。

a) 観測波 (最大速度振幅を 50cm/s に基準化)

EL-CENTRO-NS, HACHINOHE-NS, TAFT-EW の標準3波とする。

b) 告示波

建設省告示第1461号は、超高層建築物の構造耐力上の安全性を確認するための構造計算基準を定めたものである。極めて高い安全性が要求されることから、本耐震改修工事においても同程度の安全性を付与することを目的に、入力地震動として告示第1461号を適用する。

c) サイト波

海溝型地震と内陸型地震の二種類の地震を対象とし、検討対象地点近傍の地震発生源の中から、建設地点の地震危険度に最も影響が高いものを選定する。

海溝型地震としては、中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」⁷⁾が地震発生の切迫性が高いとしている多摩直下地震 (M7.3) を選定した。

内陸型地震としては、検討対象地点の周辺の活断層から、断層の規模や発生確率等を考慮して、要注意活断層⁸⁾の一つである立川断層が破壊した場合の地震として立川断層地震を選定した。

6. 解析結果

6.1 地震応答解析結果

設計用入力地震動8波における時刻歴応答解析を行った結果を以下に示す。

応答解析による層間変形角の補強前の結果と補強後の結果を図-11にそれぞれ示す。すべての地震波において各階層間変形角は表-1に示す設計クライテリアを満足している。制震装置についても応答値での各部材強度は許容値以内であり、問題ないことを確認している。

6.2 地震エネルギー吸収の比較

応答制御型の補強において重要なファクターとなる地震エネルギー吸収量について、トグル制震補強の前後による比較を行った。地震入力全体、建物の塑性歪、内部粘性減衰、トグル制震装置、そして運動の各エネルギーを図-12に示す。

補強前では、建物塑性エネルギーは全体の80%程度を占め、建物の主要構造部材が壊れ塑性化したことにより地震エネルギーを吸収している。一方、補強後では、塑性エネルギーは全体の20%程度と減少しており、代わりに装置の吸収エネルギーが全体の67%程度となりトグル制震装置が地震エネルギーの多くを吸収していることが分かる。

また、補強前に比べ補強後の塑性歪エネルギーは70%程度減少しており、エネルギー吸収の観点からもトグル制震補強により建物の塑性化が減少していることが分かる。

6.3 補強後の建物の性能

これまでの検討結果から、トグル制震装置により補強した建物は、今後建物が存続する期間において想定される最大規模の地震に対し、柱・耐震壁等がせん断破壊を起こさず建物が倒壊に至ることなく、居住者の避難が容易にできるような性能まで、建物耐震性能の実力を向上させることができたものとする。

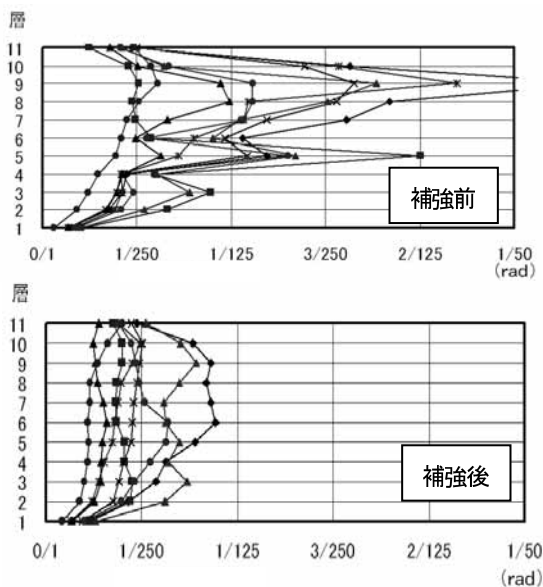


図-1 1 地震応答解析結果 (トグル制震装置補強前後)

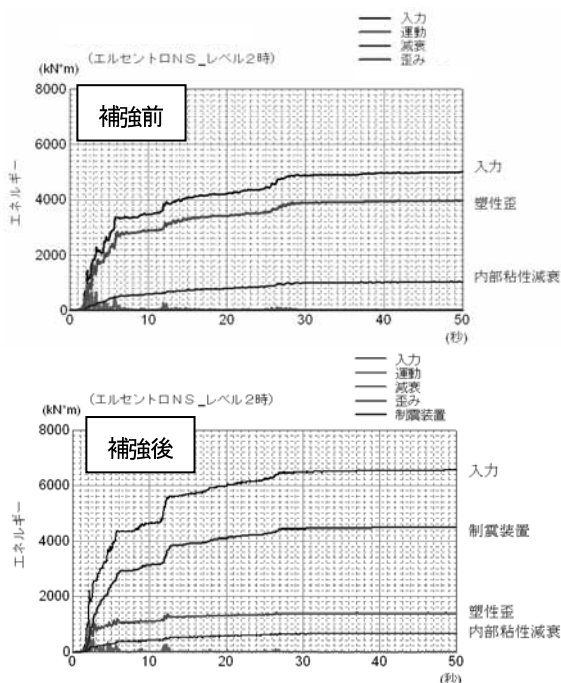


図-1 2 地震エネルギーの時刻歴

7. まとめ

耐震改修は今から 40 年前の建物を現行の法に照らし合わせ、既存建物として成立させなければならない。

今回試みた設計法は、法的に不適格となっている建物の実力を限界まで引き出し、トグル制震による変形制御による補強は今後の設計における規範を示せたと言える。

謝辞：今回の設計並びに構造評定に関わって頂いた方、長い設計期間において助言を頂いた方のご協力の下、大きな成果を上げることができました。ここに紙面をお借りして厚く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 久保田雅春, 石丸辰治ほか：増幅機構を用いた制震構造システムに関する研究, 第5回シンポジウム運動と振動の制御, (社)日本機械学会, 1997.11
- 2) 久保田雅春：トグル機構を用いた耐震補強, 建設機械, 日本工業出版, 1998.5
- 3) 榎谷英次ほか：図解 RC 造建物の耐震補強, 耐震補強研究会編, オーム社, pp.92-100, pp.181-190, 2008.5
- 4) 石丸辰治：応答性能に基づく「対震設計入門」, 彰国社, 2004.3
- 5) Masaharu Kubota, Shinji Ishimaru, Yasuo Maekawa : Analytical Study of Structural Control with Mechanism for Retrofitting Existing R/C Structures, Society of Photo-Optical instrumentation Engineers (SPIE), 1998.3
- 6) 久保田雅春・石丸辰治・秦一平：Application of Amplification Mechanisms for Seismic Response Control of Structures, 第2回世界構造制御会議, (社)日本建築学会他, 1996.8
- 7) 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」：http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/12/shiry_o2-2.pdf
- 8) 地震調査研究推進本部；<http://www.jishin.go.jp/main/>

Summary : This paper describes the seismic retrofit design methods for high-rise reinforced concrete condominiums, which were popular in the 1970s, and the methods for defining design criteria, or the goal of retrofit. In the retrofit for seismic response control unlike in ordinary seismic retrofit, the seismic performance of buildings is assessed by time-history response analysis. Properly assessing the deformability or other parameters of buildings is required. One of the methods of examination is described in this paper. Installing toggle seismic response control systems in vacant houses enabled seismic retrofit while occupants are leading their daily lives.

Key Words : Seismic Retrofit, Structure and Design Criteria, Toggle Response Control System, Using Reinforcement Housing,