

論文 エネルギー釣り合いに基づく純ラーメンRC建物の制振補強設計手法

古間直希*1・向井智久*2・衣笠秀行*3・野村設郎*4

要旨：純ラーメン RC 建物の履歴減衰型ダンパーによる制振補強設計手法の提案を行う。提案する手法は純ラーメン RC 建物を等価な 1 質点系へ縮約し、その 1 質点系に対して制振補強を行い、再度純ラーメン RC 建物へ展開するという流れである。まず本手法を提案するために柱にマルチスプリングモデルを用いた純ラーメン RC 建物を対象に、純ラーメン RC 建物から等価 1 質点系への縮約手法および制振補強された等価 1 質点系から純ラーメン RC 建物への展開手法について検討し、その妥当性を確認した。さらに提案する手法を用いた制振補強設計のケーススタディを行い、本手法の有効性を確認した。

キーワード：エネルギー釣り合い、繰り返し数、純ラーメン RC 建物、履歴型ダンパー

1. はじめに

近年、公共建物を中心に耐震改修が数多く行われるようになり、その技術の一つとして履歴減衰型ダンパーを用いた制振補強がある。純ラーメン RC 建物に制振補強を行う場合、現行の耐震改修設計指針では地震応答解析によりその補強効果を確認する必要がある¹⁾。そこで本研究では、図-1に示すフローに基づいて地震応答解析を行わずに制振補強設計を行うための簡易的な手法を提案する。本手法の特徴は、1 質点系を用いた手法であること、また図中(2)の手順において、エネルギー入力速度概念に基づき地震動の威力を評価したエネルギー釣り合いを用いて、地震応答解析を行うことなくダンパ

ーの耐力を決定することである。

本論文は、2章、3章において図-1における(1) 1 質点系への縮約及び(3) フレーム建物への展開についての検討を行い、本設計手法の妥当性を検討する。つづいて4章において 1 質点系の制振補強法(図-1 (2))について示す。最後に5章において実際の建物を想定したケーススタディを行い、本手法の有効性を検証する。

2. 等価1質点系への縮約手法とその妥当性

2.1 解析建物概要

解析対象とする建物は、梁間、桁行方向共に 6.0m × 3 スパンの平面形状を有する 4 層(以下 RC4)及び 12 層(以下 RC12)の純ラーメン RC 建物である(図-

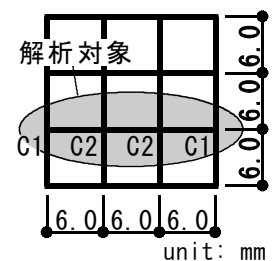


図-2 平面図

2)。部材断面、各階重量、各層階高を表-1から表-3に示す。なお各建物のベースシア係数

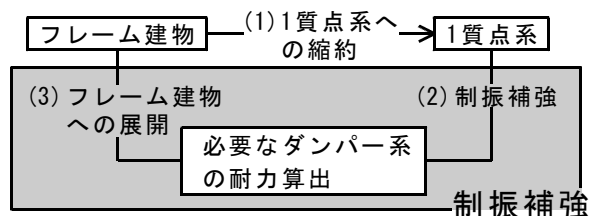


図-1 純ラーメンRC建物の制振補強フロー

- | | | | | |
|----|--------|----------|-----|----------|
| *1 | 東京理科大学 | 理工学部建築学科 | | (正会員) |
| *2 | 東京理科大学 | 理工学部建築学科 | 助手 | 工博 (正会員) |
| *3 | 東京理科大学 | 理工学部建築学科 | 助教授 | 工博 (正会員) |
| *4 | 東京理科大学 | 理工学部建築学科 | 教授 | 工博 (正会員) |

表-1 部材断面の詳細

梁部材 [b×D=400×700(RC4), 500×800(RC12)]

	階	Fc N/mm ²	Pt %	Pw %	σ _y N/mm ²	σ _{wy} N/mm ²
RC4	3~RF 2F	24	0.724	0.318	345	295
		24	0.845	0.423	345	295
RC12	12~RF	24	0.51	0.51	345	345
	10~12F	24	0.80	0.68	390	345
	8~9F	30	0.96	0.68	390	345
	6~7F	30	1.19	0.68	390	345
	5F	36	1.19	0.68	390	345
	2~4F	36	1.67	0.68	390	345

柱部材 [b×D=600×600(RC4), 850×850(RC12)]

	層	柱位置	Fc N/mm ²	主筋	Pw %	σ _y N/mm ²	σ _{wy} N/mm ²
RC4	3~4	C1	24	12-D25	0.423	345	295
		C2	24	16-D25	0.423	345	295
	1~2	C1, C2	24	16-D25	0.423	345	295
RC12	9~12	C1, C2	24	16-D29	0.299	390	345
	5~8	C1, C2	30	16-D32	0.299	390	345
		C1	36	16-D35, 8D-35	0.299	390	345
	3~4	C2	36	16-D32	0.299	390	345
		C1	36	16-D35, 8D-35	0.299	390	345
	2	C2	36	20-D35	0.299	390	345
		C1	36	20-D35, 8D-35	0.299	390	345
	1	C2	36	20-D35	0.299	390	345
		C1	36	20-D35	0.299	390	345
		C2	36	20-D35	0.299	390	345

C1:側柱, C2:中柱

表-2 各階重量

RC4		RC12	
RF	1475 (kN)	RF	1671 (kN)
3~4F	1159 (kN)	3~12F	1406 (kN)
2F	1191 (kN)	2F	1429 (kN)

表-3 各層階高

RC4		RC12	
3~4(層)	3.5 (m)	2~12	3.5 (m)
2	3.525 (m)	1	3.575 (m)
1	3.625 (m)		

は RC4 が 0.26, RC12 が 0.20 で、いずれも梁降伏型となるよう設計している。柱部材には M-N インタラクションを考慮できるマルチスプリングモデル(以下 MS モデル)を用い、せん断バネは原点指向の Tri-Linear 型とした。梁部材は曲げ、せん断変形を考慮し、曲げバネは Degrading Bi-Linear 型、せん断バネは原点指向の Tri-Linear 型としている。なお、MS モデルにおけるコンクリートバネ及び鉄筋バネの復元力特性は文献2)と同じものを使用した。

2.2 等価1質点系への縮約手法

本手法はフレームの降伏時 1 次周期 T_{ey} とベースシア係数 C_B を保存するという非常に簡易な縮約手法である³⁾。以下に等価 1 質点系への縮約手法を示す。

(1)外力分布は A_i 分布に基づき、静的非線形解析を行い、各層の層せん断力-層間変形関係(以

下 $Q_i-\delta_i$ 関係)を算出。

(2)各層の $Q_i-\delta_i$ 関係を Tri-linear 化し、降伏時の C_B 及び各層の降伏時剛性 K_{eyi} を算出。なお Tri-linear 化は文献2)と同じ手法を用いた。

(3)(2)で得られた K_{eyi} と各階の質量を用いて固有値解析を行い、1 次の T_{ey} を算出。

(4)次式により等価 1 質点系の降伏時剛性 K_{ey} を算出。

$$K_{ey} = 4\pi^2 M_{all} / T_{ey}^2 \quad (1)$$

ただし、 M_{all} : 建物全質量

(5)(2)で得られた C_B と式(1)で得られた K_{ey} から等価 1 質点系の Bi-linear 型骨格曲線を作成。

2.3 縮約された等価1質点系の妥当性

続いて地震応答解析を行い、2.2節で示した手法(以下、手法 1)により作成された等価 1 質点系とフレームモデルの応答を比較する。その際、文献4)で用いられている縮約手法(以下、手法 2)により作成された等価 1 質点系の応答も併せて比較する。なお、等価 1 質点系の除荷時剛性はフレームモデルにおける 1 層のせん断力-代表高さ変位関係により囲まれる面積と、等価 1 質点系のせん断力-変位関係により囲まれる面積が等しくなるような塑性率の関数で表す。ここで代表高さとは、手法 1 では降伏時の、手法 2 では弾性時の 1 次の刺激関数 $i\beta_{1ui}=1.0$ の高さとしている。

使用地震動は EL Centro NS, JMAKOBE NS, TAFT EW の 3 波(以下 ELCE, KOBE, TAFT と表記する)で、それぞれ最大速度が 25, 50, 75kine となるように基準化したものを使用した。建物の減衰は瞬間剛性比例型で、減衰定数は 3%である。以上の解析を CANNY99⁵⁾で行う。

図-3に等価 1 質点系の応答値を横軸に、フレームモデルの応答値を縦軸に示す。上から(a)(b)平均応答変形(m)(正負最大変形の平均値)、(c)(d)最大応答変形(m)の対応を示す。なおフレームモデルの応答変形は代表高さの応答変形である。

図-3より、いずれの手法においてもフレームモデルと等価 1 質点系の応答変形は高い相関

があるといえる。

つづいてレベル別

に検討すると、図－3(b)(d)の範囲Aにおける 25kine 及び、50kine の ELCE では手法 1 の精度が、手法 2 をやや下回っている。これは手法 1 が塑性化するフレームモデルを想定し降伏時周期を保存するように簡便にモデル化されているが、範囲Aの 4 ケースのフレームモデルが十分

に塑性化していないことが原因である。しかし、フレームモデルに十分な塑性化が見られる他のケースにおいては、手法 1 は手法 2 と同程度の精度を有しており、柱に MS モデルを用いたフレームモデルにおいても、本論文で提案する手法 1 により等価 1 質点系へ簡易に縮約することが可能であると言える。

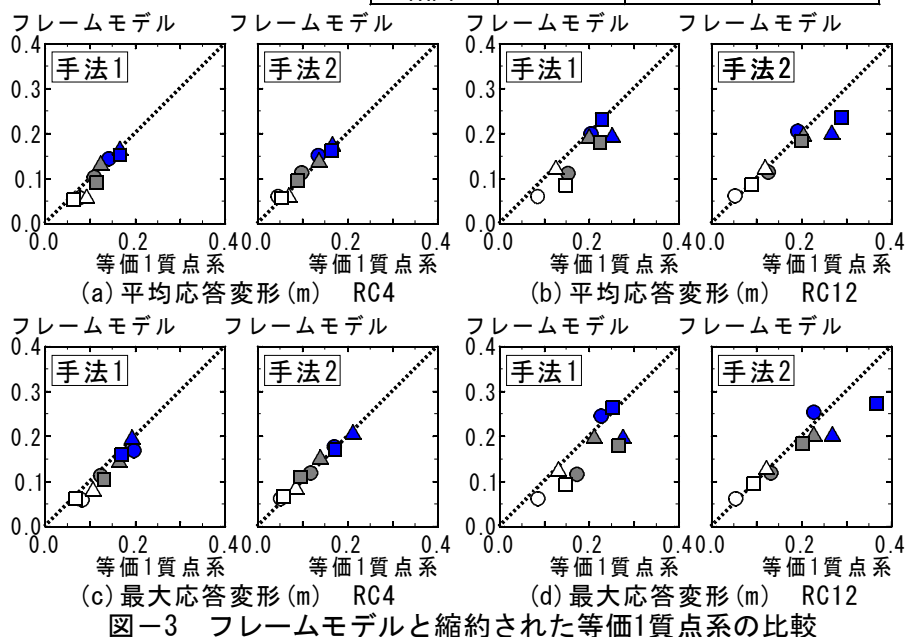
3. フレームモデルへの展開手法とその妥当性

3.1 展開手法

2章で示した手法 1 によりフレームモデルを等価 1 質点系に縮約した後、図－1 (2)の手順(4章にて後述)から、ある設計用地震動を決定した際に RC 躯体を弾性に抑えるために必要なダンパーの剛性比 γ (ダンパーの初期剛性と RC 躯体の降伏時剛性の比)及び耐力比 β (ダンパーの耐力と RC 躯体の耐力の比)が算出される。そこで本章では、求められた γ , β をフレームモデルへ展開するための手法を検討する(図－1(3))。なお、手法 2 についても同様に検討する。

展開手法では、図－1 (2)において得られる等価 1 質点系の剛性比 γ 、耐力比 β (以下目標値 γ , β)と、フレームモデルの各層の剛性比 γ_i 、耐力比 β_i が等しくなるように、各層のダンパ

	25kine	50kine	75kine
ELCE	○	●	●
KOBE	△	▲	▲
TAFT	□	■	■

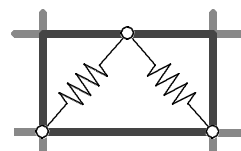


図－3 フレームモデルと縮約された等価1質点系の比較

一の剛性及び耐力を決定している。なお、このダンパーの配置方法は、目標値 γ , β と、フレームモデルの代表高さの変位、ベースシアで算出される γ , β (以下代表値)を等しくする一例であるが、ここで示す以外の配置方法でも代表値が目標値 γ , β を満足していれば、おおむね本手法を適用できるものと考えられる。

3.2 解析パラメータ

3.1節の手法の精度検証を行うために、制振補強した等価 1 質点系とフレ



図－4 K型ダンパー

ームモデルに対して地震応答解析を行い、比較する。フレームモデル及びその等価 1 質点系は2章で示したものをを用いる。またフレームモデルの制振補強部材には K 型ダンパー(図－4)を用い、RC4 では中央のスパンのみに、RC12 では 3 スパン全てに配置した。ダンパーの復元力特性は完全弾塑性型とし、ダンパーの両端はピン接合となっている。表－4に γ , β の解析パラメータを示す。また、使用地震動及び減衰定数は2.3節と同様である。

表－4 剛性比 γ と耐力比 β の解析パラメータ

RC4		RC12	
γ	0.83, 1.11, 1.67, 3.33	γ	0.83, 3.33
β	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	β	0.2, 0.5, 0.8

3.3 制振補強したフレームモデルと等価1質点系の比較

図-5に各建物、手法別に制振補強したフレームモデルと等価1質点系の(a)(c)平均応答変形(m)、(b)(d)最大応答変形(m)の対応を示す。横軸は等価1質点系の応答変形を、縦軸はフレームモデルの等価高さの応答変形を表している。図-5より、手法1, 2共に等価1質点系とフレームモデルの応答変形には相関性が見られる。建物別に検討すると、RC12においては両

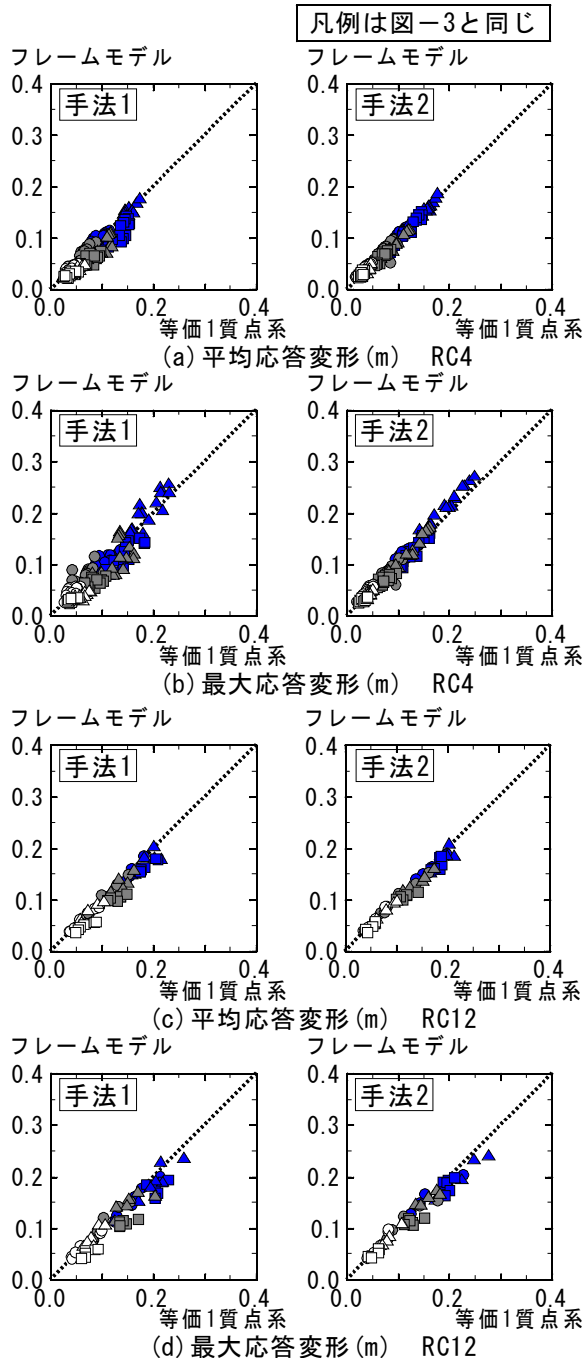


図-5 制振補強したフレームモデルと等価1質点系の比較

手法共にほぼ同程度の精度を有していると言えるが、RC4において手法1は手法2と比較しややばらつきが見られる。しかしRC4においても、平均応答変形(図-5(a))の精度は比較的高い精度となっている。本手法は平均塑性率を目標塑性率以下にする手法であるため、平均応答変形の精度が重要であると考え、手法1においても3.1節の手法を用いてフレームモデルへの展開が可能であると判断する。

したがって図-1(3)の手順において、3.1節の展開手法を適用し、等価1質点系において求められた剛性比 γ 、耐力比 β からフレームモデルにおける各層のダンパーの剛性、耐力を決定する。

4. 等価1質点系の制振補強

図-1のフローにおける(2)にあたる等価1質点系の制振補強の概略について示す。既往の研究において、1質点系にモデル化されたRC躯体に対し、エネルギー入力速度概念に基づいたエネルギーの釣り合いにより設計用地震動に対して建物がある変形量に制御するために必要なダンパー耐力の算出手法を提案している²⁾。1質点系モデルにおける制振補強フローを図-6に示す。耐力比 β' 、ダンパー降伏耐力 P_{yd}' 、累積塑性変形倍率 η は、エネルギーの釣り合いに基づき各々次式で表される。

本フローはまず剛性比 γ を決定した後、パラメトリックに耐力比 β を設定し、式(2)を用い

$$\beta' = \frac{P_{yd}'}{P_{yf}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} = f(\mu_{af}, ED, ND) \quad (2)$$

ここで、 $A = (1 - 8ND) / \gamma$ 、 $B = 8ND \cdot \mu_{af}$

$$C = 1 + 4(\mu_{af} - 1) \{1 + 2\xi(ND - 1)\} + 4\pi h_0 \mu_{af} ND - \frac{2K_{ey} \cdot ED}{P_{yf}^2}$$

ξ : ループ面積係数 (文献2)参照)

μ_{af} : RC躯体対の平均塑性率

P_{yf} : RC躯体対の降伏耐力

$$P_{yd}' = \sqrt{\frac{2ED \cdot \gamma^2 \cdot K_{ey}}{(1 + 4\pi h_0 \cdot ND) \mu_{ad}^2 + 8\gamma \cdot ND \cdot \mu_{ad} + \gamma(1 - 8ND)}} \quad (3)$$

$$= f(\mu_{ad}, ED, ND)$$

ここで、ED: 入力エネルギー量、 μ_{ad} : ダンパーの平均塑性率
 h_0 : 初期減衰定数、ND: 繰り返し数

$$\eta = 4ND(\mu_{ad} - 1) \quad (4)$$

ることで、RC 躯体の平均塑性率 μ_{af} が 1.0 以下となるダンパー耐力の範囲を決定する。(ED, ND は等価周期を算出した後、粘弾性応答スペクトルより算出する)。つづいてダンパーの平均塑性率 μ_{ad} を設定して、式 (3) を用いて最終的なダンパー耐力を決定する。その後式 (4) を用いてダンパーの累積塑性変形倍率の検討を行うという流れである。なお、本フローは $\mu_{af}=1.0$ となることが実現可能な β の範囲が存在するかを簡易に判定でき、存在しない場合には γ の再設定、もしくは補強方法の変更を行うことも可能にしている。

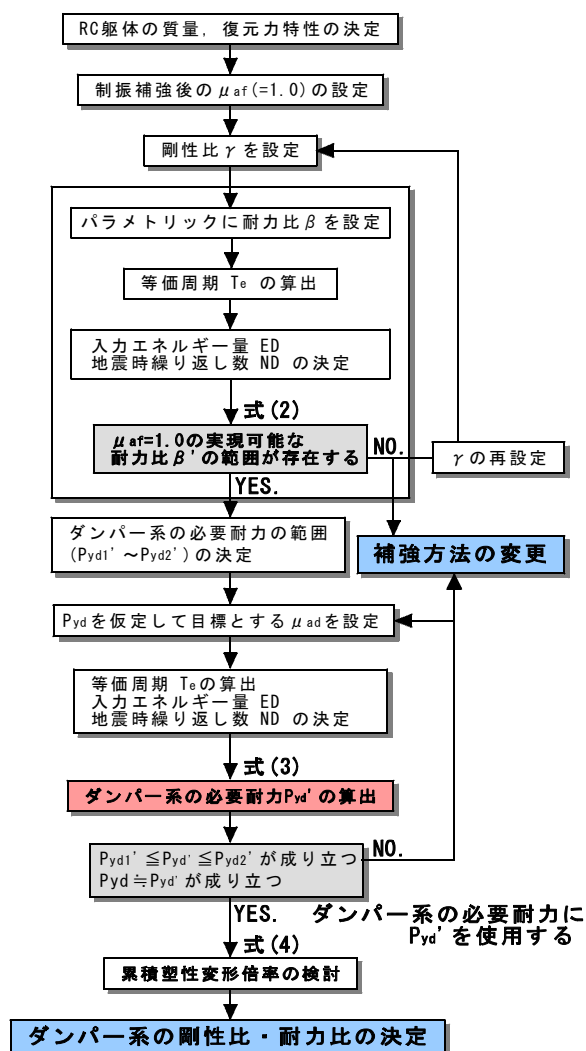


図-6 1質点系における制振補強フロー

5. ケーススタディ

2章及び3章の検討結果より、図-1に示したフローの有用性が確認された。本章では実際に多層 RC 建物を想定し、K 型の履歴減衰型ダン

パーを用いて、塑性化する RC 躯体を弾性に制御する制振補強設計を行う。

5.1 解析概要

対象建物は、図-2と同じ 6m × 3 スパンの平面形状を持つ 7 層 (以下 RC7) 及び 15 層 (以下 RC15) の RC 建物 (それぞれ階高 3.5m) である。RC7 は中央のスパンのみ、RC15 は、全スパンにダンパーを配置する。また柱には MS モデルを使用している。部材断面・各階重量については表-5及び表-6に示す。設計用地震動は、HACHINOHE NS 及び FUKIAI N330E を使用し、フレームモデルが地震動によって塑性化するものを対象としているため最大速度が 50, 75kine に基準化したものを使用する (以下 HACHI50, FUKI75 と表記)。また、繰り返し数 ND 及び入力エネルギー量 ED を算出するにあたり、5%の粘弾性応答スペクトルを使用する。躯体を弾性範囲に抑えるため、目標平均塑性率は 1.0 である。なお、RC7 における剛性比 γ を 2.0, RC15 における γ を 1.4 と設定し設計を行う。

表-5 部材断面の詳細
梁部材 [b × D = 500 × 800 (RC7, RC15 共通)]

	階	Fc N/mm ²	Pt %	Pw %	σ_y N/mm ²	σ_{wy} N/mm ²
RC7	7~RF	24	0.51	0.51	345	345
	5~6F	24	0.8	0.68	390	345
	3~4F	30	0.96	0.68	390	345
	2F	30	1.19	0.68	390	345
RC12	15~RF	24	0.51	0.51	345	345
	13~14F	24	0.8	0.68	390	345
	11~12F	30	0.96	0.68	390	345
	9~10F	30	1.19	0.68	390	345
	8F	36	1.19	0.68	390	345
	2~7F	36	1.67	0.68	390	345

柱部材 [b × D = 850 × 850 (RC7, RC15 共通)]

	層	柱位置	Fc N/mm ²	主筋	Pw %	σ_y N/mm ²	σ_{wy} N/mm ²
RC4	4~7	C1, C2	24	16-D29	0.3	390	345
	1~3	C1, C2	30	16-D32	0.3	390	345
RC12	12~11	C1, C2	24	16-D29	0.28	390	345
	8~11	C1, C2	30	16-D32	0.28	390	345
	6~7	C1	36	16-D35, 8D-35	0.42	390	345
		C2	36	16-D32	0.42	390	345
	5	C1	36	16-D35, 8D-35	0.42	390	345
		C2	36	20-D35	0.42	390	345
	1~4	C1	36	20-D35, 8D-35	0.42	390	345
		C2	36	20-D35	0.42	390	345

C1: 側柱, C2: 中柱

表-6 各階重量

RC7		RC15	
RF	1671 (kN)	RF	1671 (kN)
2~7F	1406 (kN)	2~15F	1406 (kN)

5.2 ケーススタディの結果

図-1に示した本手法の流れで制振補強設計を行い、そのフレームモデルに対し地震応答解析を行った結果を表-7に示す。本手法は、フレームモデルの代表高さの平均塑性率を目標塑性率以下とする手法である。表-7から各建物、地震動において補強後の平均塑性率が1.0以下となっており、本手法の有効性を確認することができた。しかしRC7におけるHACHI75、FUKIAIにおいては目標塑性率を下回る結果となった。これは式(2)、(3)、(4)におけるエネルギー釣り合いのモデル化で、降伏前の繰り返し履歴吸収エネルギーを考慮していないが、フレームモデルは柱をMSでモデル化しているため建物が降伏前の繰り返し履歴エネルギーを吸収し、その結果目標塑性率を下回ったと考えられる。

またRC7はRC15と比較し無補強時に大きな塑性率を示していたが、補強後の塑性率は小さな値を示し、比較的大きな補強効果があったと言える。そこで、設計用地震動をHACHI75としたケースに着目して検討する。図-7は5%のVE(入力エネルギー速度換算値)スペクトル及びND(繰り返し数)スペクトルと、降伏時周期 T_{ey} (補強後の T_{ey} は目標塑性率が1.0の時、図-6における等価周期 T_e と等しい)からスペクトルを用いて算出したVE、NDを無補強時、補強後それぞれについて示したものである。この図からRC15においてVE、NDの値はほぼ同じであることから、RC15はダンパーの履歴吸収エネルギーのみの補強効果が表れている。一方RC7においてはVEの値が大きく減少し、NDも減少している。入力エネルギーが減少することは当然応答を制御することにつながるが、NDの減少は繰り返しによるエネルギー吸収量を小さくし、応答が大きくなることを意味する。しかしRC7においてはVEの減少がより大きな影響を与え、結果として高い補強効果が得られた。このように各スペクトルの形状を考慮して地震応答解析を行わずに適切に制振補

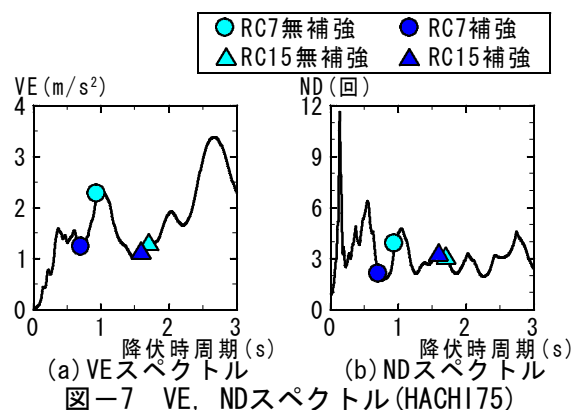
強を行えることは、本手法の大きな特徴である。

6. まとめ

本論では純ラーメンRC建物を対象に、地震応答解析を行わない、履歴型ダンパーを用いた制振補強設計手法の提案とその手法の妥当性について検討した。最後に本手法を用いた制振補強設計のケーススタディを行いその有効性を示した。

表-7 ケーススタディの結果

地震波	kine	無補強時 塑性率		γ	β	補強後 塑性率	
		最大	平均			最大	平均
RC7							
HACHINOHE	75	2.365	1.863	2.00	0.772	0.662	0.575
FUKIAI	50	3.32	3.053	2.00	0.627	0.605	0.483
FUKIAI	75	4.964	4.629	2.00	1.126	0.757	0.727
RC15							
HACHINOHE	75	1.247	1.243	1.40	0.158	0.974	0.85
FUKIAI	50	2.006	1.704	—	—	—	—



謝辞

解析には李康寧博士の立体骨組み解析プログラムCANNY99を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，2001
- 2) 向井智久，織裳慎一郎，衣笠秀行，野村設郎：RC造ピロティ建物の制振補強手法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，563号，pp.161-168，2003.1
- 3) 織裳慎一郎，向井智久，衣笠秀行，野村設郎：RC造ピロティ建物の1質点化に関する研究，日本建築学会関東支部研究報告集，2001，pp.225-228
- 4) 倉本洋，勅使川原正臣，小鹿紀英，五十田博：多層建築物の等価1自由度系縮約手法と地震応答予測精度，日本建築学会構造系論文集，第546号，pp.79-85，2001.8
- 5) Li Kang-Ning：Cann99，Three Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package，October，1996.