

# 論文 摩擦ダンパーを用いた既存鉄筋コンクリート造建物の耐震補強設計に関する研究

松本 優<sup>\*1</sup>・北嶋 圭二<sup>\*2</sup>・中西 三和<sup>\*3</sup>・安達 洋<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究は、耐震性能が劣る既存 RC 造建物に付加的なエネルギー吸収部材を組み込むことで耐震性能を向上させる、制震補強法の設計法に関する研究である。制震補強建物の補強効果を、地震応答解析を行わずに評価する方法として、耐震診断基準と同じ尺度の指標で評価する方法と等価線形化手法により評価する2つの方法を提案した。各提案手法で求めた補強効果と弾塑性地震応答解析で求めた補強効果の比較検討より、各提案手法の有効性を確認した。

**キーワード:** 既存鉄筋コンクリート造建物, 耐震補強設計, 応答制御, 摩擦ダンパー

## 1. はじめに

既存鉄筋コンクリート(以下, RC)造建物の耐震補強法の一つとして、付加的なエネルギー吸収部材(以下, ダンパー)を建物に組込むことにより耐震性能を向上させる制震補強法(以下, ダンパー補強)が開発されている<sup>1)</sup>。ダンパー補強建物の補強効果を確認するためには、一般的には地震応答解析を行って評価することが前提となっているが、現在、数多く行われている従来型補強の設計<sup>2)</sup>と同様に、耐震診断で得られた構造耐震指標  $I_S$  と補強目標  $R I_{S0}$  の差から、必要補強量が算定できれば実用的である。

本研究は、ダンパー補強建物の概算補強検討法として、ダンパーの必要補強量を地震応答解析を行わずに算定する方法について検討したものである。まず、ダンパー補強の補強効果をパラメトリックな弾塑性地震応答解析により調べ、その効果を耐震診断<sup>3)</sup>と同じ考え方に基づいて定式化した算定式で評価できることを示す。さらには、等価線形化手法により、補強効果を評価できることを示す。

## 2. ダンパー補強建物の耐震性能

耐震診断とは、その建物が耐えうる地震動の大きさで耐震性能を評価しようとする行為である<sup>3)</sup>。ただし、診断基準において耐震性能を表す具体的な指標は、地震動の大きさを直接示すのではなく、せん断破壊する建物に作用するせん断力係数(靱性指標 1 の時のせん断力係数)に換算して表記される<sup>4)</sup>。そこでまずは、靱性指標 1 のせん断力係数に換算する前の状態、すなわち、ダンパー補強建物の耐震性能として補強建物が耐えうる地震動の大きさ  $G_{max}$  (応答変位が補強目標変位を示すときの入力地震動の地動最大加速度)を地震応答解析により求め、無補強時の応答変位が同じ変位となる地震動の大きさ  $G_0$  と比較することで、ダンパー補強効果を調べる。この  $G_{max}/G_0$  を耐震性能上昇率  $n$  と定義する。

### 2.1 解析方法

ダンパー補強建物の解析モデルを図 1 に示す。補強建物の解析モデルは、補強対象の RC 造建物(主体構造)とダンパーの各々の抵抗機構をモデル化したせん断バネを並列結合した 1 質点系モデルとした。主体構造のせん断バネの履歴モデルは武田モデルを用い、ダンパーのせん断バネの履歴モデルは、バイリニアモデルを用いた。

\*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 (正会員)

\*2 (株) 青木建設研究所建築研究室主任研究員 工博 (正会員)

\*3 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)

\*4 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)

主体構造およびダンパーの解析変数を表-1に示す。主体構造の解析変数は、補強の必要性が高いと考えられる中低層のRC造建物を想定し、弾

性周期を0.2, 0.3, 0.4, 0.5sec, 降伏強度 $C_{Ystr}$ (強度指標)を0.2, 0.3, 0.4, 0.5とした。ダンパーの解析変数は、ダンパー強度比 $\alpha_c$ (ダンパーの降伏強度 $C_{Ydev}$ /主体構造の降伏強度 $C_{Ystr}$ )と、ダンパー剛性比 $\alpha_k$ (ダンパーの弾性剛性 $K_{dev}$ /主体構造の降伏点剛性 $K_{Ystr}$ )、主体構造の降伏変位 $\delta_{Ystr}$ に対するダンパーの塑性率 $\mu_{dev}$ (主体構造の降伏変位 $\delta_{Ystr}$ /ダンパーの降伏変位 $\delta_{Ydev} = \alpha_k / \alpha_c$ )と定義した。また、補強目標変位 $\delta_{max}$ は、主体構造の許容する塑性率 $\mu$ と主体構造の降伏変位 $\delta_{Ystr}$ の積で表現でき、 $\delta_{max}$ に対するダンパーの塑性率は $\mu \cdot \delta_{Ystr} / \delta_{Ydev}$ となり、 $\mu \cdot \mu_{dev}$ となる。解析は、補強目標変位を主体構造の塑性率 $\mu$ が1, 2, 3, 4の各々に対し、 $\alpha_k$ を一定として $C_{Ystr}$ に対して $C_{Ydev}$ ( $\alpha_c$ )を増分させた場合(CASE 1)と、 $\mu_{dev}$ を一定として $C_{Ystr}$ に対して $C_{Ydev}$ ( $\alpha_c$ )を増分させた場合(CASE 2)の2ケースを行った。CASE 1とCASE 2の $\alpha_c$ の増分方法を図-2に示す。入力地震動は、EL-CENTRO<NS>, TAFT<EW>, BCJL2<sup>5)</sup>を用いた。解析は、Newark- $\beta$ 法を用い、時間刻みを0.005sec, 減衰を3%の初期剛性比例型とした。

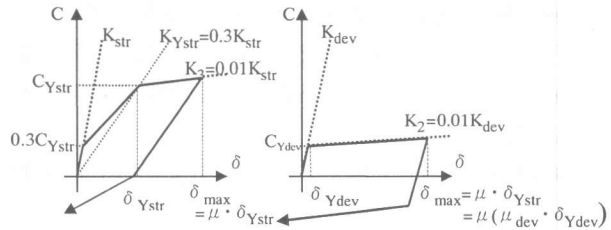
## 2.2 解析結果

図-3に主体構造の弾性周期0.3sec, 降伏強度0.3, 塑性率 $\mu$ を1および2とした時の $n(=G_{max}/G_0)$

表-1 解析変数

主体構造		ダンパー	
弾性周期	T=0.2, 0.3, 0.4, 0.5sec	CASE1	
(降伏周期)	T <sub>Y</sub> =0.37, 0.55, 0.73, 0.91sec	剛性比	$\alpha_k=0.83, 1.67, 2.50, 3.33$
(弾性剛性)	( $K_{str}=9673, 4302, 2421, 1548$ N/cm)	(弾性剛性比)	( $K_{dev}/K_{str}=0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ )
降伏強度	$C_{Ystr}=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$	降伏強度	$C_{Ydev}=0\sim 0.40$ (0.01刻み)
塑性率	$\mu=1, 2, 3, 4$	CASE2	
重量	W=9604N	塑性率*	$\mu_{dev}=4, 6, 8, 10$
		強度比	$\alpha_c=C_{Ydev}/C_{Ystr}=0\sim 1.0$ (0.025刻み)

塑性率\*:主体構造の降伏変位に対するダンパーの塑性率( $\mu_{dev} = \delta_{Ystr} / \delta_{Ydev} = \alpha_c / \alpha_k$ )



主体構造 (武田モデル)      ダンパー (バイリニアモデル)

図-1 解析モデル

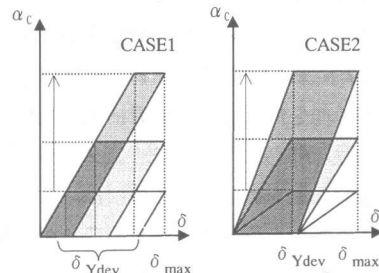


図-2  $\alpha_c$ の増分方法

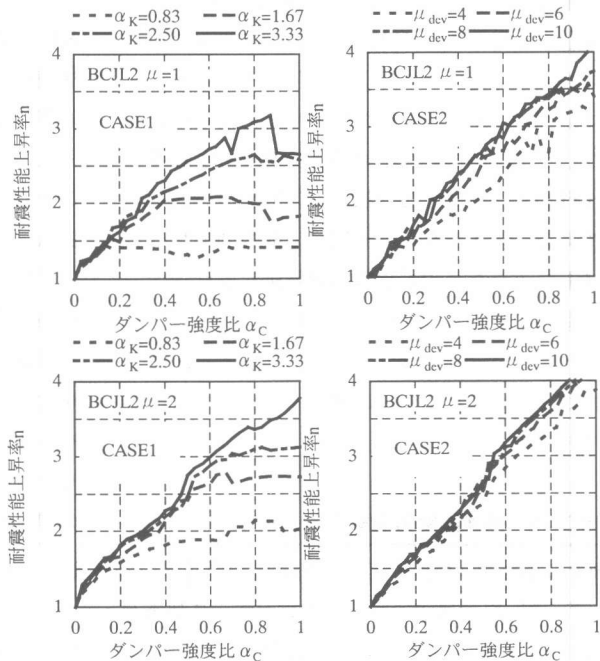


図-3  $n-\alpha_c$ 関係

と  $\alpha_c$  の関係を示す。CASE 1, 2 とともに,  $n$  は  $\alpha_c$  の増分とともに上昇した。CASE 1 の場合,  $n$  は  $\alpha_c$  を増分させても  $\alpha_K$  毎に上限があるが, CASE 2 の場合,  $\alpha_c$  の増分とともに上限なく上昇した。これは図-2 よりわかるように, CASE 1 の場合,  $\alpha_c = \mu \cdot \alpha_K / 2$  でダンパーの履歴面積が最大となり, 以降減少するのに対し, CASE 2 では,  $\mu_{dev}$  が一定なので,  $\alpha_c$  の上昇に伴ってダンパーの履歴面積が単純に上昇するためと考えられる。

### 3. ダンパー補強建物の保有性能基本指標 $R E_0$ 算定式による $n$ の評価

文献6では, ダンパー補強建物の耐震性能を耐震診断基準と同様に保有性能基本指標によって評価しうること示した。ダンパー補強後の保有性能基本指標を  $R E_0$  とし, 本章では, 文献6に示した  $R E_0$  算定式に次節に示す修正を加え, 修正された  $R E_0$  と無補強建物の保有性能基本指標  $E_0$  から等価な耐震性能上昇率  $n$  を求め, 前章の弾塑性応答解析から得られた  $n$  と比較検討する。

#### 3.1 $R E_0$ の算定式

文献6で提案した  $R E_0$  算定式を式(1)に示す。式(1)は, 耐震診断基準と同様 Newmark のエネルギー一定則に基づいて定式化したものである。ダンパー補強建物のエネルギー一定則の概念を図4に示す。ダンパーの消費エネルギーは, その履歴の繰り返し回数の多寡に大きく依存する。この効果を  $R E_0$  式に考慮するため, ダンパーの強度 ( $C_{Ydev}$ ) とその塑性変形量 ( $\delta_{max} - \delta_{Ydev}$ ) によって囲まれる履歴面積の  $B$  倍をダンパー消費エネルギーと仮定した。ここでは,  $B$  をエネルギー消費効率と定義する。 $B$  については次節で検討する。

次に, 式(1)の修正について述べる。耐震診断基準では, バイリニア系に対する Newmark のエネルギー一定則から得られる  $E_0$  算定式を RC 造建物の復元力特性の影響を考慮して, 式(2)を用いて式(3)のように修正している。

ここでは, 同様に, 図4の主体構造を RC 造建物とし, 式(1)を式(4)のように修正した。 $E_0$  は, 式(3)より主体構造のみで応答変位  $\delta_{max}$  となるときの地震入力の大さを示し,  $R E_0$  は, 式(4)よりダンパー補強された建物のそれを示している。従って,  $E_0$  と  $R E_0$  の比は前章に述べた耐震性能上昇率  $n$  と同じ意味を持ち, 式(5)のように表すことができる。

$$R E_0 = C_{Ystr} \times \sqrt{(2\mu - 1) + 2B \cdot \alpha_c \left( \mu - \frac{1}{\mu_{dev}} \right)} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{1}{0.75(1 + 0.05\mu)} \quad (2)$$

$$E_0 = C_{Ystr} \times \sqrt{\phi^2(2\mu - 1)} \quad (3)$$

$$R E_0 = C_{Ystr} \times \sqrt{\phi^2(2\mu - 1) + 2B \cdot \alpha_c \left( \mu - \frac{1}{\mu_{dev}} \right)} \quad (4)$$

$$n = \frac{R E_0}{E_0} = \sqrt{1 + \frac{2B \cdot \alpha_c \left( \mu - \frac{1}{\mu_{dev}} \right)}{\phi^2(2\mu - 1)}} \quad (5)$$

一方, ダンパーの補強効果を靱性指標の形で見込むのではなく, 単純に補強部材として見込んだ場合の  $R E_0$  算定式は式(6)となる。この場合の耐震性能上昇率  $n$  は, 式(7)で表される。

$$R E_0 = C_{Ystr} \times \sqrt{\phi^2(2\mu - 1) + C_{Ydev} \times \sqrt{(2\mu \cdot \mu_{dev} - 1)}} \quad (6)$$

$$n = \frac{R E_0}{E_0} = 1 + \alpha_c \times \sqrt{\frac{(2\mu \cdot \mu_{dev} - 1)}{\phi^2(2\mu - 1)}} \quad (7)$$

#### 3.2 エネルギー消費効率 $B$ の検討

式(4)の  $R E_0$  算定式では, エネルギー消費効率  $B$  を応答解析結果より逆算して評価しておく必要がある。 $B$  が解析パラメーターにあまり依存

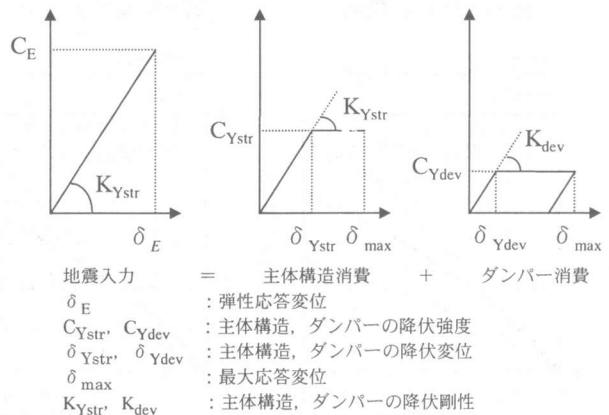


図-4 エネルギー一定則(ダンパー補強)

せずに、安定した性状を示せば、算定式は耐震性能を把握する上で有効な手段となる。そこで、式(5)を変形した式(8)に前章で求めたCASE2における $n$ の解析値を代入し $B$ を逆算して求め、傾向を調べた。

$$B = \frac{\phi^2(2\mu - 1)(n^2 - 1)}{2 \cdot \alpha_c \left( \mu - \frac{1}{\mu_{dev}} \right)} \quad (8)$$

図-5にBCJL2,  $T=0.3\text{sec}$ ,  $C_{Ystr}=0.3$ における逆算した $B$ と $\alpha_c$ の関係を、図-6に $B$ に $\alpha_c$ を乗じた値( $B \times \alpha_c$ )と $\alpha_c$ の関係を示す。両図より、 $B$ は $\mu_{dev}$ 毎に若干の変化が見られるが、ほぼ一定値となる性状を示していることがわかる。しかし、同様の検討を主体構造の弾性周期毎および各地震波毎に行うと、各々のケース毎では $B$ が一定値となる傾向を示したが、各ケース間での値にばらつきが生じていた。図-7に検討した全ケースの $B$ の頻度分布を、主体構造の塑性率 $\mu$ 毎に示す。

### 3.3 $E_0$ 算定式による $n$ の評価の適合性

耐震診断基準では、主体構造の弾性周期及び地震波を直接の変数として取り上げていない。そこで、式(4)の $E_0$ 算定式においても $B$ を一定値として採用し、耐震性能上昇率 $n$ が評価しうるか検討する。

図-7の $B$ の頻度分布より、 $B$ が履歴面積の1ループ分に相当する4以上の場合が、全体の89%であり、また、 $B$ が2ループ分に相当する8以上の場合が、全体の45%で、ほぼ平均値となった。そこで、 $B$ を4および8として式(5)で求めた耐震性能上昇率 $n$ (算定値)と、2章の弾塑性解析結果(解析値)の対応を調べた。図-8に $C_{Ystr}=0.3$ ,  $T=0.3\text{sec}$ ,  $\mu_{dev}=8$ における耐震性能上昇率 $n$ とダンパー強度比 $\alpha_c$ の関係(解析値および算定値)を示す。 $B=4$ とすると、算定値は解析値を下回る傾向を示した。 $B=8$ とすると、算定値と解析値は一致する傾向を示した。ダン

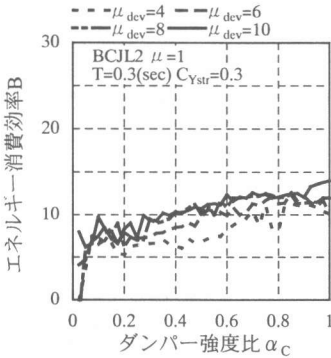


図-5 B- $\alpha_c$ 関係

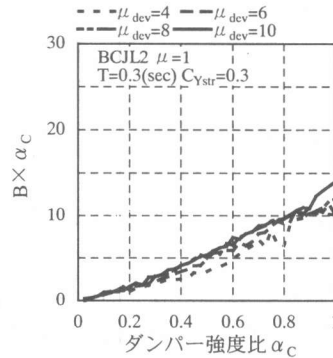


図-6  $B \times \alpha_c - \alpha_c$ 関係

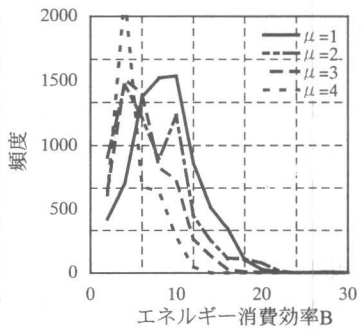


図-7 Bの頻度分布

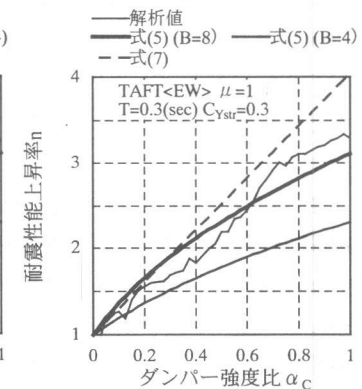
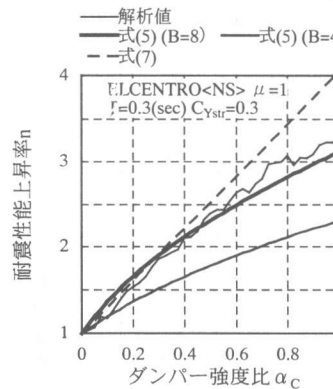
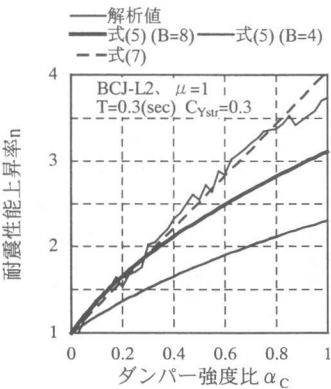


図-8  $n - \alpha_c$ 関係(解析値と各算定値)

パーを単純に補強部材と見なした式(7)より求めたnは、B=8の場合と同様、解析結果と一致する傾向を示した。

#### 4. 等価線形化手法によるnの評価

##### 4.1 等価線形化手法による概算補強検討方法

ダンパー補強により付加される履歴面積を、等価粘性減衰定数換算し、等価線形化手法によって耐震性能上昇率nを求め、2章の弾塑性解析結果と比較検討する。本章の検討に先立ち、等価線形化手法による概算補強検討方法の概要について述べておく。

等価線形化手法による概算補強検討方法とは、耐震補強検討用スペクトルとして図-9のような $C_B-S_D$ スペクトルを準備しておき、各減衰定数(以下、heq)毎に示した $C_B-S_D$ スペクトル上に、既存架構の荷重変形関係を描き補強目標変位を定めることにより、補強建物に要求される減衰性能を算定するという方法である<sup>7)</sup>。 $C_B-S_D$ スペクトルは、補強検討用入力地震動の応答変位スペクトル $S_D(T)$ の値と、 $S_D(T)$ に弾性円振動数 $\omega$ の2乗を乗じ重力加速度で除した値( $C_B = \omega^2 \cdot S_D/g$ )の関係を描くことで得ることができる。例えば図-9では、 $heq=30\%$ のスペクトルと、既存架構の補強目標変位(□印)が一致しており、補強建物に30%以上の減衰性能があれば、補強目標変位以下に応答値が収まることになる。従って、無補強時の減衰性能( $heq_{ori}=5\%$ )と補強後の減衰性能( $heq_{retro}=30\%$ )の差が、ダンパー補強により付加すべき減衰性能( $heq_{dev}=25\%$ )となる。

##### 4.2 ダンパー補強により付加される減衰性能

主体構造の塑性変形を許容しないものとし、補強目標変位が塑性率1の時のダンパー補強により付加される減衰性能は、補強建物が定常振動するという状態を仮定することにより、式(9)で算定することが出来る。式(9)は、図-10に

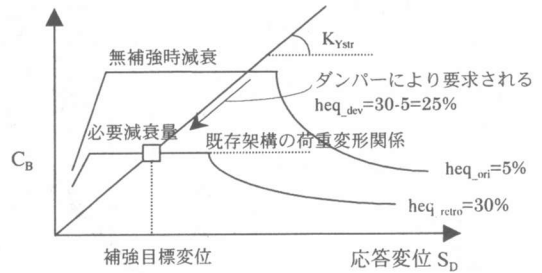


図-9 等価線形化手法による補強検討の概念

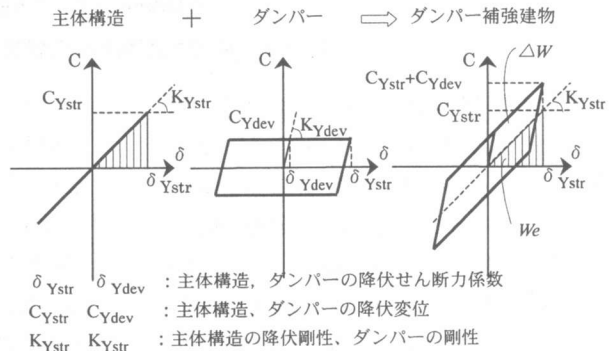


図-10 ダンパー補強建物の概念図

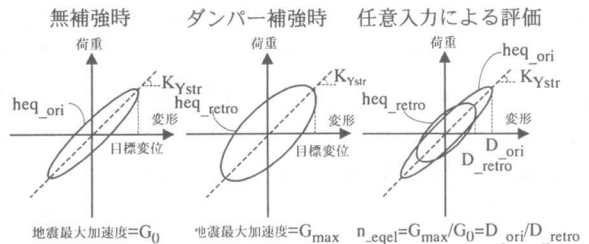


図-11 等価線形化手法でのnの求め方

示すように主体構造(無補強建物)の降伏点剛性に、付加するダンパーの履歴を重ね、補強建物の1ループの履歴面積 $\Delta W$ と主体構造の弾性ポテンシャルエネルギー $We$ の比から求めたものである。この式(9)をダンパー補強時の付加減衰定数算定式とする。

$$heq_{dev} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\Delta W}{We} \right) = \frac{2}{\pi} \cdot \alpha_C \cdot \left( 1 - \frac{1}{\mu_{dev}} \right) \quad (9)$$

##### 4.3 等価線形化手法によるnの算定方法

等価線形化手法による耐震性能上昇率nは、以下の手順で求めた。まず、無補強時の減衰性能( $heq_{ori}$ )は、主体構造の塑性率が1の場合、構造減衰3%と降伏前のひび割れによる履歴減衰2%の和として、一律5%有していると仮定する。補強後の減衰性能( $heq_{retro}$ )は、比較対象の弾

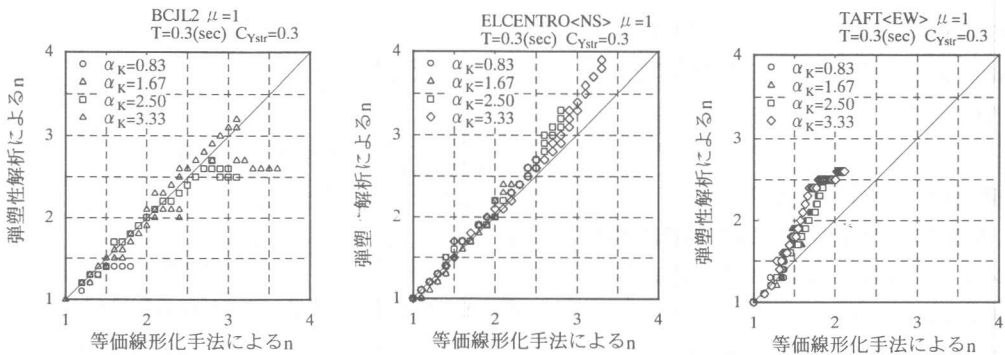


図-12 弾塑性解析と等価線形化手法の比較

弾塑性解析結果のパラメータであるダンパー強度比  $\alpha_c$  とダンパー塑性率  $\mu_{dev}(= \alpha_K / \alpha_c)$  を式(9)に代入して  $heq_{dev}$  を求め、 $heq_{ori}$  との和の減衰性能を有していると仮定する。等価線形化手法による耐震性能上昇率  $n(n_{eqel})$  は、比較対象の弾塑性解析結果のパラメータである主体構造降伏点剛性を用いて、 $heq_{ori}$  の減衰で補強目標変位に達する時の地動最大加速度と、 $heq_{retro}$  の減衰で補強目標変位に達する時の地動最大加速度の比となる。しかし、等価線形化手法は弾性応答解析であるので、任意の大きさの地震動を入力して、 $heq_{ori}$  の最大応答変位  $D_{ori}$  と  $heq_{retro}$  の最大応答変位  $D_{retro}$  の比が、上記の  $n_{eqel}$  と同じ値となる(図-11)。従って、 $D_{ori}/D_{retro}$  の値を、等価線形化手法による耐震性能上昇率  $n(n_{eqel})$  の値として用いた。

#### 4.4 等価線形化手法による $n$ の評価の適合性

2章で求めた耐震性能上昇率  $n$  (弾塑性解析結果) と等価線形化手法により弾性応答解析で求めた  $n$  を比較して図-12に示す。縦軸に弾塑性解析で得られた耐震性能上昇率  $n$  を、横軸に等価線形化手法で得られた耐震性能上昇率  $n$  をとり、同一パラメータに対する両解析結果をプロットした。図-12は、EL-CENTRO<NS>、TAFT<EW>、BCJL2の入力地震波に対し、弾塑性解析での主体構造の弾性周期が0.3secの時の比較結果である。いずれの場合もプロット値は、ほぼ45°の直線上に位置しており、弾塑性解析で求めた  $n$  と等価線形化手法(弾性解析)で求めた  $n$  が、概ねよく対応していることが分かる。

#### 5. まとめ

以上の検討結果より、以下の知見を得た。

- 1) 耐震診断の考え方に基づくダンパー補強建物の保有性能基本指標の算定式を用いて、ダンパー補強建物の耐震性能を評価しうることを確認した。提案した算定式は、ダンパー補強設計を行う際、ダンパー量を概算的に把握する為の手法として、有効である。
- 2) ダンパー補強建物の耐震性能は等価線形化手法によって、ほぼ評価することが可能であることを確認した。提案した手法は、ダンパー補強設計を行う際、ダンパー量を概算的に把握する為の手法として、有効である。

#### 謝辞

本研究は、日本大学と青木建設の共同研究「損傷低減のための耐震補強技術に関する研究成果の一部であり、関係各位に感謝いたします。

また本研究は、平成10年度文部省科学研究費補助金(基盤研究 B2)「鉄筋コンクリート部材の強度と変形性能の把握に関する研究」(研究代表者:安達洋)の一環として行ったものである。

#### 参考文献

- 1) 北嶋圭二, 野口隆, 上田英明, 中西三和, 安達洋: ダンパーを用いた既存RC造建物の補強技術に関する研究, 日本コンクリート工学協会「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集, pp. 283-292, 1997.4
- 2) 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診断基準および耐震改修指針・同解説, 1990.12
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術と事例, 1998.8
- 4) 岡田恒男: 耐震診断基準に於ける構造耐震判定指標  $I_{50}$  について, 建築防災, 1998.5
- 5) 日本建築センター: 設計用入力地震動作成手法技術指針(案)本文解説編, 1992.3
- 6) 北嶋圭二, 上田英明, 緒方翼, 中西三和, 安達洋: 摩擦ダンパーを用いた制震レトロフィット技術の研究・開発, 日本地震工学シンポジウム, 1998.11
- 7) Applied Technology Council: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC40, Report No. SSC 96-01, November 1996