

論文 既存 RC 造建物を制振補強する場合の設計法の提案

西川 和明^{*1}・前田 匠樹^{*2}

要旨：本研究は耐震性能が劣る既存 RC 造建物に粘性・粘弹性ダンパーを組み込むことで制振補強する際の設計法に関する研究である。制振補強建物の耐震診断指標 I_s 値をダンパーによる付加減衰を用いて評価し、従来型耐震補強と同様に耐震診断基準に基づいた制振補強設計法を提案した。提案した設計法で制振補強した建物と従来型の耐震補強建物との応答を比較することにより、本設計法の妥当性を検証した。

キーワード：耐震補強、耐震診断指標、粘弹性ダンパー、等価粘性減衰

1. はじめに

既存建物に粘性・粘弹性ダンパーを取り付けることにより、エネルギー吸収性能を高めることで耐震性能を向上させる制振補強の研究・開発が行われてきた¹⁾。この補強方法は従来の鉄骨プレースなどを用いて建物の強度や変形制御性能を高める補強法とは異なり、建物に減衰効果を付加することでエネルギー吸収を行い、建物の変形を抑制させる応答制御型の補強法である。従来の耐震補強の設計では、耐震診断²⁾で得られた構造耐震指標 I_s 値に基づいて、必要な強度や変形制御性能などの補強量を算出する。それに対し、制振補強された建物の場合、耐震診断基準に対応した補強設計法が確立されておらず、耐震安全性は時刻歴応答解析により検討するのが一般的である。

そこで本報ではまず、制振補強した建物の等価粘性減衰をダンパー、プレース、建物の剛性比に基づいて評価し、剛性比が等価粘性減衰に及ぼす影響を調べた。また、ダンパー設置による付加減衰に対応した耐震診断指標 I_s 値の増加率を表す指標として耐震性能割増係数 $D(h)$ を定義することにより、地震応答解析を行わずにダンパーの必要補強量を算出する設計法の検討及び検証を行った。

2. 粘弹性ダンパー補強建物

2.1 粘弹性体の力学特性

ダンパーは、図-1のような復元力特性を有しており、その力学特性やエネルギー吸収能力（損失係数 η ）は温度・振動数・振幅に依存することが既往の研究³⁾で報告されている。

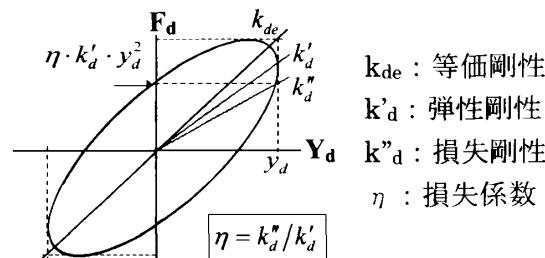


図-1 粘弹性体の力学的特性

2.2 等価剛性・等価粘性減衰

粘弹性ダンパーの等価剛性 k_{de} は図-1より、複素剛性の絶対値として式(1)で定義されている。ダンパー補強建物を1質点系にモデル化すると、既存建物と支持部材・ダンパーがそれぞれ並列に、支持部材とダンパーが直列の関係となる。ここで、等価線形化法では等価減衰と等価剛性を有する等価線形系で最大応答を模擬するものである。よって、系全体の等価剛性 k_e は最大変形時の剛性として、式(2)で定義する。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助教授 工博 (正会員)

$$k_{de} = \left| k_d^* \right| = \sqrt{k_d'^2 + k_d''^2} = k_d' \sqrt{1 + \eta^2} \quad (1)$$

$$k_e = k_f + \frac{1}{1/k_b + 1/k_d'} \quad (2)$$

このとき既存建物の等価剛性を k_f 、ブレースの剛性を k_b とする。

また、支持部材の鉄骨ブレースは弾性と仮定して、粘弹性ダンパーの履歴吸収エネルギーを ΔW_d として、系全体のポテンシャルエネルギーを W とする。粘弹性ダンパーを用いて耐震補強した建物における、ダンパーを設置したことによる等価粘性減衰の増加分 ${}_d h_{eq}$ は式(3)で表される。

$${}_d h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W_d}{W} = \frac{\eta k_d' y_d^2}{2k_e y^2} \quad (3)$$

ここで、支持部材とダンパーは直列の関係にあり、その変形の比 $y_b : y_d$ は剛性の逆比 $k_b : k_{de}$ に対応していることが既往の研究⁴⁾より分かっている。よって、ダンパーの変形は全体の変形より支持部材とダンパーの剛性の比 $k_b : k_{de}$ を用いて式(4)のように表すことができる。

$$y_d = \frac{k_b}{k_b + k_{de}} \cdot y = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \eta^2} k_d' / k_b} \cdot y \quad (4)$$

よって、等価粘性減衰の増加分 ${}_d h_{eq}$ は式(5)に示すようにダンパー・支持部材・建物の剛性の比 k_d' / k_b 、 k_d' / k_f で表すことができる。

$${}_d h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W_d}{W} = \frac{\eta \cdot \left(\frac{1}{1 + \sqrt{1 + \eta^2} k_d' / k_b} \right)^2}{2 \cdot \left(\frac{1}{k_d' / k_f} + \frac{1}{1 + k_d' / k_b} \right)} \quad (5)$$

図-2にはダンパー・支持部材の剛性比 k_d' / k_b と等価粘性減衰 ${}_d h_{eq}$ の関係を示す。本報ではアクリル系粘弹性体材料の粘弹性ダンパーを対象とし、 k_d' 、 η の値は笠井らにより提案されている算出式³⁾を用いて基準温度 20°C の場合で検討した。図-2より等価粘性減衰 ${}_d h_{eq}$ は極大値を持つ

ことがわかり、粘弹性ダンパーの減衰性能は剛性比 k_d' / k_b に影響される。 ${}_d h_{eq}$ は k_b / k_f の値によって異なるものの、いずれの場合も概ね k_d' / k_b が 0.3 付近で極大値となる。よって本報では、粘弹性ダンパーの減衰効率を考慮して剛性比が $k_d' / k_b \leq 0.3$ の範囲で設計を行うこととする。

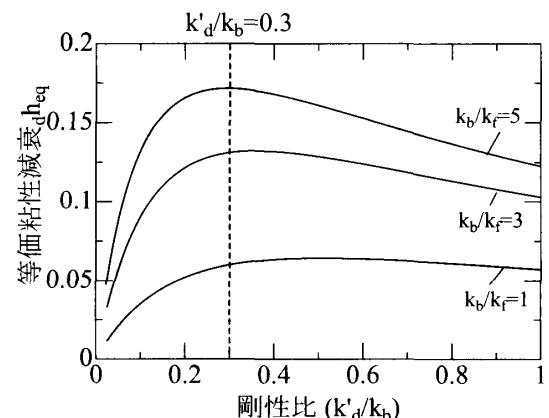


図-2 等価粘性減衰と剛性比の関係

3. 制振補強設計法

3.1 耐震診断基準に基づく補強概念

従来型の補強では目標の I_s 値に対して、耐震壁や鉄骨ブレースなどを既存建物のフレーム内に増設することにより、建物の保有水平耐力を高めるといった強度型の方法や、既存建物の独立柱の周りを RC や FRP で巻立たり、接続する腰壁等との間に耐震スリットを入れるなどして建物の変形性能を高める韌性型の方法が考えられる。

制振補強では従来型の様に、建物本体の強度や韌性を高めて補強する概念は当てはまらない。制振補強では図-3に示すように、ダンパーのエネルギー吸収能力により系全体の減衰が増加した分、みかけ上 I_s 値が増加したとみなす概念が当てはまる。そこで減衰の増加に伴う I_s 値の増加率を表す値として耐震性能割増係数 $D(h)$ を式(6)のように定義する。

$$D(h) = {}_1 I_s / {}_0 I_s \quad (6)$$

${}_0 I_s$: 未補強時の耐震診断指標

${}_1 I_s$: 補強後の耐震診断指標

ここで $D(h)$ とは、限界耐力法で任意の減衰定数における線形応答スペクトルを求める際に用いられている減衰補正係数 $f(h)$ の逆数に相当するものと考えられ、制振ディバイスにより付加される等価粘性減衰 $_{d}h_{eq}$ を用いて求まる係数とする。

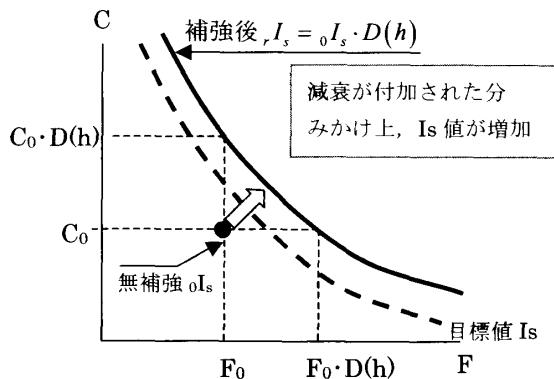


図-3 制振補強(粘性ダンパー補強)概念図

3.2 設計手法

まず、粘性ダンパーで補強を行う際の設計法について示す。図-4のチャートにも示すように、 $D(h)$ を用いて必要減衰 $_{d}h_{eq}$ を求め、それより粘性減衰係数 $_{d}C$ を算出できる。

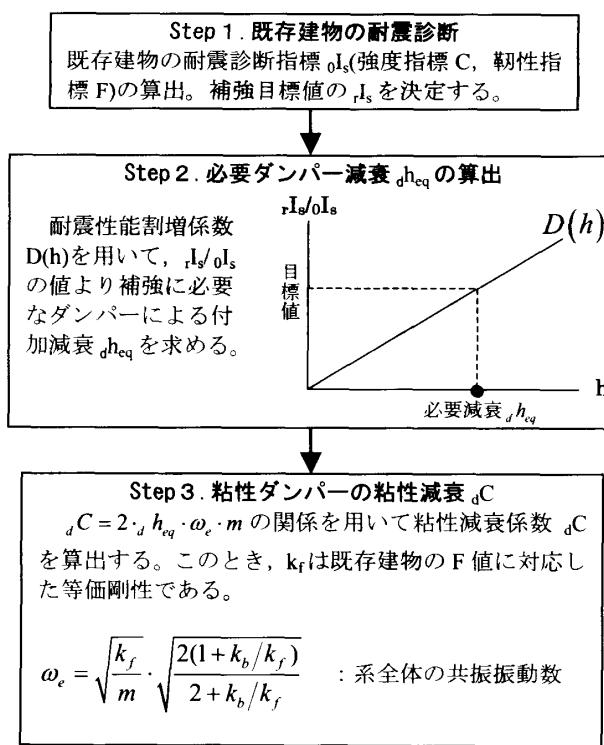


図-4 粘性ダンパー補強の設計チャート

次に粘弹性ダンパーで補強した際の設計法を以下に示す。粘弹性ダンパーのように剛性を有するダンパーの場合、図-5に示すように付加減衰により I_s が増加する効果だけではなく耐力上昇による効果も考慮する必要がある。

まず、粘弹性ダンパーで補強した際の耐震診断指標 I_s は、式(7)で表される。

$$I_s = \{ (C_0 + C_d) \cdot F_0 \} \cdot D(h) = C_0 \cdot F_0 \cdot D'(h) \quad (7)$$

$$\text{ここに, } C_0 = Q_u / (Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot \Sigma W)$$

$$C_d = Q_u / (Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot \Sigma W)$$

$D(h)$: 付加減衰による耐震性能割増係数

$D'(h)$: 付加減衰・耐力上昇を考慮した耐震性能割増係数

ここで、 F_0 は既存建物の韌性指標であり、 Q_u は既存建物の保有水平耐力であり、 Q_u は韌性指標 F_0 に相当する変形での粘弹性ダンパーの耐力である。式(7)の両辺を $C_0 \cdot F_0$ で除すと、式(8)が得られる。

$$D'(h) = (1 + C_d / C_0) \cdot D(h) \quad (8)$$

このとき、 C_d / C_0 は剛性比 k_d' / k_b 、 k_d' / k_f を用いて以下の式(9)で表すことができる。

$$\frac{C_d}{C_0} = \frac{(k_b \cdot k_d' / (k_b + k_d')) \times y / mg}{k_f \times y / mg} = \frac{1}{1 + k_d' / k_b} \cdot \frac{k_d'}{k_f} \quad (9)$$

このとき、 k_d' / k_f は等価粘性減衰の式(5)より $_{d}h_{eq}$ を用いて式(10)で表すことができる。よって、 $D'(h)$ は式(11)のようになる。

$$\frac{k_d'}{k_f} = \frac{2_d h_{eq} (1 + k_d' / k_b)}{\eta \left(\frac{1}{1 + \sqrt{1 + \eta^2} k_d' / k_b} \right)^2 (1 + k_d' / k_b) - 2_d h_{eq}} \quad (10)$$

$$D'(h) = \left(1 + \frac{2_d h_{eq}}{\eta \left(\frac{1}{1 + \sqrt{1 + \eta^2} k_d' / k_b} \right)^2 (1 + k_d' / k_b) - 2_d h_{eq}} \right) \cdot D(h) \quad (11)$$

このとき、 k'_d/k_b は粘弹性ダンパーの有効な減衰効率を考慮して 0.3 以下の値で設計時に任意に決める値であり、 η は既存建物の韌性指標 F_0 に対応した等価周期より算出する。

粘弹性ダンパーで補強する際には以上に示したように耐力上昇を考慮した耐震性能割増係数 $D'(h)$ を用いて設計を行う。図-6 に設計手順を示す。

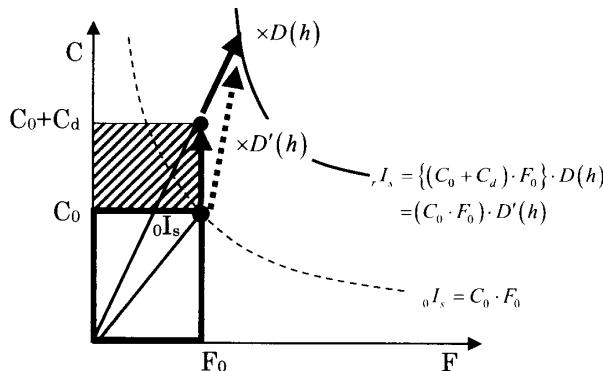


図-5 粘弹性ダンパー補強の概念図

4.耐震性能割増係数 $D(h)$ の算定

4.1 検討解析概要

前節で定義した耐震性能割増係数 $D(h)$ を地震応答解析より算定する。解析対象とした既存建物は同じ復元力特性を有するものとし、質量のみを変化させて周期 $T=0.2, 0.5, 1.0, 1.5$ 秒の場合について検討を行った。

粘性ダンパー補強の場合、支持部材は完全な剛体とし、単にダッシュポットのみを付加させた単純なモデルとした。粘弹性ダンパーの支持部材である鉄骨ブレースは常に弾性とし、ブレースと建物との剛性比を $k_b/k_f = 1, 5$ の 2 種類で行った。

解析に用いた地震波は実測波と模擬波をそれぞれ 2 波づつ用いた。実測波は El Centro NS 波、神戸海洋気象台 NS 波の 2 波を用いた。また模擬波は建築基準法告示の設計用応答スペクトルを基に作成し、「入力レベルは極めて稀に起こる地震動」とし、地盤は第二種地盤を想定した。主要動が 8 秒のものを長波、3 秒のものを短波とした。加速度応答スペクトルを図-7 に示す。

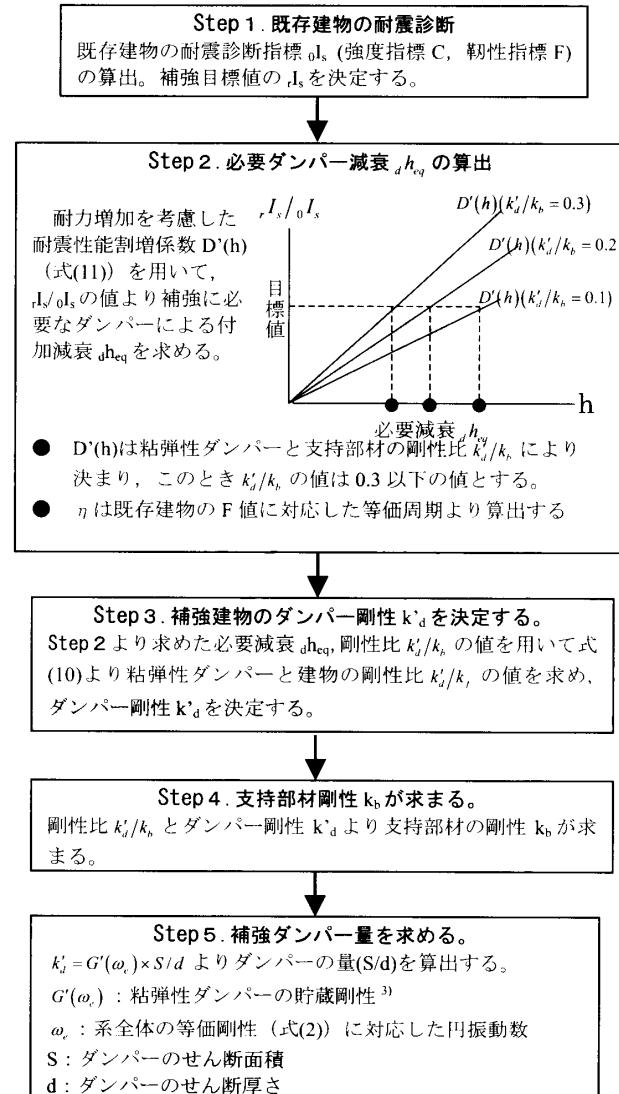


図-6 粘弹性ダンパー補強の設計チャート

表-1 検討パラメータ一覧

建物周期	$T=0.2, 0.5, 1.0, 1.5$
制振	粘性ダンパー $k_b/k_f = \infty$
ディバイス	粘弹性ダンパー $k_b/k_f = 1, 5$
地震波	観測波、模擬波

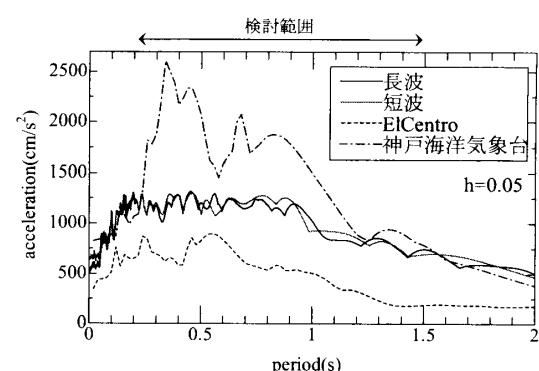


図-7 入力地震波の加速度応答スペクトル

ここで、解析による制振補強建物の耐震診断指標 I_s の評価方法を以下に示す。

1. 韧性指標 $F_0=1$ で降伏変形（終局変形）となる無補強建物を設定する。
2. 無補強建物を制振ダンパーで補強した建物に対して入力地震波倍率 R を変化させ解析を行い、応答変形がちょうど終局変形となる時の地震波倍率 R_u を求める。
3. 無補強建物に対して地震波倍率 R_u の地震波を入力し、建物の強度（強度指標 C ）を変化させたモデルで解析を行い応答変形がちょうど終局変形となる時の終局強度（強度指標 C_u ）を求める。
4. 制振補強建物の耐震診断指標 I_s は、 $I_s = C_u \cdot F_0$ に相当するものと見なす。

4.2 解析結果

まず、粘性ダンパーによる付加減衰が耐震性能に及ぼす影響をみるために、 I_s 値の増加率と減衰との関係を図-8に示す。また、図中に $D(h)$ の式(12)、(13)を示し解析結果と比較した。式(12)は限界耐力計算法で用いられている減衰補強係数 $f(h)$ の逆数とした。図-8をみると付加減衰と I_s 値の関係は、建物周期によって結果にはばらつきがみられるものの、式(12)ほど I_s 値は増加しないことが分かる。そこで、解析結果の平均値に近似するような式として式(13)を考えた。式(13)は式(12)の平方根とした。

$$D(h) = 1/Fh = \{1 + 10(h + 0.05)\}/1.5 \quad (12)$$

$$D(h) = \sqrt{1/Fh} = \sqrt{\{1 + 10(h + 0.05)\}/1.5} \quad (13)$$

次に粘弹性ダンパーの解析結果を図-9に示す。また、付加減衰による効果と耐力上昇による効果を考慮した耐震性能割増係数 $D'(h)$ を式(13)を用いて求め図中に示す。結果は短周期の建物で解析結果と $D'(h)$ の値の差が大きくなる傾向となった。

また、粘弹性ダンパーの耐力上昇による効果を除いた場合について、剛性比 $k_b/k_f = 1$ の時の結果を図-10に示し粘性ダンパー補強の場合と比

較した。図-10をみると、粘性ダンパー補強と同様に、概ね式(13)により解析結果の平均値が近似されている。そこで、式(13)の値を計算値、解析結果を応答値として、その比の値の平均値、標準偏差、変動係数を求め、図-11に示す。平均値は約1となり、解析結果の平均値をよく近似している結果となったが、変動係数が10%とばらつきが大きい。特にkobe波、短波で危険側となる傾向が見られた。

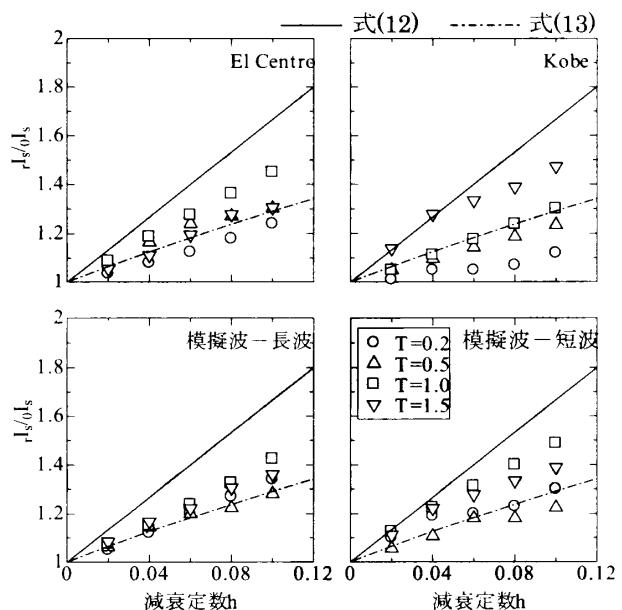


図-8 解析結果（粘性ダンパー補強）

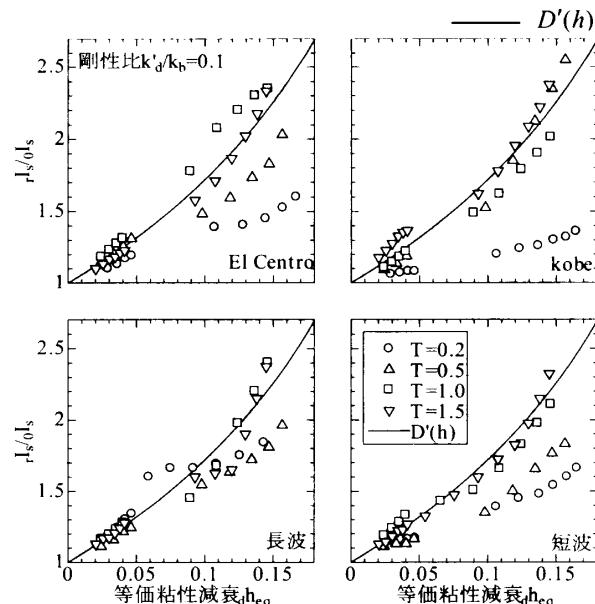
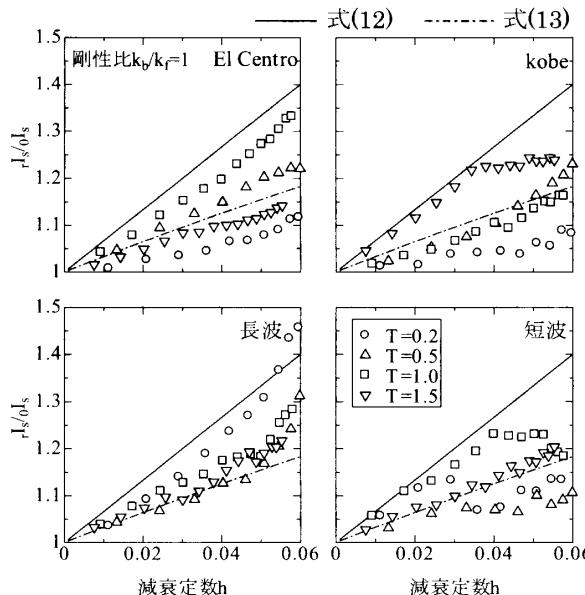
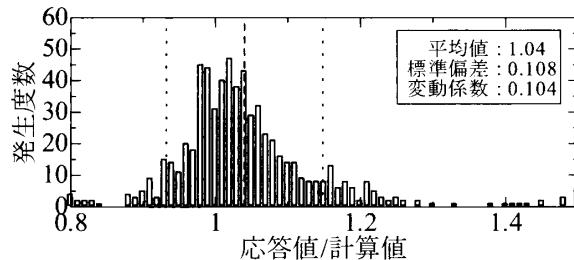


図-9 解析結果(粘弹性ダンパーの耐力を考慮)

図-10 解析結果(粘弹性ダンパー補強, $k_b/k_f = 1$)図-11 $D(h)$ の算出式と解析結果との比較

5. 制振補強設計法の検証

本報で示した制振補強設計法で設計された建物の耐震性能を検証するために、本設計法で制振補強した建物と従来の強度型の耐震補強法で設計された建物の地震応答を比較した。既存建物を強度指標 $C=0.5$ 、韌性指標 $F=1$ で降伏変形が 20mm となる $I_s=0.5$ のモデルと設定し、補強後の目標値が $I_s=0.70, 0.75$ となるように、それぞれ設計法で補強を行い地震応答解析した結果を図-12 に示す。入力は先に述べた模擬地震波を用いて、強度型補強が降伏変形を超えないような入力倍率で解析を行った。また、粘性・粘弹性ダンパー補強共に、式(13)の $D(h)$ を用いて設計を行い、粘弹性ダンパー補強の剛性比 k'_d/k_b は 0.2 とした。

解析結果をみると粘性ダンパー補強の場合は概ね従来型補強と同等の変形となり、目標値 I_s に相当する耐震性能を有する設計といえる。粘

弾性ダンパー補強の場合も目標値 I_s に近い耐震性能を有する設計が可能である。

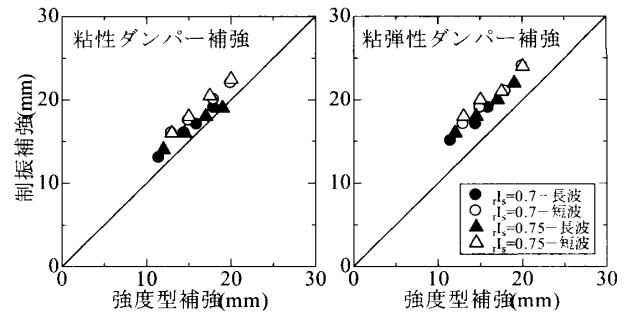


図-12 制振補強設計法の検証

6. まとめ

本報では制振補強した建物の等価粘性減衰の定式化及び、耐震診断基準に基づき補強に必要なダンパー量を算出する設計法を提案した。

(1) 等価粘性減衰の評価

粘弹性ダンパーで補強された建物の等価粘性減衰を剛性比 $k'_d/k_b, k'_d/k_f$ を用いて定式化した。ダンパーの減衰性能は、支持部材との剛性比 k'_d/k_b により決まり、本研究では k'_d/k_b の有効範囲を 0.3 以下とした。

(2) 耐震性能割増係数 $D(h)$ の算出

ダンパーの付加減衰による耐震診断指標 I_s の増加率 $D(h)$ を、地震応答解析結果を基に算定した。

(3) 制振補強設計法の提案

本報で示した耐震性能割増係数 $D(h)$ を用いて設計することにより制振ダンパーで補強する際も耐震診断基準に基づき設計できる可能性を示した。また $D(h)$ の式に関しては今後、他の地震動を用いて検討する必要があると思われる。

参考文献

- 倉本洋ほか：エネルギー吸収部材を用いた既存建築物の耐震改修効果に関する研究、日本建築学会大会 C-2, pp.173~177, 1999.9
- 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・同解説、2001 年改訂
- 笠井和彦、寺元道彦、大熊潔、所健：粘弹性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則その 1、日本建築学会構造系論文集第 543 号 77-86, 2001.5
- 西川和明、康在完、前田匡樹：粘弹性ダンパーを用いて耐震補強した既存 RC 造建物の地震応答、コンクリート工学年次論文集第 26 卷第 2 号 pp.1273~1278, 2004.7