

論文 粘弾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

西川 和明^{*1}・康 在完^{*2}・前田 匡樹^{*3}

要旨：既存 RC 造建物に対して，鉄骨ブレースに粘弾性ダンパーを組み込むことで制振補強した建物を対象に 1 質点系地震応答解析を行い，ダンパーの量及び，ダンパーと鉄骨ブレースの剛性比が応答に及ぼす影響を検討するとともに，従来型の鉄骨ブレースによる耐震補強と応答加速度・変位の低減効果を比較した。また，等価線形化法を用いて地震応答評価を行う際の等価粘性減衰定数を，剛性比を用いて定式化し妥当性を検証した。

キーワード：耐震補強，粘弾性ダンパー，地震応答，等価線形化法

1. はじめに

既存建物に粘弾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ブ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，耐震診断の I_s 値で補強効果を評価できないので，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。

近年，設計の性能規定化に伴い時刻歴応答解析を行わずに建物の補強効果を簡易に評価する手法の確立が必要とされている。そこで，本報では既存 RC 造建物を設定し 1 質点系地震応答解析を行い，ダンパーの量およびダンパーと鉄骨ブレースの剛性比が応答に及ぼす影響を検討するとともに，従来型の鉄骨ブレースによる補強と比較した。また解析結果に基づき制振補強された建物の等価剛性・等価粘性減衰を検討し，等価線形化法により地震時の応答推定を行った。

2. 解析対象建物と解析手法

2.1 既存建物（無補強）

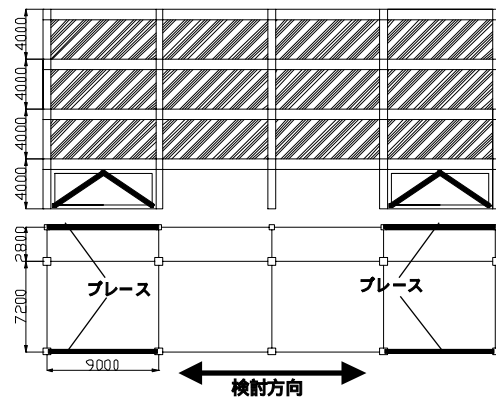


図 - 1 対象建物の平面図・立面図 (単位 mm)

解析対象建物は，図 - 1 のような学校建築に典型的な平面を有する 4 層建物で，1 階部分は純ラーメン構造で 2 階から 4 階は剛体と仮定したピロティ型建物とした。解析ではこの建物の全質量と 1 階部分の復元力特性によって 1 質点系にモデル化したものを用いる。無補強時の既存建物は，耐震補強の対象となる建物を想定し，耐震診断基準²⁾による強度指標(降伏強度 / 建物重量) $C=0.4$ ，靱性指標 $F=1$ ，耐震指標 I_s 値 0.4 と仮定した。建物の復元力特性は図 - 2 のように，層間変形角 $1/200$ で降伏するように降伏変位は 20mm ，ひび割れ強度 Q_c は既存建物の降伏強度

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

*2 (株)東海興業 博士(工学) (正会員)

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

Q_y ($C=0.4$) の $1/3$, 降伏点の割線剛性は, 弾性剛性 k_0 の 0.3 倍と設定した。また, 建物質量 m は単位重量 12kN/m^2 を用いて算出した。

2.2 鉄骨ブレース補強建物

鉄骨ブレースで耐震補強することにより既存建物の耐震指標 I_s が 0.4 から 0.7 に増加するように, ブレースの強度指標を $C=0.3$ としてブレースの復元力のモデル化を行った。図 - 2 に示すように, 一般的に耐震補強に用いられる鉄骨ブレースの実験結果³⁾などを参考に, 補強鉄骨ブレースの降伏変形は, 建物の少し手前で降伏することとし, 15mm (弾性剛性は建物の 0.3 倍) とした。ブレースの設置箇所は図 - 1 に示すように対称な 4 箇所を設置するものとした。

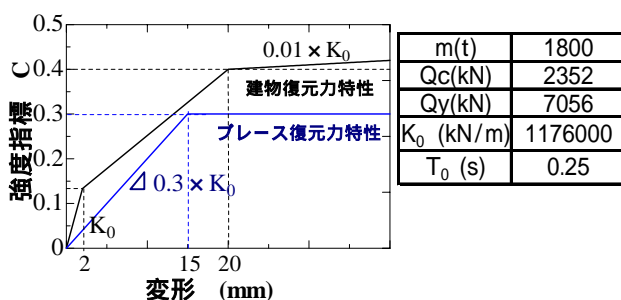


図 - 2 1 質点系建物モデルの復元力

2.3 ダンパー補強建物

ダンパー補強ではアクリル系粘弾性体材料の粘弾性ダンパーを用いて補強を行う。図 - 3 に示すように, 本研究で対象とした粘弾性ダンパー (6 層分) は 1 層あたり, 互いに平行な 2 枚の板の相対的な平行移動に伴う粘弾性体のせん断変形により, 履歴面積を伴う抵抗力を發揮して振動エネルギー吸収する。ダンパーは層数を増やすことによりせん断抵抗力が増加する。また, この粘弾性ダンパーは図 - 4 のような復元力特性を有しており, その弾性剛性やエネルギー吸収能力 (損失係数) は温度・振動数・振幅に依存することが既往の研究⁴⁾で報告されている。

粘弾性ダンパーは鉄骨ブレースの支持部材を介して建物に設置する方式とし, ダンパーの設置場所は前述の従来型鉄骨ブレース補強(2.2)と対応させるため同じとした。

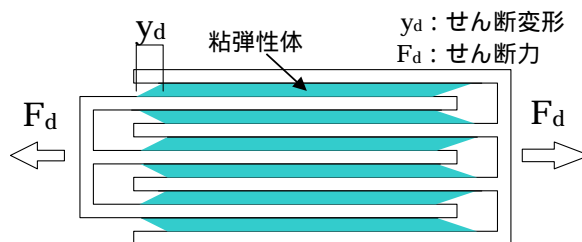


図 - 3 粘弾性体の基本構造 (6 層)

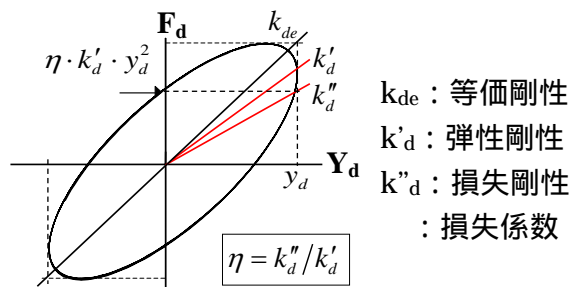


図 - 4 粘弾性体の力学的特性

表 - 1 ダンパー補強建物の解析パラメーター

粘弾性体の層数	6, 12, 18, 24
支持部材の剛性	1 倍, 2 倍,

表 - 1 に示すように, 1 ヶ所当たり 6, 12, 18, 24 層の 4 通りのダンパーの量を考える。また, 支持部材である鉄骨ブレースの剛性は, 従来型の補強と同じもの (1 倍) を用いた場合 (図 - 2), 2 倍とした場合, 及び参考のため無限大 (倍) の 3 通りを考える。

粘弾性体の量を 6, 12, 18, 24 層と増やして \sin 波による定常振動解析を行い, 微小変形時の粘性減衰 (建物の弾性時の減衰 2% を含む), 剛性比 (ダンパーの弾性剛性 k'_d / 支持部材の剛性 k_b) を求め, 図 - 5 に示す。支持部材の剛性をにした時の初期剛性に対する建物の粘性減衰定数は 5.2, 8.1, 11, 13% 程度 (既存建物分の 2% 含む) となった。実際の設計では, 支持部材の剛性によってダンパーの減衰性能が変化することを考慮する必要がある。

一般的に剛性比が約 0.3 以下だとダンパーの減衰効率が良いといわれている。図 - 5 は, 支持部材の剛性が 1 倍の時は, ダンパーの量は 6 層が適当であり, 2 倍のときは 12 ~ 18 層が適当であることを示している。

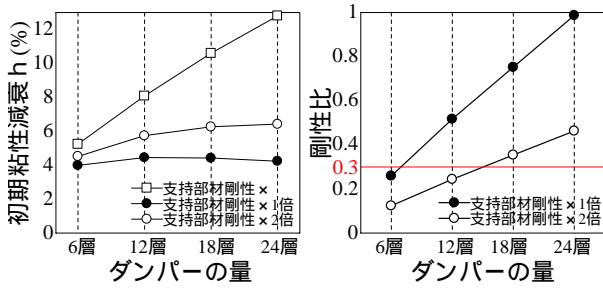


図 - 5 微小変形時の特性

2.4 解析モデル

前に述べた3種類の解析対象建物を1質点系にモデル化した。例としてダンパー補強時の解析用建物モデルを図-6に示す。

粘弾性ダンパーについては、振動数に依存して変化する特徴を考慮して、振動数依存性を適確に表現するために、解析には図-7に示すようなMaxwell流体モデルとKelvin固体モデルを並列に結合した4要素モデル⁵⁾を用いる。

RC建物の復元力特性にはTakadaモデルを用い、鉄骨ブレースの復元力特性にもRC躯体との接合部のひび割れ等による剛性低下がみられることから、Takadaモデルを用いた。また、弾性時の減衰として減衰定数2%を仮定した。

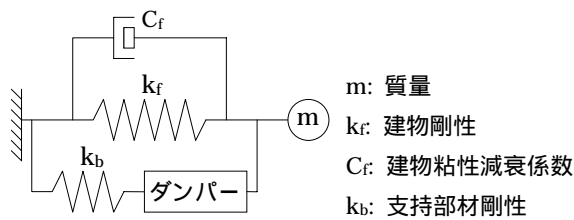


図 - 6 解析用建物モデル

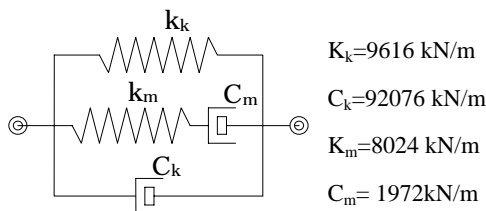


図 - 7 粘弾性ダンパーの4要素モデル

2.4 入力地震波

解析に用いた地震波は告示の設計用応答スペクトルを基に作成した。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。以下に長波・短波の時刻歴波形と加速度応答スペクトルを図-8,図-9に示す。

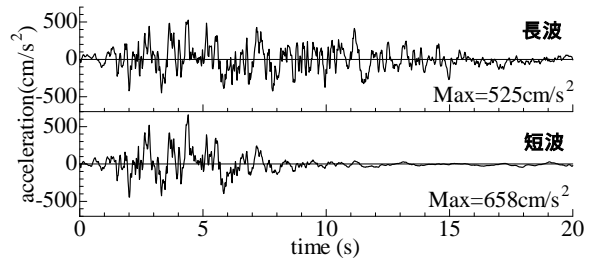


図 - 8 模擬地震波の時刻歴波形

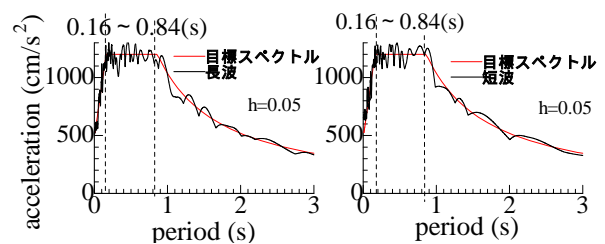


図 - 9 模擬地震波の加速度応答スペクトル

3 地震応答解析結果

無補強の建物、ブレース補強した建物とダンパー補強(6層,支持部材剛性1倍)した建物の地震応答解析結果を図-10,11に示す。入力波の倍率は、中小地震を想定して40%とし、大地震を想定として80%とした。

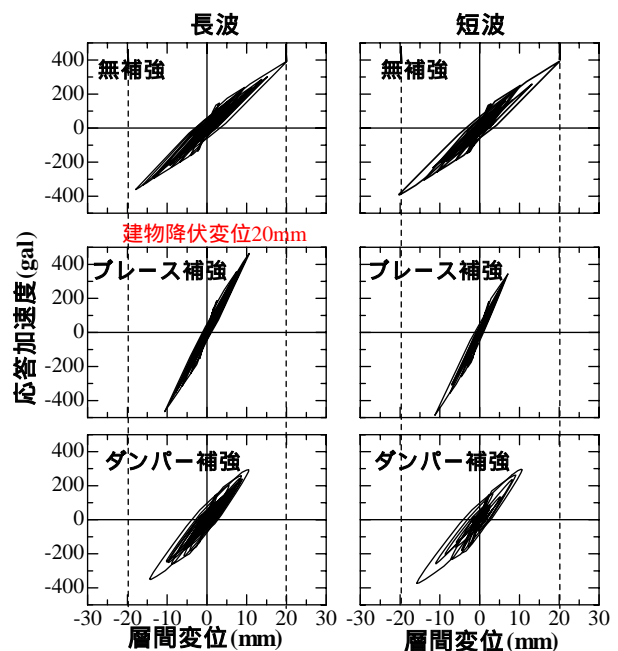


図 - 10 解析結果 (40%入力)

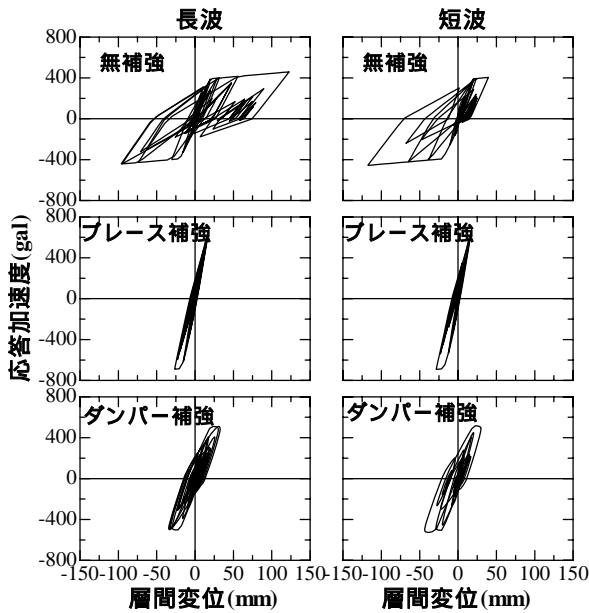


図 - 11 解析結果 (80%入力)

無補強の場合は長波・短波共に中小地震で建物がほぼ降伏変形 (20mm) に達し、大地震では塑性率が約 6 まで変形が進んでしまう。それに対し、ブレース補強・ダンパー補強共に中小地震では長波・短波共に弾性域にとどめ、大地震に対しても建物の塑性率が約 2 と応答変形を低減できていることから、補強の効果がみられる。次に最大変形に注目して、ダンパーの量、支持部材の剛性を変化させたときの補強効果を比較した結果を図 - 12 に示す。

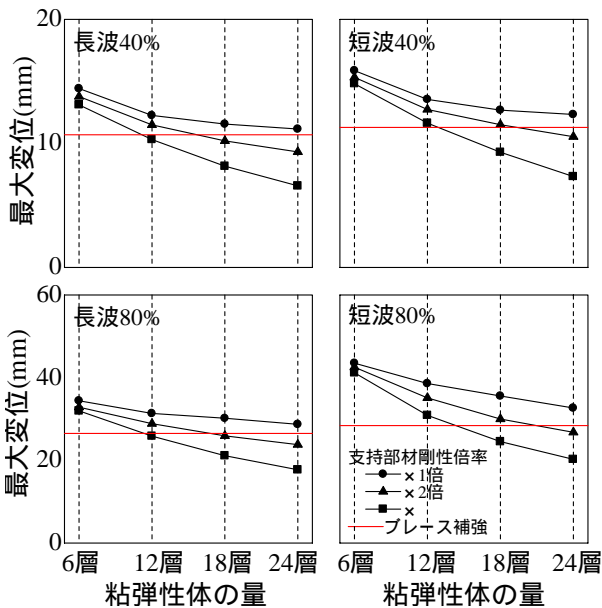


図 - 12 最大変形比較 (40%, 80%入力)

ブレース補強とダンパー補強 (ブレース剛性 1 倍) を比較すると変形を抑える点では剛性・強度を高くするブレース補強の方が有効であると思われる。ダンパー補強をブレース補強と同程度の変形制御性能を持たせるには、支持部材の剛性を高くするか、粘弾性体の量を増やす必要がある。図 - 12 をみると、ブレースの剛性を 2 倍、ダンパーの量を 12~18 層程度組み込むと、ブレース補強の変形制御性能に近づくことが分かった。

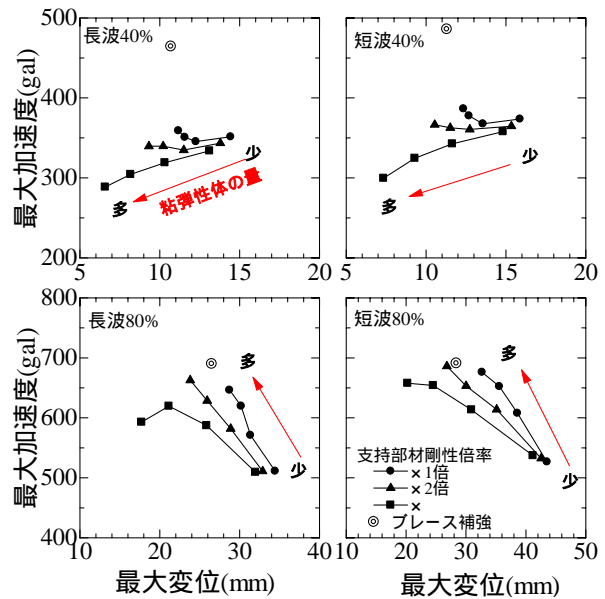


図 - 13 最大変位-最大加速度 (40, 80%入力)

図 - 13 に示すように応答加速度に注目するとダンパー補強はブレース補強に比べて加速度の上昇を抑える長所があり特に建物が降伏しない中小地震 (40% 入力) 時に顕著に見られる。大地震時 (80% 入力) はブレース補強の場合、建物、鉄骨ブレースが共に降伏しているため加速度は頭打ちになっている。それに対し、ダンパー補強ではダンパーの量を増やすと、加速度は上昇する傾向がみられる。

ダンパーのエネルギー吸収能力はダンパーの変形量に依存する。ダンパーの変形量は、粘弾性ダンパーと鉄骨ブレースとの剛性比に依存していると考えられる。そこで、粘弾性ダンパーと鉄骨ブレースとの剛性比 (ダンパーの弾性剛性 k_d' / ブレースの剛性 k_b) と変形比 (ブレース

の最大変形 / ダンパーの最大変形) の関係を調べてみると図 - 14 に示すようになる。

図 - 14 よりわかるように、ダンパーの量を増加させても支持部材の剛性が小さいと、支持部材の方が変形してしまい、ダンパーの変形量が小さくなってしまいエネルギー吸収しなくなる。

また、剛性比と変形比の関係は $r_y = 1.4 \times r_k$ の直線に近似でき、ブレースの剛性は弾性で一定なので、ダンパーの最大変形に影響を与える等価剛性 k_{de} は弾性剛性 k'_d に対して、 $k_{de} = 1.4 \times k'_d$ の関係が成り立っていることになる。

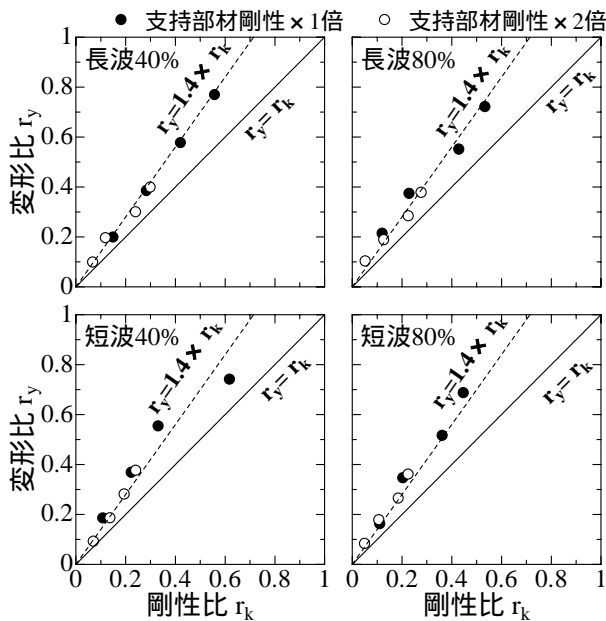


図 - 14 剛性比 r_k と変形比 r_y

4. 等価線形化法を用いた応答評価

4.1 等価減衰・等価剛性

支持部材 (鉄骨ブレース)・粘弾性ダンパー・フレーム・系全体の荷重-変形関係を簡略化して書くと図 - 15 のようになっている。

粘弾性ダンパーの等価剛性 k_{de} は図 - 4 より、複素剛性の絶対値として式(2)で定義されている。系全体の等価剛性は、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にあるため以下の式(3)で定義⁶⁾できる。

$$k_{de} = \sqrt{k'_d{}^2 + k_d{}^2} = k'_d \sqrt{1 + \eta^2} \quad (2)$$

$$k_e = k_{fe} + \frac{1}{1/k_b + 1/k_{de}} \quad (3)$$

ここで支持部材の鉄骨ブレースは弾性と仮定して、粘弾性ダンパー、フレームそれぞれの履歴吸収エネルギーを ΔW_d 、 ΔW_f とすると、式(4)のようになる。ポテンシャルエネルギー W は図 - 15 の三角形の面積となるので、粘弾性ダンパーを用いて耐震補強した建物の等価粘性減衰 h_e は次の式のようにになる。ただし、 h_0 は建物の初期減衰定数で $h_0 = 0.02$ 。

支持部材 (鉄骨ブレース)・ダンパー・系全体の变形は式(6)に示す関係であり、 $y_b : y_d$ は図 - 14 より推定できる。

$$\Delta W_f = 2(1 - 1/\sqrt{\mu})k_{fe}y^2 \quad \Delta W_d = \pi\eta k_{de}y_d^2 \quad (4)$$

$$h_e = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_f + \Delta W_d}{W} = \frac{2(1 - 1/\sqrt{\mu})k_{fe}y^2 + \pi\eta k_{de}y_d^2}{2\pi k_e y^2} + h_0 \quad (5)$$

$$y = y_b + y_d \quad (6)$$

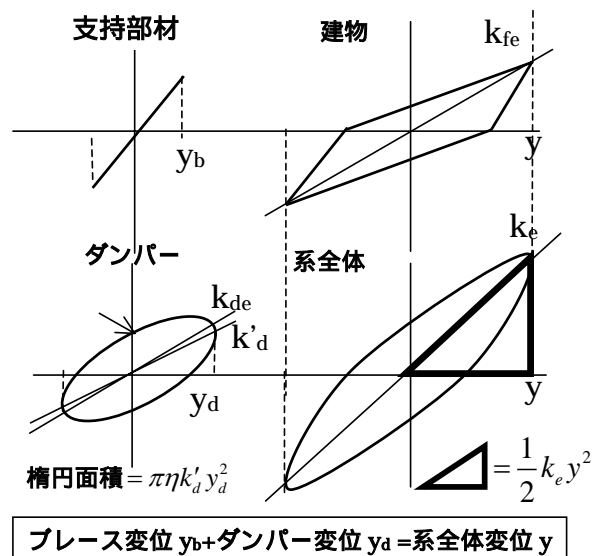


図 - 15 荷重 - 変形関係

前の地震応答解析で述べたように、ダンパーの等価剛性と弾性剛性の間には、 $k_{de} = 1.4 \times k'_d$ の関係がみられた。この 1.4 の値は、ダンパーの等価剛性の係数 $\sqrt{1 + \eta^2}$ に対応する値であり振動数に依存する。本報のダンパー補強した建物の振

動数に対応する η の値は約 0.8 ~ 0.9 であるため、解析より求めた $k_{de} = 1.4 \times k'_d$ の関係は概ね妥当と思われる。そこでこの関係を用いて式 (5) で定義したダンパー補強された建物の等価粘性減衰 h_e の値を求め図 - 16 に示す。また定常応答解析より求めた粘性減衰 h_{eq} の値をドットで示し比較した。

これより、ダンパーの等価剛性を $k_{de} = 1.4 \times k'_d$ として求めた等価粘性減衰は、解析値と良く対応している。

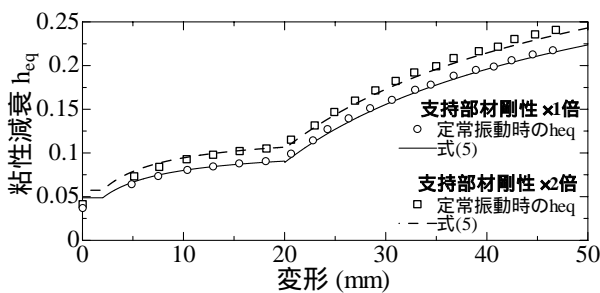


図 - 16 等価粘性減衰 (6 層)

4.2 応答推定結果

支持部材の剛性倍率は 1 倍と 2 倍、ダンパーの量は 6, 12, 18, 24 層として補強した場合の地震波 40%・80% 入力時の最大応答を等価線形化法で推定した結果と地震応答解析結果をそれぞれ図 - 17 に示し比較した。

粘弾性ダンパーの等価剛性を弾性剛性の 1.4 倍とした簡易的手法で応答推定した結果、長波・短波共に弾性域 (40% 入力) ではダンパーの量に関係なく、非常によい精度で推定できている。塑性域 (80% 入力) でも若干ばらけるもののよい推定精度といえる。

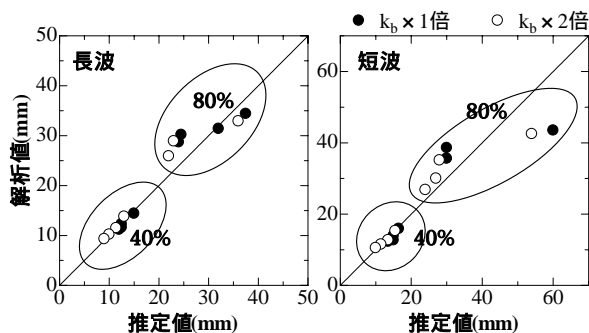


図 - 17 推定結果

5. まとめ

本報では、既存 RC 造建物に対して、鉄骨ブレースに粘弾性ダンパーを組み込むことで制振補強した建物を対象に地震応答解析を行い、従来型のブレース補強との補強効果の比較をすると共に、粘弾性体の量や支持部材の剛性による応答への影響を検討した。制振補強された建物の応答評価として等価線形化法を用いて最大応答の推定を行った。

(1) 補強効果の比較

変形制御性能の点ではブレース補強した建物のほうが良い結果となった。ダンパー補強で、ブレース補強並みの変形制御性能を持たせるには、支持部材である鉄骨ブレースの剛性を上げダンパーの量を増やす必要があった。最大加速度に注目するとダンパー補強はブレース補強に比べて中小地震時に加速度の上昇を抑えることが確認できた。

(2) 補強建物の等価線形化

粘弾性ダンパーで補強された建物の等価剛性を $k_{de} = 1.4 \times k'_d$ として等価粘性減衰を評価し、等価線形化法を用いて応答推定を行い、良い精度の推定結果を得られた。

参考文献

- 1) 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
- 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・同解説, 2001 年改
- 3) 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 年改
- 4) 笠井和彦, 寺元道彦, 大熊潔, 所健：粘弾性体の温度・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
- 5) 康在完, 堀則男, 井上範夫, 川股重也：硬化型復元力特性をもつエネルギー吸収デバイスを設置した RC 造建物の地震応答性状, コンクリート工学年次論文集第 25 巻第 2 号 pp1171~1176, 2003.7
- 6) 伊藤嘉郎：粘弾性特性を有するエネルギー吸収材料を用いた建築耐震構造の地震応答特性に関する研究, 2000 年度東北大学博士学位論文