

論文 履歴型制振ブレースを設置した既存低層RC造建物のエネルギー応答性状

落合 徹^{*1}・藤井 賢志^{*2}・北村 春幸^{*3}

要旨 : 近年, 1981 年以前に建てられた既存 RC 造建物を対象とする制振補強の開発および実施が精力的に行われている。しかしながら, 現在の耐震診断基準では制振補強による補強効果を評価することはできず, その評価には時刻歴応答解析が必要となってくるのが現状である。そこで本論では, 履歴型制振ブレースを設置したせん断破壊型の既存 RC 造建物に焦点を絞り, そのエネルギー応答性状に着目し, 時刻歴応答解析より算出される各層のせん断力と層間変位の関係の包絡曲線より既存 RC 躯体が吸収するエネルギーと, 制振ブレースが吸収するエネルギーが推定可能であることを示す。

キーワード : 既存 RC 造建物, 制振補強, 履歴型制振ブレース, エネルギー応答, 耐震診断

1. はじめに

1995 年 1 月に阪神淡路大震災が起き, 同年 10 月に建築物の耐震改修の促進に関する法律が制定され, 近年日本各地で既存 RC 造建物の耐震補強が精力的に行われている。一般的に既存 RC 造建物の耐震補強は耐震診断基準に従って行われるが, 近年増えてきた制振補強に関しては従来の耐震診断基準を適応することはできず, 時刻歴応答解析を用いて耐震性能評価を行っているのが現状である。そこで本論では, エネルギーの釣合いに基づき制振補強を施したせん断破壊型の既存 RC 造建物応答性状を検討する。

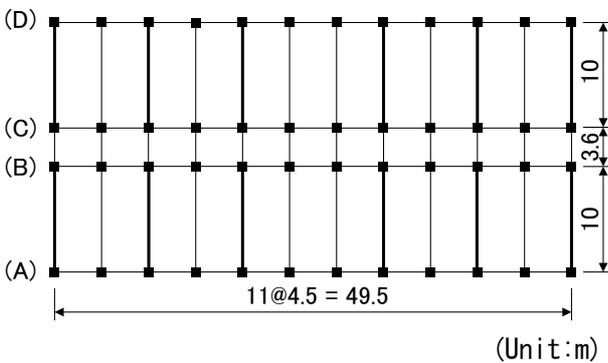


図-1 基準階平面

2. 解析諸元

2.1 解析対象建物とそのモデル化

(1) 解析対象建物

解析対象建物は, 図-1 に示す矩形平面を有する既存 RC 造学校校舎を想定した 3 層, 4 層建物であり, それぞれを Model-3, Model-4 とする。構面 A と D には腰壁が付いており, 高さは 1 層で 900mm, 他層で 600mm である。軸組図を図-2 とする。各階の慣性質量は 1.3 (ton/m²), 使用コ

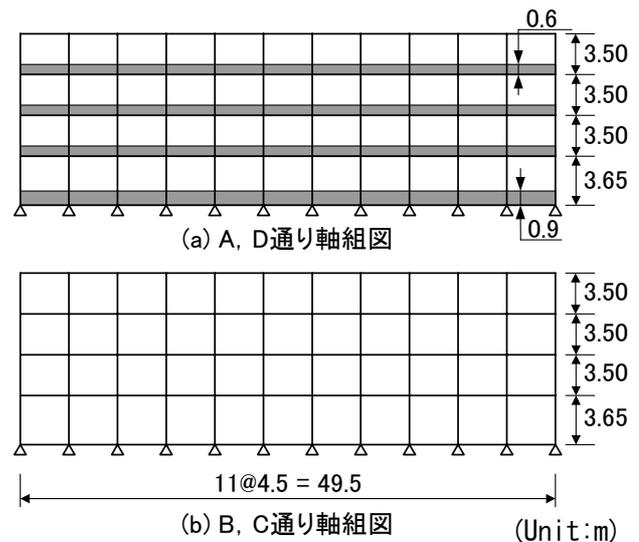


図-2 軸組図 (Model-4)

*1 東京理科大学 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 助手 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博

ンクリートは $F_c=18$ (N/mm²), 主筋は SD295, せん断補強筋は SR235 を使用するものとする。

部材断面は表-1 に表すように設定する。また, 構面 A と D の柱部材はせん断破壊が先行し, 構面 B と C の柱部材は曲げ破壊が先行するものとする。梁部材はせん断および曲げに対して十分に強く, 建物全体としては柱崩壊型の挙動となるようにする。

表-2 に, 形状指標 S_D , 経年指標 T とともに 1.0 と仮定して算定した解析対象建物の構造耐震指標 I_s を示す。また, 表-3 に制振ブレースを設置していない無補強状態での 1 次固有周期を示す。

(2) 制振ブレース

制振ブレースは, 桁行き方向外側の A と D 通り構面に設置するものとし, 各層に配置する。また, 制振ブレースには低降伏点鋼(LYP100)を用いるものとする。

パラメータは第 1 層において全ての制振ブレースが降伏する時の負担せん断力 sQ_{yi} とし, $0.05W, 0.10W, 0.15W, 0.20W$ (W :建物全重量)とする。なお, 2 層以上での制振ブレースの降伏耐力 sQ_{yi} は, A_i 分布に比例させるものとした。また, 梁間方向は十分に壁が配置されており, 所定の耐震性能が満足されているものとする。図-3 に制振ブレース付構面の軸組図を示す。

(3) 解析建物のモデル化

解析は, 平面フレーム解析により行うものとし, 桁行方向のみ検討する。解析建物は構面 A と D, 構面 B と C が同一であるため, 構面 A と構面 B を解析対象とする。各部材は矩形部分の図心を通る線材でモデル化し, 剛域はフェイス位置までとする。

梁部材は曲げ変形およびせん断変形を, 柱部材は曲げ変形・せん断変形に加えて軸方向変形を考慮する。梁および柱部材はせん断バネの付いた材端バネモデルでモデル化する。本論文では, いずれかの柱にせん断破壊が生じるまでの応答を議論の対象とする。そして, 構面 A の柱

表-1 部材断面

	Model-3, 4
梁	350×700
柱	550×500
基礎梁	350×1000

表-3 1 次固有周期

Model-3	0.3126
Model-4	0.4107

Unit : sec

表-2 解析対象建物の構造耐震指標

	Story	C指標	F指標	I_s 値
Model-3	3	0.416	1.000	0.403
	2	0.238	1.000	0.288
	1	0.225	1.000	0.321
Model-4	4	0.434	1.000	0.389
	3	0.267	1.000	0.282
	2	0.224	1.000	0.281
	1	0.225	1.000	0.306

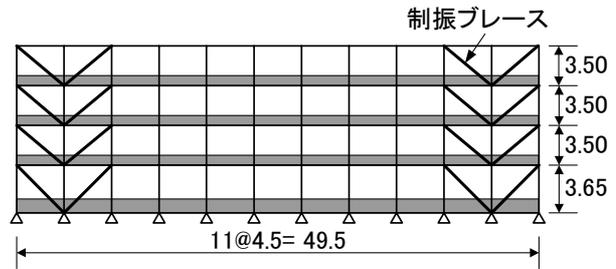


図-3 制振ブレース付構面の軸組図 (Model-4)

表-4 入力地震動一覧

観測記録名称	El Centro 1940NS	Hachinohe 1968EW	JMA Kobe 1995NS
地震動ID	ELC	HAC	JKB
最大加速度 (m/s ²)	3.417	1.802	8.178
解析時間 (sec)	40	40	25

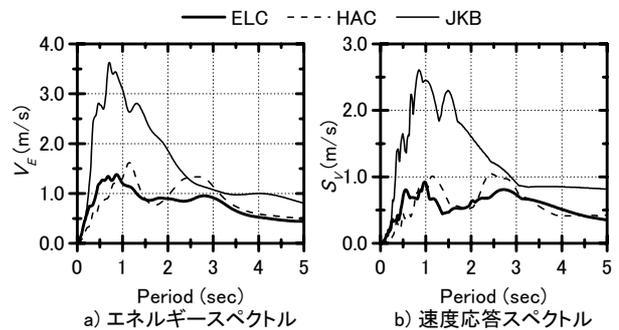


図-4 応答スペクトル

でせん断破壊が生じる時点では, いずれの部材でも曲げ降伏が生じずかつ繰り返しによるエネルギー吸収が生じないものとする。以上の理由により, 各バネの履歴特性として原点指向型モデルを用いる。

2.2 入力地震動

入力地震動は, 表-4 に示す観測記録とする。図-4 に入力地震動の総入力エネルギースペクトル (減衰定数 $h=0.10$)²⁾ と速度応答スペクトル (減衰定数 $h=0.05$) を示す。

3. 制振ブレースを設置した既存 RC 建物のエネルギー応答

3.1 エネルギーの釣合式^{2),3)}

本論文では文献 3)同様，最大応答発生時刻 t_m でのエネルギーの釣合に着目して議論を行う。

エネルギーの釣合式は式(1)で表される。

$$W_e + W_p + W_h = E = \frac{1}{2} M V_E^2 \quad (1)$$

ここで， W_e は弾性振動エネルギー， W_p は累積塑性ひずみエネルギー， W_h は減衰によって消費されたエネルギー， E は総入力エネルギー， M は建物の全質量， V_E は総入力エネルギーの速度換算値を示す。

式(1)中の W_e は弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーの和によって定められ，変位が最大となる点では運動エネルギーがゼロとなることから W_e は弾性ひずみエネルギーと等しくなる。

ここで式(1)の $E - W_h$ を損傷に寄与するエネルギー入力として E_D とする。さらに， W_e と W_p をそれぞれ既存 RC 躯体が吸収する部分と制振ブレースが吸収する部分に分けて表記すると E_D は式(2)のように示される。

$$E_D = W_D = fW_e + fW_p + sW_e + sW_p \quad (2)$$

式(2)中で W_D は建物が吸収する全ひずみエネルギー， fW_e は躯体が吸収する弾性ひずみエネルギー， fW_p は躯体が吸収する累積塑性ひずみエネルギー， sW_e は制振ブレースが吸収する弾性ひずみエネルギー， sW_p は制振ブレースが吸収する累積塑性ひずみエネルギーを示す。

3.2 建物が終局状態まで応答する時の総入力エネルギー

時刻歴応答解析では，解析対象建物内のいずれかの柱にせん断破壊が生じた時点(柱のせん断バネの最大塑性率 $\mu_{cs} > 1$)で建物が終局状態に達したものとし，ちょうどせん断破壊が生じる ($0.99 \leq \mu_{cs} < 1.0$)地震動の倍率を求める。図-5 に柱のせん断破壊が生じる入力倍率での総入力エネルギーの速度換算値 V_E とブレースの降伏耐力の関係を示す。図-5 より明らかなように，柱の

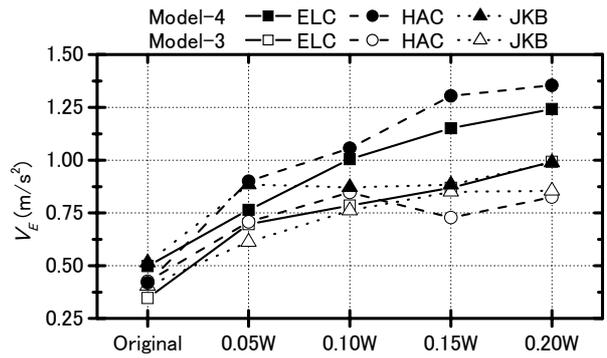


図-5 総入力エネルギーの速度換算値

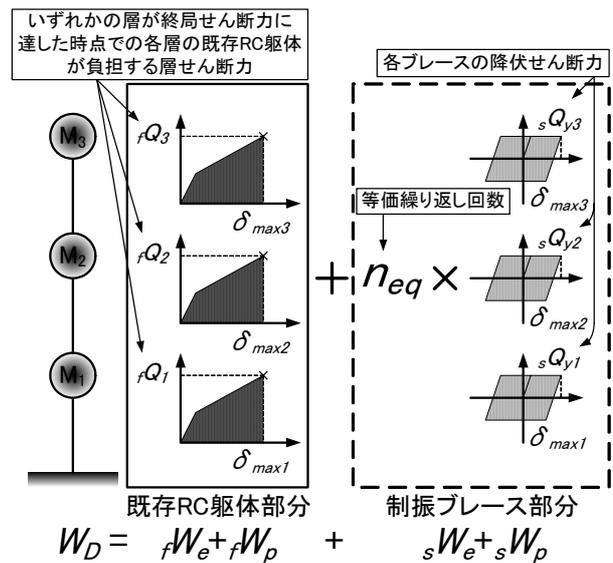


図-6 W_D の概念図 (Model-3)

せん断破壊が生じる入力倍率での V_E は制振ブレースの降伏耐力が増加するに従って増加しているのがわかる。これは，制振ブレースで吸収されるエネルギーが増加した結果，柱でせん断破壊が生じるまでに建物全体で吸収できるエネルギーが増加したためである。

3.3 既存 RC 躯体と制振ブレースのエネルギー応答

(1) 建物全体で吸収するエネルギーの概念

以下では，建物が終局状態まで応答する時に吸収できる全ひずみエネルギー W_D の評価を行う。図-6 に建物全体で吸収するエネルギー W_D の概念図を示す。 W_D は図の通り既存 RC 躯体部分で吸収されるエネルギーと，制振ブレース部分で吸収されるエネルギーに分けて考えられる。

既存 RC 躯体で吸収するエネルギーをまとめ

て式(3)で定義する。

$${}_fW = {}_fW_e + {}_fW_p \quad (3)$$

式(3)の ${}_fW$ は繰り返しによる履歴吸収エネルギーが全く生じないものとする、各層の ${}_fQ-\delta$ 関係の包絡曲線から式(4)を用いて求められる。

$${}_fW = \sum {}_fW_i, \quad {}_fW_i = \int_0^{\delta_{maxi}} {}_fQ_i d\delta_i \quad (4)$$

制振ブレースで吸収するエネルギーも同様にまとめて式(5)で定義する。

$${}_sW = {}_sW_e + {}_sW_p \quad (5)$$

式(5)は制振ブレースの降伏変形が最大変形に比べて小さく、弾性ひずみエネルギー ${}_sW_e$ が無視できる時には、累積塑性ひずみエネルギー ${}_sW_p$ のみで与えられ、 ${}_sW_p$ は正負共に振幅が最大層間変位 δ_{maxi} で1サイクル回った時の履歴吸収エネルギーに等価繰り返し数 n_{eq} を掛けたものとして得られるため、式(5)は式(6)で示される。

$${}_sW = \sum_i {}_sW_i \quad (6)$$

$${}_sW_i = n_{eq} \cdot 4 \cdot {}_sQ_{yi} (\delta_{maxi} - \delta_{Dyi})$$

ここで、 δ_{Dyi} は制振ブレースの降伏層間変位である。以下では ${}_fW$ および ${}_sW$ について詳細に検討する。

(2) 既存 RC 躯体で吸収されるエネルギー

ここでは、既存 RC 躯体部分のせん断力 ${}_fQ$ -層間変位 δ 関係の包絡曲線から吸収エネルギー ${}_fW$ を求める。代表的なモデルとして、図-7 に Model-3 の無補強モデルと制振ブレースを 0.20W 設置した時の ELC を入力した時刻歴応答解析結果より得られた各層の ${}_fQ-\delta$ 関係の包絡曲線を示す。図-7 より、両者の差が小さいことがわかる。同様の結果は他の入力、他のモデルでも得られた。

図-8 には時刻歴応答解析結果より得られた建物全体での ${}_fW$ (解析値)と包絡曲線より式(4)を用いて得られた各層の ${}_fW$ (推定値)を比較して示す。図-8 より両者は地震動の種別によらず非常に良

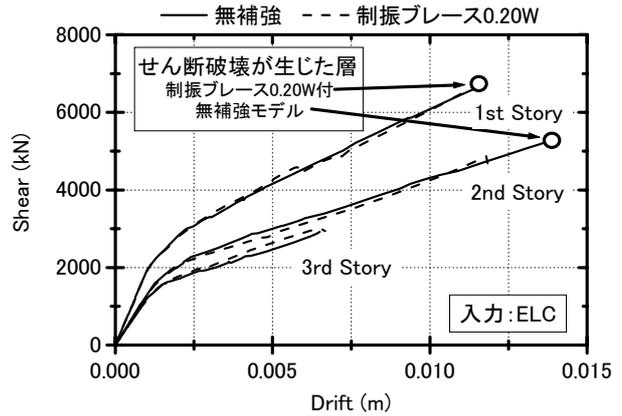


図-7 既存 RC 躯体の包絡曲線 (Model-3)

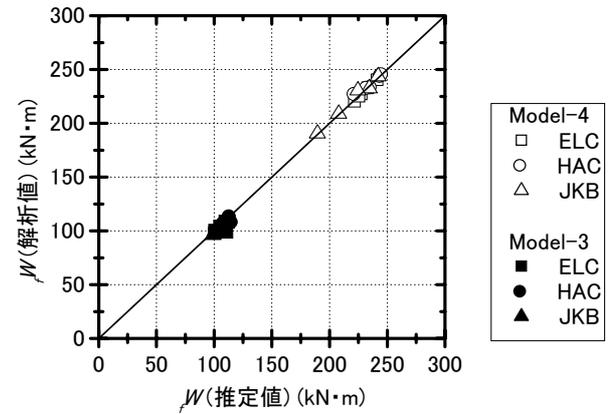


図-8 ${}_fW$ の解析値と推定値の比較

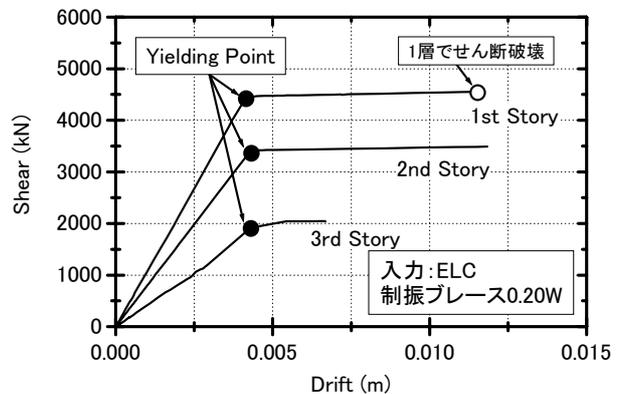


図-9 制振ブレースの包絡曲線 (Model-3)

好に対応しており、 ${}_fQ-\delta$ 関係の包絡曲線から ${}_fW$ が評価可能であることが分かる。

(3) 制振ブレースで吸収されるエネルギー

次に制振ブレースで吸収するエネルギー ${}_sW$ を既存 RC 躯体部分による吸収エネルギー ${}_fW$ と同様に、包絡曲線を用いて推定する。

図-9 に Model-3 に制振ブレースを 0.20W 設置した時の制振ブレースの負担せん断力 ${}_sQ$ -層間変位 δ の包絡曲線を示す。図-9 より明らかなよ

うに、せん断破壊が生じた時点での最大層間変位 δ_{maxi} と制振ブレースの降伏層間変位 δ_{Dy} の比 $\delta_{maxi}/\delta_{Dy}$ は 1 層, 2 層で 3.0 程度, 3 層では 1.5 程度であり, 1 層および 2 層で制振ブレースが効いていることが確認できる。

図-10 に各制振ブレースについて式(7)より求めた等価繰り返し回数 n_{eq} と, 制振ブレースの最大負担せん断力 sQ_{maxi} と既存 RC 躯体の最大負担せん断力 fQ_{maxi} の比 sQ_{maxi}/fQ_{maxi} の関係を示す。

$$n_{eq} = \frac{sW_i}{4sQ_{yi}(\delta_{maxi} - \delta_{Dyi})} \quad (7)$$

ここで, sW は時刻歴応答解析より得られた制振ブレースが吸収したエネルギー, sQ_y 及び δ_{Dy} は解析建物を設定した際に決めた値, δ_{max} は図-9 に示す包絡曲線から得られた値とする。また, 図-9 において既に示したように, Model-3 では 3 層の制振ブレースの塑性化の程度が小さくなっている。同様の傾向は Model-4 においても確認されている。そこで, 塑性化の程度が小さい制振ブレースに関しては, 吸収エネルギーも小さく, 建物全体の sW を求める際の影響が小さいとの判断より, 図-10 のプロットからは最上層のブレースは除外している。

図-10 より, n_{eq} は制振ブレースの負担せん断力の比 sQ_{maxi}/fQ_{maxi} が大きくなるにつれて小さくなる傾向があること, および n_{eq} の下限値は概ね 2.0 程度となることがわかる。

ここで, 等価繰り返し回数 n_{eq} を 2.0 と仮定して包絡曲線から制振ブレースが吸収したエネルギーを算出する(式(8))。

$$sW = 4n_{eq} \sum_i sQ_{yi}(\delta_{maxi} - \delta_{Dyi}) \quad (8)$$

図-11 に式(8)による sW (推定値)と時刻歴応答解析より得られた sW (解析値)を比較した結果を示す。図-11 より, 式(8)により $n_{eq}=2.0$ として推定した sW (推定値)と時刻歴応答解析による sW (解析値)の対応にばらつきが見られ, sW (解析値)を

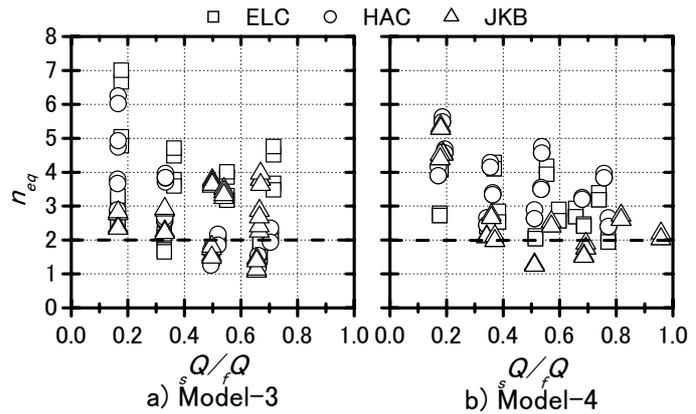


図-10 等価繰り返し回数 n_{eq}

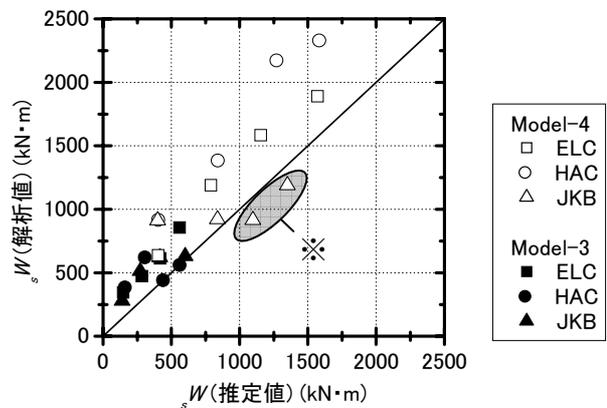


図-11 sW の推定結果

全般的に小さめに評価していることがわかる。なお, 図中の※印のプロットは時刻歴応答解析による sW (解析値)より式(8)で評価した sW (推定値)の方が大きくなったケースであるが, これは JKB を入力し, 図-10 において n_{eq} が 2.0 を下回ったケースである。

従って, 適切な等価繰り返し回数を設定することによって式(8)から制振ブレースが吸収するエネルギー sW を推定可能と言える。

3.4 建物全体で吸収できるエネルギーの評価

図-12 に, 前節で推定した既存 RC 躯体の吸収エネルギー fW と制振ブレースの吸収エネルギー sW の和として示される建物が終局状態まで応答する時の吸収エネルギー W_D を推定し, 時刻歴応答解析結果と比較して示す。

図-12 より, W_D (推定値)は時刻歴応答解析結果と良好に対応しているのが分かる。

そこで, 時刻歴応答解析により得られる包絡

曲線を用いずに建物全体で吸収するエネルギー W_D の推定を試みる。ここで、Ai 分布を用いた静的漸増載荷解析を行って得られる層せん断力-層間変位関係を用いる。静的漸増載荷解析は、いずれかの層の柱でせん断破壊が生じるステップまで行い、当該ステップまでの層せん断力-層間変位関係を用いる。さらに、制振ブレースにおける等価繰返し数 n_{eq} は、前述の検討に基づき 2.0 と仮定する。

図-13 に推定した W_D を示す。図-13 より静的漸増載荷解析より得られたスケルトンカーブを用いても良好な対応を示しているのが分かる。この結果から、適切なスケルトンカーブを仮定することで、時刻歴応答解析を用いなくても制振ブレースを設置した既存 RC 造建物が吸収するエネルギー W_D を推定することが可能であることがわかる。

4. まとめ

本論では、履歴減衰型制振ブレースを設置したせん断破壊型既存 RC 造建物のエネルギー応答性状に着目して検討した。限られた結果からではあるが得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断破壊型の既存 RC 造躯体の吸収できるエネルギーは既存 RC 造躯体部分の負担せん断力-層間変位関係から推定可能である。
- (2) 履歴減衰型制振ブレースの吸収エネルギーは、正負共に振幅が各層の最大層間変位で 1 サイクル回った時の履歴吸収エネルギーと、適切に設定した等価繰返し回数の積で推定できる。なお、制振ブレースの負担せん断力の比が大きくなるにつれて、等価繰返し回数が小さくなる傾向があるが、本検討の範囲ではその下限値として 2.0 を取ることができた。
- (3) 履歴減衰型制振ブレースを設置したせん断破壊型の既存 RC 造建物が終局状態まで応答する時の吸収エネルギーは、上記(1),(2)に基づき推定した吸収エネルギーの和として推定できることを示した。次いで、静的漸増載

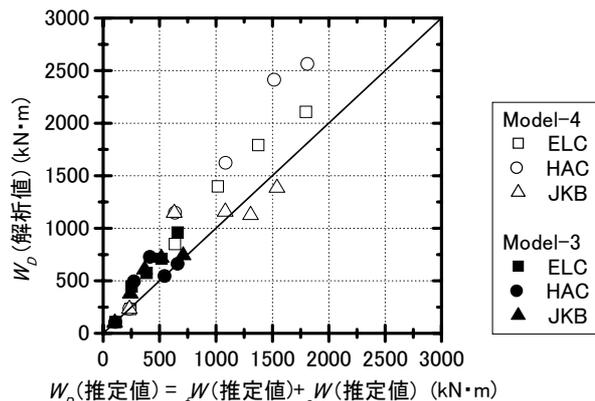


図-12 W_D の解析値と推定値の比較

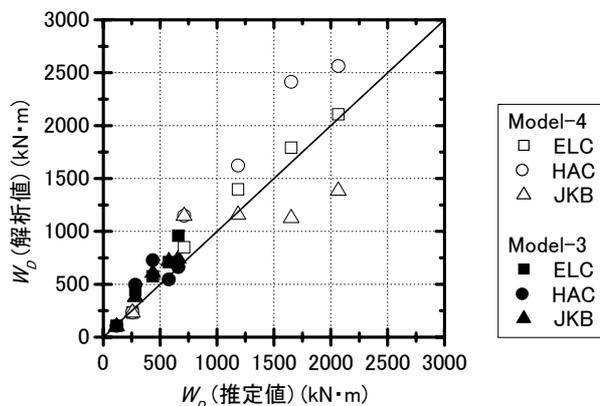


図-13 静的漸増載荷解析による W_D の推定

荷解析結果に基づき、制振ブレースの等価繰返し数を適切に設定することで時刻歴応答解析を行うことなく、建物全体での吸収エネルギーを推定可能であることを示した。

今後、終局状態まで応答する時の吸収エネルギーから制振ブレースを設置した時の耐震性能の評価法を検討する予定である。

謝辞

本研究は、JFE スチール株式会社と東京理科大学北村研究室の共同研究の成果を使用させて頂きました。関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001 年改訂版 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
- 2) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1991.1
- 3) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門，彰国社，2002.9