

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	様々な入力地震動を用いた損傷に寄与するエネルギーEDの評価
Title	
著者(和文)	佐藤大輔, 佐藤大樹, 松澤祐介, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 松蔭知明
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2037
Citation(English)	, Vol. 83, , 2037
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769783

様々な入力地震動を用いた損傷に寄与するエネルギー E_D の評価

構造一振動 正会員 ○ 佐藤大輔^{*1} 同 佐藤大樹^{*1} 同 松澤祐介^{*1} 同 北村春幸^{*1}
同 山口路夫^{*2} 同 脇田直弥^{*2} 同 松蔭知明^{*2}

入力エネルギー 損傷に寄与するエネルギー エネルギー法
せん断モデル 長周期長継続地震動

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の経験や、近い将来、発生が懸念されている長周期長継続地震動に起因して、昨今、累積値による損傷評価の重要性が高まっており、エネルギーの釣合いに基づく耐震設計法（以後、エネルギー法）に関する知見の充実がいつそう望まれる状況にある。

エネルギー法では、損傷に寄与するエネルギー E_D （=入力エネルギー E -減衰エネルギー W_h ）を用い建物の損傷評価を行うものであり、秋山より、ダンパーを有しない1質点モデルにおける E_D の経験式が提案されている¹⁾。この経験式は弾性系・弾塑性系の双方において有用性を確認されているが、標準波のみの検討に基づいたものであり、今後、 E_D の経験式を拡張するためにも様々な入力地震動による E_D の傾向特性の把握は重要であると考えられる。

本報では、長周期長継続地震動を含む入力地震動 12 波を用いたダンパーを有しない1質点・多質点モデルにおける E_D について考察を行う。

2. 検討モデル諸元及び入力地震動概要

2.1 検討モデル諸元

はじめに、1 質点モデルの諸元について述べる。検討モデルの1次固有周期 T_1 は $T_1=0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0$ (s)の5種類とし、以降、各モデルをそれぞれT0.5, T1.0, T2.0, T4.0, T6.0と称す。各モデルの初期剛性 K は式(1)より表せる。

$$K = M \left(\frac{2\pi}{T_1} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 M : 建物総質量 (=9.8(kN・s²/cm)) であり、降伏せん断力 Q_y は R_y 曲線に従い式(2)より求める。

$$Q_y = C_0 \cdot Mg \quad (T_1 \leq 1.0) \quad (2a)$$

$$Q_y = \frac{C_0 \cdot Mg}{T_1} \quad (T_1 > 1.0) \quad (2a,b)$$

ここで、 C_0 : 標準せん断力係数、 g : 重力加速度である。

次に、多質点モデルの諸元について述べる。多質点モデルの作成にあたっては、5階建て、8階建て、10階建て、21階建て、35階建ての鋼構造建物を対象とした。図1に各建物の基準階伏図と軸組図、表1に各建物の部材断面を示す。なお、解析対象はX方向とする。構造減衰は T_1 に対して減衰定数 $h=2\%$ となる剛性比例型とした。本報では、図2に示すように、静的増分解析から得られる各層の履歴曲線の面積と、終局変形 δ_{ui} （静的増

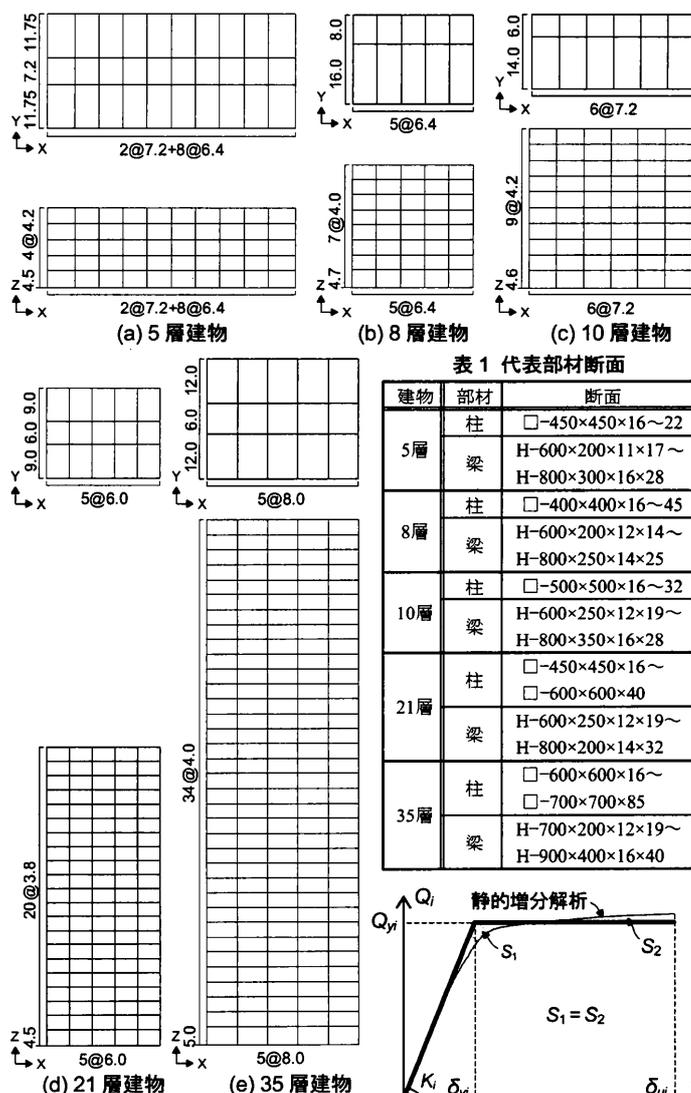


表1 代表部材断面

建物	部材	断面
5層	柱	□-450×450×16~22
	梁	H-600×200×11×17~ H-800×300×16×28
8層	柱	□-400×400×16~45
	梁	H-600×200×12×14~ H-800×250×14×25
10層	柱	□-500×500×16~32
	梁	H-600×250×12×19~ H-800×350×16×28
21層	柱	□-450×450×16~ □-600×600×40
	梁	H-600×250×12×19~ H-800×200×14×32
35層	柱	□-600×600×16~ □-700×700×85
	梁	H-700×200×12×19~ H-900×400×16×40

図1 基準階伏図と軸組図 (単位: m)

図2 復元力特性

表2 多質点解析モデル諸元

	5層	8層	10層	21層	35層
T_1 (sec)	1.10	1.51	2.01	2.42	4.08
W (kN)	75199	49115	67912	115347	373870
Q_{y1} (kN)	35154	13352	19578	30354	55176
α_1	0.47	0.27	0.29	0.26	0.15
$\alpha_1 \cdot T_1$	0.51	0.41	0.58	0.64	0.60

分解析における最大変形) 時の履歴面積が等しくなる完全弾塑性型に置換し、降伏変形 δ_{yi} を設定したせん断型モデルを用いて検討を行った²⁾。以降、各建物により得られたせん断型モデルを5層、8層、10層、21層、35層モデルと称す。表2に多質点解析モデル諸元を示す。ここに、 α_1 : ベースシア係数 (= $Q_y /$

Mg) である。

2.2 入力地震動概要

解析に用いる入力地震動は位相特性 JMA KOBE1995NS における観測波 (以後, JMA KOBE), コーナー周期 $T_c=0.64$ (s) 以降の領域で擬似速度応答スペクトル $\rho S_V=100$ cm/s ($h=5\%$) とする位相特性 HACHINOHE 1968 EW (以後, ART HACHI) および JMA KOBE1995NS (以後, ART KOBE) の模擬地震動, 最大速度を 50 cm/s に基準化した El Centro1940NS (以後, El Centro), 東北地方太平洋沖地震本震 (以後, 本震) における宮城県古川地区, 仙台地区, 東京都新宿区と神奈川県小田原地区において観測された地震動 (以後, FURU, SEN, SHIN, ODA), およびそれらのデータ¹⁾をもとに $T_c=0.64$ (s)以降の領域で $\rho S_V=100$ cm/s ($h=5\%$) に基準化した模擬地震動 (以後, ART FURU, ART SHIN, ART ODA), 東海・東南海地震を想定した東海地方の長周期地震動である三の丸波 (以後, SAN) の 12 波を用いた。図 3 に各入力地震動の加速度時刻歴波形, 図 4 に ρS_V とエネルギースペクトル V_E を示す。図中の $e t_0$ は, 実効地震継続時間³⁾である。また f 値は周期 0~10 秒の範囲で $h=0.1$ のときのエネルギースペクトルの平均値 $\bar{V}_{E,h=0.1}$ と速度応答スペクトルの平均値 $\bar{S}_{V,h=0.1}$ から求められるものであり, El Centro NS 波などの標準波に対して何倍の入力エネルギーを持つかを表す係数である³⁾⁴⁾。

※ 一左から 5 層, 8 層, 10 層, 21 層, 35 層

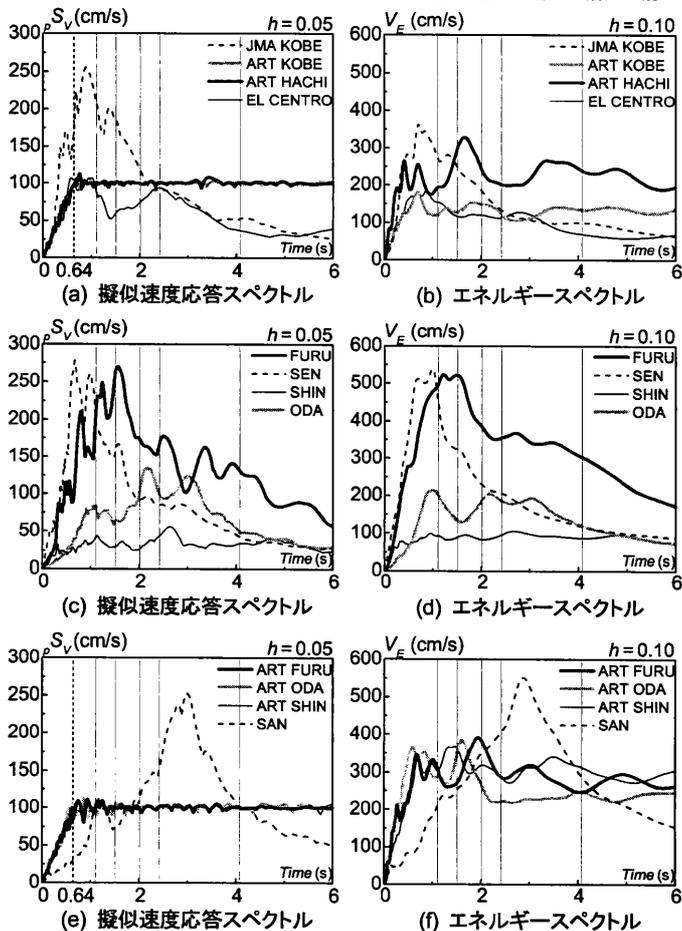


図 4 入力地震動の応答スペクトル, エネルギースペクトル

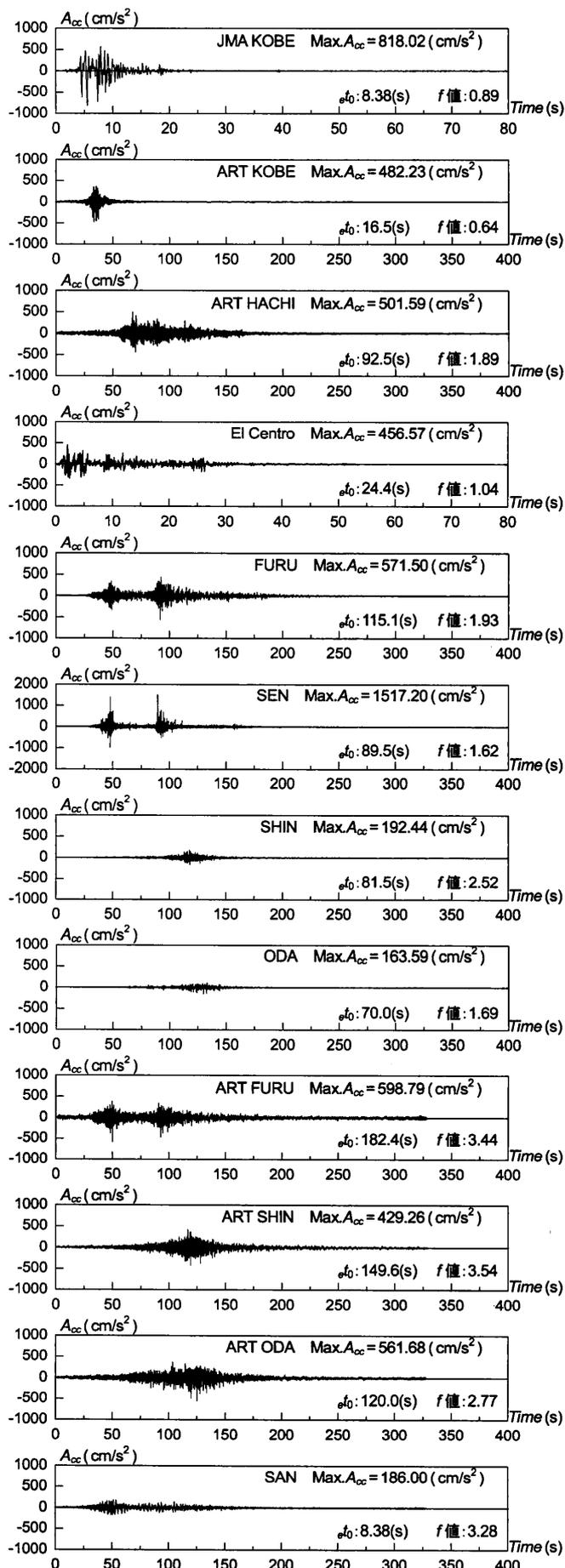


図 3 入力地震動の加速度時刻歴波形

3. 損傷に寄与するエネルギー E_D の検討

3.1 秋山による E_D の経験式

最大応答時 t_m 、地震終了時 t_0 におけるエネルギーの釣合式は以下のように書ける⁵⁾。

$$W_e(t_m) = E_D(t_0) \quad (\text{弾性系}) \quad (3)$$

$$W_p(t_0) = E_D(t_0) \quad (\text{弾塑性系}) \quad (4)$$

最大層間変形角や最大塑性率などの最大応答の予測式は $t = t_m$ 時の釣合い式(式(3))、損傷の程度に関わる塑性歪エネルギーなどの累積値は $t = t_0$ 時の釣合い式(式(4))から求める。ここに、 $W_p(t)$: 塑性歪エネルギー、 $E_D(t)$: 損傷に寄与するエネルギー(= $E(t) - W_h(t)$)、 $E(t)$: 入力エネルギー、 W_h : 減衰エネルギーである。 $W_e(t)$: 弾性振動エネルギー(= $W_{ek}(t) + W_{es}(t)$)、 $W_{ek}(t)$: 運動エネルギー、 $W_{es}(t)$: 弾性歪エネルギーであり、本報では $W_e(t_m) = W_{es}(t_m)$ とした。本報では多質点モデルにおける W_e の算出において、各層の最大応答発生時刻のずれを無視し式(5)より求めた。

$$W_e(t_m) = \sum_{n=1}^N \frac{Q_{\max i} \cdot \delta_{\max i}}{2} \quad (5)$$

ここに、 $Q_{\max i}$: 最大層せん断力、 $\delta_{\max i}$: 最大層間変形、 N : 全層数である。本報では弾性系における E_D を式(3)の釣合い式より求め、弾塑性系における E_D を式(4)の釣合式により求めた¹⁾。

以下に、秋山より提案された E_D の経験式を示す¹⁾。

$$E_D = \frac{E}{(1 + 3h + 1.2\sqrt{h})^2} \quad (6)$$

$$E_D = \frac{E}{(\sqrt{1 + 4\pi n})^2} \quad (7)$$

ここに、 n : 減衰エネルギーの等価繰返し数である。本報では $h = 0.02$ 、 $n = 2, 3$ を用いた。 $h = 0.02$ 、 $n = 2, 3$ を用いた場合、式(6)における E_D は E の66.1%、式(7)($n = 2$)における E_D は E の66.5%、式(7)($n = 3$)における E_D は E の57.0%となる。

3.2 E_D と入力地震動の関係

図5~7に、1質点・多質点モデル、弾性系・弾塑性系における入力地震動と E_D/E の関係を示す。図6(a)は $C_0 = 0.2$ 、(b)は $C_0 = 0.4$ 、(c)は $C_0 = 0.6$ の場合における検討結果である。なお、図5~7の入力地震動の順は、右ほど f 値が大きくなるように並べた。

はじめに、弾性系について考察する。図5(a),(b)より、全体的に、1質点・多質点モデルともに f 値が大きくなるような地震動ほど、 E_D/E が小さくなる傾向が確認できる。各地震動において、 T_1 の違いによる E_D/E の特徴的な傾向はみられない。El Centroをはじめとする f 値が比較的小さい地震動において、経験式(式(6),(7))による E_D は時刻歴解析の E_D よりもおおむね小さく、経験式は時刻歴解析に対し危険側の評価を下すことが確認できる。一方、長周期長継続地震動などの f 値が比較的大きい地震動において、経験式の E_D が時刻歴解析

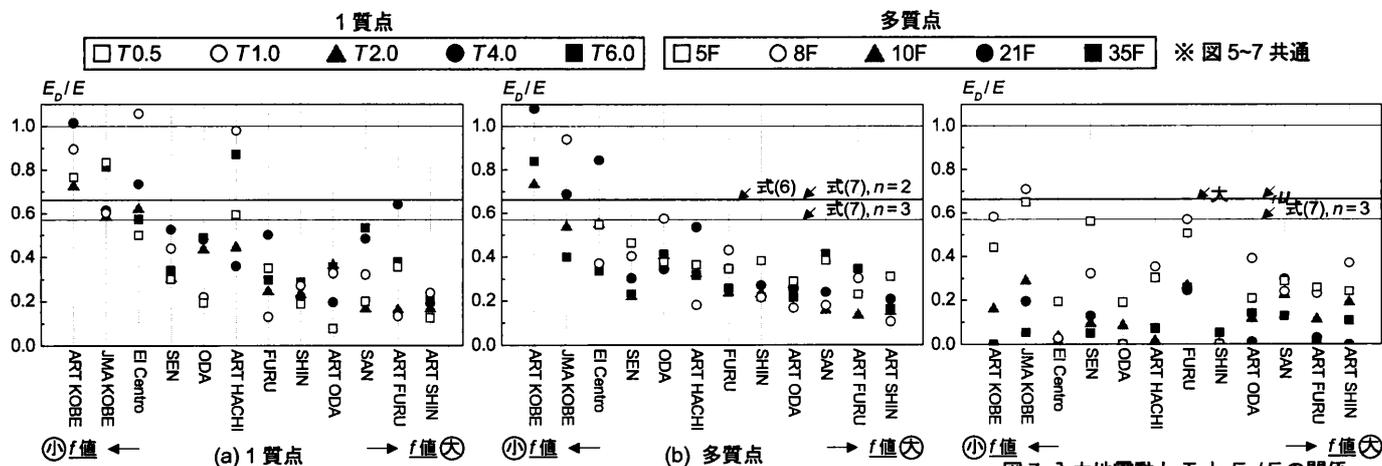


図5 入力地震動、 T_1 と E_D/E の関係 (1質点モデル、弾性系、加速度倍率1.0倍)

図7 入力地震動と T_1 と E_D/E の関係 (多質点モデル、弾塑性系、加速度倍率1.0倍)

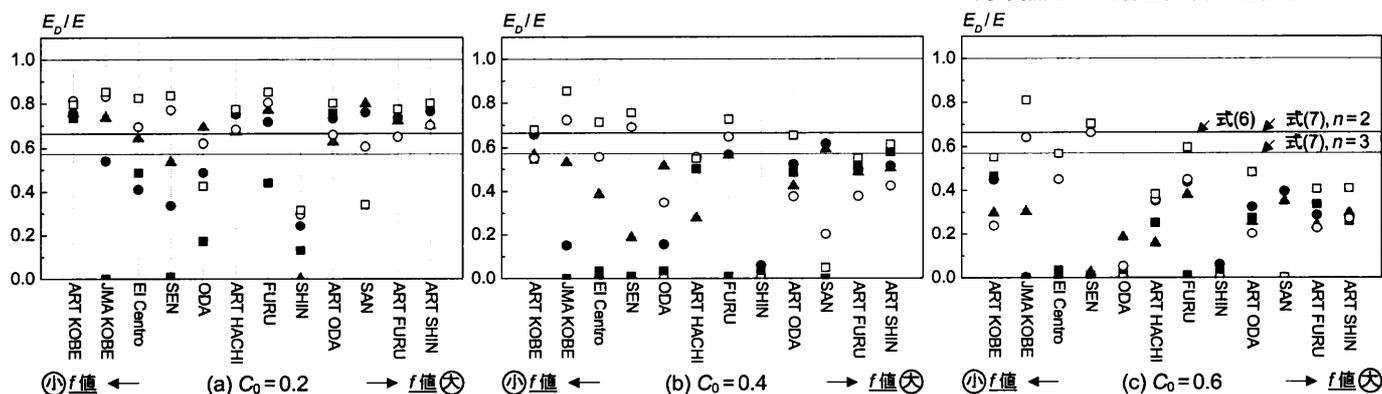


図6 入力地震動、 T_1 と E_D/E の関係 (1質点モデル、弾塑性系、加速度倍率1.0倍)

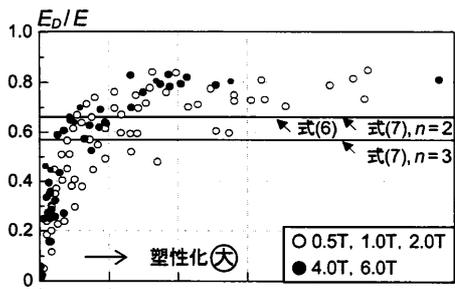


図8 E_D/E と $i\bar{\mu}$ の関係 (1 質点, $C_0=0.6$, モデル)

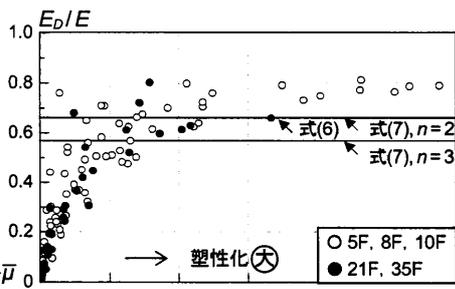


図9 E_D/E と $i\bar{\mu}$ の関係 (多質点, モデル)

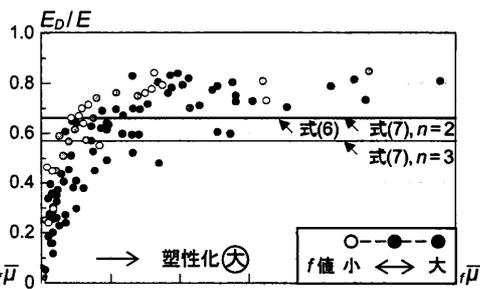


図10 E_D/E と $i\bar{\mu}$ の関係 (1 質点, $C_0=0.6$, f 値)

の E_D よりも大きく、経験式は時刻歴解析に対しておおむね安全側の評価を下すことがわかった。

次に、弾塑性系について考察する。1 質点モデルの場合 (図 6), 入力地震動が E_D/E に及ぼす影響は弾性系よりも小さい。各地震動における T_1 の違いに着目すると、 T_1 が長いほど E_D/E が小さく W_h/E が大きくなる傾向にある。 C_0 の違いに着目すると、 $C_0=0.2$ の場合、経験式の E_D は時刻歴解析の E_D よりもおおむね小さいが、 C_0 が大きくなると上記の傾向は逆転し経験式の E_D は時刻歴解析の E_D よりも大きくなることわかる。図 7 より、多質点モデルの場合、 $\alpha_1 \cdot T_1$ が比較的大きいため (表 2), E_D/E は小さくなる。

以上より、弾性系の場合、地震動 (継続時間の長さ等) が E_D に大きく影響を与え、弾塑性系の場合、 C_0 の大きさと建物の 1 次固有周期 T_1 が E_D/E に大きく影響を与えることがわかった。

3.3 E_D/E と塑性化の程度との関係

図 8~11 に、弾塑性系における主架構の塑性変形倍率の平均値 $i\bar{\mu}$ (式(8)) と E_D/E の関係を示す。

$$i\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{\max j} - \delta_{y j}}{\delta_{y j}} \right) \quad (8)$$

なお、図 8 は 1 質点モデル ($C_0=0.6$), 図 9 は多質点モデルにおける解析モデルを凡例としたものであり、図 10 は 1 質点モデル ($C_0=0.6$), 図 11 は多質点モデルにおける f 値を凡例としたものである。図 8,9 より、1 質点・多質点モデル双方において、全体的に、 $i\bar{\mu}$ が大きくなるほど E_D/E は大きくなる。また E_D/E と $i\bar{\mu}$ (塑性化の程度) は規則的な関係にあることがわかった。前節において、1 質点モデル、弾塑性系の場合、 E_D/E に影響を与える要素は主に C_0 の大きさと建物の 1 次固有周期 T_1 であると述べたが、図 8 より、上記の 2 つの要素 (C_0 と T_1) は塑性化の程度におおむね直結しており、秋山が述べていることと一致していることを確認した¹⁾。1 質点モデルの場合、 T_1 による傾向の違いは確認できなかったが、多質点モデルの場合、超高層モデルの E_D/E の方が中低層モデルの E_D/E よりも小さい傾向にある。これは、超高層モデルにおいて高次モードによる影響から減衰成分が比較的大きくなったためであると考えられる。図 10,11 より、1 質点・多質点モデル双方において、 f 値が大きくなる地震動ほど (濃色ほど) E_D/E が小さくなる傾向にある。

以上より、弾塑性系において、1 質点モデルの場合、①塑性化の程度、②地震動の 2 要素が E_D/E に大きく影響を与え、多

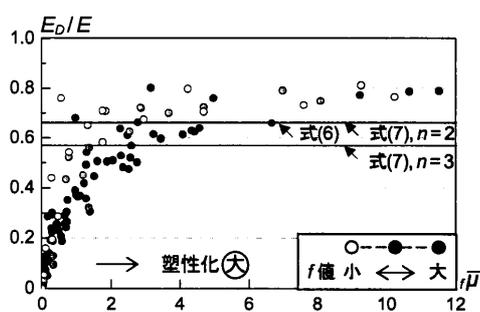


図11 E_D/E と $i\bar{\mu}$ の関係 (多質点, f 値)

質点モデルの場合、①塑性化の程度、②地震動、③解析モデル諸元の 3 要素が E_D/E に大きく影響を与えることがわかった。

4. まとめ

本報では、損傷に寄与するエネルギー E_D (入力エネルギー E - 減衰エネルギー W_h) について、ダンパーを有しない 1 質点・多質点モデル (弾性系・弾塑性系) を用いた時刻歴解析により検討を行った。以下に、得られた知見を示す。

- (1) 弾性系において、地震動 (継続時間の長さ等) が E_D/E に大きく影響を与える。
- (2) 弾塑性系において、1 質点モデルの場合、①塑性化の程度、②入力地震動、多質点モデルの場合、①と②にくわえ③解析モデル諸元 (固有周期) が E_D/E に影響を与える。また E_D/E は塑性化の程度と規則的な関係にある。

注 1) K-net 観測データを使用

謝辞

本研究は、新日鉄住金エンジニアリング、東京理科大学北村研究室による共同研究の成果の一部を用いたものです。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技術堂出版，1999.11
- 2) 北村春幸，馬谷原伴恵，川崎恵：時刻歴解析結果をもとにエネルギーの釣合に基づく耐震設計法を適用した建築物の耐震性評価法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 632 号，1755-1763p，2008.10
- 3) 秋山宏，北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，37-43p，2006.10
- 4) 小穴温子，北村春幸，吉江慶祐，佐藤俊明：設計用地震動のための長周期長継続地震動の f 値の定性評価，日本建築学会構造系論文集，第 77 号，第 674 号，575-584p，2012.04
- 5) 北村春幸，財津和麻，馬谷原伴恵：主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価法，日本建築学会構造系論文集，第 599 号，71-78p，2006.01

*1 東京理科大学 *2 (株) 新日鉄住金エンジニアリング