

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	境界条件の影響を考慮したエネルギーの釣合に基づく部材の損傷配分 予測手法の提案
Title	
著者(和文)	大下 優作, 佐藤 大樹, 北村春幸, 長江拓也, 佐野剛志
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, TUYOSHI SANO
出典 / Citation	, Vol. 82, No. 0,
Citation(English)	, Vol. 82, No. 0,
発行日 / Pub. date	2012, 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/110009571512

境界条件の影響を考慮したエネルギーの釣合に基づく部材の損傷配分予測手法の提案

構造一振動

正会員 ○ 大下優作^{*1} // 佐藤大樹^{*1} // 北村春幸^{*1}
 // 長江拓也^{*2} // 佐野剛志^{*3}

高層建物 長周期地震動 震動台実験

エネルギー法 損傷配分

1. はじめに

2007 年度に長周期地震動を受ける超高層建物に関する一連の大規模振動実験が E-ディフェンスにおいて実施された。試験体は、初期に建設された高さ約 80 m の超高層建物 (21 階建て, 1 次固有周期 $T=2.4$ s) を想定しており, 下層を 4 層の実架構部とし, その上にコンクリート錘と積層ゴムからなる縮約層を配す。この実験手法によって, 試験体に長周期地震動と対応するエネルギーが入力されることが確かめられ¹⁾, 損傷過程や変形能力の検証が行われた。この実験では, 多数の計測機器を用いて評価を行ってきたが, 防災・減災に役立てるために, 最小限の計測から建物の損傷に関する多くの情報を得ることが求められる。

これまでに、エネルギーの釣合式から構造骨組みの各層、各部材の吸収エネルギーを予測する手法としてエネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計法（以降エネルギー法と呼ぶ）がある²⁾。建物に設置された最小限の計測から部材の損傷を明らかにできれば、本実験が防災・減災に対し有益な資料になると思われる。そこで本報では、建物に入力されるエネルギーからエネルギー法に基づく損傷配分則を用いて、各部材が負担するエネルギーの予測手法を提案する。この手法を21層解析モデル³⁾と試験体モデル⁴⁾で検証する。

2. エネルギー算出方法および評価手法

2.1 損傷評価フロー

入力エネルギーから各部材が負担するエネルギーを予測する流れは図 1 の通りである。建物の固有周期 T と建物重量 M が求まれば地震動のエネルギー Spektral から入力エネルギー E が得られ、エネルギー法に基づく損傷配分則より入力エネルギー E を各層に分配することで i 層の吸収エネルギー W_i が得られる。さらに損傷配分則を部材レベの損傷評価に拡張し、 W_i から上下階の各梁端部が吸収するエネルギーへ分配する。分配された i 階の吸収エネルギーを ${}_G W_i$ 、 i 階 k 番目の梁端部が吸収するエネルギーを ${}_G W_i^k$ とする。

2.2 建物の高さ方向における損傷配分評価

文献 2)より、完全弾塑性型の復元力特性をもつせん断多層骨組みにおいて、 W_i は E を用いて式(1)より求めることができる。

$$W_i = \left(\frac{1}{\gamma_i} \right) \cdot E \quad (1)$$

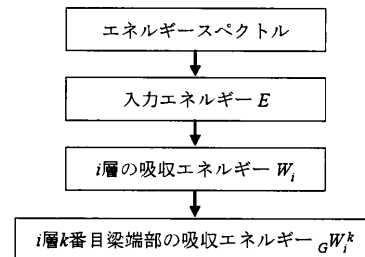


図1 損傷評価フロー

$$\gamma_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N s_j p_j^{-n}} s_i p_i^{-n} \quad (2)$$

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{f k_1}{f k_i} \right) \quad (3)$$

$$p_i = (\alpha_{vi}/\alpha_{vj})/\bar{\alpha}_i \quad (4)$$

n : 損傷集中指数, γ_i : 損傷分散係数, m_i : i 層の質量, M : 全質量, $\bar{\alpha}_i$: 最適降伏層せん断力係数分布, f_{k_i} : i 層の層剛性である。 p_i とは, $p_i < 1$ となる相対的に耐力の弱い方に外れた層には損傷が集中し, $p_i > 1$ となる相対的に耐力の強い方に外れた層には損傷を受けないように評価できる式である。降伏層せん断力係数 α_{v_i} は次式で求まる。

$$\alpha_{y^i} = \frac{Q_{y^i}}{\sum_{j=1}^7 m_j \cdot g} \quad (5)$$

Q_{vi} : 降伏層せん断力, g : 重力加速度である。

2.3 i 階 k 番目梁端部の損傷配分算出方法

各層の吸収エネルギー W_i を、部材レベルに拡張したエネルギー法に基づき各梁端の吸収するエネルギー ${}_G W_i^k$ に配分する。各梁端の番号を階毎に仮定すると、 i 階 k 番目梁端の吸収エネルギー ${}_G W_i^k$ は次式で表せる⁹⁾。

$$\frac{G W_i^k}{W_i} = \frac{s_{mi} p_{mi}^{-n_m}}{\sum_{j=1}^N s_{mj} p_{mj}^{-n_m}} = \frac{1}{\gamma_{mi}^k} \quad (6)$$

ここで、 $s_{mi} = \overline{M}_{pi}^2 \cdot (k_1 / k_i)$ 、 $\overline{M}_{pi} = M_{pi} / M_{p1}$ であり、 k_i : 剛比、 M_{pi} : 部材の全塑性モーメント、 $\overline{M}_{pi}$: 最適全塑性モーメント分布、 p_{mi} : 全塑性モーメント分布との隔たり、 γ_{ci}^* : 部材の損傷分散係数、

n_m : 部材の損傷集中指数である。なお、損傷集中指数 n_m は $n_m = 2.5 + 6P_d^3$ ($P_d = 0.8$ のとき $n_m = 5.5$) とし、 $\overline{M}_p$ は静的荷重増分解析時における弾性時のモーメント分布より求めた。

ここで、(6)式は、ある階での吸収エネルギーを同一平面上の各梁端部に配分するものである。文献5)では、 i 階の吸収エネルギー $G W_i$ は簡便のため i 階上下層の吸収エネルギーを 1/2 ずつ配分する（以下手法①）ことで算出している。21 層解析モデル（3 章で述べる）においては手法①で概ね適応できる。しかし、試験体モデル（4 章で述べる）のような特殊な建物の場合、上記の方法では傾向を捉えることができない。これは高層建物のようにある程度平面、使用部材が同等の基準階が連続した場合、1 階、特殊階等の境界条件が建物全体に与える影響は少なく無視できるためである。

そこで、本報では(6)式をさらに拡張し、ある層での吸収エネルギー W_i を上下階の各梁端部に配分することで i 階の吸収エネルギー $G W_i$ と i 階 k 番目の吸収エネルギー $G W_i^k$ を算出する（以下手法②）。算出方法は同一平面上に配分する方法と同様で、比較する部材がある層の上下階の 2 面分とする（図 2）。例えば 3 層 Y 方向の層せん断力 Q_3 と層間変形 δ_3 の履歴面積を 3 層の吸収エネルギー W_3 とする。図 3 のように W_3 を上下階（3, 4 階）の Y 方向各梁端部に配分し、同様に W_2 も上下階（2, 3 階）の Y 方向各梁端部に配分する。A 通り 2-3 間の G2 梁において 3 通り側の梁端部を A32、2 通り側の梁端部を A23 と呼ぶこととする。いま A32 の梁端を 1 番目、A23 の梁端を 2 番目の梁端部とすると、 W_3 から 3 階の A32 梁端部に配分されたエネルギーと W_2 から 3 階の A32 梁端部に配分されたエネルギーを足し合わせたものを 3 階 1 番目梁端の吸収エネルギー $G W_3^1$ とする。同様に 3 階 2 番目梁端の吸収エネルギーは $G W_3^2$ となる。

以上を踏まえ、3 章では境界条件の影響が少ない 21 層解析モデル、4 章では試験体モデルを用いて入力エネルギーから各梁端部が吸収するエネルギーを算出する。

3 21 層解析モデルでの検討

3.1 解析モデルおよび入力概要

1980 年以前に建設された初期の純ラーメン構造の超高層建物を想定した 21 層解析モデルの基準階平面図および長辺方向の軸組図を図 4 に示す。また表 1 に使用部材断面を示す。解析モデルは文献 3) と同じモデルを使用した。解析モデルの 1 次固有周期 T は長辺方向（Y 方向）において 2.41(s) である。

今回検討する入力地震動は名古屋三の丸波（以下 SAN）とする。図 5 に SAN の加速度時刻歴波形を示す。

3.2 エネルギースペクトルから入力エネルギー算出

エネルギースペクトルから試験体に入力されるエネルギー E を求める。図 6 に SAN のエネルギースペクトルを示す。図中には事前解析で得られた 1 次固有周期 T を示している。ここで、入力エネルギー E の速度換算値 V_E は、 E を用いて求められることから²⁾、入力エネルギー E を次式で算出する。

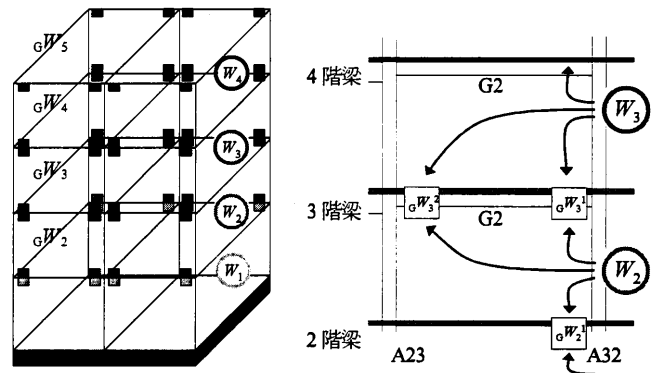


図 2 手法②による W_i から $G W_i^k$ への配分

図 3 $G W_i^k$ 配分例

表 1 使用部材断面	
柱	□-450x450x16 ?
	□-600x600x40 ?
梁	H-600x250x12x19 ?
	H-600x300x12x32

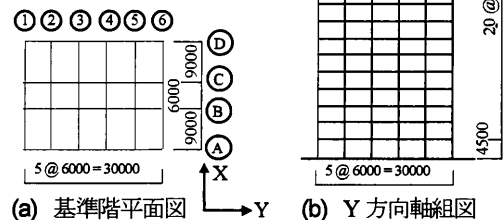


図 4 21 層解析モデル図（単位：mm）

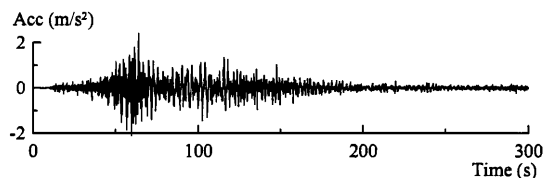


図 5 SAN 時刻歴波形

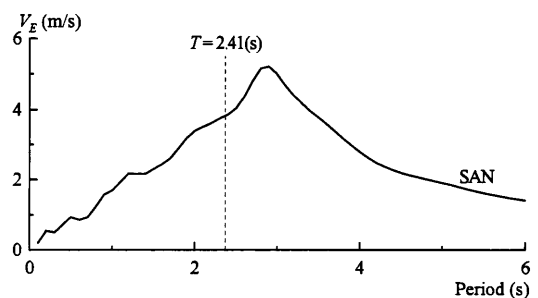


図 6 エネルギースペクトル(SAN)

ギー E を次式で算出する。

$$E = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N m_i \cdot V_E \quad (7)$$

図 6 より $T = 2.41(s)$ に対応する V_E から(7)式を用いて算出した E は、解析より SAN 加振時に入力された E の誤差は 10% 以内であった。

3.3 入力エネルギーから各層の吸収エネルギー算出

入力エネルギー E から各層の吸収するエネルギー W_i を算出する。図7に(1)式より算出した損傷配分の高さ方向分布と、解析よりSAN加振時に建物全層が吸収したエネルギー E に対する各層の吸収エネルギー W_i の割合の比較を示す。降伏層せん断力 Q_{yi} は静的荷重増分解析において、各層を構成する部材のいずれかひとつが全塑性モーメントに達したときの層せん断力とする。ただし、上層部については設計用層せん断力に α_{imin} を乗じた値とする。

$$\alpha_{imin} = \min[M_{pi} / M_{di}] \quad (8)$$

ここで、 M_{di} ：設計用荷重時の部材曲げ応力である。

図7より損傷配分の高さ方向分布は各層の吸収エネルギーの高さ方向分布と概ね類似する傾向となり、4層でどちらの分布も最大となる。

3.4 各層の吸収エネルギーから各階 k 番目の吸収エネルギー算出

各層の吸収エネルギー W_i を各梁端の吸収するエネルギー ${}_G W_i^k$ に配分する。 i 階の吸収エネルギー ${}_G W_i$ を建物全ての階で足し合わせたものを、建物全ての梁端部が吸収したエネルギー ${}_G W$ とする。解析結果より得られる i 階吸収エネルギーの高さ方向分布と、手法②より W_i を配分することで得られる i 階吸収エネルギーの高さ方向分布(${}_G W_i / {}_G W$)を図8に示す。図より、手法②による ${}_G W_i$ の高さ方向分布は解析で得られた ${}_G W_i$ の高さ方向分布とほぼ一致する結果となった。

図9に階のエネルギー量が最も大きい3階の k 番目梁端部吸収エネルギー ${}_G W_3^k$ と、解析によるSAN加振時に各梁端部のモーメントと回転角の履歴曲線の面積より得られる吸収エネルギー ${}_G W_3^k$ を示す。A通りとD通り、およびB通りとC通りは結果が同じためA、B通りのみ図に示す。建物端部の梁端部(A12, A65, B12, B65)で多少誤差が生じたが、それ以外の梁端部において、手法②により算出したエネルギー ${}_G W_3^k$ は、解析結果に対し20%以内の誤差であり、概ね傾向を捉えることができている。

4. 試験体モデルでの検討

4.1 試験体モデル概要

試験体モデルの基準階平面図、および長辺方向の軸組図を図10に示す。また表2に使用部材断面を示す。解析モデルは文献4)と同じモデルを使用した。解析モデルの1次固有周期 T は長辺方向(Y方向)において2.37(s)であり図6の21層解析モデルと同程度である。

4.2 エネルギースペクトルから各階 k 番目の吸収エネルギー算出

エネルギースペクトルから試験体に入力されるエネルギー E を求める。21層解析モデルと同様に(7)式を用いて算出した E は、解析よりSAN加振時に入力された E の誤差9%以内であった。

次に入力エネルギー E から各層の吸収するエネルギー W_i を算出する。図11に(1)式より算出した損傷配分の高さ方向分布と、解析よりSAN加振時に建物全層が吸収したエネルギー E に対する各層の吸収エネルギー W_i の割合の比較を示す。図11よりX、Y両方向とも損傷配分の高さ方向分布は各層の吸収エネルギー W_i 高さ方向分布と精度よく類似す

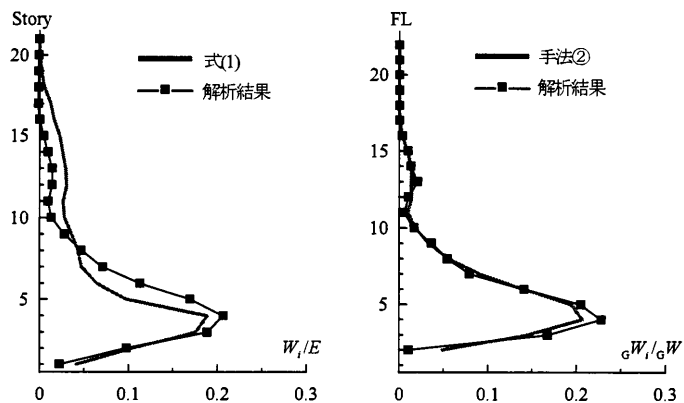


図7 損傷配分算出結果 (21層)

図8 ${}_G W_i$ 高さ方向分布 (21層)

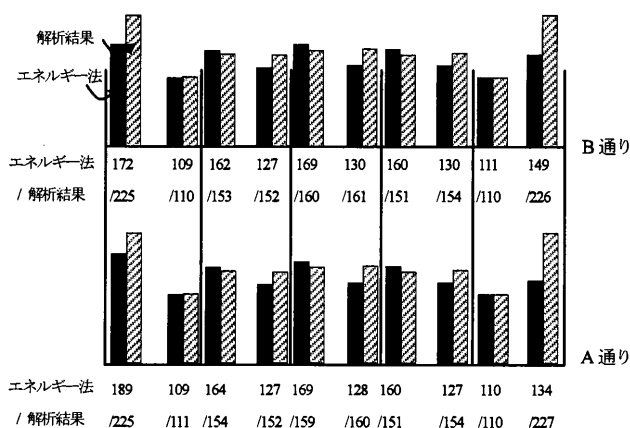


図9 梁端部吸収エネルギー ${}_G W_i^k$ (kNm) (A, B通り)

表2 実架構部の部材断面

柱	C1	□-400x400x25
	G1	H-600x200x8x19
	G2	H-400x200x8x13
	G3	H-500x200x9x16
	G4	H-800x199x10x15
梁	G4	H-800x199x10x15
	G5	H-650x199x9x14

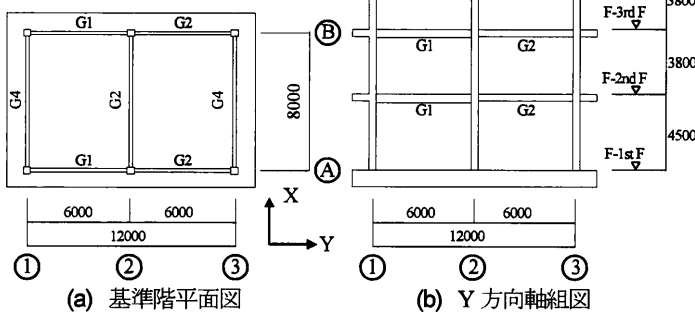


図10 試験体モデル図 (単位: mm)

る結果となった。

最後に、各層の吸収エネルギー W_i を各梁端の吸収するエネルギー ${}_G W_i^k$ に配分する。簡便のため試験体モデル実架構部分(1~4層)に着目する。ここで2.3節より、 i 層の吸収エネルギー ${}_G W_i$ を i 層上下階に1/2ずつ配分し i 階の吸収エネルギー ${}_G W_i$ を算出する手法①を試験体モデルに用いると、特にX方向で精度が悪くなる(後述図12)。これは、試験体モデル実架構部は建物層数が4層と少ないため、21

層解析モデルのように境界条件を無視できないためである。図12に解析結果より得られる i 階吸収エネルギーの高さ方向分布と、手法①、②より W_i を配分することで得られる i 階吸収エネルギーの高さ方向分布(gW_i/gW)を示す。図より、手法①では特に(a)X方向で解析結果と異なる分布となった。手法②はより精度が上がり解析結果の傾向を捉えることができています。

図13で精度の良い(b)Y方向に着目して、手法②の結果を用いた試験体モデル3階と4階の k 番目梁端部吸収エネルギー gW_i^k と、解析によるSAN加振時に各梁端部のモーメントと回転角の履歴曲線の面積より得られる吸収エネルギー gW_i^k を示す。 gW_i^k は4階で精度良く配分されており、概ね解析結果の傾向を捉えることができています。

現在の手法では1層の吸収エネルギー W_1 は全て2階で負担されるため、2層から配分されるエネルギーとの和は図8、12のように大きくなってしまいます。したがって、層の吸収エネルギー W_i を上下階のみに配分するのではなく、さらに上層、下層階へも配分する必要があると思われる。

5. まとめ

エネルギー法を用いて建物に入力されるエネルギーから各層が吸収するエネルギー、さらに各梁端部が吸収するエネルギーを予測した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 層の損傷配分を部材レベルに拡張した手法で、層の吸収エネルギー W_i から各梁端部の吸収エネルギー gW_i^k を算出することができる。
- 2) 21層解析モデルに対して精度は劣るものの、建物形状が特殊な試験体モデルでも概ね評価できる。
- 3) 本手法では、1階の吸収エネルギー gW_1 は W_1 と W_2 の配分分の和となるため実際の gW_1 に対し過大に評価されてしまうため、今後改善するために本手法を再検討する。今後は実験結果に対しても検証する予定である。

謝辞

本研究は文部科学省が推進する「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一環として、(独)防災科学技術研究所が受託した「②都市施設の耐震性能評価・機能確保に関する研究」の成果の一部です。

参考文献

- 1) 佐藤大樹, 島田侑, 大内隼人, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, : 長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率一部分切り出し架構に対する E-ディフェンス震動台実験一, 日本建築学会構造系論文集, 第653号, pp.1217-1226, 20010.7
- 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, 1999.11
- 3) 島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 齊藤大樹, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の下層階に部材配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討 一長周期地震動を想定した耐震改修一, 日本建築学会構造系

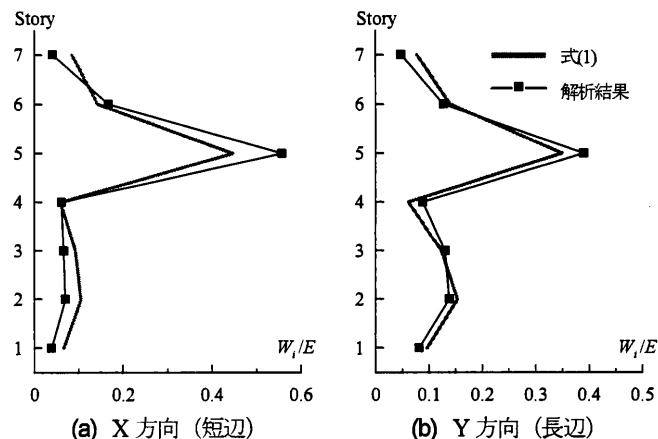


図11 損傷配算出結果

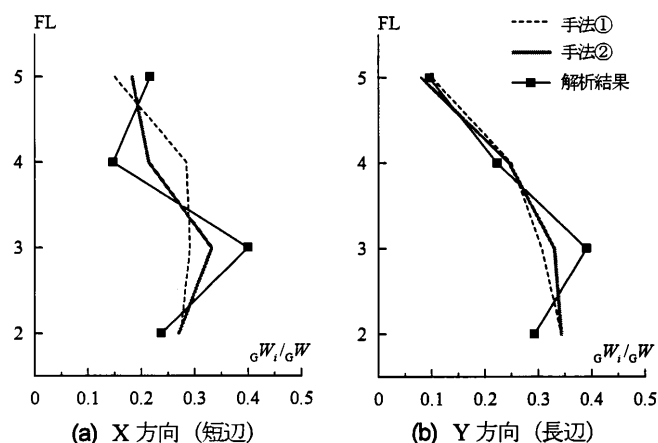


図12 gW_i 高さ方向分布

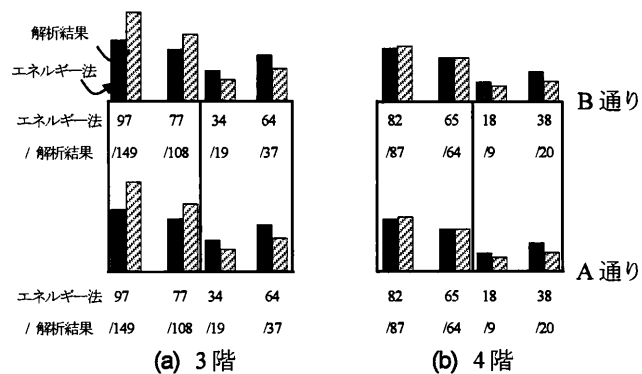


図13 梁端部吸収エネルギー gW_i^k (kNm) (長辺)

論文集, 第649号, pp.549-557, 2010.3

- 4) 島田侑, 大内隼人, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, : 解析モデルの概要と応答性状の比較 E-ディフェンス実験における高層建物試験体の累積損傷評価一その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.711~712, 2009.8
- 5) 馬谷原伴恵, 小鹿泰裕, 川崎恵, 北村春幸: 長周期地震動に対する鋼構造超高層建物の損傷評価 (その2) 部材に着目したエネルギーの釣合に基づく応答予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.963~964, 2007.8

*1 東京理科大学理工学部建築学科

*2 独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター

*3 株式会社大林組 技術研究所