

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	構造特性の高さ方向分布が不均一な中低層鋼構造建物のエネルギー配分に関する研究
Title	
著者(和文)	渋谷政斗, 佐藤大樹, 佐藤大輔, 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, , 2027
Citation(English)	, Vol. 83, , 2027
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/110009769773

構造特性の高さ方向分布が不均一な中低層鋼構建造物のエネルギー配分に関する研究

構造一振動

鋼構建造物 エネルギーの釣合 エネルギー配分

応答予測法 節点振分け法 時刻歴解析

準会員 ○ 渋谷政斗^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1} 〃 佐藤大輔^{*1}
 〃 松澤祐介^{*1} 〃 北村春幸^{*1} 〃 山口路夫^{*2}
 〃 脇田直弥^{*2} 〃 松蔭知明^{*2}

1. はじめに

建物の耐震性能は、終局耐力と塑性変形能力の積(塑性化エネルギー吸収量)により判定している。現在、このことに重点をおいた耐震計算法である、エネルギーの釣合に基づく応答予測法¹⁾(以後、エネルギー法)が、実設計にも適用されている²⁾。

階高や、積載荷重が層によって大きく異なるため、物流施設は、構造特性の高さ方向分布が不均一な計画となることが多い。しかし、エネルギー法における構造特性の高さ方向分布が不均一な建物に関する検討例は少なく¹⁾、エネルギー法の実設計への更なる適用を促進するため、知見の充実が望まれる。

本研究では、構造特性の高さ方向分布が不均一な建物の応答性状を時刻歴解析とエネルギー法による検討から明らかにすることを目的とする。

2. 入力地震動および検討対象建物概要

2.1 入力地震動概要

解析に用いる入力地震動は、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 $pS_v = 100(cm/s)$ ($h = 5\%$)となる位相特性 HACHINOHE 1968 EW (以後、ART HACHI) の模擬地震動を用いる。解析時間刻みは $\Delta t = 0.005(s)$ とする。図1に加速度時刻歴波形、図2(a),(b)に擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトルをそれぞれ示す。

2.2 検討対象建物概要

検討対象建物は、物流施設を想定した地上5階、高さ28.5m(1階7.5m, 2,4階6.5m, 3,5階4.0m)、長辺方向(X方向)11.0m×8スパン=88.0m、短辺方向(Y方向)10.6m×3スパン=31.8mの鋼構建造物である。図3(a),(b)に検討対象建物の基準階伏図と軸組図、表1に部材断面一覧、表2に設計用積載荷重一覧、図4(a),(b)に質量および層剛性の高さ方向分布をそれぞれ示す。検討対象建物は、1,2,4階が倉庫となる建築計画を想定しているので、1,2,4階の階高が高く、積載荷重が大きい。そのため、1,3層の質量が大きく、1,2,4層の層剛性が低いモデルとなっている。建物全重量は、120293(kN)である。解析はX方向を対象とする。検討対象建物の1次固有周期 T_1 は1.60(s)である。減衰定数 h は1次固有周期 T_1 に対して $h = 2\%$ となる剛性比例型とする。

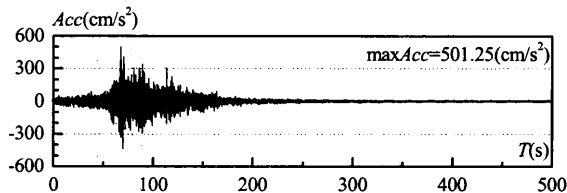


図1 ART HACHIの加速度時刻歴波形

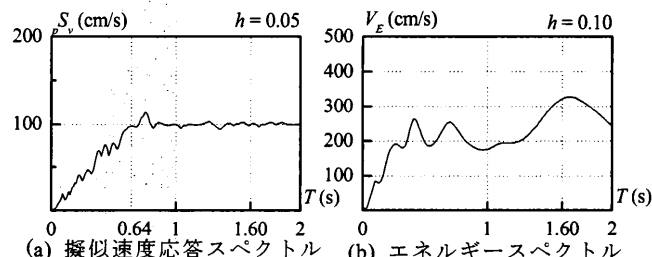
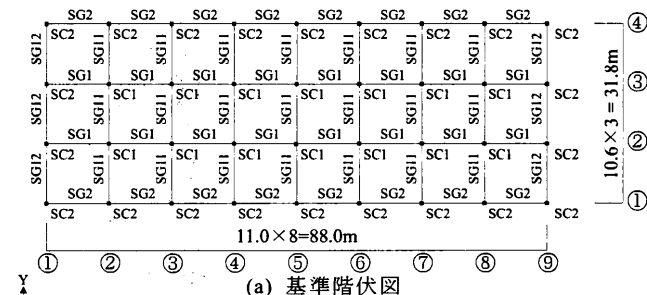
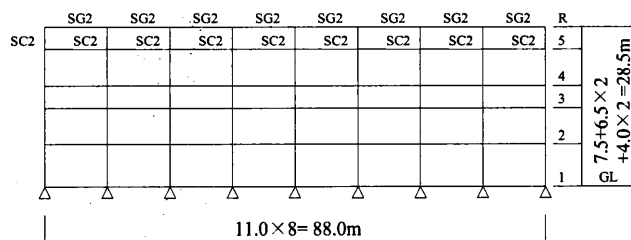


図2 応答スペクトルとエネルギースペクトル



(a) 基準階伏図



(b) Y1, Y4 通り軸組図

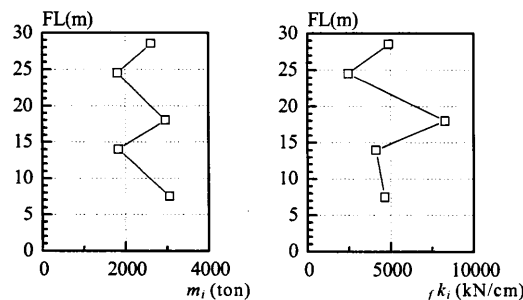
図3 検討対象建物の基準階伏図及び軸組図

表1 部材断面一覧

符号	材種	断面
SC1,SC2	BCP325	□-500×500×19~□-600×600×32
SG1,SG2	SN490	H-588×300×12×20~HY-750×300×16×32
SG11,SG12	SN490	H-600×200×11×17~HY-600×250×16×28

表2 設計用積載荷重一覧

階	設計用積載荷重(N/m²)			
	床	小梁	架構	地震
RF	5000	4500	4000	3000
3,5F	5000	4000	3000	2000
2,4F	10000	8000	6000	4000
1F	15000	12000	9000	6000



(a) 質量分布 (b) 層剛性分布
図4 質量および層剛性の高さ方向分布

3. 耐力算定法の違いがエネルギー法に及ぼす影響

エネルギー法の損傷分布は、耐力分布に大きく影響されることから、耐力算定法における選定の重要性が指摘されている³⁾。本章では、耐力算定法の違いがエネルギー法の損傷分布に及ぼす影響の検討を行い、検討建物に最適な耐力算定法を選定する。

3.1 エネルギー法における損傷分布の算定式¹⁾

エネルギー法における損傷分布は式(1)で評価される。 n には梁降伏型の8を採用する。

$$\frac{f W_{pk}}{f W_p} = \frac{s_k \cdot p_k^{-n}}{\sum_{i=1}^N s_i \cdot p_i^{-n}} \quad (1)$$

s_i , p_i は式(2),(3)で表される。

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

$$p_i = \frac{f \alpha_{yi} / f \alpha_{y1}}{\alpha_i} \quad (3)$$

ここに、 $f W_{pi}$: i 層の塑性歪エネルギー、 $f W_p$: 全層の塑性歪エネルギー、 N : 層数、 m_i : i 層質量、 M : 全質量、 $f k_i$: 層剛性、 $\bar{\alpha}_i$: 最適降伏層せん断力係数分布、 $f \alpha_{yi}$: 降伏層せん断力係数分布である。

3.2 耐力算定法概要

2.3 節では、耐力算定法として一般的な方法と考えられる静的増分解析と極限解析的な方法である節点振分け法の2通りの概要を示す。

3.2.1 静的増分解析による耐力の算定

以下、静的増分解析における耐力算定法（以後、増分法）について述べる。図5に静的増分解析の $Q-R$ 関係、図6に復元力特性をそれぞれ示す。図6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 $f \delta_{ui}$ 時の履歴面積が等しくなる（面積 $S_1 =$ 面積 S_2 ）完全弾塑性型に置換し、降伏耐力 $f Q_{yi}$ を算定する。以下に算定式を示す。なお本研究において、 $f \delta_{ui}$ を静的増分解析の最大変形とした。

$$f \delta_{yi} = f \delta_{ui} - \sqrt{f \delta_{ui}^2 - \frac{2W_i}{f k_i}} \quad (4)$$

$$f Q_{yi} = f k_i \cdot f \delta_{yi} \quad (5)$$

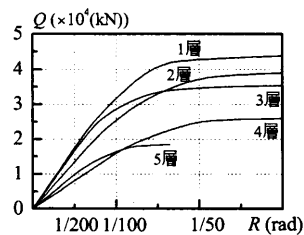


図5 $Q-R$ 関係

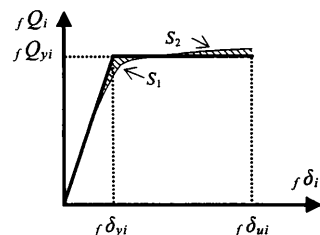


図6 復元力特性

ここに、 $f \delta_{yi}$: 降伏変形、 W_i : 静的増分解析結果の履歴曲線の面積である。

3.2.2 節点振分け法による復元力の算定

以下、節点振分け法（以後、節点法）について示す⁴⁾。各節点で、柱材端あるいは左右の梁材端部に塑性ヒンジを形成させ、柱材端の全塑性モーメント M_p を決定する。柱の全塑性モーメントから、その柱の降伏耐力を算定する。各階における柱の降伏耐力の総和が各層の降伏耐力となる。なお左右の梁材端部に塑性ヒンジが形成される場合は、両梁端における全塑性モーメント和の1/2を上下の柱に分配した。ある部材の全塑性モーメントは以下の式から算定する。

$$M_p = Z_p \times 1.1 \cdot \sigma_y \quad (6)$$

ここに、 Z_p : 塑性断面係数、 σ_y : 降伏応力度である。

図7に増分法と節点法の耐力分布の比較を示す。図7より、増分法と節点法で大きく異なる耐力分布を得られた。また節点法による耐力分布は層剛性分布（図4(b)）と同様に、各層で不均一となっている。

3.3 検討結果

図8に耐力算定法の違いによる p_i 分布（式(3)）を示す。図8より、増分法における p_i 分布は全層でおおむね1.0となっており、損傷集中が大きく生じない評価となっている。一方、節点法における p_i 分布は、耐力分布（図7）と同様に、不均一となっており、 p_i が最小の2層が最弱層となり損傷集中する評価となっている。図9に耐力算定法の違いによるエネルギー法の損傷分布（式(1)）と時刻歴解析の比較を示す。図9より、増分法の場合、時刻歴解析における最弱層（以後、損傷集中層）である2層の損傷評価に対し大きな

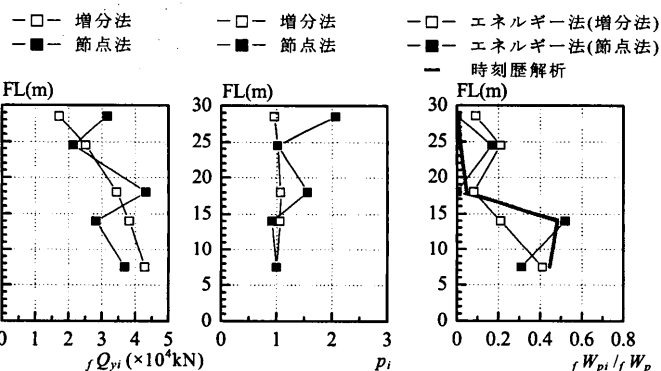


図7 耐力分布の比較 図8 p_i 分布の比較 図9 損傷分布の比較

隔たりが生じており、検討建物において増分法では損傷評価が適切に行われなことを確認した。一方、節点法の場合、2層の損傷評価を精度良く捉えている。以降、耐力算定法として節点法を用いて検討を行う。

4. 構造特性をパラメータとした損傷分布の検討

本章では、構造特性の高さ方向分布を変化させたときの時刻歴解析およびエネルギー法の損傷分布への影響を検討する。

4.1 検討パラメータの概要とモデル名称

図 10(a)~(c)に各パラメータにおける変更諸元の高さ方向分布を示す。図 4、図 7 (前頁) で示した状態を *original* と呼ぶ。図 10(a)における質量のパラメータは、*original* における3層の質量を0.2, 0.6, 1.6, 3.0倍したもので、それぞれ *m3-0.2*, *m3-0.6*, *m3-1.6*, *m3-3.0* と呼ぶ。図 10(b)における剛性のパラメータは、*original* における4階梁と3階柱のヤング係数 E を0.2, 0.7, 1.5, 5.0倍したもので、それぞれ *E3-0.2*, *E3-0.7*, *E3-1.5*, *E3-5.0* と呼ぶ。図 10(c)における耐力のパラメータは、*original* における4階梁と3階柱の材料基準強度 F を0.5, 0.7, 1.5倍したもので、それぞれ *F3-0.5*, *F3-0.7*, *F3-1.5* と呼ぶ。なお図 10(c)において3層の耐力だけでなく4層の耐力も変化している理由は、4階梁材の材料基準強度の変化によって、4階柱脚に配分されるモーメントが変化するためである。

4.2 時刻歴解析による損傷分布の検討

図 11(a)~(c)に各パラメータにおける時刻歴解析の損傷分布を示す。図 11(a),(b)より、検討パラメータの範囲において質量分布、剛性分布を変化させても時刻歴解析の損傷分布にほとんど影響がないことを確認した。一方、図 11(c)より、時刻歴解析における最弱層が *Original* や他のケースでは2層であるのに対し *F3-0.5* では3層であり、耐力の変化は損傷分布に大きな影響を及ぼすことを確認した。

4.3 エネルギー法による損傷分布の検討

エネルギー法の損傷分布は s_i および p_i によって、評価されることから (式(1))、本節では、はじめに各パラメータにおける s_i および p_i 分布について確認する。図 12(a)~(c)に各パラメータにおける s_i 分布、図 13(a)~(c)に各パラメータにおける p_i 分布をそれぞれ示す。なお耐力分布を変化させても s_i 分布は変化しないこと (式(2))、剛性分布を変化させても p_i 分布は変化しないこと (式(3)) は明らかであるが参考までに示している。図 12(a),(b)より、質量分布、剛性分布の変化によって、異なる s_i 分布となることがわかる。図 13(a),(c)より、質量分布、耐力分布の変化によって、異なる p_i 分布となることがわかる。なお図 13(c)において、*F3-0.5*, *F3-0.7* で4層の p_i が小さくなっている原因は、4.1節

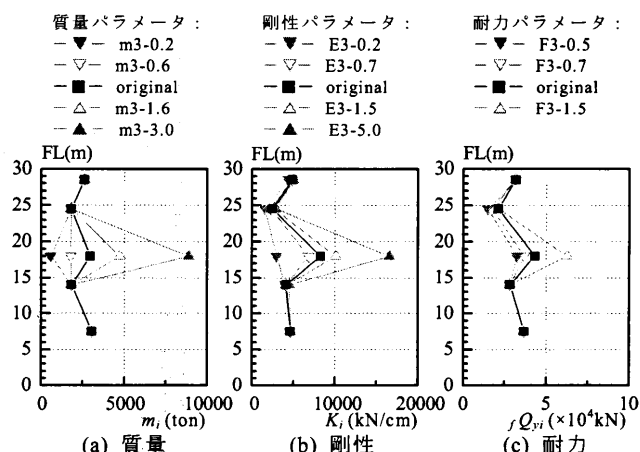


図 10 各パラメータにおける変更諸元の高さ方向分布

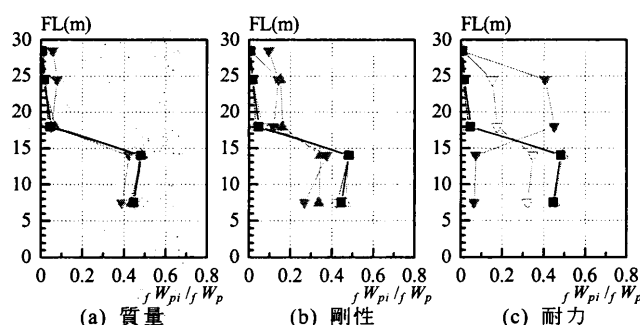


図 11 各パラメータにおける時刻歴解析の損傷分布

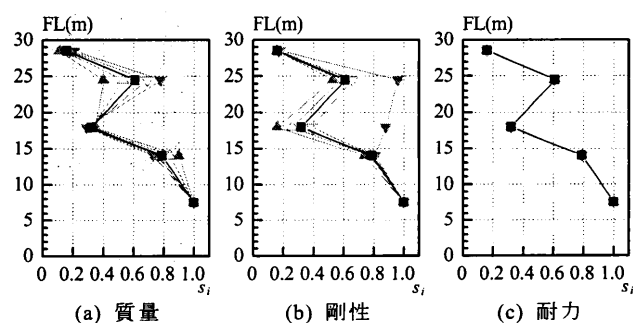


図 12 各パラメータにおける s_i 分布

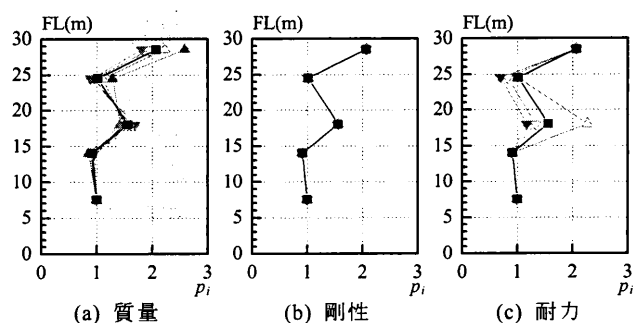


図 13 各パラメータにおける p_i 分布

で述べたように、4層の耐力が小さくなっているためである (図 10(c))。

図 14(a)~(c)に各パラメータにおけるエネルギー法の損傷分布を示す。図 14(b)より、エネルギー法において、 s_i 分布のみに影響を及ぼす剛性分布の変化は損傷

分布にほとんど反映されないことがわかる。一方、図14(a),(c)より、質量分布、耐力分布の変化は損傷分布に対し大きな影響を及ぼすことがわかる。以上のことから、エネルギー法の損傷分布は、 s_i 分布の変化にはほとんど影響されず、主として p_i 分布の変化が大きな影響を及ぼしていることがわかる。

4.4 エネルギー法の損傷分布の精度検証

図15(a)~(f)に時刻歴解析とエネルギー法の損傷分布の比較を示す。図15(a)~(c)には、エネルギー法において、損傷集中層の損傷を安全側に捉えた m3-3.0, E3-0.2, E3-5.0 を示している。一方、図15(d)~(f)には、エネルギー法において、損傷集中層以外の層を最弱層として評価した m3-0.2, F3-0.5, F3-0.7 を示している。

本検討におけるパラメータの範囲において、3層の質量、耐力を大きくしたものの、3層の剛性を変化させたものにおける予測値は、損傷集中層の損傷を安全側に評価できている。しかし、3層の質量、耐力を小さくした結果は、損傷集中層の損傷を危険側に評価している。具体的には、m3-0.2, F3-0.5, F3-0.7 において、エネルギー法は損傷集中層以外の層を最弱層として評価し、m3-0.6 において、損傷集中層の損傷を過小評価している。その理由は m3-0.2, F3-0.5, F3-0.7 は他の層と比べ4層の p_i が最小であり、m3-0.6 は4層の p_i が最小であった2層とほぼ等しい値であった(図13)ためと思われる。以上のことから、本検討建物において、損傷集中層以外の p_i が最小かそれに近い値となると、エネルギー法による損傷評価の精度が悪化する傾向が見られることがわかった。

5. まとめ

構造特性の高さ方向分布が不均一な建物の応答性状を明らかにするために、時刻歴解析とエネルギー法を用いて検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 耐力算定法に静的増分解法を用いると、エネルギー法による損傷の評価が適切に行われなかったことを確認した。一方、節点振分け法を用いると、時刻歴解析における最弱層を精度良く捉えられることを確認した。
- (2) 時刻歴解析による検討より、質量分布、剛性分布の変化は、損傷分布に対してほとんど影響はないが、耐力分布の変化は大きな影響を及ぼすことを確認した。
- (3) エネルギー法の損傷分布に対し、剛性分布の変化はほとんど影響がないこと、質量分布、耐力分布の変化は大きな影響を及ぼすことを確認した。
- (4) 損傷が集中する層以外の p_i が最小かそれに近い値となると、エネルギー法による損傷評価の精度が悪化する傾向が見られた。

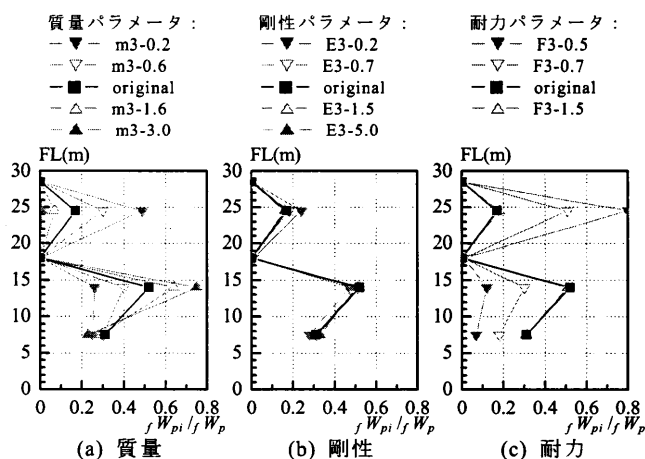


図14 各パラメータにおけるエネルギー法の損傷分布

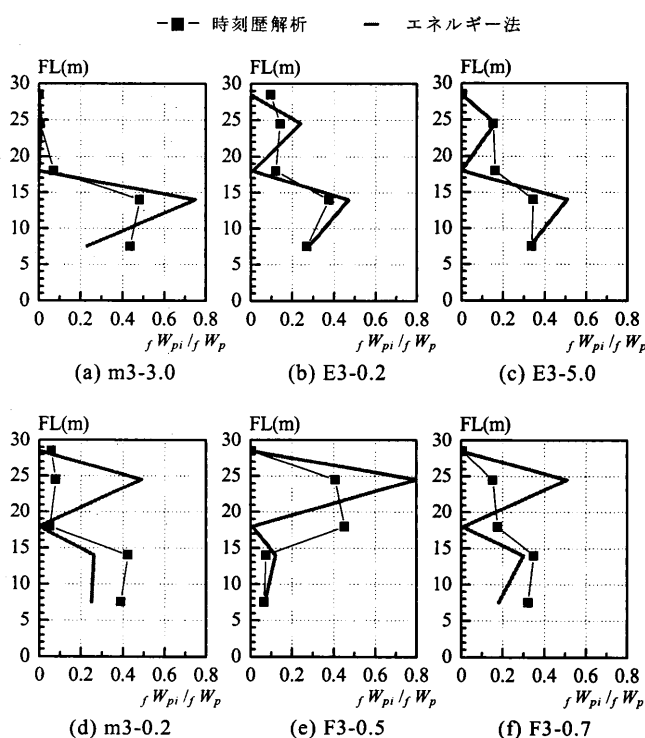


図15 時刻歴解析とエネルギー法の損傷分布の比較

謝辞

本研究は、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、東京理科大学によるエネルギー法研究会の成果の一部である。

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, 技報堂出版, 1999.11
- 2) 脇田直弥, 松蔭知明, 樋口公平, 中村秀司:エネルギー法による建物の構造設計~優れた耐震性と経済性を両立した設計手法の確立~, 新日鉄エンジニアリング技報, vol3,2012
- 3) 独立行政法人 建築研究所:鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアルー平成17年度国土交通省告示第631号「エネルギーの釣合に基づく耐震計算法」に準拠してー, 技報堂出版, 2008.9
- 4) 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990
- 5) 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

*1 東京理科大学

*2 新日鉄住金エンジニアリング株式会社