

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	簡易加速度センサーの利用を想定したRC建物のヘルスマニタリング
Title(English)	Health monitoring of RC buildings assuming the use of simple accelerometers
著者(和文)	久田翔俊, 佐藤大樹, Alex Shegay
Authors(English)	Takatoshi Hisada, Daiki Sato, Alex Shegay
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 513-516
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 513-516
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

簡易加速度センサーの利用を想定したRC建物のヘルスマonitoring

構造—振動

正会員 ○ 久田翔俊^{*1}
" Alex Shegay^{*3}正会員 佐藤大樹^{*2}RC 造建物 地震応答解析 損傷評価
構造ヘルスマonitoring

1 はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震で多くの人が一斉に帰宅しようとしたため、幹線道路は大渋滞し、救急車や消防車も身動きが取れない状態となった¹⁾。これを契機として、国や自治体は震災後にできるだけ避難をせずに建物内にとどまることを求めている²⁾。地震が発生した後も建物内に留まるためには、建物の健全性および建物の使用の可否の早期の把握が必要不可欠であり、損傷の程度を評価しなければならない。

建物の健全性を判断する方法として、現在は被災建築物応急危険度判定や構造ヘルスマonitoringシステム（以降、SHM）などが挙げられるが、それらの方法では、多くの時間や労力、費用を要する。また、これまでSHMに関して、非接触型センサー³⁾や光ファイバセンサー⁴⁾など高精度の外付けセンサーを対象とした研究が多い。そこで、本報では、センサーの内部での演算に使用されるメモリの消費量が小さく、安価な簡易加速度センサーを対象として建物の損傷評価手法を構築することを目的としている。

本報で想定している簡易加速度センサーは、サーボ型加速度センサーには分解能等の項目では性能的に及ばないものの、体感地震の計測制御用としては十分な性能を持ち、小型軽量の特徴を有している。また、加速度の時刻歴波形を保存、転送することはできないが、スカラー値である加速度最大値や地震の被害と相関が高いとされるSI値を演算・保存することが可能である⁵⁾。SI値は、式(1)のように、減衰定数 $h=20\%$ における速度応答スペクトルの周期0.1～2.5秒の面積を積分区間2.4秒で割ることにより、構造物の被害と相関のある数値として算出される⁶⁾。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (h=20\%) \quad (1)$$

本報では、時刻歴波形を保存せず、かつセンサー間の同期が取れないが、減衰定数 $h=5\%$ における速度応答スペクトルが最大値となるときの周期を記録できる簡易加速度センサーが建物のすべての層に設置されていると想定し、建物の損傷評価手法を提案する。

2 解析概要

2.1 建物モデル概要

本報では、共同住宅を想定した高さ14.3mの地上5階と高さ43.7mの地上14階建てのRC造建物（以降、それぞれ5Model、14Model）を用いる⁷⁾。それぞれの建物を構造計算プログラムのRESP-Dを用いてモデル化する。図1に5Modelの立面図と基準階平面図を示す。14Modelは5Modelと同じ平面図を有する。解析対象はX方向とし、5Modelと14Modelの弾性1次固有周期はそれぞれ0.46秒、0.85秒である。

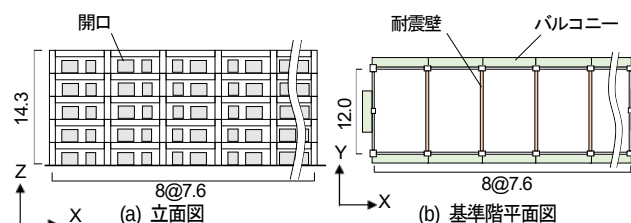


図1 5Model概要（単位：m）

図2に5Modelと14ModelのX方向の静的増分解析による層せん断力 Q と層間変形角 R の関係を示す。荷重は A_i 分布を用いた。図中に各層のいずれかの部材にひび割れが発生した点（●）と曲げ降伏が発生した点（●）を併せて示す。ここで、各層のいずれかの部材に曲げ降伏が発生した点はRESP-Dで出力されるが、各層のいずれかの部材にひび割れが発生した点は静的増分解析の傾きが初めて前ステップの95%以下となった点とした。

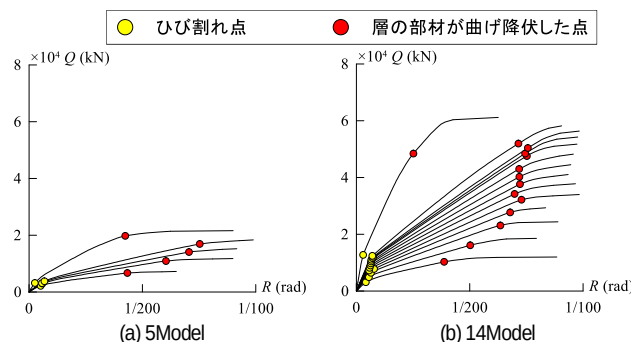
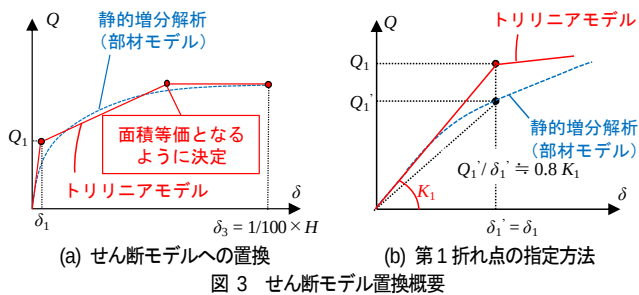


図2 静的増分解析

2.2 多質点せん断モデル化概要

5Model と 14Model の X 方向において、部材モデルの静的増分解結果をもとに、復元力特性がトリリニアとなる多質点系せん断モデルに置換する。図 3(a), (b) に部材モデルの増分解から得られた変形 δ - 荷重 Q 曲線を復元力特性がトリリニアとなるせん断モデルに置換する方法を示す。本報では、 δ - Q 曲線において割線剛性が初期剛性に対して指定値（「指定 1」）以下となった時点の変位より第 1 折れ点を決定しており、第 3 折れ点までの包絡曲線がスケルトンカーブの包絡面積と等しくなるように第 2 折れ点を設定する（図 3(a)）。本報では、「指定 1」の値は 0.8（図 3(b)），第 3 折れ点の変位を層の階高 H の $1/100$ となるように指定している。なお、復元力特性は武田モデル、構造減衰は減衰定数 $\zeta = 0.02$ の瞬間剛性比例型とする。



2.3 入力地震動概要

本報で対象とする地震動は、図 4 に示す通り、八戸位相と神戸位相のレベル 2 告示波（ART HACHI NS, ART HACHI EW, ART KOBE NS, ART KOBE EW）に加えて、ランダム位相の告示波 3 つ（ART RAND 01, ART RAND 02, ART RAND 03）の計 7 つとする。これら 7 つの地震動を 5Model には、0.1 倍、0.5 倍、1.0 倍、1.2 倍、14Model には、0.1 倍、0.5 倍、1.0 倍、1.2 倍、1.5 倍に倍率を変更して入力（以降、本震）した後に、続けてそれぞれ同じ地震波の 0.1 倍波を入力（以降、余震）する。図 5 に例として ART HACHI NS の本震が 1.0 倍時の入力地震動の時刻歴加速度波形を示す。

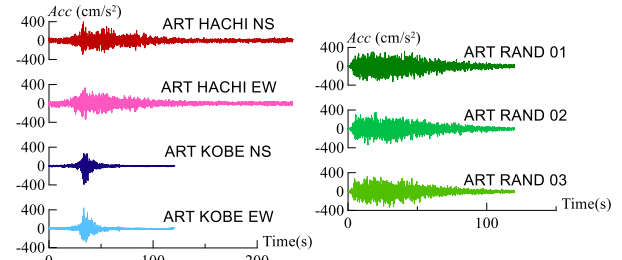


図 4 入力地震動

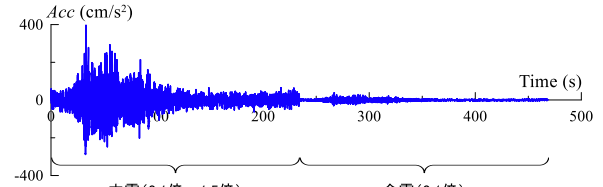


図 5 入力地震動概要（ART HACHI NS 本震 1.0 倍時）

3 解析結果

図 6(a), (b) にそれぞれ 5Model と 14Model のせん断モデルに 7 つの地震動を入力したときの各倍率での本震における最大層間変形角の高さ方向分布を示す。図中にそれぞれのせん断モデルの第一折れ点と第二折れ点の高さ方向分布を併せて示す。図 6 より、すべての地震動で本震が 0.1 倍のとき、各せん断モデルの各質点をつなぐばねのほとんどは最大層間変形角が第一折れ点を超えておらず、ほぼ弾性域であることが分かる。また、図 6(a) の 5Model のせん断モデルにおいて、1.0 倍以上のような大きな倍率の本震を入力したときは最大層間変形角が第二折れ点を超えるほど大きくなり、塑性化が発生していることが分かる。一方、図 6(b) の 14Model のせん断モデルにおいては、多くの地震動で本震が 1.5 倍のときに第二折れ点を超えるほどの最大層間変形角となっていることが分かる。

4 伝達関数に着目した検討

例として図 7(a), (b) にそれぞれ 5Model と 14Model のせん断モデルに ART HACHI NS の本震を入力したときの入力地震動のフーリエ振幅 $F(\ddot{Z})$ に対する最上階の質点の応答加速度波形

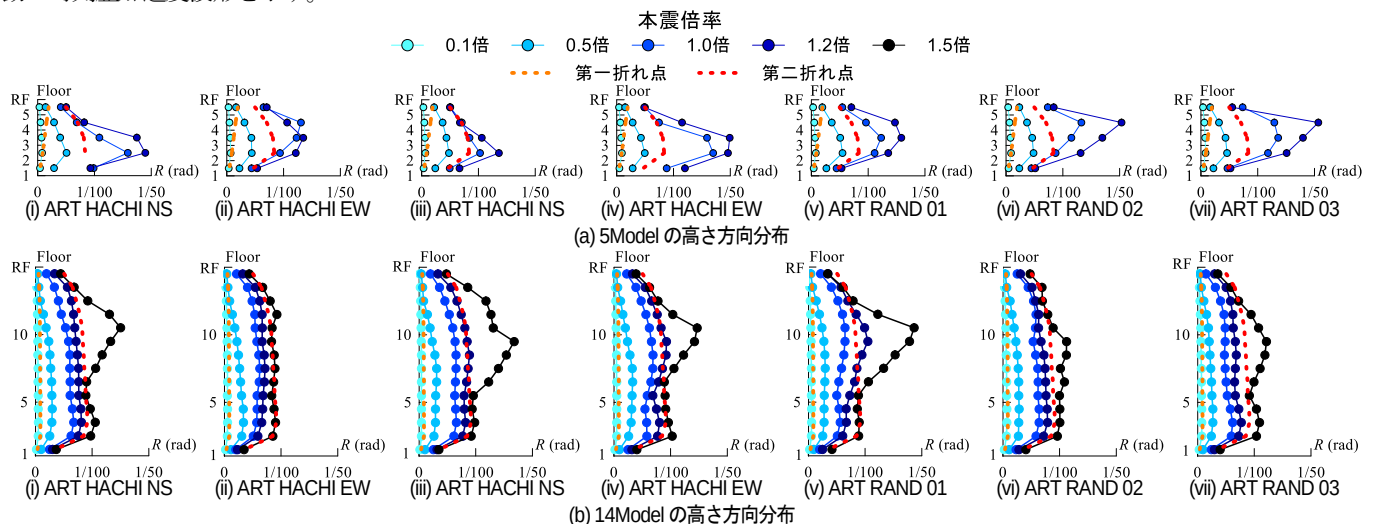


図 6 最大層間変形角の高さ方向分布

のフーリエ振幅 $F(\ddot{X}_T)$ の比（以降、伝達関数）を示す。図 7 には、各建物モデルのせん断モデルの弾性 1 次固有振動数 f_e を示している。図 7 より、どちらのモデルでも本震が 0.1 倍のときは弾性 1 次固有振動数 f_e 付近で伝達関数が卓越していることが分かる（図中●）。また、本震が 0.5 倍以上のときは弾性 1 次固有振動数 f_e 以下で伝達関数が卓越しており（図中●），入力地震動の本震の倍率が大きくなるほど、卓越する振動数が低下していることが分かる。

図 7 中の●のように、本震が 0.1 倍を入力したときは弾性 1 次固有振動数 f_e 付近、本震が 0.5 倍以上を入力したときは弾性 1 次固有振動数 f_e 以下で伝達関数が最大となったときの振動数 f の逆数を伝達関数から推定される弾性一次固有周期 T ($=1/f$) とする。

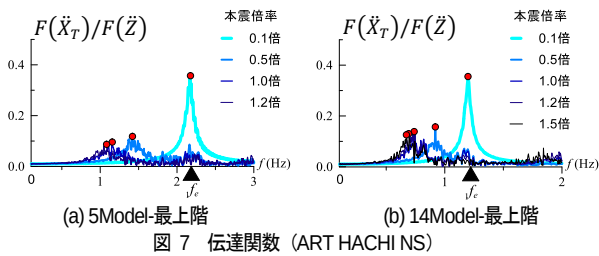


図 8 に本震および余震における T である T_m および T_s の関係を示す。図 8 より、本震と余震の T はほぼ一致しているため、本震だけでなく余震からも本震時の T を推測できる。

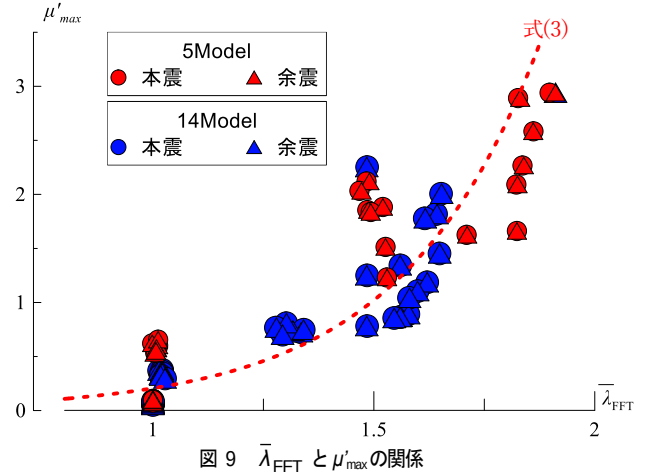
本報では、弾性時（本震 0.1 倍時）の T である T_e に対する塑性時（本震 0.5 倍以上時）の T である T_p の比を λ_{FFT} (式(2))、 λ_{FFT} の全階の平均値を $\bar{\lambda}_{FFT}$ とし、塑性時の周期の変化を表す。

$$\lambda_{FFT} = T_p / T_e \quad (2)$$

図 9 に 5Model と 14Model のすべての地震動の各倍率での本震および余震における λ_{FFT} の全階の平均値 $\bar{\lambda}_{FFT}$ と過去に経験した最大の層塑性率 μ'_{max} の関係を示す。ここで、 μ'_{max} は、せん断モデルの復元力特性であるトリリニアの第二折れ点の層間変形角に対する最大層間変形角の比として算出している。図 9 より、モデルや地震動に関わらず、 $\bar{\lambda}_{FFT}$ と μ'_{max} に強い相関があり、 $\bar{\lambda}_{FFT}$ と μ'_{max} の回帰分析を行うことにより求められた推定式を式 (3) に示し、式 (3) の曲線を図 9 に併せて示す。

$$\mu'_{max} = 8.4 \times 10^{-3} \cdot \exp(3.2 \cdot \bar{\lambda}_{FFT}) \quad (3)$$

このように、建物に設置されるセンサーから時刻歴波形が得られる場合、小地震時に対する伝達関数がピークとなるときに周波数の変化から建物の損傷を推定することができる。本報で想定しているような時刻歴波形が得られないセンサーを用いる場合でも λ_{FFT} のように建物の損傷を推定することができる指標を得られないか 5 章以降で検討していく。

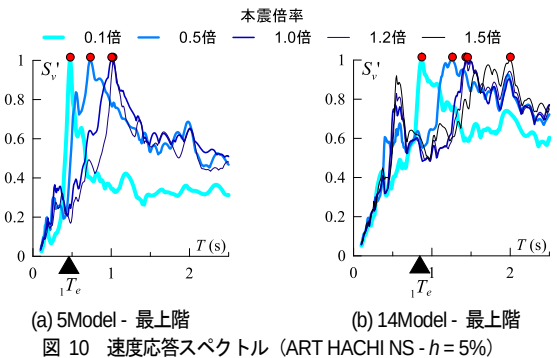


5 速度応答スペクトルに着目した検討

本章では、時刻歴波形が得られない場合でも建物の損傷を推定することができる指標として速度応答スペクトルが最大値を記録するときの周期の変化に着目した検討を行う。

例として図 10 (a), (b) にそれぞれ 5Model と 14Model のせん断モデルに ART HACHI NS の本震を入力したときの最上階の質点での減衰定数 $h = 5\%$ における周期 2.5 秒までの最大値が 1 となるように基準化した速度応答スペクトル S'_v を示す。前述の通り、SI 値は減衰定数 $h = 20\%$ における速度応答スペクトルの周期 0.1~2.5 秒の面積より算出される値であるため、本報においても速度応答スペクトルに関しては周期 2.5 秒までを考えるものとする。また、様々な減衰定数で検討した結果、減衰定数 $h = 5\%$ での速度応答スペクトルが最も建物モデルの周期の変化を捉えることが可能と判断した。図 10 において、速度応答スペクトルが最大となった点に赤印を示す。また、図中には、各建物モデルのせん断モデルの弾性 1 次固有周期 T_e を示している。

図 10 より、どちらのモデルでも入力地震動の本震が 0.1 倍のときは弾性 1 次固有周期 T_e 付近で速度応答スペクトルが最大となっていることが分かる。また、本震が 0.5 倍以上のときは弾性 1 次固有周期 T_e より大きい値で速度応答スペクトルが最大となっており、入力地震動の倍率が大きくなるほど、速度応答スペクトルが最大となる周期が長くなっていることが分かる。図 10 中の赤印のように周期 2.5 秒までの速度応答スペクトルが最大となったときの周期を T_s とする。



6 周期変化の比較

弾性時（本震倍率 0.1 倍時）の T_s である T_{se} に対する塑性時（本震倍率 0.5 倍以上時）の T_s である T_p の比を Γ_T と定義し（式(4)）， Γ_T は塑性時の周期の変化を表す。

$$\Gamma_T = T_{sp} / T_{se} \quad (4)$$

図 11 に 4 章に示した 5Model と 14Model の全階でのすべての地震動の各倍率での本震および余震における Γ_T と λ_{FFT} の関係を示す。図 11 より，モデルや地震動，本震や余震に関わらず， Γ_T と λ_{FFT} には相関があり， Γ_T と λ_{FFT} の回帰分析を行うことにより求められた推定式を式 (5) に示す。

$$\lambda_{FFT} = 0.57 \cdot \exp(0.53 \cdot \Gamma_T) \quad (5)$$

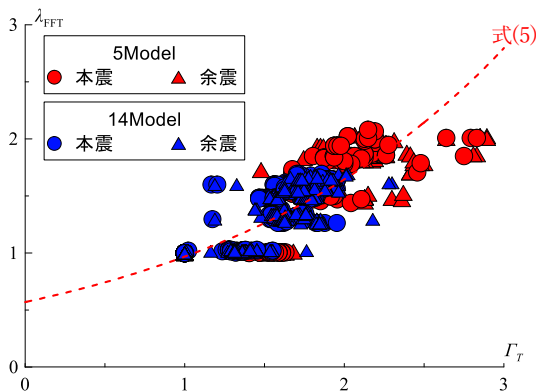


図 11 Γ_T と λ_{FFT} の関係

最終的に式 (5) の Γ_T を Γ_T の全階の平均値 $\bar{\Gamma}_T$ を用いて式 (3) に代入することで式 (6) が得られる。

$$\mu'_{max} = 8.4 \times 10^{-3} \cdot \exp\{1.8 \cdot \exp(0.53 \cdot \bar{\Gamma}_T)\} \quad (6)$$

図 12 に 5Model と 14Model のすべての地震動の本震および余震における Γ_T の全階の平均値 $\bar{\Gamma}_T$ と過去に経験した最大の最大層塑性率 μ'_{max} の関係および式 (6) を示す。図 12 より，モデルや地震動，本震や余震に関わらず， $\bar{\Gamma}_T$ と μ'_{max} には強い相関があり，式 (6) を用いて過去に経験した最大の層塑性率を概ね推定することができると考えられる。

時刻歴波形が保存できないセンサーにおいても，減衰定数 $h = 5\%$ における速度応答スペクトルが最大値を記録するときの周期をもとに，式 (6) より建物の塑性率を推定することができると考えられる。

まず，数多くの小地震時の速度応答スペクトルが最大値を記録するときの周期を保存しておくことで中低層建物の 1 次固有周期に近い数値を得ることができる。そして，その数値を基準とした大地震，もしくは大地震後で塑性化が発生した後に余震が発生したときの速度応答スペクトルが最大値を記録するときの周期から建物の塑性率を推定することができ，建物の健全性および建物の使用の可否を早期に判断することができると考えられる。

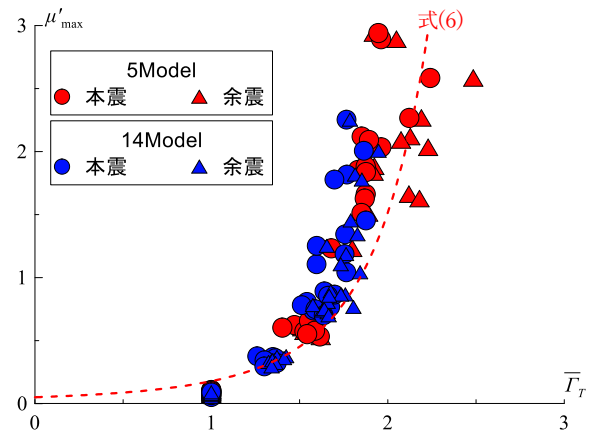


図 12 $\bar{\Gamma}_T$ と μ'_{max} の関係

7 まとめ

本報では，簡易加速度センサーを用いた建物の損傷評価手法を構築することを目的とし，RC 中低層の共同住宅を想定した建物モデルのせん断モデルを用いて地震応答解析を行った。本報で想定しているセンサーは，時刻歴波形を保存せず，かつセンサー間の同期が取れないが，減衰定数 $h = 5\%$ における速度応答スペクトルが最大値となるときの周期を記録できるものとした。そして，小地震時の速度応答スペクトルが最大値を記録するときの周期を基準とした大地震，もしくは大地震後に余震が発生したときの速度応答スペクトルが最大となるときの周期の増加量から建物の塑性率を推定する手法を提案した。

本報では，板状型の中低層建物の 1 方向にのみ地震動を入力して検討を行ったが，より多くの建物モデルの 2 方向に地震動を入力した場合の検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：逃げないですむ建物とまちをつくる一大都市を襲う地震等の自然災害とその対策一，技報堂出版，2015 年
- 2) 東京都総務局総合防災部防災管理課．“帰宅困難者対策ハンドブック・帰宅困難者対策条例の概要リーフレット”．東京都防災ホームページ https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_001/000/939/japanese_01.pdf
- 3) 高橋元一，畑田朋彦，鈴木康嗣，松谷巖，金川清，仁田佳宏，西谷章：非接触型センサーを用いた建物の層間変位計測システム（その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.191-198，2010.9
- 4) 関根麻里子，早野博幸，楠浩一，大久保孝昭，寺本篤史，川口莉穂：災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定（その 24）光ファイバセンサーを用いた外装タイルの剥離検知及び構造部材の損傷モニタリング，材料施工（2020），pp.1191-1192，2020.9
- 5) 古川洋之，田久保光，築田貴，市田俊司，清水善久，小金丸健一，中山涉：インテリジェント地震センサーの開発，電気学会研究会資料.MZK/ものづくり研究会[編]，2013.10
- 6) Howsner, G.W., Behavior of Structures during Earthquakes, Proc.ASCE, EM4, Oct.1959
- 7) 日本建築防災協会：構造設計・部材断面事例集，2007 年

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士（工学）

*3 オークランド大学 土木環境工学部 講師・Ph.D. (元東京工業大学)

Grad.Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
Associate Prof., IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng
University of Auckland, Civil and Env. Dept., Lecturer (Previously at Tokyo Institute of Technology)