

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答時の剛性の分析 その2 東北地方太平洋沖地震発生前後における上部構造および免震層の剛性の比較
Title(English)	
著者(和文)	呉 嘉瑞, 佐藤大樹, 中井亜里沙, 笠井和彦
Authors(English)	Kazui Go, Daiki Sato, Arisa Nakai, KAZUHIKO KASAI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 609-612
Citation(English)	, , , pp. 609-612
発行日 / Pub. date	2018, 3

観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答時の剛性の分析 その2 東北地方太平洋沖地震発生前後における上部構造および免震層の剛性の比較

構造—振動 正会員 ○ 呉 嘉瑞^{*1} 同 佐藤大樹^{*1} 同 中井亜里沙^{*1} 同 笠井和彦^{*1}

超高層免震建物 地震応答観測記録 履歴曲線
東北地方太平洋沖地震 剛性

1. はじめに

本報その1では、実建物を再現した多質点等価せん断型モデルおよび3次元部材モデルを用いて、地震応答時の建物剛性を算出する手法の検討を行った。その結果、応答加速度および設計質量から算出される層剛性は、多質点等価せん断型モデルでは精度良く評価できるが、3次元部材モデルでは上層になるにつれて誤差が大きくなることを確認した。

本報その2では、超高層免震建物の地震動観測記録に基づき、免震層および上部構造の層剛性を算出し、設計値との比較を行う。また、対象建物の観測記録の内、免震層の塑性化を伴う最も大きな変形を観測した東北地方太平洋沖地震発生前後における建物剛性の変化を分析する。

2. 観測記録の概要

2.1 観測記録の処理方法

J2棟には免震層に変位計が、上部構造(2FL, 7FL, 14FL, 20FL)に加速度計が設置されており、検討に用いる観測記録には以下の処理を行った。加速度計・変位計の観測記録を用いる際は、計測開始から100個のデータの平均値を全体から引き、初期値の補正を行う。加速度記録は同処理を行った後、30 Hzより高周波数側をノイズと判断し、30 Hzのローパスフィルターをかけた⁴⁾。

2.2 地震動の概要

使用する地震動は、本報その1で使用した3波に加え、東海道南方沖地震(2009年8月9日, M6.9)、駿河湾地震(2009年8月11日, M6.5)、福島県沖地震(2011年3月22日, M6.3)である⁷⁾。表1に観測記録の概要を示す。また、J2棟単体時の観測記録の内、免震層の塑性化を伴う過去最大の地震動である東北地方太平洋沖地震(以下、三陸沖地震)発生前と発生後の剛性の違いを分析するために、三陸沖地震発生

前後かつ、振幅レベルの近いものを採用している。なお、免震層せん断ひずみは、免震層最大変位を、免震層に設置されている直径1100 mm(12基, ゴム層厚215.8 mm)と1200 mm(4基, ゴム層厚234.0 mm)の天然ゴム系積層ゴムのゴム層厚でそれぞれ除し、その平均値としている。図1に検証する地震動のX方向およびY方向の加速度時刻歴波形を示す。図2に減衰定数5%での3波の加速度, 速度, 変位応答スペクトルを示す。なお、同図には免震層固定時およびレベル1入力時の固有周期を示している。図2(a)の加速度応答スペクトルをみると、駿河湾沖地震が最も大きく、ピークはX方向において33.6 cm/s²(周期約0.4秒), Y方向は25 cm/s²(周期約0.4秒)程度であることが確認できる。これは本報その1で示した静岡県東部地震と同程度の入力である。東海道南方沖地震の最大加速度応答スペクトルはX, Y方向でそれぞれ22.5 cm/s²(周期0.27秒), 25 cm/s²(周期0.35秒)であり、福島県沖地震はX, Y方向でそれぞれ約5 cm/s²(周期0.8秒), 約8 cm/s²(周期1.4秒)と低い入力である。

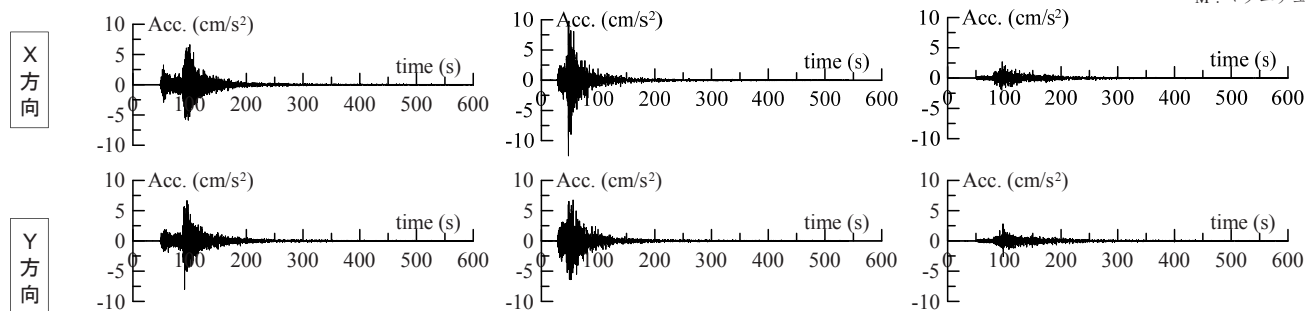
2.3 応答記録の概要

本報で使用する3波の最大応答加速度を高さ方向にプロットし、加速度計設置階の北側に設置されている加速度計のX方向およびY方向の加速度記録を比較する。図3に最大応答加速度の高さ方向分布を示す。20階の最大応答加速度

表1 観測記録の概要

年月日	震源地	M	最大地動加速度 (cm/s ²)		免震層最大変位 (cm)		せん断ひずみ (%)	
			X	Y	X	Y	X	Y
09/08/09 19:56	東海道南方沖	6.9	6.71	5.33	0.323	0.288	1.47	1.31
09/08/11 05:07	駿河湾沖	6.5	12.5	6.74	0.948	0.829	4.31	3.77
11/03/11 14:46	三陸沖(本震)	9.0	50.1	67.3	6.3	9.71	28.6	44.1
11/03/11 15:15	茨城県沖(余震)	7.7	21.3	26	3.21	6.58	14.6	29.9
11/03/15 22:28	静岡県東部	6.4	14.4	9.64	0.599	0.666	2.72	3.03
11/03/22 18:19	福島県沖	6.3	3.02	3.15	0.110	0.186	0.50	0.85

M: マグニチュード



(a) 東海道南方沖地震(2009年8月) (b) 駿河湾沖地震(2009年8月) (c) 福島県沖地震(2011年3月)

図1 加速度時刻歴波形

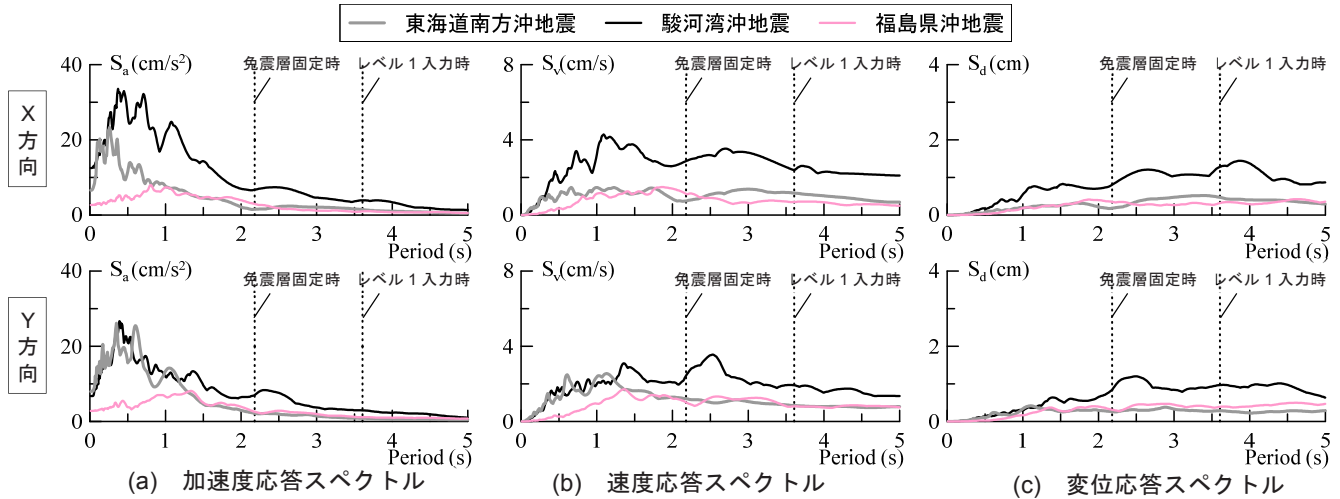


図2 応答スペクトル ($h = 5\%$)

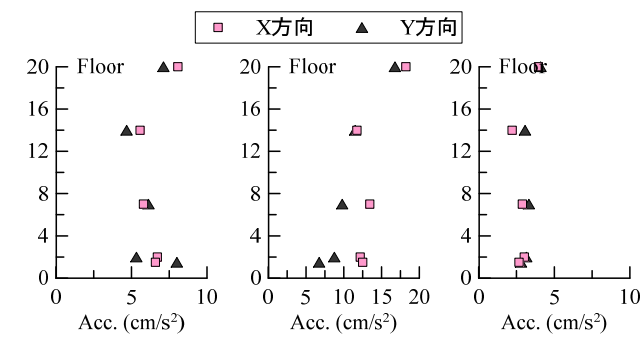


図3 最大応答加速度の高さ方向分布

は東海道南方沖地震で 8.06 cm/s^2 (X 方向), 7.12 cm/s^2 (Y 方向), 駿河湾地震で 18.2 cm/s^2 (X 方向), 16.8 cm/s^2 (Y 方向), 福島県沖地震で 3.95 cm/s^2 (X 方向), 4.09 cm/s^2 (Y 方向)である。図3より, 3波ともに, 上部構造の加速度は高次モードの影響と考えられる分布となっている。

3. 層剛性の算出

3.1 層剛性の算出方法

本報では, 免震層および上部構造の地震時の建物剛性を把握することを目的として, 地震発生時に観測された J2 棟の加速度記録を使用して, 各層の剛性を算出する。層剛性の算出方法は本報その1を参照されたい。ただし, J2 棟には加速度計が20層より上層には設置されておらず, 21, 22層の加速度は線形補間により推定することが出来ないため(3.2節, 後述), 20層と同じ応答をすると考え, 21, 22層の質量は20層の質量に組み込むこととする。

3.2 加速度線形補間の概要

本報その1で示したように, J2 棟には上部構造(2FL, 7FL, 14FL, 20FLのみ)に加速度計が設置されている。本報では, 限定された層の加速度記録を用いて, 線形補間により全層の応答加速度を推定し, 層剛性を算出する。図4に示すように, 加速度計設置階で計測された上層の加速度 $\ddot{X}_u(t)$ および加速度計設置階で計測された下層の加速度 $\ddot{X}_l(t)$ を用いて第 i 層の加速度 $\ddot{X}_i(t)$ を, 式(1)を用いて推定する。

$$\ddot{X}_i(t) = \frac{L_{kl} \ddot{X}_u(t) + L_{ku} \ddot{X}_l(t)}{L_{kl} + L_{ku}} \quad (1)$$

ただし, $(u, l) = (7, 2), (14, 7), (20, 14)$, L_{ku} : u 層から i 層までの距離, L_{kl} : l 層から i 層までの距離
 なお, 線形補間後の応答加速度を用いて地震応答時の各層の剛性を算出する手法の妥当性を確認するために, 3次元部材モデルを用いた動的応答解析を行い, 各層の応答加速度を出力して算出した層剛性(精解値)と, 線形補間した応答加速度を用いて算出した層剛性を比較した。その結果, 線形補間により算出した層剛性は精解値の $\pm 10\%$ 以内におさまることを確認した。

3.3 加速度2階積分の精度の確認

J2 棟の免震層には加速度計だけでなく, 大変形用と小変形用の変位計が北側と南側にそれぞれ設置されている(本報その1, 図3参照)。本章では加速度2階積分の精度を確認するために, 2FLとMFLの加速度記録の差から2階積分より算出した免震層変位と, 免震層変位計の観測記録を比較する。なお, 北側と南側の加速度波形を比較した結果, 本報で使用する観測記録では, 全層において建物に振れがほとんど発生していないことを確認したため, 以降では建物北側の応答を使用する。免震層の変位計は変位計の容量および分解能⁹⁾より, 北側に設置されている小変形用を使用する。なお, 文献8)では, 三陸沖地震, 茨城県沖地震, 静岡県東部地震において, 加速度記録に0.1 Hzのハイパスフィルターをかけ, 加速度記録の長周期成分を除くことで, 積分の精度を得ることを確認している。本報で使用する3波においても0.1 Hzのハイパスフィルターが適していることを確認するため, 対象とする地震動に対して0.1 Hzのハイパスフィルターをかけ, 周波数領域での積分手法を用いる。図5に加速度計および免震層変位計から得られた時刻歴波形の比較を示す。なお, 図示する時刻歴波形は, 3波それぞれの変位記録のピーク時間を

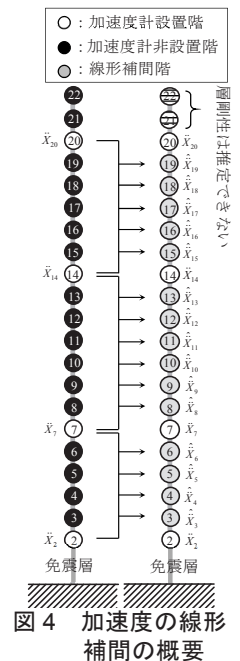


図4 加速度の線形補間の概要

含む 10 秒間である。図 5 より、加速度計および免震層変位計より算出した時刻歴波形は概ね一致していることから、加速度 2 階積分の精度が確認された。

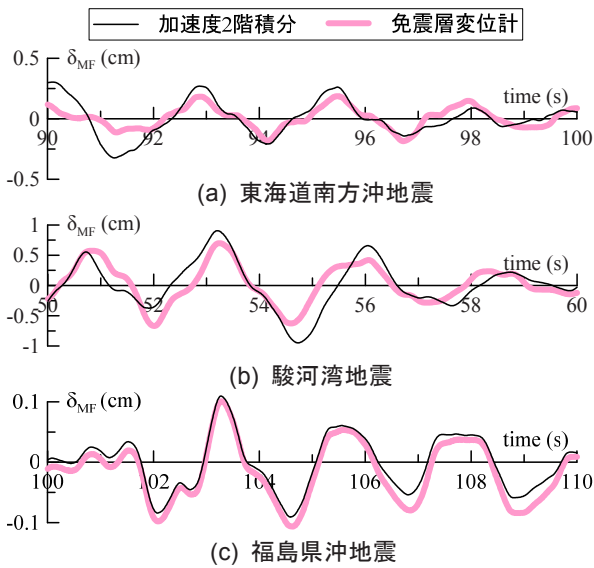


図 5 加速度計および変位計より算出した変位の時刻歴波形

4. 層剛性の算出結果

4.1 設計値と観測記録より算出した層剛性の比較

本節では、異なる振動レベルの地震波において、免震層および上部構造の層剛性が設計値に対してどのような値を示すのかを分析する。図 6, 7 に免震層および上部構造 (4, 8, 12 層) の $\delta - Q$ の履歴曲線および最小二乗法より算出した近似直線 K_i と設計値との比較を示す。図 6, 7 より、免震層および上部構造の層剛性は、全ての観測記録において設計値より高いことが確認できる。

4.2 最大層間変位と層剛性

図 8 に、免震層および上部構造 (4, 8, 12 層) における最大層間変位と、設計値と観測記録より算出した層剛性の比較 (K_i/DK_i) を示す。なお、三陸沖地震および茨城県沖地震による免震層の最大層間変位は、X, Y 方向ともに鋼製ダンパーの弾性限でプロットしている。図 8 より、免震層および上部構造では、X, Y 方向ともに振幅が大きくなると剛性が低くなり、振幅依存性が確認できた。また、図 8 において振幅レベルが同程度であり、三陸沖地震発生前後である東海道沖および福島県沖、駿河湾沖および静岡県東部、三陸沖お

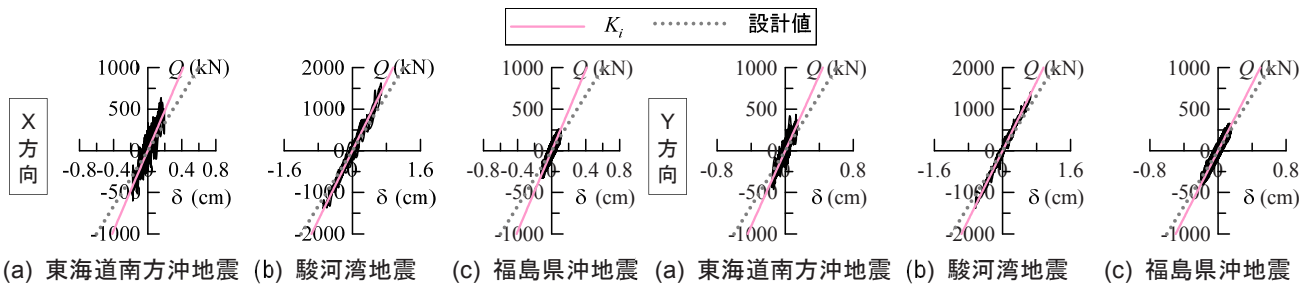


図 6 免震層の履歴曲線の比較

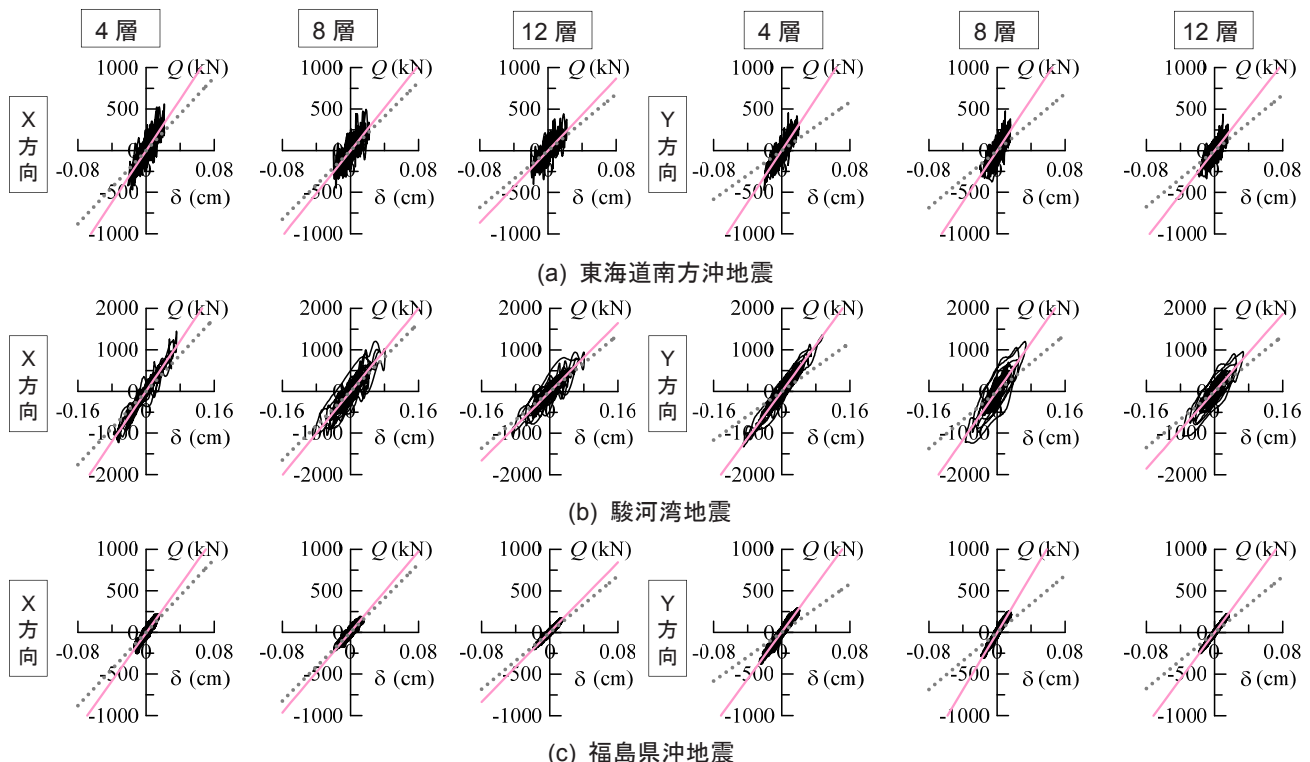


図 7 上部構造の履歴曲線の比較

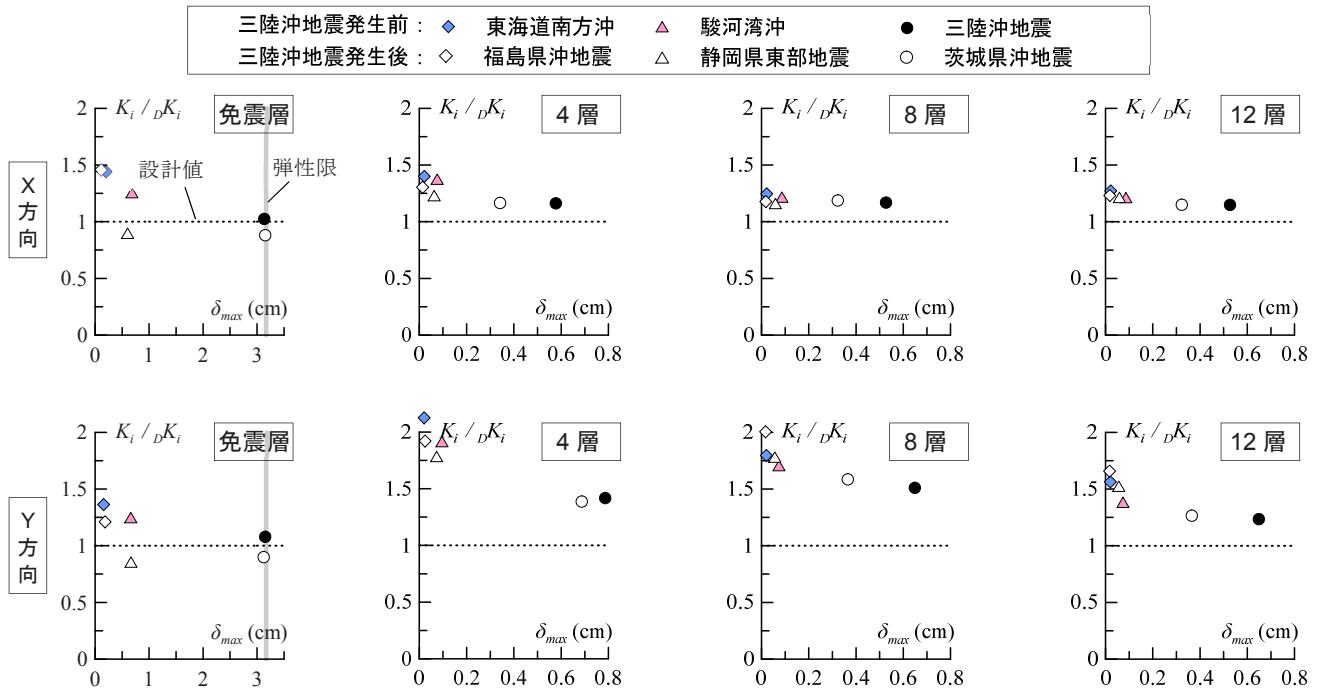


図8 設計値と観測記録より算出した層剛性の比較

よび茨城県沖の3ケースの地震波をそれぞれ比較する。図8の免震層において、駿河湾沖および静岡県東部地震での剛性の低下が著しく、三陸沖地震発生後は、発生前と比較してX、Y方向ともに約1.5倍剛性が低下していることが確認できる。また、東海道南方沖および福島県沖のY方向、三陸沖および茨城県沖のX、Y方向においても発生前後で剛性の低下が見られる。鋼材ダンパーおよび積層ゴムの剛性が小変形で低下するという文献は見られないため、取り付け部材などの軽微な損傷が発生したものと思われるが、詳細な追求は今後の課題といえよう³⁾。上部構造においては、三陸沖地震発生前後における剛性の低下はX、Y方向ともに最大1.1倍程度であり、部材の塑性化の影響による剛性低下は見られなかった。

5. まとめ

本報では、超高層免震建物J2棟の地震動観測記録に基づき、免震層および上部構造の層剛性を算出し、設計値との比較を行った。また、対象建物の観測記録の内、免震層の塑性化を伴う最も大きな変形を観測した東北地方太平洋沖地震発生前後における建物剛性の変化を分析した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 免震層および上部構造に関して、振幅が大きくなると剛性が低くなり、建物の振幅依存性を確認した。
- (2) 東北地方太平洋沖地震発生後における免震層の剛性は、発生前と比較してX、Y方向ともに最大約1.5倍低下することを確認した。
- (3) 上部構造に関して、東北地方太平洋沖地震発生後における層剛性の低下はX、Y方向ともに最大1.1倍程度であり、部材の塑性化の影響による剛性低下は見られなかった。

謝辞

本研究で用いたJ2棟の観測データは、東京工業大学GCOEプログラムから提供して頂いたものであります。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本免震構造協会：MENSIN, No.97, pp.19-24, 2017.7
- 2) 天竺貴仁, 高橋武宏, 福和伸夫, 護雅史, 飛田潤：継続的な地震観測及び微動計測に基づく高層免震建物の建設時における振動特性の変化, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, pp.721-730, 2014.6
- 3) 松田和浩, 笠井和彦：東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻 第704号, pp.1445-1455, 2014.10
- 4) 佐藤大樹, 鈴木勇人, 田村哲郎, 普後良之, 中村修, 笠井和彦, 北村春幸：超高層免震建物の観測記録に基づく風応答の分析, 第22回風工学シンポジウム, pp.251-256, 2012.12
- 5) 菊地岳志, 藤森智, 竹内徹, 和田章：メガブレースを用いた超高層免震鋼構造建築物の設計, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp.217-222, 2005.12
- 6) 大木洋司, 山下忠道, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章：超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み, 日本建築学会技術報告集, 第21号, pp.73-77, 2005.6
- 7) 気象庁：報道発表資料, <http://www.jma.go.jp/jma/press/hodo.html> (2017年12月参照)
- 8) 中井亜里沙, 佐藤大樹, 村上智一, 笠井和彦：超高層免震建物の地震動観測記録に基づく免震層および上部構造の剛性の評価, 日本建築学会技術報告集, 第57号, 2018.6

*1 東京工業大学