2011年東北地方太平洋沖地震における不整形な立面・平面を持つ免震構造物の免震層における並進、回転成分の推定

紺野克昭¹⁾、西川貴文²⁾、藤野陽三³⁾

1) 正会員 芝浦工業大学工学部土木工学科 博士 (工学)

e-mail : konno@sic.shibaura-it.ac.jp

2) 正会員 長崎大学大学院システム科学部門 博士 (工学)

e-mail : nishikawa@nagasaki-u.ac.jp

3) 正会員 東京大学大学院社会基盤学専攻 工博

e-mail : fujino@civil.t.u-tokyo.ac.jp

要 約

芝浦工業大学豊洲キャンパスの地盤、校舎には複数の加速度計が設置され、地震観測が行われている。また、不整形な立面・平面を持つ免震構造である校舎の免震層内には複数の層間変位計が設置されている。東北地方太平洋沖地震で記録された層間変位計毎の粒子軌跡は、異なった形状を示しており、免震層では並進振動の他に、回転振動をしていたことが示唆される。そこで、本論文では、同地震における免震層の動的挙動を推定することを目的に、同一平面内の2台以上の加速度計の観測記録を用いて並進、回転成分を簡易に推定する方法を新たに提案し、同地震の観測記録に適用した。その結果、免震層における回転成分の最大値は 3.8×10^{-4} rad 程度、並進成分による層間変位の最大値は 6cm 程度であったことが示された。

キーワード： 東北地方太平洋沖地震、構造物の並進成分と回転成分、地震観測、免震構造、不整形構造

1. はじめに

免震構造は地震時の変形が免震層に集中することを前提に設計されている¹⁾。そのため、強震時には大きな変形が発生する。2011年東北地方太平洋沖地震では、今回対象としている長大で免震構造を有する芝浦工業大学豊洲校舎（東京都江東区、図1、2）においても、免震層に設置された4台の感圧式の層間変位計により粒子軌跡が記録され、最大全振幅（P-P）は15.5cmと大きな相対変位が観測されている。これらの粒子軌跡は、設置個所によって異なる形状をしており、免震層の変形には並進成分の他に、回転成分が含まれていることが推測できる。

回転成分が発生する要因としては、免震層の剛性偏心、高層棟（研究棟）と低層棟（教室棟）のL字形に結合していることによる質量偏心、地震動の位相差入力などが考えられる。剛性偏心や質量偏心のある構造物が地震動を受ける場合、各層の面内振動には並進成分の他に、回転成分が発生する²⁾。また、

図1 芝浦工業大学豊洲校舎

図2 豊洲校舎の構造軸組図と平面図
および地震計設置位置 11) に加筆

実際の地震では、基礎への実体波の斜め入射や表面波のような水平入射もあると考えられる。この場合、基礎の平面形状が大規模になるほど、基礎の両端に生じる地震動の入力位相差も大きくなる。この入力位相差により、免震層には回転成分も発生する³⁾ことが予想される。なお、本論文では、これらの要因の回転成分への寄与率推定は対象外とし、地震観測記録からの並進、回転成分の抽出のみを対象としている。

回転成分によって発生する層間変位は、その回転中心からの距離に比例して大きくなる。しかし、免震層の回転振動に関する解析的な研究例^{例えば 1、4、5)}はみられるものの、観測的な研究例^{6、7)}は少ない。この理由としては、免震構造では免震層の回転成分は比較的小さいと考えられていること^{1、3)}や回転成分の抽出には、同じ平面内に2か所以上に地震計を設置する必要がある、これを満たす観測例^{6、7、8)}は少ないためと考えられる。仮に、2台の地震計が同じ平面内に離れて設置されていれば、両者の同一方向の波形記録の差分から回転成分を推定することができる⁶⁾。また、並進成分は、同一方向の波形記録の平均から推定できる⁶⁾。今回の対象構造物には免震層付近に多数の地震計が設置され、高密度の地震観測が行われている。そこで、本研究では水平面内に設置された2台以上の地震計の観測記録から並進、回転成分を簡易に抽出する方法を新たに提案する。本提案方法は、複数の地震計の水平2方向の波形記録を同時に使用し、任意に設定した回転中心に対し、2方向の並進成分と回転成分を同時に推定するものである。本論文では、この方法を東北地方太平洋沖地震時に観測された地震記録に適用し、対象構造物における並進、回転成分を推定したので報告する。

2. 観測建物の概要

対象構造物は、2005年9月に工事竣工し、2006年4月に開校されている。図1、2に示すように、校舎は地上7階の交流棟、教室棟と地上14階の研究棟の3棟からなる。3棟とも上部構造はCFT構造を用いた鉄骨造である。教室棟、研究棟は、7階までは一体であり、研究棟の2階から7階部分はピロティとなっており、構造的に複雑なL字形の不整形な構造物となっている。一方、交流棟と教室棟の上部構造は分離している。なお、2、4、6階の両棟間には、支承部分に滑り、回転機構を持つ連絡橋が設置され、両棟の変位の位相差を逃す構造となっている。

上部構造と基礎スラブ間には免震層があり、図3に示すように4種類の免震部材（積層ゴムアイソレーター、積層ゴムアイソレーター一体型鋼製U型ダンパー、鉛ダンパー、弾性すべり支承）が免震層内に配置されている。基礎スラブは、図2(a)、(b)から分かるように交流棟と教室棟の境界付近と研究棟のピロティ下側で浅くなっているものの連続している。基礎スラブの厚さは、研究棟のピロティの下側の領域のみ100cmで、他は150cmである。なお、免震部材の直上の床スラブの厚さは、3棟とも20cmである。図2(a)、(b)から分かるように免震部材の高さ方向の設置位置は、教室棟、交流棟南西側で低く、交流棟北東側、研究棟で高くなっている。研究棟では、ピロティの下側を除いた基礎スラブと免震部材の間（図2(a)参照）の空間は、雨水の貯水施設となっており、構造的には免震部材と杭頭の間の一辺200～310cmのRC柱とこれらの間の厚さ40～60cmのRC壁で構築されている。以上から、免震部材以下の下部構造の剛性は比較的大きいと考えられる。

免震層の設計許容変形は49cmに設定されている。設計時の質点系振動モデルにより得られている積層ゴムアイソレーターのみを考慮した固有周期は、交流棟が5.3秒、教室棟+研究棟が6.0秒である。また、初期剛性時の全免震部材を考慮した固有周期は、交流棟が1.4秒、教室棟+研究棟が2.0秒である。初期剛性時からきわめて稀に発生する地震動時に至るまでのすべての状態においてねじれ変形を抑えるために、全免震部材における剛心と上部構造の重心がほぼ一致し、かつ、一種類の免震部材だけを考慮した場合の剛心も重心とほぼ一致するように設計されている。また、図3の免震部材の配置図から分かるように、積層ゴム部材やダンパー部材は建物周辺部分に、すべり支承部材は建物中心部分に配置することにより、免震層のねじれ剛性を高める配慮がなされている。なお、図2(c)および後述の図14には、

図3 免震部材の種類と配置図（平面図）

図5 校舎中庭（図2(c)中の■）における常時微動のH/Vスペクトル

設計時における上部構造の重心位置と免震部材の初期剛性における剛心位置が示してあり、両者間の距離は約4.3mと近接していることが分かる。

3. 周辺地盤の概要

対象構造物のある豊洲地区は AP+3m 程度の平坦な埋立地である。埋立は、明治・大正期に隅田川河

(a) 地質断面図 (No. 1-2-3-4)

(b) 地質断面図 (No. 12-8-4)

地層名	記号	層厚 (m)	N 値	
			範囲	平均
埋立土	Bf	1.2 ~ 2.6	1 ~ 10	4.4
粘性土層	Hc	0.9 ~ 5.7	0 ~ 3	0.5
砂質土層	Hs	0.9 ~ 4.1	0 ~ 10	3.9
粘土層	Yc	22.7 ~ 25.3	0 ~ 5	1.1
砂質土層	Ys	0.7 ~ 3.6	1 ~ 18	6.0
粘性土層	Nc	1.3 ~ 9.3	3 ~ 43	10.7
砂質土層	Ns	0.4 ~ 1.4	11 ~ 60 以上	33.0
砂礫層	Ng	0.2 ~ 0.7	3 ~ 44	24.2
埋没段丘礫層	Btg	1.9 ~ 5.7 以上	47 ~ 60 以上	58.8
上総層群	Ka	—	60 以上	—

(c) 地質層序

図4 地質断面図と地質層序

口改良工事の浚渫土砂を用いて埋め立てられたのが始まりとされ、昭和 12 年頃に完了している⁹⁾。校舎施工にあたり地質調査が行われている¹⁰⁾。図 2 (c)のボーリング地点の調査結果から推定された地質断面図を図 4 に示す¹⁰⁾。なお、対象構造物の設計基準地盤面 (SGL) は AP+3.2m である。対象構造物が支持層とした埋没段丘礫層 (洪積層) の上には、下位から沖積層である 7 号地層、有楽町層と埋立土が堆積し、これらの厚さは 35~45m と非常に厚い。なお、表層付近は砂質土成分が多く、液状化の可能性があるため¹¹⁾、交流棟と研究棟の一部を除いて基礎スラブ底の位置は、SGL-10m 程度で、シルト層内となっている。また、地震時の地盤の変形に対する追随性が高い鋼管杭が支持層まで打設されている¹¹⁾。

地盤の振動特性を調べるために図 2 (c)の■印の地点で 5 分間、3 成分の常時微動測定を行っている。この微動記録の中から安定している 40.96 秒長の区間を 3 つ選び、平滑化にはバンド幅 0.25Hz の Parzen ウィンドウを用いて水平動と上下動のスペクトルを求め、これらの比を H/V スペクトルとし図 5 に示す。同図より表層地盤の卓越周期は約 1 秒程度と推定され、厚い沖積層が反映されていることが分かる。

4. 地震観測システム¹²⁾

地震観測は、軟弱地盤上での免震部材の効果・性能を検討するために、図 2 に示すように免震部材を挟むように免震部材の下側の基礎スラブ上に 5 台、上側の地下 1 階および地上 1 階に 7 台、および、建物から水平方向に 5.6m 離れた地盤内 (GL-1m と GL-40m) に 2 台の計 14 台のサーボ型加速度計が設置されている。各加速度計の波形データは、専用ケーブルにより教室棟 1 階の防災センター内の IC カード集録装置へ送られ、100Hz サンプリングで記録されている。集録装置の時刻校正は GPS を用いて行われている。この地震観測システムは 2005 年 7 月 29 日に稼働し、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震を含め多くの地震記録が得られている。また、免震層の層間変形を記録するため、4 台の感圧式変位記録装置 (以下、単に変位計と呼ぶ) が設置されている。この変位計は、基礎スラブ側に設置された平板上にカーボン紙、記録フィルムを載せ、免震層の上側に取り付けられた記録針でフィルムに水平変位軌跡を複写するものである。

2010 年度には、対象構造物の主に上部構造を中心に 12 台のサーボ型 LAN ネットワーク加速度計が設置され、連続観測とトリガー観測が行われている。各ネットワーク加速度計の時刻校正は GPS に接続している学内の NTP サーバーを用いて行われている。また、4 台の回転角付変位計も設置している。この変位記録は上述の IC カード収録装置に保存される。なお、これらの地震計観測システムの詳細については、今後、別論文として報告する予定である。

5. 免震層の並進および回転成分の推定方法

基礎スラブおよび上部構造の第一層床 (以下、単に第一層床と呼ぶ) の水平面内の並進、回転成分の簡易な推定方法を新たに提案する。基礎スラブおよび第一層床は剛体運動するものと仮定 (剛床仮定) し、水平面内の並進、回転成分のみを考える。図 6 は、基礎スラブの回転中心における並進、回転成分を模式的に示したものである。図中の直角座標 (X-Y) は絶対系に固定されている。回転中心の座標を (X_{CB}, Y_{CB}) とし、この回転中心の X、Y 方向の変位をそれぞれ $x_{CB}(t)$ 、 $y_{CB}(t)$ 、回転角を $\theta_{CB}(t)$ とする。 $\theta_{CB}(t)$ は反時計回りを正とする。添え字の C は回転中心、B は基礎スラブを表している。なお、この $x_{CB}(t)$ 、 $y_{CB}(t)$ が並進成分、 $\theta_{CB}(t)$ が回転成分に対応する。基礎スラブ上の地震計 i の座標は (X_i, Y_i) と表し、X、Y 方向の絶対変位をそれぞれ $x_i(t)$ 、 $y_i(t)$ とする。回転中心から地震計 i までの距離を r_i 、地震前における回転中心から地震計 i までの線分と X 軸の交差角 α_i とすると、これらは次式より求めることができる。

$$r_i = \sqrt{(X_i - X_{CB})^2 + (Y_i - Y_{CB})^2} \quad (1)$$

図6 基礎スラブ（剛体仮定）の水平面内の並進および回転成分の模式図

$$\alpha_i = \arctan((Y_i - Y_{CB}) / (X_i - X_{CB})) \quad (2)$$

ただし、 $\arctan(Y/X)$ は、X軸から、原点と座標 (X, Y) を結んだ直線までの角度とする。時刻 t における地震計 i の絶対座標は、図6を参考にすると、基礎スラブの並進、回転成分を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} X_i + x_i(t) \\ Y_i + y_i(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{CB} + x_{CB}(t) \\ Y_{CB} + y_{CB}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r_i \cos(\theta_{CB}(t) + \alpha_i) \\ r_i \sin(\theta_{CB}(t) + \alpha_i) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{CB} + x_{CB}(t) \\ Y_{CB} + y_{CB}(t) \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} r_i \cos \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ r_i \sin \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \theta_{CB}(t) \\ \sin \theta_{CB}(t) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

上式から地震計 i の絶対変位は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \end{Bmatrix} &= \begin{pmatrix} r_i \cos \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ r_i \sin \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \theta_{CB}(t) \\ \sin \theta_{CB}(t) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} X_i - X_{CB} \\ Y_i - Y_{CB} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_{CB}(t) \\ y_{CB}(t) \end{Bmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} r_i \cos \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ r_i \sin \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \theta_{CB}(t) \\ \sin \theta_{CB}(t) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} r_i \cos \alpha_i \\ r_i \sin \alpha_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_{CB}(t) \\ y_{CB}(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

今、 $\theta_{CB}(t) \ll 1$ と仮定し、 $\cos \theta_{CB}(t)$ 、 $\sin \theta_{CB}(t)$ をマクローリン展開の第一項で $\cos \theta_{CB}(t) = 1$ 、 $\sin \theta_{CB}(t) = \theta_{CB}(t)$ と近似して上式に代入すると次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} r_i \cos \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ r_i \sin \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ \theta_{CB}(t) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} r_i \cos \alpha_i \\ r_i \sin \alpha_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_{CB}(t) \\ y_{CB}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -r_i \theta_{CB}(t) \sin \alpha_i \\ r_i \theta_{CB}(t) \cos \alpha_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_{CB}(t) \\ y_{CB}(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

以上より、基礎スラブが剛体運動で、その回転成分の値は小さいと仮定すれば、地震計の絶対変位は $x_{CB}(t), y_{CB}(t), \theta_{CB}(t)$ の 1 次関数として表現できることが分かる。

本論文で提案する並進、回転成分の推定方法は、最小二乗法を用いて、既知である地震計の絶対変位と上式で表される絶対変位との残差二乗和を最小にするように $x_{CB}(t)$ 、 $y_{CB}(t)$ 、 $\theta_{CB}(t)$ を求める方法である。以下では、一体構造である教室棟、研究棟の中に設置されている地震計を用いて、基礎スラブと第一層床の並進、回転成分を求める手順を具体的に示す。

基礎スラブの並進成分 $x_{CB}(t)$ 、 $y_{CB}(t)$ 、回転成分 $\theta_{CB}(t)$ は、地震計 $i = 3, 4, 5$ (図 2 の地震計③④⑤) を用いて推定する。地震計 i で観測された X、Y 方向の絶対変位をそれぞれ $x_i^{obs}(t)$ 、 $y_i^{obs}(t)$ とする。これらの観測値と $x_{CB}(t)$ 、 $y_{CB}(t)$ 、 $\theta_{CB}(t)$ から決まる絶対変位との残差二乗和 ε_B は次のように記すことができる。

$$\varepsilon_B(x_{CB}(t), y_{CB}(t), \theta_{CB}(t)) = \sum_{i=3}^5 \left[\left(x_i^{obs}(t) - x_i(t) \right)^2 + \left(y_i^{obs}(t) - y_i(t) \right)^2 \right] \quad (6)$$

ここで、ベクトル $\{P_B\}$ 、 $\{Q_B\}$ 、行列 $[T_B]$ を次のように定義する。

$$\{P_B\} = \begin{Bmatrix} x_{CB}(t) \\ y_{CB}(t) \\ \theta_{CB}(t) \end{Bmatrix}, \quad \{Q_B\} = \begin{Bmatrix} x_3^{obs}(t) \\ x_4^{obs}(t) \\ x_5^{obs}(t) \\ y_3^{obs}(t) \\ y_4^{obs}(t) \\ y_5^{obs}(t) \end{Bmatrix}, \quad [T_B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_3 \sin \alpha_3 \\ 1 & 0 & -r_4 \sin \alpha_4 \\ 1 & 0 & -r_5 \sin \alpha_5 \\ 0 & 1 & r_3 \cos \alpha_3 \\ 0 & 1 & r_4 \cos \alpha_4 \\ 0 & 1 & r_5 \cos \alpha_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

残差ベクトル $\{E_B\}$ は次のように表される。

$$\{E_B\} = \{Q_B\} - [T_B] \{P_B\} \quad (8)$$

したがって、残差二乗和 ε_B は次のように表される。

$$\varepsilon_B(x_{CB}(t), y_{CB}(t), \theta_{CB}(t)) = \{E_B\}^T \{E_B\} \quad (9)$$

残差二乗和 ε_B を最小とする未知数 $\{P_B\}$ は次式から得られる^{例えば 13)}。

$$\{P_B\} = ([T_B]^T [T_B])^{-1} [T_B]^T \{Q_B\} \quad (10)$$

第一層床における並進成分 $x_{CF}(t)$ 、 $y_{CF}(t)$ 、回転成分 $\theta_{CF}(t)$ も同様に求められる。なお、添え字の F は第一層床を表している。ここでは、図 2 を参考に第一層床上の地震計 $i = 7, 8, 11, 12$ を使用することとし、ベクトル $\{P_F\}$ 、 $\{Q_F\}$ 、行列 $[T_F]$ だけ以下に示しておく。

$$\{P_F\} = \begin{Bmatrix} x_{CF}(t) \\ y_{CF}(t) \\ \theta_{CF}(t) \end{Bmatrix}, \quad \{Q_F\} = \begin{Bmatrix} x_7^{obs}(t) \\ x_8^{obs}(t) \\ x_{11}^{obs}(t) \\ x_{12}^{obs}(t) \\ y_7^{obs}(t) \\ y_8^{obs}(t) \\ y_{11}^{obs}(t) \\ y_{12}^{obs}(t) \end{Bmatrix}, \quad [T_F] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_7 \sin \alpha_7 \\ 1 & 0 & -r_8 \sin \alpha_8 \\ 1 & 0 & -r_{11} \sin \alpha_{11} \\ 1 & 0 & -r_{12} \sin \alpha_{12} \\ 0 & 1 & r_7 \cos \alpha_7 \\ 0 & 1 & r_8 \cos \alpha_8 \\ 0 & 1 & r_{11} \cos \alpha_{11} \\ 0 & 1 & r_{12} \cos \alpha_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

以上、並進、回転成分の推定方法を具体的な例を用いて示した。なお、並進、回転成分が求まれば式(5)を用いて任意の地点の絶対変位を求めることができ、免震層上下の層間変形を推定できる。これにより、任意の免震部材の変形量を推定できることになる。

6. 2011年東北地方太平洋沖地震の地震記録への適用

6.1 地震記録について

地震計 4 (図 2 の④) に隣接してサーボ型 LAN ネットワーク加速度センサー (以下、地震計 101 と呼ぶ) が設置されている。図 7 に地震計 4 と地震計 101 の東北地方太平洋沖地震の観測記録を示す。地震計 4 は 3 月 11 日 14 時 48 分 53 秒までの記録が集録装置の不具合により欠損している。地震計 1~14 も同じ集録装置を使用しているため、同時刻まで欠損している。ただし、同図から分かるように今回の地震の主要動は非常に長く、S 波の初頭 43 秒間は欠損しているものの、最大値を示した付近を含む加速度記録は残すことができた。

図 8 に免震部材より下側の地震計 3、4、5 と上側の地震計 7、8、12 の加速度記録を示す。下側の地震計の水平方向の最大加速度は 80.7~118.0 gal、上側は 89.4~120.7 gal と上側の方が若干大きい傾向がみられる。一方、上下方向の最大加速度は、下側で 49.6~88.7 gal、上側は 46.1~87.3gal と上側の方が若干小さい傾向がみられた。図 9 にこれらの加速度フーリエスペクトルを示す。免震部材下側の各地震計のスペクトルは地震計に依らずほぼ同じであるが、上側の水平成分は地震計毎に少し異なっていることが

図 7 隣接している地震計 004 と地震計 101 の東北地方太平洋沖地震の加速度記録
(カッコ内の数値は地震計 101 の時間 0~117 秒における最大加速度)

図8 東北地方太平洋沖地震における加速度記録
(カッコ内の数値は最大値)

図9 東北地方太平洋沖地震における
加速度フーリエスペクトル

図10 東北地方太平洋沖地震における
加速度フーリエスペクトル比

図11 ローカットフィルター

図12 東北地方太平洋沖地震における変位波形
(カッコ内の数値は最大値)

図 13 東北地方太平洋沖地震における相対変位波形（カッコ内の数値は最大値）

分かる。免震部材の上下の地震計のスペクトル比を図 10 に示す。周期 1 秒以上の範囲を見ると、CH1（Y）成分では、周期 2、3 秒付近にピークが見られ、CH2（X）成分では、周期 2～4 秒の範囲に複数のピークが見られる。いずれのピークも振幅比は 2 程度であり増幅されていないことが分かる。一方、CH3（Z）成分では、振幅比は 1 前後とほとんど増幅されていないことが分かる。次項ではこれらの記録を用いて並進、回転成分の推定を試みる。なお、4 章で述べた通り、免震層付近だけでなく、上部構造にも複数の地震計が設置され、地震記録が得られている。免震構造で期待される効果の一つに、上部構造の加速度応答値の低減が挙げられる。教室棟、研究棟の最大加速度はそれぞれの最上階で観測され、教室棟 7 階で CH1（Y）方向に 297.4gal、CH2（X）方向に 85.3gal、研究棟 14 階で CH1（Y）方向に 141.4gal、CH2（X）方向に 236.5gal であった。上述の通り、免震部材の下側の水平方向の最大加速度は 80～120gal 程度なので、教室棟では CH2（X）方向、研究棟では CH1（Y）の振幅はあまり増幅されないことが分かる。ただし、これが免震効果だけによるものなのか、あるいは、不整形構造物であることも要因となっているのかどうか、など、今後、対象構造物の数値解析などを行い、詳細に検討していく予定である。

6.2 並進、回転成分の推定方法への適用

一体構造である教室、研究棟の基礎スラブ、第一層床の並進、回転成分の推定を試みる。提案方法では、変位記録が必要になる。しかし、本観測システムの地震計は加速度計であるので、変位を求めるには加速度波形の積分を実施する必要がある。そこで、本研究では、FFT を用いて周波数領域で積分することにより変位波形を求めている。この際、長周期のノイズを除去するため、図 11 に示すローカットフィルターを用いている。図 12 に図 8 の加速度記録に対する変位波形を示す。同一成分の変位波形は、6 地震計ともほぼ類似した形状であることが分かる。なお、地震計 4 との比較として、地震計 101 の初期微動区間も含めて求めた変位波形も示している。地震計 4 と 101 の変位波形はほぼ同じであり、変位の推定において欠損による影響は比較的小さいと考えられる。図 13 に免震部材の上下の地震計間の相対変位波形を示す。水平成分は 10～60 秒の区間で相対変位が大きく、CH1（Y）成分の最大振幅は 4.5～5.2cm、CH2（X）成分では 6.6～9.5cm と CH2（X）方向で相対変位が大きい傾向があることが分かる。CH3（Z）成分では 0.15～0.53cm と水平成分より 1 オーダーほど小さいことが分かる。

本推定方法の適用の際に使用する地震計は、表 1 に示すように、第 5 章の説明で使った地震計の場合（ケース 1）の他に、教室棟側の地震計のみの場合（ケース 2）、研究棟側の地震計のみの場合（ケース 3）とした。これは、ケース 1 のように教室棟、研究棟が一体となって剛体と考えるのに対し、剛体

の仮定が各棟の範囲のみという可能性もあると考えたためである。

提案方法では、回転中心を指定する必要があるため、次の手順で回転中心を定めることとする。なお、基礎スラブや第一層床の個々の回転中心は異なっている可能性もあるが、ここで定義する回転中心は両者間の相対的な運動に対する回転中心である。はじめに、基礎スラブと第一層床の回転中心は同じ座標 (X_C, Y_C) とし、 $X_C = X_{CB} = X_{CF}$ 、 $Y_C = Y_{CB} = Y_{CF}$ とする。次に、この回転中心における相対的な並進成分の二乗和平方根 $S(X_C, Y_C)$ を次式のように定義する。

$$S(X_C, Y_C) = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[(x_{CF}(t_n) - x_{CB}(t_n))^2 + (y_{CF}(t_n) - y_{CB}(t_n))^2 \right] \right]^{0.5} \quad (12)$$

ここで、 t_n は離散時刻、 N は地震記録の時間方向のサンプル数である。回転中心では相対的な並進成分は小さいと考え、 $S(X_C, Y_C)$ を最小とする座標 (X_C, Y_C) を回転中心と定義する。今回は、適用する変位波形の時間区間は時刻 14 時 49 分 03 秒 (図 12 の横軸 10 秒に対応) から 140 秒間の区間とした。なお、開始時刻を上記の時刻にした理由は、周波数領域での積分であることから、リンク効果¹⁴⁾ による波形の先頭と最後の区間の誤差を避けたためである。図 14 に解析に使用した地震計と変位計の位置を示す。 $S(X_C, Y_C)$ は、図 14 に示されている $X_C = -100 \sim 300\text{m}$ 、 $Y_C = -100 \sim 250\text{m}$ の範囲をそれぞれ 1 m 刻みで求めた。式(12)の定義で得られる回転中心は、使用する変位波形の解析対象区間に依存する可能性もあるので、この 140 秒間 (10～150 秒区間) の他に、この区間を図 13 から分かるように水平動の相対変位が大きい 40 秒間 (10～50 秒区間) と比較的小さい 100 秒間 (50～150 秒区間) の 2 区間に分けて回転中心を求めた。表 1 には、各ケースの区間毎の回転中心の結果を示しており、解析対象区間によって回転中心は変化することが分かる。ただし、剛体仮定が成り立てば回転中心の位置に関わらず、基礎スラブ、第一層床の運動は式(4)で表現されることや、 $S(X_C, Y_C)$ は回転中心から比較的広い範囲であり変化がないことから、今回は 140 秒間を解析対象区間とし、回転中心をこの区間で固定として扱った。

図 14 に各ケースで得られた回転中心の座標 (表 1 の回転中心の上段に対応) が☆印で示してある。各ケースの回転中心は一致していないが、いずれも教室棟の北西側に存在していることが分かる。 $S(X_C, Y_C)$ の勾配は回転中心の周りの広い範囲で比較的小さいという性質を持っていた。そこで、今回はケース 2、3 のそれぞれの $S(X_C, Y_C)$ の和が最も小さくなる座標 (図 14 の★印) をケース 2、3 の共通の回転中心とした。

図 15 に変位計 T1～T3 で実際に得られた変位計記録 (画像) を示す。これらの粒子軌跡は場所により形状が異なり、基礎スラブと第一層床の間で回転が生じていたことがうかがえる。また、南東側の変位計記録ほど CH2 方向の最大全振幅は大きくなっており、上記の回転中心が教室棟の北西側に位置していることと整合している。同図には本提案方法から得られた並進、回転成分を式(5)に適用して推定した各変位計位置における粒子軌跡 (14 時 49 分 03 秒から 140 秒間) も示してある。なお、ケース 2、3 は上述の通り、回転中心は共通としている。実記録と比較すると変位計 T3 ではケース 2、変位計 T2、T3 はケース 3 と比較的類似した軌跡となっていることが分かる。なお、同図には、変位計の上下の地震計間の相対変位から得られる粒子軌跡も示しているが、こちらも実記録と比較的類似していることが分かる。そこで、より定量的に比較するため、各粒子軌跡の CH1、CH2 方向の最大全振幅 (P-P) の比較を表 2 に示す。変位計 T2、T3 での最大全振幅は、地震計間の相対変位から得られる粒子軌跡よりも本提案方法の方が実際の変位記録に近い値となっていることが分かる。図 14 から、変位計 T1 では、相対変位の推定に使用した 2 台の地震計と変位計との水平距離は互いに近いことが分かる。したがって、地震計間の水平距離が近い場合には、地震計間の相対変位で層間変形量を推定した方が良い結果が得られる可能性があると考えられる。

以上から、本提案方法によりある程度の精度で並進成分と回転成分を抽出できているものと考えられ

図 14 解析に使用した地震計と変位計の位置および各ケースで推定された回転中心の位置

表 1 各ケースで使用した地震計と解析対象区間毎の回転中心の位置

ケース	免震部材より上側	免震部材より下側	回転中心 (m) ※	
			Xc	Yc
1	7, 8, 11, 12	3, 4, 5	132	152
			131	176
			133	123
2	7, 8	3, 4	107	128
			111	136
			99	114
3	11, 12	4, 5	154	137
			154	164
			153	108

※解析対象区間、上段：10～150 秒、中段：10～50 秒、下段：50～150 秒（時間は図 13 に対応）

表 2 変位計記録および各種推定方法における粒子軌跡の最大全振幅 (s) の比較

位置	推定方法	全振幅 (cm)	
T3	変位計 T3		10.5
	地震計 (#007-#003)		11.1
	提案方法	ケース 1	10.6
		ケース 2	10.6
		ケース 3	10.6
T2	変位計 T2		12.5
	地震計 (#008-#004)		11.0
	提案方法	ケース 1	12.6
		ケース 2	12.5
		ケース 3	12.6
T1	変位計 T1		15.5
	地震計 (#012-#005)		15.9
	提案方法	ケース 1	16.2
		ケース 2	15.9
		ケース 3	16.3

※ケース 2、3 の回転中心は図 14 の★印の位置 (129m, 132m) を使用している。

図 15 変位計記録（画像）と変位計付近の免震層上下の地震計記録から推定した相対変位の粒子軌跡および本提案方法より推定した各ケースの変位計位置における粒子軌跡 (14:49:03 から 140 秒間) ※○印脇の数字は時刻 14:48:53 からの経過時間 (s) を示す。

る。また並進成分と回転成分で各変位計の実記録を概ね説明できることから、大局的には基礎スラブ、第一層床は剛体であると考えられる。ただし、最大全振幅を示している区間以外では、実記録と本推定方法で得られる粒子軌跡とがあまり整合していない区間も見られる。この要因としては、剛体仮定の限界、変位波形の精度などが考えられる。これは、本推定方法の根拠となる式(4)は、剛体仮定が成り立ち、変位波形に誤差が無い場合、基礎スラブ、第一層床の運動を正確に表現しているからである。したがって、剛体仮定の限界および変位波形の精度の検討を行う必要がある。これについては、今後の課題としたい。

6.3 推定された並進、回転成分の考察

ここでは、変位計の記録と比較的一致したケース 2、3 の結果を用いて考察する。図 16 にケース 2、3 で得られた第一層床と基礎スラブの並進成分と回転成分の時刻歴波形を示す。並進成分については、ケース 2、3 とも第一層床および基礎スラブは概ね同様の応答をしていることが分かる。一方、回転成分については、第一層床と基礎スラブの応答は異なるが、ケース 2、3 とも概ね同様の応答をしていることが分かる。次に、第一層床と基礎スラブとの相対的な並進、回転成分を図 17 に示す。相対並進成分は 20～40 秒の区間で大きくなっていることが分かる。なお、表 1 で示した各ケースの回転中心は、10～150 秒区間、10～50 秒区間、50～150 秒区間で求めており、相対並進成分が大きい区間に対応する 10～50 秒区間で求まる回転中心は、10～150 秒区間から得られる回転中心より、建物から離れる側にあり、逆に、相対並進成分が小さい区間に対応する 50～150 秒区間で求まる回転中心は、建物寄りになっていることが分かる。これは、各区間とも並進モード、回転モードが混在していると考えられるが、10～50 秒区間では並進モード、50～150 秒区間では回転モードが相対的に卓越したためと解釈できる。

次に、図 15 の 10～150 秒区間の粒子軌跡と図 17 を比較検討する。図 15 から粒子軌跡が大きな振幅を示している時刻（図 15 中の○印）と図 17 の相対並進成分が大きな振幅を示している時刻（図 17 中の●印）は、ほぼ対応していることが分かる。また、変位計 T1 においては、図 15 から分かるように他の変位計に比べて CH2 (X) 方向に大きな振幅（時刻 25.0～29.2 秒）が現れている。これは CH2 (X) 方向の相対並進成分と相対回転成分が大きな値を示すタイミングがほぼ同じで、かつ、このタイミングにおいて両者による振幅の向きも同じになっているため、回転中心（図 14 中の★印）から CH1 (Y) 方向に最も離れている T1 では、回転成分による相対変位がより大きく生じるためと言える。次に、ケース 2 と 3 の比較を行う。図 16 から分かるようにケース 2、3 の相対並進成分は概ね同様の応答をしていることが分かる。一方、相対回転成分については、若干異なる応答を示している。更に詳しく調べるために、周波数領域で並進成分と回転成分を見ていくことにする。図 18 に図 16 の各波形に対するフーリエスペクトルを示す。なお、第一層床と基礎スラブの並進成分のフーリエスペクトルの形状は、ケース 2、3 ともに周期 0.1～0.4 秒でほぼ直線になっている。解析に使用した変位波形の振幅を当該周期範囲のバンドパスフィルターで処理して調べたところ、いずれの最大変位も 1mm 程度以下と非常に小さいことが分かった。したがって、周期 0.4 秒以下では、並進、回転成分の推定精度は低いことが予想され、このため上記のような直線となったと考えられる。基礎スラブの回転成分のスペクトルはケース 2、3 でほぼ一致しているが、第一層床では周期 1～1.5 秒付近で比較的差异が見られる。したがって、この周期帯では教室棟と研究棟のそれぞれの第一層床は異なる回転振動をしていたものと考えられる。このため、教室棟と研究棟の一体を剛体と考えたケース 1 より、各棟を個々に剛体と考えたケース 2、3 の方が、実際の変位計の記録との整合性が良好だったと考えられる。次に、ピークの位置について検討していく。並進成分の第一ピークは周期 8 秒付近にあり、第一層床と基礎スラブのスペクトルの大きさはほとんど同じでほとんど増幅されていないことが分かる。第二ピークは周期 1～1.3 秒付近に見られる。一方、基礎スラブの回転成分の第一、二ピークは並進成分と同様であるが、第一層床については、第一ピークは周期 2 秒付近、第二ピークについては周期 1.3 秒付近にあり、並進や回転成分でみられる周期 1～1.3 秒と 8 秒のピークは入力動のピーク成分と考えられ、周期 2 秒付近のピークは第一層床の応答特性によるピ

図 16 第一層床と基礎スラブの並進成分と回転成分の時刻歴波形（カッコ内の数値は最大値）

図 18 第一層床と基礎スラブの並進成分と回転成分のフーリエスペクトル（カッコ内の数字は表 1 のケース番号を示す）

図 17 第一層床と基礎スラブの相対並進成分と相対回転成分の時刻歴変位波形（カッコ内の数値は最大値とその発生時刻）

図 19 並進成分と回転成分における第一層床と基礎スラブのフーリエスペクトル比

図 20 相対回転成分（最大値 $\theta = 3.8 \times 10^{-4}$ rad）によって発生する X、Y 方向の相対変位の最大値（cm）のコンター図

ークと考えられる。なお、周期 1～1.3 秒のピークは図 5 より推定される地盤の卓越周期にも対応しており入力動のピーク成分を裏付けるものである。

次に、第一層床と基礎スラブのスペクトル比を求めたものを図 19 に示す。回転成分には周期 2 秒付近にピークが見られ、並進成分にも同周期付近にピークが見られる。このように周期 2 秒のピークは水平 2 方向の並進成分と回転成分に見られることから、これらの成分の応答は連成振動による回転振動と考えられる¹⁵⁾。なお、図 15 の粒子軌跡の図から分かるように、特に振幅が大きい区間（時刻 25.0～29.2 秒）での振動周期は、2.6～3.0 秒程度で、連成振動における回転振動の周期 2 秒に比べると長い。これは、免震層に大きな層間変形が生じたために、免震層の剛性が低下し、振動周期が伸びたと推測されるが、詳細については今後の課題としたい。

今回対象とした構造物のように長大であればあるほど、相対回転成分によって発生する X、Y 方向の相対変位は大きくなる。図 17 の相対回転成分の最大値 $\theta = 3.8 \times 10^{-4}$ rad の時に発生する X、Y 方向の第一層床と基礎スラブとの相対変位のコンター図を図 20 に示す。同図には並進成分の最大値も示しており、コンター図の値に並進成分の最大値を加えることにより各位置でのおおよその最大相対変位が推定できる。同図から回転成分によって発生する研究棟の南東側端部における X 方向の相対変位（約 5cm）と並進成分によって発生した相対変位（約 6cm）とは、ほぼ同程度であったことが分かる。

7. まとめ

平面内の 2 台以上の地震記録から並進、回転成分を抽出する簡易な方法を提案し、2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された長大で不整形な立面、平面を持つ免震構造である芝浦工業大学豊洲校舎の地震記録へ適用した。得られた結論を以下に列挙する。

- ① 免震層内の層間変位計で観測された粒子軌跡と提案方法により推定された並進、回転成分に基づく変位計位置での粒子軌跡は調和しており、提案方法の適応性が確認された。
- ② 教室棟と研究棟の第一層床と基礎スラブは概ね剛体的な挙動をしているが、周期 1～1.5 秒付近の第一層床については異なる回転成分で振動していたと考えられる。
- ③ 免震層における相対回転成分の最大値は 3.8×10^{-4} rad 程度で、この回転成分による校舎端部での層間変位は並進成分による層間変位とほぼ同程度であったことが示された。
- ④ 第一層床と基礎スラブの 2 方向の並進成分と回転成分におけるスペクトル比には、それぞれ周期 2 秒付近にピークが見られた。このピークは 2 方向の並進と回転の連成振動によるものと考えられる。

本手法の適用例は、現時点では、同地震の当該免震層に対してのみである。今後は、上部構造に設置された地震計（1、4、7、9、14階に設置）の記録に対しても本手法を適用し、免震層、上部構造の並進、回転成分の関係を検討することにより、不整形な立面・平面を持つ免震構造の立体的な振動特性を明らかにしていく予定である。

謝辞

地震観測システムに関して、(株)東京測振 石井誠寿氏、芝浦工業大学施設課、地震防災研究室の皆様にご協力を賜りました。本研究の一部は科学技術振興機構 CREST（研究代表：藤野陽三）の助成を受けています。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針、丸善、2001.
- 2) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版、1981.

- 3) 余湖兼右、杉村義文、太田智彦、齊藤賢二、平松和嗣、鈴木幹夫：地震動の入力位相差を考慮した免震構造物の地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2003、pp.435-436.
- 4) 和泉智也、馬場研介：水平面内の偏心を考慮した免震構造物の並進・ねじり挙動に関する一考察、日本建築学会近畿支部研究報告集、構造系、No.47、2007、pp.81-84.
- 5) ジェームス・M・ケリー（日本振動技術協会訳/藤田隆史監訳）：免震構造と積層ゴムの基礎理論、東京電機大学出版局、2005.
- 6) 白石 理人、岡田 敬一、斎藤 知生：免震建物に導入した構造モニタリングシステム（その2:対象建物の動特性評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2004、pp.777-778.
- 7) 広野衣美、福和伸夫、飛田潤、小島宏章：高密度強震観測に基づく免震建物の立体振動特性の分析と分析支援ツールの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2007、pp.965-966.
- 8) 森清宣貴、金澤健司、北村春幸：免震建物を対象とした強震-微動モニタリングシステム、日本建築学会技術報告集、第22号、2005、pp.133-138.
- 9) 遠藤毅：東京都臨海域における埋立地造成の歴史、地学雑誌、113(6)、2004、pp.785-801.
- 10) 東建ジオテック：芝浦工業大学新キャンパス整備計画に係る「地盤調査」業務報告書、2002.
- 11) 芝浦工業大学：豊洲キャンパス 建設記録、2008.
- 12) 芝浦工業大学豊洲校舎における地震観測、<http://www.eq.db.shibaura-it.ac.jp/Mensin/index.shtml>、2013.2.18参照
- 13) 長松昭男：モード解析、培風館、1985.
- 14) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994.
- 15) 西川孝夫他：建築の振動 初歩から学ぶ建物の揺れ、朝倉書店、2005.

（受理：2012年10月12日）

（掲載決定：2013年2月18日）

Estimation of Lateral and Rotational Vibrations of a Base-Isolated Building during the 2011 Great East Japan Earthquake

KONNO Katsuaki ¹⁾, NISHIKAWA Takafumi ²⁾ and FUJINO Yozo ³⁾

1) Member, Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

2) Member, Nagasaki University, Dr. Eng.

3) Member, University of Tokyo, Japan, Dr. Eng.

ABSTRACT

Earthquake observation is carried out on the Tokyo campus of Shibaura Institute of Technology. Accelerometer sensors are installed at the buildings incorporating base isolation devices and in the ground. Observed horizontal orbits from relative-story displacement meters indicate that not only lateral vibrations but also rotational vibrations occurred between basement and first floor due to the irregular-shaped building. In this paper, a method is proposed to estimate lateral and rotational vibration amplitude from seismic records. This method is applied to the acceleration records observed during the main shock of the 2011 Great East Japan Earthquake. At the result, the maximum rotation angle is 3.8×10^{-4} rad and maximum lateral displacement is 6 cm are estimated.

Key Words: the 2011 Great East Japan Earthquake, Lateral and Rotational Vibrations, Earthquake Observation, Base-Isolated Building, Irregular-Shaped Building