

芝浦工業大学豊洲校舎の基礎スラブ上と支持基盤内の地震記録に対する NIOM 解析

芝浦工業大学 正会員 ○紺野克昭 元芝浦工業大学 三浦太郎 埼玉大学 茂木秀則
長崎大学 正会員 西川貴文 横浜国立大学 正会員 藤野陽三

1. はじめに

埋立地に立地する豊洲校舎は図 1 に示すように不整形な立面・平面を持つ免震構造である。軟弱地盤上での免震構造の挙動を検討するため、免震層の上下には複数の地震計が設置(図 1 の①～⑫)されている。また、校舎脇では GL-1、-40m の鉛直アレー地震観測(図 1 の⑬, ⑭)も行われている。

構造物の維持管理において、地盤の物性値の経年変化はないものと考えられている。しかし、筆者らの一人は鉛直アレー観測記録に対し 2 点間の伝播時間を調べ、強震動により S 波速度が低下し、その後通常の値までには回復していない事例もあることを報告している¹⁾。本研究では豊洲校舎の基礎スラブ上の地震計(図 1 の③, ④)と地中の地震計(図 1 の⑭)の記録に対し、文献 1)と同様に NIOM 解析²⁾を適用し、校舎直下の地盤の S 波速度の経時変化を検討したので報告する。

2. 地震観測の概要³⁾

地震計①～⑭の加速度波形データは、専用ケーブルにより1台の集録装置へ送られ、記録されている⁴⁾。図 2 に地質断面図⁵⁾と地震計位置を示す。砂質土を含む表層の約 10m は液状化対策として掘削され、厚さ 1.5m の基礎スラブを打設し、免震装置を介して上部構造が構築されている。基礎スラブ上の③, ④は AP-7.2m に位置している。一方、⑭は鋼管杭の支持基盤である埋没段丘礫層内の AP-36.8m のところに設置されている。③, ④と⑭の鉛直距離は 29.6m、③-⑭, ④-⑭間の水平距離は、それぞれ約 43, 33m である。

3. NIOM 解析の概要²⁾

NIOM 解析では、2 点の地震記録から求めた伝達関数を基に、単純なパルス波形としたときの入力モデル波形と出力モデル波形を求める手法である。NIOM 解析に必要なパラメータ²⁾は $c_x=c_y=1$, $k_x=k_y=0.0001 \text{ s}^2$ とした。地震毎に 1 つのタイムウィンドウを用い、その長さは主要動を含むように 3～12 秒間で設定した。なお、モデル波形の算出時にフーリエ逆変換を用いるが、その際、モデル波形のフーリエスペクトルの後続に 0 を付加してデータ数を 16 倍に増やし、観測時間ステップ 0.01 秒を 1/16 (0.000625 秒) に補間している。図 3 に神奈川県東部の地震の④と⑭の CH2 方向の波形と NIOM 解析の結果を示す。青線が入力モデル波形(上の観測点の波形)、赤線が出力モデル波形(下側の観測点の波形)を示す。同図から④にパルス波が時刻 0 で現れ、⑭において -0.1631 秒に入射波が通過している様子が分かる。なお、波形のピークにも 2 点間には 0.16 秒の時間差があることも分かるが、NIOM 解析では時間ステップを 1/16 にしているため時間軸の分解能が高くなっていることが分かる。

3. S 波速度の経時変化

S 波速度は 2 点間の伝播時間と鉛直距離より求めるため、使用する地震波はできるだけ鉛直入射していることが望ましい。そこで、東北地方太平洋沖地震(以下、3.11 地震)以降については、震央距離約 60km 以内の地震を用いている。図 4 に解析に使用した地震(48 地震)の震央位置を示す。図 5 に NIOM 解析から得られた S 波速度の経時変化を示す。同図から③-⑭間に比べ④-⑭間の S 波速度は小さい傾向にあることが分かる。この傾向は④直下の方が基盤までの距離が長いことと調和している。表 1 には 3.11 以前、3.11 以降の 3 ヶ月間、これ以降の 3 つの期間における S 波速度の平均値と標準偏差を示している。S 波速度の平均値は、③-⑭, ④-⑭でそれぞれ 190, 180m/s 程度である。両者には約 10m/s 程度の差があり、これは標準偏差よりも大きいことから、有意な差であると考えられる。一方、各期間や水平 2 方向に有意な差は見られない。

3.11 地震における④の波形とタイムウィンドウの長さを 5 秒として、2.5 秒重なりで求めた S 波速度の経時変化を図 6 に示す。なお、3.11 地震では収録装置に不具合が生じ、S 波主要動の途中から記録が開始されている。加速度が 50gal 程度を超えている区間では、③-⑭, ④-⑭の S 波速度はそれぞれ 170, 165m/s 前後の値を示し、他の地震で得られた S 波速度に比べ 20m/s 程度遅くなっていることが分かる。これは、この区間で地盤の剛性が低下したためと考えられる。なお、当該区間でも例えば時刻 137 秒では S 波速度が 198m/s 程度と大きく推定されている場合があるが、この場合でも NIOM 解析の出力モデル波形には時刻 134.5 秒における出力モデル波形のピークに対応するところに変曲点があることが分かる。

3. まとめ

3.11 地震を含む 48 地震を用いて S 波速度を調べた結果、検討した地震計間では有意な経時変化は見られなかった。しかし、3.11 地震では加速度が 50gal 程度を超えた区間で S 波速度の速度低下が見られ、構造物直下の地盤の剛性が低下していたことが分かった。なお、今回の結果は、水平に分布した地震計の記録から地盤の不整形性を検出できる可能性を示唆している。今後、他の地震計の記録を用いて、同様に S 波速度の経時変化や地盤の不整形を検討する予定である。

参考文献 1) 茂木秀則, Shrestha Santa Man, 川上英二, 岡村真也: 柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーにおける新潟県中越沖地震とその前後の S 波速度の経時変化, 日本地震工学会論文集, 2009. 2) Kawakami, H. and Haddadi, H. R.: Modeling wave propagation by using Normalized Input-output Minimization (NIOM), Soil Dyn. Earthq. Engng., 1998. 3) 芝浦工業大学豊洲校舎(免震構造)における地震観測, <http://www.eq.db.shibaura-it.ac.jp/Mensin/index.shtml> 4) 紺野克昭, 西川貴文, 藤野陽三: 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, 日本地震工学会論文集, 2013. 5) 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.

キーワード NIOM 解析, S 波速度, 経時変化, 地震観測, 不整形地盤

連絡先 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 芝浦工業大学土木工学科 konno@sic.shibaura-it.ac.jp

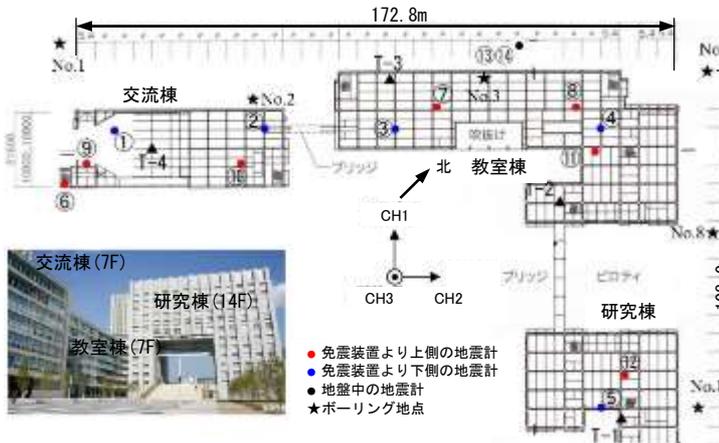


図1 豊洲校舎の平面図と地震計設置位置

埋立土	埋土	Bf	沖積層	層七号地	粘性土層	Nc
土	粘性土層	Hc			砂質土層	Ns
深	砂質土層	Hs			砂礫層	Ng
層沖積	町有	粘土層	Yc	埋没段丘礫		Btg
	層築	砂質土層	Ys	上総層群		Ka

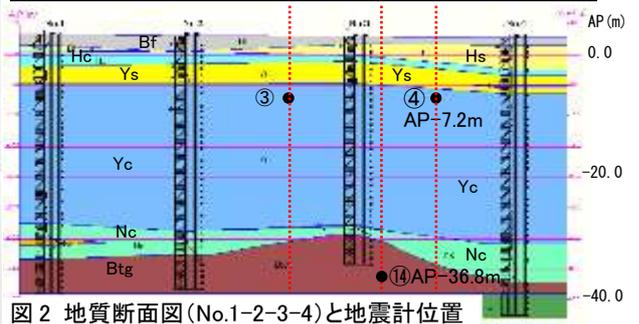


図2 地質断面図(No.1-2-3-4)と地震計位置

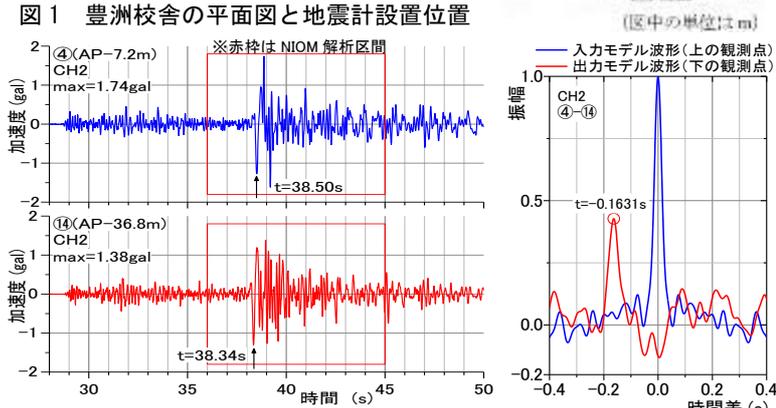


図3 2011年4月19日の神奈川県東部の地震 (M4.2, 深さ84km, 震央距離16.5km) とNIOM解析の結果

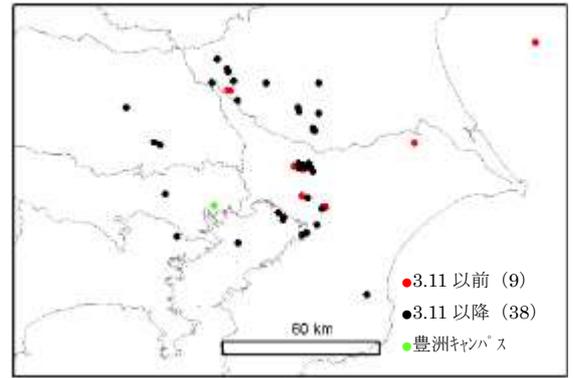


図4 解析に使用した地震の震央位置 (48地震) ※ ()内は地震数。東北地方太平洋沖地震(3.11)は枠外

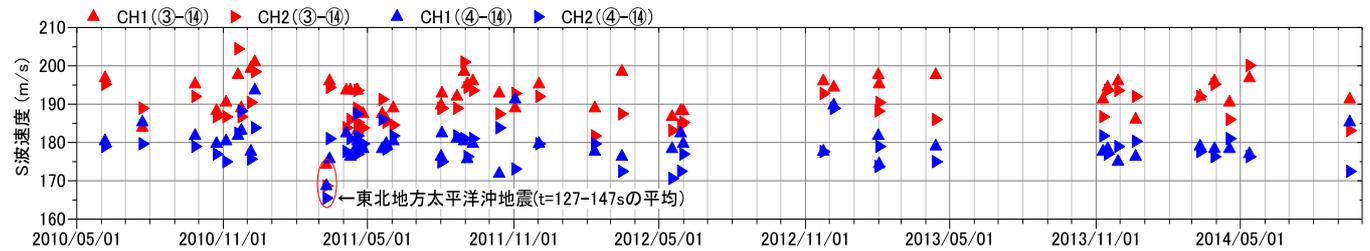


図5 NIOM解析より得られたS波速度の経時変化

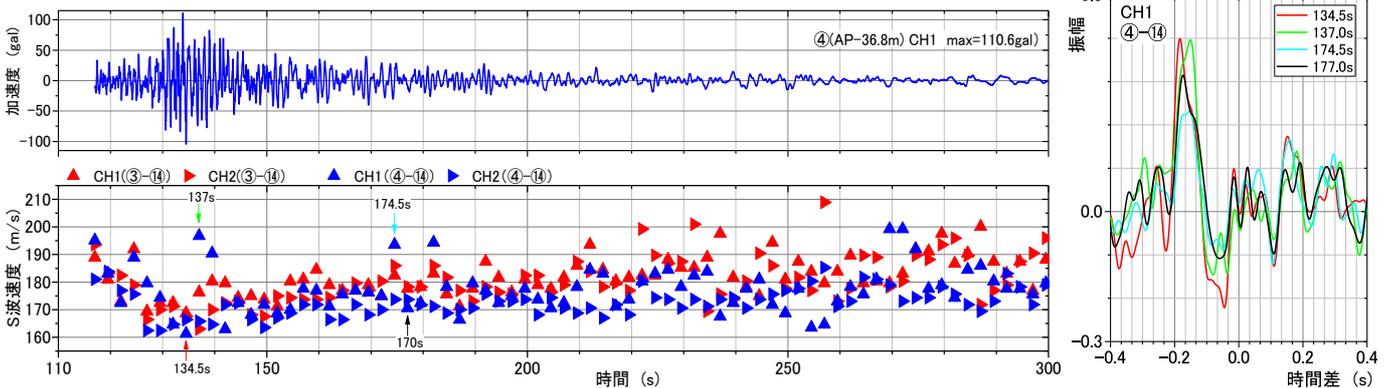


図6 東北地方太平洋沖地震におけるS波速度の経時変化とNIOM解析の出力モデル波形

表1 NIOM解析から推定されたS波速度の範囲と平均値と標準偏差(単位:m/s)

方向	地震計間	③-⑭			④-⑭		
	期間	2010/06/06 -2011/03/10	2011/03/12 -2011/06/11	2011/06/12 -2014/09/16	2010/06/06 -2011/03/10	2011/03/12 -2011/06/11	2011/06/12 -2014/09/16
CH1	地震数	9	10	28	9	10	28
	範囲	183.8-200.9	183.1-196.0	186.0-198.4	177.6-193.6	175.6-182.4	171.8-191.2
	平均値	193.5	190.3	193.1	182.6	178.8	179.3
CH2	標準偏差	5.8	4.3	3.7	4.7	2.0	4.2
	範囲	186.7-204.4	183.8-194.4	181.7-200.9	175.0-188.2	177.0-187.4	170.6-188.9
	平均値	192.2	187.7	189.9	180.0	181.1	177.7
	標準偏差	6.1	4.1	4.8	4.2	3.4	4.1