



芝浦工業大学豊洲キャンパス内の地震記録に対する NIOM解析

紺野, 克昭

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 21:213-221

(Issue Date)

2017-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011551>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011551>



芝浦工業大学豊洲キャンパス内の 地震記録に対する NIOM 解析

NIOM Analysis of Earthquake Observation Records at the Toyosu Campus of
Shibaura Institute of Technology

紺野 克昭¹⁾
Katsuaki Konno

概要：校舎の基礎スラブ上と支持基盤内で観測された2010年6月から2014年9月までの48地震の地震記録に対し、NIOM解析を適用し、上下2点間のS波速度を推定し、その経時変化を検討した。その結果、推定されたS波速度はPS検層の結果に基づくS波速度とほぼ一致していること、S波速度には有意な経時変化は見られないこと、などが分かった。一方、東北地方太平洋沖地震の記録では、加速度が50galを超えた区間でS波速度の低下が見られることが分かった。

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

1. はじめに

豊洲キャンパスは図-1に示すように埋立地に位置する。地震計を設置している校舎(図-2)は不整形な立面・平面を持つ免震構造である¹⁾。免震層の上下には複数の地震計が設置されている。また、校舎脇ではGL-1m、-40mの鉛直アレー地震観測も行われている。

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、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²⁾もあることが報告されている。本報告では豊洲校舎の基礎スラブ上の地震計と地中の地震計の記録に対し、文献2)と同様にNIOM(Normalized Input-Output Minimization)解析³⁾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。なお、本報告は文献4)を加筆修正したものである。



図-1 豊洲キャンパスの位置

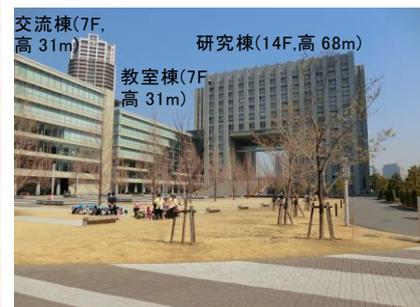


図-2 不整形な立面・平面を持つ豊洲校舎

2. 周辺地盤と地震観測の概要

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⁵⁾。図-3 に地質断面図⁶⁾を示す。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⁷⁾、交流棟と研究棟の一部分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。基礎スラブは厚さ 1.5m のコンクリートで打設され、免震装置を介して上部構造が構築されている。また、地震時の地盤の変形に対する追従性が高い鋼管杭が支持層まで打設されている⁷⁾。

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-4 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。なお、現在は建物および地盤内に計 19 台の地震計を追加設置し、計 33 台での地震観測を行っている^{8),9)}。

NIOM 解析の対象とした地震計は図-3 と図-4 に示した基礎スラブ上の③、④と地盤内の⑭である。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。なお、地震計⑭の水平方向は半時計方向に 18 度回転している可能性があるため、地震記録に対し方位補正を行っている。

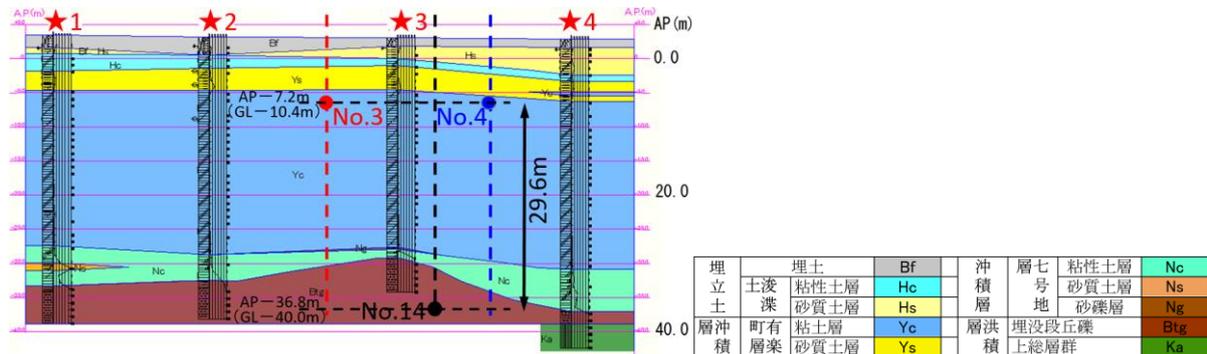
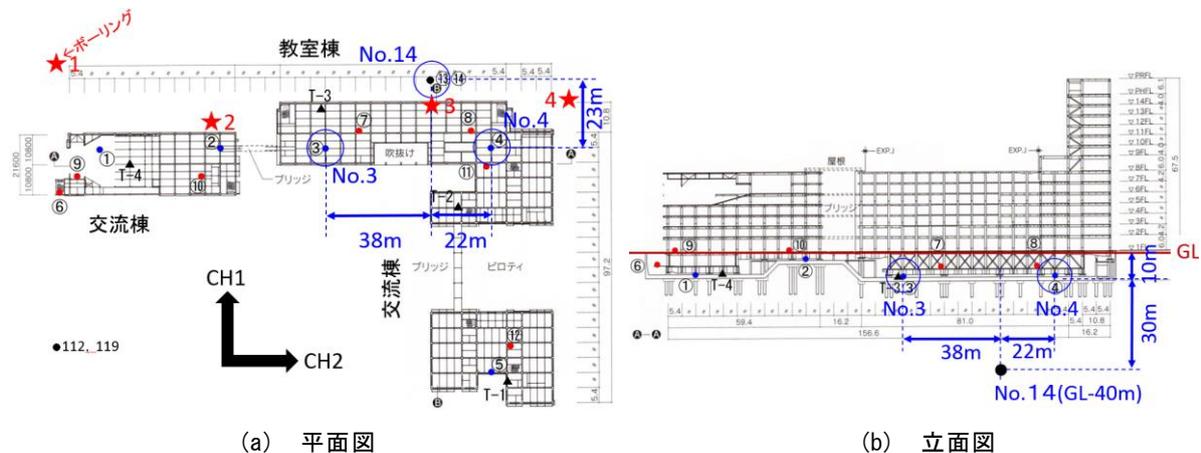


図-3 地質断面図と地震計の位置



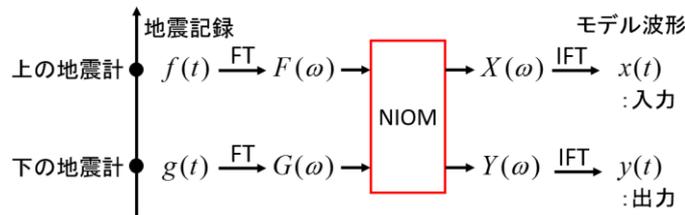
(a) 平面図

(b) 立面図

図-4 使用した地震計の位置

3. NIOM 解析の概要

NIOM (Normalized Input-Output Minimization) 解析では、2 点の地震記録から求めた伝達関数 $H(\omega)$ 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³⁾である (図-5 参照)。NIOM 解析に必要なパラメータ³⁾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 s を 1/16 (0.000625 s) に補間している。図-6 に 2011 年 4 月 19 日の神奈川県東部の地震 (M_J4.2、深さ 84km) 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。



(a) 全体の流れ

$$G(\omega_i) = H(\omega_i)F(\omega_i), \quad (i = 0, 1, \dots, N-1)$$

$$X(\omega_i) = N\Delta t \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{k_X}{c_X} \omega_n^2\right) (c_X + c_Y |H(\omega_n)|^2)}}$$

$$Y(\omega_i) = H(\omega_i)X(\omega_i)$$

(b) NIOM 解析部

図-5 NIOM 解析の概要

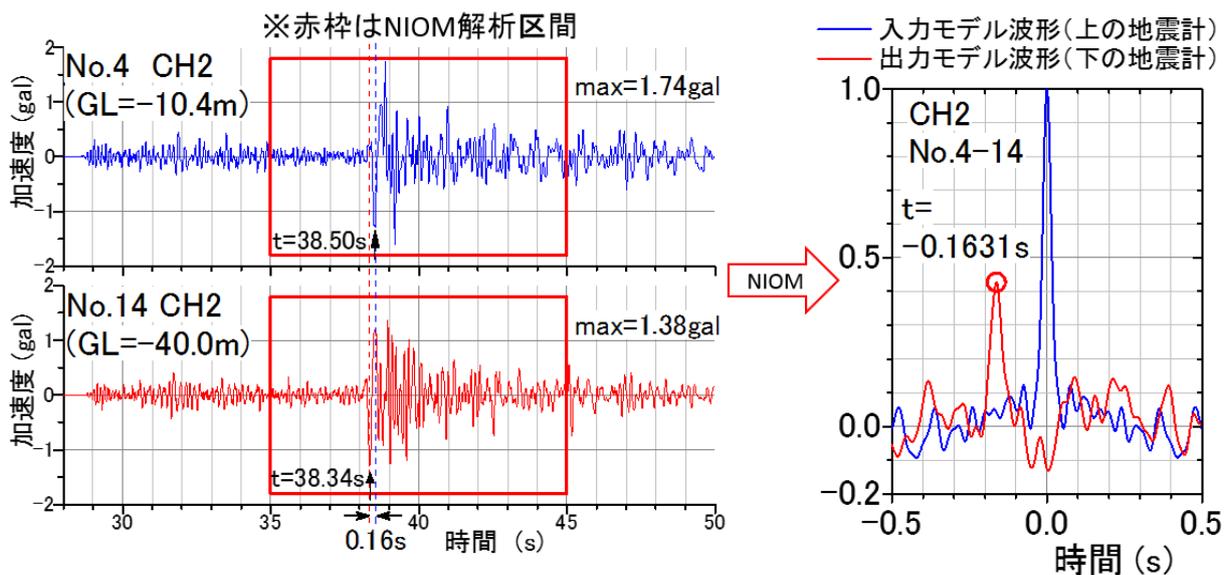


図-6 2011 年 4 月 19 日の神奈川県東部の地震 (M_J4.2、深さ 84km、震央距離 16.5km) の観測記録と NIOM 解析の結果

4. S波速度の経時変化

本章では、長期間のS波速度の経時変化と、この期間で最も大きな加速度値を示した東北地方太平洋沖地震（以下、3.11地震）時の経時変化を報告する。

(1) 長期間の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、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。表-1に解析に使用した48地震の諸元¹⁰⁾、図-7に震央位置を示す。図-8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-2には3.11地震以前、3.11地震以降の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。

表-1 解析に使用した48地震の諸元

No	地震発生時刻	震源深さ(km)	震央距離(km)	震央方位(度)	M _j	震央地域名	No	地震発生時刻	震源深さ(km)	震央距離(km)	震央方位(度)	M _j	震央地域名
1	2010/06/00/07:19	63	31.2	63	4.3	千葉県北西部	25	2011/09/04/05:52	90	28.9	-36	4.7	埼玉県南部
2	2010/07/23/06:06	35	67.0	69	5.0	千葉県北東部	26	2011/09/11/19:09	73	22.2	104	4.3	東京湾
3	2010/09/27/02:55	68	27.6	82	4.5	千葉県北西部	27	2011/10/14/18:26	63	33.4	64	3.8	千葉県北西部
4	2010/10/24/13:50	45	44.5	7	4.4	茨城県南部	28	2011/11/03/19:34	62	42.7	47	4.9	茨城県南部
5	2010/11/05/19:14	45	44.8	5	4.6	茨城県南部	29	2011/12/03/05:55	22	58.8	126	5.2	千葉県北東部
6	2010/11/20/05:49	67	34.9	91	3.8	千葉県北西部	30	2012/02/11/10:26	46	47.4	-1	4.7	千葉県北西部
7	2010/11/24/20:09	47	118.2	58	4.9	茨城県沖	31	2012/03/16/04:20	94	30.6	-37	5.3	埼玉県南部
8	2010/12/06/03:20	68	33.9	91	4.3	千葉県北西部	32	2012/05/18/17:18	51	52.9	4	4.8	茨城県南部
9	2010/12/11/06:33	64	29.3	59	3.5	千葉県北西部	33	2012/05/29/01:36	64	31.0	59	5.2	千葉県北西部
10	2011/03/11/14:46	24	385.0	45	9.0	三陸沖	34	2012/06/01/17:48	44	41.4	10	5.1	千葉県北西部
11	2011/03/15/04:59	23	16.3	152	4.1	東京湾	35	2012/11/24/17:59	72	20.3	97	4.8	東京湾
12	2011/04/05/04:30	67	33.9	61	3.9	千葉県北西部	36	2012/12/07/05:32	67	33.7	92	4.6	千葉県北西部
13	2011/04/10/06:23	67	31.8	60	4.4	千葉県北西部	37	2013/02/01/23:06	71	22.2	101	4.4	東京湾
14	2011/04/18/03:08	65	32.3	63	4.4	千葉県北西部	38	2013/03/08/07:19	32	15.8	-74	3.5	東京都23区
15	2011/04/19/02:37	84	16.5	-136	4.2	神奈川県東部	39	2013/04/14/10:22	97	46.5	-36	4.6	埼玉県南部
16	2011/04/19/23:10	53	56.4	1	5.0	茨城県南部	40	2013/11/10/07:37	64	46.1	35	5.5	茨城県南部
17	2011/04/26/21:12	46	49.9	19	5.0	茨城県南部	41	2013/11/16/20:44	72	33.0	103	5.3	千葉県北西部
18	2011/05/20/17:53	64	45.1	36	4.6	茨城県南部	42	2013/11/29/01:15	69	29.5	84	4.8	千葉県北西部
19	2011/05/25/09:19	62	42.7	47	4.5	茨城県南部	43	2013/12/21/01:10	62	43.0	46	5.2	茨城県南部
20	2011/06/03/10:33	62	48.3	43	4.5	茨城県南部	44	2014/03/12/05:04	66	31.7	60	4.4	千葉県北西部
21	2011/08/02/12:37	64	32.8	62	4.1	千葉県北西部	45	2014/03/30/12:23	67	30.3	61	3.9	千葉県北西部
22	2011/08/03/04:26	65	33.7	67	4.1	千葉県北西部	46	2014/04/18/07:53	49	51.6	5	4.7	茨城県南部
23	2011/08/22/17:36	64	57.3	35	4.7	茨城県南部	47	2014/05/13/08:35	72	30.7	110	4.9	千葉県北西部
24	2011/08/31/18:32	72	29.7	113	4.6	東京湾	48	2014/09/16/12:28	47	48.5	7	5.6	茨城県南部

※震央方位は北から時計回りを正としている。

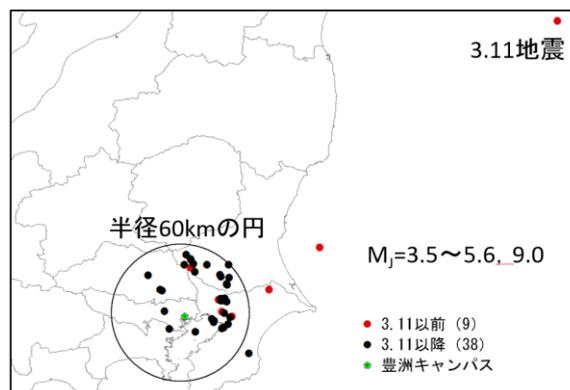


図-7 解析に使用した48地震の震央位置

一方、図-4の●119地点ではPS検層を行っており、その結果を表-3に示す¹¹⁾。図-3の地質と表-3のPS検層の結果から、③-⑭間、④-⑭間のS波速度を推定した結果を表-4に示す。最も厚いシルト層のVsがS波速度に及ぼす影響は大きく、PS検層から得られたシルト層のS波速度(走時平均)は150m/sであるが、これを160m/sとして評価すると、NIOM解析で得られたS波速度とほぼ一致することが分かる。

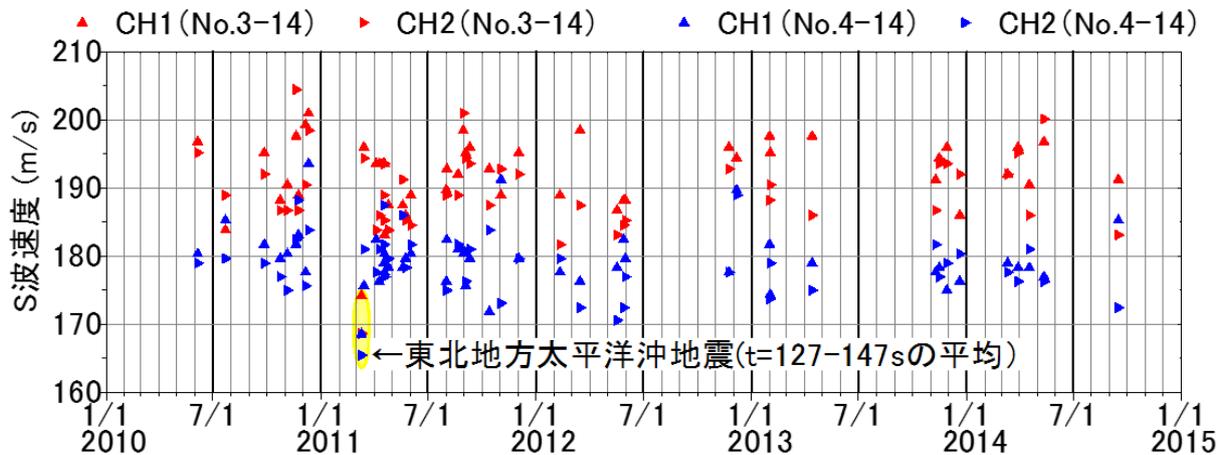


図-8 NIOM解析より得られたS波速度の経時変化

表-2 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	10/06/06 -11/03/10	11/03/12 -11/06/11	11/06/12 -14/09/16	10/06/06 -11/03/10	11/03/12 -11/06/11	11/06/12 -14/09/16
	地震数	9	10	28	9	10	28
CH1	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
	標準偏差	5.8	4.3	3.7	4.7	2.0	4.2
CH2	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

表-3 119地点(図-4)でのPS検層結果

土質	記号	下端深度(GL, m)	Vs (m/s)
埋土	Bf	-6.4	190
シルト混じり細砂	Ys	-8.3	220
シルト	Yc	-32.0	150*
凝灰質粘土	Nc	-34.5	250
細砂	Bts	-36.2	410
シルト	Btc	-37.1	160
砂礫	Btg	-40.0	480

*この層のVsは走時平均S速度で表している。

表-4 PS検層結果を参考に推定したS波速度

地震計間			③-⑭		④-⑭	
土質	記号	Vs (m/s)	層厚 (m)	走時 (s)	層厚 (m)	走時 (s)
シルト	Yc	160	20.8	0.1300	22.8	0.1425
凝灰質粘土	Nc	250	3.0	0.0120	4.0	0.0160
砂礫	Btg	480	5.8	0.0121	2.8	0.0058
合計			29.6	0.1541	29.6	0.1643
S波速度(=層厚/走時)(m/s)			192.1		180.2	

(2) 東北地方太平洋沖地震時の S 波速度の経時変化

3.11 地震における③、④、⑭の加速度記録とタイムウィンドウの長さを 5 s として、2.5 s 重なりで求めた S 波速度の経時変化を図-9 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 50 gal 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 20 m/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、この場合でも図-10 に示すように 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。

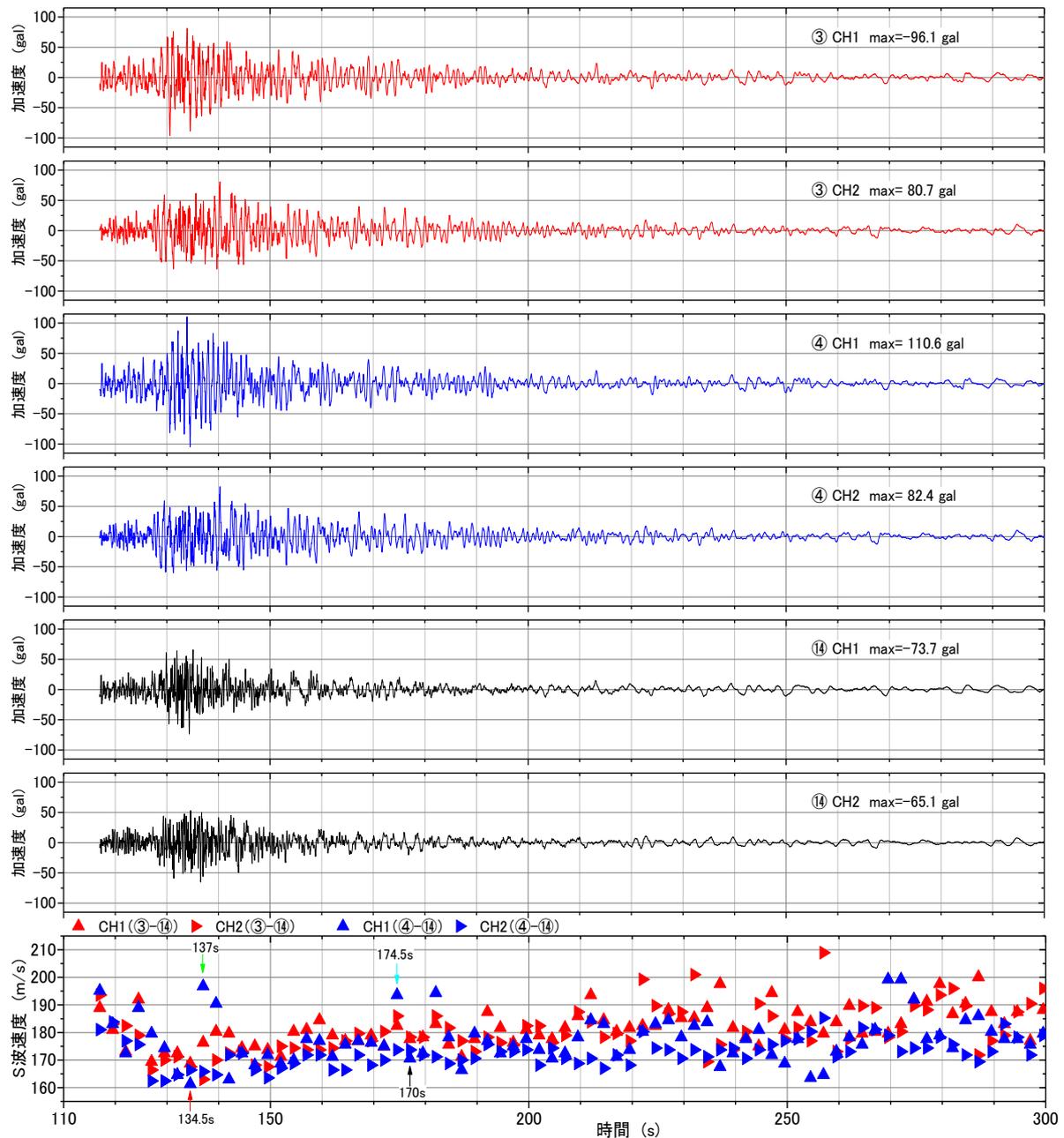


図-9 東北地方太平洋沖地震の加速度記録と NIOM 解析から推定された S 波速度の経時変化

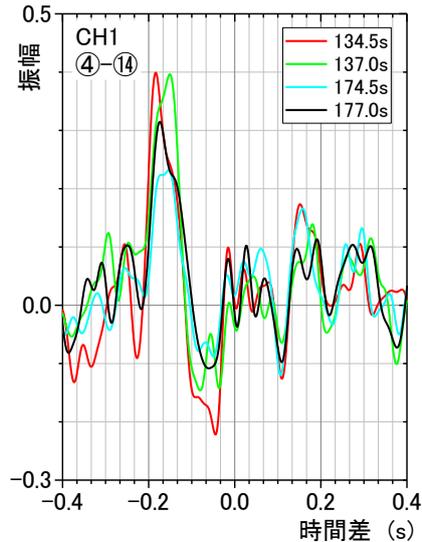


図-10 東北地方太平洋沖地震における NIOM 解析の出力モデル波形

5. まとめ

本論文では、豊洲キャンパス内の地震観測網から得られた地震記録に対して NIOM 解析を用いて、地盤の S 波速度の推定を試みた。得られた知見をまとめると以下の通りである。

1. 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。
2. NIOM 解析より地震計③-⑭間、④-⑭間の S 波速度は、それぞれ 190、180m/s と推定された。
3. これらの S 波速度は、近くの PS 検層の S 波速度と地質断面図から推定した S 波速度と概ね一致した。
4. 水平に分布した地震計と地中の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した。
5. 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。

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性を検討する予定である。

謝辞： 埼玉大学の茂木秀則氏には NIOM 解析について教えていただきました。地震観測システムの改善には横浜国立大学の藤野陽三氏、長崎大学の西川貴文氏にご支援、ご協力を賜りました。地理院地図を使用しました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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, 第 13 巻, 第 3 号, pp.14-29, 2013.
- 2) 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, 第 9 巻, 第 1 号, pp.19-31, 2009.
- 3) Kawakami, H. and Haddadi, H. R. :Modeling wave propagation by using Normalized Input-output Minimization (NIOM), Soil Dyn. Earthq. Engng., Vol.17, pp.117-126, 1998.
- 4) 紺野克昭, 三浦太郎, 茂木秀則, 西川貴文, 藤野陽三：芝浦工業大学豊洲校舎の基礎スラブ上と支持基礎内の地震記録に対する NIOM 解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), I-478, 2015.
- 5) 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), pp.785-801, 2004.
- 6) 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.

- 7) 芝浦工業大学：豊洲キャンパス 建設記録, 2008.
- 8) 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> (2017年3月閲覧)
- 9) 西川貴文, 紺野克昭, 藤野陽三, 中山雅哉：高層免震建物における既設ネットワークを利用した高密度振動観測システムとデータの利活用, 日本地震工学会論文集, 第14巻、第2号, pp.1-15, 2014.
- 10) 気象庁震度データベース, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/> (2017年3月閲覧)
- 11) ダイエーコンサルタンツ：芝浦工業大学豊洲キャンパス加速度計追加工事（ボーリング工）, 報告書, 2012.

著者：1) 紺野 克昭、芝浦工業大学、教授（2016年9月まで、神戸大学都市安全研究センター、客員教授）

NIOM ANALYSIS OF EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS AT THE TOYOSU CAMPUS OF SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Katsuaki Konno

Abstract

Earthquake observation is carried out at the Toyosu campus of Shibaura Institute of Technology. In this study, the temporal changes of S-wave velocity were examined based on the Normalized Input-Output Minimization(NIOM) analysis. The NIOM analyses were carried out for the records observed during 48 earthquakes including the 2011 Great East Japan earthquake at the basement of the building and in the ground. The results revealed that estimated S-wave velocities by using the NIOM analysis and PS logging's information were almost equal to each other, the temporal changes of S-wave velocity were not observed significantly, temporal S-wave velocities were reduced for the part of strong motion over 50 gal during the 2011 Great East Japan earthquake.

©2017 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.