

地震観測記録に基づく液状化時の表層地盤および建築物の地震挙動

Dynamic Behavior of Surface Ground and Building during Liquefaction Based on Earthquake Observation Motions

飯場 正紀¹

Masanori Iiba¹

保井 美敏²

Mitoshi Yasui²

1, 北海道大学工学院 工学研究院

1, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

2, 戸田建設株式会社 技術開発センター

2, Technology Development Center, Toda Corporation

Abstract

In order to clarify earthquake behavior of grounds and buildings during liquefaction of soils, earthquake observation motions were collected and analyzed. The earthquake motions were those of main-shock and aftershocks in Chiba prefecture during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. On the coast area of Chiba prefecture, the buildings and houses were damaged by the liquefaction. Two kinds of motions are analyzed; one is observed at the multiple points of depth in the ground, and another is observed both in the building and on the ground surface at the liquefied area. Based on the observation data, maximum accelerations are compared in the different depth of ground or in the building and on the surface. To obtain the predominant frequencies of the soil deposit and the building with an effect of soils, transfer functions are calculated and the change of predominant frequencies during liquefaction are investigated.

キーワード: 地盤液状化, 地震観測, 地盤増幅特性, 建物増幅特性, 卓越振動数

Key Words: Soil Liquefaction, Earthquake Motion Observation, Amplification of Soil Deposit, Building and Soil Interaction, Predominant Frequency

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方の広い範囲において地盤の液状化現象が確認された。液状化現象は臨海部・旧湖沼・旧河道等の若年埋立地で主に発生し、戸建住宅や道路、歩道さらに上下水道などのライフラインに多大な被害をもたらした。地震のマグニチュー



写真1 液状化地盤における住宅や建築物の被害（千葉大名誉教授・中井正一氏提供）

ードが大きく、地震動の継続時間が長かったことが、液状化被害を大きくしたと考えられている。

地震時に地盤の液状化が発生すると、地盤の支持力が低下し、杭などの鉛直支持部材を持たない戸建住宅や低層建物には、不同沈下または傾斜などの被害が発生する（写真1左）。また、深い地盤支持層まで杭基礎が設置された建物では、液状化による地盤の沈下に伴い、相対的に建物が浮き上がった状態となる（写真1右）。杭基礎を有する中高層建物は、地盤が液状化することにより、地盤から杭に作用する地盤反力が低減することが確認されており、低減した地盤反力状態における建物の地震時挙動は、液状化が発生しない状況とは大きく異なることが予想される。

建物の耐震設計を行う場合、建物の耐震性が注目されることが多いが、建物に作用する地震動の違いにより、建物の被害性状に差がみられ、建物に作用する地震動は、地表面近くの表層地盤の振動特性・増幅特性の影響を大きく受けるため、表層地盤の特性（液状化地盤）を含めた地盤挙動の解明が必要となる。

ここでは、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震・余震等で、千葉県内での2か所で観測された地震動を入手し、液状化現象に伴う地盤および建物の地震時挙動の分析を行った。地震動の1つは、地中を含めた表層地盤での地震観測記録、他の1つは、建物と地盤で同時観測されている地震観測記録である。

2. 地盤挙動の観測体制と観測結果

2-1 観測体制・地盤条件・観測記録

録

地中を含めた表層地盤の地震観測が行われている千葉市美浜区の観測地点（以下、地盤観測点）では、表1に示すように、2011 年東北地方太平洋沖地震で地震記録が収集されている¹⁾。地盤観測点では、本震で、液状化が発生したことが確認されており、また本震・最大余震の記録

表1 検討に用いた地震動の諸元

地震動名称	観測日時	計測震度 GL-2m	GL-2m 最大加速度(gal)と最大速度(cm/s)(下段)		
			NS	EW	UD
本震	2011.3.11 14:48	5.3	224.2 (26.9)	161.5 (35.0)	74.8 (17.5)
最大余震	2011.3.11 15:16	4.6	71.2 (17.1)	68.8 (17.1)	33.9 (4.76)
3.16余震	2011.3.16 12:52	3.2	34.1	22.7	11.1
7.31余震	2011.7.31 3:54	3.1	23.6	20.9	11.3

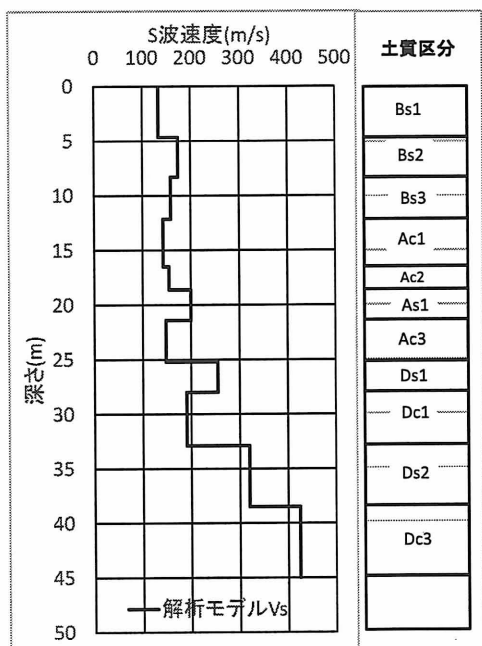


図1 地盤観測点の地盤概要²⁾

を用いて、液状化の発生深度等の評価が行われている²⁾。地盤観測点と次に述べる建物観測点は2km程度離れている。

地中を含めた表層地盤の4か所の深さ(深さ:2、9、19、45m)に地震計が設置されている。

地盤観測点の地盤特性(土質区分とS波速度)を、図1に示す³⁾。本地盤は、浅い側から、埋立層(Bs)、沖積層(As、Ac)、洪積層(Ds、Dc)で構成されている。

図2、図3に、それぞれ各深さ(2、9、19、45m)で観測された本震と最大余震の加速度波形を示す。

図4に、深さ45mで観測された本震と最大余震記録の加速度波形の擬似速度応答スペクトル(減衰定数5%)を、建築基準法の解放工学的基盤で設定される極めて稀に発生する地震動とともに示す。本震、最大余震での地震動の擬似速度値(長周期域)は、40、20 cm/s 程度となり、建築基準法で設定される極めて稀に発生する

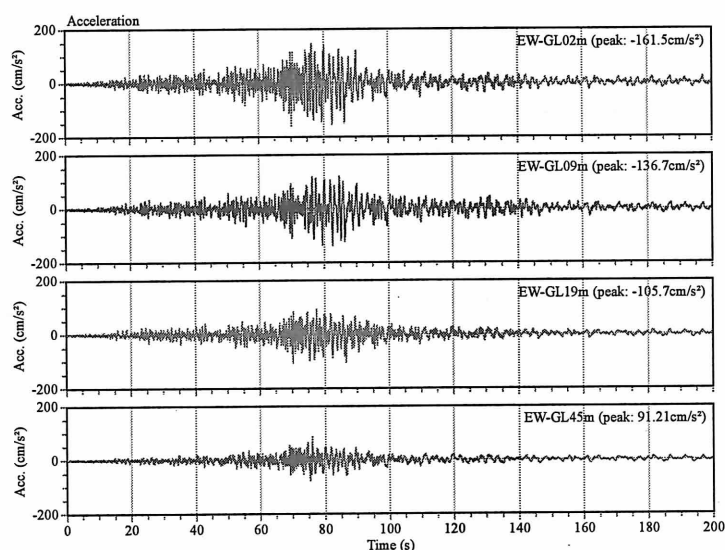


図2 本震における加速度観測記録

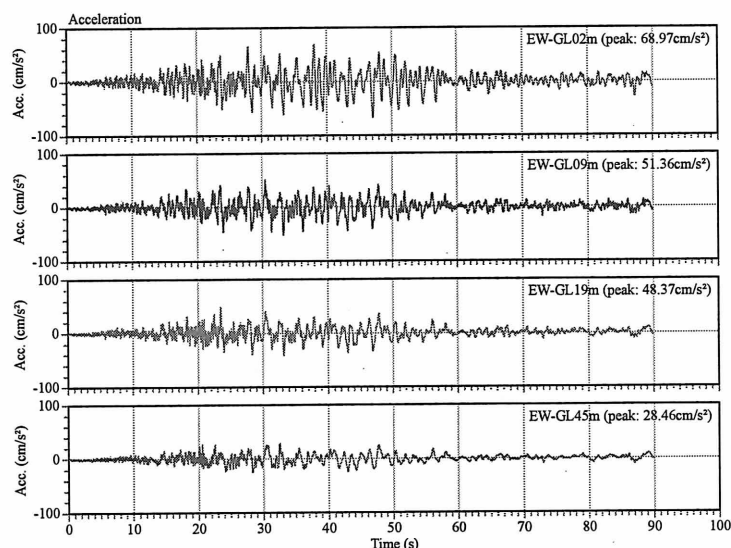


図3 最大余震における加速度観測記録

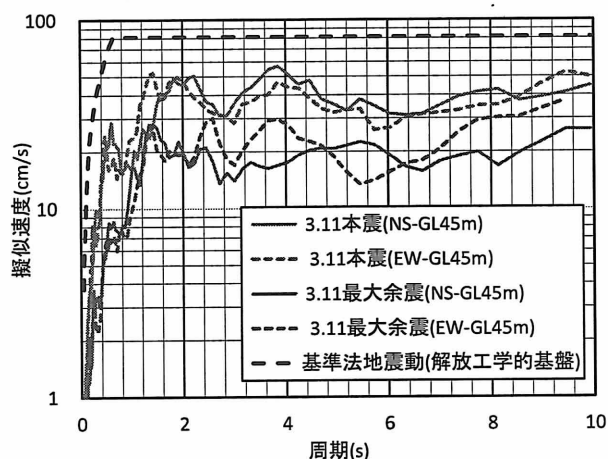


図4 深さ45m 記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

地震動より小さい特徴がある。

2-2 表層地盤の増幅特性の経時変化

図5に、深さ45mに対する深さ2mのフーリエスペクトル比の時間変化を示す。図に示した地震動は、本震・最大余震及び5日後の記録である。解析時間を30sと設定し、10sずらしたフーリエスペクトル比を求め、並べてある。色が濃い部分は、スペクトル比の振幅が大きいことを示している。本震の地震動の初期の部分では、10Hzまでの振動数範囲に4個のピークが見られる。図1に示したS波速度を用いた、1次元土柱の弾性時における卓越振動数とほぼ対応する。地震動が大きくなるにつれて、各次の卓越振動数は、低い側に移動する。1次の卓越振動数は、地震動200s程度まで比の振幅があまり小さくならないのに対し、高次の振動数では、比の振幅が小さくなる。

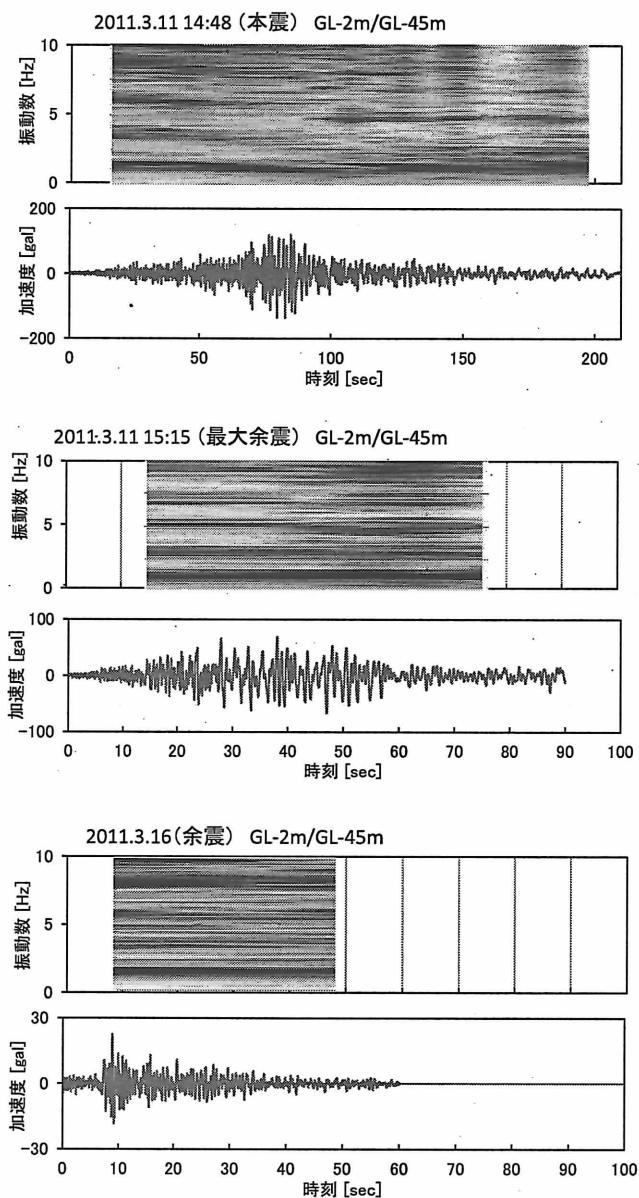


図5 各地震動におけるGL-2m/-45mのフーリエスペクトル比の経時変化

図6に、深さ9mに対する深さ2mのフーリエスペクトル比の時間変化を示す。図1による地盤特性から、深さ9mに対する深さ2mの卓越振動数は、5Hz程度となり、3.11本震の初期の部分と整合した結果となっているが、3.11の本震では、地震動が大きくなるにつれて、5Hz付近にあった卓越振動数が徐々に低下し、地震動の約80s後には、比の値が非常に小さくなる。また最大余震時にも、卓越振動数が不明瞭であり、まだ過剰間隙水圧が十分消散していないと考えられる。

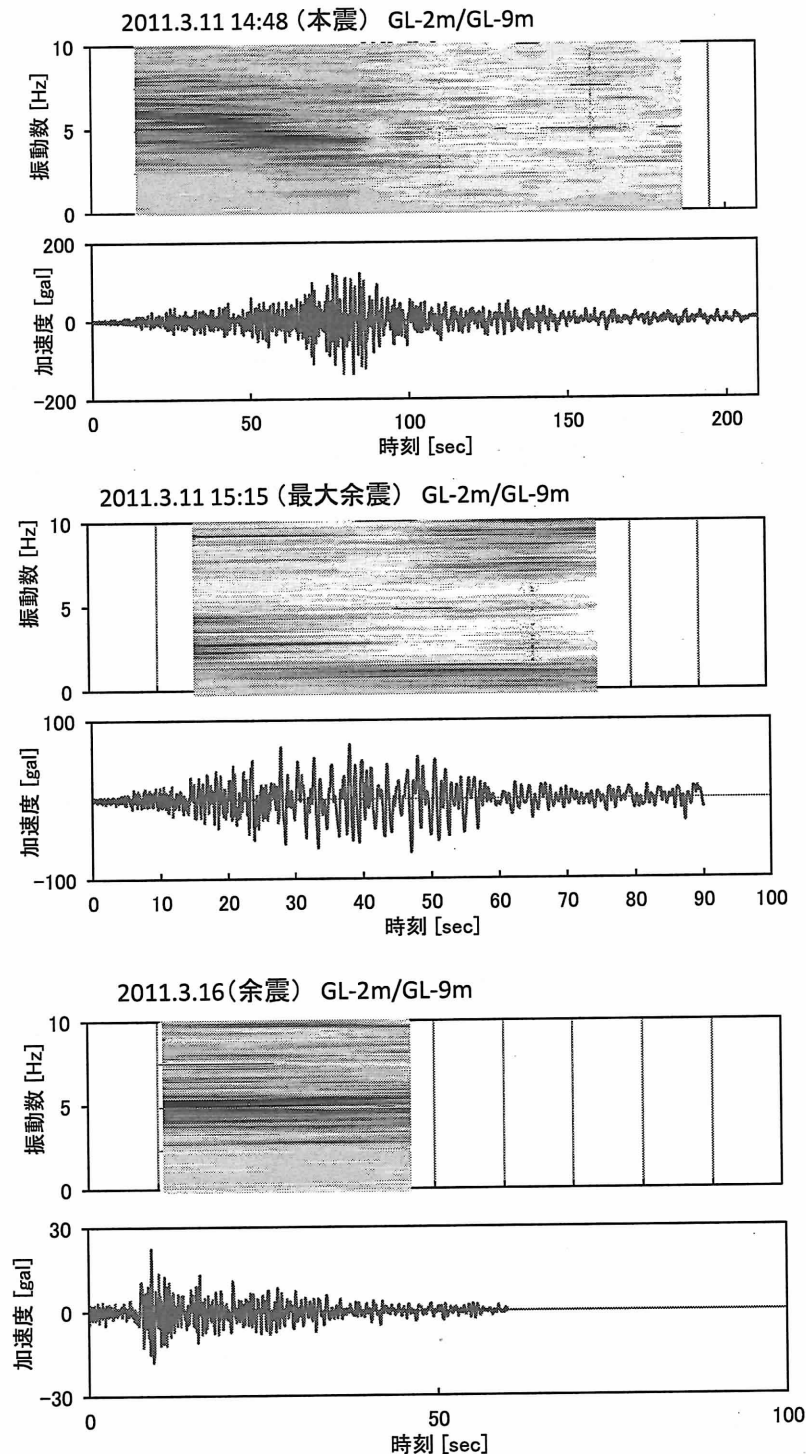


図6 各地震動における GL-2m/-9m のフーリエスペクトル比の経時変化

3. 建物－地盤系の観測体制と観測結果

3-1 建物－地盤系の観測体制・地盤条件・観測記録

千葉市美浜区に建設されている、上部構造が壁式構造の5階建WRC造（高さ13.75m、平面6.96m×65.7m）で、杭基礎を用いた構造（支持層深さ約14m）で、建物内と地表面（GL）で観測が行われている（図7、図8参照）³⁾。建物内は、1階（1F）と5階床（5F）に設置されている。

2011年東北地方太平洋沖地震直後には、写真2のように、建物周辺が液状化した形跡が残っていた。2011年東北地方太平洋沖地震後に調査した地盤のN値、Vs構造と液



図7 建設場所と建物外観

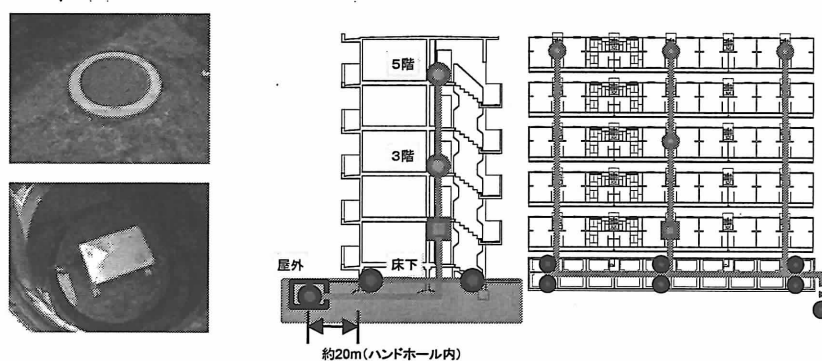


図8 地表面地震計の設置状況と建物の観測位置²⁾



30cm程度堆積した噴砂と傾斜した電柱



周囲地盤の沈下に伴う段差



全面的な噴砂(幼稚園 園庭)



噴砂の状況

写真2 地震後の建物周辺の様子

状化安全率を、図9に示す⁴⁾。
3m以深は砂層(12m付近まで、
砂層の区分は沖積砂層(As)であ
るが細粒分含有率が50%以上で
ある)が続く。地盤調査日の水
位は2.2mである。工学的基盤と
なるDs4($V_s=540$ m/s)より上層
地盤の1次固有周期は0.45秒で
ある。

液状化安全率は観測記録の地
表面最大加速度を用いて建築基
礎構造設計指針により求め
た。安全率1以下は、10.3m
の1か所であるが、3.3mの
表層付近も安全率1.02と
液状化の可能性は無視でき
ない値となっている。

表2に示す6地震(以降、
No.1を「前震」、No.2を「本
震」、No.3を「最大余震」、
No.4~No.6を「余震」と
称す)を用いて、建物と地
盤の挙動について検討し
た。

図10に、地表面、建物1
階、5階(建物の短辺方向
の記録)で観測された本震
の加速度波形を示す。地表
面、建物1階、5階の最大
加速度はそれぞれ、168gal、
219gal、244galとなる。主
要動を過ぎた時間帯(150秒以降)では、加速度値が小さくなる。

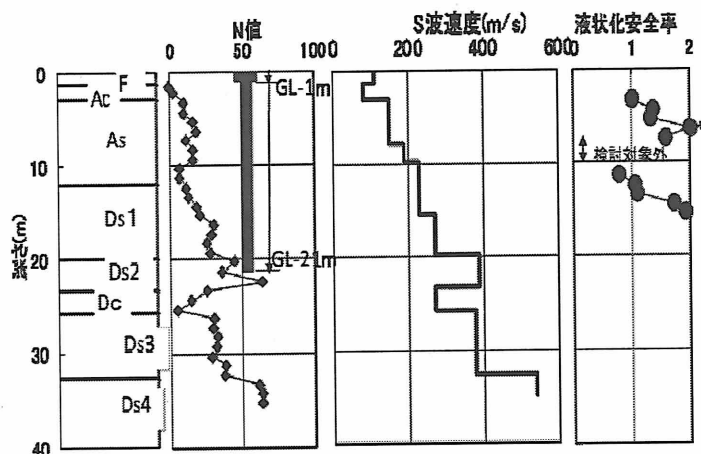


図9 観測点の地盤特性と液状化抵抗⁴⁾

表2 用いた地震記録一覧

No.	発生日時	震源	マグニチュード M	深さ [km]	PGA (cm/s^2)	地盤 計測震度
1	2011年3月9日 11時45分	三陸沖	7.3	8	5.5	1.9
2	2011年3月11日 14時46分	三陸沖	9.0	24	166.3	5.2
3	2011年3月11日 15時15分	茨城県沖	7.6	43	144	5.0
4	2011年3月11日 17時19分	茨城県沖	6.8	36	15.3	2.7
5	2011年3月14日 10時02分	茨城県沖	6.2	32	17.5	2.8
6	2012年3月1日 7時32分	茨城県沖	5.4	60	9.8	1.9

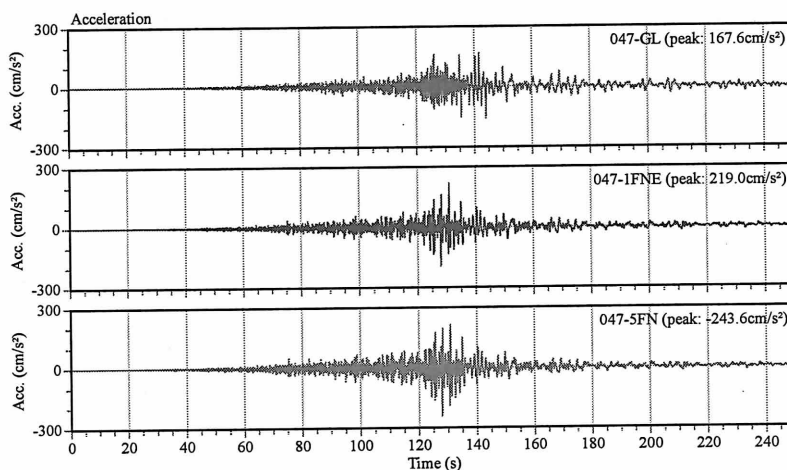


図10 本震における地表面、建物1階、5階の加速度観測記録

3-2 建物-地盤系の卓越振動数の経時変化

図11に、表2のNo.1・No.3地震動について、短辺方向の5F/GLのランニングスペクトル比(色が濃い部分が振幅が大きいことを示す)とGLの加速度波形を併記して示す^{4),5)}。前震(No.1地震動)のスペクトル比は安定しており、常時微動の系1次固有振動数3.0Hz近辺にピーク振動数が見られ、多少の変動幅はあるものの、主要動付近ではこの振動数近辺の値を保っている。これに

対し本震時(No.2 地震動)は、徐々に卓越振動数の低下がみられ、主要動以降には、スペクトル比の振幅が急に低下する。また、本震直後の最大余震(No.3 地震動)では主要動前から卓越振動数の低下が見られ、スペクトル比の振幅が不明瞭になる。最大余震から 2 時間後の余震においては、前震の卓越振動数よりやや低いもののほぼ同様な卓越振動数を示している。

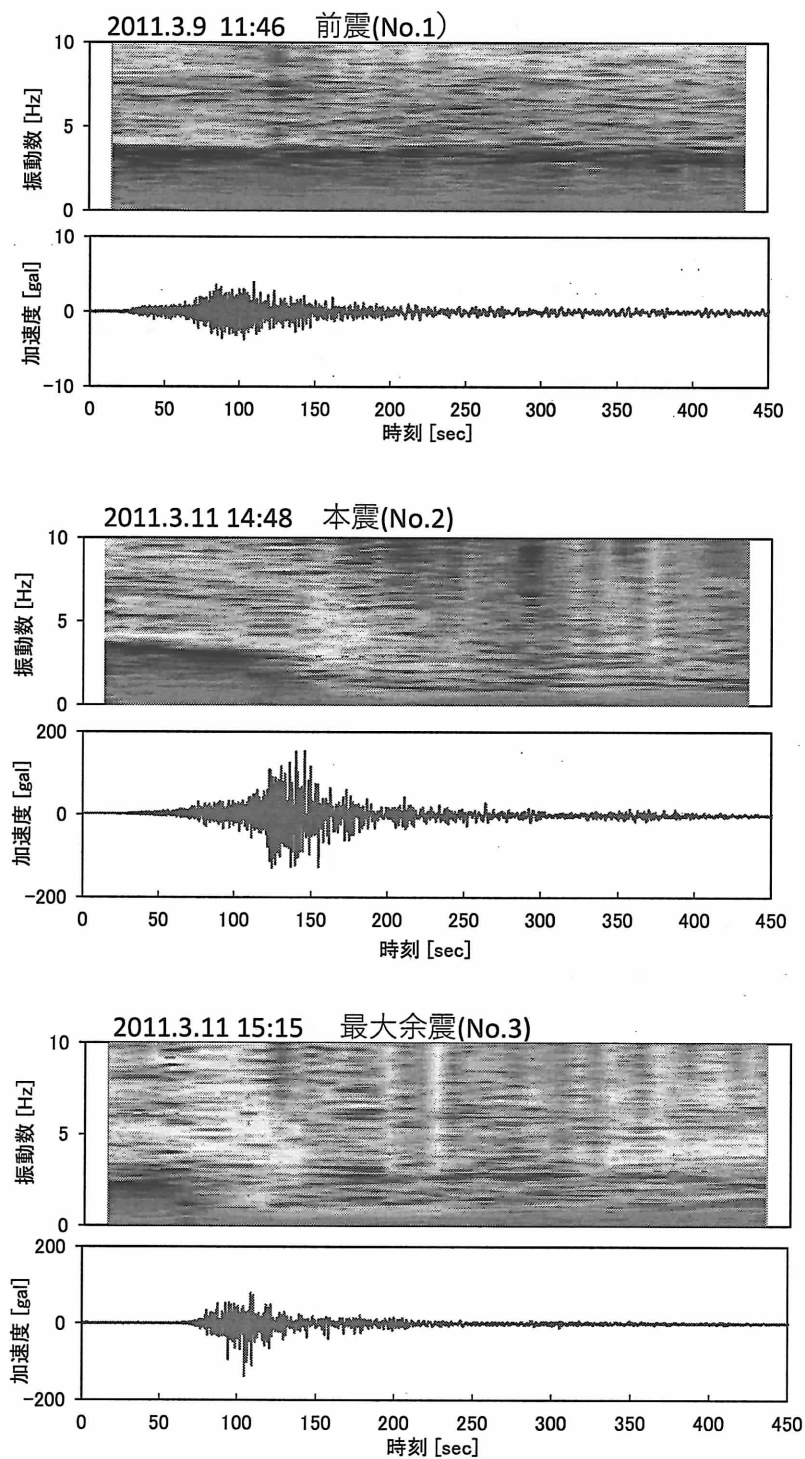


図 11 5F/GL ランニングスペクトル比と G L の加速度波形

図 12 に、本震(No.2 地震動)について 5F/1F のランニングスペクトル比と 1 F の加速度波形 (短辺方向) を併記して示す。主要動以前 (140 秒までの時間帯) では、4Hz 前後に、建物の卓越振動数が確認できる。主要動以降の時間帯となると、建物 5F の加速度値が小さくなるとともに、4Hz 付近の卓越振動数が不明瞭になる時間帯が見られる。

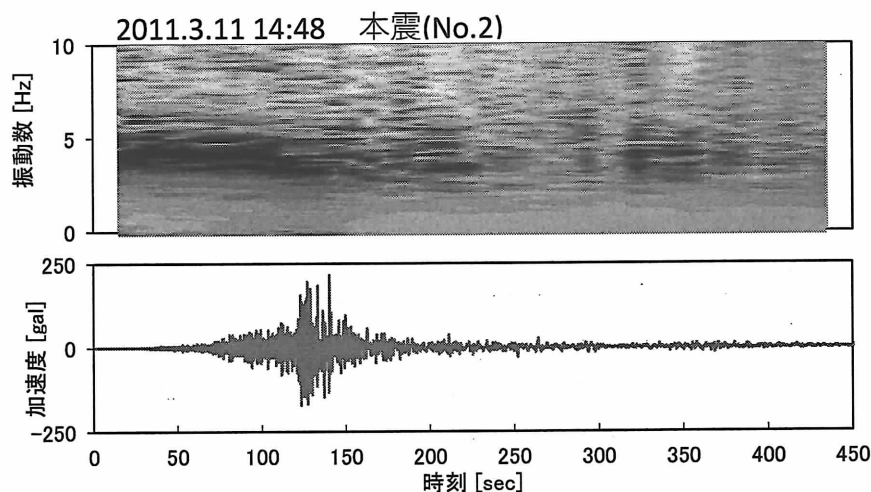


図 12 5F/1F ランニングスペクトル比と 1F の加速度波形

4. まとめ

液状化の影響が想定される地震記録を用いて、地盤と建物の応答性状を検討した。2011 年東北地方太平洋沖地震の本震・余震等を用いて、地中を含む表層地盤の増幅特性と建物—地盤連成系の卓越振動数の分析を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 液状化の発生に伴い、フーリエスペクトル比の卓越振動数が低下し、振幅が急激に低下する現象が確認された。
- 2) 最大余震時ではまだ過剰間隙水圧が十分消散しておらず、本震より小さな地震動で再度液状化していることが確認された。
- 3) 本震では、地震動の振幅が大きくなるとともに、スペクトル比 5F/GL の 1 次ピーク振動数の低下が生じ、長時間にわたり低下することが確認された。これは、地盤の液状化により大きく非線形化し、長時間の揺れにより、液状化が継続しているため、その非線形状態が継続したためと考えられる。

謝辞

国土交通省国土技術政策総合研究所、国立開発法人建築研究所から地震観測記録の提供を受けました。また、国立開発法人土木研究所、国立開発法人建築研究所及び独立行政法人都市再生機構から、地盤情報、建物情報等の提供を受けました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 金子正洋、片岡正次郎他(2013)、「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による強震記録—土木構造物における加速度強震記録 (No. 28)、高密度強震観測記録集 (No. 5)、地震計ネットワーク観測記録集—」、『国土技術政策総合研究所資料』、No. 726
- 2) 谷本俊輔、川口剛他(2015)、「鉛直アレー記録に基づく埋立地盤の液状化発生深度の評価」、『日本地震工学会論文集』、第 15 巻、第 7 号(特集号)、pp. 157-172
- 3) 井上波彦、小豆畑達哉他(2011)、「2011 年東北地方太平洋沖地震において液状化した区域における板状建築物の地震観測結果(その 1~2)」、『日本建築学会大会講演梗概集』、pp. 321-324
- 4) 保井美敏、小豆畑達哉他(2013)、「地震観測に基づく鉄筋コンクリート造集合住宅の地震入力と応答評価(その 3)」、『日本建築学会大会講演梗概集』、pp. 17-18
- 5) 保井美敏、山本健史他(2014)：「地震観測記録による液状化地盤の地震時挙動に関する検討」、『第 14 回日本地震工学シンポジウム概要集』、pp. 322-330