

2011年東北地方太平洋沖地震における宮城県井土浦での強震動および地盤沈下量の推定

Estimation of strong motion and ground subsidence at Idoura, Wakabayashi Ward, Sendai City
due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

秦 吉弥 Yoshiya HATA (大阪大学大学院工学研究科)
 常田賢一 Ken-ichi TOKIDA (大阪大学大学院工学研究科)
 谷本隆介 Ryusuke TANIMOTO (大阪大学大学院工学研究科)

宮城県仙台市若林区井土浦では、2011年東北地方太平洋沖地震による巨大津波が来襲したにも関わらず、堤防などの土構造物の被災は比較的軽微であったことが報告されているが、井土浦が震源域に比較的近いことなどを勘案すると、津波の来襲前の強震動により堤体が既に一定の損傷を受けていた可能性も考えられる。すなわち、津波による被害は軽微であったものの、津波来襲前の地震動による損傷が軽微であったとは限らず、別途検討が必要である。

そこで本研究では、井土浦において余震観測を行い、得られた記録に基づき本震時の強震動を推定した。そして、推定地震動を入力した3次元有効応力解析を行い、津波来襲前の井土浦における地盤液状化などに起因した地盤沈下量を評価した。

キーワード：余震観測，常時微動計測，サイト特性，強震動計算，有効応力解析（IGC：E08）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)では、津波だけでなく地震動による被災についても数多く報告¹⁾されている。宮城県仙台市若林区井土浦(図-1参照)では、巨大津波の来襲により、海岸付近の土木施設などに甚大な被害が生じ、多数の死者・行方不明者を出した。一方で、井土浦における堤防などの土構造物の被災は比較的軽微であったことが報告²⁾されており(写真-1および写真-2(図-2(後述)におけるD-2地点付近でともに撮影)に示すように、本震時の強震動の作用による法面崩壊、本震後の津波越流による浸食・破堤など、顕著な被災は確認されておらず²⁾、現在、堤体(盛土構造)の耐津波特性に関する様々な実験・解析³⁾が行われている。しかしながら、井土浦が震源域に比較的近いことなどを勘案すると、津波の来襲前の強震動により堤防などの土構造物が既に一定の損傷を受けていた(地盤沈下等による被災を受けていた)可能性も考えられる。すなわち、津波による被害は軽微であったものの、津波来襲前の地震動による損傷が軽微であったとは限らず、別途検討が必要である。したがって、井土浦における本震時の強震動を推定し、津波来襲前の地盤の変状等を評価することは、堤防などの土構造物の被災機構に関する理解を深め、耐震ならびに耐津波に関する検討の高度化などを今後図っていく上で非常に重要⁴⁾である。

そこで本研究では、まず、井土浦に地震計を設置し、約1か月間の余震観測を実施した。そして得られた余震観測



写真-1 井土浦での河川堤防の被災状況(川表側)



写真-2 井土浦での河川堤防の被災状況(川裏側)

記録に基づき、井土浦でのサイト特性を評価した。次に、2011年東北地方太平洋沖地震のSPGAモデル^{5),6)}と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した地震動評価手法^{7),8)}を組み合わせた強震波形計算を行い、本震時の井土浦での強震動を推定した。その際、井土浦周辺の既存強震観測点での本震記録を再現することで、強震波形計算手法の井土浦への適用性を確認した。最後に、井土浦での推定地震動を入力した3次元有効応力解析⁹⁾(地震動終了後の津波来襲前までの静的変形解析を含む)を行い、津波来襲前における地盤沈下量を評価した。

2. 本震観測記録の整理

図-1に井土浦周辺における既存観測点^{10),11),12)}とその本震観測記録の分布状況を示す。図-1に示すとおり、井土浦に最も近い強震観測点はSmall-Titan 東四郎丸小学校であり、井土浦において本震時に作用した地震波形としてSmall-Titan 東四郎丸小学校での本震記録を直接転用するという判断がなされがちであるが、比較的近接している観測点同士でも本震時の地震動特性に差異が生じているため(例えば、仙台東I.C.とSmall-Titan 七郷中学校の間におけるPGA・計測震度の差異など)、井土浦と周辺観測点では、地盤震動特性が異なっている可能性がある。したがって、本震時における井土浦での強震動は、井土浦における地盤震動特性(サイト特性)を評価した上で推定することが肝要である。

3. サイト特性の評価

3.1 常時微動計測の実施

余震観測の実施に先立ち、地震計設置位置の妥当性、有効応力解析における既存地盤ボーリングデータの利用の可能性などを判断するため、図-2に示す地点において常時微動計測を実施した。計測実施日は、後述する余震観測の開始日(2011年5月8日)と同じである。微動計としては後述の3.2と同様に、一体型微動探査兼地震計機器^{13),14)}を採用した。ボーリング地点(B-1地点)における土層構成などについては、5.で詳述する。計測方法および常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法などは、既往の方法^{15),16)}を採用した。計測方法の概略としては、計測時間は11分間、計測方向は水平2成分および鉛直成分、およびサンプリング周波数は100Hzとした。また、計算処理方法の概略としては、0.05HzのParzen Windowを考慮したフーリエ振

幅スペクトルを利用し、1区間を163.84sとしたH/Vスペクトルを3区間分計算することで、その平均を採用した。

図-3に各計測地点での常時微動H/Vスペクトルの比較を示す。図-3に示すように、ボーリング地点(B-1地点)、余震観測地点(A-1地点)、井土浦の堤体付近(D-1, D-2, D-3地点)における常時微動H/Vスペクトルの特性(ピーク周波数やスペクトル形状)が非常に類似していることが読み取れる。すなわち、井土浦での余震観測地点(A-1地点)と堤体付近の地盤震動特性が類似しており、余震観測地点(A-1地点)の妥当性が確認できる。さらに、5.で詳述する有効応力解析では、井土浦における堤体下の基礎地盤の特性として、ボーリング地点(B-1地点)での地盤情報を転用しているが、一定の信憑性があることが示唆される。

3.2 余震観測の実施

本研究では、3.1で観測に適していることを確認した五柱神社の付近において地震計を設置し(図-2参照)、余震(中小地震)観測を実施した。観測期間は2011年5月8日~2011年6月1日の約1か月間であり、地震計としては一体型微動探査兼地震計機器^{13),14)}を採用した。観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、観測方向は3成分(N-S, E-W, U-D成分)とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムを採用した。なお、常時微動計測と余震観測において同じ計器を用いているが、計測上の大きな違いはない。

3.3 サイト増幅特性の評価

図-4には、井土浦(余震観測地点：図-2参照)におけるサイト増幅特性(地震基盤~地表)と、その周辺の既存観測点(図-1参照)におけるサイト増幅特性¹⁷⁾(地震基盤~地表)を水平方向および鉛直方向について比較したものを示す。井土浦における水平方向のサイト増幅特性は、まず、井土浦とK-NET 仙台で同時に得られた余震観測記録を対象に、両地点の距離の違いによる補正^{18),19)}を考慮した水平2成分合成のフーリエスペクトルの比率(井土浦/K-NET 仙台)を計算し、この比率をK-NET 仙台における既存のサイト増幅特性¹⁷⁾に掛け合わせることによって評価^{20),21)}した(図-4(a)参照)。一方で、井土浦ならびに既存観測点における鉛直方向のサイト増幅特性(地震基盤~地表)は、余震観測記録(井土浦)もしくは本震前の中小地震観測記録(既存観測点)を対象に、水平動と鉛直動のフーリエスペクトルの比率(鉛直方向/水平方向)を計算し、この比率を水平方向のサイト増幅特性(図-4(a)参照)に掛け合わせるによって評価^{22),23)}した(図-4(b)参照)。

図-4に示すように、井土浦と既存観測点(Small-Titan 東

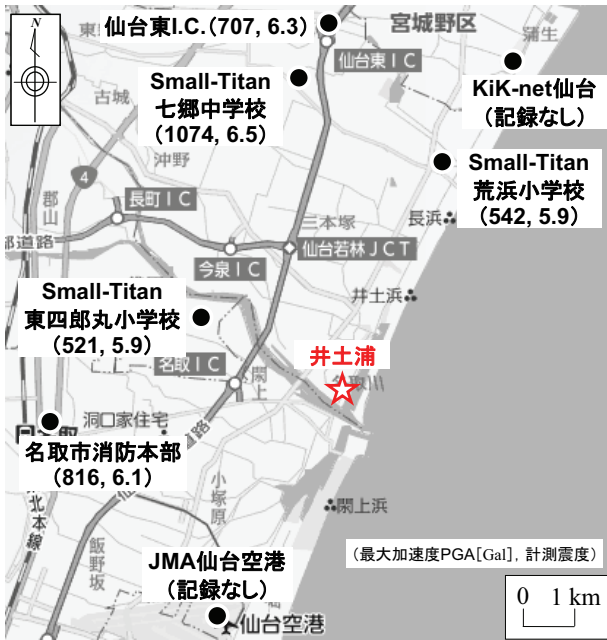


図-1 井土浦周辺での本震観測記録の分布

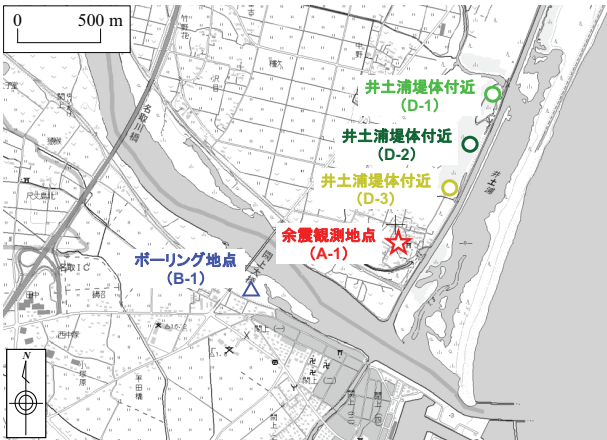


図-2 井土浦周辺での常時微動計測地点

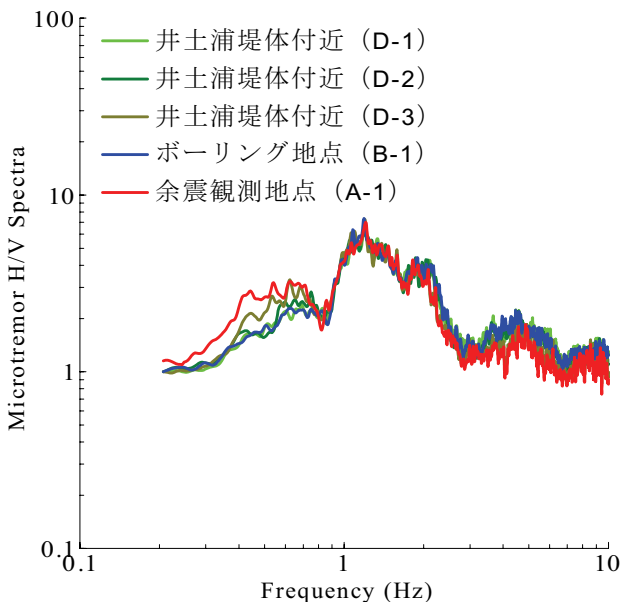


図-3 井土浦周辺での常時微動 H/V スペクトルの比較

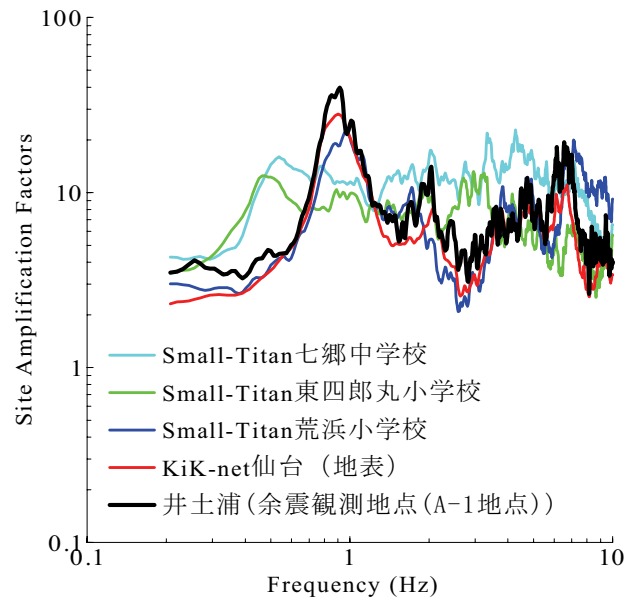


図-4(a) サイト増幅特性(水平方向)の比較

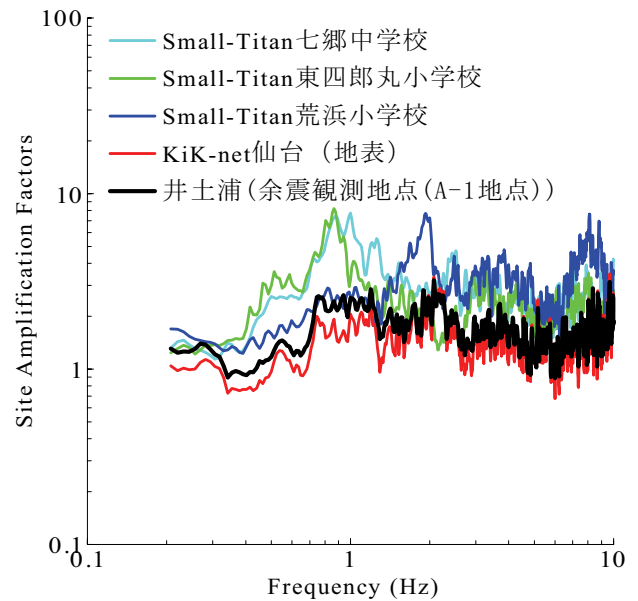


図-4(b) サイト増幅特性(鉛直方向)の比較

四郎丸小学校や Small-Titan 荒浜小学校などでは、サイト増幅特性(地震基盤～地表)がやや短周期帯域(0.5～2Hz)において比較的大きな差異が生じており、Small-Titan 東四郎丸小学校や Small-Titan 荒浜小学校などで得られた本震観測記録を井土浦での本震時の地震動として工学的に転用できないことが読み取れる。一方で、井土浦と KiK-net 仙台のサイト増幅特性(地震基盤～地表)は、評価対象とした周波数帯域(0.2～10Hz)において非常に良い一致を示しており、本震時に井土浦に作用した強震動は、KiK-net 仙台での観測地震動と同程度であったと推察される。しかしながら、KiK-net 仙台では、津波来襲の影響で本震時の記録が残されておらず、井土浦への観測記録の工学的転用は不可能である。

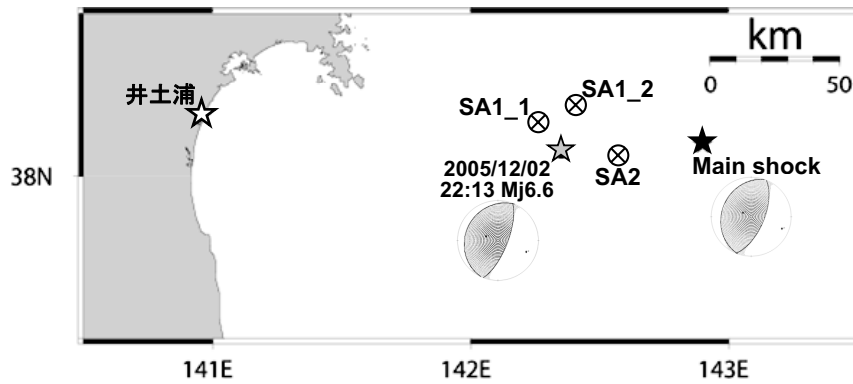


図-5 野津^{5),6)}による SPGA と井土浦の位置関係

表-1 野津^{5),6)}による SPGA のモデルパラメーターの一覧

断層パラメーター	SA1_1	SA1_2	SA2
破壊開始時刻(h:m:s)	14:46:43.5	14:46:46.9	14:47:26.3
地震モーメント(Nm)	8.0×10^{18}	8.0×10^{18}	2.1×10^{19}
長さ(km)	3.0	4.0	3.5
幅(km)	2.0	3.0	3.0
面積(km ²)	6.0	12.0	10.5
ライズタイム(sec)	0.17	0.25	0.25

4. 地震動の推定

4.1 特性化震源モデル

野津^{5),6)}による SPGA (Strong-motion Pulse Generation Area) を採用した. 図-5 に宮城県沖のサブイベント (SA1_1, SA1_2, SA2) と井土浦の位置関係, 表-1 にモデルパラメーターの一覧を示す. この震源モデルは, 太平洋沿岸にある K-NET/KiK-net¹⁰⁾ や港湾強震観測網²⁴⁾ などの既存強震観測点で得られた本震観測記録を評価可能なモデルである. ただし, 井土浦周辺の Small-Titan 東四郎丸小学校や Small-Titan 荒浜小学校 (図-1 参照) での適用性については確認できていないため, 本研究において追加検討を行った. 詳細については, 4.4 で述べる. また, この震源モデルでは, 気象庁による破壊開始点を含む走向 203deg. および傾斜 10deg. の断層面を仮定し, 破壊伝播速度を 3.0km/s としている. 地震調査研究推進本部の提案値²⁵⁾ に基づいて基盤の S 波速度は 3.9km/s および密度は 3.1t/m³ である. Q 値については, 佐藤・巽による東日本の海溝型地震での推定値¹⁹⁾ を採用している.

4.2 強震波形計算手法

本研究では, 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法^{7),8)} を適用した. この方法では, まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する.

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1)$$

ここに, $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数, $S(f)$ は中小地震の震源特性¹⁸⁾ で実数, $P(f)$ は伝播経路特性¹⁸⁾ で実数, $G(f)$ はサイト増幅特性 (3.3 参照) で実数, $O(f)$ は対象地点での中小地震観測記録のフーリエ変換で複素数, $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅 0.05Hz の Parzen Window を適用したものである. 式(1)からわかるように, 本手法では, 統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め, 統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地 で得られた中小地震記録のフーリエ位相を用いる. 式(1) をフーリエ逆変換し, 経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ²⁶⁾ を行うことで, 大地震による波形が求まる. なお, Parzen Window (添字 p で表示) は因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている⁸⁾.

4.3 サイト位相特性の評価

フーリエ位相特性 (対象地点での余震観測記録のフーリエ変換 $O(f)$: 式(1)参照) の取り扱いについては, 本震前の観測記録の中から, 入射角および back azimuth が宮城県沖のサブイベントとできるだけ共通となるように (堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるように) 評価した. 具体的には, 図-5 に示すように, 宮城県沖のサブイベント (SA1_1, SA1_2, SA2) の近傍で発生した中小地震であり, さらに震源メカニズム²⁷⁾ が 2011 年東北地方太平洋沖地震と類似している宮城県沖を震源とする地震 (2005/12/02 22:13 Mj6.6) による KiK-net 仙台 (井土浦

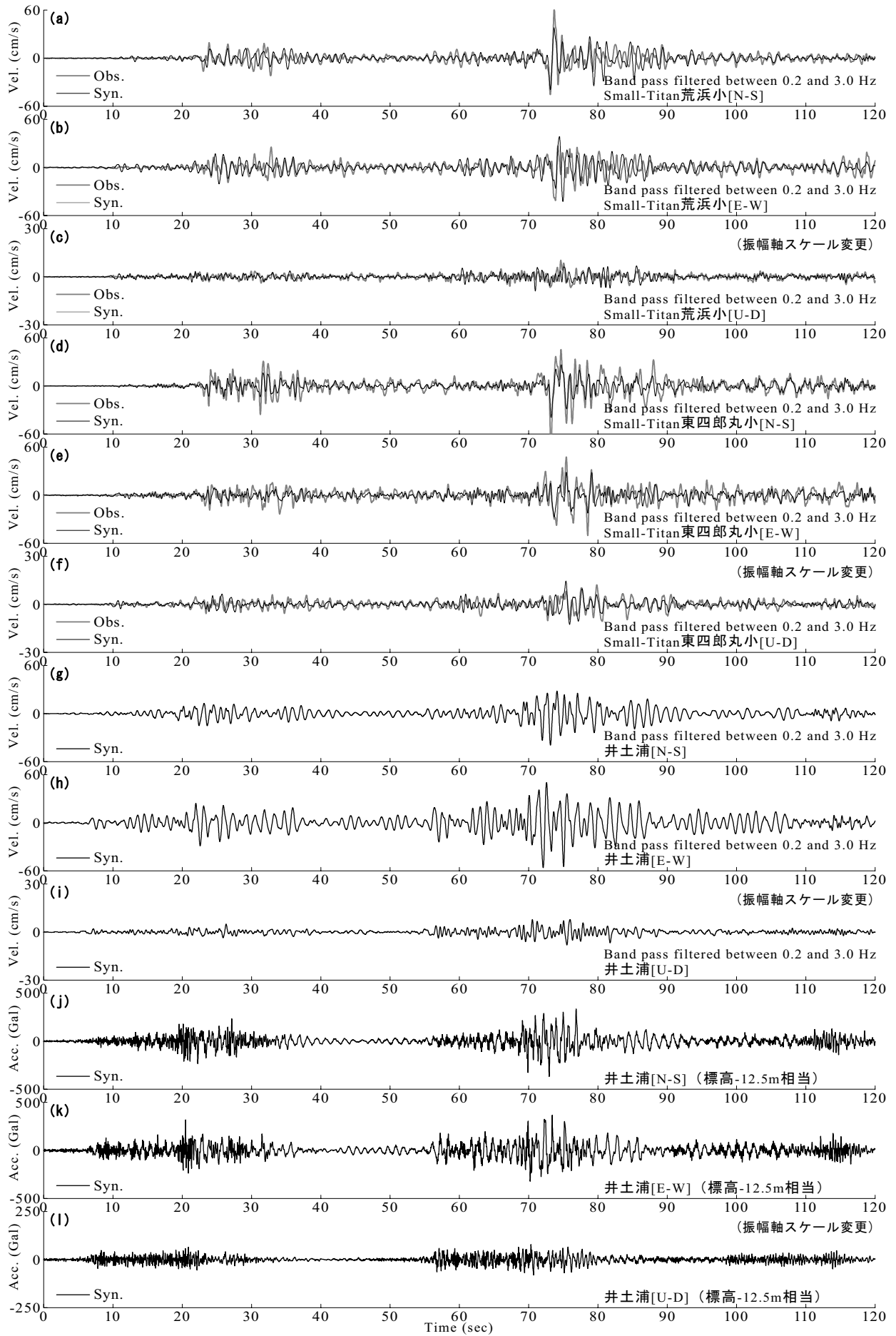


図-6 地震動推定手法の適用性確認と、井土浦での推定地震動

と同等とみなす), Small-Titan 東四郎丸小学校, Small-Titan 荒浜小学校での観測波形を採用した。

ここに, ①Small-Titan 東四郎丸小学校および Small-Titan 荒浜小学校では本震後の観測記録が現在公開されていないこと, ②サイト増幅特性が井土浦と類似している KiK-net 仙台では本震以降の観測記録が残されていないこと, ③上記①および②とは反対に, 井土浦では 3.2 で述べたとおり本震後にあたる 2011 年 5 月 8 日~2011 年 6 月 1 日の約 1 か月間の地震観測記録しか存在しないこと, ④サイト増幅特性(KiK-net 仙台と井土浦での類似性を確認: 図-4 参照)とサイト位相特性の間には相関性があることが報告²⁸⁾されていること, ⑤上記④の知見を踏まえると, 宮城県沖を震源とする地震(2005/12/02 22:13 Mj6.6)の際には, KiK-net 仙台と井土浦では同等程度の地震動が作用していた可能性が高いこと, などを考慮して, 宮城県沖を震源とする地震(2005/12/02 22:13 Mj6.6)による KiK-net 仙台での観測記録を井土浦のサイト位相特性として評価した。

4.4 適用性の確認および地震動推定結果

図-6(a)~(f)は, Small-Titan 東四郎丸小学校および荒浜小学校で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震時の速度波形(観測波)に対して, 強震動推定結果(推定波)を比較したものである。なお, 図-6 の速度波形については, 土構造物の地震被災に影響を及ぼす周波数帯域^{29),30)}などを考慮して, 0.2-3Hz のバンド・パスフィルタを施している。

図-6(a)~(f)に示すとおり, Small-Titan 東四郎丸小学校および Small-Titan 荒浜小学校において, 推定波は良好に観測波を再現できている。すなわちこれは, 野津^{5),6)}による SPGA(4.1 参照), 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した地震動評価手法^{7),8)}(4.2 参照), 宮城県沖のサブイベントに対応させたサイト位相特性(4.3 参照)の組み合わせは, 井土浦周辺の強震観測点(Small-Titan 東四郎丸小学校および Small-Titan 荒浜小学校)における地震動再現にも有効であったことが確認でき, 井土浦における地震動推定においても一定の精度(図-6(a)~(f)で示した観測波に対する推定波の精度と同程度の精度)で推定できる可能性を示唆するものである。

図-6(g)~(l)は, 井土浦における 2011 年東北地方太平洋沖地震時の推定速度・加速度波形である。なお, 速度波形については, 図-6(a)~(f)と同様に 0.2-3Hz のバンド・パスフィルタを施している。井土浦での推定速度波形と周辺観測点(Small-Titan 東四郎丸小学校および Small-Titan 荒浜小学校)での速度波形を比較すると, 若干ではあるが井土浦での推定速度波形のほうが地震動の継続時間が長くなる傾向にあり, この傾向は E-W 成分においてより顕著

に表れている。次章では, 図-6(j)~(l)に示す本震時における井土浦での工学的基盤面相当(標高-12.5m 相当)の推定加速度波形(3 成分)を入力地震波とした 3 次元有効応力解析の実施とその結果について述べる。

5. 3次元有効応力解析

5.1 地盤解析モデル

図-7 は, 井土浦近傍のボーリング地点(図-2 参照)で得られた既存の N 値の深度分布である。図-8 には, 井土浦での堤体と基礎地盤を対象とした 3 次元 FEM モデルを示す。図-7 および図-8 に示すとおり, 井土浦での基礎地盤に相当する第 2~5 層(L2~L5)については, ボーリング地点(標高-0.6m 以深)における地盤物性や土層構成などを参考に設定した。一方で, 第 1 層(L1)については, 井土浦における堤体の地盤物性および堤体高を参考に設定した。すなわち, 地盤解析モデルの最上端(第 1 層(L1)の上部)は, 井土浦での堤体天端相当を表していることになる。地下水位については, ボーリング地点(図-2 参照)での地下水位の実績(図-7 参照)や元住民からのヒアリング結果などを踏まえて, 第 1 層(L1)と第 2 層(L2)の境界に設定した。

使用要素は 6 面体アイソパラメトリック要素(ソリッド要素)であり, 境界条件は, 基盤底面は E+F 波を入力するので固定条件, その他の同一深度面は等変位条件とした。

なお, 一般的に堤防の被災事例の多くは, 液状化地盤の側方流動による沈下の影響が大きいものの, 井土浦での現地調査結果によれば, 側方流動による沈下の影響は非常に軽微であったことから(本震前後において堤体の法勾配に大きな差異が確認できないことなどから), 本稿では, 液状化による地盤沈下(圧密を含む)に主に着目するために, 図-8 に示すような FEM モデルを採用した。

5.2 解析手法およびパラメーター

3 次元有効応力解析には, 2 次元のマルチスプリングモデル³¹⁾と過剰間隙水圧モデル³²⁾を 3 次元に拡張させたモデル(3D-FLIP)⁹⁾を採用し, 3 次元の地盤応答解析を行った。

表-2 に設定した解析パラメーターの一覧を示す。地盤パラメーターは, 井土浦近傍での既存のボーリング地点(図-2 参照)で得られた土質試験結果を参考に設定した。ただし, せん断強度定数(c , ϕ), 変相角 ϕ_m , 動的変形曲線における減衰定数の最大値 H_{max} などは, それぞれ経験値^{33),34),35),36)}を採用した。また, 土粒子骨格のポアソン比は 0.333 と設定した。さらに, 液状化パラメーターについては, 森田ほか³⁷⁾による簡易設定法を用いて評価した。

表-1 3次元有効応力解析(3D-FLIP)におけるモデルパラメータの一覧

Geological classification		L1	L2	L3	L4	L5
		Embankment	Sandy Silt	Sand	Sand	Sandy Sand
Unit weight	γ_t (kN/m ³)	19	19	20	20	20
Poisson's ratio	ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Permeability coefficient	k (m/s)	2×10^{-4}	8×10^{-6}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-4}
Shear wave velocity	V_s (m/s)	150	140	230	260	300
Cohesion	c (kPa)	0	0	0	0	0
Internal friction angle	ϕ (deg.)	39	39	40	40	41
Phase angle	ϕ_m (deg.)	28	28	28	28	28
Upper limit for hysteretic damping	H_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Model parameters for liquefaction						
Ultimate limit of dilatancy	S1	-	0.005	0.005	0.005	0.005
Overall cumulative dilatancy	W1	-	11.0	30.5	21.0	50.0
Initial phase of cumulative dilatancy	P1	-	0.5	0.5	0.5	0.5
Final phase of cumulative dilatancy	P2	-	0.95	0.80	0.82	0.70
Threshold limit dilatancy	C1	-	1.6	1.0	1.0	1.0

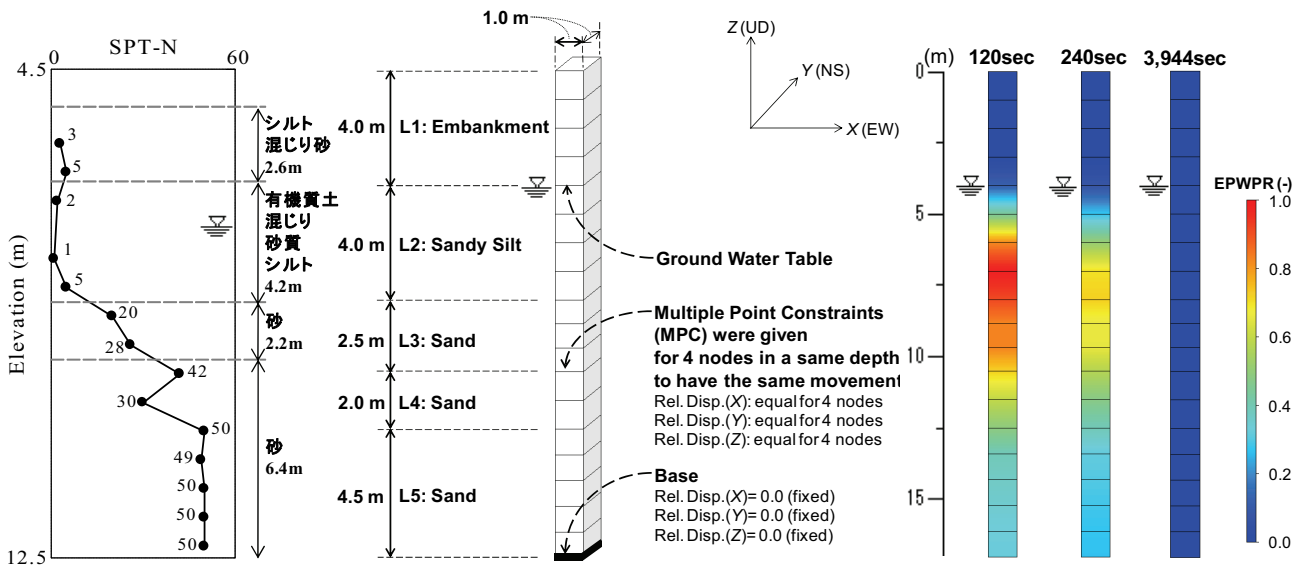


図-7 井土浦近傍での既往結果

図-8 3次元FEMモデルとその境界条件

図-9 過剰間隙水圧比の深度分布

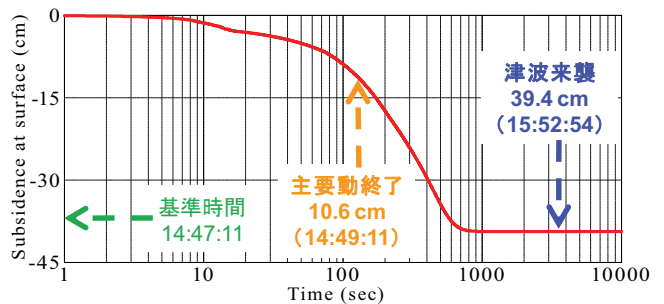
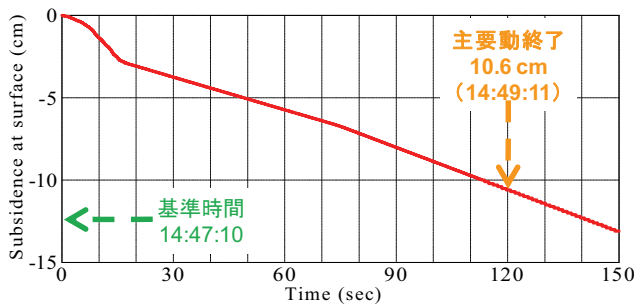


図-10 井土浦における地盤地表面(堤体天端相当)での沈下量の時刻歴

5.3 入力地震動および数値解析条件

入力地震動としては、2011年東北地方太平洋沖地震における井土浦での推定加速度波形(図-6(j)~(l))を採用した。この波形は、井土浦でのサイト増幅特性(地震基盤~地表:線形)などに基づき、地表面相当(堤体法尻相当)で評価した本震時の地震波形に対して、等価線形解析³⁸⁾を用いて工学的基盤面相当(標高-12.5m相当)まで引戻した3成分ごとの地震波形(E+F波)である。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は0.001sec

とした。Rayleigh減衰としては初期剛性比例型を採用し、その係数は、井土浦での地盤モデル(図-7参照)の1次固有周期0.28secに減衰定数1%を仮定して、0.0009とした。

動的解析時間は327.68secであり、その後、10,000secまで慣性項を無視した過剰間隙水圧の消散に伴う沈下解析(静的解析)を実施した。

5.4 解析結果

図-9には、2011年3月11日14時47分10秒を基準時

間とした場合の①120秒後(主要動終了時間帯:図-6参照), ②240秒後, ③3,944秒後(Small-Titan 荒浜小学校(図-1参照)での津波来襲実績時間³⁹⁾より評価)における過剰間隙水圧比の分布を示す. さらに図-10には, 地盤地表面(井土浦での堤体天端相当)における沈下量の時刻歴を示す.

図-9および図-10に示すように, まず, 強震動の作用がほぼ終了した時間帯(120秒後)では, 第2層(L2)および第3層(L3)において過剰間隙水圧比が1.0に近い値を示しており, 地盤液化化を伴う堤体天端相当の沈下量は10.6cmとなっている. 次に, 240秒後には過剰間隙水圧の消散に起因した地盤沈下が進行し, その沈下量は20cm程度まで増加している. 最後に, 井土浦における津波来襲想定時間(3,944秒後)には, 過剰間隙水圧の上昇・消散を伴う地盤の沈下はほぼ収束しており, その最終的な沈下量は40cm程度であったと推察される. すなわち, 津波来襲前の地震動の作用による地盤の損傷は, 津波による被害²⁾と同様に軽微であったと言える.

6. まとめ

本研究では, 宮城県仙台市若林区井土浦において余震観測を行い, 得られた記録に基づき2011年東北地方太平洋沖地震時に作用した地震動を推定した. そして, 推定地震動を入力波とした3次元有効応力解析を行い, 津波来襲前の井土浦における地盤液化化などに起因した地盤沈下量を評価した. 得られた知見を以下に示す.

- (1) Small-Titan 東四郎丸小学校や Small-Titan 荒浜小学校などで得られた本震観測記録を井土浦における本震時の地震動として転用することはできない. 一方で, 井土浦とKiK-net 仙台のサイト増幅特性は, 非常に良い一致を示しており, 本震時に井土浦に作用した強震動は, KiK-net 仙台に作用した地震動と同程度であったと推察される.
- (2) 特性化震源モデルとして SPGA (Strong-motion Pulse Generation Area), 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した地震動評価手法, 宮城県沖のサブイベントに対応させたサイト位相特性を組み合わせることにより, Small-Titan 東四郎丸小学校および Small-Titan 荒浜小学校で得られた本震時の観測地震動を推定することが可能である.
- (3) Small-Titan 東四郎丸小学校および Small-Titan 荒浜小学校で得られた本震時の観測地震動と比較して, 井土浦での本震時の推定地震動は, 地震動の継続時間が長い傾向を有している.

(4) 井土浦での堤体ならびにその直下の基礎地盤を対象とした地盤解析モデルに基づく, 井土浦での3成分推定地震動を入力波とした3次元有効応力解析の結果によれば, 井土浦の堤体直下の基礎地盤では, 継続時間の長い強震動の作用によって, 過剰間隙水圧の発生を伴う液化化が発生していた可能性が高い.

(5) 井土浦に津波が来襲した時間(強震動が作用した約1時間後)には, 過剰間隙水圧の上昇・消散による地盤沈下はほぼ収束しており, 地表面(堤体天端)での沈下量は40cm程度であったと推察できる. すなわち, 津波来襲前の地震動の作用による地盤の損傷は, 津波による被害と同様に軽微であったと言える.

今後は, 強震動による地震力ならびに津波来襲による津波力の作用を同時に考慮した土構造物の耐震・耐津波検討を実験と解析の両面から実施していきたいと考えている.

謝辞

本研究では, (独)防災科学技術研究所 KiK-net, NEXCO 東日本, 宮城県, 東北工業大学 Small-Titan による地震観測波形データ, F-net の CMT 解, 気象庁の震源データを使用させていただきました. また, (独)防災科学技術研究所 Geo-Station のボーリングデータを利用しました. さらに, 宮城県仙台市若林区の住民の皆様には, ヒアリング, 余震観測および常時微動計測の実施などにおいてご支援をいただきました. ここに記して深く御礼申し上げます.

参考文献

- 1) たとえば, 安田進, 東畑郁生: 河川堤防の被害, 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, 第7章, 2011.
- 2) 常田賢一, 谷本隆介: 2011年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.I_1406-I_1410, 2012.
- 3) たとえば, 谷本隆介, 常田賢一, 北川秀彦, 荒木進歩: 津波に対する盛土の耐浸食性および落堀構造の減勢特性の検証, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.I_316-I_320, 2012.
- 4) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 幸左賢二: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震による南三陸町志津川での強震動の評価, 土木学会論文集 B3, Vol.69, No.2, pp.I_161-I_166, 2013.
- 5) 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.2, pp.21-40, 2012.
- 6) 野津厚, 山田雅行, 長尾毅, 入倉孝次郎: 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.209-228, 2012.
- 7) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.512,

- pp.97-104, 1998.
- 8) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
 - 9) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
 - 10) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
 - 11) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
 - 12) Kamiyama, M., Matsukawa, T. and Anazawa, M.: Strong ground motions observed by Small-Titan during the 2011 Great East Japan Earthquake, *Joint Conference Proc. of 9th International Conference on Urban Earthquake Eng. / 4th Asia Conference on Earthquake Eng.* (CD-ROM), Tokyo, Japan, 10p., 2012.
 - 13) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会 2006 予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006.
 - 14) 秦吉弥, 常田賢一, 林健二: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み, 地盤と建設, Vol.31, No.1, 2014 (this issue).
 - 15) Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A.: Preliminary study on the difference of indexes of seismic motions observed at adjacent sites, *Proc. of 2nd International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Taormina, Italy, pp.42-50, 2012.
 - 16) Hata, Y., Nakamura, S., Nozu, A., Shibao, S., Murakami, Y. and Ichii, K.: Microtremor H/V spectrum ratio and site amplification factor in the seismic observation stations for 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Bulletin of the Graduate School of Engineering, Hiroshima University*, Vol.59, No.1, 2010.
 - 17) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
 - 18) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
 - 19) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
 - 20) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
 - 21) Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A.: Preliminary study on variation of ground motion indices within very small distance, *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, No.0851, Lisbon, Portugal, 2012.
 - 22) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例に一, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
 - 23) Hata, Y., Ichii, K., Nozu, A., Maruyama, Y. and Sakai, H.: Ground motion estimation at the farthest liquefaction site during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.48, pp.132-142, ELSEVIER, 2013.
 - 24) Nozu, A.: Current status of strong-motion earthquake observation in Japanese ports, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.79-83, 2004.
 - 25) 地震調査研究推進本部: 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)について, 2005.
 - 26) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
 - 27) (独)防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網 F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet> (last accessed 2013/11/08).
 - 28) たとえば, 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹: 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.915-920, 1998.
 - 29) 秦吉弥, 野津厚, 一井康二, 酒井久和: 盛土構造物の残留変形に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する基礎的検討, 第32回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), 土木学会, No.2-239, 2012.
 - 30) 酒井久和, 野津厚: 地中構造物の損傷に影響する地震動の周波数成分, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, No.194, pp.1033-1038, 2002.
 - 31) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
 - 32) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior unser principal stress axes rotation, *Proc. of 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Vol.1, pp.523-530, Nagoya, Japan, 1985.
 - 33) (社)土木学会: 地震動・動的物性, 動的解析と耐震設計, 第1巻, 技報堂出版, 170p., 1989.
 - 34) 吉見吉昭, 福武毅芳: 地盤液状化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版, 330p., 2005.
 - 35) 大井昌弘, 藤原広行: 地盤情報の統合化と提供—ジオ・ステーション—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp.8-11, 2013.
 - 36) (独)防災科学技術研究所: ジオ・ステーション (Geo-Station), <http://www.geo-stn.bosai.go.jp/jps/index.html> (last accessed 2013/11/08).
 - 37) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾空港技術研究所資料, No.869, 1997.
 - 38) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp.205-222, ELSEVIER, 2002.
 - 39) 神山眞: 2011年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー強震観測システム Small-Titan による強震観測記録について, 地盤工学会東北支部, 2011.

(2013年6月24日 受付)

