

1. 強震動を受けた地盤の S 波速度低下に関する一考察

Decrease of S-wave Velocity in Ground during Strong Motions

技術支援課 栗塚一範、小川 好

1. はじめに

建設局では、道路橋梁、河川構造物など重要構造物全 19 地点において、強震観測を実施しており、データの蓄積を行っている（資料編 1「平成 27 年度の強震観測記録」）。このうち、江戸川北工区敷地内の強震観測施設において、地震時の地盤挙動の把握及び新中川に架かる上一色橋橋脚上で観測している強震記録の補足を目的として地中強震計による観測を 2005 年度から実施している。地中強震計は、深さ GL-12.5m、GL-40m の位置に設置されているが、基盤層（ここでは、GL-40m 程度を想定）より浅い比較的軟弱層の位置に設置している施設は全国的に少ない状況である。

一方、強震動を受けた地盤は大きなひずみが生じ、そのひずみが非線形性を帯びるとともに剛性率が低下することが知られている。しかし、基盤層など比較的深く硬い層から地表までに到達する実際の地震波記録を基に検討された報告は多い^{1,2)}ものの、基盤層より浅い軟弱層から地表までの間で検討された例は多くないようである。このような条件で検討された結果は、強震動を受けた地盤の物理的状態の解明に繋がるとともに、今後の地震被害想定での地盤増幅率や卓越周期の指定など広く役立つものと思われる。

今回、地震時の地盤の剛性率（ここでは S 波速度で評価）が、それを受ける前の剛性率に対しどの程度低下するか、強震記録による実測値及び地震応答解析による解析値の両面から比較検討した結果を報告する。

2. 検証方法

地盤の剛性率は以下の式によって表される。

$$G = \rho V_s^2 \quad \dots(1)$$

ここで、 G は剛性率、 ρ は密度、 V_s は S 波速度である。

(1)式より、地盤の剛性率は S 波速度の 2 乗に比例するため、地震動を受ける前と地震時の地盤の S 波速度を求め、地盤の剛性率低下を評価することとした。

地震を受ける前の S 波速度は、2005 年 3 月に地中強震計を設置する際、そのボーリング孔を利用して PS 検層を実施していることから、その結果を用いることとした。

地震時の S 波速度は、東京都大手町で観測された大中小 3 ケースの規模の地震を対象とし、地表面の強震計 GL=0m、地中強震計 GL-12.5m、GL-40m の 3 地点で得られる強震記録を用いて検討することとした。地震時の S 波速度の求め方を以下の(1)、(2)に示す。

(1) 地震時の S 波速度（実測）

ある地震波の波長 λ は(2)、(3)式で表される。

$$\lambda = \frac{V_s}{f} \quad \dots(2)$$

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{(\theta_A - \theta_B) + 2n\pi}{2\pi} \quad \dots(3)$$

(2)、(3)より、

$$\frac{L}{V_s} = \frac{(\theta_A - \theta_B) + 2n\pi}{2\pi f} \quad \dots(4)$$

$$V_s = 2\pi L \cdot \frac{f}{(\theta_A - \theta_B) + 2n\pi} \quad \dots(5)$$

ここで、 λ は波長、 V_s は S 波速度、 f は振動数

θ_A は A 地点の位相、 θ_B は B 地点の位相

L は 2 地点間の距離、 π は円周率、

n は 0 または正の整数である。

強震計実測データから得られた加速度履歴を高速フーリエ変換(FFT)すると、変換後の複素形式から位相

θ を $\pm\pi$ の範囲で算出することができる。ここで、ある A 地点から B 地点に向かって地震波が進行した際の位相差は、進行波の波動方程式より、 $f\left(\frac{x}{V_s}-t\right)$ で表されることから、A の方が B より時間的に前の波形となっているため、 $(\theta_A-\theta_B)$ として表すことができる。この位相差とそれに対応する振動数の関係から傾き $\frac{(\theta_A-\theta_B)+2n\pi}{f}$ を求め、これを(5)式に当てはめることで、S 波速度を算出した。

なお、計算に当たっては以下の2点に留意した。

- ① 地中の地震波には地表からの反射波が含まれるため誤差があるが、今回はそれらを含めて振動数ごとの位相差を最小二乗法により近似して求めた。
- ② そもそも非線形である大ひずみでの振動をフーリエ解析という線形理論によって解析していることに異論を唱えるところがあるかもしれない。しかし、非線形の振動を厳密に解く方法がないこと、類似の文献^{1,2)}でも同様の方法を用いていることから、フーリエ解析による位相差から伝搬速度を求めた。

(2) 地震時の S 波速度 (解析)

(1) 実測データから求めた S 波速度は、地震前の S 波速度が先に受けた地震などの影響を受けている可能性は否定できないため、元の地盤条件を一定とし実測を補足することを目的として地震応答解析を行った。地震応答解析には、材料非線形性を考慮する観点から、等価線形化手法を用いた。等価線形化手法を用いた地震応答解析プログラムとしては Schnabel らにより開発された SHAKE³⁾が有名である。また、SHAKE に改良を加えた DYNEQ⁴⁾が吉田らによって公開されており、インターネット上で自由にダウンロードできるため、手軽に利用できるといった特徴がある。筆者らは DYNEQ の適用性について検証を行っており⁵⁾、結果の妥当性を確認している。これらを踏まえて今回は等価線形化手法として、DYNEQ を用いることとした。解析条件は後述する 3. (1)地震ケース、(2)地盤条件と文献⁵⁾のとおりである。

3. 検討条件

(1) 地震ケース

検討する地震ケースを表-1 に示す。用いる強震記録は、東京でも比較的大きな揺れを観測し未曾有の大災害となった 2011 年 (平成 23 年) 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震と、これよりも比較的小さな揺れを観測した 2012 年 (平成 24 年) 5 月 29 日に千葉県北西部で発生した地震 (以下、千葉北西部での地震)、2011 年 (平成 23 年) 3 月 15 日に東京湾で発生した地震 (以下、東京湾での地震) の 3 ケースとした。

各ケースの GL-40m における強震波形を図-1~3 に示す。横軸は強震を検知してからの記録時間を示す。なお、水平成分 (ここでは南北方向) の主要動を対象の地震波とし、表面波と思われる強震記録の後部分は除外した。最大加速度は、Acc90 が約 90cm/s²、Acc17 が約 17cm/s²、Acc5 が約 5cm/s²である。

表-1 地震ケース

ケース	Acc90	Acc17	Acc5	
地震名称	東北地方太平洋沖地震	千葉北西部での地震	東京湾での地震	
地震発生時刻	2011/3/11 14:46:18	2012/5/29 1:36:47	2011/3/15 4:59:47	
震央	三陸沖	千葉県北西部	東京湾	
深さ (km)	24	64	23	
マグニチュード Mj (Mw)	(9.0)	5.2	4.1	
大手町の震度	5強	3	3	
最大加速度実測値 (cm/s ²)	GL=0m GL-12.5m GL-40m	198.0 73.3 89.6	36.5 14.4 16.7	12.1 5.2 5.0

Mj は気象庁マグニチュード、Mw はモーメントマグニチュード

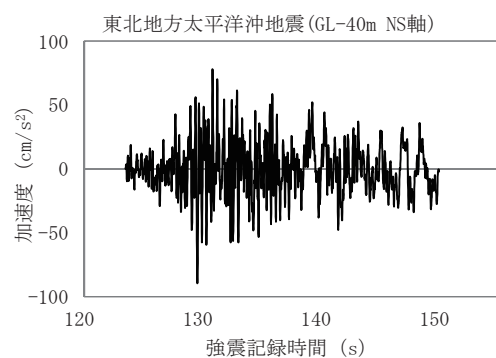


図-1 Acc90 地震波形

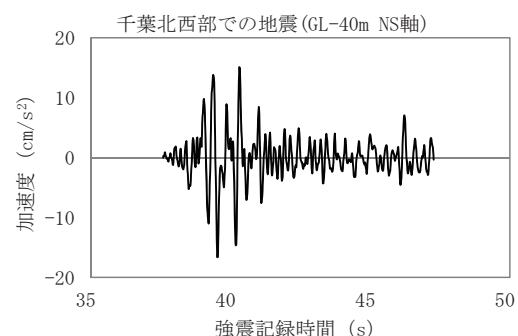


図-2 Acc17 地震波形

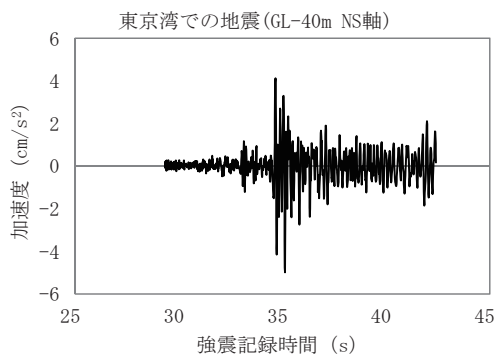


図-3 Acc5 地震波形

(2) 地盤条件

当該地点の地盤条件を表-2 に示す。土質区分及び N 値は地中強震計設置付近の地盤における既往の調査結果⁶⁾を、S 波速度は地中強震計設置時のボーリング孔を利用して PS 検層を実施した結果である。その他諸条件は文献⁵⁾によった。地表から深度 8m 程度までは N 値が小さく砂とシルトの比較的軟弱な地盤である。深度 8m を超えるあたりから N 値が大きくなり砂層が大半を占める。解析では堅硬な層が見られる GL-40m を基盤層とし、地震波の入力位置とした。

(3) 強震計

強震計の位置を図-4 に、性能を表-3 に示す。



図-4 地中強震計位置図(江戸川北工区)

表-3 地中強震計の性能

型式	JEP-4B3
加速度計	サーボ型
測定範囲	±20m/s ²
分解能	1×10 ⁻⁶ m/s ²
周波数特性	DC～450Hz
外形	φ90×540mm
質量	約 15kg

強震計は SMAC-MDU を使用している。

地表面検出器の型式は「JEP-4A3」であり、性能は、上記の加速度計・測定範囲・分解能・周波数特性と同様である。

表-2 地盤条件

層 No.	層厚 (m)	下限深度 (m)	土質 区分	S波速度 (m/s)	N値	有効拘束圧 (kN/m ²)	層区分	密度 (g/cm ³)	動的変形 特性 曲線名	備考
1	0.5	0.5	表土	120	-	-	沖積層	1.8	2	← GL=0m強震計
2	1.5	2.0	砂		3	35			9	← 地下水面
3	1.0	3.0			11	24			10	
4	1.0	4.0			砂質 シルト	5			39	
5	1.0	5.0	5	39		19				
6	2.0	7.0	2	55		20				
7	0.5	7.5	18	63		12				
8	0.5	8.0	170	18	63	12				
9	4.0	12.0		砂	50	86	30		← GL=12.5m強震計	
10	0.5	12.5			41	102	31			
11	0.5	13.0			41	102	31			
12	3.5	16.5	50		118	31				
13	4.0	20.5	250	20	149	31				
14	4.0	24.5		18	180	31				
15	4.5	29.0		14	220	32				
16	1.0	30.0		5	227	43				
17	3.0	33.0	シルト 質粘土	210	5	243	43			
18	1.0	34.0			25	267	43			
19	4.0	38.0	砂	290	38	282	32			
20	2.0	40.0			50	314	33		← GL=40m強震計	
21	基盤層			500				2.0		

(4) PS 検層概要

GL-40m のボーリング孔を利用して PS 検層を実施した。S 波については、地表に設置した板を機械式ハンマーにより左右交互に打撃することで発生させた。PS 検層概念図を図-5 に示す。

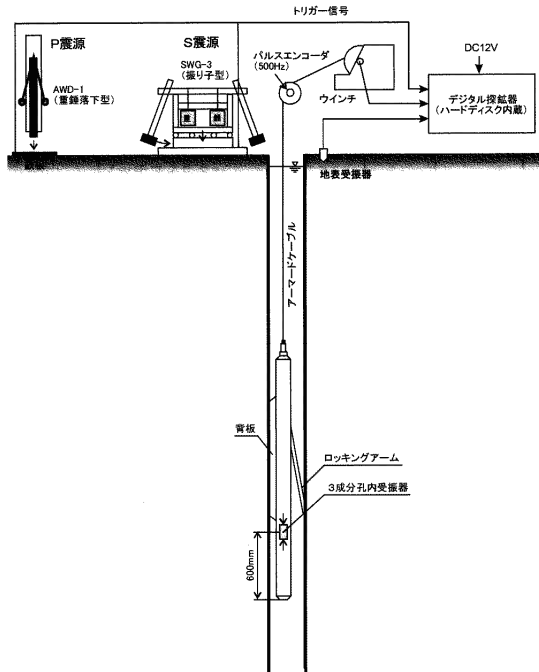


図-5 PS 検層概念図

4. 検討結果

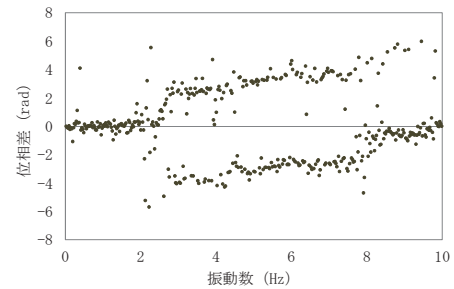
(1) 位相差と振動数の関係

3 ケースの地震発生時における 3 箇所の強震計実測データ (GL=0m、GL-12.5m、GL-40m) より、位相差を用いて S 波速度を求めた。対象とする振動数は 10Hz までである。S 波速度を算出する具体的な手順の例を図-6 に示す。

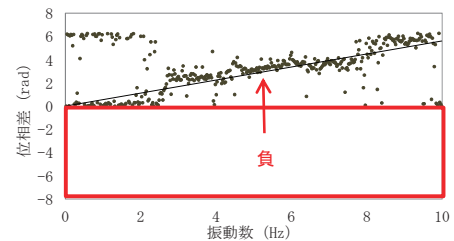
- ① 2. (1) のとおり強震時に記録された加速度履歴をフーリエ変換したものから算出した 2 地点間の位相差と振動数の関係をグラフ化する。
- ② 1 次線形の傾きを求めるため、位相差が負のものについて、その位相差に $+2\pi$ 加える。
- ③ GL=0~GL-12.5m 及び GL-12.5~GL-40m の地震波到達時間を PS 検層結果を基に計算したところ約 10Hz 以下では(2)~(5)式の n が 0 であると考えられることから、10Hz を一つの解析範囲とみなした。切片を 0 とした時の仮の 1 次線形において大きくばらつく位相差 (ここでは、 $\pm\pi$ を超えるもの) をそれぞれ仮定した線形に近づくように $\pm 2\pi$ する。

この傾きをもって前述 2. (1) の(5)式に当てはめ、S 波速度を算出する。

①



②



③

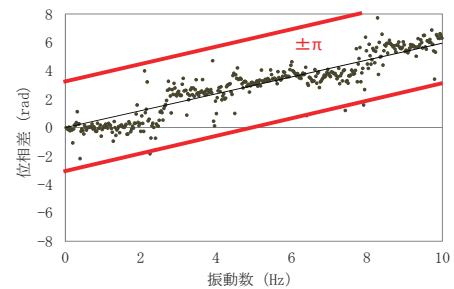


図-6 S 波速度計算手順の例

位相差と振動数の関係を図-7~図-12 に示す。全てのケースにおいて、短周期 (高振動数) になるほど位相差が大きくなる。両者の関係を最小二乗法で近似した時の寄与率 R^2 は Acc90 が 0.8 程度と相関が良いが、Acc5 は 0.5 程度とやや相関が落ちる。これは、③の手順を踏んだ時に傾きの変化が大きく、補正したにも関わらず外れ気味にプロットされたためである。しかし、全体的に相関はあると言えることから、この傾きをもって S 波速度を算出することとした。

Acc5 GL-12.5~GL-40m を除くケースにおいて、約 2Hz までの長周期 (低振動数) 側における位相差が 0 付近に集まる傾向が見られた。Acc90 においては震源が比較的遠いことから表面波を拾っている可能性があるが、Acc17、Acc5 では震源が近くその可能性が低いと考えられる。長周期側になるほど 1 波長に対する位

相差が微小であり、誤差の範囲に含まれることが要因とも考えられるが、Acc90 は後述する図-13 で示すフ

ーリエ振幅の大きい 2Hz 以下の範囲であるにも関わらず位相差が見られない原因は不明である。

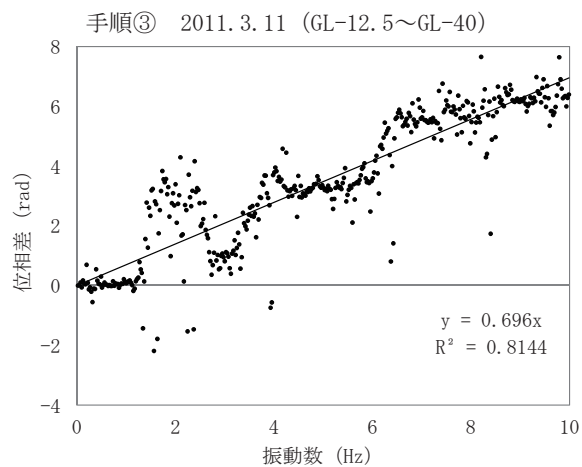
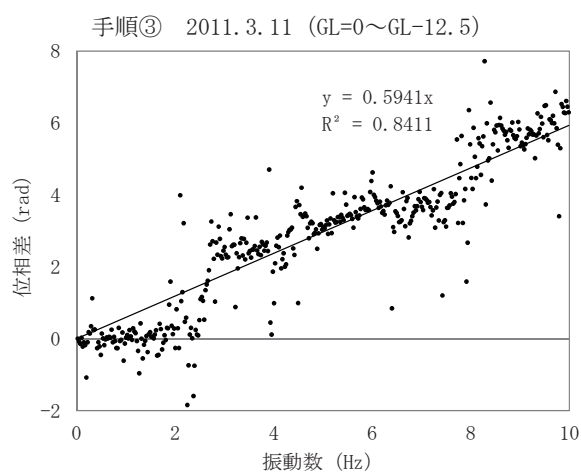
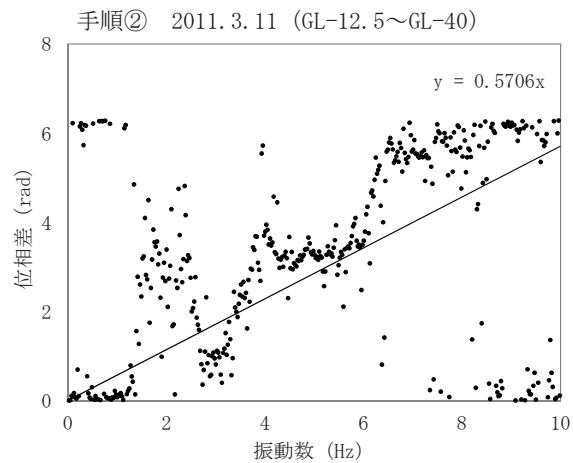
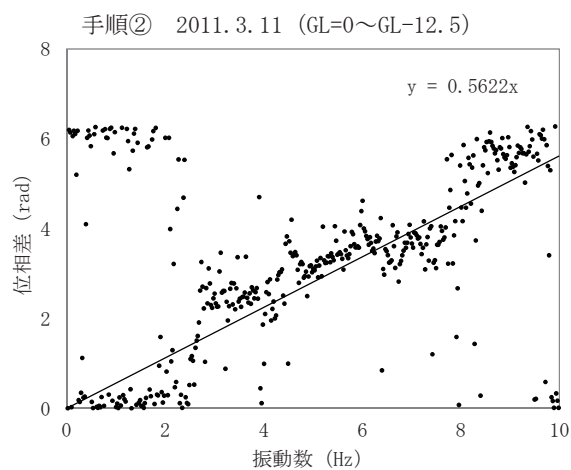
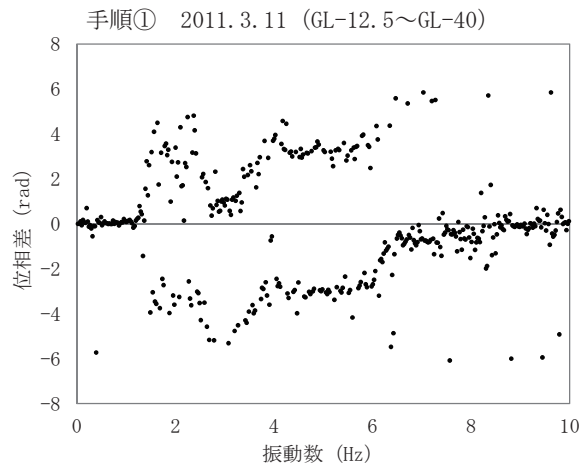
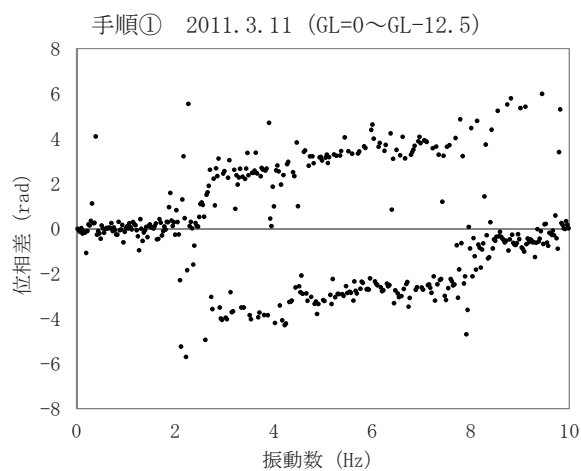
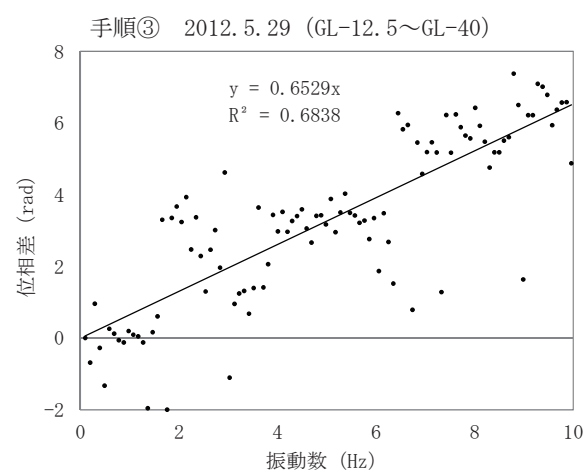
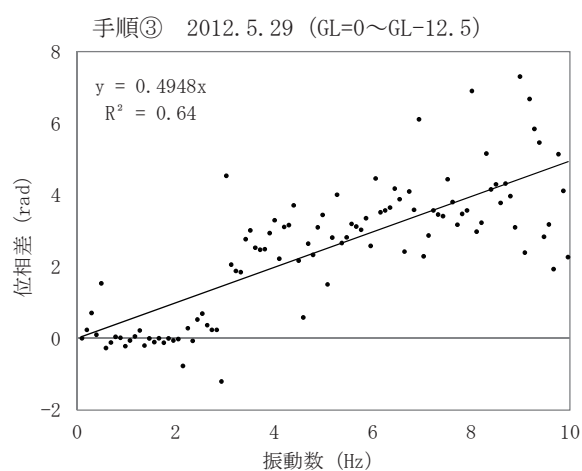
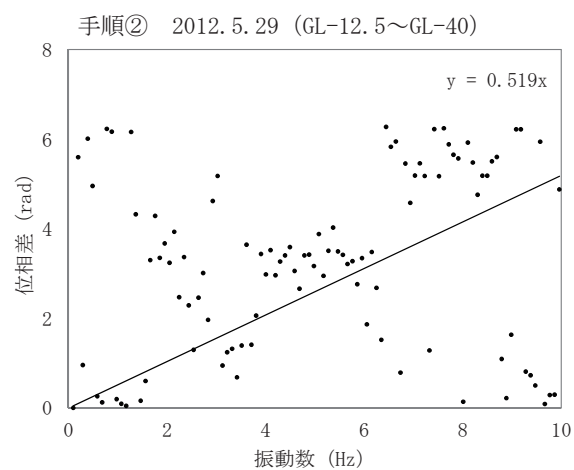
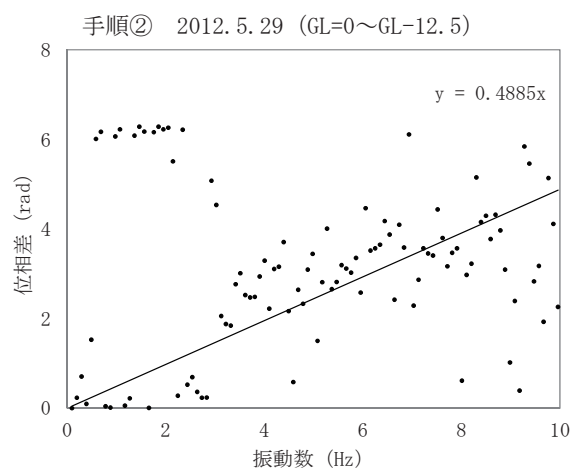
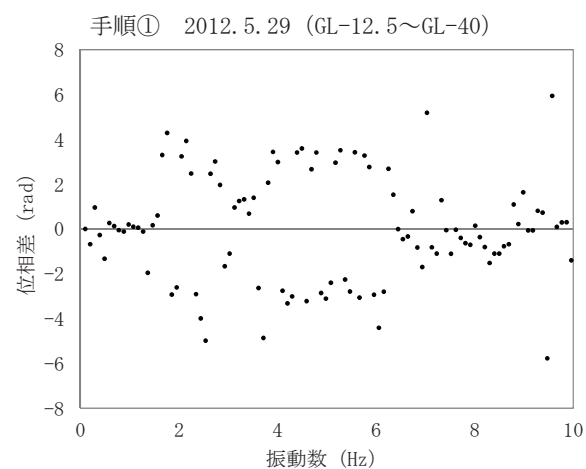
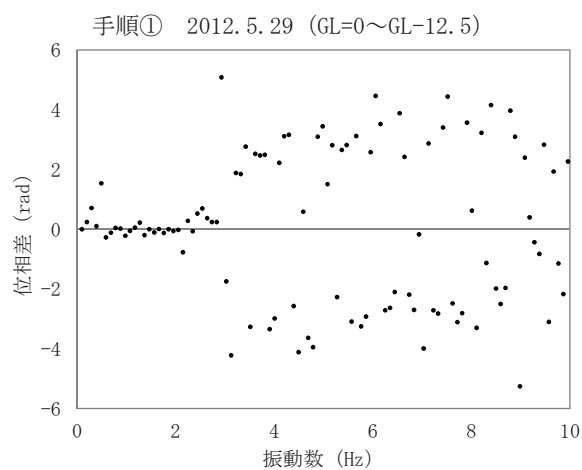


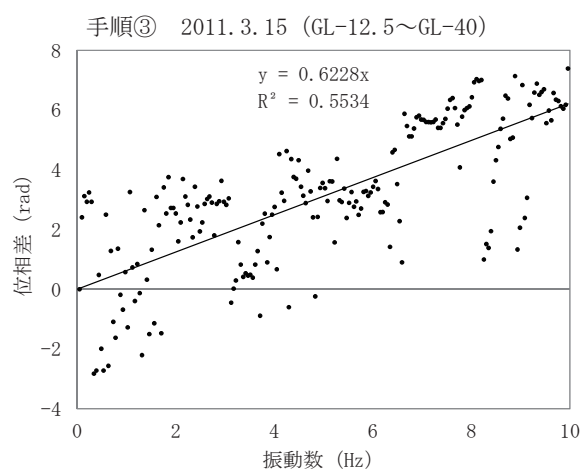
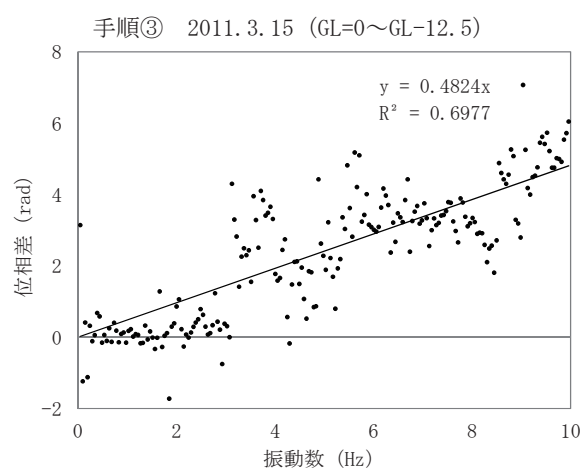
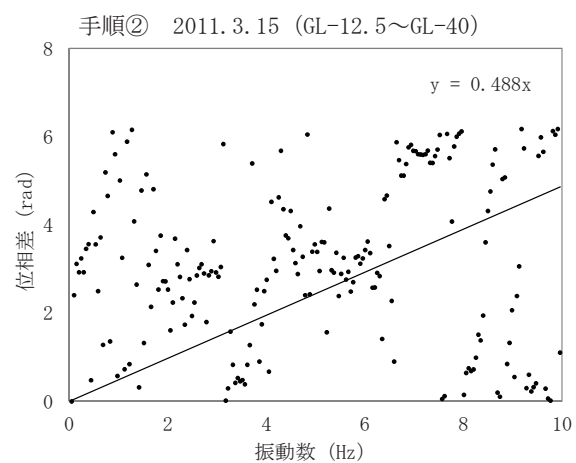
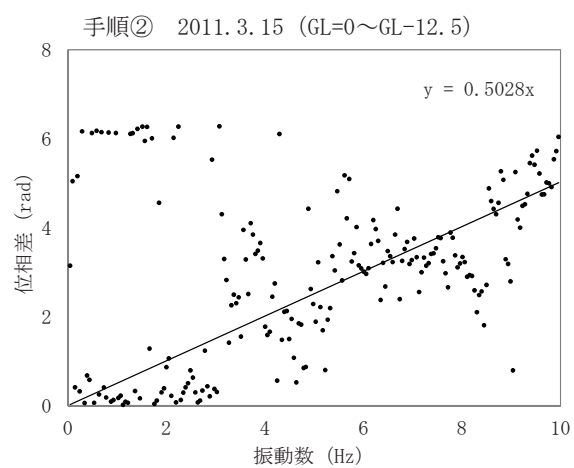
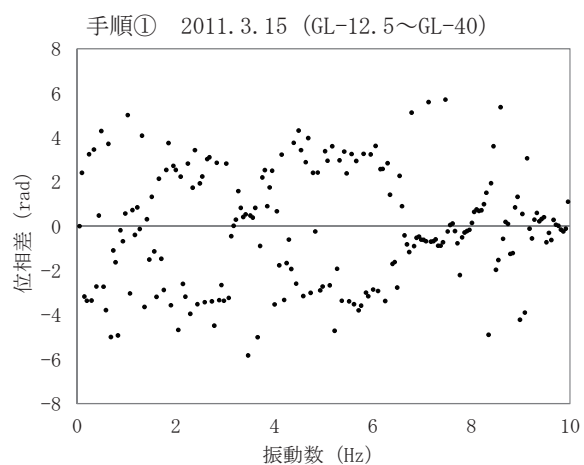
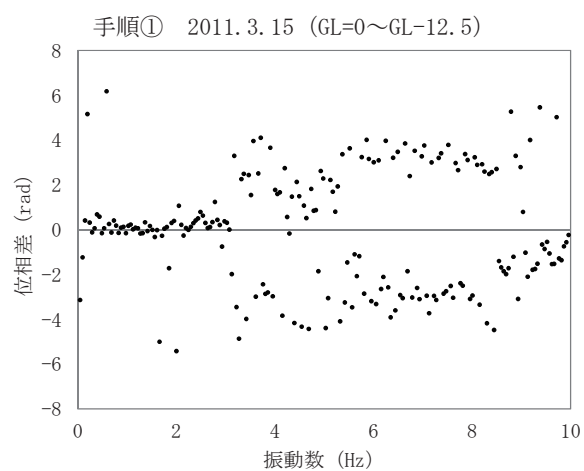
図-7 位相差と振動数(Acc90 GL0=～GL-12.5m)

図-8 位相差と振動数(Acc90 GL-12.5～GL-40m)



図－9 位相差と振動数(Acc17 GL0=～GL-12. 5m)

図－10 位相差と振動数(Acc17 GL-12. 5～GL-40m)



図－11 位相差と振動数(Acc5 GL=0～GL-12. 5m)

図－12 位相差と振動数(Acc5 GL-12. 5～GL-40m)

図-7～図-12 は、フーリエ変換後の振幅の大小問わず全ての値が含まれている。そこで、振幅の大きい値のみ抽出し同様に位相差と振動数の関係を示すことを試みた。具体的には、各強震計位置（GL=0m、GL-12.5m、GL-40m）におけるフーリエスペクトルについて、パルス状の波形を平滑化する Hanning ウィンドウ⁷⁾を実施し、その値よりも大きい振幅値のみを抽出した（図-13、14）。

抽出した振幅値で、位相差と振動数の関係を表した結果を図-15 に示す。抽出前の図-7、8 と比較すると、寄与率 R^2 は上がるが、傾きは大きく変わることはない。表-4 の S 波速度でみてもそれほど大差ないと判断し、あくまで得られた全ての実測データで分析することを意図とし、今回は Hanning ウィンドウ実施前の全ての値を対象とすることとした。

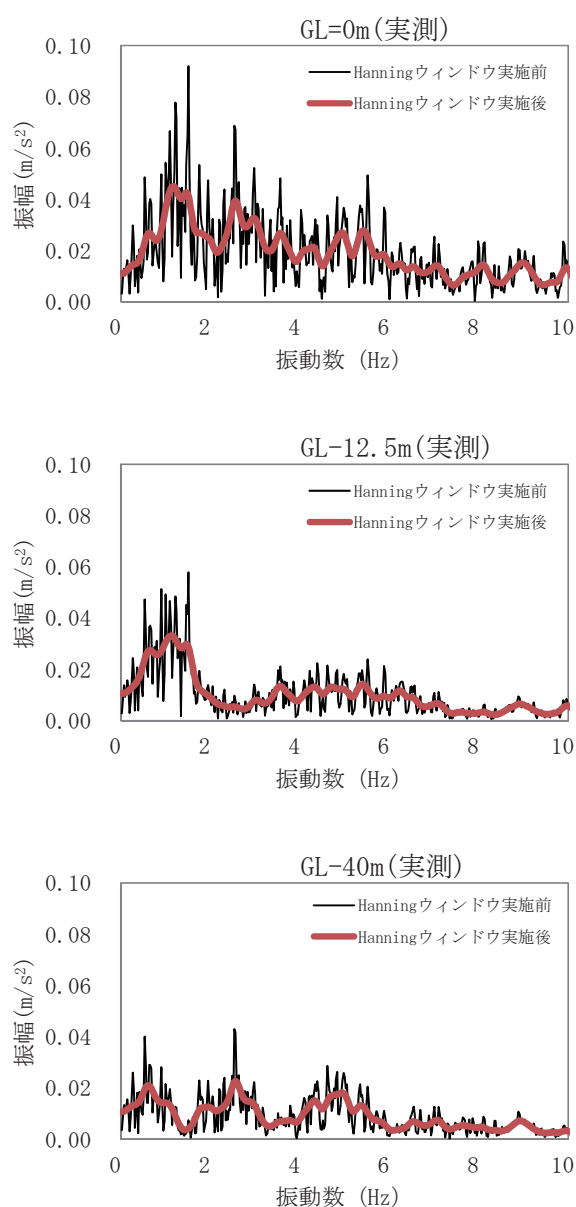


図-13 Acc90 振幅値大抽出なしのフーリエスペクトル

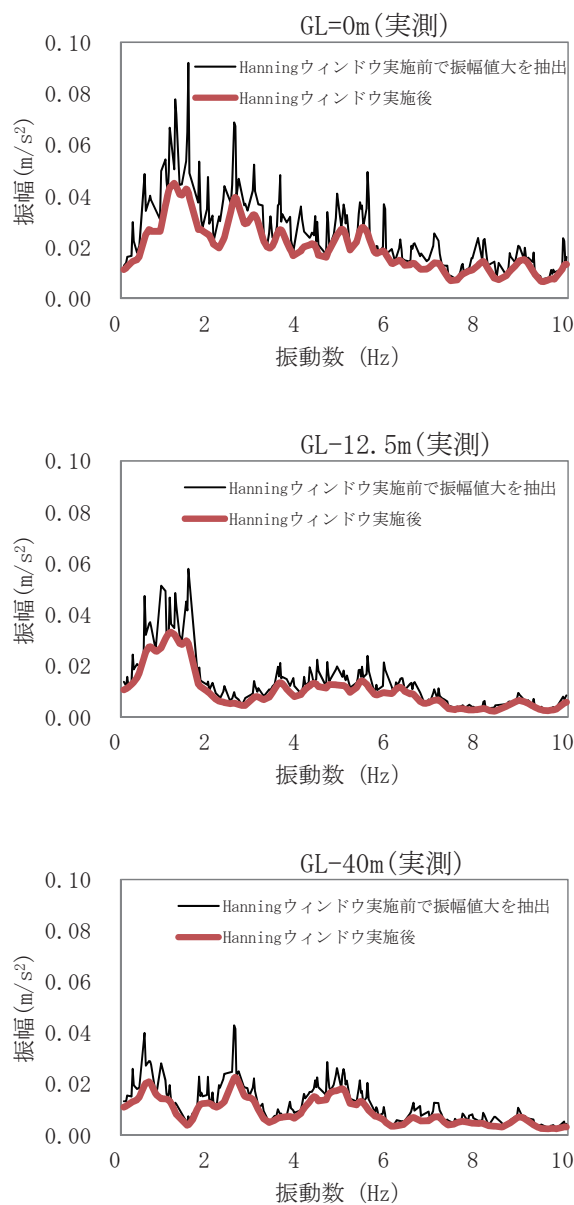


図-14 Acc90 振幅値大抽出ありのフーリエスペクトル

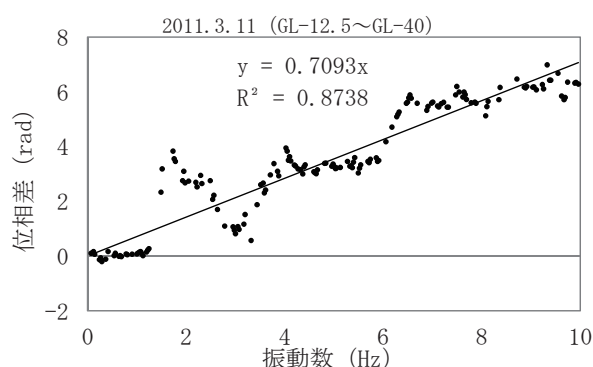
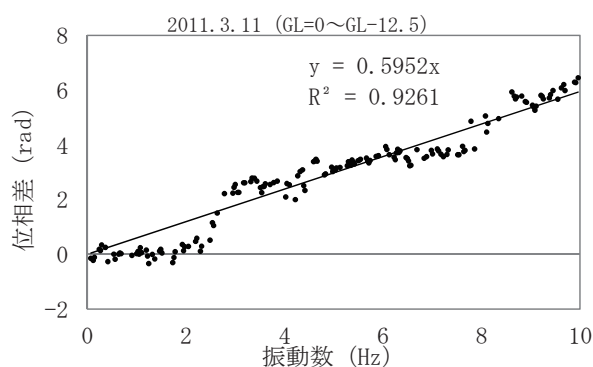


図-15 Acc90 振幅値大抽出ありの振動数-位相差

表-4 Acc90 振幅値大抽出なしとありの結果

		抽出なし	抽出あり
GL=0 ～ -12.5m	傾き	0.5941	0.5952
	寄与率 R ²	0.8411	0.9261
	S 波速度 (m/s)	132	132
GL-12.5 ～ -40m	傾き	0.696	0.7093
	寄与率 R ²	0.8144	0.8738
	S 波速度 (m/s)	248	244

(2) 地盤の S 波速度

地震を受ける前と地震時の地盤の S 波速度について、実測値の結果を図-16、解析値の結果を図-17 に示す。実測値において、深度に関わらず Acc5→Acc17→Acc90 の順に S 波速度が小さくなっている。特に浅い GL=0～GL-12.5m の位置では Acc17 と Acc5 は約 160m/s とほとんど同程度の S 波速度となっているのに対し、Acc90 は約 130m/s と約 30m/s 小さい結果となった。解析値も同様に Acc17、Acc5 に比べて Acc90 の S 波速度の方が小さくなる結果となった。

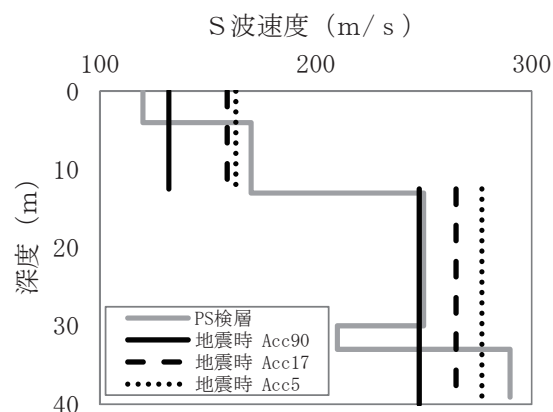


図-16 S 波速度実測値

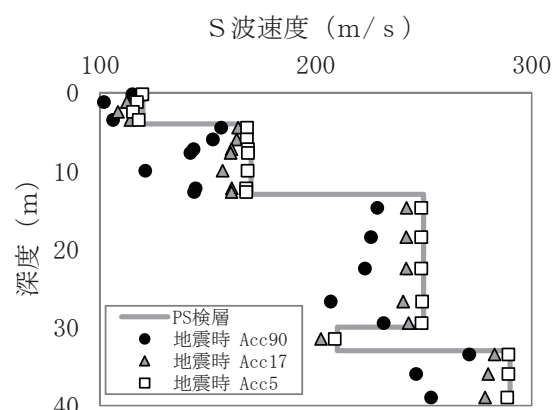


図-17 S 波速度解析値

地震時の S 波速度について PS 検層と比較した結果を図-18、19 に示す。ここで、PS 検層及び解析値の S 波速度は、図-16、17 で示す S 波速度から地盤層厚毎に伝搬時間を算出し、GL=0～GL-12.5m、GL-12.5～GL-40m のそれぞれで平均したものである。GL=0～GL-12.5m において、PS 検層の S 波速度が 151m/s に対し、地震時 Acc90 の S 波速度実測値は 132m/s と約 10%低下する結果となった。解析値においても 122m/s と約 20%の低下が見られた。GL-12.5～GL-40m においては、実測値は 253m/s から 248m/s とあまり変わらないが、解析値は 222m/s と約 10%の低下であった。

一方、地震時 Acc17、Acc5 の実測値は PS 検層に比べてやや増加する結果であった。これについて、時系列で考えると、2011 年 3 月 11 日に Acc90 の地震が発生し、その 4 日後の 3 月 15 日に Acc5 の地震が発生し、その約 1 年後の 2012 年 5 月 29 日に Acc17 が発生して

いる。文献¹⁾によると、地盤の S 波速度は強震時に低下しその後年数かけて回復に向かうとされているが、今回 4 日後に回復している結果となった。Acc17 と Acc5 の S 波速度は PS 検層の結果よりも速くなっているが、測定法の違いもあるため原因は不明である。

いずれにせよ、最大加速度との関係では、Acc90、Acc17、Acc5 の順に S 波速度の低下が大きくなっており、Acc90 のような比較的大きな地震時には地盤の S 波速度が明らかに低下することが確認された。また、S 波速度の低下は軟弱な浅い層ほど顕著であった。

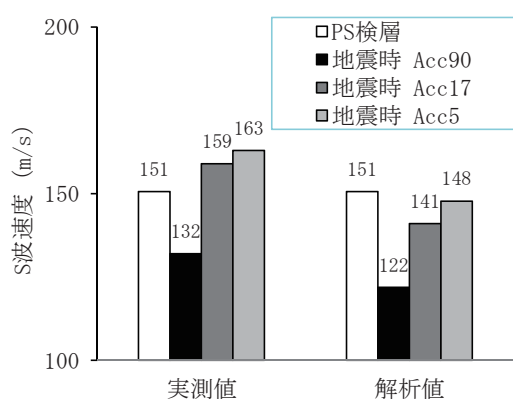


図-18 S 波速度の比較 (GL=0~GL-12.5m)

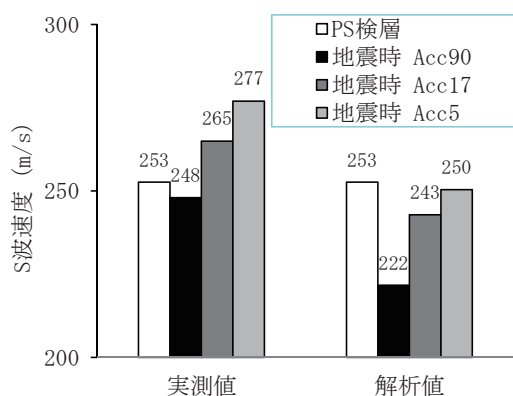


図-19 S 波速度の比較 (GL-12.5~GL-40m)

5. まとめ

地震時の地盤の剛性率（ここでは S 波速度で評価）が、地震を受ける前のそれに対しどの程度低下するか、基盤面より比較的小さい軟弱層に設置された地中強震計を利用して評価した。

その結果、地震時の S 波速度 Acc17 と Acc5 は PS 検層の結果より S 波速度が速くなっているものの、

Acc90 のような比較的大きな地震時には地盤の S 波速度が明らかに低下することが確認された。また、S 波速度の低下は軟弱な浅い層ほど顕著であった。今回の結果から、大きな地震動であるほど地盤の剛性が低下し、結果として S 波速度が低下する現象の実証例の一つとなった。

参 考 文 献

- 1) 澤崎郁, 佐藤春夫 (2006) : 強震動を受けた地盤における地震波増幅特性の時間変化の検出、東北大学大学院修士論文
- 2) Tatsuo Ohmachi and Tetsuya Tahara (2011) : Nonlinear Earthquake Response Characteristics of a Central Clay Core Rockfill Dam, Soils and Foundations Vol. 51, No. 2, 227-238
- 3) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972) : SHAKE: A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
- 4) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002) : Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol. 22, No. 3, 205-222
- 5) 栗塚一範、小川好 (2015) : 地中強震記録を用いた等価線形化手法の適用性の検証、平成 27 年東京都土木技術支援・人材育成センター年報、15-22 (http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/tech/star_t/03-jyohou/nenpo/nenpo.html)
- 6) 東京都土木技術研究所 (1996) : 東京都(区部)大深度地下地盤図 - 東京都地質図集 6- 地質柱状図集
- 7) 大崎順彦 (1994) : 新・地震動のスペクトル解析入門