

1. 地中強震記録を用いた等価線形化手法の適用性の検証

Estimation of Applicability of Equivalent Linear Method by Strong Motion Records in the Ground

技術支援課 栗塚一範、小川 好

1. はじめに

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 SHAKE¹⁾が有名であるが、SHAKE のほかに吉田らによって開発された DYNEQ²⁾もまた一般的に普及されているソフトである。DYNEQ は、アルゴリズムの詳細部分は別として、機能自体は SHAKE のそれと同様なものとされている。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。

等価線形化手法は、①地盤モデルを 1 次元とみなす、②入力波は SH 波 (S 波における下方からの鉛直入射) を与える、③土の非線形性を等価線形で表すという仮定に基づいて計算される。任意の層の波動 (入射波、反射波、複合波) を与え、任意の層の波動が取り出せる等、実用性の高い作業を行うことが出来るとされている。しかしながら、やや特殊な地盤条件においては、精度が落ちるといった欠点が指摘されている³⁾。したがって、実際使用するに当たっては使用者自らが十分検証を行い、その特性を認知した上で利用する必要がある。建設局では等価線形化手法を土木構造物の耐震設計に用いることは少ないものの、動的解析が要求される場合の設計や研究分野においては今後広く利用されていくものと思われる。今までにも数多くの研究がなされているが、さらに今後もデータを蓄積しその知見を公表することで、地震応答解析のひとつのツールとして確立していくことが求められていると考える。

一方、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。これらの強震データを用いて、等価線形化手法の研究の必要性を踏まえ、

DYNEQ による等価線形化手法の適用性を検証することとした。

2. 等価線形化手法の計算手順

等価線形化手法のプログラム内における計算手順の概要は以下のとおりである。

- ①：地盤モデルを作成する。
- ②：基盤層に地震波を与える。
- ③：フーリエ変換により基盤での周波数が求められる。
- ④：①で得られた応答倍率と②③から対象地盤の周波数応答が求められる。
- ⑤：得られた周波数応答をフーリエ逆変換し、せん断ひずみ波形が求められる。
- ⑥：求めたせん断ひずみ波形と与えられたせん断ひずみ-せん断剛性比の関係、せん断ひずみ-減衰比の関係を比較し誤差 5%以内になるまで④～⑥を繰り返す。
- ⑦：解が収束 (誤差 5%以内) した段階で計算を終了する。
- ⑧：各層での地震波形が求められる。

3. 検証方法

建設局で観測している強震記録を基に、DYNEQ による解析を実施し、実測値と解析値を比較検証することで、解析の妥当性について検証する。

(1) 解析ケース

解析ケースを表-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 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 2 ケースとした。

表-1 解析ケース

Case	地震名称	地震発生時刻	震央	マグニチュード Mj	大手町の震度
1	東北地方太平洋沖地震	2011/3/11 14:46:18	三陸沖	9.0	5 弱
2	東京湾での地震	2011/3/15 4:59:47	東京湾	4.1	3

(2) 地盤の強震記録

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、構造物と地表面を 1 セットとした基本構成としている（資料編 1 平成 26 年度の強震観測記録）。このうち図-1 に示す江戸川北工区敷地内の強震観測施設（所在地：江戸川区上一色 3-30-12）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平成 17 年度から実施している（表-2、写真-1、2）。地中強震計は深さ GL=40m、GL=12.5m に設置している。同じ位置の地表面（GL=0m）にも強震計を設置している。

今回の検証では GL=40m の強震記録を地震入力波とした等価線形解析を実施し、GL=12.5m と GL=0m での解析結果と実測結果を比較し検証する。



図-1 地中強震計位置図(江戸川北工区)

表-2 地中強震計の仕様

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、仕様は、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-3 地盤材料条件

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)	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			5	39			19	
5	1.0	5.0	砂質シルト	170	5	39	1.8	19	← GL=12.5m強震計	
6	2.0	7.0			2	55		20		
7	0.5	7.5			18	63		12		
8	0.5	8.0			18	63		12		
9	4.0	12.0	砂	250	50	86	1.8	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	シルト質砂	210	20	149	1.8	31	← GL=12.5m強震計	
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	砂	290	5	243	1.8	43	← GL=12.5m強震計	
18	1.0	34.0			25	267		43		
19	4.0	38.0			38	282		32		
20	2.0	40.0	砂	290	50	314	1.8	33	← GL=40m強震計	
21	基盤層					500				

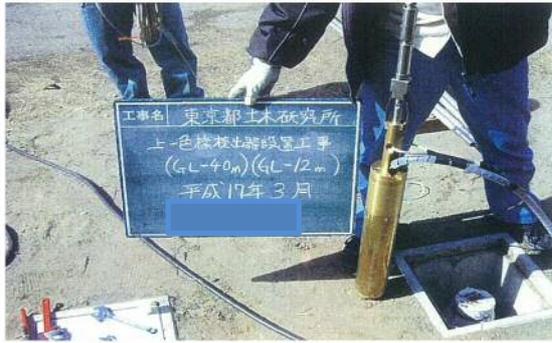


写真-1 地中強震計外観

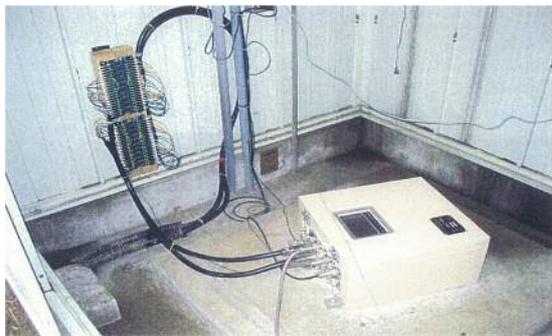


写真-2 強震計外観 (地表面)

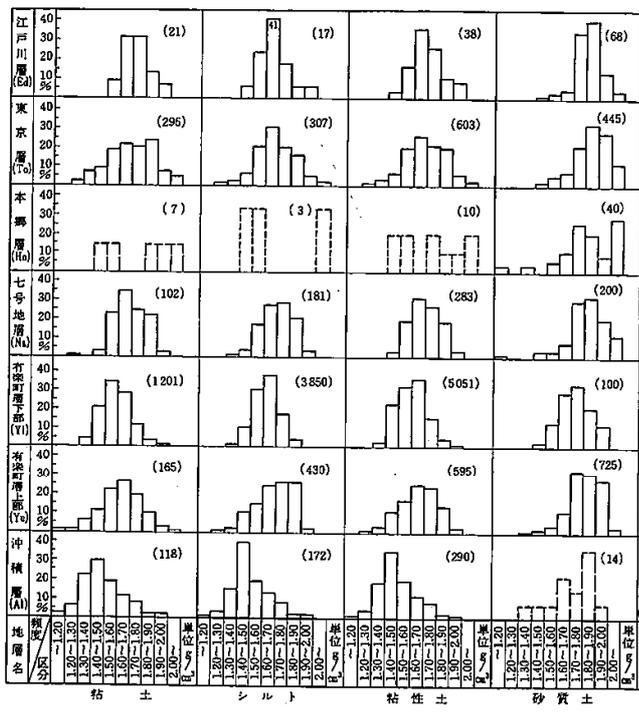


図-2 単位体積重量頻度分布⁵⁾

4. 解析条件

解析に用いた地盤材料条件を表-3 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⁴⁾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を用いている。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。GL-40m を解析の基盤層とした。全体的に砂質土であることから、密度は既存資料⁵⁾ (図-2) から 1.8g/cm^3 とした。既存の資料⁶⁾を基に、土質区分、N 値、有効拘束圧から求まる動的変形特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を図-3 に示す。

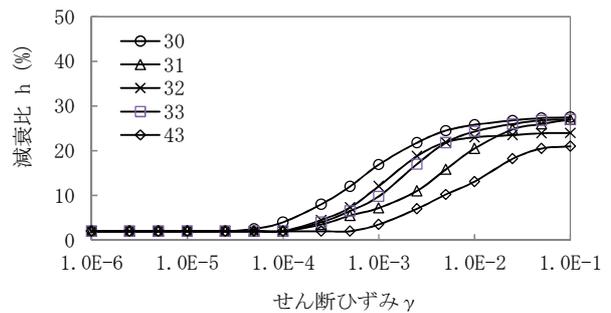
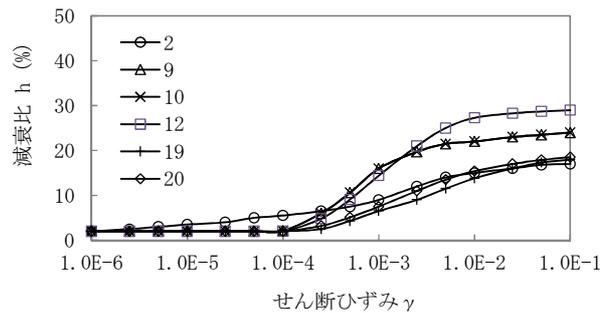
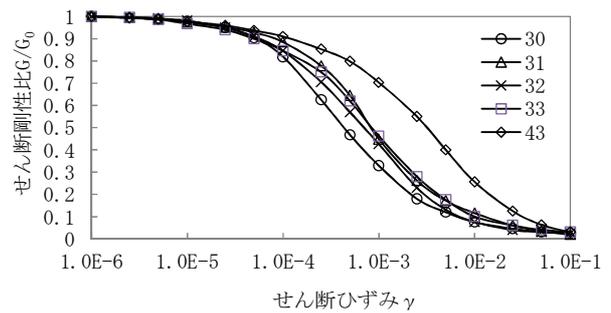
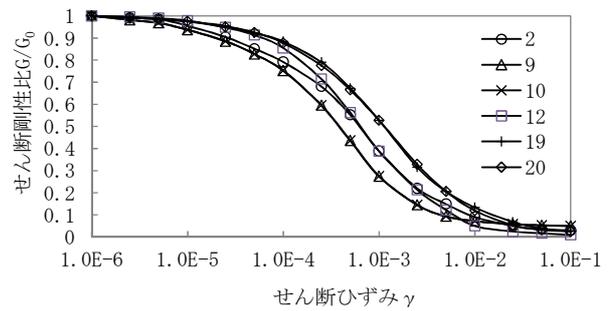


図-3 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線⁶⁾

解析条件を表-4 に示す。地震入力波を図-4、5 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、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、Case1 が約 90cm/s^2 であるのに対し、Case2 は約 5cm/s^2 である。

表-4 解析条件

複素剛性の計算方法	$G^*=G(1-2h^2+2jh\sqrt{1-h^2})$ (SHAKE での改良)
散乱減衰	考慮しない
材料の種類	非線形
地震波の種類	複合波
有効ひずみ	有効ひずみは周波数に依存しない(SHAKE の方法)

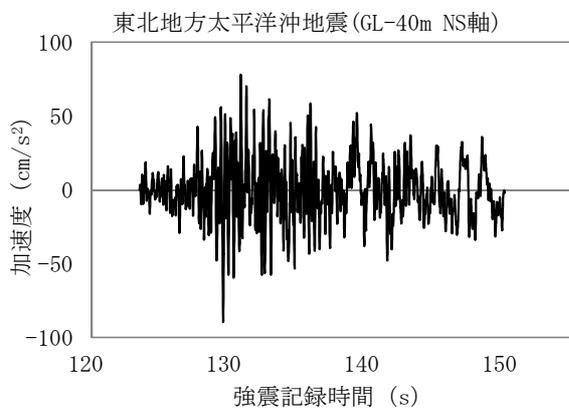


図-4 Case1 入力地震波

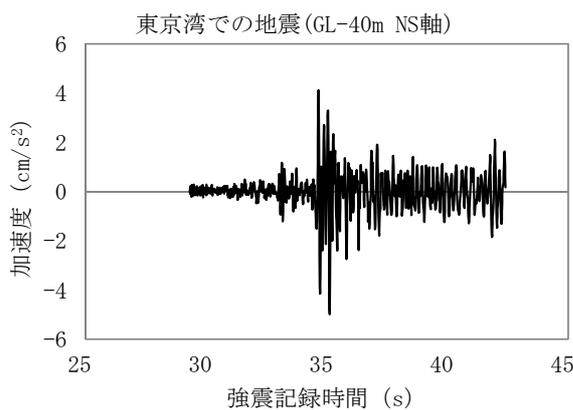


図-5 Case2 入力地震波

5. 解析結果

等価線形化手法による地震応答解析を実施し、実測値と比較した。以下に検証した結果を述べる。

(1) Case1: 東北地方太平洋沖地震

1) 周波数特性結果

フーリエスペクトルについて、実測値と解析値の結果を図-6、7、8 に示す。実測値は経時毎の加速度を FFT(Fast Fourier Transform) 解析し求めたものである。縦軸の単位系は、実測値、解析値ともに m/s^2 とした。ここで、フーリエ解析はパルス状に示されており、平滑化させるため Hanning ウィンドウ⁷⁾ を実施した。Hanning ウィンドウとは、フーリエ・スペクトルのある値とその両隣の値に、重み 0.25、0.50、0.25 与えて平均し、その平均値をその点におけるスペクトル値とみなすものである。必要であればこの作業を繰り返し、収束した時点で平滑化の終了とする。今回は Hanning ウィンドウを 30 回繰り返した。図には平滑後の結果も合わせて示している。

GL=0m の卓越周波数は、実測値、解析値ともに 1.17Hz であった。GL=-12.5m の卓越周波数は、実測値が 1.12Hz、解析値が 1.15Hz であった。地表面、地中内どちらにおいても、実測値を反映できる結果となった。

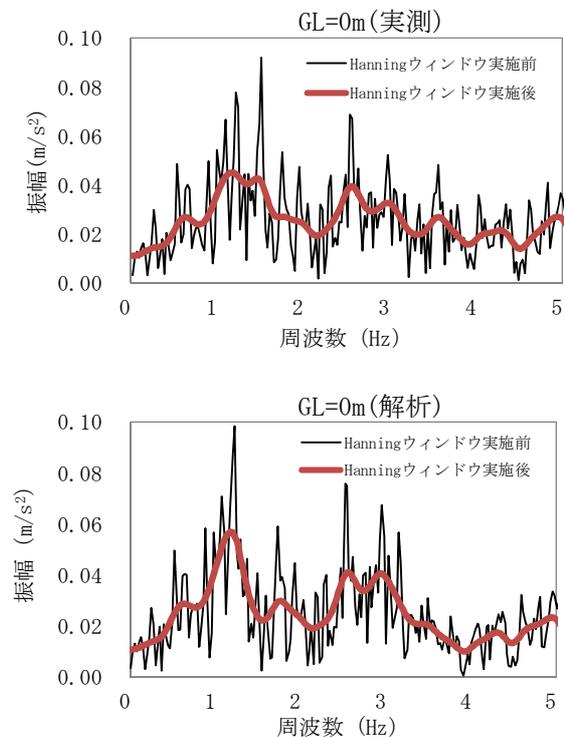


図-6 フーリエ・スペクトル
GL=0m (Case1)

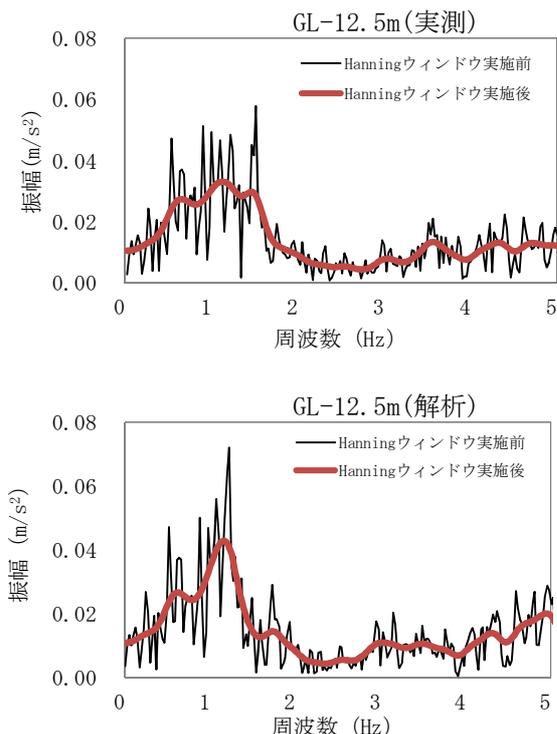


図-7 フーリエ・スペクトル
GL-12.5m (Case1)

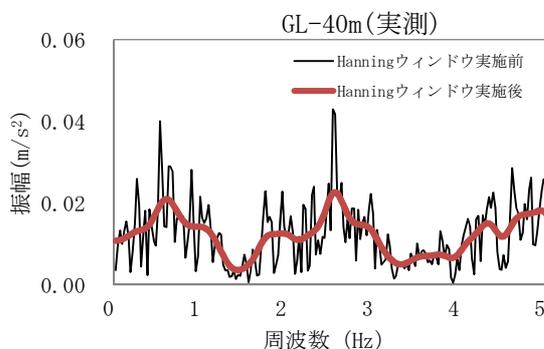


図-8 フーリエ・スペクトル
GL-40m (Case1)

GL-40m の卓越周波数は複数見受けられ、1 次モードが 2.56Hz、2 次モードが 0.61Hz であったが、両者の振幅に大きな差異はない。

GL-40m に対する GL=0m の増幅スペクトル解析結果を図-9 に示す。ここで、増幅率は基準層(ここでは GL-40m)と対象層(ここでは GL=0m)の間における地震動の増幅の程度を表すものである。1 次モードが 1.32Hz、2 次モードが 5.88Hz、3 次モードが 3.22Hz であった。

これらの結果をまとめたものが、表-5 である。GL-40m の卓越周波数が 2.56Hz、0.61Hz と 2 つ存在することになるが、増幅率の 1 次モードが 1.32Hz と卓越することから、GL=0m はその値に近い 1.17Hz に収まったと考えられる。このことから、解析結果は妥当であると判断される。

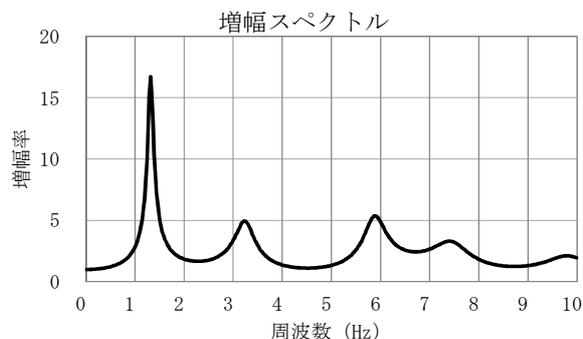


図-9 増幅スペクトル解析結果 (Case1)

表-5 周波数特性まとめ (Case1)

	実測	DYNEQ による解析	
	周波数 (Hz)	周波数 (Hz)	増幅率 (Hz)
GL=0m	1.17	1.17	1 次:1.32 2 次:3.22 3 次:5.88
GL-12.5m	1.12	1.15	—
GL-40m	2.56 0.61	—	—

2) 加速度時刻歴波形結果

加速度時刻歴波形結果を図-10 に示す。GL=0m における実測の波形と解析の波形はほぼ同様の波形を示しており、DYNEQ による解析が比較的精度よく計算されていることがわかる。一方、GL=-12.5m における実測の波形と解析の波形は加速度ベクトルが逆転する結果となった。この理由は設置された強震計のベクトルが逆になっているのではないかと推測される。ただし、加速度値等を比較すると概ね同様の波形が得られていることから、解析精度は良好であると言える。GL-12.5m の強震計が逆向きに設置されていたことは、今まで及びこれからの強震記録の取扱いに注意する必要があるものの、設計や研究分野では加速度最大値の方が大きな影響を及ぼすことから、特に問題視する必要はない。

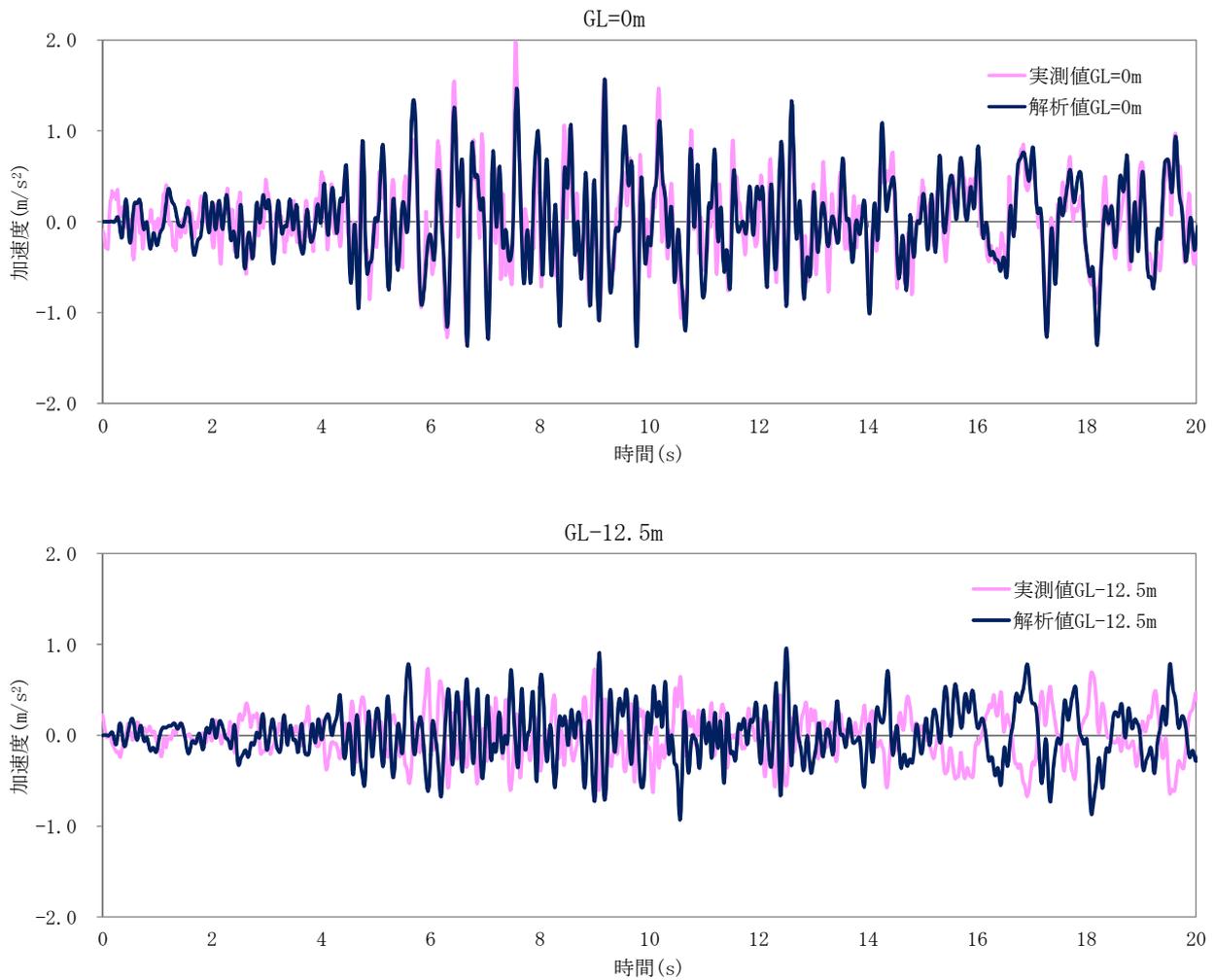


図-10 加速度時刻歴波形 (Case1)

(2) Case2: 東京湾での地震

1) 周波数特性結果

フーリエスペクトルについて、実測値と解析値の結果を図-11、12、13 に示す。Case1 と同様に Hanning ウィンドウを 30 回繰り返し平滑化して求めた。

実測値と解析値のスペクトルを比較すると、GL=0m において、実測値は卓越する周波数が複数存在するが、解析値はそれがひとつに集約される傾向である。GL=0m の卓越周波数は、実測値が 5.03Hz、解析値が 6.84Hz であった。一方、GL=12.5m においては、実測値、解析値の卓越周波数はほぼ同じ結果となった。GL=12.5m の卓越周波数は、実測値が 7.03Hz、解析値が 6.79Hz であった。これより、実測値と解析値は GL=12.5m ではほぼ一致するが、GL=0m では約 2Hz 乖離する結果となった。

GL=40m に対する GL=0m の増幅スペクトル解析結果を図-14 に示す。1 次モードが 1.51Hz、2 次モードが 3.91Hz、3 次モードが 6.69Hz であった。

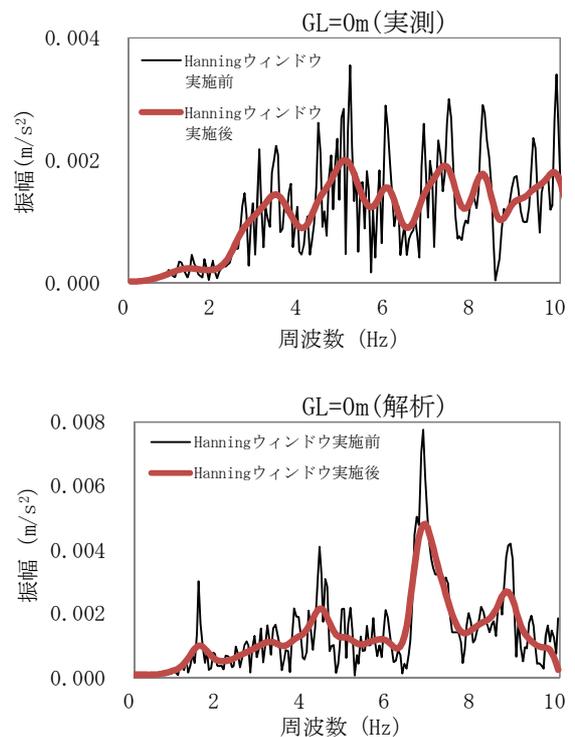


図-11 フーリエ・スペクトル
GL=0m (Case2)

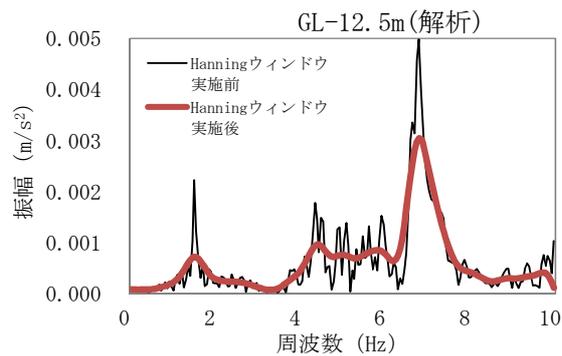
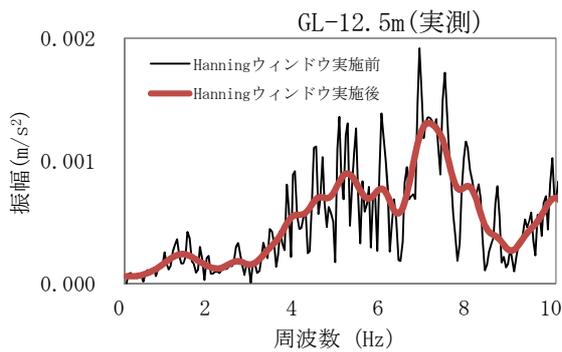


図-12 フーリエ・スペクトル
GL-12.5m (Case2)

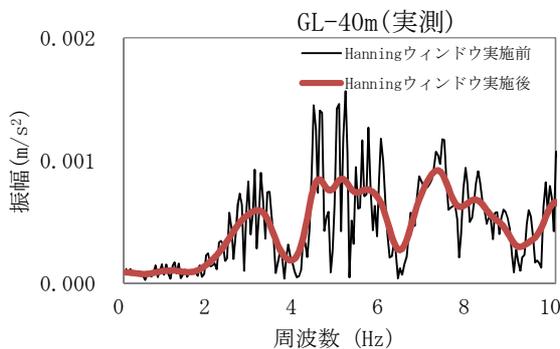


図-13 フーリエ・スペクトル
GL-40m (Case2)

周波数特性をまとめたものを表-6 に示す。GL-40m が 7.28Hz、解析結果から得られた GL=0m が 6.84Hz であることから、3 次モードの増幅率が効いてきているようである。今回は解析ケース数が少なく断定できないが、小規模地震では精度がやや落ちるのかもしれない。ただし、実務で利用するのは、比較的大きな地震であるため、特に問題視するほどでもないと考えられる。

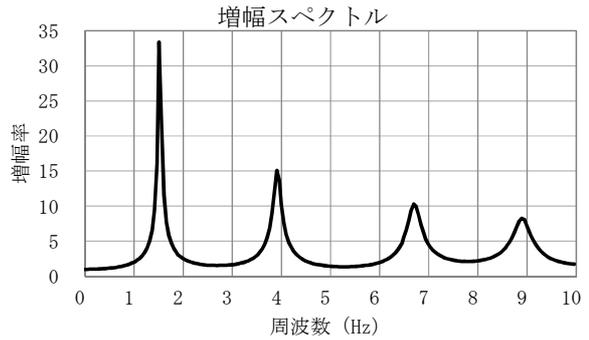


図-14 増幅スペクトル解析結果 (Case2)

表-6 周波数特性まとめ (Case2)

	実測	DYNEQ による解析	
	周波数 (Hz)	周波数 (Hz)	増幅率 (Hz)
GL=0m	5.03	6.84	1 次:1.51 2 次:3.91 3 次:6.69
GL-12.5m	7.03	6.79	—
GL-40m	7.28 5.03	—	—

2) 加速度時刻歴波形結果

加速度時刻歴波形結果を図-15 に示す。GL=0m における実測の波形と解析の波形はほぼ同様の波形を示しており、DYNEQ による解析が比較的精度よく計算されていることがわかる。一方、GL=-12.5m における実測の波形と解析の波形は Case1 同様に加速度ベクトルが逆転する結果となった。

6. まとめ

比較的大きな揺れを観測した東北地方太平洋沖地震及び比較的小きな揺れを観測した東京湾での地震を入力波として、地中強震計を用いて、等価線形化手法の適用性を検証した。以下に得られた知見を示す。

(1) 周波数特性

規模が大きい地震においては、比較的良好的に実測値を反映できる結果となった。一方、規模が小さい地震においては、地表面の実測値と解析値がやや乖離する結果となった。ただし、実務で利用するのは比較的大きな地震であるため、特に問題視するほどでもないと考えられる。

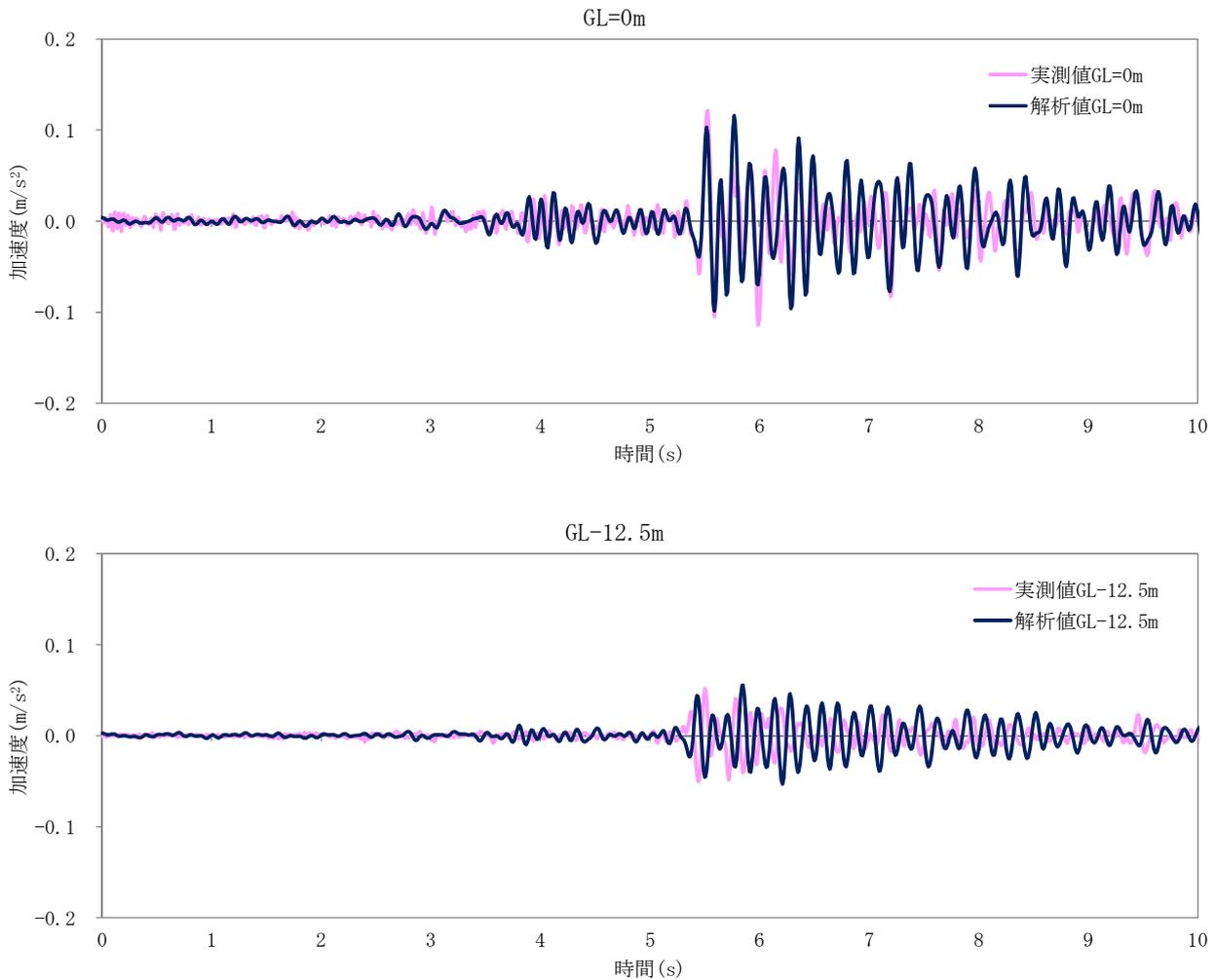


図-15 加速度時刻歴波形 (Case2)

(2) 加速度波形

規模が大きい地震、小さい地震ともに、実測の波形と解析の波形はほぼ同程度の結果が得られた。ただし、GL-12.5m で加速度ベクトルが逆転する結果となった。強震計設置時において、ベクトルを逆に設置した可能性があると考えられるが、実務上特に問題視するものではないと考える。

今回の結果から、小規模の地震では少し精度が落ちる傾向が見られたが、同じ地盤条件で大規模な地震動

の解析結果では妥当な結果であると判断されることから、この地盤が特殊な地盤条件というわけではなさそうである。大規模な地震であれば精度の良い計算結果が得られることがわかった。今回の結果が、工学に携わる技術者の研究課程の一助になれば幸いである。

最後に本報告を作成するにあたり、大崎順彦先生の著書⁷⁾を参考にさせていただきました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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 Engineering, Vol. 22, No. 3, 205-222
- 3) 吉田望 (1994) : 実用プログラム SHAKE の適用性, 軟弱地盤の地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 14-31
- 4) 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
- 5) 東京都土木技術研究所 (1977) : 東京都総合地盤図 I, 東京の地盤(1)
- 6) 東京都土木技術研究所 (1987) : 東京低地の液状化予測
- 7) 大崎順彦 (1994) : 新・地震動のスペクトル解析入門