

入力波動場による、3次元地盤応答解析法

飯田昌弘

東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: iida@eri.u-tokyo.ac.jp

入力地震波動場（波動が伝播している空間）による、3次元非線形地盤応答解析法を提案する。地盤の小領域への入力地震動では、地震による表面波を取り扱うことができない。S波及び表面波の加速度波動場を、小地震の地表及び地下の加速度記録を使用して評価する。両波動場の和である、全体波の加速度波動場を入力波動場として、3次元非線形地盤応答解析を実施する。解析法を、表面波が卓越するメキシコ市の軟弱地盤と硬質地盤に位置する2観測点に適用し、方法の線形解析の有効性を確認する。他方、入力地震動による地盤応答では、適切な応答が得られない。

Key Words : Input seismic wave field, 3D nonlinear soil response method, surface waves, Mexico City

1. 目的

地盤-建物系の地震応答相互作用解析や、地盤や建物の地震応答非線形解析などでは、対象とする浅い地盤の小領域において運動方程式を取り扱う。この地盤の小領域への入力地震動には、2つの問題点がある。第1に、浅い地盤内における地震動の増幅は、地震波動の種類によって異なる。従って、波動の種類を識別する必要がある。第2に、地震による表面波は、深い構造によって励起されて伝播するもので、浅い構造内だけを伝播するものではない。すなわち、地盤の小領域への入力地震動では、表面波を取り扱うことができない。

他方、軟弱層においては、S波の増幅よりも表面波の増幅が大きい。従って、軟弱地盤の短周期表面波は、もし発生して伝播（存在）すれば、最も警戒すべき波動である。この表面波に対する地盤応答解析を可能にするため、入力地震波動場による3次元地盤応答解析法を提案する¹⁾。波動場は、波動が伝播している空間を意味する。本稿の目的は、この応答解析法の考え方を、わかりやすく示すことである。

表-1 使用された深い構造。177mより浅い構造は、測定値である。177mより深い構造は、測定された深いP波速度に基づく推定値である。3種類のQ値が仮定される。

深さ (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	Q値		
				QS	QI	QL
0-	1430	90	1.2	30	5	3
5-	1430	30	1.1	20	5	2
12-	1430	55	1.1	20	5	2
25-	1430	80	1.2	30	5	3
33-	1430	200	1.4	100	20	10
36-	1430	130	1.4	100	20	10
44-	1780	400	1.5	100	20	10
55-	1580	250	1.5	100	20	10
65-	1750	430	1.7	100	20	10
102-	1940	660	1.7	200	40	20
122-	1750	430	1.7			20
130-	2250	920	1.9			20
138-	1760	500	1.8			20
160-	2070	670	1.8			20
177-	2600	1120	2			20
1100-	3300	2600	2.3			100

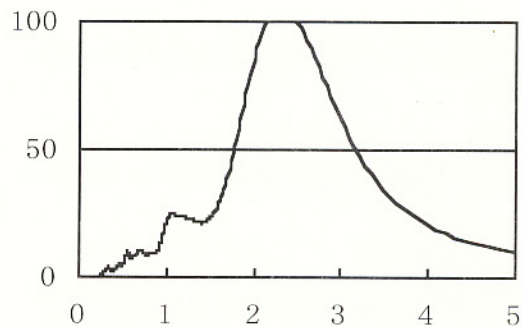
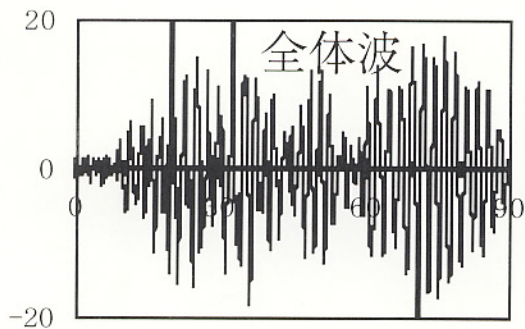
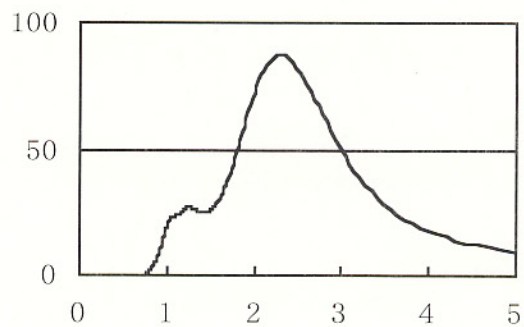
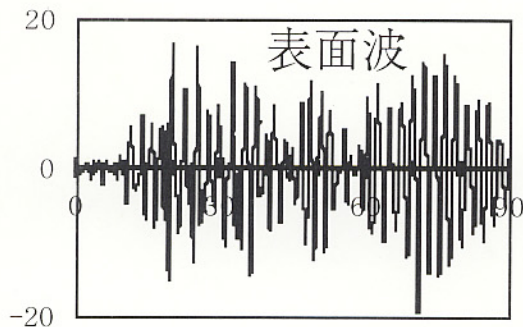
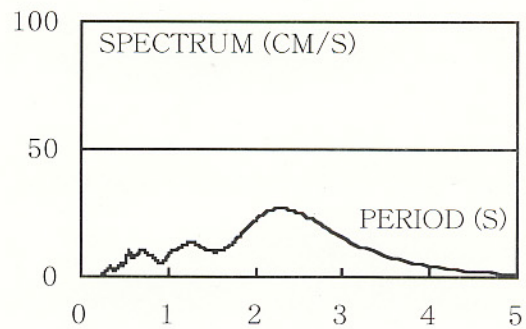
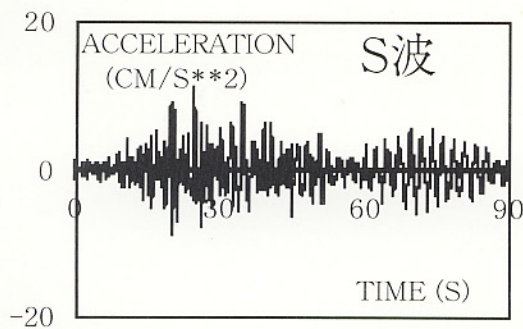


図-1 地表の S 波、表面波及び全体波の加速度波形と、それらのフーリエスペクトル。

2. 方法

入力波動場による 3 次元非線形地盤応答解析法は、以下の 4 段階からなる¹⁾。なお、水平 2 成分を対象とする。(1) 波動の種類識別。小地震の地表及び地下の加速度記録を使用して、相互相関法により、地表の記録を S 波及び表面波の加速度波形に分離する。また、表面波の種類を識別する。(2) 大地震の地震動の合成。地表において、経験的グリーン関数法により、対象とする大地震の S 波及び表面波の加速度波形を合成する。(3) 加速度波動場の構築。

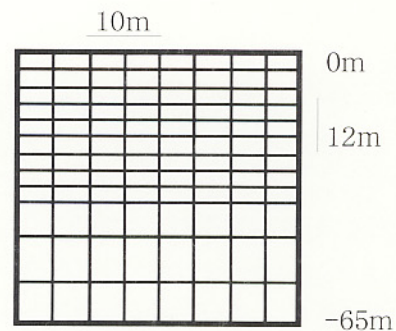


図-2 3 次元地盤要素モデル。

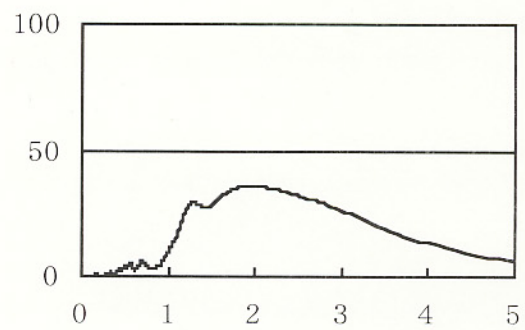
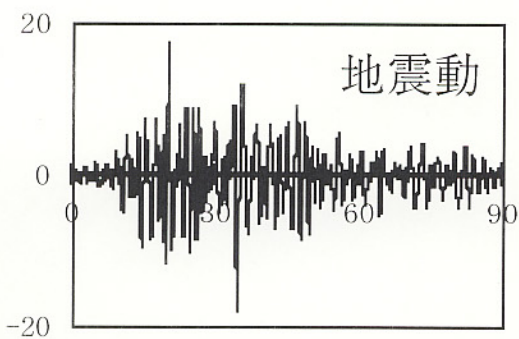
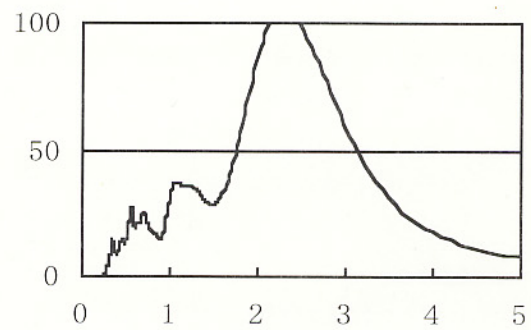
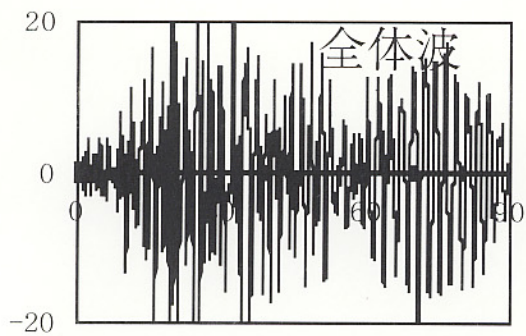
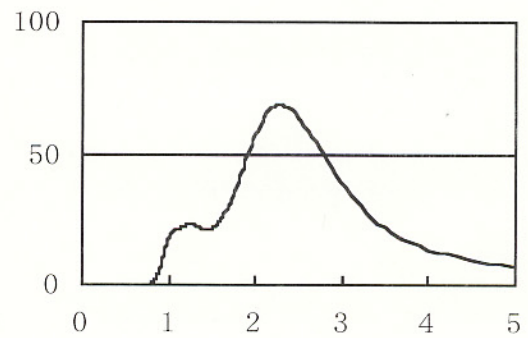
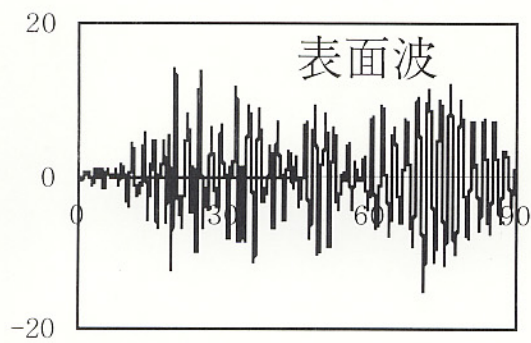
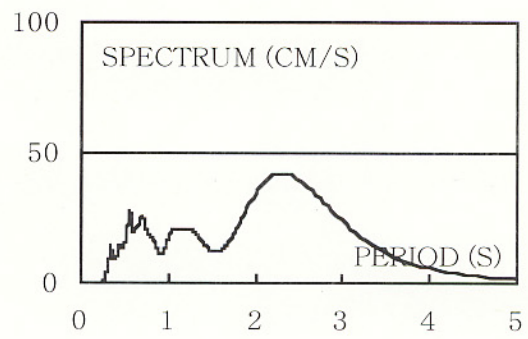
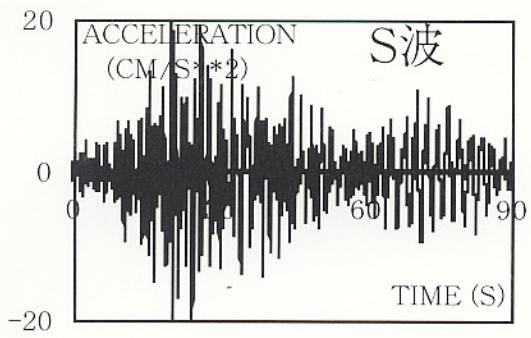


図-3 4 種類の入力による地表の応答加速度波形と、それらのフーリエスペクトル。

地表の S 波及び表面波の加速度波形から、弾性波動論により、S 波及び表面波の 3 次元加速度波動場を構築する。(4) 地盤応答解析の実施。両波動場の和である、全体波の 3 次元加速度波動場を入力波動場として、有限要素法に基づく、3 次元非線形地盤応答解析を実施する。

第 4 段階の地盤の状態が変化すれば、第 3 段階の S 波及び表面波の加速度波動場を修正する。本稿では、この非線形解析に先だち、線形解析の有効性を実証する¹⁾。線形解析では、第 2 段階が必要がなく、第 4 段階から第 3 段階へのフィードバックがない。

3. 地震波の増幅

3 次元線形地盤応答解析法を、メキシコ市の軟弱地盤及び硬質地盤に位置する Roma-C 及び Coyoacan ポアホール観測点に適用する¹⁾。本稿では、Roma-C 観測点の EW 成分のみを示す。

まず、遠距離地震(1995年9月14日、M=7.3)の地表と地下加速度記録を解析する^{2), 3)}。地表と地下102mの記録の、フーリエスペクトル振幅比を計算する^{2), 4)}。

次に、S 波及び表面波の水平動の理論振幅比を、1次元弾性波動論に基づいて計算する^{2), 4)}。表面波は、基本モードのラブ波及びレーリー波を対象とする。表-1に、使用された深い構造を示す。S 波では、102m 以浅の構造と、QS(短周期用の小減衰)と QL(長周期用の大減衰)の2種類の減衰を使用する。表面波では、177m 以浅の構造と全体構造と、QLの減衰を使用する。

S 波では、減衰がないとしても、観測される大きな増幅を説明できない。浅い構造によって励起される表面波でも、説明できない。他方、深い構造によって励起されるラブ波もしくはレーリー波として、観測された増幅を説明できる。ラブ波のほうが卓越するので、表面波をラブ波と仮定する。

4. 波動分離と波動場構築

まず第1段階として、相互相関法である木下法⁵⁾を改良して、地表の加速度記録を、S 波及び表面波の加速度波形に分離する²⁾。図-1に、分離された S 波、表面波及び両波の和である全体波の加速度波形を示す。表面波が優勢である。

次に第3段階として、弾性波動論に基づき、S 波と表面波の 3 次元加速度波動場を構築する。S 波では、前述の浅い構造と QI(全周期用の中間減衰)を、表面波では、前述の全体構造と QLを使用する。

さらに、全体波の加速度波動場を得る。

5. 地盤応答解析

有限要素法に基づく、入力地震動による 3 次元非線形地盤応答解析を、すでに実施した⁶⁾。最後に第 4 段階として、この解析法を改良して、3 種類の波動場を入力波動場として、線形地盤応答解析を実施する。図-2に、3 次元地盤要素モデル(水平 2 方向に同じ)を示す。表-1 のパラメータを使用する。

適当地盤の減衰(レーリー減衰)を仮定すれば、3 種類の入力波動場を概ね復元できる。他方、入力地震動による地盤応答解析では、適切な応答を得られない。なお、入力地震動では、地盤モデル底面の加速度波形を、地盤モデル全体に作用させている。図-3に、3 種類の入力波動場及び入力地震動による、地表の応答加速度波形を比較する。地盤応答は、前述の地震波の増幅の特徴を反映している。

6. 結論

入力地震波動場による、3 次元線形地盤応答解析法の有効性を実証した。入力地震動による地盤応答解析では、適切な応答を得ることができなかった。なお、入力地震波動場による、3 次元地盤-建物系相互作用解析も実施している。

参考文献

- 1) Iida, M. : 3 D soil response method based on an input seismic wave field, J. Geotech. Geoenviron. Eng., Am. Soc. Civil Eng. (submitted).
- 2) Iida, M., and Kawase, H. : A comprehensive interpretation of strong motions in the Mexican Volcanic Belt, Bull. Seismol. Soc. Am. (submitted).
- 3) Iida, M. : A systematic method for analyzing borehole recordings to estimate the wavefield in the lakebed zone of Mexico City, Bull. Seismol. Soc. Am., 90(5), 1268-1280, 2000.
- 4) 飯田：メキシコ市の軟弱地盤における地震動の、地震波の種類とその増幅、土木学会年次学術講演会、第 58 回第 I 部門、2003.
- 5) Kinoshita, S. : A stochastic method for investigating site effects by means of a borehole array — SH and Love waves, Bull. Seismol. Soc. Am., 89(2), 484-500, 1999.
- 6) Iida, M. : 3D analysis of S-wave propagation in soft deposits, J. Geotech. Geoenviron. Eng., Am. Soc. Civil Eng., 125(9), 727-740, 1999.

(2003. 9. 10 受付)