

地震計アレー観測結果の逆解析とその結果の信頼性評価

岐阜大学工学部 学生員 ○西川原 和幸
 岐阜大学工学部 正会員 本城 勇介
 岐阜大学工学部 正会員 小尻 利治
 (株)竹中工務店技術研究所 正会員 吉澤 睦博

1.はじめに

構造物の地震時の安全性や、地盤の液状化予測のためには、深い基盤から入力する地震波が、それぞれのサイトでどのように増幅され伝播されるかを知ることが極めて重要である。東京都江東区のあるサイトで得られた観測結果の逆解析を行い、地震の規模により生じる地盤のひずみの差により、地盤の剛性や減衰が異なるこれらの土の定数がひずみに依存することを、逆解析により現位置データを用いて確認した。この研究成果を踏まえ、この研究で、地震波のフーリエ変換で得られる複素部の情報も加えた逆解析を行う。

2.研究内容

2-1 土の動的性質と応答解析

地盤の地震時の応答を知る上で最も重要な役割を果たすのは、土または岩石の変形特性である。変形特性はせん断剛性や減衰比という形で表現される。土について動的変形特性がひずみと共にいかに変化するかを概略を、モデル化と解析法と共に示したのが図1である。

ひずみ	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
	微小ひずみ	微小ひずみ	中ひずみ	大ひずみ	破壊ひずみ	破壊ひずみ
弾性	→					
弾塑性	←					
破壊	←					
繰り返し効果	←					
速度効果	←					
モデル化	弾性モデル	粘弾性モデル	履歴追跡モデル			
応答解析法	重複反射法	等価線形型解析法	逐次積分解析法			

図1 ひずみの大きさによる土の動的性質とそれに対するモデル化と応答解析法の分類

このようなひずみの大きさによる土の性質の変化は、土の変形特性のモデル化や応答解析法の選択

に、大きな影響を及ぼすことになる。中程度のひずみが生じるような場合の応答解析では弾塑性の変形特性を考慮する必要がある。これを弾性モデルで表現し、等価線形解析法を用いることが多い。これについては、電算プログラム"SHAKE"が開発され広く実務で用いられている。本研究も、このレベルのひずみを対象としている。

2-2 理論

線形応答解析手法である、重複反射理論において多層地盤中の波動伝播に関する一般解は、水平変位u、せん断波速度V、角振動数ωと未知定数E、Fとして進行波、後退波の和の形で次式のように与えられる。

$$u_j = E_j \exp \left[i\omega \left[t + \frac{Z_j}{V_j} \right] \right] + F_j \exp \left[i\omega \left[t - \frac{Z_j}{V_j} \right] \right] \quad (j=1 \dots N)$$

2-3 解析手法

任意の2地点間A、Bで得られる加速度のフーリエ変換は、次式により与えられる。

$$\begin{aligned} A(\omega i) &= Ar(\omega) + i * Ai(\omega) \\ B(\omega i) &= Br(\omega) + i * Bi(\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

これを用いて伝達関数の振幅スペクトルは、

$$T(\omega) = \sqrt{\frac{Ar^2 + i * Ai^2}{Br^2 + i * Bi^2}} \quad (2)$$

また、位相スペクトルφ(ω_k)は、

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{ArBr + AiBi}{AiBr - ArBi} \right] \quad (3)$$

以上の関数は、重複反射理論より得られる理論解、また実観測データの双方から求められる。ここでは、観測データから求められたものにつ*をつけることにより、理論解と区別する。(2),(3)式の計算例(理論解)を図2に示す。

逆解析では、 $T(\omega)$ と $\phi(\omega)$ を直接用いず、次のような2種類の最小化されるべき、目的関数を考える。以下(4)、(5)式

$$\begin{aligned} \min J_1(G, h) &= \min \sum_{j=1}^N \left\{ \left[\text{Ar}(\omega_j | G, h) \text{Br}(\omega_j | G, h) + \text{Ai}(\omega_j | G, h) \text{Bi}(\omega_j | G, h) \right] \right. \\ &\quad - \left. \left(\text{Ar}^*(\omega_j) \text{Br}^*(\omega_j) + \text{Ai}^*(\omega_j) \text{Bi}^*(\omega_j) \right) \right\}^2 \\ &\quad + \left\{ \left[\text{Ai}(\omega_j | G, h) \text{Br}(\omega_j | G, h) - \text{Ar}(\omega_j | G, h) \text{Bi}(\omega_j | G, h) \right] \right. \\ &\quad - \left. \left(\text{Ai}^*(\omega_j) \text{Br}^*(\omega_j) - \text{Ar}^*(\omega_j) \text{Bi}^*(\omega_j) \right) \right\}^2 \end{aligned}$$

または、

$$\begin{aligned} \min J_2(G, h) &= \min \sum_{j=1}^N \left[\frac{\text{Ar}^2(\omega_j | G, h) + \text{Ai}^2(\omega_j | G, h)}{\text{Br}^2(\omega_j | G, h) + \text{Bi}^2(\omega_j | G, h)} - \frac{\text{Ar}^* \text{Ai}^* (\omega_j)}{\text{Br}^* \text{Bi}^* (\omega_j)} \right]^2 \\ &\quad + \left[\frac{\text{Ar}(\omega_j | G, h) \text{Br}(\omega_j | G, h) + \text{Ai}(\omega_j | G, h) \text{Bi}(\omega_j | G, h)}{\text{Ai}(\omega_j | G, h) \text{Br}(\omega_j | G, h) + \text{Ar}(\omega_j | G, h) \text{Bi}(\omega_j | G, h)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\text{Ar}^*(\omega_j) \text{Br}^*(\omega_j) + \text{Ai}^*(\omega_j) \text{Bi}^*(\omega_j)}{\text{Ai}^*(\omega_j) \text{Br}^*(\omega_j) - \text{Ar}^*(\omega_j) \text{Bi}^*(\omega_j)} \right]^2 \end{aligned}$$

(4)式は、伝達関数の実部と虚部を直接的に最小化しようとするものであり、(5)式は振幅及び位相の計算で用いられる成分の実質的な部分の最小化をはかったものである。問題に不適切性が生じた時には、拡張ベーズ法を用い、事前情報を加えることにより問題の適切かをはかる。

3. 実観測地震概要及び解析地盤モデル

東京都の(株)竹中工務店東陽町における地震観測データを用いる。設置地震計はG1(GL-3.5m)とG2(GL-11.2m)、G3(GL-44.4m)の3カ所に設置してある。観測地点の地盤は典型的な軟弱地盤であり、地盤調査がGL-150mまで詳細に行われている。逆解析の対象としては表2に示す9波を用いた。伝達関数は、G1/G2間、G2/G3間、G1/G3間と3つの伝達関数を用いる。図2は、G1/G3間の伝達関数の振幅スペクトル(T)及び、位相(ϕ)の推定減衰比0.02での相互相関性についてのグラフである。

4. おわりに

解析結果の詳細、評価は、講演時にゆずる。

表-1 逆解析対象地震の諸元

Nb	地震Nb	日付	震央	Mag	Depth (km)	Dist (km)	NS	
							G1/G2 (deg)	G1/G3 (deg)
1	11	1982.7.23	千葉県沖	7.0	30	200	20.5	21.9
2	33	1983.2.27	茨城県南部	6.0	72	42	80.8	77.2
3	45	1983.8.8	神奈川県 神奈川山崎町境	6.0	22	73	14.0	16.1
4	56	1984.1.1	近畿南部	7.3	388	357	18.8	19.4
5	63	1984.3.6	鳥島付近	7.9	432	707	16.0	21.5
6	131	1985.11.6	瀬田半島南部	5.0	63	51	18.2	19.1
7	173	1987.12.17	瀬田半島	6.7	58	69	47.4	65.5
8	197	1988.2.19	茨城県南西	5.6	56	40	25.6	23.7
9	239	1992.2.2	東京都	5.9	92	49	49.4	49.1

表-2 解析用地盤モデル

層番号	土質	層厚 h(m)	土の密度 ρ (t/m ³)	せん断剛性 G(MPa)	せん断波速度 Vs(m/sec)
1	互層混じり粘土	2.8	1.8	141.1	280.0
	互層混じり粘土				
2	砂質シルト	4.8	1.91	48.9	160.0
	細砂				
3	シルト質細砂	3.1	1.85	26.6	120.0
4	シルト	6.8	1.55	12.8	91.0
5	シルト	3.9	1.55	32.1	144.0
6	砂質シルト	6.5	1.75	62.5	189.0
7	粘土	5.7	1.70	89.9	230.0
8	粘土質細砂	11.0	1.80	112.5	250.0
	砂質粘土				
9(基底)	細砂	7.2	2.00	245.0	350.0

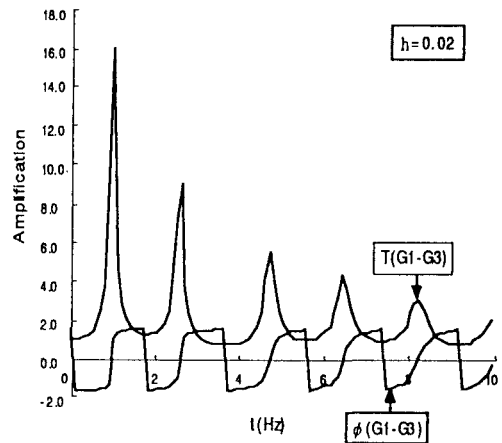


図2 東京都東陽町地盤のT、 ϕ グラフ

参考文献

- 1) 石原研而：土木工学大系 8 土質動力学、地盤の地震応答解析、pp. 217~309、1980
- 2) 岩本悟志・本城勇介：実地震アレー記録の伝達関数に基づく動的地盤定数の逆解析、第31回地盤工学研究発表会、2分冊の1、pp5~6、1996