

地盤の1次元地震応答解析に与える 地盤物性のバラツキの影響

高橋佳宏¹・國生剛治²

¹正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社 名古屋保線所 (〒453-0013 愛知県名古屋市東区中村区亀島 2-3-2)

²正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

一般に地震応答解析に用いる地盤物性は、測定データなどに基づき確定論的にその物性値を決定している。しかし実際、地盤物性にはバラツキがある。本研究では、地盤物性のうち、せん断波速度(V_s)と規準ひずみの(γ_r)バラツキに着目し、それらに対数正規分布により近似したものを、モンテカルロ法により確率論的にランダムサンプリングしたデータを用いて、1次元等価線形解析を実施した。その結果、地盤の増幅特性が物性値の変化に対し複雑な変動を示すことにより、平均物性値を用いた確定論的解析による地表での最大加速度・速度と、確率論的解析による平均値に大幅に違いがあることがわかった。また V_s の変動係数が解析結果に与える影響の方が γ_r の変動係数の影響よりも大きいことがわかった。

Key Words : earthquake response analysis, probabilistic approach, soil property, shear wave velocity, reference strain, equivalent-linear analysis, dispersion

1. 地盤物性のバラツキについて

地震応答解析に用いる地盤物性は、対象とするサイトの地盤において、標準貫入試験やPS検層などの方法で測定したデータに基づき推定する。また室内試験データや、経験式を用いられることもある。これらのデータにより地盤をモデル化し、地震応答解析を行う。しかし、地盤材料が本来自然から与えられたものである以上、人為的誤差を除いたとしても、同じ層の地盤物性値はバラツキをもって得られるのが普通である。よって、地盤を構成する土質のバラツキを適切に評価し、それらを用いた解析結果に与える影響を検討する必要がある。そこで、阪神地域の地盤を対象として、地震応答解析を実施する上で重要なパラメータである、せん断波速度(以後 V_s)と規準ひずみ(以後 γ_r)についてのバラツキを分析し、それらが解析結果に及ぼす影響を検討した。

(1) せん断波速度(V_s)のバラツキについて

V_s は、通常現位置においてPS検層で計測される。 V_s と標準貫入試験の N 値との間には、一般に式(1.a)で近似される。

$$V_s = a \cdot N^b \quad (1.a)$$

ここで、 a, b は土質別の定数である。

この関係を用い、阪神地域周辺で実施されていたPS検層結果¹⁾²⁾³⁾を利用し、阪神地域の地盤における土質別の

標準貫入試験の N 値と V_s との関係を定式化した。図-1は、一例として上部洪積砂礫層(UDg)における関係を示したものである。図-1に示したように、 N 値と V_s の間にはある程度相関があるものの、相当のバラツキがあるのも事実である。よって、このようなバラツキを評価するために、式(1.b)で V_s を正規化した。

$$V_s' = \frac{V_s}{N^b} \quad (1.b)$$

図-3(a)は、上部洪積砂層(UDs)における正規化せん断波速度(V_s')のヒストグラムを示したものである。図中の曲線は、ヒストグラムを対数正規分布にフィッティングしたものであり、概ねこの分布形状に対応しているのがわかる。このようにして求めた各土質別の変動係数を、表-1のCASE-1に示す。CASE-2,3とは、その値を2倍、0.5倍したケースである。

(2) 規準ひずみ(γ_r)のバラツキについて

γ_r は、原位置で採取した不攪乱資料を用いて、室内試験により動的変形特性を求めることで得ることができる。すなわち、せん断剛性 G が初期剛性 G_0 に対し、 $G/G_0=0.5$ となるひずみ振幅を γ_r と定義する。また図-2に示すように、非粘性土の規準ひずみは有効拘束圧(σ'_v)に依存し、Hardin-Drnevichモデルによると、式(1.c)のように表すことができる。

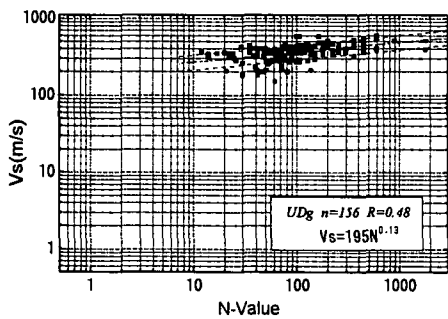


図-1 阪神地域における土質別の N 値と V_s の関係

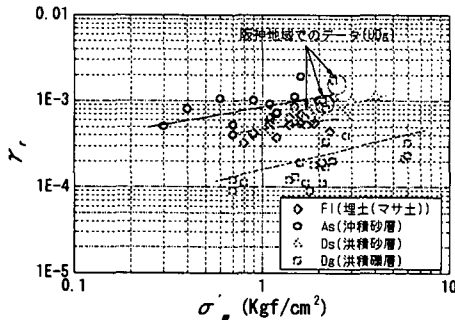


図-2 有効拘束圧と規準ひずみの関係
(上部洪積砂礫層(UDg))

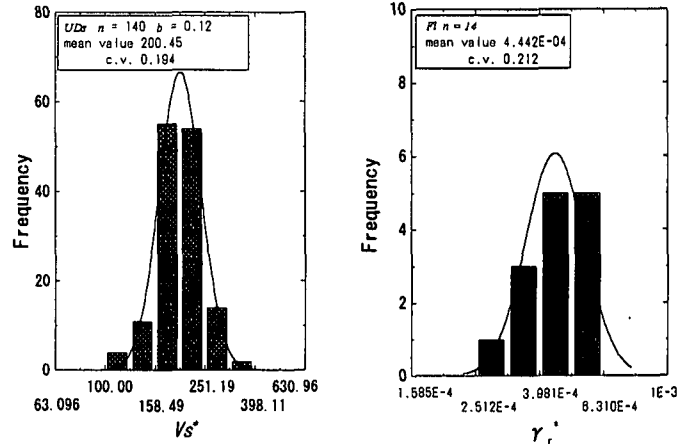
$$\gamma_r^* = \frac{\gamma_r}{(\sigma_m')^{0.5}} \quad (1.c)$$

もし土質材料が均質であれば、正規化規準ひずみは一定の値を示すはずだが、実際にはバラツキを呈する。よって、非粘性土については正規化した規準ひずみ (γ_r^*) により、また粘性土については、直接 γ_r の値によりバラツキを評価した。図-3(b)に、埋土層(FI)の正規化規準ひずみのヒストグラムを示す。図中の曲線は、ヒストグラムを対数正規分布にフィッティングしたものである。正規化 V_s に比べデータ数が少ないので、分布形状にやや無理があるものもあるが、概ねよく対応している。このようにして求めた各土質別の変動係数を表-1のCASE-4に示す。CASE-5,6とは、その値をほぼ2倍、0.5倍したケースである。 V_s' , γ_r' 共に、このように分布形状を仮定することで、 V_s' , γ_r' を各地層ごとにランダムサンプリングするモンテカルロシミュレーションが可能となった。これにより、地盤物性のバラツキを考慮した、確率論的手法による地震応答解析を実施した。

2. 解析手法

(1) 地盤物性のバラツキを考慮した地震応答解析

地盤物性のバラツキの影響を考慮した地震応答解析の結果を評価するための考え方には、大別して以下の2つ



(a) V_s' (上部洪積砂層(UDs)) (b) γ_r^* (埋土層(FI))

図-3 V_s' , γ_r^* のヒストグラム

の方法⁸⁾がある。

a)バラツキを統計的に処理して得られた、確定的な地盤物性で検討する方法(確定論的手法)

b)個々の地盤の物性値を確率変数として扱い、確率論的に検討する方法(確率論的手法)

本研究では、a)の確定論的手法において、バラツキを考慮する地盤物性値の平均値、[平均値±標準偏差]、[平均値±0.5×標準偏差]を解析用物性値として用いる5通りの解析を実施し、b)の確率論的手法の結果との比較した。また確率論的手法においては、ランダムサンプリングする地盤物性の数は、解析結果である最大加速度、最大速度、変動係数の値の、繰り返し計算による影響が少なくなる50回とし、そのサンプリング範囲は、[平均値±2×標準偏差]とした。解析方法としては、実務面でもよく用いられる1次元等価線形解析⁷⁾(実効ひずみ/最大ひずみ=0.65)を用いた。

(2) 解析条件

解析は、表-2に示すポートアイランドの鉛直アレーサイトの地盤モデルについて実施した。入力地震動については、兵庫県南部地震の際にポートアイランドの鉛直アレーサイトのGL-83.4mで観測された記録を、最大コヒーレンス法により設置誤差を修正したもの⁹⁾を最大加速度が現れる主方向に回転(NS方向から反時計回りに46度回転)させたもの、つまり兵庫県南部地震を引き起こす原因となった活断層と直交する方向の入射波を算定し、これを入力地震動とした。動的変形特性のひずみ依存性については、式(2.a)、(2.b)に示す國生らの提案式⁹⁾を用いた。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + (\gamma/\gamma_r)^\alpha} \quad (2.a)$$

$$\frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} = \left(1 - \frac{G}{G_0}\right)^\beta \quad (2.b)$$

ここで、 α 、 β は土質別の係数である。⁹⁾

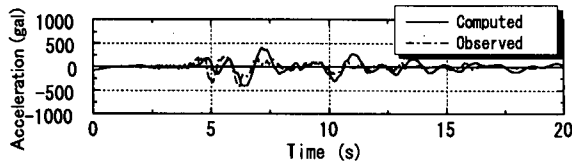


図-3 観測値と解析値の比較

表-1 解析ケースと解析結果

Case	V _s 変動 対数正規 分布 γ, γ _r 確定値	変動係数(C.V.)					Max Acc. (GLOm)	Max Vel. (GLOm)	備考	
		FI	Ac	UDc	UDg	UDs				
CASE-1	V _s 変動 対数正規 分布 γ, γ _r 確定値	0.273	0.133	0.185	0.219	0.194	m=377.87 s.d.=66.210 c.v.=0.175	m=140.86 s.d.=21.286 c.v.=0.151	実地盤データ の変動係数	
CASE-2		0.551	0.267	0.372	0.441	0.389	m=288.20 s.d.=102.17 c.v.=0.381	m=128.64 s.d.=20.483 c.v.=0.159	実地盤データ の変動係数 ×2	
CASE-3		0.136	0.067	0.093	0.109	0.097	m=397.83 s.d.=49.023 c.v.=0.123	m=150.01 s.d.=15.713 c.v.=0.105	実地盤データ の変動係数 ×0.5	
CASE-4		γ, γ _r 変動 対数正規 分布 V _s 確定値	0.212	0.18	0.18	0.126	0.126	m=22.45 s.d.=50.712 c.v.=0.120	m=156.73 s.d.=11.301 c.v.=0.072	実地盤データ の変動係数
CASE-5			0.427	0.369	0.369	0.286	0.286	m=389.92 s.d.=73.905 c.v.=0.190	m=144.22 s.d.=19.921 c.v.=0.138	実地盤データ の変動係数 ×2
CASE-6			0.106	0.09	0.09	0.063	0.063	m=439.78 s.d.=29.934 c.v.=0.068	m=161.57 s.d.=5.7084 c.v.=0.035	実地盤データ の変動係数 ×0.5

表-2 地盤モデル (ポートアイランド)

Layer No.	Mat. No.	Mat. Type	Depth (m)	Layer Thickness (m)	Density (t/m ³)	V _s (m/s)	h _{max} (%)	h _{min} (%)
1	1	FI	1.00	1.00	1.70	170	18.00	2.00
2	1	FI	2.00	1.00	1.70	170	18.00	2.00
3	2	FI	4.00	2.00	2.00	210	18.00	2.00
4	2	FI	6.00	2.00	2.00	210	18.00	2.00
5	2	FI	8.00	2.00	2.00	210	18.00	2.00
6	2	FI	10.10	2.10	2.00	210	18.00	2.00
7	2	FI	12.20	2.10	2.00	210	18.00	2.00
8	2	FI	14.30	2.10	2.00	210	18.00	2.00
9	2	FI	16.40	2.10	2.00	210	18.00	2.00
10	3	Ac	18.50	2.10	1.70	180	17.00	3.00
11	3	Ac	20.60	2.10	1.70	180	17.00	3.00
12	3	Ac	22.70	2.10	1.70	180	17.00	3.00
13	3	Ac	24.80	2.10	1.70	180	17.00	3.00
14	3	Ac	26.90	2.10	1.70	180	17.00	3.00
15	3	Ac	29.00	2.10	1.70	180	17.00	3.00
16	4	UDg	32.40	3.40	2.00	245	19.00	2.00
17	5	UDg	36.00	3.60	2.00	245	19.00	2.00
18	6	UDs	49.00	13.00	2.20	305	18.00	2.00
19	7	UDs	60.50	11.50	2.20	350	18.00	2.00
20	3	UDc	82.00	21.50	1.80	303	17.00	3.00
21	8	LDg	83.40	1.40	2.20	380	-	2.00
22	9	LDg	∞	∞	2.20	380	-	0.00

3. 解析結果

解析を実施する前に、解析精度を検討する意味で V_s 、 γ 、共に上記の手法で決定した平均とを用い、ポートアイランド鉛直アレーサイトの地表で観測された記録と解析値を比較する予備解析を実施した。その結果を、図-3に示す。主要動部分については、解析値の加速度振幅が観測値に比べやや卓越する部分があるものの、周期特性、最大値は概ね再現できているように見える。よって、本解析では定性的な議論は可能であると考えられる。そこで、前述したような地盤物性のバラツキを基に、表-1に示すケースについて、モンテカルロ法による確率論的手法による地震応答解析を実施し、地表面における最大加速度と最大速度の値の幅を調べた。解析結果の代表例として、地表面の最大加速度のヒストグラムを図-4(a),(b)に、地表面の最大速度のヒストグラムを図-4(c),(d)に示す。解析を実施する上でランダムサンプリングしたデータは、それぞれ V_s (CASE-1)、 γ 、(CASE-4)である。なお図中には、確定論的手法による地盤物性値の平均値、〔平均値±標準偏差〕、〔平均値±0.5×標準偏差〕を用いた、5通りの解析結果も表示している。さらに、図-5は、上記の確率論的手法に基づき、入力物性値の変動係数が地表の最大加速度・速度の平均値と変動係数及び影響を示したものである。これにより、以下のような知見を得ることができた。

①確率論的手法により得られた50ケースの地表での最大加速度の平均値は、確定論的手法により各土質別に地盤物性の平均値を与えて解析した値と比べ、 V_s を変化させたCASE-1では約20%、 γ を変動させたCASE-4では約8%、地表での最大速度の平均値は、CASE-1では約14%、CASE-4

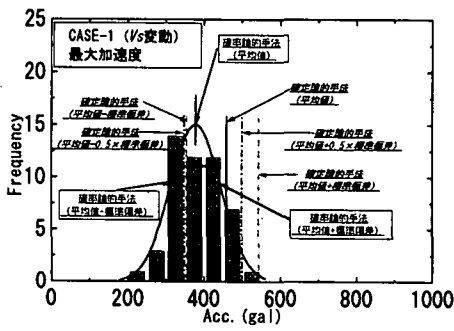
では約4%、いずれも小さな値となった。これは、ランダムサンプリングした V_s や γ 、に対する地盤の増幅率が、地盤の揺れやすい振動数でピークを示すような非線形のカーブであることなどに起因していると思われる。

②図-5(a)(b)より、上記の確率論的手法による地表での最大加速度・速度の平均値は、地盤物性の変動係数が大きくなるほど低下する傾向を示す。

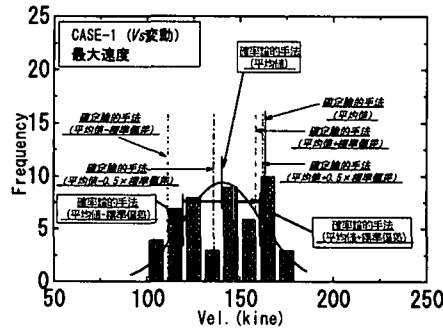
③図-4中に、破線と一点鎖線で示した入力物性値の〔平均値±標準偏差〕、〔平均値±0.5×標準偏差〕を与えた確定論的手法による解析結果の範囲が、いずれのケースにおいても、確率論的手法の地表での最大加速度・速度の平均値は包含しているものの、矢印で示した確率論的手法による解析値である〔平均値±標準偏差〕の範囲とかなりくい違っている場合がある。これも、上記の通り確率論的手法による地表での最大加速度・速度の平均値が、確定論的手法による地盤物性値の平均値を用いた解析結果と比べ、変動することが原因であると思われる。

④CASE-1では V_s の変動係数が0.133~0.273、CASE-4では γ の変動係数が0.126~0.212でそれほど違わないが、最大加速度の変動係数はそれぞれ0.175、0.072、最大速度ではそれぞれ0.151、0.072と大きな差が現れている。すなわち、 V_s の変動の方が γ の変動よりも、地表での最大加速度・速度のばらつきに与える影響は大きい。

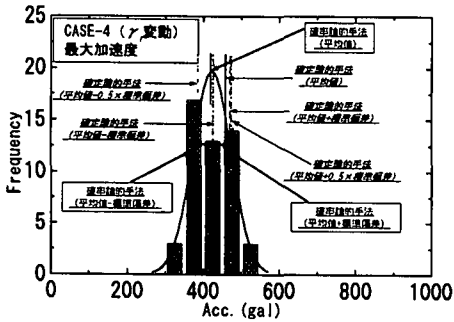
⑤図-5(c)より、最大加速度・速度の変動係数は、地盤物性の変動係数と共に増加する。また、加速度に比べ速度の変動係数は常に小さい。



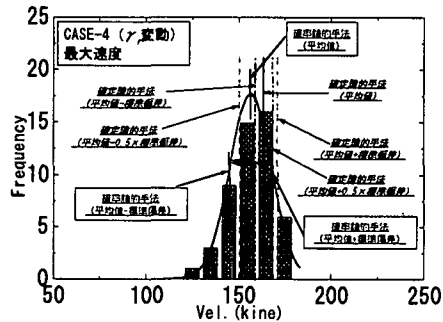
(a)



(b)



(c)



(d)

図4 モンテカルロシミュレーションによる地表の最大加速度・速度のヒストグラムと確定論的手法による解析値との比較(CASE-1, CASE-4)

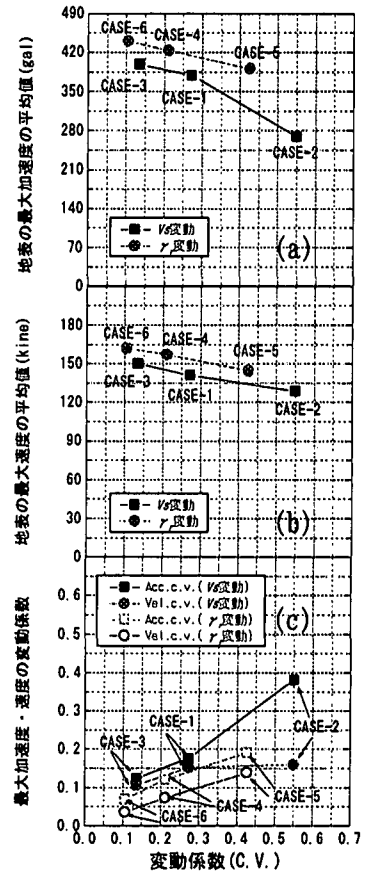


図5 入力物性値の変動幅が確率論的解析の結果に及ぼす影響(埋土層(FI))

4. 結論

- 1) 確率論的手法による地表での最大加速度、最大速度の平均値は、確定論的手法により各土質別に地盤物性の平均値を与えて解析した値と大きく異なる傾向がある。この違いの度合いは、地盤物性の変動係数が大きくなるほど広がる傾向がある。また、両手法の〔平均値±標準偏差〕の値の範囲もかなりずれる場合がある。これは、地盤の増幅特性が物性値の変化に対し、複雑な変動を示すことによるところが大きいと思われる。
- 2) 入力物性値として V_s を変動させた場合の方が、 γ_c を変動させた場合よりも地表での最大加速度、最大速度の平均値、それらの変動係数に与える影響は大きい。
- 3) 地表での最大加速度・最大速度の変動係数は、入力物性値の変動係数が増加すると共に増加する。また最大速度の変動係数は、最大加速度に比べて常に小さい。

謝辞：今回用いた地震データを提供して頂いた、関西地震観測協議会に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 神戸市(1980)；神戸の地盤
- 2) 阪神高速道路公団(1997)；阪神高速道路地質資料
- 3) 運輸省港湾技術研究所(1997)；港湾技研資料 No.857、1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告
- 4) T.Kokusho(1987)；In-situ dynamic soil properties and their evaluations、proceedings of the eighth regional conference on soil mechanics and foundation engineering Vol.2、pp.215-240
- 5) 伊藤洋、北原義浩(1985)；地盤物性のバラツキの評価法(その2)―物性のバラツキが地盤の安定性に及ぼす影響―；(財)電力中央研究所、電力中央研究所報告、研究報告：384026
- 6) 國生剛治、高橋佳宏、本山隆一(1998)；兵庫県南部地震のアー観測における地震計設置誤差の評価、第53回土木学会年次学術講演会講演概要集、I-B218、pp.436-437
- 7) 吉田望、末富岩雄(1996)；DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム、佐藤工業(株)技術研究所報
- 8) 國生剛治(1998)；等価線形解析の大ひずみへの適用の試み、第33回地盤工学研究発表会、pp773-774
- 9) Kokusho, T. and Tanaka, Y.(1994)；Dynamic properties of gravelly layers investigated by insitu freezing sampling、ASCE Convention(Atlanta)、pp.121-140