

(27) 地盤の非線形地震応答解析法に関する基礎的研究

清水建設(株) (正員) 田蔵 隆 (正員) 佐藤 正義  
 (正員) 清水 勝美  
 東京ガス(株) (正員) 小山 和夫

1. まえがき

せん断型の1次元多質点ばね系モデルで地盤の非線形地震応答解析を行う場合、その結果は地盤の地層分割数によって変化することが考えられる。また、等価線形解析の場合、最大ひずみから有効ひずみを求めるための係数(有効ひずみ換算係数と称する)によって結果が異なることが予想される。現状ではこれらを理論的に厳密に定める方法は存在せず、非線形地震応答解析結果の妥当性に曖昧さを残す要因になっている。

本研究はこれらの問題に関して、均質一様地盤モデルに対するパラメータスタディと強震記録に基づく実地盤モデルに対する非線形地震応答解析結果から、地盤地表部の最大応答値に及ぼす影響度、最適な地層分割数ならびに有効ひずみ換算係数について考察したものである。

2. 均質一様地盤モデルに対する解析ケースおよび解析定数

均質一様地盤モデルとは図1に示すような、1次固有周期が1.0秒の地盤モデルである。表1は解析ケースについて示したものであり、地盤の地層分割は5等分割、20等分割および40等分割の3種類とした。入力地震波は1940年E1-Centro記録のNS成分と1968年十勝沖地震八戸記録のEW成分の2波とし、入力最大加速度を100ガル、計算時間間隔を0.01秒として、15秒間の解析を行うことにした。

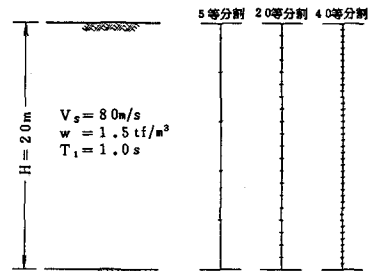


図1 均質一様地盤モデルおよび地層分割

逐次積分法による非線形地震応答解析において、土の動力学モデルとして修正Hardin-Drnevichモデル(修正H-Dモデル)<sup>(1)</sup>と修正Ramberg-Osgoodモデル(修正R-Oモデル)<sup>(2)</sup>の2種類のモデルに対する解析を行った。また、解析モデルはせん断型の1次元多質点ばね系モデルである。等価線形解析は有効ひずみ換算係数 $\eta$ を0.50、0.65、0.80、1.00とした場合の4ケースについて考えた。

各地層の規準ひずみ $\gamma_r$ 、最大減衰定数 $h_{max}$ ならびに等価線形解析における土の剛性低下曲線および減衰曲線は、砂質土に関して提案されている岩崎らの実験曲線<sup>(3)</sup>から定めた。

表1 解析ケース

非線形地震応答解析手法	地層分割数	入力地震波
逐次積分法 (計12ケース)	修正H-Dモデル	E1-Centro記録 NS成分
	20	
	修正R-Oモデル	十勝沖地震八戸記録 EW成分
等価線形解析法 (計24ケース)	$\eta=0.50$	E1-Centro記録 NS成分
	$\eta=0.65$	
	$\eta=0.80$	十勝沖地震八戸記録 EW成分
	$\eta=1.00$	

3. 均質一様地盤モデルに対する解析結果ならびに考察

均質一様地盤モデルに対する地震応答解析結果を表2および表3に示す。表2は逐次積分法による非線形地震応答解析の結果であり、表3は等価線形解析法による解析結果である。

逐次積分法の場合、表2の結果から地層の分割数Nによって地表部の最大加速度はかなり変動することが分かる。修正R-OモデルによるE1-Centro波入力の結果では、5等分割モデルの場合と40等分割モデル

表2 逐次積分法による地表部の最大応答値

地層分割数	E1-Centro記録		十勝沖地震八戸記録		
	修正H-D	修正R-O	修正H-D	修正R-O	
最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	5	31.9	35.5	42.2	50.9
20	36.4	41.7	40.4	57.1	
40	37.3	48.0	38.6	59.3	
最大速度 (cm/s)	5	13.4	13.8	22.6	28.1
20	13.4	13.9	21.9	28.1	
40	13.4	13.9	21.9	28.3	
最大変位 (cm)	5	4.3	4.3	8.7	9.9
20	4.0	4.2	9.3	9.7	
40	4.0	4.2	9.3	9.6	

表3 等価線形解析法による地表部の最大応答値

地層分割数	E1-Centro記録NS成分				十勝沖地震八戸記録EW成分				
	$\eta=0.50$	$\eta=0.65$	$\eta=0.80$	$\eta=1.00$	$\eta=0.50$	$\eta=0.65$	$\eta=0.80$	$\eta=1.00$	
最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	5	57.6	49.6	45.6	42.3	78.4	67.2	57.4	48.4
20	57.8	49.6	45.6	42.2	78.4	67.4	57.5	49.4	
40	57.7	49.4	45.4	42.2	78.5	67.4	57.5	49.5	
最大速度 (cm/s)	5	14.2	13.3	14.0	14.9	29.8	31.7	30.4	28.5
20	14.2	13.3	14.0	14.9	29.8	31.7	30.4	28.6	
40	14.2	13.3	14.0	14.9	29.8	31.7	30.4	28.6	
最大変位 (cm)	5	3.5	4.2	4.5	4.6	8.6	9.4	10.0	10.3
20	3.5	4.2	4.5	4.6	8.6	9.4	10.0	10.3	
40	3.5	4.2	4.5	4.6	8.6	9.4	10.0	10.3	

の場合で約35%(48.0ガル/35.5ガル)の差が発生しており、非線形地震応答解析から地表面での最大加速度を議論する場合、地層の分割数Nによってこの程度の差が生じることがあり得るということに留意する必要がある。最大速度および最大変位に関しては、それぞれ最大で3%(22.6kine/21.9kine)および7%(9.3cm/8.7cm)となっており、地表部での最大速度および最大変位に与える地層分割数Nの影響はきわめて小さい。

表3の結果から等価線形解析法の場合、地層分割数Nが地表部の最大加速度に与える影響は非常に小さいことが分かる。しかし、地表部の最大加速度は有効ひずみ換算係数 $\eta$ によってかなり変動し、十勝沖波入力の場合、 $\eta=0.5$ としたときの最大加速度は $\eta=1.0$ のときに対して約60%(78.4ガル/48.4ガル)の差が生じている。地表部の最大加速度は $\eta$ の値が大きいほど小さくなっているが、これは $\eta$ の値が大きいほど剛性低下率を大きく見積ることになり、このことから加速度増幅の伸びが抑えられるためである。最大速度および最大変位に関しては、最大加速度と同様、地層分割数Nによる影響は見られない。有効ひずみ換算係数 $\eta$ の値による影響は、最大速度では最大で10%程度(14.9kine/13.3kine)であるが、最大変位では30%程度(4.6cm/3.5cm)の差が生じている。

#### 4. 強震記録に基づく実地盤モデルに対する検討<sup>(4)</sup>

地震観測から得られた強震記録に基づいて、実地盤モデルに対して同様の検討を行った。図2および図3に地震観測地点の地盤概要ならびに強震記録を示す。当該地盤は地表からG.L.-14m付近までが、せん断波速度 $V_s=110\sim 190\text{ m/s}$ の軟弱な埋立土層である。加速度計はG.L.-1mおよびG.L.-42mの深さに埋設されている。図3の強震記録は1980年9月25日の千葉県中部地震(マグニチュード $M=6.1$ 、震源深さ $D=80\text{ km}$ 、震央距離 $\Delta=22\text{ km}$ )によって得られたものであり、地盤地表部および基盤での最大加速度はそれぞれ193.6ガル、63.5ガルである。

図4は図3の強震記録に基づく基盤に対する地表部の周波数伝達関数と、その他の地震による加速度レベルの小さな記録に基づく平均周波数伝達関数を対比したものである。これより、平均周波数伝達関数における周期0.5秒付近のピークが0.7~0.8秒に移行していることが分かり、この地震によって当該地盤が非線形挙動を呈したことが推察される<sup>(5)(6)</sup>。

図2に併記した解析モデルにおいて、【12分割モデル】とは、せん断波速度 $V_s$ 、土の単位体積重量 $w$ が変化する位置および加速度計が埋設されている位置を地層分割の基準とした解析モデルであり、【22分割モデル】および【44分割モデル】は、【12分割モデル】の各地層をさらに2分割および4分割したモデルである。

逐次積分法による非線形地震応答解析において、地盤のせん断弾性係数は $G=\rho V_s^2$ より求め、規準ひずみ $\gamma_r$ は岩崎らの提案曲線<sup>(3)(7)</sup>から算定した。なお、修正R-Oモデルによって非線形地震応答解析を行う場合、

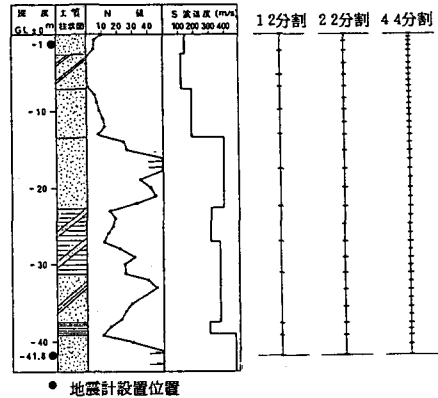


図2 地震観測地点の地盤概要および解析モデル

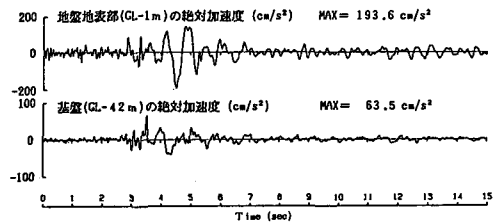


図3 1980年9月25日千葉県中部地震による強震記録

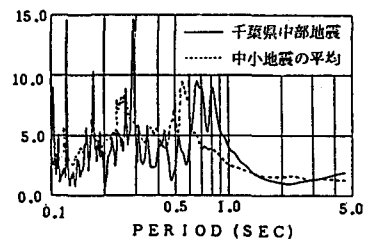


図4 基盤に対する地表部の周波数伝達関数

最大減衰定数  $h_{max}$  は筆者らの提案する方法<sup>(5)(6)</sup>によって定めた。また、等価線形解析における土の剛性低下曲線および減衰曲線は、いずれの場合も岩崎らの提案曲線<sup>(3)(7)</sup>に従った。

### 5. 実地盤モデルに対する解析結果ならびに考察

表4は地表部の最大加速度、最大速度および最大変位について、逐次積分法および等価線形解析法による解析結果について示したものである。修正R-Oモデルを用いた場合の地層の分割数Nが地表部の最大加速度に与える変動は4%程度(154.7ガル/148.6ガル)であるのに対し、修正H-Dモデルの場合は27%(61.0ガル/47.9ガル)となっている。また、地表部の最大速度および最大変位に関しては、地層の分割数Nによる影響はほとんど見られない。

等価線形解析法による結果に関しては、均質一様地盤モデルの場合と同様、地層の分割数Nが地表部の各最大応答値に与える影響はきわめて小さいことが分かる。しかし、有効ひずみ換算係数 $\eta$ に対してはかなりの変動が発生し、最大加速度、最大速度および最大変位に関する差は、それぞれ最大で25%、10%、20%となっている。

最適な地層分割数Nおよび有効ひずみ換算係数 $\eta$ について検討するために、観測記録と計算波の一致度を次式から求めるJ値によって判定した。

$$J = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \{x^*(t) - x(t)\}^2 dt}{\int_{t_0}^{t_1} x^*(t)^2 dt} \quad (1)$$

ここに、 $x^*(t)$ および $x(t)$ は、観測記録および計算波であり、 $t_0$ および $t_1$ は一致度を判定する時間区間の開始時刻および終了時刻である。J値が小さいほど、両者の一致度が高いことになる。

各解析ケースについて求めたJ値を表5に示した。なお、これは記録の主要動付近に注目し、 $t_0=3.5s$ 、 $t_1=5.0s$ として求めたJ値である。これより、逐次積分法の場合、修正H-DモデルによるJ値に比較して、修正R-OモデルのJ値はかなり小さいことが分かる。さらに、修正R-OモデルのJ値において、加速度記録に関しては【22分割モデル】のJ値が最も小さいが(J=0.191)、【44分割モデル】のJ値(J=0.192)との差はほとんどない。速度および変位記録に関しては【44分割モデル】のJ値が最も小さいが(速度; J=0.112、変位; J=0.247)、この場合も【22分割モデル】のJ値(速度; J=0.116、変位; J=0.249)との差は大きくない。

一方、等価線形解析法の場合、地層分割数NによるJ値の差はほとんど見られないが、有効ひずみ換算係数 $\eta$ の値に関しては、 $\eta=0.4$ に対するJ値が加速度、速度および変位とも最小値を与えることが分かった。

図5は逐次積分法および等価線形解析法において、最小のJ値を与えた場合の計算波形と観測記録を重ね描きしたものである。

表4 強震記録に基づく非線形地震応答解析結果

地層分割数	等価線形解析法				逐次積分法	
	$\eta=0.80$	$\eta=0.65$	$\eta=0.50$	$\eta=1.00$	修正H-D	修正R-O
最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	12	117.8	107.9	101.9	95.0	47.9
	22	118.0	107.2	100.0	94.8	55.8
	44	117.0	106.3	100.0	93.8	61.0
最大速度 (cm/s)	12	12.7	11.9	11.7	11.6	10.2
	22	12.7	11.9	11.6	11.5	9.7
	44	12.6	11.8	11.5	11.5	9.8
最大変位 (cm)	12	1.5	1.5	1.6	1.8	1.7
	22	1.5	1.5	1.6	1.8	1.6
	44	1.5	1.5	1.6	1.8	2.2

表5 各解析ケースに対するJ値

応答	地盤応答解析手法	地層分割数 N			
		12	22	44	
加速度	逐次積分法	修正H-D	0.747	0.615	0.632
		修正R-O	0.204	0.191	0.192
	等価線形解析法	$\eta=0.30$	0.297	0.282	0.293
		$\eta=0.40$	0.232	0.232	0.233
		$\eta=0.50$	0.267	0.265	0.265
		$\eta=0.65$	0.367	0.367	0.367
		$\eta=0.80$	0.473	0.466	0.472
速度	逐次積分法	修正H-D	0.670	0.521	0.535
		修正R-O	0.120	0.116	0.112
	等価線形解析法	$\eta=0.30$	0.230	0.226	0.225
		$\eta=0.40$	0.166	0.166	0.167
		$\eta=0.50$	0.203	0.200	0.201
		$\eta=0.65$	0.307	0.307	0.307
		$\eta=0.80$	0.420	0.412	0.419
変位	逐次積分法	修正H-D	1.828	1.394	1.418
		修正R-O	0.253	0.249	0.247
	等価線形解析法	$\eta=0.30$	0.254	0.252	0.252
		$\eta=0.40$	0.223	0.223	0.225
		$\eta=0.50$	0.274	0.272	0.272
		$\eta=0.65$	0.403	0.401	0.400
		$\eta=0.80$	0.573	0.560	0.572

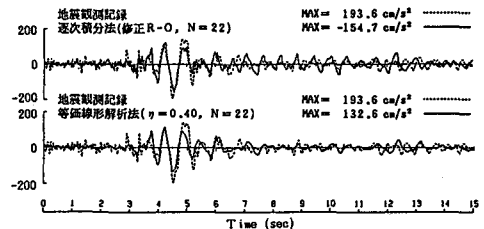


図5 各解析法においてJ値が最小となる時の応答加速度波形と地震観測記録との比較

## 6. 強震動に対する有効ひずみ換算係数 $\eta$ の最適値の検討

表5の検討をさらに拡張し、入力最大加速度が100ガル、150ガル、200ガルの場合の最適な有効ひずみ換算係数  $\eta$  に関する検討を行った。これは図3に示した基盤での観測記録の最大加速度を100ガル、150ガル、200ガルとして、逐次積分法による非線形地震応答解析結果を正解として検討したものである。

解析モデルは【22分割モデル】を対象とし、土の動力学モデルとしては修正R-Oモデルを用いた。逐次積分法と等価線形解析法による解析結果の一致度は、(1)式で求まるJ値から検討した。表6は  $t_0=3.5s$ 、 $t_1=5.0s$  に対するJ値を示したものである。入力加速度の大きさに対してJ値の最小値を与える  $\eta$  は変動しており、入力加速度が100ガルの場合は  $\eta=0.4\sim 0.5$ 、150ガルの場合は  $\eta=0.5\sim 0.65$ 、200ガルの場合は  $\eta=0.4\sim 0.5$  となっている。

最適な有効ひずみ換算係数  $\eta$  に関する既往の研究に大崎の研究<sup>(8)</sup>がある。大崎は有効ひずみ換算係数  $\eta$  自身が最大ひずみ  $\gamma_{max}$  の関数として定義されるべきものであり、最適な有効ひずみ換算係数  $\eta$  は一概に定義できないとしているが、ここでの解析結果からも同様の考察が可能であると考えられる。

## 7. あとがき

本研究において得られた知見をまとめると、以下ようになる。

- (1) 逐次積分法による解析の場合、地盤の地層分割数  $N$  によって、地表部の最大加速度に35%程度の差が生じる場合がある。しかし、地表部の最大速度および最大変位に関しては、地層分割数  $N$  による影響は非常に小さい。
- (2) 等価線形解析法の場合、地盤の地層分割数  $N$  が地表部の最大応答値に与える影響はきわめて少ない。しかし、有効ひずみ換算係数  $\eta$  の値によって、地表部の最大加速度、最大速度および最大変位に対して、それぞれ最大60%、10%、30%程度の差が発生する。
- (3) 修正Hardin-Drnevichモデルを用いた解析結果は、修正Ramberg-Osgoodモデルを用いた解析結果に比較して、観測記録との一致度は悪い。
- (4) 地層分割は逐次積分法および等価線形解析法のいずれの場合も、地盤の各地層をさらに2分割あるいは4分割すればほぼ十分である。また、最適な有効ひずみ換算係数  $\eta$  の値は、地震観測記録に基づく実地盤に対する解析では  $\eta=0.4$  であった。
- (5) 強震動を対象とした場合、最適な有効ひずみ換算係数  $\eta$  を一概に定義することは困難であると考えられる。

## 8. 参考文献

- (1) 国生、桜井：Modified Hardin-Drnevichモデルについて、第33回土木学会年次学術講演会概要集、第Ⅲ部門、昭和53年10月。
- (2) 龍岡、福島：砂のランダム繰返し入力に対する応力ひずみ関係のモデル化について(I)、生産研究、第30巻9号、昭和53年9月。
- (3) 岩崎、龍岡、高木：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ)、土木研究所報、第153号、昭和55年3月。
- (4) 田蔵、佐藤、清水、小山、渡辺：地層分割数および有効ひずみ換算係数が地盤の非線形地震応答解析結果に及ぼす影響度に関する基礎的検討、第22回土質工学研究発表会、昭和62年6月。
- (5) 田蔵、清水、嶋田、横田：土の動力学モデルの振動特性と実地盤に対する適用性について、第6回日本地震工学シンポジウム、昭和57年12月。
- (6) 田蔵、清水、横田、片山：地盤の非線形地震時挙動特性に関する二、三の考察、第1回地盤工学における数値解析シンポジウム論文集、日本科学技術連盟、昭和61年6月。
- (7) 岩崎、常田、吉田、龍岡：沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学研究発表会、昭和55年6月。
- (8) Ohsaki, Y.: Dynamic Nonlinear Model and One-Dimensional Nonlinear Response of Soil Deposits, Research Report 82-02, Department of Architecture Faculty of Engineering, University of Tokyo, March 1982.

表6 強震動に対するJ値

応答	有効ひずみ換算係数 $\eta$	入力最大加速度(ガル)		
		100	150	200
加速度	0.30	0.227	0.634	0.427
	0.40	0.147	0.288	0.154
	0.50	0.167	0.152	0.169
	0.65	0.343	0.185	0.364
	0.80	0.553	0.344	0.622
	1.00	0.863	0.600	0.933
速度	0.30	0.186	0.424	0.263
	0.40	0.086	0.185	0.090
	0.50	0.091	0.089	0.072
	0.65	0.187	0.081	0.169
	0.80	0.331	0.164	0.329
	1.00	0.538	0.328	0.557
変位	0.30	0.256	0.514	0.425
	0.40	0.143	0.320	0.207
	0.50	0.102	0.184	0.127
	0.65	0.171	0.101	0.162
	0.80	0.361	0.149	0.294
	1.00	0.713	0.332	0.519