

はじめに

地盤の地震時挙動を予測することは、家屋や都市施設の被害予測、また、液状化などの地盤災害予測を行なううえで重要な要素のひとつである。地震時挙動の予測で問題となるのは、地盤の非線形的性質である。地盤の非線形的性質は軟弱な地盤ほど強く現れることが知られており、東京低地のように軟弱な沖積層が厚く堆積している地域では、地盤の非線形的性質のとりあつかいが予測の精度を大きく左右することになる。

地盤の非線形性を最もよく表現できる解析法として時刻歴解析法があるが、この方法は実務レベルではあまり使用されていないようである。この原因として、解析法の複雑さとともに、土質実験から得られた土の非線形パラメータを直接計算にとり入れることが難しいことにあると思われる。これは、等価線形解析法の基礎となっている粘弾性モデルのような力学的モデルに対する配慮が、弾塑性解析ではやや不足していることに起因すると思われる。

力学的モデルを動的解析にとりいれた例としては、土の応力～ひずみ関係を双曲線と仮定してIwan¹⁾の直列モデルにより解析したものが Joyer と Chen²⁾によって報告されている。ここではIwan¹⁾の並列モデルを採用し、実測された土の応力～ひずみ関係による動的解析の方法を提案する。運動方程式を解くにあたっては接線剛性率を介在せずに、ひずみから直接せん断応力を求める手法を使用している。

解析方法

解析にあたっては、土の応力～ひずみ関係を表現する力学的モデルとして図-1に示すIwanの並列モデルを使用した。バネとクーロン・スライダーによって構成されるこの種のモデルは、Masingの第1および第2法則をつねに満足することが知られている²⁾。土の骨格曲線が満足しなければならない条件として”骨格曲線は一価の単調な増大関数であり、骨格曲線の接線勾配は原点から離れるにしたがい単調に減少する”と置く。この条件は数%以上のひずみ以外では、実測値とだいたい整合するものである。

図-2に示す骨格曲線を離散化するとき、N個のバネとスライダーから構成されるモデルのうち1番目のスライダーから移動する（バネの強さは番号に従って減少し、スライダーの摩擦力は番号に従って増大する）と考えると、バネの強さ S_p とスライダーの摩擦力 S_L は(1)式によって表される。

$$\begin{aligned} SP(k) &= (\sigma_k - \sigma_{k-1}) / (\epsilon_k - \epsilon_{k-1}) - \sum_{l=k+1}^n SP(l) \\ SL(k) &= \sigma_k - \sum_{l=1}^{k-1} SL(l) - \epsilon_k \cdot \sum_{l=k}^n SP(l) \end{aligned} \quad \dots (1)$$

あるひずみがモデルに加えられたときの応力は、どの番号のスライダーまで滑るかを検出することで求められる。いま、j番目のスライダーまで滑ったとすると、応力は(2)式で表される。

$$\sigma = \sum_{l=1}^j SL(l) + \epsilon \cdot \sum_{l=j+1}^n SP(l) \quad \dots (2)$$

応答解析は地盤を質点系モデルとし、バネ要素として上に述べたバネ・スライダー系におくことで計算する。計算は各質点のひずみを線形加速度法により求めて運動方程式を解き、得られた絶対加速度の増分量が一定の誤差範囲以内に収束するまで繰り返すことで解を求めている。上昇波を入力する手法としては、文献2)の方法によった。

計算結果として東京低地の地盤のうち、基盤深度が48.2mと軟弱層の厚い地盤（図-3）の解析例を図-

4に示す。また、絶対加速度とせん断応力、せん断ひずみの最大値についてSHAKEによる解析結果と比較したものを図-5～7に示す。地表での加速度をのぞき、三者とも今回の解析結果の方が大きな値を示している。特に、せん断ひずみはSHAKEの結果より大きくなっているが、これは図-8に示すように残留ひずみが計算されたことによるものである。

まとめ

今回提案した解析方法については、強震観測結果との比較を含め、さらに検討しなければならない点も多くあると思われる。しかし、この手法では地震時に失われるエネルギーを容易に計算できることから、地震時に地盤中に発生する間隙水压を推定することにより、有効応力解析に発展させることも可能である。

最後になりましたが、貴重な御意見をいただいた東京大学生産技術研究所片山恒雄教授に感謝いたします。

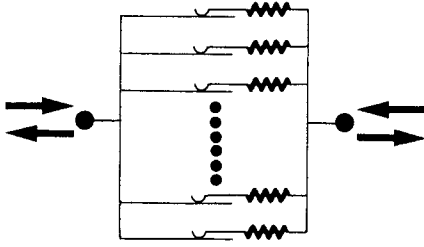


図-1 Iwanの並列モデル

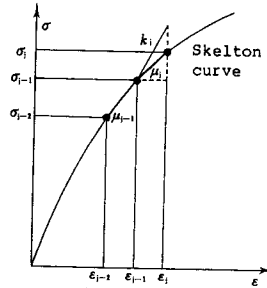


図-2 骨格曲線の離散化
MAX. = 124.92 GAL

層厚	(N)	Vs	γt
1.00	100	1.95	
1.50	150	1.75	
2.00	200	1.60	
3.00	300	1.40	
4.00	400	1.25	
5.00	500	1.10	
6.00	600	1.00	
7.00	700	0.90	
8.00	800	0.80	
9.00	900	0.70	
10.00	1000	0.60	
11.00	1100	0.50	
12.00	1200	0.40	
13.00	1300	0.30	
14.00	1400	0.20	
15.00	1500	0.10	
16.00	1600	0.05	
17.00	1700	0.02	
18.00	1800	0.01	
19.00	1900	0.00	
20.00	2000	0.00	
21.00	2100	0.00	
22.00	2200	0.00	
23.00	2300	0.00	
24.00	2400	0.00	
25.00	2500	0.00	
26.00	2600	0.00	
27.00	2700	0.00	
28.00	2800	0.00	
29.00	2900	0.00	
30.00	3000	0.00	
31.00	3100	0.00	
32.00	3200	0.00	
33.00	3300	0.00	
34.00	3400	0.00	
35.00	3500	0.00	
36.00	3600	0.00	
37.00	3700	0.00	
38.00	3800	0.00	
39.00	3900	0.00	
40.00	4000	0.00	
41.00	4100	0.00	
42.00	4200	0.00	
43.00	4300	0.00	
44.00	4400	0.00	
45.00	4500	0.00	
46.00	4600	0.00	
47.00	4700	0.00	
48.00	4800	0.00	
49.00	4900	0.00	
50.00	5000	0.00	

図-3 解析対象とした地盤
SCALE = 140.0 GAL

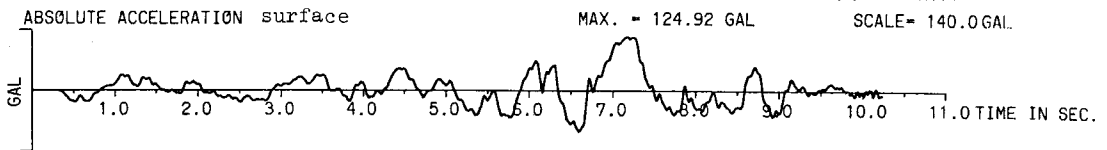


図-4 応答解析結果 入力波は文献3)による 最大入力加速度は70gal

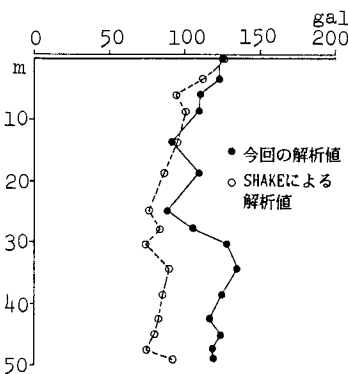


図-5 最大加速度の比較

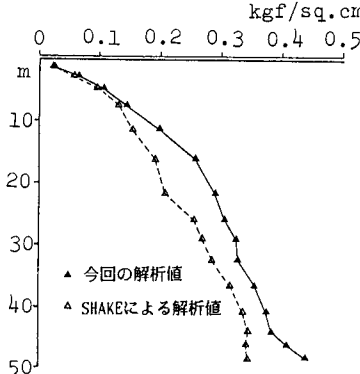


図-6 最大せん断応力の比較

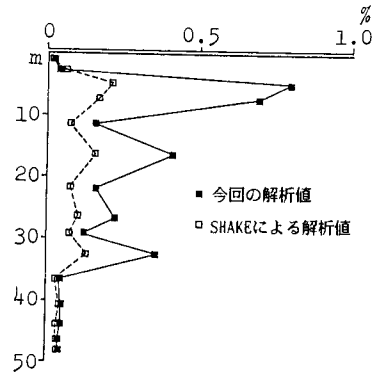


図-7 最大せん断ひずみの比較

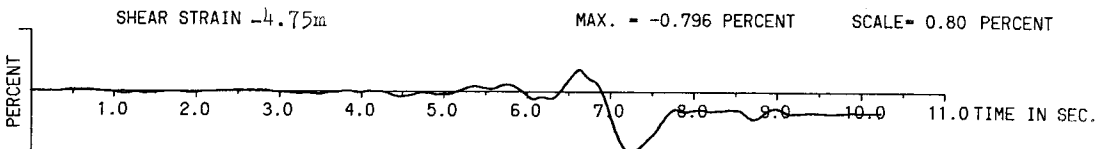


図-8 ひずみの時刻歴波形

参考文献 1)Iwan,W.D.(1966);A Distributed-Element Method for Hysteresis and It's Steady State Dynamic Response, J.Appl.Mech 2)Joyer W.B. and Chen A.T.F.(1975);Calculation of Nonlinear Ground Response in Earthquakes, Bull.Seism.Soc.Am. 3)高速道路協会(1979);耐震設計に関する調査・研究