

(26) 強震記録に基づく地盤の非線形地震応答解析

清水建設(株)技術研究所 (正員) 田蔵 隆 (正員) 佐藤 正義
東京電力(株)技術研究所 (正員) 畠山 昭

1. まえがき

土は非線形性の強い材料であり、強震時において地盤が非線形応答を呈することは過去の地震被害からも明らかである。このことから、各種構造物の耐震安全性を論ずる上で、強震時における地盤の非線形挙動予測が重要な検討課題となり、ここ十数年来、土の動力学的性質に関する研究および地盤の非線形地震応答解析法に関する研究が活発化してきている。

本研究は静岡県駿東郡の変電所構内で得られた強震記録に基づく検討から、地盤の卓越周期および減衰定数の時間的変化ならびに実地盤に対する土の動力学モデルの適用性に関して考察したものである。

2. 地震観測地点の地盤概要ならびに観測記録

図1は強震記録が得られた地点の地盤概要ならびに地震計の埋設深さについて示したものである。地表からG.L.-7mまでが、N値が10以下、せん断波速度 $V_s=120\sim 130\text{ m/s}$ の軟弱層である。地震計は地表部とG.L.-28mの深さに埋設されている。

図1に併記したせん断型多質点ばね系モデルによる固有値解析結果を図2に示したが、このモデルによる地盤の1次固有周期は0.31秒である。

図3は得られた強震記録であり、これは1983年8月8日の神奈川・山梨県境地震(マグニチュード $M=6.0$ 、震源深さ $D=22\text{ km}$ 、震央距離 $\Delta=18\text{ km}$)による記録である。地表部およびG.L.-28mでの最大加速度は、そ

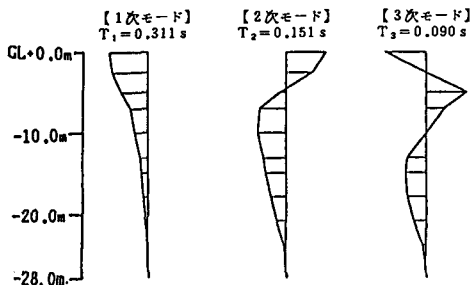


図2 固有値解析結果

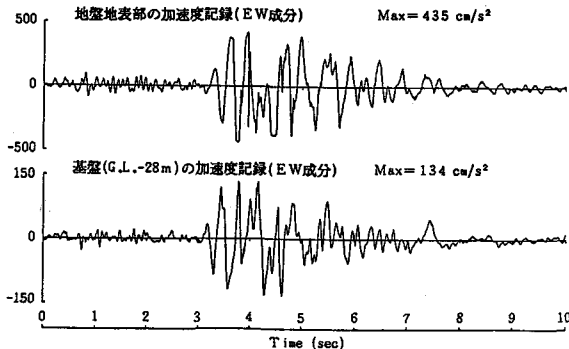


図3 1983年8月8日神奈川・山梨県境地震による強震記録

深度 (m)	土質柱状図	N 値	解析モデル	S波速度 (m/sec)	単位体積重量 (t/m^3)
GL+0.0m		0 10 20 30 40			
上部 ローム溜り スコリア			①	125	1.46
			②		
-5.0m			③	130	1.48
	黒ボク		④		
-7.0m			⑤	252	1.68
	上部 スコリア溜り ローム		⑥		
-13.2m			⑦		
			⑧		
	上部 ローム溜り スコリア		⑨	425	1.69
			⑩		
-24.0m			⑪		
	上部 スコリア		⑫	780	1.95
-28.0m			⑬		

◎ 地震計設置位置

図1 強震記録が得られた地点の地盤概要および地震計設置位置

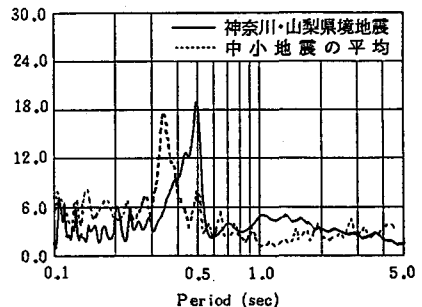


図4 基盤に対する地表部の周波数伝達関数

それぞれ435ガル、134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、図3の強震記録を除く加速度レベルの小さな観測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見られた0.33秒付近の卓越周期が、強震記録ではおよそ0.5秒に伸びていることが分かる。

3. 地盤の卓越周期および減衰定数の時間的変化の同定

地盤の非線形震動に伴う典型的な現象は、卓越周期の伸びと減衰定数の増加である。筆者らは別報⁽¹⁾で、J.L.Beckの同定手法に多少の修正を加え、地盤の卓越周期ならびに減衰定数の時間的変化を検出する手法を提案している。表1はその手法に基づき、図3の強震記録が

これより、時刻0～2秒のときの1次の固有周期 $T_1 = 0.35$ sが、時刻4～6秒の主要動付近では $T_1 = 0.43$ sに伸びており、1次の減衰定数 h_1 に関しては、時刻0～2秒における $h_1 = 2 \sim 3\%$ が、時刻2～4秒で $h_1 = 10 \sim 13\%$ 、時刻4～6秒で $h_1 = 7 \sim 9\%$ と増加していることが分かる。

図5は横軸に固有周期 T_1 、縦軸に減衰定数 h_1 をとり、G.L.-28mと地表部の加速度記録の相対加速度記録に対して計算した J_{11} の等値線図⁽¹⁾である。なお、図5の刺激係数 β_1 は、表1に示されている刺激係数 β_1 に対応させたものになっている。これより、 J_{11} が最小となる点を中心とした縦長の楕円が時刻4～6秒の主要動付近で、長周期かつ高減衰側に推移している様子が窺える。

図6は観測記録(G.L.-28m)に対する地表部の相対加速度記録を周期0.3～0.5秒のバンドパスフィルターにより処理したものと、同定結果に基づく相対加速度波形の重ね描きをした

表1 強震記録に対する同定結果

同定項目	同定区間					
	0～2 sec	2～4 sec	4～6 sec	6～8 sec	8～10 sec	
変位	固有周期 T_1 (sec)	0.352	0.409	0.426	0.421	0.407
	減衰定数 h_1	0.032	0.107	0.072	0.028	0.021
	刺激係数 β_1	2.855	2.889	2.822	2.435	2.332
	J値	0.214	0.024	0.009	0.010	0.019
速度	固有周期 T_1 (sec)	0.346	0.409	0.431	0.423	0.405
	減衰定数 h_1	0.026	0.127	0.089	0.031	0.031
	刺激係数 β_1	2.208	2.740	2.860	2.310	2.015
	J値	0.166	0.015	0.003	0.010	0.022
加速度	固有周期 T_1 (sec)	0.347	0.436	0.427	0.423	0.405
	減衰定数 h_1	0.025	0.133	0.080	0.032	0.031
	刺激係数 β_1	2.076	2.826	2.728	2.297	1.987
	J値	0.044	0.009	0.006	0.020	0.024

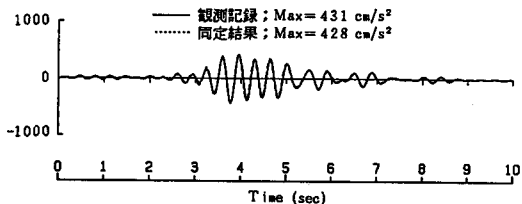


図6 同定結果に基づく応答加速度波形と観測記録の対比

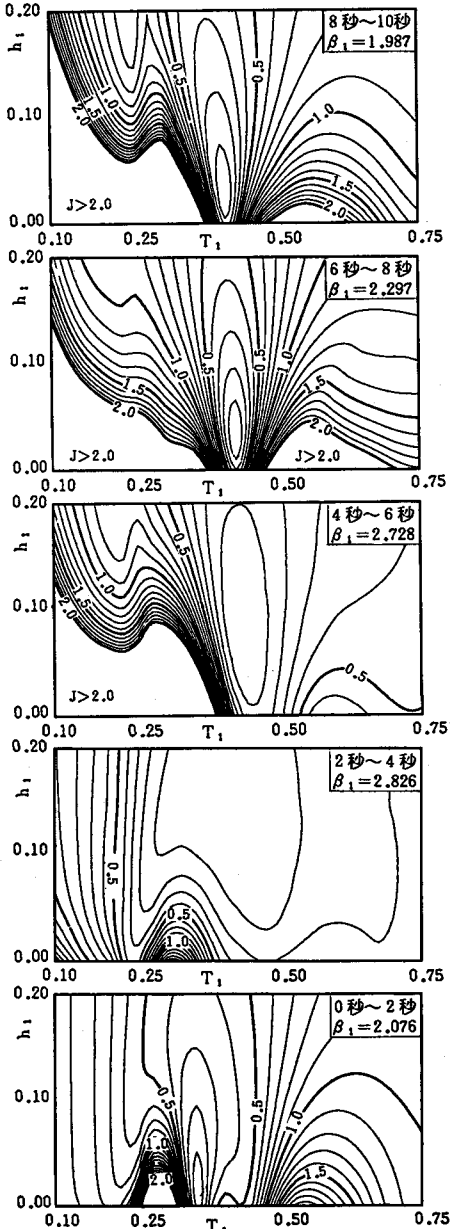


図5 地表部の相対加速度に対する J_{11} の等値線図

ものである。両者の一致度はきわめて高く、このことから表1に示した固有周期 T_1 および減衰定数 h_1 の時間的变化の同定は十分なものになっていると考えられる。また、表1の固有周期 T_1 の伸びおよび減衰定数 h_1 の増加は、地盤の非線形震動に伴って発生しているものと推察される。

4. 強震記録に基づく地盤の非線形地震応答解析

図3の強震記録に基づく地盤の非線形地震応答解析結果について示す。解析モデルは図1に示した12質点のせん断型の多質点ばね系モデルである。質点番号④がG.L.-28mに設置した地震計の位置に対応しており、また質点番号①が地表部の地震計の位置に対応している。地震波は質点番号④の固定点から入力した。

各層の初期せん断弾性係数 G_0 は、 $G_0 = \rho V_s^2$ から算定した。図7は解析モデルの上部スコリア層の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線および $h_{eq} \sim \gamma$ 曲線について示したものである。実線は実験曲線であり、破線および一点鎖線は修正Hardin-Drnevichモデルおよび修正Ramberg-Osgoodモデルによる理論曲線である。なお、修正Ramberg-Osgoodモデルによる理論曲線は筆者らの提案²⁾に基づき、ひずみ γ が無限大のときの減衰定数 h_{max} の値を操作し、 10^{-3} のオーダーのひずみレベルまでの領域で実験曲線と良く一致するようにしたものである。また、各要素の規準ひずみ γ_r は、 $G/G_0 \sim \gamma$ の実験曲線において、 $G/G_0 = 0.5$ に対応する γ の値とした。

図8は地震応答解析による地表部の応答加速度波形と観測記録を対比したものである。なお、同図にはモード合成法による線形地震応答解析結果ならびに重複反射理論に基づく等価線形解析結果について

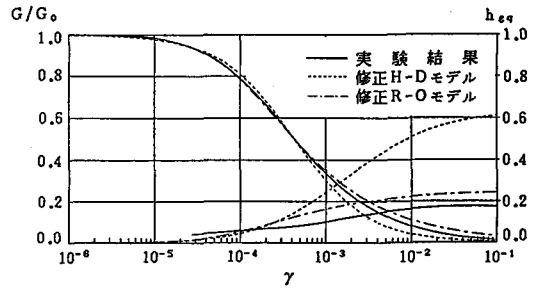


図7 上部ローム混りスコリア層の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線および $h_{eq} \sim \gamma$ 曲線

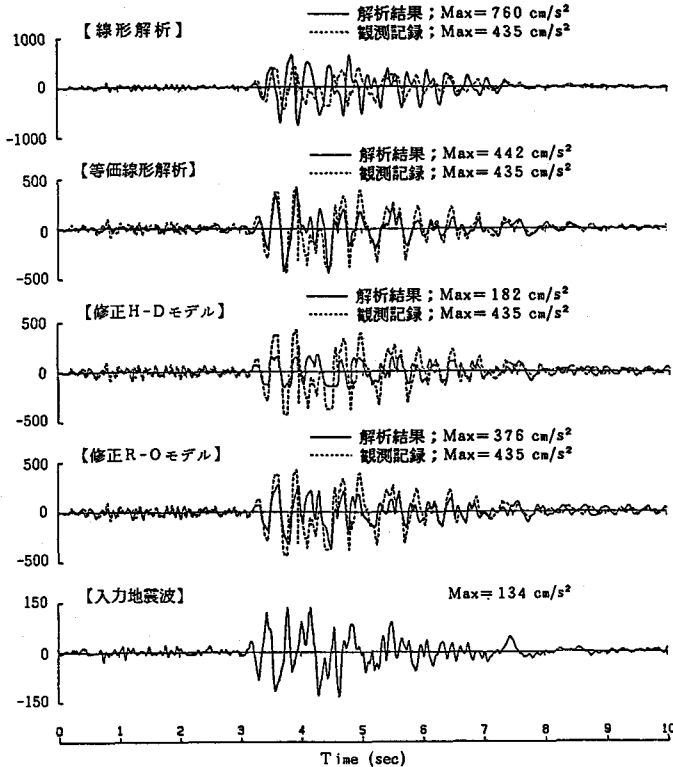


図8 強震記録に基づく地震応答解析結果

も併せて示している。線形地震応答解析における減衰定数は、図4に示した加速度レベルの小さな観測記録に基づく平均周波数伝達関数から定め、 $h_1 = 7\%$ 、 $h_2 = 6\%$ 、 $h_3 \sim h_{11} = 5\%$ とした。また、等価線形解析において、最大ひずみから有効ひずみを求めるための係数は0.65とした。図8において、いずれも実線が計算波、破線が観測記録である。

時刻3秒から8秒の主要動付近の応答波形について考察すると、線形解析の場合、計算波と観測記録との間に位相のずれが見られ、観測記録の方が位相の遅れた状態になっている。これ

に対し、等価線形解析の結果は観測記録を良く模擬しており、十分なものになっていると言える。

一方、修正Hardin-Drnevichモデルおよび修正Ramberg-Osgoodモデルを用いた非線形解析結果は、いずれも位相特性に関しては観測記録とかなり良く一致した結果になっている。しかし、修正Hardin-Drnevichモデルによる解析結果は、応答がかなり抑制されたものになっている。これはMasing則によって履歴曲線を定義した修正Hardin-Drnevichモデルの問題点であり、修正Hardin-Drnevichモデルの h_{max} は土の種類に関係なく、常に $h_{max} = 2/\pi = 0.637$ の一定値を与え、減衰を過大に評価するモデルになっているためである。修正Hardin-Drnevichモデルの結果と比較して、修正Ramberg-Osgoodモデルによる結果はかなり良い結果を与えていることが分かる。

図9は最大応答値の分布図について示したものである。これより、G.L.-7mの位置で 10^{-3} のオーダーの最大せん断ひずみが発生していること、ならびにG.L.-7m以浅の軟弱層の剛性低下率は0.5以下になっていることが分かる。

5. まとめ

本研究によって得られた知見をまとめると、以下のように書くことができる。

- (1) 地盤地表部で435ガルを記録した1983年8月8日神奈川・山梨県境地震において、非線形震動に伴い地盤の卓越周期は0.35秒から0.43秒に伸び、減衰定数は2~3%から10~13%に増加したことが確認できた。
- (2) 線形モデルによる解析結果は、観測記録に対して位相のずれが生じ、十分な結果を与えない。
- (3) 等価線形解析による結果は、観測記録をきわめて良く模擬したものになった。
- (4) 修正Hardin-Drnevichモデルによって地盤の非線形地震応答解析を行うと、減衰を過大に評価するため、観測記録に対してかなり小さ目の応答結果を与える。
- (5) 修正Ramberg-Osgoodモデルを用いて地盤の非線形地震応答解析を行う場合、室内試験から求めた $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線と修正Ramberg-Osgoodモデルの理論上の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線をひずみの全領域において完全に一致させることは困難である。しかし、両者を各地層において発生するひずみの最大レベルまでの領域において近似させることは可能であり、このようにして行った解析結果は実情に良く対応する結果を与える。

6. あとがき

本研究は、(財)地震予知総合研究振興会「軟質地盤における地震動特性に関する研究委員会」(委員長：久保慶三郎 東京大学名誉教授)における研究成果の一部であり、久保委員長はじめ委員各位からの御指導に厚く感謝の意を表す次第である。

7. 参考文献

- (1) 田蔵、清水、佐藤、広瀬、小山、渡辺：非線形震動に伴う地盤の卓越周期と減衰定数の時間的変化の同定、第19回地震工学研究発表会、1987年7月。
- (2) 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、1986年6月。

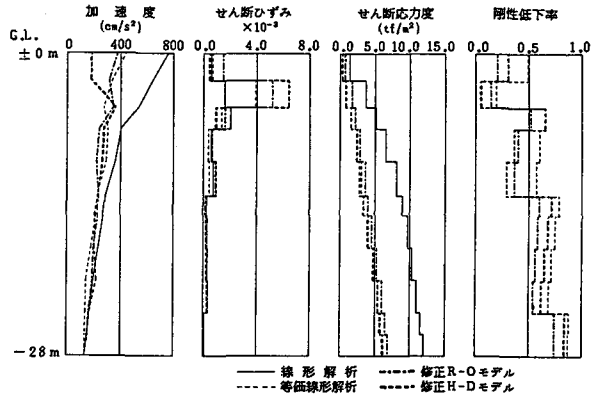


図9 最大応答値の分布図