

(25) 軟弱地盤の強震時の動的応答特性

清水建設(株) (正員) 田蔵 隆 (正員) 佐藤 正義
 (正員) 清水 勝美 (正員) 横田 治彦
 (正員) 竹脇 尚信

1. まえがき

軟弱地盤に建設される各種構造物の耐震安全性を検討する上で、強震時における軟弱地盤の動的応答特性の把握が重要となる。

本研究は卓越周期が0.54秒から1.72秒の5地点の軟弱地盤を対象として、地震観測から得られた基盤での観測記録の100ガル、150ガル、200ガル入力に対する非線形地震時挙動特性について考察したものである。

2. 5地点の地盤概要ならびに解析モデル

解析の対象とした5地点の地盤概要ならびに加速度計の設置位置を図1に示す。【A地盤】は東京都港区芝浦の地盤、【B地盤】は神奈川県横浜市の地盤、【C地盤】は東京都江東区越中島の地盤、【D地盤】は神奈川県藤沢市の地盤、【E地盤】は千葉県我孫市手賀沼の地盤⁽¹⁾である。また、せん断型が多質点ばね系モデル(図1参照)による【A地盤】から【E地盤】の1次固有周期 T_1 は、それぞれ0.54秒、0.88秒、0.95秒、1.41秒および1.72秒である。

3. 非線形地震応答解析

地盤の非線形地震応答解析は、等価線形解析と修正Ramberg-Osgoodモデルおよび修正Hardin-Drnevichモデルを用いた逐次積分法による非線形地震応答解析の3種類の方法によって行った。

5地点の地盤の各層の剛性低下曲線および減衰曲線は、岩崎らによって示されている実験曲線⁽²⁾⁽³⁾に従った。初期せん断弾性係数 G_0 は $G_0 = \rho V_s^2$ (ρ ; 密度、 V_s ; せん断波速度)、規準ひずみ γ_r および最大減衰定数 h_{max} は岩崎らの提案曲線から定めた。また、等価線形解析における地盤の最大ひずみ γ_{max} から有効ひずみ γ_{eff} 算定のための係数 η は0.65とした。

各地盤において、最深部の加速度計で得られた比較的加速度レベルの大きな記録をそれぞれ4波選び、入力最大加速度を150ガルとして非線形地震応答解析を行った。また、入力最大加速度の大きさによる影響を把握する目的で、修正Ramberg-Osgoodモデルによる解析に関しては、入力最大加速度を100ガルおよび200ガルとした場合

【A地盤】

深度 (m)	土質 柱状図	S波速度 (m/sec)	解析 モデル
-1.5m	砂質粘土	170	●
-3.0m	圧入済み砂	170	
-5.0m	粘土	170	
-10.0m	砂質シルト	130	
-12.0m	軟弱粘土	200	
-15.0m	中砂	330	
-20.0m	細砂	330	
	硬質粘土	380	
-31.2m	土丹	440	
-42.0m	土丹	530	
-50.0m			●

●: 地盤計設置位置

【B地盤】

深度 (m)	土質 柱状図	S波速度 (m/sec)	解析 モデル
-1.0m	細砂	150	●
-7.2m	細砂	180	
-13.2m	砂粘土	260	
-20.7m	シルト	140	
-28.6m	粘土	270	
-35.0m	細砂	450	
-40.0m	細砂	320	
-52.0m	砂粘土	420	
	土丹	480	
-51.0m	土丹	600	
-55.0m			●

●: 地盤計設置位置

【C地盤】

深度 (m)	土質 柱状図	S波速度 (m/sec)	解析 モデル
-1.0m	粘土	62	●
-2.7m	シルト質粘土	62	
	シルト質細砂	94	
-7.0m			
-10.0m	砂質シルト	94	
	砂質シルト	133	
-16.0m			
	砂質シルト	133	
-30.7m	シルト	133	
-34.0m	シルト質粘土	62	
-35.0m	粘土	93	
-37.0m	砂粘土	93	
-40.0m	砂粘土	175	
			●

●: 地盤計設置位置

【D地盤】

深度 (m)	土質 柱状図	S波速度 (m/sec)	解析 モデル
-1.2m	ローム質粘土	55	●
-7.6m	粘土	40	
-9.9m	硬質土	40	
-5.5m	砂質シルト	40	
-10.0m	シルト	50	
	シルト	65	
-14.0m			
	シルト	55	
-15.5m	砂質シルト	100	
-21.0m	砂質粘土	400	
-24.5m			
	細砂	400	
-30.0m			●

●: 地盤計設置位置

【E地盤】

深度 (m)	土質 柱状図	S波速度 (m/sec)	解析 モデル
	シルト	21.5	●
-6.5m			
-8.5m	シルト	31	
-12.0m	シルト	50	
-15.0m	シルト	64	
-17.0m	シルト	88	
	シルト質細砂	300	
-23.0m			
	砂	350	
-40.0m	シルト	300	
-47.0m			
	砂	400	
-55.0m			●

●: 地盤計設置位置

図1 5地点の地盤概要および解析モデル

についても検討を行った。表1は入力地震波として用いた観測地震の諸元について示したものである。

4. 解析結果ならびに考察

解析結果は地盤地表部の加速度応答波形の減衰定数を5%とした加速度応答スペクトル倍率によって整理した。図2は3つの非線形解析法の違いによる特徴を考察するために、それぞれの方法による解析結果について示したものである。図3は修正Ramberg-Osgoodモデルを用いた場合の入力最大加速度100ガル、150ガル、200ガルに対する解析結果である。

図2および図3の結果は、いずれも5地点の地盤および4入力地震波による結果(計20ケース)を平均したものである。また、両図において、▲-▲の印で示されている応答スペクトル倍率は、「日本道路協会・同解説 V耐震設計編」に示されている第IV種地盤に対する277成分平均加速度応答スペクトル倍率⁽⁴⁾である。

地盤の非線形地震応答に大きく影響される周期領域は、解析の対象とした【A地盤】から【E地盤】の1次固有周期 T_1 を考慮すると、およそ0.5秒から3.0秒付近であると考えられる。図2において、等価線形解析結果はこの周期領域で277成分平均加速度応答スペクトル倍率に比較的近いものになっているが、修正Ramberg-Osgoodモデルおよび修正Hardin-Drnevichモデルの結果は277成分平均加速度応答スペクトル倍率をかなり上回るものになっている。

また、図3の解析結果から、100~200ガルにおける入力最大加速度の大きさの違いが加速度応答スペクトル倍率に及ぼす影響は予想外に小さいことが分かる。

表1 入力地震波として用いた観測地震の諸元

観測地点	発生日時	震央位置	Δ (km)	D (km)	M
【A地盤】 東京都港区 芝浦 ($T_1=0.54$ s)	76.7.14	茨城県南西部	46	50	4.8
	76.7.18	茨城・埼玉県境	41	80	4.4
	76.10.6	福島県沖	216	70	5.9
	80.9.25	千葉県中部	43	80	6.1
【B地盤】 神奈川県 横浜市 ($T_1=0.88$ s)	83.10.28	茨城県南西部	69	60	5.3
	84.2.14	神奈川県西部	57	20	5.4
	84.9.19	房総半島南東沖	260	46	6.7
	($T_1=0.88$ s)	千葉・茨城県境	66	80	6.2
【C地盤】 東京都江東区 越中島 ($T_1=0.95$ s)	83.1.27	東京都東部	19	57	4.6
	83.1.27	東京都東部	20	56	4.4
	83.2.22	千葉県北部	30	70	4.9
	83.2.27	茨城県南部	43	72	6.0
【D地盤】 神奈川県 藤沢市 ($T_1=1.41$ s)	82.3.7	鹿児島瀬	161	60	5.6
	82.9.6	鹿児島南方沖	677	190	6.9
	83.8.8	神奈川県西部	42	20	6.0
	84.2.14	神奈川県西部	38	20	5.4
【E地盤】 千葉県我孫子市 手賀沼 ($T_1=1.72$ s)	79.11.19	福島県沖	218	60	4.5
	79.11.25	茨城県沖	130	90	5.4
	79.12.12	父島北方沖	768	160	6.7
	81.1.28	茨城県南西部	43	60	5.0

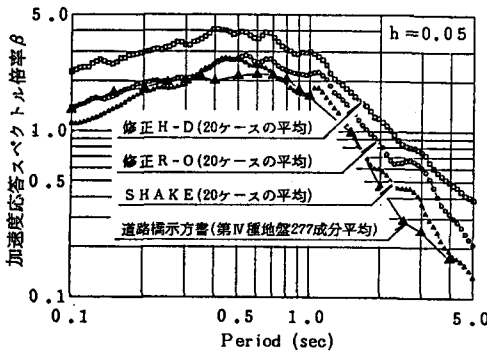


図2 各非線形地震応答解析手法による平均加速度応答スペクトル倍率

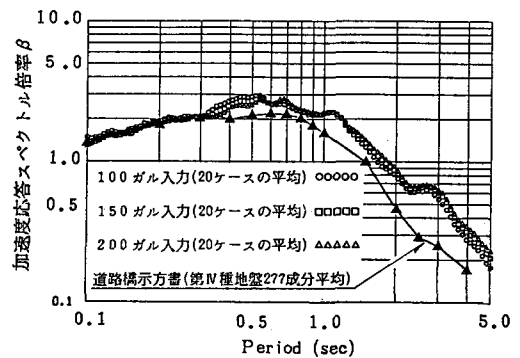


図3 修正R-Oモデルによる平均加速度応答スペクトル倍率

5. 地表部の線形地震応答に対する非線形地震応答の比

5地点の地盤モデルに対する線形地震応答解析を行い、地表部の加速度応答に関して非線形地震応答解析結果との比較を試みた。図4は線形地震応答解析結果に対する非線形地震応答解析結果のフーリエスペクトル比を縦軸に取り、横軸 λ を初期剛性に基づく地盤の1次固有周期 T_1 に対する周期 T の比、つまり $\lambda = T/T_1$ として示した結果である。図4の3つの解析法による結果は、それぞれ【A地盤】から【E地盤】の解析結果(各計20ケース)を平均したものである。また、図5は修正Ramberg-Osgoodモデルを用いた場合の入力最大加速度を変化させた場合の解析結果(各計20ケースの平均)である。

図4および図5の曲線は、線形地震応答解析の結果を地盤の非線形性を考慮した地震応答に変換するため

の係数と見ることができる。変換係数 $\xi(\lambda) = 1.0$ は線形地震応答と非線形地震応答の一致を表し、変換係数 $\xi(\lambda) \geq 1.0$ の周期比領域あるいは $\xi(\lambda) \leq 1.0$ の周期比領域は、地盤の非線形応答による影響が現れている領域である。非線形応答の影響を受ける周期比領域で問題になるのは $\xi(\lambda)$ の値であり、この値が地盤の非線形挙動の程度を表す指標になる。

図4における3つの非線形解析法の差異は、 $\lambda \leq 0.2$ の周期比領域において顕著に現れている。等価線形解析の結果はこの周期比領域において、 $\xi(\lambda) = 0.3 \sim 0.4$ であるのに対し、修正Hardin-Drnevichモデルおよび修正Ramberg-Osgoodモデルは $\xi(\lambda) \geq 1.0$ になっている。地盤の非線形地震応答解析に関する既往の研究において、一般に修正Hardin-Drnevichモデルあるいは修正Ramberg-Osgoodモデルを用いた逐次積分法による解析結果は高振動数が卓越した結果を与え、逆に等価線形解析の結果は高振動数成分の少ない結果を与えると言われているが、図4の結果は正にそのことを表したものになっている。

$0.5 \leq \lambda \leq 5.0$ の範囲の周期比領域に注目すると、 $\xi(\lambda)$ の変化の傾向はいずれの解析手法の場合も類似しており、ほぼ $\lambda = 1.1$ を境にして、 $\xi(\lambda)$ が1.0以下から1.0以上に变化する結果になっている。 $1.0 \leq \lambda \leq 5.0$ の周期比領域において、修正Hardin-Drnevichモデルの場合の最大値は $\xi(\lambda) = 1.75$ であるのに対し、修正Ramberg-Osgoodモデルおよび等価線形解析の場合は $\xi(\lambda) = 2.0$ になっている。Masing則によって履歴曲線を規定した修正Hardin-Drnevichモデルを用いた解析は、減衰を過大に評価するため、地表部での応答加速度が他の手法に比べて一般に小さくなると指摘されているが⁵⁾、この結果からもその状況が理解できる。

この最大値を与える周期比 λ は解析手法によって差が見られ、等価線形解析および修正Ramberg-Osgoodモデルの場合は $\lambda = 1.5 \sim 2.2$ であり、修正Hardin-Drnevichモデルは $\lambda = 3.0$ である。これより、基盤150ガル入力による地盤の1次固有周期 T_1 は1.5倍以上に伸びることが窺える。

また、図5より、入力最大加速度の大きさによる $\xi(\lambda)$ の変化の様子が理解でき、 $1.1 \leq \lambda$ では入力最大加速度が大きくなるに従い $\xi(\lambda)$ は大きくなり、 $0.5 \leq \lambda \leq 1.1$ では小さくなっている。

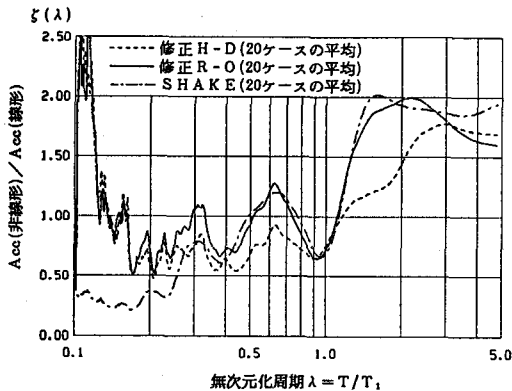


図4 線形応答に対する非線形応答のスペクトル比

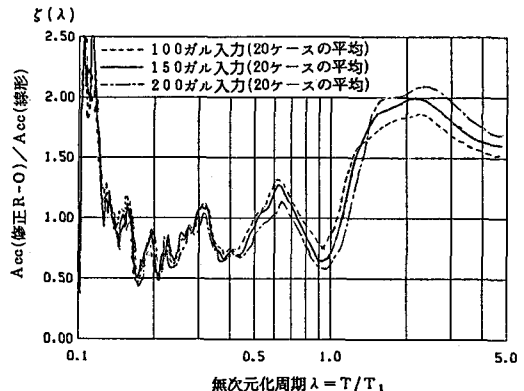


図5 線形応答に対する修正R-Oモデルによる応答のスペクトル比の平均

6. 1 質点ばね系モデルによる線形系と非線形系の定常強制振動の比較

1 質点ばね系モデルの線形系と非線形系の定常強制振動に対する比較から、5.)に示した変換係数 $\xi(\lambda)$ の周期比 λ に関する変化について考察する。履歴型の復元力特性を有する非線形1自由度系の共振曲線および位相曲線を振幅位相徐変化法によって定義すると、以下のように書ける。

$$\text{共振曲線} \quad ; \quad C^2(\gamma_a) + \{S(\gamma_a) - \gamma_a p^2\}^2 = F^2 \quad (1)$$

$$\text{位相曲線} \quad ; \quad \tan \phi = -C(\gamma_a) / \{S(\gamma_a) - \gamma_a p^2\} \quad (2)$$

ここに、 p は加振円振動数、 γ_a は最大ひずみ、 ϕ は位相角である。また、 F は外力振幅に関係する項で、

外力 Q 、質点の質量 m および質点の高さ l より、 $F=Q/m/l$ で与えられる。さらに、

$$C(\gamma_a) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\gamma_a \sin \theta) \cos \theta d\theta, \quad S(\gamma_a) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\gamma_a \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (3)$$

である。ここに、 $R(\gamma)$ は土の動力学モデルの履歴曲線である。

図4で示した非線形地震応答解析結果と対比するために、修正Ramberg-Osgoodモデルおよび修正Hardin-Drnevichモデルの共振曲線⁽⁶⁾を線形系の共振曲線に対する比、つまり、

$$\xi(\lambda) = (\gamma_a/\gamma_s)_{nonlinear} / (\gamma_a/\gamma_s)_{linear} = (\gamma_a)_{nonlinear} / (\gamma_a)_{linear} \quad (4)$$

で表すと、図6のようになる⁽⁷⁾。なお、修正Ramberg-Osgoodモデルに関しては、 $h_{max}=0.20$ とした結果である。

図6に示した結果は、規準ひずみ γ_r と外力 Q による静的なひずみ γ_s の比 γ_r/γ_s をパラメータとして描かれているため、図4の結果とは完全な形では比較できないが、両者の傾向は対応していることが分かる。しかし、図4と比較して図6の変換係数 $\xi(\lambda)$ は1.0よりかなり大きな結果を与えていることが分かる。この理由として、図4の結果は地震応答解析による非定常問題としての結果であるのに対し、図6は正弦波加振による定常振動状態の結果であり、非線形性を過大に評価した状態になっている可能性が考えられる。

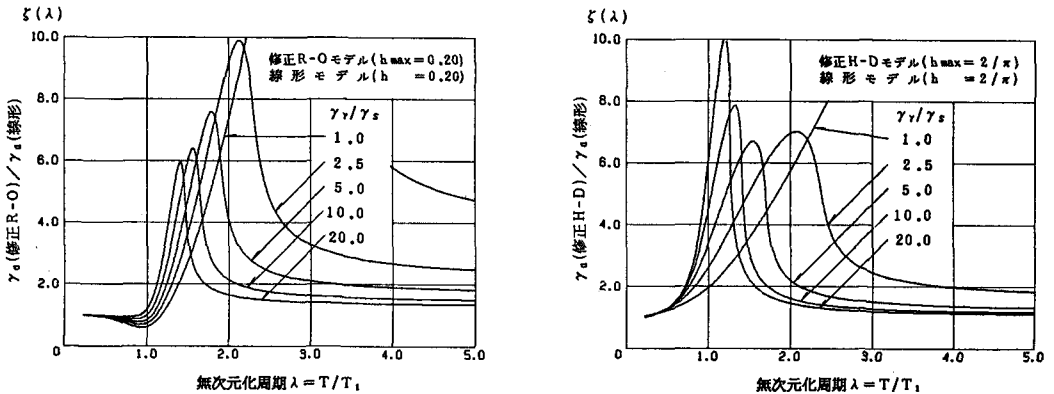


図6 線形モデルに対する修正R-Oモデルおよび修正H-Dモデルの共振曲線の比

7. あとがき

本研究における結論をまとめると、以下のようになる。

- (1) 入力最大加速度を150ガルとした非線形地震応答解析結果に基づく加速度応答スペクトル倍率は、「日本道路協会・同解説 V耐震設計編」に示されている第IV種地盤に対する277成分平均加速度応答スペクトル倍率を上回るものになった。
- (2) 入力最大加速度の変化が加速度応答スペクトル倍率に与える影響は予想以上に小さい。
- (3) 地表部の加速度応答に関する線形地震応答解析結果と非線形地震応答解析結果の比(変換係数) $\xi(\lambda)$ は、周期比 λ が $1.1 \leq \lambda$ では $\xi(\lambda) \geq 1.0$ となり、 $0.8 \leq \lambda \leq 1.1$ では $\xi(\lambda) \leq 1.0$ となる。
- (4) 1質点ばね系の定常強制振動に対する検討から求めた変換係数 $\xi(\lambda)$ は、地震応答解析結果から求めた変換係数 $\xi(\lambda)$ の変化を傾向的に裏付けるものになった。

8. 参考文献

- (1) 澤田、矢島、佐々木、桜井、高橋；地震動に対する基礎の制震効果とその特性について、第6回日本地震工学シンポジウム、1982年12月。
- (2) 岩崎、龍岡、高木；地盤の動的変形に関する実験的研究(II)、土木研究所報、第153号、1980年3月。
- (3) 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回土質工学会研究発表会、1980年6月。
- (4) 日本道路協会；「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」、1980年5月。
- (5) 田蔵、清水、嶋田、横田；地盤の非線形地震応答解析手法に関する一考察、第17回土質工学会研究発表会、1982年6月。
- (6) 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、1982年12月。