

I-463

軟弱地盤の線形地震応答に対する非線形地震応答の比

清水建設(株)技術研究所 (正) 田蔵 隆 (正) 佐藤 正義
(正) 清水 勝美 (正) 横田 治彦

1. ま え が き

本報は卓越周期が0.54秒から1.72秒の5地点の軟弱地盤を対象として、基盤150ガル入力に対する地盤地表部における線形地震応答と非線形地震応答の比について検討したものである。

2. 5 地点の地盤概要

解析の対象とした5地点の軟弱地盤とは、別報⁽¹⁾に示した【A地盤】～【E地盤】である。【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であり、各地盤の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. 地表部の線形地震応答に対する非線形地震応答の比

【A地盤】から【E地盤】の各地盤の最深部に設置した加速度計の記録を入力波とし、最大加速度を150ガルとした線形ならびに非線形地震応答解析を行った。なお、解析モデル、解析定数および解析ケースの詳細は、別報⁽¹⁾に譲る。

図1は地表部の加速度応答に関して、線形地震応答解析結果と非線形地震応答解析結果とを対比したものである。縦軸は線形地震応答に対する非線形地震応答のフーリエスペクトル比 $\xi(\lambda)$ であり、横軸は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 $\lambda = T/T_1$ である。図1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。

図1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1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られているが、図1の結果は正にそのことを表したものになっている。

周期比領域 $0.5 \leq \lambda \leq 5.0$ 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⁽²⁾、この結果からもその状況が理解できる。

また、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。

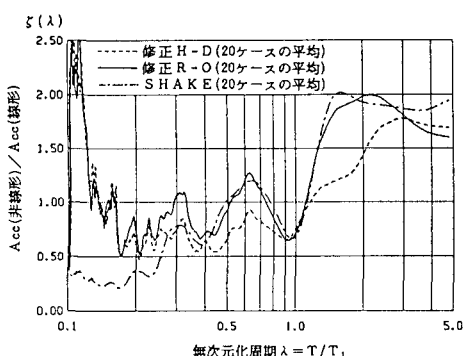


図1 線形応答に対する非線形応答のフーリエスペクトル比

4. 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、3. 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。

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

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

ここに、 p は加振円振動数、 γ_a は最大ひずみ、 ψ 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、

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

$$S(\gamma_a) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\gamma_a \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (4)$$

であり、 $R(\gamma)$ は土の動力学モデルの履歴曲線である。

図1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⁽³⁾を線形系の共振曲線に対する比、

$$\xi(\lambda) = \gamma_a(\text{非線形}) / \gamma_a(\text{線形}) \quad (5)$$

で表すと、図2のようになる。なお、修正 Ramberg-Osgood モデルに関しては、最大減衰定数 $h_{\max} = 0.20$ とした結果である。

図2の結果は規準ひずみ γ_r と外力 Q による静的ひずみ 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1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1と比較して図2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1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2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あると考えられる。

5. 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) 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、 $0.7 \leq \lambda \leq 1.1$ では $\xi(\lambda) \leq 1.0$ となる。
- (2) 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定めた変換係数 $\xi(\lambda)$ の変化を傾向的に裏付けるものになった。

6. 参考文献

- (1) 田蔵、清水、佐藤、広瀬、小山、渡辺：強震記録に基づく軟弱地盤の卓越周期と減衰定数の時間的変化の同定、第22回土質工学研究発表会、1987年6月。
- (2) 田蔵、清水、佐藤、広瀬：地盤の非線形震動問題に対する Beck の同定手法の応用、第42回土木学会年次学術講演会、1987年9月。
- (3) 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。
- (4) 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。

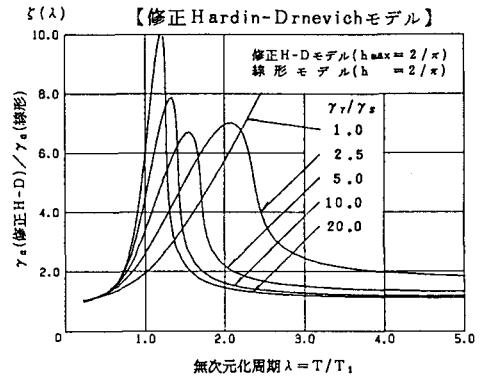
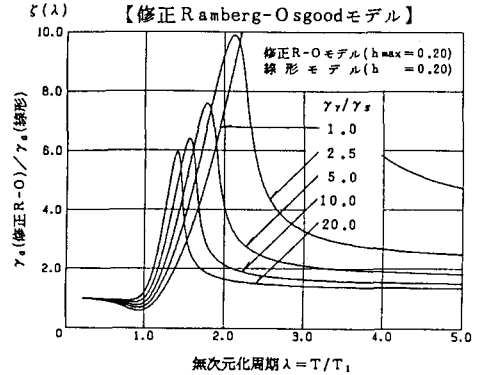


図2 線形モデルに対する修正 R-O モデルおよび修正 H-D モデルの共振曲線の比