

(23) 地盤の非線形応答に及ぼす不確定要因の影響に関する検討

清水建設 大崎研究室 正員 ○ 近藤 司
同 正員 須原淳二

1. はじめに

地盤の非線形応答解析の精度を向上させ有用性を高めるためには、非線形性の適切なモデル化と同時に地盤パラメータを高い精度で設定する必要がある。しかし、地盤構造の不均質性や地盤パラメータを設定するときの実験・実測結果のばらつきなどにより、実地盤の解析において地盤パラメータを高い精度で確定することが困難な場合が多い。

そこで、ここでは地盤の非線形モデルとしてRamberg-Osgoodモデル (R-Oモデル)を取上げ、R-Oモデルの設定に必要な3つのパラメータの変動が地盤応答に及ぼす影響を確率論的手法を用いて検討する。

2. R-Oモデルおよびパターベーション法による確率構造問題の解法¹⁾²⁾

R-Oモデルの設定に必要なパラメータは最大減衰定数 h_{max} 、規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ 、初期せん断剛性 G の3つである。式(1)にR-Oモデルの骨格曲線と履歴曲線および応答解析に用いる骨格曲線の接線剛性 k を示す。

$$\gamma = \frac{\tau}{G} (1 + a |\tau|^\beta) \quad , \quad \gamma - \gamma_0 = \frac{\tau - \tau_0}{G} (1 + a) \frac{\tau - \tau_0}{2} |\tau|^\beta \quad , \quad k = \frac{G}{1 + a(1 + \beta) |\tau|^\beta} \quad (1)$$

ここで、 τ, γ はせん断応力、せん断ひずみ、 τ_0, γ_0 は折れ曲がり点での応力、ひずみを示す。また、 $a = (2/\gamma_{0.5}G)$ 、 $\beta = 2\pi h_{max}/(2 - \pi h_{max})$ である。

つぎに振動系の確率構造の定式化を示す。 i 番目の要素のパラメータを平均値と変動量の和とし式(2)の形で表す。振動系の剛性マトリックスおよび応答量は各要素のパラメータの変動量が微小であるものと仮定し、これらの変動量の1次結合により式(3)の形で定義する。

$$G_i = G_i^* (1 + \varepsilon_i^G) \quad , \quad h_{max i} = h_{max i}^* (1 + \varepsilon_i^h) \quad , \quad \gamma_{0.5 i} = \gamma_{0.5 i}^* (1 + \varepsilon_i^\gamma) \quad (2)$$

$$[K] = [K]^* + \sum_{j=1}^n ([K_j^h] \varepsilon_j^h + [K_j^G] \varepsilon_j^G + [K_j^\gamma] \varepsilon_j^\gamma) \quad , \quad \{X\} = \{X\}^* + \sum_{j=1}^n (\{X_j^h\} \varepsilon_j^h + \{X_j^G\} \varepsilon_j^G + \{X_j^\gamma\} \varepsilon_j^\gamma) \quad (3)$$

添字*は各々の平均値を、 $\varepsilon_i^G, \varepsilon_i^h, \varepsilon_i^\gamma$ は平均値0の変動量を示す。式(3)の $[K_j^h]$ などは、式(2)を(1)の接線剛性 k に代入し1次の変動量について整理することにより求める。 $n \times \Delta t$ 時刻の応答量は式(3)を運動方程式に代入し1次の変動量について整理することにより式(4),(5)の形で表現することができる。 $\varepsilon_i^G, \varepsilon_i^\gamma$ に関する式は、式(5)と同様である。

$$\text{平均値に関する方程式} \quad [M] \{\ddot{X}_n^*\} + [K_n^*] \{\Delta X_n^*\} + \sum_{i=1}^{n-1} [K_i^*] \{\Delta X_i^*\} = -[M] \{P\} \ddot{Z}_n \quad (4)$$

$$\varepsilon_j^h \text{に関する方程式} \quad \varepsilon_j^h \{ [M] \{\ddot{X}_n^h\} + [K_n^*] \{\Delta X_n^h\} + \sum_{i=1}^{n-1} [K_i^*] \{\Delta X_i^h\} + [K_n^h] \{\Delta X_n^*\} + \sum_{i=1}^{n-1} [K_i^*] \{\Delta X_i^*\} \} = 0 \quad (5)$$

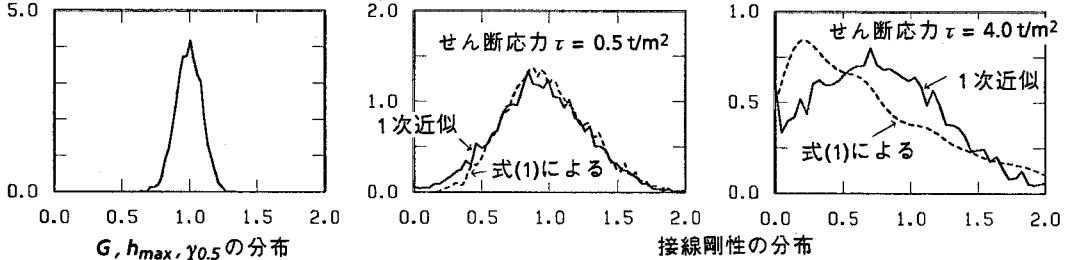
式(4)~(5)より、パラメータのばらつきに対応する応答量の増分は式(6)により算定することができる。しかし、ここでは $n \times \Delta t$ 時刻の復元力と入力力の比は $(n-1) \times \Delta t$ 時刻の復元力と入力力の比に等しいと仮定し、式(6)を式(7)の形に近似して算定することとした。

$$\{\Delta X_n^h\} = \left\{ \frac{[K_n^h] \{\Delta X_n^*\} + \sum_{i=1}^{n-1} [K_i^h] \{\Delta X_i^*\}}{-[M] \{P\} \ddot{Z}_n} \right\} \{X_n^*\} - \left\{ \frac{[K_{n-1}^h] \{\Delta X_{n-1}^*\} + \sum_{i=1}^{n-2} [K_i^h] \{\Delta X_i^*\}}{-[M] \{P\} \ddot{Z}_{n-1}} \right\} \{X_{n-1}^*\} \quad (6)$$

$$\{\Delta X_n^h\} = \frac{[K_n^h] \{\Delta X_n^*\}}{-[M] \{P\} \ddot{Z}_n} \{X_n^* - X_{n-1}^*\} \quad (7)$$

3. パラメータの確率密度関数

図(1)に式(2)に示したパラメータの確率密度関数(正規分布と仮定)と1次近似の接線剛性および式(1)の接線剛性の確率密度関数を示す。接線剛性の確率密度関数は、せん断力 τ を0.5と4.0t/m²の2ケース設定した。この図より、せん断力 τ が大きくなると厳密に評価した接線剛性の確率密度関数は正規分布からはずれてくる傾向を示し、1次近似の接線剛性の分布とは異なることがわかる。また、今回の手法では非線形性が大きくなると接線剛性のばらつきを大きく評価するといえる。

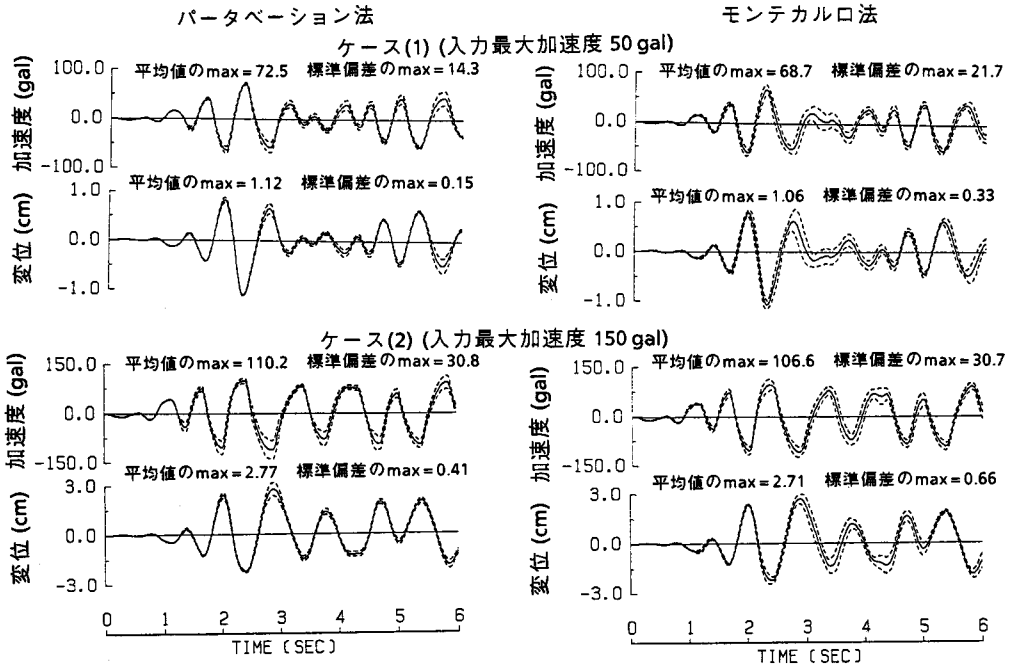


図(1) パラメータの確率密度関数

4. モンテカルロ法との比較

数値解析例として、固有周期0.5秒の1自由度系モデルを取り上げる。図(2)にパータベーション法とモンテカルロ法による応答加速度と変位の平均値および標準偏差幅の時刻歴波形を示す。式(3)のパラメータは互いに独立な正規分布で変動係数はすべて0.1とした。また、モンテカルロ法のサンプル数は100とし、入力地震波はEL-CENTRO, N-S成分とした。

解析は応答レベルの異なる2ケース行った。ケース(1)は剛性低下率 $G/G_0=0.50$ (入力最大加速度50gal)、ケース(2)は $G/G_0=0.25$ (150gal)である。同図より、加速度と変位ともに応答レベルの大小にかかわらずモンテカルロ法とパータベーション法による変動はほぼ同程度であることがわかる。このことより、パータベーション法による変動量の評価は妥当なものであると考えられる。

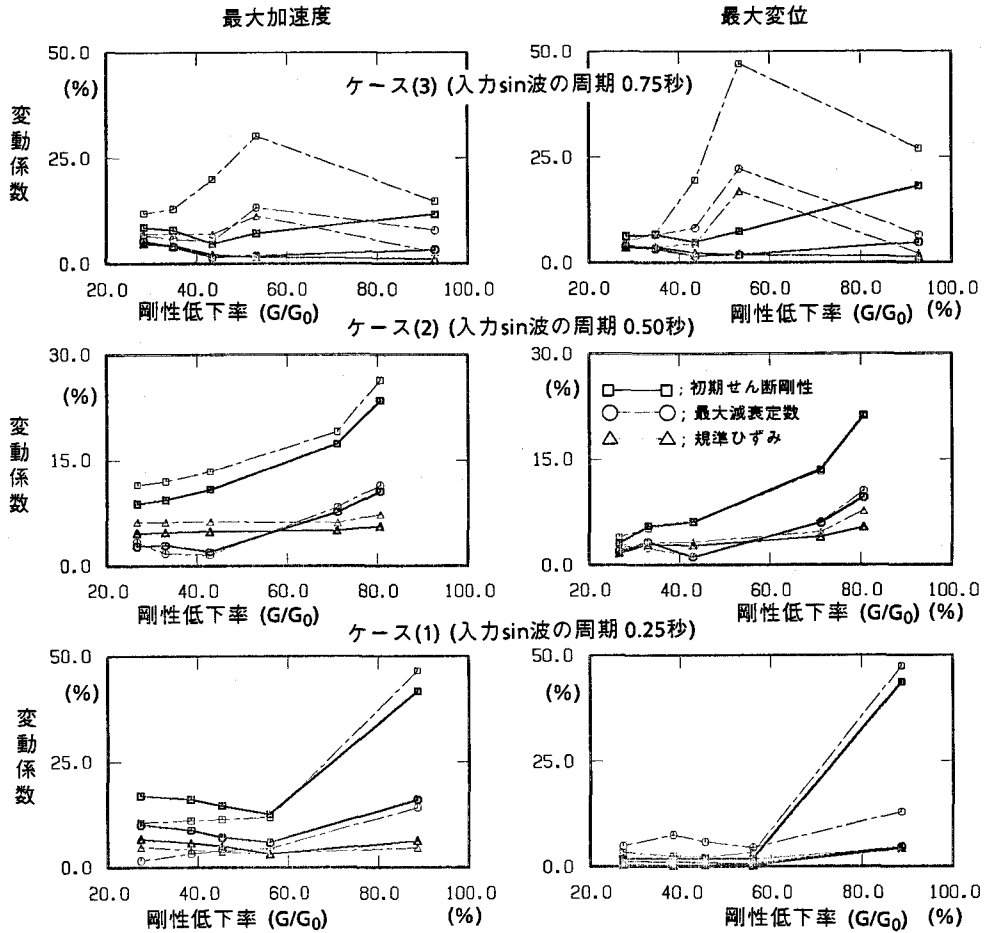


図(2) 時刻歴波形におけるパータベーション法とモンテカルロ法の比較

5. 感度解析

4.と同様に固有周期0.5秒のモデルを用いてパーティーション法とモンテカルロ法による感度解析を行う。ここでの入力波は正弦波としモデルとの共振関係に着目して周期を3ケース設定した。ケース(1)の入力周期は0.25秒であり、モデルの固有周期との関連が小さいものである。ケース(2)の周期は0.5秒であり、初期剛性のレベルで共振状態となり、非線形になるにしたがって共振状態からはずれていくものである。ケース(3)の周期は0.75秒である。このケースはモデルが非線形になるにしたがって共振状態となるものである。

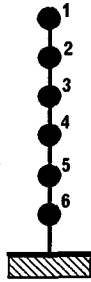
解析結果を図(3)に示す。同図の横軸は剛性低下率、縦軸は変動係数(標準偏差/平均値)である。なお、この変動係数は最大応答値の85%以上の平均である。同図よりパラメータの影響についてはつぎのことがわかる。①全体的傾向としてモンテカルロ法にくらべパーティーション法の方が変動係数は小さい傾向にある。②非線形性が大きくなると、3ケースのどのパラメータにおいても変動係数は小さくなる。③3パラメータ中で変動に及ぼす影響は初期剛性が最も大きい。④最大減衰定数および規準ひずみの変動に及ぼす影響程度は両者はほぼ同程度であり、初期剛性の影響の半分以下である。また、非線形性が小さい時は最大減衰定数が、非線形性が大きい時は規準ひずみの影響が大きい傾向にある。⑤ケース(3)の剛性低下率が50%程度のところで、パーティーション法とモンテカルロ法の結果に大きな差異が認められる。これは、この非線形レベルでモデルの固有周期と入力周期は共振関係になるが、共振状態では少しの周期の差異で応答はかなり異なることよりモンテカルロ法は変動が大きくなったものと推定される。



図(3) 感度解析 (太線;パーティーション法,細線;モンテカルロ法)

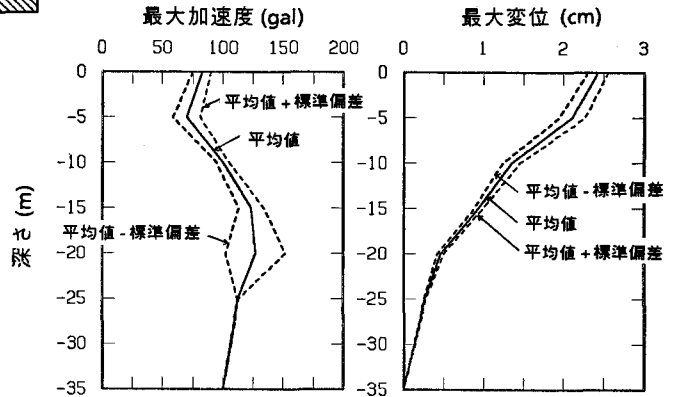
6. 多自由度の応答解析例

実地盤を想定して多自由度モデルによる応答解析結果を示す。モデルは6質点系(層間5m)とし、用いた地盤定数を表(1)に示す。モデルの固有周期は0.5秒である。入力地震波はEL-CENTRO,N-S成分、入力最大加速度は100galである。また、各要素の3パラメータの変動係数はすべて0.1とし、パラメータ間の相関はないものとした。図(4)に最大加速度・変位分布を示し、図(5)に質点1と4の加速度および変位波形を示す。これらの図より、最大加速度分布で一部変動の大きい所がみられるが、全体的には加速度の変動係数は10%程度、変位の変動係数は5%程度であり、パラメータの変動による応答の変動は加速度の方が敏感であることがわかる。



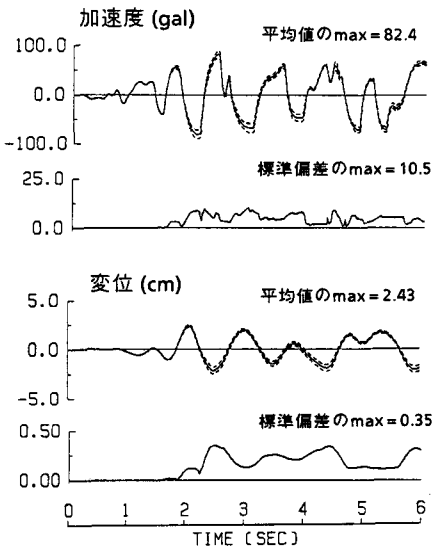
表(1) 地盤物性

要素	単位重量 t/m ³	せん断波速度 m/s	最大減衰定数 %	規準ひずみ
①	1.5	125.0	30.0	1.0×10^{-4}
②	1.5	125.0	30.0	3.0×10^{-4}
③	1.5	150.0	30.0	3.5×10^{-4}
④	1.8	150.0	25.0	4.0×10^{-4}
⑤	1.8	200.0	25.0	8.0×10^{-4}
⑥	1.8	200.0	25.0	1.0×10^{-3}

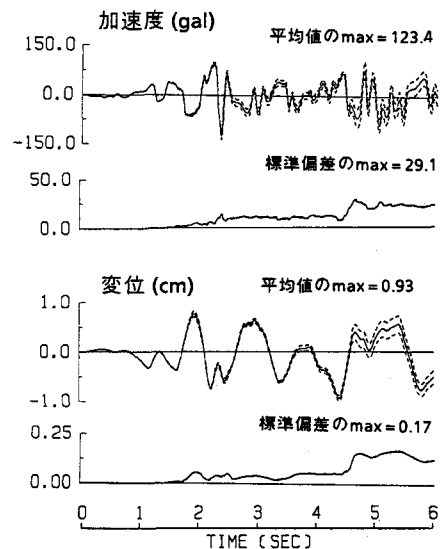


図(4) 最大応答分布

質点1



質点4



図(5) 時刻歴応答波形 (パーテーション法)

7. まとめ

地盤の非線形解析に用いられるR-Oモデルの変動が地盤応答に及ぼす影響をパーテーション法を用いて検討することがわかった。今後は、観測記録の得られている実地盤に適用していく予定である。

参考文献 (1) 龍岡, 福島「砂のランダム繰返入力に対する応力~歪関係のモデル化について(1)」生産研究 第30巻9号, 1978, pp26~29 (2) 星谷「確率論手法による構造解析」鹿島出版会, pp66~79 (3) 近藤, 須原「不確定変動を考慮した地盤の非線形解析に関する検討」第42回土木学会年次講演会, 1987