

# レベル2地震動における 土の非線形モデルの影響について

技術部 服部 孝生

## 1. はじめに

社会インフラの耐震設計では、構造物の慣性力、あるいは地盤変位作用が考慮される。一方、道路橋の設計では、地上部分の慣性力のみを静的・動的に与えるが、地盤種別を設計的に判断した上で、標準加速度スペクトルあるいは標準加速度波形を用いて解析を行う。そのため地盤の動力学特性や地層構成による地震動の増幅、不整形地盤における局所的な地震動の増幅を考慮することは困難である。このように表層地盤の応答評価は、地盤変位作用だけではなく、地震時慣性力を適切に設定する上で重要であるが、地盤の非線形性は、等価線形化手法 (SHAKE) で考慮されることが多く、逐次非線形モデルの適用は実務設計レベルでは未だ一般的とは言えない。そこで、本論文では、土の古典的な非線形モデルとして「R-0」と、鉄道標準で規定化されている「GHE-S」を使用し、レベル2地震動を入力した応答の比較結果を紹介する。

## 2. 非線形モデルの概要

### 2.1 R-Oモデル

R-0モデルは、元々金属材料の非線形解析に提案されたものである。履歴曲線はMasing則が用いられる。双曲線モデルと並び土の非線形モデルに多く用いられ、それぞれ次式で表現される。

$$\begin{aligned} \text{双曲線モデル} &: \tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \gamma/\gamma_r} \\ \text{Ramberg-Osgood モデル} &: \tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \alpha \left( \frac{G_{\max} \gamma}{G_{\max} \gamma_r} \right)^{\beta-1}} \end{aligned}$$

ここに、 $\gamma_r$ は基準ひずみ ( $=\tau_{\max}/G_{\max}$ :  $\tau_{\max}$ はせん断強度),  $\alpha, \beta$ はパラメータである。骨格曲線を図-1に示す。双曲線モデルではせん断応力は $\tau_{\max}$ に漸近する曲線となるが、R-0では、 $\gamma=(1+\alpha)\gamma_r$ でせん断強度となり、さらに $\gamma$ が大きくなるとせん断強度を越えるせん断応力が与えられる。

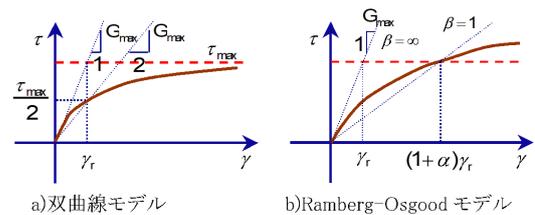


図-1 双曲線モデルと R-0 モデルの骨格曲線

### 2.2 GHE-Sモデル

GHE-Sモデルは鉄道総合技術研究所で提案されている構成式で、 $\tau \sim \gamma$  関係、 $h \sim \gamma$  関係、せん断強度を正確に考慮でき、次式で表現される。

$$\begin{aligned} y &= \frac{x}{\frac{1}{C_1(x)} + \frac{x}{C_2(x)}} \quad x = \gamma/\gamma_r, \quad y = \tau/\tau_f \\ C_1(x) &= \frac{C_1(0)+C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0)-C_1(\infty)}{2} \cdot \cos\left\{ \frac{\pi}{\alpha/x+1} \right\} \\ C_2(x) &= \frac{C_2(0)+C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0)-C_2(\infty)}{2} \cdot \cos\left\{ \frac{\pi}{\beta/x+1} \right\} \end{aligned}$$

さらに、図-2のように、Masig則の相似比 $\lambda$ をひずみ関数に改良することで、スリップ形状の履歴を表現でき、1%を越えるひずみレベルでの減衰低下を再現できるモデルである。(図-3)

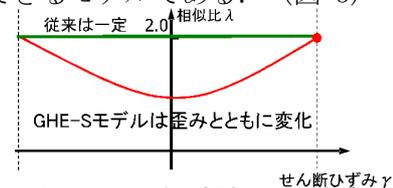


図-2 Masig 則の相似比の改良

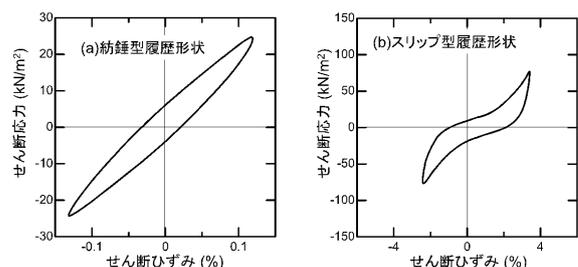


図-3 双曲線モデルと R-0 モデルの骨格曲線

### 3. 一次元地盤応答解析モデル

一次元解析モデル作成に用いた地点を図-4、柱状図を図-5、物性値を表-2に示す。

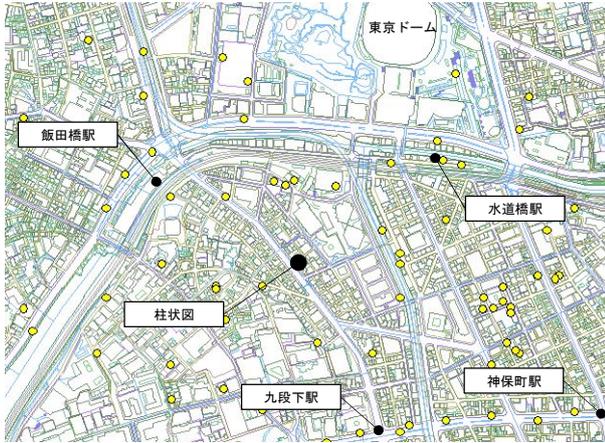


図-4 モデル対象位置

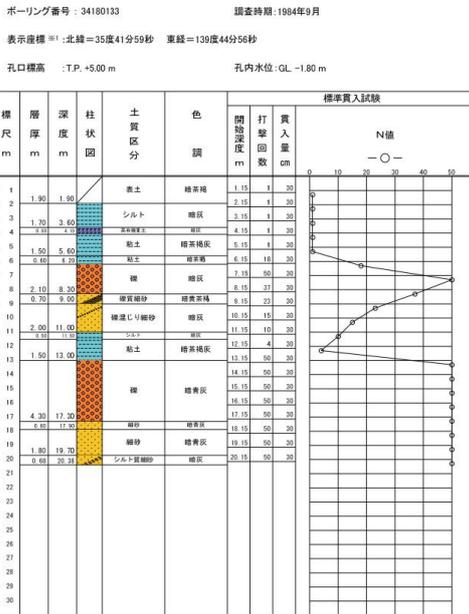


図-5 柱状図  
表-3 解析物性値

層下端	土質	単位体積重量 [kN/m <sup>3</sup> ]	V <sub>s</sub> [m/s]	G [kN/m <sup>2</sup> ]
GL-6m	粘性土	15	110	18,000
GL-11m	砂質土	18	190	65,000
GL-13m	粘性土	16	210	71,000
GL-19m	礫質土	20	300	180,000

動的変形特性の各モデルでのフィッティング結果を図-6, 7に示す。

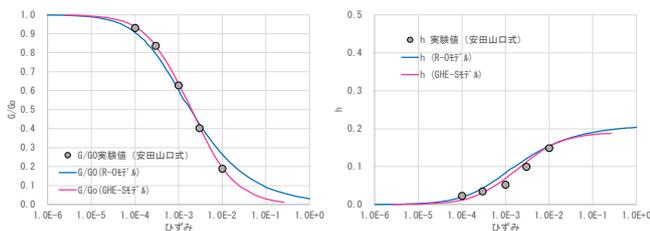


図-6 動的変形特性 (粘性土)

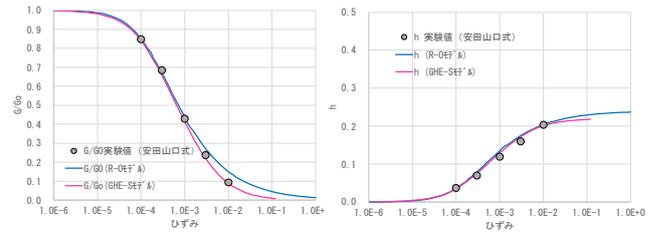


図-7 動的変形特性 (砂質土)

GHEモデルでは全てのひずみレベルで実験値と一致しているが、R-0モデルでは、粘性土、砂質土いずれも1%ひずみを越える領域でG/G<sub>0</sub>が高い傾向を示す。

### 4. 入力地震動

入力はレベル2地震動を対象とし、海溝型として日本建築センターで公表している模擬基盤波 (BCJL2) を、内陸直下型として鉄道標準のスペクトルII/G1地盤波 (SPC2) を使用する。図-8, 9に加速度波形、図-10に加速度応答スペクトルを示す。

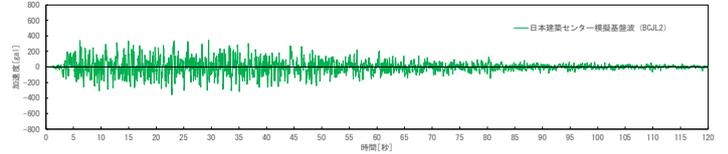


図-8 入力基盤波形 (BCJL2)

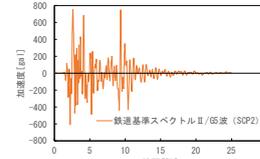


図-9 入力基盤波形 (SPC2)

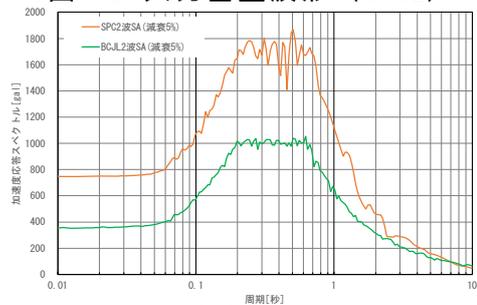


図-10 加速度応答スペクトル

### 5. 等価線形解析 (SHAKE) の特徴

SHAKEは以下の特徴を持っている。

- 1) 重複反射理論による逆増幅解析で地表面観測波を工学的基盤の波形に引き戻すことが可能。
- 2) 周波数領域の計算となり、履歴減衰を正しく取り込め、線形問題では厳密解が得られる。
- 3) 等価線形化手法を用いることで、土の非線形性を考慮できるが、適用限界は発生ひずみが1%程度とされている。

一方で、設計で多用されている等価線形解析の課題も指摘されている。SHAKEでは最大ひずみか

ら有効ひずみを計算する際に係数  $\alpha$  ( $=0.65$ ) を使用するが、図-11において、実数を入力した  $G-\gamma$  関係より求めた応力ひずみ関係、最大ひずみ  $\gamma_{max}$  に対応する点を B とする。すると、有効ひずみは図の A となり、等価線形解析では OA を結ぶ直線が応力-ひずみ関係となるので、最大ひずみに対する最大せん断応力は図の C 点となる。つまり、最大せん断応力-最大せん断ひずみ関係は、常に入力した応力-ひずみ関係より上となる。その差は応力-ひずみ関係が完全塑性状態の時に最大となり、 $1/0.65=1.54$  倍の過大評価となる。これが加速度の過大評価に結びつく。

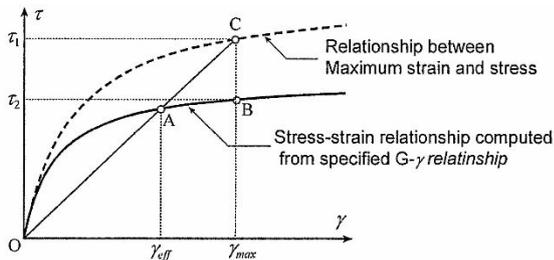


図-11 等価線形化法のイメージ

## 6. 海溝型地震波 (BCJL2) による解析結果

1次元地盤モデルに BCJL2 波を入力した結果を図-12~17に示す。

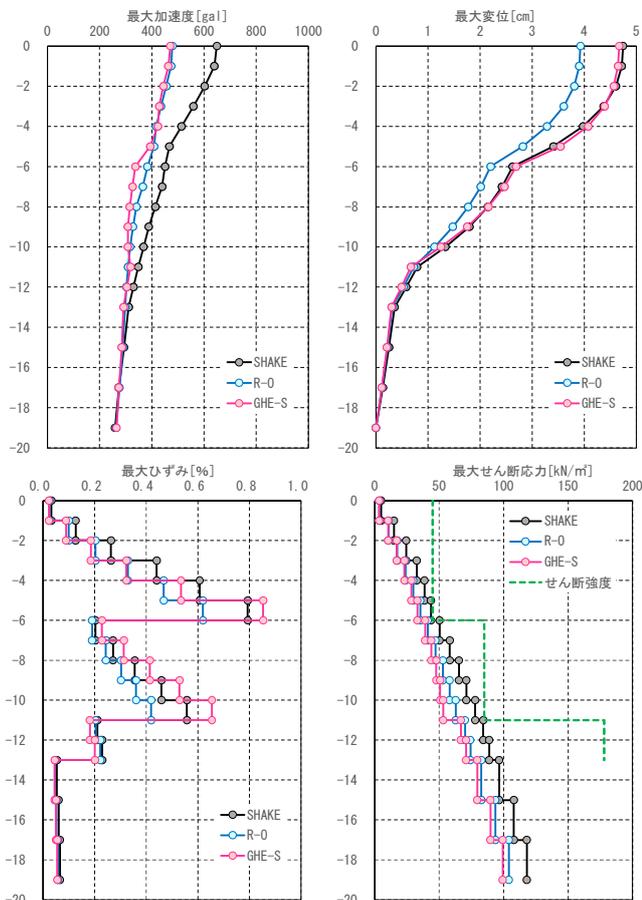


図-12 最大応答値プロット

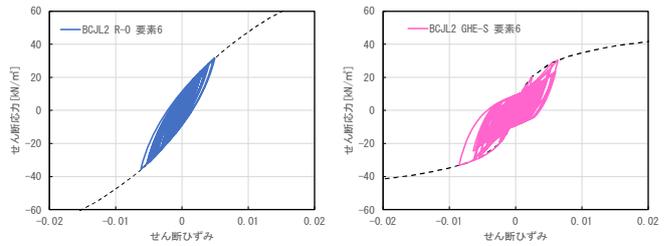


図-13  $\tau \sim \gamma$  履歴図 (粘性土層下端)

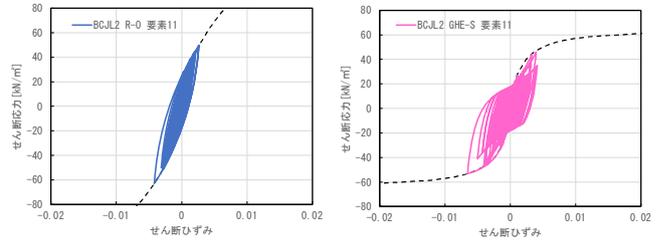


図-14  $\tau \sim \gamma$  履歴図 (砂質土層下端)

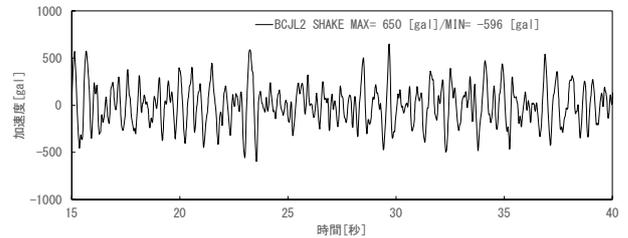


図-15 地表面加速度波形 (SHAKE)

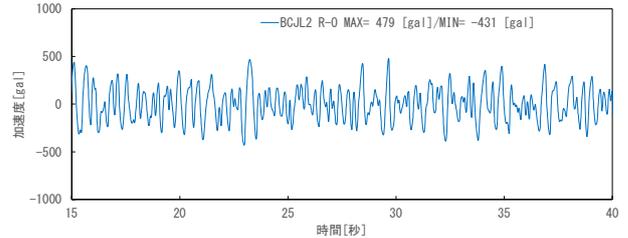


図-16 地表面加速度波形 (R-0 モデル)

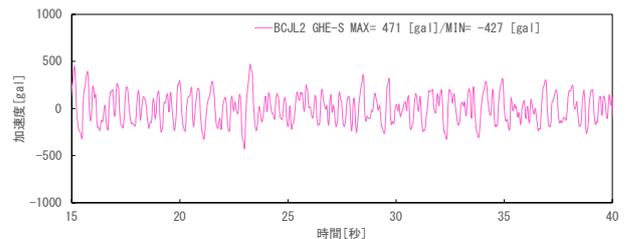


図-17 地表面加速度波形 (GHE-S モデル)

解析結果より以下の知見が得られる。

- 1) ひずみ、変位分布は SHAKE と GHE-S が近い。
- 2) 加速度分布は R-0 と GHE-S モデルが近く、加速度は SHAKE が大きい
- 3) GHE-S モデルは紡錘型から初期のスリップ形状の履歴ループとなっている。

1%以下のひずみレベルでは SHAKE が厳密解とすると、ひずみ・変位分布で GHE-S が非常に再現性が高く、かつ等価線形法における加速度の過大評価を考慮すると、GHE-S モデルが非常に高精度な非線形モデルであることが確認できる。

## 7. 内陸直下型地震波 (SPC2) による解析結果

1次元地盤モデルにSPC2波を入力した結果を図-18~23に示す。

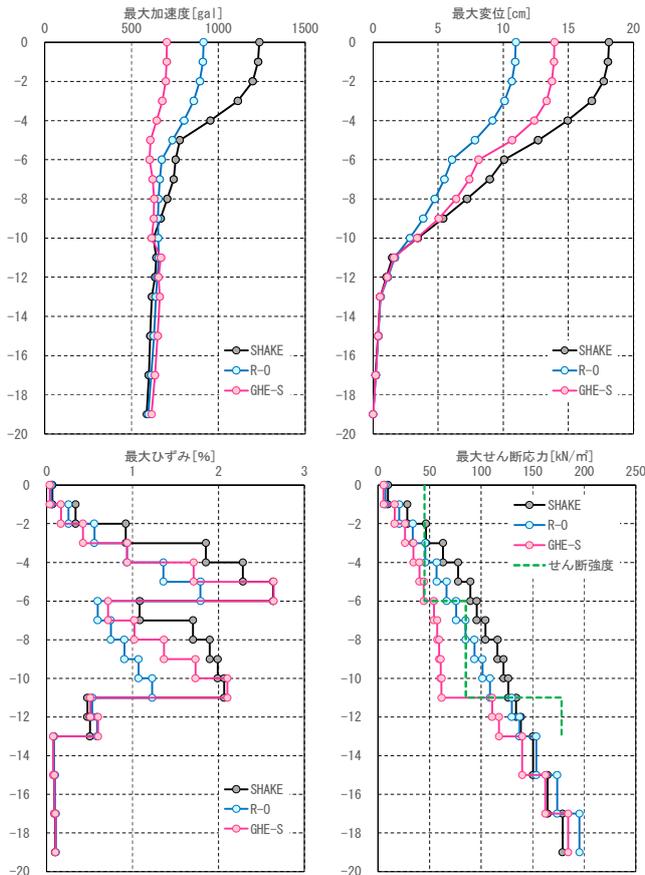


図-18 最大応答値プロット

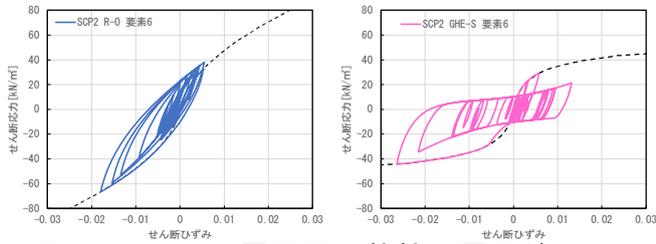


図-19  $\tau \sim \gamma$  履歴図 (粘性土層下端)

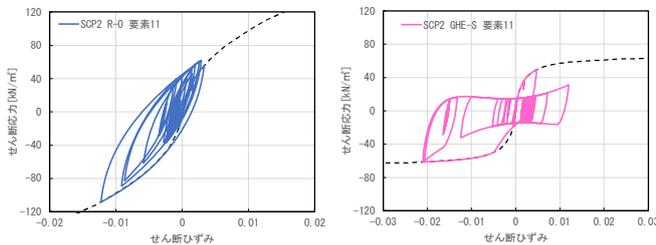


図-20  $\tau \sim \gamma$  履歴図 (砂質土層下端)

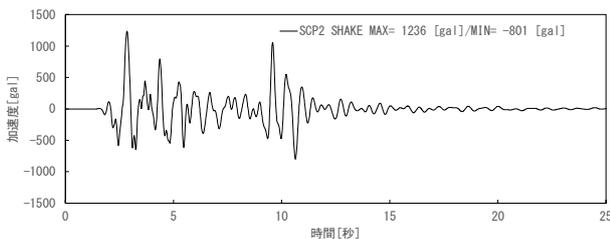


図-21 地表面加速度波形 (SHAKE)

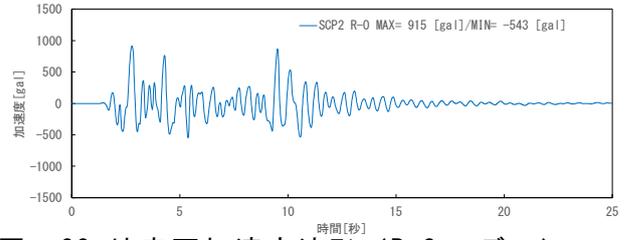


図-22 地表面加速度波形 (R-0 モデル)

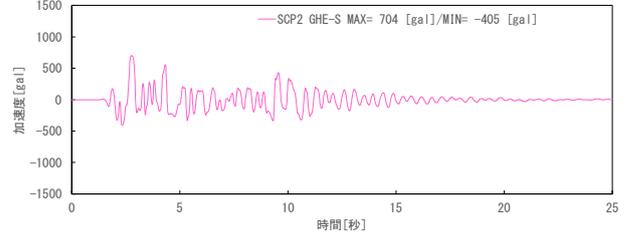


図-23 地表面加速度波形 (GHE-S モデル)

解析結果より以下の知見が得られる。

- 1) R-0モデルのひずみ, 変位が小さい. これは,  $G-\gamma$  関係のフィッティングで, 1%を越えるひずみ領域での誤差が原因と考えられる.
- 2) 発生応力がせん断強度に到達しており, GHE-Sが他モデルと比して, 特に砂層の応力が低い.
- 3) ひずみが2%を越え, GHE-Sモデルにスリップ形状の履歴ループが確認できる.

## 8. 地表面加速度応答スペクトルの比較

図-24, 25 に地表面の応答加速度スペクトルを示す. GHE-SモデルとSHAKEのピークスペクトルで最大1500galの差が生じることがわかる.

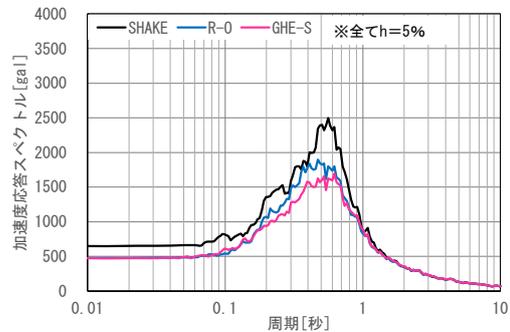


図-24 地表面加速度スペクトル (BCJL2)

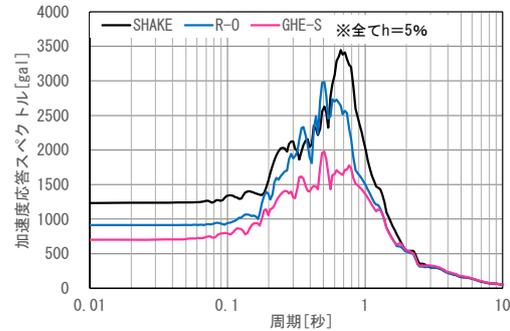


図-25 地表面加速度応答スペクトル (SPC2)

## 9. まとめ

実地盤での1次元地盤解析により, 各種の非線形モデルの応答差, GHE-Sの優位性を確認した。