

(33) 砂層の非線形応答解析における粘性減衰の効果

(財) 電力中央研究所 (正) 当麻純一 (正) 大友敬三

1. まえがき

本報告は、砂層の非線形地震応答解析法の適用性の確証を得る目的で行っている研究の一部をとりまとめたものである。

強震時における砂層の震動応答を求めるには、砂の応力-歪関係の非線形特性が応答解析の中で適切に扱われなければならない。これを考慮する方法としては周知のように、等価線形化解析と時刻歴非線形解析とがある。従来、等価線形化解析と時刻歴非線形解析との結果の比較は多くの例題によって示されてきているものの、検証データがきわめて乏しいために、いずれの数値解析法がどの程度良い近似を与えているのか判断に苦しみ場合がしばしばある。

本報告は、小型せん断土槽を用いた国生ら¹⁾の研究成果を踏まえ、その後実施した大型せん断土槽の振動台実験とその数値シミュレーションとから、非線形地震応答解析法の適用性をさらに検討したものである。

2. 模型振動実験

本実験では、水平地盤のせん断振動現象をできるだけ正確に再現するために、モデル地盤を作成する土槽として特別に工夫したせん断土槽を用いた。使用した大型せん断土槽(図-1)は、直径3.0m、高さ1.5mの円筒形で、モデル地盤と一体に自由に変形しうようになっている。周囲はカンバスで補強された厚さ7mmのゴム壁で構成されており、さらに内圧による側方への膨らみに対しては抵抗するように多段に鋼製リングが巻かれている。

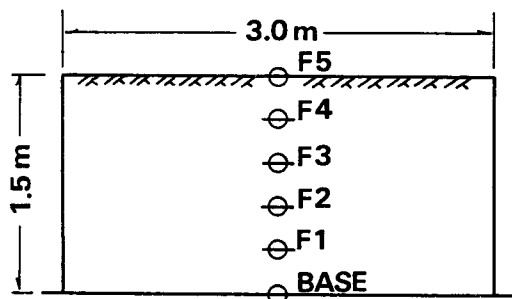


Fig.1 Model Ground on a Shaking Table

モデル地盤の材料としては、岐阜県産のマサ系の山砂を用い、含水比を約10%に調整した後に土槽内に敷きつめた。締固めはパイプレータにより、層厚が0.3m増すごとに行った。その際、各層の境界に加速度計(共和電業A S W-2 A, 容量2 G, 応答周波数0~100Hz)を埋設した。また、各層ごとに平面的に3ヶ所からシンウォールサンプラーによる試料採取をして、砂の密度の平均値として $\rho=1.378$ を得た。

振動台加振の前後に、微小振幅の自由減衰振動測定を行い、動特性の確認をした。これは、土槽端部をゴム製ハンマーで水平方向に軽く打撃することにより、地表面加速度(F5)を高倍率で記録するものである。そのフーリエスペクトルのピークは常に約19Hzであって変化せず、この地盤の一次固有振動数が一定に保たれていることを確認した。なお、加速度振幅から推定された歪レベルは $10^{-7} \sim 10^{-8}$ である。また、加速度の自由減衰波形から対数減衰率を読みとり、この固有振動数と歪レベルに対応する減衰定数として約5(%)を得た。

振動台加振は、正弦波による定常加振とEL CENTRO波による地震波加振とを行った。定常加振では、振幅一定の加速度の振動数を0~50(Hz)の範囲で変化させている。そして、振

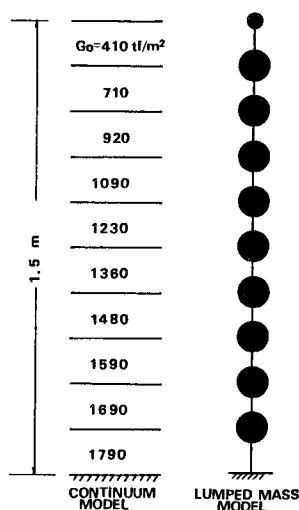


Fig.2 Models for Numerical Simulation

幅を再設定して同様の試験を繰り返した。設定した加速度片振幅は、砂層の非線形応答を考慮し、20, 80, 160, 240Galの4通りとした。地震波加振では、EL CENTRO波(1940 NS)の時間軸を1/5に短縮した波形を、最大値84, 175, 344, 533, 821(Gal)の5通りに設定して用いた。

3. 応答解析手法

砂層の地震応答を等価線形化解析(プログラム SHAKE)²⁾と時刻歴非線形解析(プログラム LIQ1)³⁾とによってシミュレートすることとした。図-2に解析モデルを示す。SHAKEは波動モデルであり、LIQ1は集中質量系モデルである。

減衰の扱いが両者で異なる。SHAKEでは、砂の履歴減衰と等価な臨界減衰比を h として、要素ごとに次式で表せられる振動数に依存しない複素剛性 G^* を用いている。

$$G^* = G (1 + 2 i h) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 G : 等価せん断剛性、 $i = \sqrt{-1}$

LIQ1では、Voigt体の運動方程式を用いている。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -\{m\}\ddot{Z} \dots\dots (2)$$

ここに、 $[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 減衰係数マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス、他は省略

$[C]$ 項は粘性減衰項であり、これから定義される臨界減衰比 h は振動系の各次の固有振動数に正比例する。系の減衰性がすべて履歴特性によっているものと考えれば、その効果は刻々変化させる $[K]$ 項で考慮されるから $[C]$ 項は不要である。

4. 解析に用いる剛性と減衰

低拘束圧であるモデル地盤の物性をできるだけ直接的に把握するために、正弦波加振による砂層の定常応答から地震応答解析に用いる剛性と減衰を求めることとした。

(1) せん断剛性

地表加速度(F5)の共振曲線を描きピーク振動数 f_0 を得て、これを平均的なせん断剛性 G に換算した。

$$G = \rho (4 H f_0)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ : 密度、 H : 砂層厚

このとき、このせん断1次モードに対応する砂層内平均歪 γ を次式で定めた。

$$\gamma = \frac{1}{H} \cdot \frac{\alpha}{(2 \pi f_0)^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 α : 地表加速度片振幅 (Gal)

図-3は、振動台加速度振幅を4通りに変えた異なる共振曲線から(3)式と(4)式に基づいて G と γ との関係を得て整理したものである。 G を履歴曲線の割線勾配に対する等価せん断剛性と考えるとHardin-Drnevichモデルでこの関係を近似

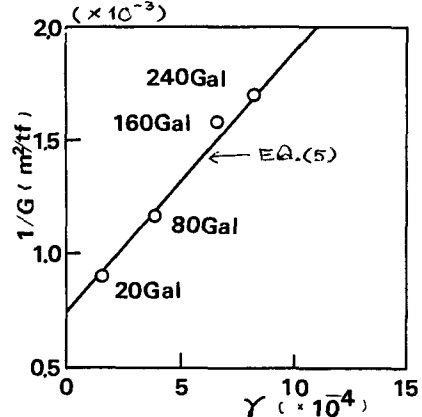


Fig.3 Shear Strain vs. Shear Modulus from Steady State Response

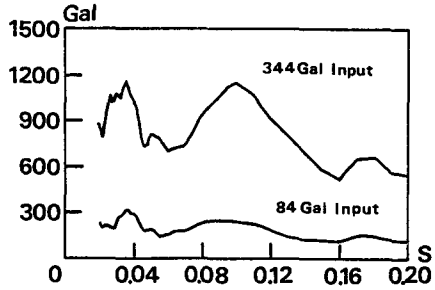


Fig.4 Measured Base Response Spectrum - Modified EL CENTRO Excitation -

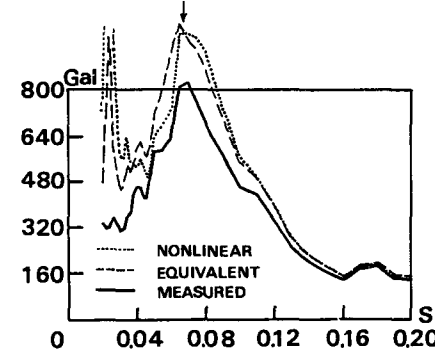


Fig.5 Surface Response Spectrum from 84 Gal Max. Base Motion

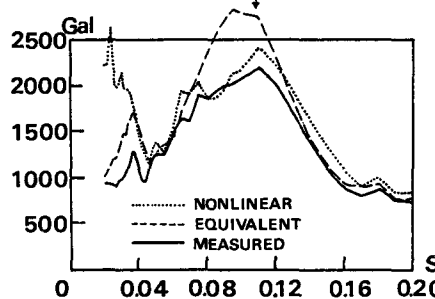


Fig.6 Surface Response Spectrum from 344 Gal Max. Base Motion

することとすれば次のようである。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma / \gamma_r} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 G_0 ：初期剛性 1335(tf/m²)
 γ_r ：規準歪 6.6×10^{-4}

G_0 と γ_r は図-3中の回帰直線の切片と傾きから定まった値である。 G_0 は微小歪に対応した砂層の平均剛性ということになる。ただし、砂の剛性は拘束圧に依存するものと考えるべきであるので、ここでは次式のように補正して用いることとした。

$$G_0 = 1500 x^{0.5} \text{ (tf/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 x ：地表面からの深さ (m)

係数1500は、(6)式で定まる系の固有振動数が一様剛性 $G_0 = 1335 \text{ (tf/m}^2\text{)}$ で定まる固有振動数(17Hz)に等しいという条件で決定したものである。

(2) 履歴減衰

時刻歴非線形解析では、応力(τ)－歪(γ)関係の骨格曲線として、

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + |\gamma / \gamma_r|} \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表現した式を用い、Masing規準によって履歴を定めた。

この場合、等価線形解析に用いる等価減衰定数 h の歪依存性は次式で表せる。⁴⁾

$$h = \frac{4}{\pi} \left[\frac{G_0}{G} \left\{ \frac{\gamma_r}{\gamma} - \left(\frac{\gamma_r}{\gamma} \right)^2 \ln \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \right\} - \frac{1}{2} \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式では $\gamma \rightarrow 0$ のとき $h \rightarrow 0$ になる。SHAKEでは $h = 0$ での計算実行が不可能なので(8)式での下限値として1%を設定した。

5. 解析結果

入力地震波の時間刻み Δt を0.0025(s)、個数 N を2048点として与え応答解析を行った。等価線形化解析での実効歪率は最大歪の65%とした。また、時刻歴非線形解析での直接積分にはNewmarkの β 法($\beta = 1/4$)を用いた。

図-4は入力波の応答スペクトル(減衰5%：以下同じ)の例である。図-5は最大84(Gal)入力の場合の地表面(F5)の応答スペクトルである。時刻歴非線形解析では粘性減衰項をあえて無視している。解析結果は両者ほぼ等しく、解析手法間による差異は目立たない。しかし、実験値と比べるといずれも主要なピーク(↓印)は再現できているものの全体的に応答が大き目である。何よりも、解析結果には短周期側に鋭いピークがあるのが特徴である。地表応答/振動台入力間の伝達関数を求めたところ、この短周期側のピークは系の2次

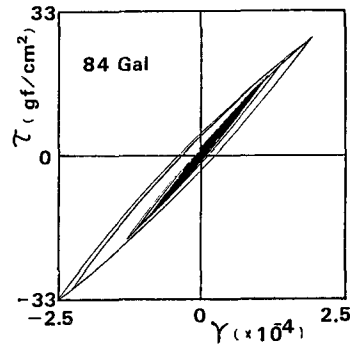


Fig.7 Stress (τ) vs. Strain (γ) from 84 Gal Max. Base Motion

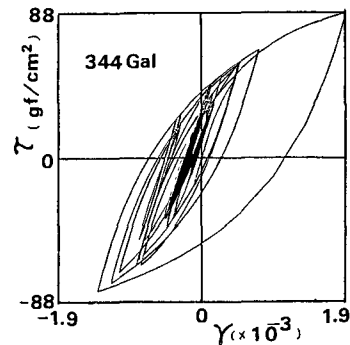


Fig.8 Stress (τ) vs. Strain (γ) from 344 Gal Max. Base Motion

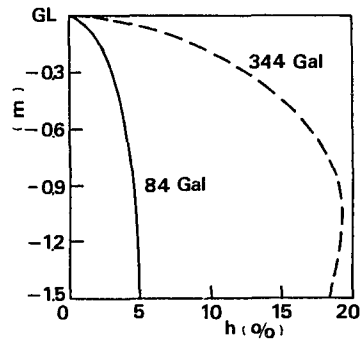


Fig.9 Strain Compatible Damping Ratio from Equivalent Linear Analysis

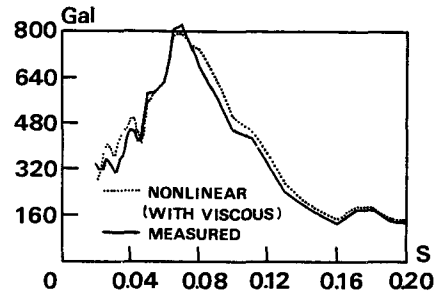


Fig.10 Surface Response Spectrum from 84 Gal Max. Base Motion

モードに起因するものであることを確認している。図-6は最大344(Gal)入力の場合の結果を同様に示したものである。両解析手法ともに主要なピークが長周期側へ移行している様子は再現できている。0.04(s)~0.20(s)間での実験値への近似度は時刻歴非線形解析結果の方が優れているが、それより短周期側での近似度はかえって悪い。等価線形化解析では入力レベルが大きくなれば短周期成分の増幅は目立たなくなるものの、全周期帯に渡って大きな応答を与えてしまう。

6. 考察

図-5、図-6を見ると時刻歴非線形解析では実験値には現れていない短周期成分の増幅が目立つ。等価線形化解析では

は入力レベルが小さなきにのみこの現象が生じている。この特徴は主として減衰の扱いの違いによるものと考えられる。図-7は、84(Gal)加振の場合の時刻歴非線形解析で描かれた応力-歪関係(図-2のモデルの最下層)である。最大歪は約 2×10^{-4} であって小さく、図から明らかなように履歴ループによる減衰はわずかなものである。ちなみに最大歪値を(8)式に代入すると、等価減衰定数は5%程度でしかない。波形の不規則性を考慮すれば有効な減衰はさらに小さいだろう。これが短周期での増幅が顕著となった理由と考えられる。このことは、したがって等価線形化解析でも同様である。図-8は、344(Gal)加振の場合について同じ整理をしたものである。最大歪は約 2×10^{-3} であり、履歴ループが膨らんでいる。ただし、曲線が密集している原点付近では 5×10^{-4} 以下程度の小振幅での繰り返しがきわめて多く、この範囲では履歴減衰があまり発揮されない。一方、等価線形化解析では最大歪(の65%)に対応して時刻に無関係に等価減衰を定めてしまうので、このような小振幅の影響は考慮されていない。履歴ループとの比較のために、図-9に等価線形化解析での減衰定数収束値の深度分布を示した。80(Gal)加振の場合には5(%)以下である。

ここで、時刻歴非線形解析において無視していた粘性減衰[C]項を考慮してみよう。ただし、簡単のため[C]項には次式で示す[K]項比例型減衰を仮定する。もちろん、[K]項は刻々変化させる。

$$[C] = a [K] \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 a : 比例定数 ($= 2h / \omega_0$) ω_0 : 系の固有円振動数, h : ω_0 に対応する臨界減衰比
 ここでは、 ω_0 として初期剛性(6)式で定まる固有振動数17(Hz)から106.76(rad/s)を、 h として5(%)を用いる。 h の値は、自由減衰振動試験で得た微小歪レベルでの対数減衰率を参考としたものである。

図-10、図-11は解析結果を実験結果と比べたものである。短周期での増幅が抑えられるとともに、全周期帯に渡って実験値と解析値との一致度はきわめて良い。このことから、時刻歴非線形解析では歪レベルに依存しない減衰を考慮しておくことが望ましいと考えられる。粘性減衰を導入するのは物性論的には問題を残しているが、今回のように高振動数域での振動台実験結果との照合を考える場合にはひとつの有用な方策と言える。

7. 結論

履歴減衰とは別に歪レベルに依存しない減衰をも適切に考慮しておけば、砂層の時刻歴非線形解析の結果は振動台実験結果と良く一致する。

参考文献

- 1) 国生ほか「軟弱地盤の非線形……」土木学会論文報告集 Vol.285, pp57~67, 1979.
- 2) Schnabelほか「SHAKE A Computer Program……」E E R C 72-12, 1972.
- 3) 国生ほか「砂層の液状化……」電力中央研究所研究報告 No381023 1982.
- 4) 国生ほか「MODIFIED HARDIN-DRNEVICH モデルについて」土木学会年講 III-64, 1978.

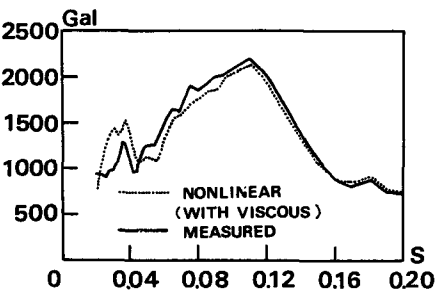


Fig.11 Surface Response Spectrum from 344 Gal Max. Base Motion