

(111) 大型せん断土槽内の模型砂地盤の

拘束圧を考慮した動的 $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係について

大林組技術研究所

松田 隆

同上

後藤 洋三

1. まえがき

地盤、土構造物あるいは地盤－構造物連成系の耐震性を模型振動実験により検証する場合、模型地盤の土質定数を正確に把握することは、その実験結果を定量的に分析する上で重要となる。また、実構造物の耐震設計に用いられる動的解析手法をこれらの実験結果と照合させ検証する場合、模型地盤の動的特性を解析手法に取り入れる必要もある。ところが実地盤材料を用いた模型実験を行なう場合、模型地盤は極めて低い拘束圧下であり、その応力状態における動的特性を通常の室内要素試験により決定することは困難である。

そこで本研究では、模型地盤の共振振動実験から得られる地盤内の加速度応答値 $\{\ddot{Y}\}_i$ を用い、逆解析手法により $G_i \sim \gamma_i$ 、 $h_i \sim \gamma_i$ 関係を直接求め、さらに、Hardin-Drnevichモデルにおける $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を推定した。

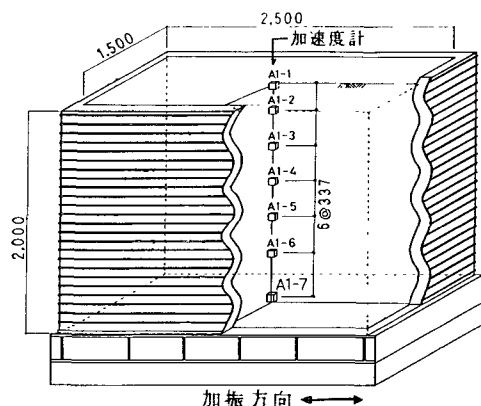
本報は大型せん断土槽¹⁾を用いた実地盤材料の振動実験にこの逆解析手法を適用した結果、ならびに推定された $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を使用した等価線形化法によるシミュレーション解析結果を述べるものである。

2. 実験内容

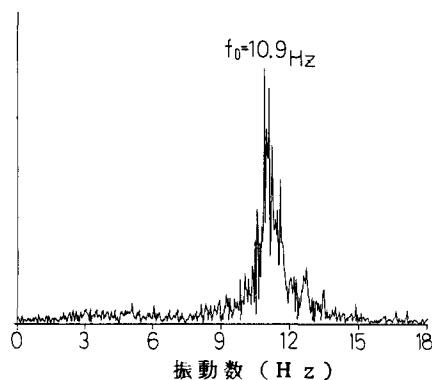
実験に用いた土槽は図－1に示す内寸法 ($L=2.5\text{m} \times T=1.5\text{m} \times H=2.0\text{m}$) の大型せん断土槽である。この大型せん断土槽は、25段の軽量鋼製の矩形枠をボールベアリングでスライド支承させることにより土槽内のモデル地盤と一体に変形し得る構造となっている。

実験試料は気乾状態の山砂を使用し、約30cm層ごとに実験試料を空中落下させ、振動台で加振(25Hz, 250gal)し充分な締め固めを行ないモデル地盤を作成した。モデル地盤の平均的な単位体積重量は 1.59t/m^3 、相対密度は88%である。また、モデル地盤地表部の微動測定より求めた砂層の卓越振動数は10.9Hzであった(図－2)。

加振実験は振動台にて正弦波を入力した共振実験と、地震波入力実験の2通りである。共振実験は底部加速度一定実験(入力加速度振巾一定、以下『B実験』と称す)に加え、モデル地盤地表部の加速度振巾に注目した頂部加速度一定実験(以下『T実験』と称す)も行なった。このT実験は入力加速度振巾が未知であるため、その入



図－1 大型せん断土槽及び計器配置



図－2 地表部の微動フーリエスペクトル

力加速度振巾の設定に困難があるものの、狭い振動数範囲で考えるなら、ほぼ地盤ひずみ一定の状態となる利点がある。そのため、地盤材料のひずみ振巾に関する強い非線形性の影響をみるには適した加振方法といえる。入力加速度振巾は表-1に示すようにB実験で6段階、T実験で4段階である。

地震波入力実験での入力はEl Centro波（時間軸1/5,継続時間10秒）を用いた。加振振巾は最大加速度を80~240galの範囲の5段階とした。

3. 実験結果

地表部の共振曲線（入力加速度に対する比）を図-3に、また共振振動数ならびに最大加速度応答倍率を表-1に示す。この図から入力加速度レベルが大きくなるに従い共振振動数および最大応答倍率が低下していることが明瞭に現われている。共振実験での10gal以下の非常に小さな入力加速度レベルにおいてもその共振振動数は微動測定の卓越振動数10.9Hzを下まわっており、すでにこの段階から地盤材料の非線形性の影響が現われていることが分る。

次に、地震波入力実験の地表部の最大加速度応答倍率とその卓越振動数を表-2に示す。また、速度応答スペクトルの一例を図-8の実線で示す。表-2からも入力加速度レベルの増大に伴ない、卓越振動数および最大加速度応答倍率が低下していくことが分る。

4. $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係の検討

ここでの主な作業は、(1) 共振実験結果を用い実際の拘束圧下におけるせん断剛性 G_i 、減衰定数 h_i を求め、(2) 微動測定結果から初期せん断剛性 G_0 を推定し、(3) Hardin-Drnevichモデルにおけるパラメーターを求める、の3項目である。

表-1 共振振動数と最大応答倍率

試験	設定 加速度 (gal)	共振 振動数 (Hz)	最大応 答倍率
B 実験	底部 10	10.17	9.94
	" 20	8.69	8.14
	" 40	8.38	5.49
	" 80	7.28	5.10
	" 120	6.19	3.89
	" 160	5.18	3.15
T 実験	頂部 50	10.70	16.67
	" 100	9.99	10.78
	" 200	7.98	7.72
	" 300	7.40	6.16

表-2 最大応答倍率
(地震波入力実験)

最大入力 加速度 (gal)	最大応答 倍率	卓越 振動数 (Hz)
80	3.93	7.69
120	3.80	7.24
160	3.53	7.14
200	3.40	6.94
240	3.23	6.60

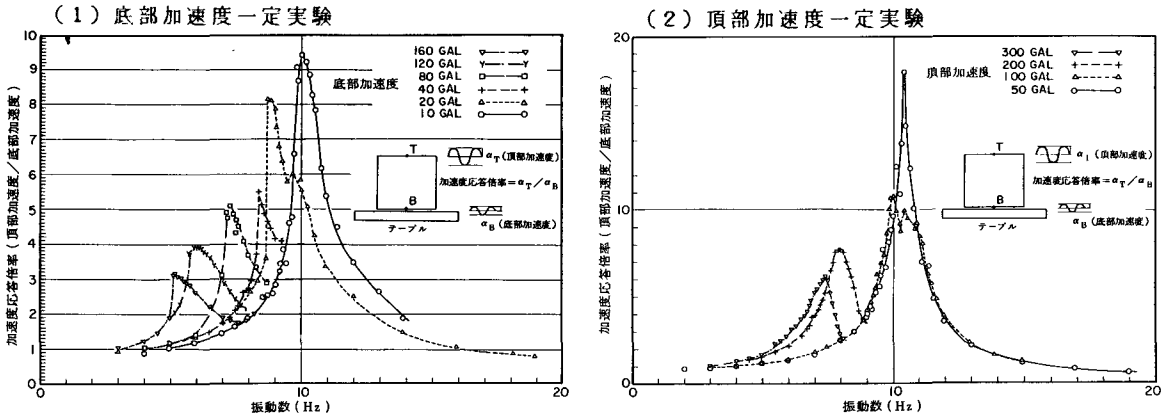


図-3 地表部の共振曲線

(1) 逆解析

モデル地盤がせん断変形のみで振動していると仮定し、図-4に示す加速度計の設置位置に対応させた6質点でモデル化する。このモデルに対する運動方程式は、加速度 $\ddot{Y}$ 、変位 Y を既知量とし単位面積当りの複素バネ K を未知量とすると式(1)のように書け、未知量 K は式(2)から求まる。

$$\{M^* \ddot{Y}\} + [Y] \{K\} = \{0\} \quad \dots\dots(1)$$

$$\{K\} = -[Y]^{-1} \{M^* \ddot{Y}\} \quad \dots\dots(2)$$

複素バネ K_j とせん断剛性 G_j 、減衰定数 h_j の関係は式(3)による。ここに H_j は j 層の層厚である。また j 層におけるせん断ひずみ γ_j は式(4)から求まる。

$$K_j * H_j = G_j = G_j (1 - 2h_j^2 + 2ih_j \sqrt{1 - h_j^2}) \quad \dots\dots(3)$$

$$\gamma_j = |Y_{j+1} - Y_j| / H_j \quad \dots\dots(4)$$

共振実験結果のうち共振点付近のデーターを式(1)に代入し求めた $G_i \sim \gamma_i$ 、 $h_i \sim \gamma_i$ 関係をプロットしたものが図-5である。 $G_i \sim \gamma_i$ 関係についてはよく知られているひずみ依存性の特徴、ならびに拘束圧の影響が明瞭に現われている。 $h_i \sim \gamma_i$ 関係は $G_i \sim \gamma_i$ 関係に比べバラついてはいるが、ひずみの増大に従い h_i が増加する傾向はうかがえる。

(2) G_0 の推定

G_0 の深さ分布は拘束圧 σ_c の0.5乗に比例すると仮定する¹⁾。

$$G_0 = \alpha * (\sigma_c)^{0.5} \quad \dots\dots(5)$$

ここで係数 α は G_0 を用いたせん断振動系の一次固有振動数が微動の卓越振動数 $f_0=10.9\text{Hz}$ に一致するように決定した。その結果、 $\alpha = 1258\text{t/m}^2$ となった。

(3) Hardin-Drnevichモデルパラメーター

Hardin-Drnevichモデルの骨格曲線ならびに減衰定数は次式で与えられる²⁾。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma / \gamma_{rG}} \quad \dots\dots(6), \quad h = \frac{h_{\max}}{1 + \gamma_{rh} / \gamma} \quad \dots\dots(7)$$

式(6)の G_0 は式(5)を用いることができる。ここで G にかかわる規準ひずみ γ_{rG} は式(6)の $G \sim \gamma$ 曲線が図-5に示す逆解析値からの分散を最小とするように決定した。図-6に γ_{rG} と σ_c との関係をプロットする。図中の直線は、既往の研究²⁾で言われている拘束圧の0.5乗の傾きを示すもので、その係数はプロット点のバラツキを平均化するように決定したものである[式(8)]。

$$\gamma_{rG} = 8.0 \times 10^{-4} * (\sigma_c)^{0.5} \quad \dots\dots\text{式}(8)$$

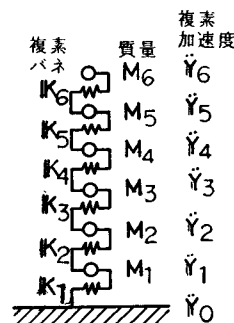


図-4 逆解析用
質点系モデル

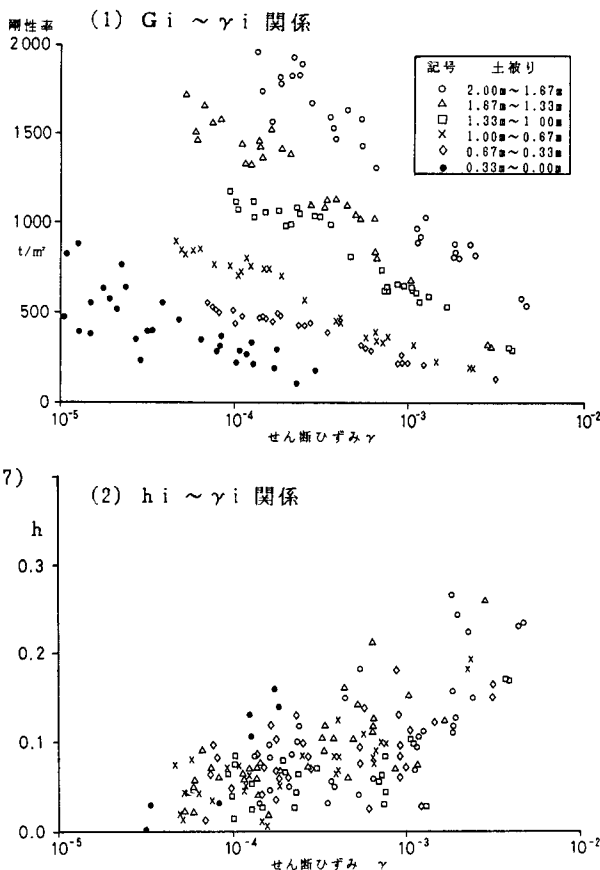


図-5 逆解析結果

減衰定数のうち h_{max} は図-5(2)で示すひずみの大きい領域での逆解析値から推定し0.3とした。 h にかかわる規準ひずみ γ_{rh} は逆解析でのプロット点がバラついており推定は困難である。よってここでは式(8)と同様の値とした。

5. 数値シミュレーション

前章で決定されたパラメーターを用い、等価線形化法(SHAKE)により共振実験ならびに地震波入力実験のシミュレーションを行なった。図-7はシミュレーションによって求められた共振曲線(—実線)を実験結果(○印)と比較して示した例である。この図から全般的にシミュレーションでの応答値が大きく、共振振動数をすぎた振動数域ではその傾向は顕著となるが、共振振動数ならびに最大応答倍率は実験結果と良好に一致することがわかる。

図-8は地震波入力時の地表部の速度応答スペクトルで、等価線形計算での実効歪率を0.7として行なったシミュレーションを破線(---),実験結果を実線(—)で表わし比較した例である。この図から短周期側でシミュレーション解析の方が大きくなる傾向はあるものの、最大応答値、卓越振動数ならびに長周期側の近似度は良好と思われる。

6. まとめ

実地盤材料を使用したせん断土槽実験から動的 $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を逆解析手法により求め、さらにHardin-Drnevichモデルにおけるパラメーターを推定した。その結果、模型地盤のように拘束圧が小さい場合においてもこの逆解析手法によって $G \sim \gamma$ 曲線を求め得ることが明らかになった。また、推定される $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を用いた等価線形化解析は実験結果の共振振動数ならびに最大応答倍率を良好にシミュレートし得ることを確認した。

最後に、せん断土槽の構造形式は電力中央研究所で考案されたものであることを記すとともに、貴重な御助言をいただいた同研究所当麻氏に感謝の意を表します。

参考文献：1)国生剛治、『土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答』、電力中央研究所報告No301
 2)Hardin,Drnevich,"Shear Modulus And Damping in Soil:Design Equations and Curves", Proc. ASCE , SM7
 3)当麻純一他、『軟質地盤に埋め込みを持つ剛体基礎の振動台実験とその動的解析』第20回土質工学研究発表会講演集

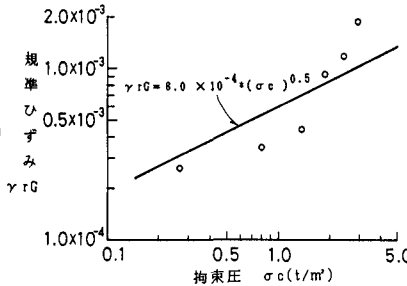


図-6 規準ひずみと拘束圧の関係

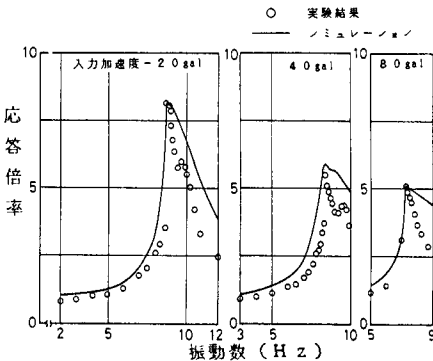


図-7 共振曲線の比較

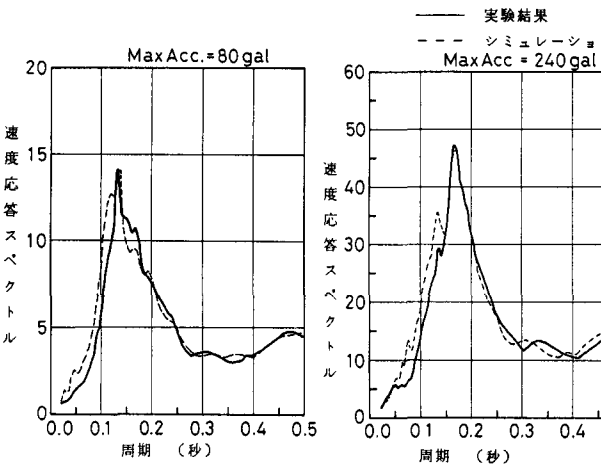


図-8 速度応答スペクトル