

神戸のまさ土における 動的変形特性の考察

川崎 宏二¹・安田 進²・樋口 佳意³・入澤 恒裕⁴

¹正会員 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

²正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

⁴学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

神戸のポートアイランドから採取したまさ土を用いて、繰返し載荷方法、相対密度、有効拘束圧を変えて土の動的変形特性を行った。その結果、まさ土のせん断剛性率や履歴減衰率に与える密度や拘束圧の影響が明らかになった。この基本的な実験に加え凍結試料での実験データを含む諸データを収集し、神戸のまさ土における動的変形特性についてまとめた。

Key Words : Masado, cyclic shear test, dynamic shear modulus, damping ratio

1. はじめに

阪神・淡路大震災ではまさ土によって埋め立てられた人工島や港湾施設などで大きな地震の揺れが発生した。まさ土は粒度分布のよい砂質土系の地盤であり、さらに神戸の埋め立てに用いられたまさ土は山から削ったもので角張っている。そのため通常の砂質土と比べて動的変形特性が異なる可能性が考えられた。そこで本試験では繰返しねじりせん断試験装置を用いて、人工的に詰めたまさ土の動的変形特性を調べた。また、凍結サンプリングによる不攪乱試料での実験も行われているため、この値との比較も行った。

2. 試験方法、装置

実験に用いた試料は、神戸のポートアイランドから採取したまさ土で、粒径 20mm ふるいを通過したものだけ用いた。図 1 に試料の粒径加積曲線、表 1 に物理特性を示す。供試体は外径 10cm、内径 6cm 高さ 10cm の中空円筒形で、湿潤状態で 5 層に分け突き固めて作製した。比較のために豊浦砂でも実験を行ったが、これは空中落下法によって作製した。

供試体を飽和状態にするために炭酸ガスの通気と通水をおこなった。実験条件は、相対密度 $D_r=50, 70, 100\%$ 、有効拘束圧は $\sigma'_c=1.0\text{kgf/cm}^2, 2.0\text{kgf/cm}^2$ 、非排水載荷とした。また、豊浦砂 ($D_r=30, 50, 80\%$) についても同様な試験を行った。実験結果は繰返し載荷回数 10 回目のヒステリシスループから等価線形法で求めたせん断剛性率 G (kgf/cm^2)、履歴減衰率 h (%) によって整理をした。装置としては中空ねじりせん断試験装置を用いて、空気圧によるアクチュエーターの水平方向の動きをラック・ピニオンギアにより載荷ロッドを回転させる応力制御とメガトルクモータより載荷ロッドを回転させるひずみ制御の 2 通りの試験を行った。

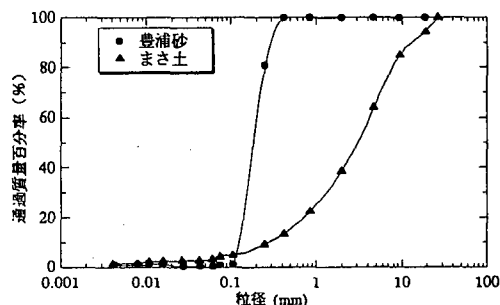


図 1 粒径加積曲線

表1 実験に用いた試料の物性特性

	まさ土	豊浦砂
D_{max} (mm)	26.5	0.425
D_{60} (mm)	4.1	0.2
D_{50} (mm)	3.1	0.18
D_{10} (mm)	0.28	0.12
U_c	14.6	1.67
ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.65
e_{max}	1.057	0.973
e_{min}	0.537	0.608

まさ土の e_{max} 、 e_{min} は 1000cc のモールドを用いて測定した。

3. 試験結果

試験結果をもとに以下に密度、拘束圧、載荷方法の影響をまとめる。ただし、密度、拘束圧については応力制御のデータのみで検討している。

(1) 密度の影響

図2にまさ土と豊浦砂のせん断剛性率 G ～せん断ひずみ γ 関係、履歴減衰率 h ～せん断ひずみ γ 関係を示す。まさ土と豊浦砂は密度の増加に伴い、せん断剛性率 G は大きくなっていることがわかる。これに対して、履歴減衰率 h は密度の影響をあまり受けていない。

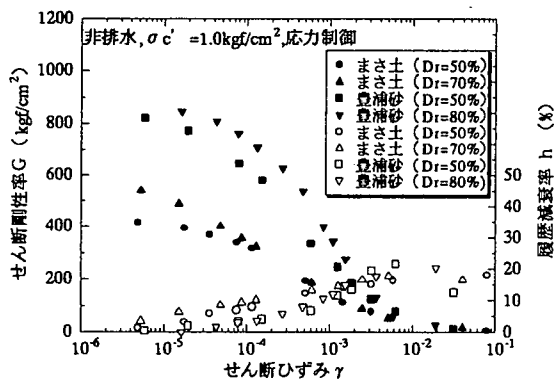


図2 $G \sim \gamma \sim h$ 関係

まさ土と豊浦砂で同程度の相対密度 ($Dr=50\%$) を比較すると、まさ土のせん断剛性率 G の方が豊浦砂に比べて格段に小さい。しかし、まさ土と豊浦砂は粒径など物理特性が異なるので、相対密度での比較だけでは説明できない。また、一般的にきれいな砂のせん断剛性率 G は相対密度ではなく e そのものによって決まるといわれている。そこで、間隙比 e を用いて(1)式でせん断剛性率 G を補正してみた。

$$G(e) = G / \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (1)$$

図3に $G(e) \sim e$ 関係を示す。同じひずみレベルのまさ土と豊浦砂を比較してみると、まさ土の方が e が小さいのに、 $G(e)$ でも小さくなった。この原因として、まさ土が破碎しやすいことや細粒分を多く含み、粒径がそろっていないことなどが挙げられる。また、試料の作製方法などの間隙比や相対密度では説明できないせん断剛性率 G への影響も考えられる。

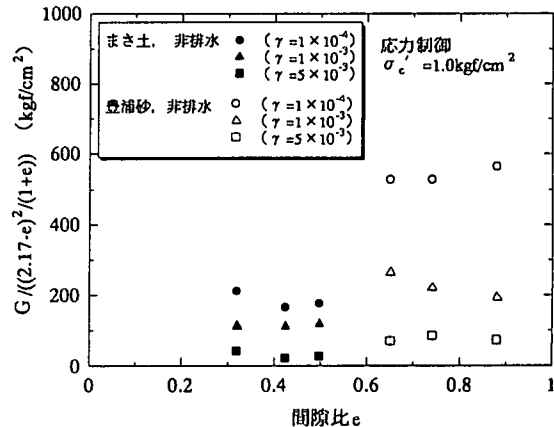


図3 $G(e) \sim e$ 関係

(2) 拘束圧の影響

まさ土と豊浦砂の拘束圧の影響について図4のせん断剛性率 G ～せん断ひずみ γ で比較してみると、両方とも拘束圧の大きい方が、せん断剛性率 G は大きくなった。

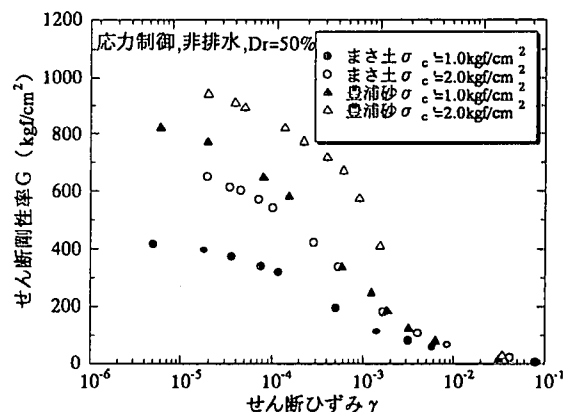


図4 $G \sim \gamma$ 関係

次に実験間の間隙比 e や拘束圧 σ'_c のばらつきの影響を消去するため図5に示すように、無次元に正規化した G/G_0 を用いて、せん断剛性率比 G/G_0 ～せん断ひずみ γ 関係で比較してみた。図6では、せん断剛性率比 G/G_0 ～拘束圧 σ'_c 関係を示すここに、 G_0 はせん断剛性率 G ～せん断ひずみ γ 関係か

ら Hadin-Drnevich モデルを用いて推定した。図 5、図 6 を見ると豊浦砂では σ_c' が大きいと同一ひずみでの G/G_0 は大きくなる。まさ土においては σ_c' の影響をあまり受けていない。

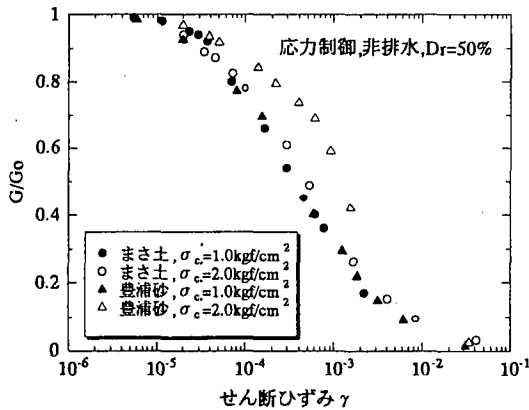


図 5 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係

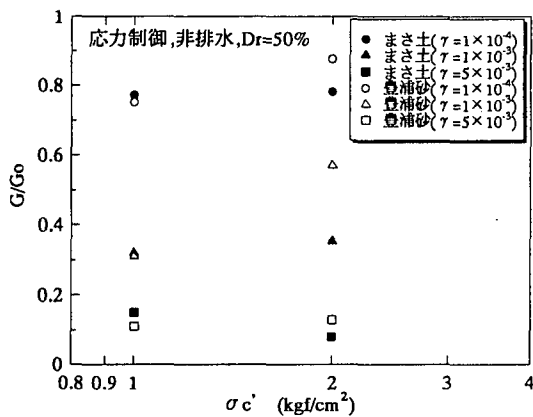


図 6 $G/G_0 \sim \sigma_c'$ 関係

(3) 載荷方法の影響

図 7、図 8 にまさ土と豊浦砂の制御の違いが動的変形特性に与える影響をせん断剛性率 G ～ せん断ひずみ γ 関係を示す。この図から豊浦砂の $Dr=50\%$ のとき大きなひずみ ($\gamma=5 \times 10^{-3}$ 以上) ではひずみ制御で載荷を行った方のせん断剛性率 G がやや小さくなっていることがわかる。

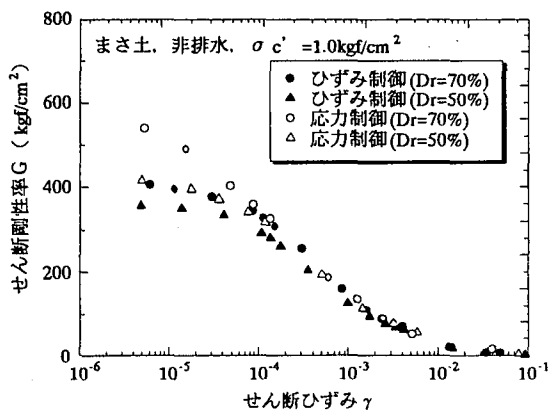


図 7 $G \sim \gamma$ 関係 (まさ土)

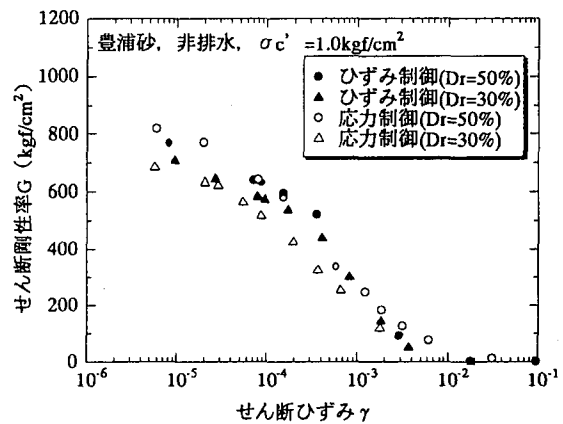


図 8 $G \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂)

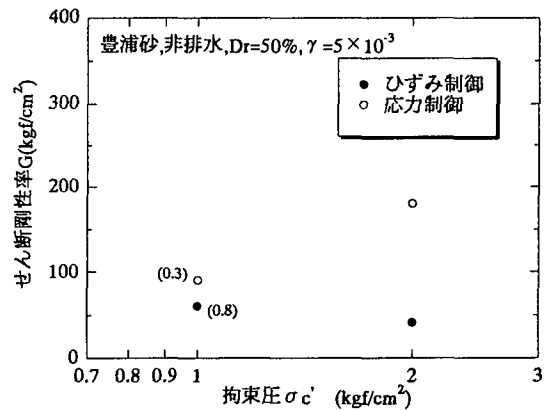


図 9 $G \sim \sigma_c'$ 関係

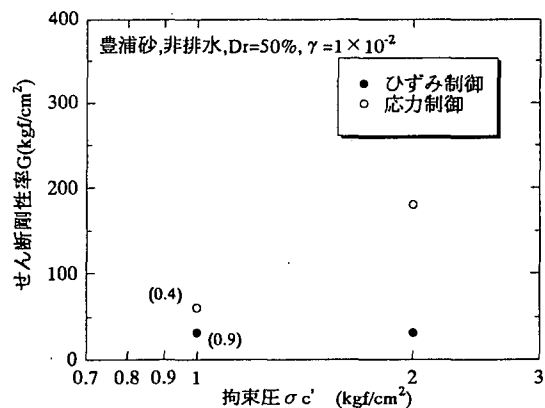


図 10 $G \sim \sigma_c'$ 関係

図 9、図 10 は豊浦砂について代表ひずみレベルでみた、せん断剛性率 G ～ 拘束圧 σ_c' 関係である。ここで図 9、図 10 内の () は発生した過剰間隙水圧である。ひずみ制御では $0.8 \sim 0.9 \text{ kgf/cm}^2$ 、応力制御では $0.3 \sim 0.4 \text{ kgf/cm}^2$ となり過剰間隙水圧発生量に差が生じた。すなわち、ひずみ制御では、過剰間隙水圧の上昇により有効応力が低下したために、せん断剛性率 G が小さくなったと考えられる。一方、まさ土では過剰間隙水圧発生量にあまり差がなく、両制御方法の結果に差はあらわれなかった。

4. 不攪乱試料での試験結果との比較

図 11、図 12 においてせん断ひずみ $\gamma=1 \times 10^{-4}$ 、 1×10^{-3} の不攪乱試料と攪乱試料の比較を行った。縦軸には密度の影響取り除くために、式(1)より $G(e)$ を求め、横軸には拘束圧 σ'_c としてプロットした。図 13、図 14 においては履歴減衰率 $h \sim$ 拘束圧 σ'_c 関係を示す。不攪乱試料のデータは阪神・淡路大震災地盤調査研究会が採取した改良地盤での試験結果¹⁾と畑中ら²⁾がコンテナ置き場かで採取した非改良地盤改良での試験結果とである。

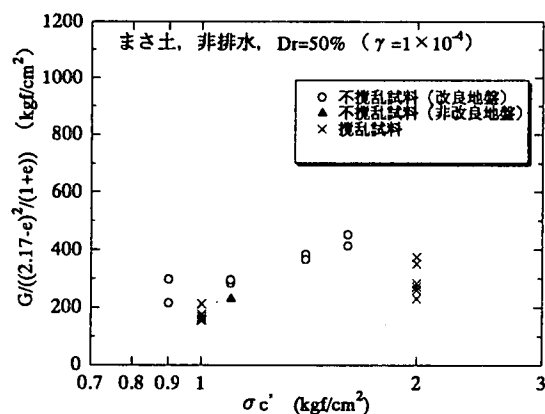


図 11 $G(e) \sim \sigma'_c$ 関係

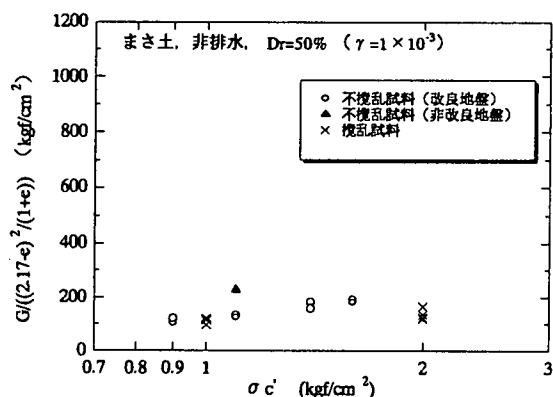


図 12 $G(e) \sim \sigma'_c$ 関係

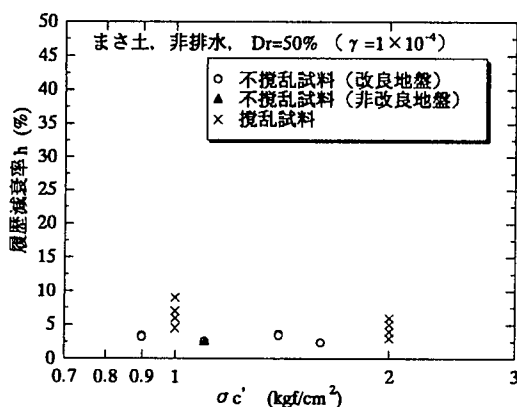


図 13 $h \sim \sigma'_c$ 関係

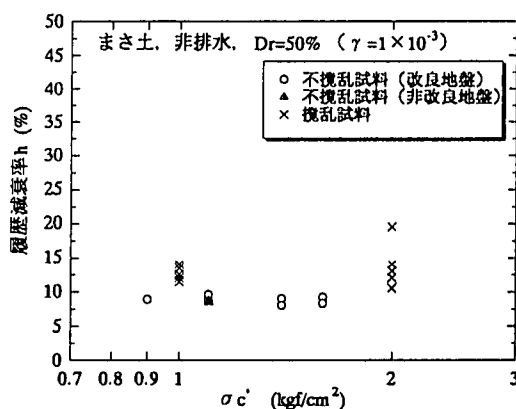


図 14 $h \sim \sigma'_c$ 関係

これらの結果から、特に小ひずみ領域で、攪乱試料の方が不攪乱試料より剛性の低下の程度が大きく、履歴減衰率が少し大きいことがわかる。

5. まとめ

まさ土の動的変形特性について、いくつかの条件を変えて実験を行った。そして、豊浦砂の実験結果と比較した。その結果、同一の相対密度ではまさ土の方がせん断剛性率 G が小さいことやまさ土では拘束圧の影響を受けにくいことなどがわかった。

参考文献

- 1) 安田進・本郷隆夫・樋口洋平・添田弘基：締固められたまさ土埋立地盤の特性(その4)室内動的変形試験結果、土木学会第53回年次学術講演集, pp130-131, 1998.
- 2) 塩見忠彦・畑中宗憲・内田明彦・吉沢睦彦：兵庫県南部沖地震で液状化したポートアイランドの地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 815-816, 1996.