

2005年福岡県西方沖地震での液状化に伴う地盤流動被害について

九州工業大学大学院	学生会員	○田端尚子
九州工業大学工学部	正会員	永瀬英生 廣岡明彦
九州工業大学工学部		中村祥平
基礎地盤コンサルタンツ(株)	正会員	田上裕 白井康夫
東洋建設(株)	正会員	柳畑亨

1. はじめに：平成17年3月20日に発生した福岡県西方沖地震により、博多湾沿岸域の埋立地を中心にして地盤の液状化が発生し、海の中道海浜公園内「光と風の広場」においては、液状化による地盤の流動被害が確認されている。そこで、流動発生地点の噴砂を試料として採取し、中空ねじりせん断試験装置を用いて、試料の液状化強度および液状化後の変形特性を調べた。また、2次元FEMを用いた、試料採取地点における地盤の流動解析を行った。さらに、博多湾浚渫土を用いて同様の試験を行い、埋戻し土の違いによる流動発生についての検討も行っている。

2. 試料：試料には、海の中道海浜公園内のかも池付近で発見された噴砂、および博多湾浚渫土を用いた。図-1にそれぞれの試料の粒径加積曲線を示す。これより、噴砂試料は比較的粒径の揃った試料であり、土粒子密度 $\rho_s = 2.560 \text{ g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max} = 0.816$ 、最小間隙比 $e_{\min} = 0.385$ 、平均粒径 $D_{50} = 0.35 \text{ mm}$ 、均等係数 $U_c = 2.0$ であった。博多湾浚渫土は、細粒分含有率 $F_c = 65.0\%$ 、粘土分含有率 $P_c = 7\%$ と、細粒分を多く含む試料であることがわかる。また、 $\rho_s = 2.746 \text{ g/cm}^3$ 、 $D_{50} = 0.038 \text{ mm}$ 、 $U_c = 6.67$ であった。さらにコンシステンシー試験を行った結果、液性限界 $w_L = 60.65\%$ 、塑性限界 $w_p = 29.02\%$ 、塑性指数 $I_p = 31.63$ であった。

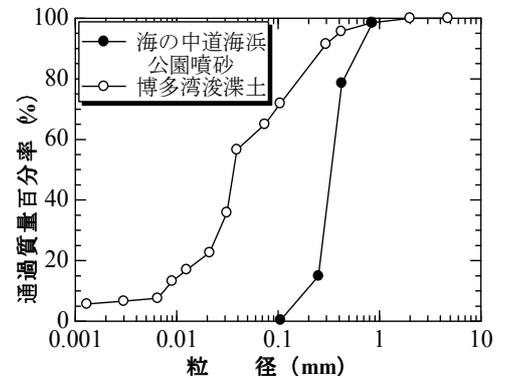


図-1. 粒径加積曲線

3. 実験方法：供試体は、外径10cm、内径6cm、高さ10cmの中空円筒形とし、噴砂試料については空中落下法により作製した。また、かも池付近のボーリングデータより、液状化したと思われる層のN値は2~5程度であった。そこで平均N値3程度より、Meyerhofの式を用い、有効拘束圧から相対密度を算出し、 $\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$ のとき $Dr = 28\%$ 、 $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$ のとき $Dr = 33\%$ 、 $\sigma'_c = 19.6 \text{ kPa}$ のとき $Dr = 38\%$ と3つの試験条件を設定した。博多湾浚渫土については締固めエネルギー $E_c = 20 \text{ kJ/m}^3$ 、 50 kJ/m^3 のエネルギーを与え、最適含水比 ($w_{\text{opt}} = 24.0\%$) で湿潤突固め法により作製した。供試体作製後、供試体内を十分に飽和させ、噴砂試料については所定の有効拘束圧で、博多湾浚渫土については有効拘束圧 $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$ にて等方圧密を行った。繰返し載荷は非排水状態で、0.1Hzの正弦波荷重を一定の繰返し応力比にて載荷した。また、繰返し応力を20回載荷し、その後非排水状態を保ったまま静的単調載荷を行った。静的単調載荷はひずみ制御で行い、載荷速度は $\dot{\gamma} = 10\%/\text{min}$ とした。

4. 液状化試験結果：図-2に、せん断応力比 $R = \tau/\sigma'_c$ と両振幅せん断ひずみ $DA = 7.5\%$ に至るまでの繰返し回数 N_c の関係を示す。それぞれの試料について液状化強度比 R_{120} を読み取ると、噴砂試料は比較的低い液状化強度比であり、博多湾浚渫土は締固めエネルギーを 50 kJ/m^3 まで増加させると、噴砂試料に比べ高い液状化強度比を示す。

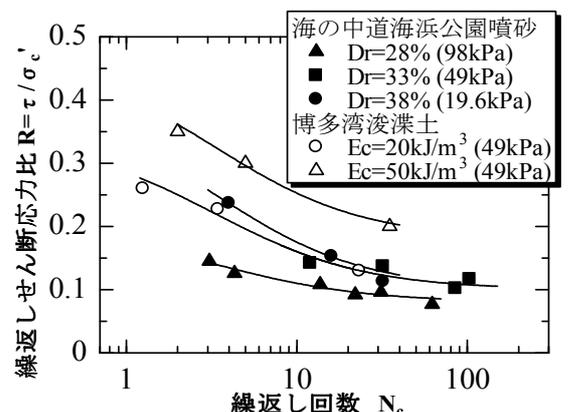


図-2. 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係

5. 繰返し載荷後の変形特性：噴砂試料について、図-3に静的単調載荷を行ったときのせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を示す。これより、 $F_L \leq 1.0$ の状態では、小さなせん断応力で大きなせん断ひずみが発生し、せん断応力を与え続けると、 $F_L = 0.95$ で

は $\gamma=15\%$ 付近, $F_L=0.90$ では $\gamma=32\%$ 付近で, 強度が回復している. これらより, 液状化安全率 F_L が小さい程, 強度が回復するまでに生じるせん断ひずみが大きいことがわかる. また, 供試体が液状化していない $F_L > 1.0$ の結果では, せん断応力を大きくしても, せん断ひずみはあまり増加せず, 単調載荷のみの $\tau-\gamma$ 曲線と良く似た傾向を示す. ここで, 静的単調載荷のみを行ったとき, $\gamma=0.3\%$ の割線勾配を初期せん断剛性 G_0 , 繰返し載荷後の剛性が回復する点までの割線勾配をせん断剛性 G_1 と定義すると¹⁾, 図-4 に示すように, 液状化後のせん断剛性低下率 G_1/G_0 は, $F_L=0.90$ では $3/1000$, $F_L=0.95$ では $5/1000$ と, 液状化した地盤は地震前と比較してせん断剛性が著しく低下することがわかる. また博多湾浚渫土については, 噴砂試料ほどの著しい剛性の低下は見取れなかった.

6. 液状化流動解析: 本解析では, 2次元液状化流動解析プログラム「ALID/WIN」¹⁾ を用いた地震前・後における2回の静的有限要素解析の間に剛性低下を求めるための2次元FEMによる地震応答解析システム「Advanced FLUSH」を用いた動的解析を行い, 液状化に伴う地盤の流動量を算出している. 地震波には, K-NET 福岡で観測された福岡市市民会館の地表面上の地震記録のEW成分を基盤データに変換したものをを用いた. 最大加速度は 174.911gal である. また, 地盤モデルはかも池周りのボーリングデータを参照し, 地震前の地盤の様子を再現した. さらに, この地盤モデルには, 地表面のひび割れを再現するために, 地震後の測量によってひび割れが確認された範囲に joint 要素を加えている. こ

のような条件での液状化流動解析により, 図-5のような変形図が得られ, 最大水平変位は盛土法尻部において 10.6m であった. このように流動量が大きくなった原因としては, 盛土下部で液状化が発生したことで, 斜面の形成が維持できなくなり, 大きな変位につながったものと考えられる. この結果は, 地震後の測量により得られた 10m 程度の水平変位量にほぼ一致する値となった. また, 地表面の亀裂については, joint 要素を加えることで, ある程度再現は可能であると思われた.

7. まとめ: 本研究で得られた結論は以下のとおりである. 1) 海の中道海浜公園内で採取した噴砂試料は, 粒径の揃った液状化しやすい試料であり, 中空ねじりせん断試験機にて液状化後のせん断剛性を求めると, 液状化しない場合の $1/100$ 以下に低下した. 2) 得られた剛性低下率をもとに, 液状化流動解析を行い, 液状化後の流動量を求めると, 盛土法尻部で 10.6m が得られ, 実測値とほぼ一致する結果となった. 3) 博多湾浚渫土は, 細粒分を多く含んだ試料であり, 締固めエネルギーを増加させると, 液状化強度比は噴砂試料に比べ高い値を示した. また, 液状化後の剛性低下率は $1/10 \sim 1/100$ と, 噴砂試料に比べ, せん断剛性の著しい低下は見られなかった. 今後, 液状化後の変形特性を用いて液状化流動解析を行い, 埋設管の浮き上がりに関する検討を行う予定である.

<参考文献>

1) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集 No.638/III-49, p71-89, 1999.

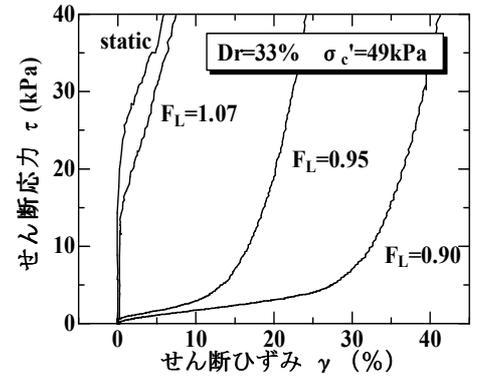


図-3. せん断応力とせん断ひずみの関係

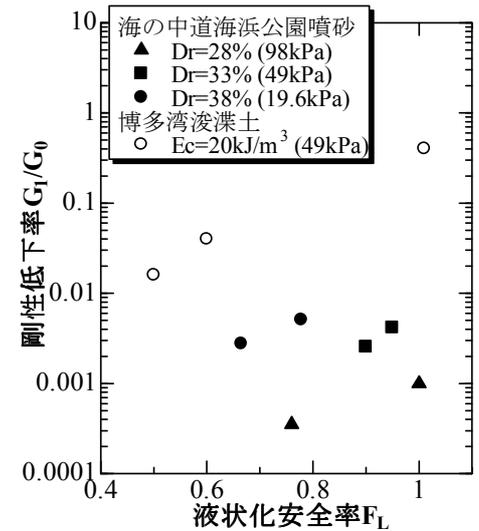


図-4. 剛性低下率と液状化安全率の関係

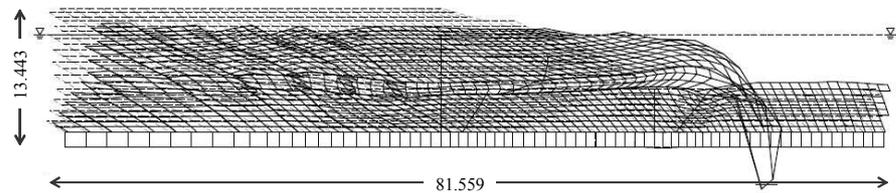


図-5. 変形図