

九州工業大学工学部 正会員 永瀬英生 佐藤工業(株) 正会員 辻野修一
 九州工業大学大学院 学生員 〇夫道 玲 同上 正会員 吉田 望
 東京電機大学理工学部 正会員 安田 進

1. はじめに

平成7年1月17日午前5時46分に、明石海峡付近を震源とするマグニチュード7.2の都市直下型地震が発生した。これにより、神戸市の臨海埋立地を中心として液状化が起り、護岸構造物等が多大な被害を受けた。また、筆者らは、過圧密による液状化対策の効果を検証するため、地震以前に人工島ポートアイランドにおいて不攪乱試料を採取し、繰返し非排水三軸試験を行っていた¹⁾。そこで、これらの試験結果に基づいて有効応力解析を行い、液状化層を推定してみたので、ここに報告したい。

2. 繰返し非排水三軸試験の方法と結果

試験に用いた試料は、神戸市ポートアイランド内より採取した不攪乱試料(略語:神戸P.I.砂)であり、まさ土で構成されている。この試料は、直径7.5cm、長さ20cm程度のシンウォールチューブを用いて、そのまわりを注意深く削りながらチューブを貫入していく方法で採取し、凍結させた後運搬した。図-1に神戸P.I.砂の代表的な粒径加積曲線を示す。土粒子の比重 G_s や最大、最小間隙比 e_{max} 、 e_{min} の値は、ケース別に各供試体から同質量ずつ抽出して混合し、土質工学会基準の試験方法に基づいて、礫分を除いた粒径2mm以下の試料を用いて求めたものである。

供試体は、直径7.5cm、高さ15cmの円筒形であり、二酸化炭素と脱気水により飽和させた。繰返し載荷時の初期有効拘束圧は、 $\sigma_o' = 0.5$ と 1.0 kgf/cm^2 とした。また、ここでは、過圧密履歴を受けた砂供試体の液状化強度も調べている。過圧密履歴の与え方は、①初期有効拘束圧で等方圧密した後、②所定の過圧密比に対応する等方応力で圧密し、③圧密終了を確認後、等方的に初期有効拘束圧まで下げる方法を採用した。ここで用いた過圧密比はO.C.R.=1, 2, 4の3種類である。なお、供試体の相対密度は、供試体から礫分を除いた部分の間隙比より求めた。詳細については文献1)を参照されたい。

図-2(A)、(B)は今回行った繰返し非排水三軸試験による繰返し応力比と両振幅軸ひずみが5%に至るまでの繰返し回数 N の関係を示したものである。図-2(B)の初期有効拘束圧 $\sigma_o' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、繰返し回数が小さい範囲で、繰返し応力比が急激に増加する傾向が見られるようである。これらの結果より、繰返し回数が5回と20回における繰返し応力比を R_5 と R_{20} とし、O.C.R.=1のとき、 $R_5 = 0.202$ 、 $R_{20} = 0.154$ と決定した。

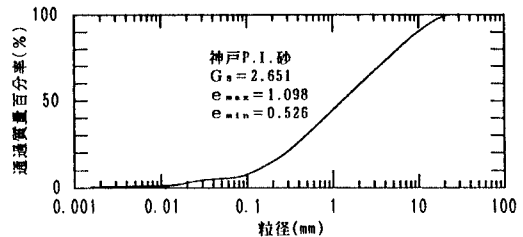


図-1 神戸P.I.砂の代表的な粒径加積曲線

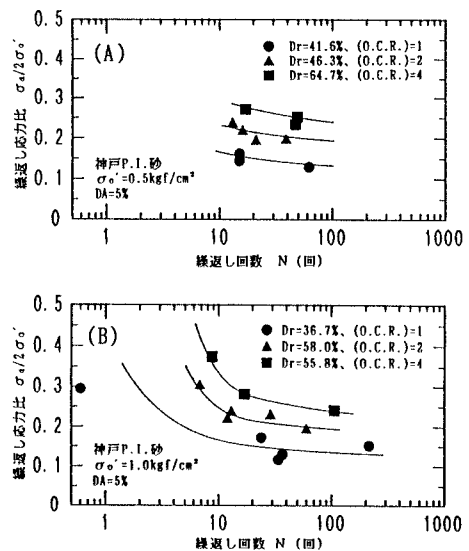


図-2 繰返し応力比～繰返し回数関係

3. 有効応力解析の条件と結果

解析対象地盤は、図-3に示すポートアイランド内の1地点における地盤である。解析に用いたプログラムは有効応力解析プログラム「YUSAYUSA」であり、地盤材料定数は以下のように設定した。すなわち、①初期せん断定数 G_0 は $G_0 = \rho V_s^2$ より算定した。②応力-ひずみモデルには双曲線モデルを用いた。③砂の内部摩擦角 ϕ' は大崎の式 $\phi' = \sqrt{20N+15}$ より算出した。④透水係数 k はCreagerの表を用いて決定した。⑤体積圧縮係数 m_v は $m_v = 0.00297 \sigma_v'^{-0.38} (m^2/tf)$ より算出した²⁾。⑥液状化強度比 R_5 、 R_{20} と間隙率 n は試験で求めた値をそれぞれ用いた。⑦間隙水圧パラメータ B_p, B_u は R_5 と R_{20} の値より図表を用いて求めた。なお、 V_s の値と N 値としては関西地震観測研究協議会より公表されたデータ³⁾を使用している。以上の条件で設定した地盤材料定数を土質の種類とともに表-1に示す。

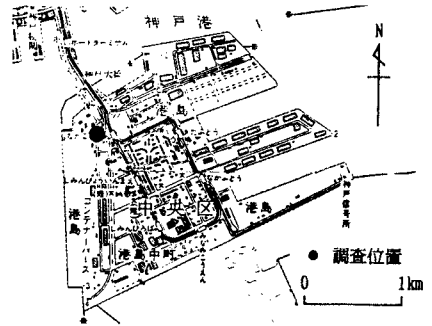


図-3 ポートアイランドにおける観測地点

表-1 地盤材料定数

土質区分	深度Z (m)	層区分	n	K_0	G_0 (kN/m ²)	m_v (m ² /kN)	k (m/s)	ϕ' (deg)	c (kN/m ²)	τ_e (kN/m ²)	B_p	B_u
砂礫	10.47	0.7	0.7	5.4 × 10 ⁴	2.42 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	25.2	0	8.31	-	-	-
	20.47	0.7	0.7	5.4 × 10 ⁴	1.60 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	25.2	0	24.9	-	-	-
砂	30.47	0.7	0.7	5.4 × 10 ⁴	1.49 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	25.2	0	35.1	6.050.34	-	-
	40.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.35 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	41.1	6.050.34	-	-
	50.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.30 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	45.4	6.050.34	-	-
	60.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.24 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	51.0	6.050.34	-	-
	70.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.18 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	58.0	6.050.34	-	-
	80.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.13 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	65.1	6.050.34	-	-
砂混り砂	90.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.10 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	70.3	6.050.34	-	-
	100.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.07 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	75.0	6.050.34	-	-
	140.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.04 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	81.8	6.050.34	-	-
	180.47	0.7	0.7	7.9 × 10 ⁴	1.00 × 10 ⁻⁴	1.4 × 10 ⁻⁴	26.4	0	89.6	6.050.34	-	-
粘土	130.61	0.6	0.6	5.7 × 10 ⁴	9.71 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁶	23.4	80	165	-	-	-
	140.61	0.6	0.6	5.7 × 10 ⁴	9.44 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁶	23.4	80	171	-	-	-
	150.61	0.6	0.6	5.7 × 10 ⁴	9.20 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁶	23.4	80	177	-	-	-
	160.61	0.6	0.6	5.7 × 10 ⁴	8.99 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁶	23.4	80	184	-	-	-
	180.61	0.6	0.6	5.7 × 10 ⁴	8.99 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁶	23.4	80	184	-	-	-

入力地震動としては、図-3に示した地点で兵庫県南部地震の際観測されたもの³⁾の内、G.L.-32mの深度で得られた加速度波形(NS成分、最大加速度 543gal)を用いた。図-4にその時刻歴を示す。G.L.-27mより深い地盤を弾性基盤と仮定し、この深度に地震動を入力した。

図-5は、この解析で地盤に発生した最大の過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma_v'$ を示したものである。深度が4m~19mの砂礫層全域において $\Delta u / \sigma_v'$ の値が計算上の設定限界値に至っており、全層において液状化が発生していることが分かる。また、液状化発生の時刻についてはここには示していないが、地下水位以下の砂礫層ではすべての層において5秒程度までの主要動(図-4参照)により液状化に到達することが解析で確認されている。これにより兵庫県南部地震においてもまさ土による埋立土の全層が主要動の早い段階において液状化したものと推定されよう。地震動が非常に大きいものであったことがこのような結果となった1つの大きな要因であると考えられる。

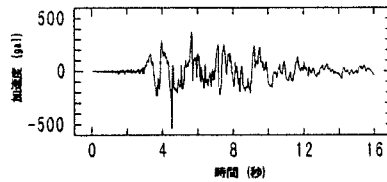


図-4 入力加速度波形³⁾

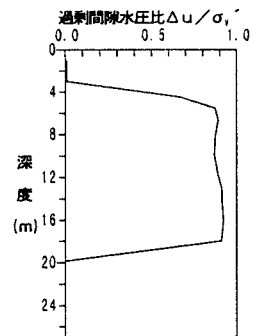


図-5 過剰間隙水圧比の分布状況

4. まとめ

兵庫県南部地震において液状化による被害の大きかったポートアイランドのある地点に対し、実測した液状化強度に基づいて有効応力解析を行ったところ、埋立土層全域が主要動の早い段階において液状化したことが推定された。

参考文献: 1) 永瀬・矢道・辻野・木村: 過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度、第30回土質工学研究発表会、1995.7. 2) 東畑・吉田: YUSAYUSA-2, SIMMDL-2、理論と使用法、1991.10. 3) 関西地震観測研究協議会: 平成7年兵庫県南部地震強震記録、1995.1.