

ポートアイランドのまさ土の液状化強度と地盤の密度の関係

東京電機大学 安田 進* 西川 修*
 岡崎 修* 平井 哲* 福島康弘*

阪神・淡路大震災の際、ポートアイランドでは埋め立てただけのまさ土は液状化したが、締め固めてあったまさ土は液状化しなかった。N値の測定結果を調べてみると、それぞれ10程度、20～25程度であった。そこで、両者の地盤での液状化強度がどの程度異なっていたかを詳しく調べるため、まさ土を採取し室内でいくつかの密度に締め固めた供試体を作成し、繰り返し三軸試験を行って液状化強度比と密度の関係調べた。また、拘束圧を加えられる土槽を用いて、同様の密度の模型地盤を作り、標準貫入試験を行ってN値と密度の関係調べた。これらより、ポートアイランドにおけるまさ土の液状化強度と地盤の密度の関係について考察を行った。

1. はじめに

1995年1月17日に起きた兵庫県南部地震は、建築物、橋梁、護岸等の構造物に多大な被害を与えた。また、埋立地においては、地震時の地盤の液状化により建築物、橋梁における橋脚の沈下等の被害が生じた。ポートアイランドでは、埋立土としてまさ土を使用している。埋め立てただけの地盤では液状化したが、サンドコンパクションパイルやロッドコンパクションパイル、サンドドレーン工法によって地盤改良をして締め固めてある地盤では液状化しなかった。

本研究では、締め固めたまさ土と締め固めていないまさ土の地盤での液状化強度がどの程度異なっていたかを調べるため、ポートアイランドで採取したまさ土を用いて、室内でいくつかの密度に締め固めた供試体を作成し、繰り返し非排水三軸試験を行って液状化強度比と密度の関係調べた。また、拘束圧を加えられる土槽を用いて同様の密度の地盤を作り、標準貫入試験を行いN値と密度の関係調べた。これらより、ポートアイランドにおけるまさ土の液状化強度比と地盤の密度の関係調べた。

キーワード

まさ土、N値、液状化強度比、相対密度

* 東京電機大学理工学部、0492-96-2911

2. 試料

実験に用いた試料は、ポートアイランド北部の港島トンネルの工事現場で採取したまさ土を用いた。ただし実験に用いたまさ土は26.5mmふるいを通過したもののみとした。採取した試料の粒径加積曲線を図-1に示す。 $G_s=2.65$ 、 $D_{50}=3.10\text{mm}$ 、 $e_{\max}=1.057$ 、 $e_{\min}=0.537$ である。

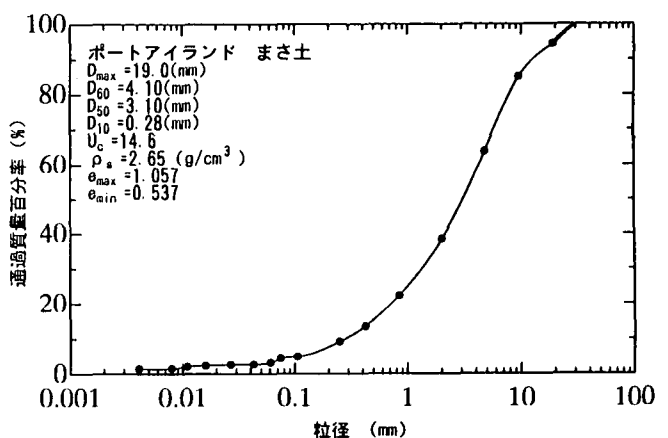


図-1 粒径加積曲線(まさ土)

また、最大・最小間隙比 e_{\max} 、 e_{\min} は2mm以上の礫分を除いて求めたものである。今回用いた試料では粒径が2mm以上の礫分も含んでいるため、礫分の含有率を考えた次の式で相対密度を求めた。

$$D_r = \{e_{\max} - e / (1 - c)\} / (e_{\max} - e_{\min}) \quad \dots (1)$$

ここに c : 礫分の質量含有率

図-1 に示すように、今回用いた試料では $c = 0.615$ である。ところがこの値を式(1)に代入すると D_r は負の値となる。そこで採取した箇所近くの他の試料をみると、 c の値は約 $0.4 \sim 0.5$ だった。また、不攪乱試料の間隙比に対して $c = 0.434$ と仮定すると、 $D_r = 50\%$ となり、 N 値が 10 程度のイメージと一致する。したがってここでは $c = 0.434$ の値を用いることにした。よって今回示す D_r は単なる密度に関するインデックスとしてみていただきたい。

3. 実験方法

(1) 繰り返し非排水三軸試験

締め固めの程度の違いによる試料の液状化強度比の相違を求めるために、相対密度 50%、80%、100%、120% の供試体を作成し、繰り返し非排水三軸試験を行った。ただし、供試体を詰める方法として次の3通りで詰めた。

- ① 湿潤：最適含水比の湿潤状態で作成
- ② 飽和：水中落下法で作成
- ③ 層状：気乾状態のまま土の礫分と砂分以下の粒径を交互につめて作成（なお密にするために棒で突いた）

その他、現場の GL-12.2m からブロックサンプリング法により不攪乱試料を採取し、試験に供した。有効拘束圧は、詰めた試料は $\sigma'_v = 1.0(\text{kgf/cm}^2)$ とし、不攪乱試料に関しては $\sigma'_v = 2.4(\text{kgf/cm}^2)$ とした。液状化時点の判断は両ひずみ振幅 $DA = 5\%$ とした。

(2) 標準貫入試験

実験に用いた土槽は図-2 に示すような内径 730cm、深さ 925cm の円筒形である。内周面及び底面に設けてあるゴム製メンブレンを介して、土槽内の模型地盤に対して水平及び鉛直方向へ独立に拘束圧を加えられるようになっている。模型地盤の作成は、繰り返し三軸試験と同じように相対密度 50%、80%、100%、120% の4通りとし、それぞれ湿潤と飽和の条件で詰めた。地盤作成後、土槽の蓋を取り付け、鉛直・水平方向に拘束圧を加えた。拘束圧は鉛直方向に σ'_v

$= 1.0(\text{kgf/cm}^2)$ 、水平方向に $\sigma_H = 0.4(\text{kgf/cm}^2)$ の圧を加えた。標準貫入試験は JIS A 1219 規定に準拠して行った。ただし、予備打ちを 30cm、本打ちを 30cm とした。

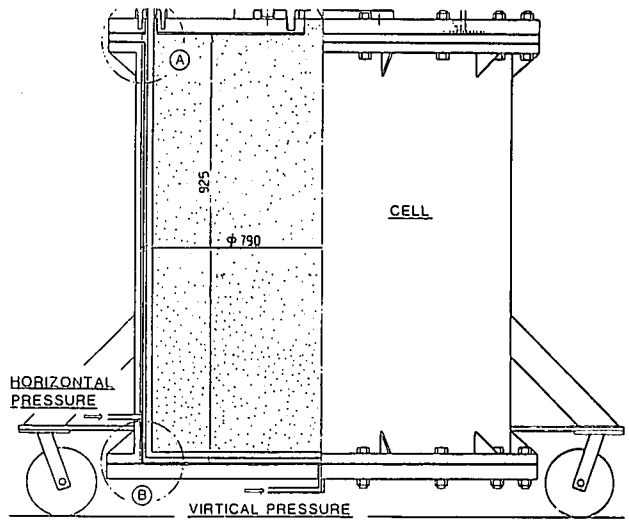


図-2 標準貫入試験に用いた土槽

4. 実験結果

(1) 繰り返し非排水三軸試験

人工的に詰めた試料に対する繰り返し三軸試験の実験結果を相対密度ごとにそれぞれ図-3、4、5、6 に示す。また、不攪乱試料の結果を図-7 に示す。図-3~7 は液状化回数と応力比の関係を表している。これをもとに相対密度と液状化強度比の関係を表すと図-8 となる。これらの図で○は湿潤、△は飽和、□は層状の供試体を表す。これらの結果より、ゆるい場合は差がないが、密になるにつれて湿潤、飽和、層状の順に大きな強度がでていることがわかる。特に、湿潤の場合の液状化強度比を他の条件と比べると、かなり大きいことがわかった。

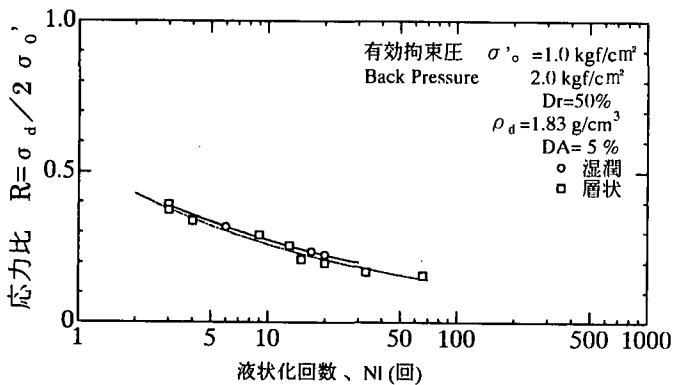


図-3 液状化回数と応力比の関係(D_r=50%)

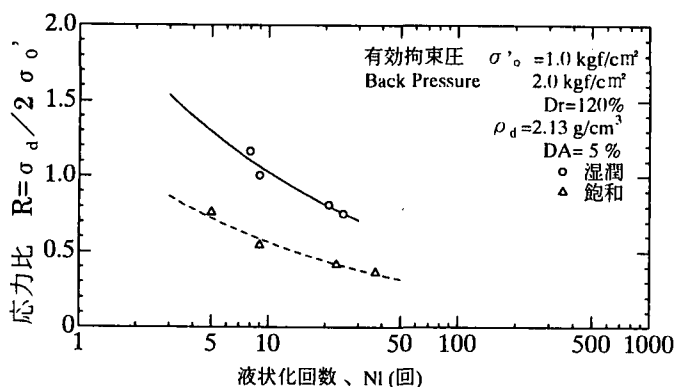


図-6 液状化回数と応力比の関係(D_r=120%)

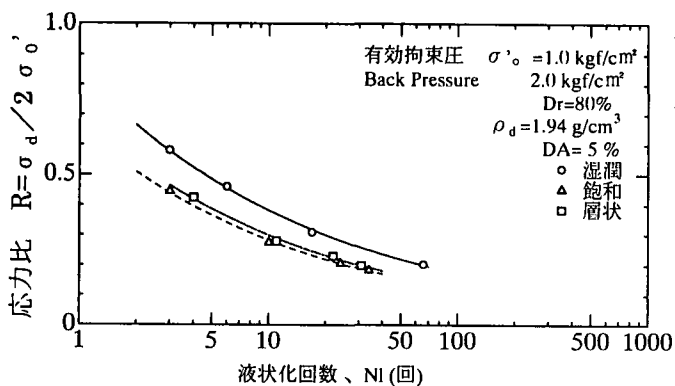


図-4 液状化回数と応力比の関係(D_r=80%)

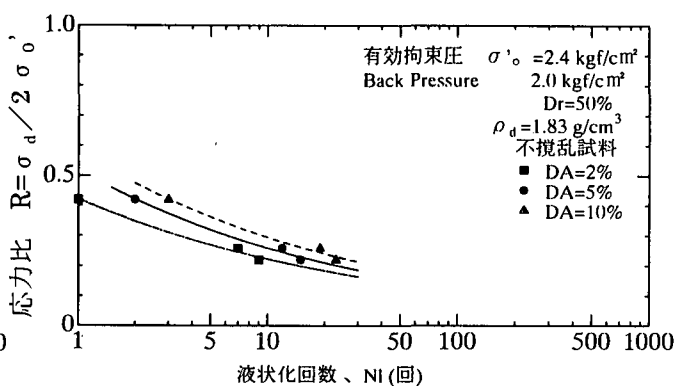


図-7 不攪乱試料の液状化回数と応力比の関係
(D_r=50%)

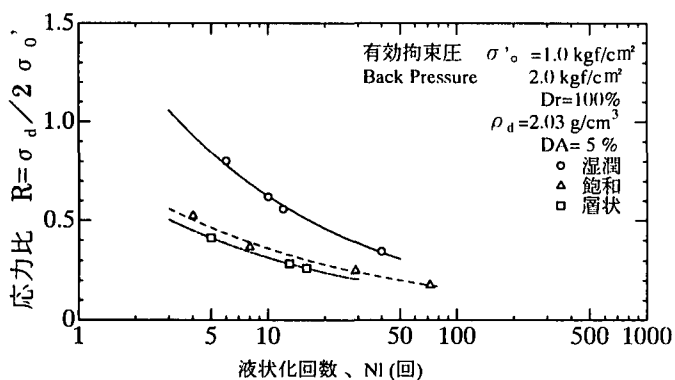


図-5 液状化回数と応力比の関係(D_r=100%)

図-8では通常のようにN₁=20でのデータを整理したが、図-9、10では直下型地震のように波数が少ないことを考えて、N₁=5およびN₁=3での液状化強度比を整理してみた。このように整理すると密度によりR_iがさらに急増していることがわかる。

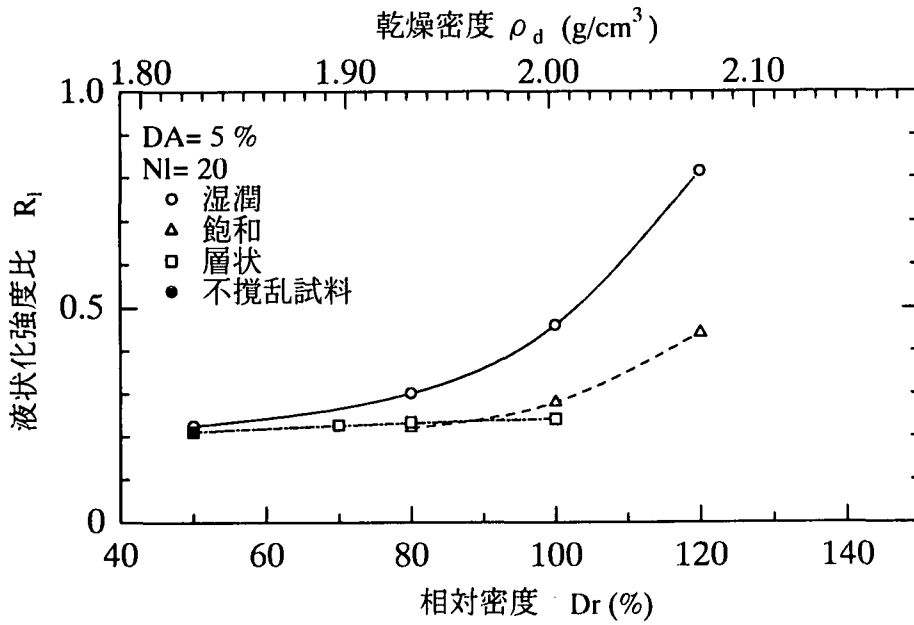


図-8 相対密度と液状化強度比 R_1 の関係 ($N_1=20$)

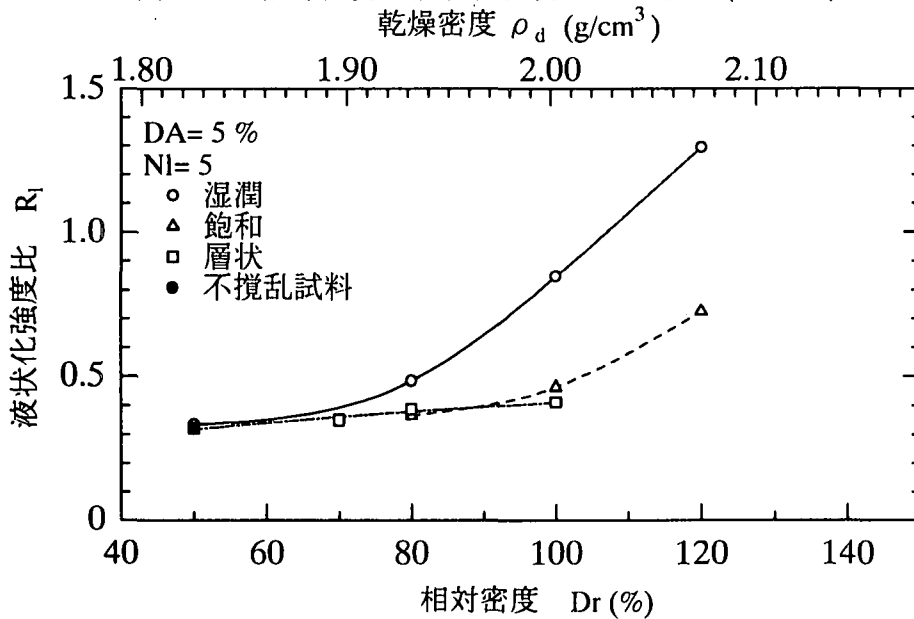


図-9 相対密度と液状化強度比 R_1 の関係 ($N_1=5$)

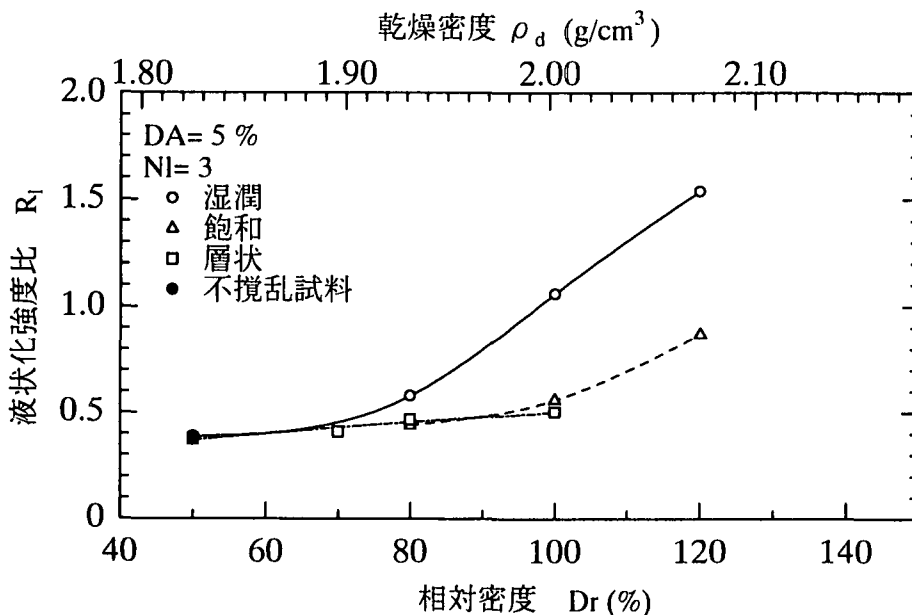


図-10 相対密度と液状化強度比 R_1 の関係 ($N_1=3$)

(2) 標準貫入試験

標準貫入試験の実験結果を図-11に示す。この図は相対密度とN値の関係を表し、○は湿潤、△は飽和を表す。この図より相対密度が大きくなるとN値は大きくなるのがわかる。この実験でも湿潤の方が飽和よりも同じ相対密度に対してN値は大きい。また相対密度が100%を超えたあたりからN値が急激に増加している。

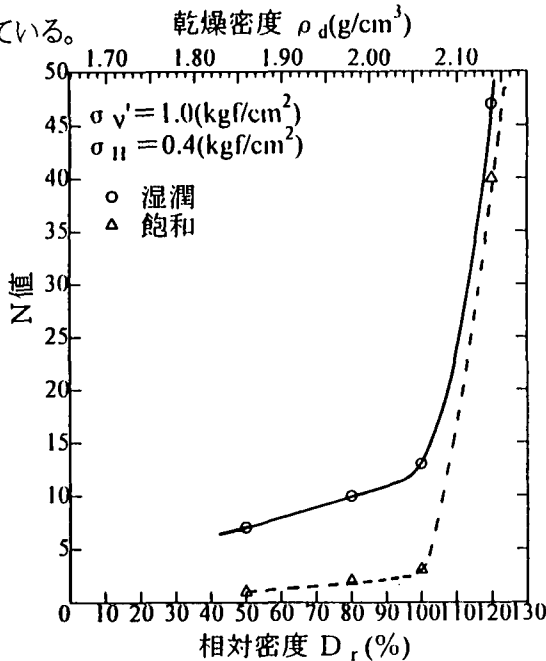


図-11 相対密度とN値の関係

5. N値と液状化強度の関係

今回の繰り返し三軸試験と標準貫入試験は同じ相対密度、同じ供試体の条件で実験を行った。そこでこれらの結果より、N値と液状化強度比 R_L の関係を求め図-12に示す。

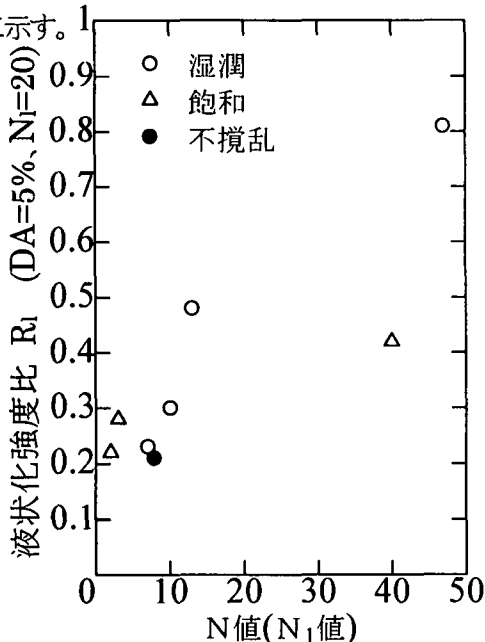


図-12 N値と液状化強度比 R_L の関係

図-12よりN値と液状化強度比の関係は右上がりの傾向があるものと考えられる。ただしN値 20~30程度のデータが無いために、これ以上ははっきりしたことはいえない。今後さらにデータを集めて検討していく必要があると考えている。図-12には不攪乱試料でのデータもプロットした。人工的に詰めた試料と比較をすると、さほど変わらない。この際、N値は実測のN値を式(2)を用いて、 $1\text{kgf/cm}^2(98\text{kN/m}^2)$ での N_1 値に基準化している。土槽での実験も $\sigma_v' = 1.0(\text{kgf/cm}^2)$ なのでこの N_1 値といえる。

$$N_1 = N \cdot 1.7 / (\sigma_v' + 0.7) \quad \dots(2)$$

ここに σ_v' : 有効上載圧(kgf/cm²)

なお筆者たちは、兵庫県南部地震により液状化した地点としなかった地点について、N値と地震時に発生したと推定される繰り返しせん断力比の関係をまとめている。地震時最大発生せん断力比 $\tau_{\text{max}}/\sigma_v'$ は

$$\tau_{\text{max}}/\sigma_v' = (1 - 0.015z) \cdot (A_{\text{max}}/g) \cdot (\sigma_v/\sigma_v') \quad \dots(3)$$

の式で求めた。ここに

z : 深度(m) A_{max} : 地表最大加速度(gal)
 g : 重力加速度 σ_v' : 有効上載圧(kgf/cm²)

対象とした地区及び地表最大加速度は、三宮駅付近・兵庫区・長田区に対しては600gal、深江・住吉・六甲アイランドに対しては500gal、甲子園町・高須町に対しては400galの値を設定した。こうしてまとめた結果を図-13に示す。

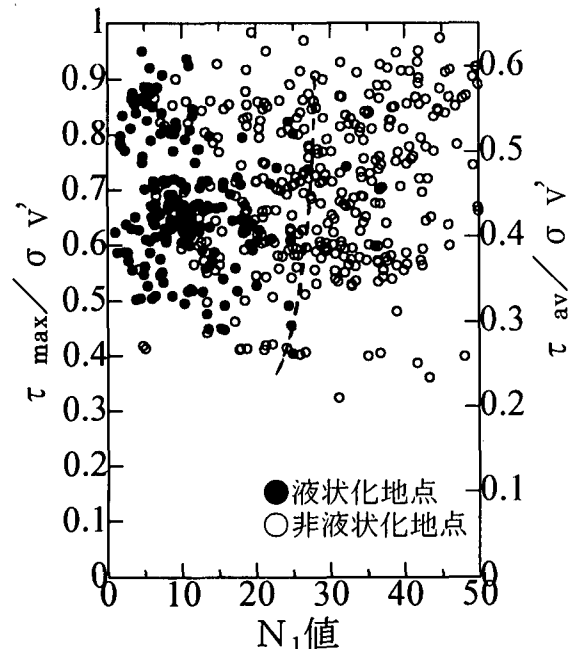


図-13 液状化・非液状化地点の N_1 値と地震時最大発生せん断力比の関係¹⁾

図-13より液状化地点の N_1 値と非液状化地点の N_1 値とは N_1 が25前後を境にして分かれているのみならずことができそうである。この境界の線は図-12における N_1 値～液状化強度比の関係と同じ意味を持つ。ただし前述したように図-12のデータが少し不足していることもあり、今後両者の関係を検討していきたい。

6. あとがき

ポートアイランドのまさ土において N 値と液状化強度の関係を求めるため、繰り返し三軸試験と標準貫入試験を行った。その結果、両者の関係が図-12のように得られた。ただし、データ数の不足により完全には関連づけることができなかった。今後さらに検討を続けていきたいと考えている。

なお、試料採取にあたっては神戸市港湾局の岡下勝彦氏、(財)地震予知総合研究振興会、大成建設、および佐藤工業の方々にお世話になった。末筆ながら感謝する次第である。

【参考文献】

- 1)安田進、坪田邦治、西川修、浅香寛之、内藤福隆：
兵庫県南部地震における液状化・非液状化地点の N 値の比較、第31回地盤工学研究発表会講演集、pp1225-1226、1996.

Relationships between liquefaction strength and soil density of masa taken at Port Island

Susumu YASUDA, Osamu NISHIKAWA, Osamu OKAZAKI
Satoru HIRAI and Yasuhiro FUKUSHIMA

Artificially reclaimed masa liquefied in Port Island during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake. However, liquefaction did not occur in compacted grounds. SPT N -values of the unimproved and compacted grounds were around 10 and 20 to 25, respectively. To know the difference of the liquefaction strength of unimproved and compacted soil, cyclic triaxial test on the samples with several densities were conducted. Relationships between SPT N -values and soil densities were also tested by using a test chamber. Based on these test results, liquefaction strength of unimproved and compacted ground in Port Island was discussed.