

相対密度の変化によるコーン貫入抵抗値と液状化強度の関係についての三軸試験

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
 中央大学理工学部 学生会員 ○井上 広基
 中央大学理工学部 学生会員 俊成 優太

1. はじめに

最近、緩い砂地盤に対して標準貫入試験の N 値に比べて信頼度の高く地盤構造を連続的に測定できるコーン貫入試験(CPT)が用いられる機会が増えている。しかし、コーン貫入抵抗値から液状化強度を予測するための実測データが N 値に比べ少なく、各種土質パラメータが与える影響が不明な点多々ある。そこで、当研究室では同一供試体で小型コーン貫入試験と繰り返し载荷液状化試験ができる装置を開発し¹⁾、貫入抵抗と液状化強度の関係を調べてきた^{2) 3)}。それによると、相対密度 D_r や細粒分含有率 F_c の違いに関わらず、貫入抵抗 q_t と液状化強度 R_L は一本の直線関係となることが示された。

今回はこの三軸試験機を用い、細粒分含有率 $F_c=0$ 、相対密度 $D_r=30, 50, 70\%$ 、さらにそれ以上に密な、相対密度 $D_r=80, 90\%$ の条件で小型コーン貫入試験と液状化試験を行い、既往の研究より示された貫入抵抗 q_t と液状化強度 R_L の一意的な関係が成り立つ密度範囲について検討した。

2. 試料と試験方法

試験試料には細粒分含有率 $F_c=0\%$ の千葉県浦安砂を用いた。表-1 に物理特性を示す。

試験には供試体直径 100mm、高さ 200mm の中型三軸試験機を用いたが、下部ペデスタルは図-1 に示す貫入ロッド付きのものに付け替えてあり、下部ペデスタル内の空間を満たした水を排水することによりセル圧の作用で供試体内に自動的に 2.5cm 貫入される。コーンの先端角は 60° 、直径 6mm で、実務で用いられるコーンの 1/6 サイズであり、貫入ロッドの寸法は長さ 115.2mm、断面積 28.3mm^2 である。貫入は非排水条件で行い、貫入抵抗値はロッド先端部に内蔵されているひずみゲージにより測定する。

供試体はウェットタンピング法により圧密後相対密度が目標値になるように作成し、 B 値が 0.95 以上であることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ 、背圧 196kPa で等方圧密する。その後、非排水条件の下で貫入速度約 2mm/sec でコーン貫入試験を行う。コーン貫入試験後、再度圧密を行った後、液状化試験を行う。液状化試験では応力制御にて両振幅ひずみ ε_{DA} が 10% 発生するまで、非排水条件で载荷周波数 0.1Hz の正弦波を加える。ちなみにコーンが貫入された状態でも液状化強度は大きな影響を受けず、またコーン貫入を排水条件で行っても貫入抵抗に大きな差異が生じないことも本試験機で行った研究で確認している²⁾。

表-1 試料の物理特性

	F_c (%)	U_c	ρ_s (g/cm^3)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	ρ_{dmin} (g/cm^3)	e_{max}	e_{min}
浦安砂	0	1.97	2.687	1.507	1.165	1.304	0.783

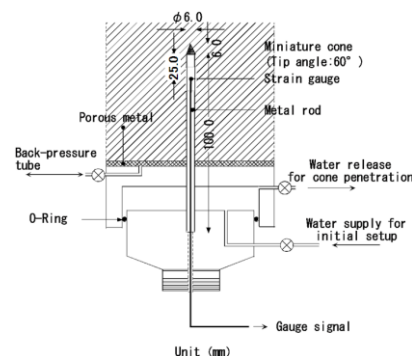


図-1 貫入ロッドつきペデスタル概略図

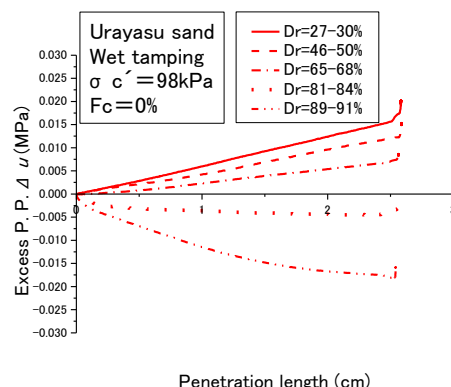


図-2 過剰間隙水圧 Δu と貫入長の関係

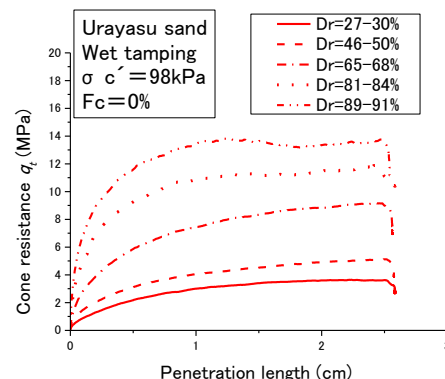


図-3 貫入抵抗 q_t と貫入長の関係

キーワード コーン貫入抵抗、液状化強度、細粒分含有率、相対密度、ダイレイタンシー

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科土質研究室 Tel 03-3817-1799

3. 試験結果

図-2, 3 は小型コーン貫入試験によって得られた貫入長に対する過剰間隙水圧 Δu および貫入抵抗値 q_t の関係を示している。緩い砂では貫入距離に対する過剰間隙水圧 Δu は上昇していく試験結果が得られていたが、相対密度 $D_r=80\%$ では一度下がるが、その後は貫入を終えるまで、過剰間隙水圧 Δu の変化は少なく、相対密度 $D_r=90\%$ の砂の場合、過剰間隙水圧 Δu は減少していくという結果が得られた。密度が小さい砂は負のダイレイタンシーにより間隙水圧が増加し、密度の大きい砂では正のダイレイタンシーにより間隙水圧が減少するためである。図-3 より相対密度を上昇させるにしたがって貫入抵抗値が増加していくことが分かる。

図-4 は繰返し応力比 R_L と両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達する繰返し載荷回数 N_c の関係を示している。図中のカーブは各条件のプロットを式(1)のべき関数により近似し、a, b の値は図中に示した通りである。

$$R_L = aN_c^b \quad (1)$$

相対密度 D_r の低い砂と比べると D_r の高い砂は R_L も大きくなっているのがわかる。そして N_c - R_L 曲線の勾配とべき定数は相対密度が大きくなるほどに急になっていることが分かる。

図-5 は、貫入抵抗値 q_t と、 $N_c=20$ 回における液状化強度 R_{L20} の直接的関係を示している。図中の直線は今までの研究で得られた相対密度 D_r や細粒分含有率 F_c によらない一意的な関係を表す直線である。相対密度 D_r が低い砂については以前に得られた一意的な関係を表す直線にのるという結果になったが、 D_r が高い砂については直線から少し上方に外れる結果になった。図-6 には今回の試験で得られたコーン貫入抵抗 q_t と液状化強度 R_{L20} の関係を横向き三角形マークで示している。同図には、さらに鈴木ら⁴⁾が原位置でのCPTと不攪乱試料の三軸液状化試験を組み合わせ求めて求めたコーン貫入抵抗値 q_t と液状化強度 R_{L20} の関係を星印と実線カーブで示しているが、これを見ると、コーン貫入抵抗値がある一定の大きさを超えると、液状化強度 R_{L20} が急激に上昇していることが分かる。これより、図-5 において、コーン貫入抵抗値 q_t が 10MPa 以上において、プロットが直線関係より上方に外れる傾向が表れるのは、全体的な変化傾向に整合しており、ある一定の貫入抵抗値を境に急激に液状化強度が上昇することを示していると考えられる。

4. まとめ

- (1) 緩い砂については、貫入距離に対する過剰間隙水圧 Δu は上昇していくが、密な砂の場合、過剰間隙水圧 Δu はダイレイタンシー特性により貫入距離に対し減少していく傾向にある。
- (2) 相対密度 D_r の低い砂に関しては、既往の研究から得られた一意的な直線に乗り、相対密度 D_r の高い砂に関しては直線から上方にずれる傾向があり、ある貫入抵抗値を境に液状化強度が急激に上昇する傾向が実験結果に反映されていると考えることができる。

[参考文献] 1) 國生剛治, 村端敬太, 伏木田達朗, 伊藤菜穂子: 三軸試験機を用いた小型コーン貫入試験法の開発と液状化強度との相関, 土木学会第58回年次学術講演集III-96, pp191-192, 2003. 2) Kokusho, T. Hara, T. and Murahata, K.: Liquefaction strength of fines-containing sands compared with cone-penetration resistance in triaxial specimens, Proc. 2nd Japan- US Workshop on Geomechanics, ASCE Geo-Institute Publication No.156, pp356-373, 2005. 3) 伊藤 文樹, 國生 剛治, 長尾 洋太: 非塑性細粒分を含む砂の液状化強度～コーン貫入抵抗関係への年代効果の影響, 土木学会論文集C (地圏工学) Vol. 67, No. 1, p 26-35, 2011. 4) Suzuki, Y., Tokimatsu, K., Taya, Y. and Kubota, Y.: "Correlation between CPT data and dynamic properties of in situ frozen samples", Proc. 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Vol.1 249-252, 1995.

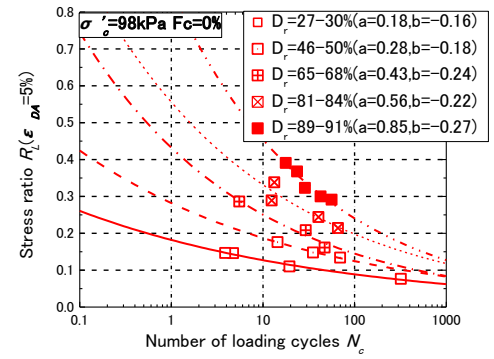


図-4 繰返し応力比 R_L と繰返し載荷回数 N_c 関係

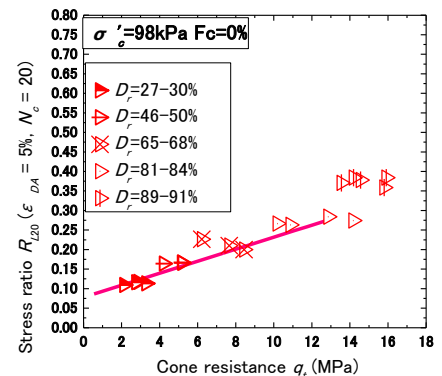


図-5 コーン貫入抵抗 q_t と液状化強度 R_{L20} の関係

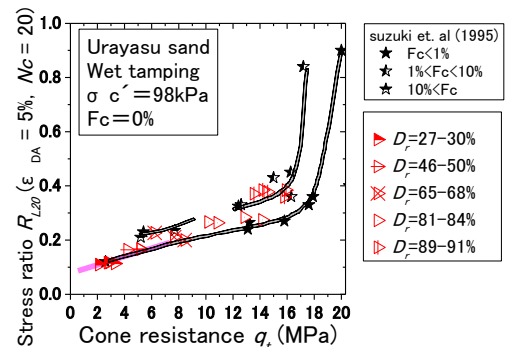


図-6 浦安砂における再構成試料のコーン貫入抵抗 q_t と液状化強度 R_{L20} の関係