

砂の液状化強度とコーン貫入抵抗の関係における有効拘束圧の影響

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
 中央大学大学院 古賀 洋平
 中央大学理工学部 学生会員 ○北村 健悟

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載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⁾。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、貫入抵抗値 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、砂の三軸供試体に対して異なる有効拘束圧 σ'_c 相対密度 D_r の下で小型コーン貫入試験と液状化試験を行い、 σ'_c が貫入抵抗値と液状化強度の关系到及ぼす影響を調べた。

2. 試料と試験方法

試験試料には千葉県富津市で採取した細粒分含有率 $F_c=0\%$ の砂浜を用いた。図-1 に試料の粒径加積曲線、表-1 に物理特性を示す。

試験機は供試体直径 100mm、高さ 200mm の中型三軸試験機を用いたが、下部ペダスタルは貫入ロッドつきのものに付け替えてある。二重構造をした下部ペダスタル内の空間を満たした水を排水することにより、供試体にコーンを 2.5cm 貫入させる。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。

今回は $F_c=0\%$ のクリーンサンドを用い、試料はウェットタンピング法により直径 100mm、高さ 200mm、相対密度 $D_r \approx 30\%$ 、 50% 、 70% の供試体を作成する。二重負圧の状態で脱気水を通水し、背圧 196kPa を加え、B 値が 0.95 以上であることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma'_c = 49, 98, 196\text{kPa}$ の 3 パターン、背圧 196kPa で等方圧密する。その後、非排水条件のもと貫入速度約 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、非排水条件で載荷周波数 0.1Hz の正弦波を加える。

3. 試験結果

図-2 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貫入抵抗値 q_t の関係を有効拘束圧が 98kPa のものを青色、49kPa のものを赤色、196kPa のものを緑色で、相対密度が $D_r \approx 30\%$ のものを実線、 50% のものを一点鎖線、 70% のものを破線で示している。これを見ると、有効拘束圧 $\sigma'_c = 196\text{kPa}$ での貫入抵抗値はどの相対密度でも最大となっている。

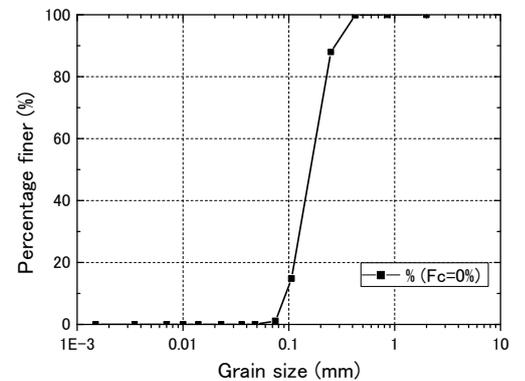


図-1 試料の粒径加積曲線

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}
0	1.89	2.716	1.62	1.289	1.107	0.677

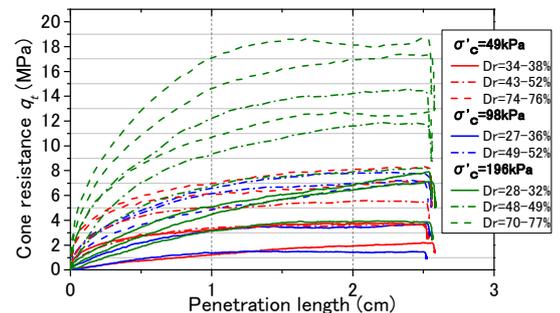


図-2 貫入抵抗 q_t と貫入長の関係

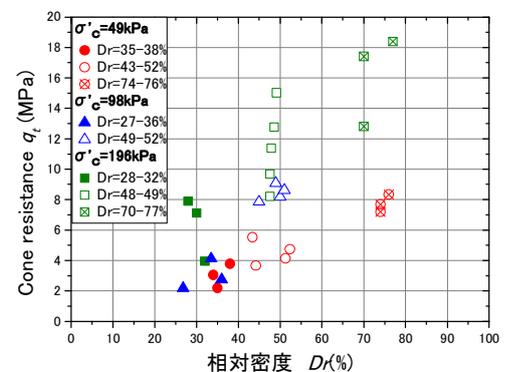


図-3 貫入抵抗 q_t と相対密度 D_r の関係

キーワード コーン貫入抵抗, 液状化強度, 有効拘束圧

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地盤工学研究室 Tel 03-3817-1799

図-3 は貫入抵抗値 q_t と相対密度 D_r の関係をプロットしたグラフである。この際、 q_t の値は図-2 に示した貫入抵抗のカーブより、貫入抵抗の最大値を読み取り使用している。ばらつきがみられるものの、 σ'_c 一定の下で D_r と q_t の間には正の相関がみられる。また、同じ相対密度では概ね σ'_c の高い方が貫入抵抗値も高い傾向を示している。

図-4 は両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ で定義した繰返し応力比 R_L と繰返し载荷回数 N_c の関係を示している。尚、図中のプロットはメンブレンペネトレーション (MP) 効果の補正⁴⁾を行っている。それぞれのプロットの形が相対密度の違いを、グラフの色が拘束圧の違いを示している。同じ有効拘束圧での液状化強度曲線は D_r が大きいほど上方に位置し、 R_L が上昇する傾向にある。また $D_r \approx 30\%$ では有効拘束圧に関わらず R_L がほぼ一定の傾向であることが分かる。

図-5 にコーン貫入抵抗 q_t と図-4 から読み取った $N_c=20$ 回の液状化強度 R_{L20} の直接的関係をプロットしている。 q_t の値は図-2 より求め、同一条件のカーブごとに平均したものをを用いた。尚、図-5 のラインはこれまでに行ってきた $\sigma'_c=98\text{kPa}$ での D_r と F_c を変化させた試験結果³⁾から求めた、細粒分含有率や相対密度の違いによらない一意的な関係を示す直線である。

今回の $D_r \approx 30\%, 50\%, 70\%, F_c=0\%$ の砂についての3段階の σ'_c で行った試験結果を、49kPa と 196kPa の条件については

$$\frac{q_{II}}{q_t} = \left(\frac{\sigma'_v}{p_0} \right)^{1/2} \dots (1) \quad \frac{q_{II}}{q_t} = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_v/p_0} \dots (2)$$

の2つの式により上載圧 98kPa の場合に換算した貫入抵抗値

q_{II} を求めた⁵⁾⁶⁾。これより、拘束圧で補正された q_{II} と R_L の関係はばらつきはあるものの、これまでの研究で得られた一意的関係に $\sigma'_c=49\text{kPa}$, $D_r \approx 70\%$ と $\sigma'_c=196\text{kPa}$, $D_r \approx 70\%$ の条件を除いてほぼ一致した。また2種類の補正式による違いは小さい結果となった。

4. まとめ

- (1) どの相対密度においても、ばらつきは大きいものの有効拘束圧の増加と共に貫入抵抗は増加した。
- (2) 液状化強度曲線において同じ有効拘束圧下では D_r が大きい程、 R_L が高い傾向にある。また $D_r \approx 30\%$ では有効拘束圧による R_L の増加がほとんどみられなかった。
- (3) q_t-R_L 関係において、有効拘束圧が 49kPa と 196kPa のものについては一意的関係 $P_0=98\text{kPa}$ で基準化した貫入抵抗値を用いることでこれまでの研究で得られた一意的関係にいくつかの例外を除いて、ほぼ一致した。また、基準化に用いた2つの式による大きな違いは見られなかった。

データのばらつきが大きいため、現在さらに追加実験を実施中であり、発表当日には信頼度を上げる予定である。

[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) Kokusho, T. Nagao, Y. and Ito, F.: Aging effect on relationship between liquefaction strength and cone resistance of sand containing non-plastic fines, 4th Japan-Taiwan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls, ATC3 Committee, ISSMGE Japanese Geotechnical Society, pp319-324, 2010. 4) Tokimatsu, K. (1990): System compliance correction from pore pressure response in undrained cyclic triaxial tests, Soils & Foundations, 30 (2), 14-22. 5) Liao, S. C and Whitman, R. V., Overburden correction factors for SPT in sand, Journal of Geotech. Eng. ASCE, 112(3), 373-377. 6) Gibbs, H. J. and Holtz, W. G. (1957): Research on determining the density of sand by spoon penetration test, Proc. 4th international Conference on SMFE, Vol.1, 35-39. Meyerhof, G. G. (1957): Discussion, Proc. 4th international conference on SMFE, Vol.3, 110.

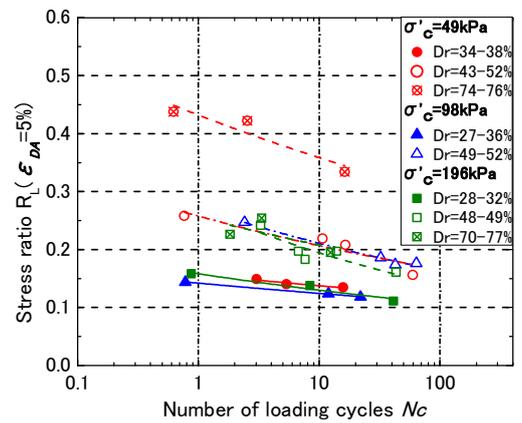


図-4 繰返し応力比 R_L と繰返し载荷回数 N_c 関係

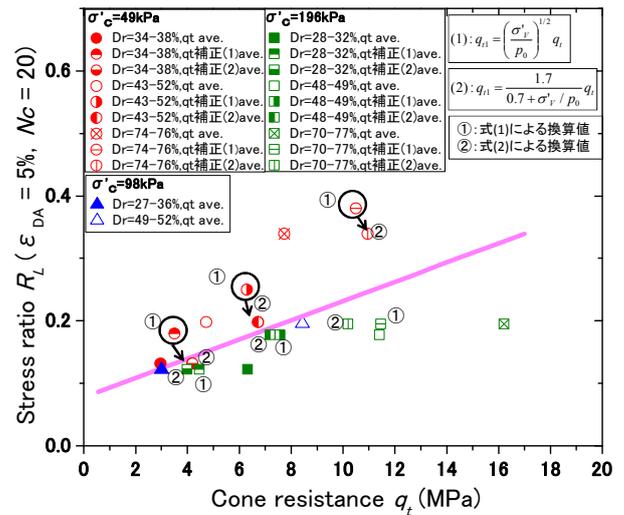


図-5 コーン貫入抵抗 q_t 、換算貫入抵抗 q_{II} と液状化強度 R_{L20} の関係