

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 学生会員 長尾 洋太
 中央大学大学院 学生会員 福山 喬久
 中央大学理工学部 学生会員 ○鈴木 雄飛

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⁾。それによると、相対密度 Dr 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 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、当研究室の既往の研究結果³⁾との比較を行った。

2. 試料と試験方法

当研究室での既往の研究で用いてきた砂試料は千葉県富津砂で、これに非塑性細粒分として $I_p=6$ 程度のまさ土細粒分を $F_c=0\sim30\%$ と変化させ混合している。図-1 に試料の粒径加積曲線を示し、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DESTALは図-2 に示す貫入ロッドつきのものに付け替えてあり、下部ペDESTAL内の空間を満たした水を排水することにより供試体内に 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。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⁾。

今回は $F_c=0\%$ のクリーンサンドを用い、供試体はウェットタンピング法により相対密度 $Dr \approx 50\%$ で作成し、 B 値が 0.95 以上であることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma'_c=49, 98, 196\text{kPa}$ の 3 段階、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。

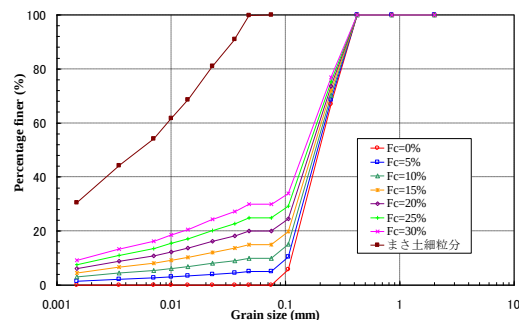


図-1 試料の粒径加積曲線

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	1.91	2.741	1.632	1.316	1.083	0.680
5	2.02	2.717	1.706	1.279	1.124	0.593
10	2.7	2.717	1.762	1.254	1.167	0.542
20	33.9	2.703	1.782	1.163	1.324	0.517
25	69.97	2.716	1.65	0.991	1.741	0.646
30	105.9	2.714	1.61	0.984	1.758	0.686

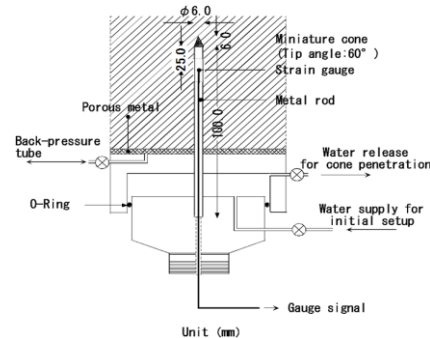
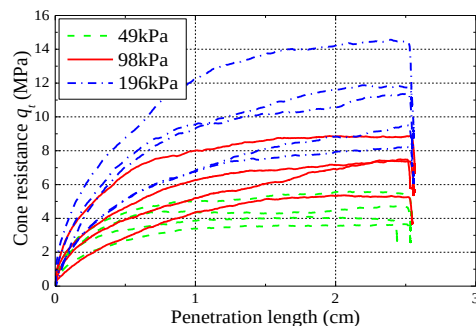


図-2 貫入ロッドつきペDESTAL概略図

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, 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土質研究室 Tel 03-3817-1799

3. 試験結果

図-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貫入抵抗値 q_t の関係を有効拘束圧が 98kPa のものを実線, 49kPa のものを破線, 196kPa のものを一点鎖線で示している. これを見ると, 有効拘束圧が変化することにより貫入抵抗も増減していることが見て取れる. 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. 図中のプロットのうち, $\sigma'_c=196\text{kPa}$ については塗りつぶし記号で示した原データとメンブレンペネトレーション (MP) 効果を補正⁴⁾した白抜き記号のデータを示している. また, それぞれの記号のプロットを青色の実線, 点線で近似している. なお, 49, 98kPa については MP 効果による補正の必要はないと判断できたため, 原データのみを示している. 図-4 より MP 効果を考慮しない場合は, $R_L \sim N_c$ 関係は 98, 196kPa でほぼ同等となるが, MP 補正をすることにより, σ'_c が大きくなるほど R_L が低下する従来から知られた傾向が得られることが分かる.

図-5 にコーン貫入抵抗 q_t と図-4 から読み取った $N_c=20$ 回での液状化強度 R_{L20} の直接的関係を塗りつぶしの星印によりプロットしている. この際, q_t の値は図-3 に示した貫入抵抗のカーブより, 貫入中の最大値を読み取り平均した. 同図中にはこれまでに行ってきた $\sigma'_c=98\text{kPa}$ の拘束圧での Dr と Fc を変化させた試験から得られた結果³⁾を他の記号でプロットしているが, 線形近似直線で示すように細粒分含有率や相対密度の違いに関わらず一意的な関係となることが示されている²⁾.

今回の $Dr=50\%$, $Fc=0\%$ 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

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

の 2 つの式により上載圧 98kPa の場合における換算貫入抵抗値 q_{tl} を求めた⁵⁾⁶⁾. これら q_{tl} と R_L により図中にプロットすると半白抜き, 白抜きの星印となる. これより, 拘束圧で補正された q_{tl} と R_L の関係はこれまでの研究で得られた一意的関係にほぼ一致しており, また 2 種類の補正式による誤差は小さい結果となった.

4. まとめ

- (1) クリーンサンドにおいて有効拘束圧を変化させることにより貫入抵抗は増減したが, 上載圧 98kPa の換算貫入抵抗へ基準化した場合, ほぼ同程度の値となった.
- (2) 液状化強度 R_L については, MP 効果を補正することで有効拘束圧の増加に伴い R_L が低下する従来から知られた傾向が得られた.
- (3) $q_t \sim R_L$ 関係において, 有効拘束圧が 49kPa と 196kPa のものについては $P_0=98\text{kPa}$ で基準化した貫入抵抗値を用いることでこれまでの一意的関係にほぼ一致した. また, 基準化に用いた 2 式による大きな違いは見られなかった.

[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, H. 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.

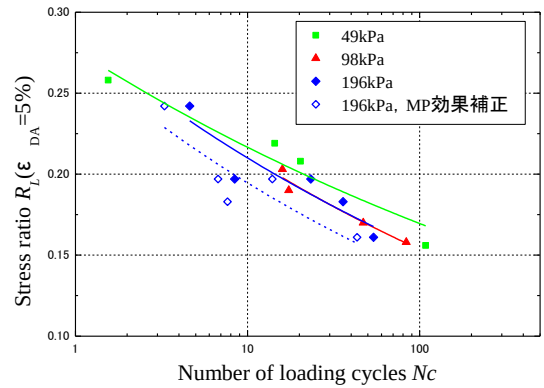


図-4 繰返し応力比 R_L と繰返し载荷回数 N_c の関係

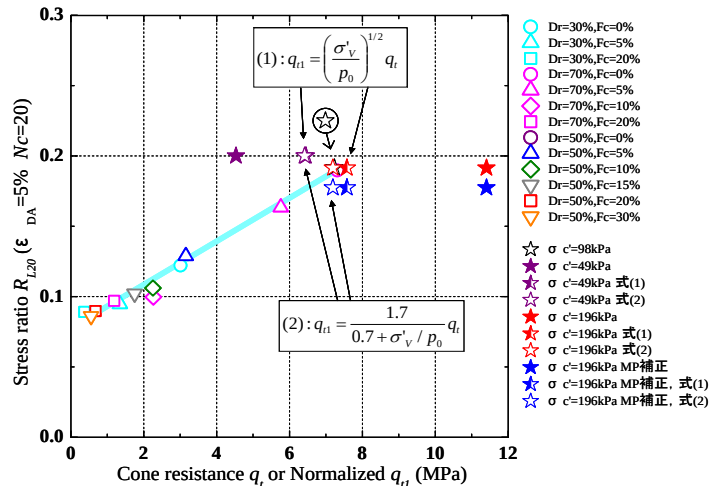


図-5 コーン貫入抵抗 q_t , 換算貫入抵抗 q_{tl} と液状化強度 R_{L20} の関係