細粒分を含む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関係

Influence of effective confining pressure on relationship between liquefaction strength and cone resistance of sand containing fines

土木工学専攻　13 号
Koga Youhei

1. はじめに

最近，緩い砂地盤に対して標準貫入試験の N 値に比べて信頼度が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も多々ある．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て，別の試料で小型コーン貫入試験と液状化試験を行い，結果を比較した．また，三軸供試体に対して異なる有効拘束圧 σ'_c および相対密度 D_r の下で試験を行った．そして，異なる有効拘束圧 σ'_c で細粒分含有率 F_c を変化させたものについても試験を行い，σ'_c が貫入抵抗値と液状化強度の関係に及ぼす細粒分の影響を調べた．

表-1　試料物理特性

	F_c (%)	U_c	ρ_s (g/cm³)	ρ_{dmax} (g/cm³)	ρ_{dmin} (g/cm³)	e_{max}	e_{min}
浦安砂	0	1.97	2.687	1.475	1.166	1.304	0.822
	10	2.46	2.705	1.587	1.204	1.246	0.704
	20	4.15	2.702	1.638	1.204	1.244	0.650
富津砂	0	1.88	2.716	1.62	1.289	1.107	0.677
	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

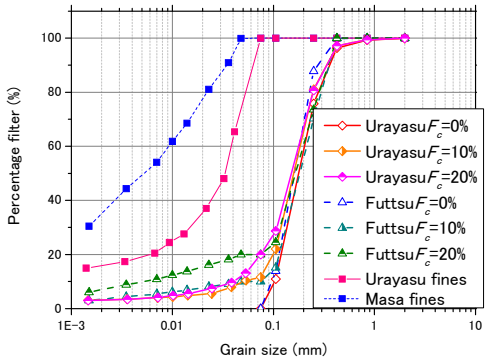

図-1　試料の粒形加積曲線

2. 試験試料と試験方法

室内調整試料には 1 つ目の試料は千葉県富津砂を用い，これに混合する非塑性細粒分として塑性指数 I_p=6 程度のまさ土細粒分を用いた．2 つ目の試料は千葉県浦安市で採取した噴砂を用い，これに混合する細粒分は噴砂に含まれていた細粒分を用いた．細粒分含有率を F_c=0，10 % と変化させた．**表-1** に試験砂の物理特性を示し，**図-1** に試料の粒径加積曲線を示す．

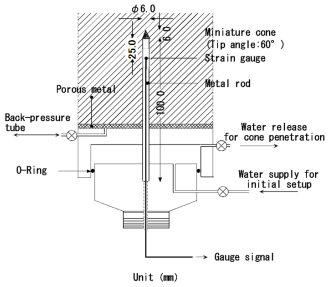

図-2　貫入ロッドつきペデスタル概略図

供試体直径 100mm，高さ 200mm の中型三軸試験機を用いたが，下部ペデスタルは貫入ロッドつきのものに付け替えてある (**図-2**)．二重構造をした下部ペデスタル内の空間を満たした水をセル圧により排水することで，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．試料は F_c=0%のクリーンサンドを用い，ウェットタンピング法により相対密度 D_r ≒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，背圧 196kPa，有効拘束圧 σ'_c =49，98，196kPa の下で等方圧密する．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．

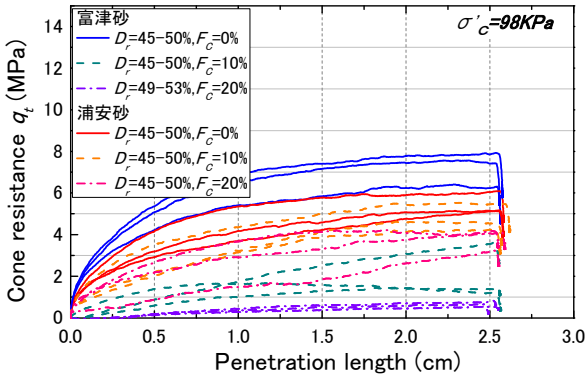

図-3　貫入長と貫入抵抗の関係

3. 富津砂と浦安砂の試験結果の比較

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 の関係を示しており，実線が浦安砂の F_c = 0%，一点鎖線が浦安砂の F_c = 10%，破線が富津砂の F_c=0%，二点鎖線が富津砂の F_c=10%の試験結果を示している．**図-2** ではどちらの試料においても貫入長が増加するにしたがって q_t が増加するが徐々に頭打ちになる傾向がみられる．この傾向は今まで行ってきた試験結果と同様である．浦安砂，富津砂ともに細粒分を加えた試料の方が q_t は減少した．しかし浦安砂はわずかに減少したのに対して富津砂では大きく減少した．

図-4 は両振幅軸ひずみ ε_{DA}=5%で定義した繰返し応力比 R_L と繰返し載荷回数 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．富津砂も浦安砂も F_c=0%より F_c=10%の方が R_L は下がる傾向があるが，富津砂は浦安砂に比べて，F_c=10%において R_L が大きく下降した．

図-5では，各条件のq_t を平均した貫入抵抗値q_tとε_{DA}= 5%, N_c=20回における液状化強度R_L（以降R_{L20}とする）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．ひし形のプロットが浦安砂の試験結果，三角のプロットが富津砂の試験結果のプロットであり，半塗りつぶしのプロットはF_c=10％の試料を示している．F_c=0%とF_c=10%を比較すると，明らかに浦安砂のq_tとR_Lの減少傾向に比べて富津砂のq_tとR_Lの減少傾向の方が大きい．そこで，両試料の違いを検討すると，**図-1**に示すように両試料に混ぜた細粒分の粒径は明らかに異なっている．つまり，浦安砂の細粒分は30μmから75μmほどの粒径のシルト分が多いのに対して，マサ土の細粒分は粘土分も多く含んでおり，この違いが2種類の砂に細粒分を加えた時の強度差の原因となっていると考えられる．しかし，このような違いにも関わらず，q_t~R_L関係には**図-5**のようにほぼ一意的相関が見られることは，貫入試験による液状化強度評価の広範な砂質土への適用性を示すものと考えられる．

4. 有効拘束圧と相対密度を変化させた試料による試験結果（富津砂）

図-6 に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 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≒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 σ'_c =196 kPa での貫入抵抗はどの相対密度でも最大となっている．また，有効拘束圧ごとにみると D_r≒70%での貫入抵抗が最大となっている．

図-7 は貫入抵抗q_tと相対密度D_r の関係をプロットした

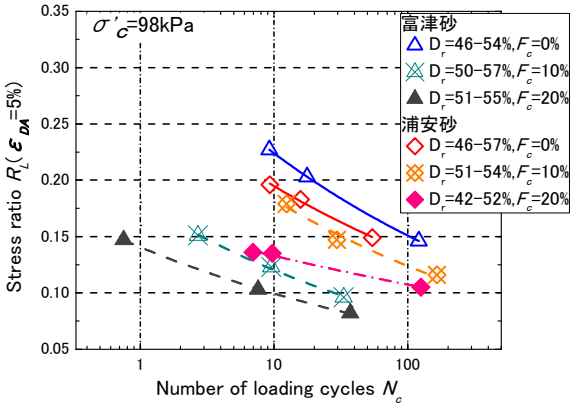

図-4　繰返し載荷回数と繰返し応力比の関係

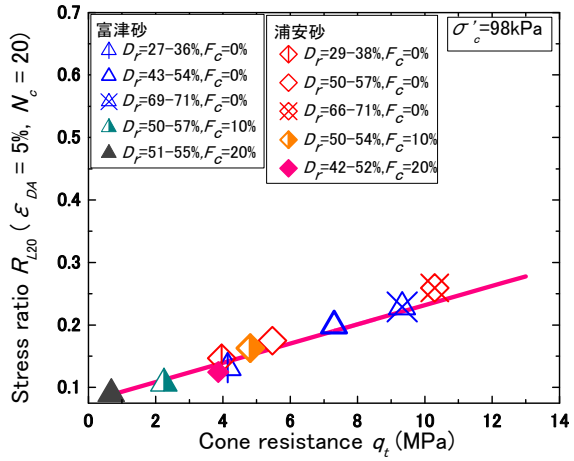

図-5　コーン貫入抵抗値と液状化強度の関係

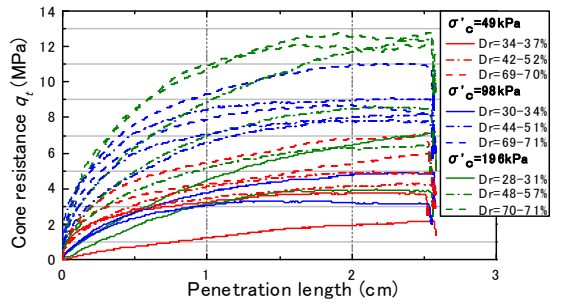

図-6　貫入長と貫入抵抗の関係

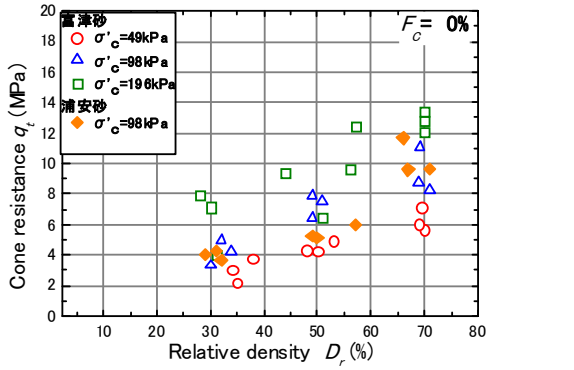

図-7　貫入抵抗 q_t と相対密度 D_r の関係

グラフである．この際，q_tの値は**図-6** 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も高い傾向を示している．

図-8 は両振幅軸ひずみ ε_{DA}=5%で定義した繰返し応力比 R_L と繰返し載荷回数 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．同一の相対密度では σ'_c=196kPa の R_L が最も低い傾向であることが分かる．

図-9 にコーン貫入抵抗 q_t と**図-8** から読み取った N_c=20 回での液状化強度 R_{L20} の直接的関係をプロットしている．q_t の値は**図-6** より求め，同一条件のカーブごとに平均したものを用いた．なお，**図-9** のラインはこれまでに行ってきた σ'_c=98kPa 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り，**図-5** の直線と同じものである．今回の D_r ≒30%，50%，70%，F_c=0%の砂についての 3 段階の σ'_c で行った試験結果のうち 49kPa と 196kPa の条件については

$$\frac{q_{t1}}{q_t} = \left(\frac{p_0}{\sigma'_c}\right)^{0.5} \cdots(1)\ ,\quad \frac{q_{t1}}{q_t} = \frac{1.7}{0.7+\sigma'_c/p_0} \cdots(2)$$

の 2 つの式により拘束圧 98kPa の場合に換算した貫入抵抗値 q_{t1} を求めた[5)6)]．また，P_0=98kPa である．なお，グラフ中に重なったプロットについては矢印で示している．これより，拘束圧で補正された q_{t1} と R_{L20} の関係はばらつきがあるものの，これまでの研究で得られた一意的関係にほぼ一致した．また 2 種類の補正式(1)，(2)による q_{t1} の違いは小さい結果となった．q_t を補正することで一意的関係に近づくということは，つまり有効拘束圧変化は液状化強度よりもコーン貫入抵抗に影響を与えるということである．

5. 有効拘束圧と細粒分を変化させた試料による試験結果（浦安砂）

図-10 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 の関係を示しており，実線が浦安砂の F_c=0%，一点鎖線が浦安砂の F_c=10%試験結果を示している．これから値の大小はあれど F_c の有無に関わらず有効拘束圧 σ'_c の高い方が貫入抵抗が大きい傾向が得られた．

図-11 は両振幅軸ひずみ ε_{DA}=5%で定義した繰返し応力比 R_L と繰返し載荷回数 N_c の関係を示している．尚，図中の

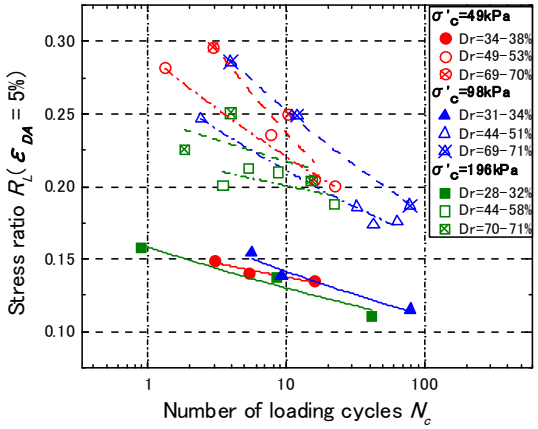

図-8 繰返し応力比 R_L と繰返し載荷回数 N_c の関係

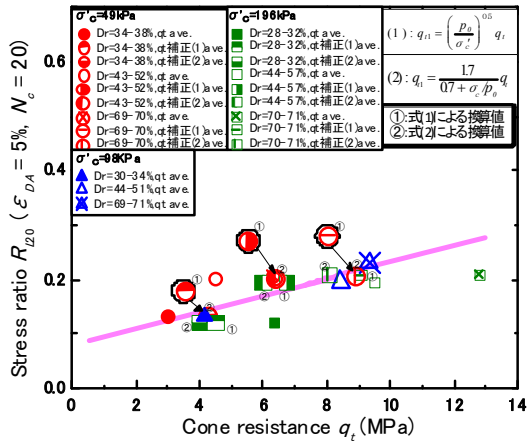

図-9 コーン貫入抵抗 q_t，換算貫入抵抗 q_{t1} と液状化強度 R_{L20} の関係

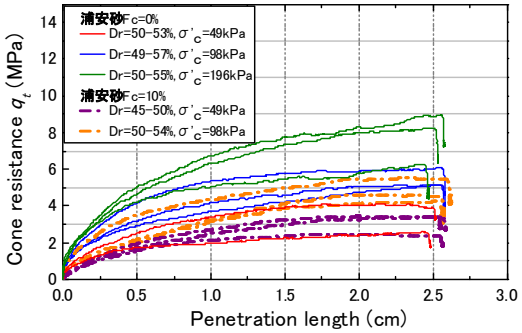

図-10 貫入長と貫入抵抗の関係

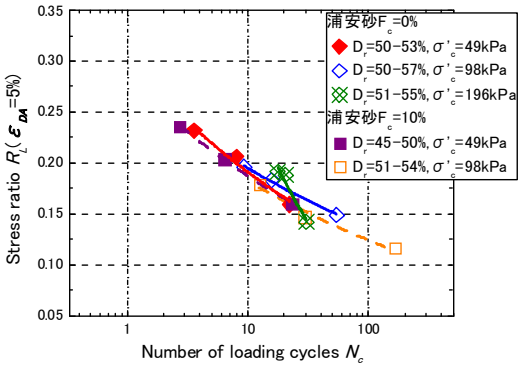

図-11 繰返し応力比 R_L と繰返し載荷回数 N_c の関係

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．ひし形のプロットがF_c= 0%，四角のプロットがF_c= 10%を示している．F_c= 0%，10%どちらのときでも有効拘束圧が変化しても液状化強度に大きな変化は見られなかった．

図-12にコーン貫入抵抗q_tと**図-11**から読み取ったN_c=20回での液状化強度R_{L20}の直接的関係をプロットしている．q_tの値は**図-10**より求め，同一条件のカーブごとに平均したものを用いた．なお，**図-12**のラインはこれまでに行ってきたσ'_c=98kPa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り，**図-5**の直線と同じものである．σ'_c=98kPaでないものは補正式(1)，(2)を用いて換算貫入抵抗q_{t1}も併せてプロットしている．

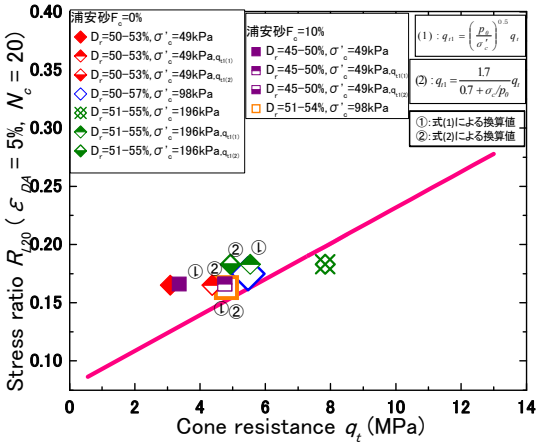

図-12 コーン貫入抵抗q_t，換算貫入抵抗q_{t1}と液状化強度R_{L20}の関係

この図から拘束圧の異なるプロットは一意的関係からはずれるが補正することでσ'_c=98kPaの同条件の近づき，ばらつきがあるもののこれまでの研究で得られた一意的関係にほぼ一致した．

6. まとめ

富津砂と浦安砂について有効拘束圧及び相対密度，細粒分を変化させた試験を行うことで以下の知見を得た．

富津砂と浦安砂の比較

- 富津砂，浦安砂共に細粒分を増加することでq_t, R_Lが減少したが，その減少量には大きな差があった．これは混ぜた細粒分の粒度の違いが関係しているとみられる．また，q_t~R_L関係においてはどの条件でも一意的関係が見られた．

拘束圧変化

- コーン貫入試験おいてどの相対密度D_rにおいても，ばらつきは大きいものの有効拘束圧σ'_cの増加と共に貫入抵抗q_tは増加した．
- 液状化強度曲線において同じ拘束圧下では，相対密度D_rが大きい程，繰返し応力比R_Lが高い傾向にある．浦安砂では同じ条件で有効拘束圧を変化させても繰返し応力比R_Lに大きな違いは見られなかった．
- q_t~R_L関係において，拘束圧が49kPaと196kPaのものについては，P_0=98kPaに基準化した貫入抵抗を用いることで，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．

参考文献　[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 Pablication 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) 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.