

# 砂質土の液状化強度～コーン貫入抵抗関係への 過圧密・小ひずみ履歴の影響

長尾 洋太<sup>1</sup>・國生 剛治<sup>2</sup>・伊藤 文樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)  
E-mail: yohta-nagao@civil.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 中央大学教授 理工学部 都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)  
E-mail: kokusho@civil.chuo-u.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)  
E-mail: fumiki-ito@civil.chuo-u.ac.jp

同一供試体において小型コーン貫入試験と液状化試験を行える三軸試験機を用いて、過圧密履歴と小ひずみ履歴が砂の液状化強度 $R_L$ 、コーン貫入抵抗 $q_t$ 及び両者の関係への影響を調べた。その際、非塑性細粒分の含有率 $F_c$ を段階的に変化させその影響にも注視した。その結果、応力・ひずみ履歴によって砂の $R_L$ 、 $q_t$ は共に増加し、その増加率は $F_c$ により異なる結果となった。また $R_L$ と $q_t$ の対する直接的関係は $F_c$ の違いによらずほぼ一直線状で、履歴の無い場合に比べて上方に位置し、同一の貫入抵抗 $q_t$ に対し大きな液状化強度 $R_L$ を与えることが分かった。また、別途行った微量なセメント添加により固結作用を模擬した加速試験結果と対比し、応力・ひずみ履歴による強度増加は固結作用とは異なり、実務での液状化判定における $F_c$ による $R_L$ 補正の対象外であることが分かった。

**Key Words** : liquefaction, miniature cone test, stress/strain history, fine contents

## 1. はじめに

近年、緩い砂地盤に対して標準貫入試験 (SPT) 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) を用いる機会が増えている。CPTとSPTでは試験法はかなり異なるが、液状化判定での使われ方は類似しており、共通の問題点も含んでいる。特に貫入抵抗値から液状化強度を評価するに当たって、細粒分含有率や年代効果などの影響についてはいまだ未解明な点が多く残されている。

現在我が国で用いられている液状化判定法では、例えば道路橋示方書<sup>1)</sup>に示されるように、SPTの同じN値に対し $F_c$ が多いものほど液状化強度を割り増すことになっている。また、米国でもCPTの貫入抵抗値から液状化強度を算出する際に $F_c$ による大幅な割り増しを行っている<sup>2)</sup>。細粒分含有率の増加により同じ貫入抵抗値に対する液状化強度が増大するという考え方の根拠としては、既往の地震により液状化した地盤のケーススタディーから液状化強度を逆算した研究<sup>3) 4)</sup>が挙げられる。さらにこれを裏付ける実験的研究として、原位置CPTと不攪乱凍結試

料による液状化試験によってコーン貫入抵抗と液状化強度の関係<sup>5)</sup>やSPTによる類似の関係<sup>6)</sup>を調べたものがある。

このように原地盤で調べられた液状化強度は同じ貫入抵抗値に対応した細粒分含有率 $F_c$ が大きいほど大きくなる傾向が見られるのに対し、相対密度一定の条件で室内調整した供試体では、 $F_c$ が大きいほど液状化強度が低下する試験結果が得られてきた<sup>7) 8) 9)</sup>。

この一見矛盾した細粒分含有率の液状化強度に及ぼす影響を解明するために、筆者らは同一供試体において小型コーン貫入試験、液状化試験を行える三軸試験機を開発し<sup>10)</sup>、砂試料の貫入抵抗と液状化強度の直接的関係を調べてきた。それによると、室内調整で短時間正規圧密した供試体については相対密度 $D_r$ 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 $R_L$ は一意的な関係となる意外な結果が得られた<sup>11)</sup>。

既往の原地盤を対象とした研究<sup>3) 4) 5)</sup>では同一の貫入抵抗値に対して $F_c$ が大きい砂ほど液状化強度は大きくなるとされていることと、この研究結果が食い違う主要因として、室内再構成試料では再現できない原地盤の年代効果が関わっている可能性が考えられる。一般に長い年月

を経て形成された自然堆積土は、骨格構造が含有鉱物の化学反応により安定し液状化強度が増大することが知られている。再構成試料はこのような固結作用による年代効果を再現しているとは言い難いため、このようなギャップが表れるものと考えられる。もしそうであるならば、室内調整試料の試験結果をそのまま原位置液状化強度と見なすことは極めて大きな誤差要因となる。

そのため我々は、前述の同一供試体において小型コーン貫入試験と液状化試験を行える三軸試験機を用いて、短時間で固結作用を再現するためにセメントを細粒分に少量加え化学的活性を強めた加速試験を行った。その結果、固結作用を受けた土は通常室内調整試料による試験結果<sup>11)</sup>とは異なり、 $F_c$ が大きくなるほど同じ貫入抵抗 $q_t$ に対して液状化強度 $R_L$ が増加する傾向が表れることが見出された。その理由としては、 $F_c$ の増大と共に細粒土の長期的固結作用が発揮されやすくなり、それが $R_L$ を $q_t$ 以上に押し上げるためであることが分かった<sup>12),13)</sup>。

ところで地盤が長期間に受ける年代効果としては、化学的な固結作用のみではなく長期間の地質変動による過圧密履歴や過去の地震による多数回の小ひずみ履歴などの応力・ひずみ作用も考えられる。過圧密や小ひずみを与えることで液状化強度が明確に増加することはかなり以前から室内試験により指摘されてきた<sup>例えば14),15)</sup>。ここでは、非塑性細粒分を含む砂の供試体に過圧密・小ひずみ履歴を加え、コーン貫入抵抗と液状化強度への影響やさらに両者の相互関係に及ぼす影響を調べることにより、固結作用による年代効果を含め $q_t \sim R_L$  関係に及ぼす年代効果を全体的に検討する。

## 2. 試験装置

試験に用いた三軸試験機は空圧制御式の中型三軸試験装置で、供試体直径は100mm、高さ200mmである。また、同一供試体において液状化試験の前にコーン貫入試験を行うために、ペDESTALを図-1のように新たに開発した

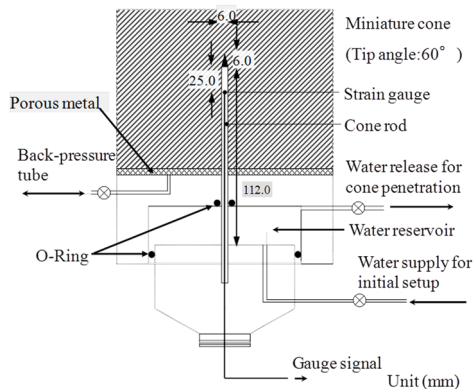


図-1 貫入ロッド付きペDESTALの概略図(左)と写真(右)

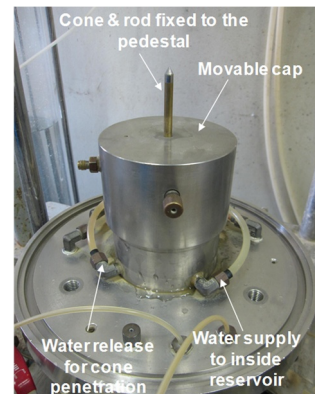
貫入ロッド付き<sup>10)</sup>のものに替えている。

このペDESTALはロッドが固定された台座とロッドが貫通した可動キャップからなり、その間は水で満たした空間となっている。バルブを開けて下部ペDESTAL内部空間を満たした水がセル圧により大気圧中に排水されると、供試体全体が下方に移動しコーンが供試体内に貫入する。コーン先端部は高さ6mm、先端角60°で、底面積は28.3mm<sup>2</sup>であり断面積は実物コーンに比べ、1/35のサイズである。コーンは非排水条件で25mm貫入され、貫入終了時の供試体中にあるコーン長は70mmである。貫入抵抗値はコーン底面から25mm下部の外形6mm中空ロッド内壁に貼り付けたひずみゲージにより測定する。厳密に言えば測定値にはロッドの周面摩擦も多少含まれるが、ここではこれを先端抵抗 $q_t$ と見なしている。

コーン貫入速度は原位置コーン貫入試験での値(通常2cm/s)よりかなり遅い約2mm/sであるが、相対密度の違い( $D_r=26\sim70\%$ )によらずほとんど一定である<sup>11)</sup>。貫入試験は非排水条件で行うが、原地盤での実際のCPTにおいては地盤の透水係数によって排水と非排水の中間的条件となることも考えられる。そこで、排水条件でのコーン貫入試験も行い、貫入抵抗値に大きな違いが生じないことも確認した<sup>11)</sup>。また、貫入試験がその後に行う液状化試験に与える影響についても調べた。通常のペDESTALを用いた液状化強度と貫入試験後にコーン貫入ロッドが供試体の中にある状態で行った液状化試験に有意な違いが認められないことも確認している<sup>11)</sup>。

## 3. 試験試料と試験方法

試料は千葉県富津砂を用い、これに混合する細粒分として塑性指数 $I_p=6$ 程度のほぼ非塑性に近いまき土細粒分を用いた。試料の細粒分含有率を $F_c=0, 5, 10, 15, 20, 30\%$ と変化させた。図-2に粒径加積曲線を示し、表-1にセメントを含まない試料の物理特性を示す。表-2には後ほど比較に用いる微量のセメントを添加し、固結作用が



及ぼす影響を調べる試験に用いた試料の物理特性を示す。

供試体は全てウェットタンピング法(WT法)により作製し、このときの含水比は3~5%程度である。相対密度は大半のケースで $D_r=50\%$ とし、 $D_r=30\%$ 、 $70\%$ についても少数のケースについて実験を行った。なお、相対密度はJIS規格に従った最大最小密度試験を用いて算出しており、以降の図表には圧密終了時の値を示している。二重負圧法により通水・飽和させ、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 $196\text{kPa}$ で1~2時間かけて等方圧密する。その後、非排水条件下、貫入速度約 $2\text{mm/sec}$ でコーン貫入試験を行う。

非排水状態でコーン貫入試験を行うと過剰間隙水圧の発生により有効拘束圧が変化し、供試体圧密時にコーンロッドに発生していた砂による拘束応力に影響を与え、コーン貫入抵抗測定値の誤差要因となる。そのため圧密時のセル圧の増加に伴うコーンのひずみゲージの変化を計測することで、有効拘束圧の変化によるひずみゲージの計測値の線形近似式を求めた。これによりコーン貫入試験中に発生した過剰間隙水圧に応じてコーン貫入抵抗値を補正したが、補正前と補正後で最大 $0.6\text{MPa}$ 程の違いが密な砂において発生した程度であった<sup>12)</sup>。

コーン貫入試験に続き、 $\sigma_c=98\text{kPa}$ で十分に過剰間隙水圧を消散させるため15分間再圧密を行った後、液状化試験を行う。液状化試験では応力制御にて両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{D1}$ が10%発生するまで、非排水条件下で載荷周波数 $0.1\text{Hz}$ の正弦波を加えた。ゴム膜貫入による液状化強度が受け

る影響をチェックするため、試験前に小さな軸応力に加え水圧増分を調べた<sup>16), 17)</sup>が、その影響は無視しうる大きさであることを確認した。

今回の一連の研究では、室内調整した試料について、 $\sigma_c=98\text{kPa}$ の正規圧密状態で応力ひずみ履歴を与えずにそのまま行う試験に加え、(1)OCR=4.0の過圧密履歴を与えてから行う試験、(2)多数回の小ひずみ履歴を与えてから行う試験を実施した。さらにこれらと(3)微量のセメントを細粒分に添加した加速試験との比較も行っている。図-3には全体の試験手順を示しているが、その中に上記の(1)~(3)の手順が記入されている。以下にそれらを具体的に説明する。

- (1) 過圧密履歴を与える試験では供試体をセットした後、試験手順の都合上通水させる前にセル圧を $392\text{kPa}$ まで増やしてOCR=4.0で60分間にわたり過圧密荷重を加える。なお、その間の体積変化はビューレットを用いて、そこに排出される気泡による水位変化を観察する。すなわち、供試体から押し出される複数の気泡がビューレットの水柱の中を上昇する間の最大水位上昇と気泡が水面上に抜けた時との最大水位変化から体積変化を計算し、それを10回程度にわたる気泡の排出すべてについて合算することにより体積収縮量を算出した。過圧密除荷時の体積変化は無視している。このような方法では飽和供試体の体積変化をビューレットで計測する場合に比べて信頼度が落ちることは明

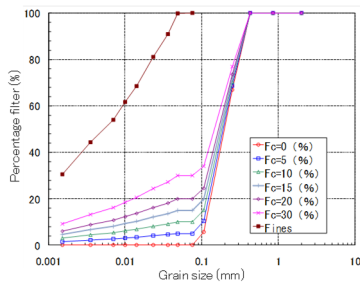


図-2 試料の粒径加積曲線

表-1 セメントを含まない試料の物理特性

細粒分含有率 Fc (%)	均等係数 Uc	乾燥密度 $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最大間隙比 $e_{max}$	最小間隙比 $e_{min}$
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	2.70	2.717	1.762	1.254	1.167	0.542
15	16.2	2.710	1.773	1.198	1.262	0.528
20	33.9	2.703	1.782	1.163	1.324	0.517
30	106	2.714	1.610	0.984	1.758	0.686

表-2 セメントを含んだ試料の物理特性

細粒分含有率 Fc (%)	セメント含有率 Cc (%)	乾燥密度 $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	最大間隙比 $e_{max}$	最小間隙比 $e_{min}$
5	0.5	2.741	1.719	1.278	1.145	0.595
5	1.0	2.743	1.723	1.293	1.122	0.592
10	0.5	2.740	1.762	1.273	1.152	0.555
10	1.0	2.742	1.763	1.276	1.149	0.555
20	0.5	2.736	1.779	1.157	1.365	0.538
20	1.0	2.738	1.784	1.162	1.356	0.535
30	0.5	2.732	1.610	1.014	1.695	0.697
30	1.0	2.734	1.658	1.036	1.639	0.649

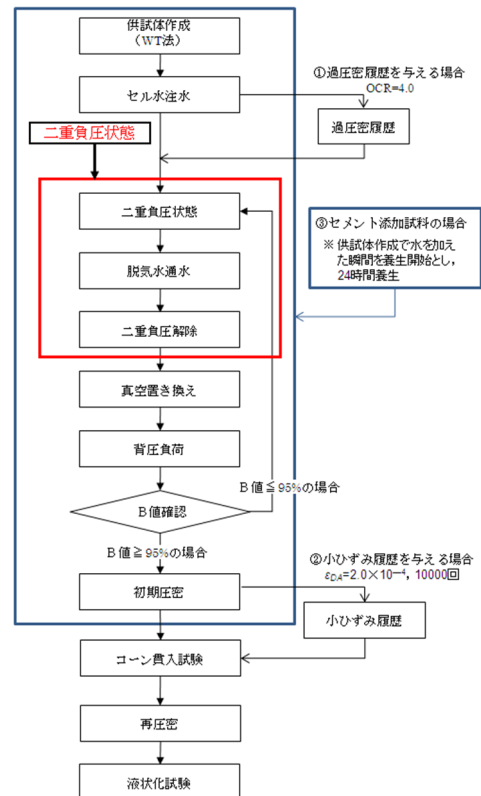


図-3 実験手順フローチャート

らからである。しかし、今回の実験では、通水後に過圧密応力を除荷するとB値が十分に上昇しなかったため敢えてこの方法をとった。ちなみに、この方法による測定値は圧密中の供試体軸ひずみ変化から推定した体積ひずみと比べて、大きな違いはないことを確認している。その後、二重負圧法で完全飽和化を図り、コーン貫入試験を行った。

- (2) 小ひずみ履歴を与える試験では、過去に地盤が経験したであろう多数回の地震を模擬するために、二重負圧法で完全飽和化し $\sigma'_c=98\text{kPa}$ で正規圧密してから、コーン貫入試験を開始する前に非排水条件で液状化してしまわない程度の大きさとして両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DM}=2.0\times 10^{-4}$ を振動数 $f=1\text{Hz}$ で10000回加える。これによりわずかに間隙水圧が上昇するため、小ひずみを発生させている途中で载荷を一度止め、バルブを開き水圧を開放するという作業を数回行った。このときビューレットの水位変化により体積変化を読み取った。
- (3) セメントの添加による加速試験を行う際には、細粒分の化学活性度を変えるためにセメント含有率 $F_c$  (セメント重量の全試料重量に対する割合)を0, 0.5, 1.0%の3段階に変化させ、細粒分を $F_c=0\sim 30\%$ の範囲で変化させた供試体で試験を行った。なお普通ポルトランドセメントを使用し、セメントは細粒分に添加し、またその一部と見なして細粒分含有率 $F_c$ を算出している。また、この試験では、WT法による供試体作製で水を加えた瞬間を養生開始とし、コーン貫入試験を行う前まで圧密しながら24時間養生する。

#### 4. 応力・ひずみ履歴を与えた試験の結果

図-4に小型コーン貫入試験により相対密度 $D_r\approx 50\%$ ,  $F_c$

$=0, 5, 10, 15, 20\%$ の供試体について得られた、貫入長に対する貫入抵抗値 $q_t$  (上段) と過剰間隙水圧 $\Delta u$  (下段) の関係の代表例を示す。まず、上段の貫入抵抗値 $q_t$ のグラフから、貫入長が増すにしたがって $q_t$ が増加するが徐々に頭打ち傾向が表れることが分かる。これらのカーブより、後ほど液状化強度と関連付ける $q_t$ 値としては、貫入長25mmの範囲で現われる最大値を読み取っている。

図中(a)~(e)の上段において履歴なしの実線カーブを比較すると、 $F_c$ の増加に伴い貫入抵抗は単調に減少していくことが分かる。また、過圧密履歴を与えたものや小ひずみ履歴を与えたものは、履歴を与えないものに比べてデータのバラつきはあるものの貫入抵抗が増加する全体的傾向が読み取れる。

一方、下段の過剰間隙水圧 $\Delta u$ のグラフから、履歴を与えないものは $F_c$ にそれほど依存せず概ね似かよった比例的な増加傾向が表れているが、過圧密・小ひずみ履歴を与えたものは正の間隙水圧の発生量が減少していることも見てとれる。

図-5には小型コーン貫入試験の後に同一供試体について行った液状化試験による繰返し応力比 $R_L$ と両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DM}=5\%$ に達する繰返し载荷回数 $N_c$ の関係を $F_c=0, 5, 10, 15, 20\%$ について示している。まず(a)~(e)の履歴を与えていない試験結果を比較すると、細粒分含有率 $F_c$ が増加するにしたがい、液状化強度が全体的に低下する傾向が明瞭に読み取れる。類似の傾向は、相対密度を一定として細粒分を変化させた既往の液状化試験においても見られる<sup>7,8,9)</sup>。また、過圧密履歴や小ひずみ履歴を与えたものはそうでないものに比べて大きく増加するが、 $F_c$ が増加するほどその効果は減少する傾向も見られる。

表-3には、図-4, 5に示した過圧密・小ひずみ履歴を与えた場合と与えない場合についての全実験条件ならびに得られた貫入抵抗値と液状化強度を纏めて示している。液状化強度は図-5に示す3~4供試体の応力比と $\varepsilon_{DM}=5\%$ に達する载荷回数の関係から、 $N_c=20$ 回または10回の応力

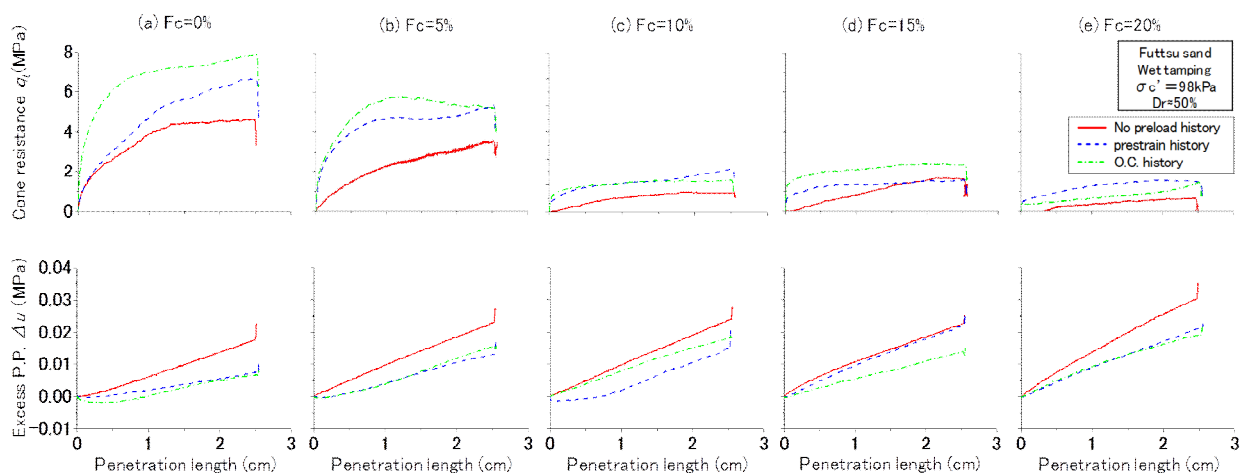


図-4  $F_c=0\%$ (a)~ $F_c=20\%$ (e)における貫入抵抗値 $q_t$  (上段) と過剰間隙水圧 $\Delta u$  (下段) の貫入長に対する変化の代表例



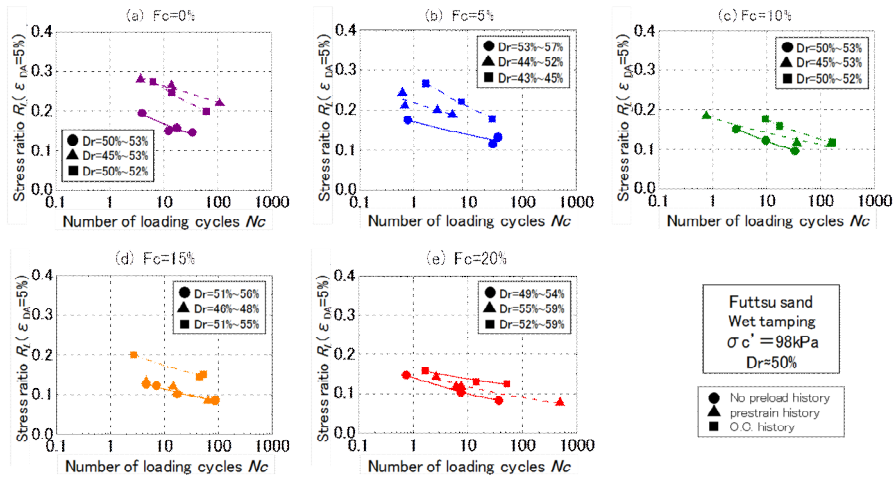


図-5  $F_c=0\%$ (a)～ $F_c=20\%$ (e)における繰返し応力比  $R_L$  と繰返し荷回数  $N_c$  の関係

表-3 応力・ひずみ履歴効果に関する試験条件と結果一覧

Nominal relative density Dr(%)	Fines content Fc(%)	without or with O.C. or strain history	Initial Dr(%)	Actual Dr(%) before OPT	Pen.Res. (mod.S) qt(MPa)	Average qt (MPa)	Actual Dr(%) before Liq.Test	Cyclic stress ratio $\sigma_d/2\sigma'_c$ ( $\epsilon_{DA}=5\%$ )	Number of cycles $N_c$ ( $\epsilon_{DA}=5\%$ )	Liquef. Strength for $N_c=20$ $R_{L20}$	Liquef. Strength for $N_c=10$ $R_{L10}$
50	0	without	50	53	4.04		53	0.150	12		
50	0	without	50	52	4.58	4.35	52	0.157	17	0.152	0.166
50	0	without	49	51	4.33		51	0.146	34		
50	0	without	47	49	4.46		50	0.194	4.0		
50	0	O.C.	44	49	7.77		50	0.274	6.5		
50	0	O.C.	46	52	7.86	8.03	52	0.198	64	0.234	0.258
50	0	O.C.	44	51	8.47		51	0.246	14		
50	0	strain	42	45	6.64		45	0.220	109		
50	0	strain	46	53	5.89	6.73	53	0.280	3.7	0.252	0.265
50	0	strain	43	47	7.66		47	0.265	14		
50	5	without	54	57	3.56		57	0.132	36		
50	5	without	51	53	3.80	3.42	53	0.115	29	0.129	0.137
50	5	without	50	53	2.91		53	0.174	0.8		
50	5	O.C.	39	45	5.88		45	0.221	7.7		
50	5	O.C.	38	43	5.14	5.02	44	0.177	28	0.188	0.208
50	5	O.C.	36	42	4.24		43	0.267	1.7		
50	5	strain	39	43	3.56		44	0.243	0.6		
50	5	strain	44	52	2.33	3.75	52	0.211	0.7	0.166	0.177
50	5	strain	46	49	5.35		49	0.188	5.1		
50	10	without	47	51	3.61		51	0.151	2.7		
50	10	without	46	49	1.67	2.25	49	0.123	9.6	0.106	0.120
50	10	without	44	48	1.48		48	0.096	33		
50	10	O.C.	27	44	2.67		44	0.158	17		
50	10	O.C.	32	46	2.34	2.47	46	0.176	9.6	0.157	0.176
50	10	O.C.	34	44	2.39		44	0.117	166		
50	10	strain	47	53	3.73		55	0.114	155		
50	10	strain	39	54	2.38	2.79	54	0.117	36	0.132	0.141
50	10	strain	48	56	2.25		57	0.184	0.8		
50	15	without	52	56	1.88		56	0.121	7.2		
50	15	without	48	51	1.62	1.57	51	0.100	17	0.102	0.113
50	15	without	49	53	1.20		53	0.085	87		
50	15	O.C.	46	55	3.31		55	0.150	53		
50	15	O.C.	45	55	2.50	2.52	55	0.143	45	0.161	0.174
50	15	O.C.	41	50	1.75		51	0.200	2.7		
50	15	strain	42	47	1.57		48	0.133	4.6		
50	15	strain	41	48	1.49	1.41	48	0.119	15	0.106	0.120
50	15	strain	40	46	1.18		46	0.084	65		
50	20	without	47	49	0.55		49	0.082	37		
50	20	without	50	53	0.66	0.68	54	0.103	7.6	0.090	0.099
50	20	without	49	53	0.83		54	0.147	0.8		
50	20	O.C.	47	58	2.40		59	0.124	53		
50	20	O.C.	42	54	0.91	1.57	55	0.158	1.7	0.128	0.136
50	20	O.C.	43	59	1.61		59	0.129	14		
50	20	O.C.	44	58	1.35		59	0.107	114		
50	20	strain	47	53	1.57		53	0.118	6.2		
50	20	strain	49	56	1.77	1.58	56	0.143	2.7	0.108	0.117
50	20	strain	47	52	1.35		52	0.117	7.7		
50	20	strain	48	59	1.61		59	0.077	491		

比  $R_L$  を求めている. なお,  $N_c$  が 10 回に満たない条件については図中の近似カーブから外挿している. また, 対応する  $q_t$  の値はそれら 3～4 回の液状化試験の前に同一供試体で行ったコーン貫入試験における平均値である.

表-3 の数値に基づき, 図-6 では  $N_c = 20$  に対応した液状化強度  $R_L$  ならびにコーン貫入抵抗  $q_t$  と細粒分含有率  $F_c$  の関係を, 履歴を与えないものは丸印, 小ひずみ履歴を与えたものは三角印, 過圧密履歴を与えたものは四角印で表している. 図-4 や図-5 でも示されているが,  $R_{L20}$  や  $q_t$  の

絶対値は  $F_c$  の増大とともにほぼ並行的に低下する. しかし, 過圧密や小ひずみの履歴を与えることで  $R_{L20}$  も  $q_t$  も共に増加する傾向が見られ, その増加割合は  $F_c$  によりかなり異なることが分かる.

図-7 は横軸に細粒分含有率  $F_c$  をとり, 縦軸には履歴を与えたことによる  $R_L$  と  $q_t$  それぞれの履歴を与えていない場合に対する増加率を三角印と四角印により示している. これを見ると, いずれの履歴についても  $F_c = 10 \sim 15\%$  までは  $F_c$  の増加にともない  $R_{L20}$  と  $q_t$  の増加率が並行的に減

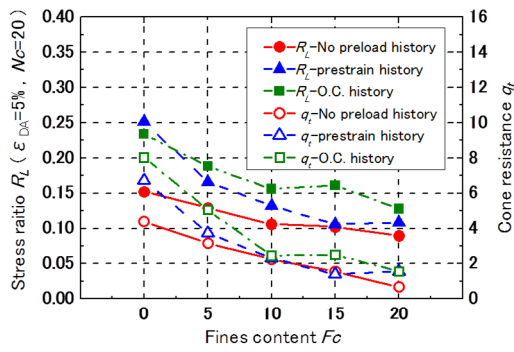


図6 細粒分含有率  $F_c$  に対する液状化強度  $R_L$  および貫入抵抗  $q_t$  の関係

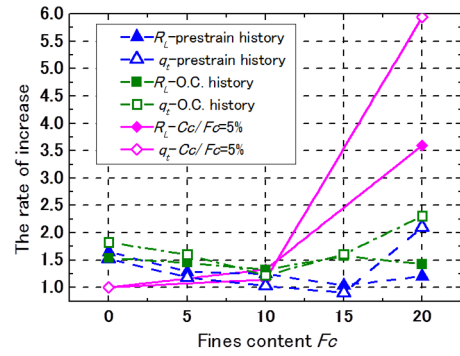


図7 細粒分含有率  $F_c$  に対する液状化強度  $R_L$  および貫入抵抗  $q_t$  の増加率

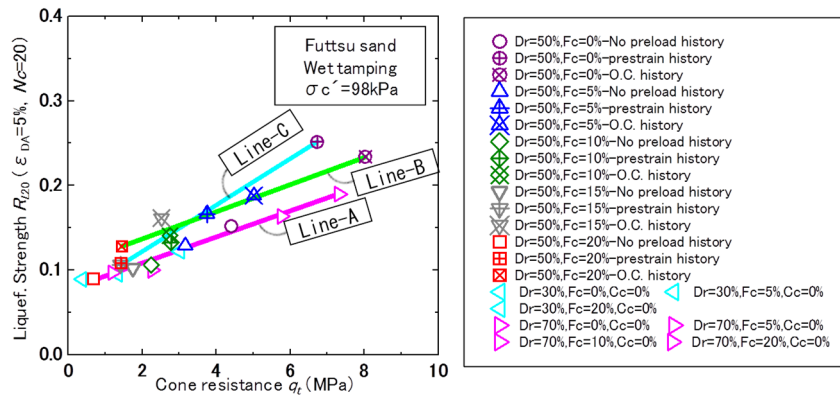


図8 過圧密履歴と小ひずみ履歴の有無による液状化強度  $R_L$  と貫入抵抗  $q_t$  の関係の比較

少している。しかしそれ以上の  $F_c$  については  $R_L$  はほぼ横ばいなのに対し、 $q_t$  は  $F_c=20\%$  に向かって急激に上昇する傾向を示すものとなった。なお、図中の菱形印については別途後述する。

以上の結果より、過圧密履歴や小ひずみ履歴を与えることにより砂粒子間の接触の状態に何らかの変化が生じるため、貫入抵抗や液状化強度に図-6, 7に見られるような類似の変化が現れると考えられる。また、その変化傾向は細粒分含有率が  $F_c=10\sim15\%$  よりも大きい小さいかによってかなり異なることが示された。

### 5. 貫入抵抗値と液状化強度の直接的関係

図-8では液状化強度  $R_L$  を縦軸にとり、横軸のコーン貫入抵抗値  $q_t$  との直接的関係をプロットしている。過圧密や小ひずみの履歴を与えない条件では、砂の相対密度が  $D_r=30\sim70\%$ 、細粒分含有率が  $F_c=0\sim30\%$  と幅広く変化しても、 $q_t \sim R_L$  関係は図中に示す直線-Aに沿ってほぼ一直線上に並ぶことが分かる。すなわち通常の室内調整試料による試験では  $q_t \sim R_L$  関係は  $F_c$  や  $D_r$  の違いに関わらず一意的関係となる。この点は筆者らの以前の研究<sup>11)</sup>で既に見出されたことであるが、今回のデータによっても再確認されたことになる。また、この一意的直線関係は

細粒分をあまり含まない砂地盤でのCPTとそこから不攪乱採取した試料の三軸試験で測定した液状化強度の直接的関係<sup>9)</sup>と定量的に良く一致することも明らかになっている<sup>12),13)</sup>。

次に、過圧密を受けた供試体について見ると、相対密度  $D_r \approx 50\%$  で細粒分含有率  $F_c=0\sim20\%$  の条件のプロット（×印の付いたマーク）は図中に示す直線-Bに沿ってほぼ一直線上に並ぶことが分かる。この直線-Bは履歴を一切受けていない供試体の直線-Aの上方にほぼ平行に位置している。つまり、過圧密履歴によって同じ貫入抵抗  $q_t$  に対する液状化強度  $R_L$  はほぼ同じ値だけ増加することになる。

一方、小ひずみ履歴を与えた場合について見ると、相対密度  $D_r \approx 50\%$  で細粒分含有率  $F_c=0\sim20\%$  の条件のプロット（+印の付いたマーク）は図中に示す直線-Cに沿ってほぼ一直線上に並ぶことが分かる。直線-Cは直線-Aの上方に位置しているが、直線-Aとは平行ではなく  $q_t$  が小さくなると  $R_L$  のひずみ履歴による増加はほとんど無くなることが分かる。

以上の結果は、過圧密履歴や揺れの小さな地震を多数経験する等の力学的な年代効果により、同一の  $q_t$  に対する  $R_L$  が増加することを意味している。また、その増加傾向は2種類の履歴の間で微妙に異なる結果となった。さらに重要な点として、細粒分含有率  $F_c$  が異なっても直線

-Bや直線-Cに沿った直線状に並ぶため、 $F_c$ の大小はこれらの $q_t \sim R_L$ 関係には直接の影響を及ぼさないことが挙げられる。なお、それぞれの履歴ごとに2つの異なる直線上に並ぶ理由については、今後検討していく必要がある。

### 6. セメント添加試験との対比

上記の応力・ひずみ履歴を加えた試験に対して図-9では、これ以前の研究で我々が行ってきた、砂に含まれる細粒分に微量のセメントを混合して24時間圧密養生しセメンテーション効果を再現した加速試験の結果を示している<sup>12), 13)</sup>。 $F_c$ の増加と共に $q_t$ も $R_L$ も図-8で述べた直線-Aより明らかに増大し、細い実線の矢印に沿って右斜め上方に移動している。そしてセメント含有率 $C_c$ が大きくなるほど直線-Aから上方への離間距離が大きくなっている。加速試験において $C_c$ を増加させることが、より長い地質年代での固結の進展を表していると考えれば、これは同じ $F_c$ の土でも時間経過と共に同じ貫入抵抗 $q_t$ に対する液状化強度 $R_L$ が増加することを意味している。

さらに、図-9の凡例の中にある $C_c / F_c$ というパラメータは細粒分に含まれるセメントの割合であり、細粒分の化学的活性度を表していると考えられる。図-9に太線の矢印で示すように、同一の $C_c / F_c = 5\%$  (実線の矢印) あるいは $10\%$  (破線の矢印) において、 $F_c$ が増加するほどほぼ同一の $q_t$ に対する $R_L$ が増加し、このため $C_c = 0\%$ の一意的関係の直線-Aより上方にずれる傾向が明瞭に見られる。つまり、同一の化学活性 $C_c / F_c$ を有する細粒分を考えた場合、 $F_c$ が大きい方が大きな液状化強度を示すことを意味している。

図-7には $C_c / F_c = 5\%$ 一定条件での $F_c$ に対する液状化強度 $R_L$ とコーン貫入抵抗 $q_t$ の増加率の関係を菱形印を結んだ線により重ね書きしている。応力・ひずみ履歴による場合、 $R_L$ と $q_t$ は $F_c = 0\%$ で大きな増加率を示し $F_c = 10 \sim 15\%$ に増加する過程で明瞭な低減傾向を示すのに対し、セメント添加の加速試験では $F_c$ が0から10%まで増加する間

に徐々に増加し、 $F_c = 10 \sim 20\%$ の間で急激に増加する。 $F_c = 10 \sim 20\%$ での急増傾向は応力・ひずみ履歴による場合もセメント添加の場合も定性的に類似しており、特にコーン貫入抵抗 $q_t$ が $R_L$ よりも大きく増加することが特徴的である。

表-1, 2に示すように今回用いた細粒分を含む砂の最小間隙比 $e_{min}$ の値は $F_c = 20\%$ 付近で最小値を取っており、この付近で骨格構造が砂粒子接触型から細粒分マトリクス介在型への変化点となっていると判断される。このような骨格構造の変化と $F_c = 10 \sim 20\%$ での $q_t$ の急増は何らかの関係があるものと推察されるが、今後さらに検討が必要である。

図-8と図-9を細粒分含有率 $F_c$ の果たす役割の観点から対比すると、図-8に示した応力・ひずみ履歴による $q_t \sim R_L$ 関係では、履歴による強度増加割合は過圧密や小ひずみ履歴に依存するのみで、図-9のような細粒分含有率 $F_c$ の影響はほとんど見られないことが大きな相違点である。実務で用いられる液状化判定においては、砂の細粒分含有率によって液状化強度を補正する方法がとられている。その根拠は専ら細粒分を含む化学的成分により長期に発揮される固結効果によるものであることが本研究の結果から明らかになった。つまり、年代効果のうちでも過圧密や小ひずみのような履歴効果は細粒分含有率とは直接関係しておらず、それによる液状化強度押し上げ効果は別途評価する必要があると言えよう。

### 7. まとめ

同一供試体で小型コーン貫入試験と液状化試験を行える三軸試験装置を用いて、過圧密・小ひずみ履歴により原地盤の土が受ける年代効果を再現するため、非塑性細粒分を含む砂について一連の試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) コーン貫入抵抗 $q_t$ も液状化強度 $R_L$ も細粒分含有率 $F_c$ が増すほど絶対値は明らかに減少するが、それら

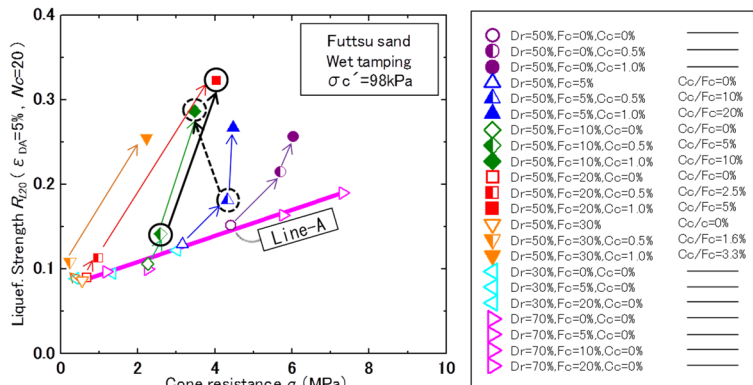


図-9 セメント含有率の変化による液状化強度  $R_L$  とコーン貫入抵抗値  $q_t$  の関係の比較

の砂に過圧密履歴や揺れの小さな地震を模擬したひずみ履歴を加えることにより、コーン貫入抵抗 $q_t$ と液状化強度 $R_L$ の両者ともに履歴を加えない場合に比べて増加する。その増加率は細粒分含有率 $F_c$ が0%から10~15%の範囲では $F_c$ が増加するほど低下するが、 $F_c$ がそれ以上増えると $q_t$ 、 $R_L$ 共に増加傾向に転じ、特に $q_t$ は急増する。

- (2) 過圧密・小ひずみ履歴を加えた供試体のコーン貫入抵抗 $q_t$ と液状化強度 $R_L$ の直接的関係は、 $F_c$ にほとんど依存せず、過圧密履歴と小ひずみ履歴それぞれについてほぼ直線状に並ぶ。その直線的関係は履歴を加えていないものに比べて上方に位置し、同じ貫入抵抗に対し大きな液状化強度を与える。
- (3) 過圧密・小ひずみ履歴を加えた試験結果を長期固結作用をセメント添加により模擬した加速試験の結果と比べると、後者では細粒分含有率 $F_c$ が $q_t \sim R_L$ 関係の重要な決定要因であるのに対し、前者ではほとんど無関係であることが分かった。

現在、実務で用いられる液状化判定においては砂の細粒分含有率によって液状化強度を補正する方法がとられているが、本研究の結果によれば過圧密や小ひずみのような履歴効果は細粒分含有率とは直接関係していないことが明らかになった。つまり、今回のまさ土細粒分を用いた実験によれば液状化強度が細粒分含有率に依存する理由は、専ら細粒分に含まれる化学的成分により長期に発揮される固結効果によるものであると言える。今後この点を確認するために、対象とする土質材料の範囲をさらに広げた実験を行っていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：7.5 砂質地盤の液状化の判定，道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.91-95, 1996.
- 2) Idriss, I. M. and Boulanger, R. W. : Soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute*, Monograph MNO-12, p.113, 2008.
- 3) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.57-74, 1983.
- 4) Seed, H. B. and De Alba, P. : Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, *Proc. In-situ '86*, ASCE Geotechnical Special Publication, No.156, pp.356-373, 1984.
- 5) 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, pp.249-252, 1995.

- 6) 松尾修：液状化の判定法と耐震設計，基礎工，Vol.25, No.3, pp.34-39, 1997.
- 7) 佐藤正行，小野匡寛，風間秀彦，小瀬木克己：細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集，No.561/ III-38, pp.271-282, 1997.
- 8) Polito, C. P. and Martin, J. R. II : Effect of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.5, pp.408-415, 2001.
- 9) Kokusho, T. : Liquefaction strengths of poorly-graded and well-graded granular soils investigated by lab tests, *Proc. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.159-184, Springer, 2007.
- 10) 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，pp.191-192, 2003.
- 11) 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 Special Publication, No.156, pp.356-373, 2005.
- 12) 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, pp.36-35, 2011.
- 13) Kokusho, T., Ito, F. and Nagao, Y. : Liquefaction Strength compared with Cone Resistance in Triaxial Specimen considering Aging Affect of Sand containing Non-Plastic Fines, *The 3rd International Geotechnical Symposium (ISG2009) on Geotechnical Engineering for Disaster Prevention and Reduction*, Harbin, China, CD-publication, 2009.
- 14) Ishihara, K. and Takatsu, H. : Effects of overconsolidation and  $K_0$  conditions on the liquefaction characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.59-68, 1979.
- 15) Seed, H. B., Mori, K. and Chan C. K. : Influence of Seismic history on Liquefaction of sands, *Journal of Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.103, GT4, pp.257-270, 1977.
- 16) Tokimatsu, K. and Nakamura, K. : A liquefaction test without membrane penetration effects, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No.4, pp.127-138, 1986.
- 17) 田中幸久，國生剛治，吉田保夫，工藤康二：システムコンプライアンスによる砂礫の動的測定誤差の評価方法，電力中央研究所 研究報告 U89040, 1998.

(2010.9.13 受付)



LIQUEFACTION STRENGTH VS. CONE RESISTANCE RELATIONSHIP  
FOR SANDY SOIL AFFECTED  
BY OVERCONSOLIDATION AND PRESTRAINING HISTORY

Yohta NAGAO, Takaji KOKUSHO and Fumiki ITO

In order to investigate the effects of overconsolidation and cyclic prestrain history on the relationship between penetration resistance  $q_t$  and liquefaction strength  $R_L$  for sands containing fines, miniature cone penetration tests and subsequent cyclic loading tests are carried out in triaxial test specimens. A unique line relating cone resistance and liquefaction strength has been found irrespective of fines content  $F_c$  for sands with given overconsolidation stress/prestrain history, indicating that the history tends to increase the liquefaction strength corresponding to a given  $q_t$  - value. In a comparison with similar results of accelerated tests simulating longtime cementation effect by adding small amount of cements to fines, it is clarified that a modification of  $R_L$  corresponding to  $F_c$  in the current liquefaction potential evaluation practice cannot apply to the aging effect by overconsolidation and presstraining histories.