

砂の乱さない試料の液状化抵抗～ N 値～相対密度関係

Relationship among Liquefaction Resistance, SPT N -Value and
Relative Density for Undisturbed Samples of Sands

吉 見 吉 昭 (よしみ よしあき)

清水建設㈱常任顧問, 東京工業大学名誉教授

1. はじめに

耐震設計のための資料として砂地盤の液状化抵抗を求める場合は, 特定の地盤の原位置における液状化抵抗を知る必要がある。細粒分の少ない砂・しらす・礫については, この目的を達成する有効な手段として, 原位置凍結サンプリング法¹⁾によって採取した, 極めて良質な乱さない試料に対して非排水繰返しせん断試験を行う方法が提案されており, 研究目的のほか, すでに相当数の重要施設の耐震設計への適用例がある。しかし, このサンプリング法は高価であるため, 通常規模の工事において個別に適用することが困難であるが, 幸い, 液状化抵抗と標準貫入試験の N 値との間にかなり良い相関関係があるので, それを利用することができる。

この資料の目的と範囲は, つぎのとおりである。

- (1) 8年にわたって複数の論文^{2)~5)}に掲載されてきたため, 参照することがやや不便な状況にある試験結果を整理して一つにまとめる。
- (2) 今後の研究成果との比較を確実かつ容易にするため, サンプリングおよび試験の条件を詳しく示す。
- (3) 標準貫入試験の N 値については, 土被り応力およびロッド長さに対する補正を加える。
- (4) 液状化抵抗および相対密度について, チューブ試料に対する試験結果^{2)~7)}と比較する。
- (5) 細粒分の少ない沖積砂および埋立砂のみを対象とする。(ただし, 図-2に示すCastroの試料の地質年代は不明。)

2. 用語の定義と解説

以下に述べる用語の定義は, 必ずしも一般的なも

のではなく, この資料に限定するものとする。

2.1 原位置凍結試料

ていねいに施工された鉛直ボーリング孔に二重管から成る1組の凍結管を挿入し, 下端の開いた内管から注入された冷媒が下端の閉じた外管内を上昇するときに周囲の熱を奪うことによって地盤を原位置において円柱形に凍結させる¹⁾。凍結した状態を保ったまま地上に持ち上げ, 昇華防止のため密封し, 融解防止のため冷凍保存された試料を原位置凍結試料と呼ぶ。後述する室内試験のための供試体は凍結したまま成型され, 必要にして十分な拘束圧を加えた状態で解凍されるので, 乱れを確実に防止できる。

この資料で報告する原位置凍結試料の諸元を表-1に示す。一番下の行だけが凍結領域の一部からコアリングしたもので, そのほかはすべて凍結領域全体を持ち上げたものである¹⁾。

2.2 チューブ試料

ボーリング孔底からの静的な押込みまたはコアリングによって採取した「乱さない」試料をチューブ試料と呼ぶ。

この資料で報告するチューブ試料の諸元を表-2に示す。「採取後試料凍結」とあるのは, 試料の運

表-1 原位置凍結試料の諸元

調査地	土 層	冷 媒	凍土の周面 摩擦除去法	試料の 最大径 (mm)	参考 文献
山 梨 県	埋土	液体窒素	なし	1100	3)
新潟市A	自然堆積土	液体窒素	水ジェット	400	3)
新潟市B	自然堆積土	ブライン	コアリング	570	3)
新潟市C	自然堆積土	液体窒素	コアリング	480	2)
川崎市A	SCP*によ る締固め土	ブライン	コアリング	564	4)
川崎市B	埋土	液体窒素	コアリング	150	5)

*サンドコンパクションパイル

表—2 チューブ試料の諸元

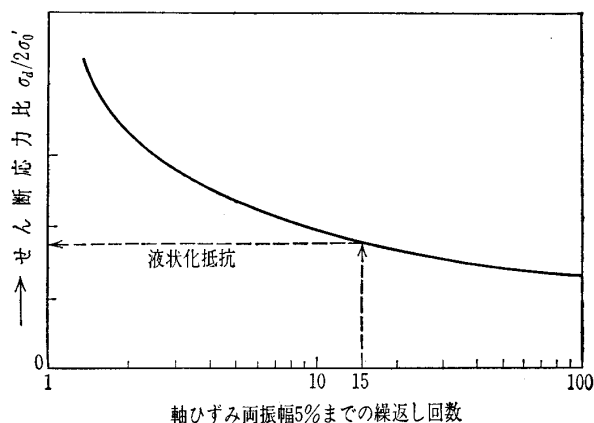
図中の記号	○	△	◇
サンプラーの種類	水圧式ピストン	ロータリー式二重管 (シュウ先行型)	ロータリー式二重管 またはピストン型
サンプラーの内径(mm)	72.5	68.1 または 130.8	73
採取後試料凍結の有無 細粒分含有率 (%) 最大・最小密度測定法	あり 4.0以下(表—4) 土質工学会基準 と同等	あり 5.8以下(表—4) 土質工学会基準によ る	なし 10未満
試験 繰返し 三軸	供試体径(mm) 1 初期拘束圧 σ'_0 (kPa) 150 ($>\sigma'_0$) 間隙圧係数 B 値 0.97以上	50 0.05, 0.1 52~98 ($=\sigma'_0$) 0.97以上	73 0.5 49~245 ($=\sigma'_0$) 0.95以上
参考文献	6)	3), 5)	7)

搬および供試体成型中の乱れを防ぐため、地上に持ち上げた試料を現場で凍結したことを意味する。凍結による膨張を防止するため、試料はサンプリングチューブに入れたまま鉛直に立てて置いて自然排水を許した後凍結し、凍った状態で供試体を成型した。したがって、供試体の成型から室内試験に至る過程は、前述の原位置凍結試料の場合と同様である。

なお、繰返し三軸試験の条件に関しては、水圧式ピストンサンプラーによる試料の初期拘束圧のみが、土被り応力より高い値に設定されていたことを指摘しておく。

2.3 液状化抵抗

複数の飽和砂供試体に対する非排水繰返し三軸試験結果から得られる図—1のような曲線において、軸ひずみ両振幅が5%に達するまでの繰返し回数15回に対応するせん断応力比の値を液状化抵抗と呼ぶ。当然のことながら、設定ひずみ振幅が小さくなるか、または繰返し回数が多くなれば液状化抵抗は小さくなる。



図—1 典型的な非排水繰返し三軸試験結果

2.4 標準貫入試験のハンマー打撃効率

ハンマー打撃効率とは、ハンマーが落下を開始する直前に保有するエネルギーのうちロッドに伝達されるエネルギーの比率である。これは、主としてハンマーとノッキングヘッドの種類・寸法・質量およびハンマー落下方法によって決まる。ここでは、トンビ法では78%、プーリー法では65%とし、それぞれ N_{78} , N_{65} と書くことに

する⁸⁾。 N 値と打撃効率は反比例するものとすれば、プーリー法による N 値はトンビ法による N 値の1.2 (=78/65) 倍になる。すなわち、

$$N_{65} = 1.2 N_{78} \dots\dots\dots (1)$$

2.5 換算 N 値

実測した N 値に土被り応力 σ'_v (kPa) およびロッド長さ L (m) に関する補正係数 C_s および C_r を掛けた値 N_1 を換算 N 値と呼ぶ。すなわち、

$$N_1 = C_s C_r N \dots\dots\dots (2)$$

$$C_s = \frac{167}{\sigma'_v + 69} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} C_r = 1, L \geq 10 \text{ m} \\ C_r = 0.562 \sqrt[4]{L}, L < 10 \text{ m} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式(3)は文献9)によっている。式(4)は米国における実験結果¹⁰⁾を定式化したもので、ロッド長さが10m未満になると、ハンマーが完全に落下しきらないうちに、ロッドの先端から反射してきた応力波がノッキングヘッドまで戻ってくるため打撃効率が低下することに対する補正である。

3. 液状化抵抗と N 値の関係

表—3, 4は、それぞれ原位置凍結試料およびチューブ試料に対する現場および室内試験結果を示している。ロッド長さはノッキングヘッド位置が地上1.5mと仮定して求めた。ロッド長さ補正係数は、ほとんどが1であり、最小でも0.86であるから、もし誤差があったとしても、その影響は小さいはずである。均等係数、細粒分含有率は、いずれも小さい。このような細粒分含有率と土被り応力の組み合わせのもとで採取される原位置凍結試料は、地盤の原位置

表—3 砂の原位置凍結試料の現場および室内試験結果

調査地	深さ z (m)	ロッド長 補正係数 C_r	N 値 (トンビ法) N_{78}	土被り 応力 σ_v' (kPa)	換算 N 値 $(N_1)_{78}$	50%粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	細粒分 含有率 F_c (%)	相対密度 D_r (%)	液状化抵抗 $\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_v'}\right)$ 5%15回
山梨県 新潟市A	4.0	0.86	1	36	1	0.26	1.8	1.3	56	0.13
	9.8	1	18	98	18	0.30	1.6	0.2	64	0.27
新潟市B	6.9	0.96	16	78	17	0.23	1.6	0.2	54	0.26
	7.9	0.98	24	88	25	0.23	1.7	0.3	84	0.39
	9.0	1	26	98	26	0.25	1.4	0.1	78	0.37
新潟市C	9.7	1	32	106	31	0.29	1.8	0.0	87	0.91
川崎市A	8.6	1	25	77	29	0.20	2.0	2.7	115	0.85
	9.3	1	24	83	26	0.24	2.1	5.8	72	0.45
	10.0	1	20	90	21	0.22	2.1	3.6	86	0.43
川崎市B	8.0	0.99	3	92	3	0.28	1.7	1.2	26	0.13

表—4 砂のチューブ試料の現場および室内試験結果

調査地	深 さ z (m)	ロッド長 補正係数 C_r	N 値		土 被 り 応 力 σ_v' (kPa)	換算 N 値 (N_1) ₇₈	50%粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	細 粒 分 含 有 率 F_c (%)	相対密度 D_r (%)	液状化抵抗 ($\frac{\sigma_d}{2 \sigma_v'}$) 5 %15回
			トンビ法 N_{78}	プーリー法 N_{65}							
ロータリー式二重管サンプラー ^{3),5)}											
新潟市B	6.9	0.96	16		78	18	0.23	1.6	0.2	76	0.16
	9.3	1	26		101	26	0.23	1.7	0.1	83	0.21
新潟市C	9.3	1	32		102	31	0.29	1.8	0.0	72	0.25
川崎市B	8.0	0.99	3		73	4	0.28	1.7	1.2	77	0.24
水圧ピストンサンプラー ⁶⁾											
新潟市D	4.2	0.87		3	43	3	0.40	2.1	—	45	0.25*
	6.7	0.95		11	65	11	0.40	1.6	—	70	0.20*
	13.2	1		17	122	12	0.41	1.9	—	46	0.17
	13.5	1		22	125	16	0.48	1.9	—	41	0.14
新潟市E	4.2	0.87		13	58	12	0.49	2.0	—	38	0.17*
	5.1	0.90		11	66	10	0.23	2.5	4.0	35	0.17*
	6.9	0.96		16	81	14	0.37	1.6	1.5	45	0.20
	8.4	1.00		12	95	10	0.29	1.7	—	60	0.22
	9.2	1		9	102	7	0.32	1.6	—	42	0.18
	11.7	1		10	124	7	0.36	1.5	—	47	0.18
	12.8	1		13	133	9	0.48	1.8	—	55	0.19
	13.8	1		19	142	13	0.42	1.9	—	51	0.20

*外挿による

における密度と液状化抵抗をそのまま保持した高品質の乱さない試料であることが分かっている¹⁾。逆に、チューブ試料にとっては、細粒分が少ないことは試料の品質にとって不利な条件となる。表—4 欄外の注記は、せん断応力比～繰返し回数曲線から15回に対応する液状化抵抗を外挿によって求めたことを示す。

液状化抵抗と換算 N 値の関係をプロットすると図—2のようになる。ただし、白抜き記号で示したチューブ試料のうち、◇印は表—2にはあるが表—4にはないもので、以下に説明する。

Castro (カストロ) は、回転式二重管サンプラー

(Pitcher sampler) またはピストン型シンウォールサンプラーを用いて採取した多数の砂試料に対して繰返し三軸試験を実施し、10回の載荷で軸ひずみ両振幅が5%に達する応力比として定義された液状化抵抗と換算 N 値との関係をプロットした⁷⁾。ここでは、表—3, 4の結果と比較するため、初期拘束圧が高いものを省き、49~245 kPa のデータを取り上げる。Castroの典型的なせん断応力比～繰返し回数曲線(図—1参照)に基づき、10回に対応する液状化抵抗を0.94倍することによって、15回に対応する液状化抵抗を求める。また、原著での換算 N 値(N')は、276 kPa に関してつぎのように定義されている。

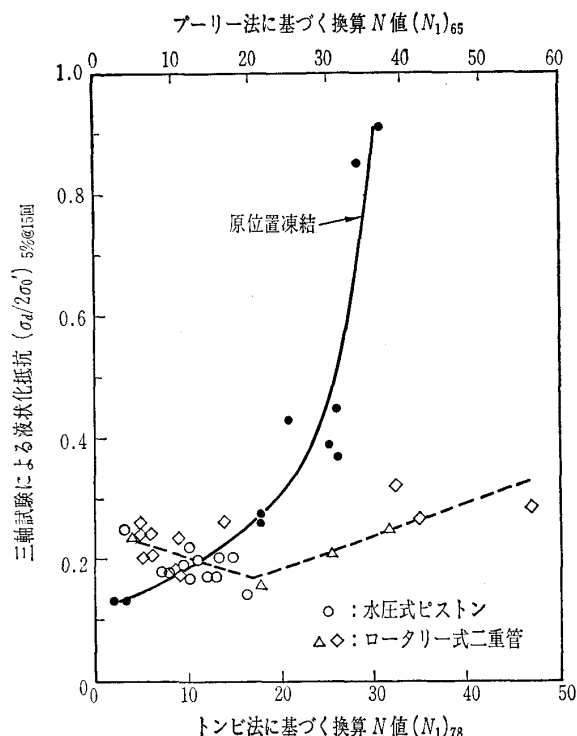


図-2 原位置凍結試料とチューブ試料の液状化抵抗～換算 N 値関係

$$N' = \frac{345N}{\sigma_v' + 69} \quad (5)$$

ここに N =実測 N 値, σ_v' =土被り応力 (kPa) である。式(3), (5)から $(\sigma_v' + 69)$ を消去すると, $C_s N = 0.484 N'$ が得られ, さらにハンマー打撃効率=60%, ロッド長さ補正係数 $C_r = 1.0$ と仮定すると

$$(N_1)_{78} = \frac{0.484}{1.3} (N')_{60} = 0.37 (N')_{60} \quad (6)$$

が得られる。これを用いて液状化抵抗と換算 N 値の関係をプロットすると, 図-2の◇印のようになる。縦軸の値の変化幅が比較的小さいので, N 値に関する上記の仮定に若干の誤差があったとしても, その影響は大きくないはずである。

図-2を見ると●印で示した原位置凍結試料および白抜き記号で示したチューブ試料の曲線の形は大幅に異なっているが, それぞれ, かなり良い相関関係があることが分かる。原位置凍結試料の液状化抵抗は, $(N_1)_{78}$ が20を超えるあたりから急激に増加し, $(N_1)_{78}$ が30になると極めて大きくなっている。反面, チューブ試料の液状化抵抗は, $(N_1)_{78}$ が20を超えても徐々にしか増加せず, $(N_1)_{78} = 30$ では原位置凍結試料の1/3以下という低い値にとどまっている。一方, $(N_1)_{78}$ が17以下では, $(N_1)_{78}$ が大きくなるほど液状化抵抗が逆に小さくなっているように見

える。

4. 相対密度と換算 N 値の関係

表-3, 4に基づいて, 相対密度と換算 N 値の関係をプロットすると, それぞれ図-3, 4のようになる。図-3の原位置凍結試料に関しては相関係数が0.81とかなり高いのに対して, 図-4のチューブ試料に関しては相関は明らかに弱い。△印の点は数が少ないので統計的な議論をするのは無意味ではあるが, ばらつきが小さく見えるのは縦軸の値の分布範囲(11%)より1桁大きい範囲(100%)の図にプロットされたためである。重要なことは縦軸の値がほぼ一定ということであって, これは N 値と相対密度がほとんど無関係であることを意味している。

5. 液状化抵抗と相対密度の関係

相対密度の値が最大・最小密度測定法に依存するほか, 原位置密度の測定には高品質の乱さない試料が必要となるので, 相対密度は N 値と比べて実用的価値が低く, かつ, 図-4に示したように信頼性に

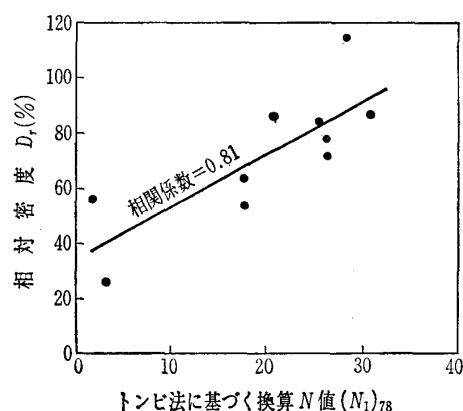


図-3 原位置凍結試料の相対密度～換算 N 値関係 (表-3 参照)

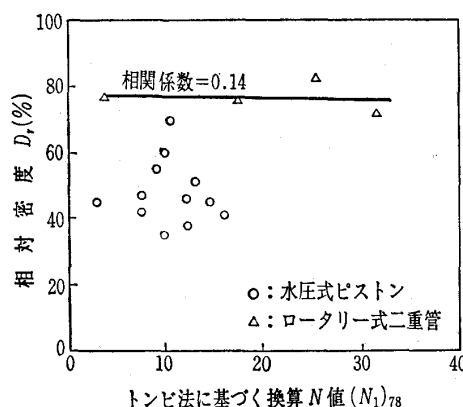


図-4 チューブ試料の相対密度～換算 N 値関係 (表-4 参照)

疑問があるけれども、再構成試料との比較を試みるために、液状化抵抗と相対密度の関係をプロットすると図-5が得られる。原位置凍結試料に関しては、図-2, 3を反映してかなり良い相関関係があるが、チューブ試料に関しては、図-4を反映して、0.46と低い相関係数となっている。

図-5の+印は、新潟市C試料(表-1, 3)を炉乾燥し空气中で自由落下させて作製した再構成試料に対する試験結果(初期拘束圧=98 kPa)である¹²⁾。曲線の形は原位置凍結試料のものとよく似ているが、縦軸の値にはかなり差がある。したがって、原位置の相対密度が再現できたとしても、空中落下法による再構成試料に対する試験によっては原位置における液状化抵抗は再現できないことになる。

6. おわりに

この稿は、文献11), 13)の一部に加筆したものであるが、筆者の意見を極力抑えて、客観的事実を提示し、読者のご参考に供するために資料として投稿させていただいた。もしお手元に類似のデータがあれば比較していただければ幸いである。また、この稿では対象外としたが、シルト質砂については現在検討中であり、洪積砂については今後の課題として検討したいと考えている。

なお、表-2右欄のデータの一部については、

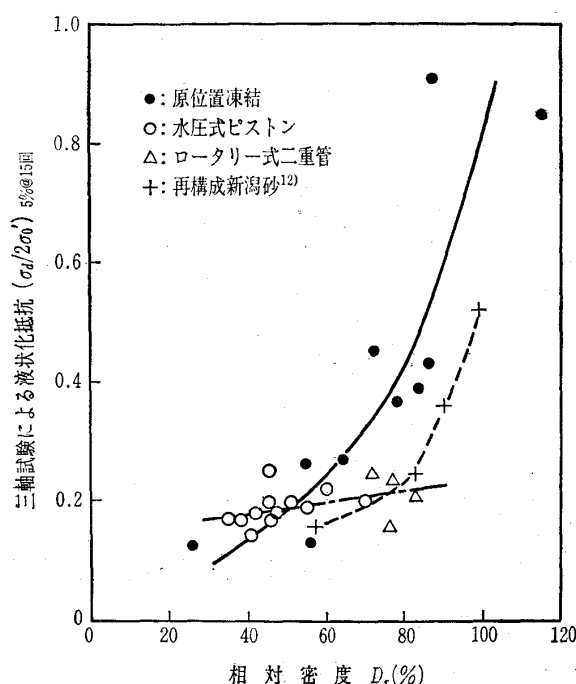


図-5 原位置凍結試料、チューブ試料および再構成試料の液状化抵抗～相対密度関係

Castro博士に教えていただいた。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 時松孝次・大原淳良：凍結サンプリング，土と基礎，Vol. 38, No. 11, pp. 61～68, 1990.
- 2) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y.: Undrained Cyclic Shear Strength of a Dense Niigata Sand, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 4, pp. 131～145, 1984.
- 3) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Hosaka, Y.: Evaluation of Liquefaction Resistance of Clean Sands based on High-Quality Undisturbed Samples, 土質工学会論文報告集, Vol. 29, No. 1, pp. 93～104, 1989.
- 4) Tokimatsu, K., Yoshimi, Y. and Ariizumi, K.: Evaluation of Liquefaction Resistance of Sand Improved by Deep Vibratory Compaction, 土質工学会論文報告集, Vol. 30, No. 3, pp. 153～158, 1990.
- 5) 井合 進・倉田栄一：ゆるい砂地盤における地震時の間隙水圧の観測と解析，港湾技術資料, No. 718, 1991.
- 6) Ishihara, K., Silver, M.L. and Kitagawa, H.: Cyclic Strength of Undisturbed Sands Obtained by a Piston Sampler, 土質工学会論文報告集, Vol. 19, No. 3, pp. 61～76, 1979.
- 7) Castro, G.: Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. GT6, pp. 551～569, 1975.
- 8) Skempton, A.W.: Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation, Géotechnique, Vol. 36, No. 3, pp. 425～447, 1986.
- 9) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction based on SPT N-value and Fines Content, 土質工学会論文報告集, Vol. 23, No. 4, pp. 56～74, 1983.
- 10) Schmertmann, J.H. and Paracios, A.: Energy Dynamics of SPT, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. GT8, pp. 909～926, 1979.
- 11) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Ohara, J.: In Situ Liquefaction Resistance of Clean Sands over a Wide Density Range, Géotechnique, Vol. 44, No. 1, 1994.
- 12) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil Liquefaction Evaluations by Elastic Shear Moduli, 土質工学会論文報告集, Vol. 26, No. 1, pp. 25～35, 1986.
- 13) 吉見吉昭：きれいな砂の乱さない試料の液状化抵抗～N値～相対密度関係，第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 977～978, 1993.

(原稿受理 1993.12.8)