粘性土凍土の圧縮強さに及ぼす内的3因子の影響に関する基礎研究

(Fundamental Study on Influence of Three Internal Factors
on Compressive Strength of Frozen Clayey Soil)

榎 戸 源 則¹⁾ (Motonori Enokido)

キーワード：圧縮強さ／含水比／凍結／比重／飽和度 (IGC: D 8)

1. ま え が き

著者は先に砂質凍土について、内的3因子（含水比、乾燥比重、飽和度）がその圧縮強さに及ぼす影響を実験式を用いて図示し検討した。これらの研究については、先づ豊浦標準砂により、次に現場土（渡良瀬川砂）について、含水比、乾燥比重、飽和度の圧縮強さに及ぼす影響を実験的に比較検討し、この程度の土質による差異は少ないこと。凍土の圧縮強さを最大にする含水比は粗粒土である渡良瀬川砂のほうが大きくなることを定量的に明らかにした^{1),2)}。

本研究では、粘土（関東ローム）凍土を用いて、これらの内的3因子がその圧縮強さに及ぼす影響を実験的に検討し、砂質凍土の場合と比較し、その類似点・相違点を明確にしようとするものである。

2. 試料および実験概要

(1) 試 料

試料としては、粘性土として本学桐生市近郊から採取した関東ロームを用いた。その粒径加積曲線を、既に報告した豊浦標準砂および渡良瀬川砂と対比して、図-1

図-1 一軸圧縮試験試料の粒径加積曲線

に示す。豊浦砂と渡良瀬川砂と比較すると、粒径加積曲線はなだらかなS字形の曲線を描き、粘土およびシルト分が通過質量百分率の50%を占めていることがわかる。また、土粒子比重 G_s の値も 2.85 と、豊浦砂の 2.65、渡良瀬川砂の 2.75 に比し、一番大きな値となっている。

図-2 に -30°C における凍土の一軸圧縮試験結果から得られた応力～ひずみ曲線を示す。既報の豊浦砂と渡良瀬川砂の応力～ひずみ曲線も比較する意味で示してあ

	ω [%]	G_s	S_r [%]
豊浦砂	22.10	1.601	97.2
渡良瀬川砂	27.7	1.486	97.3
関東ローム	95.9	0.707	98.0

図-2 一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線

i) 群馬大学工学部建設工学科 教授（桐生市天神町 1-5-1）
(1989. 6. 30 原稿受付・討議期限 1991. 1. 1, 要請があれば1か月の
期限延長可能)

る。また図-2の上段に含水比 w 、乾燥比重 G_d （乾燥土の密度 ρ_d を 4°C における水の単位体積重量 ρ_0 で除した値、即ち、 $G_d=\rho_d/\rho_0$ ）と飽和度 S_r の値も記してある。自然含水比は豊浦砂および渡良瀬川砂の22.10%、27.7%に比べ、95.9%と著しく大きくなっている。乾燥比重 G_d の値は土粒子比重 G_s が大きいのに反し、豊浦砂1.601、渡良瀬川砂1.486に比し、関東ロームは0.707と1/2以下の値になっている。飽和度は98.0%で砂の97%とほぼ同じ値を示す。

(2) 実験方法

供試体の作製方法は、土質工学会の凍土の力学的特性に関する委員会が提案した仕様に準じた⁵⁾。試料をミキサーを用いて、水を加え練り合わせた後、予備圧密槽に入れ圧密する。試料を成形し、径5cm×高さ10cmのモールドに入れ、フリーザー内で -30°C に凍結する。試料は脱型後、養生成形される。

一軸圧縮試験は、 -30°C の状態のアムスラー試験機を用い、応力制御により200~300kPa/secで行われた。詳細は参考文献1)および6)を参照されたい。

なお、凍土の圧縮強さを最大にする含水比 w_0 を求めるためには、関東ロームの最大乾燥比重 $G_{d\max}$ を知る必要がある。関東ロームのような自然含水比が高くしかも乾燥の影響を受けやすい土の締固め試験は難しく、最大乾燥比重を求めることも容易でない。したがって本研究では、本来乾燥法によるべきところを自然含水比の状態から非乾燥法によって、締固め乾燥比重～含水比曲線を描き、最大乾燥比重を求めた。

3. 実験結果

(1) 応力～ひずみ曲線

図-2に関東ロームと豊浦砂および渡良瀬川砂の応力～ひずみ曲線を示した。砂の場合は、応力 σ の値も大きく最大圧縮強さを示す明瞭なピークがみられるが、関東ロームについてはピークはみられず、 σ の値も小さい。これは既往の研究と同じような傾向を示している^{7),8),2)}。

(2) 回帰直線

著者は先にデータ整理における主観を排除するため次のような実験式を提示し、圧縮強さ q_u と含水比 w 、乾燥比重 G_d とを関係づけた。

$$q_u = q_* \left(\frac{w}{100} \right)^m G_d^n \quad (1)$$

q_u の値は、砂質土の場合、応力～ひずみ曲線のピーク応力としたが、関東ロームのごとき粘性土の場合、今回の実験では最大圧縮応力が得られなかったため、ひずみが10%のときの応力を一軸圧縮強さとした^{6),8)}。また、 q_* 、 m 、 n は土質による定数である。(1)式によって参考文献1)と同じような方法によりデータを回帰分析すると、豊浦砂と渡良瀬川砂の場合と同じように、関東ロームについて次式が得られた。

$$q_u = 53.4 \left(\frac{w}{100} \right)^{2.00} G_d^{3.06} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

ここにいう回帰分析とは、ある変数の値を他のいくつかの変数の観測値から推定する方法である。この場合、 w および G_d と q_u との関係式即ち回帰直線を求めることを意味する。このような実験結果を統計的に解析する方法が、一般に分散分析といわれる方法である⁹⁾。その手順は以下の通りである。式(1)の定数 q_* 、 m 、 n を決定するため両辺の対数をとる。

$$\log q_u = \log q_* + m \log \frac{w}{100} + n \log G_d \quad (3)$$

式(3)を一般モデルの式(4)と対比する。

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (4)$$

その結果、回帰係数 a 、 b_1 、 b_2 が求められる。

$$a = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 \quad (5)$$

$$b_1 = [S(X_2^2)S(X_1 Y) - S(X_1 X_2)S(X_2 Y)] / \Delta \quad (6)$$

$$b_2 = [S(X_1^2)S(X_2 Y) - S(X_1 X_2)S(X_1 Y)] / \Delta \quad (7)$$

ここに、 $\Delta = S(X_1^2)S(X_2^2) - S^2(X_1 X_2)$

この回帰分析の分散分析表は、表-1で与えられ、この表中のSSR、 S_T 、 S_a を用いて相関係数 r が計算される。

$$r = \sqrt{\frac{SSR}{S_T - T_a}} \quad (\leq 1.0) \quad (8)$$

尚、関東ロームの回帰分析の分散分析表は、表-2で与えられ、その回帰直線式(2)は図-3のように示される。この式の妥当性は、表-2と相関係数の値 $r=0.890$ から検証される。

表-2 関東ロームの回帰分析の分散分析表

要因	自由度	2乗和	平均2乗	F検定
平均	1	124.074	124.074	1.0(10 ⁵)
b_1, b_2	2	0.052	0.026	2.2(10)
誤差	12	0.014	0.0012	
合計	15	124.140		

$$F_{1, 12; 0.01} = 9.33 \quad F_{2, 12; 0.01} = 6.93$$

表-1 回帰分析の分散分析表

要因	自由度	2乗和	平均2乗	F検定
平均	1	$S_a = n\bar{y}^2$	S_a	S_a/s^2
b_1, b_2	2	$SSR = b_1 S(X_1 Y) + b_2 S(X_2 Y)$	$SSR/2 = SSR'$	SSR'/s^2
誤差	$n-3$	$SSD = S_T - S_a - SSR$	$SSD/(n-3) = s^2$	
合計	n	$S_T = \sum y_i^2$		

(3) 等含水比線, 等乾燥比重線, 等飽和度線

式(2)に, 含水比 w と乾燥比重 G_d を表す式(9)又は(10)を代入すると, 式(11)および(12)が得られる。

$$w = S_r \cdot G_w (1/G_d - 1/G_s) \quad (9)$$

$$G_d = 1 / \left(\frac{w}{S_r G_w} + 1/G_s \right) \quad (10)$$

図-3 関東ロームの強度と $\left(\frac{w}{100}\right)^{2.00} G_d^{3.06}$ との線形関係

図-4 (a) 関東ロームの強度-含水比図における等乾燥比重線

図-4 (b) 関東ロームの強度-含水比図における等飽和度線

即ち,

$$q_u = 53.4 \left(\frac{w}{100} \right)^{2.00} \left[1 / \left(\frac{w}{S_r \cdot G_w} + 1/G_s \right) \right]^{3.06} \quad (11)$$

$$q_u = 53.4 [S_r \cdot G_w (1/G_d - 1/G_s) / 100]^{2.00} \cdot G_d^{3.06} \quad (12)$$

ここで, G_w は氷を含めた凍土中の水の比重を表す。氷

図-5 (a) 関東ロームの強度-乾燥比重図における等含水比線

図-5 (b) 関東ロームの強度-乾燥比重図における等飽和度線

を含んでいるので G_w は1より小さな値となる。

これら式 (11) および (12) と、式 (2) を組み合わせると、等含水比線、等乾燥比重線、等飽和度線が得られる²⁾。

図-6 (a) 関東ロームの強度-飽和度図における等含水比線

図-6 (b) 関東ロームの強度-飽和度図における等乾燥比重線

例えば、強度-含水比図における等乾燥比重線 (図-4 (a)) は、式 (2) において G_d を一定とすることにより、等飽和度線 (図-4 (b)) は、式 (11) の S_r を一定とすることによって得られる。

同様に、強度-乾燥比重図における等含水比線 (図-5 (a)) は、式 (2) の w を一定とすることにより、等飽和度線 (図-5 (b)) は式 (12) の S_r を一定にすることにより得られる。

また、強度-飽和度図における等含水比線 (図-6 (a)) は、式 (11) の w を一定とすることにより、等乾燥比重線 (図-6 (b)) は、式 (12) において G_d を一定とすることによって得られる。

このようにして求められた各線の性質を調べることににより、強度に及ぼす含水比、乾燥比重および飽和度の影響が明らかにされる²⁾。

(4) 凍土の強度を最大にする含水比

凍土の強度を最大にする含水比 w_0 は参考文献 1) で求められたように次式で与えられる。

$$w_0 = 100 G_w (1/G_{d \max} - 1/G_s) \quad (13)$$

式 (13) は式 (9) において、 $S_r = 100\%$ 、 $G_d = G_{d \max}$ の場合である。

$G_w = 0.92$ とすると、

$$w_0 = 92 \times (1/G_{d \max} - 1/G_s) \quad (14)$$

ここに、 $G_{d \max}$ は最大乾燥比重、 G_s は土粒子比重である。豊浦砂については、 $w_0 = 21.25\%$ ¹⁾、渡良瀬川砂については、 $w_0 = 17.66\%$ が得られている²⁾。

関東ロームについては、砂と異なり粘性土であるので、締固め試験が困難であったが、 $G_{d \max} = 0.803$ を実験的に求めることができた。図-7 に乾燥比重-含水比の関係を示す。式 (14) に $G_s = 2.85$ および $G_{d \max} = 0.803$ を代入すると、 $w_0 = 80.60\%$ が得られた。この値は、豊浦砂や渡良瀬川砂に比し4倍程度となっている。なお、締固め試験は、自然含水比が高い関東ロームであるので、非乾燥法と非繰返し法の組合せによって実施した³⁾。

図-7 締固め曲線

4. 考 察

以上の実験結果について、特に砂質土と粘性土の相違について重点をおき、考察を加える。

(1) 回 帰 直 線

実験結果を回帰分析することにより、式(1)に基づき式(2)が得られ、図-3が示される。図-3は関東ローム凍土の強度と $(w/100)^{2.00} \cdot G_d^{3.06}$ との関係を表している。

先づこの直線の妥当性はどうであろうか。相関係数 $r=0.890$ となっており、ほぼ0.9と1に近いので、かなりの妥当性があるとみられる。しかし、豊浦砂と渡良瀬川砂の場合、ともに $r=0.996$ となり、ほぼ1に近く極めて相関性は高い。参考に豊浦砂(図-8)についてみると、そのデータは、図の直線上に殆んど一様に分布している。一方、図-3から明らかのように、関東ロームのデータは、直線の右上の部分に集中しており、豊浦砂のような広い分布はみられない。これは、関東ロームの粘性土の性質とそのために供試体の含水比を砂質土程下げることができないので、右上の含水比が大きい場合のデータしか得られないことによる。

次に、図-3と図-8の直線の勾配を比較すると、図-3のほうが著しく大きいことが一見して読みとれる。これは、基本式(1)の係数にあたる q_* が、関東ロームは53.4、豊浦砂は26.4であり、関東ロームは倍以上の値になっていることから理解される。また定数 m, n も豊浦砂に比し、大きな値となっている(m の値は0.851に対し2.00, n は2.99に対し3.06)。

(2) 圧縮強さに及ぼす含水比の影響

図-4(a)は関東ロームの強度-含水比図における等乾燥比重線を示す。これは乾燥比重が一定の時、不飽和凍土の圧縮強さが含水比の増加とともに増加する右上りの曲線となっている。この曲線は、式(2)において G_d = 一定とした時得られたもので、そのもとになるのは、

式(1)である。乾燥比重 G_d が一定の時、圧縮強さ q_u は含水比 w の m 乗に比例し、 $q_u \propto w^m$ となる。そこで、既報の豊浦砂および渡良瀬川砂の場合と比較すると、それぞれ $m=0.851$ および 1.06 であるのに対して、関東ロームでは、 $m=2.00$ とほぼ2倍となっている。したがって、関東ロームの強度~含水比曲線の勾配も、豊浦砂および渡良瀬川の場合²⁾より著しく急になっている。これは、含水比の増加に伴う圧縮強さの増加の度合が、関東ロームの方が砂質土より著しく大きくなることを意味している。

図-4(b)は関東ロームの強度-含水比図における等飽和度線を示している。これは、飽和度一定の場合、それぞれの飽和度において、含水比の増加とともに圧縮強さが減少することを示す右下りの曲線となっている。飽和度が一定であれば、凍土の構成割合のうち、水(氷と不凍水を含めた)と空気の割合が一定であるので、含水比が増加する気相の体積も増加する結果、凍土の強度が減少することは容易に理解される。既報の豊浦砂と渡良瀬川砂の場合²⁾と比較するため、式(11)およびそのもとになる式(11')について検討する。

$$q_u = q_* \left(\frac{w}{100} \right)^m \left[1 / \left(\frac{w}{S_r \cdot G_w} + 1/G_s \right) \right]^n \quad (11')$$

等飽和度線は、式(11')において S_r = 一定とした時の $q_u \sim w$ の関係を示したものである。この時、 q_u と w の関係は、第一項 w^m と第二項の $1/w$ と n との複雑な関係式であり、含水比が圧縮強さに及ぼす影響も単純でない。しかし、図-4(b)をみると、なだかな右下りの曲線となっており、含水比が増加すると、強度が徐々に減少することが理解される。この傾向は、豊浦砂や渡良瀬川砂とほぼ同じであるが²⁾、前二者が直線的な減少を示すのに対し、関東ロームの場合は、ゆるやかな曲線である点がやや異なる。即ち、砂質土より含水比の増加による強度減少の影響が小さいとみなされる。これは高志らの実験結果と同じ傾向を示している⁸⁾。

(3) 圧縮強さに及ぼす乾燥比重の影響

図-8 豊浦砂の強度と $\left(\frac{w}{100}\right)^{0.851} G_d^{2.99}$ との線形関係

図-9 豊浦砂の強度含水比図における等飽和度線

図-5 (a) に関東ロームの強度～乾燥比重図における等含水比線を示す。これらの曲線は、いずれも含水比一定の場合、乾燥比重の増加とともに圧縮強さが増加する右上りの曲線となっている。これらの曲線は、式 (2) において含水比 w を一定とした場合の q_u と G_d との関係式から得られたものである。即ち、 $q_u \propto G_d^{3.06}$ であるから、圧縮強さ q_u は乾燥比重のほぼ 3 乗に比例する。この結果を豊浦砂および渡良瀬川砂の場合と比較してみる。式 (2) のもとになる一般式 (1) について、 w が一定の場合、 $q_u \propto G_d^n$ の関係となり、豊浦砂および渡良瀬川砂は、 n の値がそれぞれ 2.99, 3.49 となる。渡良瀬川砂の 3.49 はやや大きい、いずれも $n \approx 3$ とみなしうるので、関東ロームと同じように、含水比が一定の時、圧縮強さは乾燥比重の 3 乗に比例するとみなしてさしつかえないと思われる。図-5 (a) の勾配を豊浦砂および渡良瀬川砂の場合²⁾と比較すると、著しく急になっている。これは、式 (1) の q_* の値が、豊浦砂および渡良瀬川砂が、26.4 および 22.5 であるのに対し、関東ロームでは、53.4 とほぼ 2 倍となっていることによる。

次に、図-5 (b) の強度-乾燥比重図における等飽和度線から、飽和度が一定の場合の関東ローム凍土の圧縮強さと乾燥比重の関係が明らかになる。 $q_u \sim G_d$ 曲線は、いずれも G_d の増加とともに q_u も増加し、ピークらしき点を示した後、減少に転じている。これは、ゆるやかな増加曲線を示す豊浦砂や渡良瀬川砂とはやや異なった傾向を示すとみなされる。ただし、渡良瀬川砂は、飽和度が増加するとともに曲線の勾配も急となり、最後にピークらしき点があるかに見える²⁾。これらの関係は、式 (12) のもとになる一般式 (12') によって得られたものである。

$$q_u = q_* [S_r G_w (1/G_d - 1/G_s) / 100]^m G_d^n \quad (12')$$

式 (12) および式 (12') において S_r を一定とすると、 q_u と G_d の関係式が得られる。この関係式は、 $1/G_d$ と m との複雑な関係と G_d^n との 2 項からなっており、単純にはならないが、図に示すとわかりやすくなる。

(4) 圧縮強さに及ぼす飽和度の影響

図-6 (a) に関東ロームの強度-飽和度図における等含水比線を示す。いずれも右上りのほぼ直線に近いカーブとなっており、含水比が一定ならば、飽和度の増加とともに圧縮強さが増加する傾向を示している。これは、豊浦砂および渡良瀬川砂の場合より勾配が急になっている点を除けば、飽和度の増加に伴い強度が増加するという点では、ほぼ同じであるとみなされる。含水比が一定の状態では飽和度が増加するということは、土粒子と水の割合は変わらず、空気 (気相) が減少することを意味するのであるから、凍土の圧縮強さが増加することは、当然であると考えられる。図-6 (a) は式 (11) (その一般

式は (11')) で与えられる) により、画かれたものであるから、式 (11) および (11') について検討を加える。これらの式において、含水比 w が一定の時、圧縮強さ q_u と飽和度 S_r の関係式は、 $1/S_r$ と n によって影響され、複雑となることがわかる。

また、図-6 (a) の等含水比線と等乾燥比重線とは、ほぼ平行するかのように見える。これは同じ二種類の線群が、豊浦砂と渡良瀬川の場合、ともに右上りではあるが交わっている点が異なる²⁾。また、強度-含水比図における等乾燥比重線と等飽和度線とは、土質に関係なく砂質、粘性土の場合とも、ほぼ直交するかのよう傾向を示しており、飽和度図と含水比図の相違が理解される。

図-6 (b) は、強度-飽和度における等乾燥比重線を示している。飽和度 S_r の増加と共に圧縮強さ q_u が増加する、右上りのほぼ直線に近いカーブである。これも、関東ロームの場合、勾配が急になっているという点を除けば、豊浦砂および渡良瀬川の場合とほぼ同じ傾向を示しているといえる。図-6 (b) のもとになるのは、式 (12) でありその一般式は (12') である。式 (12) および式 (12') において乾燥比重 G_d を一定とすれば、圧縮強さ q_u と飽和度 S_r の関係が得られ、 $q_u \propto S_r^m$ となる。関東ロームの場合 $m=2.00$ であるから $q_u \propto S_r^2$ であるが、豊浦砂および渡良瀬川砂の場合、 $m=0.851$ 、および 1.06 でいずれも $m \approx 1$ とみなされるから $q_u \propto S_r$ となる。従って、飽和度が強度に及ぼす影響は、砂質土では直線的な関係となるが、関東ロームでは 2 次曲線的とみなされる。即ち、砂質土と粘性土の土質によるこの程度の差異があることを示している。

(5) 凍土の強度を最大にする含水比

図-4 (a) と図-4 (b) に示されるように、等乾燥比重線は右上りの増加曲線であり、等飽和度線は右下りの減少曲線となる。図から明らかなように強度を最大にする含水比は、乾燥比重が最大 G_{dmax} であり、飽和度 $S_r=100\%$ のとき、即ち、 G_{dmax} の $q_u \sim w$ 曲線 (右上り) と $S_r=100\%$ の $q_u \sim w$ (右下り) 曲線との交点として与えられ、その値は、式 (14) によって求められる。

ここで、乾燥比重の最大値は乾燥状態で求められるべきものであるが、関東ロームのような粘性土では砂質土と異なり、非乾燥法によって実施せざるを得ない³⁾。このようにして求められた締固め曲線 (図-7) により、最適含水比に対応する G_{dmax} が得られた。その値の妥当性については、必ずしも十分満足しうるものとはいえないが、既往の結果と比較すれば、ほぼ可としてよいと考えられる³⁾。

5. 結 論

関東ロームを用いて行った実験結果を整理し、実験式

を求め図示した結果を、既報の豊浦砂および渡良瀬川砂の場合と比較検討した。その結果、含水比、乾燥比重および飽和度が凍土の圧縮強さに及ぼす影響について、次のような結論が得られた。

(1) 凍土の圧縮強さと含水比および乾燥比重との関係を示す回帰直線は、関東ロームの場合、豊浦砂および渡良瀬川砂ほどではないが、妥当な直線が得られる。この相違は、関東ロームの場合、比較的大きな含水比のデータしか得られず、データの分布に砂質土ほどの広がりがないことによる。

また、この回帰直線の勾配は、関東ロームが砂質土より急になっている。これは回帰直線の定数 q_* の相違が原因である。

(2) 関東ローム凍土の圧縮強さに及ぼす含水比の影響

乾燥比重が一定の時、不飽和凍土の圧縮強さは含水比の2乗に比例して増加している。この結果は、豊浦砂および渡良瀬川砂が、含水比の増加にほぼ比例して直線的に増加するのと比較すると、含水比の増加に対する強度の増加が著しいことを示している。

飽和度が一定の場合、関東ローム凍土の圧縮強さは、含水比の増加に伴いゆるやかに減少する。その減少の度合は砂質土凍土より小さい。即ち、砂質土が直線的であるのに対し、粘性土はゆるやかな曲線となる。

(3) 関東ローム凍土の圧縮強さに及ぼす乾燥比重の影響

含水率が一定の時、圧縮強さは乾燥比重のほぼ3乗に比例して増加する。これは砂質土の場合とほぼ同じ傾向であるが、その強度～乾燥比重曲線の勾配は粘性土のほうが急となる。

飽和度が一定の時、乾燥比重が増加すると、圧縮強さは、砂質凍土の場合と同様にゆるやかに増加する。ただし関東ロームの場合は、強度-乾燥比重曲線にピークらしき点がみられることが砂質凍土の強度乾燥比重曲線とやや異なった傾向といえる。

(4) 関東ローム凍土の圧縮強さに及ぼす飽和度の影響

含水比が一定ならば、飽和度の増加に伴い圧縮強さも増加する。これは砂質凍土の場合と同様であるが、関東

ロームの強度-飽和曲線の勾配は砂質土より著しく急になっている点異なる。

乾燥比重が一定ならば、圧縮強さは飽和度の2乗に比例して増加する。これは砂質土がほぼ直線的に増加するのは異なる。

また、砂質土の場合、強度-飽和度図の含水比線と等乾燥比重線は交わるが、関東ロームの場合、これらの線群はほぼ平行する傾向がみられる。これも砂質土と粘性土の相違点である。

(5) 関東ローム凍土の強度を最大にする含水比

関東ローム凍土の強度を最大にする含水比は 80.60% となり、豊浦砂の 21.25% や渡良瀬川砂の 17.66% に比し4倍程度となっている。これは細粒土ほど、最大乾燥比重が小さく 0.803 であることによる。 $(G_{d\max})$ は豊浦砂 1.645、渡良瀬川砂 1.80)

なお、本研究に協力いただいた亀田淳二君(現群馬県庁)、阿部明彦君(現日本舗道(株))をはじめ土質研究室の諸君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Enokido, M. and Kameta, J. (1987): "Influence of water content on compressive strength of frozen sands," Soils and Foundations, Vol.27, No.4, pp. 148-152.
- 2) 榎戸源則 (1989): 砂質凍土の圧縮強さに及ぼす含水比、乾燥比重、飽和度の影響に関する基礎研究, 「土質工学会論文報告集」, 第29巻第3号, pp. 183-192.
- 3) 土質工学会 (1981): 「土質試験法」.
- 4) Matsuo, M. and Shogaki, T. (1988): "Effects of plasticity and sample disturbance on statistical properties of undrained shear strength," Soils and Foundation, Vol.28, No.2, pp. 14-24.
- 5) 土質工学会 (1986): 「土の凍結に関するシンポジウム論文集」, pp. 9-18.
- 6) 榎戸源則・亀田淳二・永瀬英生・鶴飼恵三 (1988): 攪乱された粘土凍土の力学的特性に関する実験研究, 「土木学会論文集」, 第400号/III-10, pp. 199-204.
- 7) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純 (1980): 砂凍土の一軸圧縮強さに関する実験的研究, 「土木学会論文報告集」, 第302号, pp. 79-88.
- 8) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純 (1981): 均質な粘土凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究, 「土木学会論文報告集」, 第315号, pp. 83-93.
- 9) 石井恵一・堀 素夫 (共訳) (1987): 「工科系のための統計概論」, J. ガットマン/S.S. ウィルクス, 培風館.