

攪乱された粘土凍土の力学的特性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF DISTURBED FROZEN CLAY

榎戸源則*・亀田淳二**・永瀬英生***・鶴飼恵三****

By Motonori ENOKIDO, Junji KAMETA, Hideo NAGASE and Keizo UGAI

There have been nothing or few studies on the effect of disturbing frozen soils. An experimental study was carried out by using artificial undisturbed clay samples and was investigated by regression analysis. The obtained main conclusions are as follows. (1) The compressive strength and deformation modulus of frozen clay increased slightly by disturbing. (2) The reason why the strength and deformation modulus increase by disturbing seems to depend on decreasing of water content and increasing of dry specific gravity by disturbing. (3) If high sensitivity clay is frozen, its sensitivity ratio becomes nearly 1 and is not sensitive. (4) The more lime adds to clay, the less strength of unfrozen clay becomes. However, these effect almost disappear, if such a clay is frozen.

Keywords : frozen clay, compressive strength, modulus of deformation, disturbing, undisturbing

1. ま え が き

凍土の工学的研究(低温土質工学)がまだ緒についたばかりであることは、第一著者が繰り返して述べてきたとおりであり、低温土質工学上、残された未解明の問題は多いように思われる。本研究においては、凍土試料の攪乱・不攪乱の影響を取り上げることとする。この問題も、凍土の力学的特性に関する基礎研究課題としては残された重要な研究課題の1つであると考えられる。

未凍土(常温の土)の場合、試料が攪乱されているか否かは、重要な条件の1つとなるから、凍土の場合も、当然無視できないであろうことは、容易に推測される。この問題に関する研究も、不凍水の研究と同じようにきわめて少ない。これは、土質工学会の「凍土の力学特性に関する研究委員会」が、1984年1月から1985年4月までに行った文献調査の結果からも明らかである¹⁾。

本研究では、カオリン粘土を用いて、また石膏を添加

したカオリンにより人工的に不攪乱試料を作製し、攪乱した試料との力学的特性について、一軸圧縮強度試験結果により比較検討した。力学的特性としては、主としては、圧縮強度と変形係数を取り上げた。また、未凍土についても実験を行い、凍土の場合と比較検討を行った。その結果、凍土の場合には未凍土と異なり、攪乱の影響はほとんどなく、圧縮強度、変形係数とも、不攪乱試料より増加する傾向がみられた。

なお、現場から採取した自然状態の不攪乱試料についても、現在実験を行っており、人工不攪乱試料との比較を含めて次の機会に報告する予定である。凍土についてのこのような実験は、おそらく初めて行われたものであり、著者らの知る限りにおいて既往の研究も、非常に少ない²⁾。このような基礎研究の結果は、凍結工法や低温地下タンクなどの問題解決に役立ち得ると考えられる。

2. 実験概要

(1) 実験装置

圧縮強度は、一軸圧縮強度試験により行われた。一軸圧縮強度試験装置は、既設のアムスラー試験機を断熱材で被覆された供試体収納器により、供試体試験部分の装置を覆い、液体窒素を供給することにより、供試体を一定温度状態で試験することを可能にする。その他、温度

* 正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市天神町1-5-1)

** 学生会員 群馬大学大学院工学研究科建設工学専攻
(現・群馬県庁)(同上)

*** 正会員 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科(同上)

**** 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(同上)

制御装置、荷重・変位増幅および自動記録、液体窒素貯蔵器からなる。30 l 容量の液体窒素貯蔵器は、液体窒素くみ上げポンプにより、自動的に保冷配管を通して、供試体内に液体窒素を供給し、試験中一定温度となる役割を果たす。荷重は荷重増幅器に、変位計は変位増幅器に接続され、自動監視および記録計（ハイブリッドグラファー、Hybrid Grapher）により記録される。この装置により、応力-ひずみ曲線のグラフが、それぞれの温度に対して自動記録される。これが本実験装置の特徴の1つとなっている。

(2) 供試体の作製と実験方法

攪乱・不攪乱の影響差異を調べるためには、不攪乱試料として、自然地盤から不攪乱試料を採取する方法がとられなければならないが、同一条件での試験を何回も行う関係上、費用等の問題もあり、本研究においては、三笠らの模型実験の方法にならない石膏を加えた人工不攪乱試料が用いられた³⁾。

粘性土としては、土粒子比重 2.69 のカオリンを使用した。その粒度分布は、参考文献 4) に用いられたものと同じである。

a) 未凍土供試体 粉末状のカオリンを蒸留水と混合し、ペースト状にした後、圧密槽で圧密作製される。カオリンのみでは鋭敏比が小さいので、石膏 2% と 5% を添加した試料も用いられた。このようにして作製された試料を JIS に準じて一軸圧縮試験を行った。

b) 凍土試料 未凍土供試体の場合と同様にして作製された供試体を鋼製のモールドに入れ、フリーザー内で -30°C に凍結させた後、上記のような試験装置により、一軸圧縮強度試験を実施した。荷重速度は応力制御とし、200~300 kPa/s とした。

これらの供試体を用いて、それぞれの配合、条件について、おのおの 6 個ずつの実験を行った。

3. 実験結果

(1) 未凍土供試体の圧縮強度

未凍土供試体の圧縮強度を表-1 に示す。その応力-ひずみ曲線は図-1 のようになる。ここで、応力にピークがない場合は、一軸圧縮強度としてひずみ 10% のときの応力 σ_{10} を採用している。これは、未凍土の場合、ひずみが 15% のときの応力 σ_{15} を用いるのが一般的であるが、凍土の場合には、 σ_{10} を用いるのが一般的になっているので⁵⁾、凍土と比較する関係上、凍土に合わせた方がよいと考えて、 σ_{10} を用いたのである。したがって未凍土の場合表-1 と図-4 の σ は不攪乱の場合はピーク値を、攪乱の場合は σ_{10} を示す。

表-1 の最確値 σ は、6 回の実験値の平均値であり、その信頼区間は次式で算定される。

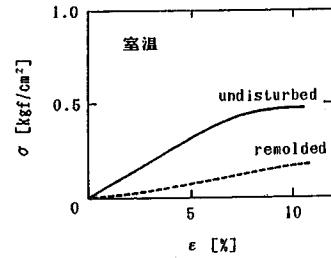


図-1 カオリンの人工地盤から作製した供試体の応力-ひずみ曲線

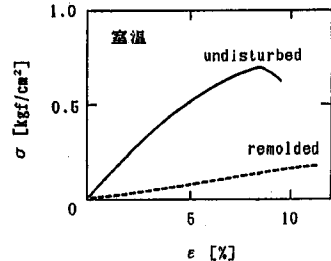


図-2 2%の石膏を添加した人工地盤から作製した供試体の応力-ひずみ曲線

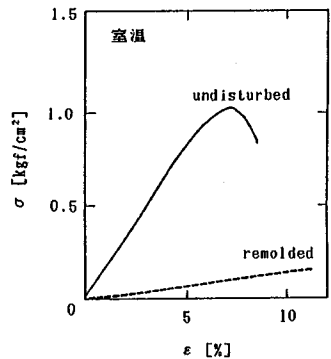


図-3 5%の石膏を添加した人工地盤から作製した供試体の応力-ひずみ曲線

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \sqrt{F_{1,n-1} \left(\frac{S^2}{n} \right)} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$$S^2 = \frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}$$

$n=6, \quad F_{1,5;0.05}=6.61$

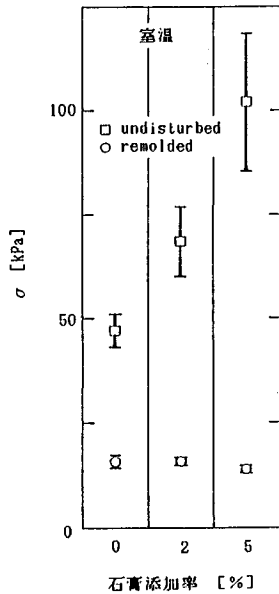
次に、カオリンのみでは、鋭敏比が 2.9 と小さいので、石膏を 2% 添加した場合と 5% 添加した場合について実験を行った。表-1 から明らかなように、石膏を添加すると、鋭敏比はそれぞれ 4.3 および 7.4 へと大幅に増加している。石膏を添加した試料の応力-ひずみ曲線を図-2、図-3 に示す。図-1~3 から不攪乱の場合、石

表一 未凍結供試体の強度

土質	状態	ω [%]	G_s	σ [kPa]	95%信頼区間	縦横比
カオリン	不攪乱	38.68	1.300	46.8	± 3.8	2.9
	繰返し	35.52	1.37	16.0	± 1.3	
石膏2%添加	不攪乱	37.13	1.282	68.3	± 6.5	4.3
	繰返し	36.34	1.35	15.8	± 0.8	
石膏5%添加	不攪乱	38.36	1.280	101.9	± 16.8	7.4
	繰返し	37.58	1.32	13.8	± 0.6	

表二 凍土供試体の強度

土質	状態	ω [%]	G_s	σ [MPa]	95%信頼区間
カオリン	不攪乱	38.75	1.269	11.4	± 0.2
	繰返し	35.64	1.294	12.1	± 0.8
石膏2%添加	不攪乱	37.48	1.268	12.0	± 0.1
	繰返し	36.53	1.275	12.3	± 0.4
石膏5%添加	不攪乱	38.65	1.251	12.7	± 0.1
	繰返し	37.47	1.282	12.8	± 0.2



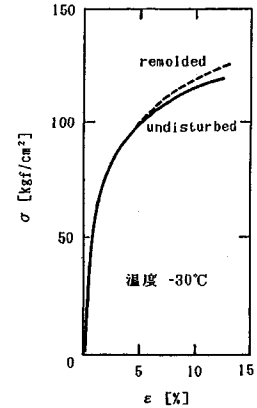
図一四 未凍結供試体の強度

膏を添加した方が、また添加率が多くなるほど、応力-ひずみ曲線のピークが明瞭になっていることがわかる。これら、石膏添加率の相違による未凍土の圧縮強度の差異を示すと、図一四のようになる。

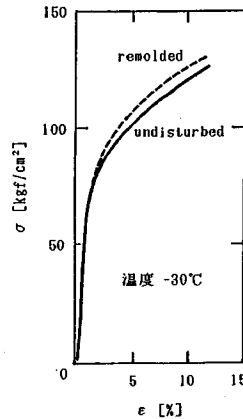
これらの結果から、未凍土の場合は攪乱されると、強度は著しく低下することがわかる。その低下の度合は、石膏添加率が増加するほど著しい。

(2) 凍土供試体の圧縮強度

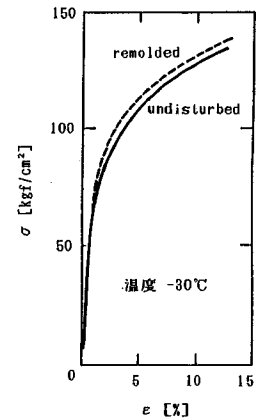
凍土供試体の圧縮強度試験結果を表二に示す。また、その応力-ひずみ曲線は、図一五、図一六および図一七のようになる。これらの結果によると、凍土の場合は攪乱の影響はほとんどみられず、むしろ攪乱試料の方が、不攪乱試料より圧縮強度の値がやや大きめになっていることがわかる。



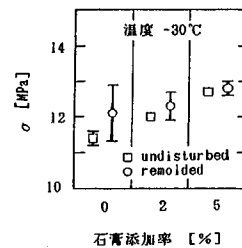
図一五 カオリンの人工地盤から作製した凍土供試体の応力-ひずみ曲線



図一六 2%の石膏を添加した人工地盤から作製した凍土供試体の応力-ひずみ曲線



図一七 5%の石膏を添加した人工地盤から作製した凍土供試体の応力-ひずみ曲線

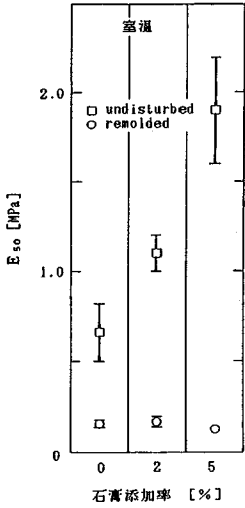


図一八 凍土供試体の強度

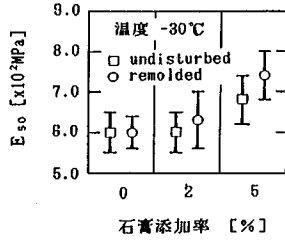
次に、石膏添加率と圧縮強度との関係を示すと図一八のようになる。各石膏添加率の相違による強度の差異がほとんどみられないこともわかる。

(3) 変形係数

凍土の変形係数と一軸圧縮強度との間には、正比例的な関係があるという実験結果が報告されている⁶⁾⁻⁸⁾。こ



図—9 未凍結供試体の変形係数



図—10 凍土供試体の変形係数

ここに変形係数としては、粘性土に対する変形係数として一般に用いられている E_{50} を用いる。ここに、 E_{50} とは次式で定義される⁹⁾。

$$E_{50} = \frac{\sigma_{10}/2}{(\text{応力が } \sigma_{10}/2 \text{ のときのひずみ})} \dots \dots \dots (2)$$

したがって、変形係数に及ぼす影響については、圧縮強度と同じようなことがいえるのではないかと予測される。未凍土供試体の変形係数については、表—6 に示すような値となる。攪乱すると、不攪乱の場合より著しく減少することがわかる。図—9 は、石膏添加率と変形係数との関係を示す。図—9 によると、石膏添加率が増加すると、不攪乱土の変形係数は、著しく増加するが、攪乱土は、石膏添加率に無関係にほぼ一定となり、むしろやや低下する傾向を示している。

表—7 は、凍土供試体の変形係数の値を示す。変形係数の場合も、圧縮強度と同じように、攪乱の影響はほとんどみられず、逆にやや増加する傾向を示す。この関係を石膏添加率と変形係数との関係で図示すると、図—10 のようになる。圧縮強度の場合と同じように、石膏添加率の相違による変形係数の増加はほとんどみられず、添加率 5% においてやや増加しているに過ぎない。

4. 分散分析による検討

以上の実験結果について、分散分析による検討を加える。分散分析の方法は、参考文献 4) による方法と同様の手法による^{10), 11)}。

前述の実験結果によって明らかのように、凍土供試体と未凍土供試体では攪乱の影響が全く異なる。未凍土の状態のとき、攪乱の影響に鋭敏な地盤から作製された供

表—3 カオリンの人工地盤から作製した凍土供試体の強度の分散分析表

要因	自由度	2乗和	平均2乗	F検定
平均	1	1 852.05	1 852.05	5.8(10 ³)
繰返し	1	1.33	1.33	4.87
誤差	10	2.85	0.285	
合計	12	1 656.23		

$F_{1, 10; 0.05} = 10.04$ $F_{1, 10; 0.05} = 4.96$

表—4 2%の石膏を添加した人工地盤から作製した凍土供試体の強度の分散分析表

要因	自由度	2乗和	平均2乗	F検定
平均	1	1 771.47	1 771.47	2.1(10 ⁴)
繰返し	1	0.40	0.40	4.82
誤差	10	0.83	0.083	
合計	12	1 772.70		

$F_{1, 10; 0.05} = 10.04$ $F_{1, 10; 0.05} = 4.96$

表—5 5%の石膏を添加した人工地盤から作製した凍土供試体の強度の分散分析表

要因	自由度	2乗和	平均2乗	F検定
平均	1	1 945.65	1 945.65	7.5(10 ⁴)
繰返し	1	0.003	0.003	0.1
誤差	10	0.26	0.026	
合計	12	1 945.91		

$F_{1, 10; 0.05} = 10.04$ $F_{1, 10; 0.05} = 4.96$

表—6 未凍結供試体の変形係数

土質	状態	E_{50} [kPa]	95%信頼区間
カオリン	不攪乱	6.8(10 ²)	$\pm 1.6(10^2)$
	繰返し	1.6(10 ²)	$\pm 0.2(10^2)$
石膏 2% 添加	不攪乱	1.1(10 ³)	$\pm 0.1(10^3)$
	繰返し	1.7(10 ²)	$\pm 0.3(10^2)$
石膏 5% 添加	不攪乱	1.9(10 ³)	$\pm 0.3(10^3)$
	繰返し	1.3(10 ²)	$\pm 0.1(10^2)$

表—7 凍土供試体の変形係数

土質	状態	E_{50} [x10 ² MPa]	95%信頼区間
カオリン	不攪乱	6.0	± 0.5
	繰返し	6.0	± 0.4
石膏 2% 添加	不攪乱	6.0	± 0.5
	繰返し	6.3	± 0.7
石膏 5% 添加	不攪乱	6.8	± 0.6
	繰返し	7.4	± 0.6

試体であっても、凍結させてしまうと、鋭敏でなくなってしまう。石膏 5% 添加の鋭敏比 7.4 の未凍土が、-30°C の凍土になると、不攪乱土、攪乱土ともほとんど変わらぬ圧縮強度を示している。凍土においても鋭敏比という概念が、未凍土と同じように用いられるとするならば、この場合、鋭敏比が 1 であるといえよう。

そこで、いま「凍土供試体については、不攪乱の影響はない」という帰無仮説をたて、一元配置法による分散分析によって検証してみる⁴⁾。その結果は、表—3、表—4 および表—5 のようになる。表—3 がカオリン 100% の場合、表—4 および表—5 は、石膏添加率がそれぞれ 2% および 5% の場合を示している。いずれの場合も、有意水準 (危険率) 5% で、上記の仮説は正しいこ

とが検証される。すなわち、カオリン粘土が凍結されると、不攪乱の影響は、実験誤差範囲に含まれる程度になってしまうといえることになる。

5. 考 察

このような実験結果と分散分析の結果をふまえて、考察を試みる。

分散分析の結果によると、カオリン粘土は凍結すると、攪乱の影響はなく、その影響は実験誤差範囲内に入ってしまうことになる。しかし、表—2および図—5, 6, 7, 8をみると、攪乱されたカオリン凍土は、不攪乱試料より圧縮強度がやや大きくなっている傾向がみられる。これは、どのように説明したらよいであろうか。この原因としては、次の2つが考えられる。

- ① 攪乱、練返しにより土粒子の配列が変化し、凍結によりさらに土粒子間の緊結、付着効果のごときプラスの要因が作用する。
- ② 攪乱、練返しにより、含水比 w が減少し、締固め効果により、乾燥比重 G_s が増加し、これが強度に直接影響を与える。

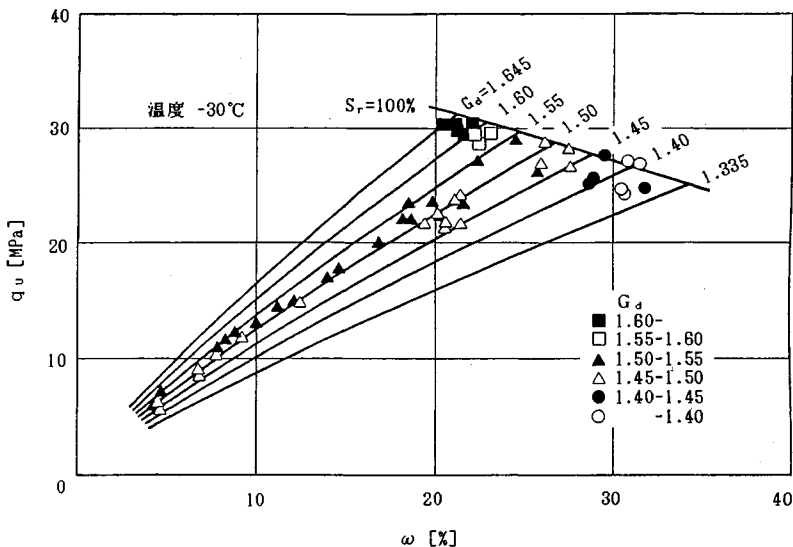
これ以外にも種々の要因が考えられるが、まず上記の理由について議論を進める。

①の要因については、まさしく粘性土の物理化学的考察が必要とされる。未凍土の場合も、一度攪乱された粘性土が、時間の経過とともに、攪乱による強度低下を回復することは、一般に認められている。いわゆるシキソトロピーといわれている現象である¹²⁾。本研究の場合、時間による強度回復は無視できる程度の短時間で実験が行われており、また、各供試体とも同じような試験条件

である。したがって、たとえ若干のシキソトロピー効果による強度増加の影響があったとしても、ほとんど問題はないものとみられる。ただ、凍土供試体の方が、再凍結等により時間効果が長くなるので、時間による強度回復も、未凍土よりも大きくなると考えられる。いずれにせよ、このような物理化学的的要因は、定量的評価が困難である。

これに反し、②の要因の方は、①に比べると、若干定量的評価が可能となる。まず表—2を再び吟味してみると、攪乱により含水比 w は、いずれの配合の場合も減少しており、反対に、乾燥比重 G_s は増加している。この結果が強度増加に関係があるとするれば、説明がつきそうである。この現象は、攪乱、練返しにより、攪乱供試体が作製される時、試料がモールドに充填される際に生ずる物理的な変化により発生するとみてよい。

この現象は、実験により直接確認できるが^{13), 14)}、豊浦砂について著者らが得た強度-含水比の関係図(図—11)を吟味してみる¹⁵⁾。土質が砂と粘土の相違はあるが、この図から粘性土の場合を類推してみる。いま、試料をモールドに充填する際、含水比は減少し、乾燥比重が増加するという変化について考えてみる。この際、粘土の供試体はほとんど飽和しているとみなせるので、含水比 w の減少、乾燥比重 G_s の増加という現象は、図—11の $S_r=100\%$ 線上を進むとみてよいであろう。とすると、 G_s の増大に伴い圧縮強度 q_u も増加する。このように推論していくと、②の原因は、かなり明確に説明可能なように考えられる。著者は、現在砂質土に続き、粘性土(関東ローム)について、含水比、乾燥密度および飽和度が凍土の圧縮強度に及ぼす影響について、引続



図—11 豊浦砂の強度-含水比図における等乾燥比重線

き研究を行っており、近く報告する予定である。その結果では、粘性土についても、同じような傾向がみられることが明らかにされた。すなわち、 $S_r=100\%$ の線は、砂質土と同じく左上り(すなわち右下り)になっており、その勾配が粘性土になるほど、一層ゆるやかになる点が異なるのみである。

以上の考察によると、①の要因の影響があるにせよ、②の要因が支配的であると推定してよさそうである。

次に、変形係数について、攪乱の影響を考察してみる。変形係数と強度とは、前述のように、正比例的関係にあることが一般に認められている。したがって、攪乱の影響も圧縮強度と同様になることが、容易に推測される。

しかしながら、表-2と表-7および図-8と図-10を比較すると、石膏を添加しない場合、変形係数の値は攪乱、不攪乱とも全く同じ値(6.0×10^2 MPa)を示し、攪乱の影響が全くないように見えるが、圧縮強度は攪乱により若干増加している。逆に、石膏を添加しても、強度はほとんど増加しないが、変形係数の方は、石膏の添加率が増えるほど、増加することが明らかに読み取れる。このような石膏添加率の影響が、圧縮強度と変形係数に与える影響の相違については、変形係数と圧縮強度が正比例的関係にあるという通説と異なるのか否か、さらに、実験を積み重ねる必要があると考えられる。

6. 結 論

凍土を攪乱した場合、その圧縮強度と変形係数にどのような影響を与えるか、人工不攪乱試料を用いて実験を行った。既往の研究がほとんどない初めての実験研究であるので、軽々に結論しかねる点もあるが、本研究の範囲内では、次のようなことがいえると思われる。

(1) 粘土凍土の圧縮強度と変形係数は、試料を攪乱することにより、やや増加する傾向を示す。

(2) この主たる原因は、試料の攪乱、練返しによる含水比の減少、乾燥比重の増加による。

(3) 凍結しない状態で鋭敏比の高い粘土を凍結させると、鋭敏でなくなってしまう。凍土の場合も未凍土と同じような鋭敏比という定義が用いられるとするならば、粘土凍土の鋭敏比は1となる。

(4) 粘土は、未凍結の場合、攪乱により著しく強度が低下する。その低下の割合は、石膏添加率が増加する

ほど著しくなる。しかし、凍結するとこのような影響はほとんどみられない。

(5) 粘土凍土の変形係数も、攪乱により圧縮強度と同じような影響を受けるが、やや異なった傾向もみられる。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：凍土の力学特性に関する委員会、土の凍結に関するシンポジウム論文集、凍土の一軸圧縮強度に係わる供試体作製の現状と問題点、pp.9-18, 1986.
- 2) 山本英夫・生頼孝博・岡本 純：攪乱・不攪乱凍土の一軸圧縮特性に関する比較実験、土木学会第39回年次学術講演会Ⅲ, pp.691-692, 1984.
- 3) 三笠正人・高田直俊・望月秋利：遠心力を利用した土構造物の模型実験、土と基礎、Vol.28, No.5, pp.15-23, 1980.
- 4) 榎戸源則・亀田淳二：混合法による不凍水量測定法の評価、土木学会論文集(投稿中)
- 5) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純：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, 1981年11月.
- 6) 片岡哲之・緒方信英・安田正幸：LNG地下タンク周辺地盤の温度低下における強度変形特性、電力中央研究所報告、No.378011, 1978.
- 7) 昭和51年度LNG地下式貯槽に関する保安調査報告書、(社)日本瓦斯協会、pp.9-32, 1977.
- 8) 後藤 茂・了戒公利・中沢 亨：室内凍結砂の力学特性、第14回土質工学研究発表会、pp.497-500, 1979.
- 9) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純：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, 1980年10月.
- 10) 石井恵一・堀 素夫(共訳)：工科系のための統計概論、I. ガットマン/S.S. ウイルクス、培風館、1987.
- 11) 田口玄一・横山異子：実験計画法、日本規格協会、1987.
- 12) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. (山内豊聡・竹中肇・東山 勇・前田 隆共訳)：新編土質工学の基礎、鹿島出版会、pp.45-46, 1978.
- 13) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：砂凍土の一軸圧縮強度に及ぼす締固めの影響、土木学会第34回年次学術講演会、pp.235-236, 1979.
- 14) 土質工学会：土の凍結—その制御と応用—、pp.65-66, 1982.
- 15) Enokido, M. and Kameta, J. : Influence of water content on compressive strength of frozen sands, Soils and Foundations, Vol.27, No.4, pp.148-152, 1987. (1988.3.8・受付)