

砂凍土の一軸圧縮強さに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF UNIAXIAL COMPRESSIVE
STRENGTH OF FROZEN SAND

高志 勤*・生頼孝博**・山本英夫***・岡本 純****

By Tsutomu TAKASHI, Takahiro OHRAI, Hideo YAMAMOTO
and Jun OKAMOTO

1. 緒 言

わが国における地盤凍結工法は、1962年の初施工以来17年間に200件を超える実施をみている。特に近年は凍土のもつ優れた遮水性・耐力性に加えて施工技術の発達とこの工法の特徴の1つである低公害性があいまって需要が増加しつつある。しかしながら、この工法にもいくつかの問題点がある。これまでに凍上と解凍に伴う沈下、凍結膨張圧、地下水流の影響、凍結領域の制御、凍結管理設精度、凍土壁の耐力強度などの問題点はある程度の定量的把握や対策が可能となりつつあるが、大規模工事や地下50mに及ぶ工事への利用増加に伴って、これらの問題点のいくつかは、さらに厳しい観点から再検討が要求されるようになってきた。本論文は、これらの問題点の1つである凍土壁の耐力強度問題へのアプローチの第1段階として、標準砂を用いた凍土の一軸圧縮試験を行い砂凍土の一軸圧縮強さのみに範囲を限定し、これに関係するいくつかの因子の影響を既往の研究よりさらに詳細にかつ組織的に実験を行った結果を報告し若干の考察を加えたものである。

アメリカ、カナダ、ソ連などの低温地域をもつ先進国では凍土の力学的研究は歴史も古く数多くあり、わが国での凍結工法の設計に際してもTsytoichらの研究結果¹⁾がしばしば用いられる。また、外国では永久凍土地域の自然凍土を対象に研究されることが多く、そのためVialovの研究²⁾に代表されるようにクリープ現象を主としたものも多い。一方、わが国では1957年に真井による研究³⁾はあるものの、その後は凍土の力学的研究は少なく、近年凍結工法の需要増加に加えてLNG地下

貯蔵タンクの建設により人工凍土の力学的特性の解明が急がれるようになってきたのが実情である⁴⁾。自然凍土と人工凍土では凍結条件の違いなどによって力学的特性が異なることも考えられ、また耐力壁として利用する人工凍土では温度の高い0°C付近の凍土強度も重要となることなどが本研究を始める動機となった。

砂凍土の一軸圧縮強さに影響を与える要因として次のものが考えられる。

- (A) 凍土の内因的にもっている要因——土の粒度分布、比表面積、土粒子配列、乾燥密度、含水(不凍水)・含氷比、間隙水の化学的性質など。
- (B) 試験条件によって変化する要因——温度、凍結速度および方向性、凍結後の温度履歴あるいは養生期間、圧縮速度、供試体の形状および寸法、供試体端面拘束状態など。

これらの要因のすべての組合せの影響を実験的に調べることは作業量が膨大となり非常に困難である。そこで、本研究では一軸圧縮強さの、①温度依存性、②ひずみ速度依存性、③凍結速度および方向依存性、④含氷比および乾燥密度依存性、⑤変形係数 E_s との関係について一定条件のもとでの実験を行い、また海岸近くでの施工を考慮して、⑥含有塩分の影響、さらに試験法に関連して、⑦供試体寸法の影響についても実験を行った。本論文では、一軸圧縮強さ q_u は荷重～変位曲線から最大荷重を読み取り、これを圧縮前の供試体断面積で割った値を用いた。なお、本論文の実験データの一部はすでに発表済み^{5)~7)}であり、粘性土凍土を用いたほぼ同じ実験も進行中で、本論文との比較も加えて次の機会に報告したい。

2. 実験方法と供試体の作製

用いた一軸圧縮試験機は0.06~40mm/minの間で一定ひずみ速度が得られ、最大載荷荷重は10tで駆動部

* 正会員 理博 (株)精研

** 正会員 (株)精研 技術研究所

*** 正会員 (株)精研 技術研究所

**** 理修 (株)精研 技術研究所

分にはヒーターを取りつけ -30°C までの低温条件下での使用が可能である。これを -30°C まで下げることができる低温室内に設置し、さらに供試体圧縮部分を恒温箱で覆うことによって設定温度に対して $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の精度で温度が制御できる。供試体と接する載荷部は 30 mm 厚みのアクリル板を用いて動力部からの伝導熱の影響を少なくした。圧縮試験は昇華を防止するためビニール袋で密封した供試体を設定温度で一昼夜以上養生した後に行い、試験中の載荷荷重および変位は X-Y レコーダーで自記記録した。

用いた試料土は豊浦標準砂で、図-1 に粒度分布を示す。供試体の形状は円柱形とし、寸法は標準を $5\text{ cm}^{\phi} \times 10\text{ cm}^H$ とした。供試体は原則的には底蓋のついたアクリルシリンダーの中に水と砂

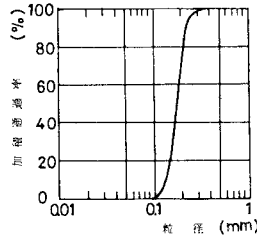


図-1 豊浦標準砂粒度分布

を少量ずつ入れ、突き固めと振動を与えながら充填したものを約 -20°C の低温槽で凍結することによって作製した。供試体の整形は凍結後にシリンダーから押し抜いたものの両端面をマイターボックスを用いて平らにし、凍結方向依存性を調べる実験用供試体以外は特に側面の整形は行わなかった。

供試体の作製で上述の原則と異なる方法で作ったものを以下に説明する。

① 凍結速度依存性を調べる実験用供試体は試料を収納したシリンダーを吊り下げ装置を用いて約 -15°C のブライン槽の中に上から下に一定速度で沈めることによって1次元的に凍結⁹⁾させたものを用いた。沈下速度に同調してほぼ定常的に凍結面が進行することおよび砂の場合は凍結膨張が生じないことから沈下速度を凍結速度とした。最初シリンダーの底面がブライン液面に接した直後は凍結が急速に進行するのでその部分(約 3 cm)は取り除いた。なお、開放型凍上試験機を用いて冷却板温度をプログラムコントロールすることによって1次元定速度凍結⁹⁾させた供試体も4個作製し、この場合の供試体寸法は $6\text{ cm}^{\phi} \times 7\text{ cm}^H$ であった。

② 凍結方向依存性を調べる実験用供試体は 10 cm^{ϕ} のアクリルシリンダーを用いて上記①と同じ方法で1次元凍結をさせたものから $5\text{ cm} \times 8.5\text{ cm}^H$ の円柱形供試体を種々の角度に切り出したものを用いた。

③ 含水比および乾燥密度依存性を調べる実験用供試体は不飽和の場合には所定の含水比になるように計量した乾燥砂と水を練り合わせて作製し、飽和の場合には十分な突き固めと振動を与えながら締固めたものと突き固めと振動をほとんど与えないものとの2種類作製した。

④ 含有塩分の影響を調べる実験用供試体は乾燥砂と所定濃度の塩水溶液 (NaCl および CaCl_2) を突き固めと振動を与えながら充填して作製した。

3. 実験結果と考察

(1) 一軸圧縮強さの温度依存性

凍土の強度に最も大きな影響を与える因子は温度である。図-2 は一軸圧縮強さ q_u と温度 θ との関係を示すために締固め条件の異なった3種類の供試体の実験結果を示したものである。平均乾燥密度 $\bar{\gamma}_d$ は密充填の場合 1.655 g/cm^3 、疎充填の場合 1.514 g/cm^3 で比較的良好であったが、中充填の場合の供試体の乾燥密度は製作方法の不安定さのために上記の値の間で大きくばらついていた。 q_u の値にもばらつきはみられるが3種類のデータはともに 0°C から -3°C 付近までは温度の低下とともに q_u が急激に増加し、その後の増加は緩慢である。 q_u の平均的な値としては -5°C で 110 kg/cm^2 、 -10°C で 150 kg/cm^2 、 -20°C で 200 kg/cm^2 となっている。3種類のデータを比較してみると、締固めの程度が密な供試体の方が -5°C 付近までの q_u の増加の割合が大きいがその後は温度の低下による q_u の増加の割合はそれほど変わらずほとんど同じ勾配となっている。また3種類のデータはともに温度が 0°C に近づくにつれて q_u も 0 に収れんする傾向がうかがえる。図-3 は q_u の温度依存性を既往の研究の結果と比較したもので、実線は今回の実験結果で図-2の実線と同じである。点線で示した Kaplar¹⁰⁾、Tsytoich¹¹⁾、井上¹²⁾の研究結果と q_u 増加の割合はよく一致していることがわかる。特に Kaplar の結果は 0°C 付近で q_u が急激に低下する傾向は今回の実験と一致している。 q_u の値の相違は供試体の内因的要因や試験条件の違いによるものと考え

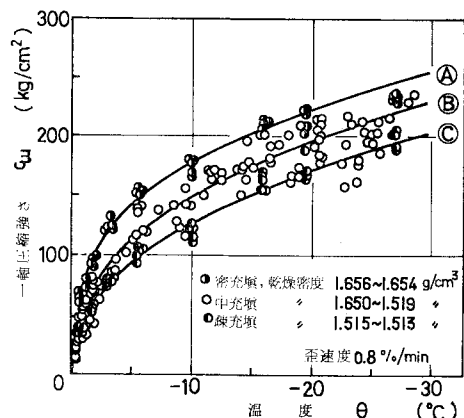
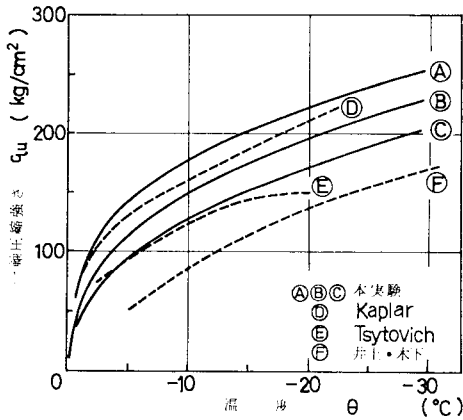


図-2 一軸圧縮強さと温度の関係

表一 既往の研究との条件の比較

	ひずみ速度または載荷速度	含水比	乾燥密度	粒径の比較
④, ⑤, ⑥ 今回の実験	約 0.8%/min (10~55 kg/cm ² /min)	20~26% (飽和)	1.5 ~1.65 g/cm ³	やや細かい 分布が広範囲
④ Kaplar	28 kg/cm ² /min	*約 39%	*1.53~1.57 g/cm ³	
⑤ Tsytovich	15~20 kg/cm ² /min	16~17%		
⑥ 井上・木下	3%/min	*20~30% (飽和)		

* 印の値はグラフから読み取った値またはそれから計算したものである。



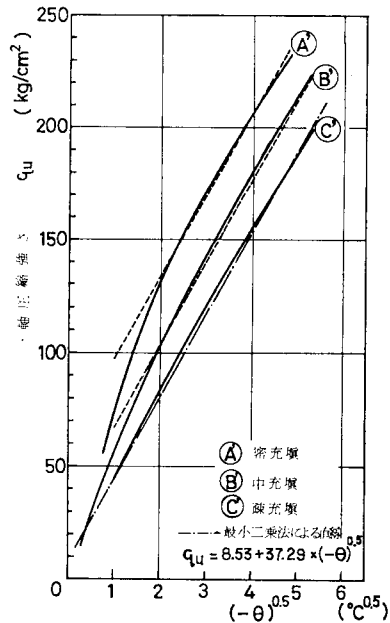
図三 q_u の温度依存性 (既往の研究との比較)

られる。比較のため表一に各文献から引き出せる範囲内でこれらの諸条件を示す。Kaplar の実験は粒径がやや細かいため含水比は大きいのが載荷速度、乾燥密度が今回の実験の範囲内にあり、 q_u の値も今回の実験の範囲内にあることとよい対応を示している。Tsytovich の q_u の値がやや下回っているのは載荷速度が遅いためであろうと推察でき、ひずみ速度が大きいかかわらず井上らの q_u の値が大きく下回っているのは粒度分布の幅が大きく、不凍水をまわりにも細粒成分の影響と思われる。

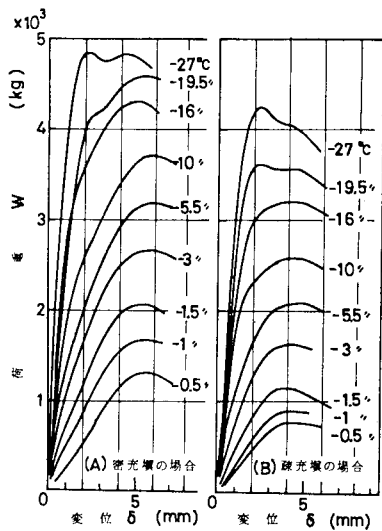
さて、Tsytovich らは q_u の温度 θ (°C) 依存性を示すものとして次の実験式¹¹⁾をあげている。

$$q_u = a + b(-\theta)^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 a, b, n は定数である。 n の値はソ連科学アカデミーの研究では 0.5 に近いことが示されている¹¹⁾。図一四は今回の実験結果と $n=0.5$ とした式(1)との比較を試みたもので、図一四の3本の実線を縦軸に q_u 、横軸に $(-\theta)^{0.5}$ をとって書き換えたものである。図中の一点鎖線は疎充填の場合のデータから最小二乗法で求めた $a=8.53, b=37.29$ の場合の直線であり、図中の点線は一点鎖線を縦軸方向に平行移動させたものである。温度 θ が低い範囲では $n=0.5$ とした式(1)で近似できるが、 θ が高い範囲では近似がよくないことがわかる。供試体の締固め程度に着目してみると、疎充填のものの方が近似が良好であり、密充填のものに比べてより高い温度まで近似式が適用できることがわかる。なお、密充填のものは n の値をより小さくした方が式(1)と



図四 $q_u \sim (-\theta)^{0.5}$ 曲線



図五 荷重～変位曲線 (温度変化の例)

の近似が良好になる傾向がうかがえる。

図一五の荷重～変位曲線は図一四の密および疎充填に属する実験から代表的なものを選んだものである。-16°C より高い温度での形状はよく似て1つの曲線族を形

成しているが、 -19.5°C 以下の形状はやや異なりピークが2つ存在している。しかも前のピークと後のピークの大小関係は温度や供試体の締固め程度の違いによって異なっている。図-2における -20°C 以下の比較的大きなデータのばらつきや近似曲線を下回る q_u の値を示す原因もこの両ピークに起因するものと考えられる。凍土の力学的機構解明のためにも興味深い現象であるので今後の課題にしたい。なお、図-5の各曲線は同じ条件で各5回の試験を行ったものの代表を示したもので各回の再現性は良好であった。

(2) 一軸圧縮強さのひずみ速度依存性

一軸圧縮試験ではひずみ速度が大きな影響因子であることが知られている。図-6は一軸圧縮強さ q_u とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を調べるために行った締固め程度の異なる4種類の供試体と2種類の温度での実験結果を示したものである。密、疎充填の場合の乾燥密度はよくそろっていたが、中充填の場合は製作方法の不安定さのためかなりばらついており、そのため q_u の値にも大きなばらつきがみられた。図をみると、 $\dot{\epsilon}$ が1%/min付近より小さい範囲では $\dot{\epsilon}$ の増加に伴って q_u はかなり増加するが、1%/min付近より大きい範囲では q_u は増加しないでほぼ一定値となっている。そこで、ひずみ速度の小さい範囲のデータから q_u と $\dot{\epsilon}$ の関係を示す近似式として次式が考えられる。

$$q_u = c + d \log \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 c, d は定数である。図中の太線は温度 $\theta = -5.4^{\circ}\text{C}$ 、乾燥密度 $\gamma_d = 1.649 \text{ g/cm}^3$ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} \leq 1\%/ \text{min}$ の場合のデータから最小二乗法で求めたもので式(2)の $c=152.22, d=34.51$ の場合の直線である。供試体の締固め程度や温度の異なる場合でも細線で示した同じ勾配に載っていることから、式(2)の d は締固め程度および温度に依存しない定数であるといえる。次に

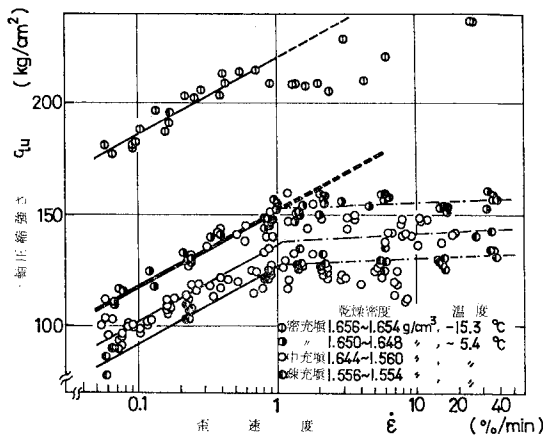


図-6 一軸圧縮強さとひずみ速度の関係

ひずみ速度の大きい範囲に関しては、著者らは本来小さい範囲と同様に図中の点線に沿って q_u が増加してゆくべきものがなんらかの影響で制限されているのではないかと考えている。もしそうならば荷重～変位曲線にその徴候が現れる可能性もある。そこで、慎重に製作条件をそろえた供試体をひずみ速度を変えて行った実験の荷重～変位曲線が図-7である。点線で示したようにひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の増加とともにピークが一定方向へずれてゆく傾向がうかがえるが、 $\dot{\epsilon}$ が2.2%/minより大きくなるとその傾向がくずれている。これは図-6で $\dot{\epsilon}$ が変化しても q_u はほぼ一定値となる領域と対応している。荷重～変位曲線におけるピークが $\dot{\epsilon}$ の変化に対応してどのように変化するかをみるために、縦軸にピークに達したときのひずみ ϵ (破壊ひずみ)横軸にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を対数でとったのが図-8である。データにかなりのばらつきはみられるが $\dot{\epsilon}$ の増加とともに ϵ は減少しており、特に $\dot{\epsilon}$ が5%/min付近からは ϵ が急激に減少し数%のひずみで明らかな破壊が生じていることがわかる。また、同じひずみ速度では締固め程度の密なものの方が破壊ひずみは大きくなっている。これらの原因はいまのところ不明であるが、凍土の力学的機構解明の足がかりになることが期待できる。

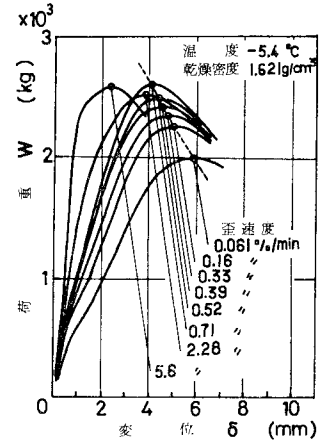


図-7 荷重～変位曲線(ひずみ速度変化の例1)

上に述べた、ひずみ速度依存性に関する実験結果は、 -5.4°C という特定の温度で得られたものであり、温度

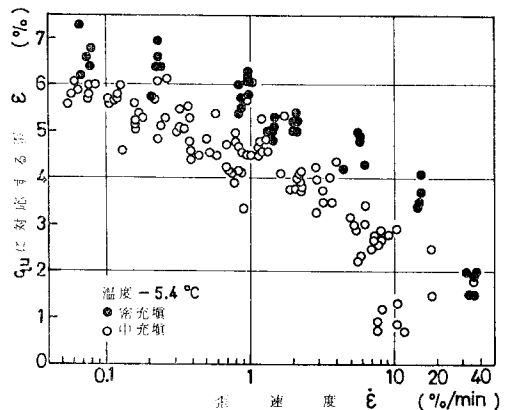


図-8 q_u に対応するひずみとひずみ速度の関係

に依存することも予想される。図-9は図-5に示す破壊荷重に2つのピークが現れる温度 $\theta = -27^\circ\text{C}$ でひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を変化させた場合の荷重～変位曲線を示したものである。 $\dot{\epsilon} = 0.8\%/min$ の場合を基準にしてみると、 $\dot{\epsilon}$ が非常に小さい $0.08\%/min$ のときは後のピーク付近のひずみでピークが

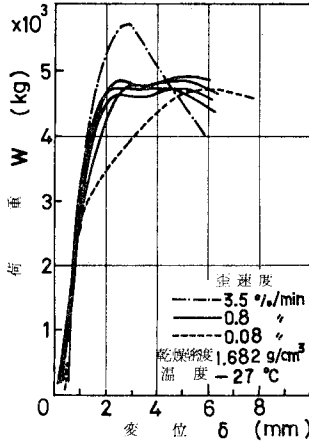


図-9 荷重～変位曲線 (ひずみ速度変化の例 2)

現れ q_u の値はほぼ一致する。一方、 $\dot{\epsilon}$ が大きい $3.5\%/min$ のときは前のピーク付近のひずみでピークが現れ q_u の値は増加している。このことは一軸圧縮強さ q_u のひずみ速度依存性は温度変化とともに破壊のモードも変化するために荷重～変位曲線を含めて研究を進める必要があることを示している。

(3) 一軸圧縮強さの凍結速度および方向依存性

粘性土を凍結するとアイスレンズとよばれる純氷層が析出し、この析出には凍結速度が大きく影響することが知られている。砂の凍結の場合はアイスレンズは生ぜず間隙水の凍結膨張分の水が凍結面から排出されるので土粒子間隔も変わらないとされている。したがって、砂凍土の一軸圧縮強さには凍結速度の影響は小さいことが予測できる。図-10は一軸圧縮強さ q_u と凍結速度 U の関係を調べた実験結果を示したものである。図中の白丸は 2.① で述べた吊り下げ装置を用いて作製した供試体によるデータで、完全な1次元定速度凍結が得られたものとはいいがたいが U の増加に対して q_u はほぼ一定値となっている。データにばらつきがみられるが、これは供試体の製作誤差に起因するものと考えられる。図中

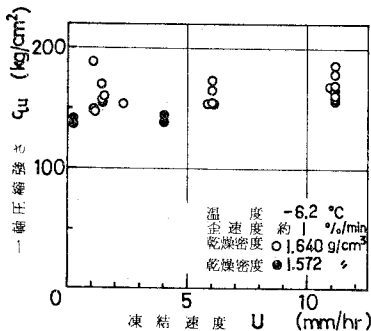


図-10 一軸圧縮強さと凍結速度の関係

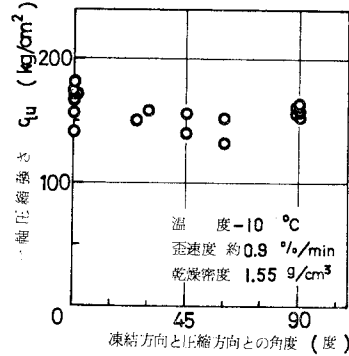


図-11 一軸圧縮強さと凍結方向の関係

の黒丸はほぼ完全な1次元定速度凍結が得られる開放型凍上試験機を利用して作製した供試体を用いたもので、 U が 0.2 mm/hr から 4 mm/hr に 20 倍増加しても q_u の値は 140 kg/cm^2 前後でほとんど変化していない。なお、これら 4 個の供試体は平均含水比 $w_i = 22.06\%$ 、平均乾燥密度 $\bar{\rho}_d = 1.572\text{ g/cm}^3$ 、平均水飽和度 $\bar{S}_r = 93.4\%$ で非常によくそろっていた。また、実験を行った凍結速度 U の範囲は一般的な地盤凍結工法に現れる凍結速度範囲をおおむねカバーしている。これらの結果から砂の場合には凍結速度による q_u の有意な差はないといえる。

図-10は凍結面の進行方向を圧縮の軸方向と一致させて実験を行ったものである。著者らは粘土凍土中のアイスレンズ自身は結晶方向がよくそろっていて、その一軸圧縮強さ q_u は圧縮方向によって大きく異なることを文献 8) で示した。砂凍土の場合にも同様の影響が現れ凍結方向と圧縮方向の違いが q_u に影響することが考えられる。図-11はこの影響を調べるために行った実験結果を示したものである。横軸には凍結方向を 0° として凍結方向と圧縮方向との角度をとり縦軸に q_u を示した。アイスレンズの場合と異なり凍結方向の違いによる有意な差はみられない。今回の数少ない実験の範囲内では 60° 付近で q_u の値は最低になっているようである。しかしながら、用いた豊浦標準砂の土粒子形状は球状ではなく締固めた場合にも構造異方性を示す¹³⁾ことから考えると、この程度の q_u の差を凍結方向の影響であるとはいいがたい。

(4) 一軸圧縮強さの含水比および乾燥密度依存性

凍土の強度を最大にする含水比 (不凍水を含む) が存在することが知られている^{11), 12)}。また、これまでに示した実験データのかなりのばらつきが供試体の締固め度の違いによることが考えられる。図-12は一軸圧縮強さ q_u と含水比 w_i の関係を調べた実験結果を示したものである。不飽和状態では含水比の増加とともに q_u は

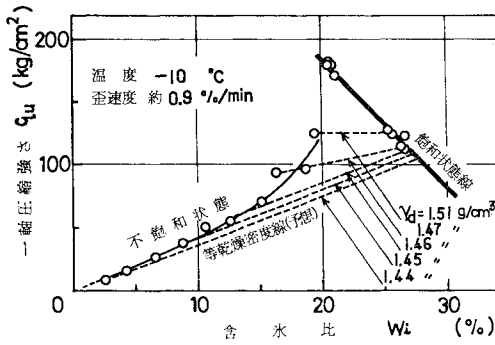


図-12 一軸圧縮強さと含水比の関係

加速度的に増加し、飽和状態では逆に q_u は直線的に減少している。飽和状態の場合の強さの低下は 3. (1) で述べた密充填の場合のデータから疎充填の場合のデータに移行することと一致する。この実験結果から q_u を最大にする含水比が存在し、締固めの程度が最も密でしかも飽和状態にあるときが最大の強度を示すといえるようである。

乾燥密度 r_d を一定にして広い範囲で含水比を変化させ、しかも均質な供試体を作製することは不可能であり、図-12 のデータも r_d はばらついている。そこで、不飽和供試体の r_d に等しい乾燥密度に相当する点を飽和状態線上に求め等乾燥密度線を予想したのが 図-12 の点線である。実際の等乾燥密度線が直線か曲線かはまったく不明であるが、今回の実験の範囲内では r_d の小さい場合ほど含水比の q_u に及ぼす影響は大きく、 r_d が同じならば完全飽和状態よりもやや不飽和の状態の方が q_u が大きくなる可能性もあることを示している。これに関しては実験をさらに進めているので別の機会に報告したい。

凍結工法はその大部分が地下水位以下で用いられ対象土は飽和状態にある。図-13 は 図-12 の飽和状態の例のデータを $r_d \sim w_i$ 図に示した例である。図中の実線は凍土の場合の含水比と乾燥密度との間の関係式から飽和度 100%, 氷比重 0.92,

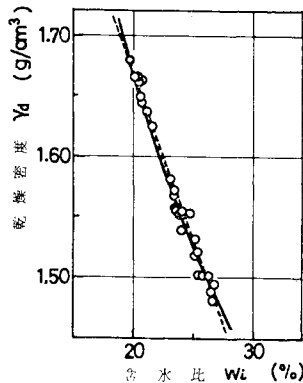


図-13 $r_d \sim w_i$ (飽和状態の場合)

および 図-6 のデータは締固め程度の異なる 3 種類の供試体の実験結果であるが、これらのデータのうち密充填、疎充填の 2 種類 (図中の半黒丸で示した) を選んで一軸圧縮強さ q_u と乾燥密度 r_d の関係で整理したものがそれぞれ 図-14 および 図-15 である。図-14 は q_u と r_d の関係が温度変化によって受ける影響を示したもので、図中に太線で示した $\theta = -6^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon} = 0.8\%/min$ のデータにみられるように q_u は r_d の増加に対してほぼ直線的に増加しているといえる。 r_d に対する q_u の増加の勾配は実線で示した -6°C より低い温度のデータではほぼ同じであるが、点線で示したように -6°C から 0°C に近づくにつれてその勾配は緩やかになっている。図-15 は q_u と r_d の関係がひずみ速度変化によって受ける影響を示したもので、この場合も q_u は r_d に対して直線的に増加しその勾配はひずみ速度が $16\%/min$ より小さい場合は 図-14 の太線とほぼ一致し、

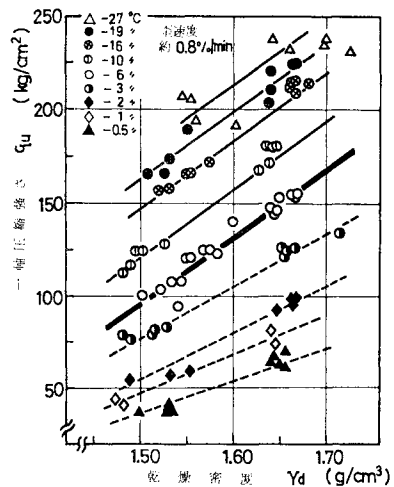


図-14 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係 (温度変化の場合)

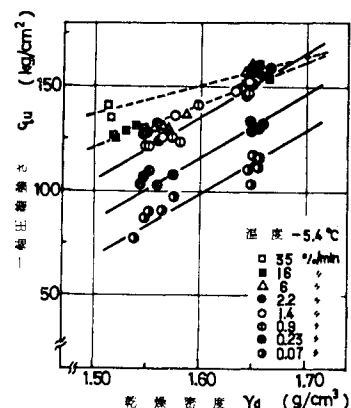


図-15 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係 (ひずみ速度変化の場合)

16%/min 以上の場合にはその勾配は緩やかになっている。これらのことから今回の実験の範囲内では一定の温度とひずみ速度条件のもとでは q_u と r_d は直線で近似できるといえる。もし、 q_u と r_d が真に直線関係にあるならば飽和状態での q_u と w_i は曲線関係になり、図-12の太線で示した飽和状態線は直線でないことになる。これに関してもさらに実験を進めているので別の機会に報告したい。また、このように一軸圧縮強さは内因的要因である含水比および乾燥密度によってもかなり影響を受けるので、攪乱試料で室内圧縮試験を行う場合は凍結対象地盤の締固め程度に応じた供試体を用いることが重要であろう。

(5) 一軸圧縮強さと変形係数の関係

一軸圧縮強さ q_u とともに工学的には変形係数 E が重要な値となる。図-5に示すように凍土の圧縮試験で

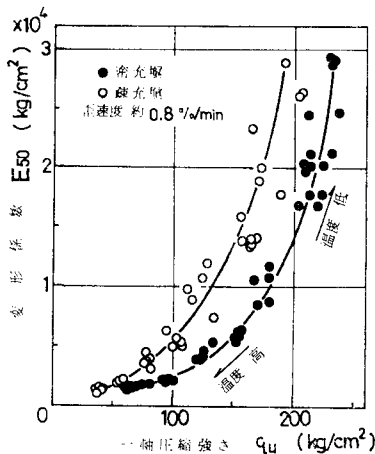


図-16 一軸圧縮強さと変形係数の関係 (温度変化の場合)

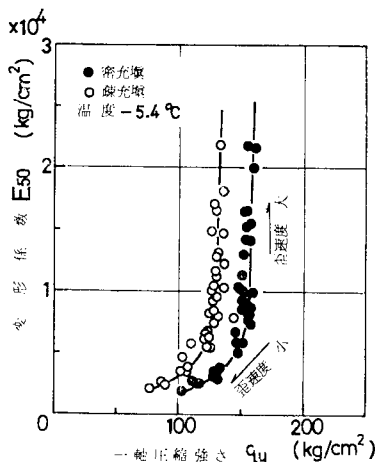


図-17 一軸圧縮強さと変形係数の関係 (ひずみ速度変化の場合)

は応力～ひずみ曲線が直線となる部分は少ない。本論文では一軸圧縮強さ q_u の 1/2 とこれに相当するひずみとの比率から求めた変形係数 E_{50} を用いる。凍土ではこの E_{50} と q_u 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^{4), 14), 15)}。図-16は、図-2の締固め程度の異なる2種類(密・疎充填)の供試体での実験データを $E_{50} \sim q_u$ の関係で整理したものである。 q_u の増加に対して E_{50} は加速度的に増加しており、正比例関係にあるとはいえない。図-17は図-6に示した密・疎充填の2種類の供試体によるひずみ速度依存性の実験データを同じ $E_{50} \sim q_u$ の関係で整理したものである。図-16の場合と同様に q_u の増加に対して E_{50} は加速度的に増加し、特に q_u の大きいところでの E_{50} の増加の割合は非常に急激となっている。この挙動は図-7でひずみ速度が1%/min以上に大きくなると q_u が増加しないで荷重～変位曲線の立上り部分の勾配が急になっていることと対応させると容易に理解できる。供試体の締固め程度に着目してみると、両図とも同じ E_{50} ならば密充填の方が q_u は大きく、同じ q_u ならば疎充填の方が E_{50} が大きいことを示している。図-16および図-17で q_u の値の小さい領域はそれぞれ温度の高い条件下およびひずみ速度の小さい条件下でのデータで

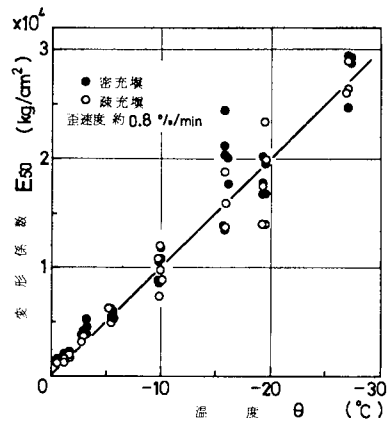


図-18 変形係数と温度の関係

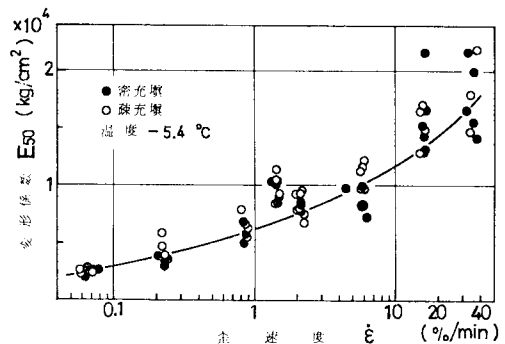


図-19 変形係数とひずみ速度の関係

あることから考えると、温度が低くひずみ速度が速い条件いかにると q_u が比較的大きい値を示す条件のもとでの実験データの場合には E_{50} と q_u はほぼ正比例的な関係で表される場合があることも推察される。

図-18 および 図-19 は、図-16 および 図-17 と同じデータを E_{50} と温度 θ およびひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係で整理したものである。図-18 からひずみ速度が一定ならば E_{50} と θ はほぼ直線関係にあることがわかる。また、図-19 では E_{50} と $\log \dot{\epsilon}$ との間に明確な法則性はみられないが $\dot{\epsilon}$ が 0.06~6%/min の間では温度が一定ならば直線で近似してもそれほど大きな差はないことがわかる。なお、両図とも供試体の締固め程度の違いによる差はみられない。

これらのことから E_{50} は q_u の増加とともに増加するが両者は正比例的な関係にあるとは限らず、むしろ他の条件が一定であるならば θ または $\log \dot{\epsilon}$ と直線関係で近似できるといえる。

(6) 一軸圧縮強さに及ぼす含有塩分の影響

海水が残留している地盤での凍結工事や LNG 地下タンク建設の際に凍土強度への塩分の影響の予測が必要である。また、施工中の凍結管折損などで、ブライン(CaCl₂ 溶液)が漏洩残留した箇所を再凍結する場合にもこの影響が問題となる。そこで、塩分として NaCl と CaCl₂ の2種類を用い、供試体はすべて飽和の状態で行った。図-20 は一軸圧縮強さ q_u と塩分濃度 C との関係調べた実験結果を示したものである。横軸の塩分濃度 C は供試体作製時の間隙水の塩分濃度(溶液に対する溶質の重量百分率)である。塩分濃度 1% 付近まで q_u は急激に減少し、それ以上の濃度では緩やかに減少する。-20°C の方は記入していないが、両温度データともに氷点濃度(-10°C で 13.2%, -20°C で 21.6%) 近くで q_u はほとんど 0 になる。また、NaCl と CaCl₂ の場合の差はほとんどないこともわかる。図-

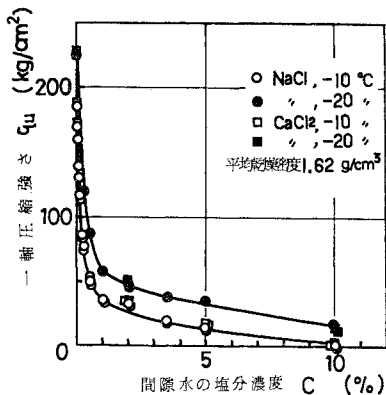


図-20 一軸圧縮強さに及ぼす塩分濃度の影響

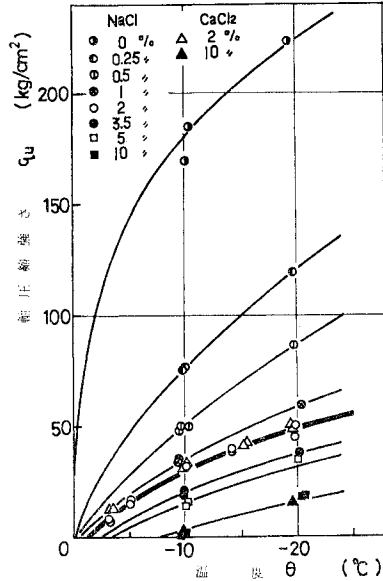


図-21 一軸圧縮強さと温度の関係(塩分含有の場合)

21 は種々の塩分濃度における q_u の温度依存性を調べた結果を示したものである。いずれも温度低下に伴って q_u は増加しているが、 q_u の増加の割合は濃度増加とともに緩やかになっている。このことは塩分含有によって生じる強度低下を温度を下げることによって回復することが非常に困難であることを示している。たとえば、わずかに塩分を含む $C=0.25\%$ の砂凍土の q_u を塩分を含まない ($C=0\%$) の場合の -3°C の q_u と同じにするためには温度を -20°C 近くまで下げなければならないことになる。また、当然のことながら、この図から各濃度データとともに氷点で q_u が 0 になることが推定でき、太線で示したように NaCl, CaCl₂ による差もほとんどみられない。次に、図-22 は -10°C における各濃度の荷重~変位曲線の例を示したものである。濃度増加とともにピークが低く緩やかになり、ついに粘土質凍土の場合のパターン¹⁶⁾に近い形になっている。塩分含有砂凍土の強度劣化の原因は氷点以下の温度でも存在する一部の濃縮された不凍液によるものと考えられるが現在のところこれを検証する研究

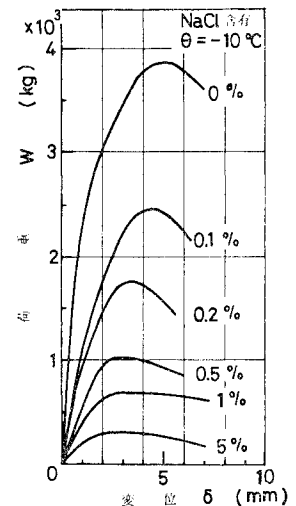


図-22 荷重~変位曲線(塩分含有の場合)

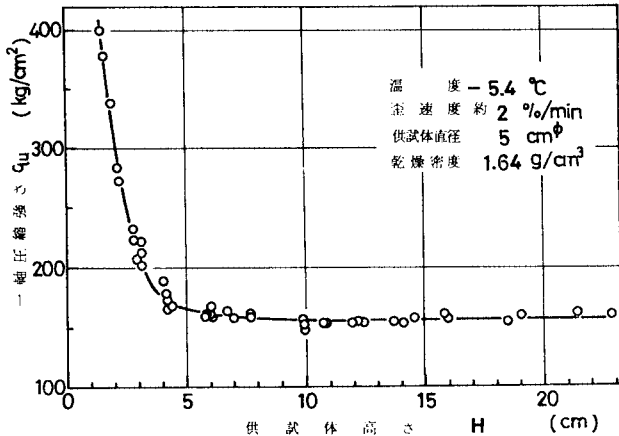


図-23 一軸圧縮強さに及ぼす供試体寸法の影響

はないようである。なお海岸近くで建設される LNG 地下貯蔵タンクを対象とした凍土の強度研究ですでに含有塩分の強度への影響が大きいことが示されているが⁴⁾、今回の実験では傾向的には一致するがさらに大きい影響があるという結果になっている。

(7) 一軸圧縮強さに及ぼす供試体寸法の影響

コンクリートの場合には供試体の形状および寸法が強度にかなり著しい影響を及ぼすことが知られている¹¹⁾。凍土の場合も円柱形供試体の直径と高さの関係による一軸圧縮強さ q_u への影響が考えられる。図-23 は直径 5 cm の円柱形供試体で高さ H を変えて q_u の変化を調べた実験結果を示したものである。 H が 5 cm より短くなると q_u は大きく増加するが、 $H > 5$ cm の範囲では q_u はほぼ一定値となり安定している。したがって、本研究に用いた標準的な供試体のサイズである $5\text{ cm}^\phi \times 10\text{ cm}^H$ は適当であり、凍結速度や方向依存性を調べる実験に用いた供試体の $6\text{ cm}^\phi \times 7\text{ cm}^H$ および $5\text{ cm}^\phi \times 8.5\text{ cm}^H$ も q_u に関する実験においては特に問題のないサイズであるといえる。供試体や摩擦に關係する載荷板の違い、温度・ひずみ速度などの条件の違いなどによっても q_u が一定値となる範囲が変わることも考えられるので、試料採取の都合で十分な供試体高さが確保できない場合は注意する必要がある。なお、今回の実験では高さ と直径の比が 2 となる $8\text{ cm}^\phi \times 16\text{ cm}^H$ および $3\text{ cm}^\phi \times 6\text{ cm}^H$ の場合も q_u は上述の一定値とよく一致することを確認した。

4. 結 論

この研究で得られた砂凍土に関する結果を列挙すると次のようになる。

(1) 一軸圧縮強さ q_u は温度 θ の低下とともに増

加し、実験式 $q_u = a + b(-\theta)^n$ (a, b, n は定数) で近似できる。ただし、 0°C 付近では近似度は十分とはいえない。また、 q_u の温度依存性は傾向的に Kaplar, Tsytoich, 井上らの既往の研究結果と一致する。

(2) 温度が -3°C 付近から 0°C に近づくにつれて一軸圧縮強さ q_u は急激に減少し、 0°C での q_u の値もほとんど 0 になる。

(3) 温度が -20°C 付近から荷重～変位曲線にピークが 2 つ現れ、一軸圧縮強さ q_u の値のばらつきが大きくなる。

(4) 一軸圧縮強さ q_u はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の増加とともに増加するが、 $\dot{\epsilon}$ が小さい範囲では実験式 $q_u = c + d \log \dot{\epsilon}$ (c, d は定数) で近似でき、

$\dot{\epsilon}$ がある値より大きくなると q_u はそれほど増加せず広い範囲にわたってほぼ一定となる。また、荷重～変位曲線でのピークに達したときのひずみ ϵ は $\dot{\epsilon}$ の増加とともに小さくなり、 q_u にも大きく影響していることが考えられる。

(5) 一軸圧縮強さ q_u の凍結速度や凍結方向による有意な差はみられない。

(6) 一軸圧縮強さ q_u は不飽和の場合は含水比の増加に伴って増加し、飽和の場合は締固め程度の密なものほど大きくなり乾燥密度とほぼ直線関係にある。したがって、図-12 に示すように q_u を最大にする最適含水比が明確に指摘できる。

(7) 一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} は温度 θ またはひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 一定のもとでは曲線関係になり、必ずしも正比例的な関係にはない。変形係数 E_{50} はむしろ θ および $\log \dot{\epsilon}$ と直線関係で近似できる。

(8) 一軸圧縮強さ q_u に及ぼす塩分の影響は大きく、間隙水の塩分濃度 1% までに q_u は急激に減少しその値は 1/4～1/5 にも低下する。また、塩分を多く含むほど温度低下による q_u の増加は期待できなくなる。

(9) 一軸圧縮試験の供試体は円柱形の場合、その高さ H は直径の 2 倍程度が適当で、最低でも直径以上の高さが必要である。

参 考 文 献

- 1) Tsytoich, N.A. : (translated from the Russian) Bases and Foundations on Frozen Soils, Highway Research Board, Special Report No. 58, National Academy of Sciences-National Research Council Publication 804, Washington, p. 28, 1960.
- 2) Vialov, S.S., et al. : (translated from the Russian) The Strength and Creep of Frozen Soils and Calculations for Ice-Soil Retaining Structures, U.S. Army, Technical Report No. AD-484093, CRREL, Hanover, 1962.
- 3) 真井：凍土の強度について、北海道大学工学部研究報告, No. 16, pp. 45～68, 1957.

- 4) 片岡・緒方・安田：LNG 地下タンク周辺地盤の低温下における強度・変形特性，電力中央研究所報告，No. 378011, 1978.
- 5) 高志・生頼・山本・岡本：砂質凍土の一軸圧縮強度，第13回土質工学研究発表会，pp. 453～456, 1978.
- 6) 高志・生頼・山本・岡本・赤見坂：塩分含有凍土の一軸圧縮強度，第14回土質工学研究発表会，pp. 669～672, 1979.
- 7) 高志・生頼・山本：砂凍土の一軸圧縮強度に及ぼす締固め程度の影響，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集Ⅲ pp. 235～236, 1979.
- 8) 生頼・高志・山本・岡本：土の凍結に伴う析出氷晶の一軸圧縮強度，第14回土質工学研究発表会，pp. 661～664, 1979.
- 9) 高志・益田・山本：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究，雪氷，Vol. 36, No. 2, pp. 1～20, 1974.
- 10) Kaplar, C.W. : Some Strength Properties of Frozen Soil and Effect of Loading Rate, CRREL, Special Report, No. 159, 1971.
- 11) Tsytovich, N.A. : (translated from the Russian) The Mechanics of Frozen Ground, McGraw-Hill Book Co., p. 148, 1973.
- 12) 井上・木下：凍土の圧縮強度と動的性質，低温科学，物理篇，第33号，pp. 243～253, 1975.
- 13) 小田・小石川：砂地盤の強度異方性とその土質工学的意義，土木学会論文報告集，第273号，pp. 111～120, 1978.
- 14) 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.
- 15) 後藤・了戒・中沢：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.
- 16) 高志・生頼・山本：粘土質凍土の一軸圧縮強度，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp. 466～467, 1978.
- 17) 近藤・坂：コンクリート工学ハンドブック，pp. 275～279, 朝倉書店，1965.

(1979.7.25・受付)