

均質な粘土凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH
OF HOMOGENEOUSLY FROZEN CLAY

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

凍土を耐力壁として用いる地盤凍結工事の設計に際しては、第一に安全性を考慮して凍土量を決定しなければならないが、必要以上に凍土量を多くすることは、経済性および工期の面から、また特に粘土などの細粒土の場合には凍上対策の面からも好ましくない。したがって、安全かつ最小の凍土量で設計することが最良であり、そのためには凍土の力学的強度に関する知識が重要である。

著者らは凍土の強度に関する組織的研究の第一歩として、砂凍土の一軸圧縮実験を行い、一軸圧縮強度に及ぼす各種のパラメーターの影響を広範に調べ、その結果はすでに報告した¹⁾。本論文は引き続いて行った粘土凍土の一軸圧縮実験に関するものである。

粘土は一般に凍上性が大きく、凍結条件によっては凍土内部にアイスレンズとよばれる、土粒子を含まない純水層が析出する。このようなアイスレンズを含む凍土では、その著しい不均質性が明らかに強度に影響し、問題が複雑となる。

そこで、粘土凍土の強度に関する研究の第一段階として、本論文では対象を、凍結速度を大きくすることによって得られる、アイスレンズを含まない均質な粘土凍土に絞り、強度に及ぼす温度、ひずみ速度、凍結方向、乾燥密度、供試体寸法および塩分の影響を調べた。また、強度に及ぼす不凍水の影響について若干の考察を行った。なお、実験データの一部はすでに学会等で発表したものである^{2)~4)}。

2. 実験方法

(1) 実験装置

用いた一軸圧縮試験機は容量 10 tf (98 kN)、ひずみ制御方式で 0.06~40 mm/min の間で一定の変位速度に設定できる。これを低温室内（到達し得る最低温度約 -30°C）に設置した。載荷板と供試体の付近は防熱箱で覆い、実験中の供試体付近の温度のゆらぎが設定温度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内になるようにした。供試体と載荷板の間には 30 mm 厚の硬質アクリル板を入れ、動力部からの伝熱の影響を少なくした。実験中の荷重および変位は温度補正を行ったプルーベングリングとダイヤルゲージで検出し、それぞれに連動する差動変圧器により増幅器を介して X-Y レコーダーで記録した。また、防熱箱内にダミー供試体を置き、その中心部の温度をサーミスタにより自記記録し、これを実験温度とした。なお、供試体近傍の空気温度とダミー中心部の温度がなるべく一致したときに実験を行うようにした。

(2) 試料土と供試体の作製方法

試料土は藤の森粘土である。この粘土は京都市伏見区で採取され、壁土用として乾燥粉末状態で市販されている。そのままでは水分を少し含んでいるため 420 μm のふるいを通過したものを実験に供した。粒径加積曲線を図-1、土質定数を表-1 に示す。

供試体の作製は原則として次の方法で行った。乾燥粉末粘土に含水比が約 60% になるように蒸留水を加え、練り返したものを直径 11 cm のシリンダーに、深さが約 17 cm になるように入れ、両面排水で約 72 時間、圧力 4 kgf/cm² (392 kN/m²) で圧密する。圧密後、固結した粘土塊から円柱形（直径 5 cm、高さ 11 cm）を圧密方向と実験時の圧縮方向が一致するように切り出す。

* 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

**** 正会員 理修 (株) 精研 技術研究所

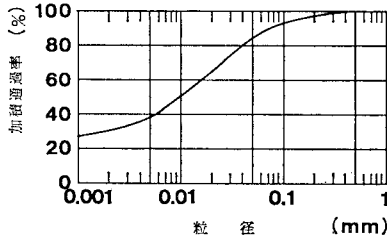


図-1 試料土の粒径加積曲線

表-1 藤の森粘土の土質定数

土粒子比重	G_s	2.679
液性限界	W_L	44.50%
塑性限界	W_p	23.27%
圧縮指数	C_c	0.27
比表面積	S	9.0 m ² /g

表-2 標準的作製方法による供試体の物理定数

形状	円柱形
寸法	直径 5 cm 高さ 10 cm
含水比	W 28.19 ± 1.20%
間隙比	e 0.833 ± 0.035
氷飽和度*	S_{vi} 98.88 ± 1.12%
乾燥密度	γ_d 1.463 ± 0.029 g/cm ³

* 土中水の全部が氷に変化したとして計算したもの

これをポリフィルムで包み、側面と底面を断熱材で覆い、-20°C の冷凍庫に入れ、上面から一次元的に急速凍結する。このときの凍結速度は約 20 mm/h で、凍結後はアイスレンズを含まない均質な凍土となる。なお、試料土に熱電対を挿入して測定した氷点は約 -0.4°C であった。凍結後、円柱形の両端面を平滑に仕上げ、高さ 10 cm とする。この作製方法（以後、標準的作製方法とよぶ）による凍土供試体の物理定数を表-2 に示す。

実験目的により、供試体の作製方法が上述の標準的作製方法と多少異なるものがあるが、これについては実験結果の項でそのつど述べる。

作製した供試体は氷の昇華を防ぐために、ビニール袋で密封し冷凍庫内で保存した。圧縮実験に際しては、あらかじめ 24 時間前に実験温度の低温室に移しておき、実験温度に十分なじませた。なお、本実験に用いた供試体はすべて -20°C の冷凍庫内で一次元急速凍結した後、各試験温度にしているが、一度 -20°C で作製した後の温度履歴が強度に及ぼす影響は、実験精度の範囲内にあることを予備実験で確かめた。

3. 実験結果

(1) 応力-ひずみ曲線と一軸圧縮強度、変形係数の定義

藤の森粘土凍土の応力-ひずみ曲線の典型的な例を、

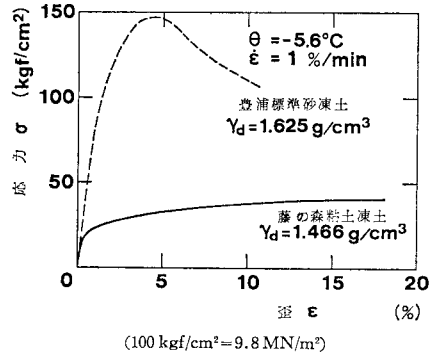


図-2 粘土凍土、砂凍土の典型的な応力-ひずみ曲線

同じ実験条件下での豊浦標準砂凍土の例¹⁾と比較して図-2 に示す。なお本論文で用いる応力は、荷重を供試体の元の断面積で割った値である。また、ひずみは変位を供試体の元の高さで割った値である。粘土凍土の応力-ひずみ曲線は砂凍土のそれに比べ、全体に応力が低いことと、応力にピークが存在しない点で大きく異なる。変形の様子は砂凍土では数 % のひずみでクラックが現われて変形するのに対し、粘土凍土ではひずみが 30% 程度進行してもクラックは現われず、供試体は側方にふくらみながら変形する。

砂凍土の場合には応力-ひずみ曲線のピーク応力を一軸圧縮強度 q_u としたが、粘土凍土ではピーク応力が存在しないため、ひずみが 10% のときの応力を一軸圧縮強度 σ_{10} と定義する。なお、未凍結土の一軸圧縮試験に関して土質試験法では、ピーク応力が存在しない場合、ひずみが 15% のときの応力（ただし断面補正後）を一軸圧縮強度とすると定めているが、後で図-5 に示すように粘土凍土の 10%、15% ひずみのときの応力はある程度対応づけることができる。一軸圧縮強度として 10% ひずみのときの応力を採用したのは、実験時間が短縮できることおよび 10% ひずみのときの応力の方が 15% ひずみのときの応力よりも小さく、強度としては安全側になるからである。なお、粘土凍土の側方への変形が必ずしも一様ではないので、本論文ではいわゆる断面補正は行っていない。

供試体の初期の応力-ひずみ特性を表わす変形係数は次のように定義する。

$$\text{変形係数 } E_{s0} = \frac{\sigma_{10}/2}{(\text{応力が } \sigma_{10}/2 \text{ のときのひずみ})} \dots\dots\dots (1)$$

(2) 強度に及ぼす温度の影響

標準的作製方法による供試体を用い、ひずみ速度約 1 %/min で強度の温度依存性を調べた。温度による応力-ひずみ曲線の変化の例を図-3 に示す。温度の低下に伴い、応力は全体に大きくなるが、曲線のパターンに大き

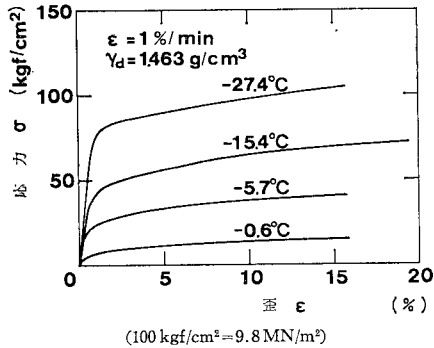


図-3 温度による応力-ひずみ曲線の変化の例

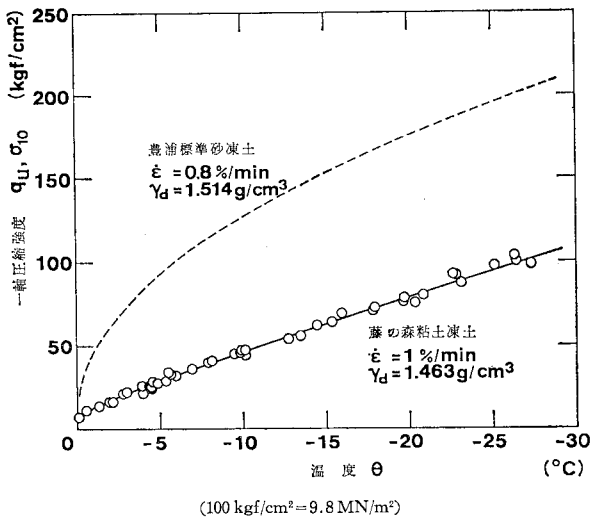


図-4 粘土凍土と砂凍土の一軸圧縮強度と温度の関係

な変化はない。

図-4 に一軸圧縮強度 σ_{10} と温度の関係を示す。Tsytoovich らは凍土の一軸圧縮強度と温度の関係に対して次のような形の実験式を提唱している⁵⁾。

$$\sigma_c = a + b \cdot (-\theta)^n \dots \dots \dots (2)$$

ただし、

- σ_c : 一軸圧縮強度
- θ : 温度 (°C)
- a, b, n は定数

著者らの実験によれば、豊浦標準砂凍土の場合(飽和凍土、乾燥密度 $\gamma_d = 1.514 \text{ g/cm}^3$ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.8 \text{ \%}/\text{min}$)には、 $a = 8.53, b = 37.29, n = 0.5$ という値が、一軸圧縮強度 q_u (kgf/cm²) の測定値に合うことがわかって¹⁾。藤の森粘土凍土(飽和凍土、 $\gamma_d = 1.463 \text{ g/cm}^3$ 、 $\dot{\epsilon} = 1 \text{ \%}/\text{min}$)についても同様の実験式を求めると、 $a = 7.0, b = 5.30, n = 0.87$ という値が一軸圧縮強度 σ_{10} (kgf/cm²) の測定値によく合った。この実験式による砂凍土、粘土凍土の曲線を図-4 に記入した。

σ_{10} と 15% ひずみのときの応力 σ_{15} は 図-5 に示す

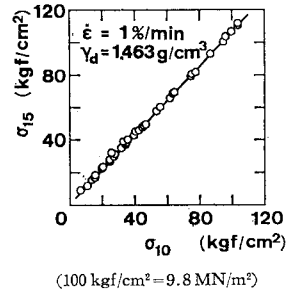


図-5 15% ひずみ時応力 σ_{15} と 10% ひずみ時応力 σ_{10} の関係

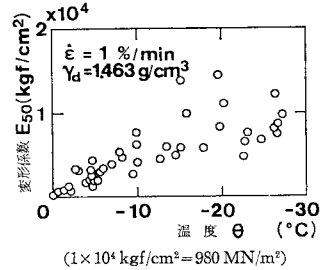


図-6 変形係数と温度の関係

ように直線関係となる。

砂凍土では 0°C からの温度の低下に伴う強度の増加が最初急激で、その後徐々に緩やかになっていくのに対し、粘土凍土では最初から比較的緩やかで、直線に近い増加傾向にある。また、実験した温度範囲では強度は砂凍土の半分以下となる。このような強度の温度依存性の相違の一つの原因として、凍土中の不凍水量の差が考えられる。この点に関して、強度に及ぼす塩分の影響と関連づけ、後章で考察した。

変形係数 E_{50} と温度の関係を 図-6 に示す。供試体端面と載荷板とのなじみによるひずみ計測の誤差に対して E_{50} は敏感なこともあり、ばらつきが大きい。-20°C 付近までの温度の低下に伴い E_{50} は増加し、それ以下の温度ではあまり増加しない傾向がみられる。砂凍土の場合には、温度の低下とともにほぼ直線的に E_{50} が増加する傾向が得られている¹⁾。

粘土凍土の一軸圧縮強度の温度依存性に関する既往の研究^{5)~7)}の結果を、本研究の結果とともに 図-7 に示す。表-3 に各研究での土質、実験条件の違いをまとめて示したが、これらの差にあまりよらず、粘土凍土の強度の温度依存性は傾向的にも量的にも大きな違いはないようである。

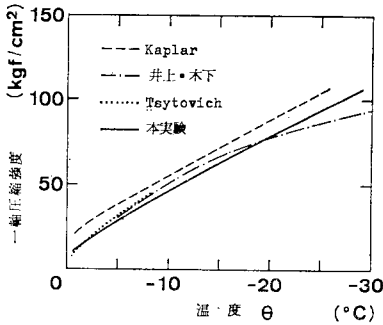
(3) 強度に及ぼすひずみ速度の影響

標準的の作製方法による供試体を用い、4種類の温度でひずみ速度が強度に及ぼす影響を調べた。-15.3°Cでのひずみ速度による応力-ひずみ曲線の変化の例を 図-

表-3 各研究での土質、実験条件の違い

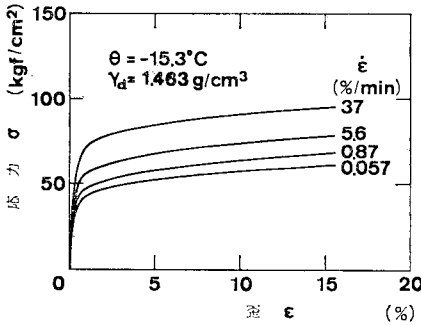
研究者	試料土	粒径の特徴	供試体	ひずみ速度 (載荷速度)	その他
Tsytoovich ³⁾	clay	50% < 5 μm	立方形	15~20 (kgf/cm ²)/min	W=34.6~36.3%
Kaplar ⁶⁾	Forgo clay			28 (kgf/cm ²)/min	S _r =80~100%
井上・木下 ⁷⁾	小向重粘土	藤の森粘土によく似ている	円柱形 (直径 5 cm 高さ 10 cm)	3%/min	飽和
高志ほか (本研究)	藤の森粘土	図-1 参照	円柱形 (直径 5 cm 高さ 10 cm)	1%/min	W=28.19% S _{ri} =98.88% γ _d =1.463 g/cm ³

いる⁷⁾。多結晶氷の場合には、応力がひずみ速度の 0.3~1 乗に比例するという流動則が得られている⁸⁾。これに比べると粘土凍土の σ₁₀ のひずみ速度依存性はかなり低次である。また、シルト凍土では粘土凍土よりも少し大きい 0.15~0.30 という指数が得られている⁹⁾。



(100 kgf/cm² = 9.8 MN/m²)

図-7 粘土凍土の一軸圧縮強度に関する既往の研究結果との比較



(100 kgf/cm² = 9.8 MN/m²)

図-8 ひずみ速度による応力-ひずみ曲線の変化の例

8 に示す。ひずみ速度の増加に伴い全体に応力は増加するが、曲線のパターンにはほとんど変化がない。

図-9 は縦軸に一軸圧縮強度 σ₁₀、横軸にひずみ速度 ε̇ をともに対数目盛でとり、実験結果を示したものである。σ₁₀ に及ぼすひずみ速度の影響は複雑で、温度により、またひずみ速度の範囲により変化している。概して、ひずみ速度が増加するに伴い σ₁₀ も増加するが、-10°C よりも低い温度では ε̇=1%/min 付近を境として、σ₁₀ のひずみ速度依存性が異なるようである。図-9 に記入した直線の傾きから、σ₁₀ はひずみ速度の 0.04~0.10 乗に比例するという結果が得られた。砂凍土の実験結果では粘土凍土と逆に ε̇=1%/min 付近を境として、ひずみ速度の増加に伴う強度の増加が少なくなっ

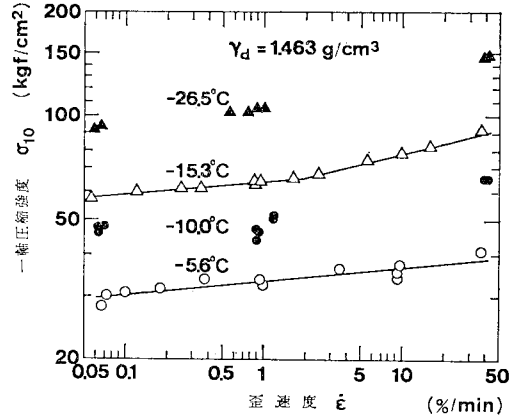
図-10 に -5.6°C、-15.3°C

における変形係数 E₅₀ とひずみ速度 ε̇ の関係を示す。ばらつきが大きい実験範囲内では E₅₀ は ε̇ に関係なくほぼ一定の値を示している。

(4) 強度に及ぼす乾燥密度の影響

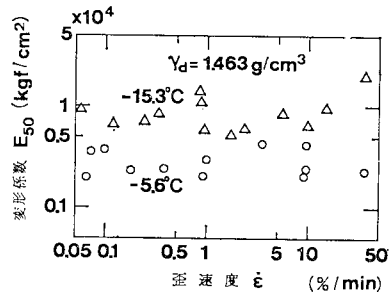
試料土の締固め度合が凍土の強度に及ぼす影響を調べるために、標準的作製方法のうち圧密圧力を変え、締固め度合を変えた供試体を用いて、3種類の温度で実験を行った。ひずみ速度は約 1%/min とした。締固め度合は供試体の乾燥密度 γ_d を用いて表わす。

乾燥密度による応力-ひずみ曲線の変化の例を 図-11 に示す。温度、ひずみ速度が変化した場合、応力-ひず



(100 kgf/cm² = 9.8 MN/m²)

図-9 一軸圧縮強度とひずみ速度の関係



(1 × 10⁴ kgf/cm² = 980 MN/m²)

図-10 変形係数とひずみ速度の関係

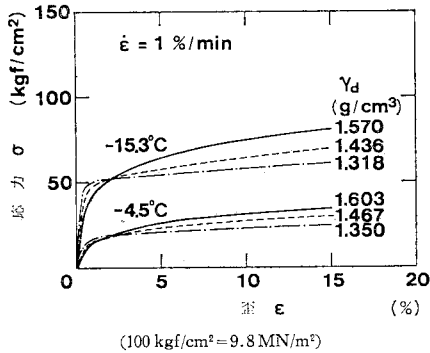


図-11 乾燥密度による応力-ひずみ曲線の変化の例

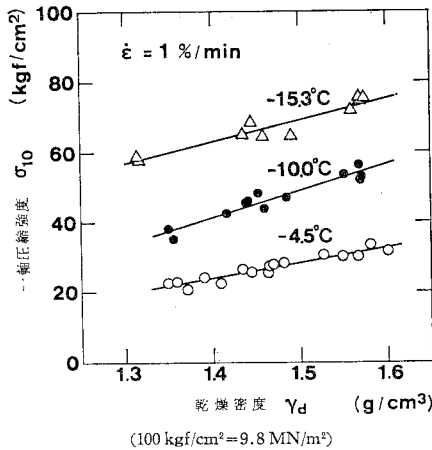


図-12 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

み曲線はおもに全体の応力が変化するので、曲線のパターンには大きな変化はみられなかったが、乾燥密度が変化した場合には曲線のパターンがかなり異なってくる事がわかる。乾燥密度が小さいほど、応力-ひずみ曲線の最初の立ち上がりは急であるが、その後の応力の増加は緩やかである。このような応力-ひずみ曲線のパターンの変化は凍土中の土粒子、氷および不凍水の量の違いを反映するものと考えられ興味深い。また、それぞれの温度で、 r_d の異なる応力-ひずみ曲線が、ひずみが2%付近で交差するのも興味ある現象である。

図-12に σ_{10} と乾燥密度の関係を示す。実験範囲内で σ_{10} は乾燥密度の増加とともにほぼ直線的に増加している。

飽和土の場合、乾燥密度と含水比は逆比例の関係にあるので、飽和凍土では含水比が大きいほど、強度は小さいことになる。なお、飽和砂凍土の場合、乾燥密度の増加に伴い強度 q_u がほぼ直線的に増加する結果が得られており、粘土凍土の場合と傾向は一致する。

本実験では、乾燥密度 r_d がかなり大きい領域で実験しているが、これは r_d がこれより小さい領域では、本実験のような供試体作製方法によっては、凍結する際に

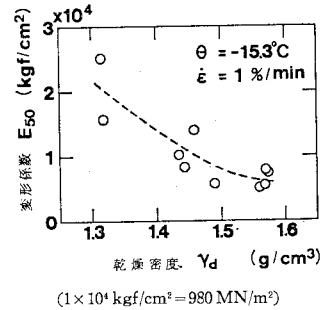


図-13 変形係数と乾燥密度の関係

供試体中に氷晶が析出し、均質な凍土供試体が得られなかったためである。乾燥密度がより小さい、すなわち、含水比がより大きい領域での粘土凍土の強度は、凍土中の析出氷晶の存在も関係してきて複雑な問題となると考えられるが、工学的に重要であるので今後の課題として取り組んでいきたい。

図-13に -15.3°C における変形係数 E_{50} と乾燥密度 r_d の関係を示す。 σ_{10} とは逆に、 r_d が小さいほど、 E_{50} は大きくなっている。このように、 $\sigma_{10} \sim r_d$ 、 $E_{50} \sim r_d$ の関係が異なる傾向にあることは、図-11に示した、乾燥密度により応力-ひずみ曲線のパターンが変化することに関連しているわけであるが、これらの現象は粘土凍土の変形あるいは破壊機構に関する情報を与えるものと考えられるので、今後、より広い乾燥密度、含水比の範囲で実験を行い検討していきたい。

(5) 強度に及ぼす凍結方向の影響

供試体を一次的に凍結する際の凍結方向が強度に及ぼす影響を調べるために、凍結方向が実験時の圧縮方向と異なる供試体を作製し、凍結方向が圧縮方向と平行な供試体の強度と比較した。供試体は圧密により得られた粘土塊を整形せずにそのまま一次的に凍結した後、凍結方向と圧縮方向が 90° または 45° をなすように、カッター、旋盤を用いて円柱形に整形した。

実験結果を図-14に示す。平均的には圧縮方向と凍結方向が垂直な場合の強度が少し小さいが、データのばらつきを考えると有意な差ではないといえる。砂凍土で

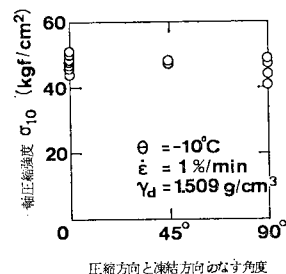


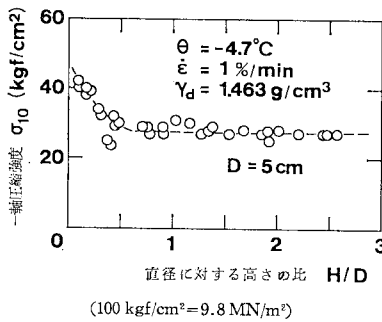
図-14 一軸圧縮強度と凍結方向の関係

も凍結方向による強度の差はほとんどないという結果が得られており¹⁾、アイスレンズを含まない凍土では、凍結方向は強度に大きく影響することはないと考えられる。アイスレンズを含む凍土では、アイスレンズそのものの強度が凍結方向により極端に異なる²⁾ことから、凍土全体の強度にも凍結方向の影響が大きく現われるものと予想される。これについては、アイスレンズの分布に関係するもう一つのパラメーターである凍結速度の影響とともに今後の課題としたい。

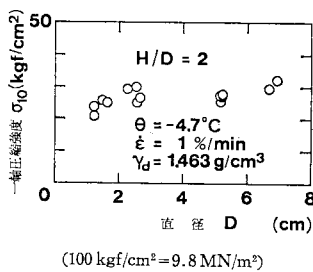
(6) 強度に及ぼす供試体寸法の影響

本実験では標準供試体として直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱形供試体を用いたが、ここではまず、円柱形供試体の直径と高さの比と一軸圧縮強度の関係を調べるために、直径が 5 cm で高さをさまざまに変えた供試体を用いて実験を行った。次に、全体の寸法と強度の関係をみるために、直径と高さの比は 1:2 で寸法を変えた供試体についても実験を行った。これらの供試体は寸法を除いて標準的作製方法に準じて作製したものである。ひずみ速度は約 1%/min にそろえた。

図一五に直径 5 cm の場合、直径 D に対する高さ H の比 H/D と σ_{10} の関係を示す。砂凍土の実験結果では H/D が 1 以上で q_u は一定となり、 H/D が 1 より小さくなると q_u は増加する³⁾が、粘土凍土では H/D が 0.5 以上で σ_{10} はほぼ一定で、 H/D が 0.5 より小さくなると σ_{10} は増加する。強度が一定になる最小の H/D が砂凍土と粘土凍土で異なるのは、載荷板と供試



図一五 一軸圧縮強度と供試体の直径に対する高さの比の関係



図一六 一軸圧縮強度と供試体の全体の寸法の関係

体の摩擦状態や、あるいは変形機構の差によるものと考えられる。

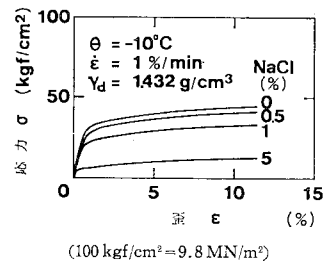
図一六に $H/D=2$ で全体の寸法を変えた実験の結果を示す。あまり広い範囲では実験できなかったが、全体の寸法が大きいほど、 σ_{10} は大きくなる傾向にある。これはコンクリートの強度試験の場合¹¹⁾とは逆の傾向であるが、現在のところ原因はわからない。

(7) 強度に及ぼす塩分の影響

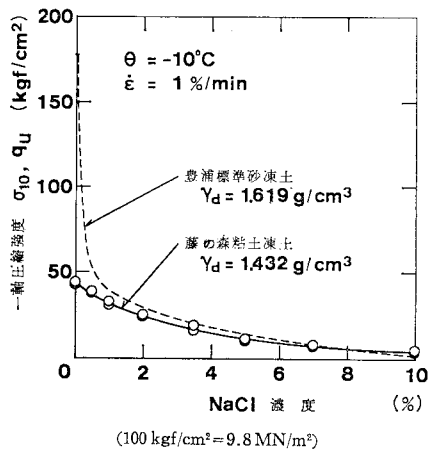
土中に塩分が含まれているときの凍土の強度は、海岸近くで凍結工事を計画する際や、凍結工事施工中の凍結管折損事故等により、冷却液が一時漏洩した箇所を再凍結するような場合に重要な問題である。また、塩分は凍土内部の不凍水を増加させる効果をもつことから、塩分を含む凍土の強度は、不凍水と強度の関係を考えるうえで興味深い問題である。

添加する塩分として、海水中の代表的な塩分である塩化ナトリウムと、凍結工事で冷却液に使われる塩化カルシウムを用いた。供試体は標準的作製方法と同様な方法で作製するが、最初の繰り返し時に加える蒸留水の代わりに所定濃度の塩水溶液を用いた。圧密時の排水の塩分濃度は加えた塩水溶液の濃度とほぼ同じであった。

塩分を含む凍土の応力-ひずみ曲線の例を図一七に示す。塩分濃度は供試体作製時に用いた塩水溶液のもの



図一七 塩分による応力-ひずみ曲線の変化の例



図一八 一軸圧縮強度と塩分濃度の関係

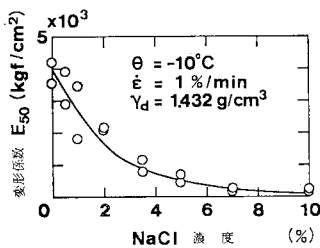
で、溶液に対する溶質の重量百分率で表わした。塩分濃度が増加するほど、応力-ひずみ曲線は全体に応力が小さくなるが、曲線のパターンに大きな変化はない。

図-18に -10°C における σ_{10} と塩分濃度の関係を示す。比較のために同じ温度の砂凍土の一軸圧縮強度 q_u と塩分濃度の関係¹⁾も記入した。砂凍土では塩分濃度の増加に伴い、強度は最初激減し、その後緩やかな減少に移っていくが、粘土凍土では最初から比較的緩やかで単調な減少傾向にある。塩分濃度が高くなると砂では強度は0に近づくが、粘土では未凍結時の強度に近づく。

図-19に -10°C における E_{50} と塩分濃度の関係を示す。塩分濃度の増加に伴い、 E_{50} も σ_{10} と同様に減少傾向を示す。

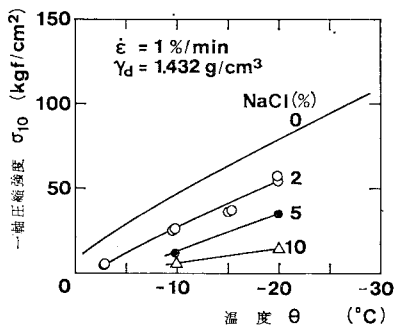
図-20に塩分を含む凍土の σ_{10} と温度の関係を示す。塩分のために氷点降下が起こり、凍結強度が発現するのはその濃度での氷点以下の温度となる。また、塩分濃度が大きいほど、温度の低下に対する強度の増加の割合は小さくなっている。

以上の結果は塩化ナトリウムを含む凍土についてのものである。塩化カルシウムを含む凍土についても同様の実験を行ったが、実験範囲内で定量的にほぼ同一の結果を得た²⁾。これは塩化ナトリウムと塩化カルシウムでは同塩分濃度の場合、水溶液の氷点にあまり差がない¹²⁾ためと考えられる。ただし、塩化ナトリウムの共晶点は -21.2°C 、塩化カルシウムは -55.0°C と異なるので、



($1 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ MN/m}^2$)

図-19 変形係数と塩分濃度の関係



($100 \text{ kgf/cm}^2 = 9.8 \text{ MN/m}^2$)

図-20 塩分含有凍土の一軸圧縮強度と温度の関係

-21.2°C 以下では両者の差が現われてくると予想される。

塩分が凍土の強度に及ぼす影響に関する上の結果について次章で若干の考察を行った。

4. 凍土の強度に及ぼす不凍水の影響に関する考察

飽和凍土はおもに固相(土粒子および氷)よりなるが、一部の水分は 0°C 以下でも凍結せず、いわゆる不凍水として土粒子表面と氷の間に液相で介在する。Anderson and Tice (1973)¹³⁾ は各種の土について不凍水量の温度依存性を実測し、土の比表面積と温度から不凍水量を求める次のような実験式を提案した。

$$\ln W_u = 0.2618 + 0.5519 \ln S - 1.4495 S^{-0.264} \ln|\theta| \dots \dots \dots (3)$$

ただし、

W_u : 不凍水分比 (土粒子の乾燥重量 100 g 当たりの不凍水量) [$\text{gH}_2\text{O}/100 \text{ g soil}$]

S : 比表面積 [m^2/g], $0.02 \leq S \leq 800$

θ : 温度 [$^{\circ}\text{C}$]

不凍水量の測定は比較的困難であり、上式も検討の余地は多く残されているが、比表面積と不凍水量の関係を一般化した形で表わしているのは、現在のところ、この式以外に見当たらない。以下では、凍土中の不凍水量が式(3)に従うものとして考察を進める。式(3)を用いると、藤の森粘土および豊浦標準砂の不凍水量の温度依存性は図-21のようになり、砂に比べて粘土の方がはるかに多量の不凍水を含むことがわかる。

凍土の強度と温度の関係を考える一つの手順として、まず不凍水が存在せず、固相のみからなる凍土を仮想し、その強度について考えてみる。固相の構成材料の一つである土粒子の力学的性質は $0 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 程度の温度範囲では一定と仮定する。そうすると、この場合の凍土の強度と温度の関係は、残る構成材料である氷の力学的性質と温度の關係に支配されることになる。もちろん、氷の強度がそのまま凍土の強度に等しくなるわけではなく、氷の力学的性質から凍土の力学的性質への変換過程には、不凍水は別として土粒子の存在による非常に複雑な影響があると考えられる。

次に、不凍水が存

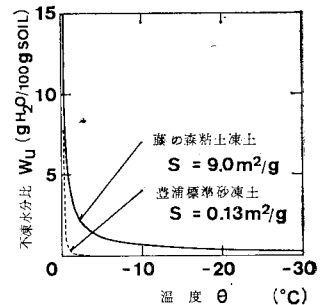


図-21 不凍水量と温度の關係

在する場合の強度を考えると、固相間に介在する不凍水膜は固相相互の結びつきを弱め、外力に対する凍土の変形抵抗を小さくする、いわば潤滑物質的な役割をすることを考えることができよう。そうすると、この場合の強度は固相のみからなると仮想した凍土の強度よりも当然小さくなるのが期待される。

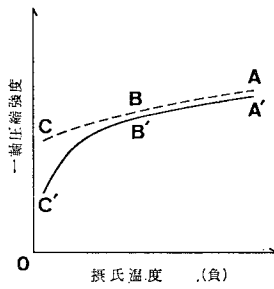


図-22 凍土の強度の温度依存性についての考え方

上述の考え方を 図-22 に示す。同図の縦軸は強度、横軸は摂氏温度である。破線で示す曲線 ABC は、固相のみからなると仮想した凍土の強度の温度依存性を表わす。この曲線 ABC がどのような関数形になるべきかは、現在のところわからない。しかし、氷の力学的性質に関する研究結果^{9),14)}から、0°C にきわめて近い領域を除いて、-30°C 程度までの温度範囲内では曲線 ABC は 図-22 に示すように、勾配があまり大きくない直線に近い形のものではないかと推定される。他方、不凍水を含む実際の凍土の強度の温度依存性は、たとえば実線で示す曲線 A'B'C' のようになる。低い温度では不凍水が少なく、実際の凍土の強度は固相のみからなると仮想した凍土の強度に近いが、温度が高くなると点 B' 付近の温度から不凍水の影響が現われはじめ、実際の凍土の強度は固相のみからなる凍土の強度よりも小さくなる。すなわち、曲線 ABC と曲線 A'B'C' のずれが強度に及ぼす不凍水の影響であると考えられる。

さて、不凍水が凍土の強度に及ぼす影響については、塩分を含む凍土の強度に関する実験結果を用いて、定量的に考察できる可能性がある。塩分を含む場合の凍土中の不凍水は Banin and Anderson (1974)¹⁵⁾, Yong et al. (1978)¹⁶⁾ により研究されており、まだ明らかでない点が多いが、少なくとも砂のように土粒子の表面力が小さい場合や、あるいは塩分濃度が極端に薄くない場合には、溶液の凍結に関する pure solution theory¹⁶⁾ という考え方をを用いて、凍結前の間隙水の塩分濃度と状態図(濃度-温度)から、ある温度での凍土中の塩分による不凍水量を推定することができる(補遺)。この方法により、-10°C における塩化ナトリウム含有豊浦標準砂凍土の実験結果¹⁾を整理して 図-23 に示す。同図は一軸圧縮強度と土粒子乾燥重量 100 g 当たりの不凍水量の関係を示す。なお、砂凍土の場合、この温度では塩分以外の原因による不凍水量は無視できる(図-21)。図-23 によれば、不凍水の増加に伴い強度は最初急激に低下し、不凍水がある程度以上の量になると低下は緩やかと

なる。不凍水が固相間において潤滑物質的な役割をするものとするれば、不凍水が少ない領域での強度の急激な低下は、潤滑的な作用が効果的に行われて、変形に対する抵抗が急減した部分に相当すると考えることができる。

図-22 に示した、凍土の強度の温度依存性に関する考え方と、図-23 の強度と不凍水量の関係を組み合わせることを次に試みる。

(1) 砂凍土の強度の温度依存性について

まず、砂凍土の強度について考える。このために次の事を仮定する。

i) 固相のみからなると仮想した砂凍土の強度の温度依存性は、砂凍土の実験結果¹⁾で -10°C, -20°C の強度を結ぶ直線で表わされるとする。

ii) 図-23 のうち、砂凍土のデータに関して縦軸を、不凍水量が 0 のときの強度に対する比に換算する。この強度比と不凍水量の関係を数式化するために、適当に範囲を分割して折線の組み合わせで近似すると、強度比 β と不凍水量 W_u (gH₂O/100 g soil) の関係は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq W_u \leq 0.015 & \text{ で } \beta = 1 - 5.067 W_u \\ 0.015 \leq W_u \leq 0.069 & \text{ で } \beta = 0.968 - 2.930 W_u \\ 0.069 \leq W_u \leq 0.290 & \text{ で } \beta = 0.857 - 1.325 W_u \\ 0.290 \leq W_u \leq 0.702 & \text{ で } \beta = 0.608 - 0.467 W_u \\ 0.702 \leq W_u \leq 1.61 & \text{ で } \beta = 0.357 - 0.1095 W_u \\ 1.61 \leq W_u \leq 16.5 & \text{ で } \beta = 0.200 - 0.0121 W_u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

強度比は式(4)により、不凍水量のみによって決定され、この関係は温度、乾燥密度に対しては変化しないと仮定する。

これらの仮定のもとに、次の手順である温度における強度を計算する。まず、仮定 i) よりその温度における固相のみの場合の強度が得られる。次に式(3)より、そ

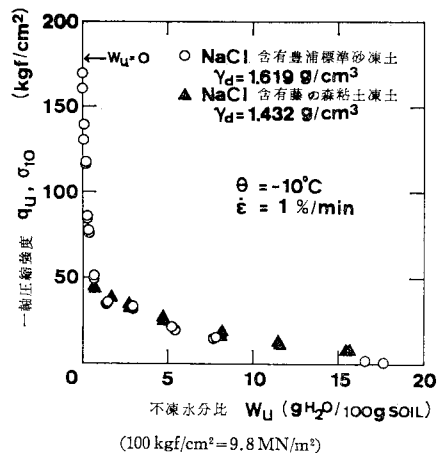


図-23 塩分含有砂粘土、凍土凍土の強度と不凍水量の関係

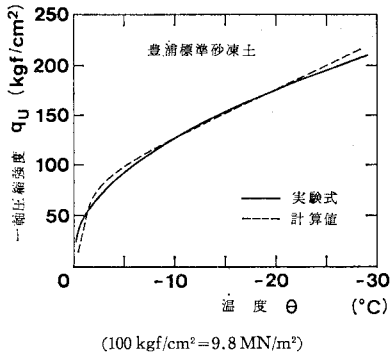


図-24 砂凍土の強度の計算値と実験式の比較

の温度での不凍水量を求め、さらに式(4)を用いて強度比を求める。不凍水を含む実際の凍土の強度は、固相のみの場合の強度に、強度比を乗じて得られる。このようにして計算した強度と、砂凍土の実験式によるものを比較して図-24に示す。同図より、砂凍土の強度の温度依存性で、 -5°C 付近までの温度の低下に伴い強度が急激に増加するのは、不凍水量の減少のためであることが定量的に説明可能である。

(2) 粘土凍土の強度について

次に粘土凍土について考える。塩分を含む粘土凍土では図-18に示したように、塩分濃度の増加に伴う強度の低下が、砂凍土に比べ緩やかであった。図-18は -10°C で得られたデータであるが、式(3)によれば、この温度では塩分を含まない粘土凍土でも $0.675\text{ gH}_2\text{O}/100\text{ gsoil}$ の不凍水をもっていることになる。そこで、塩分による不凍水の増加量を砂凍土の場合と同じ方法で計算し、これに式(3)による不凍水量を加えたものを、不凍水の総量と近似して、塩分含有粘土凍土の強度 σ_{10} と不凍水量の関係を、砂凍土の結果とともに、図-23にプロットした。粘土凍土で不凍水分比 W_u が最も小さいデータが、塩分を含まないときのもので、これ以下の W_u でのデータはない。 W_u がこれより大きい領域での、砂凍土と粘土凍土のデータを比べると、同じ W_u に対して、砂凍土の強度 q_u と粘土凍土の強度 σ_{10} が同程度の大きさであることがわかる。ただし、これについては q_u と σ_{10} という定義の異なる量を比較している点と、砂凍土と粘土凍土の乾燥密度 r_d が異なる点の二点に問題がある。まず r_d の違いであるが、図-12の σ_{10} と r_d の関係を参考にすれば、粘土凍土の r_d を砂凍土と同じにしたとすると、 σ_{10} は増加し、図-23の q_u と W_u の関係と σ_{10} と W_u の関係は量的には少しずれてくるが、傾向的には大きく異なってくることはない。次に、 q_u と σ_{10} の比較ということについて考える。砂凍土の実験結果⁹⁾によれば、温度がかなり高い場合や塩分

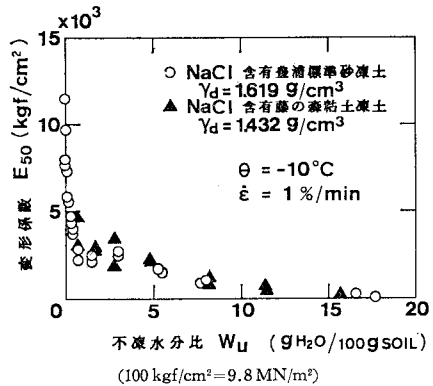


図-25 塩分含有砂凍土、粘土凍土の変形係数と不凍水量の関係

を多く含んでいるような場合、すなわち、不凍水が多く含まれているようなときの砂凍土の応力-ひずみ曲線の応力ピークはかなり鈍形である。また、図-25に示すように、塩分含有砂凍土と塩分含有粘土凍土の変形係数 E_{50} と W_u の関係はかなり一致する。これらのことを考えると、不凍水量が同じであるときの砂凍土と粘土凍土の応力-ひずみ曲線は、同一ではないが、ある程度似た形になるといえるであろう。そこで、 q_u と σ_{10} を比較するというは量的な厳密さには欠けるが、強度の温度依存性の傾向等のみをみるうえでは有効性があるものと考えられる。結局、図-23の砂凍土と粘土凍土のデータの比較からいえることは、不凍水量が同じとき、砂凍土と粘土凍土の強度が同程度の大きさになるということである。そこで著者らは一つの推論として、砂凍土と粘土凍土の強度、変形特性の違いは、第一近似的にみれば、両者の不凍水量の大小に起因しているのではないかと考えた。

さて、この推論の上で考えを進める。まず、塩分を含む凍土について考えると、塩分濃度の増加に伴う粘土凍土の強度の低下が、砂凍土に比べ緩やかである理由は、粘土凍土では塩分がない場合でも、砂凍土の場合の塩分濃度の増加に伴う強度の低下のうち、最初の急激な低下部分に相当する量の不凍水が、すでに存在しているからであると考えることができる。

次に、塩分を含まない場合に拡張して、粘土凍土の強度の温度依存性を考える。砂凍土と粘土凍土の大きな違いは不凍水量の大小によるとする、上記の推論の立場から考えると、もしも粘土凍土から不凍水をなんらかの方法でなくすることができたならば、その強度は砂凍土の不凍水がない場合の強度と同程度になることになる。そこで、粘土凍土の固相のみの強度を砂凍土の固相のみの強度と同じであると仮定し、次のような試算を行った。まず、不凍水がない固相のみの強度の温度依存性は、砂凍土の場合と共通とし、前節の仮定 i) から求め

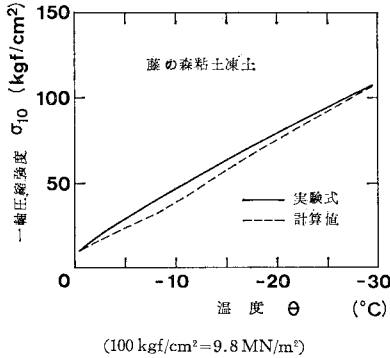


図-26 粘土凍土の強度の計算値と実験式の比較

る。次に、式(3)から粘土凍土の不凍水量を求め、さらに式(4)を用いて強度比を求め、固相のみの強度に強度比を乗じて、不凍水を含む粘土凍土の強度を計算する。この計算結果を、粘土凍土に対する実験式と比較して図-26に示す。この計算は仮定の大胆さから試算の域を出ないものであるが、粘土凍土の強度が砂凍土に比べて小さいことおよび強度の温度依存性が異なる傾向にあることを、両者の不凍水量の違いから説明し得る可能性があることを示している。

凍土の強度と不凍水の関係について、以上の考察を行ったが、このうちには検討すべき事項が多く残されている。特に重要な点は、不凍水がなく、土粒子、氷の固相のみからなるときの強度である。この強度は氷の結晶状態や土粒子の粒径、形状、鉱物組成などの影響を受けるものと考えられるが、現在のところはよくわかっていない。また、不凍水量の温度依存性についても、Anderson and Ticeの実験式がすべての土にあてはまるとは限らないようである。また、本実験では土粒子の乾燥単位重量に対して同量の不凍水が存在する場合、砂凍土と粘土凍土の強度が同程度になるという結果を得たが、片岡ほか(1980)¹⁷⁾の他の粘土を用いた実験によると、必ずしも同様の結果にはなっていない。これらの検討事項については今後さらに研究を進めていきたいと考える。

5. 結 論

藤の森粘土を試料土とした攪乱、飽和の均質な粘土凍土の一軸圧縮実験を行い、以下に述べる結論を得た。

(1) 変形挙動

一軸圧縮実験時に、砂凍土ではクラックが現われて変形するが、粘土凍土ではクラックが現われることなく変形が進行する。応力-ひずみ曲線は、砂凍土が応力ピークをもつのに対し、粘土凍土ではピークが存在せず、また全体に応力が低い。

(2) 一軸圧縮強度、変形係数の温度依存性

粘土凍土の一軸圧縮強度 σ_{10} は -30°C までの温度の低下に伴い、ほぼ直線的に増加する。これは量的、傾向的に既往の研究結果と一致する。また、変形係数 E_{50} は -20°C 付近までは増加するが、それ以下の温度ではあまり増加しない。

(3) 一軸圧縮強度、変形係数のひずみ速度依存性

ひずみ速度の増加に伴い、 σ_{10} は概して増加するが、ひずみ速度依存性は純氷と比較してかなり低次である。 -10°C よりも低い温度では $1\%/min$ 付近を境として依存性が少し異なる。また、 E_{50} にはひずみ速度の違いによる明瞭な変化はみられなかった。

(4) 一軸圧縮強度、変形係数の乾燥密度依存性

温度、ひずみ速度が変化した場合、応力-ひずみ曲線のパターンに大きな変化はないが、乾燥密度が変化した場合には応力-ひずみ曲線のパターンがかなり変化する。 σ_{10} は乾燥密度の増加に伴いほぼ直線的に増加する。逆に、 E_{50} は乾燥密度の増加に伴い減少する傾向にあり、特徴的である。

(5) 一軸圧縮強度に及ぼす凍結方向の影響

圧縮実験時の圧縮方向と、供試体作製時の一次元的凍結方向の違いが σ_{10} に与える影響はほとんどない。つまり、凍結方向に関して強度の異方性はない。

(6) 一軸圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響

円柱形供試体の直径に対する高さの比が0.5以上で、 σ_{10} はほとんど一定である。比が0.5よりも小さくなると σ_{10} は増加する。また、直径と高さの比が一定で、全体の寸法が変化する場合、全体の寸法が大きいほど、わずかではあるが σ_{10} は大きくなる。

(7) 一軸圧縮強度、変形係数の塩分濃度依存性

間隙水に塩分を含む場合の凍土の σ_{10} 、 E_{50} は塩分濃度の増加に伴い減少するが、砂凍土の場合に比べ、粘土凍土では減少の仕方は緩やかである。

(8) 凍土の一軸圧縮強度に及ぼす不凍水の影響

粘土凍土の強度の温度依存性および塩分を含む場合の強度の塩分濃度依存性の、砂凍土との差異について、不凍水量と強度の関係に着目して考察した。その結果、粘土凍土と砂凍土の間のこれらの強度特性の差が、両者の不凍水量の違いから定量的に説明できる可能性があることを示した。

補 遺

(1) pure solution theory

水溶液が凍結する際、溶質の存在のために氷点降下が生ずるが、氷点まで温度が下がると全部の溶液が凍結するわけではなく、氷点の温度ではじめて部分的に氷結晶の析出が開始される。このとき、溶質は氷結晶に取り込まれないとすると、排斥された溶質のために残りの溶液は濃度が増加し、氷点降下はさらに大きくなる。このため、温度がさらに下がるまで凍結は進行しない。温度が下がると、氷結晶の析出が再開され、同様な過程が繰り返される。溶液の凍結中には、このような過程が連続的に生じているとする考え方である（文献 15）参照。

(2) 塩分による凍土中の不凍水の計算方法

間隙水に塩分を含む土が凍結するとき、間隙水の凍結は pure solution theory に従うと考える。pure solution theory によれば、水溶液が凍結する際、凍結が進み氷結晶が析出するに伴い、残りの溶液の濃度は増加する。濃度がどこまで増加するかは温度により定まり、図-27 に示す状態図（濃度-温度）で凝固点曲線（曲線 OABC）上の点で表わされる。間隙水の塩分濃度が C_1 である土を考えると、初期濃度 C_1 の溶液は温度が θ_1 に下がるまでは濃度 C_1 の溶液のままであるが、さらに温度が下がると濃度は凝固点曲線によって増加する。温度が θ_2 になれば濃度 C_2 の溶液と純水になる。どれだけの割合が濃度 C_2 の溶液で残るかは、溶質の量が一定であるから簡単に計算できる。この割合に含水比を乗

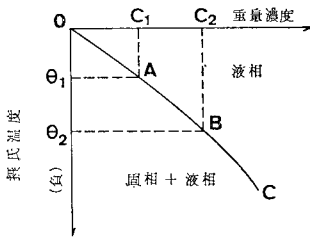


図-27 塩水溶液の状態図（濃度-温度）

じて、不凍水分比すなわち土粒子乾燥重量 100 g 当たりの塩分による不凍水量が計算される。

参 考 文 献

- 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，No. 302, pp. 79~88, 1980.
- 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：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，第 3 部，pp. 466~467, 1978.
- 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純・赤見坂 裕：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講演集，pp. 669~672, 1979.
- 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純：コンクリート状粘土凍土の一軸圧縮強度，第 15 回土質工学研究発表会講演集，pp. 665~668, 1980.
- Tsytoich, N.A.: The Mechanics of Frozen Ground (translated from the Russian), McGraw-Hill Book Co., p. 148, 1973.
- Kaplar, C.W.: Some Strength Properties of Frozen Soil and Effect of Loading Rate, CRREL, Special Report, No. 159, 1971.
- 井上正則・木下誠一：凍土の圧縮強度と動的性質，低温科学，物理篇，No. 33, pp. 243~253, 1975.
- 東 晃：氷の力学的性質，固体の流動（上田誠也編），東海大学出版会，pp. 175~201, 1974.
- Haynes, F.D.: Strength and deformation of frozen silt, Proc. 3rd International Conference on Permafrost, Vol. 1, pp. 655~661, 1978.
- 生頼孝博・高志 勤・山本英夫・岡本 純：土の凍結に伴う析出氷晶の一軸圧縮強度（第 2 報），第 15 回土質工学研究発表会講演集，pp. 657~660, 1980.
- 近藤泰夫・坂 静雄監修：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，p. 276, 1965.
- 日本冷凍協会：冷凍空調便覧，pp. 120~121, 1963.
- Anderson, D.M. and A.R. Tice: Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements, Highway Research Record, No. 393, 1972.
- Fletcher, N.H. (前野紀一訳)：氷の化学物理，共立出版，pp. 144~173, 1974.
- Banin, A. and D.M. Anderson: Effects of salt concentration changes during freezing on the unfrozen water content of porous materials, Water Resources Research, Vol. 10, No. 1, pp. 124~128, 1974.
- Yong, R.N., C.H. Cheung and D.E. Sheeran: Prediction of salt influence on unfrozen water content in frozen soils, Proc. 1st International Symposium on Ground Freezing, pp. 87~101, 1978.
- 片岡哲之・緒方信英・安田正幸・武井光男：凍結土の力学的特性（その 3），第 15 回土質工学研究発表会講演集，pp. 661~664, 1980.

(1980.8.20・受付)