

土の間隙水の粘性増加による凍上抑制に関する実験的研究

DECREASE OF FROST HEAVE AMOUNT BY INCREASING
THE VISCOSITY OF PORE WATER

高 志 勤*・生 頼 孝 博**・山 本 英 夫***

By Tsutomu TAKASHI, Takahiro OHRAI and Hideo YAMAMOTO

1. 緒 言

土が凍結するときに生じる凍上現象は、ソ連・カナダ等の寒冷地域、LNG 地下タンク等の低温構造物、あるいは地盤凍結工法等に共通する困難な諸問題をひき起こす。したがって、凍上機構の解明と並行して凍上抑制方法の確立に対しても多くの研究がなされてきた。

一般に、砂のような比較的粒径の大きな土では、凍結中排水を伴って凍結しほとんど凍上しないので、凍上性の土の置換に用いられ、飛行場の滑走路や道路建設の凍上対策として成果を上げている。

一方粘性土のように細粒成分を多く含む土では、凍結中にまわりから水分をよび込み大きく凍上することが知られている^{1), 2), 10), 16)}。すなわち、凍上は土がもともと保持している水分の凍結によるものだけではなく、凍結中の水分移動に大きく支配されているのである。したがって、なんらかの方法で間隙水の移動を減少させることができるならば凍上を抑制することができるはずである。Lambe²⁾は、土の凍結による水分移動を抑制する方法として土の透水係数を変化させる多くの添加剤を用いその効果および経済性について組織的に実験を行っている。彼の考えの基礎となったのは土の粒径と凍上の関係である。すなわち土の構成粒子が極端に小さいときは吸水能力が大きいが、透水性が小さいため水分を十分吸えなくて凍上はそれほど大きくならず、また先述したように、粒径の大きい砂や礫では吸水能力そのものが小さいためにほとんど凍上しないから、結局凍上しやすい最適の粒径範囲があるといっている (Beskow⁴⁾, Penner⁵⁾)。粒径と透水係数は関係があるから、このことは透水係数と凍上についても定性的にあてはまることになる。彼

は、凍上性の土に対して団粒化剤を添加してみかけの粒径を大きくして粗粒土のように、逆に分散剤を用いて構造を分散させ細粒土のようにして実験を行い、特に後者の方が効果のあることを報告している。大野¹⁾はポリビニールアルコール (PVA) の変成物を、Nersesova³⁾ は多価陽イオンをそれぞれ団粒化剤として用い凍上抑制効果のあることを報告している。Lambe, 大野, Nersesova らの方法は、凍結対象土の前処理が必要であることや、土の氷点が低下するために、地中深く土を凍結して凍土を構造物として利用する凍結工法や LNG 貯蔵用地下タンク等には適用困難な場合が多い。

一方、高志ら^{6), 16)}は、同じ土であっても透水係数が減少すればするほど凍上も減少することを解析的に示した。このことは、透水係数そのものは減少しなくても動水抵抗が増加すれば、効果的に凍上を抑制する可能性を示している。Lambe, 大野, Nersesova らの方法のように直接土粒子に働いて透水性を変えるのは煩雑な方法を必要とするが、間隙水の粘度を高めることによっても同様の効果が期待できる。このような観点に立脚して、凍結中凍結面に吸い寄せられる水分に粘性を与え凍上に与える影響を室内実験で調べた結果を上記諸報告と比較してみると、その凍上抑制効果が非常に顕著であることが明らかとなった。そのうえ、本方法では間隙水そのものの粘性が大きいため、地盤中の凍上の著しい部分に優先的に多くの間隙水が移動し、いわば患部に薬をよびよせる効果も大きいことがわかった。

本論文はすでに公表した中間報告^{7)~9)}を整理して、増粘剤の選定、補給水の粘度と凍上の関係および土の間隙水を完全に粘性液に置換した理想的な状態における凍上抑制効果を示すとともに、長期間地盤の凍結-解凍が繰返される場合を考慮して、間隙水の粘度増加による凍上抑制効果の経時変化についても報告する。

* 正会員 理博 (株) 精研 専務取締役

** 正会員 (株) 精研 技術研究所

*** 正会員 (株) 精研 技術研究所

2. 間隙水粘度増加のための添加剤

増粘剤としては、天然糊料（ガム、海藻類等）、半合成糊料（繊維素誘導体、加工澱粉等）、合成糊料（ビニール系やアクリル系等のポリマー）がありその数は非常に多い。

上記目的に沿う増粘剤としては、

- 1) 水に可溶性であり、少量で高粘度が得られるもの
- 2) 安価なもの
- 3) 非公害性であるもの
- 4) 添加による土の氷点降下の少ないもの
- 5) 地盤中で安定なもの

等を検討して選定する必要がある。

天然糊料は、比較的高価であり、水への溶解に煩雑な方法を必要とするものが多い。合成糊料は公害性が問題になる。半合成糊料のうち繊維素グリコール酸ナトリウム（ $RnOCH_2COONa$ ）、いわゆる CMC とよばれる繊維素誘導糊料は、水によく溶け、市販のものは 1% 水溶液で 10~10 000 cps の粘度が得られ、比較的に安価で高粘度が得られる。また、高分子化合物であるため、分子量が大きく 1% 溶液でもほとんど氷点降下を起さない。しかも、CMC は食品添加剤として広く用いられており毒性のないことが確かめられている。したがって、CMC は上述の条件 1)~4) をほとんど満足している。その他メチルセルローズ（MC）も同じように適当な増粘剤と考えられるが、本実験では CMC を用いることにした。

問題となるのは CMC の地盤中の安定性である。CMC は、土中において微生物によって分解され粘性を失う。また、酸性および 2 価の金属塩に対しても反応し粘性を失うことが知られている。CMC のエーテル化度（置換度）は、ブドウ糖 1 単位につき理論的には 3 まで可能であるが、市販品の多くは 0.5~1.0 のものが普通である。このエーテル化度が 0.8 以上になると耐酸、耐塩性が強くなる。したがって、土木ボーリングにおける循環泥水に用いられる CMC は、エーテル化度が大きいものに防腐剤を添加して耐酸、耐塩、耐微生物性を強化したものである。本実験でも、エーテル化度が大きく、1% 溶液で約 160 cps（水の 160 倍）になる CMC を用いることにした。CMC 溶液の土中での粘度劣化および防腐剤の添加の効果も調べたので実験結果の項で述べる。

3. 実験の概要

実験は次の 4 つのシリーズとそれに付随した 2 つからなり、装置、方法および土の状態もおおの異なる。

Ser. 1 土に上載荷重がない場合、補給水の粘度を变

化させ、凍上量と補給水粘度の関係を調べる。寒冷地域の自然凍結や地表面付近の凍結の凍上抑制に関係する。

Ser. 2 土が載荷状態にある場合の補給水の粘度と凍上の関係を調べる。これは地中での凍結による凍上抑制を目的としている。

Ser. 3 土が載荷状態で、補給水および土の間隙水の粘度を高めた場合の凍上量の減少を調べる。これは、土を理想的に改良した場合の凍上抑制を目的としている。

Ser. 4 Ser. 2 終了後、供試体を保存し、6 か月後および 1 年後再凍結することによって凍上抑制効果の経時変化を調べる。

付随実験 1. CMC 溶液が土中を流れるときの透水係数の推定。

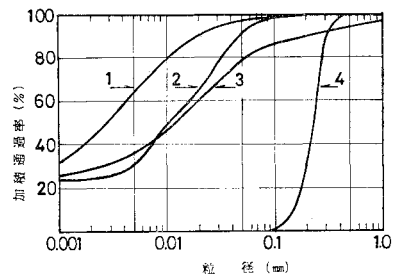
付随実験 2. 土の混入した CMC 溶液の粘度劣化の程度を調べる。

(1) 試料土

試料土の諸定数を表-1、粒度分布曲線を図-1 に示

表-1 試料土の諸定数

	単位	廻橋粘土		藤の森粘土	豊浦砂
		A	B		
粒度特性	砂・シルト %	2.0	3.5	16.5	99.5
	粘土 %	34.5	65.5	47.5	0.5
	粘粒 %	63.5	31.0	36.0	0
コンソシデンション特性	WL %	84.8	63.6	44.5	—
	WP %	43.7	36.6	23.27	—
	IP %	41.1	27.0	21.23	—
土粒子比重	G_s	2.662	2.657	2.679	2.64
含水比	w	84.4	54.4	28.7	25.5
湿潤密度	γ_t	1.496	1.657	1.917	1.97
空隙比	e	2.281	1.476	0.799	0.682
飽和度	S_r	98.5	97.9	96.3	98.7
比表面積	S	136.2	42.0	13.8	0.23
透水係数	k	4.2×10^{-6}	6×10^{-5}	5×10^{-5}	9.85×10^{-4}
凍上に関する定数	ϵ_0	0.00555	—	0.0062	—
	σ_0	0.0774	—	0.0228	—
	U_0	67.1407	—	21.208	—
	n_f	0.494	—	0.222	—



1. 廻橋粘土-A 2. 廻橋粘土-B
3. 藤の森粘土 4. 豊浦砂

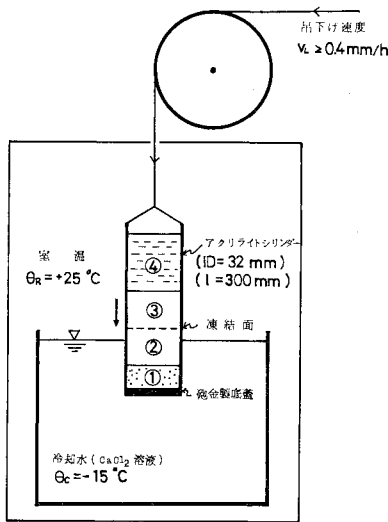
図-1 試料土の粒度分布曲線

す。表-1 中、含水比、湿潤密度、間隙比および飽和度は、CMC を添加したものと無添加のものとは少し異なるため、無添加供試体の平均値で示しておいた。

組橋粘土-A および B は、東京都九段下組橋で GL-9m 付近から採取したもので、地質学的には洪積世の上部東京累層に位置する。比較的硬質ではあるが、含水比、空隙比ともに大きく凍上性の土である。採取位置が少し異なるため、おのおのを組橋-A、組橋-B と分類した。藤の森粘土は、京都市伏見区で採取され粉碎して風乾状態で市販されているものである。凍上性は組橋粘土より小さいが、20 μ 径以下が 30% 以上あり、いずれにしても凍上性の土である。豊浦砂は、非凍上性の土であるので凍上実験には用いず、CMC 溶液の土中を通過するときの透水係数を予測する実験に用いた。

(2) 実験装置および方法

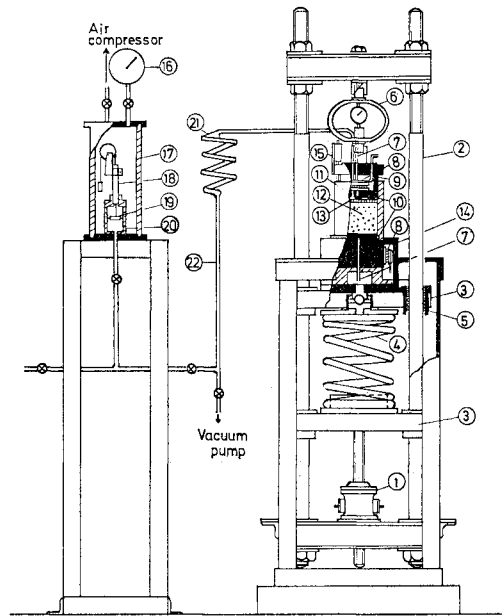
Ser. 1 の実験に用いた装置を図-2 に示す。この装置は、試料を収納した容器を +25°C の室から -15°C に冷却された CaCl₂ 溶液中に一定速度で沈めながら凍結を行うもので、吊り下げ速度 $v_L \geq 0.4$ mm/h が得られる。この場合、上載荷重は土の自重だけでほぼ零である。試料容器は、内径 32 mm、長さ 300 mm のアクリライトシリンダーに砲金製の底蓋を取り付けたもので、下から順に豊浦砂を 30 mm、組橋粘土-A を不攪乱のまま円筒上に整形したものを 90 mm、凍結中土が吸い込む補給水に蒸溜水あるいは濃度を調整した CMC 溶液を 150 mm 入れ全長が 270 mm になるように収納されている(写真-1 (a))。シリンダー内壁には試料土との摩擦を減ずるためシリコングリースが塗布されている。容器



1. 砂 2. 凍結土 3. 未凍結土 4. 補給水
図-2 吊り下げ凍結装置模式図

が -15°C の CaCl₂ 溶液に接した時点で約 30 mm までは凍結が速く進行し、それ以後はほぼ一定速度で凍結が進行する。凍上は凍結速度に依存するから¹⁰⁾、試料土中を一定の凍結速度で進行することが望ましい。供試体下に非凍上性の砂を入れたのはこのような理由からである。

Ser. 2~4 に用いた装置は、試料に載荷した状態で凍結中ポーラスプレートを通して水の出入りが自由に行える開式 (open type) の凍上実験装置である(図-3)。試料土 (12) を直径 10 cm、高さ 5 cm に整形して内径 10 cm のアクリライトシリンダー (11) に収納し、下端の冷却板 (14) に固定する。系全体をあらかじめ準備してある CMC 溶液か、あるいは蒸溜水で飽和させた後、0°C に予冷し、載荷および冷却による供試体の体積および水分移動の変化が完了するまで放置した。その後、凍結中凍結速度が一定になるように冷却板温度をプログラム調節し¹⁰⁾、他端のピストン型冷却部 (9) 温度を 0°C に保ったまま凍結を行う。上載荷重 σ はばね (4) によって与え、 σ および凍結速度 U は試料土が凍結中吸水型になるよう



- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. 荷重調節ジャッキ | 12. 試料 |
| 2. 支柱 | 13. ポーラスプレート (多孔板) |
| 3. ガイドアーム | 14. 冷却板 |
| 4. スプリング | 15. 凍上変位測定用差動変圧器 |
| 5. スライドベアリング | 16. 圧力ゲージ |
| 6. 荷重計 | 17. 加圧用器 |
| 7. 測温抵抗体 | 18. 水分移動測定用差動変圧器 |
| 8. 電子冷却モジュール | 19. フロート (浮子) |
| 9. ピストン | 20. 外部水槽 |
| 10. シール | 21. フレキシブル管 |
| 11. アクリル製シリンダー (試料室) | 22. 配管 |

図-3 開放型凍上実験装置

に選定した。今回の実験では加圧タンクを使用しなかったため、補給水槽は常に大気圧の状態にある。図-2, 3 に示した装置では、凍結が下から上に行進し、自然凍上とは方向が逆になっている。このような両者の違いについては、凍結方向が逆の2台の実験装置により予備実験を行った結果、両者に差がないことを確認している。Ser. 2 では、試料に組橋粘土-A を不攪乱のまま用い、 $\sigma=2 \text{ kg/cm}^2$ 、 $U=1 \text{ mm/h}$ で補給水に蒸留水を用いて凍上率 (=凍上量/凍結前供試体体積) が一定になるまで凍結-融解を繰り返し、次に所定の CMC 溶液を補給水に用いてやはり凍上率が一定になるまで凍結-融解を繰り返し両者の凍上率を比較した。おのおの凍結実験において、凍結完了時試料土の平均温度が少し異なる。したがって、凍結完了後の不凍水の凍結による膨張量 (2次膨張量) も異なる。これをそろえるため、凍結完了後冷却板温度を -10°C にして凍上が収まるまで放置した。その後、解凍を開始し、解凍沈下の収まるまで放置し、これを凍結-解凍の1サイクルとした。1サイクルに要する時間は約 70 時間であった。Ser. 3 では気乾燥した組橋粘土-B および藤の森粘土を乳鉢でときほぐしたものに蒸留水あるいは CMC 溶液を加えて練り返し、直径 11 cm のシリンダーに詰め、 4 kg/cm^2 で約 3 日間圧密後整形して実験を行った。補給水には試料練り返し時に用いた CMC 溶液を用いた。上載荷重は、組橋粘土で $\sigma=2 \text{ kg/cm}^2$ 、藤の森粘土は $\sigma=1 \text{ kg/cm}^2$ 、凍結速度は両者とも $U=1 \text{ mm/h}$ になるようにした。Ser. 4 は Ser. 2 の実験終了後装置から取り外した供試体を、約 6 か月および 1 年保存し、再度装置にセットして凍結を行い、保存前後の凍上量を比較した。

4. 実験結果および考察

(1) CMC 溶液が土中を通過する場合の透水係数

組橋粘土のように透水係数の低い土のその測定は、水面に空気圧を与える変水位法、または、圧密試験によって行われているが、不攪乱のままたとえば 1.5% CMC 溶液 (約 980 cps) が通過するような場合には非常な困難を伴うので、ここでは豊浦砂を用いて変水位法で測定して CMC 溶液の土中を通過するときの透水係数 k を推定した。

図-4 は、0.1% (6.7 cps) CMC 溶液を用いたときの透水係数の経時変化を示したものである。蒸留水の場合は、時間に無関係で一定であるが、CMC 溶液の場合、図より明らかなように時間とともに減少する。この理由は次のように考えられる。CMC は、溶液中では糸状の分子が散在して構造粘性を示し、1分子の長さは 10^{-3}

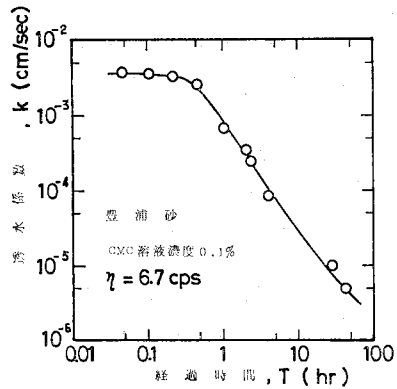


図-4 CMC 溶液が通過する場合の透水係数の経時変化

mm 前後である。一方、土の空隙径は、大きさおよび形の異なったものの集合であるが、平均としては、単位体積当りの表面積を S_T 、空隙率を n とすると、

$$r = \frac{n}{S_T} \dots\dots\dots (1)$$

として与えられる¹¹⁾。比表面積 S_g は乾燥土 1g 当りの表面積であるから、土粒子比重を G_s とすると、

$$S_T = (1-n)G_s S_g$$

$$\therefore r = \frac{e}{G_s S_g} \dots\dots\dots (2)$$

表一-1 の諸定数を用いて計算すると、

- 組橋粘土-A : $r=6.29 \times 10^{-6} \text{ mm}$
- 組橋粘土-B : $r=1.32 \times 10^{-5} \text{ mm}$
- 藤の森粘土 : $r=2.16 \times 10^{-5} \text{ mm}$
- 豊浦砂 : $r=1.12 \times 10^{-3} \text{ mm}$

となり、大雑把な算出ではあるが、豊浦砂でも空隙径が CMC 分子とあまり変わらないことがわかる。したがって、CMC 溶液が土中を通過する場合、土に濾過され、その結果目詰り現象を起こし、時間とともに透水係数を低下させると考えられる。この現象は粘土になるとさらに顕著になるであろう。このように、CMC 溶液の場合の透水係数は時間とともに変化するので、CMC 溶液初期の透水係数をとって粘度 η の関係を示したのが 図-5 である。細管内を流れる粘性流体についての Hagen-

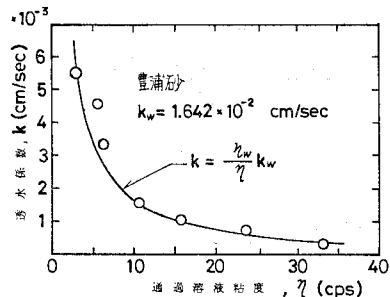


図-5 通過溶液粘度と透水係数の関係

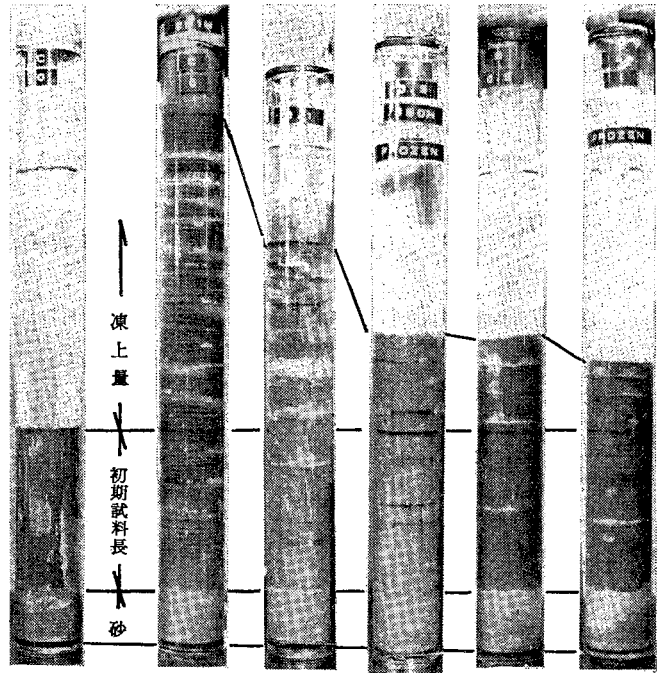
Poiseuille の方程式では、流量は流体の粘度に反比例する関係があることを用いて、同じ媒体中を流れる流体の粘度 η だけが変化した場合の透水係数 k は、

$$k = \frac{\eta_w}{\eta} k_w \dots\dots\dots (3)$$

として与えられる。ここに、 η_w 、 k_w は流体が水の場合の粘度 (20°C で 1 cps) と透水係数である。 $k_w = 1.642 \times 10^{-2}$ cm/sec を用いて計算した結果を図-5 に実線で示すと実験結果と良好な一致を示している。したがって、CMC 溶液の土中を通過するときの透水係数は式 (3) で推定することが可能である。しかしながら、前述したように、 k は経時変化をするから、式 (3) で得た透水係数はその粘度での最大値と理解すべきであろう。

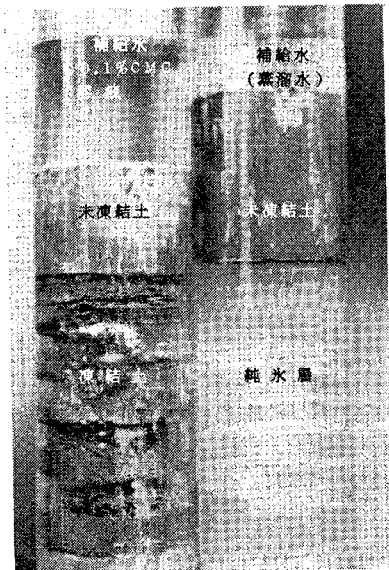
(2) 土が無载荷の場合 (Ser. 1 の結果)

租橋粘土-A は非常に大きな凍上を示す土であるが、補給水に CMC 溶液を用いた場合、凍上量は減少し、大きな凍上抑制効果を示した。写真-1 は、凍結厚み増加速度*が $U_f = 0.8$ mm/h の場合のおのおのの濃度での凍結完了時の状態を示したものである。写真-1 (b) は、補給水に蒸留水を用いたものであるが、非常に大きな凍上を示し、長さ 40 mm の未凍結土を残して容器いっぱいになってしまった。さらに別のシリンダーに移して凍結を継続した結果、写真-2 (右) のように土粒子を含まない純水層が析出し、凍上速度と凍結厚み増加速度がほぼ等しくなり、いわゆる完全凍上現象が発生した。結局、凍結を完了することができなくて、試料長 90 mm に対する凍上率は無限大になる。写真-1 (c) は、補給水に 0.1% CMC 溶液を用いたもので、上部に未凍結土を残しているが、最終的には凍結が完了した。図-6 に凍上率 ξ と補給水粘度 η の関係を示す。 η が 10 cps (約 0.2%) までは凍上率が非常に大きく減少しているが、30 cps 以上ではそれほど顕著ではない。このような状況での凍上抑制に用いる CMC 溶液濃度は極端に大きいものは必要なく、比較的低濃度でよいことがわ



(a) 凍結前状態 (b) 蒸留水 (c) CMC 溶液濃度=0.1%
(d) CMC 溶液濃度=0.3% (e) CMC 溶液濃度=0.5%
(f) CMC 溶液濃度=1.0%

写真-1 補給水粘度増加による凍上抑制効果



左は補給水に 0.1% CMC 溶液を用いたもの、右は蒸留水のもので純水層が析出し完全凍上している。

写真-2 完全凍上

* 土の凍結速度は、凍結面が未凍結土中に進入する速度 U と、凍結厚み増加速度 U_f が用いられている。単位時間 dt に凍結する未凍結土長を ΔH 、凍上量を Δh とすると、

$$U = \frac{\Delta H}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

$$U_f = \frac{\Delta H + \Delta h}{dt} = U + v_h \dots\dots\dots (5)$$

なる関係がある。ただし、 v_h は凍上速度である。吊り下げ試験装置は $U_f = \text{const.}$ 、凍上試験装置は $U = \text{const.}$ で凍結を行うものである。

(3) 土が载荷状態にある場合 (Ser. 2 の結果)

土が载荷状態で補給水に 5 種類の濃度の CMC 溶液を

かる。

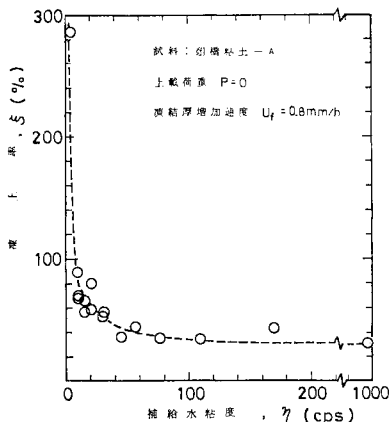


図-6 土が無載荷の場合の凍上率 ξ と補給水粘度 η の関係

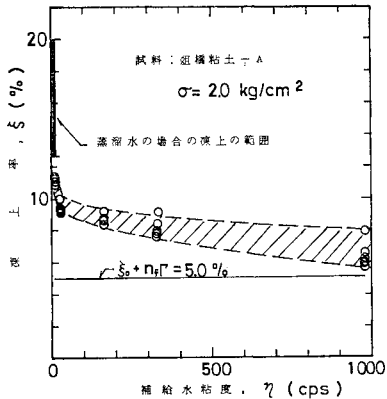


図-8 土が載荷状態の場合の凍上率 ξ と補給水粘度 η の関係

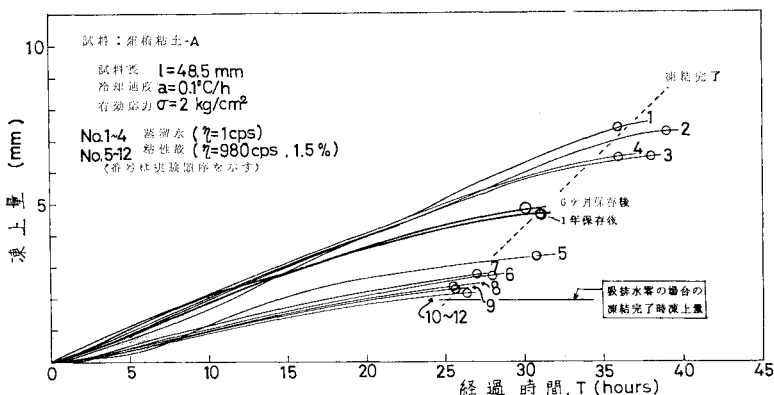


図-7 繰返し凍結による凍上の経時変化

する。解凍時には排水しながらもとの体積に戻るが、間隙水は一部 CMC 溶液に置換しているはずである。したがって、凍結を繰り返すことによって間隙水は徐々に CMC 溶液に置き換わり、しかも 4. (1) で述べたように、粗橋粘土-A の動水通路径が CMC 分子に対してかなり小さいものであるため目詰り現象を起こし、さらに透水係数が低下して、凍上が抑制されたものと考えられる。

5 種類の濃度の実験について、凍上率 ξ と補給水粘度 η の関係を 図-8 に示す。

用いた実験を行いその 1 例を 図-7 に示す。水分の移動はすべて吸水型であった。補給水濃度は 1.5% (980 cps)、凍結速度は 1.4~1.8 mm/h であった。

粗橋粘土-A は、凍結-融解を繰り返すと体積は減少し凍上量も減少するが、だいたい 5 回前後で凍結挙動に再現性を有するようになる。一般に土丹とよばれる先行応力の大きい粘土やシルトを除いて凍上性の土は、凍結-融解の繰り返しに対して再現性に乏しいが、いずれは凍結-融解を繰り返すことによって再現性を有するようになると思われる。図-7 の例では補給水に蒸留水を用いて 4 回凍結を繰り返し、凍上がほぼ一定になったことを確認して、その後 CMC 溶液を用いて凍結を行い凍上を比較しようとしたものである。しかしながら、CMC 溶液を用いた場合でも凍結を繰り返すことによって徐々に凍上量が減少している。これは他の 4 種類の濃度の実験についても同じ傾向を示している。CMC 溶液を用いた場合の減少の原因については次のように考えられる。試料土の空隙は、最初水で満たされているが、凍結することによって外部の CMC 溶液を吸い込んで凍上

て、凍上率 ξ と補給水粘度 η の関係を 図-8 に示す。斜線部分は、繰返し凍結による凍上量の減少の範囲を表している。また、図-9 は各濃度における最終の凍上の経時変化を示したものである。完全に水分移動を抑制した場合には、凍上率 ξ_c は土の自由水による凍結膨張と凍結後不凍水による 2 次膨張の和になるから¹⁰⁾,

$$\xi_c = \xi_0 + n_f \Gamma \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここに、 ξ_0 は 2 次膨張率、 n_f は自由水含水率、 Γ は水の凍結膨張率である。粗橋粘土-A は $\xi_c = 5.0\%$ であるので、1.5% CMC 溶液を用いたものはほとんどその値にまで凍上が減少し、土が載荷状態でも凍上は十分に抑制されることがわかる。また、図-9 中に破線で示した凍結完了時間は、凍上量が減少すればするほど短くなっている。凍上を抑制することは、凍結中の吸水量を抑えることであるから、同一冷却条件であるならば、当然熱負荷が減少し凍結が速く進行することがわかる。

(4) 土の間隙水粘度を調整した場合 (Ser. 3 の結果)

供試体作成時の圧密から得られた $e \sim \log P$ を 図-10

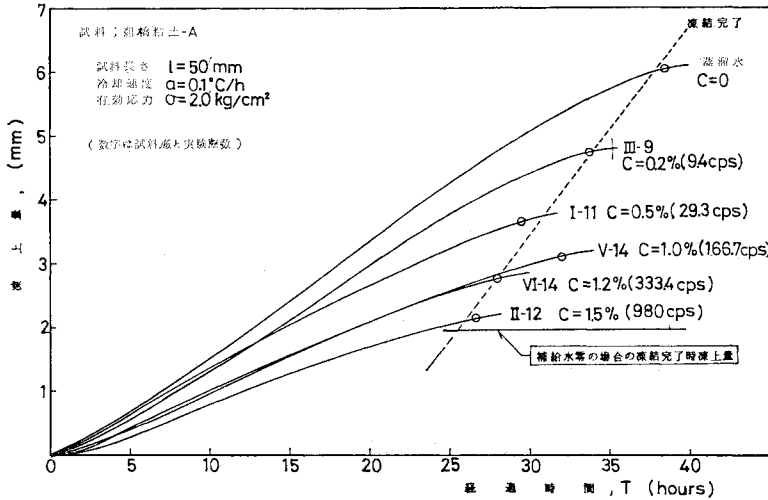


図-9 各濃度の最終凍上経時変化

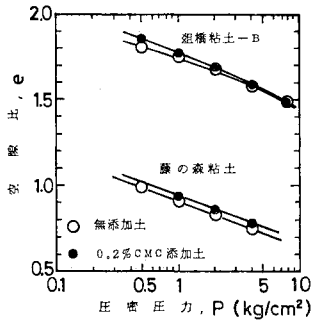


図-10 $e \sim \log P$

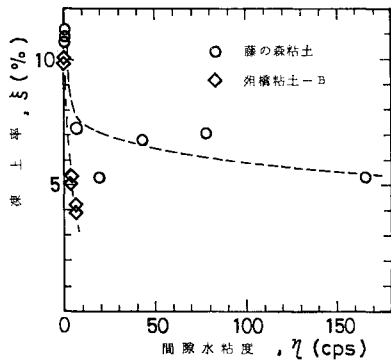


図-11 間隙水粘度と凍上率の関係

に示す。両方の試料土とも同じ荷重での空隙比は CMC を用いたものとあまり変わらない。圧密中の排水の粘度を測定すると水のそれとほぼ同じであった。このことから圧密過程で CMC 分子が土中に取り残されたことがわかる。ただ繰り返し時に濃度の大きい CMC 溶液を用いた場合、特に組橋粘土-B では団粒化が激しく、低濃度の場合と状態が明確に異なるため最大 0.2% までとした。

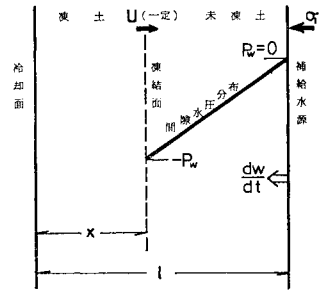


図-12 凍結面模式図

これら圧密供試体についての実験結果を 図-11 に示す。凍結中すべて吸水型の凍上を示した。凍結速度は組橋粘土-B で $U=1.4 \text{ mm/h}$ 、藤の森粘土で 1.69 mm/h であった。間隙水の粘度増加に伴い凍上量は減少し、特に組橋粘土-B では顕著である。補給水のみで CMC 溶液を用いた場合より低濃度で効果を表していることがわかる。

高志ら⁹⁾は、未凍結土の動水抵抗による凍上量の減少を 図-12 のようなモデルで解析している。長さ l なる土が補給水源に接して、凍結面に直角に有効応力 σ_1 が働いている土中を U という一定速度で凍結面が進行する場合を考えると、 U が一定でも σ_1 の大きさによって吸水量に変化が生じ、その結果として未凍結土の動水抵抗のため吸水が防げられ、凍結面付近では間隙水圧の低下 $-P_w$ が発生し、凍結面における有効応力は $(\sigma_1 + P_w)$ になる。この応力増加を考慮して凍上率 ξ および吸排水率 ξ_w は次のようになる。

$$\xi_w = \frac{1}{2Ul} \left[\sqrt{(\sigma_1 - Bl)^2 + 4ACl} - \sigma_1 - Bl + \frac{C(2A - B\sigma_1)}{B} \cdot \log \frac{B\sqrt{(\sigma_1 - Bl)^2 + 4ACl} + B^2l + C(2A - B\sigma_1)}{2AC} - C\sigma_1 \log \frac{\sqrt{(\sigma_1 - Bl)^2 + 4ACl} + \frac{2A - B\sigma_1}{\sigma_1}l + C\sigma_1}{2C\sigma_1} \right] \quad (7)$$

$$\xi = (1 + \Gamma)\xi_w + \xi_0 + n_f\Gamma \quad (8)$$

ここに、

$$A = \frac{U}{1 + \Gamma} \sigma_0 \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right)$$

$$B = n_f \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} U$$

$$C = \frac{k}{r_w}$$

ξ_0 , σ_0 , U_0 , n_f は土の凍上に関する定数、 Γ は水の凍結膨張率、 r_w は水の単位体積量である。式 (7) は k を

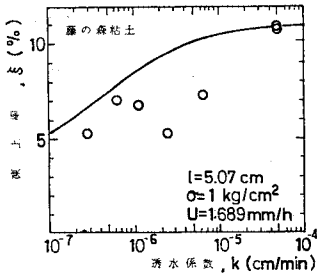


図-13 凍上率と透水係数の関係

表-2 凍上抑制効果の持続性—組橋粘土-A

試料 No.	補給水の CMC 濃度 (%)	蒸留水の場合の凍上 (mm)		CMC 溶液の場合の凍上 (mm)		半年保存試料の凍上 (mm)		1年保存試料の凍上 (mm)	
		最大	最小	最大	最小	凍上量	指数	凍上量	指数
1	0.5	14.35	7.08	4.71	4.17	5.60	0.62	6.48	0.25
2	1.5	10.51	6.74	3.80	2.59	5.37	0.47	4.96	0.61
3	0.2	8.02	5.40	5.10	5.00	5.80	-1.33	5.43	-0.1
4	1.0	10.23	7.27	4.39	4.04	5.61	0.58	5.98	0.45
5	1.2	9.29	6.41	4.32	3.64	5.66	0.36	5.86	0.26

パラメーターに含んでおり、間隙水の粘度増加による透水係数を式 (3) から推定して、計算した結果を図-13 に示す。データは計算値よりすべて小さくなっている。計算に用いた透水係数は、先に述べたように、CMC 溶液が通過する場合の初期値であるが、試料長が約 50 mm であるから凍結がほぼ 30 時間継続するので、 k は時間とともにかなり低下するものと考えられる。また、試料繰り返し時のある程度の団粒化も加わってこのような大きな抑制効果を示したものと考えられる。

(5) 凍上抑制効果の持続性について (Ser. 4 の結果)

Ser. 2 終了後の保存試料の実験結果を表-2 に、凍上の経時変化を図-7 に示す。保存試料については補給水に蒸留水を用いている。表中の凍上量は、凍結完了後 2 次膨張をそろえるため -10°C にしたときの値である。

Ser. 2 の実験終了後保存する前に補給水に蒸留水を用いて凍結を行ったが、凍上は CMC 溶液の場合の最大値とほぼ同じ値であった。これは、試料土の空隙がほぼ CMC 溶液で置き換わり、さらに、CMC 分子で目詰り現象を起こして、試料土が改良されているため、このような凍上抑制効果の保存の程度を表すために次のような相対指数 I_r をとって整理してみた。(表-2)。

$$I_r = \frac{\text{（蒸留水の場合の凍上量の最小値）} - \text{＜保存試料の凍上量＞}}{\text{（蒸留水の場合の凍上量の最小値）} - \text{＜CMC 溶液の場合の凍上量の最大値＞}}$$

$I_r=0$ の場合は抑制効果の維持がまったくなく、 $I_r=1$ の場合は完全に効果が保存されたことを示す。半年後には効果が約 1/2 まで劣化するがその後の半年では劣化はあ

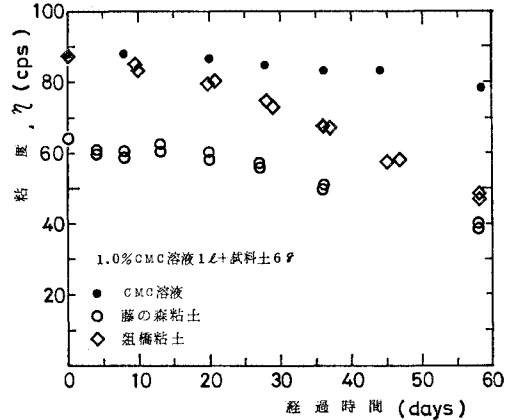


図-14 土が混入した CMC 溶液の粘度低下の経時変化

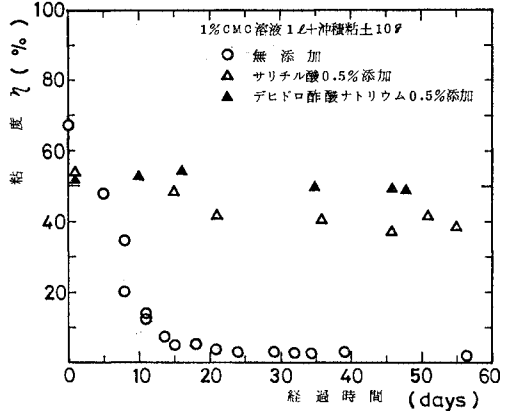


図-15 粘度低下に対する防腐剤の効果

まり進行しないようである。

CMC 溶液の粘度の劣化をさらに詳しく調べる目的で、1% CMC 溶液 1 l 中に 6 g の湿潤試料を入れ充分攪拌した後の粘度低下の経時変化を調べ図-14 に示す。CMC 溶液だけでも粘度は時間とともに低下する。2 つの土の初期の粘度は異なるが、低下速度は組橋粘土の方が大きく、60 日後では 50% の粘度になっている。CMC 溶液の粘度の低下は土質によって明らかに異なり、大阪市城東区で採取された沖積粘土の場合、20 日前後でほぼ水の粘度にまで低下してしまった例がある。CMC 溶液の粘度低下の原因は前述したようにいろいろあるが、ここでは微生物によるものに着目して 2 種類の防腐剤 (デヒドロ酢酸ナトリウム、サリチル酸) を添加して粘度低下を調べたところほとんど劣化しないことがわかった (図-15)。これら防腐剤を現地盤に用いる場合、公害性を十分検討する必要がある。

5. 結 言

本研究は土が凍結するときに発生する凍上を抑制する

目的で、土の動水抵抗に着目して、凍結中凍結面に吸い寄せられる水分の粘度を人工的に高めることによってその凍上抑制効果を室内実験で調べたものである。得られた結果を列挙すると次のようになる。

(1) 土の間隙水の増粘剤としては、経済性、公害性等を検討した結果、微量で高粘度が得られる CMC が適当である。

(2) CMC が土中を流れるとき、水に比べると粘度の増加率以上に透水係数を減ずることができる。

(3) 土の載荷状態を問わず補給水に CMC 溶液を用いた場合には、粘度が増加すると凍上量が減少し、特に地表面近くの凍結のように上載荷重がほとんどない場合には、低濃度 (0.2~0.3%) で大きな凍上抑制効果が得られる。

(4) 土の間隙水および凍結中系外から吸い寄せる水分ともに粘度を高めた理想的な状態では、透水係数の減少から計算される以上に凍上が抑制される。

(5) 間隙水の粘度増加による凍上抑制効果の保存はある程度期待できる。また、CMC 溶液の土中での粘度劣化があるが、防腐剤の添加によって防ぐことが可能である。

以上のように間隙水の粘度増加によって凍上を抑制することが可能であることが明らかとなった。しかしながら、この方法は凍上性の土が凍結するときの吸水量を抑制するものであって、土がもともと保持していた水分の凍結による凍上までは抑えることができないことを記しておかねばならない。現地盤でも、われわれが従事している地盤凍結工法で凍上が非常に問題となる工事に用いられ効果のあることが報告されているが^{12), 13)}、さらに凍上が問題となる場合、他の方法、たとえば真空脱水等と併用して用いることが望ましい。また、CMC を添加した場合の凍土の強度が問題となるが、破壊強度は無添加のものと同様ならず、逆に濃度によっては強くなる場合もあることが明らかになっている^{14), 15)}。さらに、適用地盤、CMC の土中への添加方法等が検討されて徐々にこの方法が確立されることを期待する。

最後に、CMC について助言いただいた日本化学機械製造(株)前川宗三氏、実験に協力いただいた(株)精研 研究課 野木 明氏、岡本 純氏、松浦多貴子嬢に感

謝の意を表す。

参考文献

- 1) 大野武敏：凍上と凍上防止剤，低温科学，物理編，Vol. 19, pp. 225~230, 1960.
- 2) Lambe, T.W.: Modification of frost-heaving of soils with additives, H.R.B. Bull. 135, pp. 1~23, 1956.
- 3) Nersesova, Z.A.: Heave of silty loams and physico-chemical countermeasures against it, Trudy Nil Transstroy, No. 62, 1967.
N.A. Tsytovich: The mechanics of frozen ground, McGraw-Hill Book Co., p. 94 より引用.
- 4) Beskow, G.: Soil freezing and frost heaving with special application to roads and rail roads, The Swedish Geological Society, Series C., 375 (26th Year Book, No. 3), pp. 14~21, 1935.
(Tr. by J.O. Osterburg, Publ. by Tech. Inst., Northwestern Univ., Evanston, Ill., 1947).
- 5) Penner, E.: Particle size as a basis for predicting frost action in soils, Soils Found. Vol. 8, pp. 21~29, 1968.
- 6) 高志 勤・益田 稔・山本英夫：凍上に及ぼす凍結土内の動水抵抗の影響，雪氷，Vol. 38, No. 1, pp. 1~10, 1976.
- 7) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：凍上に及ぼす間隙水の粘性の影響，第 12 回土質工学研究発表会，pp. 1045~1048, 1977.
- 8) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：凍上に及ぼす間隙水の粘性の影響(II)，第 13 回土質工学研究発表会，pp. 1093~1096, 1978.
- 9) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：間隙水の粘性増加による凍上抑制効果の室内実験，第 32 回土木学会年次学術講演会，III-251, 1977.
- 10) 高志 勤・益田 稔・山本英夫：土の凍結膨脹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.
- 11) Yong, R.N. and B.P. Warkentin: 土質工学の基礎，鹿島出版会，p. 338, 1972.
- 12) 高志 勤・戸部 暢・加藤哲治：間隙水の粘性増加による凍上抑制方法の実施工への適用結果について，第 32 回土木学会年次学術講演会，III-287, 1977.
- 13) 田中良治・高宮茂夫・戸部 暢：凍結立坑の一施工例，第 33 回土木学会年次学術講演会，III-251, 1978.
- 14) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純：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.
- 15) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：粘土質凍土の一軸圧縮強度，第 33 回土木学会年次学術講演会，III-248, pp. 466~467, 1978.
- 16) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫：一次元定速度凍結における凍結面前方の間隙水圧と脱水圧密，雪氷，Vol. 39, No. 2, pp. 1~12, 1977.

(1979.2.21・受付)