

一定拘束応力下における飽和土の凍上特性

了 戒 公 利
後 藤 茂
赤 川 敏

§ 1. まえがき

土が凍結するとき、間げき水の移動を伴いながら、熱流方向に膨張することは良く知られている。この膨張量は土の粒度、構造、間げき水の化学的性質等の、もともと土の持っている要因や凍結時の拘束力、凍結速度あるいは熱流等の外的要因によっても変化する。この量を定量的に把握しようとするれば、凍結したもとの土の体積 V に対して凍上により増加した体積 ΔV 、このとき移動した水の量 ΔV_w を知らなければならない。

高志ら¹⁾は凍結膨張率 ξ 、吸排水率 ξ_w を、

$$\xi = \Delta V / V, \quad \xi_w = \Delta V_w / V \quad \dots\dots(1)$$

と定義し、水の出入りを自由にしたまま、一定有効応力 σ のもとで、一定凍結速度 U で供試体を凍結させると、 ξ 、 ξ_w 、 σ 、 U との間に次の実験式が成り立つことを示した。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{u_0}{U}}\right) \quad \dots\dots(2)$$

$$\xi_w = \frac{1}{1+\Gamma} \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) - n_f \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 は実験から求まる土固有の定数、 n_f は自由水容積含水率、 Γ は水の凍結膨張率である。

筆者らは数多くの土質について凍結速度一定式の凍上試験を実施し、土の凍上特性を示す式(2)の ξ_0 、 σ_0 、 U_0 と土の粒径やコンシステンシーとの関係について検討した。その結果、粒度曲線による通過百分率の50%に対応する粒径 D_{50} と $\sigma_0\sqrt{U_0}$ との間に非常に良い相関があることを見いだした。

また、われわれが対象としているLNG地下式貯槽の周囲地盤には、ヒートフェンスと呼ばれる温水パイプや電熱線が設置されている。このヒートフェンスによって貯槽周囲地盤における凍結土の発達を抑制しているために、凍結速度は非常に小さいか、もしくは零になり、熱的に平衡状態になっていることが予想される。このような凍結速度がほぼ零になった後の凍上現象についても、

室内凍上試験で検討した。その結果、凍結速度がほぼ零になった後の凍上量 h と経過時間 t との間に次式が成り立つことを明らかにした。

$$h = \alpha \left\{ 1 - \exp\left(\frac{\beta \cdot \theta_t}{P}\right) \right\} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 α 、 β は正の定数、 θ_t は供試体冷却温度(負温度)、 P は上載圧である。

本報告では、凍上性を示す $\sigma_0\sqrt{U_0}$ と土の粒度およびコンシステンシーとの関係や、ヒートフェンスを再現した室内凍上試験結果について主に報告するものである。

§ 2. 試験に供した試料の土性

§ 4.の凍結速度一定の場合の凍上特性を検討するための試験に用いた試料は合計49種類であり、その内訳は粘性土が25種類、砂質土が24種類である。表-1にそれらの土性値の一覧表を示す。粘性土の中で、C-1、C-2は沖積粘土、C-3~23は洪積粘土であり、不攪乱試料である。C-24、25は採取した試料を攪乱した後、蒸留水を加えて再圧密したものである。いずれの試料も水で飽和されている。

砂質土は攪乱状態で採取した試料に、蒸留水を加えて飽和状態にして試験に供した。

§ 5.の凍結速度がほぼ零の場合の凍上特性を検討するための試験に用いた試料は、表-1に*印を付したS-2、S-22、C-1、C-2、C-12、C-25の6種類である。

§ 3. 凍上試験装置

図-1に凍上試験装置の概念図を、図-2に概要を示す。本装置は荷重を載荷フレーム③にかけることにより試験中一定の荷重を供試体に作用させることができ、そ

土質	試料番号	土粒子の比重	自然状態			コンシステンシー特性			粒度特性				凍上特性						
			含水比 (%)	単位体積重量 (g/cm³)	間げき率 n	液性限界 WL (%)	塑性限界 WP (%)	塑性指数 Ip	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	D ₅₀ (mm)	ξ ₀	σ ₀ (kg/cm²)	U ₀ (mm/hr)	n _f	σ _s √U ₀		
砂質土	S-1	2.727	35.6	1.865	49.6					72	16	12	0.15	0.004	0.002	1560	0.400	0.079	
	※S-2	2.780	26.8	2.020	42.7					60.0	35.5	4.5	0.088	0.0005	0.001	0.56	0.383	0.0007	
	S-3	2.719	25.5	1.771	48.1					78	10	10	0.20	0.001	0.001	1892	0.244	0.043	
	S-4	2.669	19.9	1.68	47.5					76	26	0	0.085	0.0002	0.019	1.0	0.153	0.019	
	S-5	2.664	41.3	1.75	54.0					89	11	0	0.11	0.001	0.006	31929	0.189	0.107	
	S-6	2.614	29.2	1.76	47.9					50	41	9	0.11	0.0025	0.004	272	0.300	0.066	
	S-7	2.702	32.8	1.88	47.6					80	9	11	0.125	0.0025	0.0112	147.4	0.170	0.136	
	S-8	2.618	34.8	1.860	47.2					67	25.5	7.5	0.15	0.004	0.011	407	0.178	0.222	
	S-9	2.653	29.2	1.76	48.7					83.5	14.5	0	0.22	0	—	—	0.267	—	
	S-10	2.665	36.2	1.766	51.3					87.0	13.0	0	0.14	0	0.007	25.0	0.356	0.035	
	S-11	2.646	31.0	1.887	38.9					95.0	5.0	0	0.20	0	—	—	—	0.472	—
	S-12	2.685	35.0	1.843	49.2					95.0	5.0	0	0.26	0	—	—	—	0.383	—
	S-13	2.636	33.4	1.783	49.3					80.0	17.0	3.0	0.17	0.004	0.012	23.4	0.467	0.058	
	S-14	2.675	26.0	1.881	49.3					85.0	14.0	1.0	0.25	0	0.017	5.54	0.378	0.040	
	S-15	2.728	31.8	1.803	49.1					91.0	9.0	0	0.27	0	—	—	—	0.372	—
	S-16	2.663	25.8	1.900	43.3					91.0	5.0	4.0	0.22	0	0.006	25.0	0.406	0.03	
	S-17	2.688	27.5	1.910	44.3					92.0	5.0	3.0	0.23	0	0.002	272	0.356	0.033	
	S-18	2.777	17.5	2.011	38.4					82.0	13.0	5.0	0.25	0	0.002	702	0.533	0.053	
	S-19	2.724	17.5	2.067	35.5					78.0	15.5	6.5	0.18	0	0.004	600	0.289	0.098	
	S-20	2.729	23.5	1.960	40.9					88.0	8.0	4.0	0.24	0	0.004	36.0	0.350	0.024	
	S-21	2.764	19.5	2.040	38.0					85.0	9.0	6.0	0.27	0	0.005	144	0.294	0.06	
	※S-22	2.671	9.5	1.951	37.7					97.0	3	0	0.35	0.0005	0.006	11.67	0.272	0.020	
	S-23	2.759	8.9	2.000	33.5					99	1.0	0	0.24	0	0	0	—	0	
	S-24	2.774	9.2	2.041	32.6					95	5	0	0.36	0.002	0.0025	4.49	0.378	0.0053	
粘性土	※C-1	2.716	39.8	1.774	53.3	42.2	23.2	19.0	27.0	53.5	19.5	0.042	0.008	0.012	2.45	0.356	0.019		
	※C-2	2.719	71.3	1.592	65.8	86.9	39.6	47.3	14.0	49.0	37.0	0.015	0.005	0.034	115.2	0.611	0.365		
	C-3	2.647	58.8	1.620	61.5	68.1	38.1	30.0	6	71	23.0	0.02	0.005	0.010	104	0.678	0.102		
	C-4	2.688	48.7	1.71	57.2	38.2	24.5	13.7	24.2	57.8	18.0	0.038	0.006	0.005	2000	0.375	0.224		
	C-5	2.635	52.9	1.702	58.0	74.0	27.6	46.4	5.0	72.0	23.0	0.015	0.005	0.015	1248	0.444	0.530		
	C-6	2.651	68.1	1.585	64.4	98.8	36.0	62.8	10.0	55.0	35.0	0.009	0.005	0.015	361.0	0.510	0.285		
	C-7	2.679	54.7	1.639	60.5	72.2	22.3	49.9	18.0	51.0	31.0	0.014	0.005	0.044	55.2	0.611	0.327		
	C-8	2.696	58.5	1.54	64.0	52.5	28.4	24.1	38.1	39.9	22.0	0.038	0.004	0.273	0.896	0.156	0.258		
	C-9	2.67	49.7	1.72	56.9	58.6	32.8	25.8	39	40	21	0.034	0.004	0.025	233	0.167	0.382		
	C-10	2.691	59.5	1.671	61.1	120.4	30.9	89.5	19.0	52.0	29.0	0.0014	0.015	0.032	14.06	0.344	0.120		
	C-11	2.600	78.3	1.561	66.3	81.0	38.5	42.5	14.0	33.0	53.0	0.004	0.010	0.340	2.34	0.444	0.520		
	※C-12	2.66	75.3	1.65	64.6	56.2	29.4	26.8	26	48	26	0.02	0.031	0.027	2.19	0.178	0.040		
	C-13	2.626	37.6	1.74	51.9	41.1	23.3	17.8	22.4	61.4	16.2	0.035	0.007	0.035	14.0	0.214	0.131		
	C-14	2.654	36.3	1.727	52.3	38.4	18.5	19.9	18.0	60.0	22.0	0.036	0.006	0.056	20.6	0.367	0.254		
	C-15	2.716	37.7	1.822	51.3	39.0	20.4	18.6	41.0	36.0	23.0	0.048	0.004	0.018	49.0	0.40	0.126		
	C-16	2.698	24.3	2.027	62.3	40.8	19.4	21.4	20.0	61.0	19.0	0.027	0.004	0.012	309	0.447	0.211		
	C-17	2.710	34.8	1.808	50.5	52.0	26.2	25.8	34.0	51.0	15.0	0.042	0.004	0.036	6.04	0.478	0.088		
	C-18	2.749	33.8	1.827	50.3	46.8	27.6	19.2	44.0	41.0	15.0	0.068	0.004	0.025	1.44	0.467	0.03		
	C-19	2.620	34.4	1.802	48.8	57.8	27.7	30.1	47.0	40.0	13.0	0.065	0.002	0.015	196	0.478	0.21		
	C-20	2.632	48.4	1.672	57.2	73.4	39.2	34.0	12.0	65.0	23.0	0.031	0.002	0.025	49.0	0.478	0.175		
	土	C-21	2.720	34.2	1.798	50.7	48.9	28.0	20.9	50.0	34.0	16.0	0.075	0.008	0.020	10.6	0.422	0.065	
		C-22	2.645	29.7	1.815	65.4	41.0	23.7	17.3	23.3	56.7	20.0	0.031	0.003	0.004	4900	0.333	0.28	
		C-23	2.690	27.7	1.834	65.2	59.5	25.7	33.8	27.0	49.0	24.0	0.019	0.009	0.004	7921	0.378	0.356	
		C-24	2.692	66.6	1.605	64.2	35.2	29.3	5.9	33	40	27	0.200	0.010	0.02	1.56	0.287	0.025	
※C-25		2.586	37.4	1.765	50.5	43.1	21.1	22.0	40	46	14	0.053	0.005	0.015	1.63	0.344	0.019		

(注) ※印は §5 の試験にも使用

表-1 土性値一覧表

の最大容量は 2tf である。供試体内の間げき水圧は加圧容器④に空気圧をかけることにより、10 kgf/cm² までの範囲で任意の圧力に保持できる。

供試体の冷却はその上下端に設けたサーモモジュール⑤により電気的に行ない、上端面は +10 ~ -10℃ の範囲

の一定温度で制御でき、下端面はプログラムコントローラーにより +2.5 ~ -22.5℃ の範囲で任意の温度に経時的に変化させることができる。

主な測定項目として凍上量および吸排水量があり、凍上量は差動トランス式の変位計、吸排水量は静電容量式

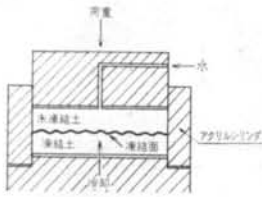


図-1 凍上試験概念図

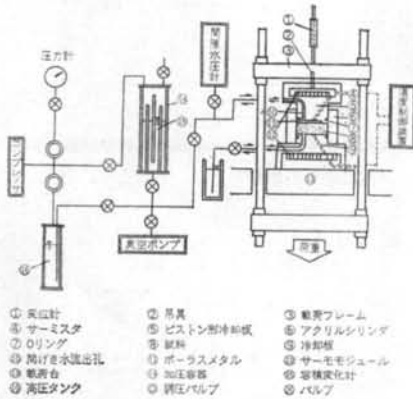


図-2 凍上試験装置

の水位計により測定される。それらの測定結果は、デジタルおよびアナログ式の記録計に集録されるようになっている。

供試体の直径は6cmで一定であるが、高さは10cm程度まで可能である。

なお、供試体の寸法効果を検討するために、直径が30cm、高さが20~40cmの供試体をセットできる大型凍上試験装置も一部使用した。

§ 4. 凍結速度一定の場合の凍上特性

4.1 凍結速度一定のための温度条件

凍結速度 U を一定に保つためには、次に示す温度条件が必要となる。

図-3に凍上試験中の供試体の1次元モデルを示す。経過時間を t 、供試体下面からの距離を x とすると、初期条件は、

$$t=0 \text{ で } x=0 \quad \dots\dots(5)$$

である。

供試体の上下面の温度は、上下面の設定温度 θ_u, θ_l に等しいので境界条件として次式が与えられる。

$$x=0 \text{ で } \theta_1 = \theta_l \quad \dots\dots(6)$$

$$x=l \text{ で } \theta_2 = \theta_u \quad \dots\dots(7)$$

凍結土と未凍結土との境界 ($x=x_f$) の温度は土の凍

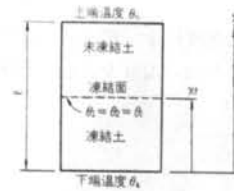


図-3 凍上試験中の供試体モデル

結温度 θ_f に等しいので、

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_f \quad \dots\dots(8)$$

であり、この境界では未凍結土層から侵入する熱流と凍結土層に伝わる熱流の差が凍結進行に使われることから次式が成立する。

$$k_1 \left. \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right|_{x=x_f} - k_2 \left. \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right|_{x=x_f} = L \gamma_1 \frac{dx}{dt} \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 θ_1 : 凍結土内の温度

θ_2 : 未凍結土内の温度

θ_u : 供試体上端温度

θ_l : 供試体下端温度

θ_f : 土の凍結温度

k_1 : 凍結土の熱伝導率

k_2 : 未凍結土の熱伝導率

γ_1 : 凍結土の単位体積重量

L : 土の凍結潜熱

l : 供試体長さ

x_f : 凍結面までの距離

いま、問題を簡単にするために凍結土および未凍結土内の温度が、いずれもそれぞれの層の中での空間座標での1次関数として十分近似できるとすると、次式が成立する。

$$\theta_1 = \frac{\theta_f - \theta_l}{x_f(1+\xi)} \cdot x + \theta_l \quad (0 \leq x \leq x_f) \quad \dots\dots(10)$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_u - \theta_f}{l - x_f} \cdot (x - x_f) + \theta_f \quad (x_f \leq x \leq l) \quad \dots\dots(11)$$

式(10)、(11)を式(9)に代入し、式(5)を考慮して θ_1 について解くと次式が得られる。

$$\theta_1 = \theta_f - \frac{(1+\xi)Ut}{k_1} \left(L \gamma_1 U + k_1 \frac{\theta_u - \theta_f}{l - U t} \right) \quad \dots\dots(12)$$

凍結の終了時間を $t_f (=l/U)$ とすると、式(12)で $\theta_u \approx \theta_f$ の場合、

$$\lim_{t \rightarrow t_f} \theta_1 = \pm \infty \quad \dots\dots(13)$$

となるため実験が不可能となる。よって上面温度は、

$$\theta_u = \theta_f \quad \dots\dots(14)$$

としなければならない。この条件を式(12)に代入すると、

下面温度は、

$$\theta_2 = \theta_f - \frac{L \gamma_1 (1+\xi) U^2}{k_1} t \quad \dots\dots(15)$$

となる。

以上により、凍結速度 U を一定になるように試験を実施するためには、上下面の温度を式(4)、(5)の温度で制御する必要がある。

4.2 試験方法

試験は水の出入りを自由にしながら、一定上載圧のもとで供試体下端面を一定冷却速度で冷却することにより一定凍結速度で供試体を凍結させ、供試体の凍上変位と凍結時間から凍結膨張率と上載圧および凍結速度との関係を求めるためのものであり、日本瓦斯協会の「LNG地下式貯槽指針」4.6.3(2)凍上試験に記されている方法に準じて実施した。なお、未凍結土の圧密の影響を少なくするために、冷却開始前に試験時の荷重プラス1 kgf/cm²を供試体に加え、過圧密領域で凍上試験を実施している。

凍結速度は、吸排水量および凍上量の経時変化から凍結終了時間を判断し、凍結開始から凍結終了までの時間 t_f と凍結前の供試体高さ l から次式で求まる。

$$U = l/t_f \quad \dots\dots(6)$$

このようにして求めた ξ 、 ξ_m 、 σ 、 U を式(2)、(3)の関係で整理し、 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 、 n_f を求めた。

4.3 試験条件

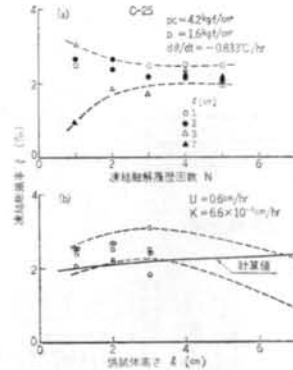
予備試験として、土の凍上性に及ぼす凍結融解履歴や供試体の長さの影響を検討した。それらの影響を検討するために、C-25の試料に先行荷重として4.2 kgf/cm²を人工的に与えたものを供試体として、供試体高さを1、2、3、7 cmの4種類変えて各々の条件で凍結・融解を5回繰り返し、その都度凍上量を測定した。

さらに、供試体の高さだけでなく直径の影響も同時に見るために、C-22の試料を用いて高さ25 cm、直径30 cmの供試体での試験も行った。

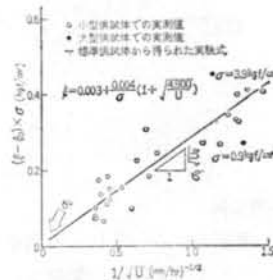
本試験は次のような条件で実施した。上載圧 P が小さいと間げき水の動水抵抗に起因する有効応力の増加によって、式(2)中の σ に P を代入した場合の計算値と実験式とは一致しなくなる³⁾ことから、上載圧の最小値を0.8 kgf/cm²とした。最大値は地下貯槽周囲地盤で予想される凍結膨張圧力を考慮して12.8 kgf/cm²とした。

凍結速度が小さくなると、凍結の終了付近でアイスレンズのみが析出して凍結が終了しなくなり、データの信頼性が損なわれるため凍結速度の範囲は0.5~15.0 mm/hrとした。

4.4 試験結果および考察



図—4 凍結膨張率に及ぼす(a)凍結融解履歴回数 N および(b)供試体高さ l の影響



図—5 大型供試体(直径30cm、高さ25cm)と小型供試体(直径6cm、高さ2cm)での凍結膨張率の比較(C-22)

(1)凍結融解履歴の影響

図—4(a)に、凍結融解を5回まで繰り返した場合の凍結融解履歴回数 N と凍結膨張率との関係を示す。

供試体の高さが1、2、3 cmの場合の凍結膨張率は、第1回目が若干大きく現われたものの、2回目以降はほぼ同じであった。一方、高さが7 cmの場合は逆に1回目小さく、それ以降はほぼ同じであった。

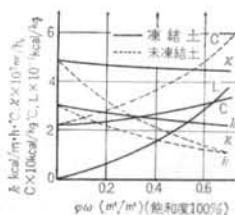
供試体を試験ごとに処女状態のものに変えた場合、供試体の土性の変化、供試体成形誤差等が新たに考えられる。そこで、供試体高さが2 cm前後で試験荷重が過圧密領域に入っている試験であれば、上述程度の凍結膨張率の差は実用的に無視できると判断し、本試験では供試体を繰り返し使用した。

(2)供試体高さの影響

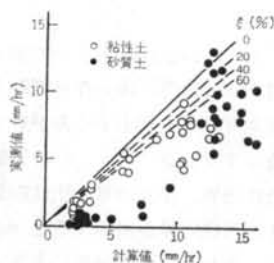
供試体の高さの影響を見るために、図—4(b)に示すように(1)の結果を供試体の高さとの関係で整理した。

その結果、供試体の高さが2 cm付近にピークをもち、その前後で減少する傾向にあった。

吸水型の凍結の場合は、凍結面の進行に伴って凍結面に吸い寄せられる間げき水の動水抵抗に起因する凍結面での間げき水圧の低下が起こり、凍結面での有効応力が



図—6 熱伝導率 k ・温度伝播率 ϵ ・比熱 C および凍結潜熱 L と容積含水率 ϕ_w ²⁾



図—7 凍結速度の実測値と計算値の比較

その分だけ増加する。有効応力が増加すると凍結膨張率は小さくなる。

本試験では排水型であったので、凍結面では逆に正の間げき水圧が発生し、凍結面での有効応力が減少し、図中の実線のように l が大きくなるにつれて凍結膨張率は大きくなるはずであった。しかし、供試体の高さが 2 cm を超えると逆に小さくなっている。これは、直径が 6 cm に対し高さが 7 cm と大きいために、アクリルシリンダーと供試体との間にシリコングリースを塗って摩擦力を軽減しているものの、摩擦力が発生して見掛け上、上載圧が増加したためと思われる。

一方、供試体の高さが 2 cm までは凍結膨張率が徐々に増加する傾向にある。これは先の理由の他に、吸水能力を有する領域が面ではなく、高木⁴⁾のいう“diffused freezing zone”のような有限領域があり、その領域が完成するまではあまり凍結膨張が発生しないためとも考えられる。

さらに、C-22での試料を供試体として図—5に示すように直径 6 cm、高さ 2 cm の小型の供試体と直径 30 cm、高さ 25 cm の大型の場合の凍上性を比較した。大型供試体における $\sigma = 3.9 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は凍結終了時に大量のアイスレンズが生じたために測定値に信頼性がないが、 $\sigma = 0.9 \text{ kgf/cm}^2$ の場合はアイスレンズが規則的に生じ、小型供試体で求めた実験式の値より小さく現われた。これは、先に述べたように動水抵抗に起因して有効応力が増加したために、凍結膨張率が小さく現われたものと思われる。動水抵抗を考慮した式³⁾で凍結膨張率を補正すると、小型供試体での凍結膨張率が 37.6% に対して大型

では 35.1% と非常に良く近似している。

以上のことから、供試体の高さを高くして試験することは日数がかかることや、供試体の周面抵抗の問題等があるので、供試体寸法は直径 6 cm、高さ 2 cm を標準とした。

(3) 凍結速度

凍結面の進行状況や温度分布を求めるためには、地盤の熱定数が必要になってくる。実測値がない場合は、図—6に示す Eucken による熱定数²⁾が使用されることがある。ここでは Eucken による推定方法の妥当性を検討するために、凍上試験で求まる凍結速度の実測値と計算値の比較を行った。計算による凍結速度は試験時の供試体の上下端面の温度が式(4)、(5)で制御されているので、そのときの供試体下端面の温度降下率と熱定数を式(5)に代入することにより与えられる。

図—7に凍結速度の実測値と計算値との比較を示す。砂質土および粘性土ともに実測値の方が計算値より小さく現われた。凍上試験を開始するために、供試体下部冷却板温度を土の凍結温度より低くし供試体の下端面に氷の核を形成させる、いわゆるサーマルショックをかけると供試体内部の温度が低下するので、実測値の方が大きく現われるはずである。しかし、実測値の方が小さく現われているので、この影響は今回の試験条件の範囲では小さいものと思われる。

この原因は、式(5)が供試体の長さ変化を考慮しているものの、吸水に伴う潜熱の増加を考慮していないためと考えるのが妥当と思われる。

よって、Eucken の式は実用的には問題ないものの、目標とする凍結速度を厳密に求めようとする場合はこの影響を考慮することが望ましい。

(4) 凍上性に及ぼす粒径の影響

普通の土の凍上性は、粒度分析で得られる土粒子の大きさだけで判定できることが経験的に知られている。一般に粒径が 0.1 mm 以上の砂では凍上性はなく、以下粒径が小さくなるにつれて凍上性が強くなり、2~5 μm で最大となる。さらに小さくなると透水性が悪くなり、凍結面への水の補給が困難となり、逆に凍上性は小さくなるといわれている。

今回の凍上試験の結果はすべて式(2)、(3)で整理できた。式(2)の土固有の凍上性を示す ϵ_0 、 σ_0 、 U_0 の個々について検討すべきであるが、誤差を含んでいるため、全体的な凍上性を示すと考えられる $\sigma_0\sqrt{U_0}$ について粒径との関係をここでは検討した。

図—8に、粘土分および(粘土+シルト)分に対する $\sigma_0\sqrt{U_0}$ の関係を示す。 $\sigma_0\sqrt{U_0}$ と(粘土+シルト)分 V_{cs}

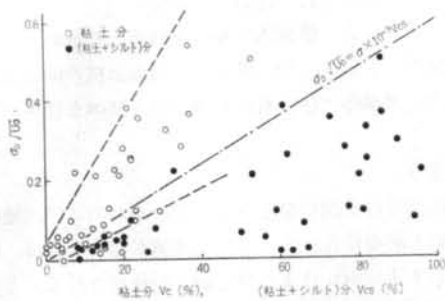


図-8 土の凍上性に及ぼす粘土分、(粘土+シルト)分の影響

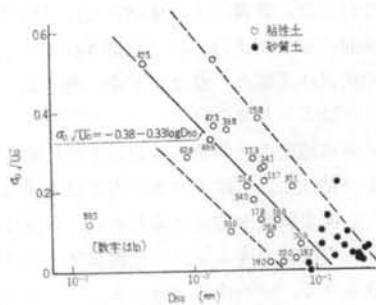


図-9 土の凍上性に及ぼす \$D_{50}\$ の影響

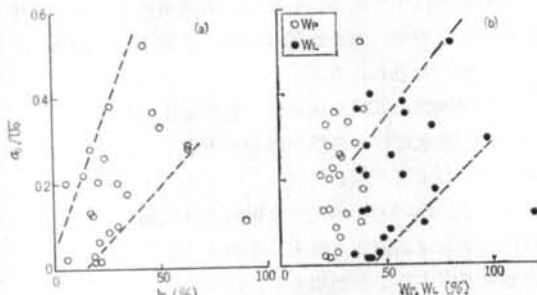


図-10 凍上性に及ぼす塑性指数 \$I_p\$、塑性限界 \$W_p\$、液性限界 \$W_L\$ の影響

との相関はあまりないようであるが図から、

$$\sigma_c \sqrt{U_0} = 6 \times 10^{-3} \cdot V_{cs} \quad \dots\dots (17)$$

なる式で与えられる値より、普通の土においては $\sigma_c \sqrt{U_0}$ は大きくならないことが予想される。

粘土分との相関は(粘土+シルト)分の場合よりもあり、粘土分が増えると $\sigma_c \sqrt{U_0}$ が増加する傾向にあった。

“capillary force theory” と呼ばれる、凍結面における氷・水・土粒子によって構成された幾何学空間に界面理論を適用した凍上理論によれば、凍結面での未凍結土側の最大吸水力 $\Delta P_{w, \max}$ は次式で表わされる。

$$\Delta P_{w, \max} = \frac{2\sigma_{iw}}{\gamma_i} \quad \dots\dots (18)$$

ここに、 σ_{iw} は氷・水界面エネルギー、 γ_i は氷・水界面の最小曲率半径である。Everett と Haynes⁵⁾ は γ_i を粒度曲線による通過百分率の50%に対応する粒径 D_{50} との関係で与えているので、 D_{50} と $\sigma_c \sqrt{U_0}$ との関係が求めた(図-9)。その結果、 $\sigma_c \sqrt{U_0}$ は粒径が $5 \mu m$ より大きい範囲では、対数的に D_{50} が小さくなると大きくなる傾向にある。しかし、 $5 \mu m$ より小さくなると、データとして一点しかないが、逆に $\sigma_c \sqrt{U_0}$ は小さくなることも考えられる。

以上のことから、 D_{50} は粘土分との関係より $\sigma_c \sqrt{U_0}$ との間に相関があるので、凍上性を判定するにあたっては粘土分量より D_{50} で判定する方が有効である。

(5) 凍上性に及ぼすコンシステンシーの影響

図-10に液性限界、塑性限界、塑性指数と $\sigma_c \sqrt{U_0}$ との関係を示す。液性限界が増加すると $\sigma_c \sqrt{U_0}$ も増加する傾向にある。これは、液性限界が大きいほど微細粒子が多く含まれているからである。

塑性限界は、粘土の表面積の増加とともに直線的ではないものの増加するといわれているが、液性限界ほど変化はしない⁶⁾⁷⁾⁸⁾ので、 $\sigma_c \sqrt{U_0}$ ほどの相関が出なかったものと思われる。

Skempton らによって、塑性指数は粘土分 ($2 \mu m$ 以下)の含有量が多くなると大きくなる⁹⁾ことがいわれているので、塑性指数が大きくなると $\sigma_c \sqrt{U_0}$ も大きくなったものと思われる。

§ 5. 凍結速度がほぼ零の場合の凍上特性

5.1 試験方法および条件

試験は次の手順で実施した。まず、供試体を試験機にセットし、供試体を水で飽和させる。その後、所定の荷重を載せ供試体の上下面を土の凍結温度に保持した後、氷の核を形成させるために供試体下端面温度を土の凍結温度より低くした。氷の核が形成されたのを確認後、供試体下部冷却面温度を負温度 θ_l 、上部温度を正温度 θ_u の一定温度に保って試験を開始し、凍上量および吸排水量を測定した。

表-2 に試験条件の一覧表を示す。

5.2 凍結面進行の経時変化

供試体の下端温度を負の温度 θ_l 、上端温度を正の温度 θ_u に一定に保った場合、2階の偏微分方程式となり、解析解を得るのは困難となるので、ここでは凍結土、未凍結土の2層の1次元モデルにおいて、各層の温度勾配が

No	上載圧P (kgf/cm ²)	供試体温度 (°C)		供試体高さ l (cm)
		上 面θ _u	下 面θ _t	
S-2	0.4	5	-5	2
	1.6			
	2.4			
	6.4			
	1.6	1	-1	
S-22	0.4	4	-2	3
		3	-3	
		6	-6	
	1.6	2	-2	3
		3	-3	
	C-1	1.6	2	-2
C-2	1.6	2	-2	3
C-12	1.6	10	-10	3
C-25	1.6	1	-1	3
		3	-3	
		5	-5	

表-2 試験条件一覧表

直線であるとして、次に示す微分方程式を求めた。

$$k_1 \frac{\theta_f - \theta_t}{x_f} - k_2 \frac{\theta_u - \theta_f}{l - x_f} = L\gamma_1 \frac{dx_f}{dt} \quad \dots\dots(19)$$

初期条件は、

$$t=0 \text{ で } x_f=0 \quad \dots\dots(20)$$

であるので、これを考慮して式(19)を解くと、凍結面が x_f に到るまでの時間 t は次式で与えられる。

$$t = \frac{\{k_1(\theta_f - \theta_t)\}^2 L\gamma_1 l^2}{\{k_1(\theta_f - \theta_t) + k_2(\theta_u - \theta_f)\}^3} \cdot \left[\frac{1}{2} X^2 - \frac{k_2}{k_1} \frac{\theta_u - \theta_f}{\theta_f - \theta_t} \{X + l_n(1 - X)\} \right] \quad \dots\dots(21)$$

ここに、 X は凍結面までの距離 x_f を無次元化したもので、次式で与えられる。

$$X = \frac{k_1(\theta_f - \theta_t) + k_2(\theta_u - \theta_f)}{k_1(\theta_f - \theta_t)} \frac{x_f}{l} \quad \dots\dots(22)$$

$X=1$ の場合が、最終の凍結面までの距離である。

図-11に凍結面および凍結速度の経時変化の計算例を示す。熱定数は図-6より求めた。冷却面温度が低いほど早く平衡に近付き、数時間で平衡値の90%以上になる。

今回の温度条件範囲では、凍結速度は10数時間経過後には 10^{-5} mm/hr 以下となり、それ以後の凍結速度は工学的には零と考えられる。

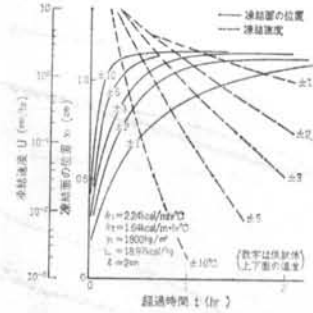


図-11 凍結面 x_f および凍結速度 U の経時変化の計算例

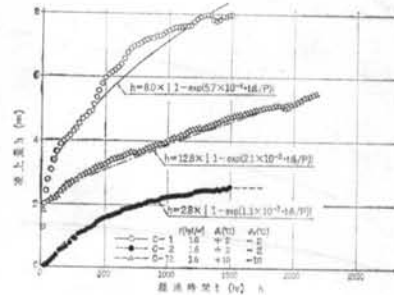


図-12 凍上量の実測値と計算値の比較

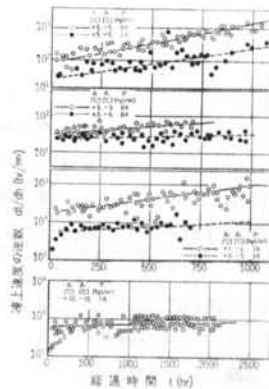


図-13 凍上速度の逆数 dt/dh と経過時間 t との関係

5.3 試験結果および考察

凍上量の増加は凍結速度がほぼ零になった後も続き、2100時間経過しても停止していない(図-12)。しかし、凍上速度は時間の経過とともに減少しており、その逆数 dt/dh と経過時間 t の関係は、図-13に示すように片対数座標上で直線近似でき、次式で表わせることが明らかになった。

$$\log(dt/dh) = at + b \quad \dots\dots(23)$$

ここに、 a 、 b は正の定数である。式(23)を積分することにより、凍結速度がほぼ零になった後の凍上量 h は次式で与えられる。

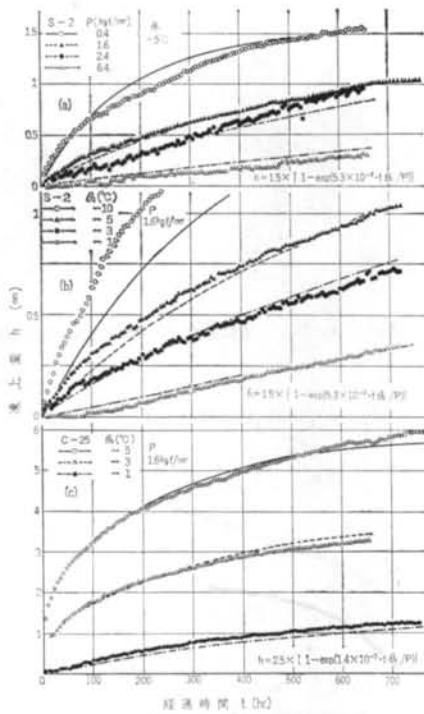


図-14 凍上量の実測値と計算値の比較

$$h = \alpha \{1 - \exp(-\beta' t)\}$$

.....24

ここに、 α 、 β' は正の定数である。

図-14(a)に、上載圧の影響をみるために供試体上下端面温度を $\pm 5^\circ\text{C}$ とし、上載圧を $0.4 \sim 6.4 \text{ kgf/cm}^2$ の間で変化させた場合の凍上量の経時変化を示す。凍結開始時には、上載圧が小さいほど凍上量も凍上速度も大きく現われたが、時間の経過とともに凍上速度は逆に上載圧が大きいほど大きくなる傾向を示した。

図-14(b)に、供試体の冷却温度の影響をみるために上載圧を 1.6 kgf/cm^2 とし、冷却温度を $-1 \sim -10^\circ\text{C}$ の間で変化させた場合の凍上量の経時変化を示す。凍結開始時には、冷却温度が低いほど凍上量も凍上速度も大きく現われたが、時間の経過とともに凍上速度の減少率は大きくなる傾向にあった。

粘性土においても、図-14(c)に示すように同様の傾向にあった。

供試体上面温度（正温度）の影響については、その温度を下面温度（負温度）の絶対値と等しくしてほとんどの実験を行なっているので明らかではないが、影響は少ないようである。

以上のことから、同一試料では供試体下面温度（負温度）が低いほど、または上載圧が小さいほど凍上速度は急速に減少し、凍上量 h は急速に一定値 α に近づくこと

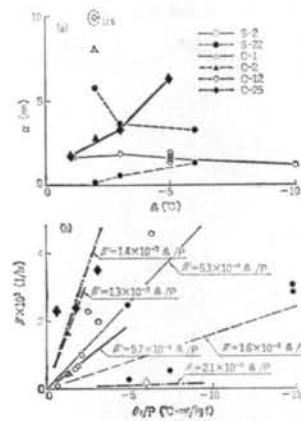


図-15 (a) α と θ_i 、(b) β' と θ_i/P との関係

試料名	α (mm)	β ($\text{kgf/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$)
S-2	1.5	5.3×10^{-4}
S-22	2.2	1.6×10^{-4}
C-1	8.0	5.7×10^{-4}
C-2	2.8	1.3×10^{-3}
C-12	12.8	2.1×10^{-5}
C-25	2.5	1.4×10^{-3}

表-3 α 、 β の値

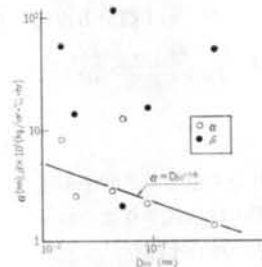


図-16 α 、 β と D_{20} の関係

が予想されるので、 β' を供試体下面温度（負温度） θ_i と上載圧 P の関数として次式で近似した。

$$\beta' = \beta \cdot \theta_i / P \quad \text{.....25}$$

その結果を図-15に示す。式25で十分近似できたものと思われる。このようにして求めた α 、 β を表-3に示す。図-14に、これらの値を使用した計算値と実測値の比較を示す。実測値と計算値とは非常に良く近似しており、凍結速度がほぼ零になった後の凍上量 h は式24、25より次式で与えられることが明らかとなった¹¹⁾。

$$h = \alpha \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\beta \cdot \theta_i}{P} t\right) \right\} \quad \text{.....26}$$

ここに、 θ_i は供試体下面温度（負温度）、 P は上載圧、 t は経過時間、 α 、 β は正の定数である。

図-16に α 、 β と D_{50} の関係を示す。 β には有意な相関は見当たらないが、 α については両対数座標上で D_{50} が小さくなると直線的に増加し、次式で近似できた。

$$\alpha = D_{50}^{-0.35} \quad (\text{mm}) \quad \dots\dots(7)$$

上式は、わずかに6試料について求めたものであり、信頼性に欠けるものの、凍結速度がほぼ零になった後の最終凍上量を推定する一方法として有効であると考えられる。

なお、 α 、 β と先に求めた $\sigma_0\sqrt{U_0}$ との間には有意な関係を見いだせなかった。

§ 6. 結論

水の出入りを自由にしたまま、一定上載圧(0.8~12.8 kgf/cm²)のもとで、供試体を一定の凍結速度 U (0.5~15.0 mm/hr)あるいは凍結速度がほぼ零になった場合(供試体の一端を-1~-10℃の負温度、他端を1~10℃の正温度に保持し、 $P=0.4\sim 1.6$ kgf/cm²で実施)の過圧密領域での土の凍上特性について検討を行なった。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 凍結速度一定の場合における凍上特性

- ①凍結膨張率は、動水抵抗に起因する有効応力の変化により供試体高さの影響を受ける。
- ②凍結融解履歴を数回受けると、その後の凍結膨張率はほぼ等しくなる。
- ③土の凍上性を示す ξ_0 、 σ_0 、 U_0 のうち $\sigma_0\sqrt{U_0}$ は I_P 、 W_L の増加に伴って増加する傾向がある。
- ④粒度曲線による通過百分率の50%に対応する粒径 D_{50} が $5\mu\text{m}$ より大きい土について、 $\sigma_0\sqrt{U_0}$ は片対数座標上で D_{50} が小さくなると直線的に大きくなり、その相関は I_P 、 W_L よりも有意である。

(2) 凍結速度がほぼ零の場合における凍上特性

- ①2100時間以上経過しても凍上は停止しない。

②最終の凍上量は上載圧 P 、冷却条件によらず、土質ごとにほぼ一定の値 α になる。

③上載圧 P が小さいか、あるいは冷却温度 θ_t が低いほど早く最終値に近づく傾向にある。

④凍結速度がほぼ零になった後の凍上量 h は次式で表わせる。

$$h = \alpha \left\{ 1 - \exp\left(\frac{\beta \cdot \theta_t}{P}\right) \right\}$$

ここに、 α 、 β は正の定数である。

⑤ D_{50} と β の間には有意な相関は見いだせなかったが、 α とは両対数座標上で、 D_{50} が小さくなると α が大きくなる傾向にあった。

⑥ α 、 β と $\sigma_0\sqrt{U_0}$ との相関は、 α 、 β を求めるための試験が不足しているためか、有意な相関を見いだせなかった。

§ 7. あとがき

凍結膨張率を求める式(2)は、過圧密粘土においては非常に有効な式であることが明らかとなった。しかしながら、LNG地下式貯槽や地盤凍結工法の現場では、沖積層のような正規圧密粘土地盤の凍上現象についても問題となり、未凍結土の脱水圧密による収縮を考えた凍上特性を明らかにする必要がある。

凍結速度がほぼ零になった後の凍上量の経時変化を算定する式を得たが、この式の適用性をさらに明確にするため、供試体を高くした場合や凍結速度一定の場合の式(2)との関係について検討する必要がある。

謝辞 今回使用したデータの大半は、東京瓦斯株式会社よりの依頼により当社が試験を実施したものであり、試験結果の使用を許可して頂いたことに対して東京瓦斯株式会社、ならびにその関係者に心より感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 高志 勤, 益田 稔, 山本英夫: "土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力に関する研究" 雪氷 36巻2号(1974) pp. 1~20
- 2) 日本瓦斯協会: "LNG地下式貯槽指針" (1979)
- 3) 高志 勤, 益田 稔, 山本英夫: "凍上に及ぼす未凍結土内の動水抵抗の影響" 雪氷 38巻1号(1976) pp. 1~10
- 4) S. Takagi: "The Adsorption Force Theory of Frost Heaving" Cold Regions Science & Technology Vol. 3, No. 1 (1980)

- 5) D.H. Everett & J.M. Haynes: "Capillary Properties of Some Model Systems with Special Reference to Frost Damage" RILEM Bull., New ser. No. 27 (1965) pp. 31~38
- 6) K.S. Birrell: "Physical Properties of New Zealand Volcanic Ash Soils (Conferene on Shear Testing of Soils, Melbourne)" McGraw-Hill (1962) pp. 30~34
- 7) B.P. Warkentin: "Interpretation of the Upper Plastic Limit of Clays" Nature, Vol. 190 (1961) pp. 287~288
- 8) W.A. White: "Atterberg Plastic Limits of Clay Minerals" Amer. Mineralogist, Vol. 34 (1949) pp. 508~512
- 9) A.W. Skempton: "The Colloidal Activity of Clays" Proc. of 3rd ICSM, Vol. 1 (1953)
- 10) 中沢 亨, 了戒公利, 後藤 茂: "土の凍上特性について" 雪氷学会秋期大会 (1978)
- 11) 後藤 茂, 渡辺 修, 了戒公利: "土の長期凍上特性" 第15回土質工学研究発表会 (1980)