

清水建設(株) 正 了戒 公利
清水建設(株) 正 中沢 亨
東京瓦斯(株) 峯岸 孝二

1. まえがき 今日、我国でもLNGやLPG等の超低温液体貯蔵用地下式貯槽が建設されるようになり、土の凍上特性や凍結土の諸特性を研究する必要性が生じた。既報では、室内凍結した砂質土の力学特性に及ぼす飽和度や至速度等の影響について報告した。ここでは、人工地盤凍結工法による地下式貯槽モデル実験に伴って発生した現地凍結土の力学試験(一軸圧縮、一軸引張、割裂、三軸圧縮、一軸圧縮クリープ試験)を実施したので、その結果について報告するものである。

表-1 土性値一覧表

土質 記号	砂質土			粘性土			
	s1	s2	s3	c1	c2	c3	c4
粒砂 (74~2000 μ)	99	94	86	10	67	4	31
シルト (5~74 μ)	1	6	8	81	25	64	51
粘土 (5 μ 以下)	0	0	6	9	8	32	18
液性限界 w_L %	NP	NP	NP	NP	NP	59.1	48.8
塑性限界 w_p %	NP	NP	NP	NP	NP	33.2	23.9
比重 G_s	2.708	2.699	2.622	2.623	2.663	2.603	2.609
含水比 w %	304	34.3	30.1	73.3	33.6	51.2	47.4
粘着力 C kg/cm ²	0	0	0	0.4	0.4	2.0	1.6
せん断抵抗角 ϕ	37	40	41	—	—	16	20
塩素イオン濃度 ppm	18000	6300	—	18000	420	220	—

2. 供試体 試験に供した7種類の土質の土性値を表-1に示す。s1とc1は埋立土、s2は沖積砂、s3は洪積砂であり、c2は沖積粘土、c3とc4は洪積粘土である。凍結土の強度特性に影響する塩素イオン濃度は洪積土に比べて、沖積土は数十倍高い。試料は30×30×30cmのブロックで切り出し、凍上用自動試料成型機にて所定の形状及び寸法にした。供試体の寸法は一軸圧縮、クリープ試験では $\phi 5\text{cm} \times L 10\text{cm}$ 、三軸圧縮、一軸引張試験(有効長)では $\phi 3.5 \times L 7\text{cm}$ 、割裂試験では $\phi 5\text{cm} \times L 5\text{cm}$ を標準とした。

3. 試験概要 クリープ試験機の載荷方式はレバー式であり、そのレバーは自動的に水平に保持される機構になっている。その他の試験で用いた加圧装置は、すべて同一装置であり、圧縮で5トン、引張で2トンまで載荷でき、制御方法は歪制御及び一定応力制御が可能である。いづれの試験機も-45℃まで冷却可能な低温室内に設置されている。三軸圧縮試験機での側圧(最大50kg/cm²)は不凍液を介して供試体に伝達される。一軸引張試験は供試体の両端部に拡大部を設け、その部分に引張器具を装着して行なう。尚、それぞれの試験温度は-10、-20、-40℃の3種類であり、載荷速度は一軸圧縮試験で1.0mm/min、一軸引張及び割裂試験で0.62mm/min、そして三軸圧縮試験で0.83mm/minである。

4. 試験結果及び考察 4.1 強度特性 図-1に一軸圧縮強さ q_u 、並びに一軸引張試験及び圧裂試験で求めた引張強さ σ_t と温度 θ との関係を示す。 q_u 及び σ_t は、温度の低下とともに増加し、 σ_t/q_u は約0.2であった。しかし、 σ_t は温度が低下しても、増加しないものもあるが、これは二次膨張によってクラックが発生したためとも思われる。 q_u の増加割合は粘性土より砂質土の方が大きい。又、塩素イオン濃度が比較的多いもの程、小さな値を示している。こ

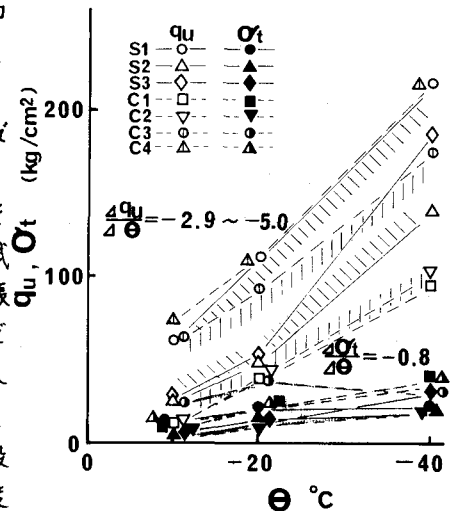


図-1 一軸圧縮強さ q_u 、一軸引張強さ σ_t と温度 θ の関係

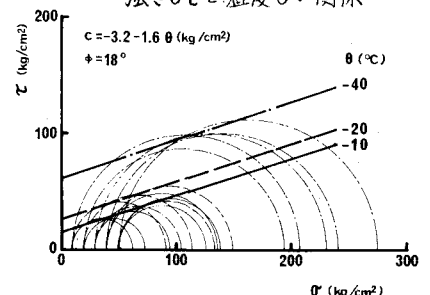


図-2 破壊時のMohr円と破壊基準直線(S3)

れは、その濃度が高い程、土粒子の未凍結水の量が多く、粒子間の結合力が弱いと思われる。

図-2はS3における破壊時のMohr円と破壊規準直線である。せん断抵抗角は18°であり、未凍結状態の41°に比べて減少している。C3においても16°から約0°に減少している。未凍結時の砂質土の強度の大きさは、土粒子のインターロッキングとダイレイタンスに大きく支配されるが、今回の凍結土の試験では供試体の体積変化がなかったことから、これらの現象による強度増加は凍結土では少ないことを示唆している。又、見かけの粘着力Cは温度に依存するが、 ϕ への影響は少ない。

図-3は一軸圧縮クリープ試験におけるクリープ破壊強度 σ_f と破壊時間 t_f との関係であり、Vialov式 $1/\sigma_f = \ln(1+t_f)/\beta$ (ここに、 β : 温度に依存するクリープ破壊定数)が成立することがわかる。

4.2 変形特性 図-4は一軸圧縮試験で求めた変形係数 E_c と一軸引張試験による E_t と温度 θ との関係である。砂質土の E_t について温度の低下とともに増加しないものもあるが、一般に、 E_c 、 E_t は温度の低下とともに増加する。 E_c の温度に対する増加率は砂の方が大きい。又、 E_t/E_c は約0.1である。

三軸圧縮試験での E_c は θ のみならず側圧 σ_3 にも影響があった。凍結土の応力 σ 、歪 ϵ 、温度 θ 、時間 t との関係は、Vialovにより次式で与えられている。 $\epsilon = \sigma \cdot t^m / \zeta(\theta)$ (ここに、 m 、 λ はクリープ定数であり、 $\zeta(\theta)$ は温度に依存し、変形係数と等価の値である。図-5に E_c 、 $\zeta(\theta)$ と温度との関係を示す。 $\zeta(\theta)$ も E_c と同様に、砂質土の方が増加率は大きくなる傾向にある。

図-6に変形係数と力学強度の関係を示す。それらの関係は次式で近似できる。 $E_c = 100 q_u$ (圧縮)、 $E_t = 600 \sigma_t$ (引張).....①

5. 結論 現地凍結土の室内試験の結果、-10~-40℃の温度範囲で次のことが明らかとなった。①圧縮強さと変形係数は温度の低下と共に増加し、その割合は粘性土より砂質土が大きい。②引張強さと変形係数は粘性土では、温度の低下と共に増加するが、砂質土では増加しないものもある。③(引張強さ σ_t)/(圧縮強さ q_u)は約0.2、(引張側の変形係数 E_t)/(圧縮側の変形係数 E_c)は約0.1である。④せん断抵抗角 ϕ は未凍結時の値より小さくなる。⑤Vialovのクリープ式及びクリープ破壊式が適用できる。⑥圧縮強さ及び引張強さに対する変形係数は式①で与えられる。

参考文献 1) Takegawa, Nakazawa, Ryokai, Akagawa, (1978): Creep characteristics of frozen Soils, Intern. Symp. on Ground Freezing.
2) 後藤 茂, 了戒公利, 中沢 亨, (1979): 室内凍結砂の力学特性, 第14回土質工学研究発表会
3) Vialov, (1963): The strength and calculation of the barriers made of frozen soil, 2nd Asian Regional Conf. SMFE, Vol. 1.

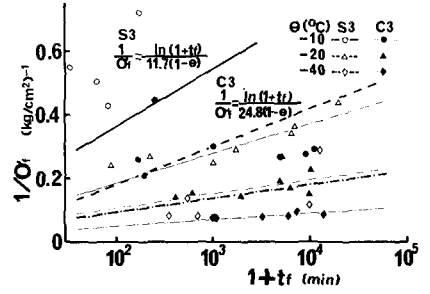


図-3 クリープ破壊強度 σ_f と破壊時間 t_f

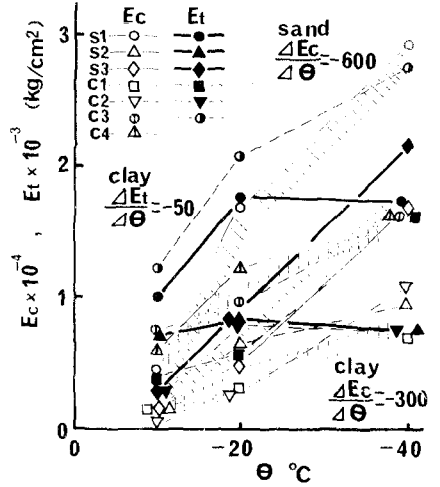


図-4 圧縮変形係数 E_c と引張変形係数 E_t の温度依存性

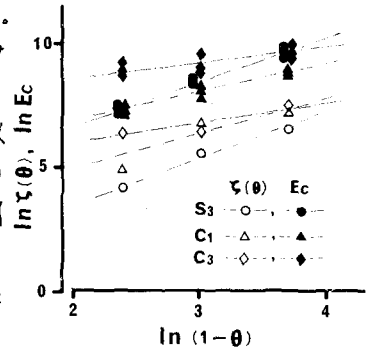


図-5 $\ln \zeta(\theta)$, $\ln E_c$ と $\ln(1-\theta)$

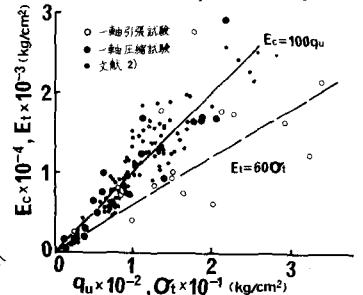


図-6 変形係数と強度の関係