

LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第7報)

——凍結土の力学的特性——

西林 清 茂 上野 孝 之
佐藤 哲

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas (Part 7)

——Strength and Deformation of Frozen Soils——

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno
Tetsu Sato

Abstract

The ground surrounding an underground LNG storage tank freezes because of the cold energy of LNG (-162°C). It is necessary for strength and deformation of frozen soils to be studied for calculation of stresses in ground. In this paper are described studies on influence of temperature, strain rate, and water content ratio on strength and deformation of frozen soil using a cryogenic monoaxial compression testing machine made by the authors. As a result of the tests the following were disclosed. (1) Strength and modulus of deformation increase with lowering of temperature and can be approximated by the experimental formula $q_r = a + b(-\theta) + c(-\theta)^2 + d(-\theta)^3$. (2) Strength and modulus of deformation increase with increments of strain rate, and are linear on logarithmic paper. (3) In case of frozen clay, the water content ratio influences the stress-strain curve, but unconfined compressive strength comparatively little.

概 要

LNG地下貯蔵槽の周辺地盤はLNGの冷熱(-162°C)のため凍結が進行し凍土が発生する。地下貯蔵槽の側壁に作用する凍土圧の算定には凍土の強度変形特性を把握しておく必要がある。そこで本研究では低温一軸圧縮試験機を製作し数種類の土質についてコンクリート状凍土の試験を行ない、温度、ひずみ速度、含水比の強度変形特性に与える影響について調べた。試験により次の結果を得た。(1) 一軸圧縮強度は温度の低下に伴い増加し、 $q_r = a + b(-\theta) + c(-\theta)^2 + d(-\theta)^3$ の実験式で近似できる。(2) 一軸圧縮強度はひずみ速度の増加とともに増加し両対数紙上で両者は直線関係にある。(3) 粘土の場合含水比の大小は応力ひずみ曲線の形に大きく影響を与えるが一軸圧縮強度に与える影響は小さい。

1. まえがき

地盤凍結工法, LNG 地下式貯蔵槽の建設, 寒冷地における工事などに伴い人工凍土, 自然凍土の研究の必要性が高まってきた。凍土の強度変形特性に与える影響として内的要因に粒径, 乾燥密度, 飽和度, 含水比, 不凍水, 塩分濃度, アイスレンズの分布, 温度履歴, 異方性などが挙げられる。また外的要因には試験方法, 凍結方法, 試験機の剛性, 計測方法などが考えられる。しかし凍結土の強度変形特性に関する統一された試験方法, 試

験装置がなくそれぞれの因子の影響は定量的に把握されていない。

ここではコンクリート状凍土の強度変形特性に及ぼすこれら影響因子のうち温度, ひずみ速度, 含水比について調べ, 試験装置の概要, 試験方法, および試験結果について述べる。

2. 試験装置

低温一軸圧縮試験機の概要を図—1に示す。低温槽は

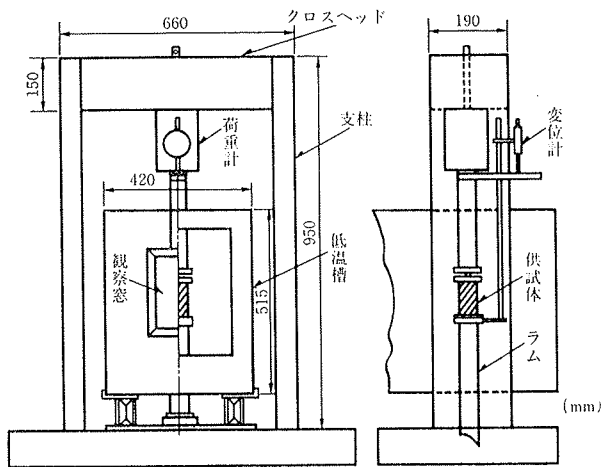


図-1 試験機概要

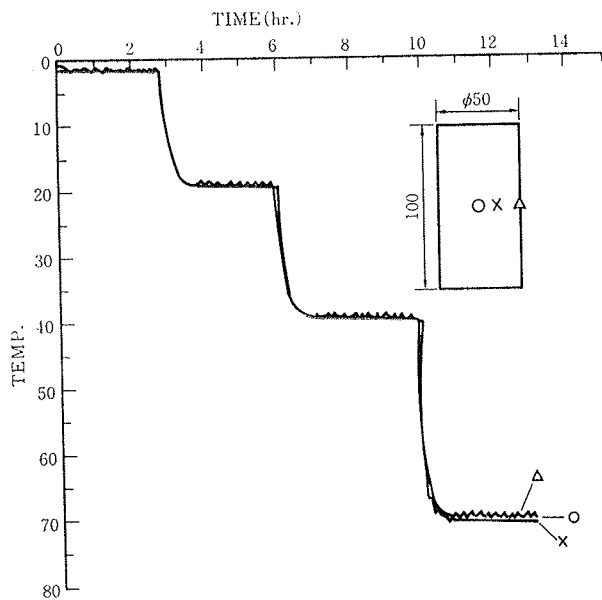


図-2 温度制御結果

ステンレス製の二重箱であり、その空間を断熱している。内空の大きさは 21.7×48.3×27.5(h)cm である。槽内の温度制御は液体窒素を噴霧することにより行なう。図-2 に槽内での温度制御結果を示す。温度は、-1.9, -19.7, -39.6, -69.7°C である。この結果より供試体は約 1 時間 30 分で定常温度となり、定常温度となった後は ±0.5°C 以内で温度制御されていることがわかる。載荷装置は剛性の大きい凍土のひずみ制御試験を行なうために任意の荷重に対しフレーム、ラムシャフト、荷重計などの変形をできるだけ小さくする必要がある。そのためこれらの剛性を大きくし、ひずみ速度の誤差を 1% 以下となるようにした。載荷は無段変速モーターに

よってラムを上昇させ、載荷速度は 1.0~0.0015 mm/min. の範囲で任意に得られるようにした。荷重計(ひずみゲージ型ロードセル)と変位計(電気式ダイヤルゲージ)は低温槽外に設置し温度変化の影響を避け、応力とひずみは X-Y レコーダに自記記録できるシステムとした。

3. 試験方法

3.1. 試験条件

試験のパラメーターを温度、ひずみ速度、含水比とした。標準的な試験条件は凍結方法を全周凍結とし温度を -5, -10, -30, -50°C, ひずみ速度を 1.0, 0.1, 0.01, 0.0015%/min., カオリン粘土の含水比を 35, 60, 118% とした。また凍結方法の違いをみるため 1 次元凍結で豊浦標準砂を凍結し温度 -10°C, ひずみ速度 1.0%/min. の試験を行ない全周凍結のものと比較した。

3.2. 供試体作製方法

試験に用いた試料は豊浦標準砂と川砂、カオリン粘土である。粒径加積曲線を図-3 に示す。砂の供試体作製は次の方法で行なった。①蒸留水を直径 5 cm, 高さ 10 cm の鋼製モールドに満す。②乾燥密度 $\gamma_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$ になる重量の乾燥砂を重力落下と振動により鋼製モールドに詰める。③供試体中の水分の昇華を防ぐためパラフィルムでモールドの上面を被う。④約 -20°C の低温槽に入れ全周方向より凍結する。⑤凍結後供試体は -5°C の

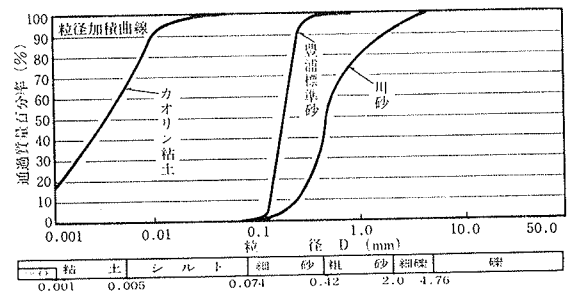


図-3 粒径加積曲線

比 重 Gs	豊浦標準砂	川 砂	カ オ リ ン 粘 土		
	2.642	2.703	2.696		
平均含水比 w (%)	30.00	23.68	34.96	60.00	118.00
平均飽和度 S _r (%)	92.0	90.0	92.4	93.4	91.5
平均単位体積重量 γ (g/cm ³)	1.950	1.957	1.801	1.578	1.313
液性限界 W _L (%)	NP	NP	44.54		
塑性限界 W _P (%)	NP	NP	28.26		
塑性指数 I _p	—	—	16.28		

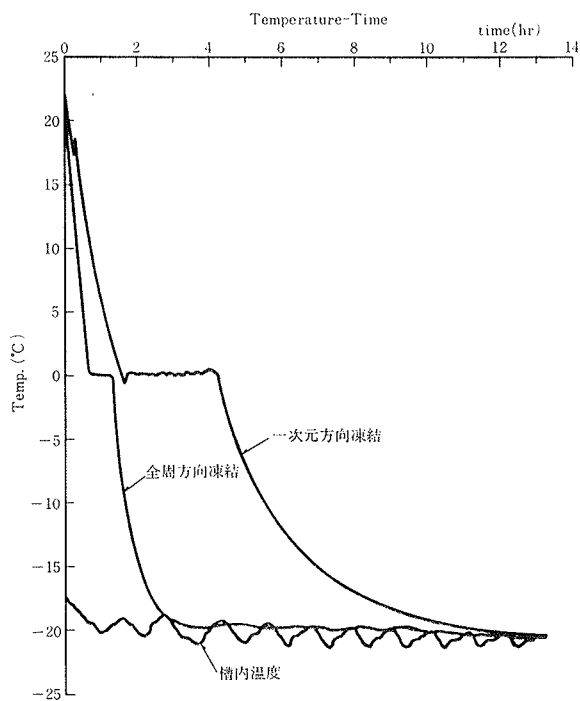
表-1 物理定数

低温室で脱型し端面成形する。

カオリン粘土の供試体作製は以下の方法で行なった。含水比35%の供試体は1.5 kg/cm²の荷重で圧密したものを直径5 cm, 高さ10 cmに成形し鋼製モールドに入れる。含水比60, 118%の供試体は所定の含水比になるように蒸留水を加えソイルミキサーで練り混ぜ鋼製モールドに入れる。以下の手順は砂の供試体作製方法③以下と同じである。

でき上がった供試体は試験中の水分の昇華を防ぐためゴムスリーブをかけた。試験時は端面摩擦の影響を防ぐためテフロンシートを供試体と載荷板の間に置いた。表一に供試体凍結前の物理定数を示す。

凍結方法の依存性を調べるための供試体はモールドの周囲に断熱材を巻き上下より1次元凍結させた。この時の供試体内温度の経時変化を図一四に示す。全周方向からの凍結は約80分で凍結し4時間で定常温度になったのに対し1次元的に凍結した供試体は約250分で凍結し12時間で定常温度となった。

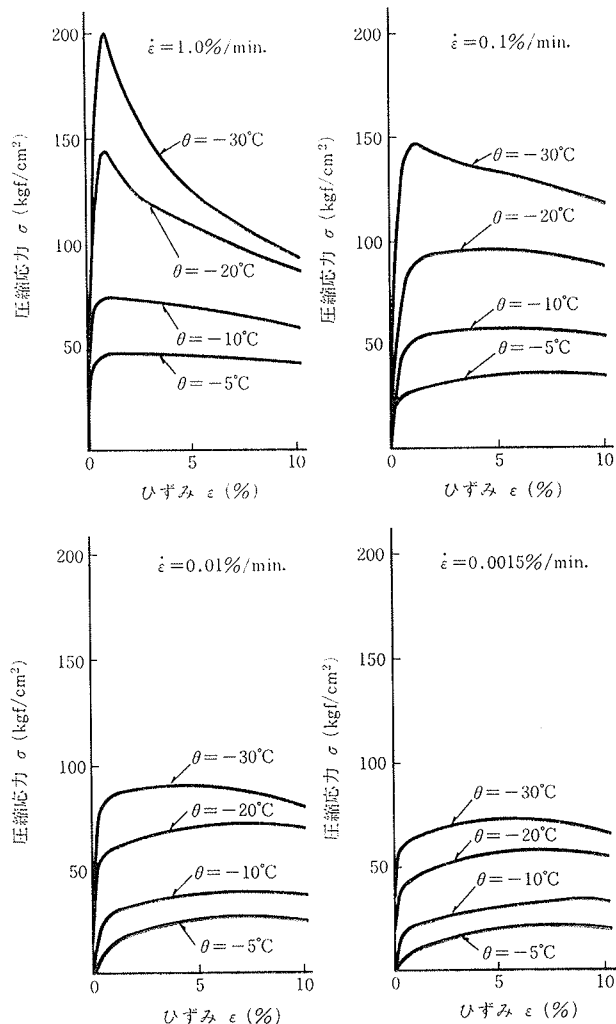


図一四 供試体内温度経時変化

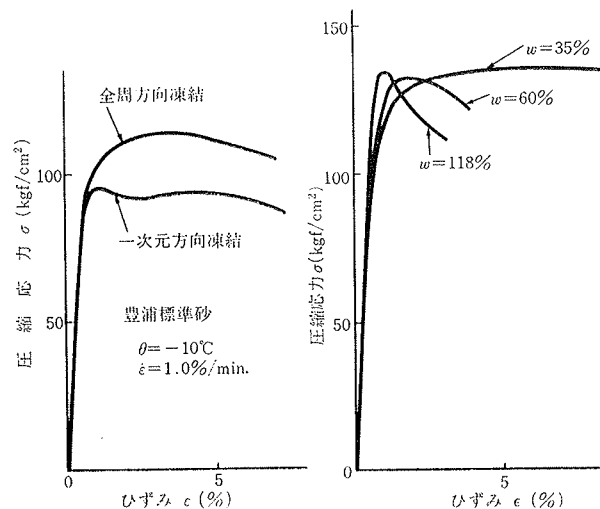
4. 試験結果

断面補正した最大圧縮応力を一軸圧縮強度 q_f と定義し, 変形係数 E_{50} を次式で定義した。

$$E_{50} = \frac{1/2 q_f}{\text{応力が } 1/2 q_f \text{ の時のひずみ}} \dots\dots(1)$$



図一五 川砂の応力～ひずみ曲線

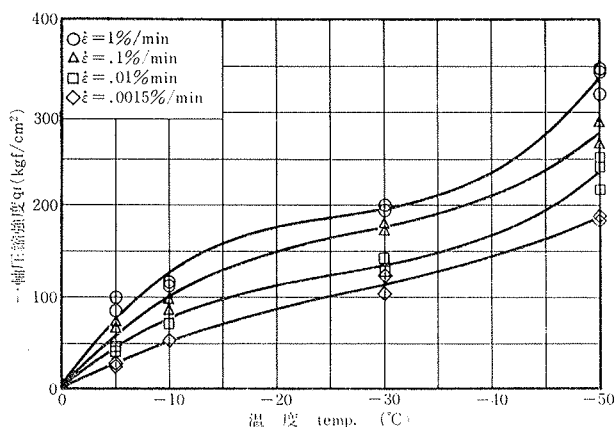


図一六 豊浦標準砂の応力～ひずみ曲線

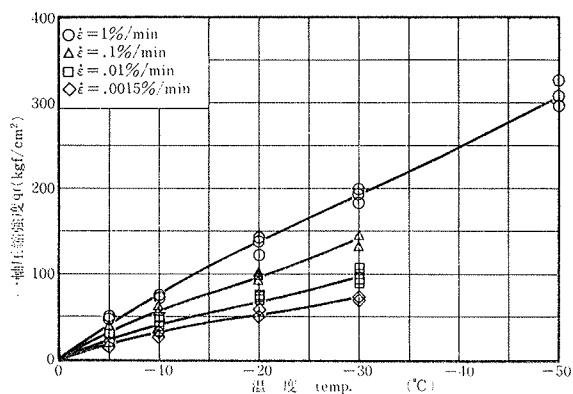
図一七 カオリン粘土の応力～ひずみ曲線

4.1. 応力～ひずみ曲線

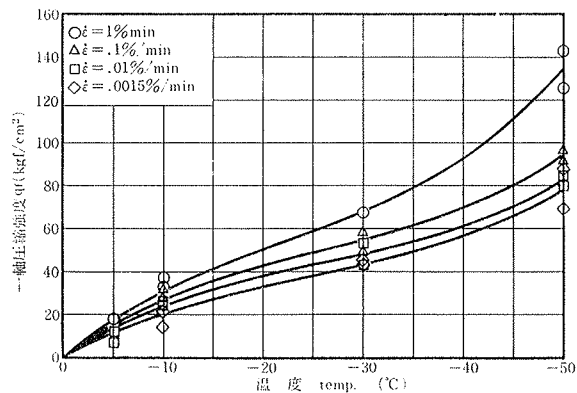
図一5に川砂の応力～ひずみ曲線を示す。曲線の形状は温度とひずみ速度の影響を受けて大きく変化する。温度が低くなるほど、またひずみ速度が速くなるほど小さいひずみで最大圧縮応力が発生しその後、急激に応力が減少する傾向が得られた。豊浦標準砂の場合も同様な結果であった。図一6に全周および1次元的に凍結した豊浦標準砂の応力～ひずみ曲線を示す。曲線の形状、一軸圧縮強度は凍結方法の影響を受け、全周方向凍結の一軸



図一8 豊浦標準砂の一軸圧縮強度～温度



図一9 川砂の一軸圧縮強度～温度



図一10 カオリン粘土 (含水比35%) の一軸圧縮強度～温度

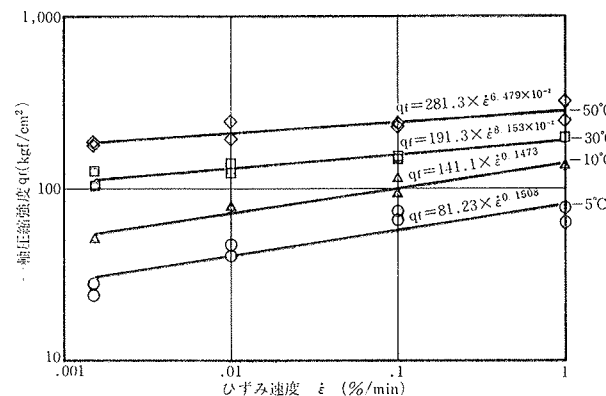
圧縮強度は1次元凍結の場合に比べ20%ほど大きい。図一7にカオリン粘土の応力～ひずみ曲線の一例を示す。カオリン粘土の応力～ひずみ曲線の形状は含水比の影響を受け含水比が35%のものは完全壘体型(ひずみの増加に伴い応力はほぼ直線的に増加しその後一定となるもの)であるが60%, 118%と高含水比になるにつれてピーク型(ひずみの増加に伴い応力はほぼ直線的に増加しピークを向え、その後急激に減少するもの)となる。また温度、ひずみ速度の影響はあまりなかった。

4.2. 強度変形特性の温度依存性

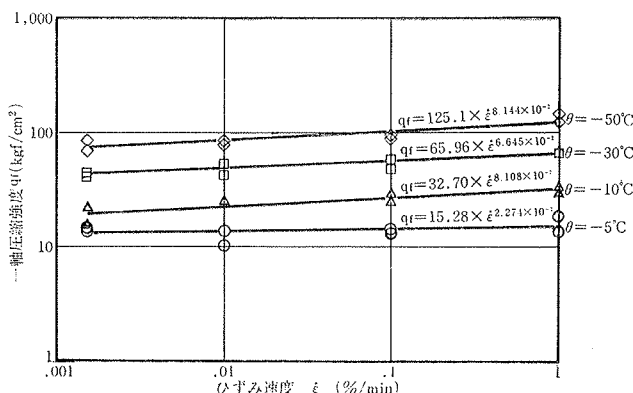
図一8～10に豊浦標準砂, 川砂, カオリン粘土 (w=35%) の一軸圧縮強度と温度の関係を示す。温度の低下に伴って一軸圧縮強度は増加するか特に-50°Cでの豊

	ϵ	a	b	c	d
豊浦標準砂	1.0	1.2	17.6	-0.60	7.66×10^{-3}
	0.1	1.2	13.3	-0.39	4.69×10^{-3}
	0.01	0.0	10.4	-0.32	4.20×10^{-3}
	0.0015	-0.5	6.1	-0.12	1.49×10^{-3}
川砂	1.0	0.4	8.4	-0.98	1.00×10^{-3}
	0.1	0.3	7.3	-0.20	4.00×10^{-3}
	0.01	0.1	5.2	-0.15	2.00×10^{-3}
カオリン粘土 (w=35%)	0.0015	0.1	4.1	-0.11	2.00×10^{-3}
	1.0	-0.1	4.0	-0.10	1.56×10^{-3}
	0.1	-0.1	3.4	-0.09	1.13×10^{-3}
	0.01	-0.1	3.1	-0.08	1.03×10^{-3}
	0.0015	0.3	2.6	-0.06	0.86×10^{-3}

表一2 各係数値



図一11 豊浦標準砂の一軸圧縮強度～ひずみ速度



図一12 カオリン粘土 (含水比35%) の一軸圧縮強度～ひずみ速度

浦標準砂とカオリン粘土の一軸圧縮強度は急激に増加している。既往の研究¹⁾では $q_f = a(-\theta)^b$ という実験式が提案されているがこれでは -50°C の値が近似できない。ここでは $q_f = a + b(-\theta) + c(-\theta)^2 + d(-\theta)^3$ という実験式で近似できることがわかった。最小二乗法により求めた各々の係数を表-2に示す。 -50°C での一軸圧縮強度の急激な増加の原因として粘土の場合、不凍水分量の変化と考えられ得るが砂の場合不凍水は -5°C で存在しなくなるため不凍水分量の変化の影響とは考えられない。

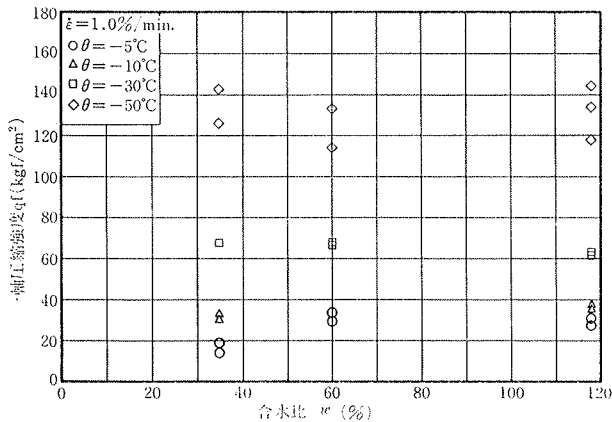


図-13 カオリン粘土の一軸圧縮強度と含水比

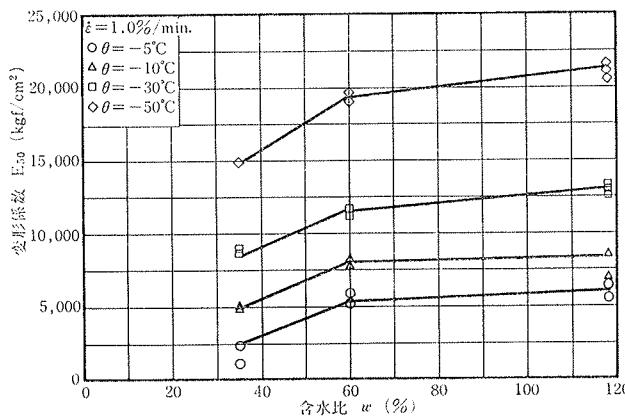


図-14 カオリン粘土の変形係数と含水比

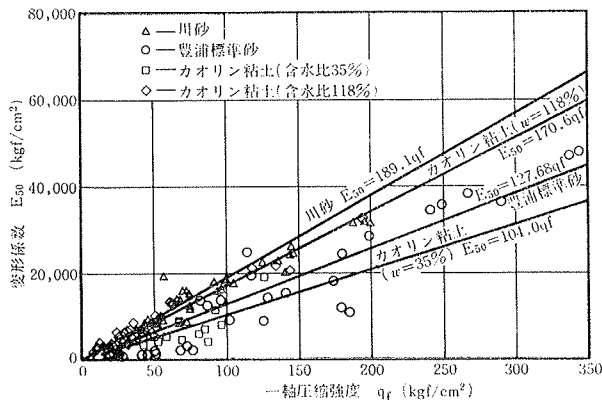


図-15 各試料の一軸圧縮強度～変形係数

他の原因としては土粒子間に存在する水の強度変化が考えられる。

各試料の温度と変形係数の関係はバラツキはあるものの温度に対する一軸圧縮強度の増加傾向と同じであった。

4.3. 強度変形特性のひずみ速度依存性

図-11, 12は豊浦標準砂と含水比35%のカオリン粘土の一軸圧縮強度とひずみ速度の関係を両対数紙上で示したものである。両者とも図上で直線関係にありHaynes²⁾らの報告と一致する。川砂、含水比118%のカオリン粘土の一軸圧縮強度とひずみ速度の関係も同様であった。また各試料の変形係数とひずみ速度の関係も両対数紙上で直線であった。

4.4. 強度変形特性の含水比依存性

図-13にひずみ速度1%/min.のカオリン粘土の一軸圧縮強度と含水比、図-14に変形係数と含水比の関係を示す。これより含水比は一軸圧縮強度にあまり影響を与えないことがわかる。変形係数と含水比の関係では含水比が35%と60%の間では含水比の増加に伴う変形係数の増加が顕著であるのに対し含水比が60%と118%の間ではごくわずかである。これは液性限界(44.54%)を境として何らかの変化があると推測できる。

4.5. 一軸圧縮強度と変形係数の相関性

図-15に各試料の一軸圧縮強度と変形係数の関係を示す。砂の場合一軸圧縮強度の小さい範囲で変形係数が多少小さい値を示しているが全体的には両試料とも一軸圧縮強度は変形係数と比例関係にあるといえる。カオリン粘土の一軸圧縮強度と変形係数の関係も各含水比ごとに比例関係にあるといえる。

5. あとがき

ここでは主に全周方向より凍結したコンクリート状凍土の強度変形特性に対する温度、ひずみ速度、含水比の影響について調べそれぞれ影響度が大きいことがわかった。また凍結方法を変えることにより応力～ひずみ曲線も変わり、一軸圧縮強度は大きく変化することが確認された。さらに凍土の強度変形特性に与える影響因子には温度履歴、供試体作製法などの外的要因、土質(粒径)、比表面積、不凍水などの内的要因があり今後それらの影響について把握する必要がある。

参考文献

- 1) Tsytoich, N. A.: The Mechanics of Frozen Ground, McGraw-Hill Book Co., (1973), p. 148
- 2) Haynes, F. D.: Strength and Deformation of frozen silt, 3rd Intern Conf. on Permafrost, (1978)