

凍土の圧縮強度と弾性係数の温度依存性

Temperature dependence in compressive strength and elastic modulus of frozen soil

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
(株)システム工学研究所

○学生員 横井 崇志
学生員 岡本 玄
学生員 西 慎彦
正 員 蟹江 俊仁
正 員 赤川 敏

(Takashi Yokoi)
(Hikaru Okamoto)
(Makihiko Nishi)
(Shunji Kanie)
(Satoshi Akagawa)

1. はじめに

永久凍土と非永久凍土が混在する地中に埋設された冷却ガスパイプラインは、フロストバルブの発生によって予期せぬ沈下や上昇、破損などの被害が報告されている。このような問題を解決するために、フロストバルブとパイプ間の相互作用を適切に評価することが必要だが、そのためにはフロストバルブとパイプ間の凍着強度が重要となる。そこで本研究では、フロストバルブとパイプ間の凍着強度を評価するために必要な、最大圧縮強度及び弾性係数の温度依存性について定量的評価を行うことを目的とする。

2. 試験方法

試料の実験条件を表-1に示す。本研究でシルト質土であるMZカオリンを扱ったのは、その凍上性の高さから、相互作用による構造物への影響を考慮して、実験結果をより安全側に見込むためである。試料の圧密条件は両面排水条件とし、含水比は圧密の収束により管理した。圧密後の試料の含水比の平均は62%であり、供試体の作成は圧密後の試料にサンプラーを押し込むという方法により行った。圧縮試験時の供試体寸法は直径Dを5cm、高さHを10cmとする円柱状とする。

供試体の冷却は、圧縮試験時の供試体の状態を試験温度に関わらず均一化させるために、液体窒素を用いた急速冷却と恒温水槽内での温度管理で行う。液体窒素での急速冷却は供試体のアイスレンズ形成を抑制し、凍上を起こりにくくするために行う。その後、恒温水槽内の不凍水に浸して温度調整をすることで供試体内部の温度を均一化させることができる。

このようにして作成した供試体を一軸圧縮試験機にセットし、鉛直方向荷重を作用させることで、圧縮ひずみと圧縮応力を直接求められる。圧縮試験を行う際には、試験を行う恒温低温室内は実際の試験温度を示すように温度調整をする。凍土を構成する氷の強度がひずみ速度に依存するため、荷重方法はひずみ制御とし、ひずみ速度は毎分1%の割合とする。供試体の軸ひずみが15%に達した所で、荷重を終了する。実験装置の概要は図-1に示す。供試体の温度は表-2に示したように4Caseとし、各Caseについて、2~3本の荷重を行った。

3. 昨年度実験との比較

昨年度からこの実験を継続して行ってきたが、昨年度はあまり精度の良い結果が得られなかった。その原因として、アイスレンズの生成が挙げられる。そこで、昨年度の実験では恒温低温室内で急速冷却していたが、今年度からはアイスレンズの生

成を抑えるために、液体窒素を用いたさらに急速な冷却を行った。図-2は昨年度の供試体を、図-3は今年度の供試体を示している。それぞれを比較すると、共にアイスレンズは生成しているものの、今年度の供試体は昨年度の供試体に比べてアイスレンズの層が非常に薄くなっている。今年度からの実験方法の改良によって、アイスレンズの生成が抑制され、精度の良い結果が得られたと推察できる。

表-1 試料の実験条件

材料	MZ カオリン
土粒子密度	2.64g/cm ³
含水比 (圧密後)	62% (平均値)
圧密荷重	100kPa
圧密時間	194hr (平均値)

表-2 供試体の温度

目標温度	供試体本数
-5℃	2本
-10℃	2本
-15℃	2本
-20℃	3本

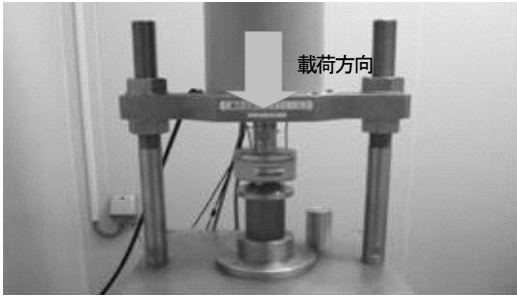


図-1 一軸圧縮試験機



図-2 昨年度供試体

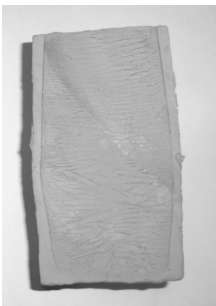


図-3 今年度供試体

4. 実験結果

表-3 に各 Case の供試体温度, 最大圧縮応力 $\sigma_{\max}$, 弾性係数 E_{50} , $\sigma_{\max}/2$ のときの圧縮ひずみ ε_{50} を示す. なお, 弾性係数を算定するに当たって, E_{50} 法を採用し, 算定式は式(1)を用いた.

$$E_{50} = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{50}} \times 100 \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

ただし, $\sigma_{\max}$: 最大圧縮応力 (MPa)

ε_{50} : $\sigma = \sigma_{\max}/2$ のときの圧縮ひずみ (%) である.

図-4 は供試体温度と最大圧縮強度の分布を示したものである. 灰色のマークは各 Case のデータ, 黒色の直線は各 Case のデータから, 最小二乗法により求めた直線回帰式となっている. 温度を T とすると回帰式は

$$\sigma_{\max} = -218.68 \times T(^{\circ}\text{C}) + 920.62 \quad (\text{KPa})$$

となり, 決定係数 R^2 は 0.96 である.

図-5 は供試体温度と弾性係数の分布を示したものである. 最大圧縮強度と同様に, 回帰式を求めると

$$E_{50} = -19.89 \times T(^{\circ}\text{C}) + 131.57 \quad (\text{MPa})$$

となり, 決定係数は 0.90 である.

図-6 は, $\sigma_{\max}/2$ のときの圧縮ひずみ ε_{50} の分布と, その平均値を示したものである. -10°C の値に少しばらつきが見られたが, 各温度の平均値を見ると大きなばらつきはあまり見られない.

図-4, 図-5 より, 最大圧縮応力 $\sigma_{\max}$ と弾性係数 E_{50} は温度が低いほど大きくなっている. また, 最大圧縮応力 $\sigma_{\max}$ と弾性係数 E_{50} は温度依存性があり, その関係はほぼ線形であるといえる. 図-6 より, $\sigma_{\max}/2$ のときの圧縮ひずみ ε_{50} については, 各温度の平均値には大きなばらつきはあまり見られず, 温度変化に関係なく概ね一定であると言える.

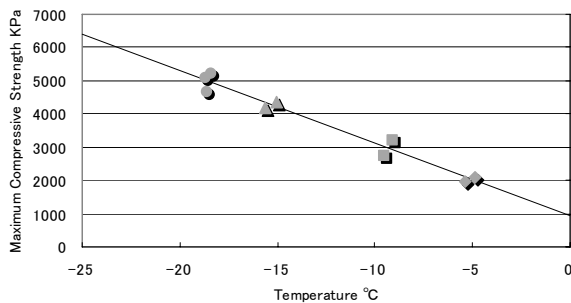


図-4 供試体温度と最大圧縮強度

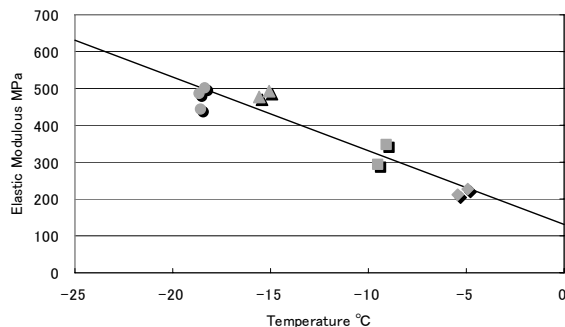


図-5 供試体温度と弾性係数

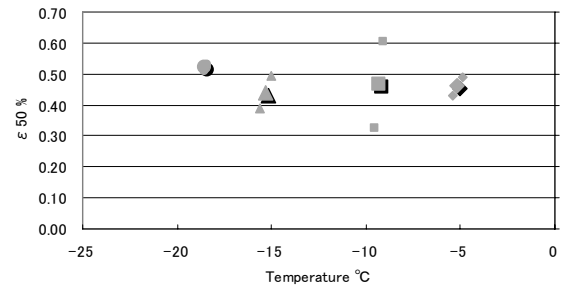


図-6 供試体温度と ε_{50}

表-3 実験結果

Case No.	供試体温度($^{\circ}\text{C}$)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	ε_{50} (%)	E_{50} (MPa)
Case05-1	-4.90	1.99	0.49	226
Case05-2	-5.00	2.38	0.43	213
Case10-1	-9.06	3.46	0.60	345
Case10-2	-9.51	3.50	0.33	294
Case15-1	-15.60	3.84	0.39	475
Case15-2	-15.04	4.67	0.49	493
Case20-1	-18.65	5.22	0.52	485
Case20-2	-18.58	5.32	0.51	444
Case20-3	-18.36	5.64	0.53	500

5. 考察

実験結果から, 凍土の温度低下により, 最大圧縮強度と弾性係数は増大するが, $\sigma_{\max}/2$ のときの圧縮ひずみは概ね一定であるということがいえる. この現象を, 凍土と構造物の相互作用という観点から考えると, $\sigma_{\max}/2$ のときの圧縮ひずみが, 温度に関わらず概ね一定であるのに対し, 凍土と構造物の剛性比は, 温度が低下するに従い増大するため, 構造物は変形形状しにくくなると考えられる.

最大圧縮強度, 弾性係数ともに精度の良い結果が得られたので, この実験の目的である弾性係数の温度依存性については満足できる結果が得られたと思われる. 今後さらに実験を進めていく場合には, 含水比の違いによる弾性係数等の変化について実験を進めていきたい.

今回得られた結果を元に, フロストバルブとパイプ間の凍着強度の定量的評価を行っていきたいと考える.

参考文献

- 1) 西慎彦, 岡本玄, 蟹江俊仁, 赤川敏: 凍結したシルト質土の力学特性とその温度依存性, 土木学会全国大会第64回年次学術講演回プログラム, iii-123 2009.
- 2) 岡本玄, 蟹江俊仁, 赤川敏, 横山正臣: 軸対称凍結モデルによるフロストバルブとパイプの凍着強度特性, 土木学会第63回年次学術講演会論文報告集, iii-433, Vol.63, 2008
- 3) 岡本玄, 蟹江俊仁, 赤川敏, 西尾淳: 軸対称凍結モデルによるフロストバルブとパイプの凍着強度, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol64, C-4, 2008