凍土壁造成における限界流速に関する基礎的実験・解析

北海道大学大学院	学生会員	○山添稜也
北海道大学大学院	フェロー会員	石川達也
摂南大学	正会員	伊藤 譲

# 1. はじめに

福島第一原子力発電所における汚染水の流出対策の一環として、力学的強度が強く完全な遮水性を持つ とされている凍土によって遮水壁を作り、原子力発電所地下への地下水の流入を抑制することが計画され ている.しかし,凍土の造成には地下水流が大きく影響する事が分かっている ).凍土同士が連結できる 限界の流速を求める理論式はすでに提案されているが、施工環境によっては、既存の理論式では扱えない ケースも発生している.本報告では,流速の異なる地下水流が存在する砂質土模型地盤内に凍土壁を造成 する模型実験を実施した.その際,流速は理論式による限界流速に基づき変化させた.また,浸透流・熱 伝導連成解析により実験結果との比較についても検討した.

#### 2. 試験方法

試験装置概略を図1に示す.試験装置では、供試体中央部に凍 結管を土槽底部まで挿入し,恒温槽で冷却した不凍液を循環させ ることで模型地盤中に凍土を造成することができる.この際、土 槽底部は金属板となっており熱の流入が多いため、底部からの地 下水流出を防ぐ目的で、市販の油粘土を凍結管部分の底部に幅 5cm, 高さ 3cm になるように設置した.また,水位を一定に保つ ことのできる流水タンクを用いて水を供試体側面から給水するこ とが可能である.供試体(高さ200mm,幅550mm,奥行き 150mm)は、豊浦砂を用い、AP法により相対密度が80%になる ように製した. 試験中はT型熱電対と, 排水量(排水速度)用 の重量計付きのたらいを用いて、土中の温度分布や流量の経時 変化が計測可能である.本試験では、模型地盤内に水頭差を一



図1 試験装置概略図

定に保った地下水流がある状態で、凍結管に-5℃の不凍液を循環させ、凍土の造成を行った.その際、凍 土壁が造成される限界流速を式(1)<sup>2)</sup>から求め、その前後で水頭差を変化させ、試験を行った.なお、計算の 結果,限界流速は 0.216m/h となったため,条件 1 では流速 0.180m/h,条件 2 では流速 0.244m/h となるよう にそれぞれ水頭差を設定した.

II –	$6\pi \cdot M^2 \cdot \lambda_1$	$\frac{\theta_f - \theta_b}{E} \cdot E\left(\frac{2a}{b}\right)$	(1)
<sup>o</sup> ∞crit −	$(n/100) \cdot l_f \cdot \gamma_w \cdot C_w$	$\frac{\partial \theta_{\infty} - \theta_{f}}{\partial_{\infty} - \theta_{f}} \left( \frac{P_{i}}{P_{i}}, \theta_{crit} \right)$	(1)

ここで、Mは凍結管の列数、 $\lambda_1$ は凍土の熱伝導率、nは地 盤の間隙率、Laは凍結領域の代表長、ywは水の単位体積重 量,  $C_w$ は水の比熱,  $\theta_t$ は水の氷点,  $\theta_b$ はブライン温度,  $\theta_\infty$ は上流の地下水温度(=地中温度),  $F(2a/P_i, b_{crit})$ は凍結

管の管径と間隔によって決まる関数値,aは凍結管の外半径,P<sub>i</sub>は凍結管の間隔である. 3. 解析方法

本報告では浸透流解析ソフト SEEP/W と熱伝導解析ソフト TEMP/W を連成させて用いた<sup>3)</sup>. 解析モデル は供試体を上から見た平面モデルとし、実験の供試体と同じ 550mm×150mm とした.メッシュの大きさは 10mm 程度の長方形となるように設定した. 解析条件を 2,表1に示す. この時,豊浦砂の水平方向の透水

係数は既往の研究<sup>4),5)</sup>より 1.38×10<sup>4</sup>m/s とした.また,熱伝導率の推定には Johansen の式のを用い,石英の 含有率は試料のデータシート "より 0.92 とした. 解析は浸透流・熱伝導解析共に定常解析を行った後,次 ステージで凍結管部分に温度を設定し連成解析を行った. 地盤の初期温度と凍結管の温度はそれぞれ実験 時と同じ20℃と-5℃とし、飽和度は1とした.



キーワード	凍土壁,	模型実験,	連成解析,	地下水流
連絡先	〒060-862	8 北海道札幌	晶市北区北13	条西8丁目

表 1	連成解析の解析条件	(豊浦砂)

間隙率	0.403
水平透水係数	$1.38 \times 10^{-4} \mathrm{m/s}$
熱伝導率(凍結)	$1.58 \times 10^4 \text{J/h} \cdot \text{m} \cdot \text{°C}$
熱伝導率(未凍結)	$9.36 \times 10^{3}$ J/h·m·°C
熱容量(未凍結)	$3.76 \times 10^{6} \text{J/m}^{3} \cdot ^{\circ}\text{C}$
熱容量(凍結)	$2.44 \times 10^{6} \text{J/m}^{3} \cdot ^{\circ}\text{C}$

北海道大学大学院工学研究院 TEL011-706-6203

-551-

#### -276

## 4. 結果・考察

各条件の流速ベクトル・温度コンター図を図3,図4に、流量の変化を図5,図6に示す.ただし、図中の破線は0℃境界を示す.また、図6中のベクトル最大長が流速0.390m/hに相当する.図5より、条件1では約1.5h経過時点から流量は減少し、12h経過後には完全に遮水されていることが分かる.実験値の方に減少の遅れが見られるのは室温等の熱流入により、凍土の造成が遅れているためと考えられる.図3より、解析で流量の減少が見られる1.5h経過時点で凍土が連結していることが確認できる.また図4、6より、

条件2の動水勾配が大きく流速 が限界流速を超えている場合は, 48h 経過後も凍土は十分に成長 せず,流量はほぼ一定のまま推 移していることが確認できる. これは、流速が早く熱の移流が 多いためだと考えられる.また, 水頭差を 1cm 刻みで変化させて 解析を行った結果,図7に示す ように解析上で凍土が連結する 限界流速は0.226m/hとなり、試 験結果の流速 0.180m/h~0.244m/ hの範囲内に収まる結果となっ た. 一方、解析結果は理論式の 限界流速より若干速くなったが, 解析では理論式よりも冷却能力 を高く評価するという既往の研 究結果®と同じ傾向を示してお り、凍結管部分を点で設定して いることや不凍水量の扱い方の 差に起因するものであると考え られる.



図4 流速ベクトル・温度コンター図(条件2,48h 経過)



18 - 20 °C

### 5. まとめ

本試験条件のような単純な凍結管配置における試験においては、凍土壁の造成に及ぼす地下水の限界流 速は既存の理論式に基づく結果や浸透流・熱伝導解析による結果とほぼ一致することが確認できた. 今後 は管の配置等の条件を変化させ、様々な条件における限界流速について検討を進める. また、実地盤につ いての解析も進める.

**参考文献**:1) 木下誠一編著:凍土の物理学, p.141, 1982.2) 日本建設機械化協会編:地盤凍結工法, p.15, 1982.3) GEO-SLOPE INTERNATIONAL: http://www.geo-slope.com/.4) 地盤工学会編:地盤材料試験の方法と解説-二分の一冊-, p.455, 2009.5) 福島伸二,望月美登志,香川和夫:三軸セルを用いた深い地盤の透水性調査法,土木学会論文集 No.445, p.127~133, 1992.6) Johansen, O.: Thermal conductivity of soils, Ph. D, Thesis, *Norwegian Technical Univ, Trondheim*, 1975.7) 豊浦硅砂鉱業株式会社: http://www.toyourakeiseki.com/about.html.8) 久門義史,松岡啓次,上田保司:地下水流が凍土壁造成に及ぼす影響把握のための二次元熱差分解析法,第49回地盤工学研究発表会, p.855~856, 2014.