

III-262

円板凍土強度実験と部分破壊を考慮した有限要素法の解析

(株) 精研 正会員 松岡啓次、伊豆田久雄
 (株) 精研 正会員 山本英夫、生頼孝博

1. はじめに シールド発進防護では、立坑前面に円板状凍土を造成する場合が有り、円板凍土の力学特性が必要で、これまでに室内実験を行ってきた。¹⁾ この実験結果から、部分的な引張破壊が生じても円板凍土はせん断破壊が生じるまで強度を維持することがわかった。部分的な破壊を含む円板凍土を弾性体とした有限要素法(FEM)を用いて解析し、破壊機構の考察と、凍土への適応性を検討する。

2. 室内実験の概要 モルタル円板(開口径10cm)に凍着させた円板凍土を、円板曲げ装置¹⁾(図1)に設置し、液圧Pを徐々に増加させることにより、円板凍土を変形させ破壊させた。試料土は豊浦標準砂と藤の森青粘土であり、各々飽和した-10°Cの円板凍土を供試体とした。

3. FEM解析の仮定及び計算手法 FEM解析は、次の条件及び仮定のもとに表1の値を用い図2のフローで行った。

- 1) 円板凍土は均質な弾性体とし、軸対称(R-Z)座標とする。
- 2) 凍着条件とは、凍着部の節点がR,Z方向に変位しないものとする。
- 3) 引張破壊は、最大の引張主応力 $(\sigma_1)_{max}$ が引張降伏強度 σ_y 以上になると、その要素が破壊し、要素のヤング率Eを0とする。但し、ある液圧Pの時点で破壊する要素が複数個ある場合、引張主応力が最大の要素のみ破壊するものとする。
- 4) せん断破壊は、図1のS点を通る仮想せん断面のせん断応力 τ がせん断強度 τ_y を超すと瞬時に破壊する。

4. 実験結果とFEM解析の比較 厚み $t=1.5\text{cm}$ の砂凍土と粘土凍土の液圧Pと中心変位 δ_0 の実験結果を図3に示す。 $P=P_y$ までは、Pと δ_0 は両凍土共直線的に変化し、実線で示すFEMの解とも一致し弾性体として挙動していることがわかる。 P_y の時点で開口側中心付近の歪 ϵ_1 (図1)が急激に変化し、中央付近で引張破壊したのが観測された。砂凍土の P_y 後では、中心から5~7本のクラックがPの増加に従って徐々に広がり、 P_{max} で加圧側の円周($r=5\text{cm}$)の歪 ϵ_2 (図1)が変化し、急激にPが低下し破壊した。粘土凍土の P_y 後では、開口側の中央付近で数本のクラックの成長が生じた後、Pが低下した。

破壊後の各々凍土平面及び断面のスケッチを図4に示す。砂凍土では、開口側で数本のクラックが $r=4\text{cm}$ まで有り、加圧側で開口径と同径の円周状クラックが深さで厚みの半分程度あり、それより開口側へせん断面が観察された。粘土凍土でも、加圧側で砂凍土と同様にクラックが生じ、加圧側では引張破壊が生じずに、せん断破壊し、せん断面は開口径と同径の円周状で観察された。

FEMによる破壊進行状況を図5に示す。砂凍土の場合、液圧

表.1 凍土の物性値

土質	砂凍土	粘土凍土
E (kgf/cm ²)	50,000	9,100
ν	0.3	0.3
ϕ (°)	15.0 ²⁾	0
C (kgf/cm ²)	52.0 ²⁾	23.7
σ_y (//)	113.0	50.0
温度 (°C)	-10	-10

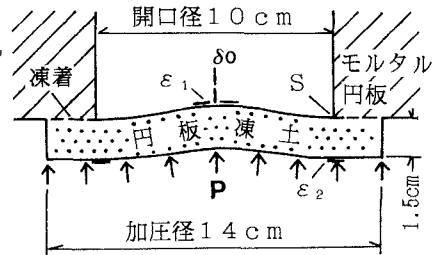


図.1 円板曲げ装置模式図

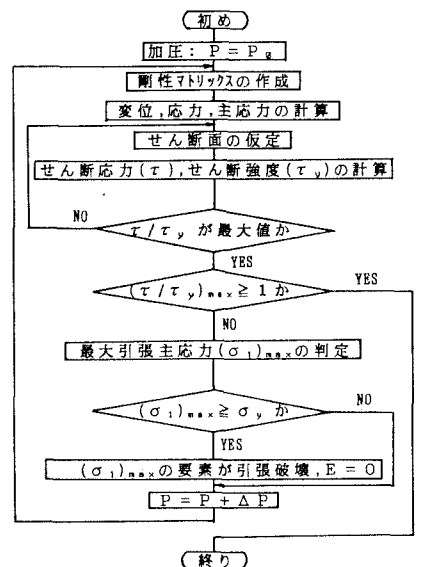


図.2 概略フローチャート

$P=14.8\text{kgf/cm}^2$ でA点で引張破壊が生じ、 $P=25.8\text{kgf/cm}^2$ まで θ 方向の引張破壊が順次発生し、 $P=26.5\text{kgf/cm}^2$ でB点の要素がR方向に引張破壊した瞬間、すぐ上の要素2個が引張破壊し、続いてせん断破壊が生じた。粘土凍土では、 $P=8.8\text{kgf/cm}^2$ でA点の引張破壊が生じ、 $P=10.8\text{kgf/cm}^2$ まで θ 方向の引張破壊が順次発生し $P=10.8\text{kgf/cm}^2$ で17度の角度でせん断破壊が生じた。

実験とFEM解析は、引張方向、クラック発生位置共ほぼ一致したが、砂凍土のクラック長さは実験の方が大きい。それはクラックの先端で集中応力が働くが、FEMでは考慮していないためである。

5. 凍土厚と破壊圧力に関する考察 開口径を一定($\phi=10\text{cm}$)にし凍土厚を変化させると、厚みが小さければ引張破壊、大きければせん断破壊が先行するのが支持状態の粘土凍土実験で確かめられている¹⁾。そこで凍着状態で解析し、凍土厚 T と P_y 、 P_{max} に関する計算結果を図6に示す。砂凍土では、 T が1.5~3.5cmなら図5のA付近で部分的な引張破壊が生じ、最終的にはB付近でせん断破壊する。3.5cm以上では引張破壊なしにせん断破壊する。尚、1.5cmではB付近でも引張破壊する。粘土凍土では、 T が1.5~2.0cmではA付近で引張破壊するが、それ以外は全てB付近でせん断破壊する。実験では $T=1.5\text{cm}$ の砂凍土、粘土凍土共引張破壊の後、せん断破壊が生じFEMの結果と一致した。

6. 結論 円板凍土強度実験を行い、クラックを伴う弾性FEMにより解析した。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 引張破壊時、せん断破壊時の応力及び破壊方向が実験とほぼ一致し、破壊強度の予測には、この弾性FEMで解析できることが確認された。
- 2) 開口径一定で凍土厚を変えることにより、引張破壊とせん断破壊の優劣により、砂凍土の場合3種類の破壊パターンが現れることがわかった。
- 3) 変位に関して、引張破壊が発生するまでは実験と一致するが、それ以降では合わないのは、凍土が塑性変形又はクリープ変形していると考えられる。

文献 1)生頼他, 円板凍土の力学特性に関する室内実験, 土質学会, 土の凍結に関するシンポジウム論文集, 1986
 2)T.SHIBATA et.al., Time-depedence and volumetric change characteristic of frozen sand under triaxial stress condition, P173-179, ISGF'85

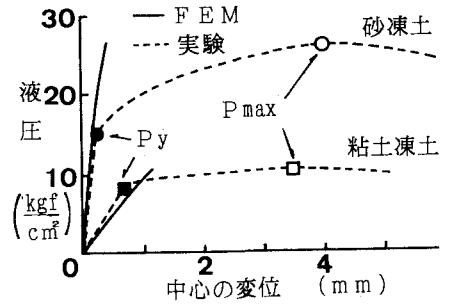


図.3 中心変位と液圧の実験とFEMの比較

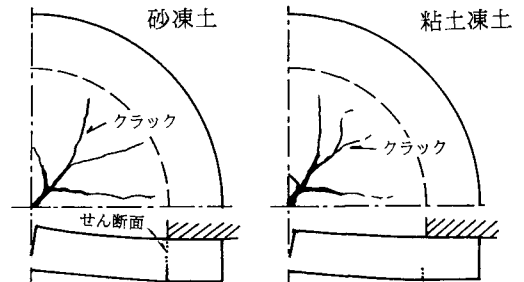


図.4 実験における P_{max} 後の凍土のクラック図

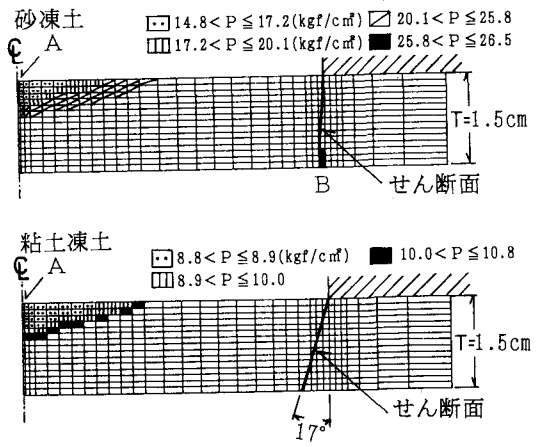


図.5 FEMによる破壊進行状況

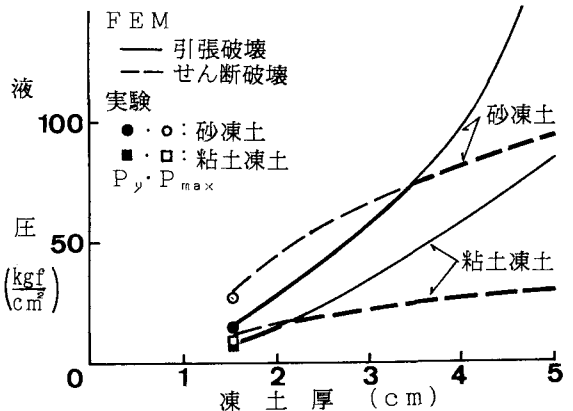


図.6 FEMによる凍土厚と破壊圧力の関係