

混合スラグ材を遮水性材料として用いたため池堤体内の挙動及び応力状態に関する一考察

A Study on the Behavior and Stress State within the Embankment of a Reservoir Using Mixed Slag Material as a Water-Proofing Material

○青木 拓磨*, 藤岡 寿美子*
AOKI Takuma, FUJIOKA Sumiko

1. はじめに

ため池改修工事においては、遮水性材料である刃金土を堤体上流側に設ける前刃金工法が一般的な改修工法であるが、近年、良質な刃金土が全国的に不足している。このような中、刃金土の代替材料として鉄鋼生産の副産物である製鋼スラグと高炉水砕スラグの混合材料（以下、混合スラグ材という）を適用、実用化に向けた研究が進められている¹⁾。本検討では、混合スラグ材を遮水性材料として用いたため池堤体内の挙動及び応力状態を解明すべく、弾塑性有限要素法による全応力解析を実施した。

2. 解析概要

解析対象ため池は、令和6年度に混合スラグ材を遮水性材料として用いる実証工事が実施された大分県臼杵市に位置するため池である。実証工事は、前刃金工法と同様に現況堤体の上流側に混合スラグ材による遮水性ゾーンを設けるものであり、堤体標準断面はFig. 1のとおりである。なお、現況堤体は砂質粘土を主体とする均一型であり、基礎地盤は沖積の礫混じり砂質粘土（ac層）及び溶結凝灰岩（Wt層）である。

本検討の全応力解析は、溶結凝灰岩及び混合スラグ材を等方線形弾性体、その他の土質材料を弾塑性体と仮定した。弾塑性体の降伏関数及び塑性ポテンシャル関数は、簡易的かつ一般的なモール・クーロンモデルを採用した。本解析時点は、実証工事完了直後を対象とし、解析ステップは次の2段階とした。1段階目は、現況堤体及び基礎地盤を対象とした自重応力解析を実施し、2段階目は、遮水性ゾーン（混合スラグ材）及び鞘土を築堤する応力変形解析を実施した。解析モデルをFig. 2に示す。基礎地盤の解析領域は、鉛直方向に堤高相当（5m）、水平方向に堤敷（13m）の3倍相当の領域とした。境界条件は、モデル左右端は水平方向変位拘束、モデル下端は水平及び鉛直方向変位拘束とした。解析に使用した材料定数をTable 1に示す。混合スラグ材について、単位体積重量は湿潤密度試験より得られた値を採用した。弾性係数は、築堤直後の強度として、散水された状態で14日間養生後の一軸圧縮試験結果²⁾より設定した。その他土質材料の材料定数は、N値及び室内土質試験結果より設定した。

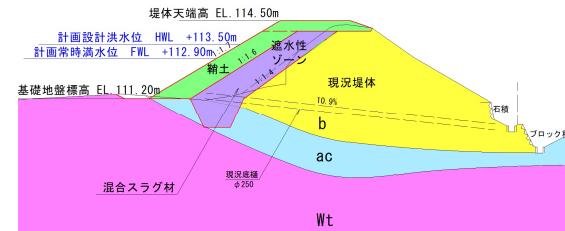


Fig. 1 堤体標準断面図
Standard Cross-Section of the Embankment

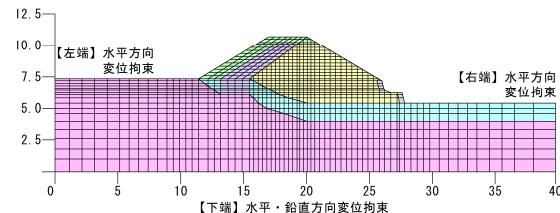


Fig. 2 解析に使用した有限要素モデル
Finite Element Model Used for the Analysis

Table 1 解析に使用した材料定数
Material Constants Used for the Analysis

種類	ボアソン比	弾性係数 (kN/m ²)	湿潤単位 体積重量 (kN/m ³)	飽和単位 体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
溶結凝灰岩 (Wt層)	0.41	4.2E+05	18.2	19	173	20
沖積層 (ac層)	0.33	2.5E+03	17.2	17.5	16	18
現況堤体 (b層)	0.33	1.4E+03	16.6	17.1	13	16
鞘土	0.29	4.0E+04	19.3	21.1	24	38
刃金土 (混合スラグ材)	0.495	3.6E+05	25.3	26.1	724	2

* 内外エンジニアリング株式会社 Naigai Engineering Co., Ltd.

キーワード：土の静力学的性質、土構造物の解析、数値解析

3. 解析結果及び考察

解析結果より、ため池堤体部の変位ベクトル図をFig. 3に示す。混合スラグ材を用いた遮水性ゾーンにおいて、床堀部は変位量が小さく、堤頂部に向かって、変位量が増加する傾向がみられた。堤体内の変位量は、最も変位が大きい堤頂部付近において約6mmであった。また、堤体内の全体的な挙動は、混合スラグ材及び鞘土の新規盛土部の重量が現況堤体に作用し、現況堤体を下流に押すような挙動を示した。上記の結果を踏まえ、遮水性ゾーンは、Fig. 4に示すように、床堀部が固定された片持梁のように上に凸な形状に変形する挙動を示している。これは、土質材料より重量の大きい混合スラグ材が現況堤体に荷重として作用し、現況堤体が変形したことによるといえる。

次に、堤体内の応力分布（最大主応力分布、最小主応力分布）をFigs. 5, 6に示す。なお、主応力は引張を正とする。引張応力については、Fig. 5より、遮水性ゾーン上流側の床堀部から床堀直上部において、引張応力が確認された。遮水性ゾーン内で確認された最大引張応力は、床堀部と堤体境界部で約110kN/m²であった。一方、圧縮応力については、Fig. 6より、遮水性ゾーン下流側の床堀部から床堀直上部において、圧縮応力が確認された。遮水性ゾーン内で確認される最大圧縮応力は、床堀部と堤体境界部で約350kN/m²であった。上記の結果を踏まえ、堤体内の応力状態は、遮水性ゾーンが上に凸な形状に変形した堤体内の挙動と整合した曲げ応力が発生しているといえる。

4. あとがき

本報では、ため池における刃金土の代替材料として混合スラグ材を用いた場合の堤体内の挙動及び応力状態を報告した。混合スラグ材は、土質材料と比較し剛性が大きく、遮水性ゾーン内で鞘土部よりも大きな引張応力や圧縮応力が発生することが判明した。しかしながら、混合スラグ材の引張強度については、資料も少なく不明な部分が多い。このため、今後の課題として、材料特性においては、築堤後の混合スラグ材の引張強度の解明、解析においては、混合スラグ材の引張強度の反映を含め、混合スラグ材の応力ひずみ関係の再現が挙げられる。これらを踏まえ、混合スラグ材の刃金土としての適用性について、より詳細に検討したい。

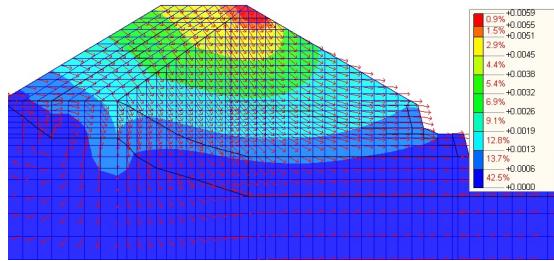


Fig. 3 変位ベクトル図 (単位: m)

Displacement Vector Diagram

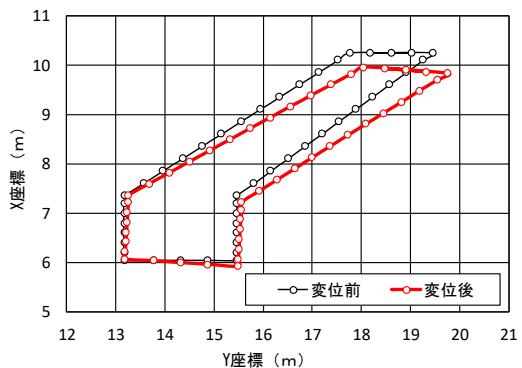


Fig. 4 傾斜遮水性ゾーンの変位イメージ図
Displacement Illustration of the Inclined Seepage Zone
※変位後=変位前+変位量×100

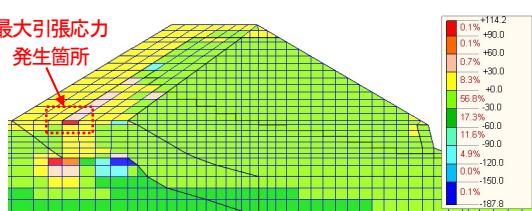


Fig. 5 堤体内の最大主応力分布 (単位: kN/m²)
Maximum Principal Stress Distribution Diagram

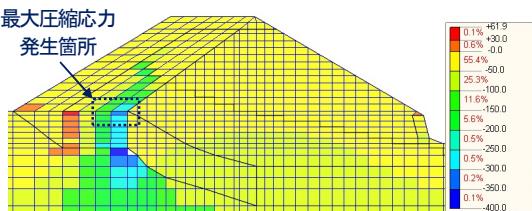


Fig. 6 堤体内の最小主応力分布 (単位: kN/m²)
Minimum Principal Stress Distribution Diagram

参考文献 1) 泉明良, 赤司有三, 山越陽介. 製鋼スラグと高炉水砕スラグ混合材料の盛立試験による施工性に関する検討. 第68回農業農村工学会大会公演会公演要旨集, 2019, p. 423.

2) 泉明良, 赤司有三, 山越陽介. 製鋼スラグと高炉水砕スラグ混合材料の長期的な強度及び透水係数. 第54回地盤工学研究発表会公演要旨集, 2019, p. 420.