

築堤時のロックフィルダム材料の弾塑性モデルと FEM 解析 (その 2)

正負のダイレイタンスーを表現できる構成式を用いた FEM 解析

(株) 日本車両 正会員 本田秀樹
 名古屋工業大学 正会員 孫 徳安・松岡 元
 (株) 関西電力 正会員 工藤アキヒコ
 (株) ニュージェック 正会員 原 忠・藤井 悟

1. はじめに

著者らがすでに提案した土の弾塑性構成式は、SMP 規準に基づく変換応力を導入することにより 3 次元応力下での正規圧密粘土の変形・強度特性を統一的に表現することができ、また硬化パラメータ H の導入により砂などの地盤材料が示す正負のダイレイタンスー特性を表現することができる¹⁾。ここでは、ロックフィルダム材料が示す強度の拘束応力依存性を考慮した 3 次元弾塑性構成式を提示し、提案モデルをロックフィルダム築堤時の FEM 解析へ適用する。なお、要素試験レベルでのモデルの検証については、別報²⁾を参照されたい。

2. 見かけの粘着成分を取り入れた硬化パラメータ

砂や粗粒材などの粒状材料は拘束応力が大きいほどピーク破壊時のダイレイタンスー量が小さくなるので、破壊時におけるモールの応力円の包絡線(上に凸な曲線となる)を直線で近似すれば、見かけの粘着成分 c が得られる。ここで粘着成分を考慮した拡張 SMP 規準に基づく変換応力の不変量(\tilde{q}, \tilde{p})を用いて、すでに提案している正負のダイレイタンスー特性を表現できる硬化パラメータ H を次式のように拡張する。

$$dH = \frac{M^4}{M_f^4} \cdot \frac{M_f^4 - (\tilde{q}/\tilde{p})^4}{M^4 - (\tilde{q}/\tilde{p})^4} d\varepsilon_v^p \quad (1)$$

ここに、M, M_f は変相点および破壊時の応力比、 ε_v^p は塑性体積ひずみ、 \tilde{q}, \tilde{p} は SMP 規準に基づく変換応力で表された q, p である¹⁾。

3. 強度の拘束応力依存性を考慮した 3 次元弾塑性構成モデル

従来の関口・太田モデルに変換応力 \tilde{s}_{ij} を用いて SMP 規準を取り入れ、見かけの粘着成分を考慮した正負のダイレイタンスーを表現できる式(1)の硬化パラメータ H を導入

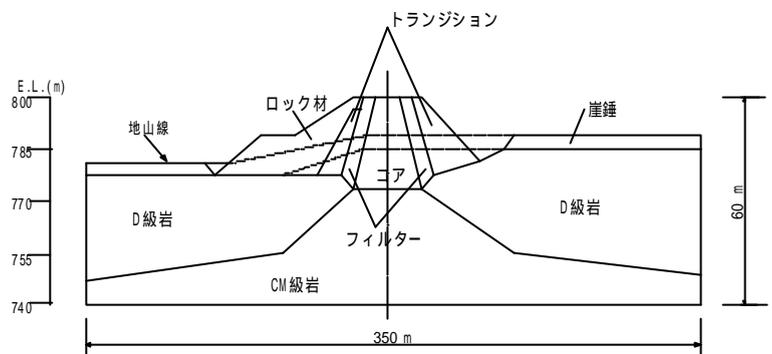


図 1 大河内発電所太田第 5 ダム断面図と解析領域

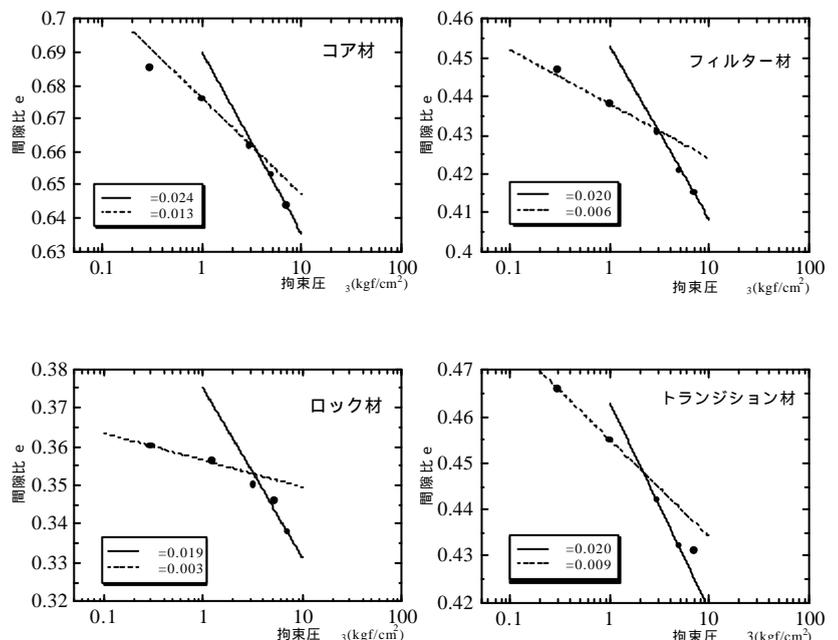


図 2 等方圧縮試験結果

キーワード：弾塑性構成式，ロックフィルダム，FEM 解析，ダイレイダンスー，拘束応力依存性
 連絡先：名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学社会開発工学科 TEL&FAX:052-7355483

し、モデルの降伏関数 f は式(2)で表される¹⁾。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left(\ln \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_0} + \frac{\tilde{\eta}^*}{M} \right) - H = 0 \quad (2)$$

4. ロックフィルダム材料の要素試験とモデルによる予測

FEM 解析の対象とするダムは関西電力大河内発電所太田第5ダムであり、ダム断面図を図 1 に示す。堤体材料であるロック材、フィルター材、トランジション材の粒度の相似試験(粒度分布について別報²⁾を参照)に対して大型の排水三軸圧縮試験を行い、基礎岩盤の D 級軟岩とコア材に対して中型の非排水三軸圧縮試験を行った。試験結果からモデルの材料パラメータ $\lambda, \kappa, M, M_f, \sigma_0$ の値を得る。 λ, κ は図 2 に示すように等方圧縮試験結果より決定される。図 2 中のプロットの間隙比は同一供試体の等方圧縮試験結果ではなくて各三軸試験せん断前(等方圧密後)の間隙比である。 M_f, σ_0 は c, ϕ の値から $M_f = 6 \sin \phi / (3 - \sin \phi), \sigma_0 = c \cdot \cot \phi$ を用いて決定される。 M の値については、排水三軸圧縮試験(CD 試験)による変相点($d\varepsilon_v = 0$)か非排水三軸圧縮試験(CU 試験)による変相点($dp=0$)の q/p の値を用いる。ロックフィルダム材料の三軸試験結果とモデル予測の比較については別報²⁾を参照されたい。

5. 弾塑性構成式の有限要素解析への適用

本研究では、太田第5ダムの築堤過程段階における FEM 解析を行う。まず、地山の掘削に先立ち、地山の全要素の自重を作用させた(自重解析)後、実際の掘削工程に従って掘削を行い、掘削が終了した後、載荷工程に従い盛立解析を行った。解析に用いた各材料のパラメータは、材料の要素試験結果を予測した時に用いたものと同じである²⁾。

太田第5ダムでは基礎地盤(D 級岩盤)の沈下量および側方変位量、またコア部の沈下量を計測しており(図 3 参照)、解析では提案モデルを既存の FEM 解析プログラム DACSAR に取り入れ、解析結果の一部として沈下量および側方変位量を得た。図 4 には D 級岩盤の表面(No.163)とコア部(V-1 ~ V-5)の沈下量の実測値と解析値の比較を示すが、解析値は実測値に近いのが見られる。図 5 には D 級岩盤(F-1 ~ F-7)の側方変位量の実測値と解析値の比較を示しているが、こちらも解析値と実測値は良く対応しているのが見られる。

参考文献 1) 孫・松岡・姚・石井・一村：初期異方性を考慮した粘土と砂の統一的な弾塑性構成式，土木学会論文集，No.631/48, pp.437-448, 1999. 2) 原・竹沢・工藤・松岡・孫：築堤時のロックフィルダム材料の弾塑性モデルと FEM 解析(その 1)，土木学会第 56 回年次学術講演概要集 第 3 部, 2001(投稿中)。

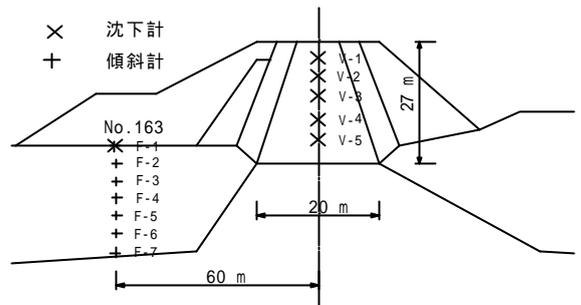


図 3 沈下量および側方変位量の計測点

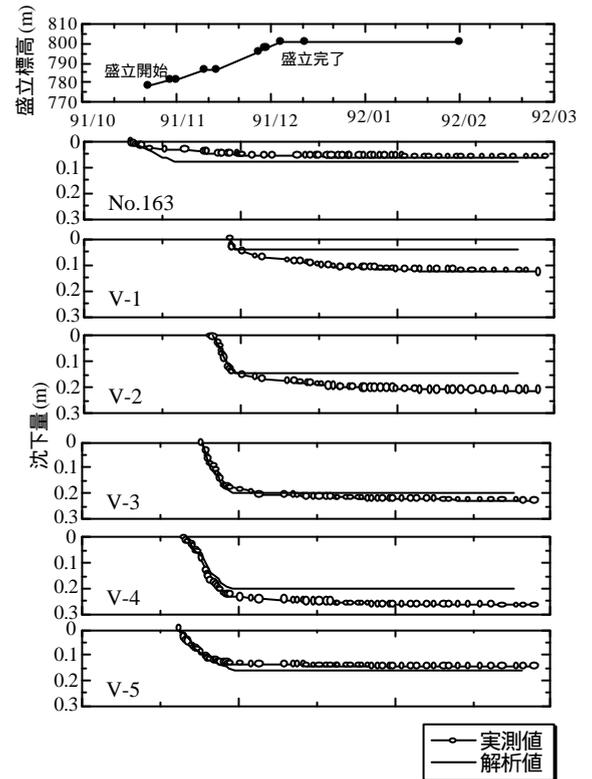


図 4 コア部の各深度における沈下量

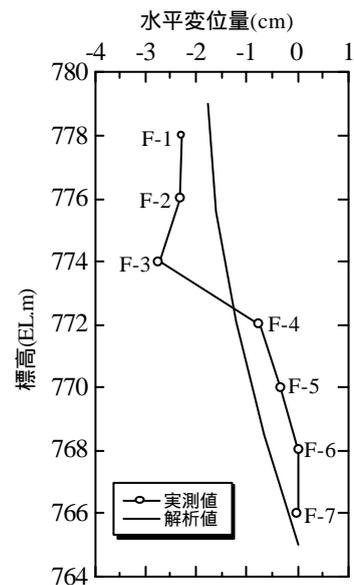


図 5 D 級岩盤の側方変位量