

河川堤防の浸透すべり破壊への剛塑性有限要素法の適用

河川堤防 すべり破壊 剛塑性有限要素法

名城大学
建設技術研究所

国際会員 ○小高 猛司
国際会員 李 圭太

1. はじめに

河川堤防の実務における現状の浸透時のすべり破壊に対する安定性の照査¹⁾は、飽和-不飽和非定常浸透流解析によって設定した降雨・洪水外力に対して発生する堤体内の水位を予測した後に、その堤体内水位を用いて、修正フェレニウス法による円弧すべり解析を実施するというものである。本研究ではそれに代わる手法として、飽和-不飽和非定常浸透流解析と剛塑性有限要素法を連成した解析法を新たに開発した。非定常浸透流解析の結果を堤体内水位としての情報のみを用いるのではなく、間隙水圧分布として直接用いるために、基礎地盤が複雑な地盤構造を有する堤防であっても適正な浸透流場を設定できる。また、崩壊メカニズムを円弧に限定することなく、堤体の塑性流動破壊時の安全率を直接求めることができる利点もある。

本報では、複層構造の高透水性基礎地盤を有する堤体模型の浸透破壊実験²⁾に提案解析法を用い、その適用性を示す。

2. 剛塑性有限要素法の概要

極限解析の簡明さと弾性解析で実績を積んできた有限要素法の発達とが重なり、塑性加工の解析に剛塑性有限要素法が開発された³⁾。塑性ひずみに対し弾性ひずみが無視できる場合は、物体は剛塑性体として取り扱うことが可能であり、塑性加工の解析においては、物体が常に極限状態で加工されると考えられることから、極限解析によって導かれる剛塑性有限要素法は大いに有効であった。また剛塑性有限要素法は、残留応力と非破壊域の応力の計算はできない一方で、応力を増分形で取り扱う弾塑性有限要素法とは異なり、大変形が生じる場合においても応力の誤差の累積はないという利点がある。そのように大変形解析として開発された剛塑性有限要素法であったが、地盤工学の分野には田村らによって導入された⁴⁾。田村らは有限要素離散化によって初めて適用が可能となる線形代数を用いて、剛塑性有限要素法を明快に定式化し直し、安定解析法として種々の土構造物の安定問題にそれを適用し多大な成果を収めた⁴⁾。この段階では土を均質なミーゼス材料として扱っていたが、その後田村らは土のような「摩擦性材料」に適用できるようにドラッガー・ブラガーの降伏関数と非関連流動則を用いた剛塑性有限要素法を新たに定式化し⁵⁾、土固有の安定問題の解決に大きく貢献した。一方浅岡は、カムクレイモデルの限界状態における塑性流動則を記述して田村らの剛塑性有限要素法に導入することによって、飽和地盤の有効応力支持力解析法を提案した⁶⁾。さらに、模型砂質地盤の浸透破壊実験による検証を通して、排水ならびに非排水条件下における「水-土骨格連成極限約合い解析」が確立された^{7,8)}。その間、限界状態における異方性を考慮した関口・太田モデルの塑性流動則を導入して異方圧密地盤の支持力問題の解決が図られ⁹⁾、さらに飽和粘性土の大変形を伴う分岐問題への適用も試みられている¹⁰⁾。また、その後は、補強斜面の安定性評価^{11,12)}や浸透時の矢板の安全性評価¹³⁾などにも利用されている。

本報では、小高による解説^{14,15)}を元に、剛塑性有限要素法を用いた「水-土骨格連成極限約合い解析」の概要を示す。

式(1)~(3)に、本研究で用いる剛塑性境界値問題を示す。式(1)は極限つり合い式であり、式(2)はミーゼス材料が示す限界状態における体積非圧縮の線形制約条件式、そして式(3)は自重による塑性仕事の大きさを仮に1としておく制約条件式である。

$$\int_V [B]^T \{s\} dV + [L]^T \{\lambda\} - \mu \{b\} = \{t\} \quad \cdots (1) \quad [L] \{\dot{u}\} = \{0\} \quad \cdots (2) \quad \{b\}^T \{\dot{u}\} = \{1\} \quad \cdots (3)$$

ここに、 $\{s\}$ ：各要素での偏差応力ベクトル、 $\{\lambda\}$ ：各要素での平均応力ベクトル、 $\{b\}$ ：各節点での自重による等価節点力ベクトル、 $\{t\}$ ：表面力が作用する各節点での表面力による等価節点力ベクトル、 $\{\dot{u}\}$ ：各節点での変位速度ベクトル、 $[B]$ ：次の関係式を作るひずみ速度～節点変位速度マトリックス、 $\{\dot{\epsilon}\} = [B] \{\dot{u}_e\}$ 、 $\{\dot{u}_e\}$ ：ある要素の節点変位速度ベクトル、 $[L]$ ：次の関係式を作る体積ひずみ速度～全体節点変位速度マトリックス、 $\{\dot{v}\} = [B] \{\dot{u}\}$ 、 $\{\dot{v}\}$ ：各要素での体積ひずみ速度ベクトル、 μ ：は安全率に相当する荷重係数である。式(3)によって自重場を仮に1g場と制約していることから、極限つり合い式の中では、自重場が μg となったら壊れるという意味となる。

式(1)の極限つり合い式は不静定であるため、剛塑性体の限界状態における構成式(4)を用いる。

$$\{s\} = \frac{\sigma_0}{\bar{\epsilon}} [Q] \{\dot{\epsilon}\} \quad \cdots (4)$$

ここに、 $[Q] \{\dot{\epsilon}\}$ ：純ひずみ速度ベクトル、 $[Q]$ ：工学ひずみ速度ベクトル $\{\dot{\epsilon}\}$ を純ひずみ速度ベクトルに変換するマトリックス、 σ_0 ：ミーゼス体のミーゼス定数、 $\bar{\epsilon}$ ：相当塑性ひずみ速度、である。

なお、式(2)の限界状態時における体積非圧縮条件を使用する段階において、この問題は破壊時のダイレイタンスシーを

考慮しないミーゼス材料を想定している。田村らは破壊時のダイレイタンシー角を考慮した制約条件式も定式化している⁹⁾が、本報の解析では、 ϕ 材の解析であっても限界状態時にはダイレイタンシー角がゼロ、すなわち体積ひずみ速度がゼロとなる非圧縮条件を適用する。もちろん今後の拡張は容易である。

さて、本研究で対象とする浸透時の堤防法面の安定問題においては、式(4)のミーゼス定数は、堤防法面内の各要素が堤防構造体として極限つり合いを保つ有効応力場を探索して決定される。その際、本研究では強度定数 c , ϕ で規定されるモール・クーロンの破壊規準によって、平均有効応力とミーゼス定数との関連づけが安全率の算定と並行して行われ、同時に解かれる。具体的には、以下の手順で解析を行う。①洪水外力を想定した飽和-不飽和非定常浸透流解析を実施し、ある状態における堤体内の間隙水圧分布を求める。②自重解析によって各要素の仮の平均応力を求める。③②で求めた平均応力から①で求めた間隙水圧を除いて各要素の平均有効応力を求める。④各要素の平均有効応力からモール・クーロンの破壊規準を用いて各要素のミーゼス定数を求める。⑤極限つり合い解析を行って各要素の平均応力を求める。この平均応力が収束した時が、正解であると判断し、その時の安全率と崩壊メカニズム（塑性流れ場：変位速度ベクトル分布）を求める。

3. 模型実験の解析例

図1は半断面浸透模型実験¹⁾の解析例である。一番左の列が模型実験の様子であり、下へ行くほど浸透時間が経過し、堤体が変状する様子がわかる。左から二列目の最上段に実験ならびに解析の境界条件を示している。非常に透水性の高い下部基礎地盤上に、やや透水性が低い上部砂質基礎地盤がある2層構造の基礎地盤を有する堤防となっている。その複雑な境界条件を反映した浸透流解析によって求められた各時刻における間隙水圧分布を、左から二列目の二段目から示している。右から二列目が剛塑性有限要素法によって求められた各時刻における安全率 F_s とその時の崩壊メカニズムである。時間経過に伴い F_s が低下しており、実験で大きな堤体変状が発生した頃に F_s が1を下回ることがわかる。一番右の列の図が、浸透流解析で求められた間隙水圧分布をそのまま使用して計算した円弧すべり解析の結果である。剛塑性有限要素法の結果にほぼ一致しており、堤体内水位のみを用いる従来の円弧すべり解析に比べると格段の進歩があり、その改良だけでも実務には有効であるが、あくまでトリガーとなる破壊の予測に限られる。

今回の解析は緒についたばかりであり、今後他の境界条件の模型実験についても事例解析を進めるとともに、現場実験や被災事例の解析を通して、詳細に提案解析法の実務への適用性を検証する。

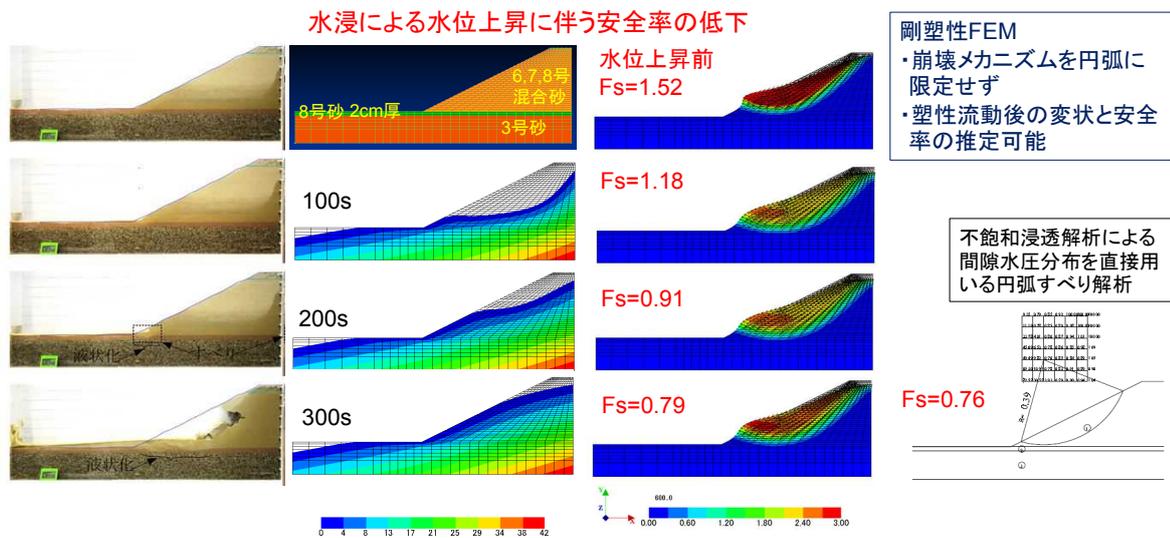


図1 半断面模型実験と不飽和浸透場連成剛塑性 FEM によるシミュレーション結果

参考文献：1) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)，JICE 資料第 111002 号，2012. 2) 林愛実，森三太郎，小高猛司，崔瑛，李圭太：高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊に関する模型実験，第 71 回土木学会年次学術講演会，235-236，2016. 3) 小林史郎，Lee, C.H., Shah, S.N.：マトリックス法による剛一塑性体変形の解析，塑性と加工，14 (153)，770-778，1973. 4) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T.: Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method, Soils and Foundations, 24(1), pp. 34-42, 1984. 5) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T.: Rigid plastic finite element method for frictional material, Soils and Foundations, 27(3), 1-12, 1987. 6) 浅岡 顕：支持力と有効応力，土と基礎，36(6)，43-49，1988. 7) Asaoka, A. and Kodaka, T.: Seepage Failure Experiments and Their Analyses of Loose and Medium Dense Sands, Soils and Foundations, 32(3), 117-129, 1992. 8) 小高猛司：水-土骨格達成極限つり合い解析に基づく複合地盤の支持力に関する研究，名古屋大学学位論文，1993. 9) Asaoka, A. and Kodaka, T.: Bearing capacity of foundation on clays by the rigid plastic finite element model, NUMOG IV, 839-849, 1992. 10) 浅岡 顕，田村 武，小高猛司，野田利弘：限界状態にあるカムクレイの平面ひずみ変形計算，粒状体の力学シンポジウム論文集，土質工学会，pp.89-92，1993. 11) Asaoka, A., Kodaka, T. and Pokharel, G.: Stability Analysis of Reinforced Soil Structures using Rigid Plastic Finite Element Method, Soils and Foundations, 34(1), 107-118, 1994. 12) Kodaka, T., Asaoka, A. and Pokharel, G.: Model Tests and Theoretical Analysis of Reinforced Soil Slopes with Facing Panels, Soils and Foundations, 35(1), 133-145, 1995. 13) 小高猛司・高稲敏浩・浅岡 顕：矢板に支持された飽和砂質地盤の浸透破壊および掘削安定解析，土木学会論文集III-43, 143-152, 1998. 14) 小高猛司：有限要素法の基礎と地盤工学への応用 8. 地盤工学における剛塑性有限要素法（その1），土と基礎，49(11)，33-38，2001. 15) 小高猛司：有限要素法の基礎と地盤工学への応用 8. 地盤工学における剛塑性有限要素法（その2），土と基礎，49(12)，65-68，2001.