

戦-21 ゆるみ岩盤の安定性評価法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 27

担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、倉橋稔幸、日外勝仁

【要旨】

本報告では、「ゆるみ岩盤」の挙動を定量的に予測できる評価法の開発を目的として、各種数値解析手法により表現可能なゆるみの力学的性状や解析パラメータを整理し、各種数値解析手法の「ゆるみ岩盤」への適用性を評価した。また、有限要素法による簡易な数値解析を行い、定量的評価の可能性と課題を抽出した。その結果、有限要素法はゆるみの進行に伴う水平変位および鉛直変位を表現することができることや、ジョイント要素を考慮することで開口亀裂の進展にともなうずれの量も表現することか可能であることを予察できた。ただし、ゆるみの程度及び開口・亀裂の量が大きい場合や、亀裂形状によっては数値解析の適用範囲に限界があることが予想される。

キーワード：ゆるみ岩盤、ゆるみ性状、数値解析、斜面安定性評価、有限要素法

1. はじめに

岩盤の中には、応力解放などによって開口亀裂が発達して岩盤が変形しやすくなり、もともとの岩盤の諸性質が大きく損なわれた領域がしばしば存在する。このような岩盤は「ゆるみ岩盤」として取り扱われ、「応力解放・重力作用・風化作用等に起因した変形・体積増加・密度減少などにより、亀裂の発生・開口・ずれなどを生じ、岩盤の状態を保ちつつも全体として変形しやすかつ非弾性的性質が大きくなった状態」と定義されている¹⁾。

このため、ゆるみ岩盤は力学的に不安定な状態にあり、掘削や湛水に敏感である。現在実施中の多くのダムでも、ダム敷やのり面等の基礎掘削量の増大、長大斜面の発生による自然景観の問題等が危惧されている。また、道路の自然斜面やのり面でも同様の問題が懸念されている。開口亀裂を伴うゆるみ岩盤は、低い力学強度と高い透水性を有し、ダム基礎や貯水池の器に好ましくないため、これまでダム基礎からゆるみ岩盤を避けたり掘削除去することで対処してきた。しかし近年、諸般の事情から地質的に不良なサイトが増加するのに伴い、ダム基礎周辺にゆるみ岩盤の分布する事例が多くなってきた。しかも、コスト縮減や環境保全等の観点から、ゆるみが軽微で基礎等として問題のない場合には掘削量を抑制したいという要請が急増している。またその一方で、貯水池の斜面変動など、ゆるみ岩盤に起因する問題も発生しており、慎重な対応が必要で、調査・設計・施工の各段階でゆるみ岩盤を地質工学的に的確に不安定な範囲や安定性を適

切に評価することが必要である。

ゆるみ岩盤の安定解析は、現状では地すべりと同様に円弧すべりによる解析が用いられることが多い。しかしゆるみ岩盤は亀裂性の岩盤を主体としていることから、不安定化の形態はくさび型やトップリングなど、亀裂に支配された複雑・多様な形態を示す。このため、円弧すべりでは、ゆるみ岩盤の不安定範囲、安定度、対策工の効果などが適切に評価できない。一方で、DEM や DDA など、不連続体の解析手法がいくつか開発されているが、実設計への利用は進んでいない。この理由として、地質調査から適切に岩盤モデル（亀裂の分布、連続性など）や入力物性（亀裂強度など）を設定する方法が確立されていないこと、また、実際のゆるみ岩盤の不安定化過程を適切に解析できるかどうかの検証が蓄積されていないことなどが挙げられる。

そこで本研究では、健全部に比べ局所的に性状が低くなっているゆるみ岩盤の挙動を定量的に評価できる手法の開発を目標とし、平成 22 年度には、各種数値解析手法により表現可能なゆるみ岩盤の力学的性状や解析パラメータを整理し、数値解析手法の「ゆるみ岩盤」への適用性を評価した。また、有限要素法による数値解析を行い、その結果から数値解析によるゆるみ岩盤の定量的評価の可能性と課題を抽出した。

2. 研究方法

2. 1 数値解析手法と解析項目の抽出

2.1.1 ゆるみ岩盤の力学的性状

佐々木ほか(2005)¹⁾は、ダムにおけるゆるみ岩盤の実態と分類試案をおこない、ゆるみの性状・物性として密度低下、開口亀裂の発生・拡大、低強度、非弾性的性質、高透水性、不均質性、不安定性を挙げている。これらの性状・物性はゆるみの進行に伴い、変化すると予想され、数値解析で表現できる可能性のある力学的性状について以下に整理した。

(1) 密度低下

密度は物性値等の力学的性状に関与する。密度低下と物性値の関係を定量化できれば、数値解析で表現できる可能性がある。

(2) 開口亀裂の発生・拡大

開口亀裂の発生・拡大は、岩盤の物性値の低下として数値解析で表現できる可能性がある。更に、幾何学的非線形や粒状体力学により、幾何学的な弱点箇所の発生・拡大を表現できる。開口亀裂と岩盤の強度及び弾性係数の関係を求めて強度及び弾性係数を調整するとともに、開口亀裂の位置に接触面を設けることで対応できる。なお、個別要素法、マニフォールド法では、有限要素法のように接触面要素を用いる必要は無い。

(3) 低強度

数値解析において、強度の低下として直接考慮する。

(4) 非弾性的性質

非弾性的性質は、岩盤の応力～ひずみ関係の非線形性で表現される。したがって、数値解析において、弾塑性モデルや非線形モデルを適用することにより表現することが可能であると考ええる。

(5) 高透水性

透水性が高くなることによりせん断強度に影響を及ぼ

すと考えられるが、力学的性状として直接考慮することは難しい。岩盤の透水性と力学的性状を同時に扱う数値解析手法もあるが、未だ研究段階の手法である。

(6) 不均質性（二次的な性質）

材料が不均質になる現象は、数値解析で材料の区分を設けることで考慮することができる。しかしながら、不均質性が複雑な場合には材料区分で考慮することが困難になるため、均質化手法を用いるなどの工夫が必要となる。

(7) 不安定性（二次的な性質。主に斜面の場合）

不安定性は、岩盤の強度及び弾性係数、幾何学的な非線形性と関係があり、上記(1)～(4)を考慮することにより、数値解析で表現することができる。

2.1.2 検討する数値解析手法の概要

ゆるみ岩盤の評価を行うに適した数値解析手法について特徴を整理する。数値解析手法の代表的なものとして、有限要素法（Finite Element Method、以下 FEM）、有限差分法（Finite Deformation Method、以下 FDM）、個別要素法（Distinct Element Method、以下 DEM）、境界要素法（Boundary Element Method、以下 BEM）、剛体バネモデル（Rigid Body Spring Model、以下 RBSM）、不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis、以下 DDA）およびマニフォールド法（Manifold Method、以下 MM）等が挙げられる。それぞれの数値解析手法の概要と長所・短所を、表-1 に示す。

2.1.3 数値解析手法のゆるみ岩盤の適用性

2.1.1 項で整理したゆるみの性状・物性に関連する力学的性状ごとに、表現可能な解析手法と解析上のパラメータとその適用性について、表-2 に取りまとめた。個々の力学的性状に対する適用性を踏まえ、数値解析手法のゆ

表-1 数値解析手法の特徴

解析手法	概要	長所	短所
有限要素法 (FEM)	解析領域を節点で結合させた有限個の要素に分割し、各要素について変形、ひずみ応力の条件を満たすように剛性マトリックスをつくり、要素全体の釣り合いを解く手法	・複雑領域に対応できる。 ・材料の構成モデルを導入できる。 ・最も一般的に用いられている手法であり、適用範囲が広く、適用実績が多い。	・大変形を表現するためには、アップデートラッシュアンなどの手法が必要となる。 ・問題によっては計算時間が増加 ・離散現象を表現できない。
有限差分法 (FDM)	解析領域全体を離散化して解く方法であり、対象領域内に配置された離散化された節点において、波動場を記述する波動方程式の変数にテイラー展開を適用し微係数を差分近似することで格子点での値に関する連立一次方程式（差分方程式）を作成し、これを逐次解いていく方法である	・大変形、破壊を追跡可能 ・計算が高速である。 ・材料構成モデルを導入できる。	・複雑な領域に対応できない。 ・離散現象を表現できない。
境界要素法 (BEM)	要素地震を剛体と仮定し、各要素間の境界がせん断方向及び垂直方向の2種類のバネに集中する表面力によるエネルギーを評価する手法	・無限領域を扱える。 ・モデル化が容易である。 ・解析規模が小さくできる。 ・材料構成モデルを導入できる。	・非線形問題には不向きである。
剛体バネモデル (RBSM)	各要素を剛体と仮定し、要素境界面上に体積変化およびせん断変形に抵抗する2種類のバネを設け、要素内の仕事の代わりに要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いてエネルギーを評価する手法	・すべりや剥離などの不連続現象を追跡できる。 ・計算が高速である。	・材料構成モデルを導入できない。 ・複雑な形状への対応が困難である。
個別要素法 (DEM)	不連続面を境界とするブロック間に鉛直せん断バネ、ダッシュボットの組合せを設定し、ブロックの回転、接触を考慮した運動方程式を差分的に解いてブロックの動きを追跡する手法	・大変形、破壊を追跡できる。 ・材料の離散現象を表現できる。 ・物体の落下、分離、離散を表現できる。	・計算コストが高い。 ・材料構成モデルを導入できない。
不連続変形法 (DDA)	任意の弾性体の多角形で構成されるブロック相互の運動を動的、準静的に解析する手法	・複雑領域に対応できる。 ・大変形を追跡できる。 ・物体の落下、衝突、離散を表現できる。	・材料の構成モデルを導入できない。 ・材料の非線形性を考慮できない。
マニフォールド法 (MM)	不連続変形法 (DDA) や有限要素法 (FEM) などの従来の手法を一般化した手法と位置づけられ、近似関数の定義域と物理的な領域を別々にとらえることで、連続体から不連続体までを統一的に扱うことができる手法	・複雑領域に対応できる。 ・材料構成モデルを導入できる。 ・大変形、破壊を追跡できる。 ・材料の離散現象を表現できる。 ・物体の落下、分離、離散を表現できる。 ・すべりや剥離などの不連続現象を追跡できる。	・計算コストが高い。 ・適用実績が少ない。

表-2 ゆるみの性状・物性と数値解析手法

ゆるみの性状・物性 関連する力学的性状 一般的な表現方法	表現可能な 解析手法	解析上のパラメータ	適用性
①密度低下			
強度低下	有限要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
せん断強度、圧縮・引張り強度の低減	有限差分法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
	境界要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	△
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	○
	マニフォールド法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
弾性係数の低下	有限要素法	弾性係数E	◎
弾性係数、バネ値の低減	有限差分法	弾性係数E	◎
	境界要素法	弾性係数E	◎
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	弾性係数E	○
	マニフォールド法	弾性係数E	○
②開口亀裂の発生・拡大			
強度低下	有限要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
せん断強度、圧縮・引張り強度の低減	有限差分法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
	境界要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	△
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	○
	マニフォールド法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
弾性係数の低下	有限要素法	弾性係数E	◎
弾性係数、バネ値の低減	有限差分法	弾性係数E	◎
	境界要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	△
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	弾性係数E	○
	マニフォールド法	弾性係数E	○
幾何学的非線形性			
接合面による開口亀裂の表現	有限要素法	接合面（ジョイント要素）の法線方向バネ係数kn、せん断バネ係数ks（もしくは、接合面（ジョイント要素、コンタクトペア）の粘着力C、内部摩擦角φ）	◎
	有限差分法	接合面（ジョイント要素）の法線方向バネ係数kn、せん断バネ係数ks（もしくは、接合面（ジョイント要素、コンタクトペア）の粘着力C、内部摩擦角φ）	◎
	境界要素法	接合面（ジョイント要素）の法線方向バネ係数kn、せん断バネ係数ks（もしくは、接合面（ジョイント要素、コンタクトペア）の粘着力C、内部摩擦角φ）	△
粒状体による表現	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	◎
不連続体による表現	不連続変形法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	○
	マニフォールド法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	◎
③低強度			
強度低下	有限要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
せん断強度、圧縮・引張り強度の低減	有限差分法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	○
	マニフォールド法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
④非弾性的性質			
応力～ひずみ関係の非線形性	有限要素法	構成モデルパラメータ	◎
材料構成モデルによる応力～ひずみ関係のモデル化	有限差分法	構成モデルパラメータ	◎
	境界要素法	構成モデルパラメータ	△
	マニフォールド法	構成モデルパラメータ	○
⑤高透水性			
直接関連はない	※	透水現象と力学的現象を同時に扱う解析で表現可能	—
⑥不均質性			
強度の不均質性	有限要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
	有限差分法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
材料区分を細分化し、各材料に対して強度を設定	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	粘着力C、内部摩擦角φ	△
	マニフォールド法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
弾性係数の不均質性	有限要素法	弾性係数E	○
	有限差分法	弾性係数E	○
材料区分を細分化し、各材料に対して弾性係数を設定	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	弾性係数E	△
	マニフォールド法	弾性係数E	○
⑦不安定性			
強度低下	有限要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
せん断強度、圧縮・引張り強度の低減	有限差分法	粘着力C、内部摩擦角φ	◎
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	境界要素法	粘着力C、内部摩擦角φ	△
	不連続変形法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
	マニフォールド法	粘着力C、内部摩擦角φ	○
弾性係数の低下	有限要素法	弾性係数E	◎
弾性係数、バネ値の低減	有限差分法	弾性係数E	◎
	境界要素法	弾性係数E	◎
	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	△
	不連続変形法	弾性係数E	○
	マニフォールド法	弾性係数E	○
応力～ひずみ関係の非線形性	有限要素法	構成モデルパラメータ	◎
材料構成モデルによる応力～ひずみ関係のモデル化	有限差分法	構成モデルパラメータ	◎
	境界要素法	構成モデルパラメータ	△
	マニフォールド法	構成モデルパラメータ	○
幾何学的非線形性			
接合面による開口亀裂の表現	有限要素法	接合面（ジョイント要素）の法線方向バネ係数kn、せん断バネ係数ks（もしくは、接合面（ジョイント要素、コンタクトペア）の粘着力C、内部摩擦角φ）	◎
	有限差分法	接合面（ジョイント要素）の法線方向バネ係数kn、せん断バネ係数ks（もしくは、接合面（ジョイント要素、コンタクトペア）の粘着力C、内部摩擦角φ）	◎
	境界要素法	接合面（ジョイント要素）の法線方向バネ係数kn、せん断バネ係数ks（もしくは、接合面（ジョイント要素、コンタクトペア）の粘着力C、内部摩擦角φ）	△
粒状体による表現	個別要素法	法線方向バネ係数kn、せん断方向バネ係数ks	○
不連続体による表現	不連続変形法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	○
	マニフォールド法	ブロック表面の粘着力C、ブロック表面の内部摩擦角φ	◎

るみの性状・物性への適用性と解析パラメータ等の設定の難易度を判定し、数値解析手法ごとのゆるみ評価に対する総合評価の結果を表-3に示す。

検討した手法のうち、FEMやMMは適用範囲が広く、密度低下や開口亀裂の発生や拡大、比弾性的性質についても解析上表現が可能と思われる、ゆるみ岩盤の評価に向いていると考えられる。なお、着目する力学的性状によっては、FDMやDEM、DDA等も有力な手法である。

2. 2 試算による解析手法検討

MMは、使用実績が非常に少なく、解析手法自体が一般化（市販ソルバーがない）されていないなど、現状で適用評価を行える状況にはないため、実際の使用実例が多く、解析結果の妥当性を検証し易いなどの利点の多いFEMを取り上げ、簡易モデルによる試算検討を行うこととした。

表-3 数値解析手法のゆるみ岩盤適用性

	表現可能な ゆるみの性状・物性	適用性	設定の 難易度	総合 評価
有限要素法 (FEM)	密度低下	◎	易	◎
	開口亀裂の発生・拡大	◎	易	
	低強度	◎	易	
	非弾性的性質	◎	易	
	不均質性	○	やや難	
	不安定性	◎	やや難	
有限差分法 (FDM)	密度低下	◎	易	○
	開口亀裂の発生・拡大	◎	易	
	低強度	◎	易	
	非弾性的性質	◎	易	
	不均質性	○	やや難	
	不安定性	◎	やや難	
境界要素法 (BEM)	密度低下	△	易	△
	開口亀裂の発生・拡大	△	やや難	
	低強度	△	難	
	非弾性的性質	×	—	
	不均質性	△	難	
	不安定性	△	難	
剛体バネモデル (RBSM)	密度低下	○	易	△
	開口亀裂の発生・拡大	△	やや難	
	低強度	△	難	
	非弾性的性質	×	—	
	不均質性	×	—	
	不安定性	×	—	
個別要素法 (DEM)	密度低下	○	易	○
	開口亀裂の発生・拡大	◎	易	
	低強度	△	難	
	非弾性的性質	○	難	
	不均質性	○	やや難	
	不安定性	○	やや難	
不連続変形法 (DDA)	密度低下	○	易	○
	開口亀裂の発生・拡大	○	やや易	
	低強度	○	やや難	
	非弾性的性質	△	難	
	不均質性	○	やや難	
	不安定性	○	やや難	
マニフォールド法 (MM)	密度低下	◎	易	◎
	開口亀裂の発生・拡大	◎	易	
	低強度	◎	やや易	
	非弾性的性質	◎	やや易	
	不均質性	○	やや難	
	不安定性	◎	やや難	

FEM を用いて、材料構成モデル（線形弾性、非線形弾性、弾塑性）と接触面要素（無し、斜め、ブロック状）の組合せにより、ゆるみ岩盤の挙動を表-4 に示す合計7 ケースについて解析した。解析モデルは単純な岩盤斜面のモデルとした（図-1）。また、材料定数は、土木学会（1994）²⁾を参考に設定した。健全部の岩盤をCH 級相当と考え、弱ゆるみ領域～強ゆるみ領域にかけて段階的に強度及び弾性係数を低減させるものとし、それぞれ弾性係数の比を1/100、1/1000、1/10000 について解析した。ゆるみ程度の差による強度低下割合を表-5 に示す。弾性係数の比が1/100 の場合の、線形弾性モデル、非線形弾性モデル（D-min 法）、弾完全塑性モデル（Mohr-Coulomb 方式）における材料定数を表-6、表-7、表-8 に示す。

試算した結果から各解析手法のゆるみ岩盤の数値解析における適用性と課題を整理した。

表-4 解析パターン一覧

解析ケース	試算手法	材料構成モデル	接触面要素	考慮する緩み岩盤の力学的性状
Case1-1	FEM + 材料構成モデル	線形弾性	無し	密度低下
Case1-2		非線形弾性	無し	密度低下 非弾性的性質 不安定性（二次的）
Case1-3		弾塑性	無し	密度低下 低強度 非弾性的性質 不安定性（二次的）
Case2-1	FEM + 材料構成モデル + 斜め接触面要素	線形弾性	斜め	密度低下 開口亀裂の発生・拡大 不安定性（二次的）
Case2-2		非線形弾性	斜め	密度低下 非弾性的性質 開口亀裂の発生・拡大 不安定性（二次的）
Case3-1	FEM + 材料構成モデル + ブロック状接触面要素	線形弾性	ブロック状	密度低下 開口亀裂の発生・拡大 不安定性（二次的）
Case3-2		非線形弾性	ブロック状	密度低下 非弾性的性質 開口亀裂の発生・拡大 不安定性（二次的）

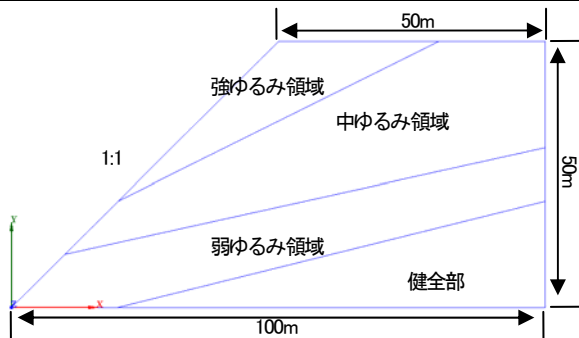


図-1 解析モデル

表-5 ゆるみ程度による強度低下割合

材料区分 弾性係数比	強ゆるみ 領域	中ゆるみ 領域	弱ゆるみ 領域	健全部
1/100	1/100	1/10	1/2	1
1/1,000	1/1,000	1/100	1/10	1
1/10,000	1/10,000	1/1,000	1/100	1

表-6 線形弾性モデルの試算用材料定数
(弾性係数比=1/100)

材料区分	強ゆるみ領域	中ゆるみ領域	弱ゆるみ領域	健全部
単位体積重量 γ t(kN/m ³)	20	20	21	22
弾性係数 E(kN/m ²)	35,000	350,000	1,750,000	3,500,000
ポアソン比 ν	0	0	0	0

表-7 非線形弾性モデルの試算用材料定数
(弾性係数比=1/1,00)

材料区分	強ゆるみ領域	中ゆるみ領域	弱ゆるみ領域	健全部
単位体積重量 γ t(kN/m ³)	20	20	21	22
初期変形係数 D0(kN/m ²)	35,000	350,000	1,750,000	3,500,000
破壊時変形係数 Df(kN/m ²)	3,500	35,000	175,000	350,000
初期ポアソン比 ν_0	0	0	0	0
破壊時ポアソン比 ν_f	0	0	0	0
ゆるみ係数 k	2	4	6	6
せん断強度 (kN/m ²)	484	4,840	24,200	48,400
引張り強度 (kN/m ²)	137	1,370	6,850	13,700
破壊崩落線指数	1	2	3	3

表-8 弾完全塑性モデルの試算用材料定数
(弾性係数比=1/1,00)

材料区分	強ゆるみ領域	中ゆるみ領域	弱ゆるみ領域	健全部
単位体積重量 γ t(kN/m ³)	20	20	21	22
弾性係数 E(kN/m ²)	35,000	350,000	1,750,000	3,500,000
ポアソン比 ν	0	0	0	0
粘着力 C(kN/m ²)	50	300	1,500	3,000
内部摩擦角 ϕ (°)	40	40	40	42

3. 解析結果と考察

3. 1 有限要素法による解析

3.1.1 ゆるみ岩盤の弾性係数比の検討

表-9 に数値解析により得られたゆるみ岩盤の水平変位量と鉛直変位量を示す。Case-1 から Case-2 に示すように、有限要素法の解析により健全部に対してゆるみ領域の弾性係数をゆるみの程度に応じて低減させた結果、その変位量は-0.02410 から-26.71000 まで変化した。

強ゆるみ領域の弾性係数が健全部と比較して1/100 程度であれば、ゆるみによる変状は高さ50m、勾配1:1 の斜面に対し2～3cm 程度であることが分かった。健全部に対して強ゆるみ領域の弾性係数を1/1,000 程度に設定すると、ゆるみによる変状は20～30cm となり、1/10,000 に設定すると変状が2～3m となった。ゆるみ程度により変形係数を低減することで、ゆるみによる変状を評価できる可能性が示された。

表-9 数値解析結果一覧

弾性係数比 解析ケース		100	1,000	10,000
Case1-1	水平変位(m)	-0.02410	-0.24242	-2.42877
	鉛直変位(m)	-0.05833	-0.60549	-6.09538
Case1-2	水平変位(m)	-0.02410	-0.26749	—
	鉛直変位(m)	-0.05833	-0.66004	—
Case1-3	水平変位(m)	-0.02410	-0.24245	—
	鉛直変位(m)	-0.05833	-0.60549	—
Case2-1	水平変位(m)	-0.49990	-3.66200	—
	鉛直変位(m)	-0.33850	-2.42200	—
Case2-2	水平変位(m)	-0.49990	-26.71000	—
	鉛直変位(m)	-0.33850	-15.26000	—
Case3-1	水平変位(m)	0.33330	2.79600	—
	鉛直変位(m)	-0.43280	-3.99200	—
Case3-2	水平変位(m)	0.33380	-0.23030	—
	鉛直変位(m)	-0.43600	-0.68360	—

3.1.2 材料構成モデルによる検討

材料構成モデルとして、線形弾性モデル、非線形弾性モデル、弾塑性モデルを適用し、比較した。ここで、非線形弾性モデルとして岩盤解析によく用いられている電中研方式、弾塑性モデルとして岩盤のせん断強度を考慮するモール・クーロン方式を適用した。その結果、表-9に示すように強ゆるみ領域の弾性係数が健全部と比較して1/100の場合には、ゆるみ領域の発生応力は弾性領域内に収まることから、線形弾性モデルを適用した場合と同様の解析結果が得られた。一方、強ゆるみ領域の弾性係数が健全部と比較して1/1,000の場合には、Case2-1のように適用する材料構成モデルにより計算変位量に差異が見られた。しかしながら、変位量が最も小さい線形弾性モデルと変位量が最も大きかった電中研方式とを比較してもわずか5%程度の差異しか認められなかった。ゆえに、自重のみを考慮した場合には、適用する構成モデルによる効果は小さいと考えられる。今回のように自重のみを考慮した場合には、構成モデルによる変位量の差異は小さいが、掘削解放力や上載荷重が载荷された場合には、差異が拡大されると考えられるため、材料の応力～ひずみ関係をより忠実に表現できる非線形弾性モデルもしくは弾塑性モデルを適用することが望ましい。

一方、電中研方式とモール・クーロン方式の比較では、後者はゆるみ程度が大きい場合には解析が収束しない、弾性慮行き内では変形係数が一定のため、岩盤の応力～ひずみ関係を忠実に表現することが難しいという短所があるため、電中研方式の方が安定して適用できる構成モデルと言える。ただし、岩盤を対象に開発されてきた構成モデルであるため、ゆるみの程度が大きい岩盤に適用する際には注意が必要である。

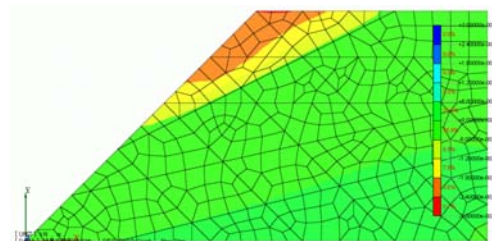
3.1.3 ジョイント要素の検討

亀裂を表現するために、ジョイント要素を設定した場合の変形モードは、亀裂を考慮しなかった場合と比較して異なる。例えば図-2、図-3に示すように、想定した亀裂位置にジョイント要素を設定した場合には、ジョイント要素位置で開口やズレの現象が表現できており、岩盤の不連続性を考慮できると言える。したがって、位置と材料定数が既知である場合には、ジョイント要素による亀裂のモデル化は、有力な手法であることが確認できた。しかしながら、ゆるみの程度及び開口・亀裂の量が大きい場合には、材料の分離、離散、ならびに大変形の問題となるため、有限要素法の適用は困難になる。

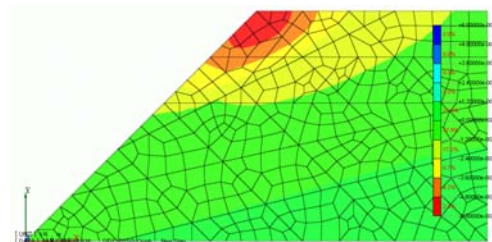
一方、亀裂が斜めに入っている場合と亀裂がブロック状に交差している場合の2通りの解析を実施した（例えば図-3、図-4）。それぞれ、指定したジョイント要素位置で開口・剥離が表現できることが分かった。しかしながら、亀裂がブロック状に交差する場合には、亀裂の交差点において多重節点となることからモデル化上の処理が困難であり、また、計算も不安定になると考えられる。したがって、ブロック状の亀裂に対しては、有限要素法の適用が困難となる。



(a) 変形モード (変形倍率 10 倍)

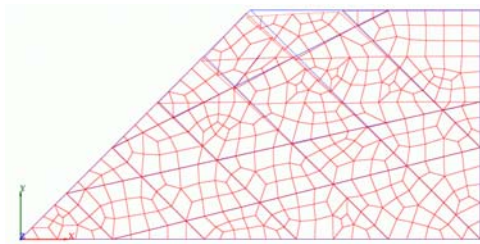


(b) 水平変位コンタ

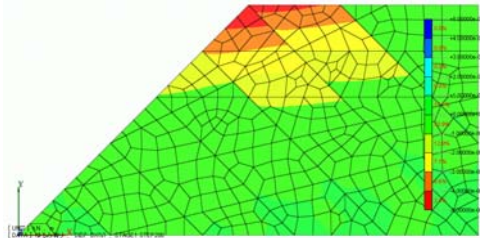


(c) 鉛直変位コンタ

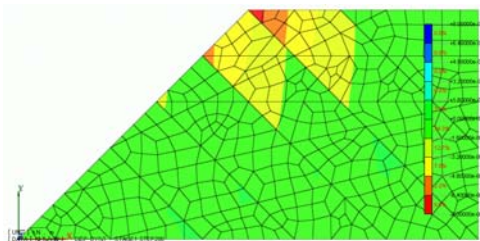
図-2 Case1-2 (非線形弾性モデル、ゆるみ強度比=1/100、亀裂なし) の解析結果



(a) 変形モード (変形倍率 2 倍)



(b) 水平変位コンタ

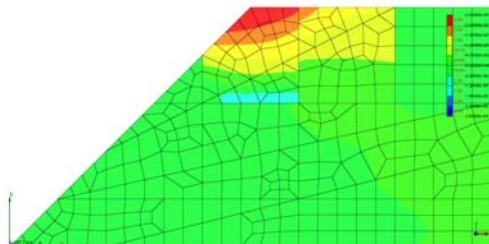


(c) 鉛直変位コンタ

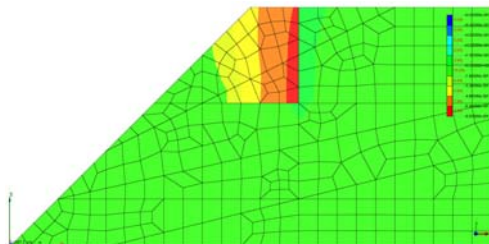
図-3 Case2-2 (非線形弾性モデル、ゆるみ強度比=1/100、斜め亀裂) の解析結果



(a) 変形モード (変形倍率 1 倍)



(b) 水平変位コンタ



(c) 鉛直変位コンタ

図-4 Case3-2 (非線形弾性モデル、ゆるみ強度比=1/100、ブロック状亀裂) の解析結果

4. まとめ

ゆるみ岩盤の力学的性状や数値解析との適合性について基本的整理を行った結果、数値解析の手法としてFEMとMMが優位であることが分かった。

また、ゆるみ岩盤の挙動をFEMで簡単なモデルにおいて試算した結果、以下のことが明らかとなった。

1) 有限要素法はゆるみの進行に伴う水平変位および鉛直変位を表現することができる。さらにジョイント要素を考慮することで、開口亀裂の進展にともなうずれの量も表現することが可能である。ただし、ゆるみの程度及び開口・亀裂の量が大きい場合やブロック状の亀裂の場合には、有限要素法の適用は困難である。

今後は、ゆるみ岩盤の実例を用いたFEMによる逆解析による詳細評価を行い、ゆるみ岩盤の性状をどのように表現できるか詳細検討を行う。特に密度低下、開口亀裂の発生・拡大、低強度、非弾性的性質の4種類について重点的に検討を実施し、ゆるみ形態をFEMで表現するための物性値の設定範囲や重要項目（弾性係数やポアソン比、不連続面など）を整理する。また、連続体解析におけるゆるみ性状のモデル化の知見を蓄積した後、MMなどの不連続体解析についても検討を行う。

参考文献

- 1) 佐々木靖人・片山弘憲・倉橋稔幸：ダムにおけるゆるみ岩盤の実態と分類試案，ダム技術，No. 228，pp. 9-21，2005 年。
- 2) 社団法人土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，土木学会，1994 年 12 月。

A STUDY ON LOOSEN ROCKMASS SLOPE STABILITY ASSESSMENT BY NUMERICAL ANALYSIS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2015

Research Team : Material and Geotechnical

Engineering Research Group

(Geology)

Author : SASAKI Yasuhito

KURAHASHI Toshiyuki

AGUI Katsuhito

Abstract : In order to develop a quantitative assessment method of a loosen rockmass slope behavior, we arranged both of loosening rockmass mechanical properties for and parameters of various numerical method analysis, and judged the applicability to assessment of loosen rockmass of various numerical methods. And moreover, we tried applying Finite Element Method (FEM) to a simple model as one of the choice methods. It resulted that amount of displacement and gap were simulated enough.

Key words : loosen rockmass, properties of loosening, numerical method, slope stability assessment, Finite Element Method (FEM)