

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：地質・地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、浅井健一、日外勝仁

【要旨】

本報告では、応力解放、重力作用、風化作用といったゆるみの成因に着目したゆるみ岩盤事例の分析を行い、表面亀裂開口型（応力解放）、岩盤クリープ型（重力変形）、特定層移動型（重力変形）、特定層風化型（風化）の4つのパターンについて、ゆるみの進行メカニズムフローを整理した。また、亀裂の開口や強度低下として表れる岩盤のゆるみ現象を連続体解析（有限要素法）で定量的に表現するため、ゆるみ性状ごとに部分要素となる解析モデルの設定方法を検討し、代表的なゆるみ進行パターンについて解析モデル化を試行した。

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。

そこで本研究では、健岩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の整理を行った。その結果を踏まえ、本年度（平成 23 年度）は、まず最初の段階として、ゆるみ岩盤を連続体として捉え、通常に得られる地質調査情報量から解析モデルの構築が可能と考えられる有限要素法によるゆるみ岩盤の定量的評価法について検討した。

2. 研究方法

ゆるみ岩盤の安定性を定量的に評価するには、地質調査によりゆるみ状況を正確に把握した上で、安定性について検討しなければならない。そのためにも、まず、岩盤のゆるみという現象が、どのような要因によって引き起こされ、進展しているのかを把握しておく必要がある。

ダム建設事業においては、ゆるみ岩盤の存在が重大な問題となるため、これまでに数多くの詳細な調査が行われてきており、本研究では、ダム調査資料（70 余事例）を基に、岩盤のゆるみの成因とその進行メカニズムについて、分類整理することとした。

また、ゆるみ岩盤の力学的性状には、開口亀裂の発生・拡大や低強度化などがあり、ゆるみ岩盤斜面の安定性を評価するためには、これらの性状変化を数値解析などで定量的に表現できなければならない。そのため、本研究では、ゆるみ性状の解析モデル化の第一段階として、連続体解析（有限要素法）を用いた「ゆるみ進行メカニズムの表現方法」について試行検討を行った。

3. 研究結果

3.1 岩盤のゆるみ進行メカニズム

ゆるみの成因には、浸食に伴う応力解放、重力変形作用、風化作用、人工的な掘削による応力解放の4つがある¹⁾。特に、浸食に伴う応力解放によるものには、亀裂の開口による一般的なゆるみ、シーディングジョイント、バレーパルジング等が、重力変形作用によるものには、トップリング、岩盤クリープ、局所すべり等が、風化作用によるものには、風化に弱い特定層の劣化作用に伴うもの、マサなどの深層風化によるもの等が考えられる。

収集した70余事例の内、中古生層の堆積岩で、ゆるみの性状やメカニズムについて詳細な記載があるか、もしくは図面や写真等の確認により考察が可能な20事例について、ゆるみパターンの整理を行った。

ゆるみパターンとは、各現場でのゆるみメカニズムの誘因と最初に起こるゆるみ現象に着目して区分を行ったものである。本研究では、各事例で最初のゆるみ現象からその後のゆるみの進行をフロー図で整理した。さらに、フロー図ではゆるみの進行が枝分かれする場合における枝分かれの条件（地形、地質、地質構造等）や、メカニズムの推定によって導き出されるゆるみ範囲の境界を示す現象を推定して記載した。

20事例について、ゆるみが発生する成因（誘因）とその後のゆるみの進行（現象の発現）過程を整理し、下記の4パターンに分類・整理した。

3.1.1 表層亀裂開口（応力解放①）パターン [10例]

河川浸食による応力解放の影響で表層の亀裂に開口が発生し、その後ゆるみが進展するパターンであり、ゆるみ進行のフローを図-1に、代表的ケースの模式図例を図-3(左図)に示す。

地表の亀裂の開口から流入粘土の充填という流れで地表から深部に向けてゆるみが進む流れと、断層沿いに風化が進む流れが考えられる。地表から深部に向けてゆるみが進む流れでは、地質構造や劣化しやすい地質の分布などによってゆるみのメカニズムが異なるため、ゆるみの進行や範囲はメカニズムに応じて考慮する必要がある。断層沿いに風化が進む流れは、基本的には断層が何らかのゆるみ範囲を規制しているものと考えられる。

3.1.2 岩盤クリープ（重力変形①）パターン [7例]

河川浸食による応力解放にともない重力変形（岩盤クリープ）が生じ、その後ゆるみが進展するパターンであり、ゆるみ進行のフローを図-2に、代表的ケースの模式図例を図-3(右図)に示す。

ゆるみの流れとしては、基本的には流入粘土の充填へ

と進行する流れが考えられる。ゆるみの範囲としてはクリープを規制する層や断層があればその層や断層までの範囲が想定されるし、特にそのような層がない場合は、ある程度地形に沿った分布で開口や流入粘土充填の程度が低い箇所がゆるみ範囲の下限として考えられる。

3.1.3 特定層移動（重力変形②）パターン [2例]

河川浸食による応力解放後の重力変形から特定層や流れ盤方向の亀裂沿いにズレ（小さな移動）が発生し、その後ゆるみが進展する。

3.1.4 特定層風化（風化①）パターン [1例]

河川浸食により風化しやすい層が露出することでその層の劣化が進み、その後ゆるみが進展する。

3.2 ゆるみ進行メカニズムの解析モデル化

3.2.1 解析モデルタイプの選択

岩盤のゆるみが様々な作用によって引き起こされることは前述したとおりであるが、母体の岩種が異なれば、ゆるみ現象の表れ方も自ずと違ってくる考えられる。

岩盤斜面崩壊事例の分析^{2),3)}により、岩盤斜面の不安定化における分離面の存在や岩盤強度の低下の関与が明らかとなっているが、ゆるみのモデル化にあたり、より考慮しなければならぬ岩種ごとの特徴について、以下に概説する。

◎火成岩…岩盤ブロックが大きく発達しており、岩盤としては均一な性状を示すが、崩壊時などでは、大きな亀裂面から一気に崩壊するケースが多い。

- ・不連続面（ジョイント）の活用を考慮する。

◎堆積岩…基本的に内在するクラックが小さく、また、量が多い傾向にあるため、クラックを含めた岩盤の基本的性状として評価することが必要である。

- ・物性値の変化を岩盤の特性とする。

◎変成岩…岩盤の性状は、受けている変成作用と基岩の特性に左右されるので、一般化が難しい傾向にある。

- ・不連続面（ジョイント）の活用を考慮する。

- ・物性値の変化を岩盤の特性とする。

本研究で岩盤のゆるみ現象の解析モデル化のために用いる有限要素法（Finite Element Method、以下FEM）で作成することのできる、岩盤特性を表現するための要素となる個別の解析形態モデルとしては、縦ジョイントモデル、横ジョイントモデル、等価連続体モデル、異方性連続体モデル、ブロックモデルなどが挙げられる。それぞれのモデルの特徴と解析で表現できるゆるみの形態を以下に整理する。

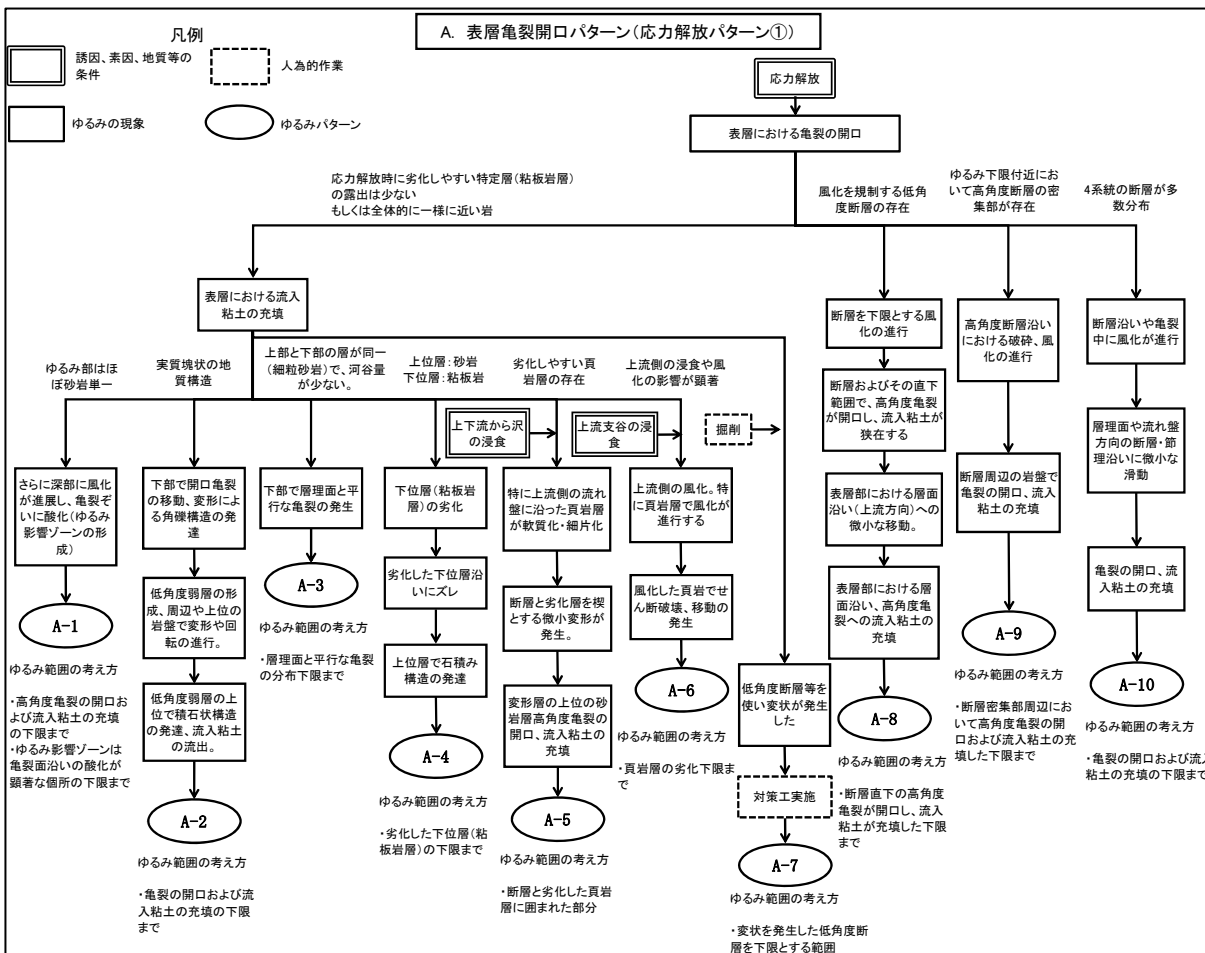


図1 表面亀裂開口パターンのゆるみ進行メカニズムフロー

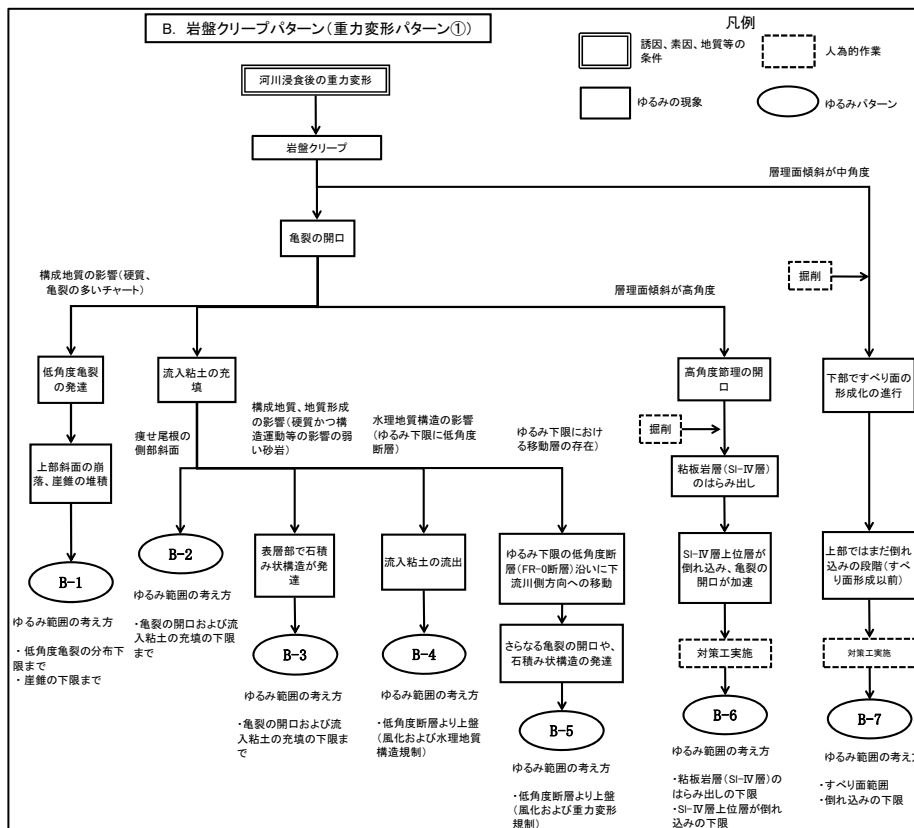


図2 岩盤クリープパターンのゆるみ進行メカニズムフロー

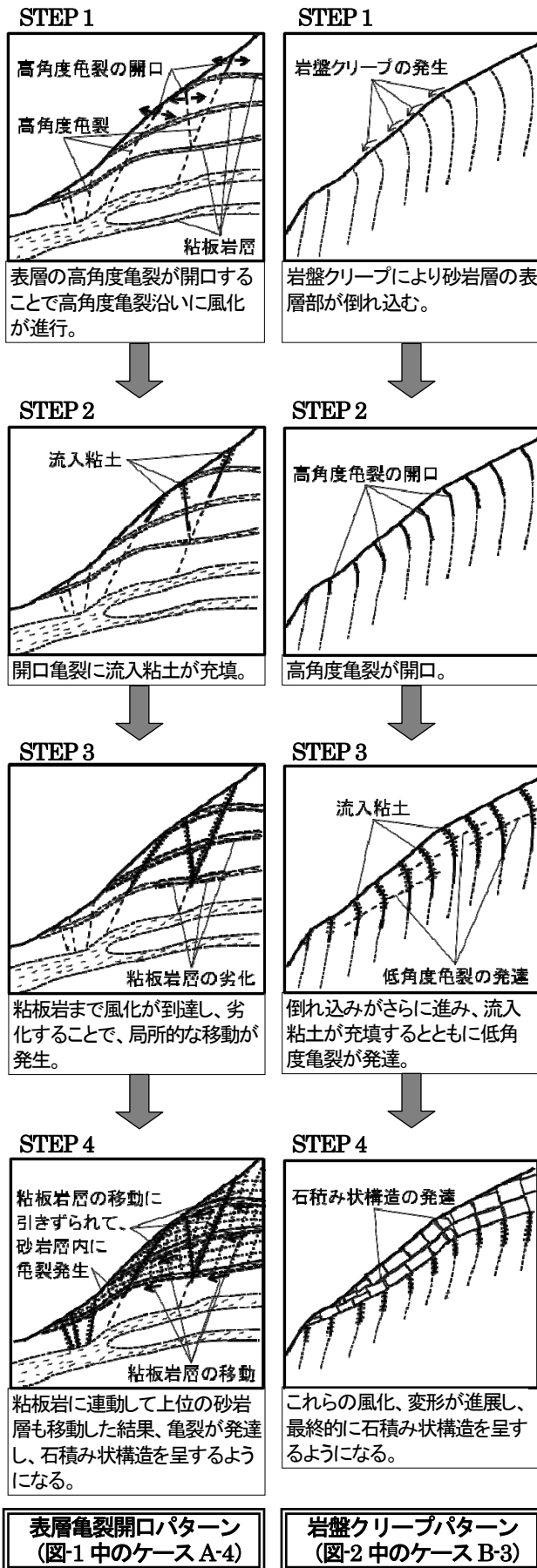


図-3 ゆるみ進行模式図例

◎縦ジョイントモデル

構造的に生じた縦亀裂を表現するための解析モデルである。柱状節理や大きな縦ブロックをモデル化する場合に用いる。

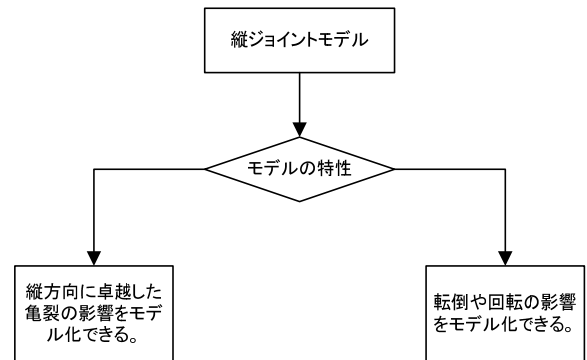


図-4 縦ジョイントモデルの特性

◎横ジョイントモデル

構造的に生じた横亀裂を表現するための解析モデルである。地層境界が明確で強度的に格差が大きな場合や剥離性の岩盤でも用いる。

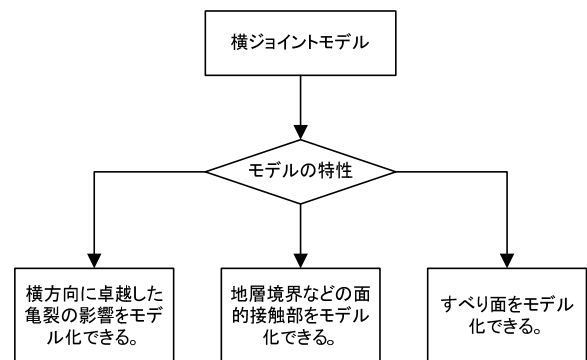


図-5 横ジョイントモデルの特性

◎等価連続体モデル

構造的に塊状である場合や逆に亀裂が密に生じているような均一な性状とすることが合理的な場合に構築する解析モデルである。強度的に異なる地層が互層する場合は、ジョイントモデルとの併用を考慮する。

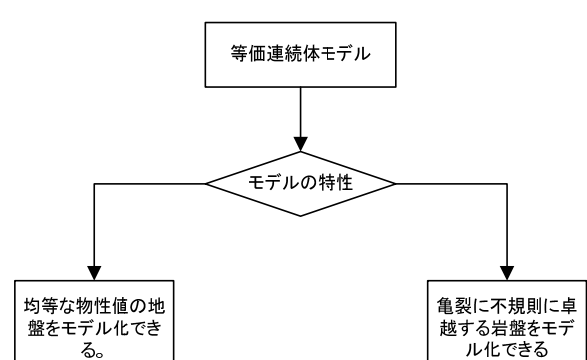


図-6 等価連続体モデルの特性

◎異方性連続体モデル

構造的に塊状である場合や逆に亀裂が密に生じているが縦横の剛性が異なる性状がある場合に構築する解析モデルである。強度的に異なる地層が互層する場合は、ジョイントモデルとの併用を考慮する。

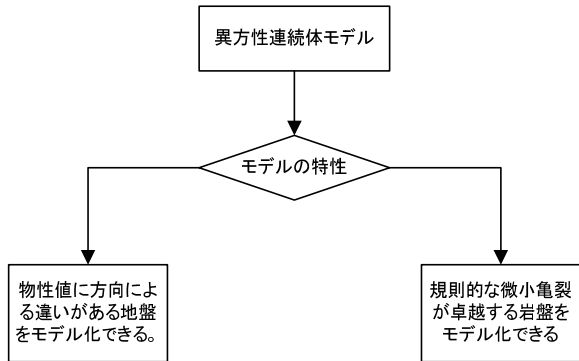


図-7 異方性連続体モデルの特性

◎ブロックモデル

構造的に大きなブロック状の亀裂を持ち、個々のブロックが積み重なって岩盤を形成しているような場合に構築する解析モデルである。

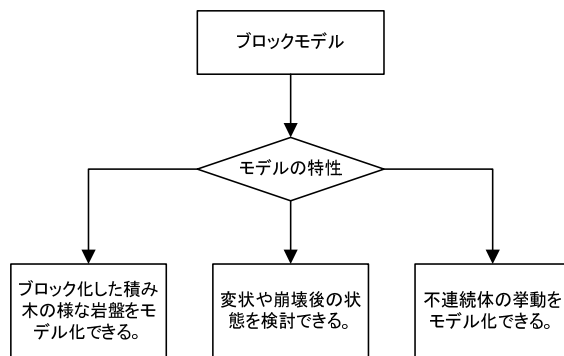


図-8 ブロックモデルの特性

これら特徴を踏まえ、岩種ごとにどのような地質性状が表れやすく、また、その性状を表現するのに最も適した解析モデルが何であるかを示した解析モデル選択フローを図-9にとりまとめた。斜面全体の解析モデルを作成する際は、地質性状の異なるエリアごとに最適な解析モデルを設定し、それらを組み合わせることで、岩盤のゆるみに直結する亀裂の開口や強度低下を適切に表現できる解析モデルの構築が可能となる。

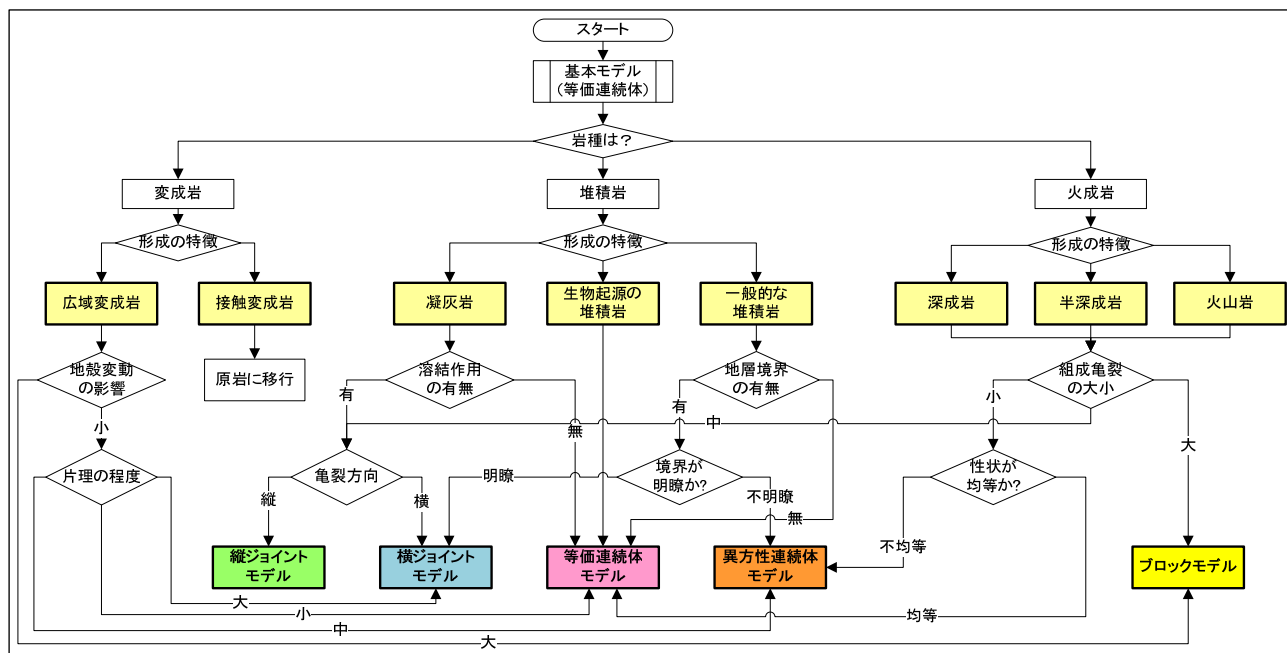


図-9 解析モデル選択フロー

次項では、図-3 に示した2つのゆるみ進行パターン（表面亀裂開口パターンと岩盤クリープパターン）について、前述の5つの解析モデルを組み合わせたFEM解析により、ゆるみの進行過程の定量的表現を試みた解析結果について例示する。

ゆるみ現象を数値解析で表現するに当たっては、2つの課題が考えられる。まず一つ目は、ゆるみの原因とな

る地質構造・地質性状を適切に反映した解析モデルの構築である。二つ目は、ゆるみの進行段階に応じた、岩盤物性値やジョイント物性値などの解析パラメータ設定である。いずれにおいても、ゆるみの発生・進展メカニズムを十分に把握するとともに、限られた地質調査情報から、斜面内部全域にわたるゆるみ性状を類推しておく必要がある。

3.2.2 表面亀裂開口モデル

砂岩と粘板岩の互層形態を図-10 に示すとおりモデル化した。地層境界にジョイント要素を配置することで、地層境界部の不連続性を表現できるモデルとした。岩盤とジョイントで使用した物性値を表-1、2 に示す。互層構造を持つ堆積岩のゆるみの進展を数値解析で表現するには、以下のモデルを組み合わせることが必要である。

- ①堆積岩：等価連続体モデル
- ②地層境界：横ジョイントモデル
- ③高角度亀裂：縦ジョイントモデル

また、風化等の影響を等価連続体モデルとして岩盤強度の低下で表現するほか、地層境界の状況や亀裂を表現するためにジョイントモデルを採用し、各要素の強度低下をシミュレーションすることで、風化・劣化や表面亀裂の開口を表現する。ゆるみの進展に応じた解析の流れを図-11 に、ステップごとの解析結果図を図-12 に示す。

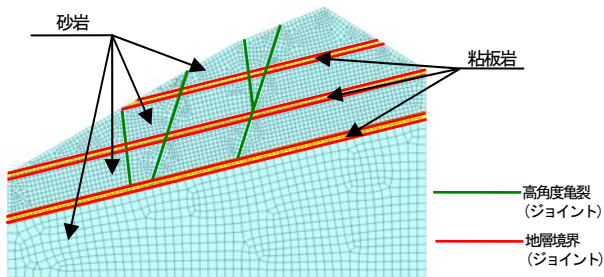


図-10 モデルメッシュ図 (表面亀裂開口パターン)

表-1 岩盤物性値 (表面亀裂開口パターン)

名称	物性値							
	ポアソン比 ν_s	ヤング率 E_s (kN/m ²)	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	引張強度 σ_t (kN/m ²)	線膨張係数 α (1/°C)
粘板岩	0.35	1,500,000	-	21.0	350.0	40.0	300.0	0.000001
砂岩	0.35	100,000	-	20.0	200.0	30.0	200.0	0.000001
粘板岩 (劣化1)	0.35	150,000	-	21.0	50.0	30.0	30.0	0.000001

表-2 ジョイント物性値 (表面亀裂開口パターン)

名称	鉛直方向剛性率 K_v (kN/m ³)	せん断方向剛性率 K_s (kN/m ³)	開口最大量 V_{mc} (m)	引張強度 σ_t (kN/m ²)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	せん断破壊時の応力分配係数 $FACT$	一軸圧縮強度 σ_u (kN/m ²)	最大強度に対する残留強度の比 B_o	ダイラタンション角 α (°)	Dr-pの関係係数 β
ジョイント1	150,000,000	55,555,555	0	200.0	350.0	45.0	0	2,000.0	0	20.0	0
ジョイント2	1,500,000	555,555	0.1	10.0	10.0	0.0	0	100.0	0	0	0
ジョイント3	1,500,000	555,555	0.1	5.0	1.0	10.0	0	50.0	0	0	0

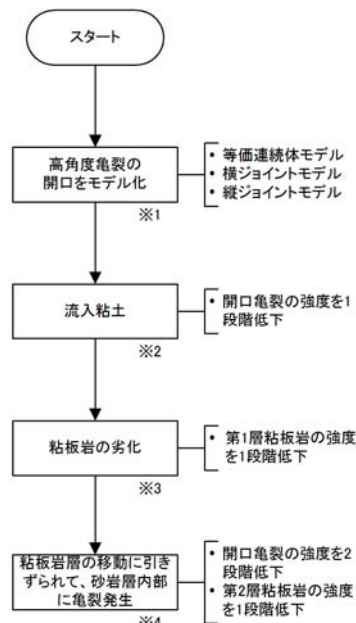


図-11 モデルメッシュ図 (表面亀裂開口パターン)

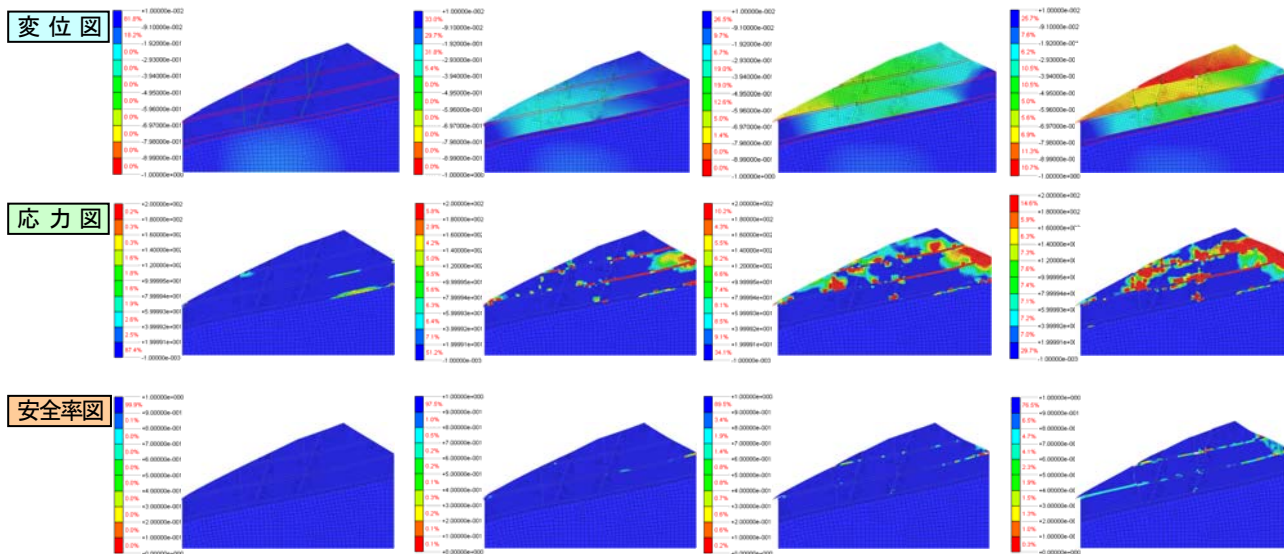
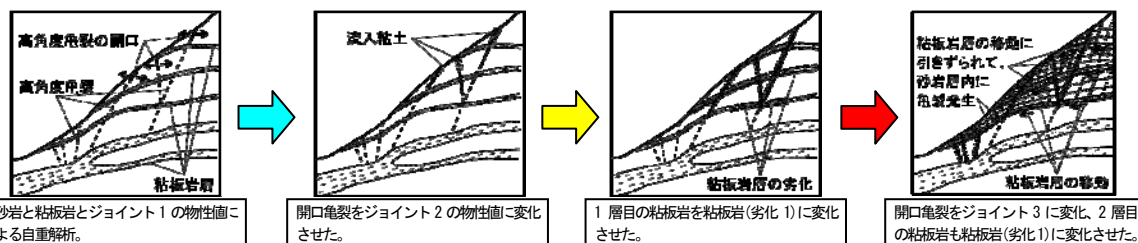


図-12 解析結果図 (表面亀裂開口パターン)

3.2.3 岩盤クリープモデル

凝灰岩におけるクリープ変形を図-13 に示すとおりモデル化した。組成段階からの節理などを縦ジョイントで表現する。岩盤とジョイントで使用した物性値を表-3、4に示す。

自重によるクリープ現象によるゆるみ現象を数値解析で表現するには、以下のモデルを組み合わせることが必要である。

- ①等価連続体モデル
- ②縦ジョイントモデル

それぞれの力学的強度を段階的に低下させることで、自重による変形の進行に伴う低角度方向への破壊が生じることが再現できる解析モデルとなった。ゆるみの進展に応じた解析の流れを図-14 に、ステップごとの解析結果図を図-15 に示す。

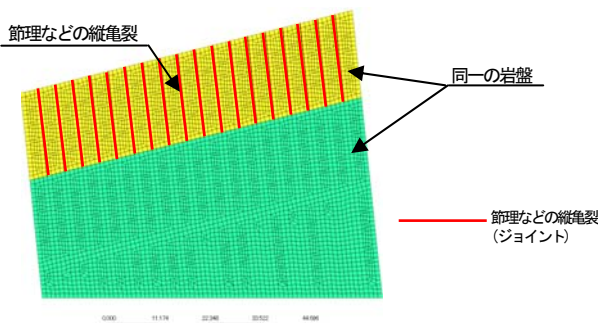


図-13 モデルメッシュ図 (岩盤クリープパターン)

表-3 岩盤物性値 (岩盤クリープパターン)

名称	物性値								
	ポアソン比 νs	ヤング率 Es(kN/m ²)	せん断弾性係数 G(kN/m ²)	単位体積重量 γ(kN/m ³)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 φ(°)	引張強度 σt(kN/m ²)	線膨張係数 α(1/°C)	
軟岩200	0.35	1,400,000	-	18.0	350.0	40.0	200.0	0.000001	
軟岩100	0.35	700,000	-	18.0	150.0	40.0	100.0	0.000001	
軟岩50	0.35	140,000	-	18.0	35.0	30.0	50.0	0.000001	
軟岩10	0.35	70,000	-	18.0	10.0	20.0	10.0	0.000001	

表-4 ジョイント物性値 (岩盤クリープパターン)

名称	鉛直方向 剛性率 Kv (kN/m ²)	せん断方向 剛性率 Ks (kN/m ²)	開口最大量 Vmax(mm)	引張強度 σt (kN/m ²)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ(°)	せん断破壊 時の応力分 割定数 FACT	最大強度に 対する残留 強度の比 R ₀	ダイレタン シー角 θ ₀ (°)	Ur-ε _p の関 係係数 M
	ジョイント200	35,000,000	12,962,963	0.04	200.0	0.0	40.0	0.0	2,000.0	0
ジョイント100	17,500,000	6,481,481	0.04	100.0	0.0	40.0	0.0	1,000.0	0	20.0
ジョイント50	3,500,000	1,296,296	0.04	50.0	0.0	30.0	0.0	500.0	0	20.0

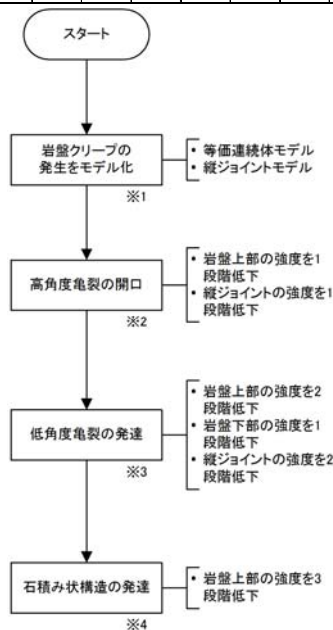


図-14 モデルメッシュ図 (岩盤クリープパターン)

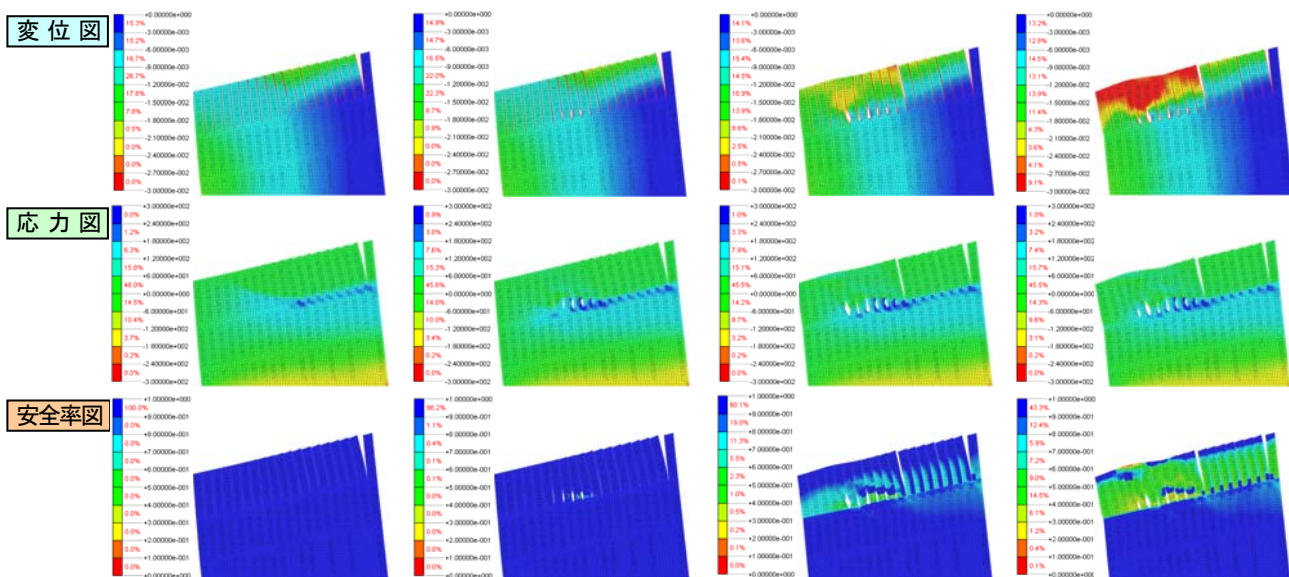
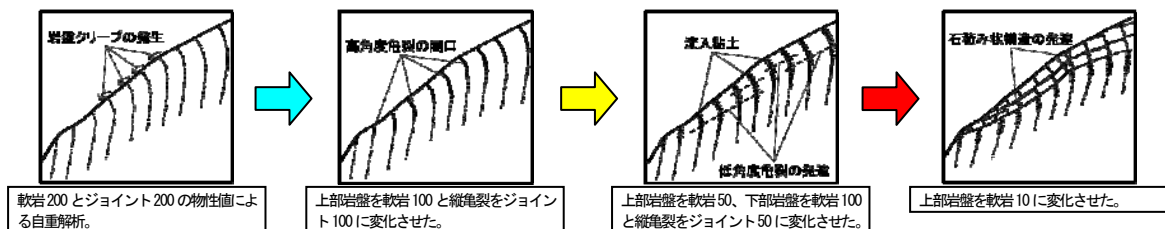


図-15 解析結果図 (岩盤クリープパターン)

3.2.4 ゆるみを表現するための解析物性値

様々な条件において解析を試行する中で、岩種ごとに解析物性値の取り得る範囲を表-5 にとりまとめるとともに、ゆるみ進行による劣化を表現する場合に、変化させるべき物性値（パラメータ）がどれなのか、着目程度を4段階で記した。今後、さらに解析検討ケースを増やすことで、ゆるみの進行に対する具体的な値の低減割合を詰めていきたい。

表-5 解析物性値

名称	物性値						
	ポアソン比 ν_s	ヤング率 $E_s(\text{kN/m}^2)$	単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	粘着力 $C(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	引張強度 $\sigma_t(\text{kN/m}^2)$	線膨張係数 $\alpha(1/{}^{\circ}\text{C})$
硬岩	0.25 ~ 0.35	5,000,000 以上	実測値	4,000 以上	40~50	800以上	0.000001
中硬岩	0.30 ~ 0.40	5,000,000 ~ 500,000	実測値	4,000 ~ 1,250	35~45	800~200	0.000001
軟岩Ⅱ	0.35 ~ 0.45	500,000 ~ 150,000	実測値	1,250 ~ 100	30~40	200~100	0.000001
軟岩Ⅰ	0.35 ~ 0.45	150,000 以下	実測値	0.0	20~30	100以下	0.000001
解析において劣化を表現する場合の着目パラメーター(案)							
火成岩類	×	◎	×	○	○	○	×
変形と破壊の関係が顕著である。							
堆積岩類	×	△	×	◎	◎	○	×
大きな変形を伴わないで破壊が発生する							
深成岩	標準化が困難						

4. まとめ

ゆるみ岩盤の調査事例分析により、ゆるみの成因別、表面亀裂開口型、岩盤クリープ型、特定層移動型、特定層風化型の4つのパターンに区分し、ゆるみの進行過程を模式図と合わせ整理した。

また、亀裂の開口や強度低下として表れる岩盤のゆるみ現象を連続体解析（FEM）で定量的に表現するため、ゆるみ性状ごとに適した解析モデルの設定方法を検討し、代表的なゆるみ進行パターンの解析モデル化の試行を行った。その結果、岩盤強度やジョイント強度を段階的に変化させることで、ゆるみの進行状況の定量的解析的表現が可能であることを確認した。

今後は、岩盤のゆるみ現象の数値解析モデル化検討結果を踏まえ、実際のゆるみ岩盤事例に即した斜面全体のゆるみ進行過程の数値解析を試行し、パラメータの設定を詰めていくとともに、ゆるみ岩盤斜面の安定性評価に向けた課題の抽出とゆるみ岩盤のモデル化並びに安定解析の改善策を検討する。

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，ダム技術

センター，2005.

- 2) 日外勝仁・伊東佳彦・佐々木靖人：岩盤斜面崩壊事例分析に基づく崩壊形態と崩壊分離面の関係，日本応用地質学会平成23年度研究発表会講演論文集，pp. 17-18，日本応用地質学会，2011.
- 3) 日外勝仁・伊東佳彦・佐々木靖人：岩盤斜面崩壊事例のモデル化による崩壊分離面の分析，第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp. 241-247，土木学会，2012.

A STUDY ON LOOSEN ROCKMASS SLOPE STABILITY ASSESSMENT BY NUMERICAL ANALYSIS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2015

Research Team : Geology and Geotechnical

Engineering Research Group

(Geology)

Author : SASAKI Yasuhito

ASAI Kenichi

AGUI Katsuhito

Abstract : In this paper, loosened rockmass cases was analyzed while paying attention to the origins of looseness such as release of in situ stress, gravitate and weathering. As a result, the advance mechanism of loosening was classified into four patterns and the process of the loosening was made an imitative chart. And moreover, in order to express the loose phenomenon of the rockmass that appeared as open cracks and the decrease in strength with Finite Element method (FEM), we examined the setting method of an analytical model of each loose properties.

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