

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】

ゆるみ岩盤は亀裂に支配された複雑・多様な不安定化の形態を示すため、特にダム建設においてはゆるみ岩盤の分布と性状の把握は重大な課題の一つとされている。ゆるみ岩盤の不安定な範囲や安定性を地質工学的かつ定量的に評価する手法の開発を目的に、本報告では、亀裂の開口や強度低下として表れる岩盤のゆるみ進行現象を連続体解析（有限要素法）で表現するために、次の二つの方法について検討を行った。一つ目は、ゆるみ状況に応じて岩盤や亀裂の強度を恣意的に逐次変化させるというステップ解析を繰り返すことで、クリープ型の岩盤のゆるみ進行過程を再現する方法である。二つ目は、ひずみ集中箇所の差別的な劣化促進がゆるみによる強度物性値低下の一因であるとの考えの下、塑性ひずみの量に応じた強度低減をモデルに繰り返し反映させることで、恣意的要素をできるだけ排除した機械的な物性低減を設定する方法である。

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。

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の整理を行った。その結果を踏まえ、平成 23 年度は、まず最初の段階として、事例に基づくゆるみ岩盤のパターン分類²⁾を行うとともに、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³⁾を行った。本年度は、「風化・劣化ゆるみ」や「応力場ゆるみ」といったゆるみの発達原因ごとに数値解析による表現方法を検討した。

2. 研究方法

岩盤の劣化（風化）は自然的要因が大きく影響していることが知られているが、これまでの地盤評価では、時間の経過を考慮せずに現状の評価に終始する傾向が強く、将来的な劣化によって生じる強度低下や地形変化の検討まで行っている事例は非常に少ない。このため土木工事を行うことで生じる変化の内、タイムラグを伴うものは見落とされることが多く、一定の年月が経過してから問題点として顕在化することもある。現状では、このような事象を全て「風化・劣化」と一括りに評価しており、

本質的な対策ではなく表面的な対処療法による処置に留まり、さらなる変状へと進展する場合が見られる。

本研究では、風化・劣化によるゆるみと、重力変形による応力場ゆるみとの判別を研究の将来的な目標としつつ、本年度は各々のゆるみ発達原因についての数値解析による表現方法について試行検討を行った。

2. 1 数値解析によるゆるみの表現方法 (過年度成果)

ゆるみ岩盤は一般に、もとの岩盤に比べ、密度低下、開口亀裂の発生・拡大、低強度、非弾性的性質、高透水性といった性質を示すことが多い。本研究では、高透水性を除く力学的な諸性質を考慮した有限要素法 (Finite Element Method、以下FEM) により、「ゆるみ」の進行を表現することを目標とした。様々な作用により引き起こされる岩盤のゆるみ現象も、母体の岩種が異なれば、現われ方も自ずと違ってくると考えられる。ゆるみのモデル化にあたって岩種別に考慮すべき点を表-1に示す。

数値解析による「ゆるみ」の定量化は、劣化に伴う物理強度の低下が特徴的に現れる形態を複数の基本モデルに分類し、これらの組み合わせにより現状地形を表現し解析評価を試みるものである。FEM で作成することのできる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。モデルごとの数値解析で表現できるゆるみの形態を表-2に示す。

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形態モデル選択フローを図-1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。

表-1 モデル化における岩種別の考慮点

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、崩壊時には、大きな亀裂面から一気に崩壊する機会が多い。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、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必要がある。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ため、一般化が難しい傾向にある。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。

表-2 解析形態モデルと表現可能なゆるみ現象

モデル	特徴
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など縦方向に卓越した亀裂の影響をモデル化する場合に用いる。転倒や回転の影響をモデル化できる。
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。想定されるすべり面をあらかじめモデル化しておく場合もある。
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。
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。
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。

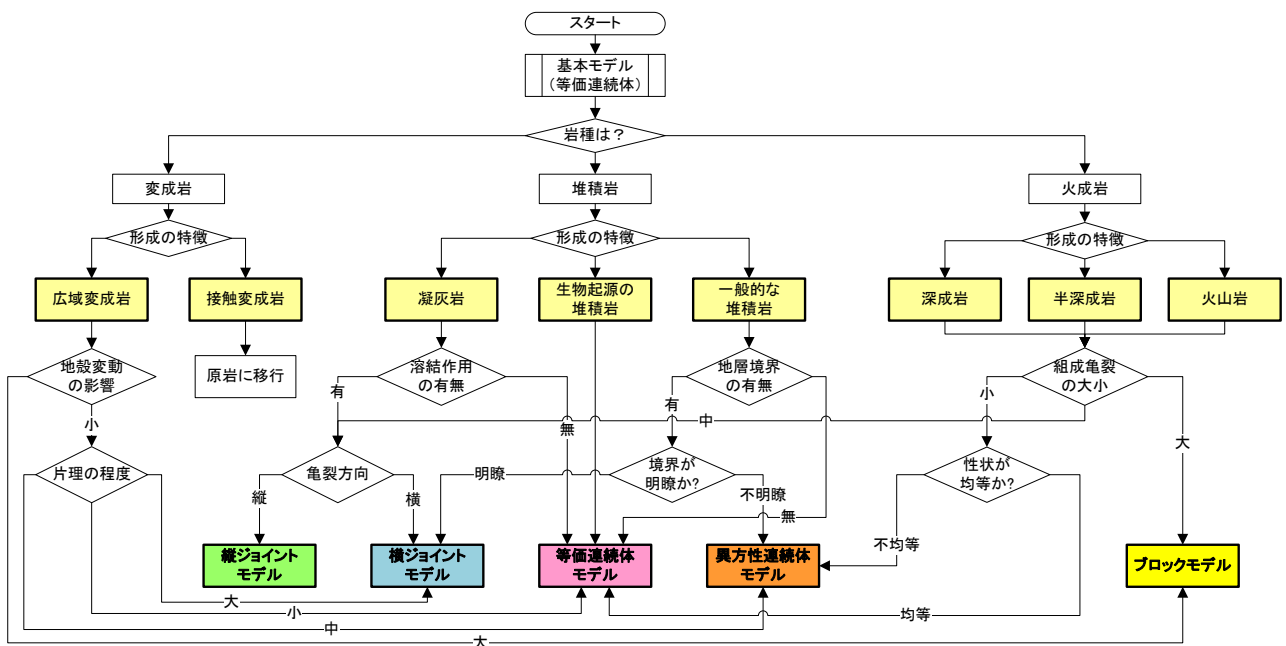


図-1 地質性状に応じた解析形態モデル選択フロー

2. 2 数値解析で表現できるゆるみの発達原因

数値解析により、「ゆるみ」の進行を表現する手法として図-2に示す「応力場ゆるみサイクル」を考案した。これは、応力場の変化に伴い発生する相当塑性ひずみの量から自破碎の程度を推定し、物性値を強制的に低減設定し再度自重解析を行うというサイクルをひずみ増加が収束するまで繰り返すものである。また、ゆるみ岩盤事例の分析^{1), 2)}に基づくゆるみの発達原因ごとに「応力場ゆるみサイクル」の適用法について以下にまとめる。下記の1)、2)に関連して、各々後述の3.2節、3.3節において、解析検討例について紹介する。

- 1) 地形改変に伴う応力解放による自破碎
 応力解放による応力場の変化により発生する相当塑性ひずみで「応力場ゆるみサイクル」を適用し、ゆるみの進行を評価する。
- 2) 重力変形作用によるクリープ変形破壊
 クリープ変形破壊を数値解析的にモデル化することで、岩盤や亀裂の風化・劣化を伴うブロック化の進行をモデル化することが可能である。
- 3) 地殻変動に伴う側圧作用による圧縮破壊（断層）
 地殻変動時に生じたと思われる側圧による圧縮破壊（断層）を連続体モデルにより解析を行う。側圧により発生する相当塑性ひずみによる「応力場ゆるみサイクル」を用いたゆるみの進行検討を行う。また、せん断破壊と考えられる応力集中部に断層を配置する。
- 4) 地震動に伴う振動作用による振動破壊
 地震動に伴う振動により動的にひずみや応力が作用する。このひずみや応力の値に応じた内部破壊が発生していると考えられる。その状態に「応力場ゆるみサイクル」を適用することで、地震時及び地震後のゆるみの進行を評価する。

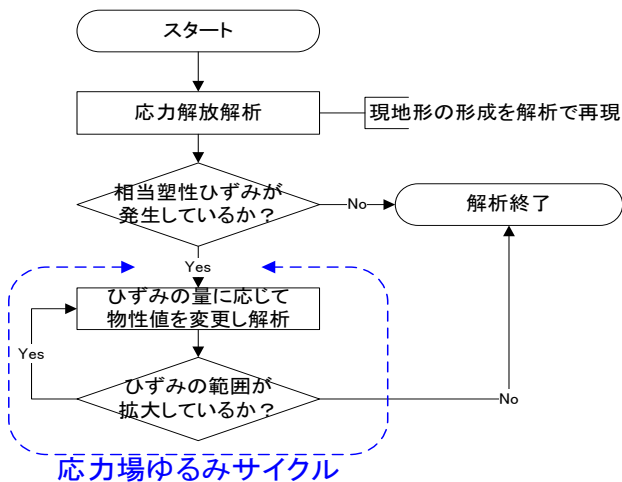


図-2 応力場ひずみ解析フロー

- 5) スレーキング・膨張収縮による微小破壊
 岩と水との反応による微小破壊が生じる事象を強制的な強度低下で数値解析に反映させる。強度低下の程度については、明確な指標をまだ設けていない。
- 6) 溶脱等による流出による空隙の増加に伴う低強度化
 岩盤内部の微小空隙の増加に伴う低強度化を強制的な強度低下で数値解析に反映させる。強度低下の程度については、明確な指標をまだ設けていない。

2. 3 ゆるみ影響解析フロー

ゆるみの進行は、前節に挙げた1) から6) の発達原因が複雑に作用し合いながら進行し、徐々にゆるみの範囲を拡大させる。そのなかで、個々のサイトで優位に見えるゆるみの特徴が異なるため、ゆるみの分類を複雑かつ困難にしている。本研究において、数値解析によるゆるみの進展検討では、ゆるみの発達原因が外力要素として作用するものは比較的表現し易いが、外力を伴わない原因は表現し難いという傾向を確認している。

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1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を構築することである。複雑な地質構造を、必要な要素を押

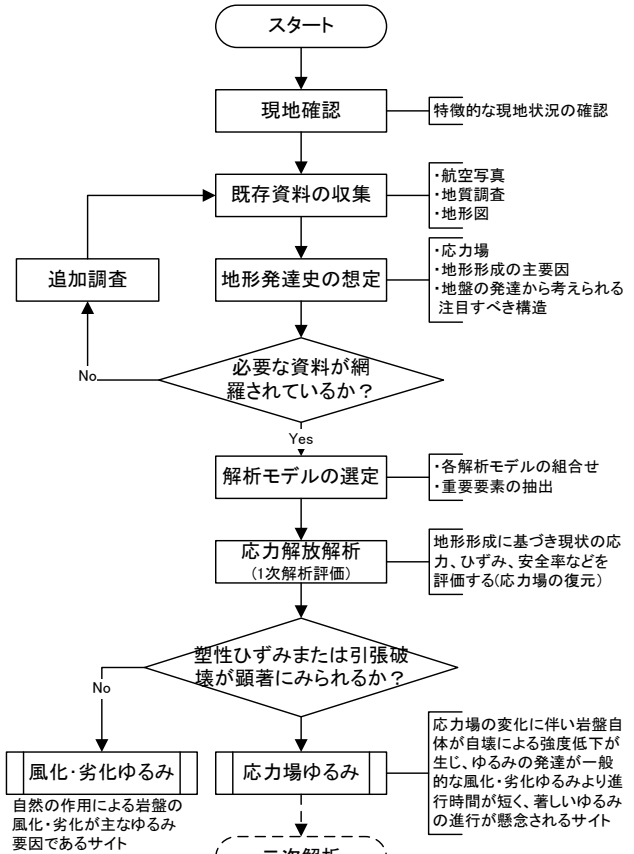


図-3 ゆるみ影響解析フロー

さえつついかに簡略化したモデルを作成するかが重要となる。2 つ目は、岩盤物性値やジョイント物性値などの解析パラメータを、ゆるみの進行段階に応じて、どのような低減割合で段階的に漸移させて設定するかである。

いずれにおいても、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の分布を的確に捕捉するとともに、地形発達史等を十分に踏まえた上で、ゆるみの発生・進展プロセスを推定しておく必要がある。

これまでの検討を踏まえた岩盤のゆるみ状況を解析評価するに当たっての流れを図-3 にとりまとめた。

岩盤斜面のゆるみの状況を正しく把握・評価するためには、現地踏査や地形判読等の既存資料の分析を行うことで地形発達史を十分に読み解いた上で、対象箇所の応力場や留意すべき地質構造、斜面変動の運動像を把握し、ゆるみの発達成因を正しく想定しておくことが必要不可欠である。それらを踏まえた上で、適切な解析モデルを設定し、ゆるみの進行過程をシミュレートすることで、過去から未来へと時間軸を考慮した評価可能となり、現在の斜面安定性の評価だけでなく、建設工事等の人為改変にも対応可能な将来的な安定性を予測評価できるようになると考えられる。

3. 研究結果

3. 1 解析物性値低減によるゆるみ進行現象の再現

3. 1. 1 トップリング型ゆるみ進行パターンと解析モデル

本節では、2.2 節 2) 項に示した自重による岩盤クリープ現象が雨水等による風化により促進されていくというゆるみ進行過程の FEM による再現方法に関しての架空モデルにおける検討例を紹介する。図-3 に示すフローにおいて「風化・劣化ゆるみ」に該当するケースであり、ゆるみの進行に応じた段階的な解析ステップを設定し、岩盤の強度物性値や亀裂を模したジョイントの物性値を適宜変化させることで、ゆるみ進行現象の数値解析的表現の可能性を検討するものである。

トップリング型のゆるみ進行過程のイメージを図-4 に示す。柱状節理に代表される高角度の開口亀裂の分布が特徴であり、その亀裂の進展と開口拡大にともなう風化・変形の進展によりゆるみが進行するパターンである。

上位岩盤中の高角度亀裂の開口と風化等による上部岩盤の強度低下が、上層から下層へと段階的に進行していく過程のモデル化表現として、まずは亀裂の開口、その次に岩盤強度の低下の順に発生するものとし、その強度低下範囲がより下層まで進行するとともに、その劣化程

度も徐々に大きくなる段階的なモデルとした。

解析モデルメッシュを図-5 に、解析に使用した岩盤やジョイントの物性値を各々表-3、表-4 に示す。基となる岩盤を等価連続体で、組成段階からの節理などを縦ジョイントで構成し、また、高角度亀裂の開口を縦ジョイントの物性値の低下で、亀裂を含む層の強度低下を岩盤物性値の低下で表現することで、ゆるみの進行を段階的に再現するようにした。

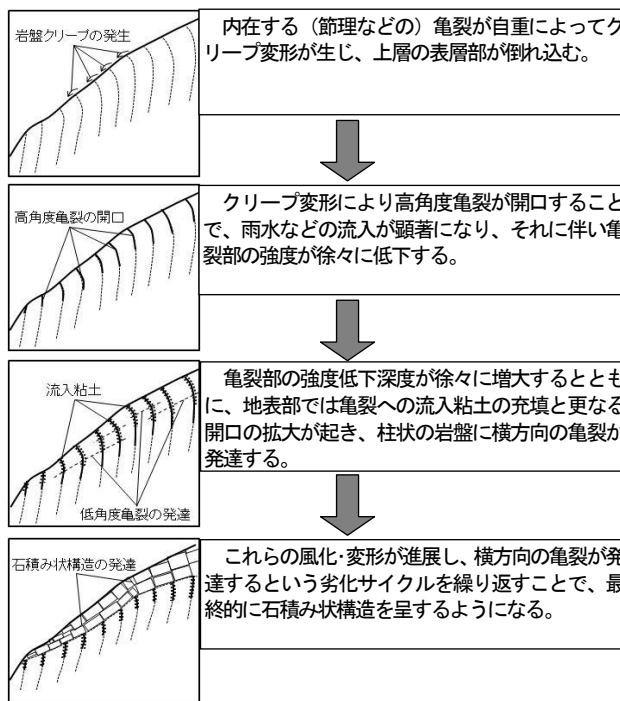


図-4 トップリング型のゆるみ進行パターン

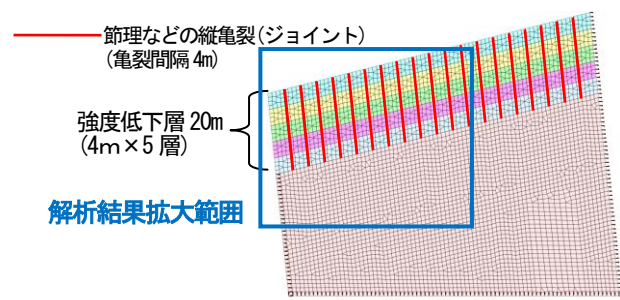


図-5 モデルメッシュ図 (トップリング型)

表-3 岩盤物性値 (トップリング型)

名称	鉛直方向 弾性率 E_v (kN/m ²)	せん断方向 弾性率 E_s (kN/m ²)	開口最大量 V_{max} (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 q_u (kN/m ²)	最大強度に 対する残強 強度の比 B_o	ダイレタン シー角 β_o (°)	Ur-t p 関係係数 β
ジョイント100	17,500,000	6,481,481	0.04	100	0	40	0	1,000	0	20	0
ジョイント50	3,500,000	1,296,296	0.04	50	0	30	0	500	0	20	0
ジョイント25	1,750,000	648,148	0.04	25	0	20	0	250	0	20	0

表-4 ジョイント物性値 (トップリング型)

名称	物性値							
	ポアソン比 ν	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/t)
岩盤200	0	1,400,000	0	18	350	40	200	0.000001
岩盤100	0	700,000	0	18	150	40	100	0.000001
岩盤50	0	140,000	0	18	35	30	50	0.000001

3. 1. 2 解析ステップ設定にいたる検討及び結果考察

本研究での最大の目標は、クリープ型のゆるみ進行過程をより良く再現できる解析モデル化方法を試行錯誤により探し求めることである。最適となった12段階の解析ステップのフローを図-6に、岩盤と亀裂の強度の変化の模式図を図-7に示す。その時の変位と塑性ひずみの解析結果を図-8に示すとともに、その解析条件へと至った検討過程についても考察する。

ゆるみ現象の進行として、亀裂の劣化のみが進行するとしたケースでは、亀裂の開口は発生するが塑性ひずみの発生は確認できず、また、岩盤の劣化のみが進行する



図-6 解析ステップフロー (トッピング型ゆるみ)

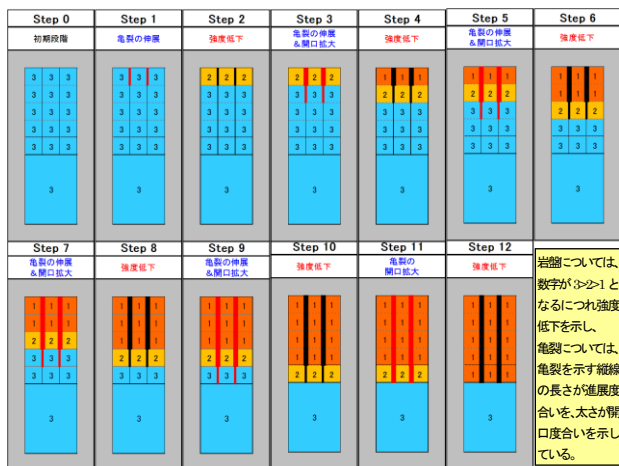


図-7 解析ステップ模式図 (トッピング型ゆるみ)

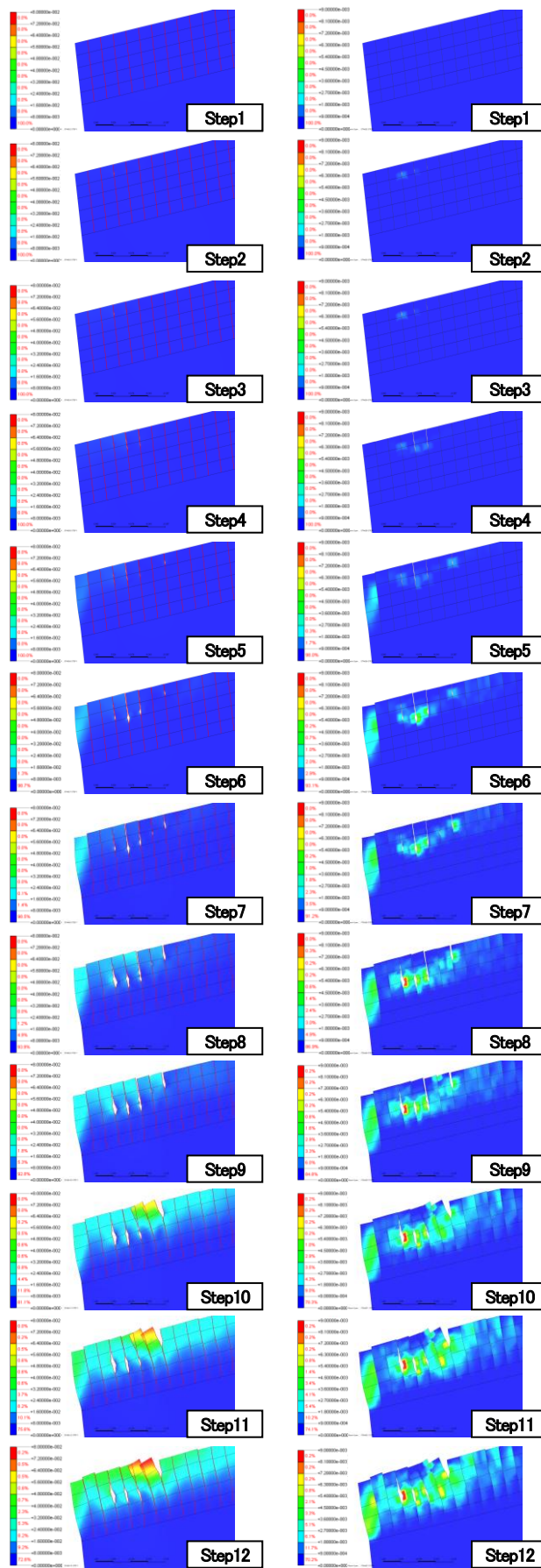


図-8 解析結果拡大図 (左図: 変位、右図: 塑性ひずみ)

としたケースでは、表層から近い範囲にのみ塑性ひずみが発生した。これらのことから、ゆるみの拡大を表現するには、亀裂の強度だけでなく岩盤自体の強度低下を考慮する必要があると考えた。また、ゆるみの進展を表すために、図-6、図-7に示すように解析ステップをできるだけ細かくするとともに、亀裂や岩盤の強度低下を一度に起こすのではなく、変化範囲と程度の両方を段階的に拡大させることで、現実的な風化・劣化進行の表現を試みた。

強度劣化をモデル化した解析を行う場合、定数低減を段階的に行った方が変化の累積が顕著に現れる傾向があった。その理由として、極端な定数低減を一度に行くとジョイント部や塑性域の拡大により荷重伝達が行われ難いことが考えられる。段階的に定数を低減することで変化の累積が適切に表現される傾向が認められた。

解析結果の図-8に示すように、縦ジョイントで分断されたブロックでは自重により変形と開口が生じており、この状態がクリープ変形であると思われる。岩盤の強度を低下させることで、ブロックの横方向に塑性ひずみが発生する。この状態は、縦ブロックにせん断破壊が生じていることを表現している。縦ブロックの強度劣化が進行すると横方向の破壊面が生じ、将来的に積み石状のブロックへと状態変化すると推察できる。

3. 2 応力場に基づく解析物性値低減方法の検討

3. 2. 1 応力場ゆるみの数値解析的表現

一般的な風化によるゆるみの進行速度が非常に遅いのに対し、応力場の変化に伴い岩盤自体が自破碎による強度低下が生じることでゆるみが進行していく応力場ゆるみは、短時間にゆるみが進行する場合がある。前節の風化の影響を受けたゆるみ進行モデルにおいては、亀裂の開口・進展や岩盤強度の低下が整順的であったため、解析物性値の変化をゆるみ状況に応じて恣意的に設定した。本章では、解析物性値の変化について、恣意的ではなく客観的な設定方法を検討するため、実際のゆるみ岩盤斜面事例を基に解析条件の設定方法を検討するものである。

風化の影響を考慮しないため図-3に示すフローにおける「応力場ゆるみ」に該当するケースであり、2.2節1)項に示した応力解放による自破碎を主要因としたゆるみの進行過程について、解析条件設定方法を検討した。

亀裂性岩盤においては内在する亀裂の量が岩盤強度を左右していると考えられ、岩盤内部の微小亀裂を増加させる要因をどのようにモデル化するかが定量的な数値解析上の課題である。また、詳細な応力・ひずみを解析す

るためには、サイトごとの特徴的な応力変化に注目する必要がある。今回検討するのは、応力場への影響が大きい河川侵食等の地形変化による上載荷重の除去から生じる応力解放に関するゆるみ進行モデルについてである。

弾塑性解析で評価することのできるひずみの内、塑性ひずみは除荷後も残るひずみであり、その量によっては、岩盤内に微小破壊が発生していると考えられる。岩盤の微小破壊はゆるみの要因の一つと考えられるため、相当塑性ひずみ量をゆるみ進行把握の評価基準とした。

岩盤は、外力に対する抵抗性が高く、解析時に得られる「ひずみ」などは、 1×10^{-6} から 1×10^{-2} 程度の範囲であり非常に微小な量である。しかし、岩盤において 1×10^{-3} 程度のひずみが生じている部分では、岩盤の強度特性は非線形領域に達しており、微小破壊の進展を意味すると考えられる。

このように、地形形成過程を解析で表現した結果から自破碎が生じていると考えられる塑性ひずみ範囲の物性値を低減して再設定することにより、応力場ゆるみの拡大を数値解析で表現する検討を行った。

3. 2. 2 解析条件設定及び解析結果考察

河川侵食を考慮した応力解放を数値解析で表現するには、実際の河川渓谷を形成する侵食作用に近い状況をモデル化する必要がある。徐々に斜面を後退させながら渓谷を拡大させていく形態として、図-9(b)の除去ブロックモデルに示すように、水平ベンチカットではなく、実際の地形発達過程に合せて、現地形の勾配に沿って斜めに段階的に複数回にわたって除荷を行うこととした。

また、ゆるみ状況を詳細に把握したい斜面表層部については、トップリングによる縦亀裂の卓越した性状を模するため、前章と同じく、等価連続体要素ではなく、縦ジョイント要素によりモデル化を行うことで、縦亀裂の開口によるトップリングの表現を試みた(図-9(c))。

解析の進め方としては、表-5、表-6に示す物性値の下、相当塑性ひずみの量を基準に岩盤の性状を考慮し、蓄積した塑性ひずみ量に応じてメッシュ別に物性値を低減設

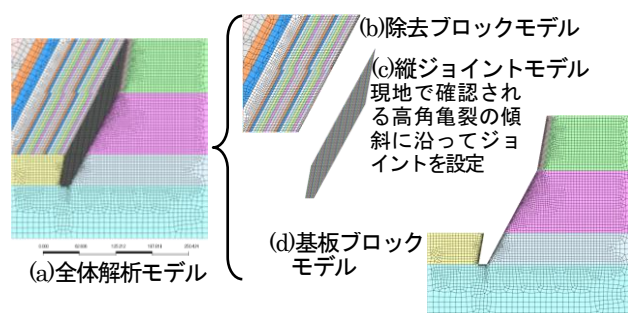


図-9 解析モデルメッシュ図

定するという応力場ゆるみサイクルを繰り返すものである。ひずみの値と破壊の関係については、「クリープが問題となるような破壊に近い、0.1%以上の大ひずみレベル」⁴⁾との見方もあるが、本検討ではステップ数を抑えるために、表-7に示すとおり、塑性ひずみ量0.1%の10倍の1.0%以上を破壊が進行していると考えてCL'級(強ゆるみ)に、0.5%~1.0%未満をCL級(中ゆるみ)に、0%~0.5%未満をCM級(弱ゆるみ)と設定した(Case1)。一番最初の自重解析の結果であるStep0において、塑性ひずみ量が蓄積し、強度低下を設定する領域の例を図-10に示す。

自重解析、塑性ひずみ量の把握、物性値の低減、再度自重解析というステップ解析を、岩盤強度がCH級の初期

表-5 岩盤物性値

名称	物性値						
	ポアソン比 ν	ヤング率 Es(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)	静止土圧係数 K ₀
砂岩CH	0.35	1,370,000	20	400	45	400	0.0009
砂岩CM	0.35	930,000	20	200	45	200	0.0009
砂岩CL	0.35	270,000	19	60	40	60	0.0009
砂岩CL'	0.35	150,000	19	60	40	60	0.0009
砂岩D	0.35	75,000	19	10	30	10	0.0009

表-6 ジョイント物性値

名称	せん断方向 剛性率 Ks(kN/m ²)	開口最大量 Vmc(m)	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 分配係数 FACT	一軸圧縮 強度 qu(kN/m ²)	最大強度に 対する残留 強度の比 Bo	ダイラタン ション角 Io(°)	Ur-rpの 関係係数 M
砂岩CH	344,444,444	0	100	100	40	0.5	1,000	0.5	20	1
砂岩CM	100,000,000	0	60	60	35	0.5	600	0.5	10	1
砂岩CL	55,555,555	0	10	10	25	0.5	100	0.5	0	1

表-7 相当塑性ひずみによる強度区分(Case1)

	相当塑性ひずみ		
	1.0%以上	0.5%以上1.0%未満	0%以上0.5%未満
岩級区分	CL'級(強ゆるみ)	CL級(中ゆるみ)	CM級(弱ゆるみ)

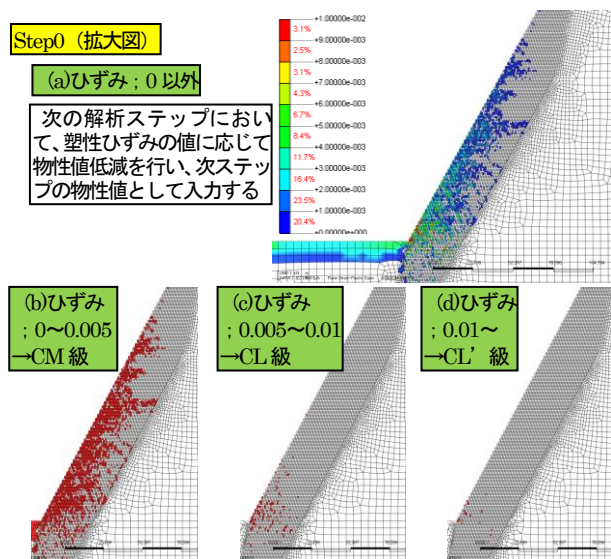


図-10 0以外の相当塑性ひずみ分布図(初期)

表-8 相当塑性ひずみによる強度区分(Case2)

	相当塑性ひずみ		
	0.1%以上	0.05%以上0.1%未満	0%以上0.05%未満
岩級区分	CL'級(強ゆるみ)	CL級(中ゆるみ)	CM級(弱ゆるみ)

状態からゆるみの影響範囲の拡大が収束するまでを目標に繰り返すことで、ゆるみ進展過程の把握を行った。ステップの進展ごとの塑性ひずみの分布と局所安全率の変化を図-11に示す。

解析ソフトの限界でメモリーエラーとなり7ステップで中断となったが、その段階までにおいても徐々にひずみのエリアが広がっていく様子が表現されている。その分布はコンター図のように明瞭な領域区分があるわけではなく、また、連続的な漸次変化でもなく、飛び石状に広く深部にまで渡っている。このことは、実際に現地を確認されるゆるみ状況とも整合的であると思われる。

地山全体の強度定数に一律に低減係数を乗じたり、深度方向に段階的に強度低下させるといった、恣意的な強度低減を行うことなく、塑性ひずみの量に基づいて機械的に設定することのみで、ゆるみ領域の拡大過程が再現できたことから、塑性ひずみの量から岩盤の破壊程度を想定する手法の妥当性を確認することができた。

また、メモリーエラーによりステップ解析が中断されたため、ゆるみの影響範囲の拡大が収束した最終状況が把握できなかったため、表-8に示すように、強度低下を引き起こすひずみ量の閾値をCase1に比べ1/10に引き下げ、より少ないひずみ量で強度低下を引き起こされるとい、いわゆるゆるみの進展速度を速めた場合(Case2)についても同様に解析を行い、ステップ解析が収束に至るかを検討した(図-12)。その結果、ゆるみの影響範囲の拡大は収束することなく、Case1と同様にメモリーエラーによりステップ解析が中断された。閾値の引き下げにより物性値を変更する総メッシュ数がCase1に比べ増えたことで、メモリーエラーが生じるステップ数は僅かに減ったものの、地山全体における塑性ひずみの分布範囲や局所安全率の低下範囲がCase1に比べ拡大している。そのことから、収束状態にまでは至らないものの、物性値低下とする塑性ひずみ量の閾値を引き下げること、数値解析検討における見かけ上のゆるみの進展速度を高められるのではないかと推察される。

ゆるみの収束拡大範囲を確かめる根本的な解決方法としては、解析メッシュの総数や閾値設定を見直した簡略モデルによる先行予備解析を行うことで、ゆるみ進行プロセスの時間的な全体像と現在の斜面のゆるみ進行ステージを把握するとともに、より緻密なモデルによって現在の応力ゆるみ状況を詳細に把握するという、2段階の検討を行う必要があると思われる。

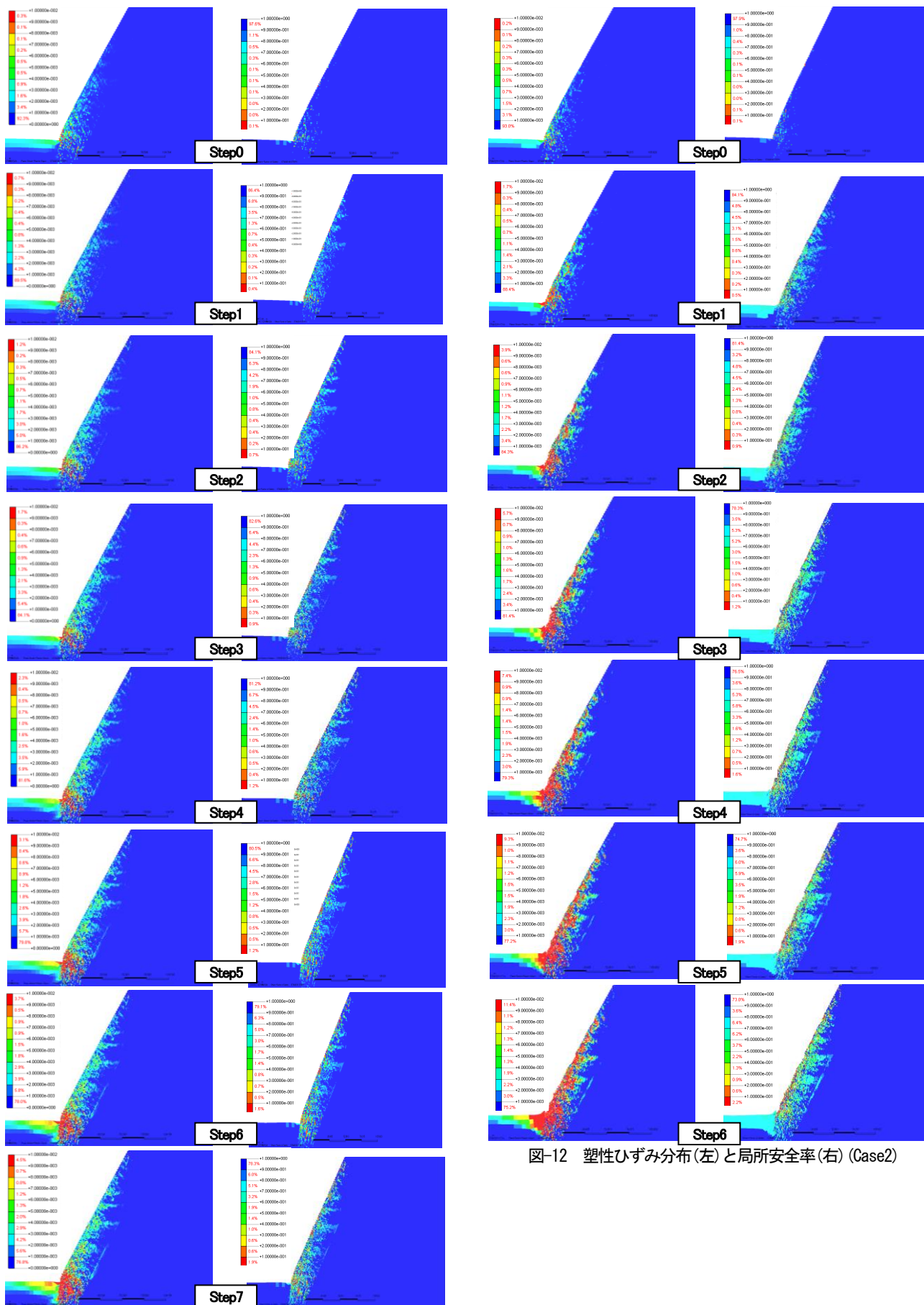


図-12 塑性ひずみ分布(左)と局所安全率(右) (Case2)

図-11 塑性ひずみ分布(左)と局所安全率(右) (Case1)

4. まとめ及び今後の課題

風化の影響を受けているトップリング型の岩盤のゆるみについて、岩盤や亀裂の強度を段階的に低減させる方法により、その進行過程を数値解析的に再現可能なことが明らかとなった。また、岩盤強度の設定方法についても、恣意的に変化させるのではなく、応力解放による応力場の変化により発生する相当塑性ひずみ量に対応して機械的に低減設定する方法の有効性が確認された。地質構造や地形発達史に基づくゆるみの発達成因を踏まえたこれらの検討手法をさらに発展させることで、ゆるみ岩盤の適切な解析モデル化が可能になると考えられる。

今後の課題として、岩盤強度の低減設定にあたって、閾値とする相当塑性ひずみ量と岩盤強度の関係について検証を重ねるとともに、応力場ゆるみの進展に関して、地震動による振動破壊の要素についても合わせて検討を行う必要がある。また、そのほかに、解析の初期モデルの設定において、河川浸食等による地形変化に起因するひずみの蓄積だけではなく、断層の形成や地層の褶曲の原因でもある造構運動にも関係する地山の応力場も考慮に入れた検討を行いたい。

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) 江口貴弘・日外勝仁・佐々木靖人：ダム建設事例におけるゆるみ岩盤のパターン分類，平成 24 年度日本応用地質学会研究発表会論文集，pp. 85-86，2012.
- 3) 日外勝仁・江口貴弘・佐々木靖人：FEM 解析によるゆるみ岩盤モデル化方法の検討，日本応用地質学会平成 24 年度研究発表会講演論文集，pp. 87-88，2012.
- 4) 越智健三・金有性・龍岡文夫：ひずみ依存性と測定誤差を考慮した堆積軟岩の変形特性の検討，土木学会論文集 No. 463/III-22，pp. 133-142，1993.

A STUDY ON LOOSEN ROCK MASS 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 : Because the loosened rock mass including a lot of cracks shows complex, various, unstable forms, the grasp of the distribution and properties of the loosened rock mass is assumed to be one of the important problems in the dam construction especially. In this paper, in order to develop the technique for quantitatively evaluating the loosened rock mass slope stability, two methods to express the progress phenomenon of loosening of the rock mass that appears as open cracks and strength degradation by the stability analysis of continuum (finite element method), are examined. One is a method of reproducing the loosening process of the rock mass of the creep type by repeating the step analysis, that is, technique of one by one changing strength parameter of rock mass and joint according to loosen situation arbitrarily. The other is a method of feeding back the strength reduction corresponding to the amount of the plastic strain to the numerical modeling many times, based on the idea that the plastic strain concentration is a cause of distinguished degradation progress.

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