FEMを用いた進行性ゆるみ岩盤の解析モデル化方法と評価の流れ

日外 勝仁[1]*・江口 貴弘[1]・佐々木 靖人[1]

[1]国立研究開発法人土木研究所　地質・地盤研究グループ地質チーム（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
*E-mail: agui@pwri.go.jp

ゆるみ岩盤は，亀裂に支配された複雑で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．本研究の目的は，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）で表現することである．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，岩盤のゆるみ進行過程を再現するという「FEMステップ解析法」からなる開発提案中のゆるみ岩盤の定量的評価法を実際の岩盤斜面評価に適用するイメージを明確にするために，評価の全体の流れをフロー図の形でとりまとめた．

Key Words : *rock slope, loosened rock mass, finite element method, FEM step analysis*

1. はじめに

自然界に見られる岩盤には，外的要因により局部的に性状が悪くなっている部分があり，この部分を「ゆるみ岩盤」と称して健岩部との差別化が図られている．佐々木[1)]らは，広義の岩盤の「ゆるみ」として「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くかつ非弾性的性質が大きくなった状態」と定義している．

このような力学的に不安定な状態にあるゆるみ岩盤を構造物基礎や切土のり面を施工した場所は様々な問題が発生している．このため，調査・設計・施工の各段階でゆるみ状況を的確に把握し，安定性を適切に評価することが求められる．

そこで本研究では，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，ゆるみ岩盤斜面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ている．

これまでの一連の研究では，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，風化によるゆるみ進行現象の再現[3)]や亀裂の分布性状に基づいたモデル化方法の検討[4)]などを行い，数値解析によりゆるみ岩盤を定量的に表現する方法を提案し[5)]，様々な基礎的検討[6),7),8),9)]を重ねてきた．

本稿では，岩盤のゆるみ進行過程を再現するために，開発提案している「FEMステップ解析法」と，それを用いたゆるみ岩盤の定量的評価法について解説する．また，実際の岩盤斜面評価に適用するイメージを明確にするため，評価全体の流れをフロー図の形でとりまとめ，その考え方を示すとともに，各要素技術についても解説する．

2. ゆるみ現象を考慮した岩盤斜面安定評価

(1) FEMステップ解析法によるゆるみ岩盤評価

本研究では，ダム建設等において基礎掘削や湛水等に伴うゆるみ岩盤の不安定化の範囲，安定性，対策工の効果等を適切に評価する手法の開発を目的に，ゆるみ岩盤の安定性評価法の開発に関する研究を実施してきた．その中で，ゆるみの進行現象の内，特に力学的な影響を客観的に評価するために，「FEMステップ解析法」を考案し，数値解析によるゆるみ岩盤の評価法を検討してきた．これまでに述べてきたとおり，この「FEMステップ解析法」によって，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て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[6)]することで，ゆるみの進展過程を数値解析により適切に表現し，現在もしくは将来のゆるみが進行した斜面における安定度を定量的に評価・把握しようというのが本研究の最終目標である．

⑵ ゆるみ進行の基幹となる劣化サイクル

既報[5]において，主に風化等によるゆるみを「風化･劣化ゆるみ」，地形改変に伴う応力解放によるゆるみや重力変形作用によるクリープ変形のゆるみを「応力場ゆるみ」と名付け，数値解析による評価手法の検討を行った．その中でも特に「応力場ゆるみ」については，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いう考えに基づいた「FEMステップ解析法」（**図-1**参照）を開発提案している．この解析法は，自重解析によって算出された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単位で物性値を低減設定した後，次のステップとして再度解析を行うというサイクルを，収束条件[7]に達するまで繰り返すものである．

本節では，ゆるみ進行を数値解析で表現する上での基幹的な劣化進展機構として，応力劣化サイクルを原因に基づきさらに細分した合計３つの劣化サイクルを設定し，各々の特徴を以下に概説する．

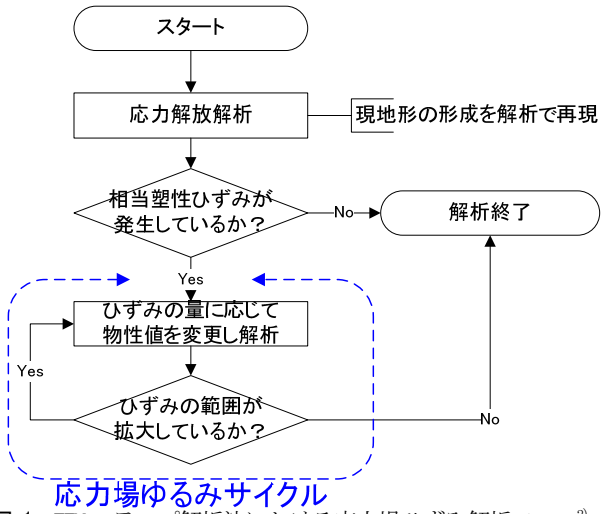

図-1　FEM ステップ解析法における応力場ひずみ解析フロー[2]

a) 重力作用に起因する応力劣化サイクル（図-3中の(i)を参照）

河川浸食や人工掘削による応力解放に起因する力学的影響の時間変化を把握するため，塑性ひずみ量に応じて物性値を機械的に低減させる解析ステップを重ねて，重力作用に起因した劣化進行を再現･評価する手法である．

b) 地震･地殻変動に起因する応力劣化サイクル（図-3中の(ii)を参照）

地震や火山などの地殻変動に起因する力学的影響の時間変化を把握するために，解析モデルの境界条件に地圧に応じた拘束圧（例：側圧作用による変形を考慮した側圧方向の拘束圧など）を付与した上で，塑性ひずみ量に応じて解析物性値を機械的に低減させるという解析ステップを重ねることで，地殻変動に起因した劣化進行を再現･評価していく手法である．

c) 風化･劣化に起因する劣化サイクル（図-3中の(iii)を参照）

風化･劣化の進行を想定し，岩盤及び不連続面の強度を恣意的に段階低減させるという解析ステップを重ねることで，風化･劣化の進行による力学的影響（応力分布や変位など）の変化を再現･評価していく手法である．

⑶ 解析要素モデルの選択（図-2参照）

FEM解析を行うにあたっては，岩盤の種類や亀裂･地層の状況から，最も適した解析要素モデルを選択する必要がある．**図-3**に示す５つの解析要素モデルについて，解析モデルの選択と解析時の留意事項を整理する．

a) 縦ジョイントモデル（図-2中の(iv)を参照）

柱状節理や高角度の不連続面が発達し，トップリングによるクリープが発生している斜面において有効な解析モデルである．特に節理構造が地山全体の挙動に影響を与える場合は考慮を検討する．

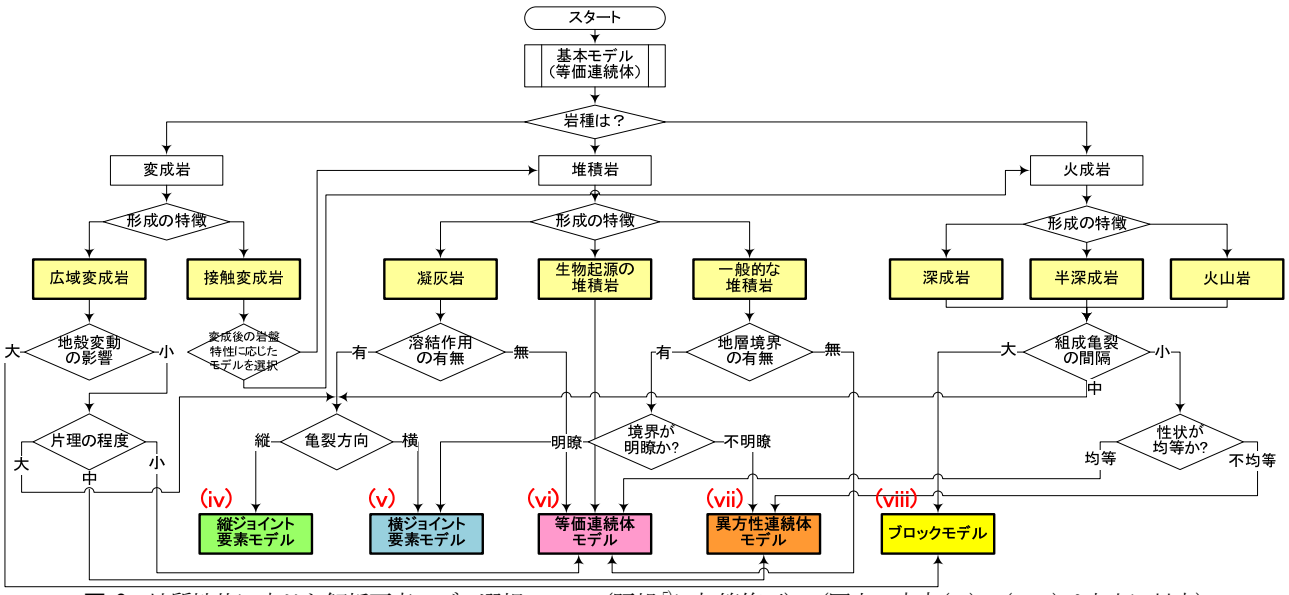

図-2　地質性状に応じた解析要素モデル選択フロー（既報[5]に加筆修正）　（図中の赤字(iv)～(viii)は本文に対応）

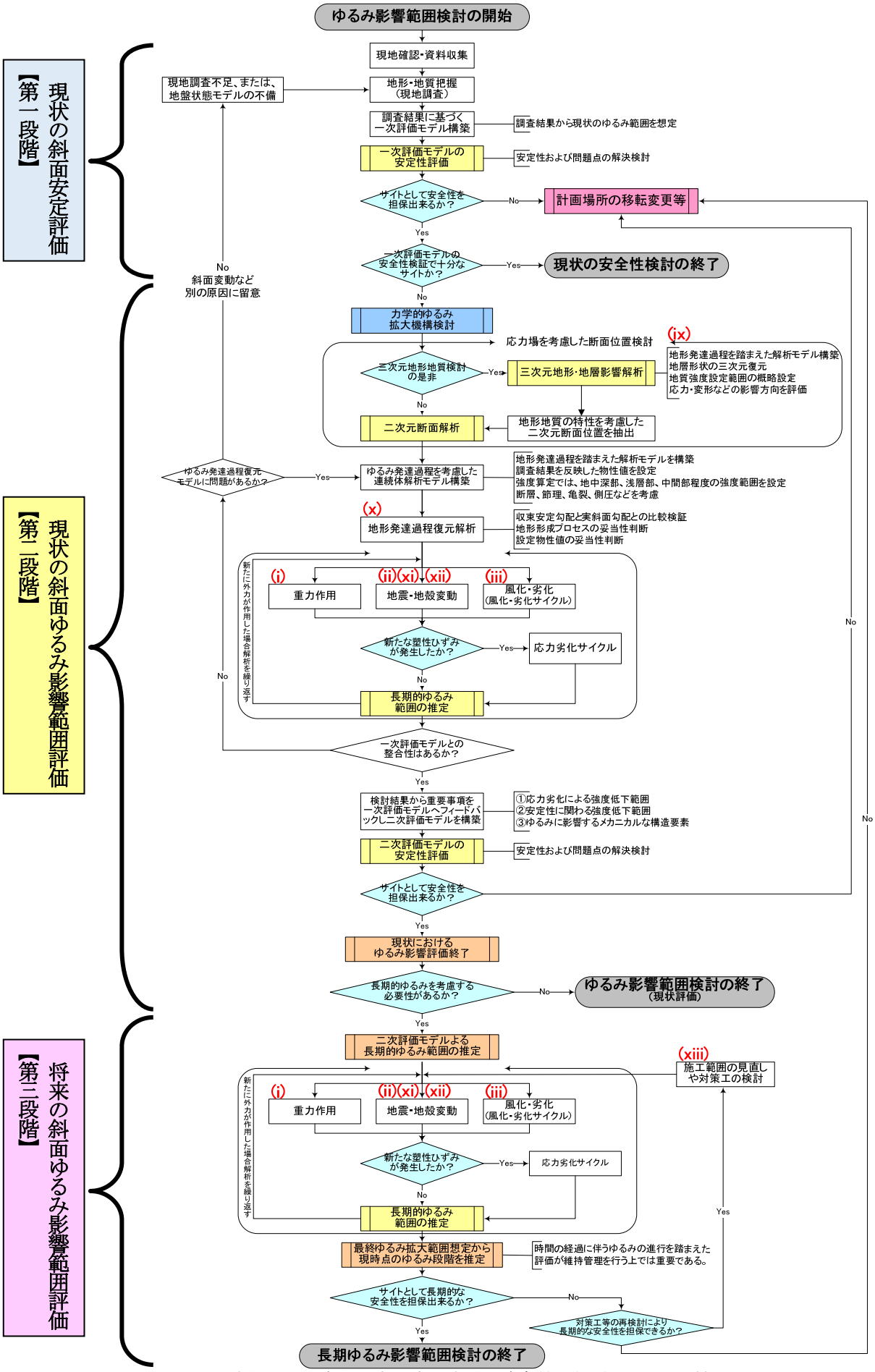

図-3　ゆるみ岩盤に対する解析・評価の流れ（図中の赤字(i)～(xiii)は本文に対応）

b) 横ジョイントモデル（図-2中の(v)を参照）

大きな断層部の影響を不連続面として変位的に評価する解析モデルである．不連続面を設けることで大変形を考慮し，位置的な変化を評価する場合に有効な解析モデルである．

c) 等価連続体モデル（図-2中の(vi)を参照）

不連続面による影響を連続体の強度低減などで疑似的に表現する解析モデルである．岩盤内部の応力･ひずみ状態を評価する場合に有効な解析モデルである．

d) 異方性連続体モデル（図-2中の(vii)を参照）

縦横で岩盤の力学特性に大きな違いがある場合に有効な解析モデルである．堆積岩類や片理を伴う変成岩の場合に考慮すべきモデルである．

e) ブロックモデル（図-2中の(viii)を参照）

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有効な解析モデルである．

3. ゆるみ岩盤に対する評価全体の流れと要素技術

(1) FEMステップ解析法によるゆるみ岩盤評価の考え方

提案するゆるみ岩盤斜面の数値解析的評価の流れについて，検討の目的に応じて，３つの評価検討段階（図-3中の灰色のエンドストップオブジェクト）に分けられる．各段階について，図-3に示すフロー図に沿って解説する．

a) 第一段階「現状の斜面評価」

第一段階は，現在の斜面形状及び物性値を反映した一次評価モデルでの安定性評価であり，通常の斜面の安定評価に相当する部分といえる．既存の現地調査結果や地形･地質に関する基本的なデータ収集で得られた情報を基に，現地の地形や地層構造がどのように形成されたかなどの地形地質発達史の把握を行う．この把握が今後行われるゆるみ影響範囲の検討において非常に重要な位置付けを持つため，十分な調査及び資料収集が必要である．それらの情報を踏まえた上で，第一段階では，現在の斜面の安全性を，調査結果に基づいた通常の一次評価モデルによって評価し，対策工等の検討を行う．

b) 第二段階「現状の斜面ゆるみ影響範囲評価」

河川浸食や切土等による地形変化にともなう応力解放により，斜面が徐々にクリープ変形等を起こし不安定になることがある．第二段階は，現状の斜面安定を評価した後に，時間の経過と伴に生じる「ゆるみ」に対して特に評価が必要と判断された場合に，力学的なゆるみ拡大機構を踏まえた解析モデルを構築し，ゆるみの程度や範囲といった進行状況の把握に重点を置いた検討を行う．

この第二段階での特徴は，通常の解析モデル化とは異なり，ゆるみ岩盤の進行性を評価するのに特化した解析モデル化にある．そのためには，ゆるみが発生する素因としての地形･地質構造の把握や，また，発生したゆるみの拡大･進展を助長する誘因的な働きをする重力作用の原因となる地形の把握が必要不可欠となる．三次元地形･地質影響解析と地形発達過程の把握については，個別に次節において詳細を述べる．

前章で概説した解析要素モデルを組み合わせることにより，ゆるみ等の地質性状を表現した解析モデルを構築した上で，ゆるみの進展を促す劣化サイクルを繰り返すことになる．最終的に得られた解析結果が，実際の現地地質調査結果と齟齬が無いかということを確認し，齟齬がある場合には，解析モデルの作り込みに問題があるか，そうでなければ調査自体が不足するなどの理由で調査結果の解釈に誤りがあるか，の２つの可能性が導き出される．既存の調査で捉え切れない可能性のある事象としては，不規則な地質構造や地山内部の大規模断層･破砕帯の存在，滑動地すべりまでは顕在化していない岩すべりや初生地すべりの存在などが挙げられる．特に最後の事象については，ダム建設などにおいては，箇所選定に関わる大きな事案であり，その判断材料として本検討手法の活用が期待される．

第二段階では，数値解析というものを，力学的な安定性の評価として用いるだけではなく，現地地質調査結果と対照し，解析モデル自体の妥当性や地質解釈の正否，ひいては，基となる調査自体の不足の可能性にまで考えを及ばせるものである．

c) 第三段階「将来の斜面ゆるみ影響範囲評価」

最後の第三段階は，調査結果と整合したゆるみ岩盤に適応した解析モデルが構築できた後の評価段階であり，現状の斜面において，今後さらにゆるみが進行した場合の安定度を評価する「長期ゆるみ影響範囲検討」である．この段階においては，斜面対策工もモデル化することで，長期劣化に対応した適切な対策工の設計が可能となる．

ゆるみ影響評価を含めた現状の安全性評価のみで良いサイトでは，第二段階で検討が終了する．しかし，更に長期的なゆるみの評価が必要なサイトでは，二次評価モデルによる長期的ゆるみ範囲の推定へと進むことになる．長期的安定評価に最も重要な外力として作用するものが自重である．自重の影響として，大規模掘削や大規模盛土，重量構造物の設置などが挙げられる．これらは，二次的外荷重として作用させる荷重である．荷重の載荷は１回に限らず，過去の発生をトレースするように載荷回数を考慮，また，今後予想される事象については規模も含めて適切な載荷を行う．自重･外荷重の作用による応力劣化サイクルを行い，後の強度劣化まで見据えた長期的な力学的な「ゆるみ」の範囲の想定を行う．

地形の形成過程を含めた自重解析（除荷）を行うことで，現在そして将来的なゆるみの範囲の想定を行うこと

になる．しかし，この想定ゆるみ範囲が，現地調査から想定した地形モデルとの整合性の評価，及び，最終的なゆるみの過程で現在がどの程度の段階にあるのかの評価を行い，現況との関係を検討する段階である．

長期的なゆるみ範囲を想定した上で，このサイトに計画されている構造物建設が問題なく実施できるのかについて検討を行う．対策を行うことで実施可能なのか，また，別の場所に計画を変更すべきなのかについては，ライフサイクルコストを含めた総合的な判断が必要となる．

(2) 解析モデル構築の要素技術

a) 応力劣化サイクルにおける強度低減基準

一般的なひずみの範囲は，以下の様に考えられている．

ひずみ範囲		
	0.001%～0.01%	：弾性
	0.01%～1.0%	：弾塑性
	1.0%以上	：破壊

相当塑性ひずみ量に応じて，岩盤等級に対応させた物性値に段階的に変化させることで応力劣化サイクルを表現した[6]．強度物性値は低減させるのみで，増加はさせないものとする．

相当塑性ひずみ量	
0.01未満	：物性変更なし(C_H級)
0.01%以上，0.1%未満	：C_M級へ強度低減
0.1%以上	：C_L級へ強度低減

岩盤等級は相対区分となっており，岩種等に応じて，大強度（硬度の高い火成岩），中強度（第三紀以前の堆積岩や亀裂の多い火成岩），小強度（第四紀以後の堆積岩や変成岩）の３つに分類し，各々について岩盤等級毎の物性値を参考までに**表-1**，**表-2**，**表-3**に例示する[6]．

表-1 岩盤等級別岩盤物性値（大強度）[6]

名称	静的変形特性						
	物性値						
	ポアソン比 ν s	ヤング率 E(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
C_H級岩盤	0.30	2,000,000	20	2,000	50.0	400	0.5
C_M級岩盤	0.30	750,000	20	750	42.5	150	0.5
C_L級岩盤	0.30	200,000	20	300	35.0	60	0.5
D級岩盤	0.30	100,000	20	150	30.0	30	0.5

表-2 岩盤等級別岩盤物性値（中強度）[6]

名称	静的変形特性						
	物性値						
	ポアソン比 ν s	ヤング率 E(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
C_H級岩盤	0.30	1,000,000	20	1,000	45.0	200	0.5
C_M級岩盤	0.30	500,000	20	500	40.0	100	0.5
C_L級岩盤	0.30	200,000	20	300	35.0	60	0.5
D級岩盤	0.30	100,000	20	150	30.0	30	0.5

表-3 岩盤等級別岩盤物性値（小強度）[6]

名称	静的変形特性						
	物性値						
	ポアソン比 ν s	ヤング率 E(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
C_H級岩盤	0.30	500,000	20	500	40.0	100	0.5
C_M級岩盤	0.30	200,000	20	300	35.0	60	0.5
C_L級岩盤	0.30	100,000	20	150	30.0	30	0.5
D級岩盤	0.30	50,000	20	70	25.0	14	0.5

b) 三次元地形地質検討（図-3中の(ix)を参照）

ゆるみの発達過程を考慮した解析は，（現状では）二次元断面解析として実施することになるため，現状の特徴を最も適切に表すことのできる二次元断面の解析モデルを選定することが重要となる．その際，サイトに特徴的な地形や地質構造がある場合には，前段として三次元地形地質検討を行うことが検討の精度向上に直結する．

ゆるみの発生原因の一つに亀裂の存在があるが，断層･破砕帯が数多く分布し，かつ，その走向･傾斜にも卓越した方向がある場合には，斜面形状と合わさって，ゆるみの発達や斜面変形方向に大きく寄与する場合がある．また，地質構造に関しては，層状をなした互層斜面において，挟まれた強度が低い脆弱層等などの変形･はらみだしにより，斜面全体の変形･ゆるみを引き起こしている事例がある[8]．そのようなケースでは，斜面と脆弱層の位置･交差状況が，斜面変形の方向を規制することになるため，二次元断面において斜面安定を計算する際においても，単純に最大傾斜方向を抽出するのではなく，斜面形状及び地質構造を反映した三次元モデルにおいて，地形･地質影響解析を行った上で，より詳細な評価を行うべき二次元断面位置を決定する必要がある．

なお，三次元の地質構造のモデル化において，顕著な活褶曲地形や方向が卓越した断層群が分布するなどした応力場の場合には，初期地圧として三次元モデルの拘束条件に組み込んだ上で影響解析を行うことで，応力･変位等が顕著に表れる方向を把握し，その結果を基にゆるみ影響評価を行う二次元断面を抽出する．

また，断層や亀裂の表現方法は，サイト毎で条件が異なるため画一的に決めることはできないが，要素性状を把握した上で作用外力との兼ね合いを考慮して決定することが重要である．

c) 地形発達過程復元解析（図-3中の(ix)を参照）

文献調査や現地調査から，隆起･堆積･浸食などといった地形･地質構造の成り立ちを読み取り，現地状況に応じた地形発達過程を復元するように数値解析を行うことで，現在の地形に至るまでのゆるみの範囲を想定する．

評価対象とする河川急崖斜面に対し，河川浸食によるV字谷の形成過程を数値解析によりトレースし，劣化サイクルが進んだ解析上の斜面安定勾配と現実の斜面勾配とを比較することで，解析モデル（構成要素の構造や解析物性値）の妥当性を検証することも可能である[9]．

なお，河川浸食表現モデルで用いた相当塑性ひずみ量に応じた強度低減基準は以下に示すとおりである．通常の岩盤斜面における強度としては考えづらいD級までの強度低減を設定し，その上で，斜面内部ではなく，表層に面したD級強度のメッシュについては，浸食によりなくなるものと考え，解析のステップを進める際にメッシュ除去を行い，応力再配分等の処理を続けている．

相当塑性ひずみ量	
0.01未満	：物性変更なし(C_H級)
0.01%以上，0.1%未満	：C_M級へ強度低減
0.1%以上，1.0%未満	：C_L級へ強度低減
1.0%以上	：D級へ強度低減※
局所安全率	
1.0未満	：D級へ強度低減※

※斜面表層に面したD級強度メッシュは除去する．

d）地震動影響検討（図-3中の(xi)を参照）

地震動に伴う岩盤の破壊状況を評価するのに有効な解析モデルと評価手法である．地震動による応力作用による影響を考慮することで応力劣化サイクルのトリガーとなる荷重を評価する．

e）側圧影響検討（図-3中の(xii)を参照）

側圧作用に伴う岩盤の破壊状況を評価するのに有効な解析モデルと評価手法である．側圧による応力作用による影響を考慮することで応力劣化サイクルのトリガーとなる荷重を評価する．

f）対策工の力学的影響検討（図-3中の(xiii)を参照）

グラウンドアンカー工や押さえ盛土などの対策工の効果を数値解析で求めるための評価手法である．対策工の効果を力学的に評価することで岩盤内部に生じている力学的影響を評価する．

4. まとめ及び今後の課題

塑性ひずみ量に応じて岩盤の強度物性値の逐次低減変更を繰り返すという，本研究で開発提案中である「FEMステップ解析法」に基づいたゆるみ岩盤の定量的評価法について，評価全体の流れをフロー図の形でとりまとめ，その適用の考え方と各要素技術の特徴について解説した．

地形変化に起因した応力解放による応力場ゆるみを対象とした機械的な強度低下設定法については，既報等において様々な検討を重ねてきた[4),5),6),7),8),9)]．その一方，表層からの風化や地山内部の地下水等による風化･劣化については，基礎的な原理検討による実現可能性を確認したのみであり[3),5)]，具体的な物性値設定などの詳細な検討は今後の課題である．また，通常の経時変化であるゆるみ劣化変化だけではなく，斜面変動が大きな引き金となり，その後，ゆるみ劣化が進行していくような複合的なモデルについても，今後さらに検討を重ねたい．

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) 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（その２），日本応用地質学会平成 25 年度研究発表会講演論文集，pp.31-32，2013.
5) 日外勝仁，江口貴弘，佐々木靖人：岩盤斜面におけるゆるみ進行過程の数値解析モデル化に関する基礎検討，土木学会第 42 回岩盤力学に関するシンポジム講演集，pp.74-79，2014.
6) 日外勝仁，江口貴弘，佐々木靖人：岩盤斜面におけるゆるみ岩盤の数値解析評価における物性値低減設定に関する検討，土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジム講演集，pp.248-253，2015.
7) 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（その３），日本応用地質学会平成 26 年度研究発表会講演論文集，pp.163-164，2014.
8) 江口貴弘，日外勝仁，佐々木靖人：数値解析結果に基づくゆるみの進行における地質構造の影響について，日本応用地質学会平成 27 年度研究発表会講演論文集，pp.77-78，2015.
9) 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（その４），日本応用地質学会平成27年度研究発表会講演論文集，pp.79-80，2015.

ANALYSIS MODELING METHOD AND FLOW OF EVALUATION FOR PROGRESSIVE LOOSENED ROCK MASS USING FEM

Katsuhito AGUI, Takahiro EGUCHI and Yasuhito SASAKI

The purpose of the present study is 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 FEM. Because the loosened rock mass including a lot of cracks shows complex and 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. To clarify an image for applying the rock evaluation method in development including "FEM Step Analysis" to the actual evaluation of loosened rock slopes, the entire flow of the evaluation of loosened rock mass has been shown in the form of a flow diagram.