

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

日外 勝仁^{1*}・江口 貴弘¹・佐々木 靖人¹

¹土木研究所 つくば中央研究所 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「FEMステップ解析法」、すなわち、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の設定方法について様々な検討を行った。

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

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、元々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、ダム敷や法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、道路の自然斜面や法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、これまでダム位置としてゆるみ岩盤の分布箇所を避けたりダム基礎からゆるみ部分を掘削除去したり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悪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、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ところである。

2. 応力劣化サイクルによるゆるみ現象の表現方法

既報²⁾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始めたところである。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て「FEMステップ解析法」（図-1参照）を現在考案中である。この解析法は、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ことで表現する手法を提案し、ゆるみの進展過程を数値解析でトレース・評価する可能性を確認したところである。

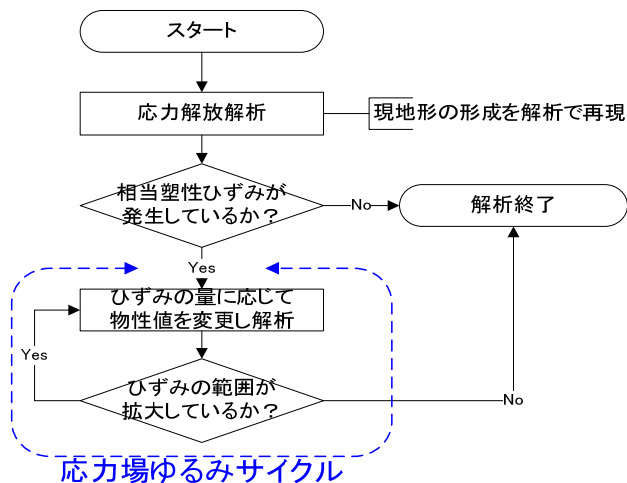


図-1 FEM ステップ解析法における応力場ひずみ解析フロー²⁾

本稿で検討を行う「FEMステップ解析法」とは、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解析的に収束するまで繰り返すものである。

既報²⁾において、図-1に示す応力場ゆるみサイクルが収束に至らないうちに解析プログラムのメモリーエラーで中止となったため、エラーとならずに解析のサイクルを重ねられる解析条件設定をトライアルアンドエラーによる解析を繰り返すことで求める必要が生じた。また、どのような状態を解析的に収束したと見なし、解析のステップを止めるのかについても課題であった。

さらに、健岩での初期強度が異なってくる、岩種などの違いを考慮した上で、数値解析の際に用いる段階的に低減させていく各種物性パラメータについても、標準的な値を定めておく必要が確認されていた。

これらゆるみ岩盤を対象としたFEMステップ解析法を実施する上で必須となる解析条件設定について行った種々の検討結果について、3章に述べる。

3. 解析条件設定に関する種々の検討

(1) ひずみ量と岩盤強度

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

上記を踏まえ、応力劣化サイクルにおいて、物性値の低減を行う劣化区分を以下の様な相当塑性ひずみの閾値から設定することとした。強度物性は低減させるのみで、ひずみ量に関わらず増加させることはないものとする。

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

ここに示した相当塑性ひずみ量の閾値と、次節で述べる岩盤等級別の解析物性値の対応は、数多くの解析結果を比較検討しながら絞り込んだ結果である。本節では、比較検討事例の中で現時点に導き出された最適と思われる解析条件を前出しして示し、以降の記述を進める。

(2) 岩種別の標準物性値

開発検討中の「FEM ステップ解析法」の中で検討に用いる岩盤強度について、現地での調査分類との整合性をできるだけ確保するために既存の分類方法を活用することとした。ダムやトンネルといった評価対象物に応じた分類手法は各種あるものの、整理・統一された明確な基準になっていないのが現状である。平成 16 年 3 月社団法人地盤工学会より「新規制定地盤工学会基準・同解説 岩盤の工学的分類法 (JGS3811-2004)」³⁾が出版され学会としての岩盤分類法を規定したが使用状況は思わしくない。さらに、これらの岩盤分類から直接的に岩盤強度の定数を導き出す資料など⁴⁾も存在するが、制定機関ごとに異なった数値となっている。その理由として岩盤は、単一物質の結晶体でないため岩種が同様でも生成過程やその後の風化・劣化によって異なった強度特性を示すこととなり、標準値を規定することが難しいことが考えられる。そのため、現地試験により得られた強度定数を用いることが一般的であり、標準値を規定する必要が無かったことが最も大きな理由と思われる。

そこで、ダム建設事例における岩級区分と強度の相対的な関係や岩盤斜面数値解析の既往文献等で用いられている解析物性値を参考に、解析適性を考慮した上で、本研究で検討中の「FEMステップ解析法」で用いる岩盤物性値について整理を行った。本研究で用いている、等級区分の全体の強度分布を3種類の岩種強度に分けた岩盤等級別岩盤物性値を参考として表-1、表-2、表-3に示す。

大強度	: 硬度の高い火成岩に適用可能な強度分布
中強度	: 第三紀以前の堆積岩や亀裂の多い火成岩に適用可能な強度分布
小強度	: 第四紀以後の堆積岩や変成岩に適用可能な強度分布

これらの値では、明らかに表現が難しい岩盤特性がある場合には、物性値の低減や特性値を考慮する必要がある。また、岩盤を弾塑性体として検討しているが、非線形要素として取り扱うべき岩盤もあり、岩盤の性状を十分に理解した上で物性値の決定を行う必要がある。

表-1 岩盤等級別岩盤物性値（大強度）

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 $\gamma(kN/m^3)$	粘着力 $C(kN/m^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	引張強度 $\sigma_t(kN/m^2)$	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）

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 $\gamma(kN/m^3)$	粘着力 $C(kN/m^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	引張強度 $\sigma_t(kN/m^2)$	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）

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 $\gamma(kN/m^3)$	粘着力 $C(kN/m^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	引張強度 $\sigma_t(kN/m^2)$	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

特に水の影響を受けやすい岩盤では、化学的な反応である膨潤やスレーキングが発生することもあり、本研究においてはこれらの現象に対応した標準物性値の設定方法までは検討していない。そのため、解析モデル作成において、対象地山の変状が力学的要素以外の要因であることが明確な場合は、初期応力の設定や作用外力のあり方について別途留意する必要がある。

また、物性値の低減状況を現地調査結果から定める方法についても今後の大きな課題である。現地で得られる情報には、以下のものがあげられる。

- ①物理的な強度（試験が出来る程度の健岩部）
- ②亀裂の本数や開き（ボアホールや横坑壁面）
- ③岩盤の性状（年代や組成）

また、計測を行っていれば、

- ④地表面の変位量
- ⑤軸力、応力など

上記のようなデータが入手可能であるが、強度算定方法としては、現地で得られる情報との関連性の定量化を図ることで、現況を反映した定量的でより詳細な強度設定を行うことで手法確立への発展が期待できる。

C_H級岩盤を中硬岩上限程度と設定し、以下1ランクずつ低下させることで強度区分を行った。また、基本物性を弾塑性とし、Mohr Coulombの降伏条件で解析を行った。

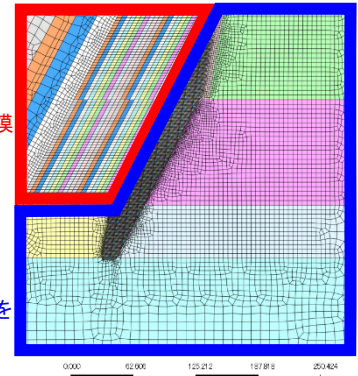
以降に示す応力劣化サイクルでの解析条件の検討にあたっては、実際のゆるみ岩盤斜面事例の比高と勾配から図-2に示すメッシュモデルとし、また、構成地質、岩盤強度などから表-2に示す中強度岩の岩盤等級別物性値を採用した解析モデルを採用することとした。

(a) 除去ブロック

- ・河川浸食等の地形変化を模して除去する範囲
- ・後退浸食モデルで表現

(b) 評価対象ブロック

- ・斜面安定を評価する範囲
- ・表層部はメッシュサイズを小さく設定



メッシュの色分けは便宜的であり、初期物性値は同一。

図-2 解析モデルメッシュ図

(3) 解析収束条件

応力劣化サイクルの収束条件は以下の通りとする。実際に相当塑性ひずみの増加がストップするまでサイクルを繰り返すことができれば、最も正確な解析評価となると思われるが、評価に用いている相当塑性ひずみは、非常に小さなスケールであるため物性値変更箇所があれば発生範囲が拡大し易い傾向にある。そのためなかなか収束に至らない状況が発生する。

解析精度の確保と繰り返し回数の軽減とのバランスを図るため相当塑性ひずみの増加量から増加機構の優位性を評価し収束判定に取り入れる検討を行った。

応力劣化サイクル解析において相当塑性ひずみ範囲は、初期解析よりステップが進行するに伴い徐々に増加量が拡大するが、ピークを境に増加量が徐々に減少してゆく傾向にある。これは作用荷重と強度物性の関係から相当塑性ひずみが生じない部位まで劣化範囲が広がったことを示している。

しかし、前述したように物性値の低下を行った部位があればその周辺では、微量でも相当塑性ひずみの増加が見られるため、なかなか完全な収束に至らない。この状況は、作用荷重と強度物性の関係から必然的に相当塑性ひずみが生じる範囲ではなく、計算手法の誤差として考えることができると判断した。

この誤差に対して範囲条件を設定することで応力劣化サイクルが収束に至っているか判定することとした。

応力劣化サイクルの解析ステップの進展状況を測る指標として、1回の解析における物性を低減させた解析メッシュ数の増加量に着目した。具体的なデータ例としては、後述する表-5の解析結果を参照のこと。

増加量に対して優位性を見出す方法として「統計」による標準偏差を用いた。

統計上の信頼区間に以下の考え方がある。

- ・分布が正規分布に従う場合、
95%信頼区間は約平均 $\pm 2 \times$ 標準誤差
- ・分布が正規分布に従う場合、
99%信頼区間は約平均 $\pm 3 \times$ 標準誤差

表-4 岩盤等級に対応させる相当性ひずみ量

比較項目	収束サイクル (再開後の最終)	0.01%	0.05%	0.1%	0.2%	0.3%	塑性ひずみ量
Case1 (基準)	16						
Case2 下限側区分数	19						
Case3 下限側	14						
Case4 下限側区分数	9						
Case5 上限側区分数	17						
Case6 上限側	19						
Case7 区分数	14						

表-5 物性低減サイクルと物性値低減メッシュ数 (Case1)

物性低減サイクル	増加C _L 級メッシュ数	【参考】増加C _M 級メッシュ数	累積増加C _L 級メッシュ数	C _L 級増加率 (増加数/前サイクルまでの累積増加数)
開始直後	3	(4)	3	
1	2	(4)	5	66.7%
2	5	(4)	10	100.0%
3	6	(1)	16	60.0%
4	7	(9)	23	43.8%
5	8	(5)	31	34.8%
6	9	(8)	40	29.0%
7	10	(8)	50	25.0%
8	10	(9)	60	20.0%
9	10	(10)	70	16.7%
10	8	(10)	78	11.4%
11	7	(10)	85	9.0%
12	8	(9)	93	9.4%
13	8	(10)	101	8.6%
14	6	(6)	107	5.9%
15	6	(8)	113	5.6%
16	5	(7)	118	4.4%

表-6 岩盤等級別岩盤物性値 (中強度, C_M級細分)

名称	静的変形特性						
	物性値						
	ポアソン比 ν	ヤング率 $E(\text{kN/m}^2)$	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 $\sigma_t(\text{kN/m}^2)$	静止土圧係数 K_0
C _L 級岩盤	0.30	1,000,000	20	1,000	45.0	200	0.5
C _M 級岩盤	0.30	750,000	20	750	42.5	150	0.5
C _M 級岩盤	0.30	350,000	20	400	37.5	80	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

解析モデル中のひずみ量の分布が必ずしも正規分布を呈しているわけではないが、標準誤差の2倍以上の範囲である5%値はイレギュラーの可能性が高いと見なし、「5%以下の増加率になった段階で増加優位性がなくなったと判断し、応力劣化サイクルが収束している」とと判定することとした。

(4) 強度低減閾値

塑性ひずみ量に応じて岩盤強度を低減させるのが提案する「FEMステップ解析法」の基本方針であるが、解析手順の中で具体的な基準を定める必要があり、様々なモデルケースにおける解析結果を元に前述の3(1)節に示すとおり強度低減基準を定めたものである。その際の解析結果を図-3に示す。また、そこに至る検討ケースの一例を表-4に、収束段階の各解析結果を図-4に示す。

適否の基準は、解析収束状態での塑性ひずみ分布状況に甚大な影響がない範囲で、数値解析の作業量（解析数と必要データ処理量）を軽減させられる強度低減閾値条件となるよう以下のとおり比較検証を行った。

a) 下限側閾値検討

塑性ひずみ量0.1%をC_M級からC_L級に強度を低減する閾値として固定しつつ、C_H級からC_M級に最初に強度を低減させ始める下限側の閾値について、0% (Case2), 0.01% (Case1:採用基準), 0.05% (Case3), 0.1% (Case4) の4つを比較した。下限側閾値を極端に0%としたCase2では拡大範囲が大きくなるとともに、のり尻部での強度低下領域の厚みも厚くなった。下限側閾値を0.05%と高めたCase2や0.1%として中間区分をなくしたCase4では、閾値の引き上げに伴って、強度低下領域の拡大範囲（ノビ）が小さくなる傾向が認められた。

また、収束条件に至るまでの解析ステップ数は、下限側閾値が低いほどステップ数が増える傾向が確認された。

強度低下領域の分布勾配は、いずれのケースにおいてもほぼ同じ38度程度を示しており、斜面形状と初期岩盤強度（C_H級相当）のみより定まり、強度低減設定の下限側閾値にはあまり左右されないことが確認された。

b) 上限側閾値検討

C_L級に強度低減させる上限側の閾値について、0.01% (Case5), 0.1% (Case1:採用基準), 0.2% (Case6) の3つを比較した。収束条件に至るまでの解析ステップ数に大きな差はないものの、上限側閾値が低いほど強度低下領域の拡大範囲（ノビ）が大きくなる傾向が認められた。

c) 閾区分数検討

基準とした区分数はCase1の3区分であるが、区分数を2と4に変更したケースについても比較検証した。

区分数を2に減じたCase2, Case4, Case5の傾向は前述の通りであり、最終的な強度低下領域の分布形状は、区分数より閾値の大小の方により左右されると推察される。

一方、基準の3区分から中間区分であるC_M級を更に2つに細分（C_{MH}級, C_{ML}級）して計4区分としたCase7と基準のCase1とを比較する。Case7で使用した岩盤物性値を表-6に示す。強度低下領域の拡大範囲と形状はほぼ同じで、ステップ数も同程度であった。違いとしては、強度低下領域の上位側（領域拡大方向）の厚みが4区分の方がスリムになり、進展していく強度低下領域の下面側の勾配がやや立っているように見える。区分数を増やすことによる物性値低減変更の作業量の増加を考え、作業量は少なく収束時の強度低下分布形状がほぼ同じ結果を得られる3区分のCase1を基準設定とすることとした。

d) 強度低減閾値に関する全体考察

閾値を下げると、強度低下範囲は拡大する傾向が確認できる。ただし、強度低下範囲の進展傾向は一致する。

塑性ひずみと強度の関係が明確になるならば、その値を用いるべきであるが、現時点で作業性と評価のバランスを考慮すると、下限値を設けることが有効と思われる。

区分数を増やしても解析結果に優位性がみられないため、基準とした3区分が最も有効であると考えられる。

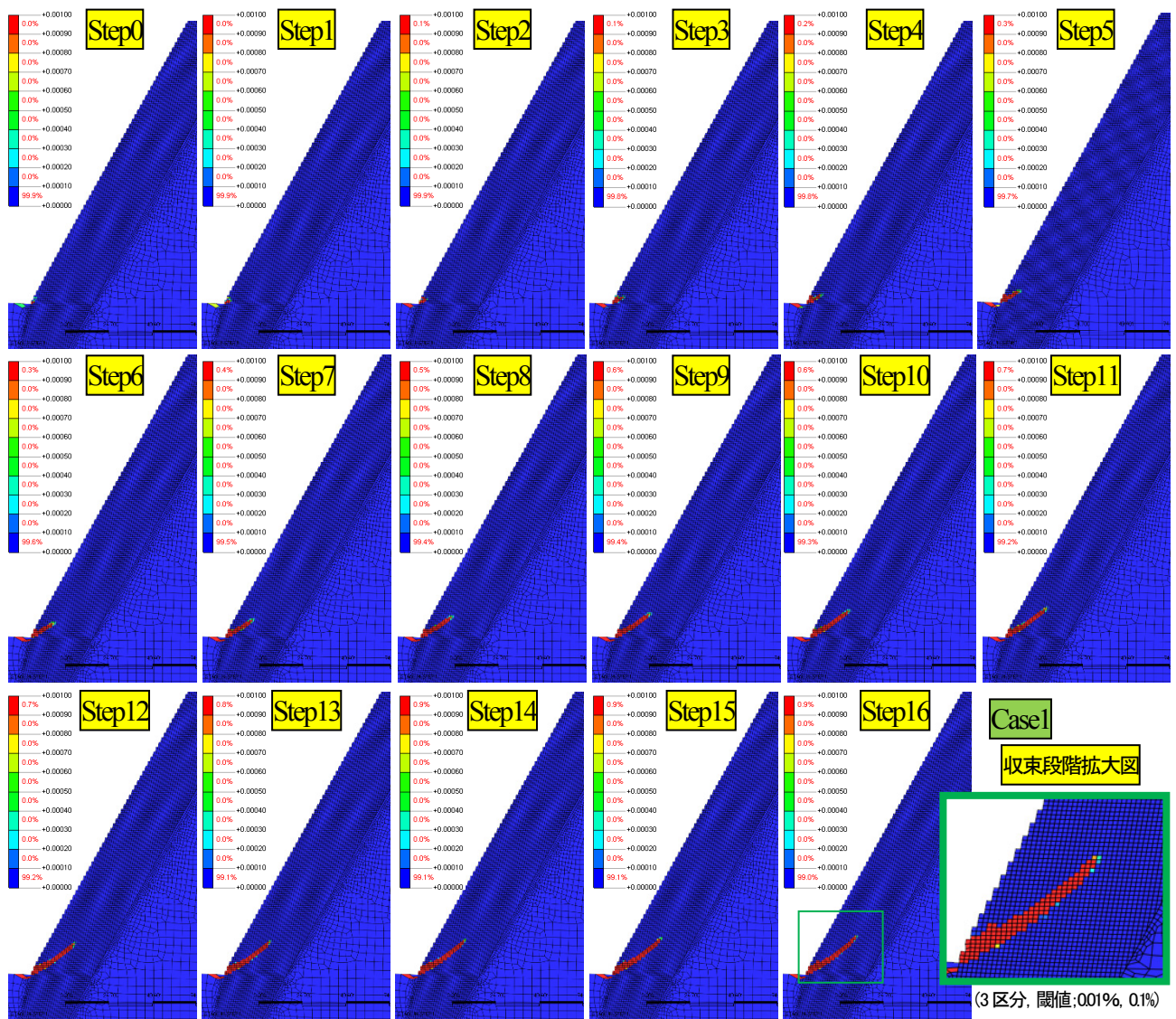


図-3 相当塑性ひずみ進展図（中強度岩盤、閾値設定；Case1）

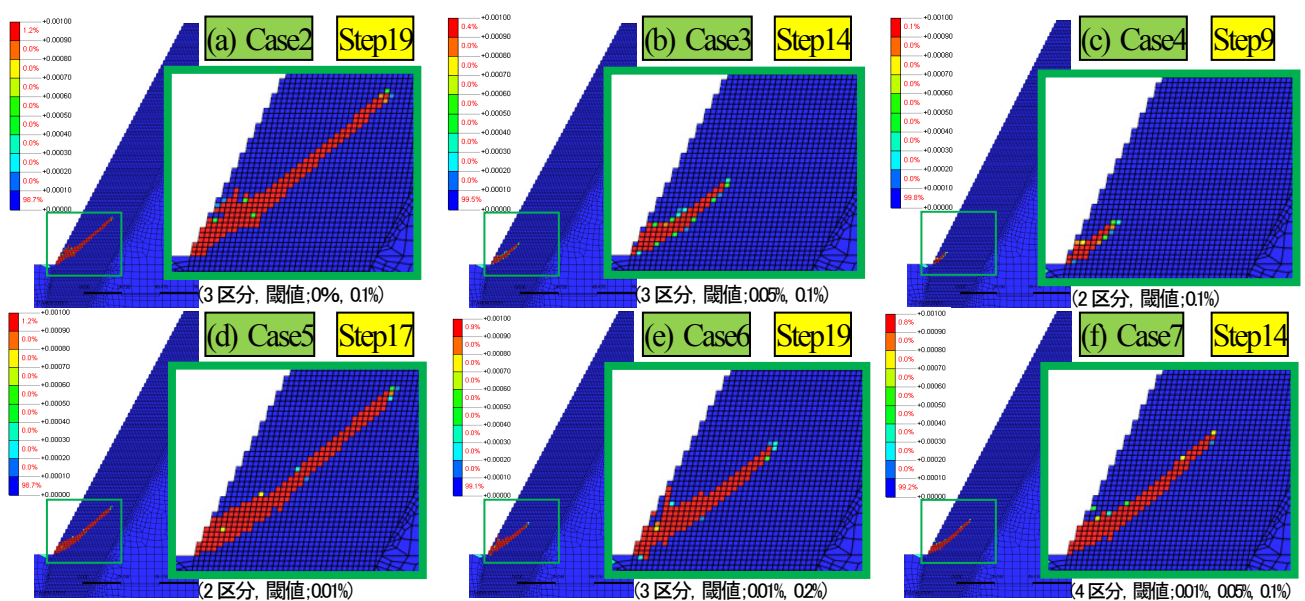


図-4 相当塑性ひずみ収束段階図（中強度岩盤、閾値設定；(a) Case2, (b) Case3, (c) Case4, (d) Case5, (e) Case6, (f) Case7）

(5) 地形改変による除荷影響

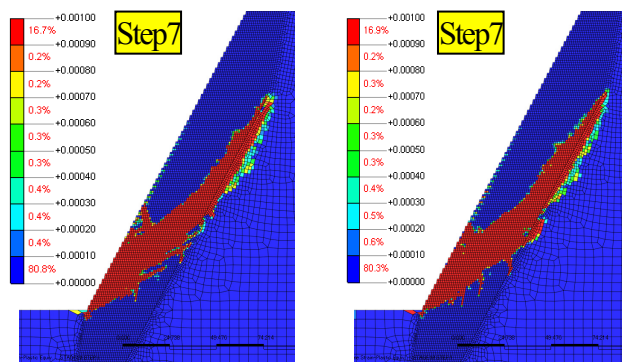
ゆるみ岩盤を評価対象とした物性値低減による「FEMステップ解析法」では、河川浸食や掘削工などの地形改変からくる応力解放の影響をステップ繰り返しの駆動力としている(図-1)。そのため、河川浸食などの長時間にわたる地形改変の除荷影響を、解析の初期段階においてどのように与えた後に応力場ゆるみサイクルを開始するかが、最終的な解析結果に大きな影響を与えると考えられるため、除荷の方法についても検討を行った。

本研究のモデルケースでは、ダム建設時の岩盤のゆるみ状況把握を目的としているため、図-2(a)に示されるような除去ブロックについて、河川浸食を模して斜面勾配に沿った後退浸食モデルとした。その際に、解析メッシュ上で、全面の粗い5ブロックと背面の詳細な40ブロックに区分し、一度に除荷するブロック数に応じて除荷のステージを以下の2通りについて検討を行った。

- ・一括除荷；合計45ブロックを一括[1ステップ]で除去した後に、物性低減サイクルを実施。
- ・段階除去；前面は1ブロックずつ、背面は4ブロックずつで、 $[5/1+40/4=15]$ ステップで除荷した後に、物性低減サイクルを実施。

解析物性値としては、表-2に示す中強度の物性値では解析結果に顕著な差異が認められなかったため、表-3に示す中強度の物性値を採用した。解析収束に至るステップ数は両者ともに7ステップとなった。収束段階での相当塑性ひずみ分布図を図-5に示す。

一括で除荷する方が、応力解放としては影響の大きいことがこれまでの解析検討事例から分かっていたが、今回の検証では、強度低減させた要素の総数は、一括除荷：3417要素、段階除荷（4ブロック）：3233要素と約5%の違いはあったものの、解析結果の分布図には優位な差異は認められなかった。解析ステップの増加に伴う解析時間の増加などの影響や検討結果が安全側評価となることを考慮した場合、応力劣化サイクル解析では、一括除荷による検討で十分有効性を発揮すると考えられる。



(a)一括除去後の収束結果

(b)15ステージ除去後の収束結果

図-5 相当塑性ひずみ分布図(小強度)

4. まとめ

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していくという、本研究で開発提案中である「FEMステップ解析法」において、塑性ひずみ量の閾値とそれに対応する岩盤強度物性値の標準値について種々の検討を行い、現時点で最適と思われる物性値低減設定の解析条件を決定した。

今後は、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だけではなく、表層からの風化や地山内部の地下水等による風化・劣化、または、斜面変動によって引き起こされるゆるみ等を考慮にいった複合的な評価手法について、検討を進めて行いたい。

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) 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ウム講演集, pp.74-79, 2014.
- 3) 新規規定地盤工学会基準・同解説 岩盤の工学的分類法 (JGS3811-2004), 地盤工学会, 2004.
- 4) 設計用地盤定数の決め方 ー岩盤編ー, p.279, 地盤工学会, 2007.

STUDY ON THE REDUCTION SETTING OF STRENGTH PARAMETER IN NUMERICAL ANALYSIS FOR LOOSENED ROCK MASS

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 (finite element method; 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. The setting method of the threshold of the amount of the plastic strain was deliberated on the basis of the idea, "Distinguished degradation promotion in the strain concentration part is a cause of strength degradation because of loosening".