

## 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、  
江口貴弘

### 【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である。そこで、本研究では、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、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「FEM ステップ解析法」を開発提案してきており、今年度は以下の三つの検討を行った。

本研究は、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に基づいている。そこで、まず一つ目の課題は、物性値低減の設定方法についてである。物性値は、塑性ひずみの量に応じて、連続的ではなく段階的に低減することとしており、その低減段階毎に岩盤等級区分を対応させている。低減段階を幾つにするか、その時の閾値となる塑性ひずみ量は幾らか、また、各段階における岩盤物性値は幾らと設定するのか、などが検討項目となる。

「FEM ステップ解析法」では、劣化サイクルというステップを進めていく際の最初の駆動力を、河川浸食等の地形変化による応力解放（除荷）に求めている。二つ目の課題は、本提案手法を用いることで河川浸食による地形発達過程の再現を試み、その結果から、設定した解析物性値と斜面形状の関係を検証することである。

三つ目の課題は、「FEM ステップ解析法」からなる開発提案中のゆるみ岩盤評価手法を実際の岩盤斜面の評価に適用するイメージを明確にすることである。数値解析を行う際に必須となる、地形地質構造に応じた解析メッシュモデル化方法について整理するとともに、評価の全体の流れをフロー図の形でとりまとめた。

キーワード：岩盤斜面、ゆるみ岩盤、斜面安定評価、有限要素法（FEM）、FEM ステップ解析法、塑性ひずみ、河川浸食、地形発達過程

### 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<sup>1)</sup>。

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、慎重な対応が求められており、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捉え、不安定な範囲や安定性を適切に評価することが必要とされている。

そこで本研究では、健全岩部に比べ局所的に力学的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、方針検討として、事例に基づくゆるみ岩盤のパターン分類<sup>2)</sup>を行うとともに、ゆるみ岩盤を連続体として捉え、通常で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<sup>3)</sup>を行った。平成24年度は、**図-1**に示すような「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<sup>4), 5)</sup>した。平成25年度は、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、現在考案中である「FEM ステップ解析法」(**図-2**参照)、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を設定する手法<sup>6), 7)</sup>、について検討を行った。

本年度は、以下の3つの課題について検討を行った。

- ① 物性値低減設定法 (閾値と物性値の対応)<sup>7)</sup>
- ② 河川浸食による地形発達過程の再現
- ③ 本検討手法適用の流れの概説

## 2. 物性値低減設定法に関する検討

### 2.1 FEM ステップ解析法とは (過年度成果再掲)

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解析的に収束するまで繰り返すものである (**図-2**参照)。

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

上記を踏まえて、昨年度までの予備検討では、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。但し、強度物性は低減させるのみで、ひずみ量に関わらず回復・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
0.01%以上、0.1%未満	: C <sub>0</sub> 級へ強度低減
0.1%以上	: C <sub>1</sub> 級へ強度低減

物性値低減の区分数と、その時の閾値となる相当塑性ひずみ量は、パラメトリックスタディにより決定したものであり、そこに至る検証結果は次節で紹介する。

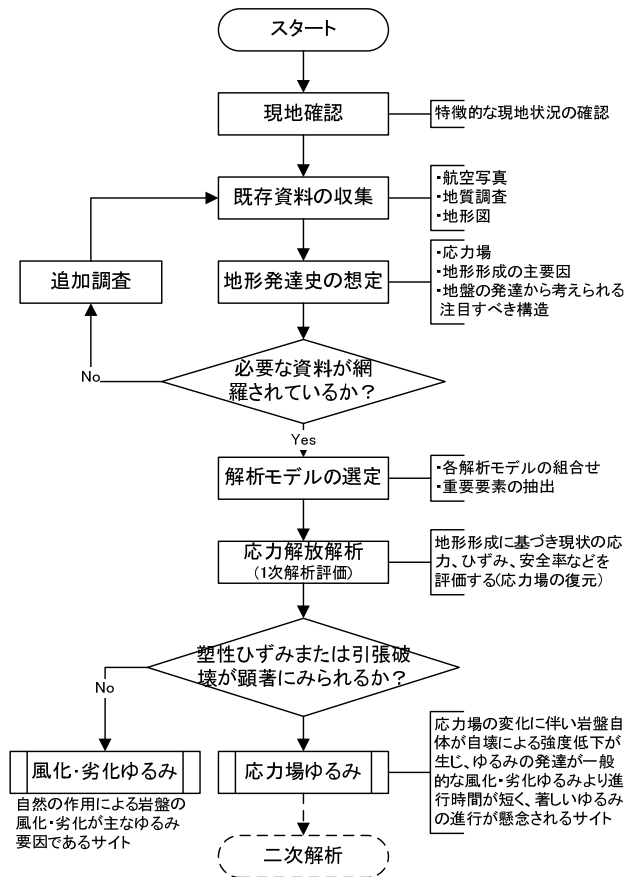


図-1 ゆるみ影響解析フロー (過年度成果)

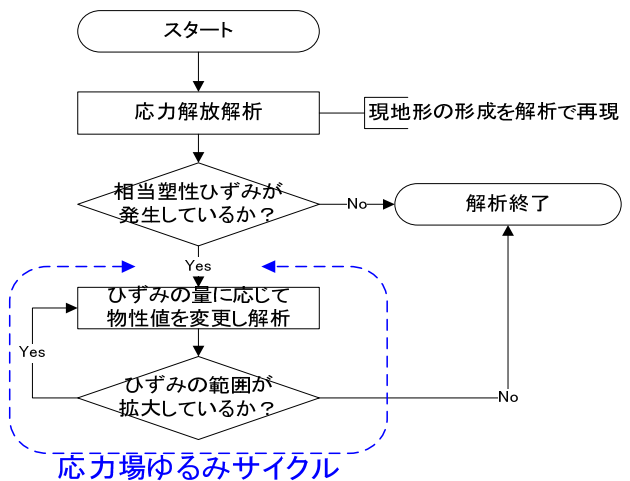
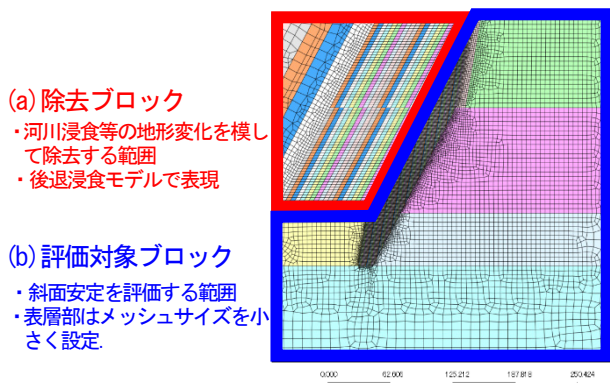


図-2 応力場ひずみ解析フロー (過年度成果)

### 2.2 物性値低減閾値に関する検証

既報<sup>9)</sup>において「FEMステップ解析法」を実施した際は、**図-3**に示す解析モデルにおいて、強度低減設定と物性値 (**表-1**) の条件 (Case1) を基準値とした。その時の収束サイクルを**表-2**に示す。本稿では、**表-3**に示す物性値を追加で用いて、基準値と比較検証を行った。その結果の一部を**表-4**に、解析収束段階の各解析結果図とサイクル数を**図-4**に示す。



メッシュの色分けは便宜的であり、初期物性値は同一。

図-3 解析モデルメッシュ図

表-1 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 $\nu_s$	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 <sub>H</sub> 級岩盤	0.30	1,000,000	20	1,000	45.0	200	0.5
C <sub>M</sub> 級岩盤	0.30	500,000	20	500	40.0	100	0.5
C <sub>L</sub> 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 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 <sub>L</sub> 級 メッシュ数	【参考】 増加C <sub>M</sub> 級 メッシュ数	累積増加C <sub>L</sub> 級 メッシュ数	C <sub>L</sub> 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-3 岩盤等級別岩盤物性値 (中強度, C<sub>M</sub>級細分)

名称	静的変形特性						
	物性値						
	ポアソン比 $\nu_s$	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 <sub>H</sub> 級岩盤	0.30	1,000,000	20	1,000	45.0	200	0.5
C <sub>M</sub> 級岩盤	0.30	750,000	20	750	42.5	150	0.5
C <sub>L</sub> 級岩盤	0.30	350,000	20	400	37.5	80	0.5
C <sub>L</sub> 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-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)	相当性ひずみ量					塑性ひずみ量
		0.01%	0.05%	0.1%	0.2%	0.3%	
Case1 (基準)	16	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	
Case2 下限値 区分数	19	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	
Case3 下限値	14	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	
Case4 下限値 区分数	9	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	
Case5 上限値 区分数	17	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	
Case6 上限値	19	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	
Case7 区分数	14	C <sub>L</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>M</sub> 級	C <sub>L</sub> 級	

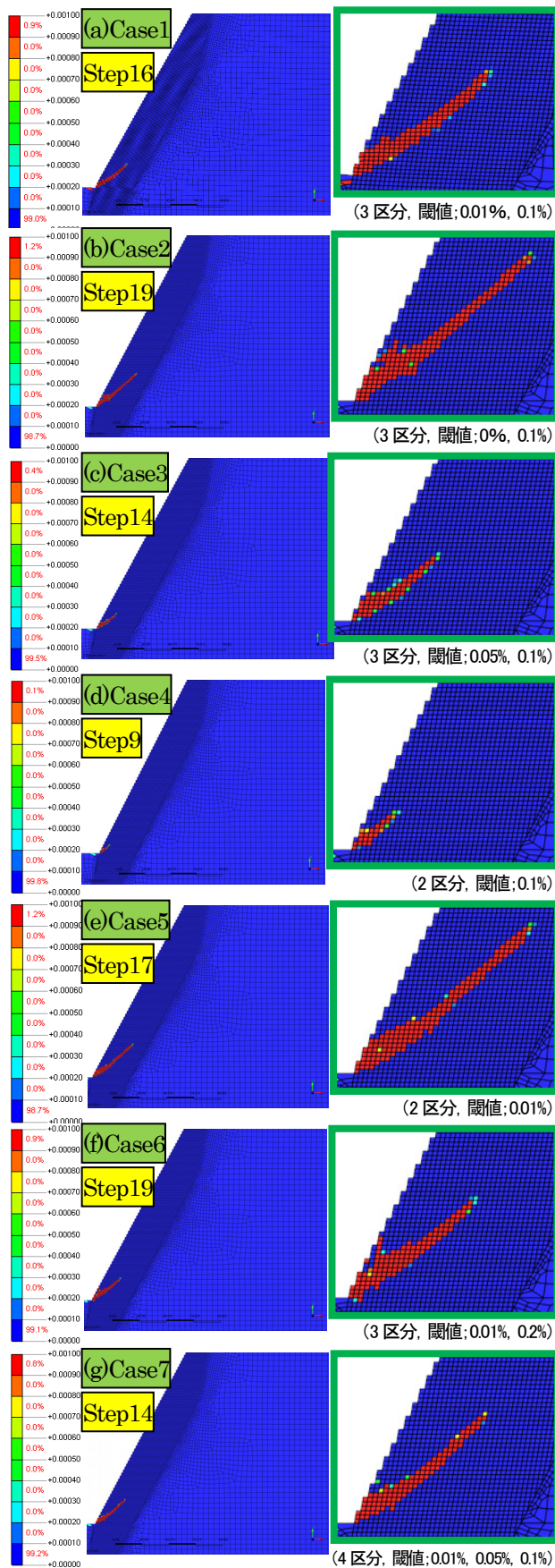


図-4 相当塑性ひずみ収束段階図 (中強度岩盤 閾値設定 ; (a) Case1, (b) Case2, (c) Case3, (d) Case4, (e) Case5, (f) Case6, (g) Case7)

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内で、数値解析の作業量（解析数と必要データ処理量）が最も軽減されている強度低減閾値の設定条件を、以下の比較検証に基づき決定した。

#### a) 下限側閾値検討

塑性ひずみ量0.1%を $C_{10}$ 級から $C_1$ 級に強度を低減する閾値として固定しつつ、 $C_{10}$ 級から $C_{10}$ 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 ( $C_{10}$ 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

$C_1$ 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 $C_{10}$ 級を更に2つに細分 ( $C_{10}$ 級、 $C_{10}$ 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-3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、4区分の方が強度低下領域の上位側(領域拡大方向)の厚みがスリムになり、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。

### 3. 河川浸食による地形発達過程の再現検討

#### 3.1 河川浸食過程

本研究では、主に山間部の河川沿いの急崖斜面において、河川浸食が引き起こす応力解放(除荷)によって発生する岩盤斜面のゆるみを対象としている。数値解析にあたっては、河川浸食による地形変化からくる除荷を、解析メッシュの除去という形で表現し、その結果として発生する塑性ひずみを駆動力として、応力劣化サイクルを繰り返している所である。図-4にも見られるように、除荷による塑性ひずみは法尻部に集中し、そこから斜面深部上方にゆるみが拡大する解析結果となっている。

実際の河川斜面においては、浸食による地形変化、応力解放、ゆるみや風化といった3つの要素が、入り交じりながら異なる速度で進行していると考えられる。そのため、時々河床法尻部からのゆるみの進行と下刻による下方浸食の合わせり具合によっては、ゆるみ範囲は法尻部だけではなく、表層から一定深度までの斜面全体に分布することも考えられる。その場合は、解析結果と実際の斜面安定度はかなり乖離してしまうことになる。

そのため、各岩級別に浸食による斜面安定勾配が何度になるのかを踏まえた上で、検討中の手法によって河川浸食による地形発達過程を再現するとともに、斜面形状とゆるみ発達部の位置関係の把握を行うこととした。

河川浸食は、図-5に示すとおり、河床を徐々に浸食しながら川底の標高を下げて行く、ただし河床部の岩盤強度は地中深部に向かうほど一般的に硬くなり、浸食による標高変化は小さくなる。その反面、河床部分の浸食に使われていたエネルギーが横方向に作用するようになり、浸食斜面の下部にオーバーハング形状を生じさせる。オーバーハング地形は、突出部の自重作用により、背後岩盤上部に引張応力が生じ、オーバーハング基部には大きな圧縮応力が作用する。このような進行過程を数値解析で表現するために、図-6に示すように、表層( $D$ 級)、中層( $C_1$ 級)、下層( $C_{10}$ 級)、最下層( $C_{10}$ 級)と、強度の異なる4層からなる地盤としてモデル化した。

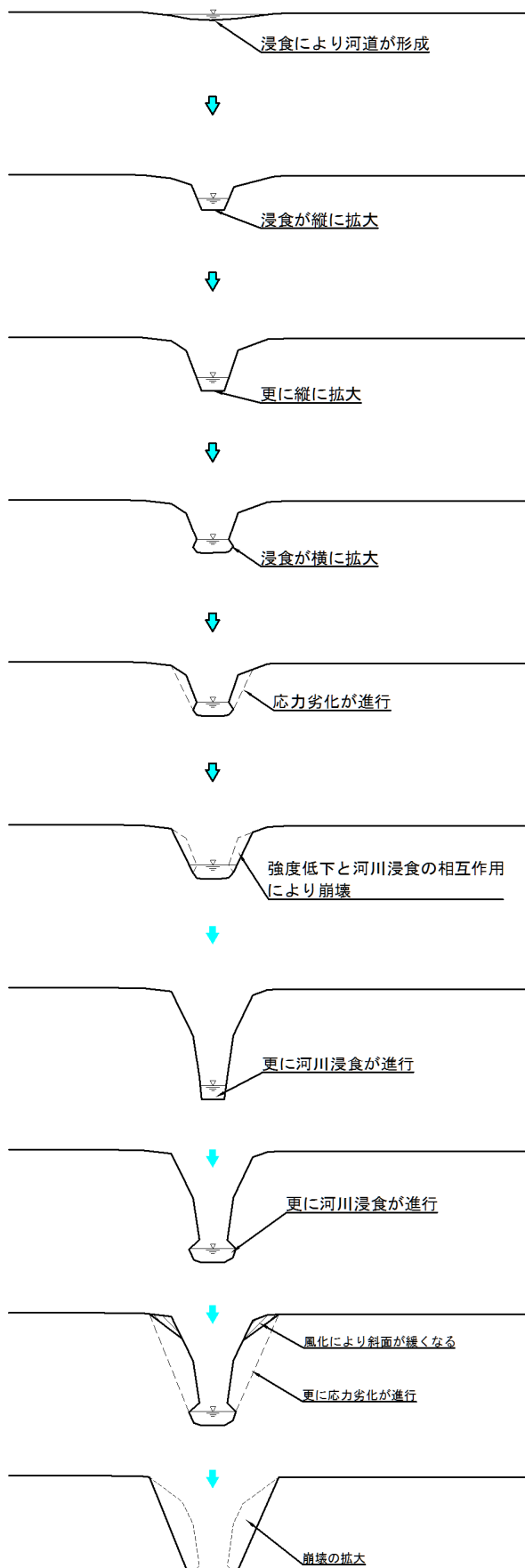


図-5 河川浸食模式図

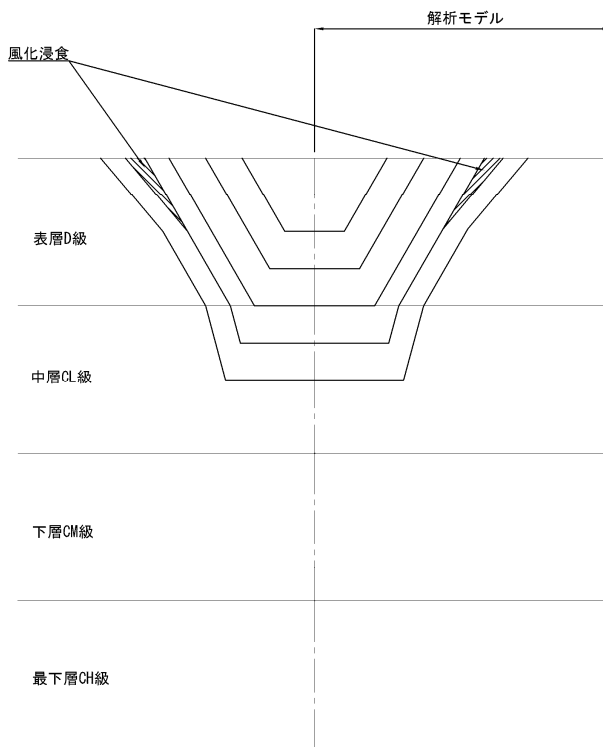


図-6 解析基本モデルイメージ

### 3.2 解析モデル検討

#### 3.2.1 解析条件

河川が形成される地盤として表層部にD級層を考慮した。複合条件による応力劣化と浸食作用を組み合わせることで河川による洗掘作用を表現する。通常の塑性ひずみによる破壊の判定では、微小破壊をモデル化し、C<sub>1</sub>級までの物性変化としていたのに対し、河川浸食や雨水浸食のモデル化にあたっては、応力開放などによる地盤の変化を破壊だけではなく、河川流水だけでなく雨水などの表流水でも浸食が進行する岩盤に対応させるため、物性値をD級まで低減することとした。また、斜面表層でD級に低減された部分については、風化・浸食作用により、取り除かれていく現象の再現を試みた。

物性値は、これまで検討に用いてきた中強度岩盤用の基本値(表-1)を採用して検討を行った。2.1節に示したとおり、破壊とみなせるひずみ範囲は1.0%以上であると考えられる。河川浸食表現モデルにおいては、通常のゆるみ岩盤評価とは異なり、塑性ひずみ量1.0%以上のメッシュをD級と設定することにした。

相当塑性ひずみ量(河川浸食表現モデル)

- 0.01未満 : 物性変更なし
- 0.01%以上、0.1%未満 : C<sub>4</sub>級へ強度低減
- 0.1%以上、1%未満 : C<sub>1</sub>級へ強度低減
- 1%以上 : D級へ強度低減

塑性ひずみ量以外の物性低減基準として、数値解析で一般的に用いられる破壊評価法である局所安全率を併用し、局所安全率が $F_s=1.0$ を下回るメッシュをD級へ物性低減することとした。

数値解析では、線対称の場合、片側だけをモデル化する場合がある。今回の解析ステージの方法としては、河川浸食を表現するために、河床幅を40mとしてその半分にあたる20mのモデル化として、メッシュモデル左側20m幅のブロックを1m毎に除去することで、浸食の進行を表現することとした。また、幅20m×下方1mの下方浸食の他に、河川流水や表流水による側方浸食による地形変化を表現するために、表層に面したD級メッシュを取り除くこととした。解析の手順は以下に示すとおりである。

- ① D級岩盤のみのモデルにおいて、D級岩盤の安定勾配を算出
- ② 求められた安定勾配に基づいたD級岩盤斜面の下位に $C_L$ 級岩盤を配置したモデルにおいて、 $C_L$ 級岩盤の安定勾配を算出
- ③ 求められた安定勾配に基づいたD級及び $C_L$ 級岩盤斜面の下位に $C_M$ 級岩盤を配置したモデルにおいて、 $C_M$ 級岩盤の安定勾配を算出

これらの結果を基に、河川浸食が $C_M$ 級岩盤へといたるまでの全体の地形変化を把握するとともに、斜面形状におけるゆるみ分布箇所の把握を行うものである。

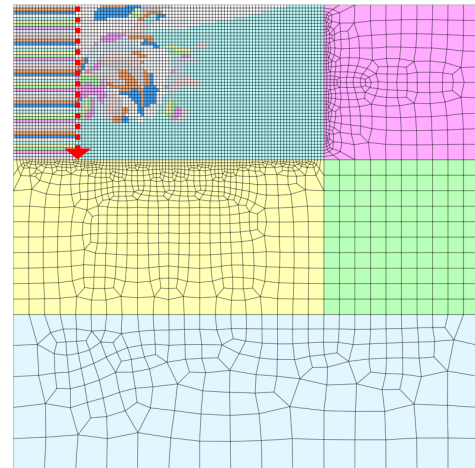
### 3. 2. 2 表層D級岩盤層浸食検討

最初の段階は、表層部の強度を最も軟弱なD級として検討を行い、D級岩盤における安定勾配の算出を試みた。解析メッシュモデルは、**図-7**に示すとおりである。表層部をD級の強度とし、最上部左側の20mについて、河川による下方浸食を模して、解析1ステップ毎に1mずつ除去していくこととした。その時のメッシュを除去する境界を**図-7**中に赤点線で示す。解析の手順を以下に示す。

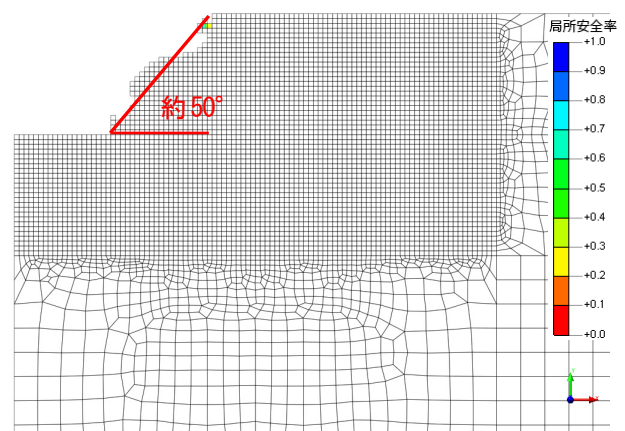
- D-1 河床浸食を模して、幅[20m]×深さ[1m]のメッシュを除去。
- D-2 自重解析 ⇒ 分布結果把握。
- D-3 局所安全率に基づき、D級に物性値を変更。
- D-4 斜面表層部に新たに生じたD級メッシュを除去。

このようなD-1からD-4のサイクルを、新たに斜面基部の法尻部に局所安全率の低下エリアが生じるまで繰り返し、浸食とメッシュ除去によって生じた法尻部と法肩部をつなぐ平均斜面勾配を計測する。

**図-8**に示すように、結果として、D級岩盤は、浸食25mで約 $50^\circ$ の勾配の崩壊斜面が形成される結果となった。



メッシュの色分けは便宜的であり、初期物性値は同一。  
**図-7** D級岩盤解析メッシュモデル図（浸食境界を图示）



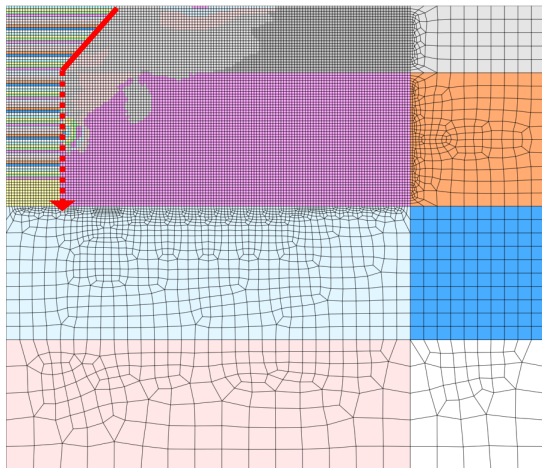
**図-8** D級岩盤における安定勾配状態での局所安全率図

### 3. 2. 3 中層 $C_L$ 級岩盤層浸食検討

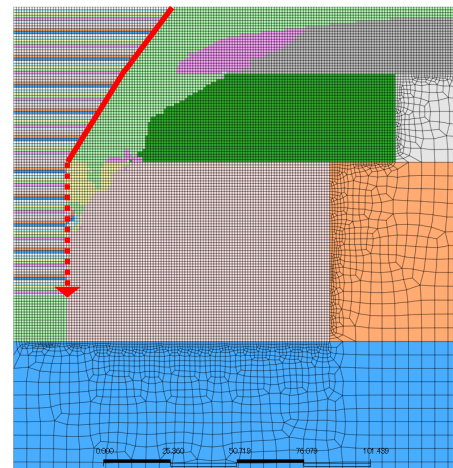
次の段階では、解析メッシュモデルとして、下部に河床幅の半分として20mの浸食境界（**図-9**中の赤点線）を反映した $C_L$ 級岩盤を配置し、その上部に $D_L$ 級岩盤を配置し、20m位置を起点として斜面勾配 $50^\circ$ で層厚25mの浸食境界（**図-9**中の赤実線）となるようなメッシュ区分を設定する。解析の手順を以下に示す。

- $C_L$ -1 表層D級層においては、幅[20m+勾配 $50^\circ$ となる分]×深さ[1m]のメッシュを除去。また、下位の中間 $C_L$ 層においては、幅[20m]×深さ[1m]のメッシュを除去。
- $C_L$ -2 自重解析 ⇒ 分布結果把握。
- $C_L$ -3 塑性ひずみ及び局所安全率に基づく物性値変更。
- $C_L$ -4 斜面表層部に新たに生じたD級メッシュを除去。

**図-10**に示すように、結果として、 $C_L$ 級岩盤は、浸食33m(全体58m)で約 $59^\circ$ の勾配の崩壊斜面が形成される結果となった。



メッシュの色分けは便宜的であり、初期物性値は同一。  
 図-9 C<sub>1</sub>級岩盤解析メッシュモデル図 (浸食境界を图示)



メッシュの色分けは便宜的であり、初期物性値は同一。  
 図-11 C<sub>4</sub>級岩盤解析メッシュモデル図 (浸食境界を图示)

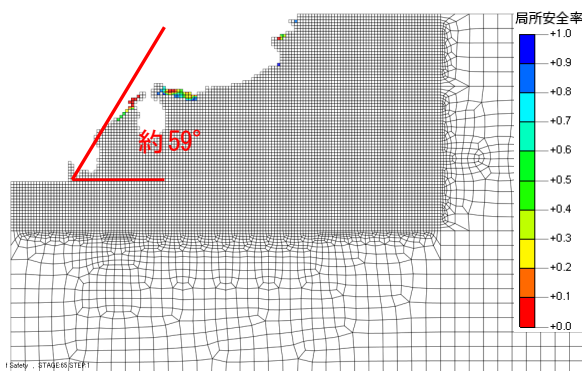


図-10 C<sub>1</sub>級岩盤における安定勾配状態での局所安全率図

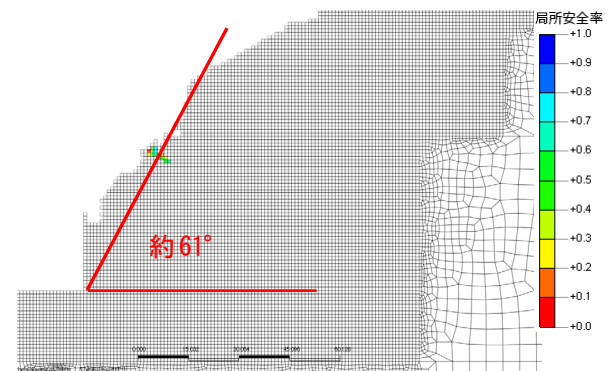


図-12 C<sub>4</sub>級岩盤における安定勾配状態での局所安全率図

### 3. 2. 4 下層 C<sub>4</sub>級岩盤層浸食検討

さらに次の段階では、解析メッシュモデルとして、下部に河床幅の半分として 20m の浸食境界 (図-11 中の赤点線) を反映した C<sub>4</sub> 級岩盤を配置し、その上部に C<sub>1</sub> 級岩盤を配置し、20m 位置を起点として斜面勾配 59° で層厚 33m の浸食境界 (図-11 中の赤実線下部) となるようにし、さらにその上部には、D 級岩盤を配置し、下位浸食境界に接続するように斜面勾配 50° で層厚 25m の浸食境界 (図-11 中の赤実線上部) となるようなメッシュ区分を設定する。解析の手順を以下に示す。

C<sub>M</sub>-1 表層 D 級層 (層厚 25m) においては、幅 [20m + 勾配 50° となる分] × 深さ [1m] のメッシュを除去し、その下位の中間 C<sub>1</sub> 層 (層厚 33m) においては、幅 [20m + 勾配 59° となる分] × 深さ [1m] のメッシュを除去。また、さらにその下位の下層 C<sub>4</sub> 層においては、幅 [20m] × 深さ [1m] のメッシュを除去。

C<sub>M</sub>-2 自重解析 ⇒ 分布結果把握 ⇒ 除荷。

C<sub>M</sub>-3 塑性ひずみ及び局所安全率に基づく物性値変更。

C<sub>M</sub>-4 斜面表層部に新たに生じた D 級メッシュを除去。

図-12 に示すように、結果として、C<sub>4</sub> 級岩盤は、浸食 47m (全体 105m) で約 61° の勾配の崩壊斜面が形成される結果となった。

### 3. 2. 5 最下層 C<sub>4</sub>級岩盤層浸食検討

C<sub>4</sub> 級岩盤についても、これまでと同様にモデル化を行い、浸食過程の再現を試みたが、浸食深が 100m 近くとも斜面基部の法尻部に新たに局所安全率の低下が発生せず、解析メッシュ数の制限により浸食サイクルを打ち止めとしたため、C<sub>4</sub> 級岩盤における安定勾配を把握することはできなかった。

### 3. 3 河川浸食による地形発達過程再現に関する考察

河川浸食や応力解放によるクリープ変形などは、非常に長期な時間スパンでの出来事であり、斜面表層の劣化部分については風化や浸食を受けることで除去されるという現象が再現確認された。そのことから、最下層の河床法尻部に発現する塑性ひずみ集中域から斜面内部にゆるみが拡大進展していくという図-4 にみられるような結果に大きな矛盾はないと推察される。

## 4. 本検討手法適用の流れ

### 4. 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を開発することを目的に、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、ゆるみ岩盤斜面の数値解析評価法を検討してきたところである。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。

実際のゆるみ岩盤斜面の解析・評価の流れを図-13のフロー図に示す。まず、4.2節において開発中のゆるみ岩盤評価法を構成する各要素技術について簡単に説明を行い、4.3節において、評価全体の流れと本提案手法の特徴をとりまとめる。

## 4. 2 ゆるみ岩盤評価法を構成する各基礎技術

### 4. 2. 1 ゆるみ進行の基幹となる劣化サイクル技術

H24年度報告において、岩盤のゆるみの発達原因について詳細を述べているが、ゆるみ進行を数値解析で表現するにあたり、以下に示す(1)から(3)の3つの劣化サイクルが基幹となっている。それぞれについて概説する。

#### (1) 重力作用に起因する応力劣化サイクル

河川浸食や人工掘削による応力開放に起因する力学的影響の時間変化を把握するために、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、重力作用に起因した劣化進行を再現・評価していく手法である。

#### (2) 地震・地殻変動に起因する応力劣化サイクル

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。

#### (3) 風化・劣化に起因する劣化サイクル

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。

### 4. 2. 2 解析要素モデルの選択 (図-14 参照)

FEM解析を行うにあたって、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。以下の(4)から(8)に示す5つの要素解析モデルについて解析時の留意事項等を概説する。

#### (4) クリープモデル(縦ジョイントモデル)

柱状節理や高角度の不連続面が発達し、トッピング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。

#### (5) 不連続面モデル(横ジョイントモデル)

大きな断層部の影響を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。

#### (6) 疑似不連続面モデル(等価連続体モデル)

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。

#### (7) 異方性連続体モデル

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。

#### (8) 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有効な解析モデルである。

### 4. 2. 3 地質性状に応じた解析モデル構築の要素技術

数値解析によりゆるみを評価する上で基本となる、以下の(9)から(13)に示す5つの要素技術を概説する。

#### (9) 三次元地形地質検討

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は、初期地圧として三次元モデルに組み込んだ上で、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。

#### (10) 地形発達過程復元解析(河川浸食モデル)

河川浸食によるV字谷の形成過程を数値解析で表現する解析モデルと評価手法で、河川浸食をトレース再現することで、収束安定勾配と実斜面勾配との差異から、設定強度物性値の妥当性検証としても利用可能である。



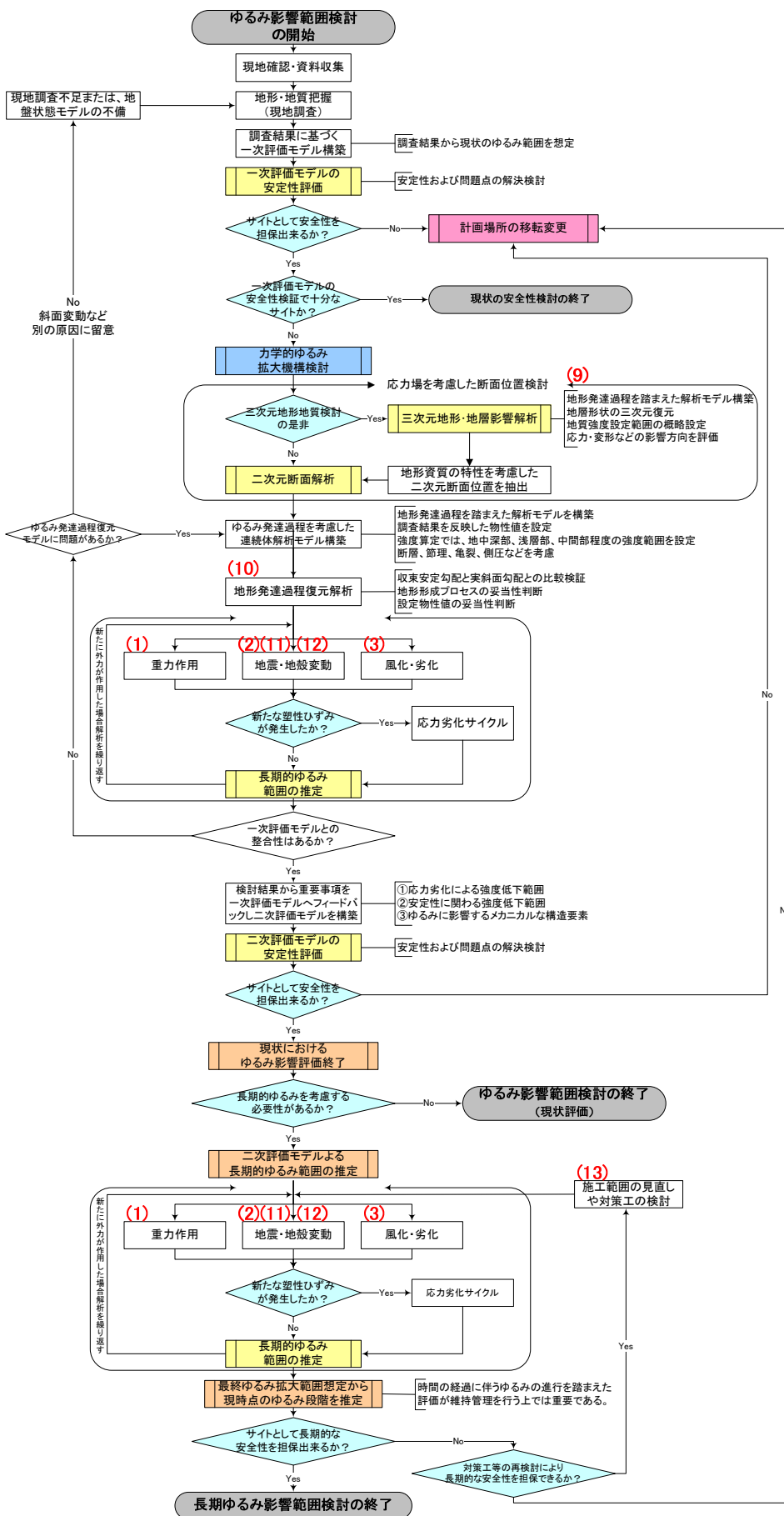


図-13 ゆるみ岩盤に対する解析・評価の流れ (図中の赤字(1)～(13)は本文に対応)

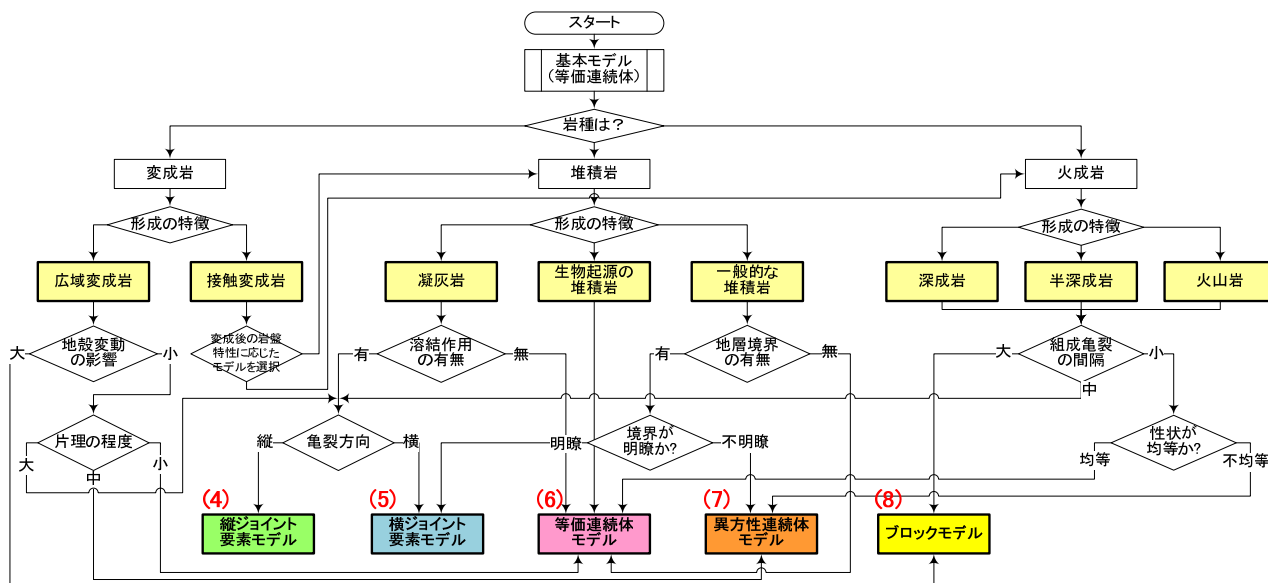


図-14 地質性状に応じた解析要素モデル選択フロー（過年度成果に加筆修正）（図中の赤字(4)～(8)は本文に対応）

(11) 地震動影響

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。

(12) 側圧影響

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。

(13) 対策工の力学的評価手法

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。

4.3 ゆるみ岩盤に対する評価全体の流れ

4.2節で概説した、基幹劣化サイクル、解析要素モデル、解析モデル構築要素技術についてそれぞれの見出し番号を、図-13の評価全体のフロー、図-14の解析要素モデル選択フローに赤字で図示した。

ゆるみ岩盤の評価全体について大きな特徴として、3つの評価段階（図-13中の灰色のエンドストップオブジェクト）が挙げられる。まず、最初の段階は、通常の斜面評価である「現状の安全評価検討」である。

次の段階が、岩盤のゆるみといった時間進行性に大きく左右される岩盤のゆるみ現象の評価が必要となった場合に実施される「ゆるみ影響範囲検討」である。この評

価段階での特徴は、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モデル化にあるといえる。解析モデル化と劣化サイクルの進展を繰り返す、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大きな差異が無いかということを確認する。もし、不備がある場合には、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ていない事象の例としては、地山内部の大規模断層・破碎帯の存在であるとか、不規則な地質構造であるとか、滑動地すべりとまでは顕在化していない岩すべりや初生地すべり構造の存在が考えられる。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手法の活用が期待される。

最後は、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、斜面对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。

また、本手法のもう一つの特徴が、地形発達過程を考慮した解析モデル化にある。そのさわりは、3章に記述したとおりであるが、現状として技術的に完成途上であるこの考え方を改善・発展させていくことができれば、より正確な斜面の現状安定度評価と、より確からしい将来の安定度予測が可能になると期待するところである。

## 5. まとめ及び今後の課題

本年度は3つの課題に取り組んだ。まず、一つ目の課題である物性値低減の設定方法については、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（塑性ひずみ量の閾値と区分数及び岩級別岩盤強度）を基準値として決定した。二つ目の課題である、河川浸食による地形発達過程の再現解析においては、上位から順にD級からC<sub>M</sub>級へといたる岩盤斜面において、岩盤強度に対応した安定勾配を明らかにするとともに、地形変化からくる除荷によって引き起こされる塑性ひずみを劣化サイクルの最初の駆動力とし、法尻部から斜面内部上方に拡大するゆるみ領域を評価するという、本提案手法の考え方の妥当性を確認した。最後に、三つ目の課題として、開発中のゆるみ岩盤評価手法について、各構成技術を概説するとともに、評価全体の流れをフロー図の形でとりまとめ、実際の適用方法および特徴について解説した。

本研究の最終年度となる次年度においては、評価全体フローに基づき実存するゆるみ岩盤斜面に本開発手法を適用し、解説的な資料としてとりまとめるとともに、これまでの一連の研究成果をゆるみ岩盤評価マニュアルとしてとりまとめる予定である。

## 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) 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ウム講演集、pp. 74-79、2014.
- 6) 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.
- 7) 日外勝仁・江口貴弘・佐々木靖人：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ウム講演集、pp. 248-253、2015.

# 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

EGUCHI Takahiro

**Abstract** : 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. In this study, the purpose is the development of techniques for geotechnical and quantitatively evaluate the unstable range and stability of loose rock. FEM step analysis has been developed in order 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). In the process, this year has been considered three issues below.

This study is based on the idea that one of the causes of the strength property value reduction due to loosening is discriminatory accelerated deterioration of strain concentration points. The first issue is how to set the property value reduction. Rock mass strength are stepwise reduced not continuous depending on the amount of plastic strain. In addition, the reduction stage corresponds to the rock class. Considerations are as follows. The number of reduction stages, plastic strain amount of the threshold, rock mass strength at each stage.

In the "FEM step analysis", the first impetus in expressing the degradation cycle by proceed with analysis step is a stress release due to terrain changes in the river erosion, etc.. The second issue is to verify the relationship between the set analysis rock mass strength and the slope shape, by using a reproduction result of the topography developmental process by river erosion using the proposed method.

The third issue is to clarify an image for applying the rock evaluation method in development including "FEM Step Analysis" to the actual evaluation of loosened rock slopes. Essential in numerical analysis, analysis mesh modeling method according to the terrain geological structure is organized, the entire flow of the evaluation of loosened rock mass has been shown in the form of a flow diagram.

**Key words** : rock slope, loosened rock mass, slope stability assessment, finite element method, FEM step analysis, plastic strain, river erosion, topography development process