

降雨時における鉱山残壁の安定性に関する研究

Study on the Stability of Retaining Wall during Rainfall

吉田秀典*・野崎郁郎**

Hidenori YOSHIDA and Ikuro NOZAKI

*正会員 博士(工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科(〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**修士(工学) 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター 研究員(〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1 丁目 3)

It is quite important to mine ores with forming a stable retaining wall from the viewpoints of the safety for miners and the scenic preservation of the mine. However, there have been always a lot of the collapse of retaining wall. There is few research to consider the mechanism of the collapse of retaining wall during rainfall though the investigations or observations of the collapse of retaining wall are well studied. Thus, in this study, the finite element analysis for the collapse of retaining wall is carried on and its stability is considered from hydraulic and mechanical points of view. The results reveal that the intensity and elapsed-time of rainfall as well as the properties of rock mass such as a permeability coefficient are quite important.

Key Words : mine, retaining wall, collapse, rock mass, rainfall

キーワード：鉱山，残壁，崩壊，岩盤，降雨

1. はじめに

かつて 1000 を超えていたとされる日本国内の露天掘り鉱山の多くが廃山，休山となっており，現在稼行中の鉱山は，最盛期に比べ約半数となっている¹⁾．四国管区内では，現在，20 の露天掘り鉱山が稼行中である．露天掘り鉱山においては，安定的な残壁を形成しつつ採掘を進めることが鉱山労働者に対する危害の防止や景観保護等の観点から重要な課題となっている．しかしながら，現在に至るまで多くの残壁崩壊事例が全国的に報告されており，四国管内においても，平成 16 年 4 件，平成 17 年 1 件，平成 18 年 2 件の残壁崩壊事故が発生している

事故発生の背景としては，稼行中鉱山の中には作業員が数名といった小規模の鉱山も多く存在しており，斜面の安全性に関して予算や時間を割くことが難しいことに加え，残壁崩落に対する対策を施すことが可能な技術者が不足しているということがある．しかしながら，一度残壁が崩落すると，鉱山内の現場作業員が死傷する危険がある他，周辺地域へ土砂が流出することで，周辺地域の生活基盤が損壊に至るという可能性もあり，不安定状態のままの放置される残壁は非常に大きな問題となってきている．

残壁問題の調査・研究は歴史が古く，そうした調査の結果や成果などが石灰石・けい石鉱山残壁データ²⁾や残壁ハンドブック³⁾にまとめられている．特に残壁ハンドブック³⁾では，調査結果のみならず，露天掘り鉱山の現場技術者や大学の学生を対象として，露天掘り鉱山の開発から終掘に至る過程で必要な，調査試験

法，安定解析，現場計測法，設計・造成・管理，緑化と景観について実例を示しながら説明を加えている．しかしながら，両文献とも，調査を主体とした内容であり，実際の残壁崩壊のメカニズムなどを掘り下げたものではない．

こうした調査事例のほか，GPS などを用いた残壁の長期変位観測^{4),5),6)}や，残壁の安定性を議論する目的よりカバーロックに着目した研究事例⁷⁾も行われているが，これらもまた，実際の残壁崩壊のメカニズムなどに関する研究事例ではない．

上述の通り，残壁に関しては，その崩壊事例のメカニズムを解明するような試みはそれほど多くはないが，一方，土砂斜面の崩壊に関しては，様々な研究が行われている．例えば，1998 年に南関東・北関東を襲った集中豪雨より福島県西郷村で発生した斜面崩壊を題材とし，鈴木ら⁸⁾が，土壌中の透水係数，不透水層の勾配を考慮した斜面浸透流モデルを適用し，浸透流解析を行っている．また，同じ事例について，佐々ら⁹⁾がすべりの運動機構について検討を加えている．他にも，1999 年の広島県に斜面崩壊をもたらした降雨を題材に佐々木ら¹⁰⁾が降雨特性と警戒のための雨量指標を示すなど，実際に発生した事例を題材にした研究が行われている．残壁においても，降雨が契機となって崩壊する事例が多いことから，こうした研究事例は大いに参考となるが，岩盤とは浸透特性が大きく異なる土砂などの斜面崩壊の研究事例であり，固い岩盤斜面である残壁については，別途，検討を行う必要があるものと思われる．

そこで本研究では，崩落した残壁に対する数値解析

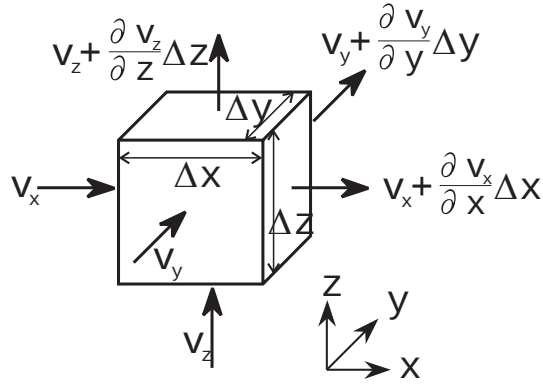


図-1 control volume を通過する流体

(有限要素解析)を行い、水理学的および力学的側面より、その安定性について検討を行うこととした。

2. 浸透モデル

2.1 質量保存則

地盤内を流れる地下水の質量保存則について、赤井ら¹¹⁾は、以下に記すような考え方を導入している。

流体は、control volume と称される直方体領域を通過するものと仮定すると、その流れは、図-1 に示すようになる。これより、微小時間 Δt の間に x_i 軸 ($x_1 = x$ 軸, $x_2 = y$ 軸, $x_3 = z$ 軸) と垂直な面における流出する水の質量は、

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad (1)$$

となる。ここで、 ρ は流体の密度、 v_i は流速ベクトルを表す。また、直方体 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 内の質量の増加は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_w)}{\partial t} \Delta t &= \frac{\partial(\rho \frac{V_w}{V})}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \\ &= \frac{\partial(\rho \frac{V_w}{V_v} \frac{V_v}{V})}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \\ &= \frac{\partial(\rho S_w n)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ は直方体の体積、 V_w および V_v は直方体内の含水体積および間隙体積、 $S_w = \frac{V_w}{V_v}$ は飽和度、 $n = \frac{V_v}{V}$ は有効間隙比である。このような流出する質量と V 内の増加質量に加え、control volume より Δt の間に排水される(あるいは注入される)水の質量 $\rho q \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$ があるとする(q は単位時間かつ単位体積あたりの排水で、 $q > 0$ で排水となることに注意)、これらの和は 0 であることから、次式が導かれる。

$$\frac{\partial(\rho S_w n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \rho q = 0 \quad (3)$$

2.2 ダルシー則

地下水の流れは流体の流れには違いないが、流れの場のほとんどは固体の微細空間で充満された空間が、あるいは複雑に繋がった連続した細い管(多孔質)で構成されている。したがって、個々の空隙内の流れは流体運動の基礎方程式(Navier-Stokes 方程式)にしたがうとしても、空隙は狭く複雑かつ不規則で、こうしたミクロな流体の運動から広い場での地下水の流れを取り扱うことは適切ではない。ミクロレベルで定義するのではなく、流体に対して十分大きなスケール、つまりマクロレベルでの定義で地下水の流れを取り扱えば十分である。こうした観点から地下水運動を論じる際の基礎法則が、浸透層中の流れの流速と動水勾配に関するダルシーの法則である。この法則では、浸透層中の流量 Q は管の断面積 A と動水勾配 $\Delta h/l$ に比例し、

$$Q = kA \frac{\Delta h}{l} \quad (4)$$

と表現される。あるいは流量 Q を浸透層の断面積 A で除して、

$$v = -k \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (5)$$

と表される。ここに、 h は基準面からのピエゾ水頭で次式で表される。

$$h = z + \frac{p}{\rho g} = z + \psi \quad (6)$$

ここで、 z は位置水頭、 $p/\rho g = \psi$ は圧力水頭、 x は流れの方向の座標を示し、比例係数 k は透水係数である。

この法則を 3 次元に拡張すると、

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表される。

2.3 支配方程式

式(7)を式(3)に代入すると次式を得る¹¹⁾¹²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \quad (8)$$

ここで、式(8)を次式のように書き換える。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \rho q = \frac{\partial}{\partial h} (\rho S_w n) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

左辺の第一項は、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

となる。ここで、密度 ρ が一定であると仮定すると、次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

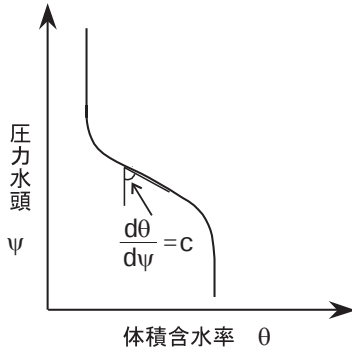


図-2 圧力水頭と体積含水率の関係の一例

また、式 (9) における右辺

$$\frac{\partial}{\partial h} (\rho S_w n) = \rho S_w \frac{\partial n}{\partial h} + S_w n \frac{\partial \rho}{\partial h} + \rho n \frac{\partial S_w}{\partial h} \quad (12)$$

については、 ρ が一定であることから、以下のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial h} (\rho S_w n) = \rho \left(\beta S_s + \frac{\partial \theta}{\partial h} \right) \quad (13)$$

ここで、 S_s は比貯留係数、 θ は体積含水率、 β は不飽和領域で 0、飽和領域で 1 と定義される。なお、式の詳細な誘導は文献^{11),12)}を参照されたい。 S_s については、次節で説明を行う。

以上より、式 (9)、式 (11)、および式 (13) より、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - q = \left(\beta S_s + \frac{\partial \theta}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (14)$$

h, z, ψ の関係は、 $h = z + \psi$ であることから、 $\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial h}{\partial z} = 1 + \frac{\partial \psi}{\partial z}$ が導かれ、また、 z は時刻 t とは独立していることから、 $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \psi}{\partial t}$ が導かれる。これより、式 (14) は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + k_{i3} \right) - q = \left(\beta S_s + \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (15)$$

さらに、不飽和領域に対応すべく、透水係数テンソル k_{ij} を飽和透水係数テンソル k_{ij}^s と相対透水係数 k^r の積 $k_{ij} = k^r k_{ij}^s$ とすると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k^r \left(k_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + k_{i3}^s \right) \right\} - q &= \left(\beta S_s + \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} \\ &= (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (16)$$

が導かれる。ここで、 $c \equiv \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ は比水分容量である（図-2 参照）。

表-1 比貯留係数の代表値

材質	S_s (1/m)
塑性粘土	$2.0 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-3}$
締まった粘土	$2.6 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-3}$
やや硬い粘土	$1.3 \times 10^{-3} \sim 9.2 \times 10^{-4}$
ゆるい砂	$1.0 \times 10^{-3} \sim 4.9 \times 10^{-4}$
密な砂	$2.0 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-4}$
密な砂礫	$1.0 \times 10^{-4} \sim 4.9 \times 10^{-5}$
割れ目のある岩石	$6.8 \times 10^{-6} \sim 3.2 \times 10^{-6}$
固結岩石	3.2×10^{-6} 以下

2.4 浸透特性

一般に、透水係数と呼ばれる指標は飽和透水係数 k_{ij}^s であり、これは、上述のダルシー則より定義される係数である。また、比貯留係数 S_s は、飽和状態にある単位体積あたりの多孔質媒体内において、水頭、例えば圧力水頭に变化が生じた際の流入出流量を表す。この時の水の出自は、圧力（水圧）変化による土粒子あるいは媒体骨格の伸縮にともなう空隙体積の変化と水の圧縮特性に相当するもので、弾性変形を前提としており、

$$S_s = \gamma_w (\alpha + n\beta) \quad (17)$$

と定義される。ここで、 γ_w は水の単位体積重量 (N/m^3)、 α は媒体（地盤）の圧縮率 (m^2/N)、 β は水の圧縮率 ($\text{m}^2/\text{N} = \text{Pa}^{-1}$ 、1 気圧かつ 20 の時、 $4.5 \times 10^{-1} \text{ GPa}^{-1}$)、そして n は間隙率をそれぞれ表す。一般に、地盤（硬質な岩盤を除く）の圧縮率は水のそれよりはるかに大きいので、 $S_s = \gamma_w \alpha$ にて評価することが可能である。しかしながら、地下水の調査では、こうした圧縮率を評価して S_s を算定することはほとんどなく、多孔式揚水試験結果として得られる貯留係数 S ($= S_s b$ 、 b は帯水層厚さ) から S_s を評価することが一般的で、この場合は地盤および水の圧縮特性を区別せずに、両者の合算特性として評価される。比貯留係数の代表値を表-1 に示す¹³⁾。

不飽和浸透特性 ($\theta-\psi$ 、 $\theta-k^r$ および $\theta-c$) は地盤の含水状態によってその値が変化する。ここで、 $\theta-c$ 関係は $\theta-\psi$ 関係から計算できるので、 $\theta-\psi$ および $\theta-k^r$ が必要となる。これらについては、本来、試験/実験によって求められるべきであるが、手法が確立しているとは必ずしも言い難いことから、いくつか推定式が提案されている¹²⁾。詳しくは文献¹²⁾を参照されたい。

飽和問題では、比水分容量 c は 0 と扱われるので、式 (16) の右辺（貯留項）は比貯留係数 S_s のみに影響を受けるが、不飽和問題では、 S_s はキャンセルされることはなく、 c との合算として貯留項を形成する¹²⁾。

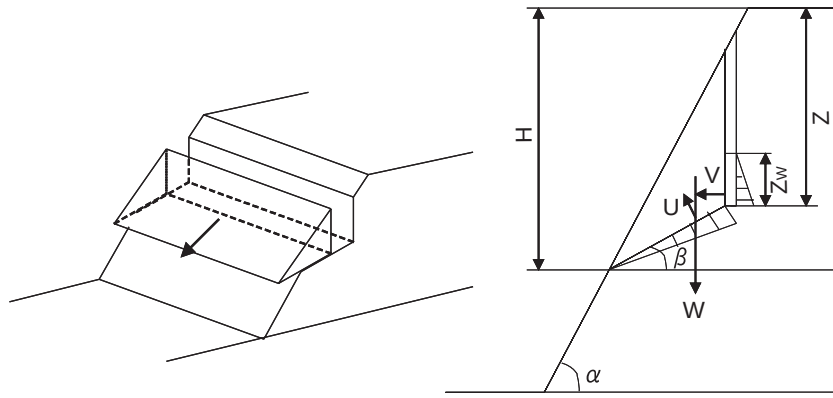


図-3 斜面内に亀裂がある場合

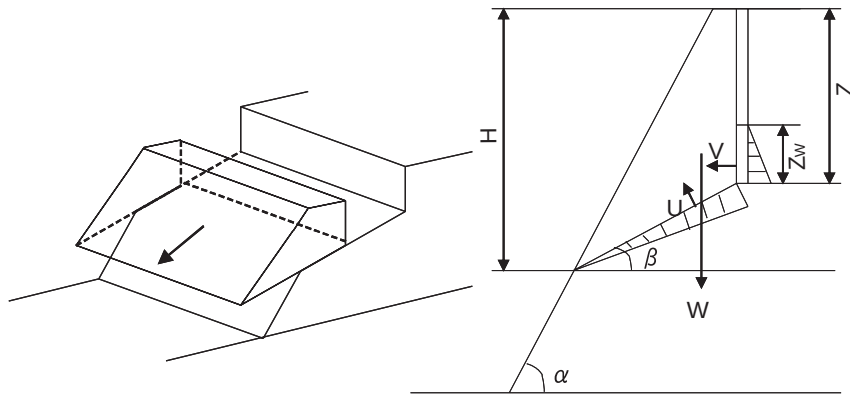


図-4 斜面の上部平面上に亀裂がある場合

3. 限界平衡解析の概要

3.1 平面すべり

本研究では、残壁（岩盤斜面）の安定性を評価するにあたって、限界平衡解析法³⁾を採用する。限界平衡解析法は極限平衡解析法とも呼ばれ、剛体としての力の釣り合い、すなわち、すべり面におけるせん断応力とせん断強度の極限釣り合い状態を考えることによって安定性を検討する手法である。本研究では、図-3、図-4に示すような、

1. 斜面の走向に平行な鉛直引張亀裂が斜面内にある場合、図-3)
2. 上記亀裂が斜面の上部平面上にある場合（図-4）

について考える。ここで、図-3、図-4に示すように、引張亀裂が斜面内あるいは上部平面との交線上に存在するいずれの場合についても、すべり面の下端より引張亀裂の上端までの斜面の高さを H 、引張亀裂の深さを z 、斜面の水平からの仰角を α 、すべり面の水平からの仰角を β とする。

このような斜面の場合、すべりに対する全抵抗力とすべりを生じさせようとする力の比として定義される

安全率 F は、

$$F = \frac{cA + (W \cos \beta - U - V \sin \beta) \tan \phi}{W \sin \beta + V \cos \beta} \quad (18)$$

と表される。ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角を表す。なお、式中の A 、 U 、 V は以下の通りである。

$$A = (H - z) \operatorname{cosec} \beta \quad (19)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H - z) \operatorname{cosec} \beta \quad (20)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 \quad (21)$$

$$(22)$$

ここで、 γ_w は地下水の単位体積重量、 z_w は引張亀裂内の水深である。

W については、引張亀裂が上部平面内にある場合、

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left\{ \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \beta - \cot \alpha \right\} \quad (23)$$

と表され、一方、引張亀裂が斜面内にある場合、

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left\{ \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \beta (\cot \beta \tan \alpha - 1) \right\} \quad (24)$$

となる。ただし、 γ はそれぞれ残壁を構成する岩盤の単位体積重量である。

式 (18) の分母分子に $\frac{2}{\gamma H^2}$ を乗じると,

$$F = \frac{(2c/\gamma H)P + \{Q \cot \beta - R(P + S)\} \tan \phi}{Q + RS \cot \beta} \quad (25)$$

となり、ここで、

$$P = (1 - \frac{z}{H}) \operatorname{cosec} \beta \quad (26)$$

$$R = \frac{\gamma_w z_w}{\gamma H} \quad (27)$$

$$S = \frac{z_w}{H} \sin \beta \quad (28)$$

$$(29)$$

である。Q は、引張亀裂が上部平面内にある場合、

$$Q = \left\{ \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \beta - \cot \alpha \right\} \sin \beta \quad (30)$$

となり、また、引張亀裂が斜面内にある場合、

$$Q = \left\{ \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right\}^2 \cos \beta (\cot \beta \tan \beta - 1) \quad (31)$$

となる。式 (25) 中の P, Q, R, S は全て無次元量で、斜面の形状のみに関係するパラメータである。したがって、粘着力 $c = 0$ の場合、安全率は斜面の寸法に依存しなくなる。

すべり面に沿う水圧分布に関しては様々なケースが考えられるが、式 (18) および式 (25) では、前記のとおり、斜面上でちょうど大気圧となるような、直線的な圧力分布を仮定して導かれている。これに対し、たとえば寒冷地では、斜面の表面が凍結し、すべり面の水が排出できなくなる場合がある。このような場合、すべり面が斜面の上に現れる点で、 $(H - z + z_w)$ の全水頭がかかるというような、危険な水圧分布が生じる可能性もある。しかしながら、一般の斜面設計でこの水圧分布を用いると、過度に安全側の設計となってしまうため、通常は三角形分布を仮定する。

3.2 地下水の影響

実際の岩盤内の地下水流の状態を厳密に定めることは困難である。そこで、以下に示すようないくつかの単純なケースを想定し、それぞれの条件下における斜面の安定性の考察を行うのが一般的である。いくつかの想定ケースより安全率の変動幅を把握し、地下水の状態変化が斜面の安定性に及ぼす影響度合いを推定することが可能となる。

(1) 完全排水状態

これは斜面が乾燥している、いないに関わらず、引張亀裂内あるいはすべり面に水圧がまったく作用しない状態を示す。このことから、式 (18) の U, V は共に 0 となり、安全率は、

$$F = \frac{cA + W \cos \beta \tan \phi}{W \sin \beta} \quad (32)$$

あるいは、式 (25) から、

$$F = \frac{2c}{\gamma H} \frac{P}{Q} + \cot \beta \tan \phi \quad (33)$$

となる。

(2) 引張亀裂中にのみ水がある場合

比較的透水性が低く、長期間乾燥状態にあり、地下水面がすべり面よりも下がっている斜面に豪雨があると、上部平面に効果的な排水路が設けられていない限り、地表面にあふれた水が引張亀裂に流入し、急激に水圧¹⁴⁾が形成される。この場合、少なくとも短期的には、水圧が引張亀裂中にのみ作用し、すべり面における揚圧力がない状態が考えられる。また、すべり面が粘土物質により満たされていて不透水であれば、同じような状態が起こり得る。このような場合の安全率は、

$$F = \frac{cA + (W \cos \beta - V \sin \beta) \tan \phi}{W \sin \beta + V \cos \beta} \quad (34)$$

あるいは、

$$F = \frac{(2c/\gamma H)P + (Q \cot \beta - RS) \tan \phi}{Q + RS \cot \beta} \quad (35)$$

となる。

(3) 水で完全に飽和した斜面

無数の亀裂が発達し、透水性の高い岩盤中には、砂質地盤に近い流線が生じているものと考えられる。このような場合長期にわたる豪雨の際にもっとも危険な状態になる。

地表から激しく水の供給を受けている飽和した斜面に生じる流線網から求められる水圧分布を用いて、数々の斜面の安全率計算がされているが¹⁵⁾、その計算過程は非常に複雑なものになっている。しかし、その結果を総括すると、地表から激しく水の供給を受けている飽和した透水性の高い斜面の安全率は、式 (18) あるいは式 (25) において、引張亀裂が水で飽和している、つまり $z_w = z$ とすることにより近似できる。

4. 降雨浸透流解析

本研究では、解析の対象として、平成 16 年に大規模な残壁崩落を起こし、また、それ以前にも幾度となく崩落を繰り返している H 鉱山を取り上げることとした。

4.1 解析対象鉱山の概要

H 鉱山では、高さ約 130 m、平均傾斜 60 度前後の大規模で急傾斜な残壁が形成されている。また、残壁を形成する際に必要不可欠である小段が十分でないことに加え、不適切な発破によって堅固な状態を維持すべき岩盤が弱体化しており、その安定性について疑念が呈されている。さらには、H 鉱山の残壁は河川に隣接する形で切り立っていることから、大規模な残壁崩

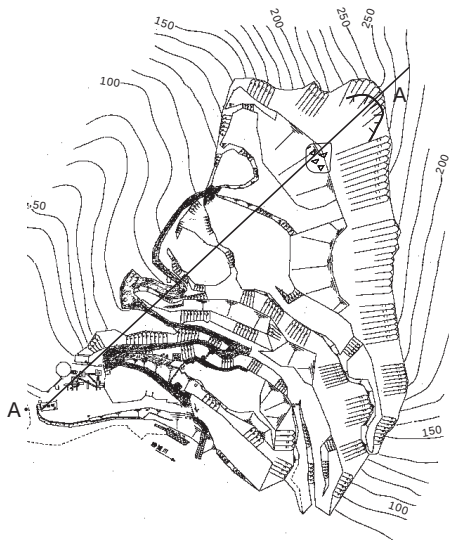


図-5 H 鉱山の平面図

壊が発生した場合、河川への土砂流出といった危険性が危惧されており、安全照査と早急な対策が急務の課題となっている。

4.2 解析概要

本研究では、平成 16 年 10 月に襲来した台風にともなう豪雨によって、約 500m^3 に及ぶ大規模な残壁崩壊が発生した地点を解析の対象とする。H 鉱山に最も近い地点のアメダスデータを降雨データとし、崩落発生当時の降雨による地下水位の変動について解析を行い、その水位状態における残壁（斜面）の安定解析を実施した。

図-5 は H 鉱山の平面図であるが、図中の A-A' 断面が解析対象地点を通る線分で、これは、鉱山のほぼ頂部と底部を結んだ線分である。この線分に沿った断面で解析メッシュを作成し、単位幅領域において解析を行った。図-6 に解析メッシュを示す。なお、メッシュ内の黒い太線が初期水頭位置である。

浸透流解析においては、降雨というパラメータの他に初期水位（初期水頭）や岩盤の物性（透水係数）が必要となる。初期水頭については、現地調査を行った際、前述の位置付近より地下水の流出が確認されたことから、このレベル（メッシュの底面より 100m ）に設定した。勿論、実際の地下水位は極めて複雑であると思われるが、地下水の分布を測定できていないこと、また、解析結果の解釈を容易とするために、便宜的にこのような水位レベルを設定した。さらに、解析領域の両側を水の浸出面とし、地下水の流動は自由になるように設定した。底面は不透水としている。なお、解析において入力した降雨データとしては、崩落発生前日および当日に相当する 2 日間のアメダスデータ（図-7）を気象庁のホームページよりダウンロードして用

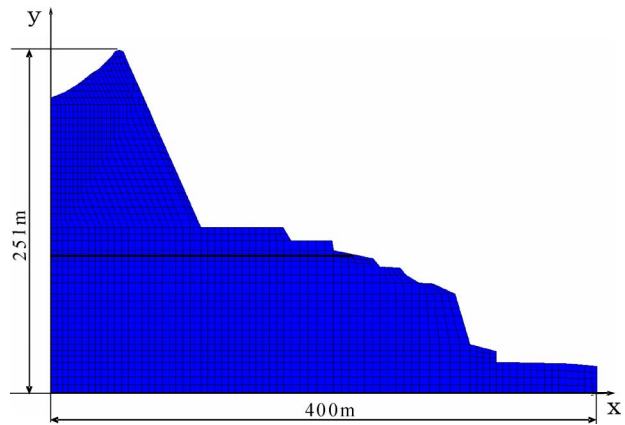


図-6 浸透解析のメッシュ

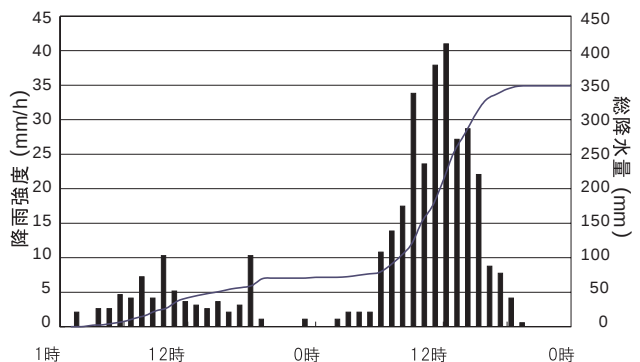


図-7 H 鉱山付近の降水データ（平成 16 年 10 月某日）

いた。

岩盤の物性に関しては、データが存在しなかったので、透水係数については $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ (case1) と $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ (case2) の 2 ケースを想定し解析を行った。不飽和浸透特性である $\theta-\psi$ および $\theta-k^r$ についても、文献¹²⁾を参考に図-8 に示す関係を設定した。比貯留係数 S_s については、H 鉱山の残壁の表土は固結性に乏しく、かなり割れ目も多かったことから、表-1 の砂礫を参考に、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ と仮定して用いた。なお、当該地点の地質状況は決して単純なものではないが、詳細な地質データや物性が得られているわけではないことから、本解析では、対象領域を一定物性を有する岩盤と仮定して解析を実施した。

4.3 解析結果

解析結果としては、降雨にともなう地下水位などの変動を評価するために、降り始めから適当な間隔で圧力水頭分布と地下水位の位置をプロットする。初期状態を図-9 に（水頭のスケールはこの図のみ。単位は m ）、case1 については図-10～図-16 に、また、case2 については図-17～図-23 にそれぞれ示す。なお、圧力水頭は初期状態における地下水位を 0m としている。地

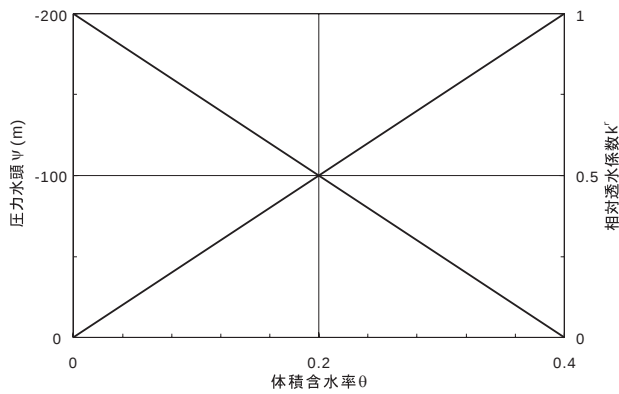


図-8 θ - ψ 関係と θ - k^r 関係

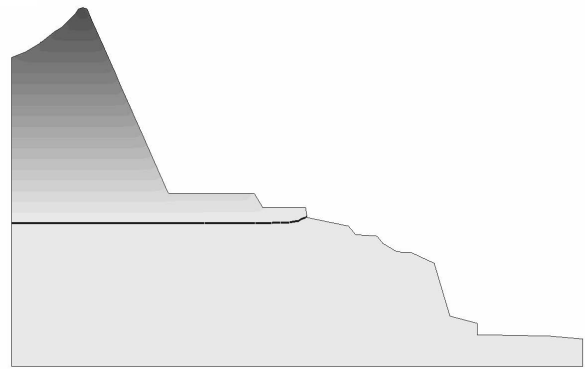


図-10 圧力水頭図 (case1:初日 11 時)

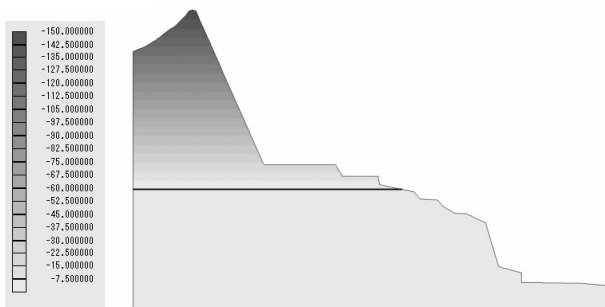


図-9 圧力水頭図 (初期状態)

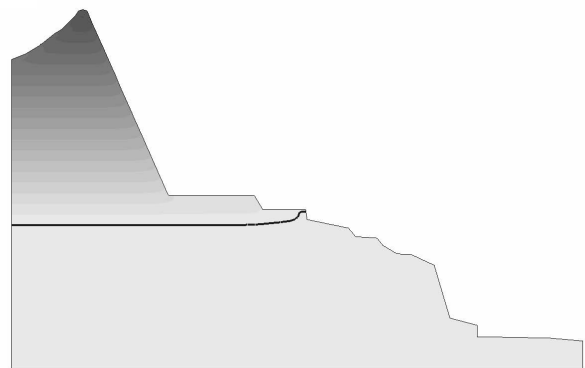


図-11 圧力水頭図 (case1:初日 19 時)

下水などが存在しないそれより上方側では、圧力水頭はマイナスの値を示すが、降雨によって地下水が上昇する、あるいは残壁表層付近に雨水が浸潤すると圧力水頭が発生するため、その箇所は初期の状態より圧力水頭が変化する。本論文では、地下水などの変動について、このような圧力水頭の変化を追跡することで考察を加える。

まず、岩盤の透水係数を 1.0×10^{-5} (cm/sec) と想定したケース (case1) について考察を加える。初日の 11 時に降雨強度が 10 mm/h に達しているが、圧力水頭にそれほど大きな変化は見られなかった。しかしながら、若干ではあるが、残壁 (地下水位より上方に位置する岩盤斜面) の近傍では地下水位 (黒の太線) が上昇している。この後、雨足は弱まるが、再び 19 時に降雨強度が 10 mm/h を超えている。この際も、圧力水頭にそれほど大きな変化は見られず、11 時の時点とほぼ同じ分布をしている。この後、雨量は減り、日が変わった二日目の 1 時には、初日の 19 時の時点よりも残壁近傍の地下水位が下がっていることがわかる。ところが、二日目の 7 時以降、雨足は急激に強まり、降雨強度が 33 mm/h に達した 10 時には、頂上から地下水位が存在する地点に至る残壁の近傍で、圧力水頭分布が上向きにカーブして上昇している。圧力水頭が

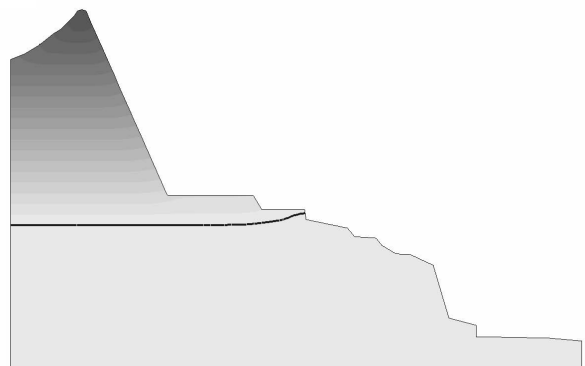


図-12 圧力水頭図 (case1:二日目 1 時)

プラス側に变化したということは、残壁の表層より浸透した雨水が表層付近に留まっていることを意味する。その 2 時間後に降雨強度は 37 mm/h に達し、残壁底部に設けられている中間ステージでは、浸透した雨水が地下水面が地表面まで達しているが、地層全体にわたって地下水が上昇しているのではなく、残壁近傍のみが飽和して地下水面を形成している。これは、簡易的に地下水位の初期条件を設定していることに起因するものであり、実際は、地下水位が斜面に沿って下方に変化しているものと思われるので、このような現象は生じないものと思われる。一方、残壁の近傍では圧力水頭がさらに変化し、さらに雨水が浸透して表層水を

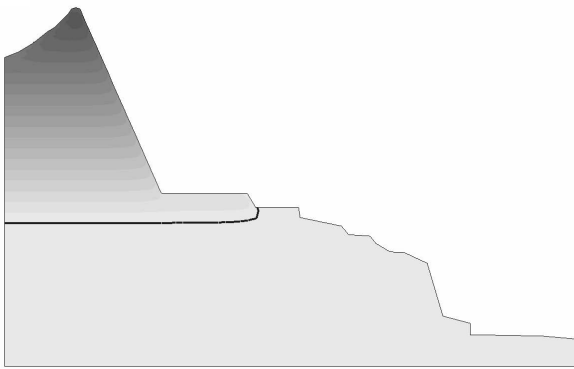


図-13 圧力水頭図 (case1:二日目 10 時)

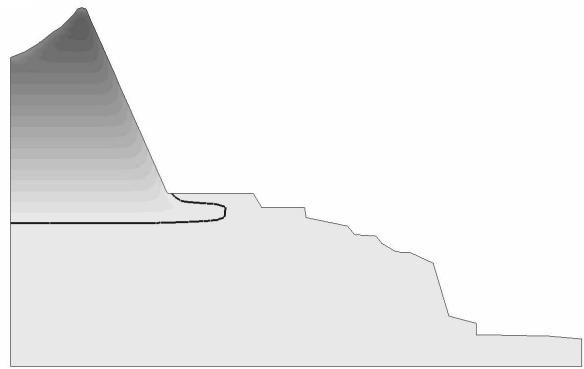


図-16 圧力水頭図 (case1:二日目 20 時)

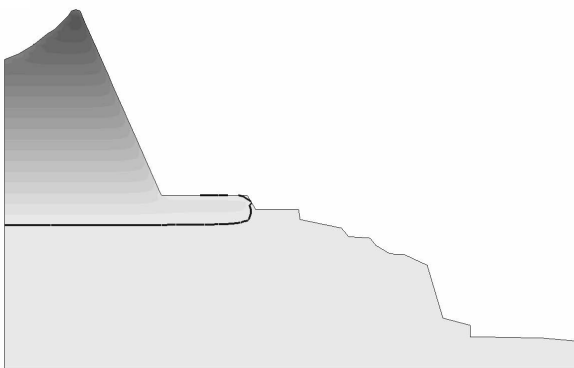


図-14 圧力水頭図 (case1:二日目 12 時)

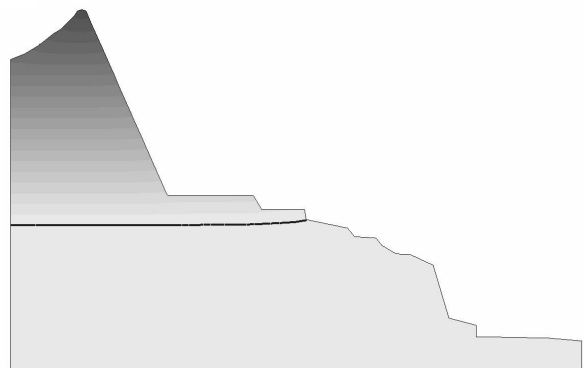


図-17 圧力水頭図 (case2:初日 11 時)

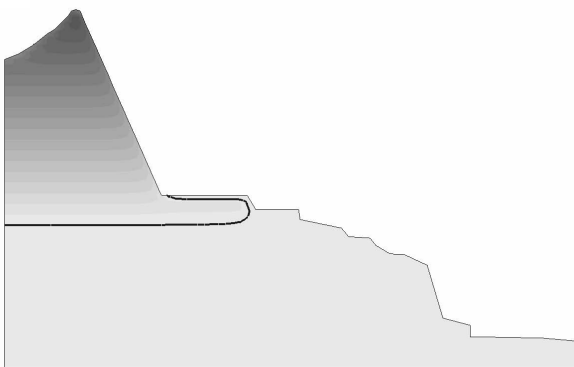


図-15 圧力水頭図 (case1:二日目 13 時)

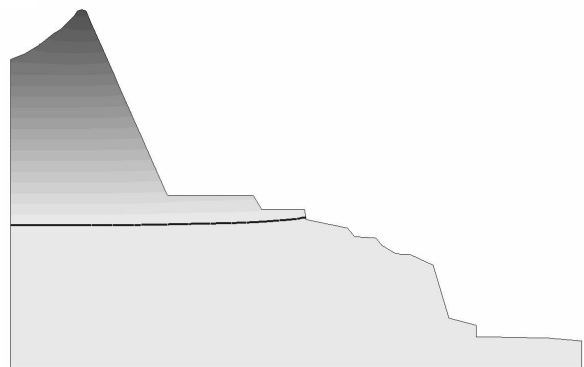


図-18 圧力水頭図 (case2:初日 19 時)

形成している．最大降雨強度を記録した 13 時には，残壁近傍でさらに圧力水頭が変化し，その領域も深部側（山側）に広がっている．20 時には，降雨量はわずかとなっているが，残壁近傍の圧力水頭はそれほど変化しておらず，表層水はまだその場に留まっていると考える．中間ステージより鉛直下向きに浸透した雨水によって地盤が飽和し，それによって，地下水の水位がさらに上昇している．

次に，岩盤の透水係数を 1.0×10^{-4} (cm/sec) と想定したケース (case2) について考察を加える．この場合，透水係数が 10 倍大きいため，case1 に比べ水はけが良く，地下水位および圧力水頭の変化は，いずれも

case1 に比べ緩やかなものとなっている．case1 において圧力水頭の変化に大きな動きが見られた二日目 10 時には，地下水位は緩やかな変化が見られるものの，残壁近傍の圧力水頭にはそれほど大きな変化は見られない．12 時には，斜面上部で圧力水頭に変化が見られ，表層水が貯留しはじめたと思われる．13 時には，残壁近傍の圧力水頭がさらに変化しているが，これは case1 とほぼ同じ挙動である．

case1，case2 の両ケースにおいて，透水係数の違いによる圧力水頭，地下水位の変化の違いはあるものの，両者には，定性的に同様の傾向が見られた．降雨として降り注いだ雨水は表面付近に表層水として留まり，徐々

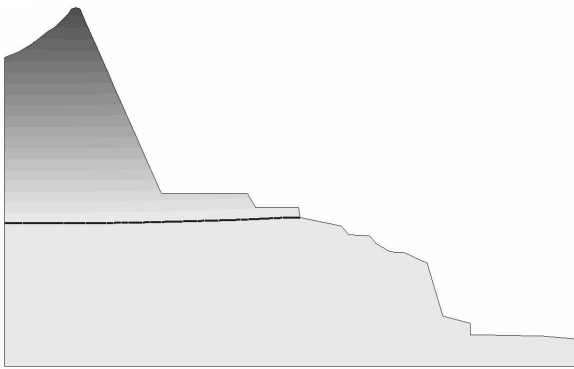


図-19 圧力水頭図 (case2:二日目 1 時)

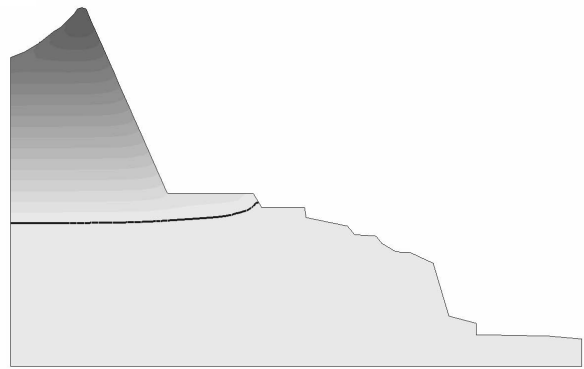


図-22 圧力水頭図 (case2:二日目 13 時)

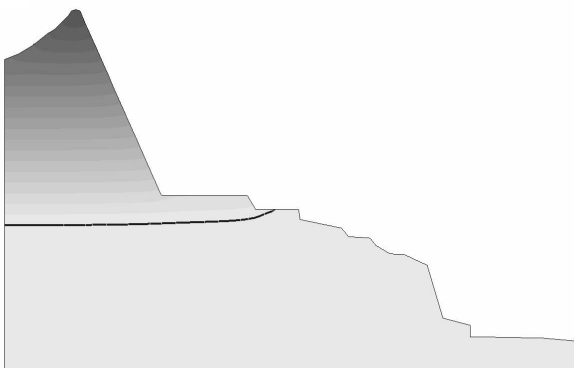


図-20 圧力水頭図 (case2:二日目 10 時)

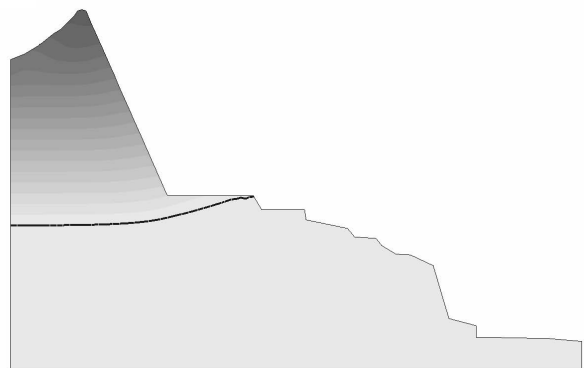


図-23 圧力水頭図 (case2:二日目 20 時)

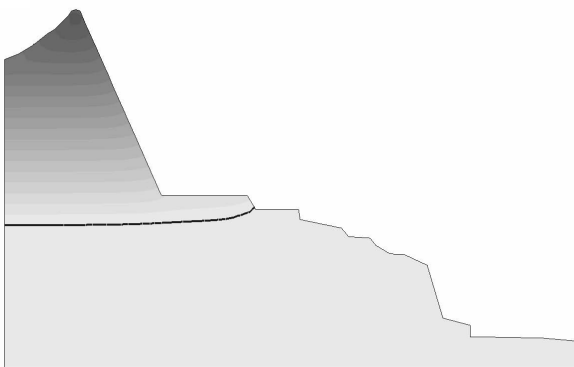


図-21 圧力水頭図 (case2:二日目 12 時)

に残壁より流下して、場所によっては地下水まで浸透しているという結果が得られた。

5. 限界平衡解析

前章の降雨浸透流解析より、斜面に降り注いだ降雨は表層水となって残壁近傍に存在するといった結果が得られた。3章で述べた限界平衡解析法では、(1) 完全排水状態、(2) 引張亀裂中にのみ水がある場合、(3) 水で完全に飽和した場合、というような簡易なケースを想定し安全率を算出する。また、引張亀裂中に水がある場合、亀裂を井戸と想定し、亀裂底部より水が浸潤

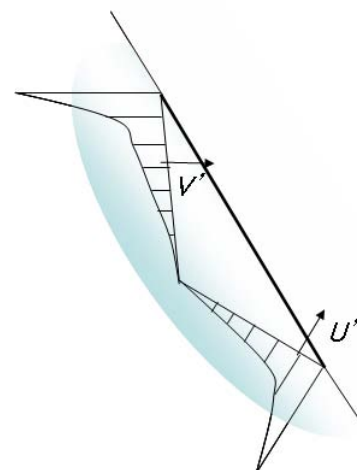


図-24 表層水の分布

すると考えている。しかしながら、前章の解析結果より、残壁の表層ほど圧力水頭の変化は大きく、深部に至るとほとんど変化が見られない。つまり、残壁面に対して垂直な方向に面から遠ざかると水压変化は小さいので、式 (21) や式 (22) のような三角形分布にはならない。想定亀裂およびすべり面近傍における表層水による水压分布をイメージすると、図-24 のようになる。



写真-1 解析対象箇所

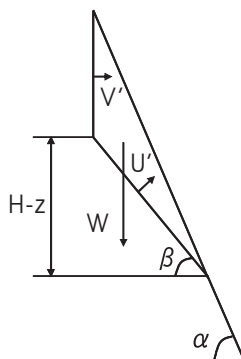


図-25 崩壊面断面図

無論，明確な引張亀裂が存在して，そこに水が入っていくということであれば，従来の限界平衡解析法を適用することが可能であるが，岩盤の固結性が低い場合，必ずしも特定の亀裂に，雨水が井戸のように貯留するとは限らないと考える．そこで本章では，前章の解析を基に想定すべりブロック近傍の水圧を計算し，求まった水圧を用いて安全率を算出する．

5.1 解析概要

前章の解析と同様，平成 16 年 10 月の台風にとともなう降雨時に発生した H 鉱山の大規模崩落地点に着目する．写真-1 は，図-5 における A-A' 断面の一部である．本研究では，写真における赤枠について地点を限界平衡解析の対象とすることとした．対象地点の断面図を模式的に描くと，図-25 のようになる．この場合，引張亀裂が上部平面内にある場合に相当するので，限界平衡解析には，式 (25) および式 (31) を用いて評価する．図-3 および図-25 に基づき解析に用いるパラメータを設定する．それらを表-2 に示す．これらより，引張亀裂の上部端は残壁の頂上より約 25 m の地点で，その長さは約 22 m である．一方，すべり面の上端は

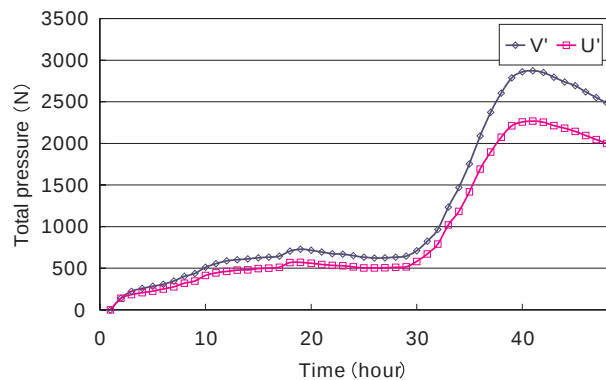


図-26 表層水による U' と V' (case1)

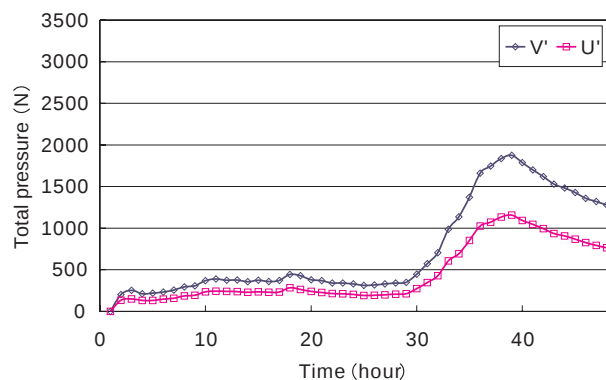


図-27 表層水による U' と V' (case2)

残壁の頂上より約 47.21 m の地点，下端は 65.10 m の地点に位置する．

まず，前章の解析結果（圧力水頭の変化）より，図-25 における U' および V' を算出する．その結果を，case1 を図-26 に，case2 を図-27 に示す．前章の解析結果より，残壁表層部では，頂部より下部に至るまで圧力水頭の変化は同程度で，若干ではあるが，頂部に近い方で変化がやや大きい．こうしたことから，case1 および case2 とともに， V' の方が U' よりやや大きい値を示している．また，case1 および case2 とともに， U' および V' の変化は図-7 に示した降雨強度と強い相関があり，降雨強度が増大するとともに V' および U' も増大する．ただし，降雨強度が低下しても，一旦増大した V' と U' はすぐに低下しない．また，透水係数が大きい case2 の方が case1 より V' および U' の値が小さく，これは表層に貯留する程度が case1 よりも小さいことに起因しているものと考えられる．また，case2 の方が降雨強度の変化に敏感で，透水係数が大きいほど，雨水の浸透が速やかに行われることを示している．

こうして得られた U' および V' を用いて，粘着力 c ，内部摩擦角 ϕ を変化させた際の安全率 F を図-28 から図-31 に図示する．図-28 と図-29 はそれぞれ，case1 において内部摩擦角 $\phi=30$ 度および 40 度の下，粘着力 c を 0 ～ 200 kN/m² まで変化させた結果である．図

表-2 解析パラメータ（限界平衡解析）

$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\gamma_w(\text{kN}/\text{m}^3)$	$H(\text{m})$	$z(\text{m})$	$A(\text{m}^2)$	$W(\text{kN})$
59.18	53.62	21.56	9.80	65.10	47.21	22.22	597.04

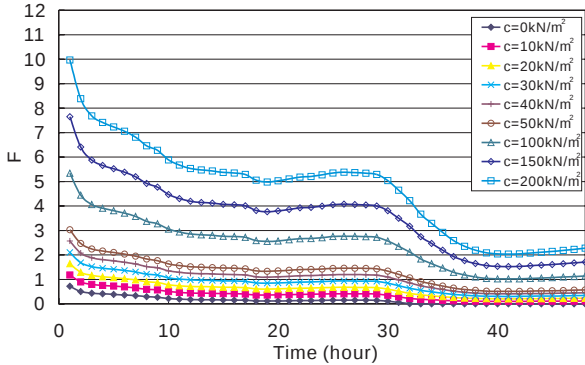


図-28 安全率（case1: $\phi = 30^{\circ}$ ）

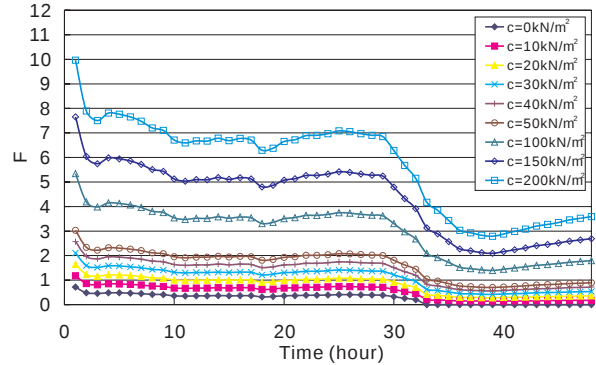


図-30 安全率（case2: $\phi = 30^{\circ}$ ）

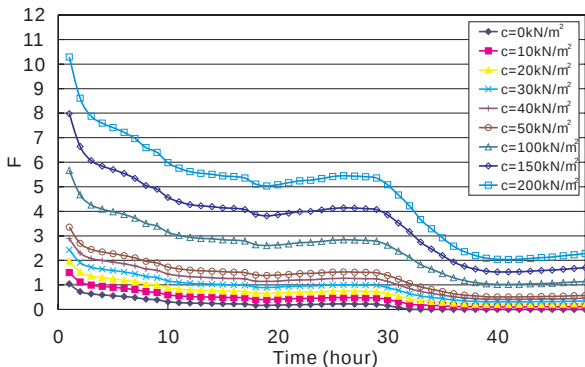


図-29 安全率（case1: $\phi = 40^{\circ}$ ）

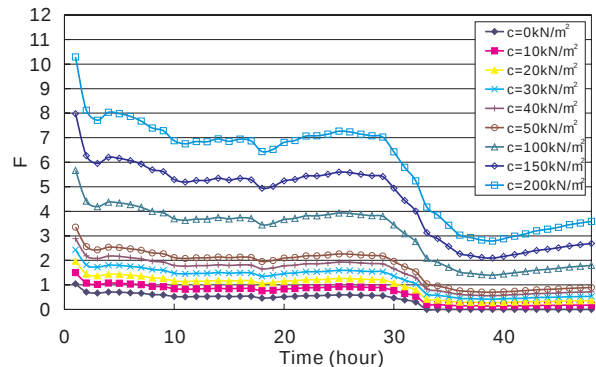


図-31 安全率（case2: $\phi = 40^{\circ}$ ）

図-28 と図-29 は、同じ解析を case2 について実施してまとめた結果である。

case1 については、粘着力が $50 \text{ kN}/\text{m}^2$ 以下の場合、いずれの内部摩擦角においても、二日目の 7 時（31 時間経過）以降、安全率が 1 を下回る結果となっている。また、これ以降、全ての場合で安全率が低下しているが、粘着力が大きいケースにおいて顕著となっている。二日目の 7 時（31 時間経過）の降雨強度は $10.5 \text{ mm}/\text{h}$ となっており、この後 $10 \text{ mm}/\text{h}$ を超える降雨が 10 時間にわたり続いている。この結果を見る限り、急激に降雨強度が増した場合、または $10 \text{ mm}/\text{h}$ を超える降雨が続く場合は、残壁の岩盤特性（透水係数など）にもよるが、警戒が必要になってくるものと考ええる。一方、二日目の 16 時（40 時間経過）には、安全率の低下が収まっていることが分かる。この時の降雨強度は $21.5 \text{ mm}/\text{h}$ と非常に強く、この段階で安全率は最小となっている。その後、降雨が減少し、安全率も穏やかに上昇しているものの、30 時間経過以前の状態には戻っていない。

case2 は case1 に比べ透水係数が 10 倍大きいことから水はけがよく、斜面近傍に発生する表層水の領域も小さくなり、安全率が上昇する。二日目の 16 時（40 時間経過）以降の安全率の回復に関しても、case1 よりも速く回復している。しかしながら、定量的に若干の違いはあるものの、case2 における安全率の変動は、定性的には、ほぼ case1 と同様の傾向が見られた。

一般に、比較的硬質な岩盤では粘着力は $50 \text{ kN}/\text{m}^2$ 以上、また、内部摩擦角は 30° 以上を有するものと思われる。仮に、内部摩擦角が 30° の場合、透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}/\text{sec}$ では粘着力が $100 \text{ kN}/\text{m}^2$ 以上、透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$ では粘着力が $80 \text{ kN}/\text{m}^2$ 以上を有していないとすべりブロックは崩壊することとなる。内部摩擦角が 40° の場合でも、ほぼ同様のことが言えることから、当該鉱山においては、通常の降雨程度では残壁の崩壊がなかったことも勘案すると、岩盤の粘着力は $50 \text{ kN}/\text{m}^2 \sim 80 \text{ kN}/\text{m}^2$ 程度であったということになる。

ただし、本解析では、すべりブロック内（引張亀裂、

すべり面)も周辺岩盤と同じ透水係数を用いている,つまり水はけが悪い状態で解析していることから,ブロック周辺で表層水が生じる可能性については更なる議論が必要である.また,本解析では簡易的に地下水位レベルを設けたり,全ての箇所と同じ岩盤のパラメータ(透水係数,貯留係数など)を用いていることから,本解析は,あくまでも感度解析的な事例に過ぎない.したがって,必ずしも上述した岩盤の状態であったわけではないと考えるが,鉱山では発破を用いて岩盤を砕き,さらに長年に亘って風雨に晒され岩盤が風化することから,比較的低い岩盤強度を想定し,今回の解析のような手法で,どの程度の降雨で安全率が1を割り込むかなどの検討をすることは重要であると考え.

6. まとめ

本研究では,崩落残壁に対する数値解析(有限要素降雨浸透解析)を行い,さらに,水理学的および力学的側面を考慮に入れ限界平衡解析を実施し,降雨時における残壁の安定性について議論を行った.

降雨浸透解析の結果,岩盤のように透水係数の小さい場合では,地表面に降り注いだ降雨は,表層水として表面付近に留まり,徐々に残壁近傍より流下/浸透していることが判明した.また,解析より,降雨強度が40 mm/hを超えるような場合,残壁近傍にて圧力水頭が急激に変化していることから,要注意であるという結論を得た.さらに,10 mm/hを超える雨が長く続く場合においても,徐々にではあるが圧力水頭が変化し,その結果,安全率が下がり続けていくということから,降雨時間についても注意が必要であるということが判明した.透水係数が大きい場合,圧力水頭や地下水位の変化の割合は小さいが,一般に,岩盤の透水係数は通常の地盤よりも小さいことから,通常の斜面以上に降雨時の残壁については注意が必要であると思われる.

既存の限界平衡解析では,簡易なパターンをいくつか設定して斜面の安全率などを類推するに留まっているが,上述した通り,降雨によって残壁近傍に表層水が存在するが,その分布は極めて複雑で,表層水による水圧は三角形分布を示していないことが判明した.したがって,地下水は勿論のこと,表層水の分布状況も加味した上で残壁の安定性を議論する必要がある.地質が不均一である場合は,地下水などの分布はさらに複雑になることから,従来のように,数例の簡易なパターンだけで斜面/残壁の安定性を議論するのではなく,地質状況や降雨状況を反映させた解析を踏まえた上で,斜面/残壁の安定性を議論する必要があると思われる.

しかしながら,本研究では,解析対象領域の全体にわたって一律な物性を用いて解析を行っていることが

ら,感度解析的な研究事例に留まっている.したがって,地質構造が与える影響や,数少ない調査からどのようにして物性(入力パラメータ)を客観的に決定するかなどについても,今後,検討が必要であると考えている.

謝辞: 本研究を実施するにあたって,中国四国産業保安監督部四国支部鉱山保安課より多くの資料を提供して頂きました.ここに付記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 原子力安全・保安院鉱山保安課 編(経済産業省 鉱山保安局/公害保安局/立地公害局/環境立地局): 鉱山保安年報 昭和24年度~平成15年度版, 鉱業労働災害防止協会, 1949~2004.
- 2) 経済産業省原子力安全保安院鉱山保安課 編: 石灰石・けい石鉱山残壁データ, 2001.
- 3) 資源・素材学会 編: 残壁ハンドブック, 資源・素材学会, 2005.
- 4) 松田浩朗, 西村好恵, 清水則一, 吉富 功, 今 行忠: 秋芳鉱山における残壁のGPSによる長期変位計測, 第22回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.73-76, 2001.
- 5) 清水則一, 水田義明: 大規模残壁の安全管理手法のためのGPS変位モニタリングシステムと安定評価解析手法の開発に関する研究, 石灰石, 287(5), pp.43-55, 1997.
- 6) 児玉淳一, 金子勝比古, 都築雅年, 西山えるむ: 井倉鉱山における残壁の長期変形計測とその解析, 資源と素材, Vol.120, pp.182-189, 2004.
- 7) 村直昭, 津嘉山良治, 平田篤夫, 金子勝比古: カバーロック型残壁の変形計測とその解釈, 資源と素材, Vol.119, No.9, pp.547-552, 2003.
- 8) 鈴木雄太郎, 真野明: 豪雨に対する斜面崩壊地の浸透流解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.271-276, 2003.
- 9) 佐々恭二, 汪 発武, 王 功輝: 1998年福島県降雨による稗返地区高速地すべりの運動機構, 土と基礎, Vol.49, No.7, pp.4-6, 2001.
- 10) 佐々木康, 森脇武雄, 加納誠二, 白石芳樹: 1999年の広島斜面災害をもたらした降雨特性と警戒・避難のための雨量指標, 土と基礎, Vol.49, No.7, pp.16-18, 2001.
- 11) 赤井浩一, 大西有三, 西垣 誠: 有限要素法による飽和・不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, 第264号, pp.87-96, 1977.
- 12) 西垣 誠: 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2,3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.3, pp.165-177, 1983.
- 13) Domenico, P.A. and Mifflin, M.D.: Water from low-permeability sediments and land subsidence, *Water Resources Research*, Vol.1, No.4, pp.563-576, 1965.
- 14) 地盤工学入門委員会 編: 地盤工学入門, 地盤工学会, pp.171~173, 2000.
- 15) 例えば, 宇都宮徹, 成田国朝, 奥村哲夫: 貯水位変動に伴う斜面内の浸透挙動に関する研究, 愛知工業大学研究報告, 第35号B, pp.119-126, 2000.

(2007年9月18日受付)