HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	石灰石鉱山の残壁を対象とした降雨浸透流解析
Author(s)	山田, 高史; 福田, 大祐; 児玉, 淳一; 藤井, 義明
Citation	資源・素材講演集2017（札幌）, 4(2), PY2-75
Issue Date	2017-09-26
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/67667
Type	proceedings
Note	資源・素材2017（札幌）: 平成29年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2017年9月26日～28日, 北海道大学, 札幌市
File Information	PY2-75.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

若手ポスター発表（Poster：MMIJ Students and Young Researchers）
岩盤工学（ Rock Engineering）
Rock Engineering
2017年9月26日(火) 15:30 ～ 17:30 ポスター会場2 N301 (N棟3階/Fl.3.,Build. N)

[PY2-75] 石灰石鉱山の残壁を対象とした降雨浸透流解析
Groundwater analysis on rock slope in limestone quarry during rainfall

○山田 高史[1]、福田 大祐[1]、児玉 淳一[1]、藤井 義明[1] （1. 北海道大学）
○Takashi Yamada[1], Daisuke Fukuda[1], Jun-ichi Kodama[1], Yoshiaki Fujii[1] （1. Hokkaido University）

キーワード：石灰石鉱山、残壁、安定性評価、降雨、浸透流解析
limestone quarry, rock slope, stability evaluation, rainfall, groundwater analysis

降雨時に岩盤が大きく不連続的に変位するという事例が報告されるなど，降雨が鉱山の残壁の安定性評価に多大な影響を及ぼすことは経験的に良く知られている。しかし，既往の研究では、採掘に伴う影響を評価したものが多く、降雨による地下水位や間隙水圧の上昇などの影響も考慮した例は少ない。一方，地盤中に不透水層が存在すると，大きな間隙水圧が発生する場合があるため，残壁内の水理特性の評価には地質構造の影響も把握する必要がある。本研究では、カバーロック，互層帯および破砕帯が存在する露天掘り石灰石鉱山を対象に，2次元不飽和浸透流解析を実施した。そして，降雨パターンと地質構造が残壁内の地下水位や間隙水圧などに与える影響について検討した。

©一般社団法人 資源・素材学会

1. はじめに

露天掘り鉱山を操業する際には経済的損失や安全操業といった面から、残壁の安定性評価は非常に重要であり、これまでに数多くの研究がなされている[1)2)3)]。現在は主に採掘や埋め戻しに伴う影響を考慮したものが多い。しかし、吉田らによって降雨を考慮した鉱山残壁の安定性について、透水係数の低い岩盤ではその残壁近傍の圧力水頭が急激に変化すること、長期間による降雨により岩盤の安定性が低下することなど、安定性評価には水理特性も考慮する必要があることが明らかになってきている[4)5)]。ただし、この研究についても均質な岩盤を対象としており、地質構造の違いを考慮した上で、降雨が岩盤に与える影響を検討している研究事例が少ない。また、露天掘り鉱山では採掘により、幾何学形状が変化するため、これが水理特性に影響を与える可能性もあるが、同様に研究事例が少ないのが現状である。

そこで本研究では、下盤に輝緑凝灰岩を持ち、破砕帯が存在する露天掘り石灰石鉱山を対象に、2 次元不飽和浸透流解析を実施した。そして、地質構造と幾何学的な違いが残壁内の地下水位や間隙水圧に与える影響について検討した。

2. 支配方程式と水分特性

2.1 支配方程式[4)]

地盤内の水の基質濃度は、水の密度 ρ_w、間隙率 n、飽和度 S を用いて $\rho_w nS$ と表せる。微小体積に対して、質量保存則を考慮すると、微小体積から抜け出た水の量は基質濃度の変化量と等しいため，式(1)で表現できる。

$$\nabla^T(\rho_w q) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w nS) \tag{1}$$

ここで，q は水の流量である。上式において右辺は、

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w nS) = nS\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \rho_w n\frac{\partial S}{\partial t} + \rho_w S\frac{\partial n}{\partial t} \tag{2}$$

となる。ここで、 ρ_w を一定であるとすると、式(2)中の密度変化に対応する右辺の第一項は無視することができ、

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w nS) = \rho_w n\frac{\partial S}{\partial t} + \rho_w S\frac{\partial n}{\partial t} \tag{3}$$

となる。一方ダルシーの法則から、

$$q = -k\nabla h \tag{4}$$

ただし、**k** は透水係数マトリックス、h は基準面からのピエゾ水頭であり、

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z \tag{5}$$

である。ただし p は間隙水圧、γ_w は水の単位体積重量、z は位置水頭である。式(1)に式(3), (4), (5)を代入し整理することで、以下に示すような間隙水圧を未知数とする支配方程式を得ることができる。

$$\frac{1}{\gamma_w}\nabla^T(k\nabla p) - \nabla^T(kn_g) = (n\frac{\partial S}{\partial p} + S\frac{\partial n}{\partial p})\frac{\partial p}{\partial t} \tag{6}$$

2.2 水分特性[4)]

水が地盤内に流れるとき、完全に乾燥状態にはならず、一定量が地盤内に保有される。この水の量は毛管力と地盤特性によって支配されている。これを含水量と言い、全体積に対する、水の体積の比である体積含水比 θ=nS により表現する。これより、体積含水比の間隙水圧に対する変化量は以下のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial p} = S\frac{\partial n}{\partial p} + n\frac{\partial S}{\partial p} \tag{7}$$

式(7)中の右辺の第一項は、飽和条件での体積含水比の傾きを示しており、間隙水圧の変化に対して地盤に流入(流出)される水の体積比を示す非貯留係数 S_S を用いて、以下のように表せる。

$$S\frac{\partial n}{\partial p}=\frac{S_s}{\gamma} \tag{8}$$

式(7)中の右辺の第二項は、不飽和条件での体積含水比の傾きであり、不飽和特性関数の傾きを示している。

3. 解析概要

本研究では、幾何形状の影響を検討するため, 採掘の進行状態が異なる3つのモデルを作製した。すなわち, 未採掘状態のモデル(model1)、採掘が半分終了した状態のモデル(model2)、採掘終了状態のモデル(model3)である。またそれぞれのモデルに対して表1に示すように4パターンの地質構造を与えて降雨による浸透流解析を行った。解析時間は72時間、解析における1ステップを1時間とした。図1にmodel1の解析メッシュを示す。図1内のexcavation1の部分を取り除いたものがmodel2、excavation1および excavation2の部分を取り除いたものがmodel3である。case2およびcase3では、モデルの青色を石灰岩、緑色を輝緑凝灰岩として、石灰岩の透水係数を5.0×10^{-4} m/sec、輝緑凝灰岩の透水係数を5.0×10^{-6} m/secに設定した。なお、メッシュ内の青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。勿論、実際の地下水位は極めて複雑であると思われるが、地下水の分布を正確に把握するのが困難であること、また、解析結果の解釈を容易とするために、初期水頭は便宜的に採掘領域の最低レベルと同じ900mに設定した。さらに、初期水頭位置を境目にそれより上を水の浸出面とし、モデル外部との地下水の流動が自由になるように設定した。初期水頭位置より下部を不透境界としている。なお、解析において入力した降雨データは、ある石灰石鉱山における雨量の計測値を参考に図2のように設定した。降雨は図1の青色矢印で示しているように、モデル表面全域に一様に降らせている。不飽和浸透特性線図 についても、文献[4]を参考に図3に示す関係を設定した。case3で考慮している破砕帯は図1の白線であり、破砕帯の透水係数は、健全部よりもかなり低いと考え1.0×10^{-20} m/secとした。また、非貯留係数は5.0×10^{-6}m^{-1}とした。

表1　地質構造

case	Characteristic
1-1	Homogeneous model (k=5.0×10^{-4})
1-2	Homogeneous model (k=5.0×10^{-6})
2	Limestone and schalstein
3	Limestone and schalstein with fractured zone

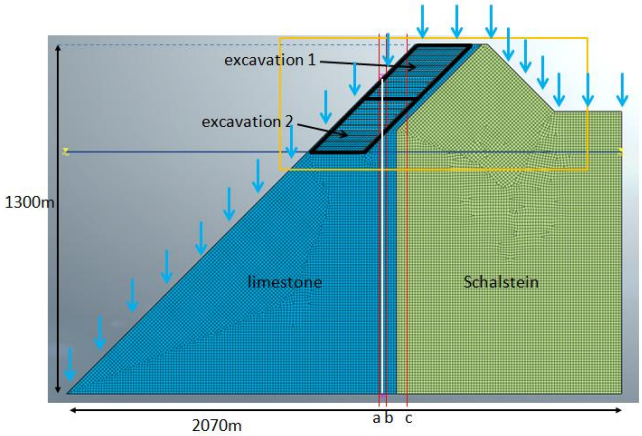


図1　解析モデル(model1)

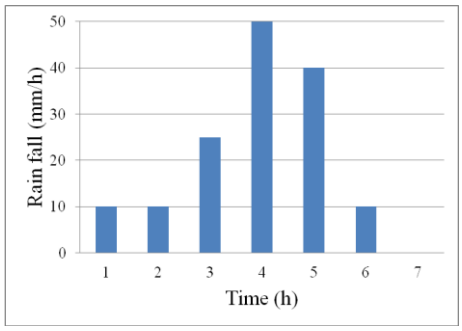


図2　解析で与えた降水量

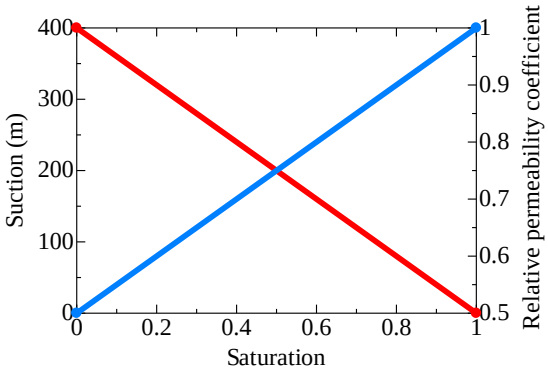
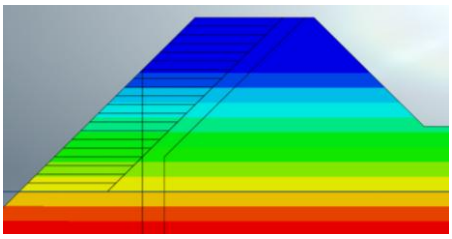


図3　不飽和特性線図

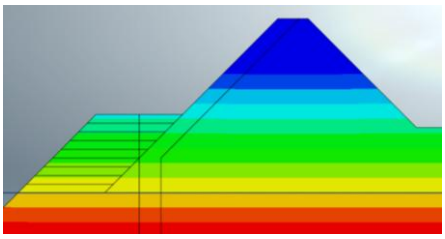
4.　解析概要

4.1 間隙水圧

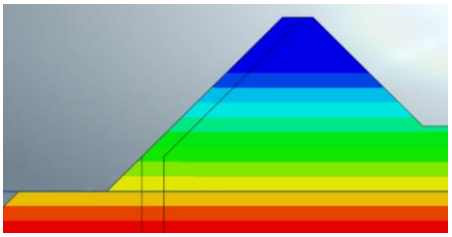
解析結果では採掘領域周辺に注目するため、図１の黄色枠で囲まれた部分のみを示す。図４に各モデルの初期状態の間隙水圧、図５、図６、図７、に各モデルの各 case での解析７時間後の間隙水圧を示す。正値が圧縮を示している。均質モデルで透水係数に差がある場合(case1-1 と case1-2 との比較)では、すべてのモデルで、透水係数の小さな case1-2 の表面付近の間隙水圧の増加が見られる。これは当然透水係数を小さく設定することにより、降雨が地盤内を浸透しにくくなり表層部分に滞留したためであると考えられる。また,採掘の進行による違いとしては、図より model2、model3 の間隙水圧の上昇量が model1 よりも大きくなっていることが分かる。石灰岩と輝緑凝灰岩の２つの地質かななる場合(case2 と case1-1 や case1-2 との比較)では、case2 でのモデル右側斜面では case1-2 と同様に表面付近の間隙水圧上昇が見られる。モデル左側斜面では、地質境界が表面に近い model2 や model3 では間隙水圧の上昇が見られる。また、各モデルで、石灰岩側の間隙水圧が少しではあるが全体的に上昇していることが分かる。これは、地質の境界で透水係数が異なるため、降雨が地質境界に沿って流れるため、均質なモデルと比べて石灰岩側に流れ込む水の量が多くなっていることに起因していると思われる。さらに破砕帯がある場合(case2 と case3 の比較)では、case3 の破砕帯を境に不連続的な間隙水圧が見られる。model1 では破砕帯より左側部分の間隙水圧の上昇が見られる。これは単に case2 よりも水が溜まる領域が少ないためであると考えられる。model2 や model3 では地質境界と破砕帯に囲まれた部分の間隙水圧が上昇していることが分かる。model3 では model2 に比べて、より地質境界と破砕帯に囲まれた部分に集まる雨の量が多くなることから間隙水圧の上昇量が大きくなっている。



(a) model 1



(b) model 2



(c) model 3

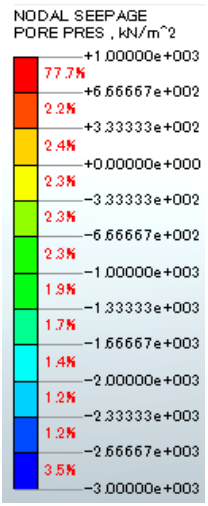
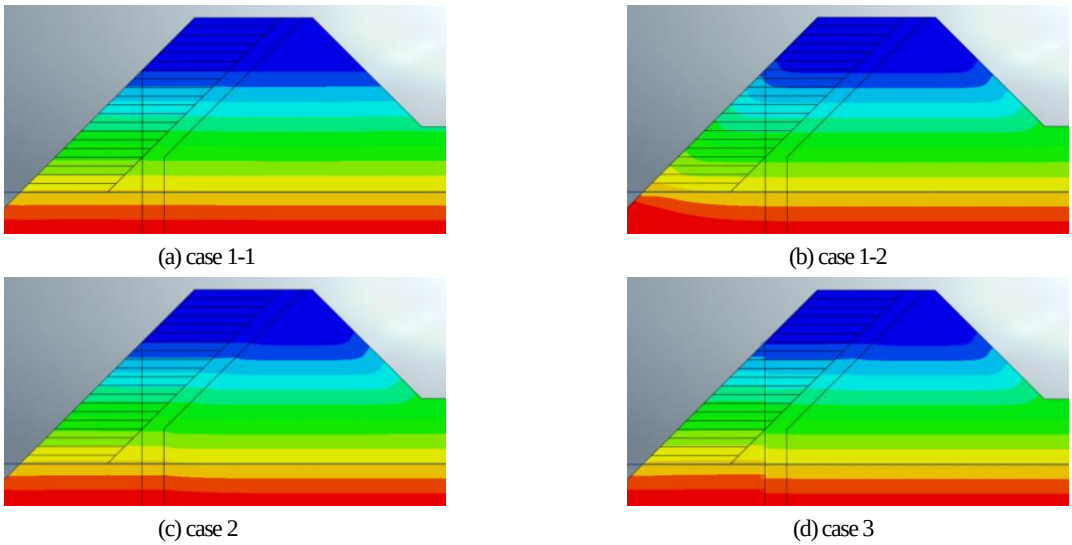


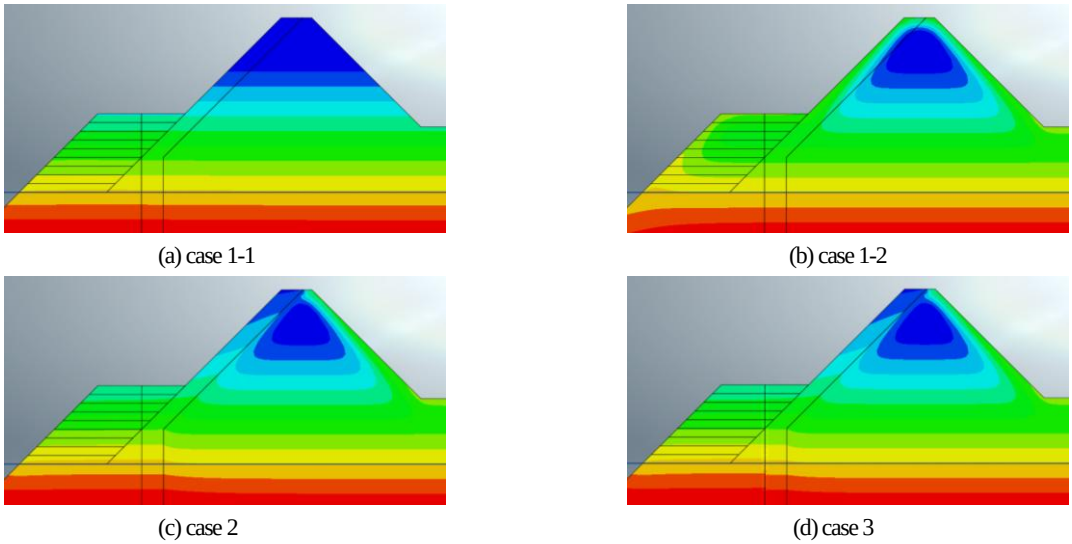
図４　各モデルでの初期間隙水圧



(a) case 1-1　(b) case 1-2

(c) case 2　(d) case 3

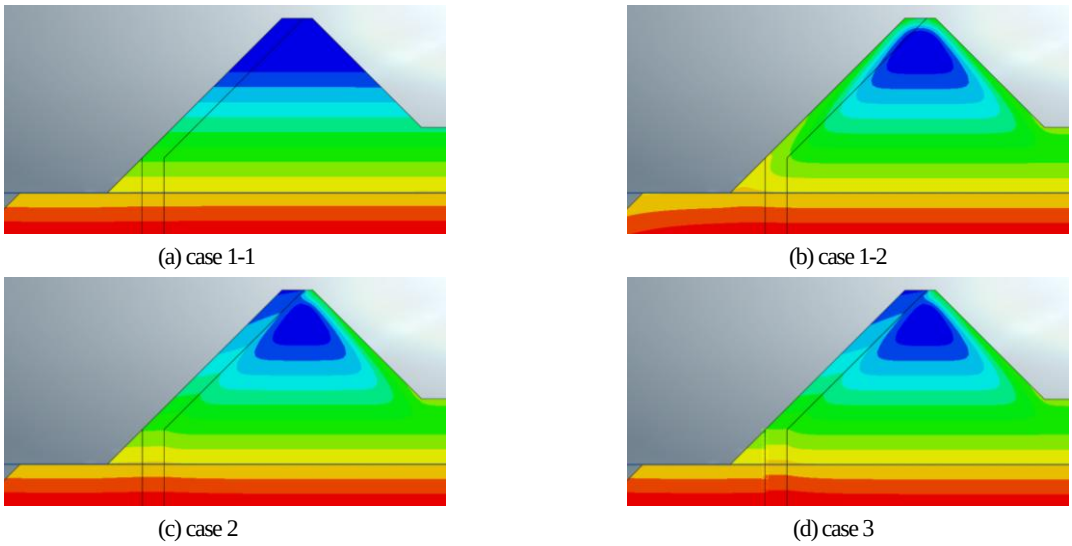
図 5　model1 の各 case での 7 時間後の間隙水圧



(a) case 1-1　(b) case 1-2

(c) case 2　(d) case 3

図 6　model2 の各 case での 7 時間後の間隙水圧



(a) case 1-1　(b) case 1-2

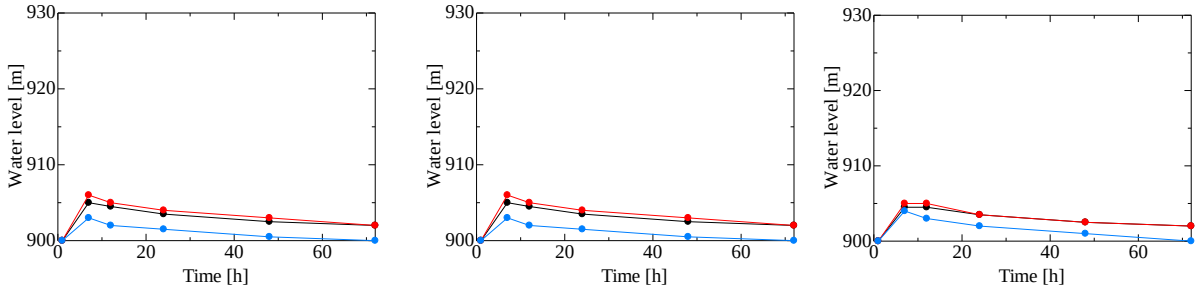
(c) case 2　(d) case 3

図 7　model3 の各 case での 7 時間後の間隙水圧

4.2地下水位

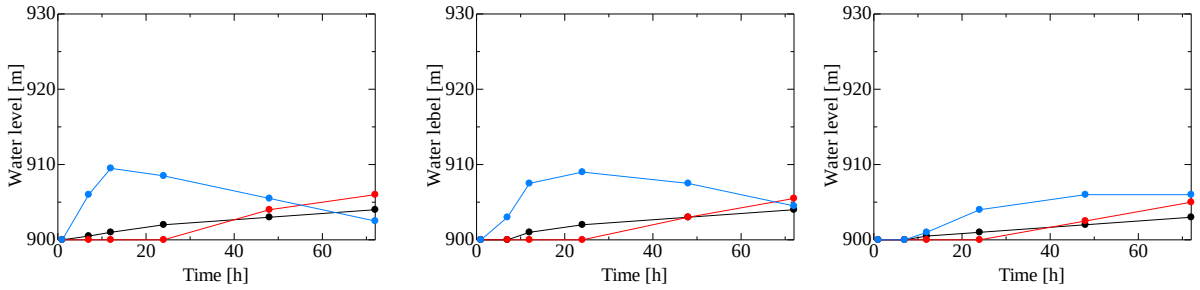
図8、図9、図10、図11、に各caseにおける地下水位面の推移を示す。水位の分析を行った位置は図1における赤線a、b、cであり、a線は破砕帯より表面側、b線は破砕帯と地質境界に挟まれた部分、c線は下盤の緑輝凝灰岩を測定している。これらのグラフでは0、7、12、24、48、72時間後の水位面をプロットし直線で結んでいる。case1-1では全モデルを通して、ほぼ同様の傾向を示している。model3の水位上昇が若干低くなっているのは、モデル左の水平部分に降った分の雨が水位上昇に影響を与えないためであると考えられる。

モデルの透水係数を変えた場合(case1-1とcase1-2との比較)では、全モデルとも水位が上昇するまでに時間がかかっていることが分かる。またmodel3では水位線に降雨が達するまでの距離が短くなっていることから、比較的、降雨からのタイムラグが小さくなっている。またモデル下部へ浸透しにくいため、若干ではあるがcase1-1よりも水位上昇量の最大値が大きくなっている。case1-1、case1-2では均質なモデルであるため、多少のタイムラグや定量的な違いはあるものの、定性的にはほとんど同様の傾向を示しているといえる。石灰岩と輝緑凝灰岩からなる場合(case2 とcase1-1との比較)では、全モデルにおいてa、b線ではcase1-1と同様の傾向を示していること分かる。しかしながら4.1でも述べたように、集水していることからcase1-1よりも上昇量が多くなっている。c線に関しては、主にmodel2で上昇量の増加が見られる。これは地質境界を通ってb線付近の水が浸透してきたことによるものだと考えられる。破砕帯がある場合(case3とcase2の比較)では、まずa線では、水位が下降する速度がこれまでのものよりも早くなっていることが分かる。これは自由面から抜けることができる水の量が破砕帯を設けることにより、減ったことによるものである。b線では、model2、model3において、急激な水位の上昇が確認できる。これはcase2と比較して、破砕帯で領域を区切っているため、同じ量の水でより多く水位が上昇するためである。model1では、上昇量に関しては、他のケースとほとんど変わらないが、破砕帯により水の自由面と切り離されているため、地下水位の下がり方がかなり緩やかになっている。c線では、model2、model3においてb線での水が地質境界を通って徐々に浸透していくことから、少しのタイムラグを持ちながら大きな水位上昇を確認することができる。model1に関してはb線と同様に地下水の下降が緩やかとなっている。



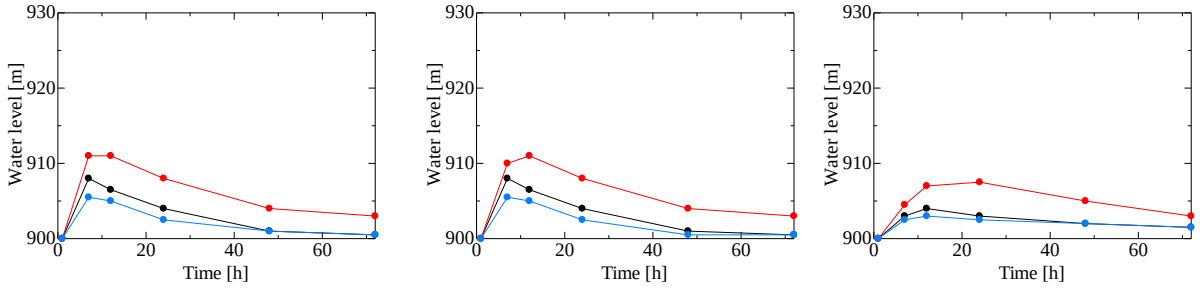
(a)a線　(b)b線　(c)c線

図8　case 1-1での各地下水位



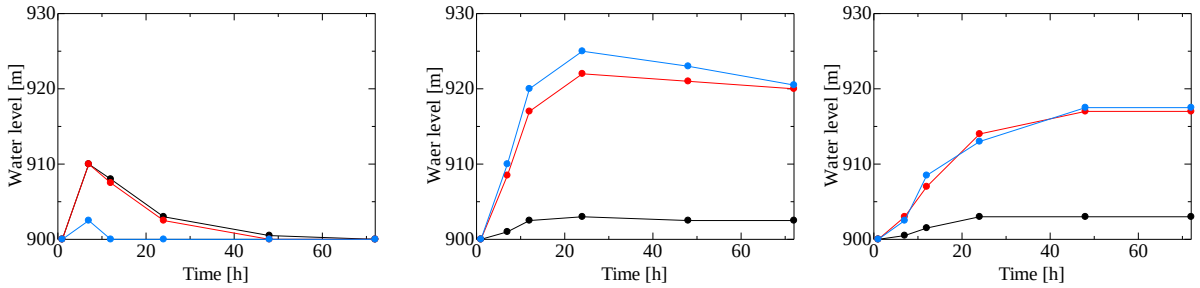
(a)a線　(b)b線　(c)c線

図9　case 1-2での各地下水位



(a)a線　　(b)b線　　(c)c線

図10　case 2での各地下水位



(a)a線　　(b)b線　　(c)c線

図11　case 3での各地下水位

5.　まとめ

本研究では、下盤に輝緑凝灰岩を持つ、破砕帯を含む石灰石鉱山を対象としたモデルに2次元不飽和浸透流解析を行い、間隙水圧、地下水位に与える地質構造の影響を明らかにした。また採掘の進行による幾何形状の変化が与える影響についても検討した。

まず透水係数を小さくした場合、地表面に降り注いだ雨は表層水として表面付近に集まり、間隙水圧の上昇につながることが判明した。地質構造を考慮した場合、雨は地質境界に沿って流れ、地下水位の上昇や間隙水圧の上昇につながることが分かった。また破砕帯まで考慮することにより、破砕帯と地層境界に挟まれた部分では水位の上昇をより促進させる結果となることが分かった。モデルの幾何学的な違いでは、未掘削のモデルでは、地下水位線までの距離が遠く、地下水位の上昇量は比較的小さくなることが分かった。地質境界と破砕帯の両方を考慮した場合では、破砕帯と地質境界に挟まれた部分に関しては採掘途中でも、採掘終了状態でも大きな水位上昇を示し、両者に大きな違いは見られなかった。このように、地質境界や破砕帯などモデルの地質学的違いや、採掘状況などの幾何学的な違いによって、間隙水圧や地下水位に大きな影響を与えることが分かった。したがって、地下水や、降雨状況なども考慮した上で、残壁の安定性を議論する必要があると考えられる。

しかしながら、本研究では初期水位レベルを一定にし、簡略化された不飽和特性線図を用いたものに留まっており、実際の安定性評価に応用する際には、岩盤の正確な地下水位や不飽和特性の測定など、使用する物性の決定方法についての検討が必要であると考えられる。

参考文献

1) 金子勝比古・野口義文・曽田健・波津久亮　:岩盤内変位計測による掘削斜面の安定性評価、資源と素材、Vol.112、 pp915-920(1996)
2) 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、p182-189 (2004)
3) 金子勝比古・加藤昌治・中村直昭：露天採掘斜面の3次元応力解析法、石灰石(292)(1998)
4) 吉田秀典・野崎郁郎：降雨時における鉱山残壁の安定性に関する研究、土木、VoL54A,、p102-113
5) 西村拓馬・吉田秀典：不飽和特性が岩盤斜面の安定性に及ぼす影響に関する数値解析的研究、土木、VoL57A,、p125-135