亀裂等水文地質構造を反映した 3 次元FEM浸透流解析 による地下水排除工の効果判定 —大平地すべり地区を例として—

Effect of drainage facilities using 3 D seepage flow analysis reflecting
hydro-geological structure with aspect cracks in a landslide
—Example of analysis in OODAIRA Landslide area—

山田正雄^{a)}*・鵜飼恵三^{b)}・鎌田 智^{a)}・福田 毅^{c)}・小澤岳弘^{d)}

Masao YAMADA, Keizo UGAI, Satoshi KAMADA, Tsuyoshi FUKUDA and Takehiro OZAWA

Abstract

Stratum water and crack water through cracks of bedding planes and of joint surfaces give a great influence on the amount of displacement of moving mass in a landslide area. In this paper, at first, we examined the three-dimensional modeling of seepage flow analysis reflecting aspect cracks and then calculated water pressure distribution specifically by melting snow water in order to grasp a change of water pressure distribution of before-and-after construction of drainage facilities of well and drainage pipe. On that occasion, we made accurate modeling structure of various cracks and drainage facilities of well and drainage pipe. Using the results derived by the seepage flow analysis, we carried out a three-dimensional stability analysis. Based on the result of the stability analysis, we evaluated the stability of the landslide slope and the effect of drainage facilities. In OODAIRA Landslide area where landslides were reactivated by melting snow, by applying the above mentioned analysis, we were able to obtain the acceptable results that matches field situation between fluctuation of water pressure and displacement of moving mass. We were then able to simulate effectiveness of drainage facilities.

Key words : hydro-geological structure model, three-dimensional seepage flow analysis, three-dimensional stability analysis, effect of drainage facilities

和文要旨

地すべり地内では、地層中を流動する地層水とすべり面・節理等のいわゆる亀裂を介して流動する裂か水が地すべり変動に大きな影響を与える。本論文では、最初にすべり面・節理等の亀裂を含む水文地質構造を反映した3次元解析のモデル化について検討し、次に3次元FEM浸透流解析を実施し、融雪時における地下水排除工の施工前後の間隙水圧分布の変化を求めた。ここで、地盤および地下水排除工については、すべり面・節理等の亀裂を含む3次元水文地質構造や集水井・集水ボーリング・排水管の対策施設をできるだけ忠実にモデル化した。この浸透流解析より得られた結果をもとに3次元安定解析を実施し、地すべり斜面の安定度を評価することにより、地下水排除工の効果判定を行った。融雪時に地すべりが再活動する大平地地区を解析対象に上記解析手法を適用して、観測水位や地すべり変動と適合する解析結果を得ることができ、地下水排除工の効果を予測することが可能となった。

キーワード：水文地質構造モデル、3次元浸透流解析、3次元安定解析、地下水排除工の施工効果

1. はじめに

地下水は地層水と裂か水から構成される。地層水はあらゆる方向に水体的に連続するのに対し、裂か水は亀裂、節理、断層といわれる地層中の断裂系統（水脈）を通して水体的に連続する。地中では地層の層界や地下水制限床の存在により、層状に水を包蔵している帯水層が形成される。また裂か水面は横方向に断裂がない場合には横方向への直接の水の動きはなく、裂かを通して連続する有圧の地下水面となっている（申，1989）。地すべり地では地下水が亀裂帯や地層中を流動する地下水文構造が地すべり変動に大きな影響を与える。

最近の研究報告でも3次元浸透流解析が取り上げられるようになってきた。着眼点はそれぞれ異なるものの、地下水の流動特性や地下水排除工の施工効果の評価を目的として3次元浸透流解析を実施している。

浅野他（2005）は、地層とすべり層に透水係数を与え、集水井については、排水トンネルへの接続を考慮して揚水孔の節点に透水性の高い線形一次元要素を配置してモデル化している。井良沢他（2002）は帯水層別に水平に2次元モデルを重ね合わせた積層3次元モデルを用い、集水井については領域における集水井の排水条件を変化させ、集水管については集水管の体積比を考慮して要素の透水係数を補正することによりモデル化している。岩堀他（2005）は、集水井については集水ボーリングを含めた集水井の排水流量を既知流量境界としてモデル化している。國眼他（2005）は、地下水排除工の排水能力に比流量およびコンダクタンスという概念を導入している。また、透水係数については、透水試験、揚水試験結果に

* 連絡著者／corresponding author

a) 国土防災技術株式会社

Japan Conservation Engineers Co., Ltd.
〒330-0074 さいたま市浦和区北浦和2-12-11浦和青葉ビル
Urawaku Kitaura 2-12-11 Saitamashi

b) 群馬大学社会環境デザイン工学科

Gunma University, Department of Civil and Environmental Engineering

c) 株式会社地層科学研究所

Geoscience Research Laboratory Co., Ltd.

d) 長野県林務部

Nagano Prefecture, Forester Department

地下水検層や一般値等を加味して与えている点で, おおむね共通している。角田他 (2004) は, 集水ボーリングを透水性の高い領域としてモデル化し, それを集水井モデルとしてFEM浸透流解析を行い, 集水井の最適配置計画を検討している。

著者らは, 地下水文構造の要素の方向や連続性によって地下水の流れがどのように変化するかを検討するため, 水文地質構造の実態に対応してソリッド要素, ジョイント要素, 線要素等種々の要素が設定可能な3次元FEM浸透流解析を用いることにした。すべり面と節理に関わるものを面亀裂, 集水ボーリングと排水管に関わるものを線亀裂ととらえ, 要素の境界部に透水性のジョイント要素や線要素を付加した3次元FEM浸透流解析を実施した。

著者らが行った3次元浸透流解析は次のような特徴をもっている。最初にすべり面・亀裂状節理等の亀裂構造および節理系高透水性ゾーンを考慮した3次元水文地質構造のモデル化を行った。すべり面・亀裂状節理についてはジョイント要素, 節理系高透水性ゾーンについては透水係数の大きいソリッド要素としてモデル化した。また, 地下水排除工に関しては, 集水井をその形状と規模をできるだけ忠実に反映した形で, 集水ボーリングと排水管を一次元亀裂要素として, モデル化した。地盤の透水係数については, 最初に2次元定常解析と2次元非定常解析 (融雪水量に対する感度分析) で地盤の透水係数を設定し, 次に3次元非定常解析で観測水圧に適合するようにすべり面・亀裂状節理・高透水性ゾーンの透水係数を設定した。

2次元定常解析は, 主断面方向の水文地質構造をもとに, 縦断面ごとに水圧面形状が地下水排除工施工前の観測水圧面に適合するように2次元FEM浸透流解析を実施した。2次元非定常解析は, 地下水排除工設定前の融雪時における観測水圧の時系列データに適合するように2次元FEM浸透流解析を実施した。さらに, すべり面および発達した節理構造の3次元的水文地質構造 (とくに横断方向) を反映するように, すべり面と亀裂状節理の面亀裂と亀裂系高透水性ゾーンをモデル化し, 融雪水量のデータを基に観測水圧の時系列データに適合するように3次元FEM浸透流解析を実施した。

また, 地下水排除工の効果判定のための地下水排除工については以下の方法でモデル化した。

- ①集水井は, その規模をそのままモデル化し, 円形状と等価の四角形ボックスとして与える。
- ②集水ボーリング孔からの平均的な排水量は, 孔ごとの排水量のバラツキが大きいため, 平均的な排水量に相当する透水係数を集水ボーリングに与える。
- ③集水井を連結し地上へ地下水を排水する排水管の透水係数については, 集水ボーリング孔との比較から, 集水ボーリングの透水係数に排水管と集水ボーリング孔の断面積比を乗じた値を与える。

本論文では, とくに, 融雪時に地すべりが再活動する大平地すべり地区を対象として, 亀裂等水文地質構造を反映した3次元FEM浸透流解析を実施し, 水位観測専用孔で観測される間隙水圧の時系列データとの比較から亀裂を考慮した3次元FEM浸透流解析モデルの妥当性を検証するとともに, 地下水排除工施工後の融雪時における地下水排除工の施工効果を判定した (図-1参照)。

2. 大平地すべり地区の概要

2.1 調査地の概要

大平地すべり地区は, 図-2に示すように, 長野県北安曇郡小谷村役場より北北西約8kmに位置し, 紙すき牧場の平坦地形を北端とし南端を土沢とする大きな馬蹄形を呈している。

保全対象は, 大平集落, 地内を横断する村道紙すき牧場線, 来馬集落等である。

地すべり防止区域内には馬蹄形状の地すべり活動が活発なA1ブロックが存在する (図-3参照)。

A1ブロックは, 上部から中部が概ね傾斜 $20\sim 30^{\circ}$ で所々平坦地形がみられるような緩斜面で, 下部では土沢に向け傾斜 $40\sim 50^{\circ}$ の急崖となっている。このうち土沢に面した急崖は崩壊地を形成している。1995年の豪雨によりA1ブロックの下部斜面において崩壊が発生し, さらに1999年の融雪により拡大崩壊が発生している。

A1ブロックでは, 1997年以降地すべりの調査・観測

図-1 3次元浸透流解析の実施方法

Fig.1 Flow chart of three-dimensional seepage flow analysis

図-2 調査位置図
Fig. 2 Location map

が行われ、地すべり抑制工として集水井工等の地下水排除工を中心とした対策工が導入され、その都度動態観測によって、その効果判定が行われているところである。現在は地下水排除工により地すべりが安定化しつつある。

2.2 地質構造

調査地およびその周辺の地質は、中生代に堆積した来馬層群の石炭薄層を挟んだ砂岩頁岩層が分布しており、それを風吹岳～白馬乗鞍起源第四紀の安山岩質火山碎屑物（火山礫凝灰岩）が覆っている。

地すべり地内は、来馬層群の砂岩泥岩互層で構成されるが、北側の尾根および紙すき牧場などの地形的な高まりを見せている箇所では火山碎屑物がみられる。火山碎屑物は30cm程度の亜円礫を含み、半固結状態のものとルーズで未固結状態のものとが存在する。

砂岩頁岩層は、土沢河床部では比較的硬質であるものの、土沢兩岸の斜面内では破碎が著しく、とくに挟炭層部は岩片化・粘土化が著しい。地層の走向は土沢下流（G1）から上流（G5）に向かって、WNW-ESE→WSW-ENEと変化し、南に20～60°傾斜していることが確認されている。地すべり地内の滑落崖や観測井で確認された層理面の走向は、ほぼEWで南に20～45°傾斜しており土沢で確認される構造と一致する。

右岸側の沢の露頭で確認される基盤の層理面の走向傾斜がN65°E32°S、節理面のそれはN65°W70°Nである。

A1ブロック末端部の崩壊斜面をみると、岩片状に著しく破碎した砂岩泥岩と、亀裂は多いが比較的新鮮な砂岩泥岩の層界があり、その標高は北から南に徐々に下がっている。この層界は、付近の来馬層群の層理面の走向傾斜E-W30°～40°Sとほぼ合致する。すなわち、地すべり左側壁から末端部にかけては、基盤の層理面に規制された流れ盤であると考えられる。このことは、調査ボーリングおよび各種孔内観測によっても裏付けられている。また、空中写真の判読からも、すべり右側壁部の

沢右岸斜面ではN-S32°Eの均質な斜面がまっすぐに延びており、地質規制面の存在がうかがえる。

2.3 すべり面の構造

斜面上部左岸側に位置するNo.1集水井（図-3参照）において、GL-33.5mにすべり面を確認している。すべり面は中生代ジュラ系来馬層の炭質頁岩層強化部に形成されており、走向傾斜はN63°E22°S、そして集水井内で確認された擦痕によると地すべり移動方向はS57°E方向に12°の傾斜を示し、縦断線方向と解析断面のすべり面傾斜とはほぼ一致している。またすべり面の最大傾斜方向は右側壁方向を向いている。

すべり面は、葉片状に破碎が進んだ黒色炭質頁岩の上の粘土化が著しい炭質頁岩強化層内に形成されている。基岩側は堅硬な砂岩の岩盤となっており、直上の葉片状破碎部は層厚15cm程度で分布し、含水は乏しい。

2.4 地すべりの地下水文状況と活動状況

地すべり左側壁およびその外側は、透水性の高い凝灰角礫岩およびその崩積土層で構成されている。凝灰角礫岩層および崩積土層内を浸透した地下水が、基盤の層理面に規制されたすべり面（左側壁から右側壁下方へと傾斜している）へ直接浸透する。実際No.1集水井（図-3参照）では融雪期に500リットル/分を越える集水量が確認されたこともある。一方、比較的ブロック中央部に近いNo.4集水井（図-3参照）で地すべり頭部からの地下水流入があり、左側壁側のみではなく、地すべり頭部および右側壁側からも地下水が流入していると考えられる。当地すべりは、左右非対称の横断形状を有し、地すべり移動方向としては、右側壁側にすり付くように移動している。

地下水位の上昇と地すべり変動との一例（BV12-4）を図-4に示す。図より、2002年3月6日以降水位-22.9mで歪計の歪が大きく変動している。すなわち、豪雨期にはほとんど変動せず融雪期のみ歪が累積変動しており、臨界水位が-22.9mと捉えられている。

集水井工数の増加によって年々融雪期の歪変動量も鎮静化する傾向にあるが、これまで融雪期には多数の歪計において顕著な歪の累積がみられる。

また2003年からGPS観測が実施され、融雪期における地すべり変動が2005年まで捉えられており、移動方向は縦断線方向と一致している。

これまでの観測において、無雪期での降雨が臨界水位を超える状況には至らず、融雪期のみ地すべり活動が活発化することから、降雨よりも融雪水量の方が間隙水圧上昇に与える影響がかなり大きいことがうかがえる。

3. 3次元FEM浸透流解析手法

3.1 3次元地層構造モデルの作成

大平地すべり地区では、移動層および基岩層は節理等の亀裂が発達しているため、定常時におけるボーリング孔の水位観測では孔内水位が形成されていない。しかし、

図-3 調査地平面図

Fig. 3 Detailed map of study region

図-4 臨界水位 (BV12-4)

Fig. 4 Critical water pressure (BV12-4)

融雪期や豪雨期には間隙水圧の上昇が確認されており、設置した水位観測専用孔により、すべり面付近に流動する有圧地下水が確認されている。

これまでの調査結果から、地下水の供給源としては、冠頭部および右側壁 (亀裂状節理) とその外側の高透水性ゾーンからの浸透、斜面上方の岩盤内からの流入、地表面亀裂からの地表水の浸透があげられており、左側壁

図-5 解析モデル

Fig. 5 Analytical model

およびその外側は透水性のある凝灰角礫岩およびその崩積土層で構成されキャップロック構造を呈していること (自由地下水の浸透), および基盤の層界面 (不連続面) が左側壁から右側壁下方へと傾斜していること等が判明

している (図-5 の解析モデル参照)。当地すべり地区では, 雨水や融雪水等がすべり面へ伝わり有圧地下水を形成するという地下水文特性を有している。

水文地層構造モデルは, ボーリングの位置・地盤高, 地層構成 (地質区分) の情報をもとに各ボーリング間の地層データを連結して作成した。ボーリング調査データから地層構造モデルを作成する方法については, 山田他 (2006) を参照されたい。

FEM 浸透流解析を行う場合, すべり面・亀裂状節理等や地下水排除工 (集水井, 集水ボーリング, 排水管) を適切な要素で表現する必要がある。

これまででも, すべり面・亀裂状節理等については, すべり土塊の地盤の透水係数よりも透水係数が高いとして高透水性ゾーン要素として与え (浅野他, 2005), 集水ボーリングや排水管についても高透水性ゾーン要素や透過性の高い一次元要素として与える (浅野他, 2005; 井良沢他, 2002) 方法があった。著者らは, すべり面・亀裂状節理等の面亀裂, 地下水排除工について, 形状や規模等をできるだけ忠実に反映したモデルを作成するように留意した。

3.2 すべり面・亀裂状節理の設定

すべり面や亀裂状節理の透水係数を設定する上で, 地盤透水性との関係において予備的な定性的評価を得るために図-6 に示す簡易モデルを用いた検討を行った。簡易モデルは, 地盤の透水係数やすべり面の形状および厚さの範囲を現地条件に近い形で与え, 地盤に対するすべり面の透水係数の違い, すべり面の形状および厚さが水位低下にどのような影響を及ぼすかについての定性的評価をするためのモデルである。

融雪期に地すべり変動がみられる再活動型の岩盤地すべりのすべり面は, すべり面粘土で構成される面の直上にある厚さをもった破碎・粘土化したせん断亀裂が位置すると考えられている。そして, このせん断亀裂はすべ

図-6 検討のための簡易モデル (亀裂勾配45°-22°-0°-22°-45°の例)

Fig. 6 Simplified model for technological study (sample pattern of inclined angle 45°-22°-0°-22°-45°)

り面への地下水の通路となっている (山田他, 2000)。また亀裂状節理は, 風化が進み, 雨水が地中へ浸透する水の通路となっている。

すべり面は, せん断亀裂帯の中に形成される主変位せん断面を連ねたもので, 一定の厚みを有するゾーンのものである (申, 1995)。著者らは, 過去に, 地層の層界, 節理や断層に関わる面亀裂を対象に要素の境界部に透水性のシェル要素を付加することにより 3 次元浸透流解析を実施し水みちを表現している (山田他, 2003; 地すべり学会, 2006)。今回, 著者らは, 地盤要素および集水井要素との兼ね合いから 3 次元浸透流解析においては, すべり面を面方向に卓越した流れをもつ面亀裂として, FEM 解析上厚みを有するジョイント要素として扱うことにした。本質的には透水性シェル要素と同じものである。厚みを有するジョイント要素の模式図を図-7 に示す。厚みを有するジョイント要素はパラメータとして厚さをもっているにすぎない (図では節点は離れて描かれているが, 実際は重なっている)。透水係数とすべり面の厚さによりすべり面における流束を任意に設定できる。面亀裂の構成式は表-2 に示すとおりである。

大平地すべり地区の地盤は崩積土, 砂岩, 頁岩層からなり, 後述する4.2節の2次元浸透流の定常解析結果と観測水位との適合から, 簡易モデルにおける地盤の平均的な透水係数 k_g を $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とした。後述する6.1節の3次元浸透流の定常解析結果と観測水位との適合から, すべり面や亀裂状節理の透水係数は地盤の透水係数のおよそ数10~200倍の透水係数があるものと考えられる。すべり面や亀裂状節理が水位低下に及ぼす影響を調べるため, ここでは, すべり面の透水係数 k_s および亀裂状節理の透水係数 k_{cs} を, それぞれ $2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ とした。

(1) ソリッド要素とジョイント要素

すべり面をジョイント要素としたケースとすべり面にジョイント要素を設定しないですべり面直上の地層を高透水性のソリッド要素としたケースを比較し, 解析結果が等価となるソリッド要素の高さを求めてみた。

図-7 厚みを有するジョイント要素
Fig. 7 Joint element with thickness
- 0°-22°-45°)

その結果, 以下の知見が得られた。

- ①すべり面厚さを一定にした場合, 解析結果が等価となるソリッド要素の厚さはジョイント要素の透水係数にほぼ比例する。
- ②すべり面の透水係数を一定にした場合, ジョイント要素の厚さが増加すると解析結果が等価となるソリッド要素の高さは減少する。ここでは, すべり面厚さを 3 倍にした場合ソリッド要素の厚さは元の厚さの約 0.76 となった (厚みをもつすべり面では卓越した流束が形成されるため, ソリッド要素の厚さが元の厚さの $1/3$ になるわけではない)。
- ③ソリッド要素の厚さが 5 m 以上になると, ソリッド要素の透水係数はジョイント要素の厚さにほぼ無関係に地盤の透水係数に近い一定値になる。

これらのことから, すべり面の厚さや透水係数が間隙水圧分布に与える影響は, それぞれ非線形の効果, 線形の効果をもたらす, すべり面の厚さの効果は思ったほど影響が大きくはない。ソリッド要素に大きな透水係数を与える方法では観測水位との適合をとる上で要素の大きさを決めるのがむずかしい。むしろ, すべり面の厚さを知るための調査をして, 観測水位に適合するようにすべり面の透水係数を調整する方法がより合理的であると考えられる。

一方, 亀裂状節理については, すべり面の厚さより小さな亀裂幅を与え, すべり面より透水係数を小さくする必要がある。

(2) すべり面形状

斜面の上部, 中部, 下部の位置により横断方向のすべり面形状が異なる。ここではすべり面形状が水位低下に及ぼす影響を調べてみた。

すべり面形状が斜面の上部, 中部, 下部の位置に対応される形で試算ケースを次の 3 つとし, 中央縦断面におけるそれぞれのケースの相対水位低下量を調べた (傾斜角の並びは図-6 を参照されたい)。

①勾配 $60^\circ - 30^\circ - 0 - 30^\circ - 60^\circ$

②勾配 $45^\circ - 22^\circ - 0 - 22^\circ - 45^\circ$

③勾配 $30^\circ - 15^\circ - 0 - 15^\circ - 30^\circ$

ここでは, すべり面の厚さと透水係数をそれぞれ 15 cm, $k_{is} = 2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ とした。

その結果, 斜面下部ではすべり面形状の勾配が緩いほど水位低下が大きく, 斜面上部では, 逆にすべり面形状の勾配が急なほどやや水位低下が大きいという結果が得られた。

地すべり地区は一般に斜面上部のすべり面の横断勾配がやや急で斜面下部のすべり面横断勾配が緩い傾向が多い。そのため, すべり面形状が水位低下に及ぼす影響は勾配の緩い斜面下部の方が勾配の急な斜面上部よりも水位低下が大きいと考えられる。

4. 地盤および亀裂要素の透水係数の設定

4.1 境界条件

解析領域の端部の境界条件は, 図-3 に示すように, 山側が常に一定の水圧に保たれているとする固定水圧境界, 河川を浸出面境界, 谷部を横断方向に水の出入りがない流量 0 境界として設定した。

4.2 地盤の透水係数の設定

浸透流解析に用いる不飽和に関するパラメータは, 試験値がないため, 不飽和パラメータ, 比貯留係数, 飽和体積含水率, 最小含水量を一定値とし, ここでは, 計算の収束性をよくするため, 比貯留係数を $S_s = 1 \times 10^{-0.4}$, 飽和体積含水率を 0.4, 最小含水量 0 と与えた。

2 次元断面において年平均降雨を用いて定常解析を行った結果が観測水位に適合するように各地層の透水係数を設定した。解析水位が観測水位にほぼ一致するようにボーリング調査結果や地下水検層等を見直すことにより, 地層の風化度に着目して水文地質断面図を作成した。水文地質断面図の一例 (I 測線) を図-8 に示す。

次に融雪水量の時系列データを用いて観測水位に適合するように融雪水量に対する感度分析を行った。非定常時の解析水位と観測水位との誤差が大きい場合は, 各地層の透水係数を設定し直す必要がある。その際観測水位の変化が大きい箇所に着目して透水係数を設定すると, おおむね観測水位と適合させることができる (図-8 参照)。地盤の透水係数を表-1 に示す。

4.3 亀裂要素の設定

(1) すべり面および亀裂状節理

すべり面の厚さおよび透水係数はそれぞれ 15 cm, $2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ としてジョイント要素として与えた。また, 卓越した亀裂状節理は, ジョイント要素厚さを 5 cm 程度として, すべり面よりも亀裂単位幅あたりの透水係数が小さいと考えられるため透水係数を $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ として与えた。

(2) 節理系高透水性ゾーン

当地すべり地区の砂岩泥岩互層の走向傾斜は, $N65^\circ E 32^\circ S$, 節理の走向傾斜は $N65^\circ W 70^\circ N$ で, 節理面はかなりの急角度で右岸側壁部から中央部にかけて発達している。右岸側壁部の節理面はすべり面側壁を形成しているため, 卓越した節理面となっている。また, 地すべりブロックの右岸側から右岸側の沢にかけてのゾーンは, 節理が発達しており, 比較的ブロック中央部に近い箇所でも地すべり頭部からの地下水流入があり, 右側壁部からも地下水が流入していると考えられる。そのため, 地すべりブロックの右岸側ゾーンを節理系高透水性ゾーンとして取り扱った。

高透水性ゾーンは, 表-1 に示すように, 卓越した亀裂状節理 ($2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) よりも透水係数が小さく, 地盤 ($5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) よりも透水係数が大きいと考えられることから, 透水係数を $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ として与えた。

図－8 2次元定常解析例（I 測線）

Fig. 8 Example of two-dimensional steady analysis (I line)

表－1 地盤と亀裂の透水係数

Table 1 Coefficient of permeability of geological layer and cracks

材料名	透水係数(m/sec)	
崩積土	5.00E-04	2次元逆解析で設定
崩積土	1.00E-04	
砂岩(高透水)	1.00E-05	
砂岩	5.00E-06	
砂岩(低透水)	1.00E-06	
頁岩	5.00E-07	3次元解析で追加設定
頁岩(低透水)	1.00E-07	
すべり面	<u>2.00E-03</u>	
節理	<u>2.00E-04</u>	
高透水性層	<u>1.00E-04</u>	

5. 3次元FEM解析における地下水排除工の取り扱い

5.1 集水井の設定

地下水排除工を再現するために、Ⅲ測線上のNo1, No2, I 測線上のNo7, No8, I 測線とⅡ測線の間のNo3, No6, Ⅱ測線上のNo4, No5の計8箇所に集水井, 集水ボーリング, 集水井と集水井を連結する排水管, 最下端の集水井から地上の水路へ連結する排水管をモデル化した。

集水井は本来断面が円形であるが, 地盤の要素がソリッド要素で作成されているため, 集水井を正方形断面としてモデル化ができれば, モデル化が非常に容易になる。集水井の断面積を同じにして円形断面 ($\phi 3.5\text{m}$, $A 9.62\text{m}^2$) と正方形断面 ($3.1\text{m} \times 3.1\text{m} = 9.61\text{m}^2$) で簡単なモデルを作成して比較計算を行ったところ, 円形断面でも正方形断面でも同等の間隙水圧分布結果が得られたので, 集水井を正方形断面として解析モデルを作成することにした。

5.2 集水ボーリング, 排水管の設定

集水ボーリング, 排水管は, 線状亀裂モデルとしてモデル化を行った。

線状亀裂モデルは, 図－9に示すような一次元亀裂要素で亀裂方向にのみ透水係数を有するものである。地盤との合成においては, 地盤の透水係数は亀裂の透水係数より非常に小さく, 一次元亀裂要素の周囲から地盤へ向かう水の流れを無視できるほど小さい。

線状亀裂モデルは線状の亀裂が複雑に入り組んだ地盤の浸透流解析を行う場合, 亀裂の配置の変更を行う際に改めてモデリングから行う必要があるため非常に複雑となる。そこで, 図－9のように, 地盤要素内を亀裂が貫通するときに, 亀裂の透水係数を地盤の透水係数と合成することを考えた。

線状亀裂を取り入れた地盤要素の構成式は表－2に示すとおりである。亀裂が貫通する地盤要素の体積を v_s , 地盤要素を貫通する部分の亀裂の体積を v_f とすると, 亀裂を除いた地盤部分の体積は $(v_s - v_f)$ となる。地盤の透水係数マトリックスを $[K_s]$, 亀裂の透水係数マトリックスを $[K_f]$ とすると, 亀裂を含んだ地盤要素の透水係数は,

$$[\bar{K}] = \frac{v_s - v_f}{v_s} [K_s] + \frac{v_f}{v_s} [K_f] \dots\dots\dots (1)$$

として求めることができる。

地盤が貫通する地盤要素は亀裂と直交する方向に要素として地盤要素 (ソリッド要素) と同じ透水係数をもたせるため, ソリッド要素から地盤が貫通する体積割合を減じている。

当地すべり地区は, 融雪水量が多量でその分布が様でないこと, 打設方向によっても集水量が異なる等から集水ボーリング孔からの集水量にバラツキがある。そこで集水ボーリング孔において測定された集水量から個々の集水ボーリングの集水効果を把握し, それに見合う集水井の透水係数を与えることにした。2005年のNo1～No5集水井の集水量は, 集水ボーリング1個あたり2～20リットル/分 (平均値10リットル/分) である。これより集水ボーリング ($\phi 66\text{mm}$) の透水係数をおおむね5 cm/sの線状亀裂としてモデル化した。また, 集水井を連結して地上へ排水する排水管については, どちらも管勾配が緩いため, 集水ボーリングと同様に考え, 集水ボーリング孔とは断面積の異なる線状亀裂としてモデル化し,

表-2 地盤および亀裂の構成式
Table 2 Constitutive equation of soil and crack

地盤要素 (ソリッド要素)	面亀裂 (ジョイント要素)	線亀裂を取り入れた地盤要素
支配方程式は共通 $(\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + q, \quad u_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}, \quad h = \psi + z$ $\beta_s: \text{飽和時: 1, 不飽和時: 0}; \quad S_s: \text{亀裂の比貯留係数}, \quad c: \text{比水分容量}$ $h: \text{全水頭}, \quad \psi: \text{圧力水頭}, \quad z: \text{位置水頭}$ $u_i: \text{ダルシー流速}, \quad K_{ij}: \text{透水係数テンソル}, \quad q: \text{単位体積あたりの流入/流出項}$		
透水係数テンソル 直交異方性であれば、 $[K] = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix}$	局所座標系における面亀裂の透水係数テンソルは $[K'] = \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_n \end{bmatrix}$ $K_s: \text{亀裂面内方向の透水係数}$ $K_n: \text{亀裂厚さ方向の透水係数}$ 全体座標系に直すと $[K] = [Q]^T [K'] [Q]$ $[K]: \text{全体座標系の透水係数テンソル}$ $[K']: \text{局所座標系の透水係数テンソル}$ $[Q]: \text{座標変換}$	局所座標系における線亀裂の透水係数テンソルは $[K'_f] = \begin{bmatrix} K_L & 0 & 0 \\ 0 & K_T & 0 \\ 0 & 0 & K_T \end{bmatrix}$ $K_L: \text{線亀裂方向の透水係数}$ $K_T: \text{線亀裂方向でない透水係数}$ 全体座標系に直すと $[K_f] = [Q]^T [K'_f] [Q]$ $[K_f]: \text{全体座標系の透水係数テンソル}$ $[K'_f]: \text{局所座標系の透水係数テンソル}$ $[Q]: \text{座標変換}$ 地盤要素の透水係数と合成すると $[\bar{K}] = \frac{v_s - v_f}{v_s} [K_s] + \frac{v_f}{v_s} [K_f]$ $v_s: \text{地盤要素の体積}$ $v_f: \text{線亀裂の体積}$

図-9 線亀裂の取り扱い
Fig. 9 Treatment of the line crack

排水管の透水係数を10cm/sと与えた。

6. 3次元浸透流解析結果とその検証

6.1 水文地質構造解析モデルの3次元浸透流定常解析

すべり面、節理等を全く考慮しない場合、すべり面と亀裂状節理面を設定した場合、高透水性ゾーンを設定した場合、それらをすべて設定した場合のおおのについて

て(図-5参照)3次元浸透流定常解析を実施した。すべり面と亀裂状節理面、節理系高透水性ゾーンが間隙水圧低下に及ぼす影響について以下に述べる(図-10参照)。

(1) すべり面と亀裂状節理面を設定した場合

すべり面と亀裂状節理面を設定した場合、間隙水圧低下の影響が最も大きいのはⅡ測線で、B測線より斜面上部で5~15m程度の間隙水圧の低下がみられる。しかし、Ⅳ測線では間隙水圧の低下は5m程度とⅡ測線より小さく、Ⅰ測線では目立った間隙水圧の低下がみられない。

層理に沿ったすべり面と卓越した節理面が交差しているⅡ測線が最も間隙水圧の低下が大きい。この箇所は、すべり面標高が測線の中で最も低く、すべり面の横断勾配が緩い箇所である。

(2) 節理系高透水性ゾーンを設定した場合

高透水性ゾーンを設定した場合、間隙水圧低下の影響が最も大きいのはⅣ測線で、水平距離250m~350m区間で最大20mの間隙水圧の低下がみられる。また斜面上部の間隙水圧の低下は、斜面下部において間隙水圧の上昇をもたらしている。

Ⅱ測線ではB測線より上で最大5m程度の間隙水圧の低下がみられ、Ⅰ測線では目立った間隙水圧の低下がみ

られない。高透水性ゾーンをⅡ測線とⅣ測線の間に設定しているため、Ⅳ測線が最も間隙水圧の低下が大きい。調査結果から上端をA測線とB測線の中間、下端をD測線として高透水性ゾーンの範囲を設定しているが、高透水性ゾーンの影響がみられるのは、A測線とB測線の中間より下流側となっている。この箇所は斜面上部の岩盤内からの地下水や地表亀裂からの地表水が流入する位置である。

(3) すべり面・亀裂状節理, 節理系高透水性ゾーンをすべて設定した場合

すべり面と亀裂状節理面および節理系高透水性ゾーンを考慮した現地モデルについてみると、Ⅱ測線とⅣ測線区間が最も間隙水圧の低下が大きい。すべり面が左岸側から右岸側に向かって深く、右岸側に硬質な基盤があることにより、Ⅱ測線とⅣ測線に地下水が集中する水文地質構造をもつという現地の地質規制条件を反映している。また、斜面下部ではⅣ測線側により地下水が集中するた

め、斜面下部の間隙水圧の上昇が大きい。

6.2 地下水排除工施工前後の3次元浸透流非定常解析

地下水排除工施工前の融雪時における3次元浸透流解析を実施し、地下水排除工の施工効果について検討した。2004年9月に集水井5基完成 (No.1～No.5), 2005年12月にさらに3基追加し合計8基完成している。集水井5基の施工位置は、図に示すように、Ⅲ測線のNo.1, No.2 (斜面上部) とⅡ測線のNo.3～No.5 (斜面中部) の5基である。追加の集水井3基は、斜面上部のNo.6～No.8である。

次の3つの融雪期について3次元浸透流解析を行った。

①ケースA (集水井施工前) : 2002年2月～4月

②ケースB (集水井施工5基) : 2005年3月～5月

③ケースC (集水井施工8基) : 2006年2月～5月

図-11にケースA, ケースB, ケースCについての非定常浸透流解析結果を示す。図の解析水位は、解析期間中の最高解析水位を示している。

図-10 3次元定常浸透流解析結果

Fig. 10 Results of three-dimensional steady analysis

図-11 3次元非定常浸透流解析結果

Fig. 11 Results of three-dimensional unsteady analysis

集水井施工後のケースB, ケースCの解析結果について以下に考察する。

(1) 集水井5基施工 (ケースB) の場合

Ⅲ測線では, 集水井No.1とNo.2により, 集水井付近の間隙水圧が低下しているのがわかる。また, Ⅱ測線でも, 同様に集水井No.4とNo.5により, 集水井付近の間隙水圧が低下している。

しかし, Ⅳ測線では全体的に逆に間隙水圧がケースAよりも高くなっている。これは当地すべり地区では, 2005年の融雪水量が例年にくらべて非常に多かったためである。そのため, 集水井が5基完成しているにもかかわらず, Ⅳ測線では間隙水圧がケースAよりやや増加している結果となっている。Ⅰ測線では, ケースBの方がケースAよりも微妙に間隙水圧が増加している。

(2) 集水井8基施工 (ケースC) の場合

2006年の融雪期は, 例年の融雪水量に戻っており, ケースBよりも全般的に間隙水圧が低下している。Ⅰ測線では, 集水井No.7とNo.8により, 集水井付近の間隙水圧が低下している。Ⅱ測線でも集水井No.6により集水井付近の間隙水圧が低下している。

6.3 解析結果と間隙水圧との照合

図-12に, 集水井8基完成時の浸透流解析値と観測値との照合の例を示す。図中の融雪水量は気象観測局 (図-3参照) において平面ライシメータ (集水ます) から

融雪水をハンドホールへ導き転倒ます型流量計で計測されたものである。

BV13-1, BV13-5とも解析値が観測水位の時系列変化とおおむね適合している。また集水井施工後の間隙水圧の低下はBV13-1の方がBV13-5よりも大きくなっている。

解析値と観測値のずれは斜面長700mに対しておおむね10m以内に収まっているが, 水位レベルをそれ以下に合わすまでには至っていない。しかし, 現地における融雪水量が一様でないこと, 現地の地層構造をモデル化する上での制約, 観測値の計測誤差等を考えると, 解析結果は融雪水に対する観測水位の時系列変化はおおむね説明できていると考えられる。

7. 3次元安定解析による危険度評価

7.1 3次元安定解析方法

鵜飼他 (1987, 1989) は, 任意の地形, すべり面形状をもつ斜面に適用可能な簡易ヤンプ法による斜面の3次元安定解析式を提案している。著者らは, 3次元浸透流解析から得られる時系列水圧面データに対し, 鵜飼他が提案する任意形状の地すべり土塊に適用可能な3次元簡易ヤンプ法を適用して, 3次元安全率を算定することにより地すべり土塊の斜面安定度を評価した。3次元安定解析を実施する上で, 地表面, すべり面, 水圧面の3次元メッシュデータとせん断強度定数が必要である。水圧面はFEM解析で得られた各要素の水圧データから水圧等値線図を作成して求めた。地形および地すべり土塊面, 水圧面をGIS上で読み取り地表面, すべり面, 水圧面の3次元メッシュデータを作成した。ここで地すべり土塊の微形状が反映するようにメッシュ間隔を5mとしている。

7.2 すべり面土質強度

No.2集水井の不攪乱試料を用いたすべり面せん断試験の結果では, せん断抵抗角 ϕ' は, $\phi' = 8.53^\circ$ と得られている。当地すべり地区は, 右側壁に規制され, すべり面形状が左側壁から右側壁下方へと傾斜している特異な地質構造を示しており, このすべり面形状の抵抗分を粘着力 c' に反映させるものとする。2002年3月6日からの融雪水量の急激な増加により歪の累積がみられ地すべりが再活動しており, ケースAにおける3月6日を地すべり斜面の安全率を1.0として c' を求めたところ, 粘着力 c' は, $c' = 108.11 \text{ kPa}$ と得られた。

7.3 地下水排除工の施工と地すべり安全率の推移

図-13は集水井施工前のケースAにおける2002年3月6日の地すべり斜面の安全率を1.0として, ケースA (集水井施工前), ケースB (集水井施工5基), ケースC (集水井施工8基) について, 融雪時の地すべり斜面の安全率の推移を示したものである。

ケースAの集水井施工前では, 斜面安全率が最小0.98まで低下している。また集水井5基施工後のケースBで

図-12 2006年融雪期の融雪水量に対する集水井の施工効果
Fig. 12 Effect of well facilities on amount of melted snow during the melting season of 2006

も, 斜面安全率が最小0.98に低下している。しかし, 2005年は融雪水量が平年に比べてとくに多かったことを考えると集水井5基の施工効果がでていると考えられる。

ケースCは2005年12月までに集水井8基が完成している。2006年の融雪水量は平年並みで, 斜面安全率が最小1.0となっている。ケースAにくらべて集水井8基の施工効果は顕著である。

今回算出した斜面安全率は, 歪変動量やGPS観測による移動量の時系列変化と適合しており, 地下水排除工の施工効果が確認された。

斜面安全率の推移(ケースA, 2002年)

(1) ケースA (集水井施工前)

斜面安全率の推移(ケースB, 2005年)

(2) ケースB (集水井施工5基)

斜面安全率の推移(ケースC, 2006年)

(3) ケースC (集水井施工8基)

図-13 地下水排除工の施工前後の地すべり斜面の安全率
Fig. 13 Safety factor of landslide slope before-and-after construction of drainage facilities

8. 地下水排除工の効果判定

前節では, 集水井施工前のケースAにおける2002年3月6日の地すべり斜面の安全率を1.0として, ケースA (集水井施工前) ケースB, (集水井施工5基), ケースC (集水井施工8基) について, 融雪時の地すべり斜面の安全率を試算したが, それぞれ時期が異なり, 融雪水量も異なる。そこで, 地下水排除工の効果を説明するため, 融雪水量を同じにして集水井施工前後の地すべり斜面安全率を試算した。

2006年3月1日～5月9日までの融雪期を対象に, ケースA, ケースB, ケースCについて, 地すべり斜面安全率を計算した結果を図-14に示す。

集水井5基の場合, 集水井なしに対し, 斜面安全率が約0.01～0.015増加している。集水井8基の場合さらに0.004～0.005増加している。また融雪水量が多いほど安全率差が大きく地下水排除工の効果が捉えられている。

9. おわりに

融雪時に地すべりが再活動する大平地すべり地区を対象として, 亀裂を考慮した3次元浸透流解析を実施し, 水位観測専用孔で観測される水圧の時系列データと比較した結果, 亀裂を考慮した水文地質構造を反映した3次元浸透流解析の有用性を検証した。3次元定常解析, 非定常解析においてはほぼ融雪時の間隙水圧の上昇高さを再現することが可能となった。とくに, 層理に沿うすべり面や節理の地質構造の実態を反映したモデルとすることにより, 現地観測値と適合した結果を得ることができた。また3次元浸透流解析から得られる水圧面の位置情報をもとに3次元安定解析を実施して得られる地すべり安全率は, 歪計等の変動状況とも適合する結果を得ることができた。

しかし, 解析によって間隙水圧をおおむね再現することはできたが, 完全に観測値と解析値を一致させるまでには至らなかった。その理由として, 以下のことが考えられる。

①水位観測専用孔の間隙水圧の変化をみると, 融雪水

図-14 地下水排除工の施工効果 (2006年の融雪期を対象)
Fig. 14 Effect of drainage facilities (calculated using data from the melting season of 2006)

量の変化と理論的に対応しないものが少なからずある。融雪水の時系列データが場所によって異なり、そもそも1箇所の融雪水をもとに解析するのには無理がある。

②モデル化をするにあたり、水面形を重視して観測値とフィッティングするため、水文地質構造との不適合も発生することから水文地質構造を表現するのに限界がある。

③2次元解析は透水係数や水文地質断面を修正することにより間隙水圧分布をなんとか再現することはできるが、3次元解析では、横断方向の水の流れが発生することにより、2次元解析の際の水文地質構造をそのまま使っても2次元解析結果と同じにはならず、透水係数の修正にも限界がある。

①の融雪水分布が場所によって異なる点については、融雪水の計測箇所を増やすことにより、観測値と解析値との適合性を向上させることが可能である。

今後自動観測センサーによって観測される間隙水圧から地すべり斜面の安全率を逐次計算できるようになれば、安全率という理解しやすい評価項目で、リアルタイムで地下水排除工の施工効果を説明することが可能となろう。また、亀裂を考慮した水文地質構造モデルを用いて水位応答解析を行うことにより、融雪水等の計測情報をもとに短期予報も可能となる。近い将来自動観測で得られる間隙水圧や移動量の他、時々刻々の安全率をWeb等の手段により現状の斜面の安全度を管理者や住民等に理解しやすい形で提供することが求められるであろう。

参考文献

- 1) 申潤植 (1989): 地すべり工学—理論と実践—, pp.70–72, 山海堂
- 2) 申潤植 (1995): 地すべり工学—最新のトピックス—, pp.3–9, 山海堂
- 3) 浅野志穂・松浦純生・岡本隆 (2005): 大規模地すべりの三次元地質構造モデルを用いた地下水流動解析, 応用地質, Vol. 45, No. 6, pp.304–315.
- 4) 井良沢道也・南雲政博・大川滋 (2002): 三次元シミュレーション解析を用いた地下水排除工の定量的効果判定, 地すべり, Vol. 39, No. 2, pp.34–44.
- 5) 岩堀康希・吉松弘行・森屋洋・阿部真郎・西真佐人 (2005): 平根地すべりにおける地下水排除工の効果予測, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 5, pp.96–103.
- 6) 國限定・林義隆・太田英将・北方泰憲 (2005): 地下水モデルを用いた地下水排除工の評価方法, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 3, pp.32–41.
- 7) 角田信吉・鵜飼恵三・若井明彦・蔡飛・倉岡千郎・牧野孝久・藤原民章・新屋浩明 (2004): FEMの地すべり解析への適用例 (FEM講座), 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 4, pp.103–107.
- 8) 山田正雄・山崎勉・山崎孝成 (2000): 地下水流動と地すべり変動の特徴について, 日本地すべり学会誌, Vol. 36, No. 4, pp.22–31.
- 9) 山田正雄・井上真悟 (2006): 地すべりGISのシステム構築, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 4, pp.51–62.
- 10) 山田正雄・里優・河原裕徳 (2003): 面亀裂を考慮したFEM浸透流解析, 第42回地すべり学会研究発表会, pp.467–470.
- 11) 地すべり学会 (2006): 「有限要素法による地すべり解析」, 山海堂, pp.119–122.
- 12) 鵜飼恵三 (1987): 簡易Janbu法による斜面の三次元安定解析, 地すべり, Vol. 24, No. 3, pp.8–14.
- 13) 鵜飼恵三・細堀建司 (1989): 任意形状の地形とすべり面を有する斜面の安定解析, 土木学会論文集, No. 412, pp.183–190. (原稿受付2007年4月5日, 原稿受理2007年12月3日)