

4. FEMの地すべり解析への適用例

角田信吉／群馬県中之条土木事務所
Nobuyoshi TSUNODA／Nakanajo Public Works
and Construction Office Gunma Prefecture

鶴飼恵三／群馬大学工学部
Keizo UGAI／Faculty of Engineering Gunma University

若井明彦／群馬大学工学部
Akihiko WAKAI／Faculty of Engineering Gunma University

蔡 飛／群馬大学工学部
Fei CAI／Faculty of Engineering Gunma University

倉岡千郎／日本工営株式会社
Senro KURAOKA／Nippon Koei. Co., Ltd.

牧野孝久／日本工営株式会社
Takahisa MAKINO／Nippon Koei. Co., Ltd.

藤原民章／日本工営株式会社
Tamiaki FUJIWARA／Nippon Koei. Co., Ltd.

新屋浩明／日本工営株式会社
Hiroaki SHINYA／Nippon Koei. Co., Ltd.

キーワード：地すべり，有限要素法，浸透流解析，集水井，地下水
Key words：landslide, FEM, seepage analysis, drainage well, ground water

4.1 FEM浸透流解析による集水井の最適配置の検討

4.1.1 はじめに

地すべりの代表的な抑制工である地下水排除工の効果は地下水位の低下量により評価されており，既往の観測結果に基づいて低下量の目安が示されている¹⁾。しかしながら，コスト削減を目指した効率的な地下水排除工を計画するためには，地下水排除工の配置や地盤の透水特性を反映し，任意の降雨量における地下水排除工の効果を予測する技術が期待される。そのような技術の一つとして，3次元FEM浸透流解析を用いて地下水排除工の効果をシミュレートできることが示されている^{2)~6)}。もちろん地すべりの透水特性の不確実性に起因した予測精度の限界には留意しなければならない。しかし，信頼性のある地下水観測データにより地下水の挙動が水理及び地質構造の面から説明可能な場合は，FEMにより無駄のない地下水排除工の配置と数量を検討することが可能と考えられる。

本講座では，群馬県の生須地すべりにおいて，効率的な集水井の配置と数量をFEMにより検討した事例に基づき，FEMのモデル化上の要件や適用上の留意点などについて説明する。

4.1.2 対象地すべりとその目的

対象とした生須地すべりは，群馬県草津近郊の白砂川左岸に位置している幅800m，長さ600m，厚さ80mの大規模岩盤すべりである（図-1）。基盤岩である新第三期鮮新世の凝灰岩には熱水変質を受けて脆弱化した箇所が多く，この脆弱部をすべり面としている。本地すべりは，平成元年から平成15年までの間に排水トンネル工

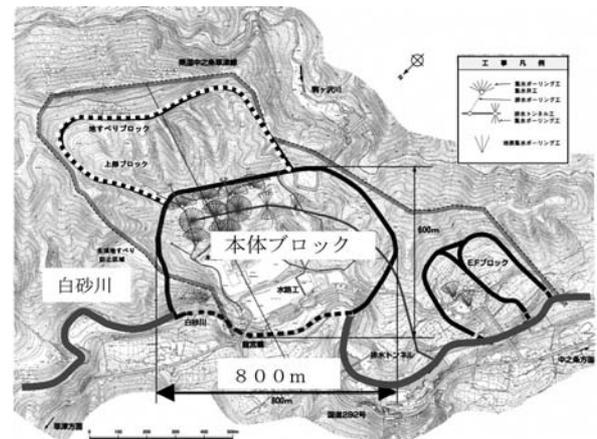


図-1 生須地すべり平面図

(1042m)，集水井工9基が施工され平常時は安定している。しかし，現在も地すべり滑動は終息に至っていないため，新たな集水井の施工計画が求められている。計画の策定にあたっては，コスト削減，定量的な事業評価に配慮するため3次元FEM浸透流解析及び3次元安定解析を実施して降雨時における新設集水井の効果を予測した。

業務全体の具体的な内容は藤原ら（2004）⁵⁾を参照いただくものとし，本講座ではFEMの適用方法に焦点をおくためFEMモデルの要件や注意点を中心に述べてから解析結果を説明する。

4.1.3 地盤モデル

地下水排除工の効果を評価するにあたっては，任意の降雨量に対する地下水位の変化量と変化速度を求めな

ればならない。そのため、降雨時に水が地表から不飽和域を浸透する速度と量を求める必要があり、本事例では飽和-不飽和浸透流解析を採用した。ただし、本手法では支配方程式がダルシー則に基づいているので、卓越した亀裂を流れる不規則な地下水挙動を表すには限界がある。

また、地下水排除工を含むモデル全体は水収支を満足する必要がある。本事例では尾根地形に基づいて不透水境界とする解析領域を設定し、別途タンクモデルの計算を行って、FEMから求められる河川への流量を検証した。

4.1.4 集水井モデル

集水井は井戸本体が集水する効果もあると考えられるが、過去の観測によれば壁面の集水効果は、集水ボーリングの効果に比べて小さいとされている⁷⁾。そこで、本事例では集水ボーリングをモデル化し、そのモデルを集水井モデルと呼ぶものとした。また、既往の観測によれば水位低下は集水ボーリングが地盤に占める範囲で認められており、集水ボーリングの密度、集水ボーリングと自由水面との水頭差が水位低下量の要因として示されている⁷⁾。したがって、集水井モデルはこれらの要因の影響を反映でき、計算結果として排水量と水位低下が求められることが望ましい。

以上の特徴を表すことのできる集水井モデルには、いくつかの方法が考えられる。集水ボーリング一本一本を透水性の高い要素としてモデル化する方法、一つの集水井の集水ボーリング全体を排水性の高い領域として設定する方法などが挙げられる^{2)~6)}。本事例では、既存の集水井だけでも9基あることから集水ボーリングを1本ずつモデル化すると節点数が膨大になる恐れがあった。そこで、図-2に示すように集水ボーリングを透水性の高い領域として表し、その領域の大きさと透水係数により集水井ボーリングの効果を表した。

要素のタイプとしては、平面要素を用いた(図-2)。

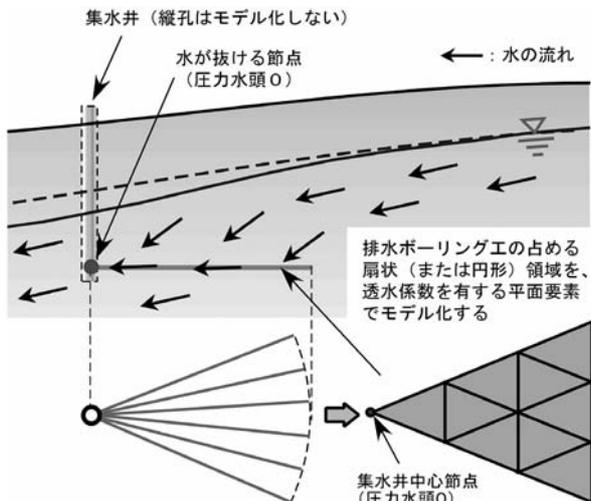


図-2 集水井ボーリングを表す要素の模式図

その理由は、要素の厚さをボーリング孔の直径相当に設定しようとするれば、全体の要素数が膨大になる可能性があり、また普遍的な根拠のない厚みにすると、厚みを変える度に透水特性を調整しなければならないからである。

集水井モデルを流れる水は排水される必要がある。実際の集水井ボーリングの出口は大気に接しているので、集水井モデルでも中心部における圧力水頭を0に設定することが考えられる。しかしながら、地盤と接している集水井要素の節点の圧力水頭を0に設定すると自由水面が強制的にその部分で形成され、排水量も過大になる恐れがあった。そこで、本事例では集水井モデルの中心にあたる節点は、地盤と結合させないで圧力水頭0を与えた。

4.1.5 地盤及び集水井の要素タイプ

本事例では、集水井の任意の数量と配置について解析を行う必要があった。この際、集水井の配置と数量を変える度に要素メッシュを修正することは作業効率が極めて悪い。そこで、本業務では図-3に示すように地盤部分を表わす全ての要素を同じ大きさの立方体(6面体要素)とし、集水井モデルは正方形の平面要素により近似した。このようなメッシュを作成すると要素及び節点数が多くなるが、地すべり内部において不規則な形状を有する地層領域を設定・修正することが容易であり、集水井モデルを任意の位置に変更・追加することも容易である。

4.1.6 透水特性の設定方法と解析手順

(1) 透水係数の設定方法

飽和-不飽和解析において入力する地盤の透水特性は、飽和透水係数及び不飽和浸透特性である。不飽和浸透特性とは水分特性曲線($k_r-\phi$, $\theta-\phi$)を意味し、 k_r は比透水係数、 ϕ はサクション、 θ は体積含水率である。本事例では、水分特性曲線における体積含水率の変化幅は、概ね有効間隙率と等価であると考え、有効間隙率と呼ぶものとした。図-4に水分特性曲線の例を示す。水分特性曲線の形状の影響は明確にされていないが、既往の解

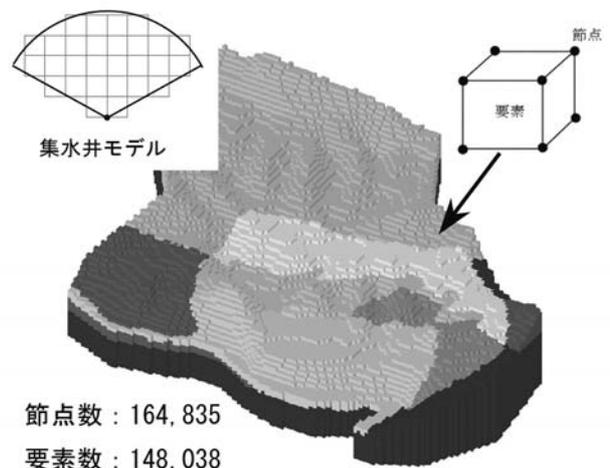


図-3 FEMメッシュと要素形状

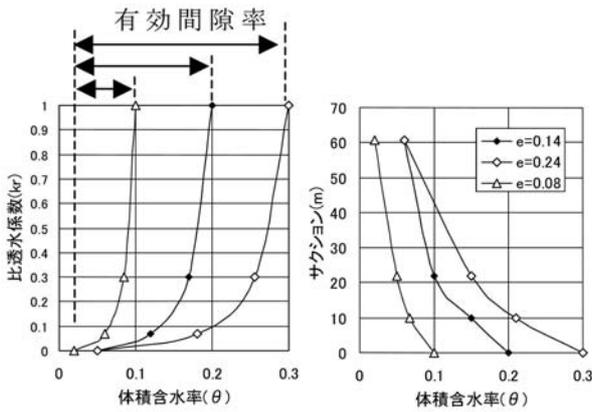


図-4 不飽和特性(水分特性曲線)と有効間隙率(e)の例

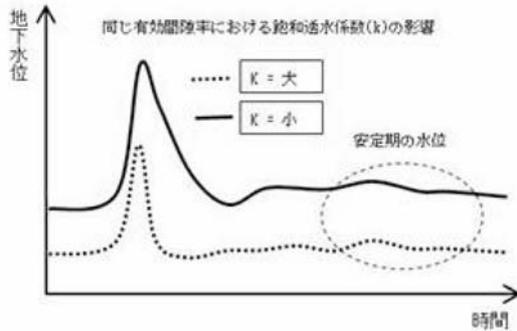


図-5 飽和透水係数(k)の地下水位に対する影響(同じ有効間隙率)

析例によれば地下水位は飽和透水係数と有効間隙率の影響が大きいことが示されている^{8),9)}。そこで、本事例では、これらの二つのパラメータを主な透水特性として考えた。

これらの透水特性を試験から求めることは、地すべり土塊が不均質であり不確実性があるため容易でない。そこで、本事例では観測地下水位の再現解析によって、飽和透水係数と有効間隙率を決定した。再現解析にあたっては、これらの透水特性の地下水位に対する影響を知っておくことが役立った^{8),9)}。

1) 流入出がバランスした安定状態の地下水位は、飽和透水係数の影響が支配的であり、図-5に示すように飽和透水係数が高いほど地下水位が低い。

2) 短期的な豪雨時の地下水位上昇量は、有効間隙率の影響が大きく、図-6のように有効間隙率が小さいと地下水位上昇が大きい。ただし、有効間隙率が同じであれば、飽和透水係数が高いほど地下水位降下が早い。

(2) 解析手順

本事例におけるFEM浸透流解析は、大きく再現解析と予測解析の二つのステップからなる。再現解析では地盤及び集水井の透水特性を決定し、予測解析においては7通りの新設集水井の配置について豪雨時の解析を実施してその効果を求めた。最終的には、予測した地下水位を水圧として三次元安定解析に設定して安全率を求めた。

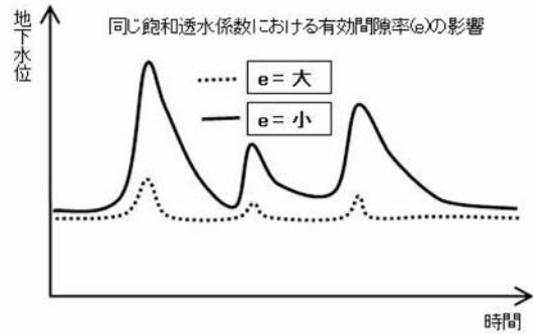


図-6 有効間隙率(e)の地下水位に対する影響(同じ飽和透水係数)

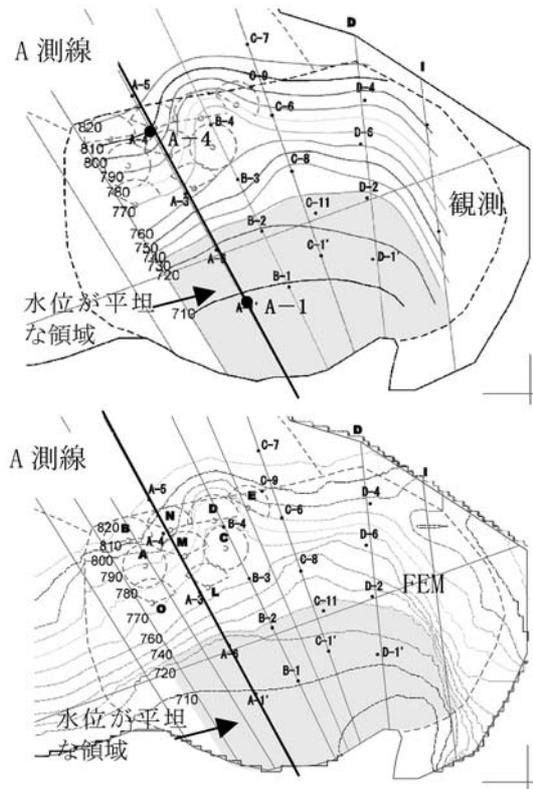


図-7 FEMから求めた安定期の地下コンターと観測に基づく地下水コンター

4.1.7 観測地下水位の再現解析結果

(1) 地盤の透水特性の逆算

再現解析は、まず安定期の地下水コンターを再現することで飽和透水係数を求めた。それは、前述したように安定期の地下水位が飽和透水係数に支配されるからである。次に豪雨時の地下水位の変化を再現することで有効間隙率を決めた。

平均降雨を用いた安定期の再現解析から求められた地下水位コンターを図-7に示す。ここで再現されている重要な傾向は、自由水面が末端領域で平坦であり、ブロックの中ほどから頭部に向かって地表面とほぼ同じ勾配を示していることである。この傾向は、末端域の透水性が高いため地下水位が低くなることを示しており、末端域



図-8 降雨時の地下水変動の再現結果
(末端のA-1孔: 図-7)

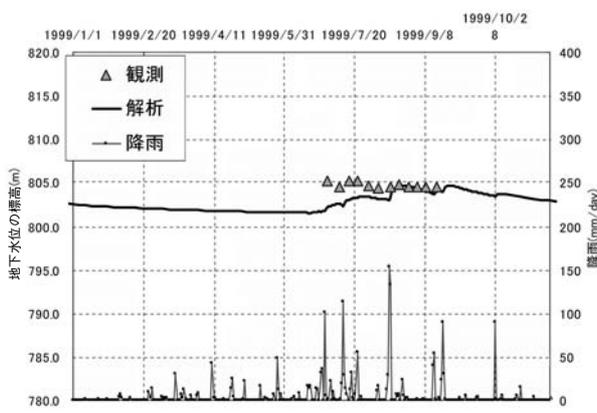


図-9 降雨時の地下水変動の再現結果
(頭部のA-4孔: 図-7)

が充填物のない開口亀裂性の岩盤領域であることと整合している。

一方、降雨時の再現解析から求められた末端域と頭部周辺の代表的な結果をそれぞれ図-8及び図-9に示す。その傾向に着目すると、末端では頭部に比べて水位上昇速度が速く上昇量も大きいものに対して、頭部では降雨に対する応答が鈍く変動幅も小さい。これは、末端域の亀裂性岩盤は見かけの間隙率が低く透水性が高いため地下水水位が大きく変化するが、頭部では岩盤が著しく破碎されており間隙率が高いのに加えて表層の透水性が高いため地下水水位が小さいものと考えられる。これらの傾向は、寺川ら(1997)¹⁰⁾の示す地すべりタイプ、①岩盤地すべり、②粘塑性体的地すべり、③砂丘地によって分類した水位変化パターンとよく整合し、本事例の末端域の水位変化は岩盤地すべりの特徴を示し、頭部は砂丘礫の特徴と整合している。以上の結果と考察により、再現解析から求められた透水特性は地下水機構を適切に説明できるものと判断された。

次に集水井モデルの透水特性を決定した。集水井モデルの効果は、飽和透水係数で支配される。そこで、平成11年時点で施工されている6基の集水井及び、平成13年時点で施工されている9基の集水井について、各年の実

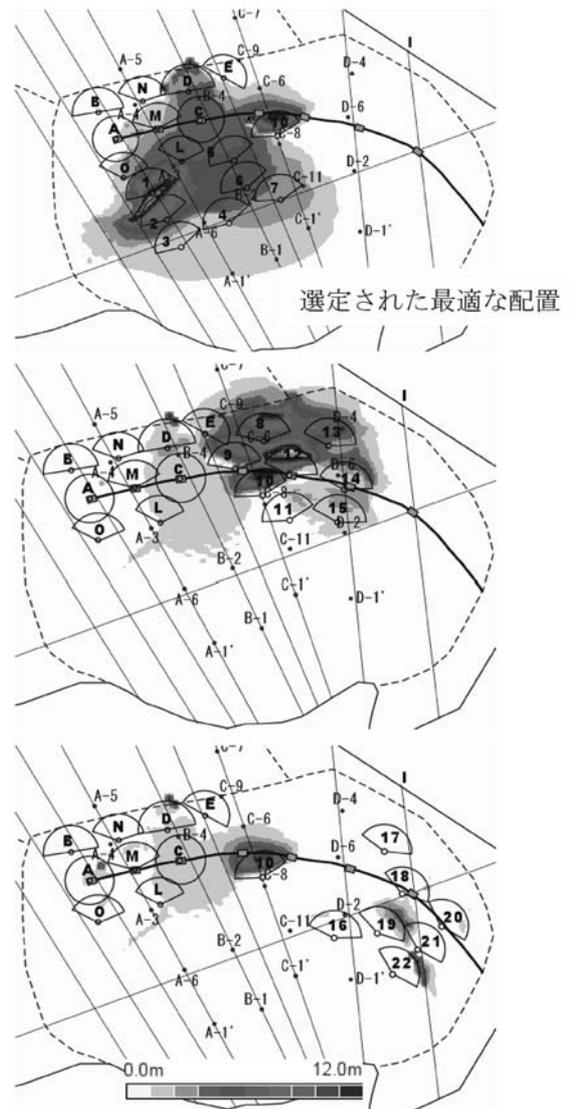


図-10 異なる集水井配置における水位低下の例

測降雨量を与え、孔内水位の変動状況を各孔で再現することで、集水井モデルの飽和透水係数を逆算した。

4.1.8 新規集水井の効果の予測解析

予測解析においては、30年及び50年確率雨量を用いた。これらの雨量は榎田ら(2001)¹¹⁾の事例を参考にして、対数正規分布に基づいて10日の累積雨量について算定した。

次に、集水井の施工性を考慮して新設集水井の配置案を7ケース作成し、各々のケースについて所定の降雨を与えた解析を実施した。求めた地下水水位を三次元安定解析に水圧として設定し安全率を求めた。これらのケースのなかで所定の計画安全率を満たすケースについて、概算工費を算定して、経済性に優れた配置計画を決定した。50年確率雨量を与えた場合について、既存の集水井に対して新設集水井を施工した場合の水位低下分布の例を図-10に示す。また、最終的に採用された配置計画を図-10に示した。

4.1.9 おわりに

本講座では、生須地すべりの解析事例を挙げて、3次元FEM浸透流解析における地盤及び集水井のモデル化方法を中心に説明した。地下水排除工の効果判定においては、任意の降雨時の地下水位変化の量と速度を求める必要があるため、不飽和域における降雨の浸透機構を考慮する必要がある。また、排水量や地下水位の変化は、集水ボーリングの占める面積及び密度、周辺地盤の透水特性、集水ボーリングと自由水面との水頭差などに応じて計算結果として求められる必要がある。

本事例では、観測されている地下水位の分布及び変化パターンを再現することができ、求められた透水特性は水理地質構造を説明できるものである。しかし、地すべりの透水特性には不確実性がともなうのでFEM浸透流解析による予測精度には限界がある。したがって、FEMの結果にしたがって集水井を施工する場合は、施工前後の地下水位の変化を観測し、FEMの予測結果と比較することでモデルを修正して、再度予測解析を実施することで計画を更新することが望ましい。

本稿では、FEMのモデル化を中心に述べたが、再現解析においては信頼性のある地下水データが必須であり、今後も水理構造に応じた適確な調査技術の確立が必要である。

参考文献

1) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：建設省河川砂

- 防技術基準（案）同解説・計画編，平成14年発行。
- 2) 鶴飼恵三・蔡飛・若井明彦・阪上最一（1998）：集水ボーリング工の効果に関する定量的評価手法の提案，地すべり，Vol. 35，No. 3，pp. 1-7.
 - 3) 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.
 - 4) 西田憲司・山上拓男・蔣景彩（2000）：三次元有限要素浸透流解析に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法，地すべり，Vol. 37，No. 3，pp. 1-9.
 - 5) 藤原民章・新屋浩明・岩間倫秀・牧野孝久・倉岡千郎（2004）：大規模地すべりの事業計画見直しとコスト縮減への取り組み，第43回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 375-378.
 - 6) 牧野孝久・倉岡千郎・鶴飼恵三・蔡飛・若井明彦・角田信吉（2003）：生須地すべりに関する集水井工の3次元有限要素浸透流解析，第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 135-138.
 - 7) 丸山清輝・北島義則（1996）：地すべり地における集水井の地下水排除効果に関する検討，地すべり，Vol. 33，No. 3，pp. 13-18.
 - 8) 倉岡千郎・新屋浩明・徳永博・小林慶之（2003）：降雨時の地下水位変動の飽和-不飽和浸透流解析における透水特性の影響，第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 139-142.
 - 9) 白木克繁・中村浩之（2001）：飽和不飽和浸透数値計算法による地すべり地地下水変動再現計算-福島県大川地すべり地を例として-，地すべり，Vol. 38，No. 1，pp. 30-33.
 - 10) 寺川俊浩（1997）：地すべり地における地下水調査法と地下水排除工の設計（その1），地すべり技術，Vol. 24，No. 1，pp. 300-321.
 - 11) 榎田充哉・須田大祐・小野由紀光（2001）：地すべりの安全率と確率評価，第40回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 201-204.
(原稿受付2004年10月26日，原稿受理2004年10月26日)