

丘陵地造成工事の地下水状態への影響評価に関する研究

名古屋大学工学部地圏環境工学教室 正会員 大東憲二
同 上 正会員 植下 協

1. まえがき

丘陵地を各種の目的で利用する場合、そのままの状態では構造物を造ることが難しいので、盛土や切土を行って平坦地を造り、そこに構造物を造ることになる。このような地形や地被状態の改変は、造成工事領域内ならびに周辺地域の地下水状態に変化を生じさせる。例えば、地下水面にまで達するような切土が行われたり、舗装によって地表面からの降雨浸透率が低下すれば造成工事領域内の地下水位が低下する。そして、この影響が造成工事領域外にまで及ぶ場合もある。造成工事領域内の将来の地下水状態は、その丘陵地利用における設計条件として必要になることがあり、また周辺の地下水状態への影響については、環境アセスメントを行う上で必要になる場合がある。

このような場合の地下水状態変化の予測は、これまであまり報告されていないが、実際には種々の地下水浸透流解析が行われていると考えられる。従来の地下水浸透流解析は、飽和浸透流解析と飽和・不飽和浸透流解析の2つの方法に大別できる。

飽和浸透流解析は、従来からよく用いられてきた解析法であり、飽和領域の地下水の挙動だけを対象とした解析である。飽和浸透流解析は、室内または現場の透水試験から求めた飽和透水係数を解析に用いることができるが、自由地下水面の変動に合わせて解析領域の修正が必要であり、降雨による地下水位の変動を考慮しようとする場合、これとは別に不飽和部の浸透も考えなければならない。不飽和領域の鉛直浸透にタンクモデルを用いて解析する方法を大東ら¹⁾が提案しているが、盛土や切土によって地形が変化する場合には、新たにタンクモデルの諸係数を決め直すなくてはならない。

飽和・不飽和浸透流解析は、飽和領域だけでなく不飽和領域の地下水の挙動も対象としたもので、今日では、各分野で多用されている。Philip²⁾は1次元の鉛直浸透問題を扱い、Freeze³⁾は3次元問題の差分法による浸透流解析を行った。Neuman⁴⁾は有限要素法を用いた方法を提案した。わが国でも赤井ら⁵⁾が有限要素法を用いた方法を提案した。また、岡⁶⁾は差分法を用いた解析を行った。これら以外にも数多くの研究成果が報告されている。飽和・不飽和浸透流解析では、地下水面が圧力水頭ゼロの点を連ねたものとして求められ、飽和浸透流解析で必要であった解析領域の修正が必要でない。ただし要素分割が粗い場合には計算誤差が生じやすいためある程度細かな要素分割が必要とされ、計算機の必要記憶容量が大きくなり計算時間が長くなる。

そこで著者らは、これらの解析法の長所と短所を考慮し、地形変化に伴う地下水状態の変化を解析する便利な手法として、地表面から地下水面までの降雨浸透を扱う鉛直一次元不飽和浸透流解析と地下水位を求める三次元飽和浸透流解析を組み合わせた複合浸透流解析法⁷⁾を提案している。この解析方法は、Pikulら⁸⁾が提案した鉛直一次元のRichardsの式とBoussinesqの式を地下水面上で結合させて差分法で解く方法を基礎にしているが、飽和帯の解析に三次元飽和浸透流解析モデルを用い、そのモデルの最上面節点上に鉛直一次元不飽和浸透流解析モデルを乗せ、両モデルの要素形状を地下水面の位置に応じて変化させながら有限要素

Study on Environmental Assesment about Groundwater Condition of Land Developement of Hilly Area
: Kenji DAITO, Kano UESHITA (Department of Geotechnical and Environmental Engineering, Nagoya
University)

法によって解析する方法に拡張したものである。

対象地域の地下水涵養が地表面から地下水面までの鉛直浸透である場合、不飽和領域に鉛直一次元不飽和浸透流解析を適用すると次のような利点がある。

- 1) 造成工事に伴う地形の変化を、鉛直一次元モデルの長さの変化で表現することができる。
- 2) 三次元飽和・不飽和浸透流解析を適用するよりも計算時間を大幅に短縮することができる。

本論文では、複合浸透流解析法の概要を説明し、実際の丘陵地造成工事の地下水環境影響評価への適用例について述べる。

2. 複合浸透流解析法の概要

複合浸透流解析の手順を図-1に示す。ここで、複合浸透流解析では、不飽和領域に対しては鉛直一次元不飽和浸透流解析、飽和領域に対しては三次元飽和浸透流解析を行うので、モデルの形は図-2に示すように三次元モデルの各最上面節点上に鉛直一次元モデルが乗った形になっている。

まず、タイムステップ $t = i$ において、各鉛直一次元モデルを用いて鉛直一次元不飽和浸透流解析を行う。この解析の境界条件としては、鉛直一次元モデルの上端に降水浸透条件を与え、下端に地下水面標高に相当する地下水頭の固定条件を与える。また、初期条件としては、各節点上に地下水面標高に等しい地下水頭を与える。そして、この解析により、地下水頭分布とモデル下端からの流下量を求める。求められた流下量は、三次元モデルへの地下水涵養量となる。

次に、同じタイムステップにおける三次元飽和浸透流解析を行う。この解析の境界条件としては、三次元モデル上面に先程求めた地下水涵養量を与え、その他の面には、不透水または地下水頭固定の条件を与える。また初期条件として前のタイムステップで求めた初期地下水頭を各節点上に与える。この解析により、飽和帯の地下水頭分布と地下水面を求める。

次のタイムステップの解析で用いる鉛直一次元モデルの長さは、三次元飽和浸透流解析で求められた地下水位と地表面との距離に応じて変わる。すなわち、地下水位が上昇すればそれに合わせてモデルの下端が上昇して鉛直一次元モデルの長さが短くなり、逆に地下水位が低下すれば鉛直一次元モデルの長さが長くなる。このとき鉛直一次元モデルの各要素の長さが同じになるように地下水位と地表面との距離を等分する。また、次のタイムステップで鉛直一次元モデルに与える初期地下水頭分布は、図-3に示すように与える。

まず、鉛直一次元モデルの下端の節点の位置は、地下水面の位置に当たるので、圧力水頭を零とする。すなわち地下水頭を位置水頭に等しくする。その他の節点は、地下水位が低下する前の地下水頭分布をそのまま与える。しかし、このようにして求めた下端節点とその直上節点の動水勾配は、鉛直一次元モデルの変形

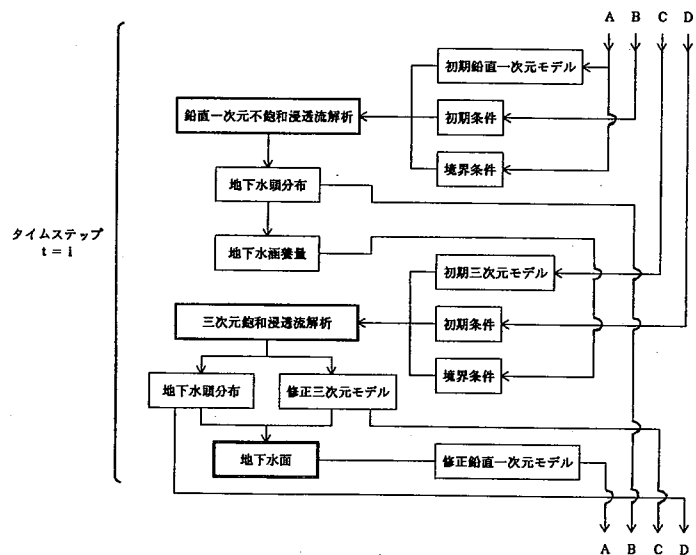


図-1 複合浸透流解析の手順

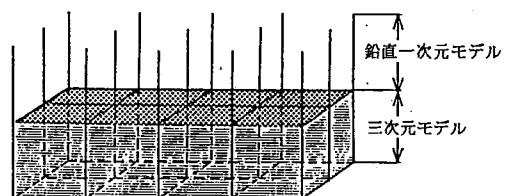


図-2 複合浸透流解析モデル

の前より増加することになる。これでは、前のタイムステップで求められた地下水面上の動水勾配の状態が、次のタイムステップの初期状態と異なってしまふ。そこで、解析の便宜上、下端節点とその直上節点の動水勾配が、地下水位低下前と等しくなるような地下水頭を下端節点の直上節点に与えることにした。

このようにして長さの変化した新しい鉛直一次元モデルで同様の解析を繰り返して行い、新たな地下水面を求める。これをタイムステップ毎に行い、経時的な地下水面の変化を求めることができる。

複合浸透流解析法の妥当性の検証結果については、別途報告予定⁹⁾であるが、理論解析法や三次元飽和・不飽和浸透流解析法と比べて、同程度の解析結果が短時間の計算で得られることを確認している。

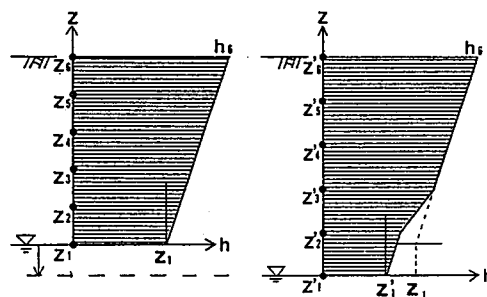


図-3 鉛直一次元モデルの変形と地下水頭分布の修正

3. 丘陵地造成工事の地下水環境影響評価への適用例

(1) 対象地域の概要

a) 地形地質環境 今回研究対象とした造成工事現場は、岐阜県土岐市の西方に位置し、多治見市と土岐郡笠原町に近接している。この地域の造成工事前の地形図を図-4に示した。この地域には、中央部から西に向かって流れる沢、北東部に源を発する川、および南東部に源を発する川があり、中央部の沢水は下流のため池に流入し、農業用として使われていた。また、北東部に源を発する川は、対象地域の北東方向に位置する集落の簡易上水道源となっていた。

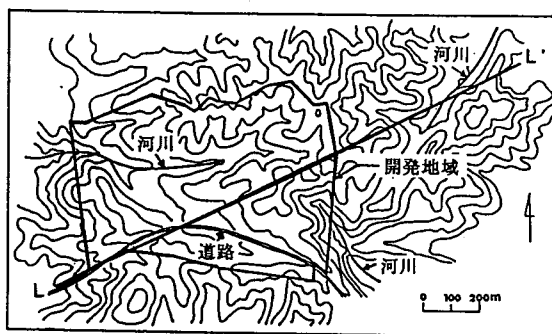


図-4 対象地域の地形図

また、図-4中のL-L'の地質断面図を図-5に示した。この地域では、図中に示されている土岐砂礫層が最も広域に分布しており、層厚は厚いところで50~60mもある。土岐砂礫層の礫の成分は、中・古生層起源のチャート、砂岩、ホルンフェルスまたは花崗岩、流紋岩である。土岐口陶土層は、木節粘土、蛙目粘土、珪砂などが主となっており、西に向かうにつれてその上面の標高は低くなり、層厚も減少していく。また、花崗岩は、粗粒で等粒状の黒雲母花崗岩が主体となっており、上部は強風化してまさ土化しているが深部へいくと新鮮な花崗岩となる。秩父古生層は、対象地域の西端部にみられ、粘板岩、砂岩、チャートが主として分布していて花崗岩層とともに基盤岩を構成している。

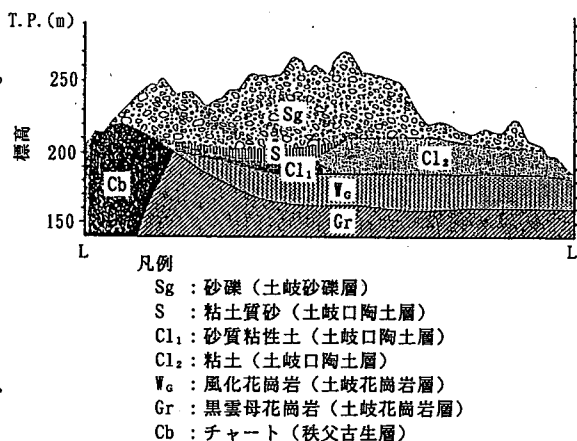


図-5 図-4のL-L'の地質断面図

b) 水文環境 開発地域の近くにある気象庁多治見観測所の記録によると、1956年~1988年の平均年間降水量は1634mmである。同観測所で観測された1986年~1988年の月別降水量を図-6に示す。この図を見ると、1987年は、1986年と比べても4月と6月の降水量がかなり少なかったことがわかる。一方、1988年は、6月から9月にかけての降水量が多かったことがわかる。

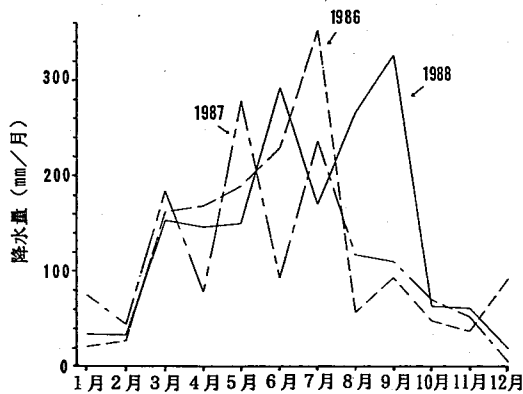


図-6 解析対象地域の月別降水量
(気象庁多治見観測所の記録による)

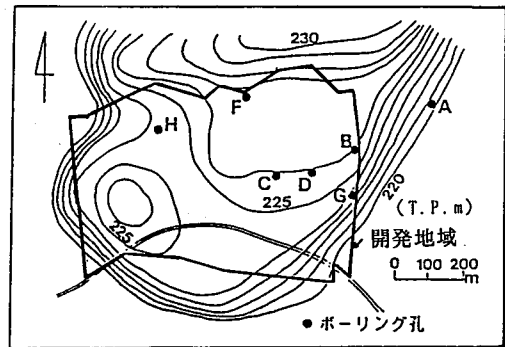


図-7 造成工事前の地下水位等高線
(1987年3月時点)

また、ボーリング孔で観測した地下水位および地表踏査によって確認された湧水点の標高を基にして描いた造成工事前の1987年3月時点の地下水位等高線を図-7に示した。この時期の地下水面は、ほぼ地形に対応しており、開発地域の西端部を除いて地下水面は土岐砂礫層中に存在している。地下水位の1年間の変動傾向は毎年ほぼ同じで、地下水位は3月が最も低く、梅雨期に急上昇し、それを過ぎると徐々に低下する。このように、梅雨の地下水位への影響が大きいため、梅雨期の早晩によって最高水位とその現れる時期が異なってくる。地下水位の場所的な特徴を見ると、A孔は地下水面が地表面に近いために、降雨があるとすぐに地下水位が上昇するが、地下水の滲出地域がA孔の東側にあるために、A孔の地下水位が地表面まで上昇することはない。この地下水の滲出地域は、下流の集落の簡易上水道水源となっており、この滲出地域が造成工事によってどのような影響を受けるか検討するためにも、A孔の地下水位変化の予測が重要である。一方、他のボーリング孔の地下水位は、一降雨による変動量よりも季節的な変動量が大きく、特に丘陵地の頂部のB孔、F孔では、梅雨期の降雨による地下水位の上昇が著しい。

(2) 対象地域のモデル化

a) **地盤モデル** 解析領域は、開発地域外の東部の周辺住民が地下水を利用している地域（Aボーリング孔付近）も含むように図-8に示す範囲を決定した。解析領域の東西方向の長さは1500m、南北方向の長さは760mで、図-8に示すような有限要素解析用の平面分割を行った。そして、地下水面以下の飽和領域は3層に分割し、1683個の四面体要素に分割した。また、節点数は、一層当たり120個で、合計480個とした。不飽和領域は、飽和領域モデルの上面にある120個の各節点上の一次元5分割要素でモデル化した。

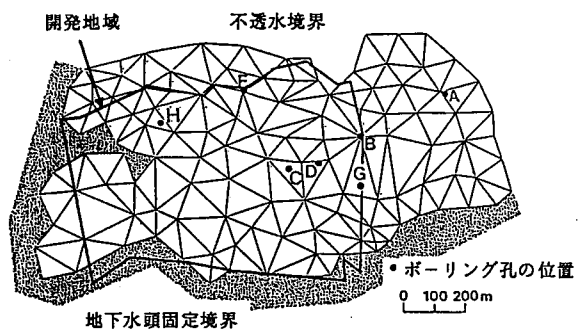


図-8 複合浸透流解析モデルの平面要素分割と境界条件

解析に関連する地層は、土岐砂礫層、土岐口陶土層、風化花崗岩層で、各層の層厚はこの地域で作成された地質断面図を元にして求めた。また、各地層の透水係数は、土岐砂礫層を対象とした単孔式原位置透水試験が各ボーリング孔で、また揚水試験がD孔の近くで行われており、これらの試験結果を参考にして、 $k = 1.2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ を採用した。土岐口陶土層と風化花崗岩層の透水係数は、室内透水試験の結果を参考にして、土岐口陶土層では、 $k = 1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、風化花崗岩層では、 $k = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ とした。飽和領域の比貯留量は、揚水試験によって求められた貯留係数と帯水層厚を参考にして、 $S_s = 0.015/\text{m}$ とした。

b) 不飽和浸透特性 各地層の不飽和浸透特性はすべて等しいと仮定し、図-9に示す関係を与えた。図中の飽和度(S_r)と圧力水頭(ψ)の関係については、現場から採取した土岐砂礫層の試料を用いて求めた実験的關係を使用した。また、図中の飽和度(S_r)と比透水係数(K_r)の関係については、現場の浸透能試験の数値シミュレーション¹⁰⁾を行った際に実測値を最も良く再現したAverjanovの推定式を用いた。

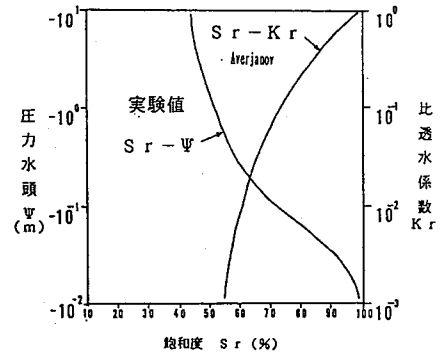


図-9 解析に用いた不飽和浸透特性

c) 境界条件 複合浸透流解析で使用する鉛直一次元不飽和浸透流解析と三次元飽和浸透流解析に与える境界条件はそれぞれ次のようである。

1) 鉛直一次元不飽和浸透流解析

- ①地表面に相当する上端の節点には、降雨の浸透量を流量既知条件として与える。ただし、降雨の浸透率は、林地で60%、裸地で40%、造成完了後の地表面で20%と仮定し、その最大は浸透能試験で求まる浸透能である。
- ②地下水面に相当する下端節点では、全水頭が位置水頭に等しいとする。

2) 三次元飽和浸透流解析

- ①地下水面に相当する三次元モデルの上面には、鉛直一次元不飽和浸透流解析によって求められた地下水涵養量を与える。
- ②三次元モデルの底面となる基盤（秩父古生層、土岐花崗岩層）との境界面は不透水面とする。
- ③解析領域の南部および西部は、基盤が露頭していたり、地下水の滲出地域があるため、地下水頭条件をそれに合わせて一定とする。（図-8参照）
- ④解析領域の北部および東部は尾根部になっているので、地下水の分水嶺と見なして不透水条件を与える。（図-8参照）

なお、初期水位は、各ボーリング孔で観測された地下水位および地表踏査によって確認された湧水地点の標高を参考にして推定した。

(3) 造成工事による地下水への影響

a) 造成計画を考慮した解析条件 造成計画に基づいて作成した解析モデルの造成前後の地形図を図-10、11に示す。開発地域の全面積は48.0haで、そのうち造成工事に伴う切土面積は10.7ha、盛土面積は14.3haである。この造成計画による地形の変化を、造成工事前の地下水状態解析で用いたモデルの地表面節点に当たる鉛直一次元モデルの上端節点の標高を造成後の標高に合わせることによって再現する。解析領域の西部境界付近では、盛土や切土などの造成工事が行われることによって地下水位の境界条件が変化することが予想

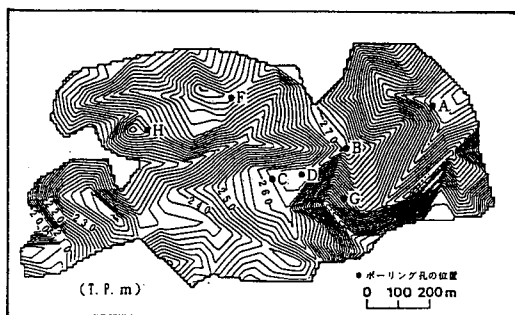


図-10 土地造成前の解析対象領域の地形図

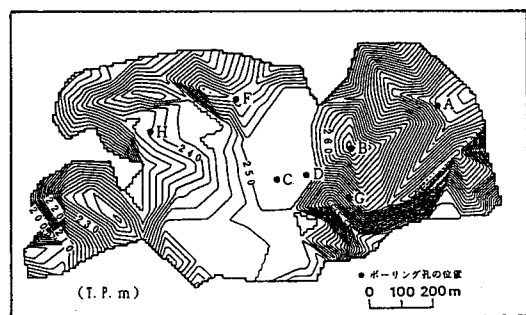


図-11 土地造成後の解析対象領域の地形図

されるが、それらについては次のように対処した。

- 1) 盛土が行われる場所では、地下水の滲み出し点は土岐砂礫層と基盤との境界にあり変化しないと考え、境界条件は造成前と同じ条件とする。
- 2) 切土が行われる場所で地下水が滲み出している場合には、造成後の新しい地表面の標高が地下水位になるとした。

上記以外の境界条件や初期条件は、造成工事前の地下水状態解析の条件と等しくした。

b) 造成工事前後の解析結果と実測値の比較 ボーリング孔A、B、Gの位置における地下水位について、造成工事前の地盤条件を用いたそれぞれの解析値と実測値を図-12(a)~(c)、13(a)~(c)に示した。造成工事前の降雨データには、1987年のデータを用い、降雨浸透率は全領域が林地であることを考慮して60%とした。また、造成工事後の降雨データには、1988年のデータを用い、降雨浸透率は開発地区については40%とし、その他の領域は林地であるので60%とした。

まず、A孔の造成工事前の実測地下水位は、降雨による一時的な変動のみで、季節的変動はほとんどない。また、複合浸透流解析によって求められた地下水位は、降雨による変動幅が実測値よりも小さいが、季節的変動がほとんど無い傾向をよく表している。また造成工事後の実測地下水位は、造成工事前とほとんど変化しておらず、計算結果も同様の傾向を示している。また、B孔とG孔の造成工事前後の実測地下水位は、梅雨期に上昇し10月頃から徐々に低下しており、複合浸透流解析によって求められた地下水位は、造成工事前

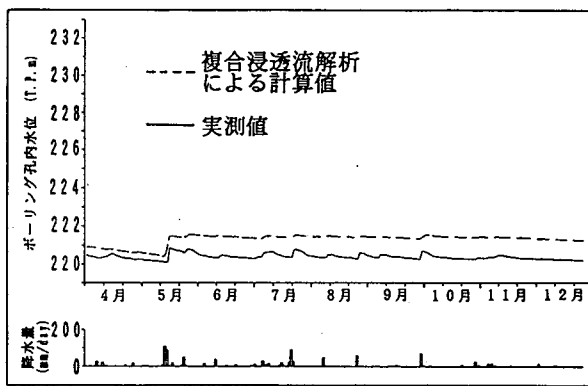


図-12(a) ボーリング孔Aにおける土地造成前(1987年)の地下水位の実測値と計算値の比較

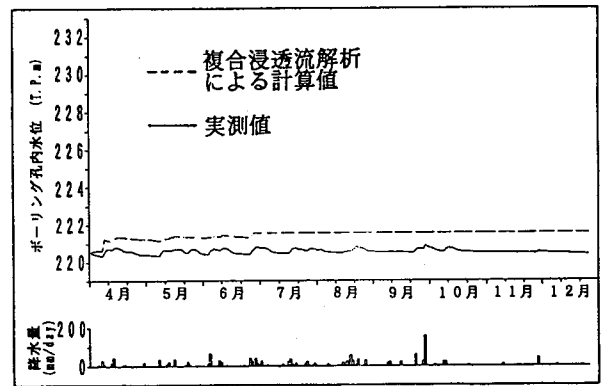


図-13(a) ボーリング孔Aにおける土地造成後(1988年)の地下水位の実測値と計算値の比較

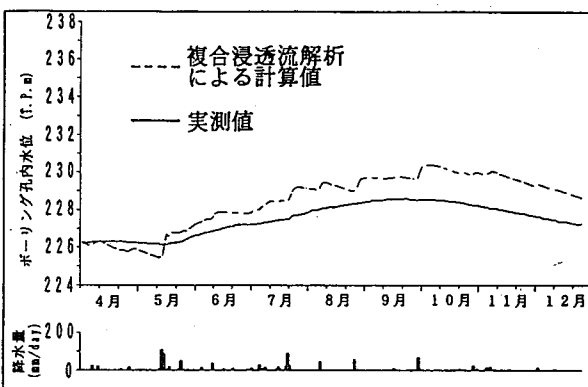


図-12(b) ボーリング孔Bにおける土地造成前(1987年)の地下水位の実測値と計算値の比較

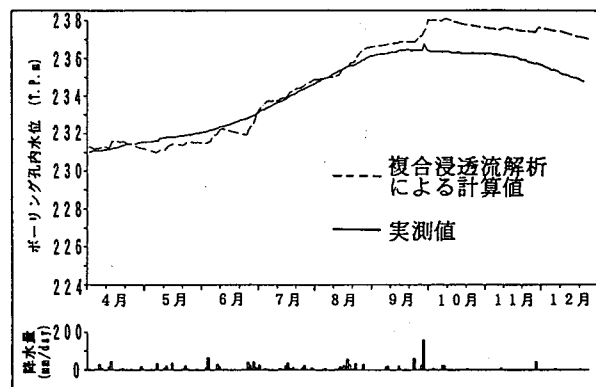


図-13(b) ボーリング孔Bにおける土地造成後(1988年)の地下水位の実測値と計算値の比較

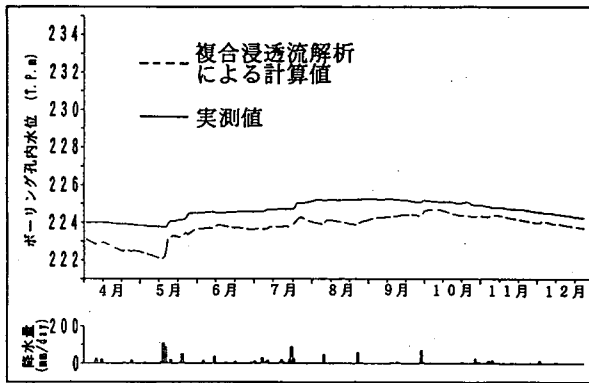


図-12(c) ボーリング孔Gにおける土地造成前(1987年)の地下水位の実測値と計算値の比較

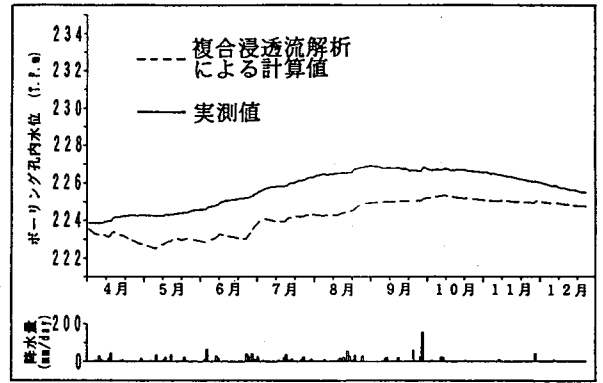


図-13(c) ボーリング孔Gにおける土地造成後(1988年)の地下水位の実測値と計算値の比較

後とも実測地下水位と比較して降雨に対する反応が大きいものの、ほぼ同様の地下水位の季節変動を再現している。

以上のように、複合浸透流解析は、地形変化や地被状態の変化があった場合にも実測地下水位とよく対応する。

c) 土地利用を考慮した地下水環境影響評価 ボーリング孔A付近の湧水を利用している住民が心配していた造成工事によるA孔付近の地下水位への影響については、開発地域が裸地の場合を想定した降雨浸透率40%を用いると、本解析により工事の影響がないと予測され、A孔での実測地下水位もその予測を裏付けるデータを示した。しかし、開発地域の地被状態が建築物や舗装のために変化すると降雨が浸透しにくくなる可能性がある。そこで、開発地域内の降雨浸透率が20%程度となるとして定常地下水位分布を求め、前述の降雨浸透率40%の場合の定常地下水位との差から求めた地下水位低下等量線図を図-14に示した。この図から造成地北西部と北東部を中心に地下水位が低下することがわかる。

また、開発地域内において、造成地内の植林や透水性舗装などの降雨浸透対策を実施した場合に地下水状態がどのように変化するかを予測した。なお降雨浸透率は、降雨浸透対策を考慮して開発地域内で30%とした。降雨浸透率が40%の場合の地下水位との差から求めた地下水位低下等量線図を図-15に示した。図-15と図-14とを比較すると、開発地域内の地下水位低下量がかなり少なくなり、降雨浸透対策を施した場合の効果が予測できる。

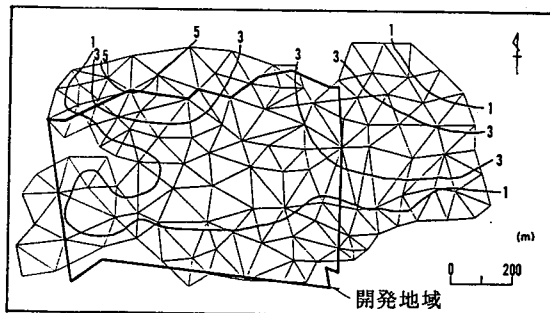


図-14 開発地域の土地利用を考慮した場合の地下水位低下等量線(降雨浸透対策無し)
降雨浸透率: 開発地域 40%→20%
 林地 60%のまま

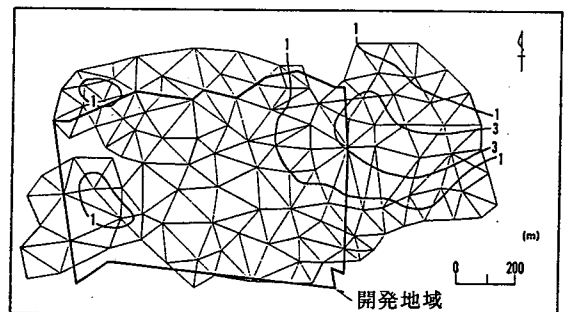


図-15 開発地域の土地利用を考慮した場合の地下水位低下等量線(降雨浸透対策有り)
降雨浸透率: 開発地域 40%→30%
 林地 60%のまま

4. 結論

本論文では、地形変化に伴う地下水状態変化を比較的簡便に予測できる著者らが提案した複合浸透流解析法を現実の丘陵地造成工事に適用し、モニタリングされた実測地下水位と予測結果とを比較することによりその有効性を示した。本研究を通して得られた結論を以下に示す。

- 1) 造成工事に伴う地下水環境影響評価を行う場合には、周辺地域の地下水利用状況を調査し、造成工事によって地下水状態に変化を及ぼす可能性のある地域まで含めて解析対象領域とする必要がある。
- 2) 複合浸透流解析では、浸透能試験や現場透水試験など実際の透水試験結果を再現できる透水パラメータを用いることが重要である。
- 3) 不圧地下水位は、降雨の浸透状況により大きく変動する。特に我国では、梅雨や台風によって多量の降雨があり、その一部が地下水として涵養されるので、不圧地下水位の季節変動を解析する場合には、降水量の詳細なデータと浸透能のデータが必要である。
- 4) 造成工事によって地被状態が変化し、それに伴って地表面の浸透能が変化することを複合浸透流解析で考慮することにより、造成工事による地形改変だけでなく土地利用に対する地下水環境影響評価が可能である。

参考文献

- 1) 大東憲二, 他: 山岳トンネル掘削に伴う地下水状態変化ならびにトンネル出水の予測, 土と基礎, Vol. 34, No. 11, pp. 39~44, 1986.
- 2) Phillip, J.R.: The Theory of Infiltration; 1, The Infiltration Equation and its Solution, Soil Science, 83, pp. 345~357, 1957.
- 3) Freeze, R.A.: Three-dimensional Transient Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin, Water Resources Research, Vol. 7, No. 2, pp. 347~365, 1971.
- 4) Neuman, S.P.: Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., ASCE HY, Vol. 99, No. 12, pp. 2233~2250, 1973.
- 5) 赤井浩一, 他: 有限要素法による飽和-不飽和領域の浸透流解析, 土木学会論文報告集, 第264号, pp. 87~96, 1977.
- 6) 岡 太郎: 斜面域における土壌水分流動の二次元解析と考察, 昭和52年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 356~357, 1977.
- 7) 若杉直彦・大東憲二: 丘陵地造成工事における地下水状態変化の解析法について, 土木学会第42年会次学術講演会講演概要集 3, pp. 420~421, 1987.
- 8) Pikul, M.F., et al.: A Numerical Model Based on Coupled One-Dimensional Richards and Boussinesq Equations, Water Resources Research, Vol. 10, No. 3, pp. 295~302, 1979.
- 9) 大東憲二, 他: 丘陵地造成工事による地下水状態変化の簡易予測法, 土木学会論文集(投稿中).
- 10) 大東憲二, 他: 礫質土の不飽和浸透特性に関する考察, 第27回土質工学研究発表会平成4年度発表講演集, Vol. 2, pp. 1967~1968, 1992.