

土中の水の状態による道路の通行規制・解除基準の考察

大阪産業大学工学部 教授 小田和広

1. はじめに

道路では、豪雨によるのり面の土砂災害に対する交通の安全を確保するため、通行規制区間が設けられ、異常気象時に雨量に基づく事前通行規制が行われている。過去の実績によれば、規制を行う前に災害が発生する“見逃し”や規制を実施しても災害が発生しない“空振り”が多数ある¹⁾。特に、“空振り”は年々増加している。これは、防災工事等によって道路の防災力が向上しているにも関わらず、その効果が規制基準に反映されていないことが挙げられる。というのも、従来、規制基準は経験的に決定され、科学的根拠に基づかないことが理由の一つとなっている。

土質力学的見地に立てば、斜面災害の発生は土中の水の状態に支配される。そのため、土中の水の状態を計測し、斜面防災に役立てようとする試みは多数行われている²⁾。土中の水の状態を計測する手段としては、①地下水位の計測のための水位計、②土中のサクションを計測するためのテンシオメーター、③体積含水率を計測するための土壌水分計等がある。①は昔から存在し、多くの適用例がある。但し、地下水位のみが計測されるため、土中の含水量などが不明である。したがって、雨水の浸透から地下水位の形成過程を明らかにすることができない。②は雨水浸透に伴うサクションの変化や地下水位の形成といった土中の雨水浸透特性を明らかにすることができる。一方、メンテナンスに手間がかかることや計測されるサクションから土中の水分量に変換するためには水分特性曲線が必要であることなどの問題点もある。③は単位体積あたりの間隙水の体積である体積含水率を計測するものであり、土中の水分量を直接的に得ることが出来る。また、比較的メンテナンスも容易である。一方で、地下水位が発生した後の地下水位の高さは計測することができない。このように、土中の水の状態を把握する方法には、それぞれに利点と欠点がある。

ところで、国の科学技術政策である Society 5.0 では、“サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）”が提唱されている³⁾。これは、各種センサによって計測される実物の現象（すなわち、フィジカル空間）とコンピューターシミュレーション（サイバー空間）を同期させ、計測値を再現できるようにシミュレーションモデルを逐次修正する。そのようにして、逐次修正されたシミュレーションモデルによって対象とする現象が発展していく様子を予測し、問題を解決しようとするものである。いわゆる、データ同化を基盤としたデジタルツインやサイバーフィジカルシステムといった技術である。

本研究では、体積含水率の計測結果に基づくデータ同化解析によって斜面への雨水浸透を再現できるシミュレーションモデルを同定する。次に、コンピューターシミュレーションによって計測が行われた道路のり面の土中の水の状態を再現する。さらに、そのり面における降雨量（連続雨量、時間雨量）、土壌雨量指数等の気象指標と土中の水の状態（体積含水率、地下水の有無およびその水位）との関連を明かにする。最後に、現在用いられている、または既に提案されている通行規制・解除基準に対して、土中の水の状態に基づき考察を行うことを目的としている。

2. データ同化解析手法

先に述べたように、データ同化とは、現地計測結果によってシミュレーションモデルを逐次修正する

技術である⁴⁾。図-1は斜面への雨水浸透問題におけるデータ同化の位置付けを示している。現地計測では、計測点において土中の水の状態が計測されるが、その空間的な広がりなどは不明である。また、計測値は計測を行っている現在までの値であり、今後についても当然不明である。一方、コンピューターシミュレーションでは、空間的な土中の水分の状況や計測できない物理量なども得ることが出来る。また、降水予報を用いれば任意の降雨に対する土中の水の状態を予測することもできる。しかし、シミュレーションモデルを設定する際に不確定部分が多く、現地で実際に起こる雨水浸透挙動に対するシミュレーションモデルの適用性については担保されない。この両者を高度に融合させ、両者の欠点を利点によって打ち消しあうのがデータ同化である。つまり、計測値を再現できるようにシミュレーションモデルを逐次修正

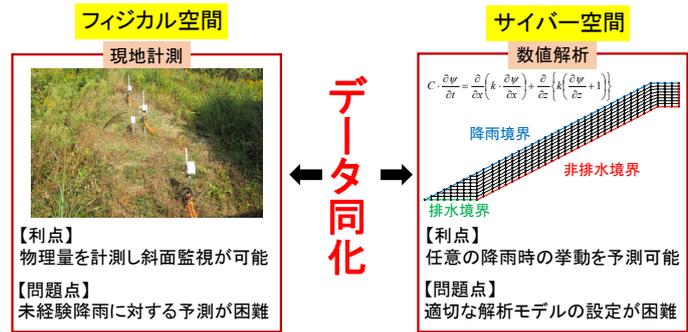


図-1 雨水浸透問題におけるデータ同化の位置付け

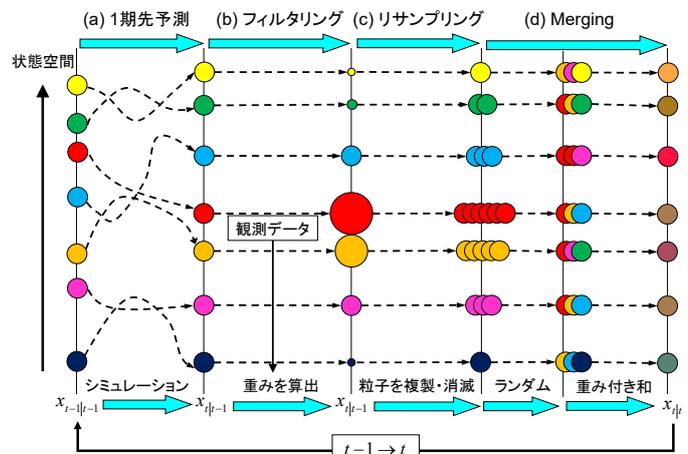


図-2 融合粒子フィルタのアルゴリズム⁴⁾

し、その修正されたシミュレーションモデルによってコンピューターシミュレーションを行うことにより、シミュレーション結果に対する信頼性を担保する。一方、計測値の空間的な広がりや今後の土中の水分の状態の変化などの予測についてはコンピューターシミュレーション結果が現地計測を補うこととなる。

以上、データ同化について概念的に説明したが、以下に本研究で使用したデータ同化手法について説明する。本研究では、粒子フィルタ (PF : Particle Filter) を用いた⁴⁾。粒子フィルタとはシステムの状態に関する確率分布を粒子と呼ばれる多数の実現値集合体で近似的に表現するデータ同化手法の1つである。各粒子はシミュレーションモデル (初期条件, 境界条件, パラメータ等) とシミュレーション結果である各時刻の物理量の情報を有している。そして、計測値に対する適合度に応じてそれぞれの粒子に重みを付け、その重みを活用することによって、計測値を再現可能なシミュレーションモデルの確率分布を求めるものである。PFには様々な手法があるが、本研究では、融合粒子フィルタ (MPF : Merging Particle Filter)⁵⁾を用いた。図-2はMPFのアルゴリズムを概念的に示している。MPFでは(a)1期先予測、(b)フィルタリング、(c)リサンプリング、(d)マージングの4つの計算ステップを繰り返すことによってデータ同化を行う。いま、図-2では7個の粒子がある。ここで、色の違いは各粒子の違いを表している。まず、(a)1期先予測では、時刻 $t-1$ から時刻 t までのシミュレーションが行われる。時刻 t における観測データ (計測値) が与えられると(b)フィルタリングが行われる。この過程では、観測データ (計測値) に対するシミュレーション結果への適合度に基づきベイズの定理によって各粒子の重みが計算される。図では、重みを玉の大きさで表している。つまり、観測データ (計測値) は赤色と橙色の粒子の間にあるため、赤玉と橙玉が大きく、観測データ (計測値) から

離れている黄玉と黒玉は小さい。次の(c)リサンプリングでは、(b)フィルタリングで付けた重みに応じてサンプルを復元抽出する。図では、全体が 21 個になるように重みに応じてサンプルを復元しているため、重みの大きい赤玉は 5 個、橙玉は 4 個となり、逆に小さい黄色玉や黒玉は 1 個である。最後に(d)マーキングでは 21 個のサンプルを 3 個ずつの組にし、それぞれについて重みつき和を行う。このようにして 7 個の粒子を再度作成する。このようにして作成された粒子は、観測データ（計測値）に近い値のシミュレーションモデル（赤玉、橙玉）の情報を持つ確率が高くなる。一方、観測データ（計測値）に遠い値のシミュレーションモデル（黄玉、黒玉）の情報を持つ確率は小さい。その結果、観測データ（計測値）を表現できる粒子の確率が高くなる。以上の計算ステップを繰り返すことによって、観測データ（計測値）に対して適合度が高いシミュレーションモデルの確率が高くなるように自律的に修正される。

3. 現地計測

本研究では、近畿地方に位置する道路沿いの盛土斜面を研究の対象とした⁶⁾。盛土は主にまさ土で構成されている。写真-1 は土壤水分計の設置状況を示している。まず、設置地点にトレンチを掘り、所定の設置深度において、掘削した鉛直面に対して垂直になるようにセンサ部分を地盤に突き刺して設置した。この方法であれば、掘削によって乱されない地盤にセンサを設置することができる。写真-2 は使用した土壤水分計を示している。Delta T Device 社製の SM150T⁷⁾であり、その仕様は、検出方法は誘電率測定方式（ADR 法）、測定範囲は 0~0.6m³/m³、測定精度は±0.03m³/m³である。

図-3 は現地の簡易貫入試験結果を示している。打撃回数は概ね深度とともに増加している。但し、深度 140cm 以深において打撃回数が急増している。この試験結果に基づき、土壤水分計の設置位置は地表面から深度 40cm、80cm および 100cm とした。また、雨量計も計測地点に設置した。いずれも計測間隔は 10 分である。

図-4 は本研究で研究対象とした降雨時における体積含水率の計測値と 10 分間雨量の経時変化を示している。研究対象とした降雨の総雨量は 437.5mm であった。

また、降雨継続時間が 73.5 時間であり、前半は降雨量が多く後半は少ないことから、前半が強めの長雨であったと判断される。体積含水率は、①上昇、②一時的な平衡状態、③再上昇、④再度の平衡状態および⑤漸減している。①は深度が浅いほど、②は深度が深いほど、⑤は深度が浅いほど開始刻が早い。

4. コンピューターシミュレーションの概要

本研究では、シミュレーションモデルとして赤井らの方法⁸⁾による飽和不飽和浸透流解析を用いている。不飽和土中の水の流れの支配方程式は次式で与えられる。



写真-1 土壤水分センサ設置状況



写真-2 土壤水分計⁷⁾

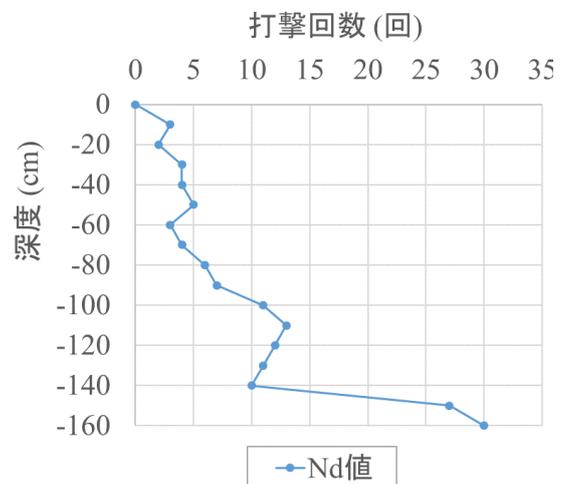


図-3 簡易貫入試験における Nd 値

$$C \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\Psi) \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} \quad (2)$$

ここに、 θ は体積含水率、 Ψ は土壌水分吸引水頭、 C は比水分容量、 t は時間、 k は不飽和透水係数である。個々で、 θ と Ψ の関係を表現するモデルが水分特性曲線モデルであり、 θ や Ψ から不飽和透水係数 k を算出するモデルが不飽和透水係数モデルである。本研究では、水分特性曲線モデルとしては式(3)に示す van Genuchten モデル⁹⁾を、不飽和透水係数モデルとしては式(4)に示す Mualem モデル¹⁰⁾を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1 - \frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$k = k_s \cdot S_e^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (4)$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 α と n は水分特性曲線の形状を与えるパラメータ、 k_s は飽和透水係数である。以上、これらのモデルにおける推定すべき未知パラメータは θ_s 、 θ_r 、 α 、 n および k_s の 5 種類である。

図-5 は解析モデルを示している。雨水の浸透は一次元的に生じることから鉛直方向の浸透のみを考慮する一次元問題としてモデル化を行った。簡易貫入試験の結果から 140cm 以深の土は良く締まっており、難透水層とみなせると考え、そこを排水境界とすることとした。そのため、モデル全体の大きさは 140cm とした。そして、各土壌水分計の設置深度の中間を層の境界として三つの層に分割した。また、モデル上面は降雨境界とし、雨量計で計測された降雨量の全量を与えた。次に、モデル側面は非排水境界とした。最後に、モデル底面は浸透係数を導入した排水境界とした⁶⁾。通常、浸透解析では、完全に水の出入りを遮断する非排水条件、全ての間隙水の出入りを可能とする自由排水条件のいずれかしか扱えない。そのため、境界に近い部分では境界条件の影響が過度に出てしまう傾向がある。これを避けるには、境界条件との緩衝体とするための有限要素を用いる必要がある。本研究で使用する浸透係数を用いた排水境界条

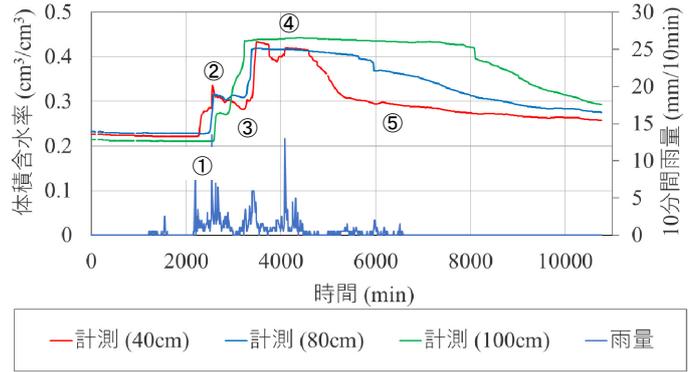


図-4 体積含水率と 10 分間雨量の経時変化

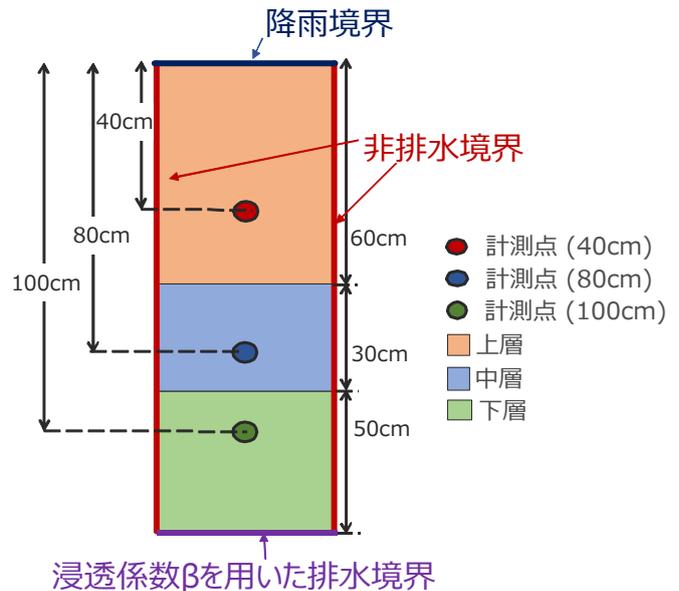


図-5 解析モデル

件とは、境界からの排水量を制御することにより、非排水条件と自由排水条件の中間的な条件を扱うことができる。ここで、境界からの排水量を制御する浸透係数 β は $0 \leq \beta \leq 1$ をとる値であり、 $\beta=0$ の時は非排水条件、 $\beta=1$ の時は自由排水条件を示す。

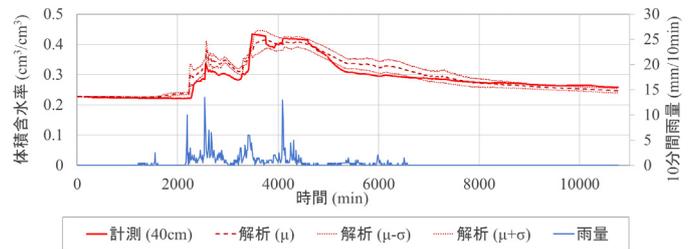
表-1 は解析に使用したパラメータの範囲を示している。2. で述べたように、PF では粒子と呼ばれるそれぞれが異なる条件を持つ多数のシミュレーションモデルが必要となる。これは、それぞれのケースにおいて異なる解析パラメータを使用したシミュレーションを意味している。本研究においては、500 個の粒子を用いた。すなわち、表-1 に示す解析パラメータの範囲内で一様乱数によりランダムなパラメータの組み合わせを 500 通り作成し、それぞれの粒子の解析条件とした。なお、本研究では、MPF を用いているので、各粒子のもつ解析パラメータは同化を行う毎に計測値と適合するように時々刻々変化する。

表-1 パラメータの範囲

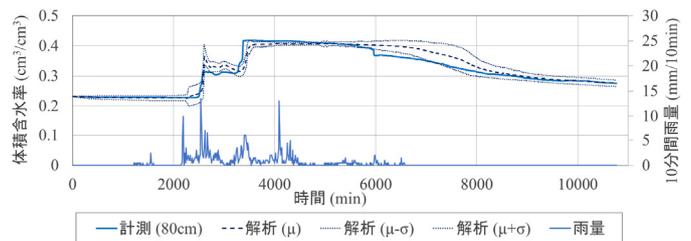
		θ_s (cm^3/cm^3)	θ_r (cm^3/cm^3)	α ($1/\text{cm}$)	n (-)	k_s (m/s)	β (-)
上層	最大値	0.44	0.20	0.13	1.8	1.0×10^{-3}	-
	最小値	0.42	0.12	0.03	1.3	1.0×10^{-5}	-
中層	最大値	0.42	0.20	0.13	1.8	1.0×10^{-3}	-
	最小値	0.40	0.12	0.03	1.3	1.0×10^{-5}	-
下層	最大値	0.45	0.18	0.13	1.8	1.0×10^{-3}	-
	最小値	0.43	0.12	0.03	1.3	1.0×10^{-5}	-
	最大値	-	-	-	-	-	0.1
	最小値	-	-	-	-	-	0.001

5. 土中の水の状態の再現性と地下水位の挙動

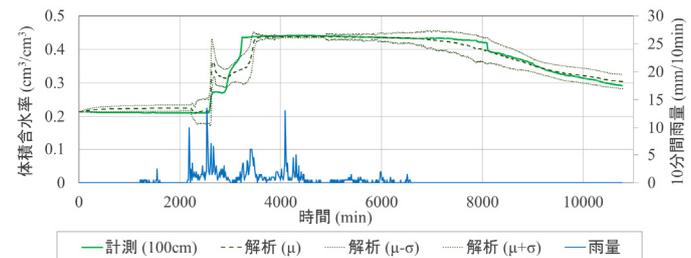
図-6 は計測値とデータ同化結果の比較を示している。図中、実線が現地計測値を、破線がデータ同化解析の結果を示している。また、凡例の μ は 500 個の粒子の平均値、 σ は標準偏差である。深度 40cm については、図-4 の②の区間における体積含水率が 0.05 近くデータ同化解析結果の方が大きい値を一時的に示したことが、③の区間においてピーク値に至る過程が十分に再現できていないこと以外は、計測値とデータ同化結果で体積含水率の経時変化は概ね一致している。深度 80cm に関しては、⑤の区間の 6000 分以降において、データ同化結果の方が体積含水率の低下が遅い点を除けば、計測値とデータ同化結果で体積含水率の経時変化は概ね一致している。深度 100cm に関しては、②や③の区間の計測値とデータ同化結果は大きな差がある。但し、この点を除けば両者の経時変化は概ね一致している。さて、計測値とデータ同化結果における違いの原因の一つとして間隙空気の影響が挙げられる。既往の研究において、間隙空気の影響により降雨が全て地盤内に浸透しない



(a) 深度 40cm



(b) 深度 80cm



(c) 深度 100cm

図-6 計測値とデータ同化結果の比較

ケースもあることが報告されている¹¹⁾が、本研究で使用したシミュレーションモデルでは間隙空気の影響を考慮していない。その他の原因としては、表層の植生などの影響によって降雨の一部が地面に浸透せず表面流としてのり面を流下したことも考えられる。次に、深度 100cm の体積含水率の計測値とデータ同化結果の差が他の深度と比べて大きかったことについて考察する。10 分間雨量に着目すると、2160 分以降の降雨では、降雨開始から 5.5mm/10min や 10 mm/10min と降雨が大きかった。そのため、モデル底面付近では水位が形成されていたのではないかと考えられる。よって、深度 100cm では底面付近での水位形成による毛管水帯の影響で 0.09 と他の深度よりも計測データと解析結果の差が大きくなったと推察される。しかし、その後降雨は 1.0mm/10min や 1.5mm/10min と弱くなったため、モデル底面付近に形成していたと考えられる水位も下降し、2710 分時点で深度 100cm の体積含水率も低下したと考えられる。

図-7 はデータ同化結果から推定される地下水位の経時変化を示している。まず、解析モデル底面の境界を、浸透係数を用いた排水境界条件によってモデル化したため、地下水位の発生と消失を再現できた。地下水位は約 3400 分で発生し、その後、急激に上昇する。約 3700 分で

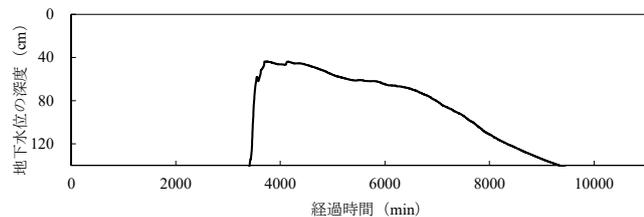


図-7 地下水位の経時変化

ピーク値の約 40cm の深度に達し、ほぼ平衡状態となる。約 4500 分まで深度約 40cm の地下水位を保った後、時間の経過とともに単調に地下水位は低下している。地下水位の発生は、降雨前半の強度の強い降雨によってではなく、後半の比較的弱い降雨に起因している。つまり、前半の降雨によって擬似飽和状態²⁾が形成され、その後の降雨によって地下水位が形成された。また、降雨強度が弱いにもかかわらず地下水位の形成からピークに達するまでは非常に急である。このことは、図-4 および図-6 において、体積含水率がほぼフラットになる時間が深度にかかわらずほぼ同じであることから裏付けられる。つまり、体積含水率がほぼフラットになるということは、完全に飽和したことを示しており、これは地下水位の上昇によるものである。データ同化結果に基づけば、地下水位のピークは深度約 40cm である。このことは地下水位がほぼピークに達した時点で深度 40cm の位置の体積含水率がフラットになっていることから裏付けられる。また、約 3900 分以降体積含水率がピーク値よりも若干小さくなっているのは、その期間において地下水位が若干低下していることと対応しているものと考えられる。図-4 および図-6 から分かるように、各深度の体積含水率が下がり始める時間が大きく異なるのは、地下水位の低下が上昇に比べてゆっくりであるからである。

6. 通行規制・解除基準時の土中の水の状態

道路の通行規制基準として、①多くの国道で用いられている連続雨量¹²⁾、②高速道路等で用いられている組合せ雨量¹²⁾、③筆者が提案した土壤雨量指数と時間雨量を組み合わせた基準¹³⁾を適用することとした。また、通行規制解除の基準は、①連続雨量の場合は、2mm/h 以下の雨量が 3 時間続いた時点、②組合せ雨量の場合は、2mm/h 以下の雨量が 6 時間続いた時点、③土壤雨量指数と時間雨量を組み合わせた基準の場合は、定められた土壤雨量指数 (180) を下回った時点とした。なお、今回適用する基準は、計測を行った盛土を有する道路に用いられているものではないこと、使用した雨量は雨量計によるものでなく、解析雨量であることを明記しておく。

表-2 は①の連続雨量による規制基準を示している。連続雨量は 140mm~200mm の 4 ケースとした。図-8 は組合せ雨量による規制基準を示している。図中には解析雨量に基づくスネーク曲線を併せて

示している。本基準においては、連続雨量の最大値を 200mm とした。降雨強度に関しては、25mm/h を基準とし、その時の連続雨量を 60mm~120mm の 4 ケースに変動させた。その結果、A120H25 を除き、時間雨量に基づく規制基準に達することとなった。図-9 は土壌雨量指数と時間雨量を組み合わせた規制基準を示している。図中には解析雨量に基づくスネーク曲線を併せて示している。本基準において、土壌雨量指数の最大値を 180 とした。降雨強度に関しては、25mm/h を基準とし、その時の土壌雨量指数を 50~11

0 の 4 ケースに変動させた。なお、図から分かるように、いずれにおいても同じ時点で規制基準に達する。

図-10 は体積含水率の経時変化と連続雨量に基づく通行規制・解除基準の関係を示している。規制基準に達したとき、深度 40cm と深度 80cm では、いずれも擬似飽和状態である。しかし、深度 100cm では、C140 と C160 が擬似飽和状態であるのに対し、C180 では擬似飽和状態から飽和状態へ移行中、C200 では飽和状態となっている。このことは、C200 では、地下水が発生し、水位が深度 100cm 以上に達していることを意味している

(図-7 参照)。一方、規制解除時点では、40cm では体積含水率が飽和状態から減少しはじめている。このことは、地下水位が深度 40cm 以下まで低下したことを意味している。80cm と 100cm では体積含水率が飽和体積含水率のままであることから、地下水位は深度 80cm よりも高いことが分かる。このような挙動を示すメカニズムは 5. で考察したとおりである。そのメカニズムに基づけば、深度 40cm では擬似飽和状態の期間が長い一方で、飽和状態の期間が短い。また、5. で示唆したように、深度約 140cm に難透水層が存在することから、深度 100cm では擬似飽和状態に至った後、

表-2 連続雨量による規制基準値

	連続雨量 (mm)
C140	140
C160	160
C180	180
C200	200

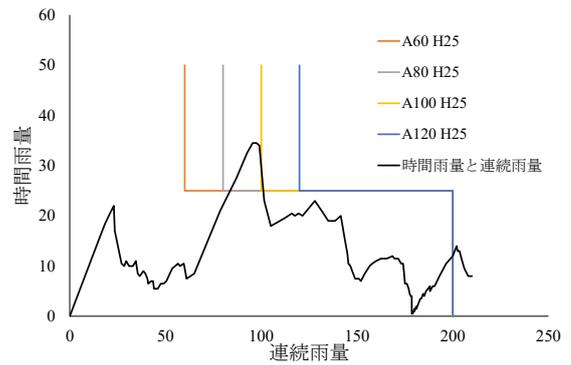


図-8 組合せ雨量による規制基準値

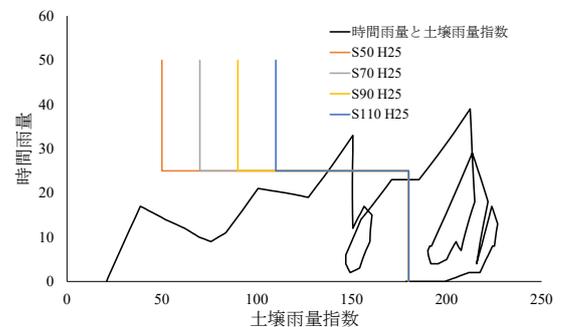


図-9 土壌雨量指数と時間雨量を組み合わせた規制基準値

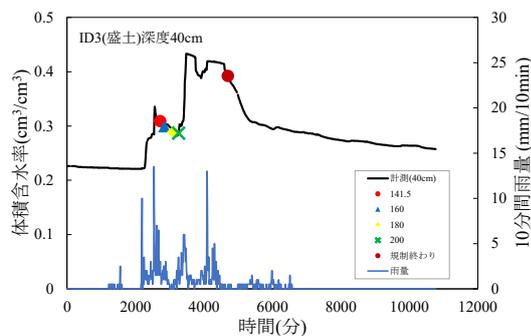


図-10(a) 体積含水率の経時変化と連続雨量に基づく規制基準の関係 (深度 40cm)

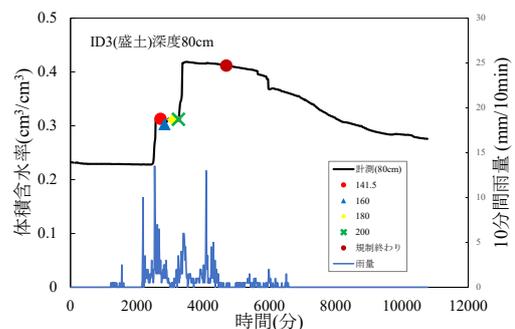


図-10(b) 体積含水率の経時変化と連続雨量に基づく規制基準の関係 (深度 80cm)

短い時間で浸潤面が難透水層に達し、地下水位が形成される。そして、急速に地下水位が上昇する（図-7 参照）。このため、ケース毎の土中の水分状態の違いが顕著に表れる。その一方で、降雨終了後の地下水位の低下は非常に遅いため、規制解除の基準に至るまでにその影響を受ける地下水位の最高水位とほぼ等しい深度 40cm だけである。

図-11 は体積含水率の経時変化と組合せ雨量に基づく通行規制・解除規制基準の関係を示している。規制基準に達したとき、深度 40cm ではいずれのケースも擬似飽和状態である。深度 80cm では、A60H25 と A80H25 では擬似飽和状態に至る過程であり、一方、A100H25 と A120H25 では擬似飽和に至っている。深度 100cm では、A120H25 のみが飽和状態に至っているが、それ以外は擬似飽和状態にも達していない。A120H25 を除き、連続雨量に基づく通行規制基準に比べて早い段階で規制がかかるのは、図-8 から分かるように、規制基準に達したとき連続雨量が小さいためである。なお、A120H25 では、時間雨量による基準に達しなかったため、C200 と同じ連続雨量 200mm の規制基準となる。一方、規制解除時点では、40cm では体積含水率が飽和状態から減少しはじめており、地下水位が低下していることが分かる。ただし、80cm と 100cm では体積含水率が飽和体積含水率のままであることから、地下水位は深度 80cm よりも高い。なお、規制解除の基準は 2mm/h 以下の降雨が 6 時間続いた場合としたが、その程度では地下水位は下がり始める程度である。

図-12 は体積含水率の経時変化と土壌雨量指数と時間雨量を組み合わせた基準に基づく規制基準の関係を示している。なお、先に述べたようにケースに関わりなくいずれも同じ時点で規制基準に達する。規制基準に達した時点では深度に関わりなくいずれも擬似飽和状態である。一方、規制解除時点、土壌雨量指数が 180 を下回った時点では、40cm では体積含水率が飽和状態から減少しはじめて

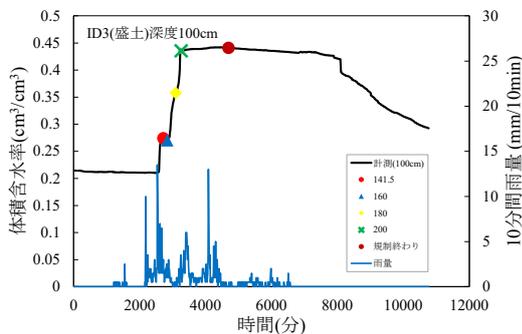


図-10(c) 体積含水率の経時変化と連続雨量に基づく規制基準の関係（深度 100cm）

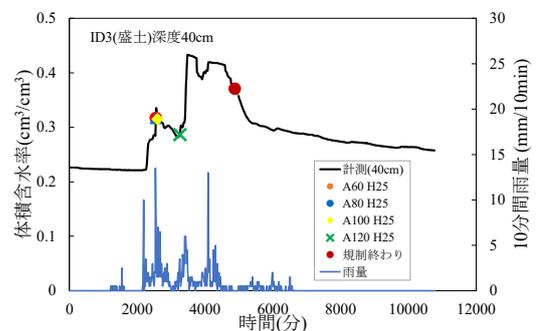


図-11(a) 体積含水率の経時変化と組合せ雨量に基づく規制基準の関係（深度 40cm）

おり、地下水位が低下しているが、80cm と 100cm

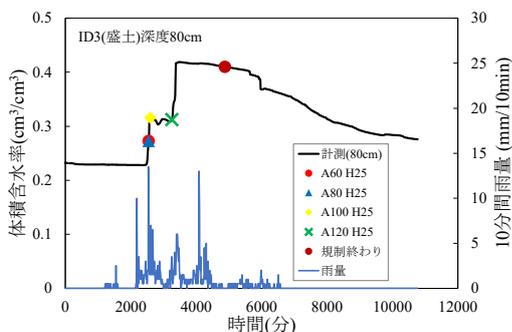


図-11(b) 体積含水率の経時変化と組合せ雨量に基づく規制基準の関係（深度 80cm）

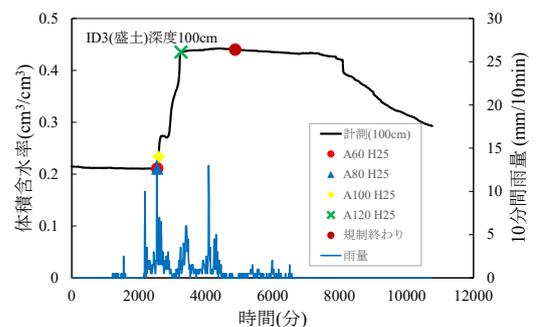


図-11(c) 体積含水率の経時変化と組合せ雨量に基づく規制基準の関係（深度 100cm）

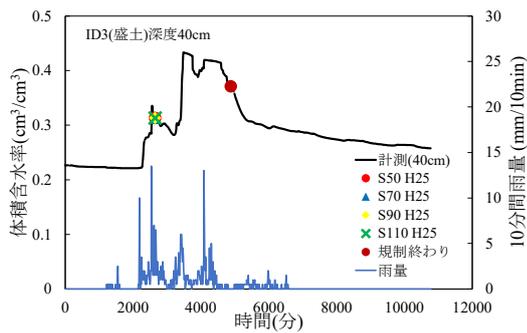


図-12(a) 体積含水率の経時変化と土壤雨量指数に基づく規制基準の関係 (深度 40cm)

では体積含水率が飽和体積含水率のままである。なお、本研究では、規制基準の土壤雨量指数の最大を組合せ雨量よる基準とほぼ一致するように決めている。

以上の結果から、本研究で検討対象とした道路の通行規制・解除基準では、通行規制を開始する時点ではほとんどのケースで擬似飽和状態である。ここで、地下水が発生した後の地下水位の上昇は非常に急であり、一挙にピークに達する(図-7 参照)ことから、地下水位の観測を以て通行規制を行うことが困難であることを示唆している。したがって、地下水位の発生する前の擬似飽和状態で通行規制を適用することが望ましいと考えられる。一方で、地下水位が低下しきるまでには非常に長い時間を要することから地下水位のピーク後、低下しはじめた段階において規制を解除するという点も理にかなっているものと考えられる。

本研究のような取り組みによって、土中の水の状態と通行規制・解除基準との関係を科学的見地から明らかにすることができた。空振り事例が多発している通行規制区間においては、本研究のような取り組みを行い、現地ののり面における土中の水の状態とそれを支配するメカニズムを解明することによって、通行規制・解除基準に科学的な裏付けを与えることができる。さらにそれを応用することによって、規制雨量の緩和や撤廃につなげるべきである。

7. 結論

本研究によって得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 体積含水率の計測結果に対し、浸透係数を用いた排水境界条件を考慮した飽和不飽和浸透解析をシミュレーションモデルとしたデータ同化解析によって、豪雨時の雨水浸透におけるシミュレーションモデルを同定できる。
- 2) 体積含水率の現地計測からでは不明であった地下水位の挙動を推定できる。
- 3) 豪雨時における土中の水の状態は、①斜面からの雨水浸透による擬似飽和状態、②地下水形成と地下水位の上昇による飽和状態、③降雨終了後、地下水位の低下による不飽和状態へと変動する。

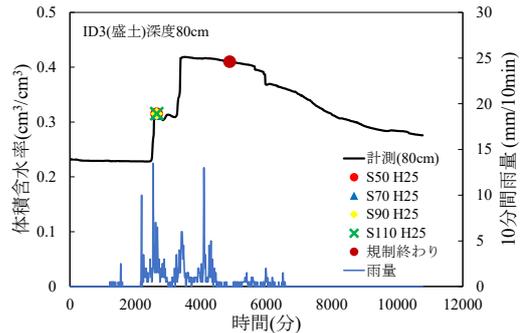


図-12(b) 体積含水率の経時変化と土壤雨量指数に基づく規制基準の関係 (深度 80cm)

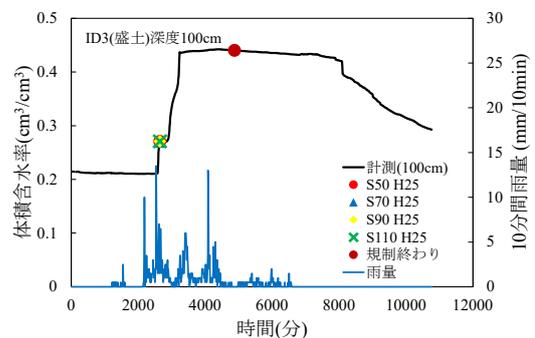


図-12(c) 体積含水率の経時変化と土壤雨量指数に基づく規制基準の関係 (深度 100cm)

- 4) 地下水の形成後、地下水位は一挙に上昇し、ピークに達する。但し、ピーク後、地下水位の低下は非常に遅い。
- 5) 通行規制が開始される際の土中の水の状態は、擬似飽和状態である場合が多い。
- 6) 通行規制が解除される際の土中の水の状態は、地下水位が下がりはじめている
- 7) 本研究の取り組みのような現地計測とコンピューターシミュレーションを組み合わせた取り組みによる豪雨時における土中の水の状態を推定から通行規制・解除基準に科学的裏付けを与えることができる。

参考文献

- 1) 一般財団法人 道路新産業開発機構：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，http://www.hido.or.jp/14gyousei_backnumber/2015data/1508/1508gerira_gouu_mlnt.pdf，(2018年2月13日閲覧)
- 2) 小泉圭吾，櫻谷慶治，小田和広，伊藤真一，福田芳雄：降雨時の表層崩壊に対する高速道路通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究，土木学会論文集 C，73/1, 93-105, 2017.
- 3) Society 5.0 - 科学技術政策 - 内閣府，https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/(2021年2月13日閲覧)
- 4) 樋口知之，上野玄太，中野慎也，中村和幸，吉田亮：データ同化入門—次世代のシミュレーション技術—，朝倉書店，2013.
- 5) 中野慎也，上野玄太，中村和幸，樋口知之：Merging Particle Filter とその特性，統計数理，56/2, 225-234, 2008.
- 6) 伊藤真一，小田和広，小泉圭吾，西村美紀，檀上徹，酒匂一成：融合粒子フィルタを用いた境界条件を含む浸透解析モデルの推定手法の提案，土木学会論文集 C，76/1, 52-66, 2020.
- 7) SM150T Soil Moisture Sensor - Delta-T Devices, (2021年3月13日閲覧)
- 8) 赤井浩一他：有限要素法における飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，No.264, pp.87-95, 1977.
- 9) van Genuchten, M.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Research Report, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
- 10) Mualem, Y.: A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resources Reserch, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 11) 岡崎滉大，小泉圭吾，小松満，小田和広，堤浩志：擬似飽和現象に着目した現地観測結果の一考察，地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集，pp.105-108, 2019.
- 12) 地盤工学会編：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，107-112, 2009.
- 13) 小田和広，鳥居宣之，小山倫史，小泉圭吾，藤本将光：連続雨量に基づく通行規制・解除基準と土壌雨量指数によるその比較，Kansai Geo-Symposium 2019 発表論文集，121-126, 2019.