

毛管遮水層 (Capillary Barrier) の歴史的建造物周辺の 斜面管理への応用

Application of Capillary Barrier to Maintenance and Management of Slopes around Heritages

北村良介¹・酒匂一成²・竹原晋平³

Ryosuke Kitamura, Kazunari Sako, Shinpei Takehara

¹ 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

Professor, Kagoshima University, Dept. of Ocean Civil Engineering

² 立命館大学ポスドク研究員 総合理工学研究機構(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Postdoctoral fellow, Ritsumeikan University, Research Organization of Science and Engineering

³ 兵庫県 (〒650-8567 兵庫県神戸市中央区下山手通 5 丁目 10 番 1 号)

Government of Hyogo Prefecture

Capillary barrier means the impermeable layer, which is observed at the boundary of two different unsaturated soil layers. The principle of capillary barrier has been applied for the ancient burial mound, capping of waste disposal site, and so on. In this paper, mechanism of capillary barrier is explained using the relationship between unsaturated permeability coefficient and suction. Soil tank test is also carried out to confirm the appearance and disappearance of the capillary barrier. Finally, the application of capillary barrier to the maintenance and management of slopes around the heritages are proposed.

Key Words: *Capillary Barrier, Unsaturated soil, Countermeasure, Slope failure*

1. まえがき

粒度分布が異なる土や同じ土でも間隙比が異なると不飽和浸透特性が異なる。ここに、不飽和浸透特性とは水分特性曲線によって表される不飽和土の保水特性と不飽和透水係数～含水量関係によって表される不飽和土の透水特性を意味している¹⁾。毛管遮水層 (Capillary barrier) とは不飽和浸透特性の異なる2つの不飽和土の境界で生じる遮水層のことである。毛管遮水層 (Capillary barrier) の原理を利用した代表的な土構造物に古墳²⁾、廃棄物処理場における覆土 (Capping)³⁾がある。古代アジア人は不飽和浸透特性を定量的に把握し、土中水の流れを制御する技術を有していたのであろうが、現代人はその技術を継承できていない。このことは、現代の地盤技術者が不飽和土質力学の重要性に気づいていないことを意味している。

本論文では、毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生・消滅メカニズムを水分特性曲線と不飽和透水係数～含水量関係から導かれる不飽和透水係数～サクシオン関係を用いて説明する。次に、毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生と消滅を確認するために行った模型実験を紹介する。最後に、歴史的建造物周辺斜面を取り上げ、毛管遮水層 (Capillary barrier) を応用した環境への負荷の少ない斜面の維持・管理手法を提案する。

2. 毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生・消滅メカニズム

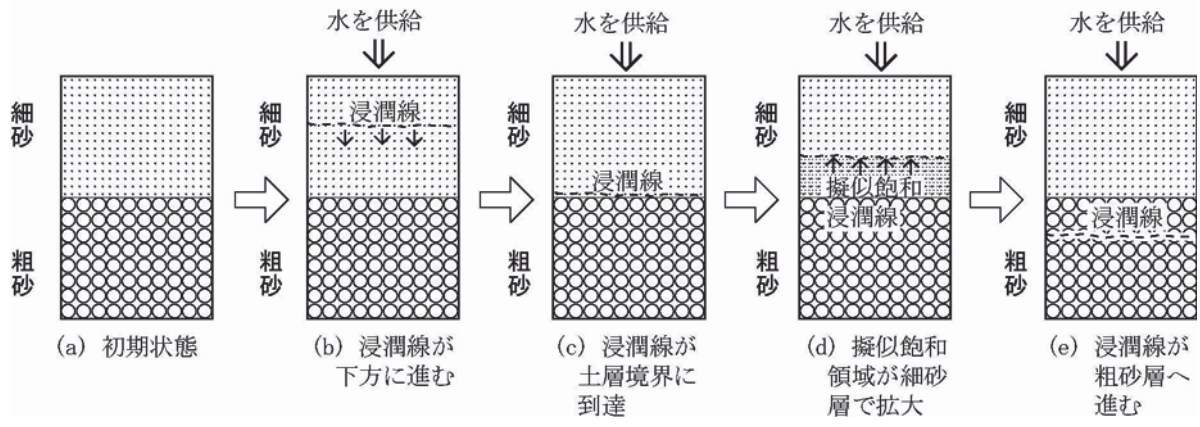


図1 細砂・粗砂からなる水平な層状土への不飽和浸透過程

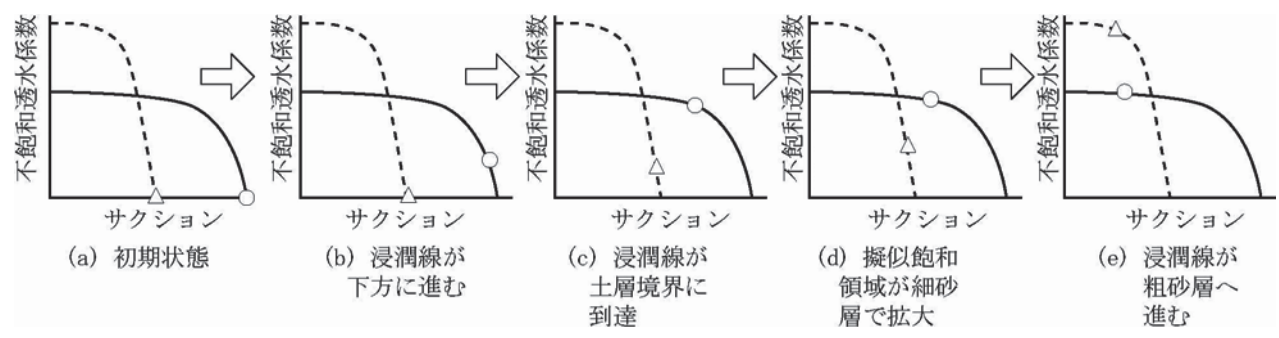


図2 不飽和透水係数～サクシオン関係と土槽境界面での細砂と粗砂の状態

図1(a)は乾燥した細砂・粗砂が水平に堆積した土層を示している。上部の細砂層上端から水を供給すると、浸潤線が細砂層を下方に進んでいく(図1(b))。浸潤線が細砂層と粗砂層との境界に達する(図1(c))としばらくの間、浸潤線は境界に止まる。その間、飽和(但し、飽和度 S_r は100%ではない、このような状態を擬似飽和と称することにする)領域が細砂層の上方に広がっていく(図1(d))。そして、ある時間が経過すると浸潤線は粗砂層を下方に進む(図1(e))。このような浸透過程において、浸潤線が細砂層と粗砂層の境界に達し(図1(c))、粗砂層に浸潤線が現れる(図1(d))までの時間は細砂層と粗砂層の境界に毛管遮水層(Capillary barrier)が発生し、その後、毛管遮水層(Capillary barrier)が消滅したことになる。ここでは、細砂と粗砂からなる層状土を取り上げたが、このような毛管遮水層(Capillary barrier)は同じ土で間隙比が異なる場合(上部の土の間隙比が小、下部の土の間隙比が大)にも生じる。

図2は、図1で取り上げた細砂と粗砂のサクシオンと透水係数の関係を示した模式図である。不飽和状態では細砂と粗砂の不飽和透水係数が含水量比に依存して逆転している。すなわち、サクシオンが大きい範囲(含水量が少ない状態)では細砂の透水係数が粗砂より大きく、サクシオンが小さい範囲(含水量が多い状態)では粗砂の透水係数が細砂より大きくなる。通常、粗砂の透水係数は細砂より大きいといわれるが、これは擬似飽和状態での透水係数の比較を行ったものであり、乾燥状態では細砂の不飽和透水係数が粗砂より大きくなる。

図2のプロットは、図1に示した不飽和浸透過程での経過時間とともに変化する土層境界面でのサクシオンと透水係数の状態を示している。初期状態(図2(a))では細砂層のサクシオン(○印)は粗砂層(△印)より大きい。上端から水を供給すると細砂層の含水量が増加し、土層境界面直上でのサクシオンは小さくなるが、境界面直下の粗砂層のサクシオンは初期状態と同じである(図2(b))。浸潤線が細砂層と粗砂層の境界に達した時でも境界面の細砂側のサクシオンは粗砂側よりも大きく(図2(c))、土中水は粗砂層には浸透しない。時間の経過とともに境界付近の細砂層では、擬似飽和領域が拡大し、境界面直上(細砂層)と直下(粗砂層)のサクシオン～透水係数関係が図2の交点に近づく(図2(d))。交点を過ぎ、さらにサクシオンが低下すると境界面直上(細砂層)と直下(粗砂層)のサクシオンは同じになり、毛管遮水層(Capillary barrier)は消滅する。図2において、細砂と粗砂の境界面での含水状態が曲線の交点より右側にあれば(すなわち、乾燥していれば)、毛管遮水層(Capillary barrier)が存在し、土中水は粗砂層には入らない。

表 1 土粒子密度

試料	土粒子密度 (g/cm ³)
赤土	2.74
さんご	2.7

ここでは、細砂と粗砂を組合せた場合の毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生・消滅を定性的に説明した。組合せは不飽和浸透特性の異なる土を用いれば、場合の数は無限大になる。例えば、粘土と砂、しらすと黒土、赤土とサンゴ礫などの組合せが考えられ、不飽和浸透過程でこれらの層状土の境界面に毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生・消滅が現れる。

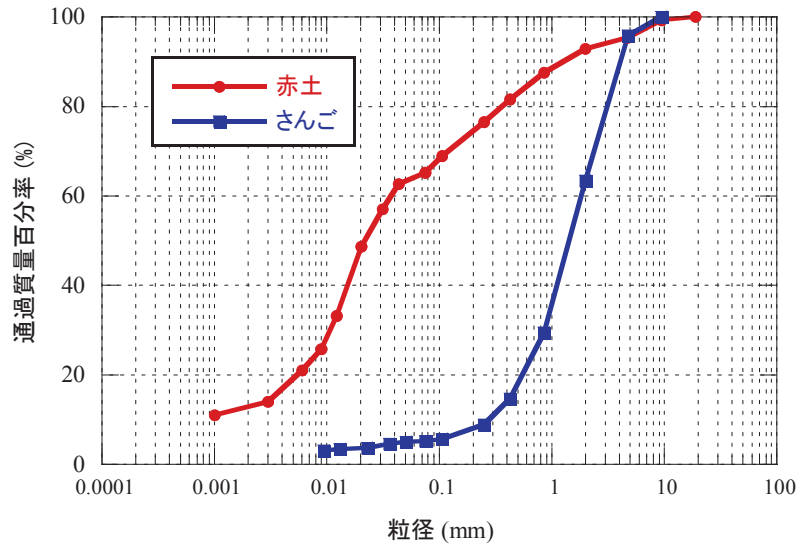


図 3 粒径加積曲線

3. 模型土槽試験による毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生・消滅⁴⁾の確認と数値シミュレーション

鹿児島県喜界島で採取した赤土とサンゴ礫粉砕試料を用いた模型土槽試験により 2 章で述べた毛管遮水層 (Capillary barrier) の発生・消滅を確認し、酒匂らが開発中の不飽和浸透数値解析コーディングを適用し、数値シミュレーションを行った。

(1) 採取試料、模型土槽試験装置、試験手順

採取試料の粒径加積曲線を図 3、土粒子密度を表 1 に示す。図 4 は、模型土槽試験装置の概略図を示している。模型地盤のサイズは高さ 40cm、幅 99cm、奥行き 30cm である。模型地盤では上層に赤土、下層にさんごを所定の間隙比 (赤土:1.0、さんご:0.7) になるように締固めて設置した。締固め終了時の各層の厚さは 10cm である。土層表面に水滴による浸食防止のため、ガラスビーズを 1cm 敷いた。図 4 に示すように降雨装置から模型地盤に水が供給された。供給量は流量計によって測定され、水道水のバルブを調節することによって一定の水量を模型地盤に供給するようにした (降雨量換算値: 5.0mm/h)。降雨装置のパイプの穴には 5cm 間隔で針 (内径 0.3mm) が挿入され、左右の振動を与えることによって、模型地盤に均等に給水されようとした。

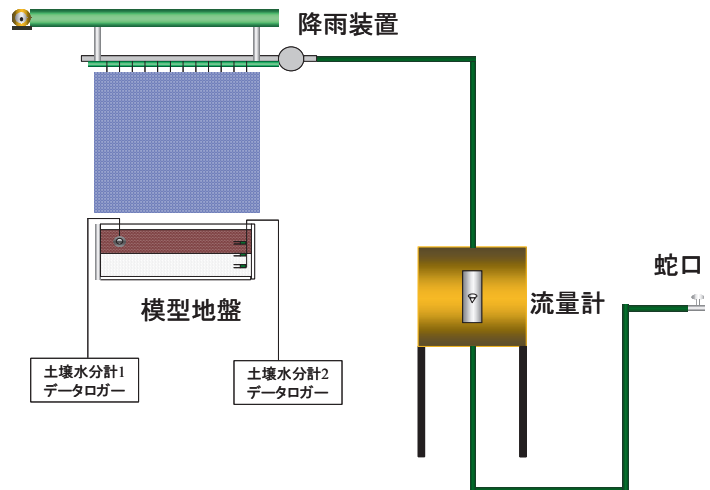


図 4 模型土槽試験装置の概略図

(2) 不飽和浸透試験結果

写真 1、写真 2 は不飽和浸透挙動を

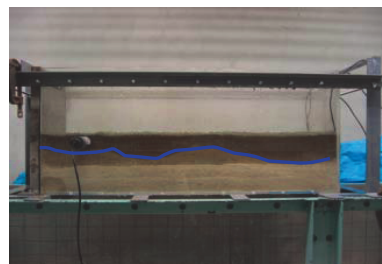


写真 1 454 分後

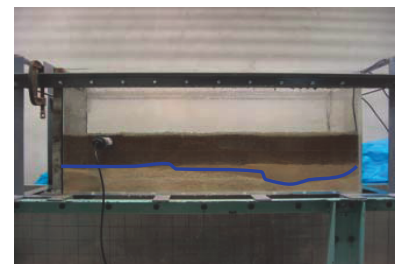


写真 2 720 分後

示したものである。試験開始から 454 分後浸潤線の右側が境界面に到達した(写真 1 参照)。試験開始から 512 分後に浸潤線がさんご層に浸透したことを目視により確認した。454 分後から 512 分後の間の約 50 分間赤土層への浸透がなかった。同様に、試験開始から 600 分後供試体中央が境界面に達し、660 分後さんご層へ浸潤線が下降した。つまり、60 分間赤土層で保持したことになる。720 分後、赤土層全面に浸透が確認できた(写真 2 参照)。

(3) 不飽和浸透シミュレーション

酒匂らが開発中の KITA-RP モデル⁵⁾⁶⁾の入力パラメータは粒径加積曲線、土粒子密度、間隙比、間隙水の密度・粘性係数である。KITA-RP モデルから不飽和・飽和透水係数～サクシオン関係が得られる。浸透モデルでは間隙モデルによって得られた計算結果を用いて 2 次元不飽和浸透解析を行う。

表 2 に KITA-RP モデルに用いる試料(赤土、さんご)の入力パラメータを示す。図 5 に間隙モデルから得られた、不飽和・飽和透水係数～サクシオン関係を示す。サクシオンの低い浸潤側ではさんご層のほうが不飽和・飽和透水係数が大きくなっているが、サクシオン 5kPa 付近で赤土とさんごの関係が逆転している。また、サクシオンの高い乾燥側では赤土層のほうが不飽和・飽和透水係数が大きくなっている。

不飽和浸透試験では、模型地盤と同じ解析領域を設定した。上面を降雨条件(5mm/h)、底面を排水条件とし、赤土およびさんごの初期サクシオンは 98kPa とした。図 6(a)より赤土層とさんご層の境界面で保水されているのが分かる。これは、赤土層とさんご層の境界面に毛管遮水層(Capillary barrier)が発生していることを示している。図 6(b)では、毛管遮水層(Capillary barrier)が消失しさんご層へ浸透が進んでいる。

4. 毛管遮水層(Capillary barrier)を応用した斜面の維持・管理手法

図 7(a)は、図 1 の水平な土層を傾けたものであり、図 7(b)はその状態を斜面に置き換えたもの(地山や盛土の斜面保護に締固め土を利用)を示している。図 1 の水平な層状土では浸潤線が境界に達すると擬似飽和領域が上方に拡大するだけであったが、図 7(a)のような傾斜した層状土では、土中水は境界面にそって下方に流れる。枠工やコンクリート吹付けで斜面を

表 2 KITA-RP モデルの入力パラメータ

試料	赤土	さんご
土粒子密度 (g/cm ³)	2.74	2.70
水の表面張力 (N/m)	73.48×10 ⁻³ (水温15°C)	
水の粘性係数 (Pa・s)	1.138×10 ⁻³ (水温15°C)	
間隙比	1.00	0.70
粒径加積曲線データ数	17	13
保水性試験データ数	12	13
透水試験データ数	2	1

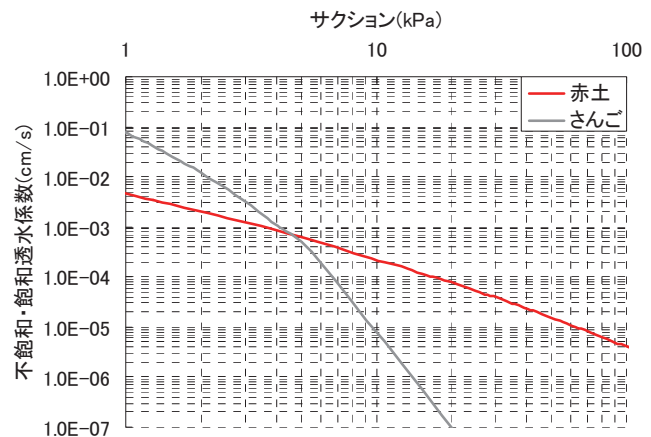


図 5 不飽和・飽和透水係数～サクシオン関係

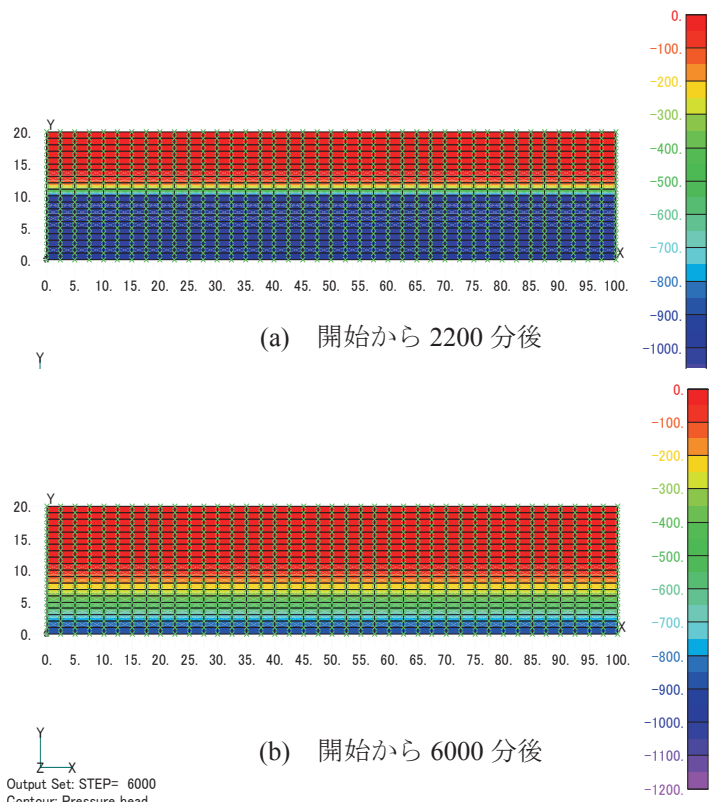


図 6 圧力水頭分布

Output Set: STEP= 6000
Contour: Pressure head

保護するのではなく、斜面を構成する土より細かな土を締めめて斜面を保護し、法尻部に排水溝を設けることによって雨水の斜面への浸透を防ぐことが可能となる。その際、版築技術を再現・改良した斜面での締めめ技術の開発が必要である。降雨時の表層すべり型斜面崩壊は潜在すべり面上のせん断強度の低下と崩壊土塊の自重の増加によるものと考えられている。ここに、表層すべり型斜面崩壊とは、崩壊深が1 m前後、崩壊幅が5 m前後、崩壊長が10~20 m程度の比較的小規模な斜面崩壊を意味している。含水量の増加によってせん断強度は低下する。従って、表層すべり型斜面崩壊を防止するためには、潜在すべり面上の含水量が増加することによって安全率が1を割ることのないようにすればよい。図7(b)に示す地山や盛土の安全率が1を割るような含水量の増加を起こさせないためには、地山・盛土と締めめ土の間に毛管遮水層(Capillary barrier)を発生させ、雨水が締めめ土の中を流下するようにすればよい。粒径分布や間隙比の異なる層を増やすことによって毛管遮水層(Capillary barrier)の効果を大きくすることができる。

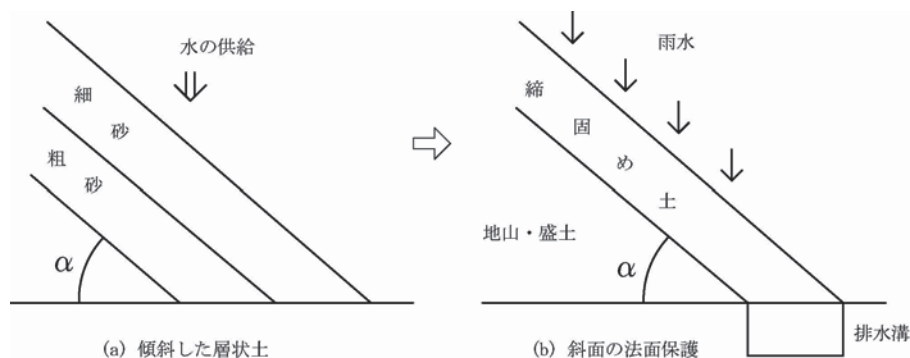


図7 傾斜した層状土と実際の斜面

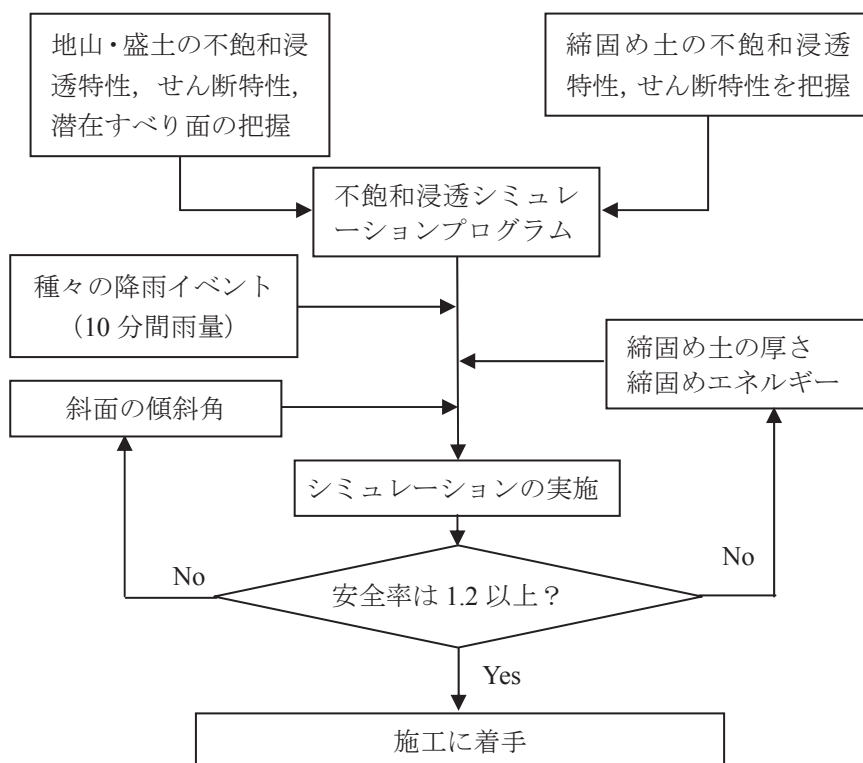


図8 Capillary barrier を応用した斜面保護工の調査・設計手順

そのような状況が発生させるためには地山・盛土、締めめ土の不飽和浸透特性を入力パラメータとする不飽和浸透シミュレーションを行えばよい。北村ら^{7) 8)}は、不飽和シミュレーションプログラムの開発を行っている。図7に示した手法を斜面防災に適用するためには施工上の問題点を解決しなければならないが、ここでは言及しない。

図8はこれから毛管遮水層(Capillary barrier)を利用した斜面保護工を実施しようとする場合の作業手順を示している。地山・盛土、締めめ土の不飽和浸透特性を把握するためにはサンプリング試料による保水性試験、不飽和透水試験を行うか、原位置透水試験を行わなければならない。せん断特性を把握するためには採取試料によるせん断試験を行い、せん断強度パラメータを求めなければならない。降雨イベントとしては過去に災害を起こしたいくつかの豪雨を入力すればよい。安全率が1を割る場合は、締めめ土を細砂、粗砂、シルト、粘土等の互層にすることが考えられる。いずれにしても、最適な解を得るためには、降雨強度、総降雨量、湿度、気温を境界条件として考慮できるシミュレーションプログラムが必要である。

図9は、既存の毛管遮水層(Capillary barrier)を利用した斜面の管理手順を示している。斜面の傾斜角、締めめ土の厚さが既知であることが図8と異なる。酒匂ら⁹⁾はこのような手順で寺社の斜面の管理を行っている。北村ら¹⁰⁾は降雨による斜面崩壊予知システムを提案している。従来、斜面崩壊の原因として地下水位の上昇が挙げられる場合があったが、少なくとも表層すべり型斜面崩壊では擬似飽和領域の拡大と解されるも

の多いのではないかと推測される。従って、図 8、図 9 の手順に地下水水位調査は含まれていない。

歴史的建造物周辺には降雨時や地震時に崩壊する可能性の高い斜面が数多く存在する。これらの斜面の安定性を定量的に評価し、本論文で提案した毛管遮水層 (Capillary Barrier) を応用した対策を講じることは、地球環境問題とも関連し、有用であると考えられる。

5. あとがき

現代の地盤工学では土の締固めには高度な技術は含まれないとされ、土の締固め技術は無視されてきている。ここでもう一度締固め技術の重要性を地盤技術者は認識し、職人芸的な締固め技術の復興を目指すべきである。地球環境への負荷の観点からコンクリートや鉄を利用した斜面防災構造物とライフサイクルコストを比較すると、少なくとも廃棄のコストが不要となり、リユースが可能である。

本稿では植生のこと (蒸発散による土中の含水状態への影響、根系による補強効果) については言及していない。植生の影響・効果を今後調べていかなければならない。植生の影響が定量的に評価されれば、不飽和浸透シミュレーションプログラムに取り入れることは容易である。

謝辞：本研究に対して科研費基盤 (A) の援助をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 北村良介：講座 不飽和土・不飽和地盤 (1. 講座を始めるにあたって)，地盤工学会誌，Vol.56, No.4, pp.53-54, 2008.
- 2) 松元真一，北村良介：不飽和土質力学に基づく版築技術の復興に向けて，第 61 回土木学会年次学術講演会 (III 部)，pp.785-786, 2006.
- 3) 工藤賢悟，鈴木正人，中尾法生：砂で雨水の鉛直浸透を遮断する新工法 - キャピラリーバリア型遮水覆土 -，電力土木技術協会誌，技術情報，Vol.310, pp.155-157.
- 4) 竹原晋平，田中祥司，北村良介：Capillary Barrier (毛管遮水層) の赤土等流出問題への応用，第 43 回地盤工学研究発表会，pp.1965-1966, 2008.
- 5) K. Sako and R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 6) 北村良介：地圏シミュレータ構想と北村モデル，第 63 回土木学会年次学術講演会 (III 部門)，2008 (印刷中).
- 7) 松元真一，北村良介，酒匂一成，外狩麻子，島村誠：鉄道盛土における雨水浸透に関する数値解析，第 60 回土木学会年次学術講演会 (第 III 部)，pp.587-589, 2005.
- 8) 松元真一，酒匂一成，北村良介：二層不飽和土の保水・浸透特性に関する一考察，第 62 回土木学会年次学術講演会 (III 部)，pp.193-194, 2007.
- 9) 酒匂一成，深川良一，岩崎賢一，里見知昭，安川郁夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol.1, No.3, pp.57-69, 2006.
- 10) 北村良介，酒匂一成：降雨によるのり面/斜面崩壊，基礎工，Vol.35, No.11, 通巻 412 号，pp.27-29, 2007.

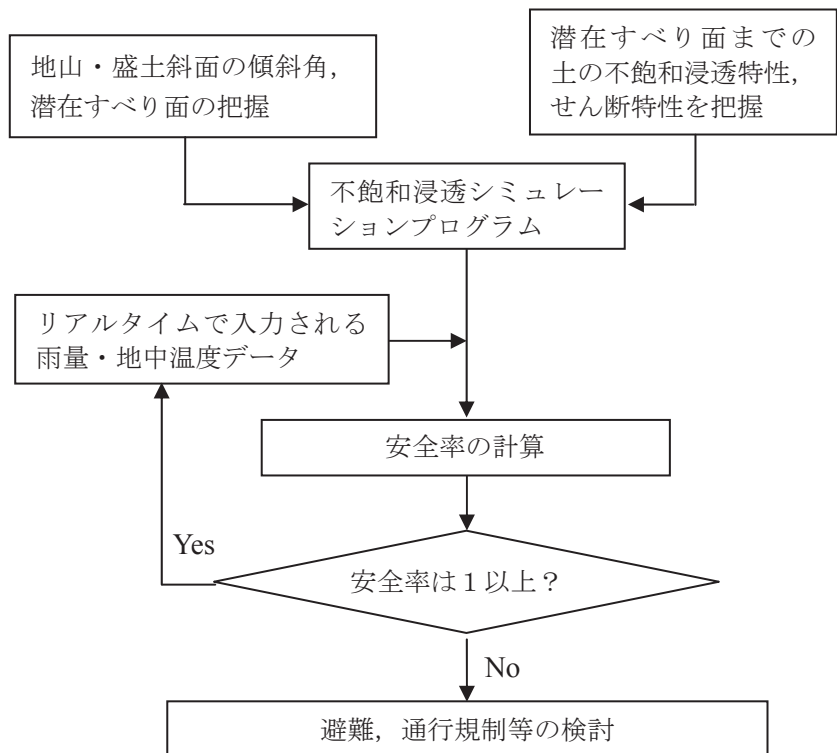


図 9 Capillary barrier を応用した既設斜面の管理手順