

マサ土斜面の安定性評価に用いる降雨条件の提案

Proposal for Rainfall Condition for Slope Stability Evaluation of Granite Soil

笹井友司 Yuji SASAI (中電技術コンサルタント(株) 原子力プロジェクト室)
西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学大学院 環境生命科学研究科)
西山 哲 Satoshi NISHIYAMA (岡山大学大学院 環境生命科学研究科)

毎年各地で集中豪雨による斜面崩壊が発生しており、調査・解析による崩壊メカニズムの解明に向けた多くの研究がなされている。これらの大半は、斜面崩壊時の雨量記録に対してなされており、非崩壊時の降雨イベントとの比較や他地点の豪雨に対する研究事例はあまりない。近年、地球温暖化に起因すると思われる集中豪雨の多発等によって降雨の地域性が薄れる中、斜面の現状の安定性評価と対策工の検討に用いる統一的な降雨特性の設定が不可欠と考える。そこで本論文では、近年の集中豪雨を考慮した FEM 飽和-不飽和浸透流解析を行い、福岡県から中国地方、愛媛県、兵庫県にかけて分布するマサ土斜面の現状評価・対策工検討に用いる統一的降雨条件の提案を行った。

キーワード：マサ土，斜面安定，降雨浸透，浸透流解析 (IGC : B05, E06, E07)

1. はじめに

花崗岩の風化土であるマサ土は、主として九州南部に分布するシラス・ボラ・コラ・赤ホヤ・ヨナ、静岡県に分布する富士マサと並んで特殊土壌に位置付けられている。また、マサ土は、降雨による崩壊や土砂流出が激しいため、福岡県北部から中国地方 5 県の大半、愛媛県北部に加えて、兵庫県と九州南部の熊本県、宮崎県、鹿児島県の一部が特殊土壌地帯に指定されている¹⁾。

近年、マサ土が分布する福岡県から兵庫県では、時間雨量が 60mm を超える 1999 年 6 月広島豪雨²⁾、2009 年 7 月山口豪雨³⁾、2010 年 7 月広島県庄原豪雨⁴⁾、2012 年 7 月九州北部豪雨⁵⁾、2013 年 7 月山口・島根豪雨⁶⁾、2014 年 8 月兵庫県豪雨⁷⁾、2014 年 8 月広島豪雨⁸⁾により斜面崩壊が発生している。これを受け、調査・解析による崩壊メカニズムの解明に向けた研究^{たとえ 9), 10)}が多くなされているが、非崩壊時の降雨イベントとの比較や他地点の豪雨による研究事例はあまりない。

地球温暖化に起因すると思われる集中豪雨の多発や台風経路の変化等によって、降雨の地域性は薄れつつあり、他地点での既往最大豪雨がどこでも発生する可能性がある。平成 27 年 11 月の水防法改正では、浸水想定区域の設定に用いる降雨量の設定範囲を従来の河川流域エリアから全国 15 エリアへ大幅に拡大するとともに、想定し得る最大規模の降雨を考慮することとされた¹¹⁾。

前記より、斜面内の浸透挙動の把握が不可欠である降雨時の斜面安定性の現状評価と、それに基づく排水孔などの崩壊抑制対策の配置検討等においても、拡大したエリアでの統一的な降雨特性の設定が必要と考える。

そこで本論文では、図-1 に基づいて上記 7 豪雨に対する FEM 飽和-不飽和浸透流解析^{12), 13)}を行い、マサ

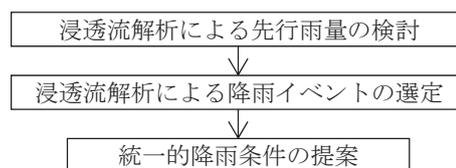


図-1 統一的降雨条件の検討フロー

土が分布する福岡県から中国地方、愛媛県、兵庫県を 1 エリアとした斜面安定性の現状評価や対策工の配置検討等に用いる統一的降雨条件の提案を試みる。なお、本論文では崩壊抑制対策、つまり防災への適用を考慮したうえで安全側の降雨条件となるよう、先行雨量と降雨イベントそれぞれについて地下水位上昇量が最大となる降雨イベントを検討する。また、前記 7 豪雨の実績から、本論文では 1977 年～2016 年の至近 40 年間で時間雨量が 60mm を超える降雨イベントを集中豪雨と定義する。

2. 浸透流解析による先行雨量の検討

斜面の安定性には、総雨量のみならず先行雨量が大きく影響するとされている^{たとえ 14)}。そこで本章では、2 次元および 3 次元の FEM 飽和-不飽和非定常浸透流解析を行い、統一的先行雨量の設定を行う。

2.1 解析条件

解析モデルは、1999 年 6 月広島豪雨による自然斜面の崩壊実績^{たとえ 9)}を参考に、2 次元モデルは図-2 に示す表層厚 2m、斜面勾配 30° の一様斜面とした。また、3 次元モデルは、図-2 の 2 次元モデルに図-3 の横断面形状を組み合わせた図-4 に示す谷地形モデルを仮定し

た. なお, 表層厚 2m は, マサ土斜面の大半が崩壊厚 2m 以下(たとえば 2), 3), 7), 8)であることを考慮している.

解析手法は, FEM 飽和-不飽和浸透流解析とし, 地表面は降雨浸透境界, 下流境界はモデル下端に水頭固定, 上流側と 3 次元の側面(尾根筋)およびモデル底面は不透水境界とした. また, 初期水位はモデル底面とした.

飽和透水係数は, 崩壊地の試験結果(たとえば 15), 16), 17), 18)を参考に表-1 に示す 4 ケースを設定し, 図-5 に示す不飽和特性¹⁹⁾を設定した. なお, ケース 4 の飽和透水係数 $3.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ は, 2014 年 8 月広島豪雨による崩壊斜面の浸透流解析¹⁸⁾に用いられた値である.

また, 浸透能については, 厚さ 2m の表層地盤では図-5 の有効間隙率約 15%, 飽和度 0% の状態で 300mm 相当の雨量しか貯留できず, 大きな浸透能を設定すると全ケースで斜面内が完全飽和してしまい, 降雨特性の違いが評価できない. このため, 目的が地下水位上昇量の把握でなく, 対策工の検討等に用いる先行雨量の設定にある本検討では, 浸透能を小さめの 30% に設定した. この浸透能 30% は, タンクモデルを用いた流出係数・浸透能に関する既往研究²⁰⁾において, 浸透能は降雨初期段階の 100% から地盤内の飽和度の上昇に伴って 30% 程度まで低下するとの研究成果を参考にしている.

降雨条件は, 図-6, 図-7^{21), 22), 23)}に示す前章 7 豪雨の雨量記録を整理し, 主要な降雨を選定した. ここで, 1999 年 6 月広島豪雨は, 解析モデルの設定に用いた崩壊斜面近傍の八幡川橋気象観測所(日本道路公団, 現 NEXCO 西日本)の雨量記録を入手できなかったため, 降雨特性が前記観測所とほぼ同様である気象庁呉特別地域気象観測所の雨量記録^{10), 21)}を用いている. 集中豪雨(以降, 「降雨イベント」と記載)と先行雨量の区分けは, 河川堤防の浸透に対する安全性照査¹⁹⁾を参考に, 時間平均雨量 1mm/hr 程度以上となる範囲を降雨イベントとし, それ以前を先行雨量とした. なお, 河川堤防の浸透に対する安全性照査では, 先行雨量として梅雨時期の月平均雨量の平年値程度を 1mm/hr の雨量強度で与えることとされており, この雨量強度 1mm/hr は先行雨量が堤防内に全て浸透するよう設定されている. 時間平均雨量 1mm/hr 程度以下を対象とした先行雨量については, 降雨イベント前の 2 ヶ月間に 100mm/day を超える強雨がかったものを対象に設定した. その結果から, 先行雨量の時間平均雨量が多い 2010 年 7 月広島県庄原豪雨と 2012 年 7 月九州北部豪雨の 2 豪雨を選定した.

表-1 飽和透水係数の検討ケース

ケース番号	飽和透水係数
1	$1.0 \times 10^{-1} \text{cm/s}$
2	$1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
3	$1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$
4	$3.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$

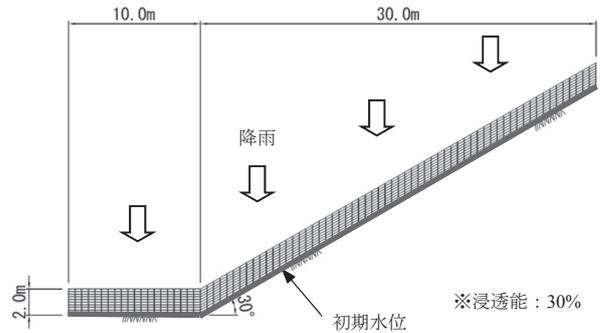


図-2 2次元浸透流解析モデル

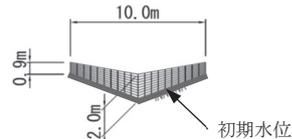


図-3 横断方向の要素分割図

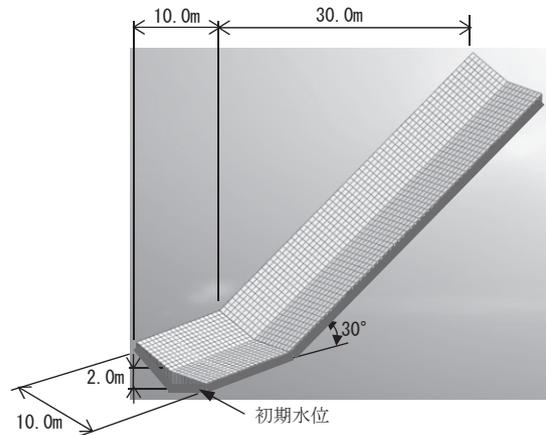


図-4 3次元浸透流解析モデル

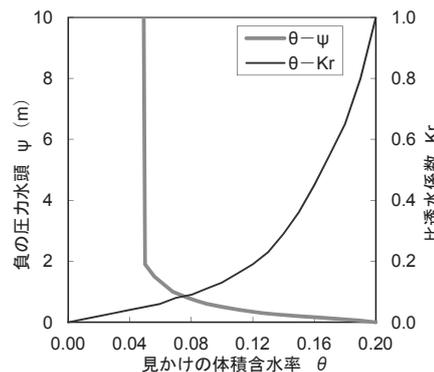
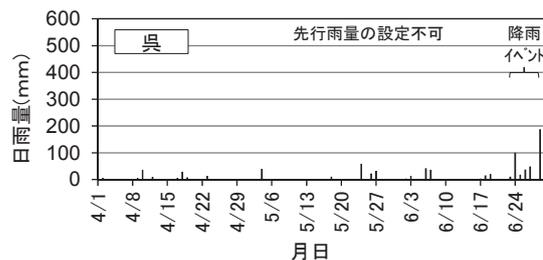


図-5 不飽和特性(礫質土, 砂質土)¹⁹⁾



(a) 1999 年 6 月広島豪雨²¹⁾

図-6 近年の集中豪雨における先行雨量(その 1)

マサ土斜面の安定性評価に用いる降雨条件の提案

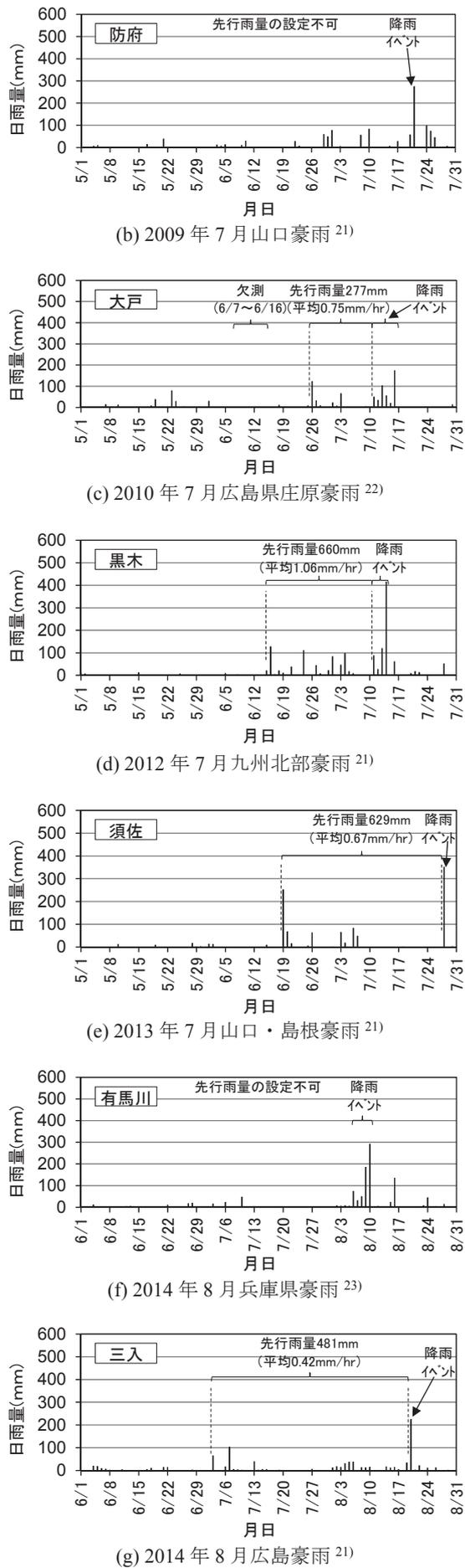


図-7 近年の集中豪雨における先行雨量 (その2)

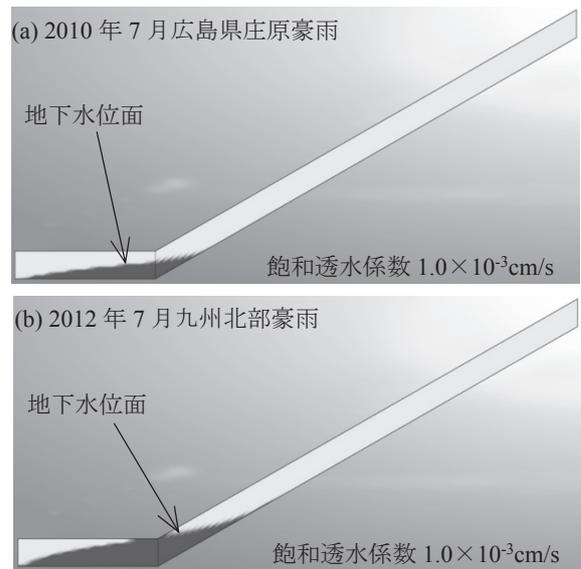


図-8 2次元非定常水位(実績先行雨量考慮, ケース3)

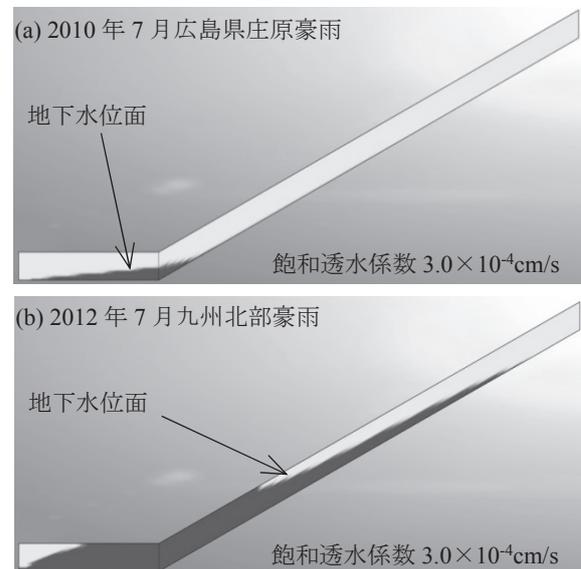


図-9 2次元非定常水位(実績先行雨量考慮, ケース4)

2.2 解析結果

2010年7月広島県庄原豪雨, 2012年7月九州北部豪雨の先行雨量に対する浸透流解析結果を図-8~図-12に示す. なお, 2次元解析のケース1とケース2, 3次元解析のケース1のように透水係数が大きなケースでは, 降雨イベント前の無降雨期間に斜面内の水位が低下し, 地下水位面が形成されなかったため図示していない.

その他のケースは, 2次元, 3次元ともに, 時間平均雨量の多い2012年7月九州北部豪雨の方が2010年7月広島県庄原豪雨に比べて地下水位が高くなる. また, 2010年7月広島県庄原豪雨におけるケース4の地下水位は, 2次元ではケース3に比べて低いが, 3次元では高くなる. これは, ケース4は透水係数が小さく, 2次元では降雨浸透水が地下水位面に至らないのに対し, 3次元では薄層で降雨浸透水がモデル底面に到達しやすい側方からの地下水流入によって谷部が水位上昇し, その上昇した地下水位面に降雨浸透水が至ることによる.

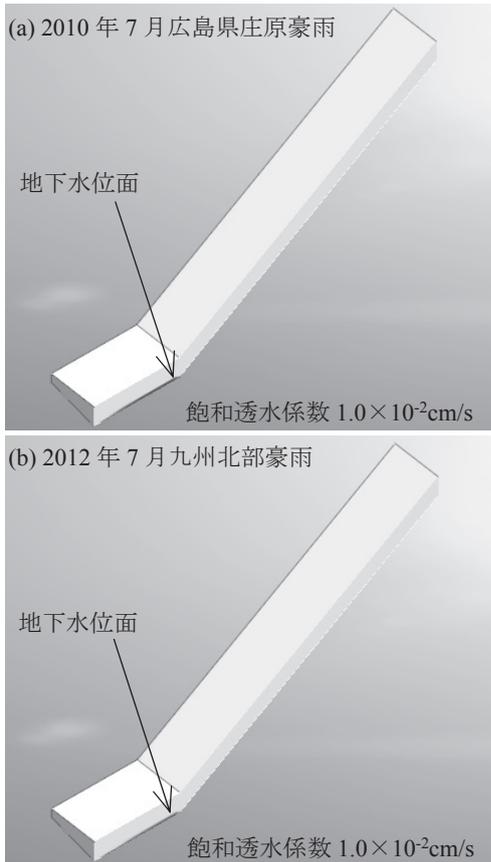


図-10 3次元非定常水位【谷部で切断表示】
(実績先行雨量考慮, ケース 2)

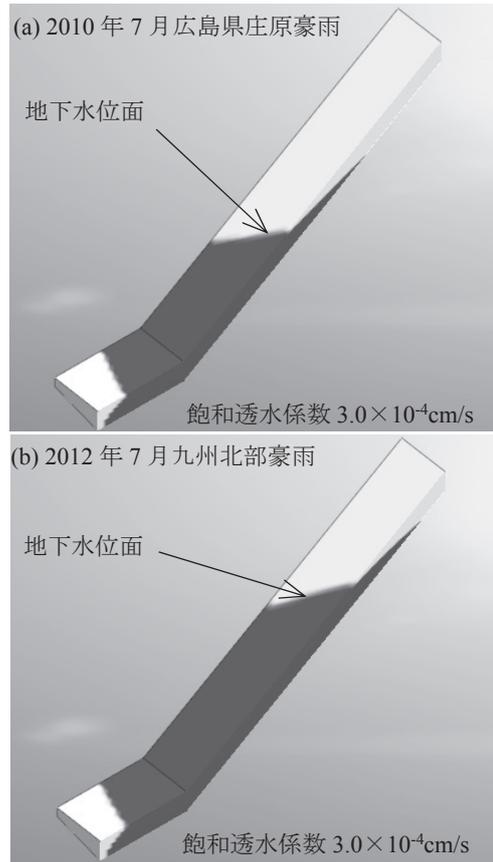


図-12 3次元非定常水位【谷部で切断表示】
(実績先行雨量考慮, ケース 4)

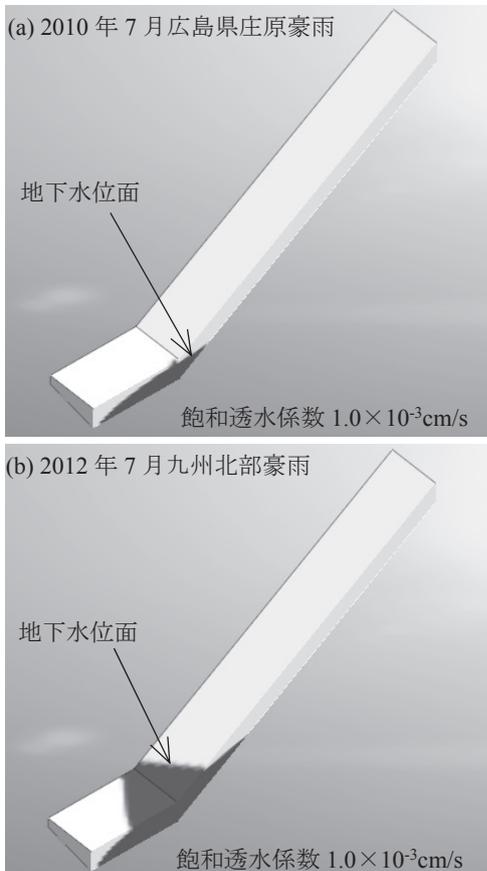


図-11 3次元非定常水位【谷部で切断表示】
(実績先行雨量考慮, ケース 3)

2.3 先行雨量の設定

本検討対象の 8 県内気象庁全観測所における既往最大月合計雨量は、鳥取県の大山地域気象観測所で 2011 年 9 月に観測された 1400mm である。この降雨による最大時間雨量は 50mm/hr であり、本論文で集中豪雨として定義した最大時間雨量 60mm/hr に達していない²⁾。このため、大山地域気象観測所は検討対象から除外した。

これにより、2012 年 7 月の九州北部豪雨を含む 6 月 15 日から 7 月 14 日までの月合計雨量 1309mm は、8 県内における既往最大雨量となる。また、先行雨量 660mm も 8 県内の既往最大となり、改正水防法で定義されている想定し得る最大規模の降雨であると言える。

以上より、先行雨量としては、2012 年 7 月の九州北部豪雨の実績 660mm を考慮したうえで少し安全側の時間雨量 1mm/hr が 1 ヶ月 (720hr) 継続するものとした 720mm を提案する。提案にあたって、図-13、図-14 に示すとおり、1mm/hr × 660hr を考慮した 2 次元、3 次元の浸透流解析による地下水水位面が、前節の図-8～図-12 に示す 2012 年 7 月九州北部豪雨の先行雨量に対する地下水水位面を上回ることを確認している。また、本検討結果は、無降雨期間のある断続的な降雨に比べて、無降雨期間のない継続的な降雨の方が水位上昇量が大きくなることを示唆している。なお、飽和透水係数を 3.0 × 10⁻⁴cm/s としたケース 4 では、2 次元、3 次元とも斜面内が完全飽和した状態となったため、図示していない。

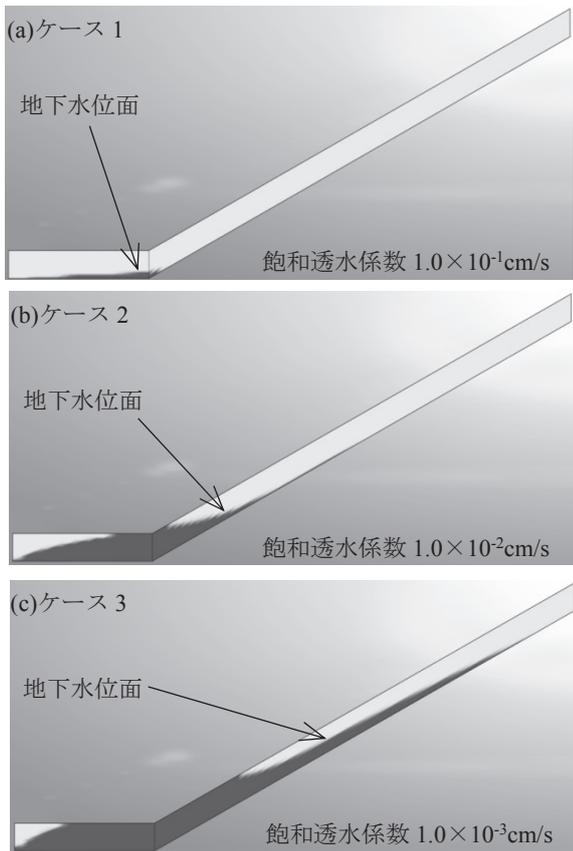


図-13 2次元非定常水位
(先行雨量 $1\text{mm/hr} \times 660\text{hr} = 660\text{mm}$ を考慮)

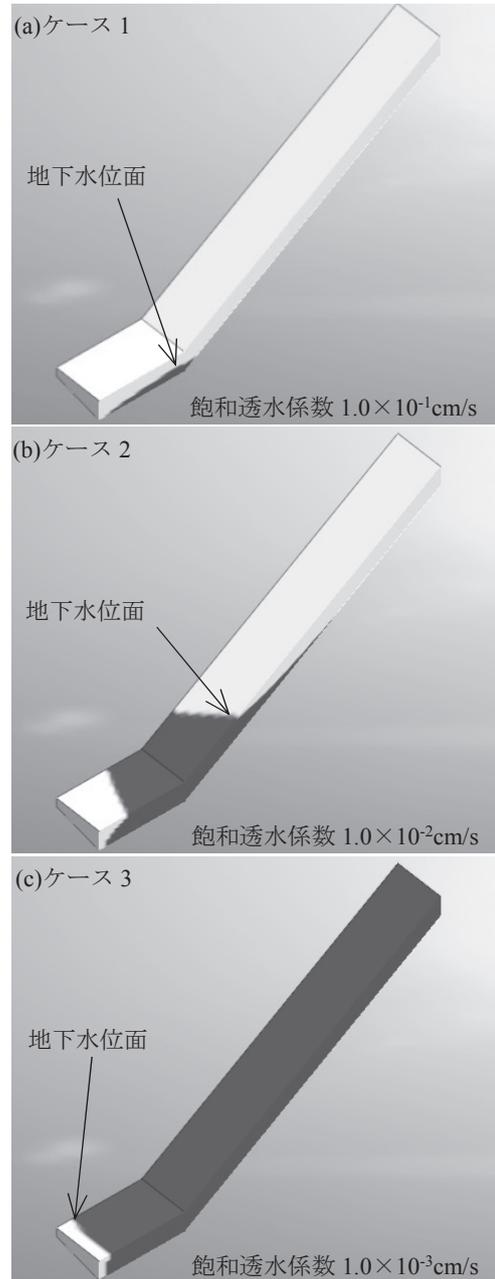


図-14 3次元非定常水位【谷部で切断表示】
(先行雨量 $1\text{mm/hr} \times 660\text{hr} = 660\text{mm}$ を考慮)

3. 浸透流解析による降雨イベントの選定

3.1 解析条件

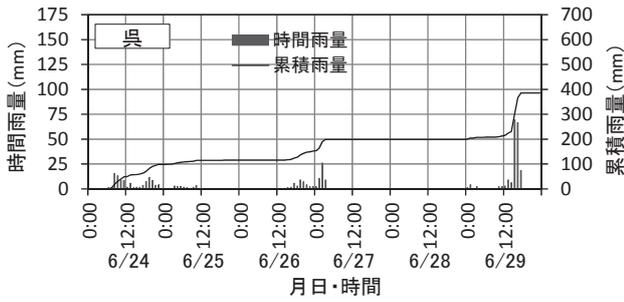
本章では、前章で谷地形の効果により地下水位面上昇が大きくなった3次元解析に限定する。

降雨条件を除く3次元解析モデル、解析手法、初期水位、飽和透水係数の検討ケース、浸透能等は、前章と同様である。また、降雨条件は、前章で設定した $1\text{mm/hr} \times 720\text{hr}$ を先行雨量として、前章と同様の7豪雨から降雨イベントを選定する。7豪雨の降雨イベントは、図-15、図-16²¹⁾、²²⁾、²³⁾ に示すとおりであり、下記に基づき2012年7月九州北部豪雨、2013年7月山口・島根豪雨、2014年8月兵庫県豪雨の3豪雨を選定した。

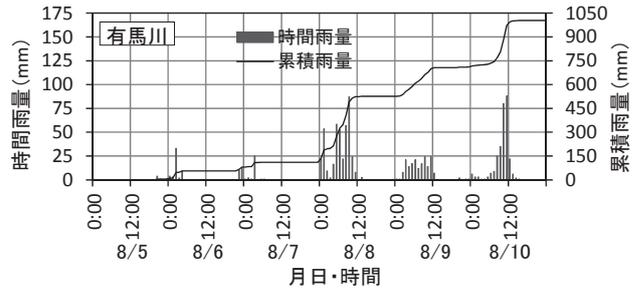
- (1) 2012年7月九州北部豪雨の時間最大雨量 87mm/hr は、2013年7月山口・島根豪雨の 137.5mm/hr に比べて少なく、累積雨量 649mm も2014年8月兵庫県豪雨の 1003mm に比べて少ないが、時間平均雨量 8.9mm/hr は、その他選定2豪雨に比べて多い。その証拠に、この降雨イベントにおける72時間雨量は、本検討対象8県内の気象庁全観測所の既往最大であり、(2)の3時間雨量や(3)の5日雨量に対して中間型の想定し得る最大規模の降雨イベントである。
- (2) 2013年7月山口・島根豪雨の累積雨量 351mm は、その他選定2豪雨に比べて少ないが、時間最大雨量 137.5mm/hr (全国第18位)は多い。この時間最大雨量は、8県内気象庁全観測所の中で、同豪雨の山境地

域気象観測所における 143mm/hr (全国第12位)²¹⁾ に次ぐ2位であるが、3時間雨量では8県内最大であり、(1)の3日雨量や(3)の5日雨量に対して短期集中型の想定し得る最大規模の降雨イベントである。

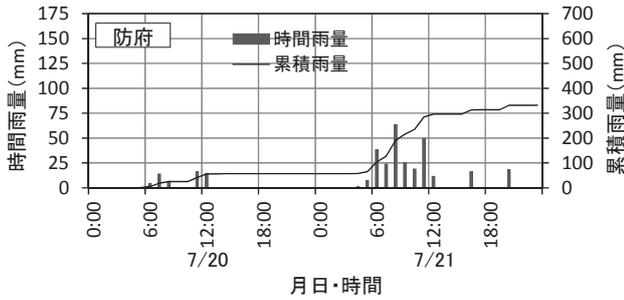
- (3) 2014年8月兵庫県豪雨の時間最大雨量 87mm は、2013年7月山口・島根豪雨の 137.5mm/hr に比べて少ないが、累積雨量 1003mm はその他選定2豪雨に比べて多い。この5日間の累積雨量は、8県内気象庁全観測所の既往最大であり、(1)の3日雨量や(2)の3時間雨量に対して長期継続型の想定し得る最大規模の降雨イベントである。ただし、当豪雨は継続時間が長いので、時間平均雨量 8.8mm/hr は2012年7月九州北部豪雨の 8.9mm/hr に比べて少ない。
- (4) 上記以外4豪雨の時間最大雨量、累積雨量等は、上記3豪雨に包絡されるため検討対象豪雨としない。



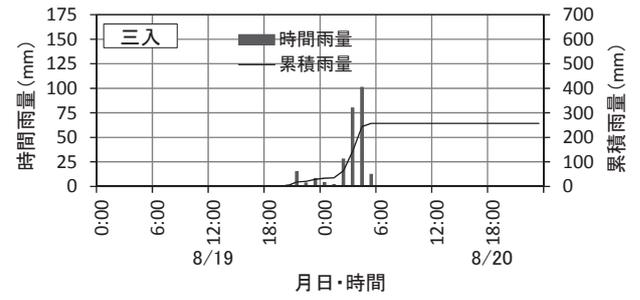
(a) 1999年6月広島豪雨²¹⁾



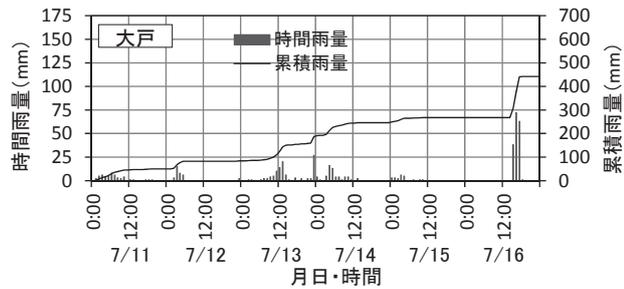
(f) 2014年8月兵庫県豪雨²³⁾



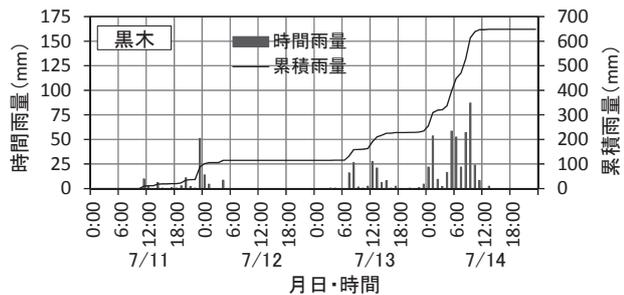
(b) 2009年7月山口豪雨²¹⁾



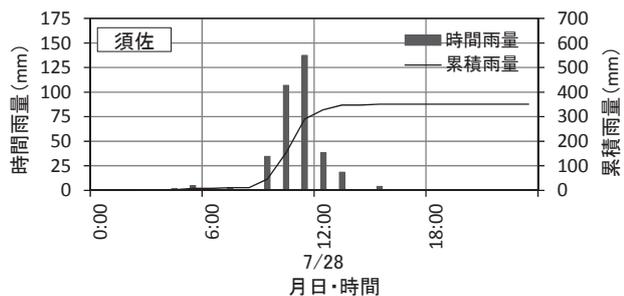
(g) 2014年8月広島豪雨²¹⁾



(c) 2010年7月広島県庄原豪雨²²⁾



(d) 2012年7月九州北部豪雨²¹⁾



(e) 2013年7月山口・島根豪雨²¹⁾

図-15 近年の降雨イベントにおける雨量記録(その1)

図-16 近年の降雨イベントにおける雨量記録(その2)

3.2 解析結果

前節で選定した2012年7月九州北部豪雨、2013年7月山口・島根豪雨および2014年8月兵庫県豪雨の3豪雨に対する浸透流解析結果を図-17～図-19に示す。なお、ケース3の2014年8月兵庫県豪雨およびケース4の3豪雨では、透水係数が小さいために斜面内からの地下水流出量に比べて降雨浸透量が多くなり、完全飽和した状態となったため図示していない。

- (1) 飽和透水係数を $1.0 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ としたケース1では、地下水流出量が多くなるため、短期集中型の2013年7月山口・島根豪雨で地下水水位面が最も高くなる。
- (2) 飽和透水係数を $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ としたケース2では、ケース1とケース3の中間型の2012年7月九州北部豪雨で地下水水位面が最も高くなる。
- (3) 飽和透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ としたケース3では、地下水流出量がケース1, 2に比べて少ないため、長期継続型の2014年8月兵庫県豪雨で地下水水位面が最も高くなる。
- (4) 飽和透水係数を $3.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ としたケース4では、地下水流出量がケース3よりもさらに少なくなるため、ケース3と同様、長期継続型の2014年8月兵庫県豪雨で地下水水位面も最も高くなる想定される。

3.3 統一的降雨イベントの選定

前節の解析結果より、3豪雨の中から1降雨イベントへの絞り込むはできず、飽和透水係数に応じて想定し得る最大規模の降雨イベントとして選定した3豪雨を組み合わせる必要があるとの結論を得た。

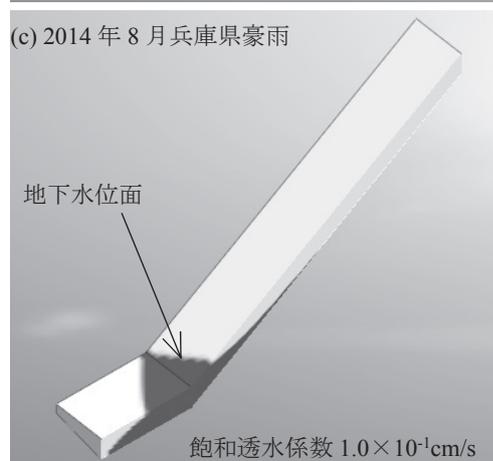
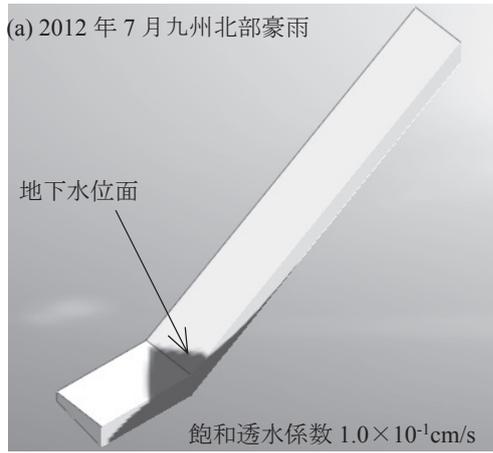


図-17 3次元非定常水位【谷部で切断表示】
(720mmの先行雨量+降雨イベント, ケース1)

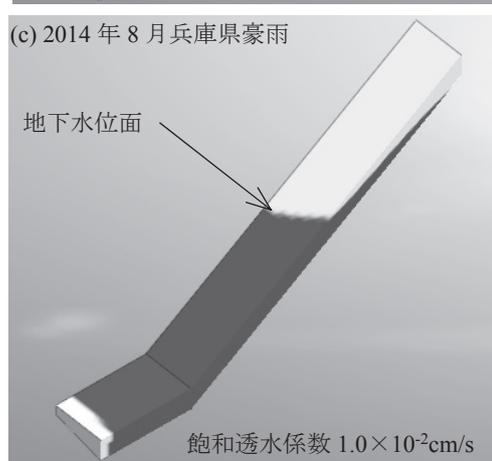
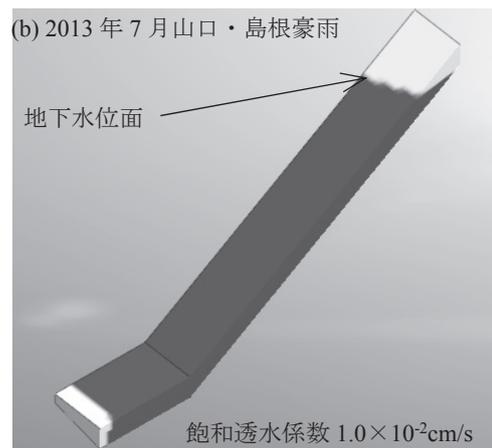
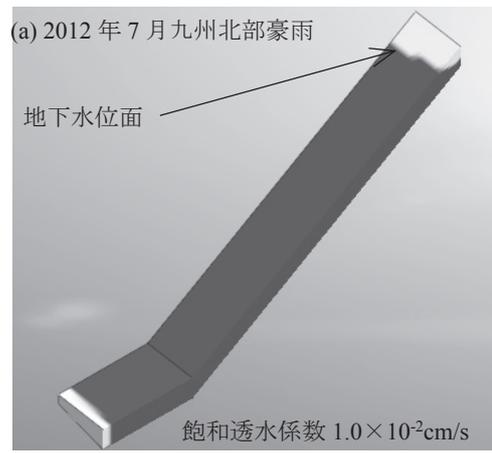


図-18 3次元非定常水位【谷部で切断表示】
(720mmの先行雨量+降雨イベント, ケース2)

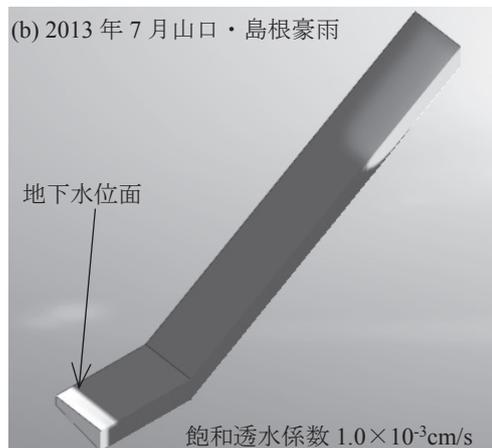
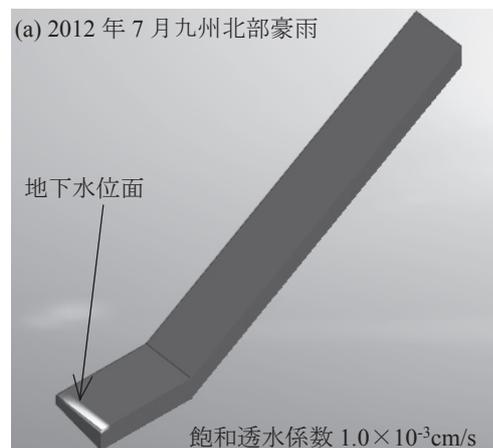


図-19 3次元非定常水位【谷部で切断表示】(720mmの先行雨量+降雨イベント, ケース3)

4. 統一的降雨条件の提案

地球温暖化に起因すると思われる降雨特性の変化を背景に、各地で集中豪雨による斜面崩壊が多発しており、斜面安定性の現状評価とそれに基づく排水孔などの崩壊抑制対策の検討には、改正水防法で定義されている想定し得る最大規模の降雨を用いる必要があると考える。本論文での近年の集中豪雨を考慮したFEM飽和-不飽和浸透流解析の結果より、福岡県から中国地方、愛媛県、兵庫県にかけて分布するマサ土斜面の対策工の検討などに用いる統一的降雨条件として、以下を提案する。

- (1) 初期水位設定用の先行雨量として、時間雨量1mm/hrが1ヶ月間継続するものとした720mmを考慮する。
- (2) 降雨イベントとして、飽和透水係数に応じて表-2に示す3豪雨から選定する。なお、本論文では、3豪雨に対して地下水位が最も上昇する飽和透水係数の境界値が評価できていないため、透水係数が重複する範囲では複数の降雨イベントを対象としている。筆者らは既往研究²⁴⁾において2次元浸透流解析による簡易評価を提案したが、今後、斜面の傾斜角、3次元的地形(例えば、中腹から法尻に向けて横断面形状が漸縮)や排水孔の配置による相違等を3次元浸透流解析により把握し、本論文成果の検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局：特殊土壌地帯対策の概要資料，No.2，pp.1-3，2011.
- 2) 海堀正博，石川芳治，牛山素行：1999年6月29日広島土砂災害に関する緊急調査報告（速報），砂防学会誌，Vol.52，No.3，pp.34-43，1999.
- 3) 若月強，石澤岳昂，植竹政樹，川田真也：2009年7月防府市・山口市豪雨災害において花崗岩斜面に発生した土石流と斜面崩壊の特徴，防災科学技術研究所主要災害調査，No.44，pp.39-51，2010.
- 4) 土田孝ら：2010年7月に広島県庄原市で発生した土砂災害の調査と考察—平行斜面中腹の崩壊メカニズムに関する検討—，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.295-309，2012.
- 5) 福岡管区气象台：災害時気象速報平成24年7月九州北部豪雨，2012.
- 6) 小林北斗，山本晴彦，山本実則：2013年7月28日に山口・島根県で発生した豪雨の特徴と洪水被害の概要，自然災害科学，Vol.33，No.3，pp.205-220，2014.
- 7) 鏡原聖史，上田允教，沖村孝：近年の強雨による斜面崩壊の発生メカニズムに関する一考察，建設工学研究所論文報告集，No.57，pp.37-56，2015.
- 8) 松四雄騎，渡壁卓磨：2014年広島災害における表層崩壊の発生メカニズムと降雨閾値，京都大学防災研究所年報，No.58A，pp.24-33，2015.

表-2 既往降雨イベントを対象とする飽和透水係数

既往降雨イベント	飽和透水係数
2013年7月山口・島根豪雨	$1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 以上
2012年7月九州北部豪雨	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$
2014年8月兵庫県豪雨	$1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 以下

- 9) 地盤工学会緊急調査団：平成11年6月29日豪雨による広島県の斜面災害に関する緊急調査報告，土と基礎，Vol.47，No.10，pp.40-45，1999.
- 10) 古川智，笹井友司：降雨浸透を考慮した斜面崩壊の3次元評価，第36回地盤工学研究発表会講演集，pp.2437-2438，2001.
- 11) 国土交通省：国土交通省告示第八百六十九号，2015.
- 12) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，No.264，pp.87-96，1977.
- 13) 西垣誠ら：飽和・不飽和3次元浸透流解析プログラムVer.2013他，岡山地下水研究会(仮)，http://www.igeol.co.jp/okayama/oka_index.htm，2013.
- 14) 西山壮一，斉藤実：降雨のパターンおよび先行降雨の違いによる災害の差異，香川大学農学部学術報告，Vol.33，No.1，pp.53-58，1981.
- 15) 地盤工学会中国支部：平成11年の広島県豪雨災害調査報告書，pp.33-65，2000.
- 16) 沖村孝，鳥居宣之：豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築，砂防学会誌，Vol.63，No.6，pp.4-12，2011.
- 17) 公益社団法人土木学会：平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書，p.259，2014.
- 18) 水工学委員会災害調査団：平成26年8月広島豪雨災害調査報告書，p.59，2015.
- 19) (財)国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），pp.42-68，2012.
- 20) 古賀博久：豪雨時の透水性の高い斜面表層における降雨流出特性に関する研究，京都大学大学院都市社会工学専攻修士論文，pp.20-59，2015.
- 21) 気象庁 web：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>（入手日2017.5.25）
- 22) 広島県防災 web：<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/info/disp?disp=R10100>（入手日2017.5.25）
- 23) 国土交通省水文水質データベース web：<http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SrchSite.exe?KOMOKU=0&SUIKEI=0&KEN=0>（入手日2017.5.25）
- 24) 笹井友司，西垣誠，西山哲，松井章弘：浸透水圧を考慮した斜面の安定性評価と簡易的な評価手法の提案，地盤と建設，地盤工学会中国支部，Vol.34，No.1，pp.29-36，2016.

(2017年6月18日 受付)