

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	降雨による道路盛土内の水位変動メカニズムの解明と要注意箇所選定方法の提案
Title(English)	
著者(和文)	日下寛彦
Author(English)	Hirohiko Kusaka
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11300号, 授与年月日:2019年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:高橋 章浩,北詰 昌樹,竹村 次朗,笠間 清伸,佐々木 栄一
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11300号, Conferred date:2019/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学 位 論 文

降雨による道路盛土内の水位変動メカニズムの解明と

要注意箇所選定方法の提案

東 京 工 業 大 学

日 下 寛 彦

目次

第1章 序論

1-1	研究背景と目的	1
1-2	既往の研究	6
1-3	本研究の構成	8

第2章 浸透流解析による盛土内水位変動メカニズムの整理

2-1	はじめに	12
2-2	不飽和地盤内の浸透流の数学モデル	14
2-3	解析形状と境界条件	15
2-4	解析条件	17
2-5	解析結果及び考察	20
2-5-1	結果の整理方法	20
2-5-2	雨量の影響	23
2-5-3	透水係数の影響	25
2-5-4	盛土の規模の影響	27
2-5-5	雨量, 透水係数, 盛土高さを用いた収束水位の正規化	29
2-5-6	基礎地盤の厚さ, 幅の影響	32
2-5-7	盛土の幅深さ比の影響	34
2-5-8	盛土と基盤の透水係数の差の影響	36
2-5-9	保水特性の影響	38
2-5-10	各影響度のまとめ	40
2-6	収束水位及び水位上昇速度の定式化	41
2-6-1	収束水位	41
2-6-2	水位上昇速度	45
2-7	まとめ	49

第3章 模型実験による盛土内水位変動メカニズムの検証

3-1	はじめに	51
3-2	実験形状の設定	51
3-3	実験模型の作製	56

3-4	実験に用いた材料とその特性	59
3-5	実験手順	61
3-6	実験結果	63
3-6-1	降雨による水位変化結果の一例	63
3-6-2	浸潤速度	65
3-6-3	水位上昇速度, 水位低下速度	67
3-6-4	収束水位	69
3-6-5	降雨継続時間の影響	72
3-7	まとめ	77

第4章 盛土内水位上昇の評価方法の提案

4-1	はじめに	79
4-2	水位上昇速度と透水係数及び雨量との関係	79
4-3	水位上昇量と透水係数及び雨量との関係	82
4-4	盛土内の水位上昇の評価方法の提案	86
4-5	まとめ	94

第5章 実盛土における水位観測結果と推定値の比較

5-1	はじめに	96
5-2	対象地点と対象個所の透水係数の設定	96
5-3	水位上昇速度及び上昇量の算定と対応する降雨の設定	104
5-4	水位上昇速度の比較検証	107
5-5	水位上昇量の比較検証	110
5-6	まとめ	112

第6章 結論

6-1	結論	114
6-2	今後の課題及び展望	117

謝辞	118
----	-----

第 1 章 序論

1-1 研究背景と目的

道路盛土は一般に常時において大規模な崩壊が発生することはないが、地震時に大規模崩壊が発生した事例はある。地震時の大規模崩壊要因の一つとして盛土内水位の存在が挙げられ、2007年の能登半島沖地震や、2009年の駿河湾を震源とする地震（図 1-1, 図 1-2）、2011年の東北地方太平洋沖地震でもこれを要因とする道路盛土の崩壊事例が報告されている（図 1-3, 図 1-4）^{1, 2, 3), 4)}。また、東北地方太平洋沖地震においては、河川堤防における堤体の液状化による被害も報告されており^{5, 6)}、道路以外でも盛土内水位の影響が注目されてきている。そのため、盛土内水位が常時高い箇所や、水位が上昇しやすくかつ下がりづらいといった、持続的に盛土内に水位が存在するような箇所を特定することは大規模被害を防ぐ上で重要である。

このような箇所を特定する方法として、集水地形などの外的要因に注目して選定する方法が実務の中でも取り入れられている¹⁾。一方で、盛土及び基盤の透水性や保水性などの内的な特性に着目した選定はこれまであまり実施されてきていない。このことは、材料自体の違いや、盛土形状の違いなどの複数の条件を考慮しなければならないことが、実用的な選定手法として確立していない理由の一つとして挙げられる。選定手法の確立には、これらの条件が個々に盛土内水位に与える影響及び各条件の関連性を具体的に評価する必要がある。盛土内水位を推定する手法としては、タンクモデルや実効雨量といった、観測で得られたデータを基に一定の関係を導き出し、水位変動をモデル化する方法（たとえば吉松⁷⁾、桂ら⁸⁾、澤野・外崎⁹⁾）と、浸透流解析により物理則に基づいて盛土内水位を推定する方法（たとえば森本ら¹⁰⁾、西村ら¹¹⁾、Zhangら¹²⁾）が挙げられる。これらのうち、浸透流解析による手法を用いれば、透水係数といった材料特性等の違いを直接比較する事ができる。一方、浸透流解析でのこれまでの事例では、崩壊箇所といった特定の箇所の検討や、自然斜面に対する豪雨の影響を対象としたもの等が多く、材料特性等の値を比較し弱点となる条件を探すといった観点ではあまり検討がされてきてい

ない。

そこで本研究では、盛土内の水位上昇に影響を与えると考えられる、透水係数や盛土及び基礎地盤の形状といった指標について、二次元浸透流解析によってそれぞれの水位上昇に対する影響を体系的に評価する。評価する上で盛土内水位が持続的に高い条件の一つとして、排水層となる透水性基盤の厚さが薄い場合や、透水係数が低いといった条件が推測されるため、この推定を踏まえて整理を実施する。また、浸透流解析の結果から得られた、鉛直方向の水位変化を確認するために盛土中央部を想定した筒状の模型実験を実施し、得られた傾向の妥当性を示す。

更に、浸透流解析及び模型実験により確認した諸条件と盛土内水位との関係を基に、実際の道路盛土における国内の降雨条件を想定し、道路盛土の水位上昇に関する要注意個所の選定手法を考案する。加えて考案した方法について、実際の高速道路盛土の水位観測データを用いた比較検証を行う。



図 1-1 東名高速道路 牧之原地区の盛土崩壊状況

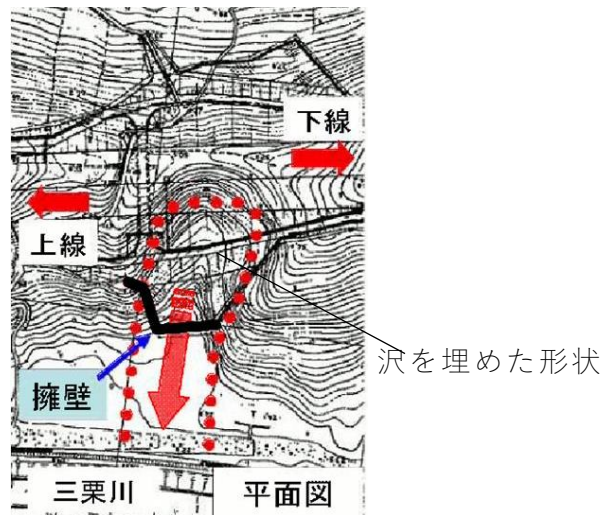


図 1-2 東名高速道路 牧之原地区，盛土崩壊箇所の平面図



图 1-3 常磐自動車道 那珂地区，盛土崩壊状況

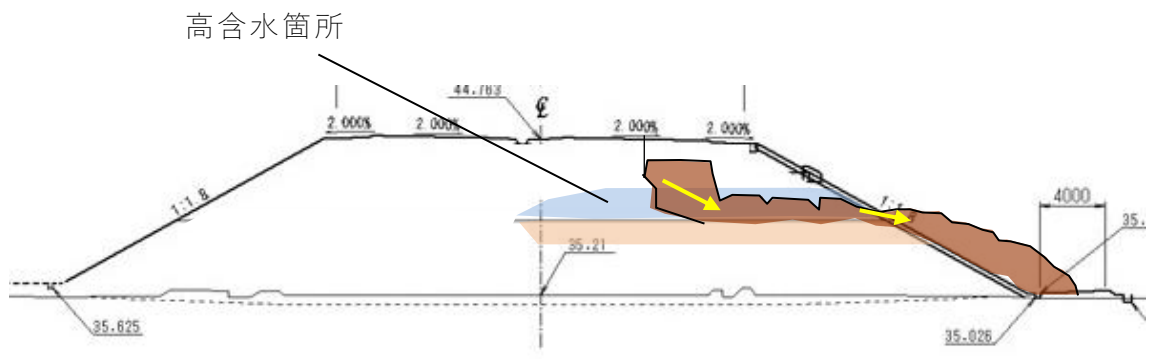


图 1-4 常磐自動車道 那珂地区，盛土崩壊状況模式图

1-2 既往の研究

ここでは、本研究を実施する上で参考にした既往研究について整理し、本研究の位置付けについて示す。

(1) 盛土内水位の導出に関する研究

盛土内水位を推定する手法としては、実行雨量やタンクモデルといった、観測で得られたデータを基に一定の関係を導き出し、水位変動をモデル化する方法（たとえば吉松⁷⁾、桂ら⁸⁾、澤野・外崎⁹⁾）と、浸透流解析により物理則に基づいて盛土内水位を推定する方法（たとえば森本ら¹⁰⁾、西村ら¹¹⁾、Zhangら¹²⁾）が挙げられる。

実効雨量法は、実効雨量と地下水位の間にある一定の関係式（1次式など）を仮定し、地下水位の変動を最もよく再現できる半減期と関係式中の係数を求めたうえで、実効雨量から地下水位の変動を再現しようとする手法である⁸⁾。実効雨量法は必要なパラメータの数が少なく、解析も容易という利点を有しており、個別個所の観測を踏まえた水位変動の予測を行う上で有効な方法と考えられる。ただし、パラメータが少ない分、箇所ごとの地形や材料といった特性が半減期等のパラメータにどのように影響を与えているかを直接関連付けることは難しい。

タンクモデルは、直列に並べられたタンクの最上段に降雨から蒸発散を差し引かれた量の水が入力値として設定され、タンクごとに流出高さ、流出係数、浸透係数を定め、それぞれのタンクから流出する水の量や、下段のタンクに浸透する水の量を求め、各タンクに貯留される水の量などから土中の水位や水分量を求める方法である¹³⁾。この方法を基に気象庁では「土壌雨量指数」を算定し、降雨による土砂災害の判断基準として活用している¹⁴⁾。タンクモデルはそのモデルの構造から、降雨による水位変化の遅れを表現できるといった利点がある。ただし、タンク段数や流出率、浸透率といったパラメータは観測値との比較検証により試行錯誤的に設定するケースが多く、実効雨量法と同様にパラメータと地形や材料の特性との関連付けが難しい部分がある。

上述した実効雨量法やタンクモデルは、実際の水位変動予測や地すべ

りの滑動予測などにも活用されており，実務上非常に有効な手法であると考えられる．ただし，前述したようにパラメータの物理的意味づけが難しいという一面もあり，地形条件や材料特性との関係を整理するという，本研究の目的のためには直接使用することは難しく，何らかの関連付けが必要となる．

これに対し，浸透流解析は流域内の空間的な水の流れをダルシー則や質量保存則といった物理則に基づいて解析する手法である．浸透流解析は，物理則に基づいて解析を行うため，透水係数といった材料特性等の違いを直接定量的に比較する事ができるという点で，本研究には適した方法であると考えられる．浸透流解析でのこれまでの研究事例の多くは，崩壊箇所といった特定の箇所の検討や，自然斜面に対する豪雨の影響を対象としたもの等であり，材料特性等の値を比較し弱点となる条件を探すといった観点ではあまり検討がされてきていない．そこで本研究では，浸透流解析を，材料特性や地形条件を比較するという観点で使用する．

(2) 道路盛土における要注意箇所，対策箇所の選定方法

道路盛土において，冒頭に示したとおり近年盛土内水位について注目されてきており，既設盛土に対して排水対策を含めた安定性を向上させる対策が実施されている．2009年の駿河湾を震源とする地震の後に国土交通省から，①盛土高さが10m以上で，②集水地形に位置し，③脆弱岩により造成された盛土が地震時に被害を受けやすいとして，対策を実施するように通達が出されている．また，この3条件によって選定された箇所について実際に盛土内水位が高いかどうかを1か所ずつ調査して盛土内水位が盛土高さの3分の1以上の場合に対策工を検討するという流れになっている¹⁵⁾．

上記の流れでは，まず集水地形という外部からの水の流入しやすさにより選定がなされる．内的要因については，直接は考慮されておらず，ボーリングなどにより直接調査することによって水位の有無を確認することとしている．そのため多大な労力がかかることや，集水地形以外の内的要因により盛土内に水が溜まりやすい箇所が抜けてしまう可能性が考えられる．

また、高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会¹⁵⁾の提言を受け、2014年度からリニューアル工事の一環として、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)は盛土の補強対策、排水強化対策を実施している。この工事の対象個所についても基本的には集水地形を対象としており、上述した選定方法と類似の方法により対象を選定している。

また、既往の地震被害から抽出された被害要因としては、2007年の中越地震においては、盛土高さや傾斜地盤の影響が大規模被害に関連しているとされており¹⁷⁾、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では旧河道が大規模盛土の崩壊要因に関連しているとされている¹⁾。

これまで述べてきた崩壊要因や対策箇所の選定においては、外的要因に着目してきている事例が多い。そのため盛土自体の透水性、盛土直下の地盤の透水性についてはあまりふれられていなく、これについて整理することで内的要因も踏まえた盛土内水位の選定ができ、より効率的、合理的な選定ができると考えられる。

1-3 本研究の構成

図 1-5 に本研究の構成を示す。盛土内水位変動メカニズムを解明するために、第 2 章でまず、透水係数や盛土及び基礎地盤の形状といった指標について、二次元浸透流解析によってそれぞれの水位上昇に対する影響を体系的に評価する。続いて第 3 章で、浸透流解析の結果から得られた、鉛直方向の水位変化を確認するために盛土中央部を想定した筒状の模型実験を実施し、得られた傾向の妥当性を示す。第 4 章では、第 2 章の浸透流解析及び第 3 章の模型実験により確認した諸条件と盛土内水位との関係を基に、実際の道路盛土及び国内の降雨を想定し、道路盛土の水位上昇に関する要注意個所の選定手法を考案する。最後にここで考案した方法について、第 5 章で実際の高速道路盛土の水位観測データを用いた比較検証を行う。

【研究の章構成】

1. 研究背景
 - 道路盛土の被害要因
 - 既存の危険箇所の抽出方法と課題、研究目的

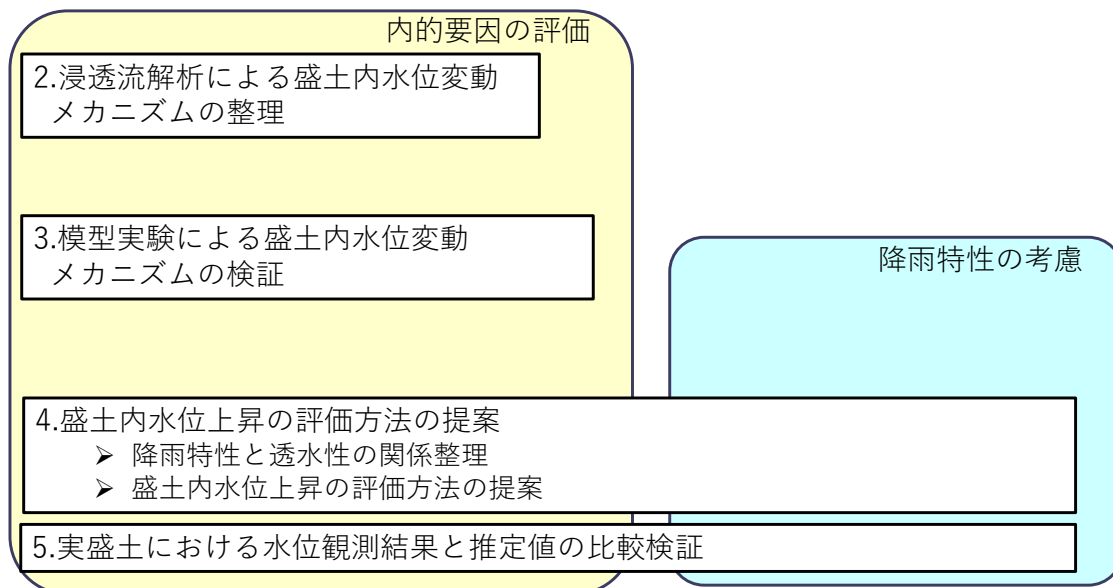


図 1-5 研究の構成

参考文献

- 1) 藤岡一頼，横田聖哉，日下寛彦，広瀬剛：東北地方太平洋沖地震における高速道路盛土の被害分析，日本地震工学会論文集，Vol.16, No.1, pp. 285-307, 2016.
- 2) 為重誠，川村國夫，駒田秀一，宮村雅之，埴原強，室井辰盛：能登半島地震による能登有料道路の被災と復旧 -盛土の被害と対策工事について- ，地盤工学ジャーナル，Vol. 4, No. 4, pp. 289-305, 2009.
- 3) (公社)土木学会，(公社)地盤工学会：2007年能登半島地震被害調査報告書，pp.132-215，2007.
- 4) 横田聖哉，高木宗男，菅浩一，安田進，太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の実態，第55回地盤工学シンポジウム論文集，pp.193-196，2010.
- 5) 岡二三生，吉田信之，甲斐誠士，飛田哲男，肥後陽介，鳥居宣之，鏡原聖史，中西典明，木元小百合，山川優樹，東瀬康孝，渦岡良介，京谷孝史：東北地方太平洋沖地震被害調査報告 -宮城県北部- ，地盤工学ジャーナル，Vol. 7, No. 1, pp. 37-55, 2012.
- 6) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について報告書，国土技術研究センター，2011.
- 7) 吉松弘行：地すべり地における地下水変動現象の解析，地すべり，Vol. 17, No. 2, pp. 20-25, 1980.
- 8) 桂真也，畠田和弘，木村誇，丸山清輝，池田慎二，秋山一弥：実効雨量法を用いた積雪地域の山間地に位置する地すべり地の地下水位変動解析，日本地すべり学会誌，Vol. 53, No. 1, pp. 1-12, 2016.
- 9) 澤野幸輝，外崎靖也：泥岩盛土における法面変状対策(地下水排除)，基礎工，pp. 38-41，2017年10月.
- 10) 森本励，川村國夫，宮下孝，山岸達也，高橋裕之，津田雅丈：能登半島地震による「のと里山海道(旧能登有料道路)」盛土崩壊とその地下水位推定-山岳・丘陵部道路盛土の地震時安定評価の簡便法提案- ，地盤工学ジャーナル，Vol. 12, No. 2, pp.177-195, 2017.
- 11) 西村聡，所哲也，Rivas, M.F：降雨浸透・蒸発散を考慮した細粒度盛

- 土の水理状態の解釈，第 51 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1035-1036, 2016.
- 12) Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M., Tang, W. H.: Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review, Proceedings of the Institute of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, Vol. 164, Issue 5, pp. 299-316, 2011.
 - 13) 吉田稔彦：タンクモデルを用いた流出解析，OGI Technical Reports vol.11（2000年12月10日発行），2000.
 - 14) 岡田憲治，牧原康隆，新保明彦，永田和彦，国次雅司，斉藤清：土壌雨量指数，天気（日本気象学会），Vol. 48, No. 5, pp.59-66, 2001.
 - 15) 国土交通省：盛土のり面の緊急点検について，国土交通省ホームページ（2009年11月20日），http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000095.html, 2009.
 - 16) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会 報告書（2014年1月22日），2014.
 - 17) 中村洋丈，横田聖哉，吉村雅宏：高速道路盛土の地震災害マネジメントにおける耐震性評価手法の構築，土木学会論文集，Vol. 69, No. 2, pp.156-175, 2013.

第2章 浸透流解析による盛土内水位変動メカニズムの整理

2-1 はじめに

ここでは、透水係数や盛土及び基礎地盤の形状といった指標について、二次元浸透流解析によってそれぞれの水位上昇に対する影響を体系的に評価する。

浸透流解析は古くから実施されてきており、物理則を基に実施されているため、透水係数や盛土形状の違いを計算に反映させることができる。また、対象とする道路盛土は、奥行き方向に形状があまり変化しないため、2次元断面で道路形状をモデル化し、有限要素法により解析を行う。

図 2-1 に本章の構成を示す。「2-2 不飽和地盤内の浸透流の数学モデル」、「2-3 解析形状と境界条件」、「2-4 解析条件」で、本章で扱う浸透流解析の解析手法や解析条件についてはじめに示す。次に「2-5 解析結果及び考察」で解析結果について示すが、まず結果の整理方法について「2-5-1 結果の整理方法」で説明し、その後 2-5-2 から 2-5-5 で、盛土と基盤が均一で形状比率が一定の場合の解析結果として、基本となる雨量や透水係数の影響を示す。次に 2-5-6 から 2-5-9 で基礎地盤の形状や透水性が異なる場合の影響について示し、2-5-10 で保水特性について記載した後、2-5-11 で解析結果についてまとめを行う。その後、2-6 で収束水位と水位上昇速度について解析結果を基に定式化を行う。

2-1 はじめに
2-2 不飽和地盤内の浸透流の数学モデル 解析に用いる数学モデルの説明
2-3 解析形状と境界条件
2-4 解析条件
2-5 解析結果及び考察
2-5-1 結果の整理方法
2-5-2 雨量の影響
2-5-3 透水係数の影響
2-5-4 盛土の規模の影響
2-5-5 雨量、透水係数、盛土高さを用いた収束水位の正規化 盛土と基盤が均一で、形状比率が一定の場合の解析結果
2-5-6 基礎地盤の厚さ、幅の影響
2-5-7 盛土の幅深さ比の影響
2-5-8 盛土と基盤の透水係数の差の影響
2-5-9 各影響度の比較 基盤の形状や透水性が異なる場合の影響評価
2-5-10 保水特性の影響
2-5-11 影響のまとめ
2-6 収束水位及び水位上昇速度の定式化
2-6-1 収束水位の定式化
2-6-2 水位上昇速度の定式化 収束水位、水位上昇速度について定式化
2-7 まとめ

図 2-1 第 2 章の構成

2-2 不飽和地盤内の浸透流の数学モデル

以下に解析に用いる 2 次元の非定常流れの考え方について示す。まず 2 次元の地下水の定常流れはダルシー則と連続式から式(2-1)のように表すことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (2-1)$$

ここで、 h は全水頭、 k は透水係数、 q は単位面積あたりの湧き出し流量である。流れが非定常の場合、土要素内の水の時間変化を考慮する必要がある。この場合、式 2-1 に時間変化の項が加わり、リチャーズの式¹⁾として知られている式 2-2 の様に表すことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-2)$$

ここで、 θ は体積含水比である。ここで、式 2-2 の右辺は、以下の様に書き直すことができる²⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = (C + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-3)$$

ここで、 C は比水分容量と呼ばれ、水分特性曲線の勾配を表す。また、 S_s は比貯留係数と呼ばれ、水圧に対する間隙率の変化と関係し、圧力水頭変化による土要素に貯留または土要素から排出される水量を表すものである。これは飽和時には顕著であるものの、不飽和時は無視できるので、式 2-3 において、飽和時に $\beta = 1$ 、不飽和時に $\beta = 0$ として表すことによって、その考慮の有無を切り替えることとしている。式 2-2 と式 2-3 の式を組み合わせると、式 2-4 の様に非定常流れの式は表すことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = (C + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-4)$$

ここで、前述したように比水分容量 C は水分特性曲線に基づき定められるものである。また、不飽和条件においては透水係数も飽和度に応じて変化する非線形の変数である。これら 2 つの変数については、いくつかの定式化の方法がこれまで示されてきている。本検討においては、これまで広く用いられており、実測データを比較的よく再現できているとされる式 2-5、式 2-6 に示す Van Genuchten-Mualem モデル³⁾を用いた。

$$C = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{m}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \quad (2-5)$$

$$k = k_{ws} k_{wr}, \quad k_{wr} = S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right\}^2 \quad (2-6)$$

ここで、 α, n, m は、フィッティングパラメータで、 $m = 1 - 1/n$ という関係を持つ。また、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r 残留体積含水率、 S_e は有効飽和度、 k_{ws} は飽和透水係数、 k_{wr} は比透水係数である。

2-3 解析形状と境界条件

図 2-2 に解析対象の盛土形状及び境界条件を示す。基盤部分の底面及び側面は非排水条件とし、基盤の上部両端を水面として固定の既知水頭条件とし、それ以外の基盤表面を浸出境界として、全水頭と位置水頭を等しい値としている。盛土表面は降雨浸透境界として、一定の降雨が流入する設定としている。実際の道路盛土は山岳部と平坦地盤上で条件が異なるが、単純で、集水地形といった外的要因の差が少ないという理由から平坦地盤上の盛土を想定している。また低地の平野部では多くの場合、地下水位が浅い位置に存在することが想定されるため、基礎地盤表面に地下水位が存在する状況を条件として設定した。

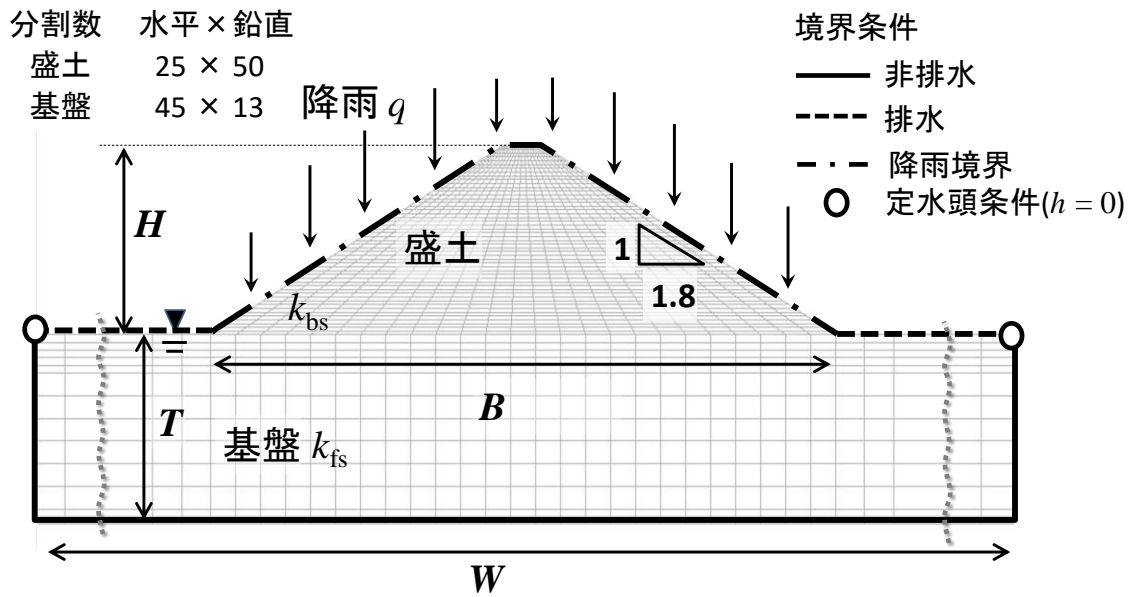


図 2-2 解析対象とする盛土断面

2-4 解析条件

本研究では時間雨量 q ，形状に関する指標（基盤厚さ T ，基盤幅 W ，盛土高さ H ，盛土幅 B ）及び，基盤の飽和透水係数 k_{fs} ，盛土の飽和透水係数 k_{bs} を変化させて解析を行った．水分特性については，一般に盛土材料として用いられているものの一つで，既往の道路盛土の水位低下に関する研究^{4,5)}で用いられている銚田砂の値を用いた．表 2-1 にこの銚田砂の材料特性を示す．水分特性曲線は，図 2-3 に示すとおりで，締固め度 95% の銚田砂による排水過程における保水性試験の実験値から求めた．水分特性曲線については，ヒステリシスがあり排水過程と吸水過程で異なる曲線を示すことが一般に知られている．「2-5-9 保水特性の影響」で示しているが，本論文で検討した銚田砂の条件では，収束する水位には違いがみられず，水位の上昇速度についても大きな違いは確認されなかった．そのため本論文では，「2-5-9 保水特性の影響」以外の項では排水過程の銚田砂の保水性試験の値を用いている．また，式 2-6 を用いて求めた比透水係数を図 2-4 に示す．

解析では，はじめに降雨が無い条件で定常浸透流解析を行い，ここから得られた全水頭分布，飽和度分布を初期値とした．図 2-5 に盛土全体の初期飽和度分布を示す．続いて一定の降雨を連続して与えるという手順で解析を実施した．

表 2-1 銚田砂の物性値

項目	単位	
土粒子密度 ρ_s	Mg/m ³	2.68
細粒分含有率 F_c	%	9.9
最大粒径	mm	4.75
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (JIS A 1210 締固め試験 呼び名 A)	Mg/m ³	1.71
最適含水比 w_{opt} (JIS A 1210 締固め試験 呼び名 A)	%	15.6

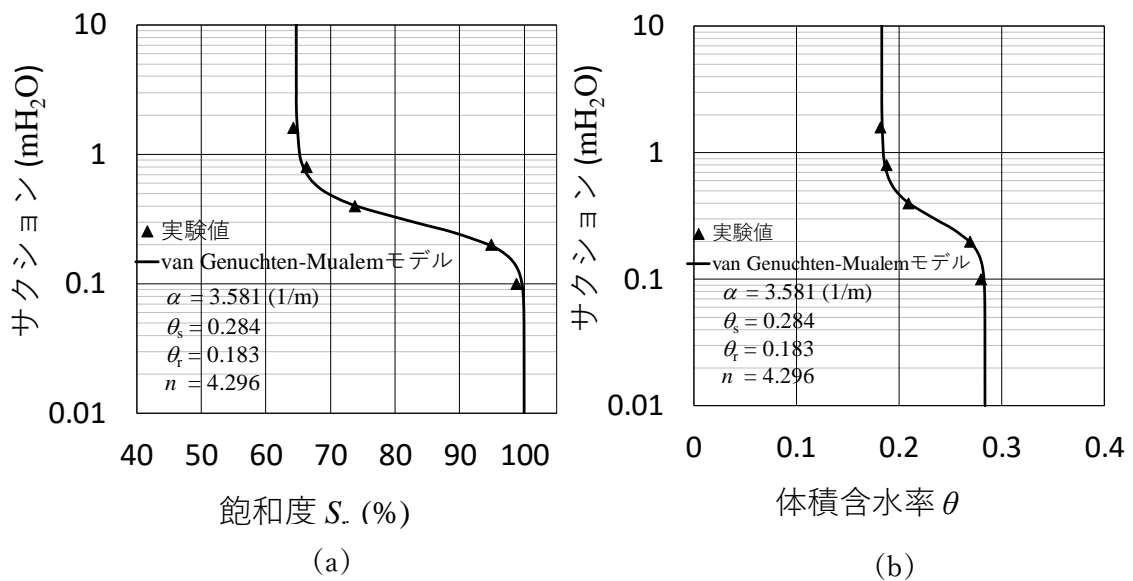


図 2-3 解析に用いた水分特性曲線

((a)飽和度とサクシヨンの関係, (b)体積含水率とサクシヨンの関係)

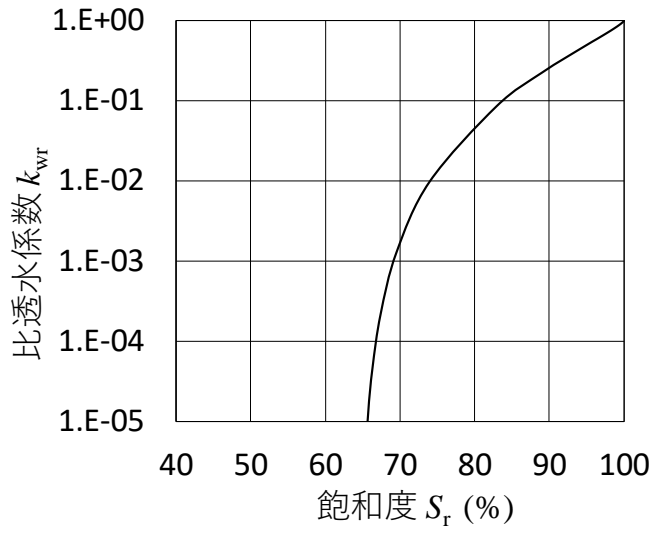


図 2-4 解析に用いた比透水係数と飽和度の関係

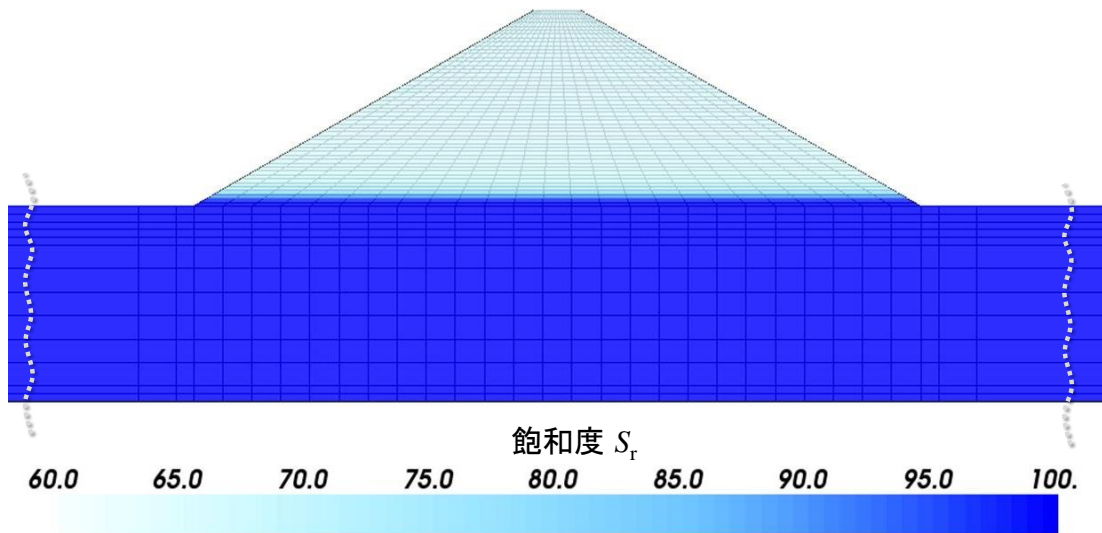


図 2-5 初期飽和度分布

2-5 解析結果及び考察

2-5-1 結果の整理方法

解析結果の一例として、図 2-6 に盛土高さ $H = 5\text{m}$ 、盛土幅 $B=19\text{m}$ 、基盤厚さ $T = 5\text{m}$ 、基盤幅 $W = 196\text{m}$ 、盛土飽和透水係数 $k_{bs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、基盤飽和透水係数 $k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、時間雨量 $q = 10 \text{ mm/h}$ ($2.78 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)の条件で実施した浸透流解析について、降雨開始から 50 時間経過後の飽和度分布を示す。この経過時間は、最も水位が上昇した時の最終的な飽和度の水平方向及び鉛直方向の分布を確認するために、飽和度等の変化が完全に収束した時間を選択している。図 2-6 より、収束時点では水平方向の差はほとんどないことがわかる。図 2-7 に、図 2-5（降雨前初期条件）及び図 2-6（降雨中収束時）の状態における鉛直方向の飽和度分布を示す。また、図 2-8 に同条件における流速分布を示す。ここからも盛土内の流速は鉛直方向に卓越していることがわかる。そこでこれ以降、盛土中央部の鉛直方向の変化に着目する。

図 2-9 は図 2-6 と同条件の解析における盛土中央部の水位の時間変化を示したグラフである。ここで、圧力水頭が 0 となっている点を結んだものを水面とし、盛土底面からこの水面までの高さを水位とした。図より、盛土内に降雨が浸入した後、ある程度時間が経過してから水位が上昇し、最終的に一定の高さに収束していることがわかる。なお、収束水位が盛土内で確認できたケースでは、全てのケースにおいて、同様の変遷が確認されている。ここで、この最終的な水位を「収束水位 h_{wf} 」とし、図 2-9 に示すように、収束水位に対して 20%水位から 80%水位までの、ほぼ直線的に水位が上昇している範囲の傾きを「水位上昇速度 v_{up} 」とする。以下、この収束水位と水位上昇速度が条件の違いによってどのように変化するかを示す。

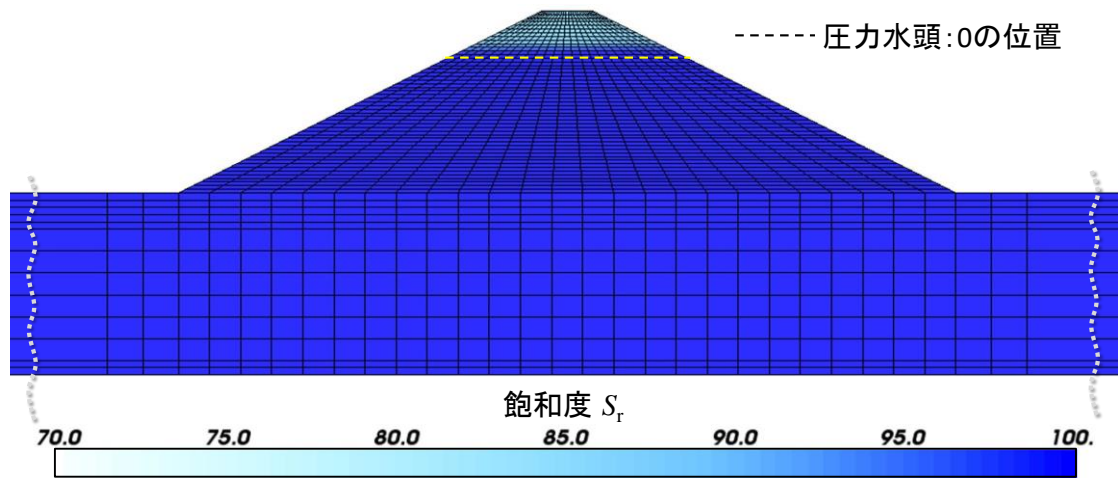


図 2-6 降雨後50時間経過時点の飽和度分布 ($H = 5\text{m}$, $B = 19\text{m}$, $T = 5\text{m}$, $W = 196\text{m}$, $k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5}\text{m/s}$, $q = 10\text{mm/h}$ ($2.78 \times 10^{-6}\text{m/s}$))

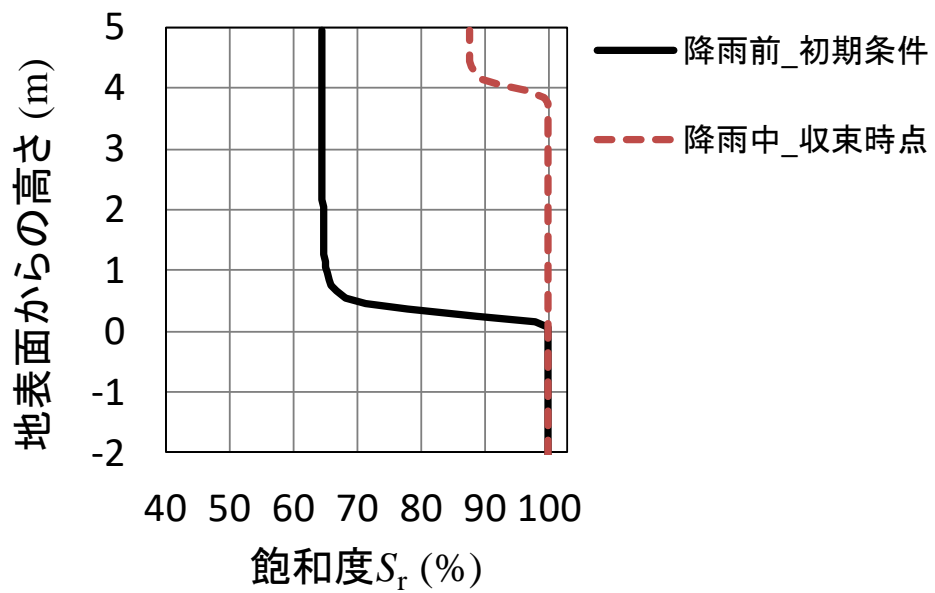


図 2-7 盛土中央部における飽和度分布 (条件 : 図2-5と同様)

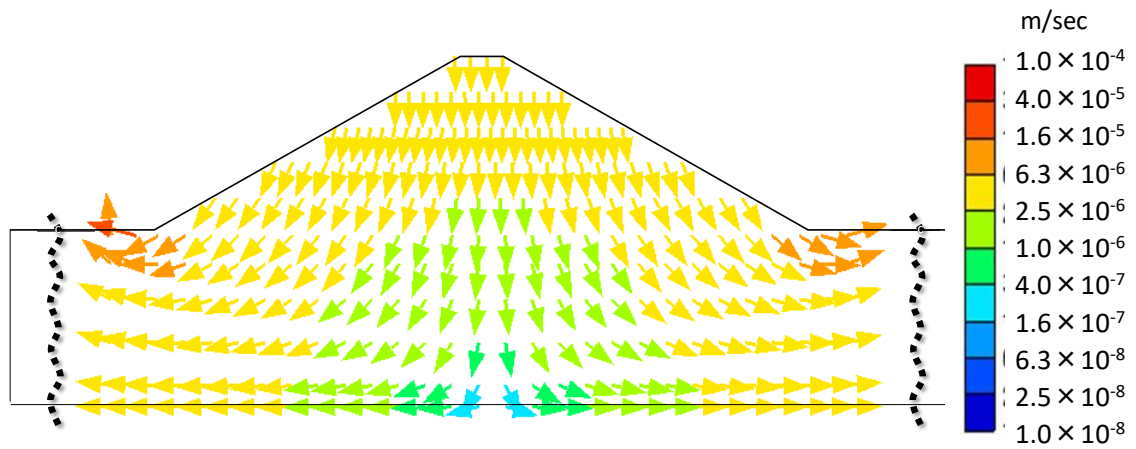


図 2-8 盛土内の流速分布（条件：図2-5と同様）

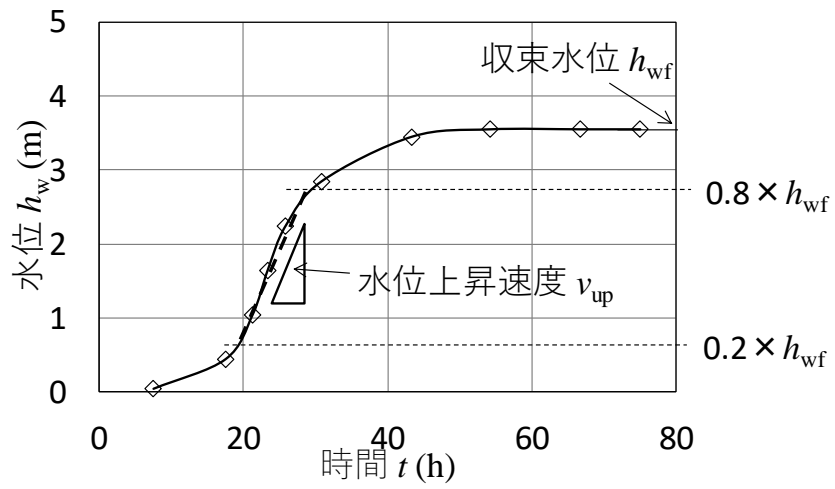


図 2-9 盛土内水位の時間変化（条件：図2-5と同様）

2-5-2 雨量の影響

図 2-10 に時間雨量を変化させた時の盛土内水位の時間変化を示す．条件は盛土高さ $H=5\text{m}$ ，盛土幅 $B=19\text{m}$ ，基盤厚さ $T=70\text{m}$ ，基盤幅 $W=196\text{m}$ ，盛土飽和透水係数 $k_{bs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，基盤飽和透水係数 $k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ である．時間雨量が増加するにつれて収束水位も上昇し，収束するまでの時間は短くなっている．図 2-11 に同条件の盛土の時間雨量と収束水位の関係を示す．ここから，時間雨量の増加にあわせて収束水位はほぼ直線的に上昇していることがわかる．また，図 2-12 に時間雨量と水位上昇速度の関係を示す．水位上昇速度についても，時間雨量の増加に伴い上昇していることがわかる．

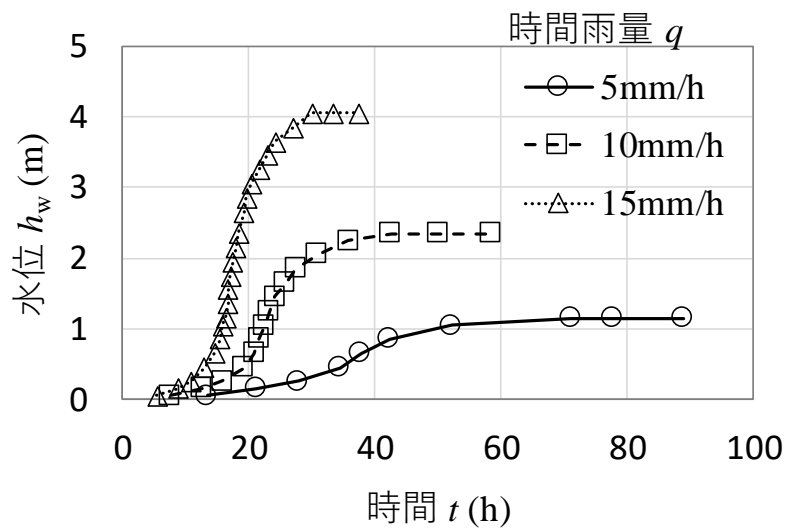


図 2-10 異なる時間雨量における盛土内水位の時間変化 ($H=5\text{m}$, $B=19\text{m}$, $T=70\text{m}$, $W=196\text{m}$, $k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

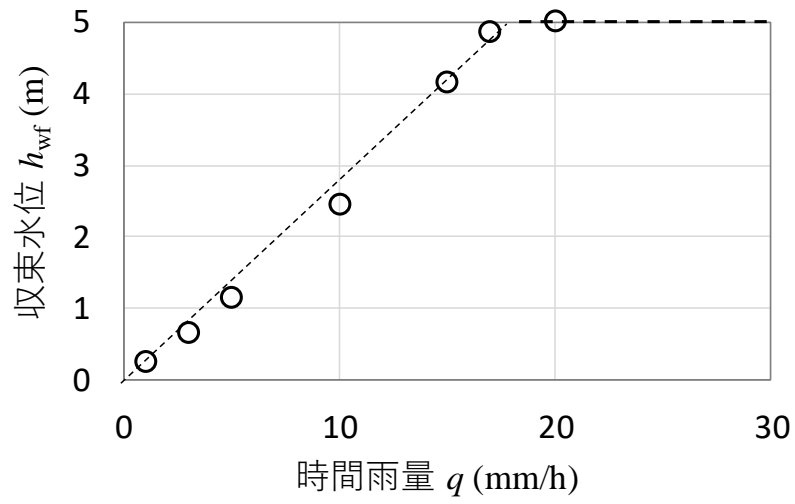


図 2-11 時間雨量と収束水位の関係

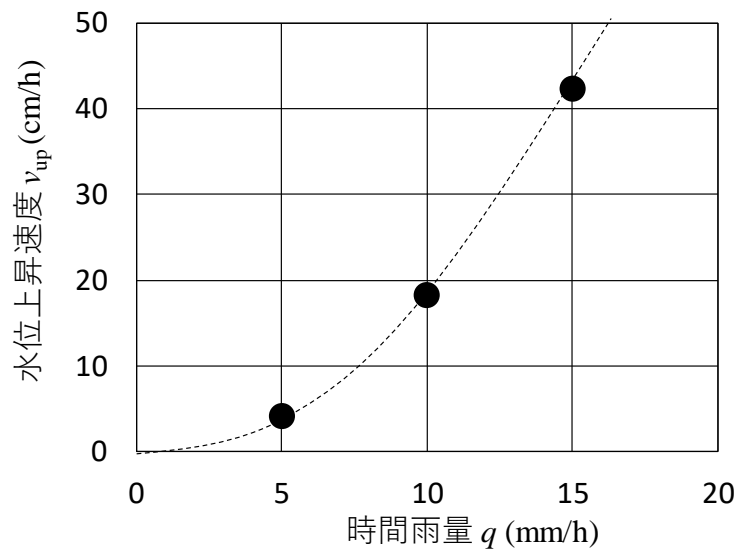


図 2-12 時間雨量と水位上昇速度の関係

2-5-3 透水係数の影響

次に、透水係数の違いについて示す。図 2-13 は盛土の飽和透水係数が $1.52 \times 10^{-5} \text{m/s}$ における時間雨量 10mm/h の結果と、 $1.52 \times 10^{-4} \text{m/s}$ における時間雨量 100mm/h の盛土内水位の時間変化を示している。他の条件は「2-5-2」と同様の条件を用いている。ここから、どちらも収束水位はほぼ同値となっていることがわかる。ここから、時間雨量を盛土の飽和透水係数で正規化した値 q/k_{bs} (以降、「比雨量」という) が等しい時、収束水位が等しいことがわかる。また、図 2-14 は図 2-13 の横軸を経過時間×時間雨量とした図である。図 2-14 より、この二つの曲線はほぼ一致していることから、水位変化にかかる時間については、時間雨量に比例することが推定できる。

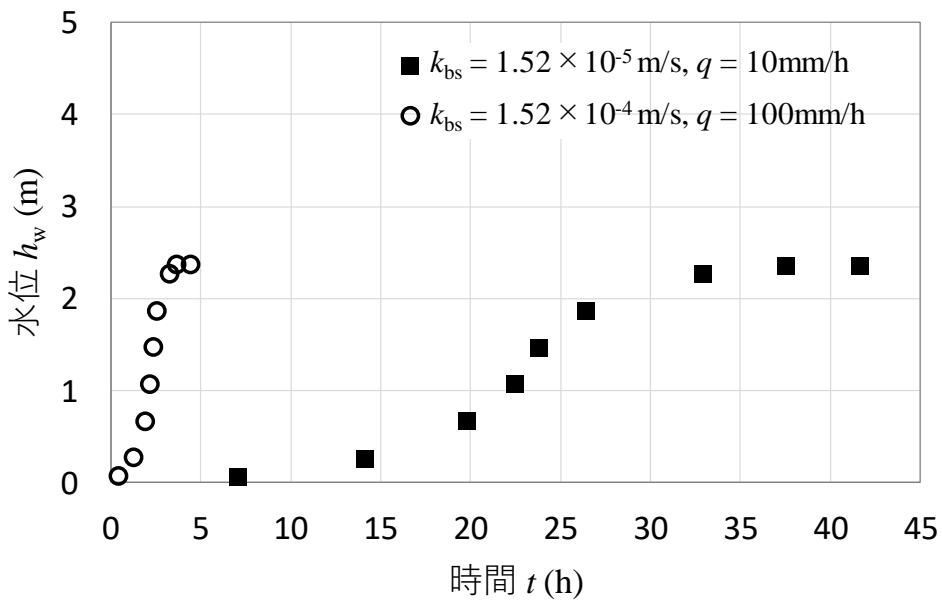


図 2-13 異なる透水係数における盛土内水位の時間変化($H = 5\text{m}$, $B=19\text{m}$, $T = 70\text{m}$, $W = 196\text{m}$.)

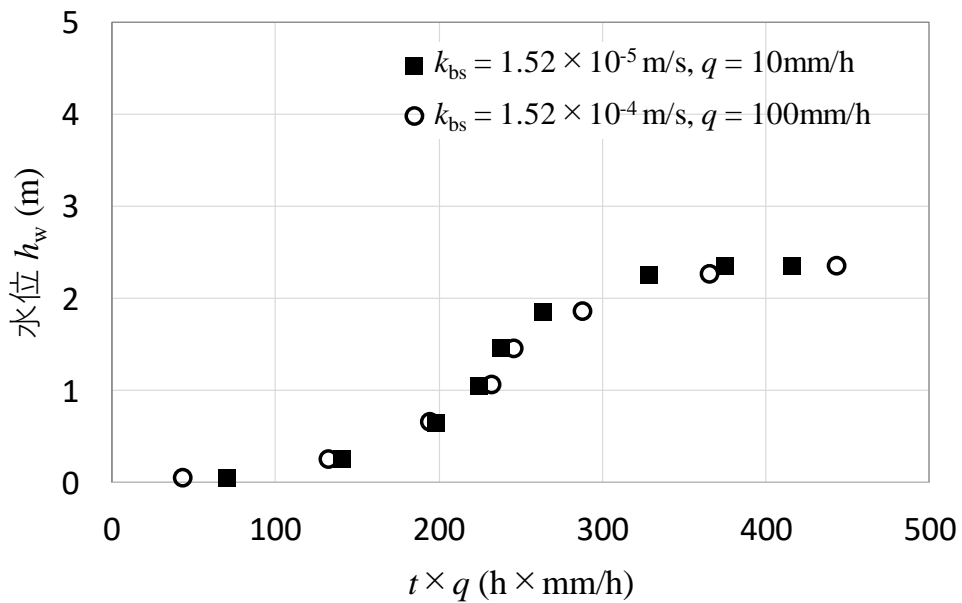


図 2-14 異なる透水係数における盛土内水位の時間変化(横軸：時間 \times 時間雨量)

2-5-4 盛土の規模の影響

次に盛土の規模（大きさ）が異なる場合について整理する．盛土高さ H を変化させ，他の盛土と基盤の形状比率は一定として解析を行った．盛土高さ以外の条件は，盛土高さ基盤厚さの比 H/T （以下，「基盤厚さ比」と呼ぶ）は， $H/T = 0.07$ ，盛土と基盤の幅の比 B/W （以下，「基盤幅比」と呼ぶ）は， $B/W = 0.1$ ，盛土の高さと幅の比（以下，「盛土幅深さ比」と呼ぶ） $B/H:3.8$ ，盛土飽和透水係数 $k_{bs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s，基盤飽和透水係数 $k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s，時間雨量 $q = 10$ mm/h である．図 2-15 に盛土内水位の時間変化を示す．これを見ると，盛土高さが高い方が収束水位は高くなり，収束するまでの時間は長くなっていることがわかる．また，図 2-16 は，水位が上昇し始める時刻（以下，「上昇開始時刻 t_0 」という）より後の水位変化について，時間，水位ともに盛土高さ H で割ることで整理した図である．ここから，時間，水位を盛土高さで割ると同一の曲線としてプロットできることから，時間雨量，透水係数，形状比率が同じ場合，収束水位は盛土高さに比例して上昇することがわかる．また，水位変化にかかる時間は盛土高さに比例して長くなり，水位上昇速度は収束水位も増加しているため，盛土高さによらず一定であることがわかる．

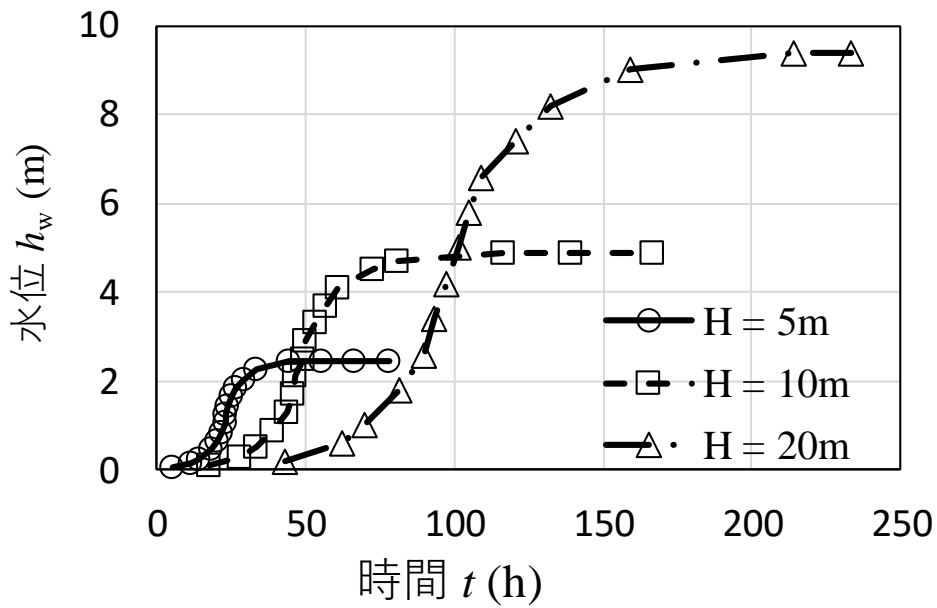


図 2-15 異なる盛土高さにおける盛土内の水位変化($H/T:0.07$, $B/W:0.1$, $B/H:3.8$, $k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s, $q = 10$ mm/h)

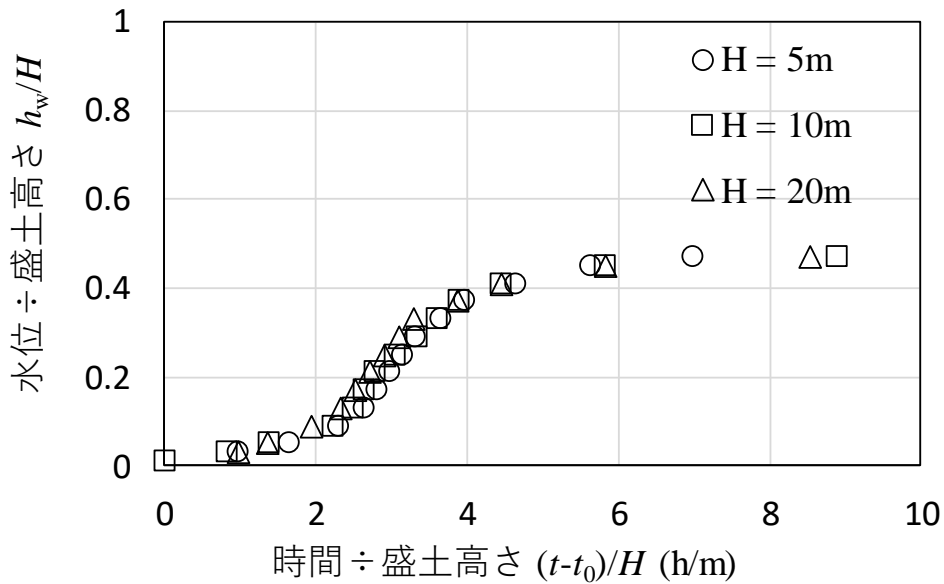


図 2-16 異なる盛土高さにおける盛土内の水位変化 (図2-13を縦軸, 横軸ともに盛土高さ H で除算)

2-5-5 雨量，透水係数，盛土高さを用いた収束水位の正規化

前述した「2-5-2」から「2-5-4」の関係について整理する．図 2-17 は，時間雨量 q を盛土の飽和透水係数 k_{bs} で正規化した値（以下，「比雨量」という）と，収束水位 h_{wf} を盛土高さ H で正規化した値（以下，「比収束水位」という）との関係をプロットしたものである．ここで，前述してきた整理と同様，盛土及び基盤の形状比率は一定で $H/T = 0.07$, $B/W = 0.1$, $B/H:3.8$ であり，盛土と基盤の飽和透水係数は同じ値を用いている．図 2-16 を見ると，高さや透水係数が異なる場合でも，一つの線に帰着することがわかる．また，時間雨量と飽和透水係数が等しくなる ($q/k_{bs}=1$) 前に比収束水位が 1 に達していることがわかる．図 2-18 に収束水位を一定とした場合の時間雨量と飽和透水係数の具体的な関係を示す．比雨量 $q/k_{bs} \doteq 0.3$ の時に今回の条件では収束水位は盛土高さとも一致しており，時間雨量が 10mm/h (2.8×10^{-6} m/s) の場合は盛土の飽和透水係数が 9.3×10^{-6} m/s，時間雨量が 100mm/h (2.8×10^{-5} m/s) の場合は盛土の飽和透水係数が 9.3×10^{-5} m/s よりも小さいと収束水位は盛土高さとも一致し，これより透水係数が小さいと収束水位は盛土高さよりも低くなる．時間雨量の範囲は数 mm/h から 100mm/h 程度で透水係数に比べると変化する範囲は小さいので，盛土の飽和透水係数が盛土内水位に大きな影響を与えていると考えられる．

図 2-19 は図 2-17 と同条件の解析結果について，比雨量 q/k_{bs} と，水位上昇速度 v_{up} を盛土の飽和透水係数 k_{bs} で正規化した値（以下，「比水位上昇速度」という）との関係を示している．図 2-19 を見ると，先ほどと同様に高さや透水係数が異なる場合でも，一つの線に帰着することがわかる．図 2-20 は，図 2-19 の関係を基に時間雨量 10mm/h の場合と，時間雨量 100mm/h の場合の盛土の飽和透水係数と水位上昇速度の関係を示している．ここから，透水係数が時間雨量に近づくほど（比雨量が 1 に近づくほど）水位上昇速度は増加しており，水位上昇速度には時間雨量と盛土の飽和透水係数の比が大きく影響していることがわかる．

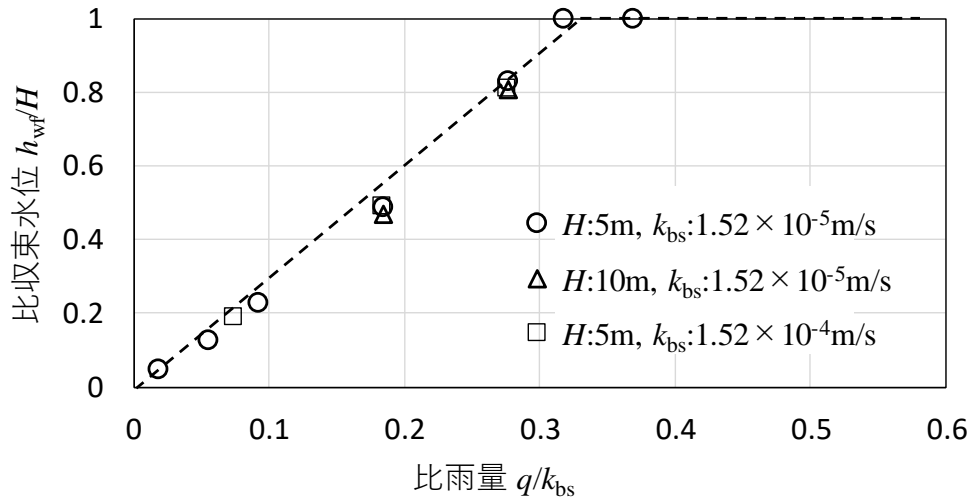


図 2-17 比雨量と比収束水位の関係 ($H/T:0.07, B/W:0.1, B/H:3.8, k_{bs} = k_{fs}$)

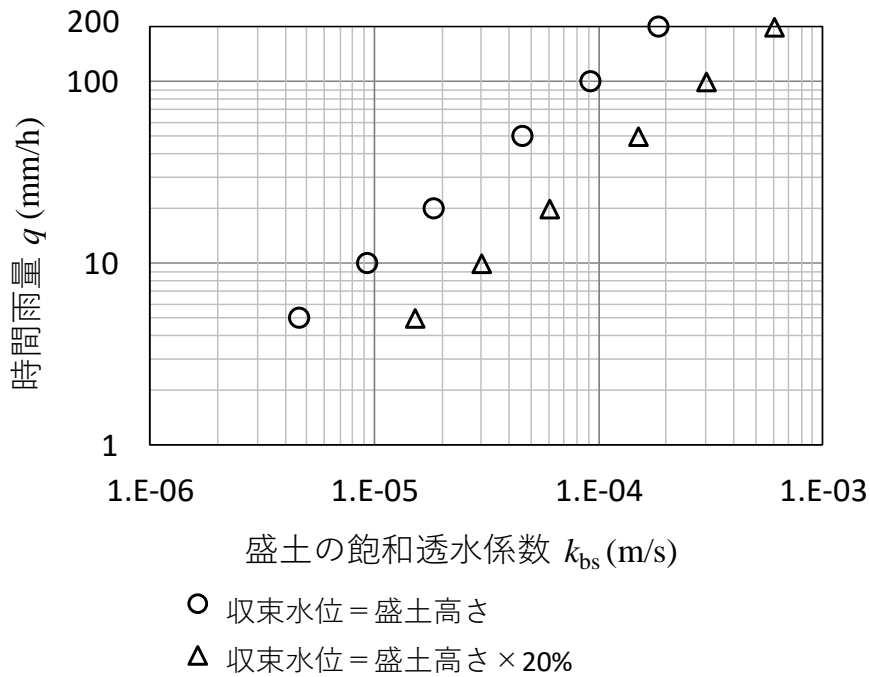


図 2-18 収束水位を一定とした場合の時間雨量と盛土の飽和透水係数の関係

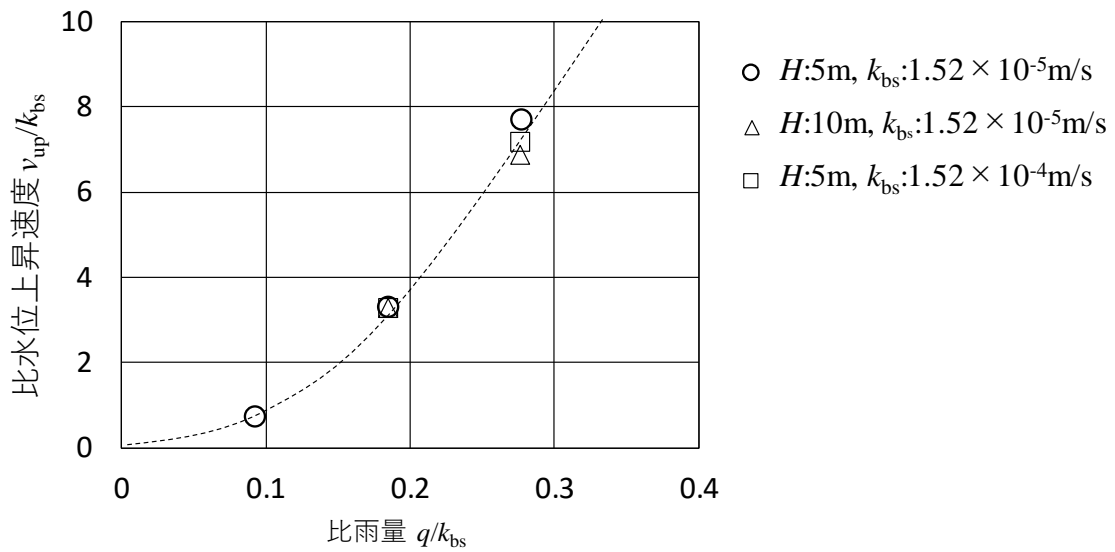


図 2-19 比雨量と比水位上昇速度の関係 ($H/T:0.07, B/W:0.1, B/H:3.8, k_{\text{bs}} = k_{\text{fs}}$)

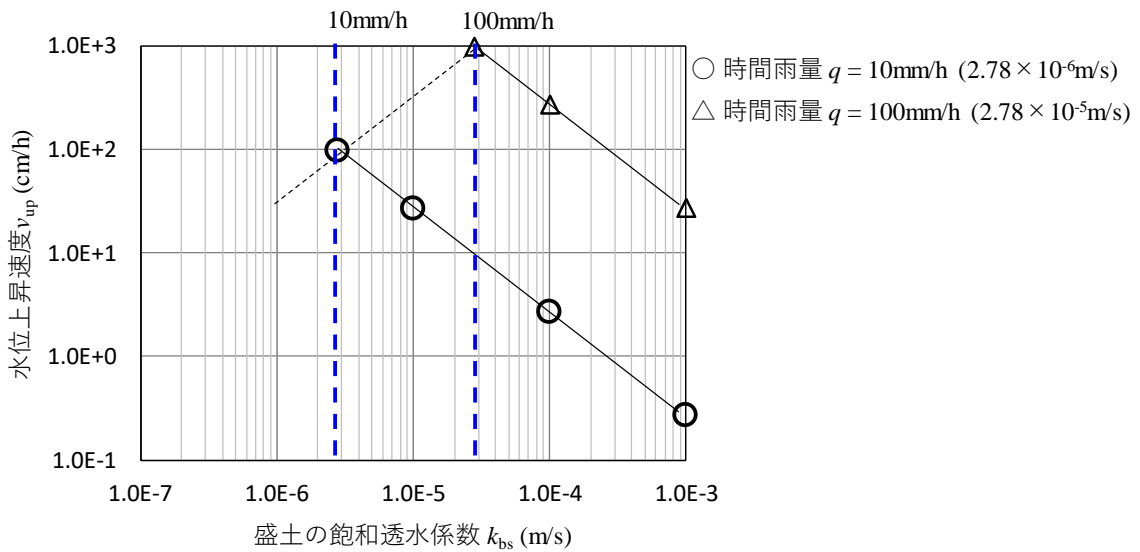


図 2-20 時間雨量一定時の盛土の飽和透水係数と水位上昇速度の関係 ($H/T:0.07, B/W:0.1, B/H:3.8, k_{\text{bs}} = k_{\text{fs}}$)

2-5-6 基礎地盤の厚さ、幅の影響

ここから、基礎地盤の形状や透水性が異なる場合の影響について整理する。まず、盛土に対する透水性基盤層の厚さ T や幅 W の影響について示す。基盤厚さ比 H/T 及び基盤幅比 B/W を変化させたときの盛土内水位の時間変化を図 2-21 に示す。それぞれ H/T 、 B/W が大きくなるほど収束水位は高くなる。これは透水性基盤層の面積が小さくなり、水の流動が制限されることが影響していると考えられる。また、 H/T や B/W が大きいほど、傾きが急になり、水位上昇速度が速くなっていることがわかる。

図 2-22 は H/T と収束水位の関係、図 2-23 は B/W と収束水位の関係を示している。 W は盛土幅 B よりも基本的に大きいので $B/W \leq 1$ となることを考慮し、この二つを比較すると、基盤厚さとの比 H/T の変化に伴う収束水位の変化の幅の方が大きいことがこの図からわかる。実地盤を考えた場合も、層構成を成すことを考慮すると、基盤厚さの方が考えられるレンジとしては、小さな値(数十 cm 程度)からとり得ると考えられる。

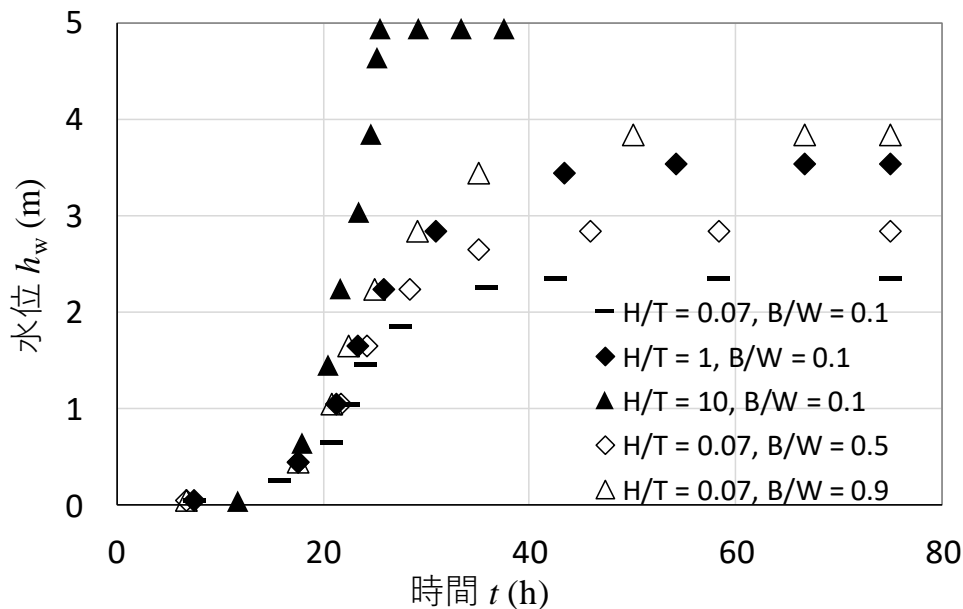


図 2-21 異なる H/T 、 B/W における水位変化 ($B/H:3.8$, $k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s, $q = 10$ mm/h)

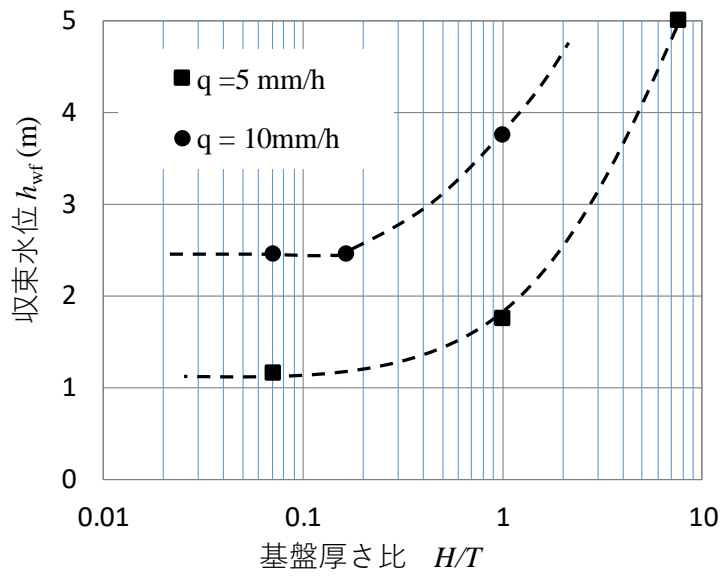


図 2-22 H/T と収束水位の関係 ($B/H:3.8, B/W:0.1, k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

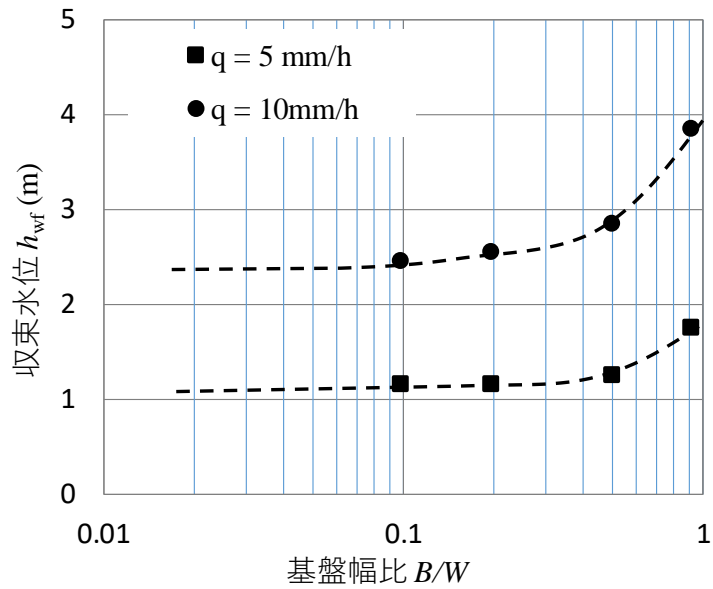


図 2-23 B/W と収束水位の関係 ($B/H:3.8, H/T:0.07, k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

2-5-7 盛土の幅深さ比の影響

次に盛土高さ H と幅 B の比率 B/H (以下, 「盛土幅深さ比」という) の関係について整理する. 図 2-24 に幅深さ比を変化させたときの盛土内水位の時間変化を示す. B/H が大きくなると, 収束水位は高くなるが, これに対して上昇開始時刻は遅くなる. 盛土幅 B が大きくなると盛土高さ H に対する降雨流入量の比率が増えるため, 収束水位は上昇すると考えられる. 上昇開始時刻については, 盛土厚が薄い端部から水位が上昇するため, その影響を受け B/H が小さい方が上昇開始時刻は早く, B/H が大きくなるにつれて 1 次元的な挙動に近づき, 一定の値に収束するものと考えられる. 図 2-24 の水位上昇中の傾きは変わっておらず, 盛土幅によって水位上昇速度は変化しないと考えられる. 図 2-25 は B/H と収束水位との関係を示している. B/H が大きくなるにつれ, 比収束水位は上昇するが, 日本国内で一般的な 2 から 4 車線の道路を想定すると, B/H は 4 から 10 程度と想定でき, その範囲を踏まえて図 2-22 の H/T , 図 2-22 の B/W , 図 2-25 の B/H 各々の影響を比較すると, H/T が最も変化の幅が大きい.

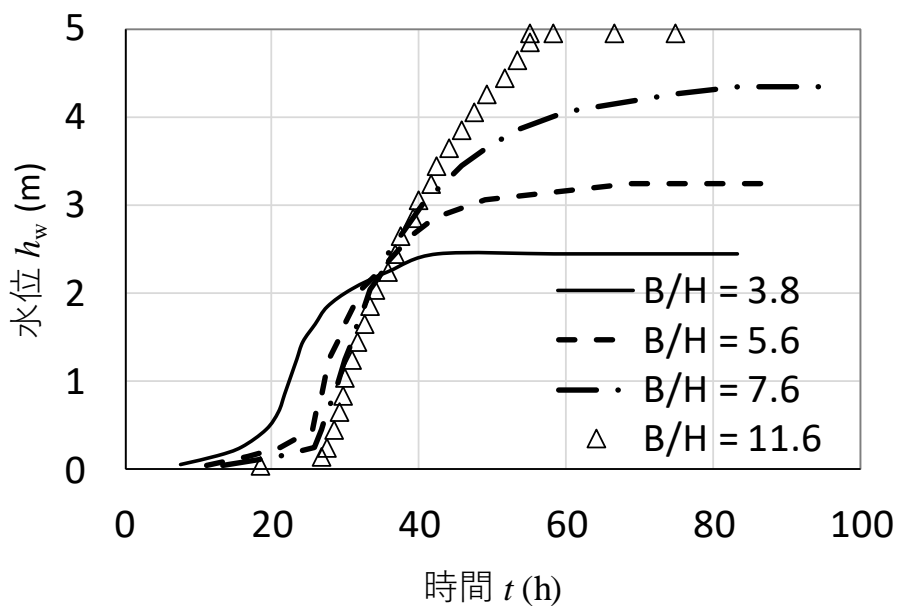


図 2-24 異なる B/H における水位変化 ($H/T:0.07$, $B/W:0.1$, $k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s, $q = 10$ mm/h)

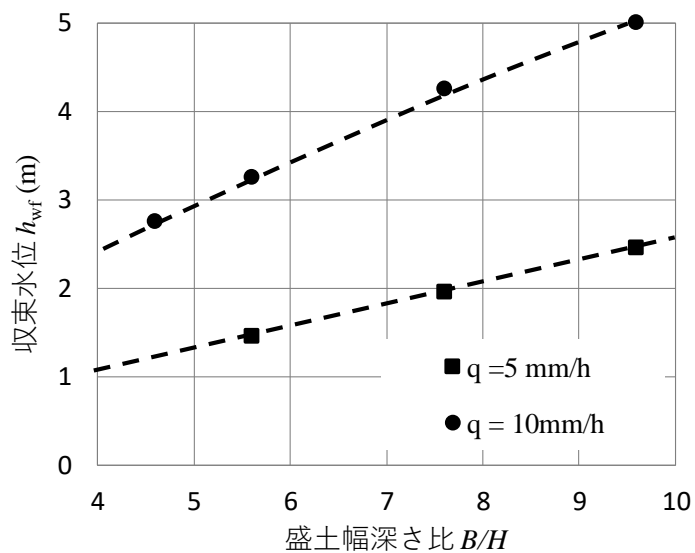


図 2-25 B/H と収束水位の関係 ($H/T:0.07$, $B/W:0.1$, $k_{bs} = k_{fs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s)

2-5-8 盛土と基盤の透水係数の差の影響

盛土と基盤の飽和透水係数の差について整理する．盛土の飽和透水係数 k_{bs} と基盤の飽和透水係数 k_{fs} の比 k_{bs}/k_{fs} を R_k とする（以下「盛土基盤透水係数比」という）．この R_k を変化させたときの盛土内水位の時間変化を図 2-26 に，収束水位と R_k の関係を図 2-27 に示す． R_k が大きくなると収束水位や水位上昇速度が大きくなることがわかる．また， R_k は指数的に変化するので変化の幅が広く，他の条件と比べても水位上昇に与える影響は大きいと考えられる．

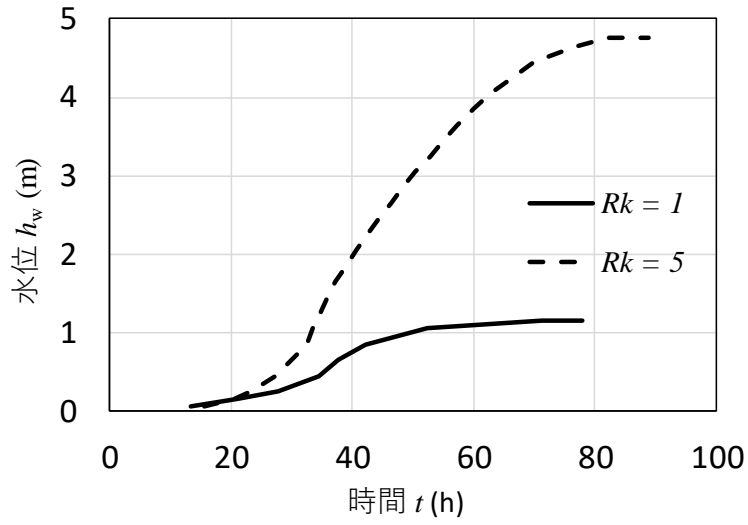


図 2-26 異なる R_k における水位変化 ($H/T:0.07$, $B/W:0.1$, $B/H:3.8$, $k_{bs} = 1.52 \times 10^{-5}$ m/s, $q = 5$ mm/h)

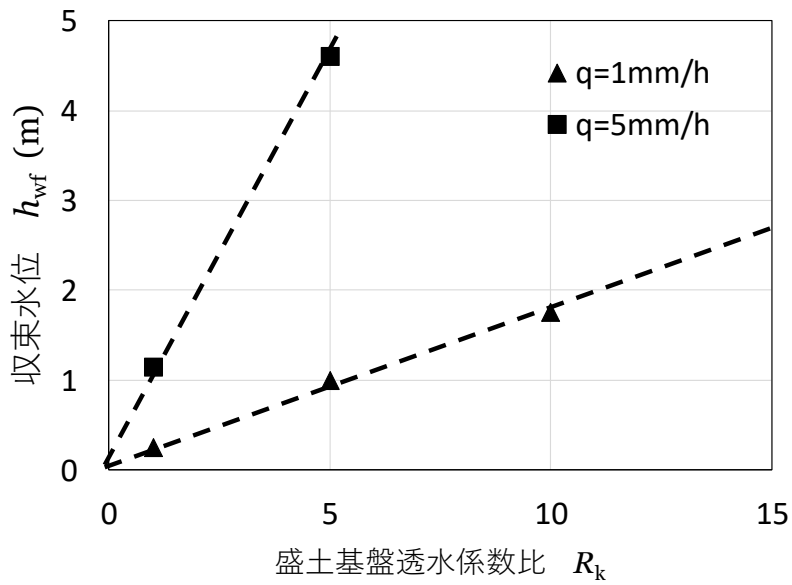


図 2-27 R_k と収束水位との関係

2-5-9 保水特性の影響

水分特性曲線の違いについて検討した。図 2-28 に検討に用いた水分特性曲線を示す。これまで検討に用いてきた銚田砂の排水過程における水分特性曲線(Sand A)のほかに、銚田砂の特性を修正した曲線 (Sand B)、銚田砂の吸水過程における水分特性曲線 (Sand C)、高速道路盛土から採取したシルト質砂 (Silty Sand A) のあわせて 4 種類の特性について比較を行った。図 2-29 に水分特性曲線の違いと盛土内水位変化の関係を示す。上昇開始時刻は、水分特性曲線における空気侵入値等の変化点がサクシヨンの高い範囲に位置する方が早いことがわかる。水位上昇速度についても、曲線によって異なり、シルト質砂の方が銚田砂に比べて速度が速い。これは同ポテンシャルにおける飽和度が高いことなどが影響していると考えられる。Sand A, Sand B, Sand C を比較すると、水位が収束する時刻はほぼ同時刻であり、平均的な水位上昇速度は大きくは変わらない。また、図 2-29 を見ると、異なる水分特性曲線を用いても、収束水位には影響しておらず、同じ水位に収束する結果となった。水分特性曲線は粒度分布や乾燥密度などの影響を受けると考えられ、透水係数とも関連があると考えられるので、透水係数との関連性を踏まえた整理が今後必要と考えられる。

- Sand A ($\alpha = 3.58, n = 4.30, \theta_s = 0.284, \theta_r = 0.183$)
- - Sand B ($\alpha = 1.50, n = 4.30, \theta_s = 0.284, \theta_r = 0.183$)
- · Sand C ($\alpha = 8.90, n = 2.47, \theta_s = 0.286, \theta_r = 0.178$)
- Silty Sand A ($\alpha = 1.56, n = 2.19, \theta_s = 0.461, \theta_r = 0.357$)

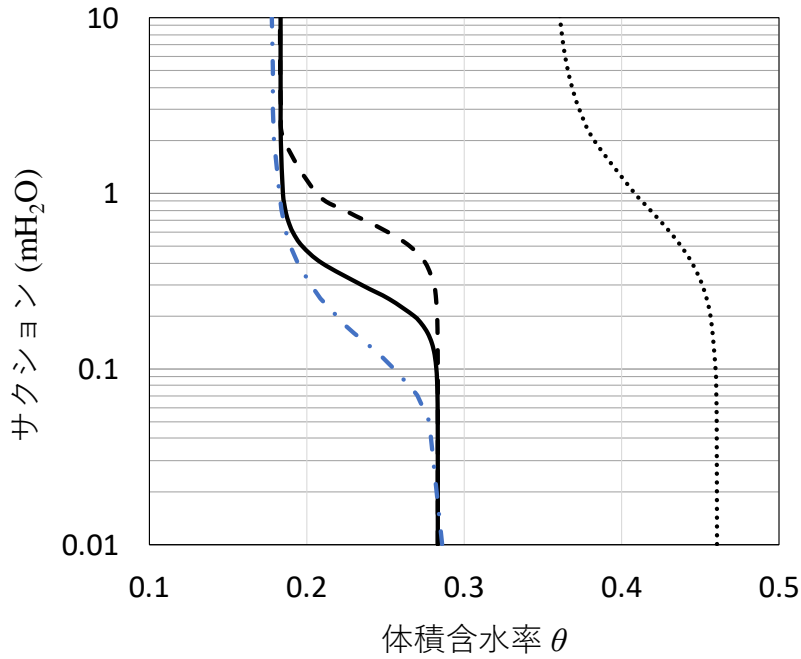


図 2-28 検討に用いた水分特性曲線

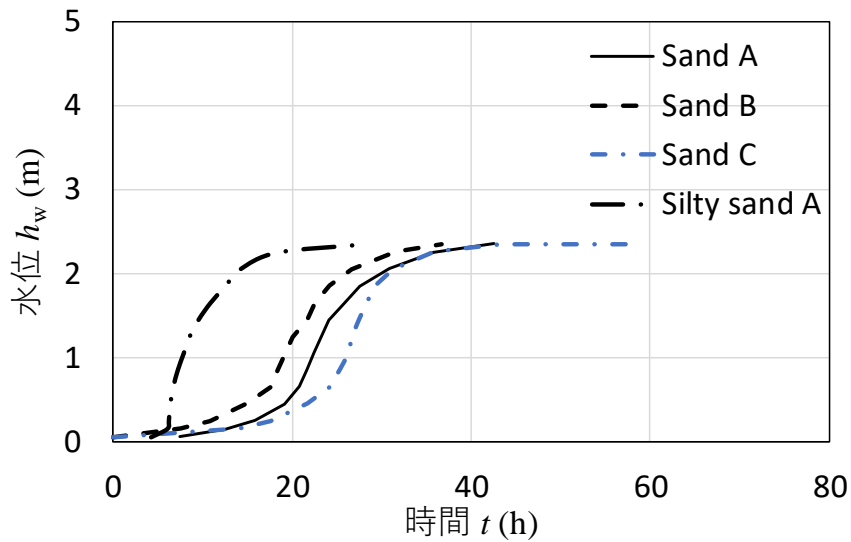


図 2-29 水分特性曲線の違いと盛土内水位変化の関係

2-5-10 各影響度のまとめ

表 2-1 に、前述した各項目の値が増加した時の盛土内水位の変化をまとめた。このうち前述してきた検討の結果から、値の範囲を考慮し、振れ幅が大きく影響が大きいと考えられる項目としては、時間雨量 q 、盛土の飽和透水係数 k_{bs} 、盛土と基盤の厚さの比 H/T 、盛土と基盤の飽和透水係数の比 R_k が挙げられる。そのため今後は主にこれらの項目に着目する。

なお、本章では降雨開始時点の飽和度分布を、「2-4 解析条件」に示すとおり降雨がない条件における定常状態から求めているが、実際には降雨履歴等により初期飽和度分布は変化すると考えられる。これによって水位が上昇し始める時間などが変化する可能性が考えられる。これについては、「第 3 章 模型実験による盛土内水位変動メカニズムの検証 3-6-5 降雨継続時間の影響」で詳しく考察する。

表 2-1 各条件の盛土内水位に与える影響

項目	影響	
	水位上昇速度 v_{up}	収束水位 h_{wf}
雨量強度 q	増加(q^2 に比例)	増加 (比例)
盛土高さ H	影響なし	増加 (比例)
飽和透水係数 ($k_{bs}=k_{fs}$ の場合)	減少 (反比例)	減少 (反比例)
基盤厚さ比 H/T	増加 ^{※1}	増加 ^{※2}
基盤幅比 B/W	増加	増加
盛土幅深さ比 B/H	影響なし	増加(比例)
盛土基盤透水係数比 $R_k(k_{bs}/k_{fs})$	増加 ^{※1}	増加 (比例) ^{※2}
水分特性曲線	影響あり	影響なし

※1 「2-6-2 水位上昇速度」に詳述

※2 「2-6-1 収束水位」に詳述

2-6 収束水位及び水位上昇速度の定式化

「2-5-10 各影響度のまとめ」で示した項目に着目し、収束水位及び水位上昇速度について定式化を行う。

2-6-1 収束水位

図 2-30 は盛土中央部における、収束水位（盛土高さ H で正規化した比収束水位）と時間雨量（盛土の飽和飽和透水係数 k_{bs} で正規化した比雨量）の関係を示したものである。同図には、盛土形状を固定し、基盤の厚さ T 及び飽和透水係数 k_{fs} をそれぞれ変化させた場合の結果についてもプロットしている。基盤厚さについては、変化の傾向を確認するために計算上 30 m や 70 m といった大きな値についても計算している。全体の傾向として、収束水位は比雨量の増加に伴い直線的に増加しており、式 2-7 のように示すことができる。

$$h_{wf}/H = m_1 \times q/k_{bs} \quad (2-7)$$

また、基盤の厚さが薄くなるにつれて、又は基盤の飽和透水係数が低くなるにつれて、排水しづらい条件となるため、収束水位は増加し、図 2-30 に示す傾き m_1 は増加していることがわかる。また、基盤厚さが厚くなると傾き m_1 は減少するが、 $T=30$ m と $T=70$ m ではほとんど変化が見られない。このことから、これ以上基盤厚さが厚い場合は半無限地盤として扱うことができると考えられる。なお、「2-5-4 盛土の規模の影響」より、盛土高さが異なる場合でも盛土と基盤の高さの比を用いることで図 2-30 と同様の評価ができる。

図 2-31 は図 2-30 における傾き m_1 と、基盤厚さ比 H/T 及び盛土基盤透水係数比 $R_k = k_{bs}/k_{fs}$ の関係を示したグラフである。これより、傾き m_1 は、基盤厚さ比や盛土基盤透水係数比に対してほぼ直線的に増加しているため、傾き m_1 を基盤厚さ比と盛土基盤透水係数比の関数とし、 $m_1 = m_1(H/T, R_k)$ と表すこととする。図 2-32 は基盤厚さ $T = 0.65$ m ($H/T = 7.7$) における、傾き m_1 と盛土基盤透水係数比 R_k の関係を示したグラフである。ま

た、このグラフには図 2-31 に示す基盤厚さが $T=70\text{m}$ ($H/T=0.07$, 以下, 「 $[H/T]_0$ 」と呼ぶ) で一定とした場合の m_1 と R_k の関係 $m_1([H/T]_0, R_k)$ 及び, 盛土基盤透水係数比が $R_k = 1$ で一定とした場合の m_1 と H/T の関係 $m_1(H/T, 1)$ から, 変数 $R_k, H/T$ をそれぞれ式(2-8)に代入して求めた値についてもプロットしている.

$$m_1(H/T, R_k) = m_1([H/T]_0, R_k) \times m_1(H/T, 1) / m_1([H/T]_0, 1) \quad (2-8)$$

この二つのプロットがほぼ同じ値を示していることから, 基盤厚さと透水係数の, 傾き m_1 に対する影響はそれぞれ独立しており, 個別に評価することができると考えられ, 式(2-9)が成り立つと考えられる.

$$m_1(H/T, R_k) = m_1(a, R_k) \times m_1(H/T, b) / m_1(a, b) \quad (2-9)$$

ここで a, b は定数である. これにより, 任意の $R_k, H/T$ に対して時間雨量と収束水位の関係を表す傾き m_1 を求めることができ, 時間雨量を与えれば収束水位を求めることができる.

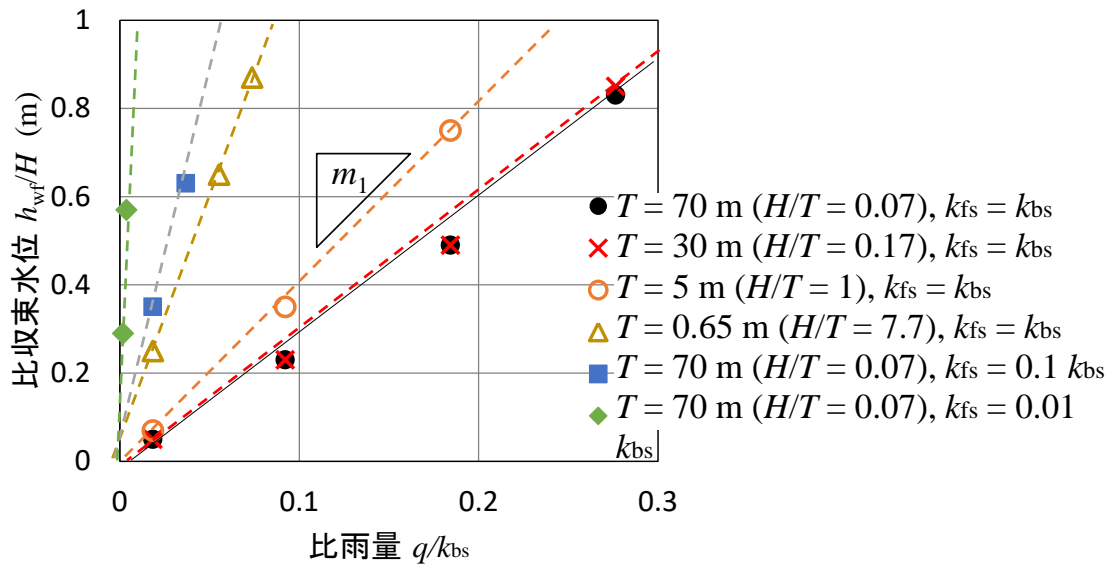


図 2-30 比収束水位と比雨量の関係

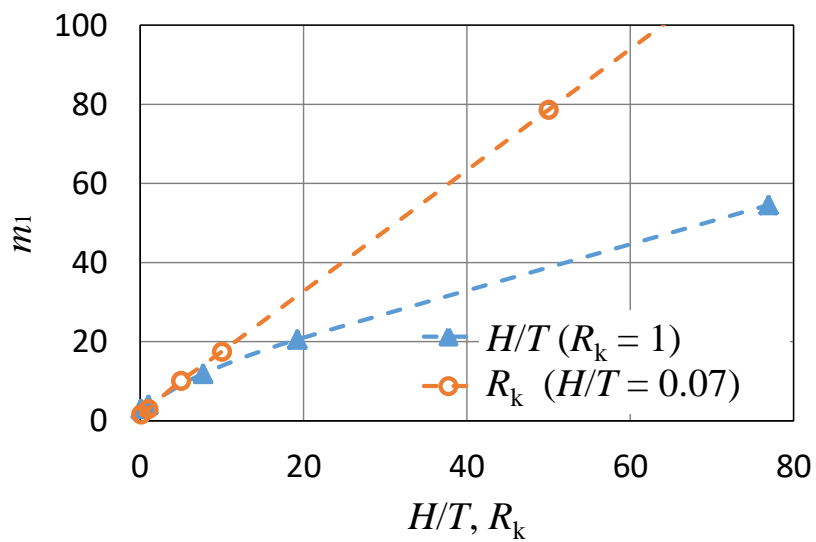


図 2-31 傾き m_1 と基盤厚さ比 H/T 及び盛土基盤透水係数比 R_k の関係

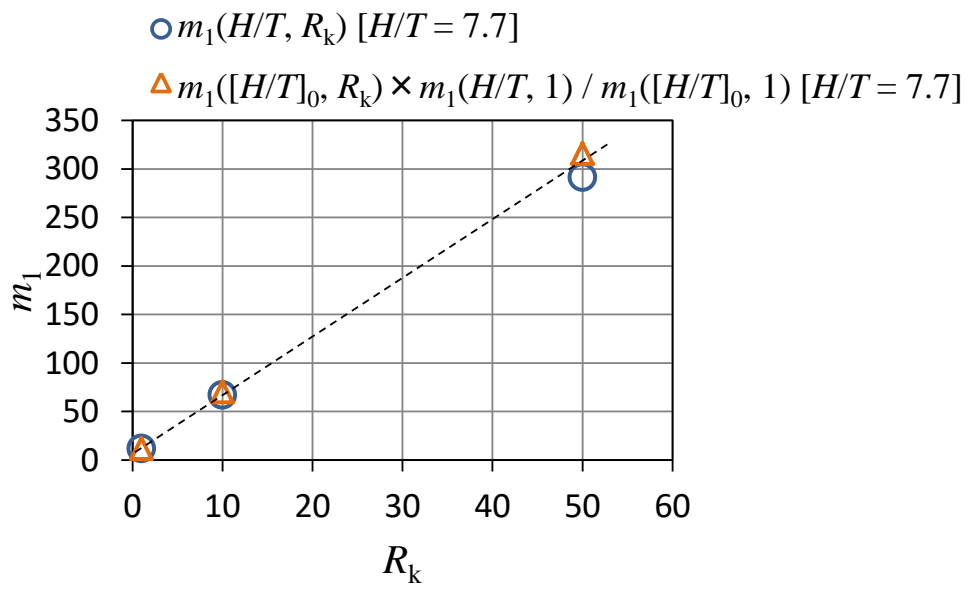


図 2-32 2種類の方法で求めた傾き m_1 と盛土基盤透水係数比 R_k の関係の比較

2-6-2 水位上昇速度

次に水位上昇速度 v_{up} について整理する．図 2-33 に水位上昇速度を盛土の飽和透水係数 k_{bs} で正規化した比水位上昇速度と，比雨量の関係を示す．これについても基盤の厚さ及び飽和透水係数をそれぞれ変化させた場合の結果についてプロットしている．水位上昇速度は比雨量の 2 乗に比例して増加しており，式 2-10 のように表すことができる．

$$\frac{v_{up}}{k_{bs}} = m_2 \times \left(\frac{q}{k_{bs}} \right)^2 \quad (2-10)$$

また，基盤の厚さが薄くなるにつれて，又は基盤の飽和透水係数が低くなるにつれて，図 2-33 の 2 次曲線の係数 m_2 は増加している．つまり，基盤と盛土で飽和透水係数が等しい場合や，基盤厚さが深く半無限地盤条件である場合と比べ，基盤の飽和透水係数が低い場合や基盤の厚さが薄い場合に，排水能力が低くなるため，水位上昇速度が大きくなるということがわかる．

図 2-34 は，盛土形状を固定した時の，盛土基盤透水係数比 $R_k = 1$ の場合の前述した係数 m_2 と基盤厚さ比 H/T の関係及び， $[H/T]_0$ の場合の係数 m_2 と盛土基盤透水係数比 R_k の関係を示したグラフである．基盤の厚さや飽和透水係数によって係数 m_2 は変化し，上限は底部が非排水条件の値に収束していく．また， H/T と m_2 の関係と， R_k と m_2 の関係は，類似の曲線形状を示している．

ここで係数 m_2 を m_1 と同様に基盤厚さ比と盛土基盤透水係数比の関数とし， $m_2 = m_2(H/T, R_k)$ と表すこととする．図 2-35 は，図 2-34 の 2 つの曲線から， $m_2(H/T, 1) = m_2([H/T]_0, R_k)$ となる時の基盤厚さと盛土基盤透水係数比の関係をプロットしたグラフである．ここから以下の関係が得られる．

$$R_k = f(H/T) = -0.0031(H/T)^2 + 0.52 H/T + 1 \quad (2-11)$$

この関係を用いて，係数 m_2 に対する基盤厚さの影響を，式(2-12)のように表す事ができる．

$$m_2(H/T, 1) = m_2([H/T]_0, f(H/T)) \quad (2-12)$$

これは、基盤厚さ $T = 70 \text{ m}$ ($H/T = 0.07 = [H/T]_0$)を半無限地盤条件と考えると、盛土基盤透水係数比が 1 の条件における有限基盤厚さ比 H/T と係数 m_2 との関係を、半無限地盤条件における盛土基盤透水係数比 R_k と係数 m_2 との関係に置き換えることができることを示している。

ここで、図 2-36 に図 2-34 と同様に $T = 70 \text{ m}$ ($[H/T]_0$)のときの m_2 と R_k の関係を示す。この条件を半無限地盤条件と考えると、 m_2 は R_k の値によって定めることができる。また、同図には基盤厚さが有限地盤の範囲の $T = 0.65 \text{ m}$ ($H/T = 7.7$)の場合の m_2 と $R_k \times f(H/T)$ との関係についても合わせてプロットしている。これらの 2 種類の値が一つの曲線上に位置する事から、基盤厚さが有限で盛土基盤透水係数比 R_k が 1 でない場合についても、式 2-10 の関係を用いて係数 m_2 は、以下の式 2-13 で表すことができると考えられる。

$$m_2(H/T, R_k) = m_2([H/T]_0, R_k \times f(H/T)) \quad (2-13)$$

つまり、この関係を用いれば、任意の k_{bf} , H/T に対する、水位上昇速度の大きさを表す係数 m_2 を求めることができる。

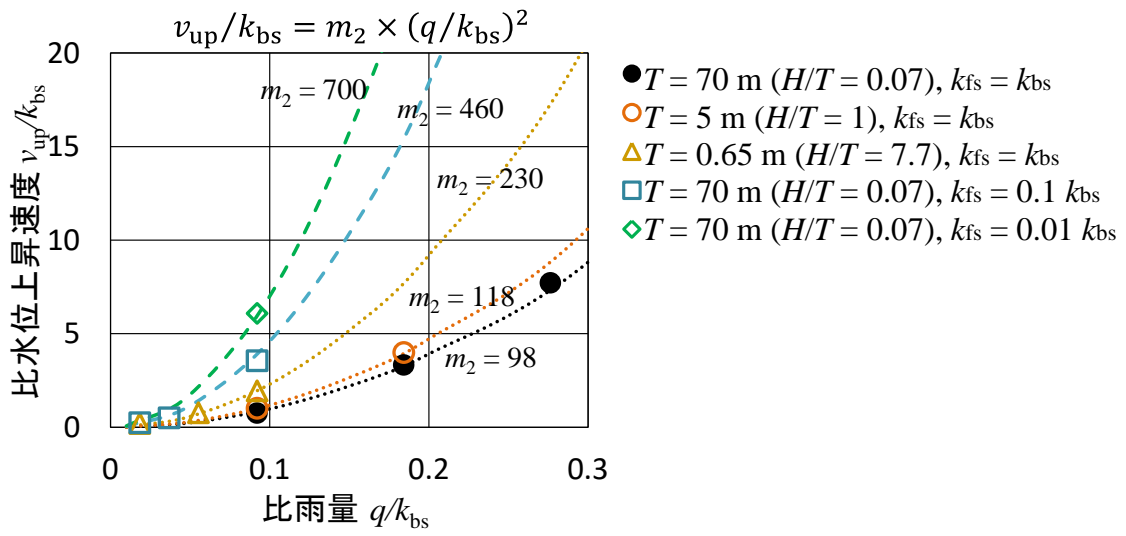


図 2-33 比水位上昇速度と比雨量の関係

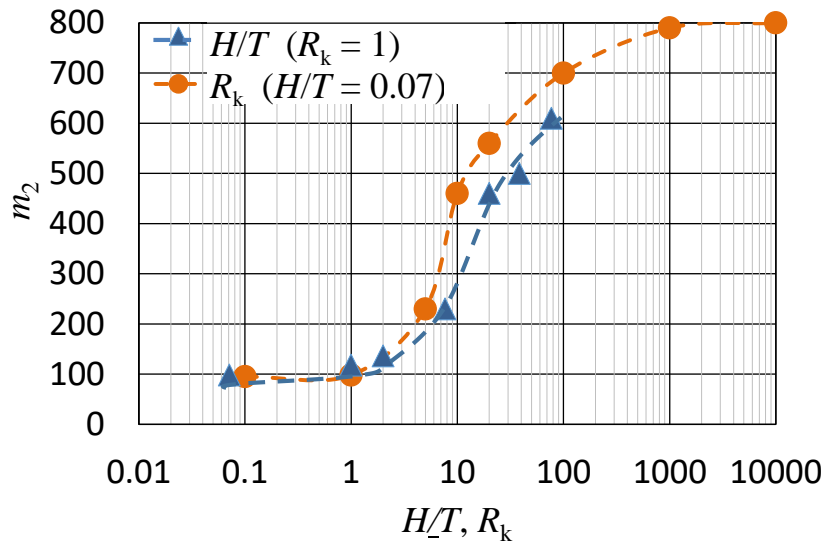


図 2-34 係数 m_2 と基盤厚さ比及び盛土基盤透水係数比の関係

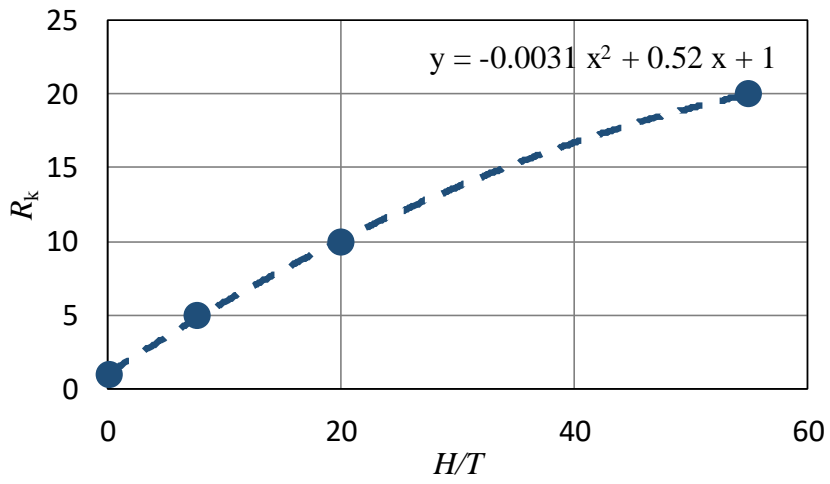


図 2-35 $m_2(H/T, 1) = m_2([H/T]_0, R_k)$ となる時の盛土基盤高さ比と盛土基盤透水係数比の関係

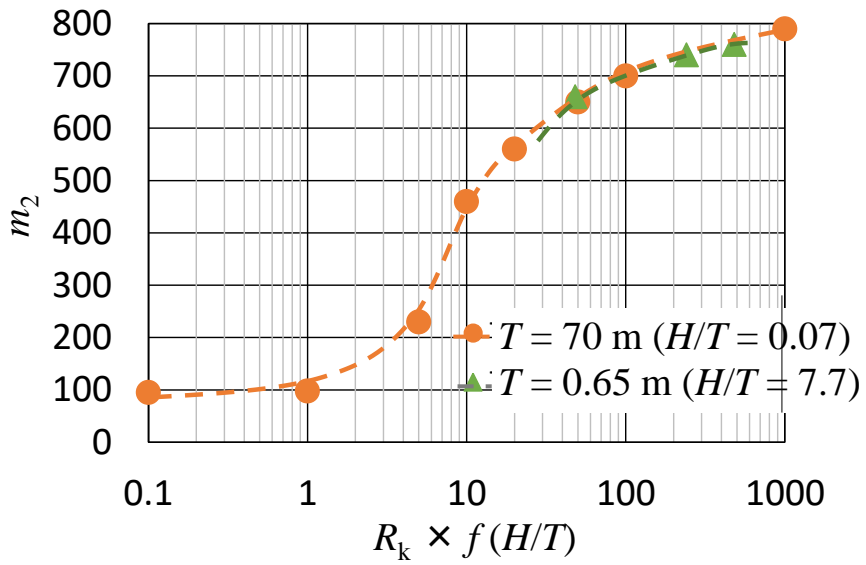


図 2-36 係数 m_2 と $R_k, R_k \times f(H/T)$ の関係

2-7 まとめ

本章では，浸透流解析を用いて各条件の影響評価を行った．ここで得られた内容について以下に示す．

- ・盛土及び基盤の形状比率が等しく，飽和透水係数が均一な場合，収束水位を盛土高さで正規化し，時間雨量を盛土の飽和透水係数で正規化することで時間雨量と収束水位の関係を同一曲線上にプロットすることができる．時間雨量に対する盛土の飽和透水係数の比で水位が決定されるので，材料特性として盛土の飽和透水係数が水位変化に大きな影響を与えていると考えられる．例えば盛土の飽和透水係数 $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ で降雨 10mm/h の時に収束水位が 3m だとすると，盛土の飽和透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の場合は降雨 1mm/s の時に収束水位が 3m になる．
- ・水位上昇速度は，時間雨量を盛土の飽和透水係数で正規化した値の 2 乗に比例する．
- ・基盤厚さが薄い場合や基盤幅が狭い場合，基盤の飽和透水係数が盛土の飽和透水係数よりも低い場合に収束水位及び水位上昇速度は増加する．
- ・盛土幅の増加に比例して収束水位は上昇する．
- ・想定される値の範囲を考慮すると，収束水位や水位上昇速度に大きな影響を与えるパラメータは，時間雨量，盛土の飽和透水係数，基盤の飽和透水係数，基盤厚さが考えられる．
- ・盛土形状が同一の場合，収束水位に対する，基盤の厚さと透水係数の影響はそれぞれ独立しており，これらの影響を個別に求めて正規化し，後から掛け合わせることで，任意の基盤厚さ，透水係数における収束水位を求めることができる．
- ・盛土形状が同一の場合，盛土と基盤の透水係数が等しい時の盛土高さに対する基盤厚さの比率（以下，基盤厚さ比という）の水位上昇速度に対する影響は，半無限地盤条件における水位上昇速度に対する基盤の飽和透水係数の影響に，2 次関数を用いて置き換えることができる．そして，半無限地盤条件における基盤の飽和透水係数の値を，「基盤の飽和透水係数」と前述した「基盤厚さ比を基盤飽和透水係数として置き換えた時の値」の積に変換することで，任意の基盤厚さ比と飽和透水係数における

水位上昇速度を求めることができる。

参考文献

- 1) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics* 1, 318-333, 1931.
- 2) 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.
- 3) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soils, Soil Sci. Am. J.*, Vol. 44, pp.892-898, 1980.
- 4) 濱田泰治, 藤岡一頼, 安部哲生, 新井寿和, 三島信雄, 塚本正康: 碎石豎排水工の対策効果について—その1: 盛土模型実験—, 第50回地盤工学研究発表会講演集, pp.1099-1100, 2015.
- 5) 安部哲生, 藤岡一頼, 塚本正康, 濱田泰治: 碎石豎排水工の排水効果に関する模型実験, *土木学会第70回年次学術講演会*, pp.333-334, 2015.

第3章 模型実験による盛土内水位変動メカニズムの検証

3-1 はじめに

第2章で記載した浸透流解析の結果から、基盤厚さが薄い場合や基盤の飽和透水係数が低い場合に、収束水位が高くなり水位上昇速度も増加する傾向が確認された。これらの傾向を確認するために実施した模型実験について以下に報告する。

3-2 実験形状の設定

第2章で記載した浸透流解析の結果から、盛土内の流速は鉛直方向に卓越していることがわかっている。そこで、盛土中央部の鉛直方向の流を再現することを目的とし、実験を計画する。実験模型の模式図を図3-1に示す。基礎地盤を想定した基盤部の上に盛土中央部を想定した円筒型の土柱を設置し、その上部から降雨を付与する構造を計画した。水位や飽和度の変化は土柱に均等に土壤水分計と間隙水圧計を設置することで計測する構造を計画した。実験室で実施する規模を考慮し、土柱の直径 B を10cm、基盤部の直径 W を50cmとし、土柱の高さは1mから2mと計画した。

実験ケースを設定するにあたって、まず模型実験の形状を想定した2次元浸透流解析を行った。解析形状を図3-2に示す。境界条件は第2章図2-2と同様で直線が非排水境界、点線が浸出境界、一点鎖線が降雨浸透境界、基盤上面端部が既知水頭境界で、解析手順についても第2章で示した手順と同様で、はじめに降雨が無い条件で定常浸透流解析を行い、ここから得られた全水頭分布、飽和度分布を初期値とし、続いて一定の降雨を連続して与えるという手順で解析を実施した。この浸透流解析により、基盤の厚さや飽和透水係数を変えて、結果の違いを確認した。

図3-3に比雨量と収束水位の関係を示す。第2章図2-29と同様に、基盤の厚さが薄くなるにつれて、収束水位は大きくなる傾向が確認できる。同様に基盤の飽和透水係数が盛土(土柱)に比べて低い場合についても、収束水位が増加する傾向が確認された。

ここで、図 3-3 を見ると、前述した解析結果図 2-29 と異なる点が 2 点確認される。一つ目は、曲線の形状の違いが挙げられる。前述した図 2-29 では、比雨量にたいして収束水位が直線的に増加しているが、図 3-3 を見ると、はじめは上昇量が少なく、徐々に上昇が大きくなるような曲線的な変化を示している。図 3-4 に土柱の幅 B を変化させたときの比雨量と収束水位との関係を示す。これを見ると、幅 $B=10\text{m}$ では直線的な変化をしているが、幅 B が減少するに従って曲線の曲率が大きくなり、比雨量が大きくなるにしたがって急激に収束水位が上昇する傾向が確認できる。これは、幅が広いと土柱中央からの排水距離が長くなるため、幅が狭い場合に比べて収束水位が高くなる可能性が推定できる。

もう一つの違いは、収束水位が変化する基盤厚さのオーダーが異なる点である。収束水位が変化する基盤厚さは、第 2 章で前述した浸透流解析結果と比較すると $1/100$ 程度のスケールになっている。基盤に流入する水の総量は盛土幅によって変化するが、この流入量によって盛土内水位に対する基盤厚さの影響は変化すると考えられる。前述した浸透流解析では図 2-30 に示すように盛土幅 19m に対して基盤厚さが 5m より小さい範囲（盛土幅の $1/4$ 程度）で変化が顕著である。こういったことから、土柱幅の $1/4$ の数 cm 程度以下で変化が顕著になっていると考えられる。また、このような条件では法尻下の水流はほぼ水平かつ一様であり、図 3-5 に示すように解析における二次元断面と実験における軸対象条件における流入面積と流出面積を比較すると、二次元断面では流入と流出の面積比率はおよそ $B:2T$ であるのに対し、実験条件では $B:4T$ となり流出面積は 2 倍になる。そのため、模型実験における基盤部の厚さについては土柱直径 10cm の $1/8$ の 1cm 程度にするのが良いと考えられるが、本実験ではこれに基盤の作成精度を勘案した上で基盤厚さについては 1cm と 3cm の比較をすることで、盛土内水位に対する影響を評価することとした。

以上の検討から表 3-1 のとおり、実験ケースを設定した。ケース 2 を基本としてケース 1 は盛土（土柱）高さが低いケース、基盤厚さが薄いものがケース 3、基盤の飽和透水係数が小さいものがケース 4 である。

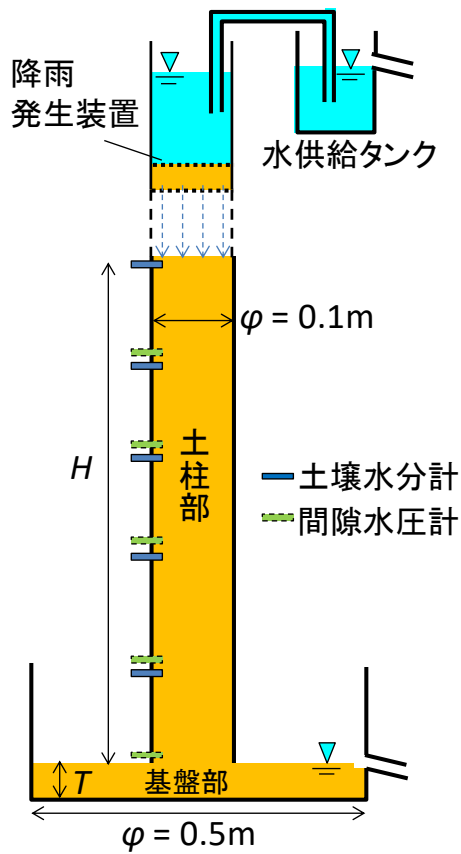


図 3-1 実験模型の構造

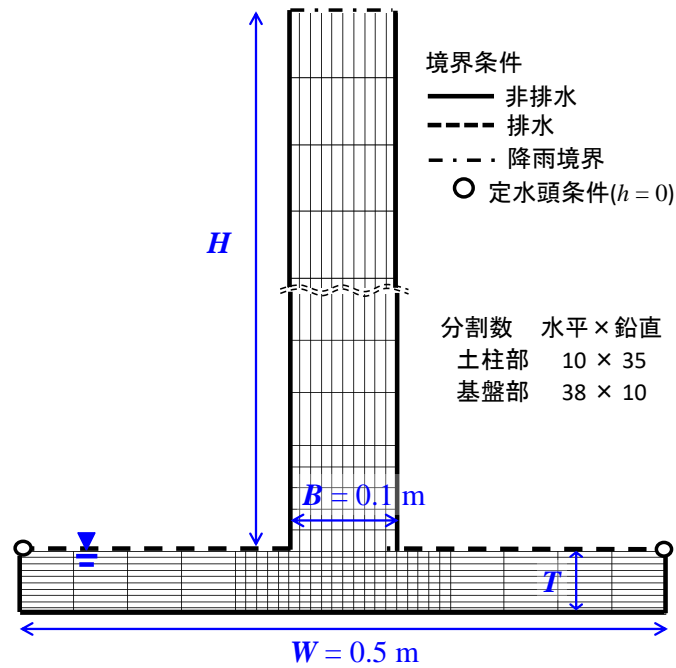


図 3-2 再現解析に用いた解析断面と境界条件

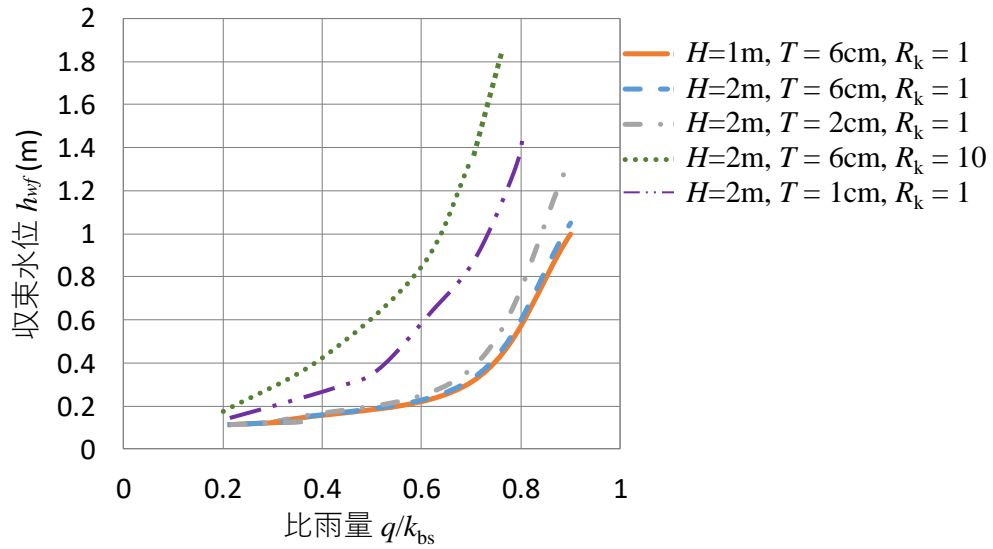


図 3-3 比雨量と収束水位の関係（実験模型， $B=0.1\text{m}$ ， $W=0.5\text{m}$ ）

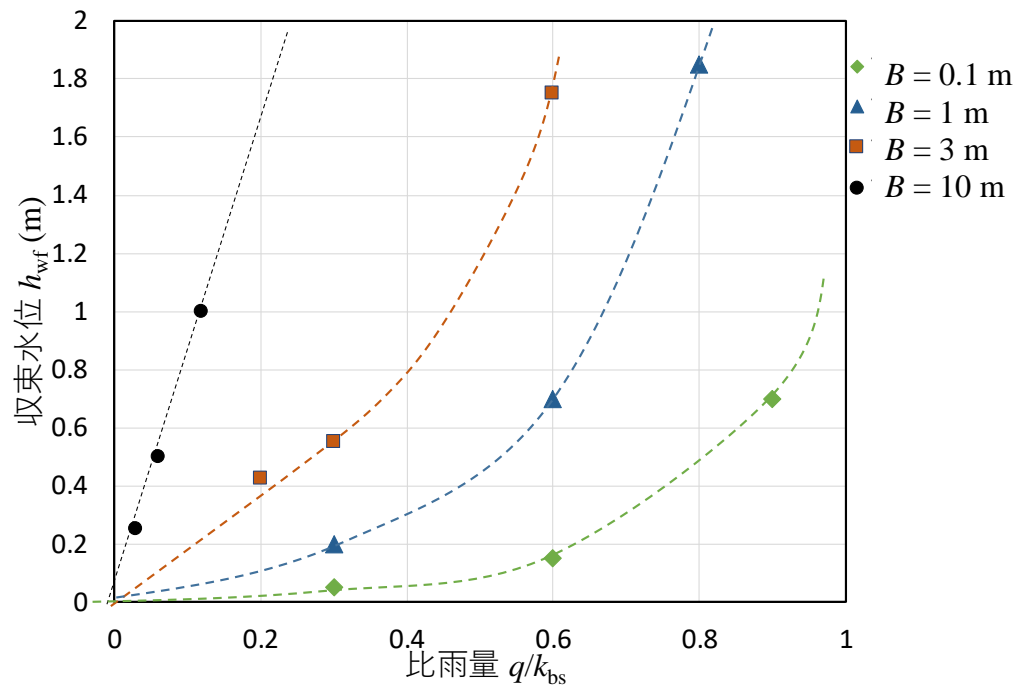


図 3-4 比雨量と収束水位の関係（実験模型， $H=2\text{m}$ ， $T=3\text{m}$ ， $W = B \times 6$ ）

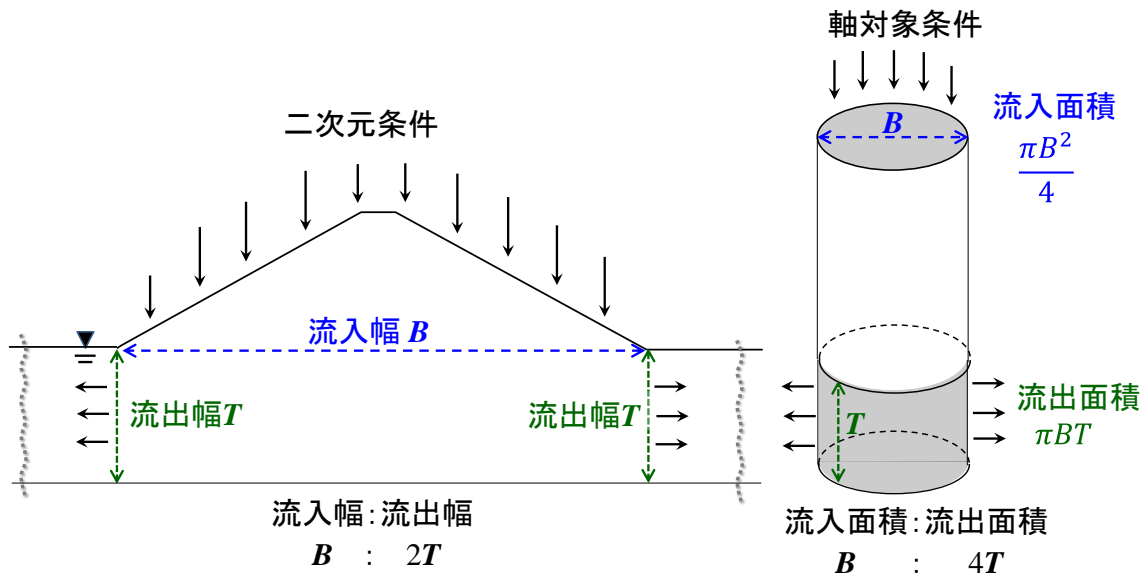


図 3-5 二次元条件及び軸対象条件における流入面積と流出面積の関係

表 3-1 実験ケース

		単位	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
土柱部	高さ H	cm	98	195	195	195
	乾燥密度 ρ_d	Mg/m ³	1.4	1.4	1.4	1.4
	締固め度 D_c	%	84.3	84.3	84.3	84.3
	飽和透水係数 k_{bs}	m/s	3.5×10^{-5}	3.5×10^{-5}	3.5×10^{-5}	3.5×10^{-5}
基盤部	厚さ T	cm	3	3	1	3
	乾燥密度 ρ_d	Mg/m ³	1.4	1.4	1.4	1.55
	締固め度 D_c	%	84.3	84.3	84.3	93.3
	飽和透水係数 k_{fs}	m/s	3.5×10^{-5}	3.5×10^{-5}	3.5×10^{-5}	3.5×10^{-6}

3-3 実験模型の作製

上記実験を実施するために、実験模型を作成した。土柱は図 3-6 に示すように、アクリル柱を用いて、土壌水分計及び間隙水圧系を設置できるように加工した。図 3-7 に模型全体の構造図と全景写真を示す。土柱の上部に設置する降雨を発生させる装置は、締固めた土の上に水を張った構造としており、この装置と水供給タンクが接続された形状となっている。

(図 3-7 参照) 供給タンクには常に水を供給し余剰水を溢れさせることにより常に一定の水位を保つことができる構造とした。この水供給タンクと降雨発生装置が接続されてるので、降雨発生装置の水位は一定で、一定の降雨を定常的に発生させることができる。また、供給タンクの設置高さを変えることで雨量発生装置の水位が調節でき、この水位の違いによって雨量の調節ができる構造とした。

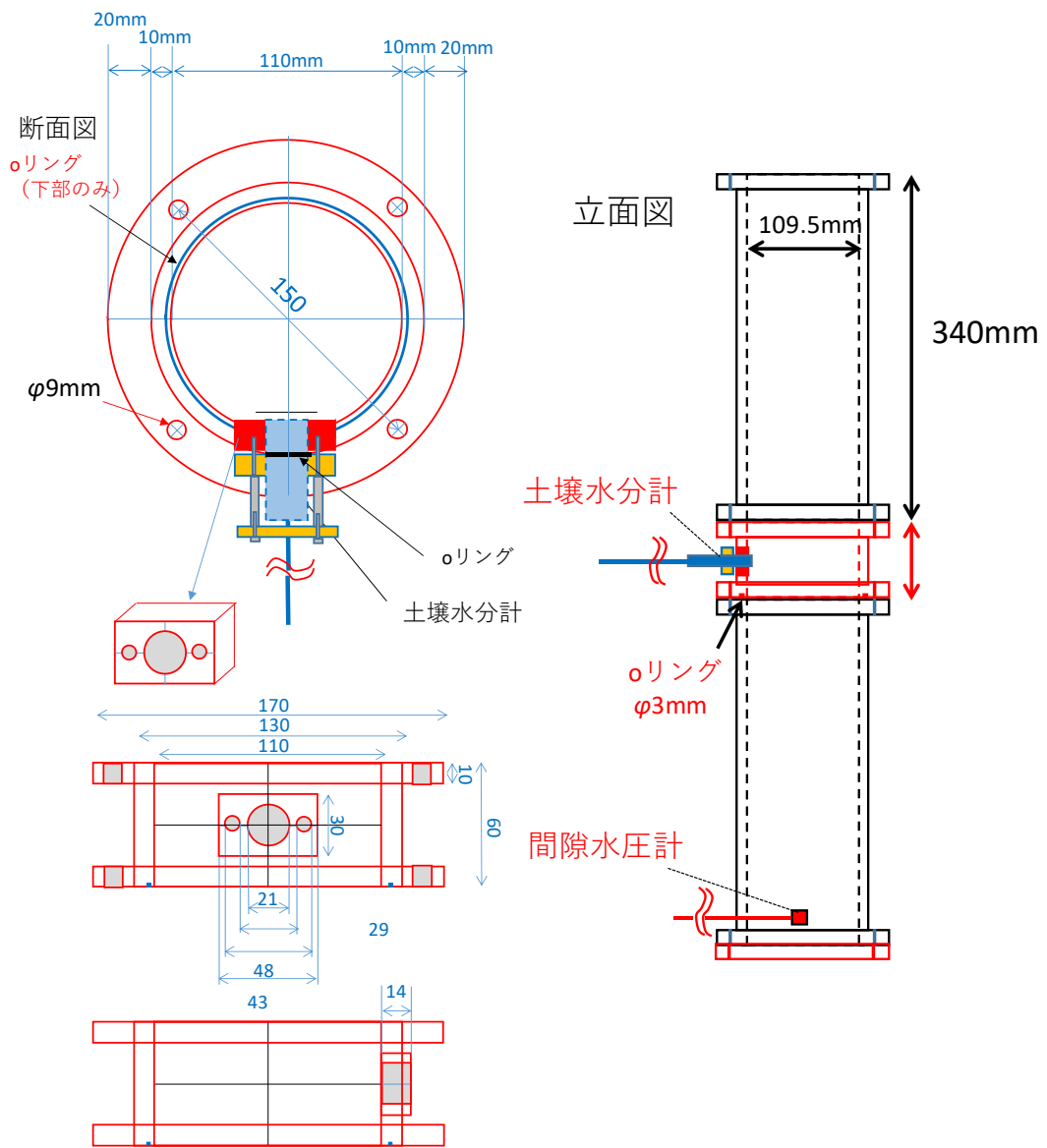


図 3-6 実験模型詳細図

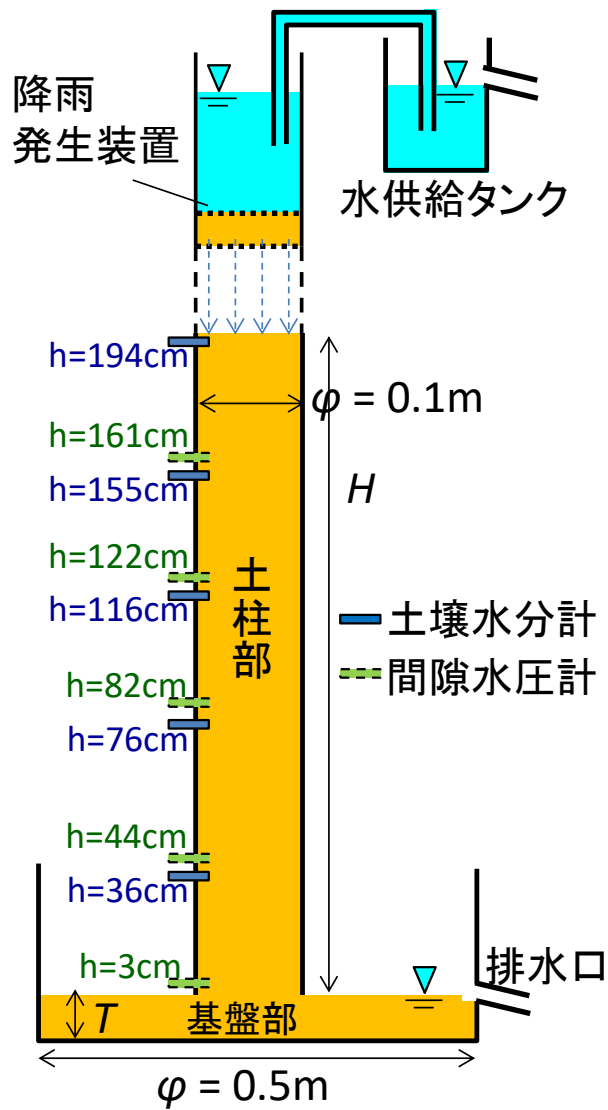


図 3-7 実験模型の構造（左：模式図，右：実際の写真）

3-4 実験に用いた材料とその特性

土柱部及び基盤部には銚田砂と類似の物性を持ち、銚田砂と同様に既往の道路盛土の水位低下に関する研究¹⁾で用いられている江戸崎砂を使用しており、その物性値を表 3-2 に示す。江戸崎砂の飽和透水係数については、乾燥密度を変えて透水試験を行い、ここから得られた値を基に設定した。浸透流解析に用いる水分特性曲線は図 3-8 に示す 2 種類で、江戸崎砂を用いて別に実施した保水性試験（排水過程）より求めた値 (SWCC1) と、本模型実験後、排水が完了し変化がおさまった時点で直接試験を採取して計測した鉛直方向の含水比分布から求めた値 (SWCC2) を用いた。

表 3-2 江戸崎砂の物性値

項目	単位	
土粒子密度 ρ_s	Mg/m ³	2.69
細粒分含有率 F_c	%	14.0
最大粒径	mm	4.75
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (JIS A 1210 締固め試験 呼び名 A)	Mg/m ³	1.66
最適含水比 w_{opt} ((JIS A 1210 締固め試験 呼び名 A)	%	17.8

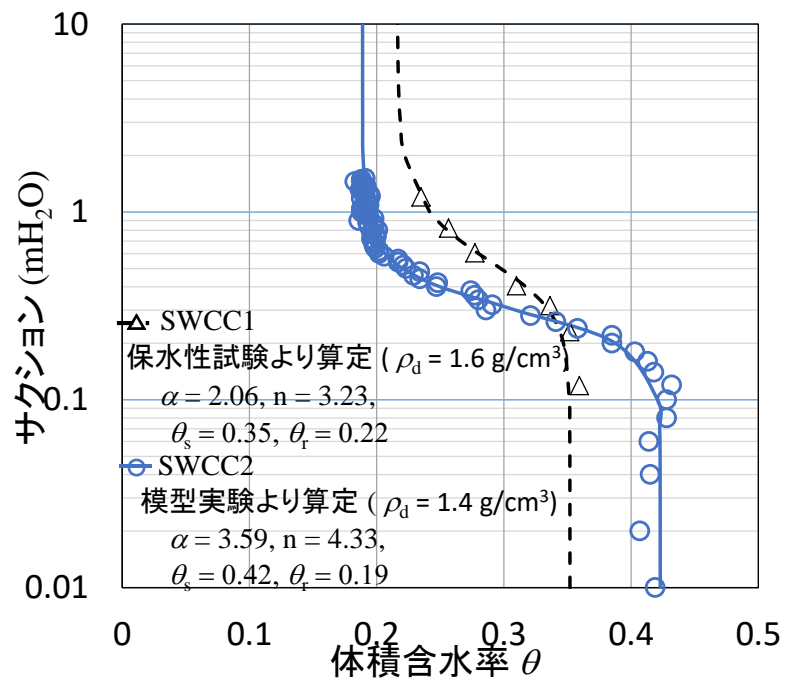


図 3-8 再現解析に用いた水分特性曲線

3-5 実験手順

次に実験の流れを図 3-9 に示す。まず底部の基盤及び土柱を所定の飽和透水係数となるように乾燥密度を調整して作製する。この時の試料は、整形のしやすさを考慮し含水比が 11%程度で一律になるように事前に調整したものを使用した。次に飽和するのに十分な時間と量の降雨を与える。土柱の飽和を確認後、降雨を停止し基盤部から排水を行い、土壌水分計及び間隙水圧計の値が収束し定常状態となるまで排水を続ける。土壌水分計及び間隙水圧計の収束を確認した後、一定の降雨を上部から継続して与え、浸潤過程、水位の上昇過程における含水比や間隙水圧の変化及び、最終的な収束値を計測する。収束が確認された段階で、降雨強度を上げ、再度土壌水分計や間隙水圧計の値が収束するまで降雨を継続して与えるという過程を、最終的に土柱すべてが飽和し上部に水面が発生するまで繰り返し実施した。

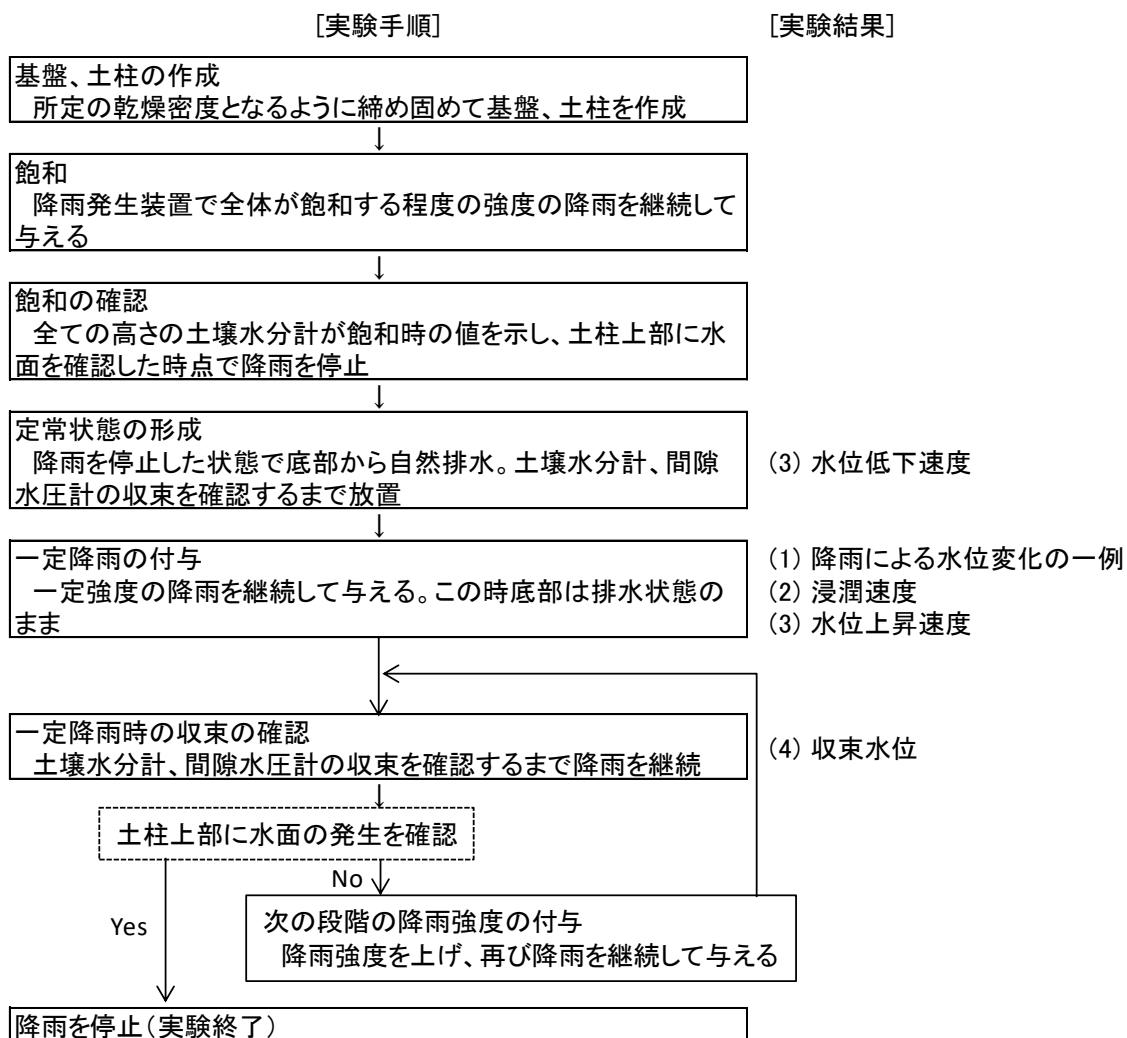


図 3-9 実験手順

3-6 実験結果

実験結果として、一定降雨を付与している段階における状態変化の概略・浸潤速度・水位上昇速度、定常状態の形成段階における水位低下速度、及び一定降雨時の収束の確認段階における収束水位について、順番に示す。結果の整理に用いたデータは図 3-9 に示している各段階で得られたデータを用いた。また、実験と同一条件で行った、浸透流解析結果との比較についてもあわせて示す。ここで、解析における断面と境界条件を図 3-3 に示す。基盤厚さは前述した二次元と軸対象の条件の違いを考慮し、解析における基盤厚さは実験の 2 倍としている。

3-6-1 降雨による水位変化結果の一例

まず、降雨の流入によって生じる水位上昇等の状態変化の概略を示す。図 3-10 は、ケース 4 の時間雨量 65mm/h ($1.8 \times 10^{-5}\text{m/s}$) における体積含水率及び、間隙水圧の時間変化のグラフである。ここで、降雨の降り始めを 0 分としている。なお、間隙水圧計における計測では正圧の計測を主目的としており、一般的な正圧用の間隙水圧計を使用しているため、負の間隙水圧の範囲は、計器の性能上うまく計測できていない。0～200 分において、上部の土壌水分計から順番に体積含水率が上昇していることから、浸潤が上から下に進行していることがわかる。また、高さが 76cm の位置及び 116cm の位置の 200 分付近から、体積含水率が一度収束し、その後、今度は下部の体積含水率から順番に再上昇している。このことから、浸潤水が下部に到達した後に水位が上昇し、下部から徐々に土柱の飽和が進行していることがわかる。ここで間隙水圧計の値を見ると、同様に下部の水圧計から順番に水圧が上昇している。また、高さ 76cm、116cm の土壌水分計が再上昇し収束した時間と高さ 82cm、122cm の間隙水圧計が上昇しはじめる時間がほぼ等しいことから、土柱下部からの水位上昇、飽和の進行が確認できる。また、高さ 155cm の土壌水分計を見ると、若干の再上昇が確認できるものの、これより下部よりも低い体積含水率で収束していることから、この位置では供試体は飽和しておらず、最終的に収束した水位は、高さ 122cm と 155cm の間にあると推定できる。

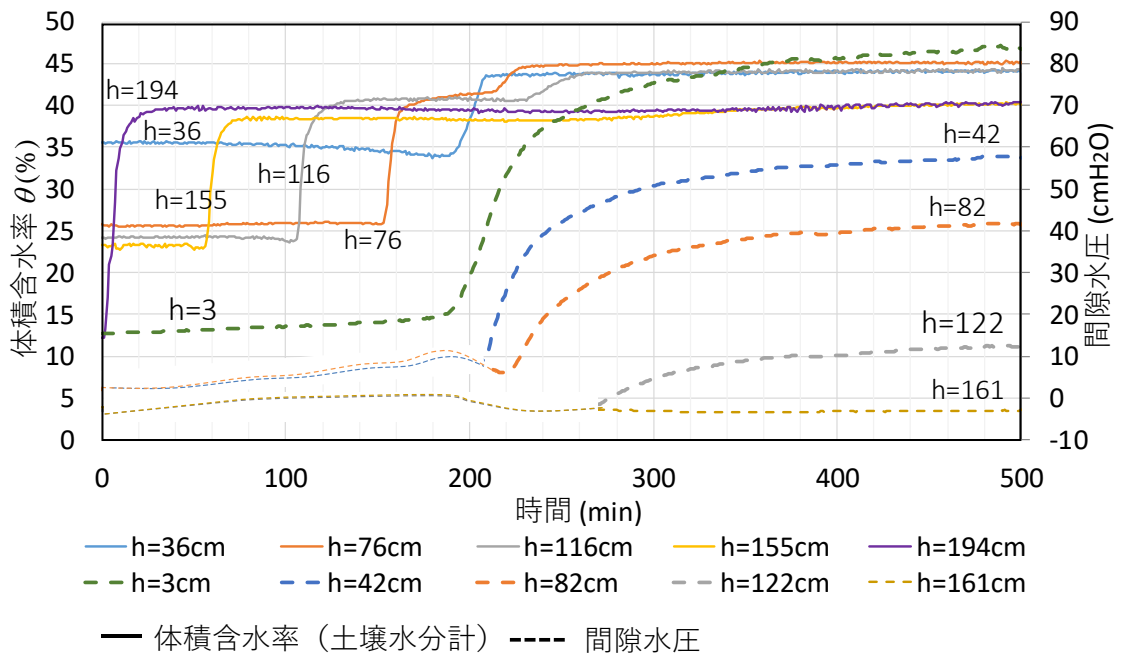


図 3-10 体積含水率及び間隙水圧の時間変化の具体例 (Case 4)

3-6-2 浸潤速度

次に、浸潤速度 v_{in} について整理する。図 3-10 から、それぞれの高さにおける体積含水率が上昇し始めた時間が特定できる。この時点を上からの浸潤面が到達した時間として、この時間と浸潤距離から浸潤速度を計算した。図 3-11 に各ケースにおける、比雨量と比浸潤速度の関係を示す。また、この図には浸透流解析により求めた結果もあわせて記載している。

図 3-11 を見ると、雨量の増加に伴い浸潤速度は上昇している。また、全ての実験結果がほぼ一つの曲線上に帰着していることから、実験に用いた土柱の乾燥密度や透水係数は、設定したとおりほぼ同値であることが確認できる。また、上からの浸潤に対しては基盤の厚さや飽和透水係数の違いはあまり影響していないことも、この結果から確認できる。また、比浸潤速度は比雨量がある程度大きくなると飽和透水係数 k_{bs} よりも大きい（1 より大きい）値を示している。浸潤速度は浸潤面が到達する時間（体積含水率が変化し始める時間）から求めている。これは体積含水率や飽和度の変化のスピードを示しているため、実際の流れよりも速く変化していると考えられる。

次に実験値と解析値を比較すると、直接模型実験から算出した SWCC2 による解析結果に近い値となっている。これは、SWCC1 は保水性試験時の供試体の乾燥密度が高く、最大と最小の体積含水率の範囲がせまいため、浸潤にかかる時間が短く浸潤速度が速くなり模型実験の結果とずれてしまったことが原因と考えられる。また、一般的に水分特性曲線にはヒステリシスがあり、吸水過程の方が排水過程に比べ空気侵入値が低い側の曲線を描く傾向がある。本解析には排水過程の水分特性曲線を用いているが、解析結果と実験結果がほぼ合致していることから、本検討に用いた土では、水分特性に対するヒステリシスの影響は小さいと考えられる。

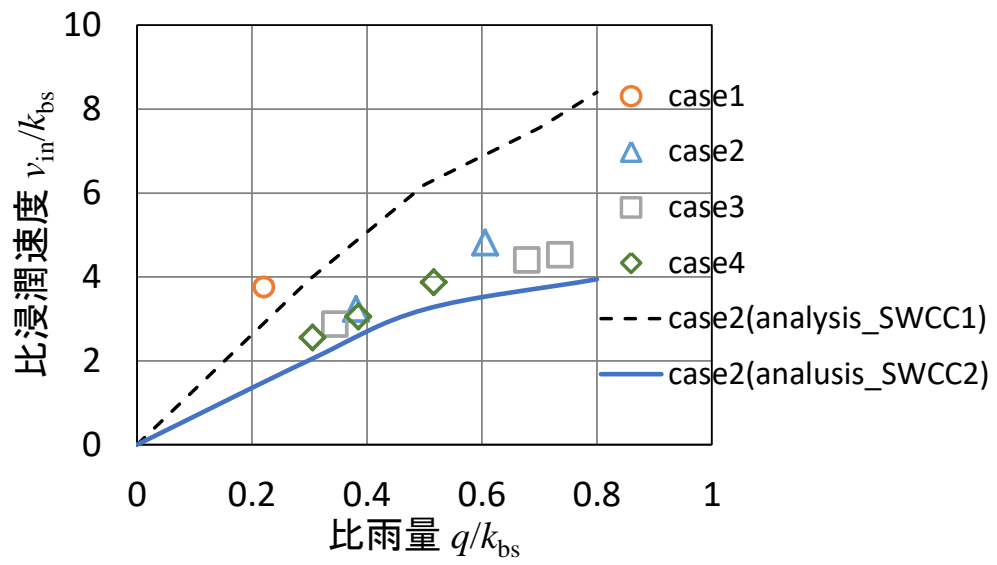


図 3-11 浸潤速度と比雨量の関係

3-6-3 水位上昇速度，水位低下速度

次に，水位上昇速度 v_{up} ，水位低下速度 v_{down} について整理する．土壤水分計と間隙水圧計を設置したそれぞれの高さにおける，体積含水率が飽和時の値に収束した時間及び間隙水圧が上昇し始めた時間から，図 2-8 に示したような水位と時間の関係を整理し，ここから水位上昇速度 v_{up} を算定した．また，全体が飽和し降雨を止めた後に，各高さの体積含水率が低下し始める時間から，同様に水位と時間の関係を整理し，水位低下速度 v_{down} も算定した．

図 3-12 にケース 4 の比水位上昇速度と比雨量の関係について，実験結果と解析結果を示す．なお，他のケースでは雨量が飽和透水係数に近いような，不飽和領域の飽和度がかなり高い条件でしか水位上昇が確認できず，明確な収束時刻を求められなかったため，水位上昇速度は確認できていない．図 3-12 から，雨量の増加に伴い水位上昇速度も増加しており，解析結果と実験結果でほぼ同様の傾向を示していることがわかる．

続いて図 3-13 に排水段階における水位と比水位低下速度の関係を示す．これを見ると，どのケースも水位の低下とともに水位低下速度が小さくなっている．また，ケース 4 は，他に比べて全体的に水位低下速度が小さく，基盤の飽和透水係数が低く水位低下しづらいという結果となった．

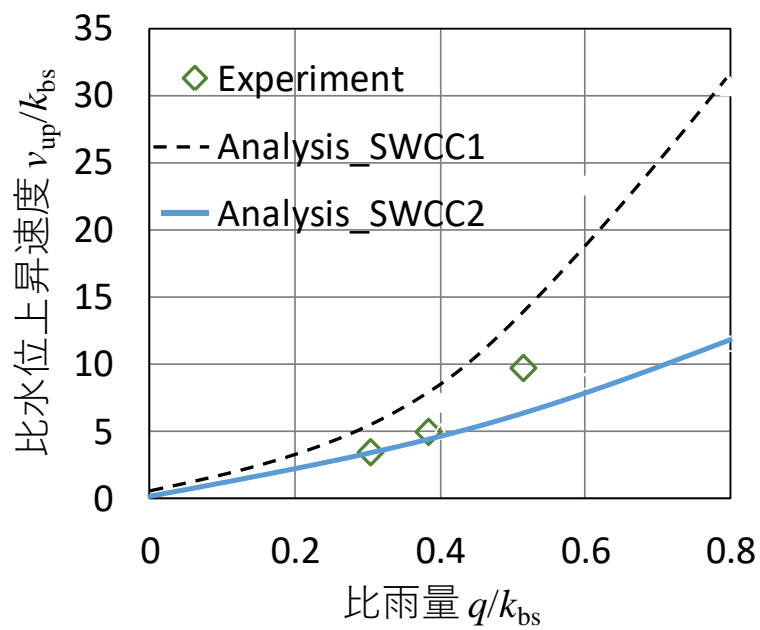


図 3-12 水位上昇速度と比雨量の関係 (Case 4)

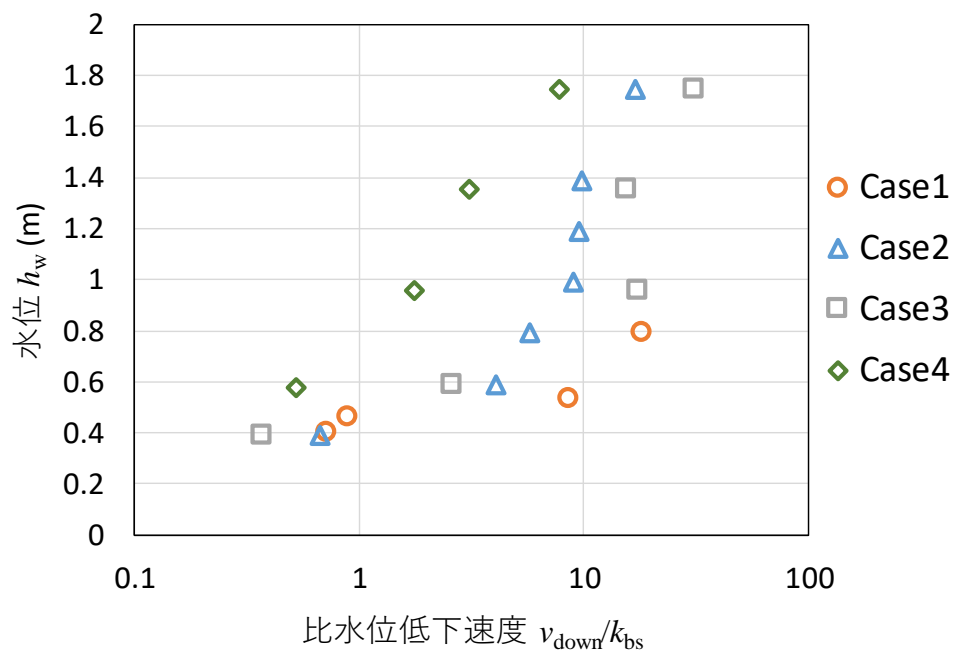


図 3-13 水位と水位低下速度の関係

3-6-4 収束水位

次に、それぞれの雨量において、変化が収束した時点の高さ方向の間隙水圧分布から、間隙水圧が上昇して 0 を越え飽和に達している高さを求め、この高さを収束水位 h_{wf} とし、収束水位と雨量の関係を導出した。なお、ケース 1 については、土柱底部のみでしか間隙水圧が計測できなかったため、土壌水分計の値から体積含水率の高さ方向の分布を求め、体積含水率が飽和時の値に達している位置を収束水位とした。図 3-14 にこの結果を示すとともに、同条件における浸透流解析の結果について示す。なお、水分特性曲線が異なっても (SWCC1, SWCC2 のいずれを用いても) 浸透流解析の結果は変わらなかった。

まず全体の傾向を見ると、雨量の増加に伴い収束水位も高くなっていることがわかる。土柱高さの異なるケース 1 とケース 2 を比較すると、実験、解析とも大きな差は無く、盛土内水位に対する盛土高さの影響は無いことが確認できる。基盤の飽和透水係数の異なるケース 2 とケース 4 を比較すると、ケース 4 の方が同じ雨量における収束水位がかなり高い結果となっている。これは、ケース 4 の基盤の飽和透水係数が低く排水しづらい条件であったためであり、実験と解析のどちらからも同様の傾向が確認できる。また、解析において基盤の飽和透水係数を盛土の 1/20 にした場合に実験結果とほぼ同じ値をとるといった結果となった。

これに対して基盤厚さの異なるケース 2 とケース 3 を比較すると、浸透流解析では若干の差が出ているが、実験では明確な差は確認できていない。今回の実験では、設定した基盤厚さが 1cm 又は 3cm と薄く、数 mm 単位の精度で地盤を作成しなければならず、この精度でうまく均一な地盤が作成できなかった可能性が考えられる。

次に、それぞれのケースにおける、水位と間隙水圧の関係について述べる。図 3-15 は、各ケースにおける水位と、土柱底部近くの基盤部上面から高さ 3cm の点に設置した間隙水圧計の値について、実験結果及び同条件における解析結果を示したグラフである。水位の上昇に伴い土柱底部の間隙水圧も上昇しており、実験結果と解析結果は同様の傾向を示している。ケース 4 は他のケースに比べ間隙水圧が大きく、ケース 1 からケース 3 は静水圧分布と比べかなり小さな値となっている。この結果は、

水位が同じ位置にあったとしても、基盤の排水性が大きいと間隙水圧は小さくなるということを示唆している。間隙水圧が盛土の安定性に与える影響を考えると、間隙水圧が低いケース 1 からケース 3 の方が、ケース 4 に比べ抵抗力が大きくより安定した状態であると考えられ、これは安定検討上留意すべき点である。

以上より、前述した雨量と水位の関係を踏まえると、基盤の飽和透水係数が低い等の排水しづらい条件の場合、水位が上がりやすいだけでなく、間隙水圧についても高い状態（静水圧に近い状態）にある。また、特に基盤と盛土の飽和透水係数の差が、水位や間隙水圧の差異に大きく影響するという結果となった。

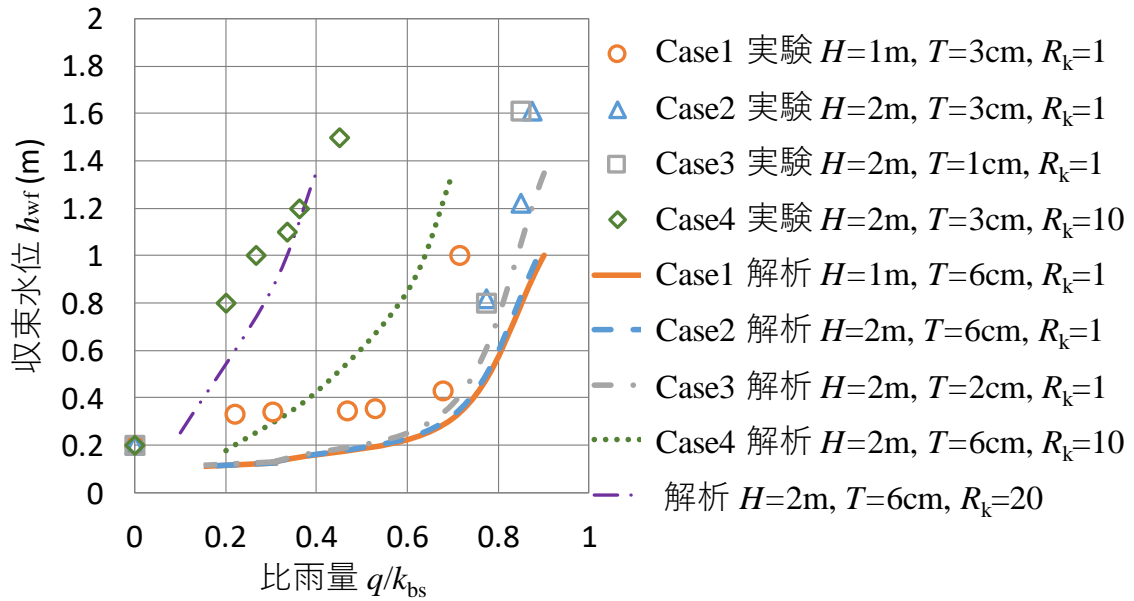


図 3-14 収束水位と比雨量の関係

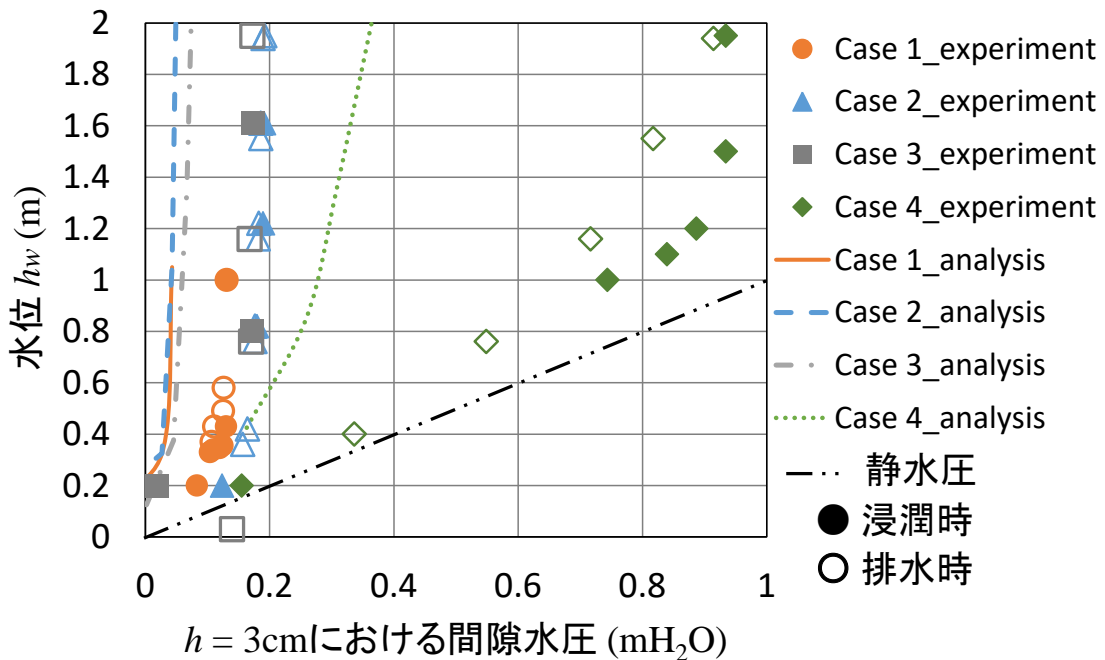


図 3-15 水位と土柱底部 (h=3cm) の間隙水圧の関係

3-6-5 降雨継続時間の影響

ここまでは、雨が連続して降るという条件で検討を行ってきたが、実際には一定の継続時間があり、この継続時間の長さや、その前の降雨履歴によっても盛土内の状態は変化する。そこで本研究では、前述した実験模型を用いて降雨の継続時間の影響についても検討した。

(1) 実験による評価手法

降雨の継続時間の影響を調べるために、本研究で用いてきた図 3-7 に示した模型を用いて実験を行った。透水係数等の材料特性は、表 3-1 に示すケース 4 の条件を用いた。表 3-3 に降雨条件を示す。

表 3-3 降雨条件

	継続時間 min	時間雨量 q	
		mm/h	m/s
Case A	40	83	2.3×10^{-5}
Case B	120	72	2.0×10^{-5}
Case C	連続	40	1.1×10^{-5}
		47	1.3×10^{-5}
		65	1.8×10^{-5}
Case D	120×2 インターバル 120分	72	2.0×10^{-5}

ケース A とケース B は継続時間を 40 分、120 分としてその後降雨を停止させるケース、ケース C は降雨を連続して与えたケースで、ケース D はインターバルをはさんで降雨を与えるケースとし、それぞれの条件における浸潤速度や水位変化の違いを確認した。なお、ケース C は、前述したケース 4 の実験結果であり、このケースのみ複数種類の雨量における実験結果が得られている。

(2) 実験結果

まず継続時間の異なるケース A, B, C について比較する。図 3-16 は土柱底部（基盤部との境界）からの水位及び浸潤面の到達高さ（以下、「浸潤到達位置」という）と時間との関係を示している。ここで、ケース C に

については、時間雨量 $q = 65 \text{ mm/h}$ ($1.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) の結果を示している。図 3-16 より、ケース C の水位は 130cm 程度まで上昇しているのに対し、ケース B は 40cm 程度、ケース A については水位上昇が確認されていない。つまり降雨の継続時間が短くなると、水位上昇量が低下することがわかる。

次に図 3-17 に比浸潤速度と比雨量の関係を示す。ここでケース A については、図 3-16 より降雨停止後浸潤速度が低下しているため、浸潤到達位置が 195cm から 116cm までの平均浸潤速度をケース A1、116cm から 36cm までの平均浸潤速度をケース A2 とした。この図より、ケース A1、B、C は雨量にほぼ比例して浸潤速度が増加しており、同一線上にプロットできる。これに対しケース A2 は、既に降雨が終了しており上部からの供給が止まっていることから、浸潤速度は他のケースよりも小さくなっている。

次に図 3-18 に比水位上昇速度と比雨量の関係を示す。同じ雨量条件で比較すると、ケース B はケース C に比べ水位上昇速度が小さいことがわかる。これらの結果から、水位上昇量や上昇速度、浸潤速度は降雨の継続時間の影響を受け、水位が上昇する前に降雨がやむと、連続降雨の場合と比べて水位上昇量や上昇速度、浸潤速度は低下することがわかる。これは、収束水位に到達する前の状態であり、第 2 章に記載した収束水位や水位上昇速度は、こういった継続雨量を考慮した場合には、同条件下における最大値を算出していると言える。

次にインターバルをはさんで降雨を与えたケース D について説明する。図 3-16 より、ケース D は一度水位が上昇した後、水位が下がりきる前に 2 回目の降雨が到達し、その後更に水位が上昇している。ここから、盛土内水位に対する先行降雨の影響はある程度持続しており、継続降雨時の収束水位を上限とし、その範囲内であれば水位はさらに上昇することが推定できる。次にケース D の 1 回目と 2 回目の浸潤速度及び水位上昇速度を比較する。図 3-18 より水位上昇速度は 1 回目と 2 回目であまり変化が無いが、図 3-17 より浸潤速度は 1 回目に比べて 2 回目の方が速い。これは水位より上の不飽和部分の状態の違いが浸潤速度に影響を与えていると考えられる。図 3-19 はケース D における 1 回目の降雨の直前($t = 0 \text{ min}$)と、2 回目の降雨の直前($t = 240 \text{ min}$)の鉛直方向の体積含水率分布を

示している。この分布を見ると、2回目の降雨前は1回目よりも体積含水率が高くなっており、その影響で透水性が高く、浸潤速度も大きくなったと考えられる。

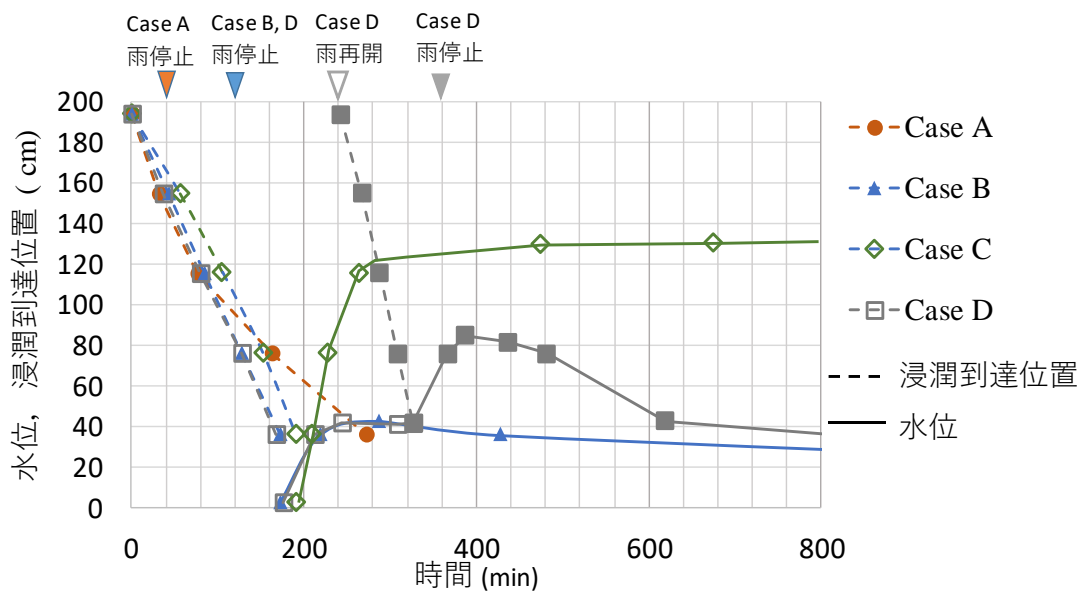


図 3-16 水位，浸潤到達位置の時間変化

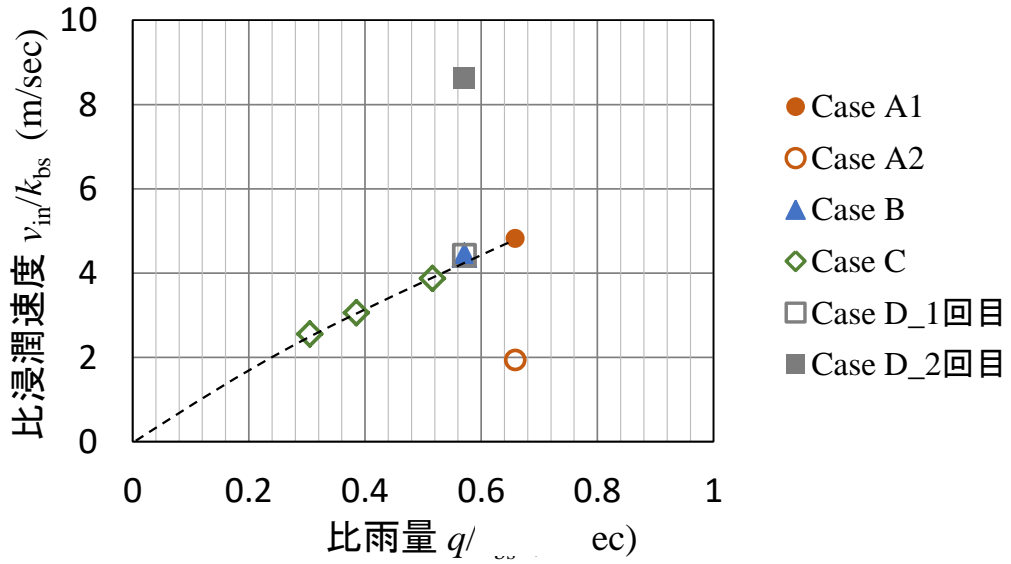


図 3-17 比浸潤速度と比雨量の関係

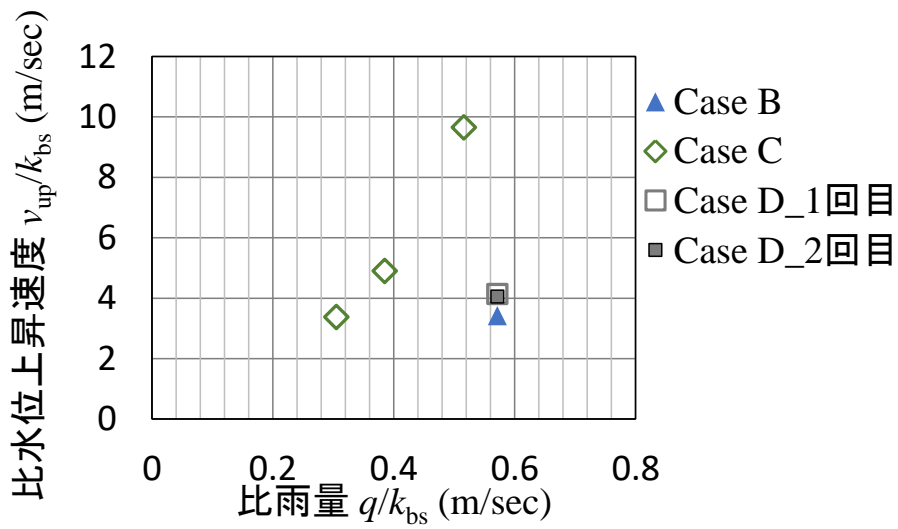


図 3-18 比水位上昇速度と比雨量の関係

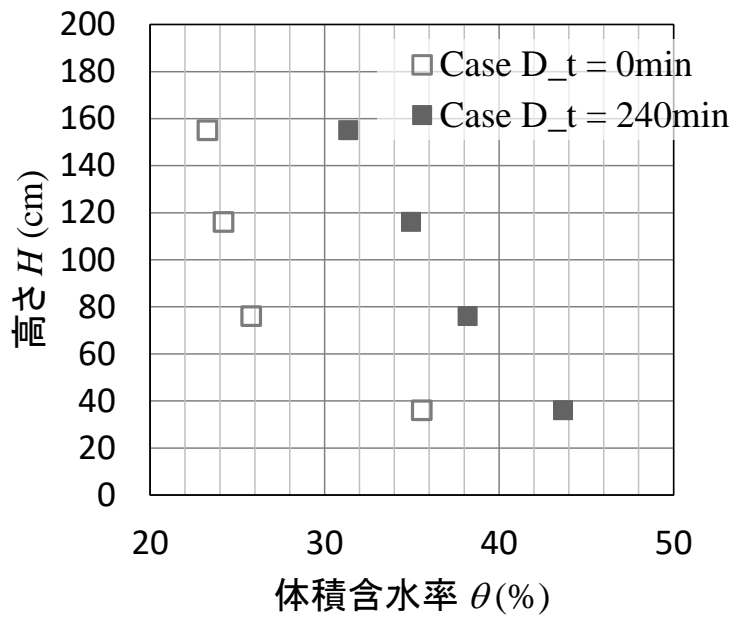


図 3-19 Case D の体積含水率分布

3-7 まとめ

本章では、盛土の透水性よりもその下部に位置する基盤部の透水性が低いといった透水性能に「差」がある場合、盛土内水位が高くなるという想定のもと、これを確かめるために、基礎地盤表面に水位が存在する平坦地盤上の盛土を想定して、基盤条件や雨量を変化させて、模型実験による検証を行った。また、模型実験では降雨継続時間の影響についても調べた。この結果、基礎地盤の透水性が低い場合、盛土内の収束水位及び水位上昇速度は大きくなり、水位低下速度は小さくなるという結果が得られ、想定していたように、このような条件の時に盛土内に水位が停滞しやすいことが示された。また、以下にこれに加えて得られた事項を示す。

- ・雨量の増加に伴い収束水位や水位上昇速度は上昇する。
- ・基盤の透水性が低い場合の方が、同じ水位であってもより盛土内間隙水圧が高くなるという傾向が模型実験から確認された。盛土の安定性に与える影響を考えると、間隙水圧が低い方が、抵抗力が大きくなり安定した状態であると考えられる。盛土内間隙水圧の静水圧からのずれは、安定検討上留意すべき点である。
- ・水位上昇量や上昇速度は降雨の継続時間の影響を受け、水位が上昇する前に降雨がやむと、連続降雨の場合と比べて水位上昇量や上昇速度は低下する。
- ・浸潤速度は降雨の継続時間の影響を受け、水位が上昇する前に降雨がやむと、連続降雨の場合と比べて浸潤速度は低下する。また、浸潤時点の飽和度が高い方が浸潤速度は大きくなる。
- ・盛土内水位上昇に対する先行降雨の影響はある程度持続し、一度水位や含水比が上昇した後、含水比や水位が下がりきっていない状況で再度雨が降ると、浸潤速度は初めの浸潤に比べて大きくなり、水位は継続降雨時の収束水位を上限とし、さらに上昇する。

参考文献

- 1) 安部哲生, 新井寿和, 藤岡一頼, 塚本正康, 濱田泰治, 三島信雄: 砕石豎排水工の対策効果について—その2: 遠心力模型実験—, 第50回地盤工学研究発表会講演集, pp.1101-1102, 2015.

第4章 盛土内水位上昇の評価方法の提案

4-1 はじめに

第2章及び第3章では盛土及び基礎地盤の形状や透水係数に着目し、浸透流解析や模型実験により、盛土内の水位上昇について検討を行ってきた。ここでは、これまでの検討から得られた関係を基にした水位上昇速度や水位上昇量の評価方法について示すとともに、実際に想定される降雨特性を考慮した時の水位上昇との関係について示す。

4-2 水位上昇速度と透水係数及び雨量との関係

第2章式2-10に透水係数や雨量と水位上昇速度の関係を示したが、これを基に盛土内水位上昇の評価方法について検討する。式4-1に、式2-10に表面流出及び透水係数による流入の上限を考慮して記載しなおした式を示す。

$$v_{\text{up}}/k_{\text{bs}} = m_2 \times (q'/k_{\text{bs}})^2 \quad (4-1)$$
$$q' < k_{\text{bs}} \text{ のとき, } q' = 0.6q$$
$$q' \geq k_{\text{bs}} \text{ のとき, } q' = k_{\text{bs}}$$

ここで、盛土内に流入する水の量を有効雨量 q' としている。有効雨量は雨量から表面を流出する分を差し引いた値と考えられ、流出する割合はいくつかの算定事例^{1,2)}があるが、表面の被覆や勾配などの条件によって変化する。本検討では道路盛土で一般的な植生で覆われたのり面における流出割合を想定し、時間雨量 q を0.6倍した値を有効雨量 q' として計算に用いるものとする¹⁾。また、飽和透水係数より流入量が大きくなることはないので、 $0.6q > k_{\text{bs}}$ の場合、有効雨量と盛土の飽和透水係数は等しく $q' = k_{\text{bs}}$ となると考えられる。

また、 m_2 と盛土の高さ H と基盤の厚さ T の比（以下、基盤厚さ比 H/T という）及び盛土の飽和透水係数 k_{bs} と基盤の飽和透水係数 k_{bf} の比 R_k には、図2-33のような関係があることが浸透流解析により確認されており、

m_2 は 10^2 から 10^3 程度の値をとる．底部の透水性が低く，水が抜けづらい条件の時に m_2 は大きくなり，水位上昇速度は増加する．

式 4-1 に基づいて計算した，時間雨量と水位上昇速度の関係を図 4-1 に示す．なお，図 4-1 では $m_2 = 100$ としているが， m_2 が 2 倍，3 倍となれば，式 2 より，水位上昇速度も 2 倍，3 倍に増加する．図 4-1 より，時間雨量が小さい図の左側では，盛土の飽和透水係数が小さい方が，盛土の飽和透水係数が大きい場合よりも水位上昇速度が大きい．これは式 1 で盛土の飽和透水係数 k_{bs} が右辺の分母にあることから想定できる．これに対し，時間雨量が増加し値が盛土の飽和透水係数を超えると，水位上昇速度は時間雨量によらず一定値となる．そのため時間雨量が大きい図の右側では，透水係数が大きい方が，透水係数が小さい場合よりも水位上昇速度が大きくなっていく．ここから，盛土の飽和透水係数によって，水位上昇に大きな影響を与える降雨条件が異なることがわかる．また，図 4-1 に示す上限値は有効雨量と飽和透水係数が等しい $0.6q = k_{bs}$ の場合の値であり，計算上，水位上昇速度がこの線を超えることはない．

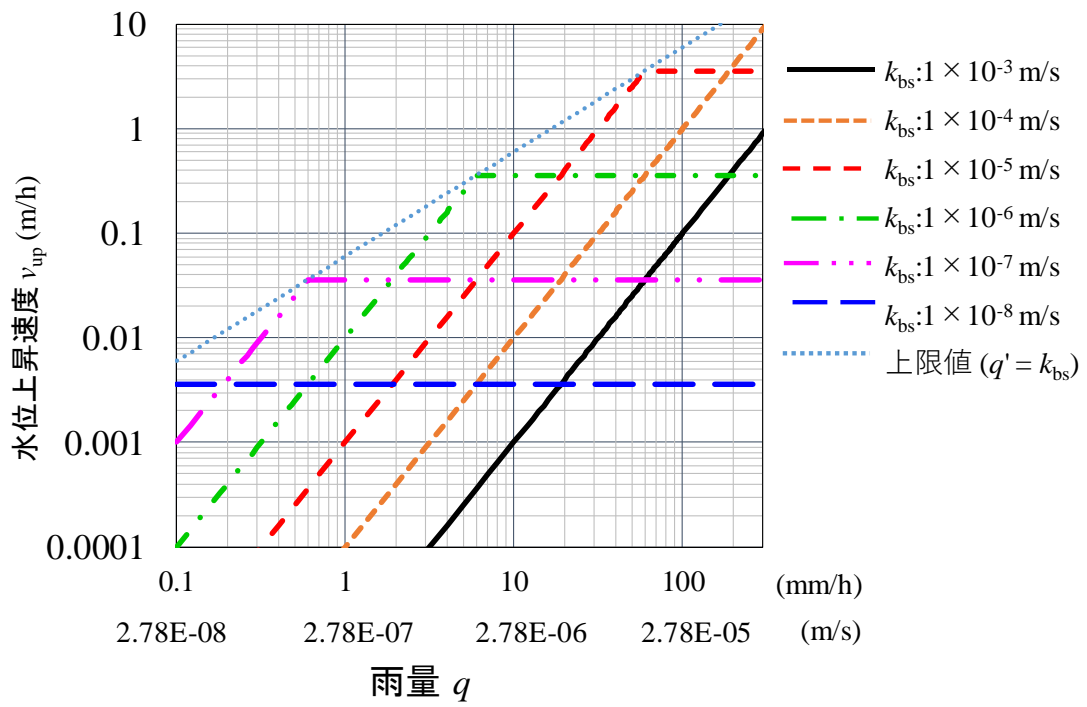


図 4-1 時間雨量と水位上昇速度の関係 ($m_2 = 100$)

4-3 水位上昇量と透水係数及び雨量との関係

降雨の継続時間を t とし、水位上昇量を h_{up} とすると、式 4-1 より水位上昇量は以下の式で表すことができる。

$$h_{up} = v_{up} \times (t - t_{in}) = m_2 \frac{q'^2}{k_{bs}} \times (t - t_{in}) \quad (4-2)$$

ここで、 t_{in} は降雨が降り始めてから雨が浸潤し水位が上昇開始するまでの時間（以下、降雨到達時間という）である。この式のうち、 m_2 は盛土と基盤の厚さの比率 H/T 及び盛土と基盤の飽和透水係数の比率 R_k によって定められる係数であり、基盤の影響を示す係数とも言うことができる。よって式 4-2 は、水位上昇速度は①盛土に対する基盤の影響、②盛土の飽和透水係数、③降雨強度、④継続時間からなる関数によって表すことができるという内容を意味している。（式 4-3）

$$h_{up} = m_2 \frac{q'^2}{k_{bs}} \times (t - t_{in}) = f(m_2, k_{bs}, q', t) \quad (4-3)$$

また、統計的に雨量と継続時間には関係性があり、短期の降雨のほうが時間当たりの雨量が大きくなる確率が高く、長時間降雨になると、時間当たりの雨量は小さくなる傾向がある。この関係について、いくつかの評価方法が考案されているが^{2,3,4)}、道路における排水施設の設計では、Talbot 式⁴⁾が用いられている。Talbot 式を用いて時間雨量を計算すると、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} q &= (60 + b)/(t + b) \times q_0 \\ b &= (60 - 10\beta)/(\beta - 1) \end{aligned} \quad (4-4)$$

ここで、 q_0 は 1 時間当たりの確率降雨強度で、 β は地域特性を示す係数である。ここで、式 4-4 は、係数 b 及び継続時間 t の単位を(分)とした時の式である。

図 4-2 に式 4-4 で計算した再現確率を 10 年とした場合の代表的な地域の継続時間と時間雨量の関係を示す。表 1 に計算に用いた 1 時間確率降雨度と特性係数の一覧を示す。式 4-3 の形からも、継続時間に反比例して時間雨量が小さくなることがわかる。この関係を用いて、降雨と水位上昇量について整理する。

式 4-4 を式 4-3 に代入した式を式 4-5 に示す。なお、簡略化のため降雨到達時間 $t_{in} = 0$ としている。

$$h_{up} = f(m_2, k_{bs}, q', t) = \frac{m_2}{k_{bs}} \left\{ \left(\frac{60+b}{t+b} \right) 0.6q_0 \right\}^2 t \quad (4-5)$$

この式を用いて高知と東京の降雨特性を基に継続時間と水位上昇量の関係について算出した結果を図 4-3 に、盛土の飽和透水係数と水位上昇量の関係を図 4-4 に示す。また、 $m_2 = 100$ としている。図 4-3、図 4-4 を見ると、継続時間によって降雨強度が変化するため、飽和透水係数が大きい場合は継続時間が短い（降雨強度が大きい）場合に水位が上昇しやすく、飽和透水係数が小さい場合は継続時間が長い時に水位上昇量が大きくなっている。また、飽和透水係数が等しい場合は、高知、東京とも飽和透水係数が時間雨量より小さい範囲では上昇量は等しく、水位上昇量の最大値は時間雨量の大きい高知の方が大きくなっている。また、図 4-4 より有効雨量と飽和透水係数が等しい時に水位上昇量は極大値を示している。また、飽和透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ の場合、水位上昇量は最大 1m 程度で、それ以上水位は上昇しない。よって透水性がある程度高い（ $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 程度より高い）盛土の場合は、大きく水位が上昇することはないと考えられる。

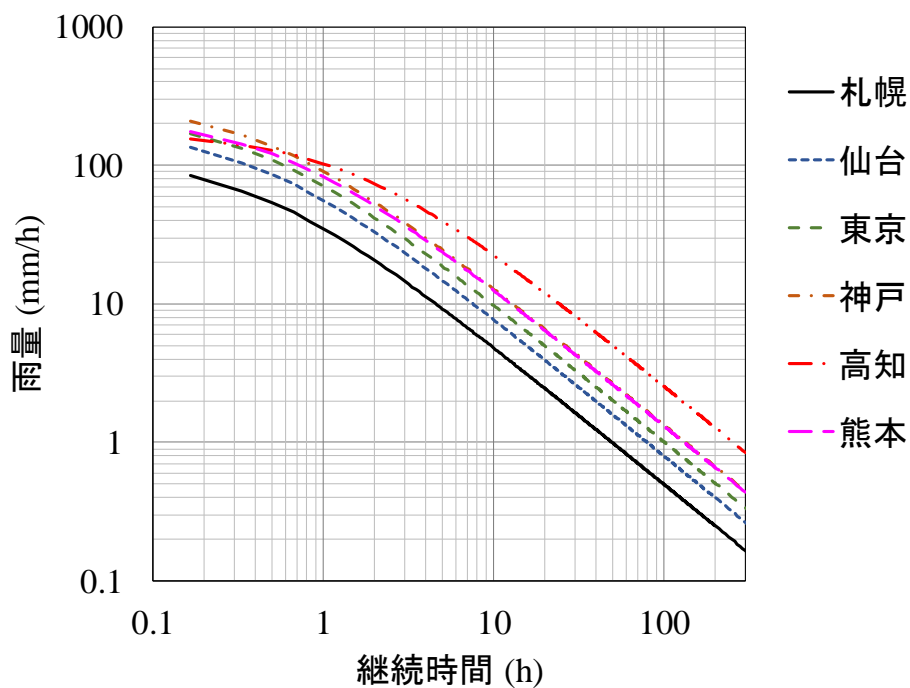


図 4-2 Talbot 式による時間雨量と継続時間の関係

表 4-1 各地の 1 時間確率雨量と特性係数³⁾

地区名	1 時間確率雨量 q_0 再現期間 10 年 mm/h	β	b
札幌	35	2.4	25.7
仙台	56	2.4	25.7
東京	71	2.4	25.7
神戸	91	2.3	28.5
高知	103	1.5	90.0
熊本	83	2.1	35.5

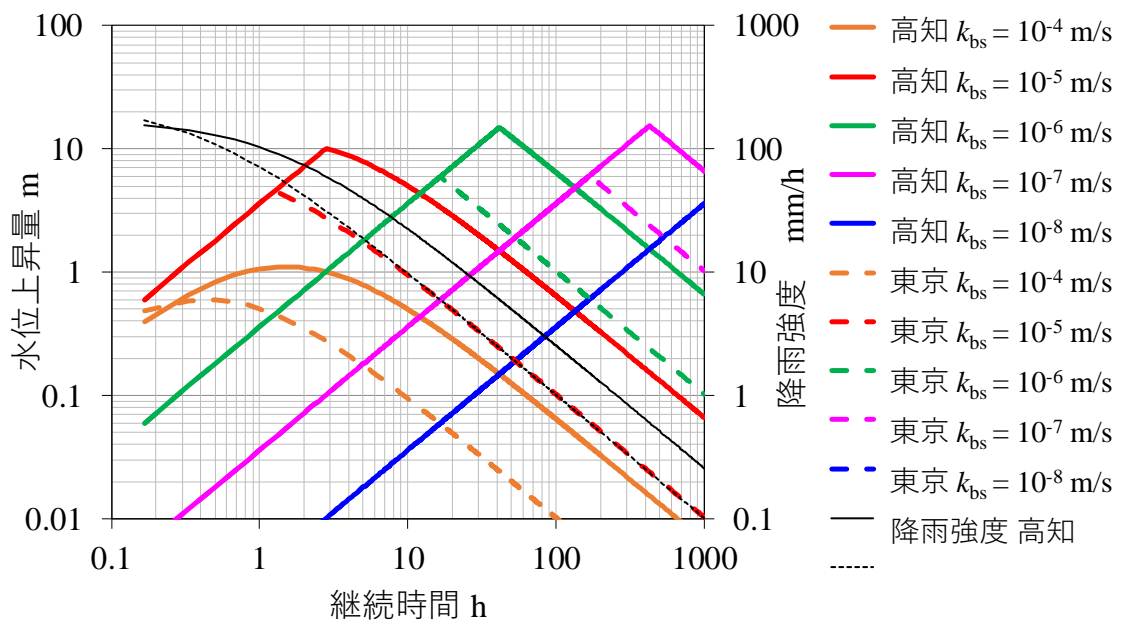


図 4-3 継続時間と水位上昇量の関係（高知，東京）

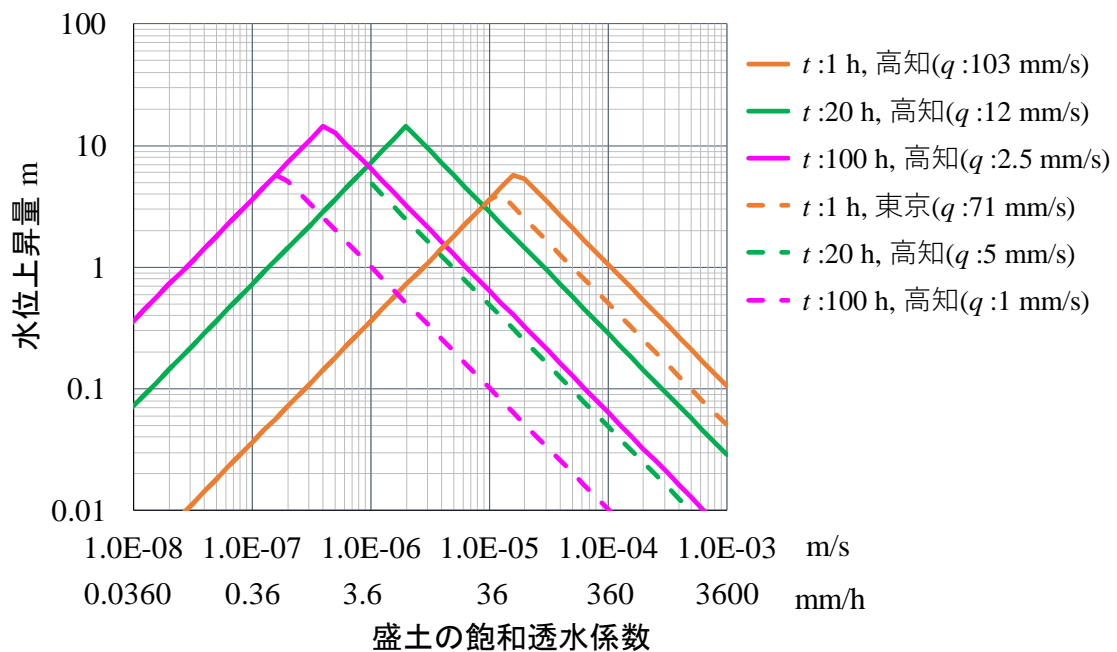


図 4-4 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の関係（高知，東京）

4-4 盛土内の水位上昇の評価方法の提案

次に、それぞれの地域の降雨特性に対する盛土の水位上昇可能性の評価方法について検討する。図 4-1 や図 4-3 から、水位上昇しづらい条件としては、盛土の飽和透水係数がかなり大きく排水量が多いため水位上昇しづらいケースと、透水係数がかなり小さく水位上昇速度が遅いため水位上昇しづらいケースの二通りが考えられる。ここで、先ほど示した式 4-5 を基に、水位上昇しやすい盛土の飽和透水係数の範囲について考察する。

(1) 透水係数の上限値

式 4-5 を書き換えると、水位上昇量は以下のように表すことができる。

$$h_{up} = \frac{m_2}{k_{bs}} \left\{ \left(\frac{60+b}{t+b} \right) 0.6q_0 \right\}^2 t = m_2 \frac{(0.6\gamma_0)^2}{k_{bs}} \left\{ -b \left(\frac{60+b}{t+b} - \frac{60+b}{2b} \right)^2 + \frac{(60+b)^2}{4b} \right\} \quad (4-6)$$

式 4-6 では、盛土の飽和透水係数が有効雨量よりも大きい場合は、 $t = b$ の時に水位上昇量が最大になる。図 4-5 は東京における $t = b$ の場合の飽和透水係数と水位上昇量の最大値との関係を示している。ここでは、基盤厚さ比は基盤厚さ T が十分に大きい値 ($H/T = 0.07$) で固定値とし、基盤透水係数比 R_k を変化させて計算した結果を示す。ここで、例として水位上昇量の許容値を 3m とすると、 $R_k = 1 (m_2 = 100)$ の場合（盛土と基盤の飽和透水係数が等しく、相対的に水位が上昇しづらい条件）、盛土の飽和透水係数 $k_{bs} = 2 \times 10^{-5}$ m/s、 $R_k = 1000 (m_2 = 790)$ の場合（盛土に対し基盤の飽和透水係数が低く、相対的に水位が上昇しやすい条件）は盛土の飽和透水係数 $k_{bs} = 1.6 \times 10^{-4}$ m/s よりも透水係数が大きいと水位は 3m 以下となる。この許容値と盛土の飽和透水係数との関係について整理したものを表 4-2 に示す。このように水位上昇量の許容値を設定することで、その盛土の水位上昇について評価することができる。

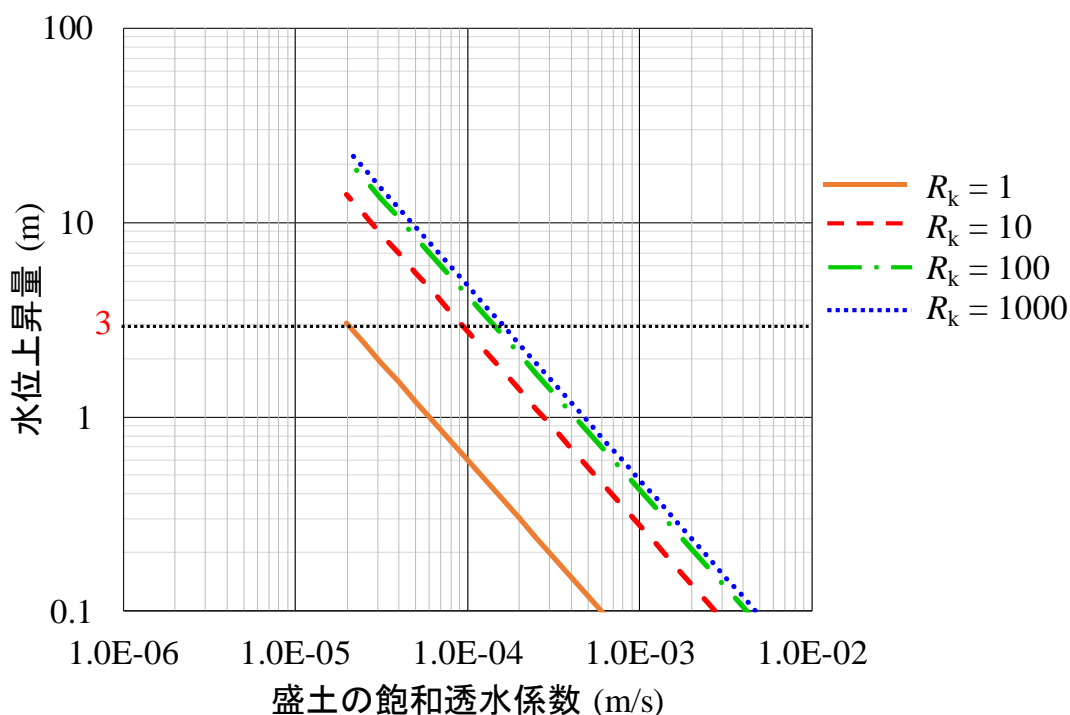


図 4-5 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の関係 ($t = b, q' < k_{bs}$, 東京の場合)

表 4-2 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の許容値との関係(透水係数の上限)(降雨特性:東京, 水位上昇量の許容値:3mの場合)

盛土の飽和透水係数 (m/s)	水位上昇量
$k_{bs} < 2.0 \times 10^{-5}$	3m 以上 (許容値以上)
$2.0 \times 10^{-5} < k_{bs} < 1.6 \times 10^{-4}$	基盤条件による
$1.6 \times 10^{-4} < k_{bs}$	3m 未満 (許容値内)

(2) 透水係数の下限値

盛土の飽和透水係数が有効降雨よりも小さい場合、 $q' = k_{bs}$ なので、水位上昇量は式 4-2 より式 4-7 のように表すことができる。

$$h_{up} = m_2 k_{bs} t_{max} \quad (4-7)$$

ここで、 t_{max} は最大継続時間である。盛土の飽和透水係数の下限値の算定のためにこの降雨の最大継続時間を設定する必要があるが、竹下ら⁵⁾によると、過去 30 年間（1976 年から 1985 年、2003 年から 2012 年まで）のアメダスの全国観測データによると、降雨の最大継続時間は 40 から 160 時間程度となっている。このデータを参考に式 4-7 における継続時間 40 時間、160 時間の場合の盛土の飽和透水係数と水位上昇量の最大値との関係を図 4-6 に示す。前述したのと同様に水位上昇量の許容値を 3m とすると、継続時間 $t_{max} = 40$ 時間の場合、 $R_k = 1$ ($m_2 = 100$)では、盛土の飽和透水係数 $k_{bs} = 2.1 \times 10^{-7}$ m/s、 $R_k = 1000$ ($m_2 = 790$)では盛土の飽和透水係数 $k_{bs} = 2.6 \times 10^{-8}$ m/s よりも透水係数が小さければ、水位は許容値の 3m 以下となる。この許容値と盛土の飽和透水係数との関係について整理したものを表 4-3 に示す。

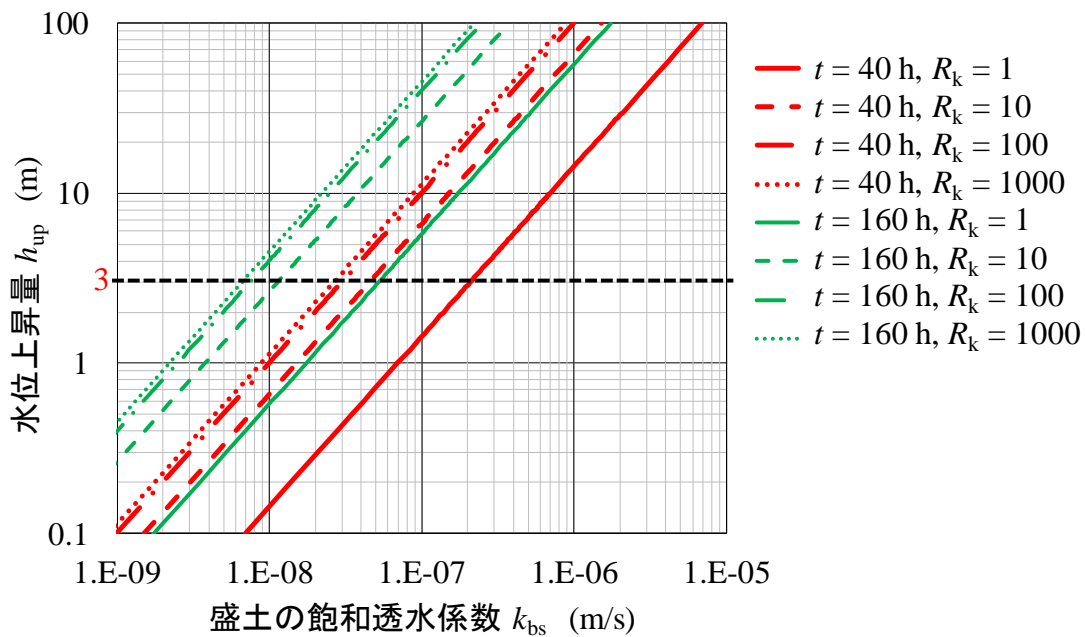


図 4-6 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の関係 ($q' > k_{bs}$ の場合)

表 4-3 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の許容値との関係(透水係数の下限)(降雨特性：東京，継続時間：40 時間，160 時間，水位上昇量の許容値：3m の場合)

継続時間 (h)	盛土の飽和透水係数 (m/s)	水位上昇量
40	$k_{bs} < 2.6 \times 10^{-8}$	3m 未満 (許容値内)
	$2.6 \times 10^{-8} < k_{bs} < 2.1 \times 10^{-7}$	基盤条件による
	$2.1 \times 10^{-7} < k_{bs}$	3m 以上 (許容値以上)
160	$k_{bs} < 6.6 \times 10^{-9}$	3m 未満 (許容値内)
	$6.6 \times 10^{-9} < k_{bs} < 5.2 \times 10^{-8}$	基盤条件による
	$5.2 \times 10^{-8} < k_{bs}$	3m 以上 (許容値以上)

(3) 透水係数の上限値と下限値の間における水位上昇量

継続時間が $b < t < t_{\max}$ の場合、「4-3 水位上昇量と透水係数及び雨量との関係」でも述べたように有効雨量 q' と盛土の飽和透水係数 k_{bs} が等しい時に水位上昇量が最大になると考えられる。そのため、式 4-4 から、 $q' = k_{bs}$ となる継続時間 t を求めると、水位上昇量は以下の通りとなる。

$$h_{up} = m_2 k_{bs} t \quad (4-8)$$

$$t = \frac{0.6\gamma_0}{k_{bs}} (60 + b) - b$$

(4) 水位上昇量の許容値の設定

以上の内容を踏まえて図 4-7 に、東京の降雨特性で最大継続時間 160 時間の場合の盛土の飽和透水係数と水位上昇量の最大値の関係を示す。水位上昇量の許容値を 3m とすると、図の 3m を上回る範囲が許容値を超過する可能性のある透水係数の範囲と考えることができる。

また、図 4-8 はそれぞれの飽和透水係数に関して、図 4-7 に示す水位上昇量が最大値を示す時の継続時間と時間雨量の条件についてあわせて示した図である。この図から、それぞれの飽和透水係数に対し、どういった降雨条件の時に水位上昇量が最大になるかが確認できる。例えば図 4-8 を見ると、 $R_k=1$ の場合で、盛土の飽和透水係数が $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合は継続時間 82 時間、時間雨量 0.6mm/h の条件で水位上昇量が最大値を示し、その最大値は 6m となることがわかる。また、盛土の飽和透水係数が $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の場合は継続時間が 0.4 時間、時間雨量 58mm/h の条件で水位上昇量が最大値を示し、その最大値は約 5m となっており、水位上昇量の最大値は近い値を示しているが、その時の降雨条件は盛土の飽和透水係数により大きく異なることがわかる。図 4-9 は透水係数と対応する土の種類⁶⁾を示している。

また、図 4-10 は図 4-8 に示した東京の降雨特性で降雨の継続時間 160 時間とした場合と、札幌の降雨特性で降雨の継続時間を 40 時間と場合の水位上昇量の最大値を示している。東京の場合と比べると、全体的に水位上昇量が小さく、許容値を超過する飽和透水係数の範囲も狭くなっていることがわかる。このように地域特性によっても盛土内水位の上昇可

能性は変化することがわかる。

このように降雨条件と許容水位上昇量を設定すれば、水位が許容値を超えて上昇する可能性のある盛土を選別することができる。なお、今回は保水性の違いや降雨到達時間の影響などを考慮していないが、飽和透水係数をベースに整理するという基本的な考え方については変わらないので、傾向が変わるようなことはないと考えられる。

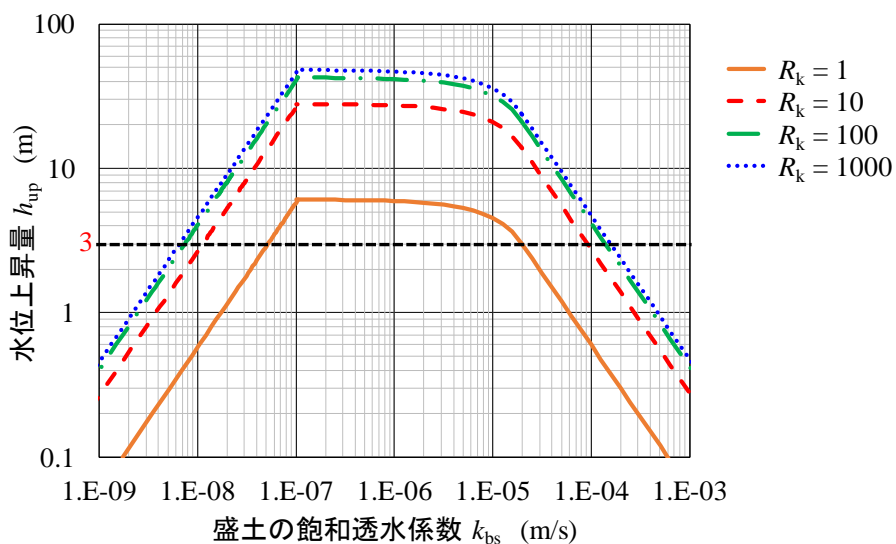


図 4-7 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の最大値の関係（東京の降雨特性，最大継続時間：160 時間）

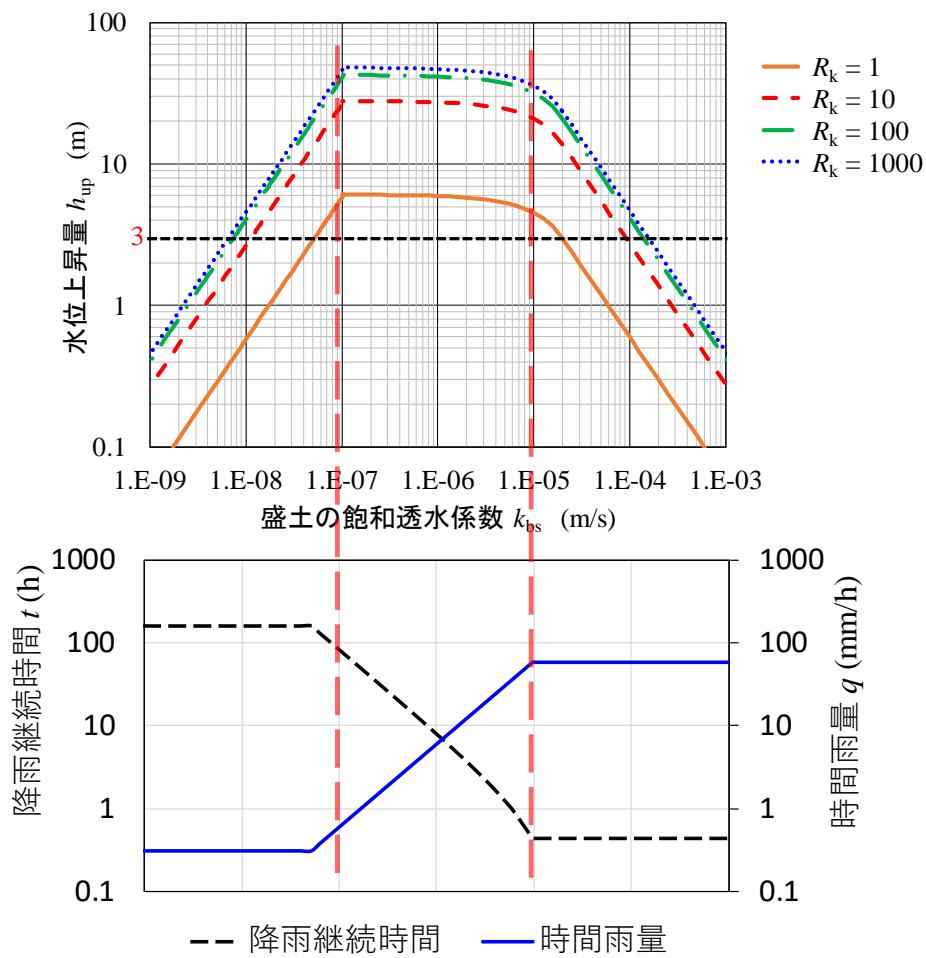
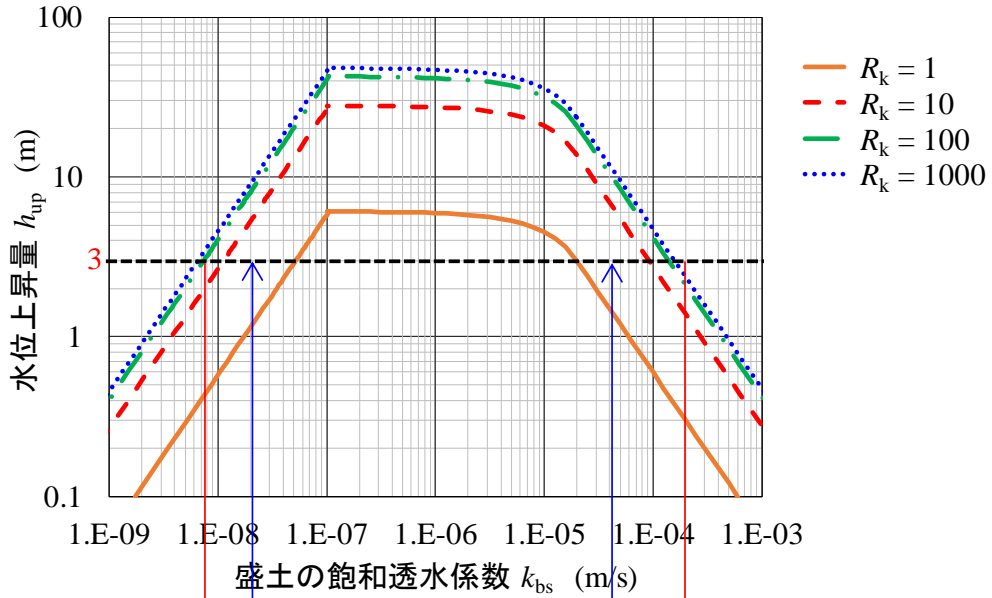


図 4-8 図 4-7 の水位上昇最大条件における盛土の飽和透水係数と継続時間 t と時間雨量 q の関係

透水性	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰
	実質上不透水		非常に低い		低い		中位			高い		(m/s)
対応する土の種類	粘性土 (C)		微細砂, シルト, 砂-シルト-粘土混合土 (SF) (S-P) (M)			砂及びれき (GW) (GP) (SW) (SP) (G-F)			清浄なれき (GW) (GP)			

図 4-9 透水係数と対応する土の種類⁶⁾

・降雨特性：東京，最大継続時間：160時間



・降雨特性：札幌，最大継続時間：40時間

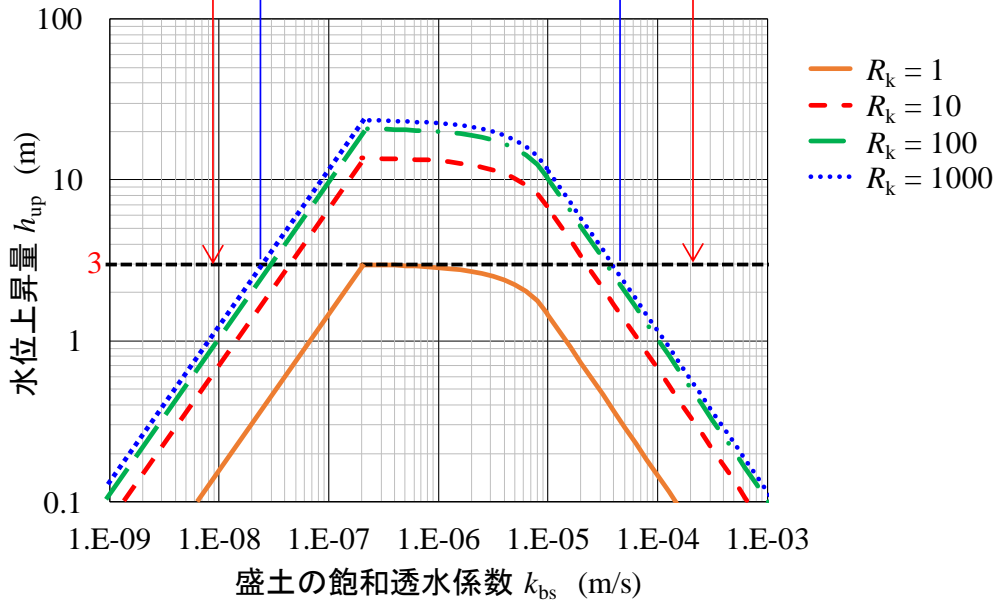


図 4-10 盛土の飽和透水係数と水位上昇量の最大値の関係の比較（上図 降雨特性：東京，最大継続時間：160 時間，下図 降雨特性：札幌，最大継続時間：40 時間）

4-5 まとめ

本章では，盛土内水位が上昇しやすい盛土かどうかを推定することを目的とし，第 2 章で導出した推定式と国内の降雨特性を踏まえて，実際の道路盛土における盛土内水位上昇量の推定方法の提案を行った．また，この手法を用いて，特定の地域の降雨特性と盛土の許容水位を設定することで，要注意個所を選定する手法についても提案を行った．その結果，以下の結論を得た．

- ・ 第 2 章で提案した水位上昇速度の推定式と，Talbot 式により整理した継続時間と時間雨量の関係を用いて，盛土内水位上昇量の推定方法を提案した．
- ・ 推定式から，盛土の飽和透水係数が小さい場合には継続時間が長い時に水位が上昇しやすく，透水係数が大きい場合は継続時間が短く降雨強度が強い場合に水位上昇量が大きくなっており，透水係数によって影響を受ける降雨条件が異なることが確認された．
- ・ ある程度以上に盛土の飽和透水係数が高いと国内で想定される降雨では盛土内の水位はほとんど上昇しなくなることを確認した．
- ・ 前述した盛土内水上昇量の推定方法を基に，特定の地域の降雨特性と盛土の許容水位を設定することで，要注意個所に該当する盛土の飽和透水係数を推定する方法を提案した．

参考文献

- 1) 国土交通省告示第 521 号：流出雨水量の最大値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示，2004.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路土工要綱，pp.134, 2009.
- 3) 高速道路総合技術研究所：設計要領第一集 土工保全編・土工建設編 平成 28 年 8 月版，2016.
- 4) 岩井重久，石黒正儀：応用水文統計学，森北出版，1970.
- 5) 竹下清，斎藤源，高橋定雄：近年の降雨特性の分析，水資源地球環境技術研究所所報，pp. 21-27，2014.
- 6) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 515-530, 2010.

第5章 実盛土における水位観測結果と推定値の比較

5-1 はじめに

次にこれまで述べてきた盛土内水位上昇の評価方法について、実盛土における水位観測結果との比較を行った。

5-2 対象地点と対象個所の透水係数の設定

雨量や降雨継続時間や盛土の透水特性と、水位上昇との関係について、これまで述べてきた評価手法を実際の道路盛土における水位観測データに当てはめて検証を行った。観測データは実際の高速道路盛土ののり肩に水位観測孔を設置し、継続的に水位観測を実施した結果を用いている。表 5-1 に対象個所の盛土高さ、ボーリング No, 飽和透水係数を示す。また、図 5-1 から図 5-5 に対象個所のボーリング位置を示す。滋賀については同じ盛土においてボーリング孔が 3 か所設置されている。なお、飽和透水係数に記載されている番号は試験方法を示しており、①は現場における「JGS1311 ボーリング孔を利用した砂質・礫質地盤の地下水位測定方法¹⁾」により求めた値、②は室内試験「JGS0311 土の透水試験方法²⁾」により求めた値、①'は水位観測中の水位低下の履歴を基に①と同様の方法で求めた値である。

飽和透水係数については、今回は実際の盛土の状況の評価するため、現場透水試験により求めた値を用いることが適当であると考え、現場透水試験を実施していない箇所については室内試験の結果を用いた。透水試験は現場試験、室内試験、粒度による推定などの導出方法があるが、現場透水試験は値が他の方法に比べ大きくなりやすいなど³⁾、それぞれ傾向があると考えられるため確認を行った。図 5-6 は栃木 A, 栃木 B, 茨城地区における室内透水試験結果と、Creager の方法による粒度による推定値⁴⁾を比較したもので、図 5-7 は同様に現場透水試験と、室内試験及び Creager の方法による推定値を比較したものである。図 5-6 より飽和透水係数が 10^{-5} m/s 程度よりも大きい栃木 A, 栃木 B の結果では Creager の方法で求めた値に対し、室内試験結果の方が小さい傾向にある。また、飽和

透水係数が 10^{-7}m/s 程度よりも小さい茨城 A の結果を見ると室内試験結果の方が大きい傾向にある。既往の研究事例では同様の傾向を示しているものもあるが⁵⁾、土質によっても結果は異なる可能性があると考えられる。また、図 5-7 より、現場透水試験は粒度による推定方法の 10 倍程度、室内試験結果の 10^2 倍程度の値を示している。現場透水試験は他の方法に比べ 0~3 オーダー程度高いという事例もあり⁶⁾、傾向としては一般に考えられている傾向に近い結果であると考えられる。本検討では飽和透水係数が 10^{-7}m/s 程度より低い範囲で現場透水試験の結果がない場合があったため、その場合は室内試験結果を採用することとした。

表 5-1 水位観測個所の諸元

対象盛土	盛土高さ (m)	ボーリング No.	飽和透水係数 (m/s)	
			盛土	基盤
栃木 A	7	1	5.46×10^{-5} ①	2.26×10^{-7} ②
栃木 B	7	2	8.61×10^{-4} ①	8.34×10^{-6} ①
茨城	8	3	4.38×10^{-8} ②	-
群馬	18	4	5.35×10^{-7} ①'	-
滋賀	8	5	3.00×10^{-7} ①'	-
		6	1.19×10^{-7} ①'	-
		7	1.52×10^{-7} ①'	-

栃木 A ボーリング位置

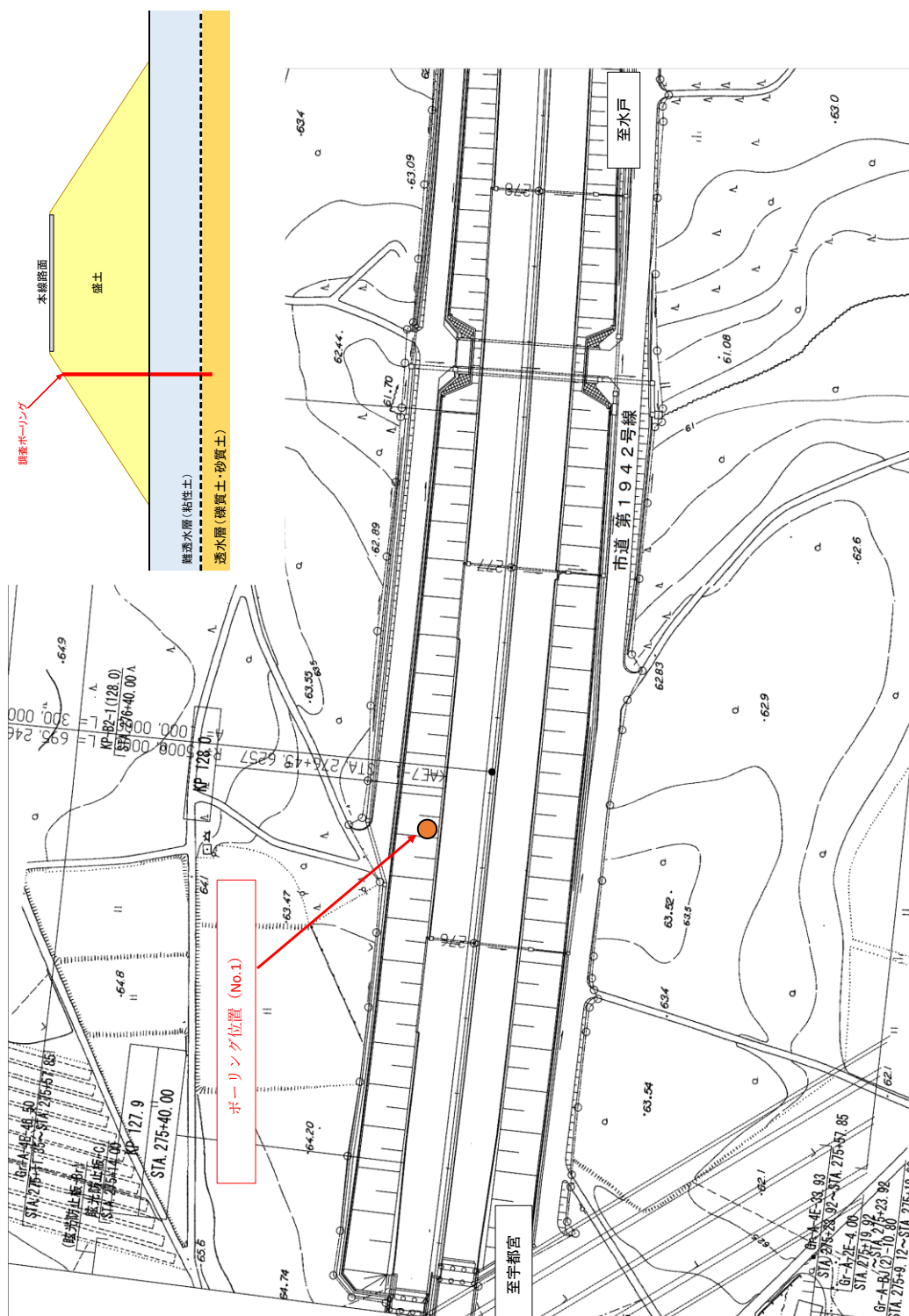


図 5-1 栃木 A(ボーリング No. 1)平面図, 横断図

栃木 B ボーリング位置

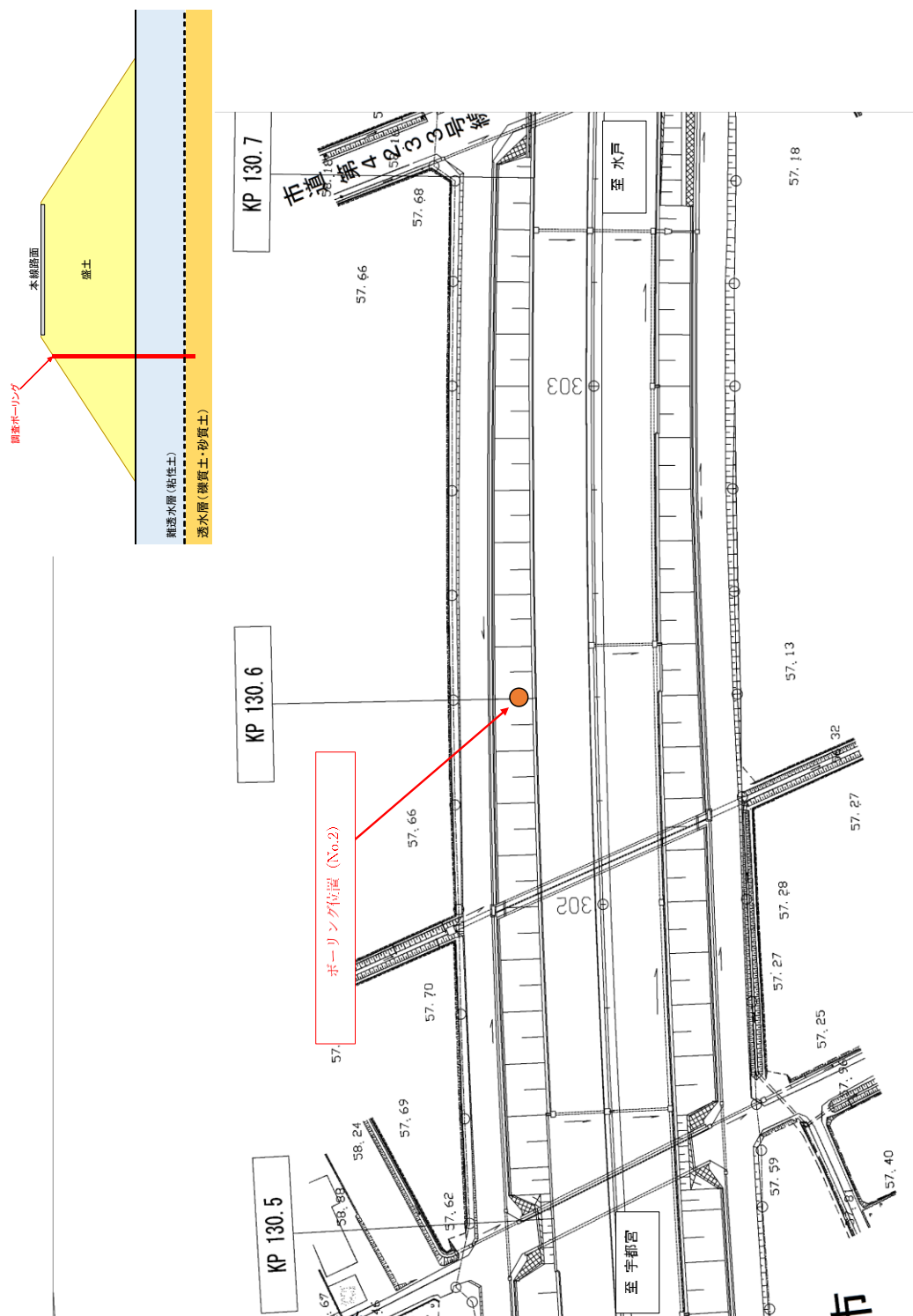


図 5-2 栃木 B(ボーリング No. 2) 平面図, 横断図

茨城 ボーリング位置

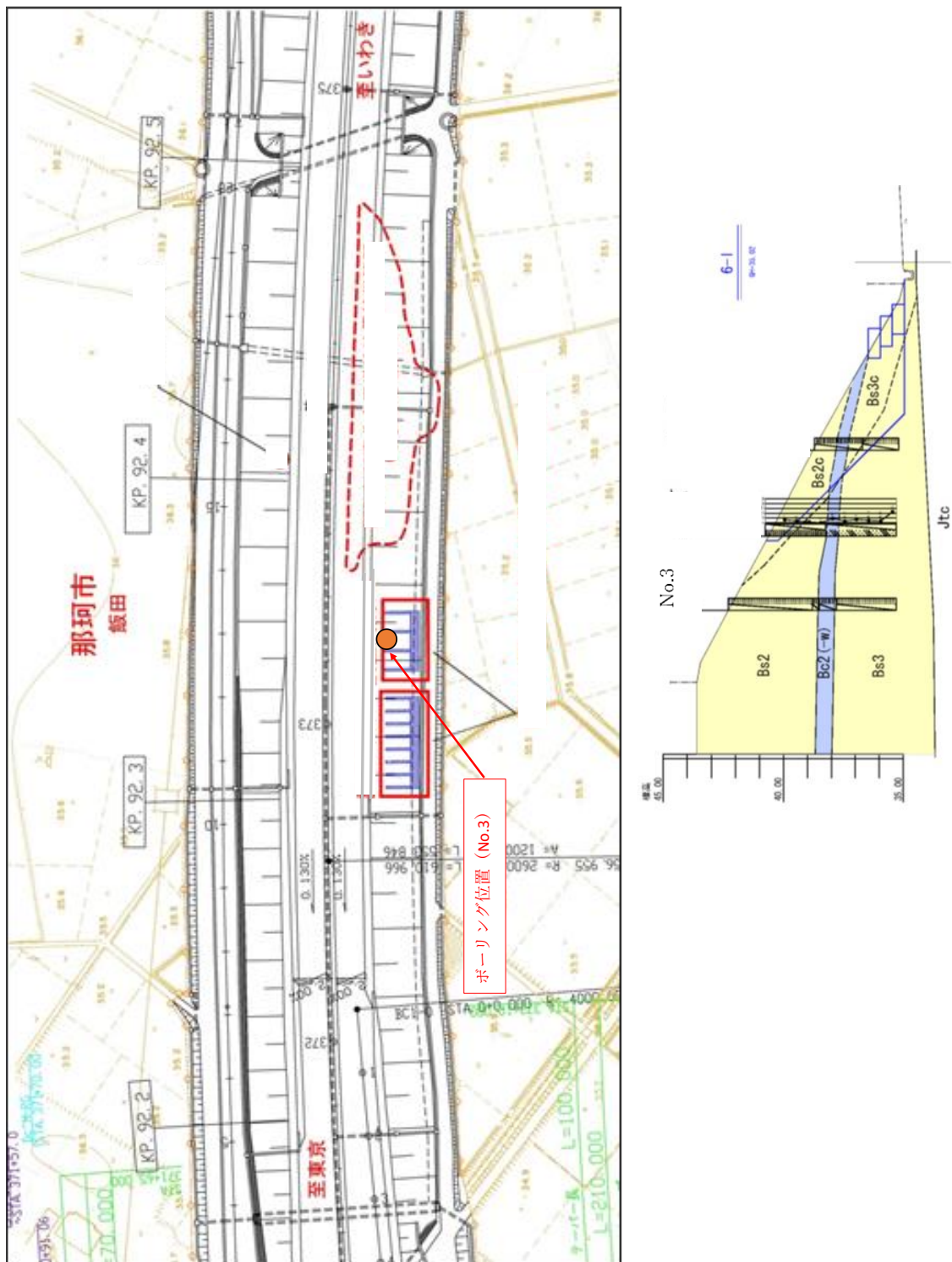


図 5-3 茨城(ボーリング No. 3)平面図, 横断図

群馬 ボーリング位置

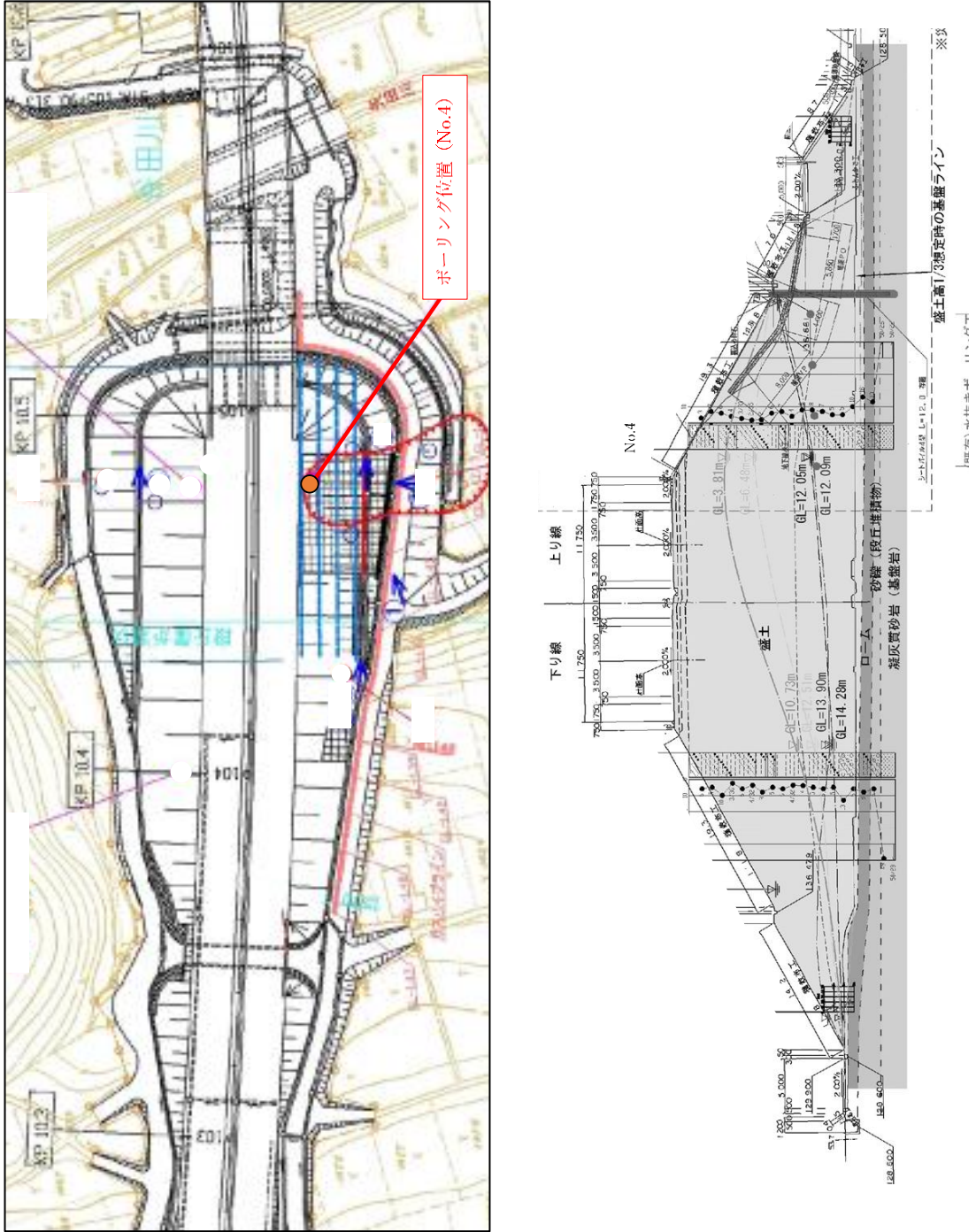


図 5-4 群馬(ボーリング No. 4) 平面図, 横断図

滋賀 ボーリング位置

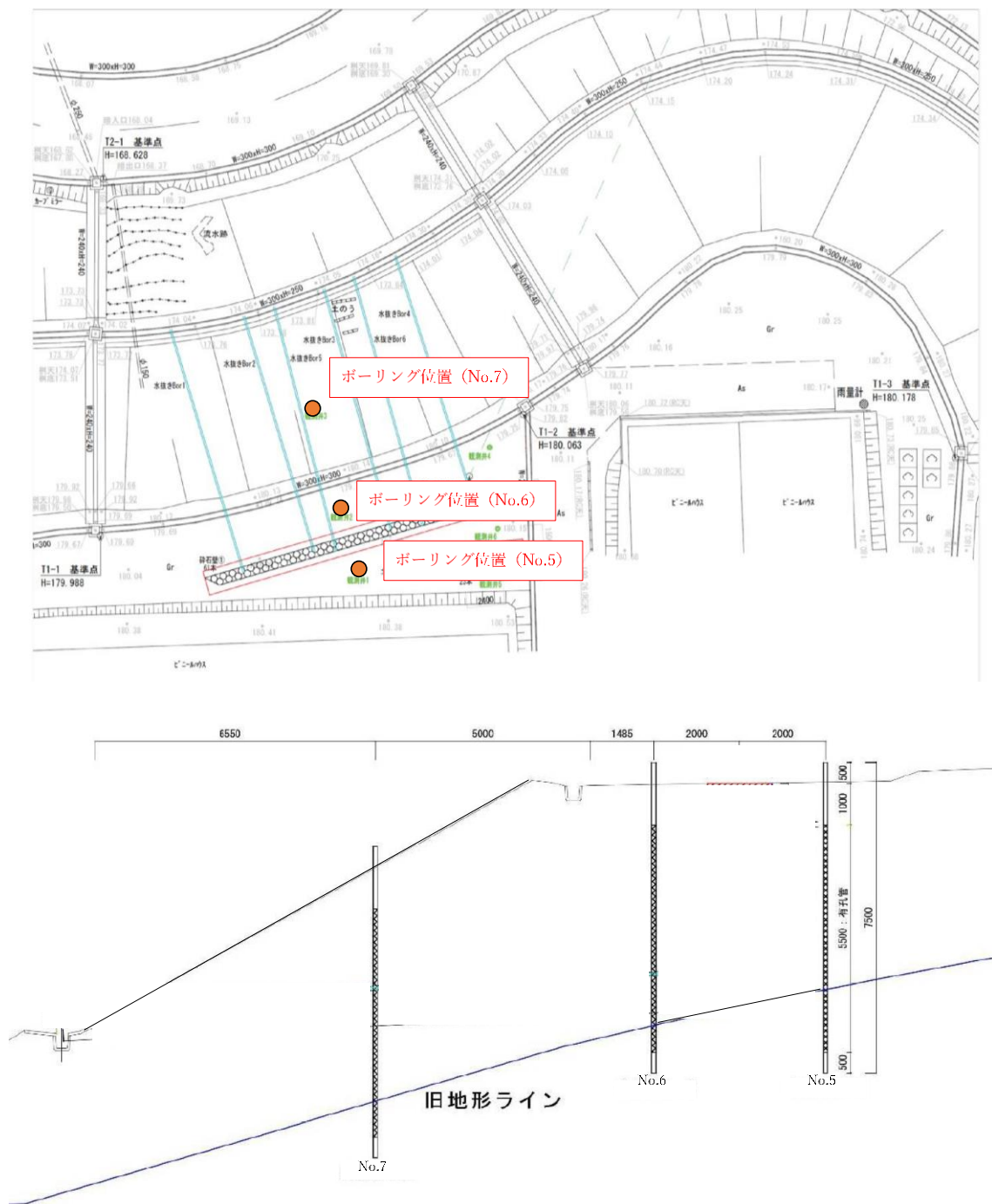


図 5-5 滋賀(ボーリング No. 5, No. 6, No. 7)平面図, 横断図

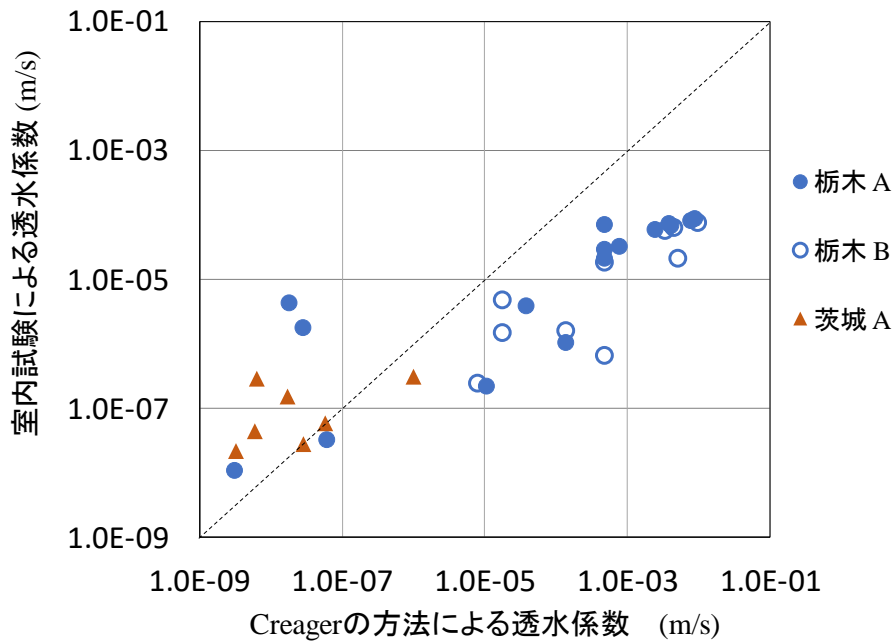


図 5-6 室内透水試験と Creager の方法との比較

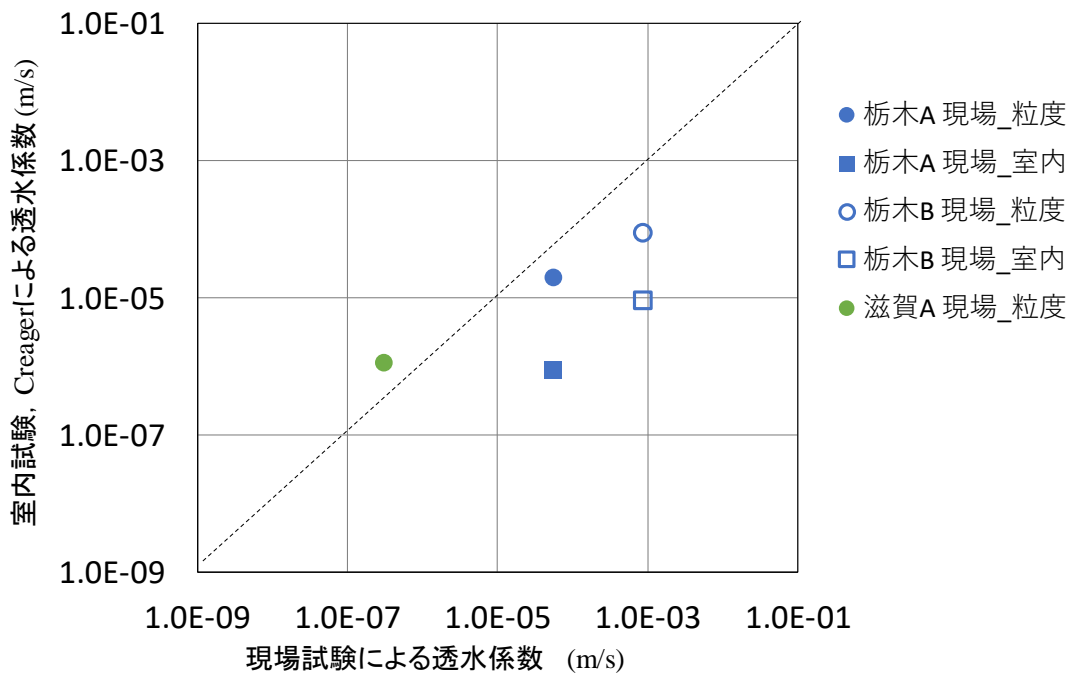


図 5-7 現場透水試験と室内試験, Creager の方法との比較

5-3 水位上昇量及び上昇速度の算定と対応する降雨の設定

次に水位上昇量及び水位上昇速度の算定方法について示す。図 5-8 にボーリング No. 1, No. 2, 図 5-9 に No. 3 における水位上昇を示している期間の観測結果の一例を示す。図に示すようにまとまった降雨を観測した後で、この降雨に伴って水位が上昇している。こういった水位が上昇しているケースを選択し、検証対象とした。

また、水位上昇の継続時間と同程度の継続時間の降雨が水位上昇に影響していると考え、図 5-8, 図 5-9 に示すように水位上昇前の降雨履歴から、影響があると想定される降雨の継続時間を算定し、この時間中の累積雨量を時間で割り戻して平均の雨量を算定した。また、水位上昇の開始時刻と終了時刻についてであるが、図 5-8, 図 5-9 に示すとおり上昇開始は勾配が明確に変化しておりこの点を開始時間としたが、No. 1 と No. 3 のように上昇が終わる時間は明確でない場合があるため、上昇開始から水位上昇量が 90%に達した時間までを水位上昇の継続時間とし、この時点までの平均値から水位上昇速度を算定した。算定結果の一覧を表 5-2 に示す。この結果を用いて前述した推定式と水位観測結果の比較を行った。

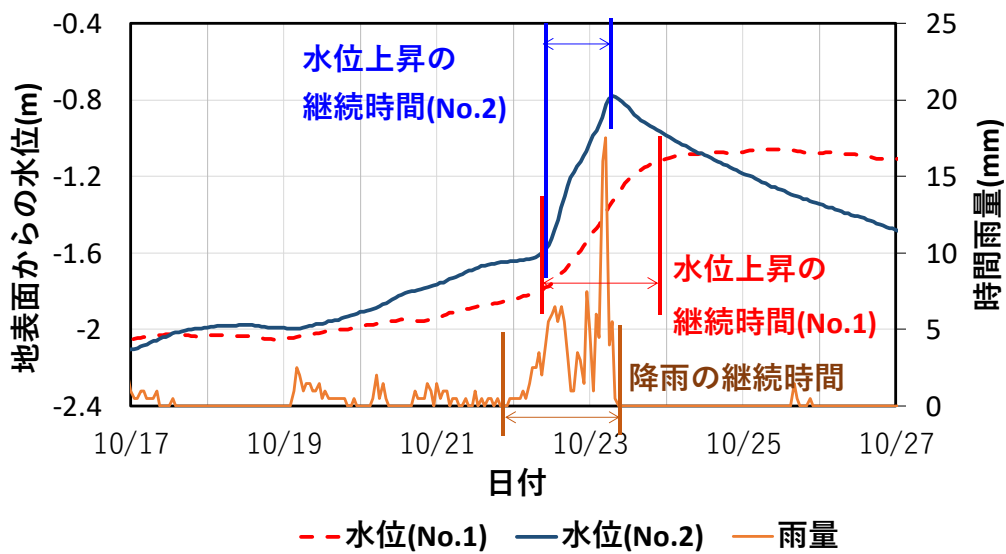


図 5-8 水位観測結果（栃木 A, 栃木 B, 2017 年 10 月）

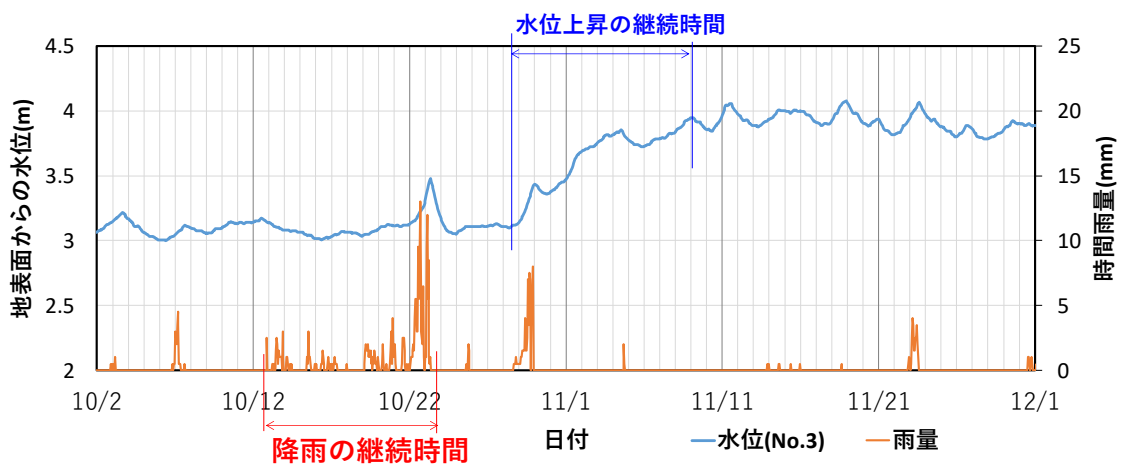


図 5-9 水位観測結果（茨城, 2017 年 10 月～12 月）

表 5-2 各観測地点の水位上昇データ及び関連する降雨データ

対象 盛土	ボーリング No.	イベント 名称	水位の 変動範囲	水位上昇 開始時刻	水位上昇 90%の時刻	水位上昇の 継続時間		水位 上昇量 m	水位上昇 速度		降雨 開始時刻	降雨 終了時刻	降雨の 継続時間 hour	累積雨量 mm	平均雨量 mm/hour
						hour	hour		m/hour	m/hour					
栃木A 栃木B	1	a	基盤内	2017/10/22 9:00	2017/10/23 20:00	35	0.79	0.020	0.020	2017/10/21 23:00	2017/10/23 7:00	34	135.5	3.99	
	2	a	基盤内	2017/10/22 4:00	2017/10/23 7:00	20	0.85	0.038	0.038	2017/10/21 23:00	2017/10/23 7:00	34	135.5	3.99	
茨城	3	a	盛土内	2011/11/19 23:00	2011/11/20 7:00	8	1.02	0.128	0.128	2011/11/19 7:00	2011/11/19 19:00	12	44.5	3.71	
		b	盛土内	2012/3/5 9:00	2012/3/5 16:00	7	1.77	0.253	0.253	2012/3/4 23:00	2012/3/5 18:00	19	31.5	1.66	
		c	盛土内	2012/5/3 7:00	2012/5/3 13:00	7	1.79	0.256	0.256	2012/5/2 20:00	2012/5/3 13:00	17	109.5	6.44	
		d	盛土内	2013/10/16 18:00	2013/10/17 13:00	19	0.27	0.014	0.014	2013/10/15 17:00	2013/10/16 8:00	15	92.0	6.13	
		e	盛土内	2014/2/15 10:00	2014/2/15 20:00	10	1.12	0.112	0.112	2014/2/15 0:00	2014/2/15 15:00	15	130.0	8.67	
		f	盛土内	2017/10/28 19:00	2017/11/9 1:00	270	0.94	0.003	0.003	2017/10/13 5:00	2017/10/23 7:00	242	220.0	0.91	
群馬	4	a	盛土内	2015/7/17 15:00	2015/8/9 11:00	572	2.46	0.004	0.004	2015/7/15 23:00	2015/8/2 18:00	428	180.0	0.42	
		b	盛土内	2015/7/17 15:00	2015/7/17 23:00	8	1.65	0.206	0.206	2015/7/15 23:00	2015/7/16 19:00	20	83.0	4.15	
		c	盛土内	2015/8/22 23:00	2015/8/23 8:00	9	3.64	0.404	0.404	2015/8/22 18:00	2015/8/23 4:00	10	83.5	8.35	
		d	盛土内	2015/9/9 4:00	2015/9/9 13:00	9	6.13	0.681	0.681	2015/9/8 3:00	2015/9/9 13:00	34	149.5	4.40	
滋賀	5	a	盛土内	2015/9/9 0:30	2015/9/9 5:30	5	5.37	1.074	1.074	2015/9/9 0:00	2015/9/9 10:00	10	76.0	7.60	
		a	盛土内	2015/9/9 6:30	2015/9/9 14:30	8	1.33	0.150	0.150	2015/9/8 6:00	2015/9/9 11:00	29	102.0	3.52	
7	6	a	盛土内	2015/9/9 9:30	2015/9/9 13:30	4	1.33	0.333	0.333	2015/9/8 6:00	2015/9/9 11:00	29	102.0	3.52	
		b	盛土内	2015/9/1 0:00	2015/9/17 15:00	399	0.67	0.002	0.002	2015/8/29 5:00	2015/9/9 11:00	271	163.0	0.60	

5-4 水位上昇速度の比較検証

図 5-10 は水位上昇速度について、表 5-2 に示した水位観測データと、式 4-2 で求めた計算値をプロットしたものである。計算値については、栃木 A、栃木 B 地区は水位が盛土よりも下で変動しているため基盤の飽和透水係数、茨城、群馬、滋賀地区については盛土内で水位が変動しているため盛土の飽和透水係数を用いて算定している。係数 m_2 については、茨城、群馬、滋賀地区は盛土内に水位があるが、上昇前の水位が基盤からかなり離れた高い位置に継続して存在するため、基盤の影響は小さいと考え $m_2 = 100$ とした。栃木 A、栃木 B 地区は水位が基盤内で変動しており、その変動はそれより下の層の影響を受けている可能性があるが、下部層の飽和透水係数が不明であるため $m_2 = 100$ と仮定した。また、栃木 A、栃木 B 地区については盛土の飽和透水係数による計算値も参考にプロットしている。

全体を見ると、時間雨量が大きくなると水位上昇速度も増加しており、右上がりの傾向が確認できる。これは計算で求める場合にも同様の傾向になると考えられる。

次に計算値と実測値の比較をすると、時間雨量が 5mm/h 以上と比較的大きい場合は、計算値に比べて実測値の方が大きい値を示す場合が多い。これに対して時間雨量が 1mm/h 以下と比較的小さい場合には、計算値に比べて実測値の方が小さい値を示す場合が多い。図 5-11 に水位上昇速度の実測値と計算値の比較図を示すが、この図からも同様の傾向が確認できる。実測値の方が小さい理由としては、表面からの浸入量が想定よりも小さい場合や、水みちが局所的にあり計算よりも水位が上昇しづらい可能性が考えられる。これに対し、実測値の方が大きい事例は、盛土の飽和透水係数から考えられる上限値以上の水位上昇速度となっており、盛土全体の水位変化を表しているとは考え難い。また、ボーリング孔 No. 3, No. 4, No. 5 では大きい時間雨量で水位が上昇する（上昇速度が速く短時間に起こる）ケースと、小さい時間雨量で水位が上昇する（上昇速度が小さく変化が長時間にわたる）2 つのケースが同一のボーリング孔で確認されており、ここからも異なる現象を捉えている可能性があると考えられる。このように上昇速度が計算上の上限値を超える理由としては、表

面付近の透水係数が高く、宙水のような形で上部に水位が形成されたことにより下部の間隙水圧も上昇するケースや、何らかの理由でボーリング孔に水が流入してしまう場合などが考えられる。前者のケースは筆者らが実施した模型実験においても同様の現象が確認されている。

また、No.1, No.2 については、前述したとおり水位は基盤内を変動しており、盛土内まで水位が上昇する事例は発生していないが、図 5-10 の栃木 A、栃木 B 地区の盛土の飽和透水係数を用いた計算値からも、盛土の飽和透水係数が高いため今回計測された時間雨量では水位上昇速度はかなり小さく、盛土内で水位が上昇する可能性は低いと考えられる。

以上のように、時間雨量と水位上昇速度との関係について、時間雨量の増加に伴い水位上昇速度も上昇するといった傾向を確認することができた。また、時間雨量が大きい時に飽和透水係数から想定される以上の、計算では考え難い水位上昇が確認されており、想定していたものと異なる現象を捉えている可能性が確認された。こういった事例は水位観測の結果を評価する上では注意が必要であり、降雨開始から水位上昇までのタイムラグなども考慮に入れ、今後更に詳しく調べていく必要があると考えている。

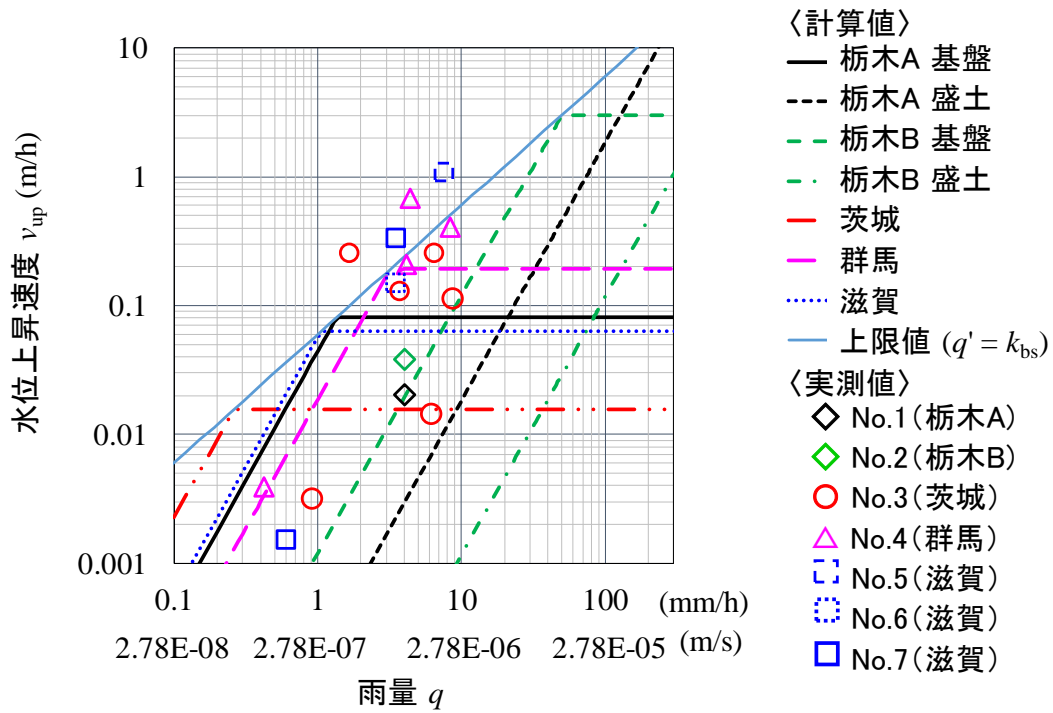


図 5-10 水位上昇速度と時間雨量との関係

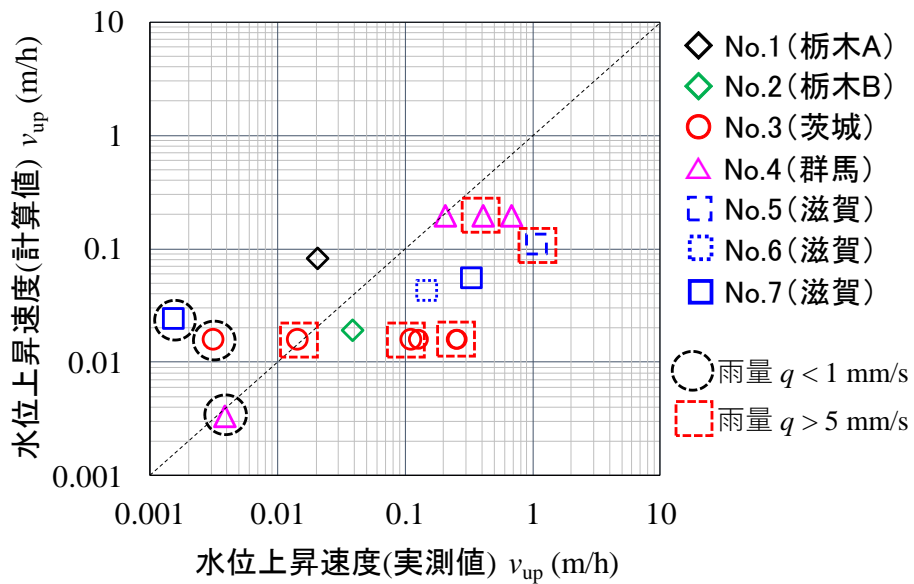


図 5-11 水位上昇速度の実測値と計算値の比較

5-5 水位上昇量の比較検証

図 5-12 は水位上昇量と継続時間の関係について、実測値と計算値をそれぞれプロットしたものである。また、図 5-12 には前述した東京の降雨特性における茨城の盛土の飽和透水係数 (4.38×10^{-8} m/s) を用いた水位上昇量の推定線と、栃木 A の盛土の飽和透水係数 (5.46×10^{-5} m/s) の推定線についても記載している。

図 5-12 より、No.3, No.4, No.7 の継続時間が長い降雨の影響で水位が上昇しているものについては、栃木 A の推定線のような飽和透水係数が高い条件では水位上昇せず、茨城の推定線のように、ある程度飽和透水係数が小さい場合に水位が上昇するという、想定していた傾向と合致している。また、栃木 A のように盛土の飽和透水係数が高い場合は、推定線から水位上昇量は小さいことがわかる。栃木 A や、より盛土の飽和透水係数が高い栃木 B については盛土内では水位上昇は確認されておらず、想定と同じ傾向が確認できたといえる。

次に個々の値について実測値と計算値を比較する。図 5-13 は水位上昇量について実測値と計算値を比較したものである。図 5-12 及び図 5-13 から、前項で示したのと同様に、継続時間が短い（時間雨量が大きい）場合は実測値が計算値よりも大きく、継続時間が長い（時間雨量が小さい）場合は実測値が計算値よりも小さい傾向が確認された。理由としては前項で記載したものと同様の理由が考えられる。

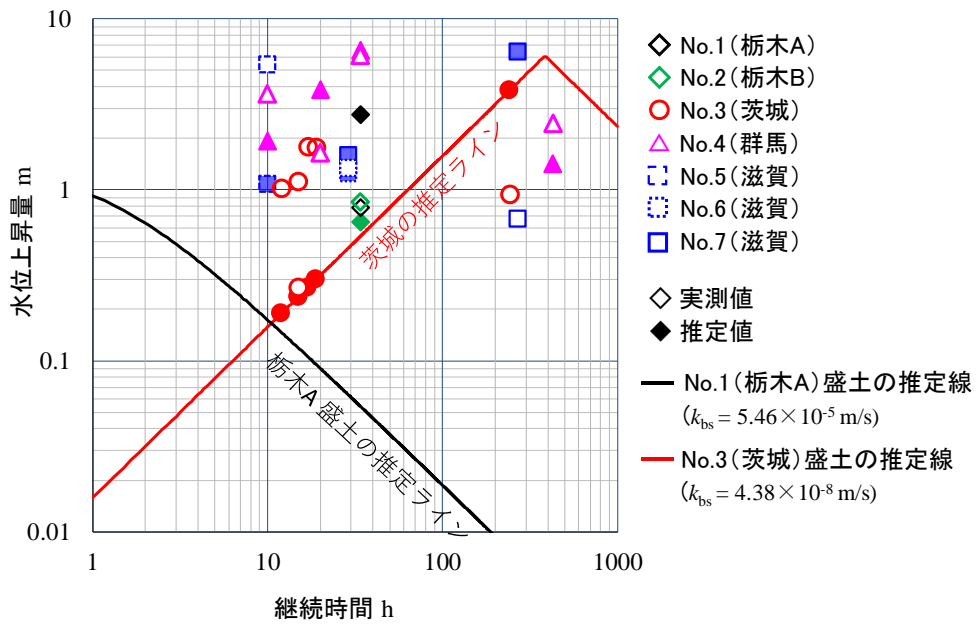


図 5-12 水位上昇量と継続時間の関係

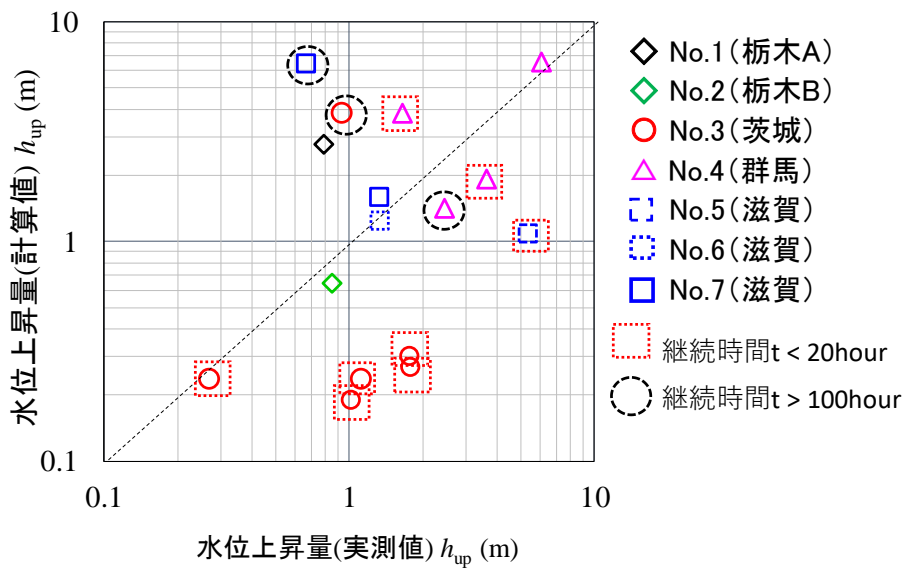


図 5-13 水位上昇量の実測値と計算値の比較

5-6 まとめ

本章では、4章で提案した盛土内水位上昇量の推定式と、実際の高速道路盛土における水位観測データを比較し、推定式の妥当性について検証を行った。結果として値自体は一致しない場合もあったが、傾向としては概ね同様の傾向を確認することができた。以下に検証の結果具体的に得られた事項を示す。

- ・水位観測データから、時間雨量が増加すると水位上昇速度も増加する推定式と同様の傾向が確認された。
- ・水位観測データからも継続時間が長い降雨の影響で水位が上昇しているものは飽和透水係数が小さい盛土となっており、また、今回観測した範囲の雨では盛土の飽和透水係数が高い場合は、水位上昇は確認されておらず、推定式から想定した結果と同じ傾向が確認できた。
- ・水位観測データから、同じボーリング孔において短期間で速く水位上昇するケースと、長時間の降雨とともにゆっくり水位上昇する2つのケースが確認された。短時間の水位上昇ケースでは、推定式による水位上昇速度を実測値が大きく超えているケースもあり、表面付近やボーリング孔付近の宙水のような局所的な現象を捉えている可能性が考えられ、水位観測の結果を評価する上では注意が必要である。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説， pp. 449-461, 2013.
- 2) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説， pp. 515-530, 2010.
- 3) 小野哲治，塚元伸一，宇都洋一：各種の方法で求めた築堤材料の透水係数について，第46回地盤工学研究発表会講演集，pp.239-240, 2011.
- 4) 山本荘毅：新版地下水調査法，古今書院，1983.
- 5) 石森裕康：種々の透水試験から得られる透水係数比較の一例，全地連「技術 e-フォーラム 2007」札幌，2007.
- 6) 李圭太，小高猛司，石原雅規，上山高史：河川堤防を対象とした原位置透水試験に関する考察，第52回地盤工学研究発表会講演集，pp.1-2, 2017.

第 6 章 結論

6.1 結論

本研究では、盛土内の水位上昇に影響を与えると考えられる、透水係数や盛土及び基礎地盤の形状といった指標について、二次元浸透流解析によってそれぞれの水位上昇に対する影響の体系的な評価を行った。また、ここから得られた基盤の透水性が低いといった盛土内水位が上昇しやすい条件について、模型実験により検証を行った。

加えて前述した影響評価の結果に加え、降雨特性を考慮した水位上昇の評価方法について検討し、提案を行った。更にこの評価方法について実際の高速道路盛土における水位観測結果を用いて検証を行った。以下に、これらの研究から得られた結論を示す。

【盛土内水位変動メカニズムの整理】

第 2 章「浸透流解析による盛土内メカニズムの整理」では、平野部に位置する道路盛土を対象に非定常浸透流解析を実施し、土の透水係数や盛土及び基礎地盤の形状が盛土内水位や水位上昇速度に与える影響を系統的に整理した。その結果、以下の結論を得た。

- ・収束水位は時間雨量を盛土の飽和透水係数で正規化した値に比例して増加し、水位上昇速度はこの正規化した値の 2 乗に比例して増加するという関係を示した。
- ・基盤厚さが薄い場合や基盤幅が狭い場合、基盤の飽和透水係数が盛土の飽和透水係数よりも低い場合に収束水位及び水位上昇速度は増加することを示した。また、盛土幅の増加に比例して収束水位は上昇することを示した。
- ・上述した各パラメータの影響度合いの比較を行い、盛土内の水位変化に与える影響が大きいパラメータとしては、盛土の飽和透水係数、基盤の飽和透水係数、雨量、基盤厚さが挙げられることを示した。
- ・上記パラメータを用いて、収束水位、水位上昇速度の推定式の提案を行った。

本章では、道路の盛土内水位変化に関して、これまで系統的にあまり整理されてきていなかった、材料特性の違いや盛土及び基盤の形状の違い、また、それらの複合的な影響について整理を行い、盛内の収束水位や水位上昇速度に対する影響度合いを明らかにした。また、盛土内の収束水位及び水位上昇速度について、それぞれのパラメータを用いた推定式の提案を行った。

第3章「模型実験による盛土内水位変動メカニズムの検証」では、第2章の成果を踏まえて、盛土中央部を対象としたコラム試験を実施した。実験では土柱上部に降雨を与え、一定間隔に設置した間隙水圧計及び土壌水分計により、降雨による地盤内水分の時間的変化、空間的变化を確認した。その結果、以下の結論を得た。

- ・雨量の増加に伴い収束水位や水位上昇速度が上昇する傾向を確認した。また、基盤の飽和透水係数が低い場合に収束水位が上昇する傾向を確認した。これらの傾向については第2章の成果と同様の傾向である。
- ・排水段階において、基盤の飽和透水係数が低い場合水位低下に時間がかかる状況を確認した。
- ・基盤の透水性が低い場合の方が、同じ水位であってもより盛土内間隙水圧が高くなるという傾向が模型実験から確認された。

本章では、第2章の数値解析で得られた成果について妥当性を確認するとともに、基礎地盤の透水係数が小さい場合に水位上昇しやすく、水位低下はしづらいついた盛土内に水位が停滞しやすい条件になることを示した。また、盛土内水位が同じであっても基礎地盤の透水性が低い方が間隙水圧は高くなることを示した。これは盛土の安定性に与える影響を考えると、間隙水圧が低い方が、抵抗力が大きくより安定した状態であると考えられ、安定検討上留意すべき点であると考えられる。

【要注意箇所選定手法の提案】

第4章「盛土内水位上昇の評価方法の提案」では、第2章及び第3章

の成果と国内の降雨特性を踏まえて、実際の道路盛土における盛土内水位上昇量の推定方法の提案を行った。また、この手法を用いて、特定の地域の降雨特性と盛土の許容水位を設定することで、要注意個所を選定する手法についても提案を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・第2章で提案した水位上昇速度の推定式と、Talbot式により整理した継続時間と時間雨量の関係を用いて、盛土内水位上昇量の推定方法を提案した。
- ・推定式から、盛土の飽和透水係数が小さい場合には継続時間が長い時に水位が上昇しやすく、透水係数が大きい場合は継続時間が短く降雨強度が強い場合に水位上昇量が大きくなっており、透水係数によって影響を受ける降雨条件が異なることが確認された。
- ・前述した盛土内水位上昇量の推定方法を基に、特定の地域の降雨特性と盛土の許容水位を設定することで、要注意個所に該当する盛土の飽和透水係数を推定する方法を提案した。

本章では、これまで実務には採用されていない、盛土や基盤の材料特性である透水係数に着目した要注意盛土の選定手法として、盛土内水位が上昇しやすい盛土の推定方法の提案を行った。また、透水係数の違いによって、影響を受けやすい降雨特性が異なるという留意点を示した。

第5章「実盛土における水位観測結果と推定値の比較」では、第4章で提案した盛土内水位上昇量の推定手法の妥当性を、実際の高速道路盛土の水位観測データを用いて検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・時間雨量が増加すると水位上昇速度も増加する推定式と同様の傾向が確認された。
- ・継続時間が長い降雨の影響で水位が上昇しているものは飽和透水係数が小さい盛土となっており、また、今回観測した範囲の雨では盛土の飽和透水係数が高い場合は、水位上昇は確認されておらず、推定式から想定した結果と同じ傾向が確認できた。

- ・同じボーリング孔において短時間で速く水位上昇するケースと、長時間の降雨とともにゆっくり水位上昇する 2 つのケースが確認された。短時間の水位上昇ケースでは、推定式による水位上昇速度を実測値が大きく超えているケースもあり、表面付近やボーリング孔付近の宙水のような局所的な現象を捉えている可能性が考えられる。

本章では、第 4 章で提案した水位上昇量の推定式について、水位観測データにより検証を行い、時間雨量や継続時間と、盛土の透水係数との関係について、推定手法が概ね妥当であることを確認した。また、短時間に大きく水位変動を示す観測結果は地表面付近やボーリング孔付近の宙水等の影響を受けている可能性について指摘し、水位観測結果を評価する上での注意点として示した。

6.2 今後の課題及び展望

本研究で提案した推定方法において、浸潤水が地下水位に到達するまでの時間について考慮していないため、今後これを考慮した推定方法を検討する必要がある。到達時間を考慮することで、特に短時間降雨による水位上昇量が低下する可能性が考えられる。

また、保水性が異なる場合に水位上昇速度が変化する可能性があり、影響を評価する必要がある。

また、実測による検証の結果については、実測値と推定値に少なからず差異があるため、更なる検証が必要であると考えている。

選定した要注意個所での排水対策、遮水対策について、今回整理した知見を用いることで目標値の設定などに活用が期待され、今後より効果的な排水対策の実施が期待できると考えている。

謝 辞

本論文は，東日本高速道路株式会社，株式会社高速道路総合技術研究所に所属し，ならびに東京工業大学大学院の社会人博士課程に在籍して実施してきた研究の内容をまとめたものです．その中では，非常に多くの方々からご指導，ご助言，ご援助を賜りました．

まず主査の高橋章浩教授，副査の北詰昌樹教授，竹村次朗准教授，笠間清伸准教授，佐々木栄一准教授に御礼申し上げます．主査の高橋教授には，博士課程に入学をする前から研究内容や進学について相談にのっていただき，入学後も多くのご指導，ご助言をいただきました．打合せやゼミ等，長時間に渡って議論をさせていただく中で，徐々に研究の方向性を決めていくことができました．また，解析関連，実験関連どちらについても，幅広い知識から多くのアドバイスをいただくことができ，本研究のとりまとめにつながったと感じています．また，論文の書き方や英語の文章の書き方など，土木以外の部分でも迅速，的確なアドバイスをいただきました．心より感謝し深く御礼申し上げます．

また，副査の北詰教授，竹村准教授，笠間准教授，佐々木准教授には，ゼミや研究発表の際等に多くのご指導，ご助言をいただきました．保水特性等の材料特性の取り扱いに関するご指摘や，研究に用いる手法や条件選定に対する妥当性について，またわかりやすく読みたくなる論文にするためのご指摘など，より良い論文とするためにいくつものご指摘，ご助言をいただきました．ご指導，ご指摘をいただいたことにより，より良い論文にすることができたと感じております．心から御礼を申し上げます．

また，堀越一輝助教には浸透流解析の実施にあたってのアドバイスや，実験の実施方法や装置の設計に関するアドバイス等，具体的なアドバイスを数多くいただきました．また，研究以外でも，授業や研究室内のちょっとした相談，雑談にも応じていただきました．深く御礼申し上げます．また，技官の関栄さんには，データロガーの手配や，実験装置の作成にあたって，相談に乗っていただき，実験装置の調達等の調整をしていただきました．また，忙しい合間に話し相手になっていただきました．ありがとうございました．秘書の森みゆきさんには旅費の手配な

どの事務手続きをしていただきました。いやな顔も一切せずに雑談を交えて対応していただき、ありがとうございます。

川崎地質株式会社の三嶋氏，塚本氏，黛氏には現地水位観測調査にご協力いただくとともに，研究内容についてご指導，ご助言をいただきました。また，調査に当たっては東日本高速道路株式会社の各現場にご協力をいただきました。ご協力いただいた皆様方に御礼を申し上げます。東日本高速道路株式会社，元北海道支社保全課長の古俣直紀氏には，私が北海道支社保全課に在籍中に国内留学に行きたいという相談に対して，前向きに対応していただき，留学に対してご理解，ご支援をしていただきました。心から感謝し，御礼を申し上げます。また，元本社技術企画課長の松本吉英氏，坂巻広治氏，課長代理の川口真史氏には，国内留学期間中，状況報告をさせていただくとともに，その際に研究に対するご助言をいただきました。深く御礼を申し上げます。

株式会社高速道路総合技術研究所，元土工研究室長，藤岡一頼氏には国内留学中から研究の相談をさせていただき，多くのご助言，ご協力をいただきました。また，私が土工研究室に配属してからは，上司として研究の相談や論文に対するご指導やご助言をいただきました。仕事と大学の両立にもご理解をいただき，大変感謝しております。深く御礼を申し上げます。また，元斜面防災研究担当部長，横田聖哉氏，竹本将土工研究室長，佐野良久土構造物研究担当部長には，研究に関する数多くのアドバイスをいただきました。また仕事面でも研究の両立にご理解をいただき，ご支援をいただきました。心から御礼を申し上げます。元土工研究室主任研究員中村洋丈氏，藤原優氏には，研究所の先輩であり，社会人博士の先輩でもあり，研究内容の相談に乗っていただくとともに，論文の書き方に関する助言や，在学中の仕事面でのご支援等もしていただいたと感じております。深く御礼を申し上げます。また，研究員の小林一氏，米澤友哉氏，元研究員の細田寿臣氏には水位観測に関する現地調査や試験関係のご協力をいただきました。また，池田氏，梶屋氏，新谷氏をはじめ，土工研究室の皆様にご支援，ご協力をいただきました。また，環境研究室主任研究員の岩吹氏には，大学の先輩として論文の内容やスケジュール等々，多くのアドバイスをいただきました。また発表会にも聴講に来ていただき，非常に心強かったです。心から感謝し，深

く御礼を申し上げます。卒業に至ることができたのは皆様のご助力、ご支援のお陰であったと感じております。

大学の土質系研究室の学生の皆様方にもご助言、ご援助をいただきました。澤石正道博士には、社会人ドクターの先輩として論文の内容等々多くのことをご助言いただきました。また、共に博士課程として在籍していた Singh Jenisha さん, Wan Gang さん, Saha Partha さん, Kumar Ritesh さん, Kunasegaram Vijayakanthan さん, 李楊さんには、ゼミ等で色々なアドバイスをいただきました。また、学生生活を送るうえで、年が離れていることもあまり気にせず過ごすことができ、皆様のおかげで楽しく快適に過ごすことができたと感じています。心から感謝し、御礼を申し上げます。

本論文をまとめることで、研究は一区切りとなりますが、まだ内容としてはスタート段階にたどり着いたという状況だと考えています。今後ここで研究した内容が活用できるよう、私自身としても社会に貢献できるよう今後とも精進していきたいと考えています。

最後に遠くから気遣ってくれた両親、仕事と学業の両立に対して理解を示し、いつも明るく心の支えとなってくれていた妻の直子に心から感謝します。

2019年8月