

豪雨特性と間隙空気の影響を考慮した河川堤防の
飽和・不飽和浸透挙動とモニタリング手法
Saturated and unsaturated seepage in dike considering heavy rain properties and pore air
and monitoring methodology

齊藤啓¹, 前田健一², 杉井俊夫³, 小林剛⁴, 伊藤嘉¹, 今瀬達也¹

- 1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・社会工学専攻・cju18531@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学・高度防災工学センター・都市社会工学科
- 3 中部大学・工学部 都市建設工学科
- 4 応用地質株式会社 東日本統括支社

概 要

近年、突発的な豪雨により河川堤防の決壊被害が報告されている。その一要因として、堤防内に封入された圧縮空気が噴出する際に亀裂等の損傷を与える可能性が示唆されている。本研究では堤防内への間隙空気の封入過程を、降雨外力条件および降雨浸潤速度に着目し検討した。模型実験により、降雨強度が大きく、雨滴が大きいく程、間隙空気を封入しやすいことを明らかにした。その結果を踏まえ、実堤防モニタリングを実施した結果、同様の傾向を確認した。さらに、降雨履歴による堤防内の含水状態が浸潤挙動に影響を及ぼし、特に降雨履歴無しでは、透水性が小さくなり間隙空気を捕捉する様子がわかった。これらの現象を評価するため、比抵抗モニタリングによる堤体内の二次元的可視化を行った結果、浸潤挙動をよく捉えていた。さらに、比抵抗、水分計、水圧計の応答から地盤内の含水状態により、それぞれ適した探査・モニタリング手法があることを明らかにした。

キーワード：河川堤防、間隙空気、豪雨、比抵抗モニタリング

1. はじめに

近年、都市部を襲う突発的な豪雨による堤防被害が相次いで報告されている。その要因として、豪雨による堤防表層からの急激な浸潤化と河川水位の上昇に伴う堤防内の浸潤線の上昇により間隙空気が捉えられ、空気塊として圧縮されて噴発するエアブロー現象の発生が実堤防で確認されており、模型実験及び数値解析による検討が行われている^{1), 2)}。近年では、2011年の福島・新潟豪雨、台風15号時にも確認されており、特に、降雨量が多い豪雨時や、間隙空気を多く含む不飽和堤防において考慮しなければいけない問題と考える。しかし、一般的に不飽和堤防は洪水時に河川水の浸入を抑制することから、災害に対し強固であるという見解³⁾があるが、降雨の影響についての十分な検討がなされていないのが現状であり、間隙空気の影響やその対策についても明確な記述がない。想定される降雨・洪水の作用力が大きくなる中、堤防をねばり強くするためには、これらのメカニズムを解明するとともに、堤体内の状態をモニタリングする手法を整備する必要がある。

そこで本研究では、模型実験および実堤防における現地モニタリング計測において、降雨外力条件が堤防内浸潤挙動および間隙空気の捕捉に与える影響について検討した。

特に、以下の点を考慮している。

- 1) 通常降雨時と比較して豪雨時では雨滴の大きさが約3倍程度大きく、降下する雨滴数密度も高いことが知られている。そこで、模型堤防実験の堤体表面における降雨作用の水理学的条件について、実降雨の忠実な再現を試みた。
- 2) 比抵抗モニタリングは、水分計や水位計などの単点の計測に比べ面的な測定が容易であり、実堤防においても効果的に浸潤挙動を把握できるため、エアブロー現象による堤防破壊メカニズム解明に期待されている。しかし、比抵抗変化の整理は十分ではなく、そのため浸潤挙動が明解な一次元浸潤模型実験を行うことで計測値の検討を試みた。

2. 雨滴径を変化させた模型堤防実験

2.1 模型堤防実験の概要

図2-1に示す任意の降雨強度を再現することが可能な降雨発生装置を備えた土層を用いて実験を行った。模型堤防(実堤防の1/30スケール)は、豊浦砂($D_{30}=0.173\text{mm}$)を相対密度70%で管理して作製し、堤体の大きさは幅1.5m、奥行0.5m、高さ0.3mでのり面勾配は1:2である。作製した模型堤防に降雨強度80mm/hr(猛烈な雨)を、雨滴径を変化させて作用させた。雨滴径の調節には雨滴径可変装置を用

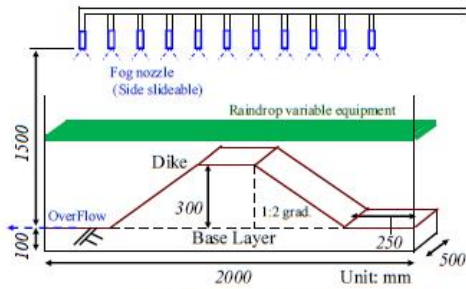


図 2-1 模型堤防試験装置概要

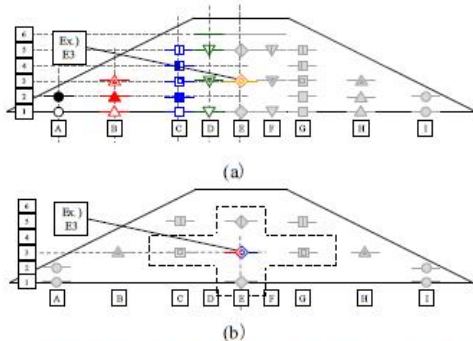


図 2-2 計測器埋設位置(a)：水分計，(b)：間隙水圧計，間隙空気圧計（黒点線内の位置）

い、雨滴小は約 1.0mm，雨滴大は約 6.0mm となっている。堤体内には土壌水分計を 32 箇所，間隙水圧計を 13 箇所，間隙空気圧計を 5 箇所設置し，堤体内の浸潤過程及び間隙空気の挙動を観察した（図 2-2）。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 堤体断面浸潤過程

まず，壁面から見た堤体断面における浸潤の時刻歴を比較したものを図 2-3 に示す。降雨開始から 65 分後の堤体断面に着目すると，同等の降雨強度にも関わらず雨滴大の浸潤が遅れている様子が観察できる。堤体断面の様子から雨滴大では堤体内部への浸潤が遅れることがわかる。この要因として堤体内の間隙空気が降雨水の浸入を妨げている可能性が考えられる。

つぎに，試験断面より観察される浸潤挙動から雨滴径の違いが間隙空気の封入過程に及ぼす影響について検討する。試験開始から 65 分後における天端付近を拡大したものを用いて図 2-4 に示し，そのときの表層浸潤の概略を図 2-5

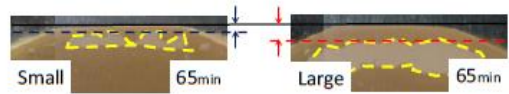


図 2-4 試験開始 65 分後における天端付近の浸潤挙動比較

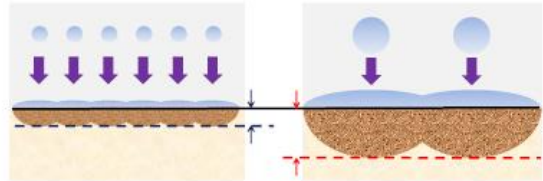


図 2-5 雨滴径の違いによる表層浸潤への影響

に示す。天端直下の浸潤厚さを比較すると，雨滴大の方が分厚い浸潤膜が形成されていることがわかる。これは雨滴が地盤表面に着地した際，表面だけでなく深度方向にも広がるが考えられる(図 2-5)。つまり雨滴大では早期に堤体表層に分厚い浸潤膜を形成し，間隙空気の排出を抑制するため，堤体内の間隙空気を封入しやすい浸潤挙動を示すものと思われる。次項では，間隙空気の封入が浸潤過程に及ぼす影響について，各種計測器の応答より検討を試みる。

2.2.2 水分量変化における雨滴径の違いが及ぼす浸潤過程の比較

雨滴小の水分量の時刻歴について比較したものを図 2-6 に示す。堤体表層(A2, C5 等)，内部(E3 等)ともに試験開始直後から水分量が緩やかに上昇している様子がわかる。

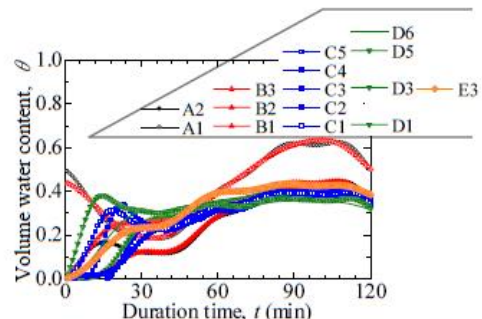


図 2-6 降雨強度 80mm/hr 時（猛烈な雨），雨滴小における水分量変化

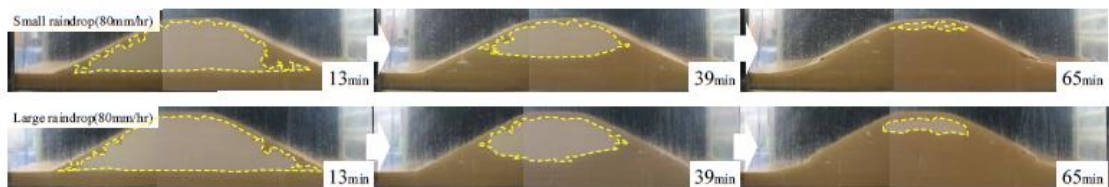


図 2-3 降雨強度 80mm/hr 時（猛烈な雨）における堤体断面の比較，上：雨滴小，下：雨滴大

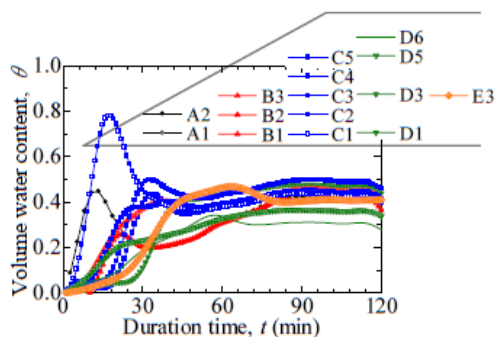


図 2-7 降雨強度 80mm/hr 時 (猛烈な雨), 雨滴大における水分量比較

一方雨滴大(図 2-7)では、試験開始直後に堤体表層(A2, C5)で急激な水分量の上昇が生じ、堤体内部(E3 等)では試験開始からおよそ 30 分後に、堤体表層における水分計の反応から遅れるようにして水分量が急上昇する。つまり、雨滴大では堤体表層が急激に浸潤化し、堤体内部への浸潤に遅れが生じることから、間隙空気と浸潤水との置換が進みにくいことがわかる。次項では、堤体内部の浸潤挙動に関して、水分計のみによる評価だけでなく計測原理の異なる間隙水圧計による検討結果を示す。

2.2.3 間隙水圧変化における雨滴径の違いが及ぼす浸潤過程の比較

間隙水圧計の時刻歴について比較したものを図 2-8 に示す。ここでは間隙水圧が急激に上昇する時間(図中破線)に着目して、堤体内中央に設置した E3 における間隙水圧変化を比較する。間隙水圧挙動から雨滴小(青線)では、試験開始から約 42 分後に堤体内水位が E3 に達しているが、雨滴大(赤線)では約 56 分の時間を要している。

水分計や間隙水圧計の反応から、雨滴が大きいほど堤体内部への浸潤が遅れることが伺えるが、この現象が封入された間隙空気にとどのような影響を与えているか検討を行うため、次項では堤体内に設置された間隙空気圧計の挙動に着目した。

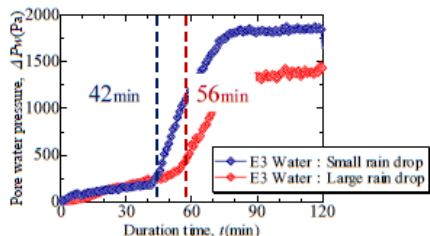


図 2-8 雨滴径の違いによる間隙水圧変化の比較

2.2.4 間隙空気圧変化における雨滴径の影響比較

間隙空気圧計の時刻歴について比較したものを図 2-9 に示す。ここでは、間隙空気が最も蓄積されると思われる

堤体内中央に設置した E3 について比較する。雨滴小(青線)では、試験開始から約 42 分後(内部水位が E3 に到達)におよそ 300(Pa)の空気圧を蓄積しているが、雨滴大(赤線)では、試験開始から約 56 分後(内部水位が E3 に到達)におよそ 900(Pa)の空気圧を蓄積している。また、水位到達後圧力が急上昇する理由について、間隙空気圧計は間隙水圧計の表面を撥水加工し、センサー受圧部で空気のみを検知するようにしたが、受圧部に水が浸入したことで水圧を計測したためと思われる。間隙空気圧計の挙動から、降雨により捕捉される間隙空気が圧縮される様子を確認し、特に雨滴径が大きいほどその現象が顕著に見られた。

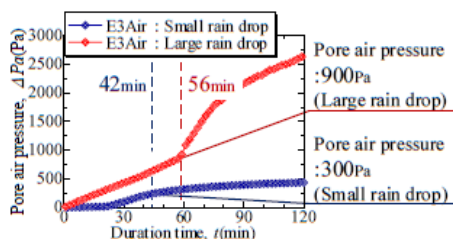


図 2-9 雨滴径の違いによる間隙空気圧変化の比較

模型実験の結果から、豪雨特性を有する降雨外力が不飽和堤防に作用すると、内部への浸潤が遅れ間隙空気圧を蓄積するような浸潤挙動を示すことがわかった。この結果を踏まえ、実堤防における浸潤挙動について検討を試みた。

3. 実堤防モニタリングにおける浸潤挙動比較

3.1 実堤防モニタリングにおける浸潤挙動比較の概要

実堤防モニタリングは名古屋市内を流れる矢田川右岸 2.2K・庄内川左岸 20.2K 地点の背割堤に、水分計を設置している。図 3-1 に実堤防に埋設した水分計の位置を示す。

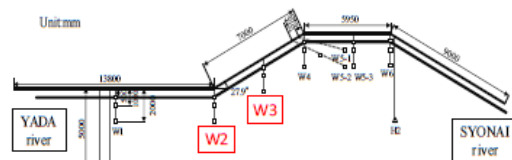


図 3-1 実堤防水分計埋設地点図

実堤防において、降雨強度の違いによる浸潤挙動の変化を比較するため、観測地付近の降雨強度データが台風相当(強い雨)の 30mm/hr (2011 年 7 月 19 日)と集中豪雨相当(強烈な雨)の 80mm/hr (2011 年 9 月 20 日)を記録する時刻の 2 時間前から 6 時間分の水分量変化を抽出した。また、事前降雨の有無による浸潤過程の違いを検討するため、降雨強度 80mm/hr における事前降雨有(2012 年 7 月 6 日, 前日までの総雨量 30mm)と事前降雨無(2012 年 8 月 29 日, 11 日間降雨無し)を抽出し比較を行った。

3.2 計測結果および模型実験との比較

3.2.1 模型堤防実験における水分量変化の特徴

模型堤防実験から以下のことが明らかになっている。

- 台風相当の降雨強度 30mm/hr では、堤体の表層、内部において時間とともに水分量が単調に増加する。
- 集中豪雨相当の降雨強度 80mm/hr では、豪雨により捕捉される間隙空気塊によって、堤体表層では水分量が急激に増加し、その後減少するが、堤体内部では水分量の増加に遅れが生じる。

3.2.2 降雨強度による浸潤挙動の比較

降雨強度の違いによる実堤防法先 (W2) の水分量変化を比較したものを図 3-2 に示す。また、各深度において水分量がピークに達する時間を図中に示した。

降雨強度 30mm/hr 時の水分量変化(図 3-2, 左図)から、W2-2000 (地表面からの深度 2.0m) における水分量にピーク値が見られなかったが、降雨による浸潤水が W2-2000 まで到達しなかったためと考える。また、W2-500, W2-1000 ではおよそ同時刻に水分量がピークに達していることから、降雨強度 30mm/hr 相当における模型堤防実験でみられたように、堤体の表層、内部において一様な水分量の増加を実堤防でも確認した。

つぎに、降雨強度 80mm/hr 時の水分量変化(図 3-2, 右図)をみると、同等の降雨強度における模型堤防実験でみられたように、堤体表層が急激に浸潤化し、堤体内部の水分量が遅れて上昇する様子を確認した。豪雨相当の外力が堤防に作用した際、堤体内部の水分量の増加が遅れるのは、堤体内の間隙空気を捕捉するように表層が急激に浸潤化し、捕捉された間隙空気がその後の降雨水の浸入を妨げるためと考えられる。

つぎに、実堤防法面(W3) の水分量変化を比較したものを図 3-3 に示す。図 3-3・左図 (降雨強度 30mm/hr) において W3-500 が水分量のピークに達した時間と、W3-1000 がピークに達した時間の差が 10 分であったが、図 3-3・

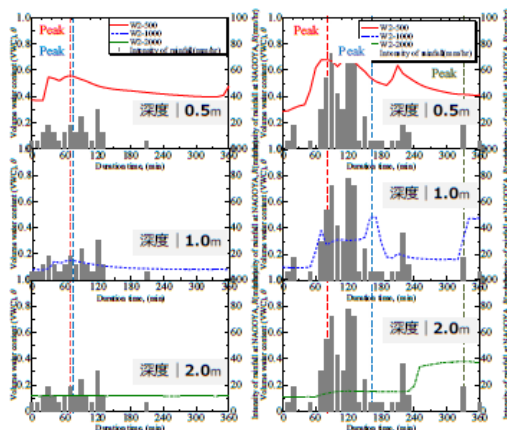


図 3-2 実堤防法面 (W2) の水分量変化 (左: 降雨強度 30mm/hr (台風相当), 右: 降雨強度 80mm/hr (集中豪雨相当))

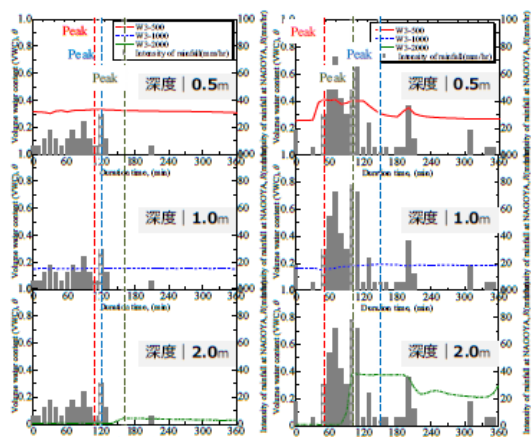


図 3-3 実堤防法面 (W3) の水分量変化 (左: 降雨強度 30mm/hr (台風相当), 右: 降雨強度 80mm/hr (集中豪雨相当))

右図 (降雨強度 80mm/hr) には同位置間の差が 100 分であった。つまり、降雨強度が大きくなるほど堤防内部の浸潤が遅れることがわかる。さらに、各深度における水分量がピークに達する順番に着目すると、降雨強度 30mm/hr 時には W3-500, 1000, 2000 の順番であったが、降雨強度 80mm/hr 時には W3-500, 2000, 1000 という順番であった。降雨強度 80mm/hr 時には、堤体内に間隙空気を捕捉するような浸潤をするため堤体内部(W3-1000) への浸潤が遅れ、また堤防法先からの浸潤によって W3-2000 の水分計が先に応答を示したと思われる。

3.2.3 降雨履歴による浸潤挙動の違い

実堤防における浸潤挙動について、降雨履歴の有無に着目し比較したものを図 3-4 に示す。地表面から深さ 0.5m における 120-140 分の水分量の増加勾配を浸潤速度 (V_{sp}) として図中に示した。浸潤速度を比較すると、法先地点 (W2) の降雨履歴有りでは、 $V_{sp}=2.1 \times 10^{-2}(\text{min})$ 、降雨履歴無しでは $V_{sp}=1.2 \times 10^{-2}(\text{min})$ である。また、法面地点 (W3) においても降雨履歴有りの方が、浸潤速度が大きいことがわかる。降雨履歴が有ることにより、あらかじめ堤防内に間隙部の経路ができ、堤体内への浸透が速やかに進むためと考えられる。一方、降雨履歴の無い不飽和堤防の場合、降雨水と間隙空気の置換が発生しづらく、堤体内に圧縮した間隙空気を開け込む可能性が危惧される。

3.2.4 降雨履歴による排水挙動の違い

つぎに、水分量がピーク値到達後の排水挙動に着目した検討を行った。地表面から深さ 0.5m における水分量ピーク値を記録した時点から 60 分後までの、水分量の減少勾配を排水速度 (V_{dr}) として図 3-4 中に示した。降雨履歴の有無について排水速度を比較すると、法先地点(W2) の降雨履歴有りでは、 $V_{dr}=1.8 \times 10^{-3}(\text{min})$ 、降雨履歴無しでは $V_{dr}=1.5 \times 10^{-3}(\text{min})$ と事前に降雨があるほうが排水速度が速い。さらに、法面地点(W3) においても、降雨履歴有り

の方が無しに比べ排水速度が 10 倍程度速いことから、堤防の初期状態が排水速度にも影響を与える事がわかる。浸潤速度の比較の際にも述べたとおり、降雨履歴が有る方が堤体内にあらかじめ間隙部の経路ができており、この経路は降雨水が浸透するときだけでなく排水時にも影響し、浸潤水の出入りを円滑にする作用を持つことが考えられる。

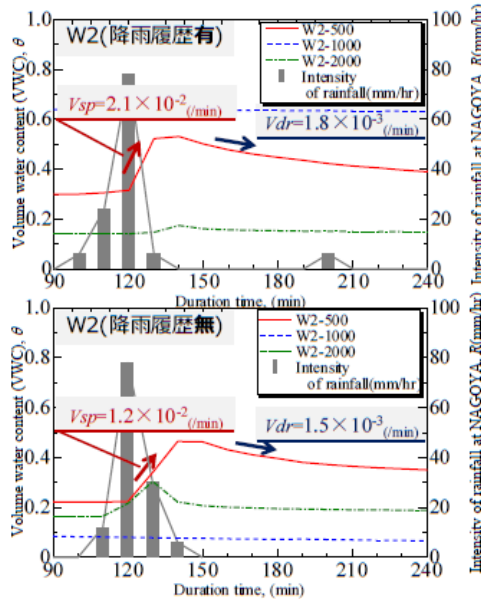


図 3-4 降雨強度 80mm/hr 時 (集中豪雨相当) の実堤防内浸潤及び排水速度比較 (上: 降雨履歴有, 下: 降雨履歴無)

これまで、不飽和領域における浸潤挙動については水分計や間隙水圧計を用いることによる原位置モニタリングを実施してきたが、浸潤過程に対し二次的かつ時系列的な把握を目的とし比抵抗によるモニタリングも実施している。次章では、比抵抗モニタリングと併せて様々な計測器を同時に用いることで、比抵抗モニタリングの有用性の検討及び定量化のための実験結果について記す。

4. 一次元浸潤模型実験による比抵抗モニタリングの検討

4.1 実験方法及び実験条件

図 4-1 に実験装置の概略図と計測器に配置を示す。図 4-1(a) に示すような、任意の降雨強度を実現可能な降雨発生機能と底部からの浸潤機能を有し、高さ 200mm、幅 200mm、奥行 200mm 供試体 (豊浦砂) を設けた一次元浸潤模型装置を用いた。降雨外力は、設定降雨に合わせた噴霧ノズルを用いて土槽上部から散水した。また、土槽底部からの注水による実験も行った。この場合、上部は排気状態としている。

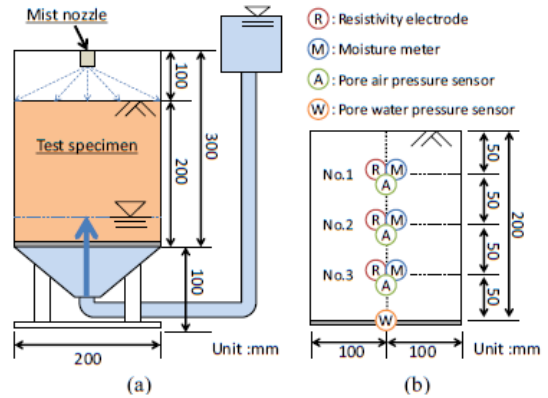


図 4-1 実験装置の概略図(a): 実験装置全体図, (b): 地盤内の各計測器の設置位置

実験断面の浸潤挙動を観察するために、土槽正面からビデオ撮影を行った。また、土層内部の浸潤挙動については、図 4-1(b) に示すように土槽内部の同じ測点に対して、比抵抗電極⁴⁾、土壌水分計、間隙空気圧計をそれぞれ 50mm 間隔で三深度に設置し、土槽底部に間隙水圧計を設置した。計測原理の異なる計測器を同深度で用いることで、各々のセンサーの特徴についても検討した。

実施実験の一覧を表 4-1 に示す。土層上部からの降雨外力、土槽底部からの水位外力、初期含水比、土槽底部の排気・排水条件を変化させ、浸潤挙動と各種計測器との対応を検討した。表 4-1 のうち、本稿では Case1 と Case 9 について検討した。

表 4-1 実験条件一覧

	降雨強度 (mm/hr)	注水流量 (mm/hr)	初期含水比 (%)	底面条件
Case1	135	-	0	非排水 非排気
Case2	135	-	0	排水 排気
Case3	135	-	5	非排水 非排気
Case4	-	135	0	-
Case5	-	135	5	-
Case6	135	-	0	非排水 非排気
Case7	135	-	0	非排水 排気
Case8	-	30	0	-
Case9	-	30	0	-
Case10	-	30	5	-

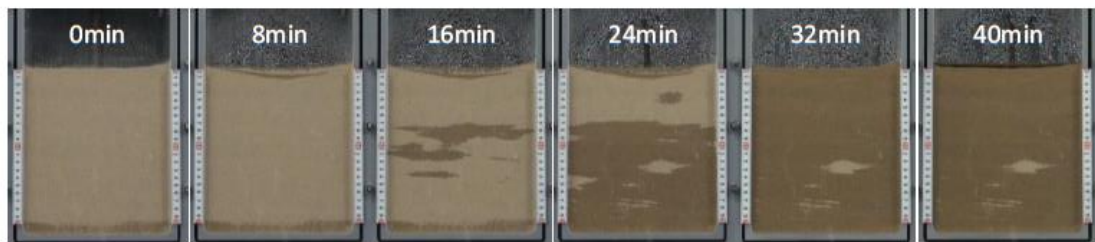


図 4-2 乾燥地盤へ集中豪雨に相当する降雨強度 135mm/hr を与えた際の浸潤及び浸透過程の時刻歴 (Case1)

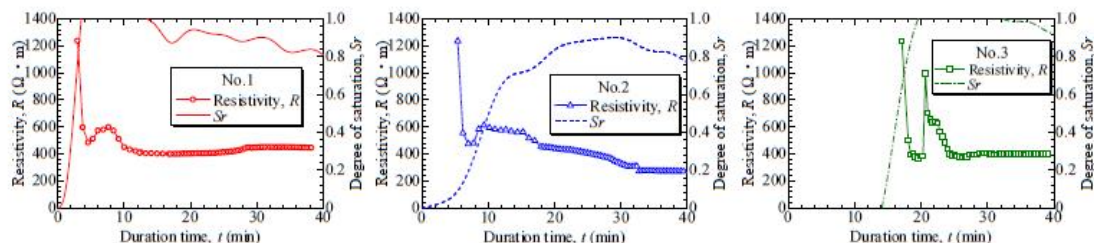


図 4-3 Case1 における比抵抗値・水分量の時刻歴: 左図は計測器位置 No.1 (土槽底面から 150mm), 中央図は No.2 (底面から 100mm), 右図は No.3 (底面から 50mm) における時刻歴を示す。

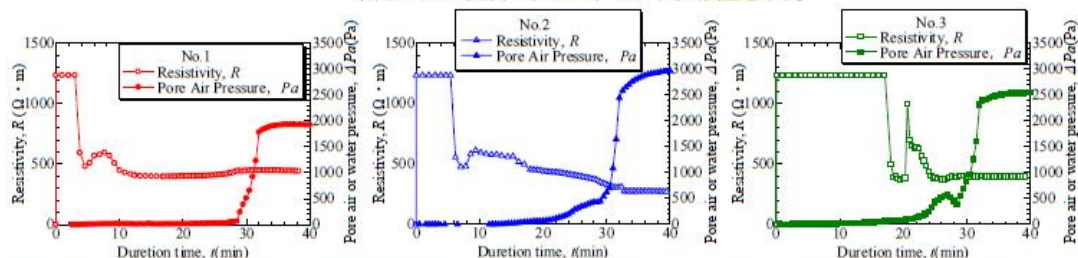


図 4-4 Case1 における比抵抗値と間隙空気圧の時刻歴: 左図は計測器位置 No.1 (土槽底面から 150mm), 中央図は No.2 (底面から 100mm), 右図は No.3 (底面から 50mm) における時刻歴を示す。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 Case1(降雨外力 135mm/hr, 初期含水比 0%, 底面: 非排水・非排気)

a) 実験断面における見かけの浸潤及び浸透挙動

図 4-2 に実験時に撮影した実験断面の時刻歴を示す。本試験では降雨外力を作用させたが、実験開始から 16 分後において、中央付近 (底面から 100mm) に浸潤域が発生した。浸潤水は実験開始から 24 分後に土槽底面に達し、40 分後に土槽全体が見かけ上飽和することを確認した。実験断面の様子から、降雨による見かけの浸潤及び浸透挙動は供試体に対して面的ではなく、不均一な浸潤挙動となる。この場合、実験断面からの目視だけでは降雨浸潤挙動を正確に把握することは難しくなるため、地盤内の浸潤挙動について、比抵抗モニタリング・土壌水分計・間隙空気圧計より計測した結果に着目して検討する。

b) 比抵抗値と水分量の変化

各深度における比抵抗値と水分量の時刻歴を図 4-3 に示す。ただし、水分量については、浸潤による地盤内の間隙比が初期値から変化しないものとして算出した飽和度

S_r を用いて示している。計測器の位置は、図 4-1(b) に示すように、土槽上部から底面に向かって、No.1, 2, 3 である。比抵抗値及び水分量の応答から、降雨浸潤に伴って土槽上部から底面へと順に反応することがわかる。また、比抵抗値の変化に着目すると、水分量の増加に伴い比抵抗値が低下することから、比抵抗モニタリング及び土壌水分計が降雨浸潤挙動の把握に有効であるといえる。なお、各計測器について、単独で計測を行った結果と本実験の結果を比較したところ、浸潤に対する応答挙動に大きな違いがみられないことから、乾燥試料において、計測器間で干渉が生じていないものと考えられる。

c) 比抵抗値と間隙空気圧の変化

各深度における比抵抗値と間隙空気圧の時刻歴を図 4-4 に示す。間隙空気圧の変化に着目すると、実験開始から約 20~28 分後に、計測器位置 No.2 (土槽中央部) 及び No.3 (土槽下部) において間隙空気圧が上昇することがわかる。

以上より、乾燥度合いが高い地盤で降雨強度が非常に強い場合には、下方への浸潤過程において、降雨水と間隙空

気との置換がスムーズに行われないことから、間隙空気が上昇することがわかる。比抵抗値の変化と間隙空気圧との関係について詳しくみると、No.1, 2, 3 の箇所で、それぞれ実験開始から、6, 8, 20 分時点で、浸潤によって低下した比抵抗値が上昇に転じ、その後低下していることがわかる。また、No.2 と No.3 では、この比抵抗上昇時に間隙空気圧の値が上昇し始めている。これは、間隙空気が

閉じ込められ圧縮されることを、比抵抗が鋭敏に捉えていると考えられる。なお、実験開始から 28 分以降に各深度において急激な圧力の上昇がみられた。ここで、間隙空気圧計の測定可能範囲は、十分に飽和した地盤内水位が到達するまでである。今後は、間隙空気圧のより正確な測定に加えて、堤体内の巨視的な空気圧挙動の把握とそのモニタリング手法について検討する必要がある。

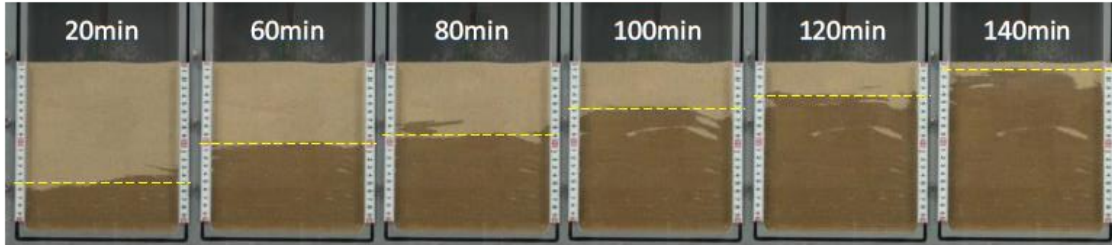


図 4-5 乾燥地盤へ降雨強度 30mm/hr に相当する流量を土槽底面から与えた際の浸潤及び浸透過程の時刻歴 (Case9)

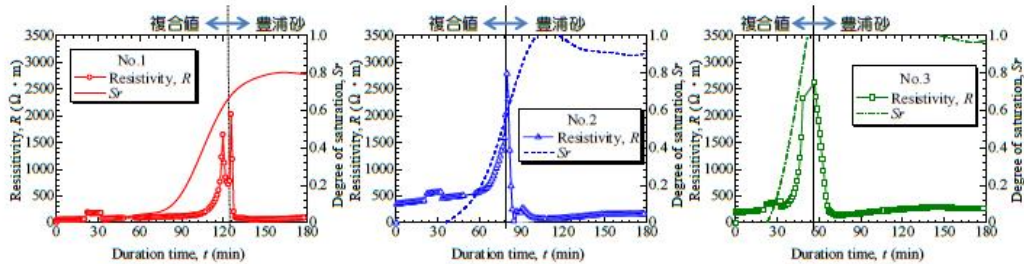


図 4-6 Case9 における比抵抗値・水分量の時刻歴：左図は計測器位置 No.1 (土槽底面から 150mm)、中央図は No.2 (底面から 100mm)、右図は No.3 (底面から 50mm) を示す。また、図中の黒点線より後が豊浦砂の比抵抗値を示す。

4.2.2 Case9(注水外力 30mm/hr 相当, 初期含水比 0%)

a) 実験断面における見かけの浸潤及び浸透挙動

図 4-5 に実験時に撮影した実験断面の時刻歴を示す。土槽上部から降雨させた実験結果 (図 4-2) と比較すると、面的に浸潤のフロントが進行していることがわかる。

b) 比抵抗値と水分量の対応関係

図 4-6 に各深度における比抵抗値及び水分量の時刻歴を示す。ここで、比抵抗値は水分量の増加に伴い増加し、その後、ピーク値に達した後には減少しているが、実験開始からピーク値に達するまでは、導電マットの比抵抗値と、注水により押し上げられた間隙空気の比抵抗値、および浸潤してきた水道水の比抵抗値のそれぞれが複合された比抵抗値の変化を示していると考えられ、乾燥地盤の浸潤に伴う比抵抗値の変化ではないことに留意する必要がある。図 4-6 より、比抵抗値と水分量の応答を比較すると、水分量の変化に比べて比抵抗が少し遅れて変化し始めることがわかる。これは、抵抗値を計測する比抵抗モニタリングに比べ、誘電率の変化を捉える水分計の方が水分変化に回答しやすいためと考えられる。また、見かけの浸潤線の位置と計測器の設置位置を比較すると、計測器の設置位置に浸潤線が達するあたりで反応し始め、水分量の増加に伴って

比抵抗値が低下することがわかった。

さらに、比抵抗値は水分量の増加に伴って低下した後、飽和度の定常化に伴い、ある一定の値に収束している。以上の結果から、比抵抗値の変化は、浸潤初期から飽和までの水分量の変化を捉えているといえる。なお、収束値に対する土質や密度の影響については、今後の課題である。

c) 浸潤線のフロントと地盤内水位との関係

図 4-7 に、実験断面より目視で読み取った浸潤線のフロントの位置と、堆積地盤内の水位の時刻歴を示す。

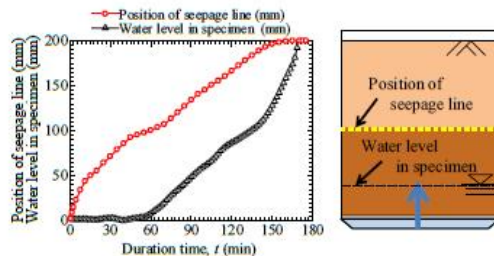


図 4-7 Case9 における浸潤線のフロントの位置と地盤内水位の時刻歴

堆積地盤内の水位については、間隙水圧計の計測値による圧力水頭とした。浸潤線のフロントと堆積地盤内の水位の対応関係をみると、浸潤線のフロントの方が常に 100mm 程度高く推移した。これは、毛管現象による吸い上げ作用によるものと考えられる。つまり、浸潤線のフロントと堆積地盤内の水位は異なり、双方を区別するためには、適切な計測方法を選択する必要があることがわかった。

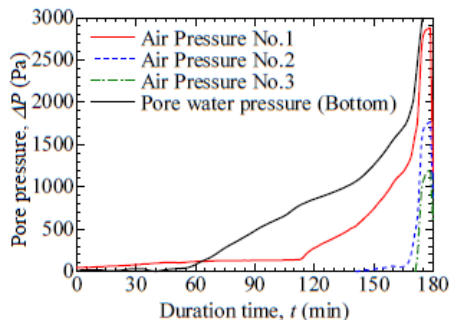


図 4-8 Case9: 各深度の間隙空気圧時刻歴

間隙空気圧の時刻歴を図 4-8 に示す。Case9 の実験ケースでは、土槽上部が排気条件であるために間隙空気による圧力の上昇はみられなかった。ただし、実験終盤に急激な圧力の上昇がみられるのは、センサー部へ水が浸入することで、水圧を同時に計測してしまうことに起因するものと考えられる。

以上の結果を踏まえると、降雨による浸潤初期（浸潤線が到達するまで）から浸潤中期（浸潤線が到達後、地盤内水位が到達するまで）までの浸潤及び浸透挙動を捉えるためには、比抵抗モニタリング及び水分計が適しており、浸潤後期（内部水位が到達したあと）の浸透挙動を捉えるためには間隙水圧計を用いることが有効といえる。また、比抵抗値の定量化に関しては、今後試験ケースを重ね、比抵抗値の変化率など計測結果をより良く活かすための方法について検討を進める。

	浸潤初期	浸潤中期	浸潤後期
水分量	水分計 比抵抗	水分計 比抵抗	-
空気圧	間隙空気圧計 比抵抗	間隙空気圧計 比抵抗	-
水圧	-	-	間隙水圧計

図 4-9 本実験より整理した、適材・適所なモニタリング手法
 浸潤初期 | 浸潤線が到達するまで
 浸潤中期 | 浸潤線が到達後、地盤内水位が到達するまで
 浸潤後期 | 内部水位が到達したあと

5. まとめ

本稿では、河川堤防において豪雨により捕捉される間隙空気塊の挙動把握と、堤防内の弱部を特定するためのモニタリング手法の検討及び整理を試みた。

- 1) まず豪雨特性の一つである、大粒の雨滴径を再現した模型堤防実験を行った。その結果、雨滴径が大きいほど堤体内に間隙空気を封入し、圧縮の様子が確認された。また、もう一つの豪雨特性として超過降雨があるが、これについても模型実験により降雨強度が大きいほど堤防内に間隙空気を封入する作用が強いことを確認している。
- 2) これらの結果を踏まえ、実堤防における長期モニタリングによる堤防内浸潤挙動に着目すると、模型実験の結果と同様に間隙空気を閉じ込めるような浸潤挙動を示すことを確認した。さらに、実堤防において事前降雨の有無により地盤内への透水性に違いが出ることを明らかにした。
- 3) 一次元浸潤実験では、同深度において、計測原理の異なるモニタリング手法を用いることで多角的な検討を試みた⁵⁾。その結果、それぞれの計測器において浸潤過程を計測する上で適材・適所な計測領域があることを明らかにした。水分計や水位計などの単点で配置する計測に比べ、特に比抵抗モニタリングは面的な測定が容易なことを鑑みると、実堤防においてもより効果的に浸潤及び浸透挙動を把握できる有効なモニタリング手法の候補といえる。さらに、比抵抗モニタリングでは計測地点に内部水位が到達する前の水分量変化、間隙空気圧変化を捉えることができる可能性があり、エアブロー噴出による堤防破壊メカニズムの解明に資すると期待する。

謝辞：本研究に用いた装置の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) 23360203 の助成を受けたものである。また、本実験は、国土交通省河川技術開発制度地域課題研究によって、国土交通省庄内川河川事務所との共同で実施されたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 1) 前田健一, 柴田賢, 馬場千児, 樹尾孝之, 今瀬達也: 豪雨と気泡の影響を考慮した河川堤防における透気遮水シートの設置効果, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, ジオシンセティックス論文集, 第 25 巻, pp107-pp112, 2010.
- 2) 前田健一, 柴田賢, 馬場千児, 小林剛, 樹尾孝之, 尾畑功: 模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, Vol.18, pp.305-310, 2012.
- 3) 石原雅規, 井上 悟士, 宇野 尚雄, 小俣 篤, 川井 正彦, 齋藤由紀子, 佐古 俊介, 佐々木哲也, 長田 仁, 森 啓年: 河川堤防の浸潤に対する照査・設計のポイント, (独) 土木研究所地質・地盤研究グループ 土質振動チーム, pp.45, 2013
- 4) 小林剛, 前田健一, 柴田賢: 不飽和堤防の急速浸潤化に伴う間隙空気塊の挙動と比抵抗モニタリングによる可視化, 河川技術論文集, Vol.18, pp.293-298, 2012.
- 5) 小西千里, 林 宏一, 畠山正則, 川原孝洋, 亀谷裕志: 不飽和土の比抵抗と S 波速度のクロスプロットの解釈について, 物理探査学会第 121 回学術講演論文集, 175-178, 2009.