

河川堤防材料の浸潤挙動に及ぼす降雨強度 及び浸潤速度の影響とモニタリング手法の比較

INFLUENCES OF RAINFALL INTENSITY AND SEEPAGE RATE
ON INFILTRATION IN DIKE MATERIAL
WITH DIFFERENT MONITORING METHODOLOGIES

小林剛¹・前田健一²・齊藤啓³・伊藤嘉³・阿部知之⁴

Tsuyoshi KOBAYASHI, Kenichi MAEDA, Hiroshi SAITO, Yoshimi ITO and Tomoyuki ABE

¹ 理修 応用地質株式会社 計測システム事業部 (〒305-0841茨城県つくば市御幸が丘43番地)

² 正会員 工博 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

³ 学生会員 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

⁴ 正会員 工修 応用地質株式会社 東日本統括支社 (〒331-8688さいたま市土呂町2丁目61番5号)

Since a river dike located at the downstream, where urbanization has been in progress, is composed of sandy soil consisting mainly of soft and fine particles, the river dike is considered to be easily damaged by pore air that has been enclosed within the dike. By performing experiments using a small soil column model equipped with rainfall and raising seepage apparatus, the behaviors of pore air and pore water by the infiltration was visualized and investigated with pressure meters for pore air and pore water, moisture meter and specific resistivity monitoring. As a result, it is pointed out that the moisture meter and the resistivity monitoring show early response followed by increment of pore air pressure, and then the pore water pressure increases after it is perfectly submerged. Further studies are needed to put the right monitoring system in the right place and the adequate.

Key Words : dike, specific resistivity monitoring, seepage, heavy rainfall, pore air

1. はじめに

近年、都市部において局所的な集中豪雨と、それに伴う急激な河川水位の上昇による河川堤防の損傷に関する実被害や研究成果が報告されている¹⁾。不飽和な堤防では、時間雨量10~30mm程度の頻度の高い降雨と比較して、豪雨時には急激な浸潤化作用によって間隙空気が浸潤線に捉えられ、空気塊として圧縮され、浮力による天端への引張り作用や、堤防の弱線に沿って地表に押し出される作用を受ける。この間隙空気が噴発するエアブロー現象が、実堤防や模型実験、数値解析でも確認されている²⁾。しかし、堤体内への降雨浸透挙動及び間隙空気圧挙動と、それに伴う堤防損傷メカニズムについては、いまだ未解明な部分が多い。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。

一方、堤防の非破壊試験方法として、様々な物理探査手法が提案され実用化されている³⁾。また、異なる計測方法による探査結果を重ねて解釈するクロスプロットも行われている⁴⁾。これらは、堤体を構成する土質やその断面構造を捉えるに重要なツールであると認識されているが、それぞれの探査手法の特徴の整理は十分とは言えない。また、堤体の弱部を特定するには、堤体の不均質性の同定だけでなく、負荷(浸潤、せん断応力など)に対する応答として、弱点となる損傷モードも考慮する必要がある。想定する作用に対する堤体の弱部を見つけるためには、モニタリング手法の適材適所・適役な導入が必要となる。

そこで本研究では、集中豪雨や急激な浸潤化作用に起因する間隙空気による堤防不安定化のメカニズムを把握するために、浸潤方向が明確な一次元浸潤実験を実施した。実験では、土壌水分計、間隙水圧計、間隙空気圧計及び比抵抗モニタリングを用いて、堤体内への浸透挙動の可視化を試みた。また、浸潤過程を把握するにあたり、各計測方法の特徴について考察した。

2. 計測器の概要

本実験では、計測原理の異なる計測器を用いた。まず、土壌水分計はEC-5（デカゴン社製）を用いた。これは二つの電極間内（コンデンサー的役割を果たす）の誘電率から土壌水分を測定するセンサーであり、計測領域はセンサーから2~3cmである。つぎに、間隙水圧、間隙空気圧の計測には、小型間隙水圧計P306A（SSK社製）を用いた。特に、間隙空気圧の計測には、間隙水圧計に元々設置されているフィルターに、目の細かいメッシュ(140 μ m)を張り付け、撥水スプレーを塗布することでセンサー受圧面に水が接しないようにして、センサーに作用する局所的な圧力（空気圧）の変動が計測できるように工夫した。

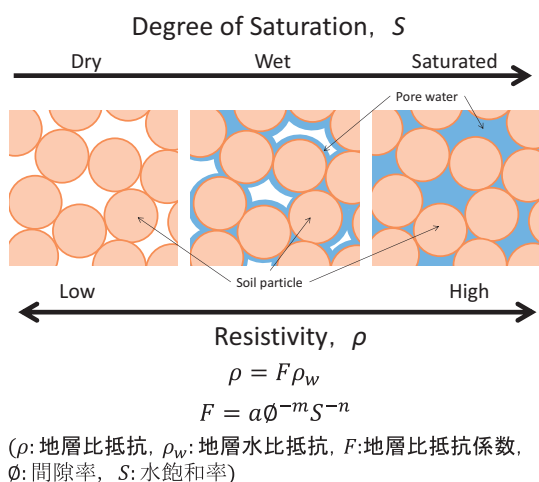


図-1 比抵抗モニタリングの原理：一般に間隙中に占める水の割合が増えるほど、比抵抗値は小さくなる。図中に示したアーチーの式(Archie, 1942)は、比抵抗値と飽和率の関係を示している。

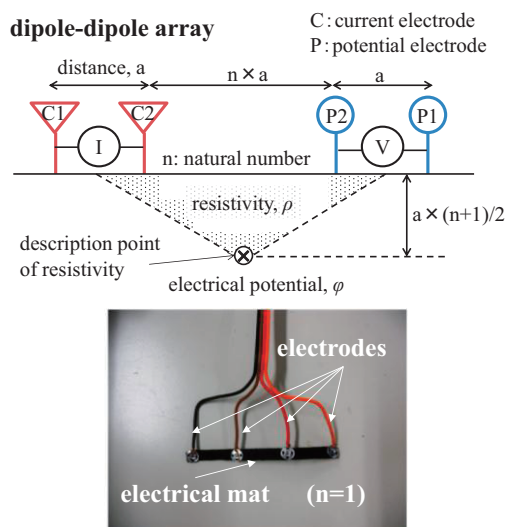


図-2 比抵抗電極の配置と比抵抗の表示点の関係図（ダイポール・ダイポール法）及び用いた電極の外観

さらに、比抵抗モニタリング（連続電気探査）⁵⁾も実施した。比抵抗モニタリングは、地盤内の比抵抗（電気の流れにくさ・流れやすさ）を繰り返し計測するもので、一般に地盤内の間隙に占める間隙水の割合が大きくなるほど比抵抗値が小さくなる（図-1）。本実験では、四極法（ダイポール・ダイポール法）を採用した（図-2）。電極間の配置（距離 a 及び a の n 倍）と算出される比抵抗 ρ の表示点との位置関係は図の通りである。本実験での計測領域は、電極から1cm ($a=1, n=1$) であり、測定範囲は、1~6,000 $\Omega \cdot \text{m}$ である。なお、本実験では、極端な条件である乾燥砂の状態においても計測を可能にするために、比抵抗電極間には導電マットを用いた（図-2）。また、計測器の測定レンジの限界などから、計測不能領域や出力が不安定であった箇所のデータは除去することとした。

3. 実験方法及び実験条件

図-3に実験装置の概略図と計測器に配置を示す。実験装置は、図-3(a)に示すように、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土槽を設けた小型降雨浸透模型装置を用いた。降雨には水道水を用い、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、土槽底面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。

実験時には、時々刻々と進行する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。図-3(b)に示すように、土槽内部には、同じ測点に対して、比抵抗電極、土壌水分計、小型間隙空気圧計をそれぞれ50mm間隔で三深度に設置し、土槽底面には小型間隙水圧計を設置した。これら3種の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。

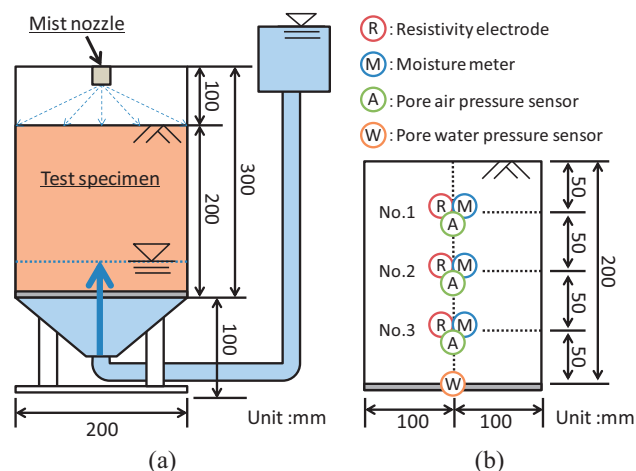


図-3 実験装置の概略図：(a) 実験装置全体図、(b) 各計測器の設置位置

表-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	-

土試料には、浸潤が目視でも観察しやすい豊浦標準砂を用いた。実施実験の一覧を表-1に示す。降雨、土槽底部からの浸潤速度、初期含水比、土槽底部境界の排気・排水条件を変化させ、浸透及び浸潤挙動を観察した。本論文では、このうち、Case1, Case 3, Case 9についての考察を記す。

4. 実験結果及び考察

(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透及び浸潤挙動

図-4に実験時に撮影した実験断面の浸透及び浸潤過程を示す。土槽上部からの降雨であるが、実験開始から16分後の実験断面において、地盤中央付近（深度100mm）に浸潤域が見られた。さらに実験開始より24分後に土槽底面へ達し、その後土槽全体が浸潤することを確認した。

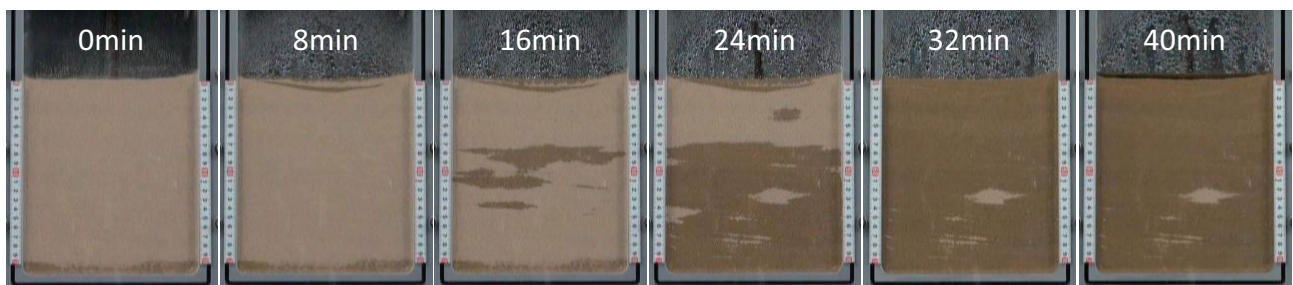


図-4 乾燥地盤へ集中豪雨に相当する降雨強度135mm/hrを与えた際の浸透及び浸潤過程の時刻歴 (Case1)

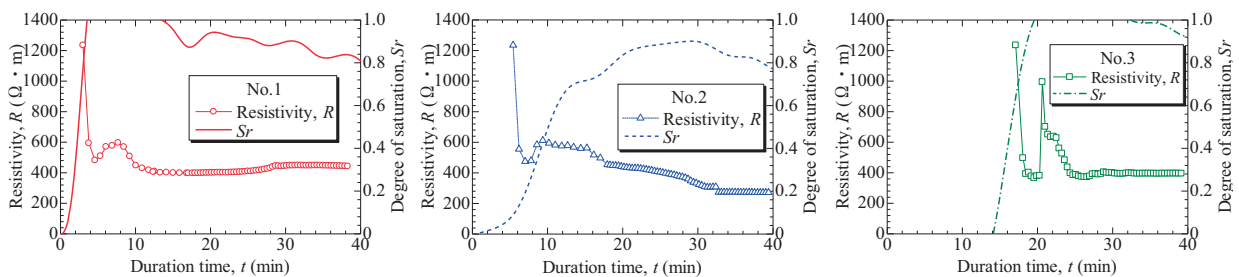


図-5 Case1における比抵抗値・水分量の時刻歴：左図は計測器位置No.1（土槽底面から150mm），中央図はNo.2（底面から100mm），右図はNo.3（底面から50mm）における時刻歴を示す。

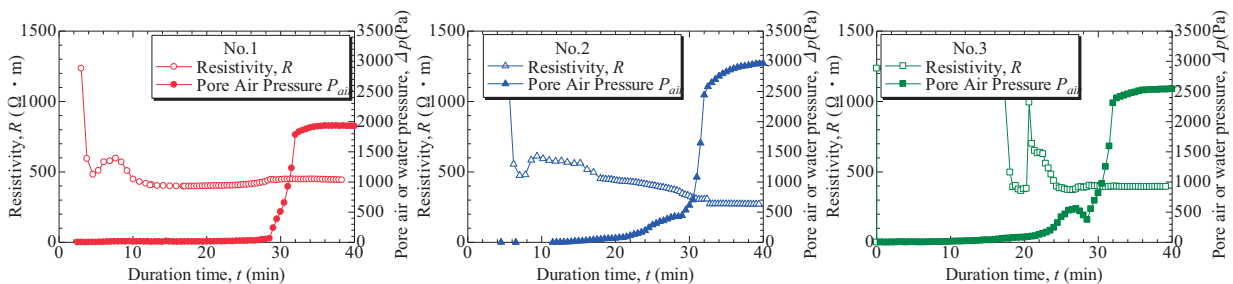


図-6 Case1における比抵抗値と間隙空気圧の時刻歴：左図は計測器位置No.1（土槽底面から150mm），中央図はNo.2（底面から100mm），右図はNo.3（底面から50mm）における時刻歴を示す。

このことから、降雨による見かけの浸透及び浸潤挙動は堆積地盤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、降雨浸透挙動を正確に把握することは難しくなる。そこで次項では、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考察する。

b) 比抵抗値と水分量の変化

各深度における比抵抗値と土壌水分計で計測した水分量の時刻歴を図-5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-3(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、降雨浸透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がわかる。このことから、比抵抗モニタリング及び土壌水分計が降雨浸透挙動を把握すること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違いがみられないことから、乾燥時において、計測器間で干渉が生じていないものと考えられる。

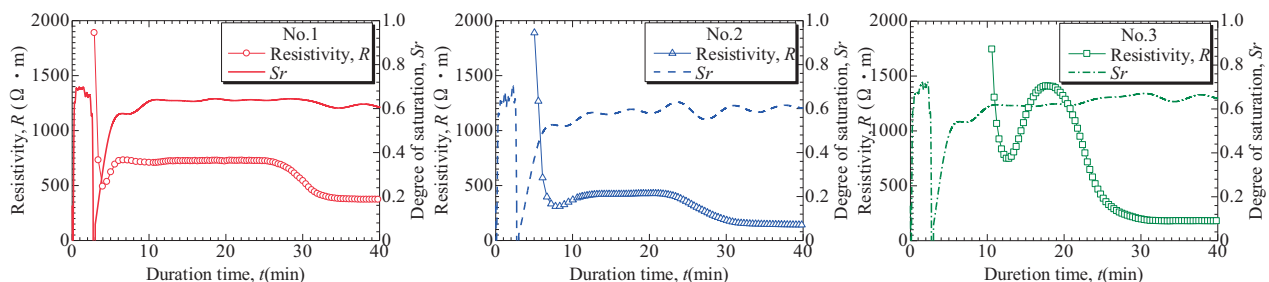


図-7 Case3における比抵抗値・水分量の時刻歴：左図は計測器位置No.1（土槽底面から150mm）、中央図はNo.2（底面から100mm）、右図はNo.3（底面から50mm）における時刻歴を示す。

(2) Case3(降雨外力135mm/hr, 初期含水比5%, 底面：非排水・非排気)

a) 初期含水の違いによる浸潤速度の比較

初期含水比5%の場合、実験断面の浸潤の様子を濃淡から判断することが困難であったため、本項では初期含水比の有無による浸潤速度の比較を行う。ここで浸潤速度とは、隣接する比抵抗間距離（50mm）を、比抵抗値が急激な減少に転じる時間差で除したものを指す。今回の実験のCase1及びCase3では、比抵抗の出力が安定して得られた時刻と、比抵抗値が急減する時刻が等しくなっていることがわかる（図-5, 7のプロット開始時刻）。Case1及びCase3の浸潤速度を表-2に示す。表-2から、No.1-No.2間ではCase3($w=5\%$)、Case1($w=0\%$)ともに浸潤速度（ v_{sp1-2} ）は約0.2と大きな差がなかったが、

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-6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。このとき実験断面（図-4）では、非浸潤域が見られた。

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、降雨水と間隙空気置換がスムーズに行われなことから、間隙空気圧が上昇すると言える。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, No.2とNo.3の箇所で、それぞれ、6分、8分、20分の時に、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、比抵抗値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。

より深い箇所のNo.2-No.3間では、浸潤速度（ v_{sp2-3} ）はCase3の方が2倍程度、浸潤速度が速いことがわかる。これは、乾燥砂に比べて湿潤砂では、間隙空気と降雨水の置換がスムーズに行われることに起因すると考えられる。

表-2 初期含水比の違いによる浸潤速度比較

実験条件	比抵抗急減時刻(min)			浸潤速度(m/min)	
	t_1 (No.1)	t_2 (No.2)	t_3 (No.3)	v_{sp1-2} (No.2-No.1)	v_{sp2-3} (No.3-No.2)
Case1 ($w=0\%$)	3.00	5.42	16.82	0.21	0.04
Case3 ($w=5\%$)	2.88	5.33	9.45	0.23	0.11

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-7に示す。比抵抗値の変化に着目すると、この実験条件においても、計測器位置No.1からNo.3へ順に反応することがわかる。しかし、土壌水分計については、十分な応答が得られなかった。そこで、Case1と同様に各計測器について、単独で計測した結果と本実験の結果を比較したところ、水分計については浸潤に対する応答挙動に違いがみられた。この要因としては、比抵抗モニタリングと土壌水分計の計測器間の干渉が考えられ、今後詳細を検討する予定である。

ここまで、降雨外力による浸潤挙動、各計測器の応答について示した。その結果、乾燥状態の試料で降雨強度が高い場合には、浸潤はスムーズに進まず、非浸潤域での空気圧が上昇することが計測できた。一方、湿潤状態の試料では、浸潤がスムーズに進行した。また、比抵抗モニタリング及び土壌水分計が、降雨浸透挙動を把握することに有効であることを示した。次節では、浸潤挙動が捉えやすい乾燥地盤に、降雨強度30mm/hrに相当する流量を土槽底面から注水した実験結果について示す。

(3) 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透及び浸潤挙動

図-8に実験断面における浸透及び浸潤過程を示す。土槽上部から降雨させた実験結果（図-4）と比較すると、面的に一樣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-9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減少している。なお、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-9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応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-10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。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、前者の方が後者に比べて、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。

間隙空気圧の時刻歴を図-11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潤することで、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から飽和に至るまでの浸透及び浸潤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、十分に飽和した領域の境界である水位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。

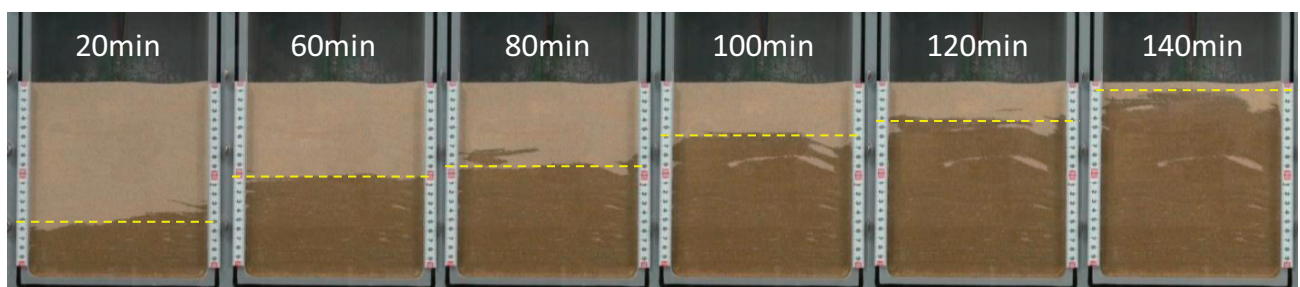


図-8 乾燥地盤へ降雨強度30mm/hrに相当する流量を土槽底面から与えた際の浸透及び浸潤過程の時刻歴 (Case9)

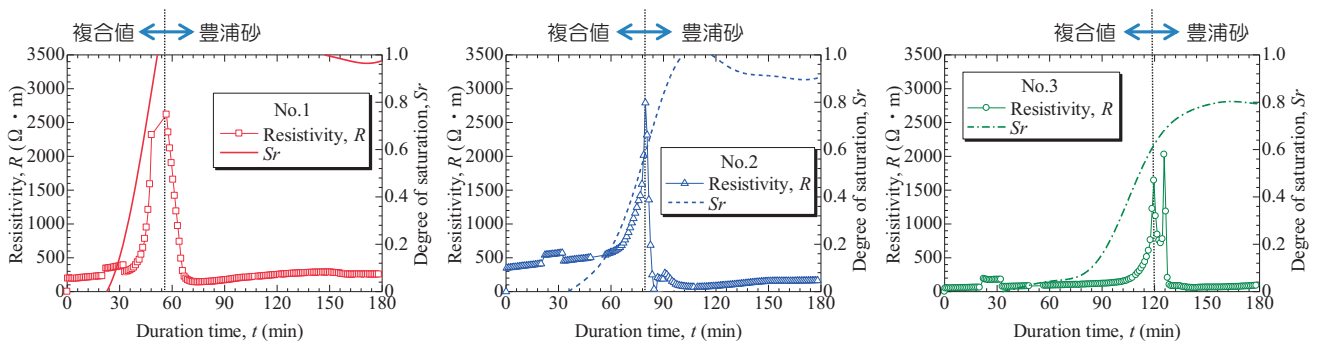


図-9 Case9における比抵抗値・水分量の時刻歴：左図は計測器位置No.1（土槽底面から150mm），中央図はNo.2（底面から100mm），右図はNo.3（底面から50mm）における時刻歴を示す．また，図中の黒点線より後が豊浦砂の比抵抗値を示す．

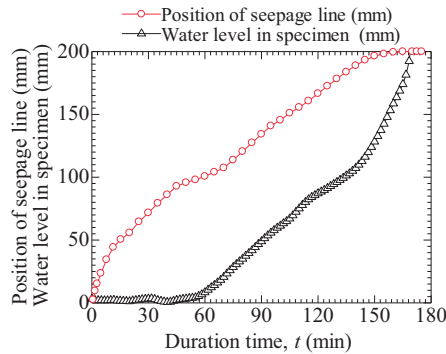


図-10 Case9における浸潤線のフロントの位置と地盤内水位の時刻歴

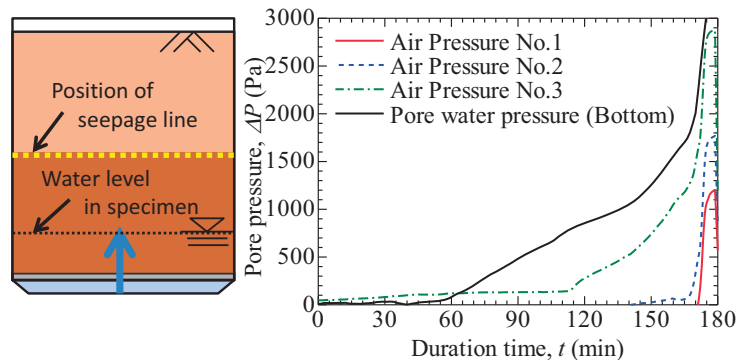


図-11 Case9における各深度の間隙空気圧の時刻歴

5. まとめ

本研究では，一次元浸潤実験を行い，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，各々のセンサーが持つ特徴，水・空気の間隙流体の土中での浸透及び浸潤挙動について多角的な検討を試みた．その結果，乾燥状態の試料で降雨強度が非常に高い場合には，浸潤はスムーズに進まず，非浸潤域での間隙空気圧が上昇し得ることを確認した．一方，湿潤状態の試料では，浸潤がスムーズに進行することを確認した．また，比抵抗モニタリング及び水分計は浸潤線のフロントが近づくと敏感に応答するが，間隙空気圧は遅れて反応し，間隙水圧は浸潤線のフロントが十分に進行してから上昇することがわかった．浸潤初期では比抵抗の応答は水分計に比べ若干遅れるものの，堤体内の水分量の変化を捉えていることがわかった．また，降雨作用や浸透作用の違いによる間隙空気圧の応答についても，比抵抗値の計測結果に反映されていることがわかった．水分計や水位計などの単点で配置する計測に比べ，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透及び浸潤挙動を把握できる有効なモニタリング手法の候補と言える．

今後は，種々の作用，初期条件について考察するとともに，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．

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，平成24年度国土交通省河川技術開発制度地域課題研究公募で採択された委託研究によって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，榊尾孝之，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，榊尾孝之，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) 稲崎富士：統合物理探査による河川堤防の内部構造評価，物理探査学会第114回学術講演論文集，234-237，2009．
- 4) 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．
- 5) 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圧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．

(2013. 4. 4受付)