小型模型実験に基づく様々な耐越水堤防の浸透特性の検討

東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻　学生会員　○ 浅野　友里
東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻　学生会員　倉上　由貴
東京理科大学理工学部土木工学科　正会員　二瓶　泰雄

１．序論

近年の気候変動の影響で異常豪雨が各地で多発し，それに伴う堤防決壊により甚大な被害を及ぼしている．2012 年九州北部豪雨災害時の矢部川は浸透による決壊，2015 年関東・東北豪雨災害時の鬼怒川は越水による決壊であった [1]．堤防設計では複数の外力に対して考慮しているが，現行では超過洪水時の外力には対応しておらず，洪水外力増大に耐え得る堤防補強技術の開発が必要である．従来の堤防補強技術としては，ドレーン工により裏のり面の排水機能を向上させる浸透対策と，コンクリート製被覆工により堤体表面を保護する（アーマ・レビー）等の越水対策がある．しかしながら，越流対策堤防における耐浸透性は不明確な点が多い．一方で，著者らはジオシンセティックス（GRS，Geosynthetic-Reinforced Soil）補強土工法を用いて，堤体内に水平に敷設したジオグリッドとコンクリート被覆工を結合した構造である堤防強化技術を提案し（**図１**），その耐越流侵食性がアーマ・レビーと比べて十分高いことを小型・大型模型の越流実験で検証しつつある [2]．しかしながら，GRS 河川堤防は耐浸透性の低下に対する懸念が残る．そこで本研究では GRS 河川堤防を含めた様々な耐越水堤防における浸透特性の把握を目的とし，小型模型を用いた浸透実験を行った．

２．研究方法

（１）実験方法の概要：様々な耐越水堤防の浸透能を把握するために，堤外地側から継続的に一定水位で浸透させる「定水位浸透実験」，その後に水位を段階的に上昇させる「変水位浸透実験」を一連の実験として行った（**図２**）．本実験は，アクリル製浸透実験装置（長さ 150cm×奥行き 20cm×高さ 35cm）内に，高さ 20cm，天端幅 10cm，表・裏のり面が 2 割勾配となる模型堤防を作製した．水位条件としては「定水位実験」では水位 h を装置底面から 20cm で固定し，「変水位実験」では水位を 1 分間で 2cm 上昇させ，その水位を 30 分間キープする，というプロセスを繰り返し，段階的に水位を上昇させた（水位が天端位置になるまで）．ここで，基礎地盤の端部に，不織布と金網で作製した透水性の土留め壁を設置し，基礎地盤を含まない堤体の浸透侵食状況を調べた．

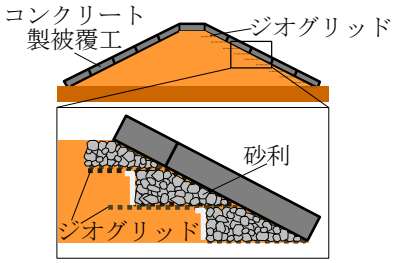


図１　GRS 河川堤防の概要

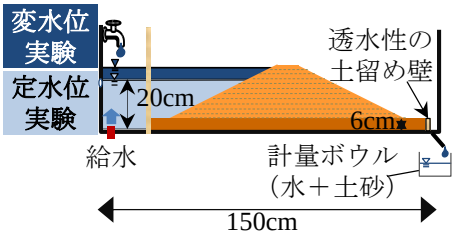


図２　浸透実験概要

（２）模型堤防の概要：模型堤防は，土堤及び，ジオグリッドを敷設した GRS 補強土（以下，ジオグリッドのみ），アーマ・レビー，GRS 河川堤防とする（**図３**）．ここで，GRS 河川堤防は**図１**のように，既設堤防に適用できる部分補強を基本形としているが，本実験では基本形の極端な例として，全体をジオグリッドで補強した堤防を用い，水みちが形成されやすい堤防条件下での基本的な浸透能を把握する．また，細粒分含有率 Fc は全て浸透侵食が生じやすい 0%とした．堤体材料には珪砂 6 号を用い，締固め度 Dc=90%とした．GRS において用いるジオグリッドとして，ハイメッシュ（開口率 A_p=68%，目合い 1cm 四方，前田工繊㈱製）を用いた．被覆工には，コンクリートと同比重のアルミパネルを用い，パネル間の隙間は防水スポンジテープとグリスを用い遮水させた．

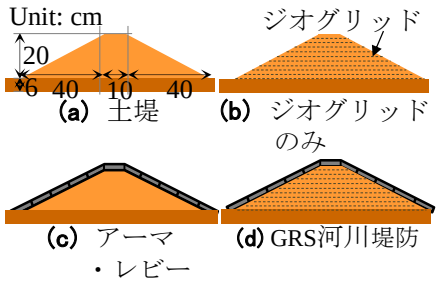


図３　模型堤防の概要

（３）計測方法：本実験では，①堤体側面・上面・斜めからのビデオ撮影により浸潤面進行・堤体侵食状況，②裏のり尻部に設置された計量ボウルを用いて浸透流量，③固形染料（ウォーターブルー）による局所的な流線可視化及び，見かけの浸透速度の計測をした．

キーワード：堤防，GRS，浸透能，水みち，補強工法
連絡先：〒278-8510　千葉県野田市山崎 2641　TEL：04-7124-1501（内線 4069）FAX：04-7123-9766

３．実験結果と考察

（１）単位幅流量と堤体面積残存率の時間変化：定水位・変水位浸透実験を対象として，水位と単位幅流量，堤体面積残存率（＝堤体断面中の残存面積／初期断面積）の時間変化を**図４**に示す．変水位実験の開始時刻は，GRS 河川堤防では実験開始から t=300min とし，その他の 3 ケースでは t=120min としている．まず，単位幅流量に着目すると，いずれのケースも初期段階の定水位実験では時間と共に増加し，やがてほぼ定常状態になっている．また，上昇中及び定常状態における単位幅流量の大小関係は，アーマ・レビー，GRS 河川堤防＜土堤，ジオグリッドのみとなっており，堤防表面に被覆工を敷設することにより，堤体表面上の浸透可能面積が大幅に減少するためである（アーマ・レビー，GRS 河川堤防では，実際には基礎地盤の上流端からのみ浸透）．　一方，堤体面積残存率は，土堤＜ジオグリッドのみ＜アーマ・レビー，GRS 河川堤防の順になっている．特に，前者 2 ケースでは，変水位実験時の動水勾配が大きいときには，大規模なすべり破壊が進行し，やがて決壊した．しかしながら，土堤よりもジオグリッドのみの方が侵食速度が遅く，決壊までの時間をより長く稼げている．また，アーマ・レビーや GRS 河川堤防では全く侵食が発生しなかった．

図５は各ケースにおける同じタイミングにおける裏のり面の様子を示す．ここでは，変水位実験開始から 100 分後を選定している．これより，土堤では侵食が天端付近まで進行しているが，ジオグリッドのみでは侵食が裏のり尻付近に留まり，ジオグリッドにより侵食が抑制されている．また，アーマ・レビー，GRS 河川堤防では侵食が全く見られなかったものの，アーマ・レビーでは裏のり尻の被覆工の浮き上がりが見られ，一方，GRS 河川堤防ではそのような現象は生じなかった．裏のり尻部の堤体土が飽和して膨張したため被覆工が変位したものと推察され，アーマ・レビーでは抑えられなかった被覆工の変位を GRS 堤防では抑制できているものと考えられる．

（２）染料による流れの可視化： GRS 河川堤防内部の流況を調べるために，定水位実験時 t=45，60min における GRS 河川堤防側面からの染料の様子を**図６**に示す．ここで，染料を投入し始めた時刻は t=41.5min のときである．これより，表のり尻部では，染料が堤体内部に拡散すると同時に，被覆工に沿って進む流れが確認された．また，懸念されるジオグリッドに沿った水みちは確認されなかった．ただし，これは土層厚さが十分な大きさでない影響もあるため，今後の課題である．

（３）考察：GRS 堤防において浸透流量が抑制される理由は，ジオグリッドと土のかみ合わせの良さ及び，ジオグリッドの厚みにより相対的に締固め度が大きくなることによると考えられる．このことは，土層の変形が生じない透水実験でも確認された [3]．また，変水位実験では，土堤とジオグリッドのみでは流量の上昇と共に，大きな変動が見られるのに対し，アーマ・レビーと GRS 河川堤防では流量の上昇が非常に緩やかであった．この要因としては，流量変動は，裏のり面の侵食と連動していることによると考えられる．

参考文献：1)国交省関東地方整備局：第二回鬼怒川堤防調査委員会資料，2015，2)倉上ら，土木学会第 71 回年次学術講演概要集，2016，3)藤井ら，土木学会第 71 回年次学術講演概要集，2016.

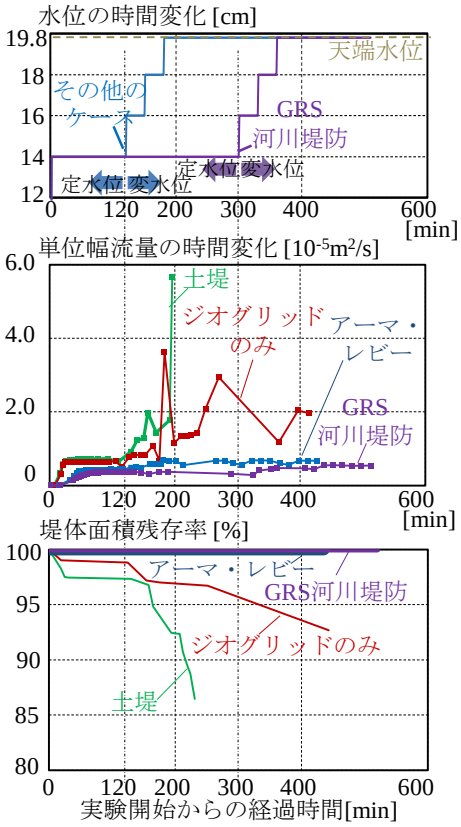
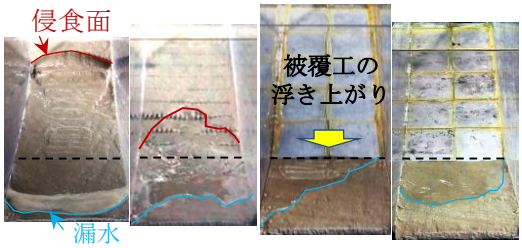
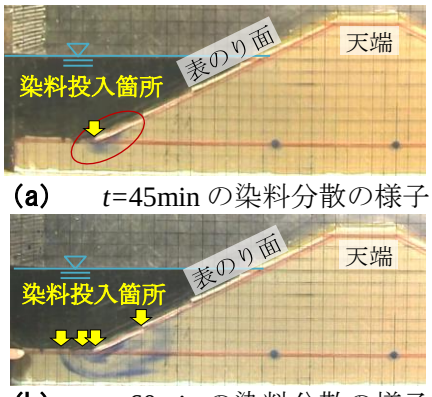


図４　堤外地側水位と単位幅流量，堤体面積残存率の時間変化



(a) 土堤　(b) ジオグリッドのみ　(c) アーマ・レビー　(d) GRS 堤防

図５　変水位実験時の裏のり面の様子（GRS，その他：t=400，220min）



(a)　t=45min の染料分散の様子

(b)　t=60min の染料分散の様子

図６　被覆工に沿った流線の様子（t=45min，60min）