

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560599

研究課題名(和文) 豪雨・洪水時の河川堤防の安全性確保に関する研究

研究課題名(英文) On safety evaluation and remedial measures for damages of river banks during heavy rainfall and flooding

研究代表者

奥村 哲夫 (OKUMURA, Tetsuo)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70078913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：豪雨・洪水により発生する河川堤防の崩壊メカニズムを解明するために、堤防模型に遠心加速度を作用させ、実物と相似な挙動が期待できる遠心載荷模型実験及び数値解析を行った。河川水位の上昇や降雨によって堤防内の土粒子の隙間に水が補給され、堤防が不安定になる要因を、土質や斜面の形状、降雨の強さ、水位の上昇時間等を変えて実験・解析を行い、堤防の崩壊メカニズムの一部を解明することができた。そして、崩壊に対する対策工法について基本的事項を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to study the mechanism of slope failure of river banks during heavy rainfall and flooding and to propose appropriate and definite measures to prevent these damages, some centrifuge model tests and numerical analyses were conducted in this project. Centrifuge tests were done by considering various situations associated with the dimensions and material properties of banks, the strength of rainfalls and the rate of water rise by flooding. The influential factors on slope instability due to saturation and softening of fill materials were fully examined together with the results of numerical analyses, and the mechanism of bank failure was broken down to discuss and propose definite measures against these damages.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：河川堤防 豪雨・洪水 崩壊メカニズム 遠心模型実験 FEM解析

### 1. 研究開始当初の背景

近年、堤防の決壊によって大水害が発生している。しかし、既存の堤防の安全性を高めるための破壊メカニズムの解明、安全性評価手法の確立、堤防の強化・補強工法など、豪雨・洪水時の河川堤防の安定性評価に関する研究は十分されているとは言い難い。そこで、豪雨・洪水を想定した堤防の安全性を、応力の相似性を満たし効率的な実験が可能である遠心载荷装置を用いて、その破壊メカニズムや強化・補強工法等を調べると同時に、実験モデルに対する解析を通して崩壊現象に関する要因が解明できれば、河川堤防の安全性を確保することが可能となる。

### 2. 研究の目的

3年間の研究の目的は、河川堤防の飽和域形状と土質・斜面形状等の関係を遠心模型実験及びFEM飽和・不飽和浸透解析から検証する。河川水の水位上昇速度と堤防内飽和域の逐次拡大との関係を実験的に解明する。堤防内部及び基礎部にドレーン工を設置した実験を行い、適切なドレーンの設置位置・規模等を明らかにする。等である。なお、東日本大震災を受けて、地震により発生した堤防内のクラックが洪水時の浸潤面変動に及ぼす影響を解明することを目的とした実験を実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 遠心载荷模型実験

実験模型は、幅510×高さ460×奥行200mm(三次元実験では奥行410mm)のアルミ製土槽内に作成し、模型形状を、遠心場の等加速度線が円弧を描き、遠心力の作用方向が回転軸を中心として半径に沿った形となることから、基礎及び堤体底面の形状を遠心半径に等しい円弧とし、斜面を対数らせん線で近似して重力場と同一勾配となるようにした。

間隙水圧計及び変位計は、12×8t及び14×23×75Lの小型のものを使用した。

降雨浸透実験では、雨滴の結合やコリオリ力の影響によって斜面上への均一な降雨強度を得ることができないため、275本のガイドパイプを降雨発生装置に固定し、且つ降雨発生装置内の水深を変化させることにより、降雨強度の調整が可能な独自に開発した装置を用いた。なお、使用した遠心载荷装置は、有効半径1.36m、容量15g tonであり、遠心加速度を全ての実験において30gとした。

#### (2) 試料及び模型の作成

実験目的によって異なるが、主として、堤体材料は礫質砂、透水層及びドレーンは砂(珪砂6号及び1号)、難透水層は粘土を用いた。模型の作成は、所定の密度となるよう数層に分けて突棒で締めて行った。

### 4. 研究成果

(1) 河川水位の上昇に伴う堤体内飽和域の逐次拡大と浸潤面低下法に関して、透水性基

礎地盤上(厚さ75mm、 $k=8.97 \times 10^{-4}$  cm/s)に堤高 $H=150$ mm、斜面勾配 $i=1:1.4$ 、奥行 $D=200$ mmの模型(礫質砂、 $k=6.50 \times 10^{-7}$  cm/s)を作成し、洪水位(0.8H)までの水位上昇時間 $t$ を3ケース変化させて遠心模型実験を行った(基礎と堤体の透水係数比=1380)。 $t=212$ s(実物換算53h)及び $t=24$ s(6h)のほぼ同一水位における堤体内の浸透状況を撮影した写真から両者の浸潤面形状を比較すると、水位上昇速度の遅い場合は川表から川裏側全体に亘って浸潤面が上昇しているが、上昇速度の速い場合は、水位の上昇に比較して堤体内への浸透が遅れるため川裏に向かうほど浸潤面が低く現れることが分かった。

この洪水時に発生する浸潤面の上昇は、堤防のすべりや浸透破壊の原因となる。そこで、堤体内に設置したドレーンの効果を調べることを目的に、堤体と基礎地盤を同一材料(シルト混じり砂、 $\rho_s=1.56$  g/cm<sup>3</sup>)として、ドレーンを裏法尻及び堤体内に作成し、水位上昇時の浸潤面の拡大状況を調べた。堤体及び基礎地盤下部に埋設した間隙水圧計の値から浸潤面を定め、両者の浸潤面形状を比較すると、堤体内の堤軸下流側に鉛直ドレーンを設置する場合が最も効果的であることが分かった(図-1)。また、高水位が長時間継続した場合に対応する定常浸透時の流線網からも堤体内鉛直ドレーンの設置が最良であった。しかし、実際の施工を考えると、形状・規模等の更なる検討が必要である。

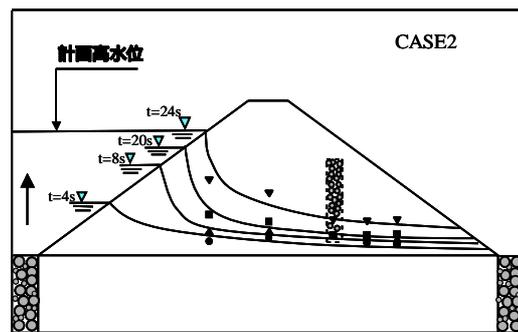


図-1 水位上昇時の浸潤面変化

(2) 降雨に伴う浸潤面の上昇について、上記(1)のドレーン設置模型において、高水位・定常浸透状態の下で、降雨強度 $r$  16~52mm/hの降雨を川裏側斜面に与える遠心実験を行った。この結果、ドレーン形状・設置位置及びドレーンの有無に関わらず、降雨による浸潤面の上昇は実物換算で概略60mmあった。この値は、本実験の堤高4.5mに対して1.3%であり、浸潤面上昇に及ぼす降雨の影響は、本実験の場合、無視できるほど小さいと言える(図-2)。

また、通常時の河川堤防を対象に、貯水無の状態での模型堤体( $H=165$ mm、斜面勾配1:2)の斜面上に降雨を与え、堤体内の飽和域の成長過程を調べた。降雨強度 $r$ と飽和透水係数

k の比、 $r/k < 1.0$  の範囲で  $r/k$  を変えて実験を行ったが、いずれの実験も斜面表面から侵入した雨水によって斜面内の飽和域が徐々に高さを増しながら斜面内部へ進行し、 $r/k$  値が大きいほど飽和域がより高く、速く成長し、この結果は、別に行ったガラス球と潤滑油を用いた 1G 場の結果と一致することが確認された。

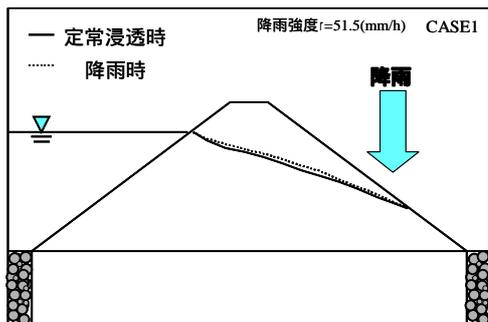


図-2 降雨による浸潤面の変動

(3) FEM 飽和・不飽和浸透解析による降雨時の斜面崩壊現象に関する要因分析について、厚さ一定の表土層斜面が降雨を受ける時の浸透挙動の特性を、関連するパラメータを幾つか変えて調べた。この結果、降雨により土層内に浸入した雨水は岩盤斜面に沿って下降し、水勢が一旦低下した後、法先にて土層外に流出する様相を示すこと、斜面内では時間の経過とともに飽和域が順次拡大し、やがて排水と貯留が平衡して水位の上昇速度が鈍ること、この飽和域の形成や法先付近の水面上昇に対し、勾配の緩急の影響は小さいこと、降雨浸透に支配的な影響を及ぼす因子は降雨強度であり、土層の透水係数の数倍の変化は現象に殆ど影響を与えないこと、などが知れた。降雨に伴う表土層のすべり破壊については、表土層の底面に生じられる間隙水圧は、降雨開始当初は斜面に沿いほぼ一定であるが、時間経過に伴い斜面下部では飽和域が拡大するため水圧値が高まること、斜面に沿うすべり安全率は時間経過に伴って単調に減少するが、無降雨時の安全率からの低下度合でみると、その変化は斜面勾配の緩急に関わらずほぼ一定の傾向を示すこと(図-3) 無限斜面解による安全率と FEM で求めた応力解に基づく安全率を比較すると、前者が 15%~20%小さく算定され、無限斜面解を適用すれば安全側の設計が確保されること、などが知れた。表土層のすべり破壊に対する土層厚の影響を調べた結果では、表土層底面に沿う浸透の様相は土層厚の影響をほとんど受けず、法先の浸出面高や水流の集中度合に若干変化が現れる程度であること、土層幅が薄いとすべり安全率が低下する傾向にあるが、時間が経過し間隙水圧が高くなると、その低下度合が急激になること、法先の三角形部のすべり出し破壊も、土層厚が薄いほど先端の浸潤・水圧の影響を大

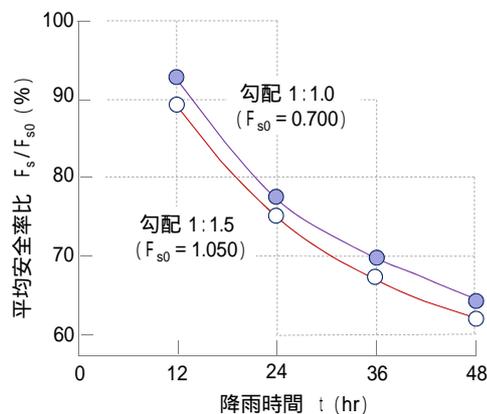


図-3 不安定化の進行 ( $F_s$ : 各時刻の平均安全率、 $F_{s0}$ : 無降雨時の安全率)

きく受けて安全性が低下すること、降雨開始当初は法先のすべり出し破壊より一様土層のすべり破壊が卓越するが、時間の経過とともに両破壊形態の均等な出現が想定されること、などが知れた。

また、降雨による表土層の物性変化や降雨時の初期状態などの影響については、表土層形状として、斜面勾配と斜面高の影響を調べるため、上記の結果を補間する形で幾つかの計算を追加した。その結果、降雨強度が同じであれば、飽和域の形成状況、したがって斜面内の間隙水圧の発生過程は、勾配や高さにはほとんど影響を受けないこと、岩盤面に沿うすべり破壊安全率の絶対値は斜面が急なほど小さくなるが、無降雨時からの安全率の低下傾向は斜面勾配にほぼ無関係であること、ただし、斜面高が大きいほど安全率の平均化に際し局所安全率の低い帯片を取り込む割合が多いため、不安定化が緩む(安全率の低下度合が小さい)傾向が見られること、などが知れた。表土層の初期飽和度(降雨前の湿潤状態)の影響については、初期飽和度が高いほど、降雨の初期段階で法先近傍での飽和域の形成(浸潤面の高まり)が速いこと、ただし、時間経過に伴って飽和度の影響が薄れ、浸潤状態が一定値に漸近すること、すべり安全率の変動も、斜面内の水圧値の特性と類似しており、降雨開始直後は初期飽和度による影響が大きい、時間経過とともに影響が薄れる傾向が見られること(図-4)などが判明した。降雨強度  $r$  と表土層の透水係数  $k_s$  の関係については、法先における浸潤面の発達や水圧値は、 $r$  値が大きく、また  $k_s$  値が低くなるにしたがって、変動が小さくなること、ただし、その変動傾向は  $r$  値や  $k_s$  値の単独の変化において様相が異なり、影響を一律に論じることができないこと、また、両者の比率 ( $r/k_s$ ) も一つの指標値であるが、本研究で吟味した範囲では、現象の統一的な整理・解釈には的確に使用できないこと、などが知れた。法先の三角形土塊の浸透破壊(岩盤面に沿うすべり出し破壊)について、破壊領域の範囲を変えて吟味した結果で

は、破壊領域を小さく想定するほど、特に降雨初期において安全性が低く評価されるが、時間経過に伴って領域の影響は薄れ一定値に漸近すること、粘着力を考慮すると安全性が比例的に増加するが、その変動傾向は、最先端の場合を除いて破壊領域の大きさに依存しないこと、浸透破壊については斜面勾配の影響が見られ、領域を広く想定するほど勾配の影響が敏感に現れること、表土層の幅が広いほど浸透破壊の安全性は向上するが、その変動傾向は、破壊領域を広く想定するほど敏感になること、などが判明した。芝などの透水性が低い材料（難透水性層）によって斜面表面が被覆される場合の降雨浸透挙動を調べた。この結果、難透水性層の存在により雨水の浸透が制限されるため、飽和域の形成が遅れ、法先の飽和域の盛り上がりや斜面に沿う浸潤面の高さが相当低下する様子が見られた（図-5）。その低下度合いは、難透水層が表土層の1/8程度の厚さでも、均質斜面と比較して20~30%程度、場合によっては（斜面内の場所や降雨開始からの経過時間にも依るが）40~50%程度に至ることが知れた。

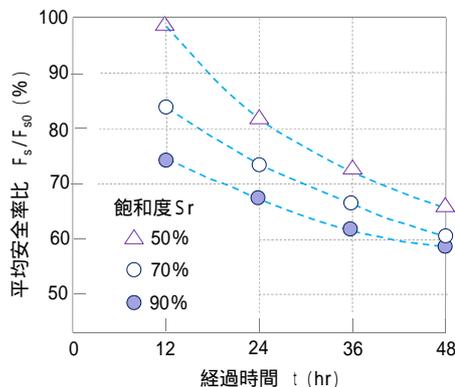


図-4 不安定化の進行(初期飽和度の影響)

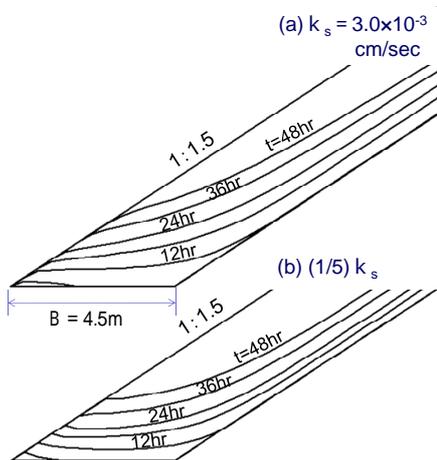


図-5 飽和域の形成( a : 難透水層無、  
b : 難透水層あり)

(4) 堤体底面に作用する揚圧力について、堤高  $H = 150\text{mm}$  (礫質砂、 $k = 6.50 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ )、斜面勾配 1:1.4、基礎高さ 75mm (砂、 $k = 8.97 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ )、奥行 200mm の堤防模型を作成し、川裏側法尻部に水平ドレーンを設置しない場合 (実験A) と設置した場合 (実験B、ドレーン幅 120mm、厚さ 20mm、奥行 160mm) について遠心実験を行い堤体底面に作用する揚圧力の相違を調べた。この結果、堤体底面の間隙水圧が上昇して一定となるまでの時間は、水位上昇時間が 27 秒 (実物換算 6.8 時間) において約 300 秒 (75 時間) であった。また、高水位 (HWL、定常状態)、高水位に対して水位 1/3 (1/3HWL) および水位 2/3 (2/3HWL) における堤体底面 ~ の間隙水圧  $u$  を同一時刻における各水位の貯水圧力  $p$  で除して正規化した  $u/p$  の分布から、何れの水位においても水平ドレーンを設置した実験Bの  $u/p$  値はドレーンを設置しない実験Aと比較して、基礎部全域において小さくなっており (水位:HWL では最大約 1/2)、ドレーンを設置することによる揚圧力の低減効果を確認した (図-6)。さらに、貯水開始以降の天端の沈下量は、測定精度に問題が残されるものの、実験Aで概略 0.02mm (実物換算 0.6mm)、Bで 0.03mm (0.9mm) であり、水位上昇に伴う沈下は本実験の場合極めて小さいと言える。

(5) 川裏側難透水性地盤の揚圧力対策について、厚さ 40mm の透水層 (砂、 $k = 8.97 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) 上に難透水性地盤 (厚さ 35mm、粘土、 $k = 4.00 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ) を作成し、堤高  $H = 150\text{mm}$  (礫質砂、 $k = 6.50 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ )、斜面勾配 1:1.4、奥行 200mm の半断面模型堤防に対し、堤体川裏側に水平ドレーンが無い場合 (実験1)、水平ドレーンと堤体法尻下部の難透水地盤に鉛直ドレーンを設置した場合 (実験2) 及び法尻先端部の難透水地盤に鉛直ドレーンを設置した場合 (実験3) について遠心実験を行い、ドレーンの設置位置と揚圧力の関係

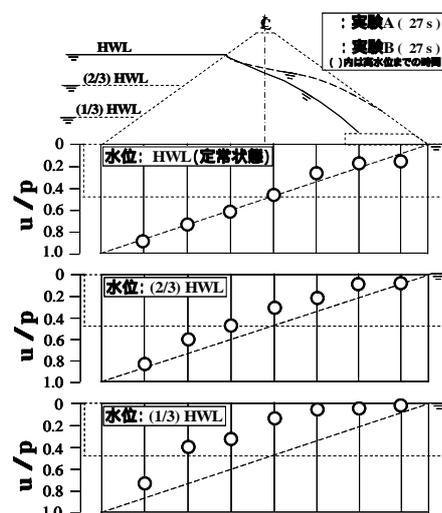


図-6 各水位における間隙水圧分布

を調べた。この結果、鉛直ドレーンの無い場合（実験1）と鉛直ドレーンを設置した場合（実験2、3）の比較から、ドレーンを設置した結果は全ての位置で間隙水圧が低めに現われており、揚圧力対策としてのドレーンの効果を確認した。また、鉛直ドレーンを設置した実験2と3の比較から（貯水位はほぼ同一）鉛直ドレーンの設置位置は堤体法尻下部が最適であることを確認した

（6）揚圧力低減のための鉛直ドレーンの有効設置間隔について、上述の実験結果をもとに、堤体川裏側法尻部に水平及び鉛直ドレーンを設置して、有効なドレーン間隔を見出す目的で、三次元遠心実験を行った（模型奥行410mm）。ドレーン間隔は400mm（実物換算  $S = 12m$ ）、200mm（ $S = 6m$ ）及び133mm（ $S = 4m$ ）変化させた。図-7は実験模型の概略である。実験結果から、 $S=4, 6$ 及び12mについて、法尻先端部のA-A断面と法尻から4.8m離れたC-C断面の間隙水圧から求めた圧力水頭  $h_p$  の分布形状に着目すると、法尻部のA-A断面では、何れのドレーン間隔においてもドレーン間の中央で高く、ドレーンに近づくほど低く現れ、上に凸の形状を示し、ドレーンの影響が比較的明瞭に現れるが、この傾向は法尻から離れたC-C断面ではA-A断面と比較してさほど明瞭でなく、ドレーンの影響が薄らぐことが分かった。また、ドレーン間の中央部 - 断面の圧力水頭  $h_p$  及び2箇所を設置した変位計A、Bから求めた膨張量  $L$  とドレーン間隔  $S$  の関係から、 $h_p$  の値にバラツキが認められるが、ドレーン間隔が広がるのに伴って  $h_p$ 、 $L$  共に増大傾向を示す（図-8）。さら

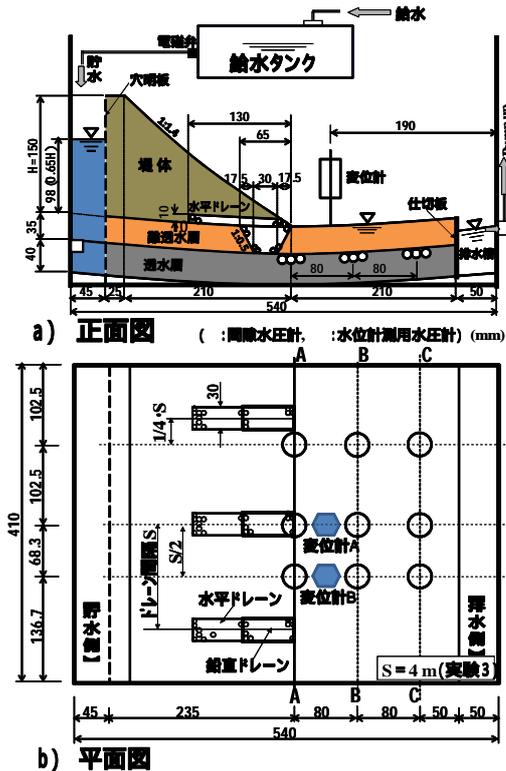


図-7 実験模型の概略

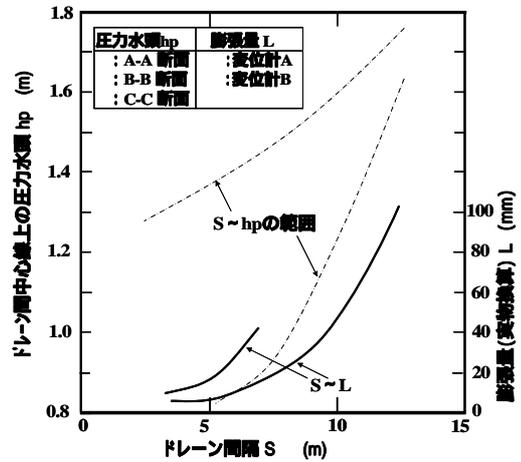


図-8 ドレーン間隔と圧力水頭、膨張量

に、膨張量  $L$  と変位計設置位置近傍の間隙水圧（水圧計 -、-）を平均して求めた平均圧力水頭  $h_p'$  の関係を整理した結果、難透水層の有効土被り圧  $\gamma'_v$  と透水力  $u_f$  が一致する圧力水頭が概略 1.75 であるに対し、実験では  $h_p' = 1.3$  あたりから比較的急激な膨張が見られ、 $L$  と  $h_p'$  の間に何らかの関係が存在する、等の知見を得ることができた。

（7）堤軸に直交する潜在クラックが浸潤面変動に及ぼす影響について、厚さ 75mm の基礎に作成した堤高  $H=150mm$ （実物換算 4.5m）、天端幅 25mm、斜面勾配 1:1.4、堤頂長 410mm（12.3m）の模型堤体に対して、高水位（0.7H）状態で、上流側斜面内に遠心力作用下で堤軸に直交する形でクラックを発生させ、堤体基礎部に埋設した間隙水圧計の測定値から下流側の浸潤面高さを算出した（30G）。この結果、上流側天端から深さ 115mm（3.5m）の範囲で発生したクラックによる浸潤面高さはクラック発生場所近くで 5% 程度の上昇であるが、クラック発生個所から堤軸方向に 350mm（10.5m）離れた場所ではほとんど変化がなく、この傾向は、深さ 80mm（2.4m）の範囲で発生させたクラックにおいても認められ、浸潤面の変動に及ぼす堤軸方向への浸透は無視できるほどである、等が明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

成田国朝、降雨時の浸透挙動と斜面の不安定化について(その2) 愛知工業大学研究報告、査読無、第48号、2013、pp.241-250

日高和彦、木村勝行、奥村哲夫、堤体内浸透流に対する Casagrande, A. の方法の適用性、愛知工業大学研究報告、査読無、第47号、2012、pp.301-309

成田国朝、降雨時の浸透挙動と斜面の不安定化について、愛知工業大学研究報告、査読無、第47号、2012、pp.281-290

〔学会発表〕(計5件)

奥村哲夫、木村勝行、成田国朝、中村吉男、河川堤防の揚圧力対策に関する三次元遠心模型実験、土木学会第68回年次学術講演会概要集、-193、pp.385 386、2013年9月4日~6日、日本大学

奥村哲夫、木村勝行、成田国朝、田口直哉、河川堤防の揚圧力対策に関する遠心模型実験、土木学会中部支部平成24年度研究発表会講演概要集、pp.221 222、2013年3月20日、愛知工業大学

奥村哲夫、木村勝行、成田国朝、河川堤防に作用する揚圧力に関する遠心模型実験、第47回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.931 932、2012年7月14日~16日、八戸工業大学

奥村哲夫、木村勝行、成田国朝、河川堤防の揚圧力に関する遠心模型実験、土木学会中部支部平成23年度研究発表会講演概要集、pp.185 186、2012年3月8日、信州大学

日高和彦、木村勝行、奥村哲夫、堤体内浸透流に対する Casagrande, A. の方法の適用性、土木学会中部支部平成23年度研究発表会講演概要集、pp.187 188、2012年3月8日、信州大学

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥村 哲夫 (OKUMURA, Tetsuo)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70078913

(2) 研究分担者

成田 国朝 (NARITA, Kunitomo)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：90064956

木村 勝行 (KIMURA, Katsuyuki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70064954