

## 正面越流破堤に関する模型実験の縮尺の違いによる影響

INFLUENCE OF SCALE TO REPRODUCIBILITY OF  
SMALL HYDRAULIC EXPERIMENTS ON CROSS-LEVEE BREACH BY OVER FLOW

北見工業大学工学部土木開発工学科  
北見工業大学工学部社会環境工学科  
北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻  
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

学生員 風間 順一 (Jyuniti Kazama)  
正会員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)  
学生員 山本 昌慧 (Masato Yamamoto)  
正会員 島田 友典 (Tomonori Shimada)

## 1. はじめに

近年、台風や集中豪雨による河川の氾濫が多発しており、なかでも堤防決壊による水害は甚大であり、過去の水害事例ではその8割以上が越水に起因するものであるとされている<sup>1)</sup>。また、日本は河川の氾濫原に人口、資産が集中しているため、破堤による被害は大きくなるものと予想される。このことから、越水破堤のメカニズムを把握することが必要となる、しかし集中豪雨は突発的に発生するため、解析に必要なデータが十分に得られているとは言えない状況にある。河川堤防の決壊メカニズムの把握については水路実験や数値解析などが行われている<sup>2)3)</sup>。しかしながら、実スケールの破堤実験を室内水路で再現した研究は少ない。なかでも、同一の破堤現象を様々な縮尺で再現し比較研究した研究は少ない。

国土交通省北海道開発局と(独)土木研究所寒地土木研究所では、2008年度に北海道帯広市近郊の十勝川千代田実験水路において、3次元越水破堤メカニズム(破堤のきっかけ、拡幅拡大過程、洗掘穴の形成過程など)の時系列での把握を目的に実物大実験(以下、「実スケールの実験」)の正面越流による越流破堤実験<sup>4)</sup>が行われた。また、2010年に渡邊ら<sup>5)</sup>によって千代田実験の1/50スケールの室内実験による再現性の検討が行われた。本研究では、1/50とは異なる縮尺すなわち1/70スケールで室内実験(以下、「1/70スケールの実験」)を行い、実スケールの実験、1/50スケールの実験との比較検討を行うものである。

## 2. 実験概要

(1) 千代田実験水路概要<sup>4)</sup>(実スケールの実験)

2008年8月15日に千代田実験水路において横断堤破堤実験が実施された。千代田実験の平面図を図-1に、千代田実験の堤体材料、また堤体材料を室内スケールに置き換えたものを図-2に示す。図-2において、「1/70に補正」、「1/50に補正」とは千代田実験堤体材料を1/70スケール、1/50スケールに縮尺したもの、「粘土シルト分を除外」とは各スケールに縮尺したものから0.075mm以下の細粒分を取り除いたものを示している。

河床勾配 1/518, 供給流量  $4\text{m}^3/\text{s}$ , 越水時の河川水の貯留量は  $38,000\text{m}^3$  であり、高さ 2.5 m, 天端幅 2 m, 法勾配 2 割の横断堤を水路全幅(下幅 30 m, 上幅 40 m)において造成している。また、破堤のきっかけとなる切欠は天端中央部に幅 5 m, 深さ 0.05 m で設けられている。

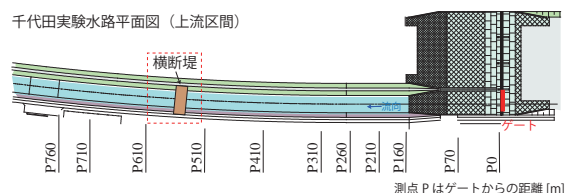


図-1 千代田実験平面図

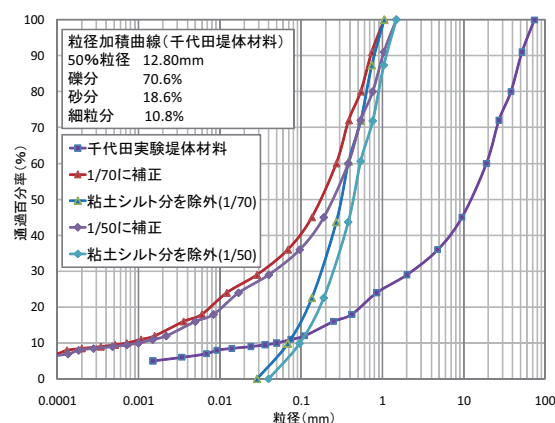


図-2 実スケールの粒度分布を室内スケールに相似

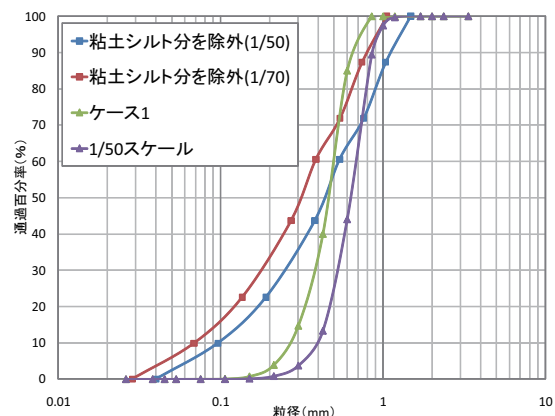


図-3 室内実験堤体材料

## (2) 室内実験水路(渡邊)概要(1/50スケールの実験)

渡邊ら<sup>5)</sup>の研究では縮尺を 1/50 としており、河床勾配 1/500, 供給流量は  $210\text{cm}^3/\text{s}$ , 越水時の貯留量は  $0.3838\text{m}^3$  であった。高さ 5cm, 天端幅 4cm, 法勾配 2 割で造成している。河床材料には 4 号珪砂を用い、堤体材料は東北珪砂 4 号, 5 号の混合砂を使用し様々な粒徑分

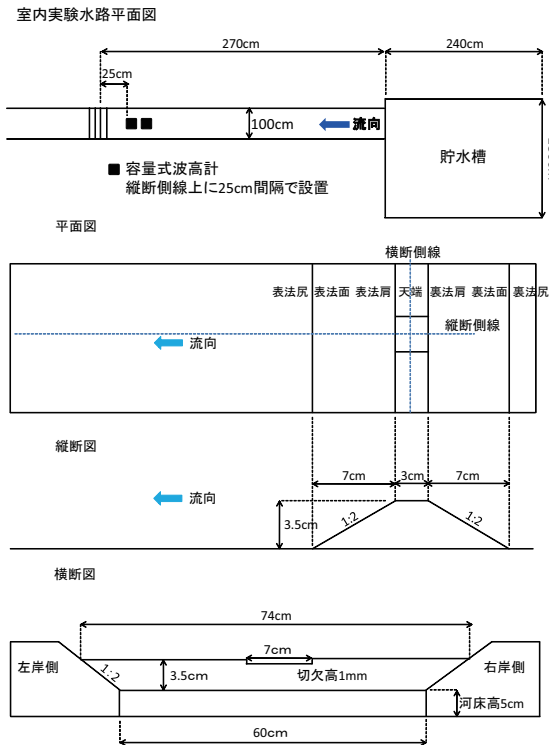


図-4 室内実験概要

布を設定している。

その中で、実スケールの実験を最も良く再現した砂の配合比は、4号:5号=1:1 であるとしている。この時の粒径加積曲線を図-3 に示す。なお、この粒径加積曲線は「粘土シルト分を除外 (1/50)」の 70%粒径が等しくなるように設定されたものである。

### (3) 室内実験概要 (1/70 スケールの実験)

千代田実験水路で行われた実スケールの実験<sup>4)</sup>を室内実験で再現するにあたり、渡邊ら<sup>5)</sup>は縮尺を 1/50 としして実験を行っているが、本研究ではより小規模な実験施設での再現性の確認のため、縮尺を 1/70 と設定した。その概要を図-4 に示す。

河床勾配 1/500、供給流量は 105.3cm<sup>3</sup>/s、越水時の水の貯留量は 0.1110m<sup>3</sup> とした。高さ 3.5cm、天端幅 3cm、法勾配 2 割で堤体を造成している。

越水時の貯留量を 1/70 縮尺にするため、貯水槽の一部 (縦 85cm、横 128cm) に貯水されないようにしている。また、河床材料には東北砂 4 号を、堤体材料は東北砂 5 号、6 号の混合砂にて堤体を造成した。なお、実スケールの土質を室内スケールに置き換えた場合、粘土、シルト質の土が占める割合が多くなり、再現性に影響を及ぼす可能性があるため、1/50 スケールの実験と同様、粘土、シルト質を除外した粒径加積曲線を描き、これを目安として砂の配合比を決定した。詳細は後述する。

堤体は砂の混合砂に水を加えて締め固め造成している。含水比、締め固め度の算定は、1/50 スケールの実験の条件を参考に設定した。堤体の造成後、動画から拡幅過程を読み取るため、図-5 に示すように 2cm 間隔でメッシュを描いた。

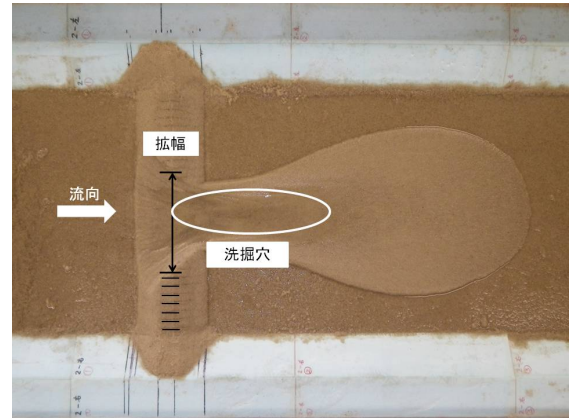


図-5 室内実験状況

表-1 室内実験堤体材料配合比

RunNo.	4 号	5 号	6 号	Dm(平均粒径)
ケース 1	0	3	1	0.464(mm)
ケース 2	1	1	0	0.629(mm)
1/50 スケール	1	1	0	0.629(mm)

### 3. 実験条件

#### (1) 測定項目

越流量、破堤幅の拡幅過程を時系列で把握する必要がある。越流量については、堤体より上流側の水位を容量式波高計を用いて計測し、式 (1) より推定した、

$$Q_{out} = Q_{in} + A \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{out}$  は堤防からの越流量、 $Q_{in}$  は供給流量、 $A$  は堤体より上流側の水路表面積、 $\Delta h$  は減少した水位、 $\Delta t$  は計算時間刻みである。

破堤幅の拡幅過程は、図-5 に示している拡幅の長さを上方より撮影した動画から 1 秒間隔で読み取り、破堤幅の時間変化とした。また、実験終了時の洗掘穴の形状を走行台車式砂面計測機を用いて計測した。

#### (2) 河床材料の設定

河床材料についても 1/70 とするため、1/50 スケールの実験と同様の考え方で砂の配合比を 5 号:6 号=3:1 としたものをケース 1 とした、また、比較のため、1/50 縮尺の実験と同じ砂の配合比すなわち、4 号:5 号=1:1 としたものをケース 2 とした。なお、ケース 1 及びケース 2 の粒径加積曲線を図-3 に、砂の配合比を表-1 に示す。なお、比較のためにどちらも 1/50 スケールの実験の値を示している。

### 4. 実験結果

#### (1) 拡幅拡大時の状況

実験開始から上流に貯留されている水により堤体と河床が湿潤する。流入水が切欠部を越えると、裏法面を裏法尻に向かって滲筋を形成しながら下刻する。流入水が裏法尻に到達すると、天端部の拡幅拡大、洗掘が開始し、破堤開始から拡幅幅が 10cm 程度になるまでは浸食

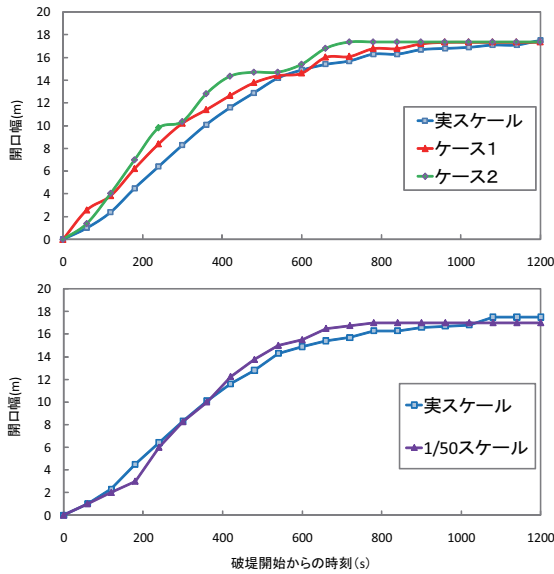


図-6 拡幅拡大過程

による砂粒状の崩壊が主であったが、それ以降は、砂塊状の崩壊が断続的に発生しながら拡幅が拡大していった。特に、減水期にこの現象がみられたことから、減水期に堤体下部が浸食され、堤体上部の砂が自重に耐えきれなくなり、崩壊したと考えられる。

## (2) 拡幅拡大過程の比較

拡幅拡大過程を実スケール実験と室内実験で比較を行う際には、相似則を用いて時間の縮尺を調整することが必要である。本研究では、流れについてはフルードの相似則を用い、拡幅過程については掃流力相似則に従うものとした。ここで、拡幅過程を土砂移動として捉える場合、掃流力と限界掃流力の両者を考慮する必要がある。しかし、破堤時には限界掃流力に比して掃流力が十分大きいことから、ここでは無次元掃流力のみ等しくなるように設定することとした。以上を踏まえ時間縮尺は式(2)で表される。

$$t_r = L_r^{1/2} = 1/8.367 \quad (2)$$

ここで、 $t_r$  は時間縮尺、 $L_r$  は幾何縮尺である。各ケースの拡幅拡大過程を、実スケールの値にそろえて図-6に示した。実スケールの実験及び1/50スケールの実験のグラフは滑らかに拡幅が拡大しているが、今回行った1/70スケールの実験のグラフは階段状に拡幅が拡大している。これは、拡幅を読み取る際に亀裂が生じた地点までを拡幅幅としているため、天端部に亀裂が生じた後、その地点より堤体中央側の砂が浸食される間、拡幅幅は変動していないとしている。そのため、拡幅過程が階段状に表現されたものと考えられる。

なお、いずれの実験においても、最終拡幅幅が17.5m付近の値を示しているのが見て取れるが、最終拡幅幅に到達する時刻が実スケールの実験と比較して、ケース1、ケース2のいずれも早い段階で到達している。

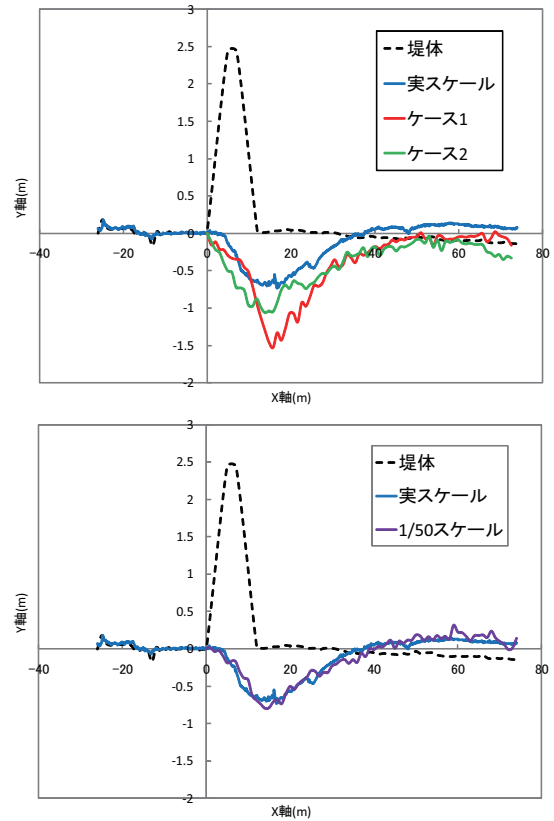


図-7 洗掘穴の比較

## (3) 洗掘穴の比較

洗掘穴の形状を比較したものを図-7に示す。実スケールの実験、1/50スケールの実験と比較すると、今回の1/70スケールの実験は明らかに洗掘が大きい。このことは、実スケールの実験では破堤幅が最終拡幅幅に到達する時点で洗掘穴が50cm程度埋め戻される現象が生じているのに対し、今回の1/70スケールの実験では埋め戻しの現象が生じなかったことが原因と考えられる。

## 5. 考察

ここまで、拡幅拡大過程、洗掘穴の形状による比較を行ってきたが、これらは実験終了後の再現性を検討するものであり、破堤開始時からの再現性を検討するものではない。そこで、渡邊ら<sup>5)</sup>は拡幅拡大過程と同じ時系列データである越流量に着目し、各実験における越流量と拡幅過程の関係を把握するため縦軸に拡幅幅、横軸に越流量をそれぞれ実スケールに変換したものを与えたグラフを作成している。本研究でも同様のグラフを作成し、図-8に示す。

また、洗掘部の堆砂が堤体を構成する材料によるものか上流部からの流砂によるものかを推測するため各実験での越流部上流の無次元掃流力 $\tau^*$ と限界無次元掃流力 $\tau_c^*$ による比較を行った。その結果を図-9に示す。

### (1) Q-B 曲線による考察

1/50スケールの実験結果は実スケールの実験結果を精度良く再現しているが、今回の1/70スケールの実験ではいずれも越流量の最大値が実スケールの値より少



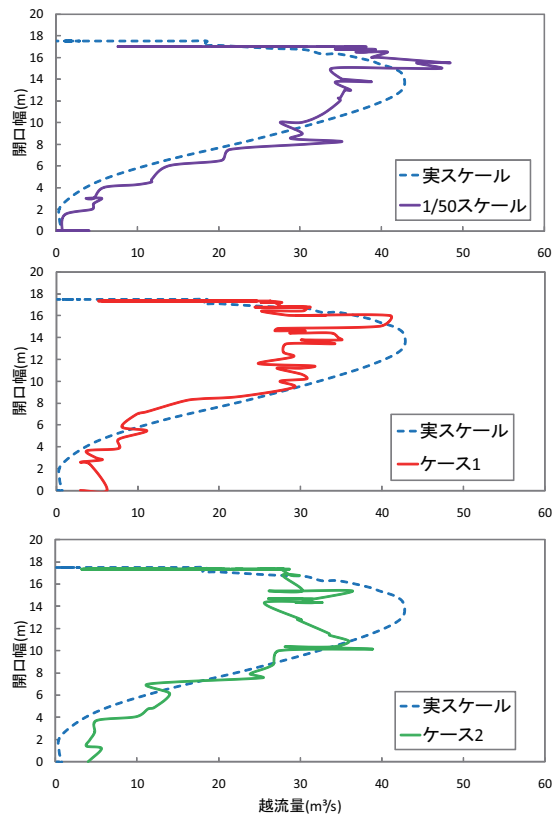


図-8 Q-B 曲線による比較

ない結果となった。このことは、1/50 スケールにおいても若干見られている。この原因として、破堤幅が広がり上流での貯留量が減少し水深が小さくなって、流れについて粘性の影響が表れてきていると考えられる。このことについてはさらに詳細に分析を行う必要がある。

## (2) 再堆砂の考察

堤体直上流部の水位測定地点における  $\tau^*$  の時間変化を示したものが図-9 である。なお、同図には平均粒径の  $\tau_c^*$  も合わせて示している。最終的な洗掘穴の形状が、実スケールの実験結果をほぼ再現している 1/50 スケールでは、破堤現象が平衡状態へと移行する 150 から 200 秒の間の時間帯において、 $\tau^*$  が  $\tau_c^*$  を下回っている。すなわち、洗掘部の洗掘が早期に終結するため、実スケールと近い形状になったといえる。このことはケース 2 でも同様である。ケース 1 では、実験期間を通じて  $\tau^*$  が  $\tau_c^*$  を上回っており、このことが洗掘穴が深くなる要因であると思われる。すなわち、破堤現象が平衡状態へと移行する時間帯になっても、 $\tau^*$  が  $\tau_c^*$  よりも大きいままとなり、洗掘部の砂を流失させ、実スケールより洗掘穴が深くなったものと考えられる。

一方で、洗掘部に着目すると、実スケールの現象は、再堆砂といった現象が生じており、室内実験水路では、再堆砂が見られなかった。いずれのケースも洗掘部の  $\tau^*$  が実スケール実験の  $\tau^*$  をうまく再現していない可能性があり今後それらの検証が必要である。

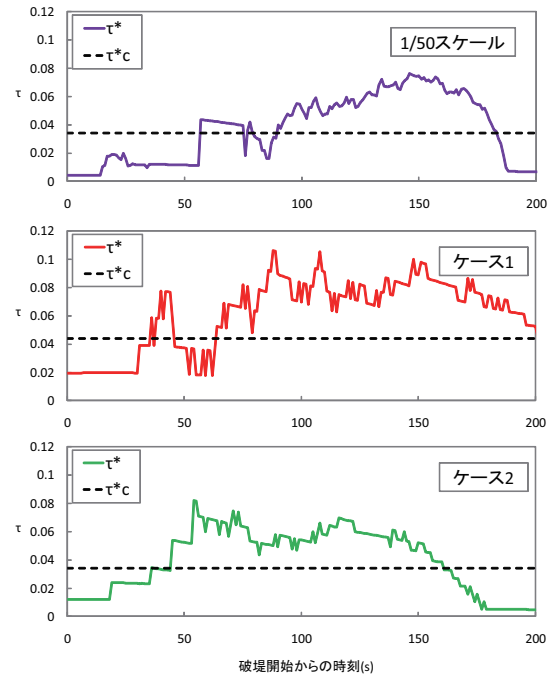


図-9 破堤部上流における無次元掃流力の時間変化

## 6. おわりに

今回の実験では、異なる縮尺に縮小したケース 1, 2 いずれのケースでも貯留量の縮尺を合わせることで、拡幅の再現に成功した。しかし、洗掘穴の再現に至ることはできなかった。また、洗掘穴においてはケース 2 が比較的再現性が高い結果となった。今後、 $\tau^*$  と  $\tau_c^*$  の時系列で把握をすることにより、洗掘の下刻の容易さ、再堆砂の有無を確認する必要がある。

## 参考文献

- 1) 吉川勝秀: 河川堤防学, pp65
- 2) 藤田裕一郎・田村多佳志・松本嘉雄: 河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第 27 号 B-2, 1984.4
- 3) 禪野浩貴・岩崎理樹・清水康行・木村一郎: 越流破堤現象に対する平面二次元モデル適用性の検討, 土木学会北海道支部論文報告集第 66 号, 2009
- 4) 島田友典・渡邊康玄・横山洋: 十勝川千代田実験水路における横断堤を用いた正面越流破堤実験, 寒地土木研究所月報, No670, 2009.3
- 5) 渡邊康玄・山本昌慧・島田友典: 正面越流破堤における室内実験による再現性の検討, 水工学論文集第 55 巻 2010.2
- 6) 島田友典, 横山洋, 平井康幸, 辻珠樹: 十勝川千代田実験水路における水路内縦断堤を用いた越水破堤実験, 寒地土木研究所月報, No.682, pp.15-31
- 7) 島田友典, 渡邊康玄, 横山洋, 辻珠樹: 千代田実験水路横断堤における越水破堤の拡幅過程, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp333-338
- 8) 平成 19 年度施行, 千代田実験水路外地質調査業務報告書