

縮尺の違いによる越流破堤実験の再現性の検討

Reproducibility of the hydraulic experiments on overflow-induced collapse
by the different scales

渡邊康玄¹・山本昌慧²・早川博³・島田友典⁴

Yasuharu WATANABE, Masato YAMAMOTO, Hiroshi HAYAKAWA and Tomonori SHIMADA

¹ 正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

² 正会員 工修 パブリックコンサルタント株式会社 (〒060-0005 札幌市中央区北 5 条西 6 丁目 1-23)

³ 正会員 博(工) 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

⁴ 正会員 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

For the flood disaster prevention and reduction, the elucidation of the physical mechanisms on the breach of flood levee is indispensable. However, since extraordinary danger exists in the observation during flood and the scale of the phenomenon is large, the observation of the breach have been conducted after the flood. In order to clarify the phenomenon on breach of flood levee, a small-scale hydraulic model experiment needs to be carried out. In this research, we tried to reproduce the result of the actual size hydraulics model test on the breach using the small-scale hydraulic model experiment in which the scale was changed. As a result, in order to grasp a phenomenon correctly in a small-scale hydraulic model experiment, it was shown that it is necessary to coincide the square of the ratio of critical friction velocity with a model scale.

Key Words: *flood levee, breach due to over flow, Chiyoda experimental channel, hydraulic experiment*

1. はじめに

破堤による洪水氾濫は、現象の進行および氾濫流速の速さや氾濫流に土砂等が含まれることから、甚大な被害を招くこととなる。水害に対する防災・減災さらには早期の復旧対策手法の確立のためには、破堤に関する物理機構の解明が必要不可欠である。しかしながら、現象の規模や観測に非常な危険を伴うことから、破堤後の調査による原因解明等が中心であった。藤田ら¹⁾は、越水破堤に関する水理模型実験を行うとともに詳細な検討を行い、決壊部の拡大過程には、(1)初期の決壊期、(2)決壊口の下刻と急激な拡幅期、(3)拡幅期、(4)拡幅の終了期の4段階の存在を指摘している。また、辻本ら²⁾は藤田らの実験結果¹⁾を用いてモデルの再現性を確認し、堤防断面や河道の違いによる破堤進行の相違を数値シミュレーションにより示している。このように、破堤現象についての知見が蓄積されてきている。しかしこれらの検討は、実スケールでの現象との検証が十分に行われておらず、定量的ではあるが相対的な比較となっている。一方この問題を解決するため、実物大の模型実験も行われてきている。建設省土木研究所河川研究室³⁾は、実物大の堤防模型を用いた実験を行い、実際の越水破堤現象の解明を試みて極めて有用な知見を得ている。しかしながら大型の実験では、実験に要する労力や予算等の制約から、多種多様な条件

での実験は不可能であり、実現象を再現する小規模な水理実験の手法や数値シミュレーションの開発が望まれている。

北海道開発局では、現地スケールの実験が可能である千代田実験水路を使用し、2008年より横断堤の破堤(正面越流による破堤)実験⁴⁾を、2009年から縦断堤の破堤(横越流による破堤)実験^{5,6)}を行い、実験条件は限定されているものの実スケールでの破堤現象の詳細な観測が行われている。この結果を利用し、禰野ら⁷⁾は平面2次元モデルを用いた河床変動計算手法の妥当性について検討を行っている。また伊藤ら⁸⁾は、千代田実験水路で行われた縦断堤の破堤実験を縮尺1/20の水理模型実験で行い、水理模型実験の再現性を検討している。しかしながら、縮尺1/20でも屋外の広い実験施設が必要であり、実験条件の変更が容易ではないと考えられ、室内でも実行可能なより小規模な実験装置による破堤機構の解明の可能性について検討を行う必要がある。

本研究では、室内実験による破堤現象の再現性を明確にすることを目的として、千代田実験水路で行われた横断破堤実験結果とその再現を試みた縮尺1/50の水理模型実験結果⁹⁾および新たに実施した1/70の水理模型実験結果を用いて、縮尺の違いによる影響を把握することとした。さらに、小規模の実験を行う上で現地の現象を精度よく再現するための手法について考察を

行うこととした。

2. 千代田実験水路における実物大破堤実験の概要

千代田実験水路において、水路横断堤を越水破堤させる実験⁴⁾および縦断堤を越水破堤させる実験^{5,6)}が行われている。本論文では、破堤現象の室内実験での再現性を詳しく考察することを目的としているため、現象がより単純な横断堤の実験を扱うこととした。実験水路の勾配は1/500であり、横断堤は、下幅30m上幅40mの水路全幅にわたって、高さ2.5m、天端幅2.0m、法勾配2割で造成されている⁴⁾。また、破堤のきっかけとして、水路中央部の天端に幅5m、深さ0.05mの低みが設けられている⁴⁾。横断堤越水直前に横断堤の上流側に貯留されている水量は、38,000m³であり、実験中の上流からの供給流量は4m³/sである⁴⁾。

3. 1/50 室内水理模型実験⁹⁾

渡邊ら⁹⁾は、千代田実験水路における横断破堤実験の1/50の実験を行って、再現性の検討を行っている。縮尺は、1/50の無歪で行われており、水量はフルードの相似則にしたがって決定されている。堤体材料は、千代田実験水路の堤体材料を1/50にした粒径加積曲線を作成し、粘土シルト分(0.075mm以下の成分)を除外したものを基準に、5ケース設定している。ケースA-1、A-2は、基準の粒径加積曲線にほぼ一致するものであり、ケースA-1とA-2の違いは各粒径の珪砂の配合割合が異なる。ケースA-3、A-4およびA-5は、それぞれ70%粒径、50%粒径および20%粒径が基準と一致するように均等係数を下げたものである。使用された堤体材料の粒径加積曲線を、図-1に示す。また、各ケースの平均粒径を表-1に示す。なお、粘土シルト分を除外した理由は、力学的特性が複雑になることを避けるためである。

(1) 拡幅の時間変化

図-2に示されるように、破堤口の拡幅時間変化は堤体材料に関係せず千代田実験水路の結果と一致することを示している。なお、千代田実験水路の結果は、フルードの相似則を用いて実験の縮尺に換算している。なお、以降の各室内水理模型実験の結果との比較においては、千代田実験水路の結果をフルードの相似則を用いて室内水理模型実験の縮尺に合わせている。

(2) 洗掘深

一方、洗掘深は、図-3に示されるように、堤体材料に大きく依存し、70%粒径が一致するように設定したケースA-3が最も千代田実験水路の実験を精度よく再現することを示している。

表-1 1/50 室内水理模型実験に使用した堤体材料の平均粒径

ケース	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
平均粒径 (mm)	0.465	0.425	0.633	0.425	0.266

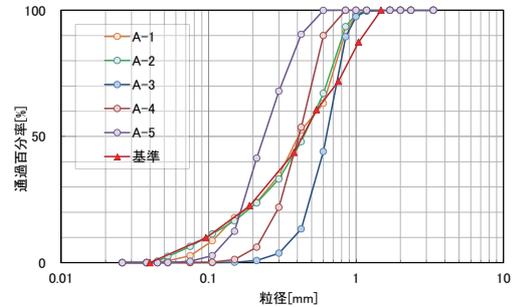


図-1 1/50 室内水理模型実験に用いられた堤体材料

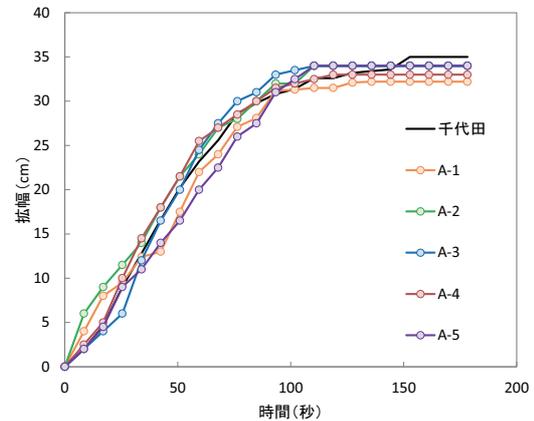


図-2 1/50 室内水理模型実験の拡幅過程

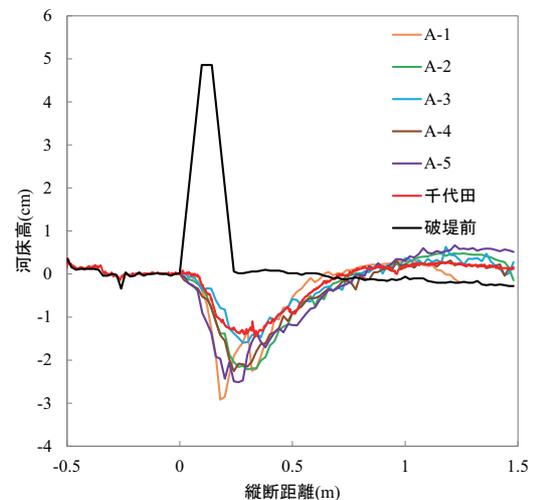


図-3 1/50 室内水理模型実験の最終洗掘形状

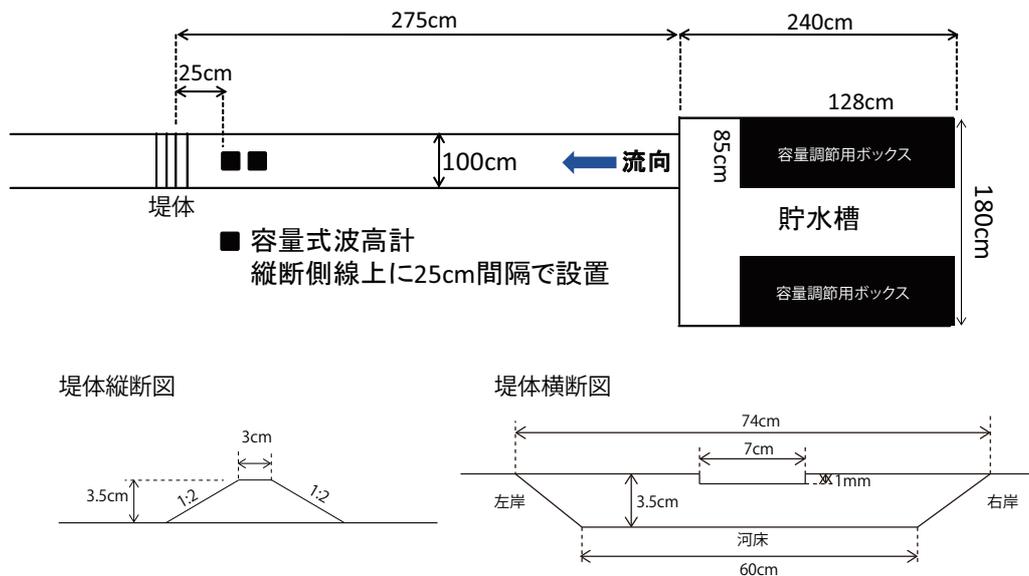


図-4 1/70 室内水理模型実験水路の概要

4. 1/70 室内水理模型実験

水理模型実験の再現性における縮尺の影響を把握する目的で、千代田実験水路における横断破堤実験の1/70の実験を行うこととした。

(1) 実験水路

実験に用いた水路は、長さ14m、幅1.8mの実験架台に図-4に示すように、千代田実験水路の1/70の縮尺で底幅60cmの台形断面の水路を形成した。また、水路側壁は千代田実験水路と同様に2割の勾配で形成している。なお、千代田実験水路は微小な曲率を持った法線形を呈しているがその程度は極めて小さく、今回の実験水路の法線形では直線としている。破堤現象は、横断堤上流に貯められた水量によって決定する破堤後の越流量に大きく依存する。このことから横断堤の位置は、千代田実験水路の横断堤と上流に存在する流量調節ゲートまでの越水時の貯水量の1/70となる位置としている。横断堤も同様に1/70すなわち、高さ3.5cm、天端幅3.0cm、法勾配2割で形成し、越流のきっかけとして横断堤中央部に幅7cm、深さ0.1cmの切欠き部を設けた。横断堤の作成に当たっては、1/50室内水理模型実験⁹⁾と同様に、締固め度が90%程度となるように突き固めを行った。さらに、通水時には、最適含水比の上限である13%程度になるよう配慮した。なお堤体には、破堤幅読み取りのために、横断方向に2cm間隔で水性インクでメッシュを入れた。

破堤進行中の測定項目は、破堤の拡幅幅と堤防前面の水位である。破堤の拡幅幅は、堤体上流側上部から撮影した動画より読み取り、堤防前面の水位の計測は、堤体から25cmおよび50cm上流に設置した容量式波高計を用いた。また、実験終了後には、レーザー砂面計を用いて堤防周辺の河床形状を測定した。

(2) 実験条件

実験に用いた水理量は、フルードの相似則で千代田実験水路の横断破堤実験の1/70で設定した。すなわち、越水時の堤体上流側での貯留量が 0.110m^3 、上流からの供給流量が $105.3\text{cm}^3/\text{s}$ である。また、使用する堤体材料は、1/50室内水理模型実験と同様の考え方で、千代田実験水路における堤体材料を1/70にし、そのうちの粘土シルト分(0.075mm以下の成分)を除外した粒径加積曲線を基準とした。実際に実験に用いた堤体材料は、1/50室内水理模型実験で最も洗掘深の再現性が良かった、基準の粒径加積曲線に対し70%粒径が一致するもの(ケースB-1)、および1/50室内水理模型実験で最も洗掘深の再現性が良かった粒径分布をそのまま用いたもの(ケースB-2)の2ケースを設定した。それぞれの粒径加積曲線を図-5に示す。また、それぞれの平均粒径を表-2に示す。なお、ケースB-2の粒径加積曲線は、基準の粒径加積曲線の最大粒径が一致している。ここで、粒度分布の相似性を考慮せず、より一様粒径に近い材料を用いた理由は、1/50室内模型実験において、粒度分布の相似性を考慮した実験ケースA-1およびA-2よりも、一様粒径に近く平均粒径がやや大きく設定したケースA-3の再現性が高い結果を得たためである。

(3) 実験結果

1/70室内水理模型実験の結果を、拡幅の時間変化と洗掘深とに分けて述べる。

a) 拡幅の時間変化

図-6は、ケースB-1およびB-2と千代田実験水路横断破堤実験の拡幅の時間変化の比較を示したものである。1/50室内水理模型実験では、堤体材料に関係なくほぼ千代田実験水路の結果と一致していたが、1/70室内

表-2 1/70 室内水理模型実験に使用した堤体材料の平均粒径

ケース	B-1	B-2
平均粒径 (mm)	0.465	0.633

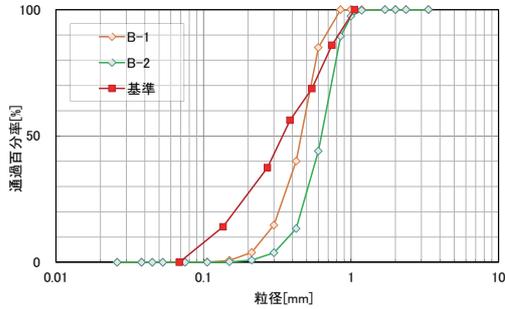


図-5 1/70 室内水理模型実験に用いられた堤体材料

水理模型実験ではやや異なる傾向を示した。最終的な破堤幅に関して、ケース B-1 は良好な一致を示すものの、ケース B-2 はやや小さい値を示している。また、両ケースとも千代田実験水路横断破堤実験に比べ拡幅過程が早く進む傾向を示している。この理由として、図-7 に模式的に表したように、千代田実験水路横断破堤実験や 1/50 室内水理模型実験では、越水初期に堤防の下刻が生じその後破堤口の拡幅が生じるのに対し、1/70 室内水理模型実験では堤防の下刻現象がみられず、越水と同時に堤防が崩れるようにして瞬時に破堤口の拡幅が始まるためである。

b) 洗掘深

河床洗掘の最終形状の測定結果について、水路中央部の河床高縦断面図として示したものが、図-8 である。ケース B-1 は 1/50 室内水理模型実験で最も再現性の良いと判断された設定を行ったにもかかわらず、過大な洗掘が生じる結果を得た。縮尺の上からは極めて大きな材料を用いたケース B-2 では、やや大き目ではあるが、ケース B-1 に比較して洗掘深の形状をよく再現している。ただし、両ケースとも千代田実験水路横断破堤実験で生じた洗掘部下流側の堆積形状は再現されていない。

5. 流砂の相似性に関する考察

以上のように、フルードの相似則での縮尺により現象が大きく異なる結果を得た。破堤現象は、重力による流れによって支配されている現象であることから、フルードの相似則を使用することが一般的ではある。しかしながら、洗掘堆積現象が時間とともに変化していく流れによって支配されているため、フルードの相似則とともに掃流砂の相似性も重要な事項となる。模型の縮尺により堆積現象の有無や洗掘深の差異が生じて

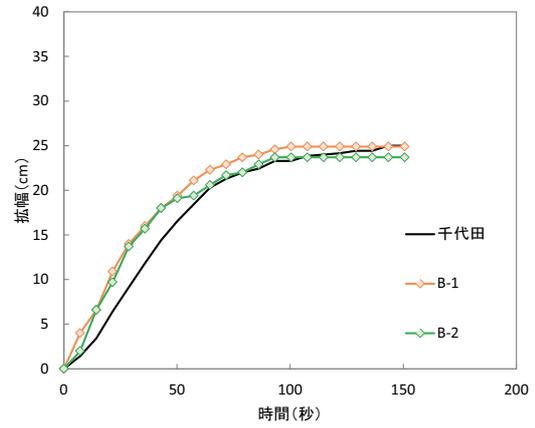


図-6 1/70 室内水理模型実験の拡幅過程

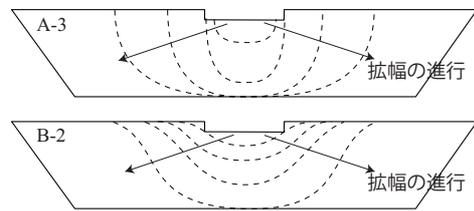


図-7 拡幅過程の模式図

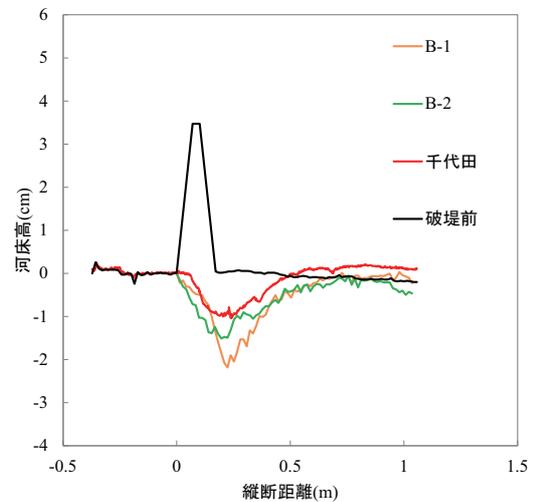


図-8 1/70 室内水理模型実験の最終洗掘形状

いることから、流砂の相似性について、考察を行うこととした。越水破堤現象では掃流砂が支配的であることから、掃流砂相似を扱うこととする。

(1) 掃流砂相似則

川幅 B における時間 T に通過する土砂量 V は、単位幅無次元流砂量を q_b とすると、式 (1) で表される。

$$V = Bq_b \sqrt{sgd_s^3 T} \quad (1)$$

いま，模型実験と実現象とで長さ L の縮尺が S すなわち式 (2) が成立するとき，掃流砂量式にそれぞれ式 (3)，(4) で表される Meyer-Peter & Müller の式や芦田・道上の式を用いると，式 (5) の関係が導出される．

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 = S^3 \quad (2)$$

$$q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (3)$$

$$q_b = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{*cm}}{\tau_{*m}} = \frac{\tau_{*cp}}{\tau_{*p}} \quad (5)$$

ここで，添え字の p 及び m は，それぞれ実現象及び模型実験の値を示す．模型の縮尺について考えていることから，式 (5) を有次元量である摩擦速度で表現すると式 (6) を得る．

$$\frac{u_{*cm}^2}{u_{*cp}^2} = S \quad (6)$$

ここで， u_{*cp} 及び u_{*cm} は，それぞれ実現象及び模型実験の限界摩擦速度である．岩垣の限界摩擦速度式は，砂粒子の比重に 2.65，水の動粘性係数に $0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ ，重力加速度に $980\text{cm}/\text{sec}^2$ を用いると，粒径をパラメータにして式 (7) で表される¹⁰⁾．

$$\begin{aligned} d_s \geq 0.303\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 80.9d_s \\ 0.303 \geq d_s \geq 0.118\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 134.6d_s^{31/22} \\ 0.118 \geq d_s \geq 0.0565\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 55.0d_s \\ 0.0565 \geq d_s \geq 0.0065\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 8.41d_s^{11/32} \\ 0.0065 \geq d_s & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 226d_s \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) より，実現象及び室内水理模型実験ともに粒径が 0.303cm 以上の場合には，粒径も模型縮尺と同じにすることによって，掃流砂相似も満足することになる．しかしながら，今回の破堤実験においては，千代田実験水路における粒径が 0.303cm 以上であり，単純に模型縮尺を用いると $1/50$ 室内水理模型実験及び $1/70$ 室内水理模型実験では，それぞれ 0.053cm 及び 0.038cm となり，掃流砂相似を満足しなくなる．このことを踏まえ，各実験での再現性を考察することとする．

(2) 実験結果の考察

a) 限界摩擦速度の縮尺と再現性

上記のように各実験において，模型と実現象における限界摩擦速度は式 (6) を満たすことができていない．そこで，各実験において式 (6) の左辺の値が，右辺の値に比較してどの程度かい離れた条件であったかを考える．図-9 は， $1/50$ 室内水理模型実験及び $1/70$ 室内水理模型実験における模型縮尺 S と限界摩擦速度の縮尺 u_{*cm}^2/u_{*cp}^2 との関係を見たものである．なお，実現象すなわち千代田実験水路における限界摩擦速度の算定にあたっては， $1/50$ および $1/70$ の縮尺の室内模型実験

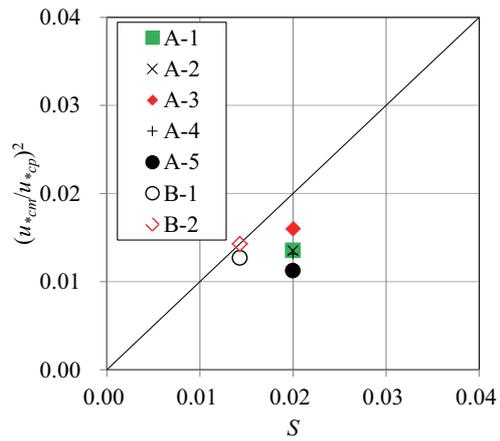


図-9 模型縮尺と摩擦速度の縮尺

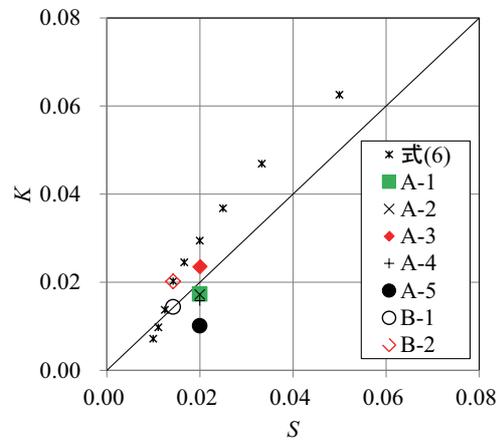


図-10 模型縮尺と堤体材料の縮尺

を実施するにあたってそれぞれの縮尺で縮小した粒径分布のシルト成分を除外して決定した基準の粒径分布における平均粒径を用いている．このためケース A とケース B では， u_{*cp} の値が若干異なっている． $1/50$ 室内水理模型実験において，実現象を最もよく再現していたケースは A-3 であるが，この図から掃流砂相似則を満足する粒径に最も近いものがケース A-3 であることがわかる．同様に， $1/70$ 室内水理模型実験において，実現象を最もよく再現していたケースは B-2 であるが，掃流砂相似則を満足する粒径に最も近いものがケース B-2 であることがわかる．

b) 堤体材料の縮尺と再現性

模型実験を行う上では，使用する堤体材料の粒径が具体的な問題となる．このことから，式 (6) を満足する粒径の比 $\kappa = d_{sm}/d_{sp}$ と模型縮尺 S との関係を考えることとする．限界摩擦速度と粒径との関係に式 (7) で表される岩垣の式を用いて関係を示したものが図-10 である．本来であれば， $1/50$ 室内模型実験及び $1/70$ 室内模型実験に使用する堤体材料の粒径は 0.079cm および

0.054cm とすべきであったことになる。

ここで、1/70 室内水理模型実験におけるケース B-2 は、掃流砂相似も満足する条件となっていたにもかかわらず、図-8 に示されるように、必ずしも完全に洗掘深を再現しているとは言えない。これは、前述したように、越水初期の堤防の下刻現象が十分に再現されておらず、破堤幅の拡大が実現象よりも早く進行し、短時間に多くの流量が通過したことによるものと考えられる。

次に、ケース B-2 の拡幅が実現象よりも早く進行したことについて、移動土砂量 V の相似性に基いて考察を行う。式 (1) を用いると模型実験と実現象の V の比は、式 (8) で表される。

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{B_m q_{bm} \sqrt{sgd_{sm}^3 T_m}}{B_p q_{bp} \sqrt{sgd_{sp}^3 T_p}} = S \kappa^{3/2} \frac{q_{bm} T_m}{q_{bp} T_p} \quad (8)$$

ここで、ケース B-2 では堤体材料をフルードの相似則による粒径よりも大きいものを使用し、 $\kappa > S$ であるとともに $q_{bm}/q_{bp} \approx 1$ の条件となっている。このため、移動土砂量をフルードの相似則で $V_m/V_p = S^3$ を満足させるためには掃流砂の時間縮尺で $T_m/T_p < S^{1/2}$ とする必要がある。1/50 室内実験のケース A-3 では、掃流砂に関する時間縮尺が 1/9 で流れの時間縮尺である $S^{1/2} = 1/7$ に近い値となっているが、1/70 室内実験のケース B-2 では、掃流砂に関する時間縮尺が 1/18 で流れの時間縮尺である $S^{1/2} = 1/8.4$ と大きく異なる値となっている。このように、ケース B-2 では流れの時間縮尺と掃流砂の時間縮尺が一致せず、フルード相似則に基づいた図-7 において、室内模型実験の拡幅現象が実現象よりも早く進行したものと描かれたものと判断される。さらに、流れの現象よりも流砂の現象が相対的に早く進んだため、越水初期の現象も異なることとなったと推察される。

以上より、掃流砂相似を満足させるとともに、流れと土砂移動の時間縮尺を一致させ、実現象で生じる越水初期の下刻現象をも再現できる規模での実験が必要と判断される。

6. おわりに

実物大の堤防模型を用いた千代田実験水路横断破堤実験結果を室内で再現する場合の再現性について、室内水理模型実験結果とを比較することにより考察を行った。実際の堤防の粘着成分を省略したにもかかわらず、堤体材料をうまく選定することにより、ある程度実現象を再現できることが示された。また、流れをフルードの相似則を用いた場合、破堤の拡幅速度は概ね再現

することが可能であるが、洗掘形状を再現する際には、掃流砂相似則をも満足させる必要があり、限界摩擦速度の比の 2 乗の値を模型縮尺に一致させるとともに流れと土砂移動の時間縮尺を一致させる必要があることが明らかとなった。

今回の関係を使用することにより、より多くの条件で越水による破堤現象の解明が室内規模での水理実験を行い、現象の解明をより詳細に進めることが可能となると考えられる。

今後は、より詳細に越水初期の堤防の下刻現象の支配要因を解明するとともに、千代田実験水路で行われている縦断破堤実験⁶⁾を室内で再現し、今回の知見の氾濫域を含む縦断破堤における適用性について、把握を行う予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、北海道開発局から千代田実験水路における実験結果の提供を受けた。また、十勝川千代田実験水路実験検討会¹¹⁾において有益な意見交換をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤田裕一郎, 田村多佳志, 村本嘉雄: 河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験的研究, 京大防災研究所年報, 第 27 号 B-2, pp.369-392, 1894.
- 2) 辻本哲郎, 鷲見哲也, 寺本敦子, 前田和: 破堤拡大過程と河川特性の関係について, 土木学会河川技術論文集, 第 11 巻, pp.121-126, 2005.
- 3) 建設省土木研究所河川研究室: 越水堤防調査最終報告書解説編, 土木研究所資料, 第 2074 号, 1984.
- 4) 島田友典, 渡邊康玄, 横山洋, 辻珠希: 千代田実験水路における横断堤越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp.871-876, 2009.
- 5) 島田友典, 平井康幸, 辻珠希: 千代田実験水路における越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第 54 巻, pp.811-816, 2010.
- 6) 島田友典, 横山洋, 平井康幸, 三宅洋: 千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.s-841-846, 2011.
- 7) 禅野浩貴, 岩崎理樹, 清水康行, 木村一郎: 平面二次元モデルを用いた実物大越流破堤実験の再現計算, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.s853-858, 2011.
- 8) 伊藤幸義, 島田友典, 横山洋, 坂野章, 茂木映治: 模型実験による氾濫域を含む越流破堤メカニズム検討, 土木学会河川技術論文集, 第 16 巻, pp.371-376, 2010.
- 9) 渡邊康玄, 山本昌慧, 島田友則: 正面越流破堤の室内実験による再現性の検討, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.s847-852, 2011.
- 10) 河村三郎: 土砂水理学 1, 森北出版株式会社, 1982.
- 11) URL: <http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/zi/iinkai/kentou/K01.html>

(2011.9.30 受付)