

地震動が外水位上昇を受けた堤体の崩壊挙動に 及ぼす影響に関する縮尺模型実験

SCALE MODEL EXPERIMENT ON INFLUENCE OF EARTHQUAKE MOTION
ON COLLAPSE BEHAVIOR OF LEVEE WITH RISING RIVER WATER LEVEL

川尻峻三¹・川口貴之²・山下聡³・渡邊康玄⁴

Shunzo KAWAJIRI, Takayuki KAWAGUCHI, Satoshi YAMASHITA and Yasuharu WATANABE

¹正会員 博士(工) 北見工業大学助教 工学部地球環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

²正会員 博士(工) 北見工業大学准教授 工学部地球環境工学科 (同上)

³正会員 博士(工) 北見工業大学教授 工学部地球環境工学科 (同上)

⁴正会員 博士(工) 北見工業大学教授 工学部地域未来デザイン工学科 (同上)

In recent years, damage to levees due to floods after the earthquake has been reported. However, there are few studies on the relevance between the magnitude of the earthquake and the level of the embankment during the flood.

In this study, a scale model experiment was conducted to clarify the influence of the difference in maximum acceleration on the rising behavior of the water level in the levee and to clarify the penetration collapse behavior. Based on the experimental results, the permeability of levee varied depending on the magnitude of maximum acceleration. In addition, the amount of embankment deformation due to aftershocks may be affected by changes in permeability due to the main shock.

Key Words : Levee, earthquake motion, river water level, scale model experiment

1. はじめに

地震動を受けた河川堤防は、越水や浸透破壊に対する性能が低下している可能性がある。例えば、地震後の降雨による堤体の被災事例として、福井地震¹⁾や熊本地震²⁾などが報告されている。福井地震では1948年6月28日に発生したマグニチュード7.1の地震で堤体が損傷し、この地震から1か月後の7月23日から25日にかけて累積雨量で300mmを超える記録的な降雨を被災堤体の周辺で観測した。この降雨による出水の際には、土のう積み等の水防活動は行われていたものの、地震による堤体沈下量が30~450cmにも達したことから、出水に伴い約300mにわたって破堤し、堤内地が浸水した¹⁾。近年の事例として2016年4月に発生した熊本地震では、4月14日のマグニチュード6.5の前震と4月16日のマグニチュード7.3の本震で木山川の堤体において10cm程度の堤体天端の沈下が確認された後、地震発生から2か月後の6月20日に熊本県を中心とした累積雨量100mmを超える降雨によって出水し、約50mにわたり破堤した。この破堤要因として、地

震後に大型土のうによる応急対策が行われていたものの、越流水によって土のう直下地盤でパイピングによる侵食が発生し、大型土のうを不安定化させたことが報告されている²⁾。このようなことから、地震による被災堤体の外水位上昇に対する安定性や堤体内水位の上昇速度を考慮して、地震後の出水時には避難勧告のタイミングを早めるなどの弾力的な避難行動が必要となる可能性がある。

昨今では、北海道東部において東北地方太平洋沖地震に匹敵する巨大地震の発生確率が高いことが報告されており³⁾、この場合には直線河川である新釧路川等では津波の河川遡上が発生することが予想される。このように今後の気候変動による外力条件の変化を考慮すると、地震と外水位上昇などの複合的な外力条件を加味した堤体の耐力評価が必要となる。しかしながら、地震後の降雨浸透による盛土の耐力低下については、実験的なアプローチとして地震動によって発生したクラックなどの影響によって、加振後の散水時には盛土内が水位上昇しやすいことなどが報告^{4) 5)}されているものの、河川堤防を想定して地震後に外水位を上昇させた際の堤体内の水理挙動について検討した事例は少ない⁶⁾。

本研究では、数多くの実験ケースを実施できる利点を活かして縮尺模型堤体を作製し、地震動規模の違いを再現した最大加振加速度が異なる地震波を模型堤体に与えた後、出水や津波遡上に伴う外水位上昇を想定した給水を行った。本文では、加振後の外水位上昇時における堤体内水位に及ぼす最大加振加速度の影響や、外水位上昇後の余震による堤体の変形挙動について詳述する。

2. 実験の概要および条件

図-1は本実験で用いた模型堤体の概略図および計測装置の設置状況を示す。模型盛土は長さ550mm×高さ300mm×幅150mmの前面がアクリル製の土槽内に高さ50mmの水平な支持地盤を作製し、その上にのり面勾配1:1.8、盛土高さ100mm、天端幅30mmの堤体を作製した。模型盛土の縮尺は1/50程度である。ここで模型堤体ののり面勾配は、土槽サイズの関係で通常の堤体の1:2.0よりもやや急勾配であるが、本実験では経年劣化によってやや急勾配化（寺勾配化）して地震動や外水位作用に対して耐力が低下している堤体を再現していると考えらるこ

とができる。模型堤体に設置・埋設した計測機器としては、堤体内水位を観測するためのピエゾメータ、堤体の間隙水圧を計測するために間隙水圧計、天端変位を計測するために変位計（精度1/100mm）、天端の加速度応答を計測するために加速度計を堤体天端と加振テーブルに設置した。

模型堤体の構築には豊浦砂と藤の森粘土を重量比で8.5:1.5の割合で混合した試料を用いた。試料は図-2に示すような粒度特性であり、図-3にJIS A1210（A-b法）で実施した突固め試験により得られた締固め曲線を示す。支持地盤は締固め度 D_c （乾燥密度 ρ_d / 最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \times 100$ ）= 90%，盛土部については $D_c = 75\%$ を目標として各層10mmとして所定の盛土高さに到達するまで締固めて作製した。支持地盤における $D_c = 90\%$ は加振に伴う揺すり込み沈下や液状化が発生しないような値を設定した。また、堤体部では模型盛土の縮尺が小さいことによる過度な土の強度設定の低減、浸透水の浸透程度に加えて、現在の設計・施工体系が確立する前に施工された、いわゆる形状規定型設計によって築堤された N 値の低い低密度状態の堤体が本実験で想定する複合外力に対して最も耐力が低いと考え、これを再現する理由から $D_c = 75\%$ と

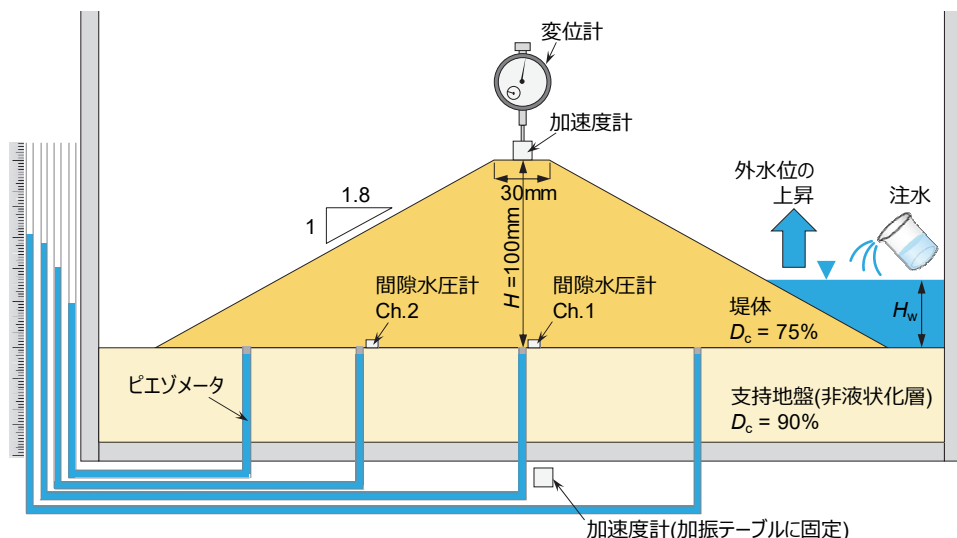


図-1 模型堤体および計測機器の配置図

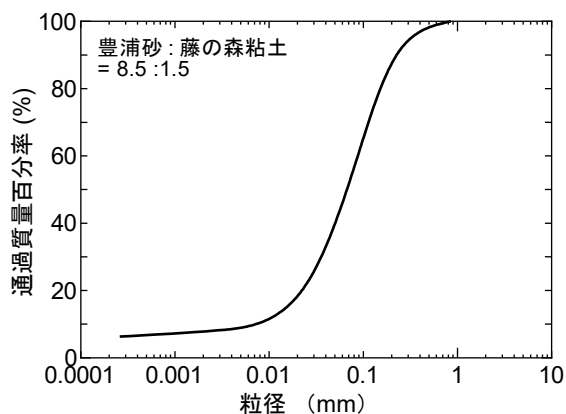


図-2 模型堤体および支持地盤材料の粒度分布

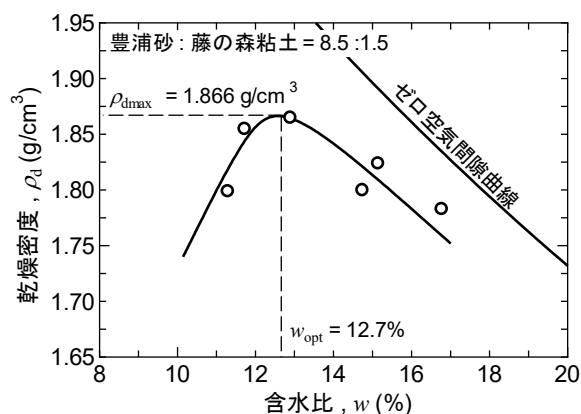


図-3 模型堤体および支持地盤材料の締固め曲線

< 堤体作製 >

< 加振 >

- sin波, 5Hz, 20波
- 加振無し, 300, 400, 500, 600, 700galの6ケース

< 外水位上昇 >

- $H = 100\text{mm}$ に対して, $H_w = 50, 60, 70\text{mm}$ の3ケース
- 所定水位到達後, 一定時間 H_w を維持

< 再加振 >

- 外水位上昇による崩壊が軽微なケース
- 余震を想定して300galで再加振

図-4 実験手順

した. ここで筆者らが過去に行った地震後の盛土の降雨耐力評価を目的とした散水実験⁴⁾では, 加振に伴い発生した亀裂が散水時の雨水浸透を促し, 加振履歴が無い場合と比較して少ない降雨量で盛土内水位が上昇した. この結果を河川堤防に適用させると, 加振履歴を有する堤体では, 外水位が計画高水位に達した段階で加振履歴が無い場合よりも堤体内水位が上昇し, 加振履歴の有無が外水位上昇時の堤体耐力に影響を与えると予想される. そこで本研究では, 図-4に示すような実験手順で実験を行った. 加振波形の最大加振加速度に着目し, 地震規模の違いを想定した5水準の異なる最大加速度を与えた堤体模型に対して, 外水位 H_w の上昇を想定した給水を行った. 給水については外水位 $H_w = 50, 60, 70\text{mm}$ の3水準とした. 外水位の上昇速度については, 急激な水位上昇による表のり面の崩壊を防ぐ水位上昇速度を予備試験から決定し, 1分間に10mmの速度で外水位を上昇させた. 以上のケースに加振無しの実験を含めると実験ケースは最大加振加速度6ケースと外水位3ケースの全18ケースであり, 実験中には模型堤体の断面観察と堤体内水位の変化, 堤体内の間隙水圧を計測し, その結果から加振外力が堤体内水位と崩壊挙動に及ぼす影響について考察した. なお, 加振加速度の周波数や波数の大小は, 堤体内の過剰間隙水圧の発生状況に影響を与えると考えられるが, 本研究では基礎的な検討として最大加振加速度による出水時の堤体の浸透に対する性能を評価することを目的としているため, 周波数や波数などの地震波形の影響は今後の課題である. また, 実験の再現性の確認として, 各 H_w の1もしくは2つの加振条件に対して予備試験を実施し, 2回の実験結果が同程度となったことを確認できたため, 実験の再現性は確保できていると判断とした.

3. 実験結果および考察

(1) 最大加速度と堤体内水位の関係

図-5は代表的な実験結果として, $H_w = 50\text{mm}$ における堤体内水位の時間変化を最大加振加速度別に示している. 堤体内水位の変化は, $H_w = 50\text{mm}$ に到達した時点からの

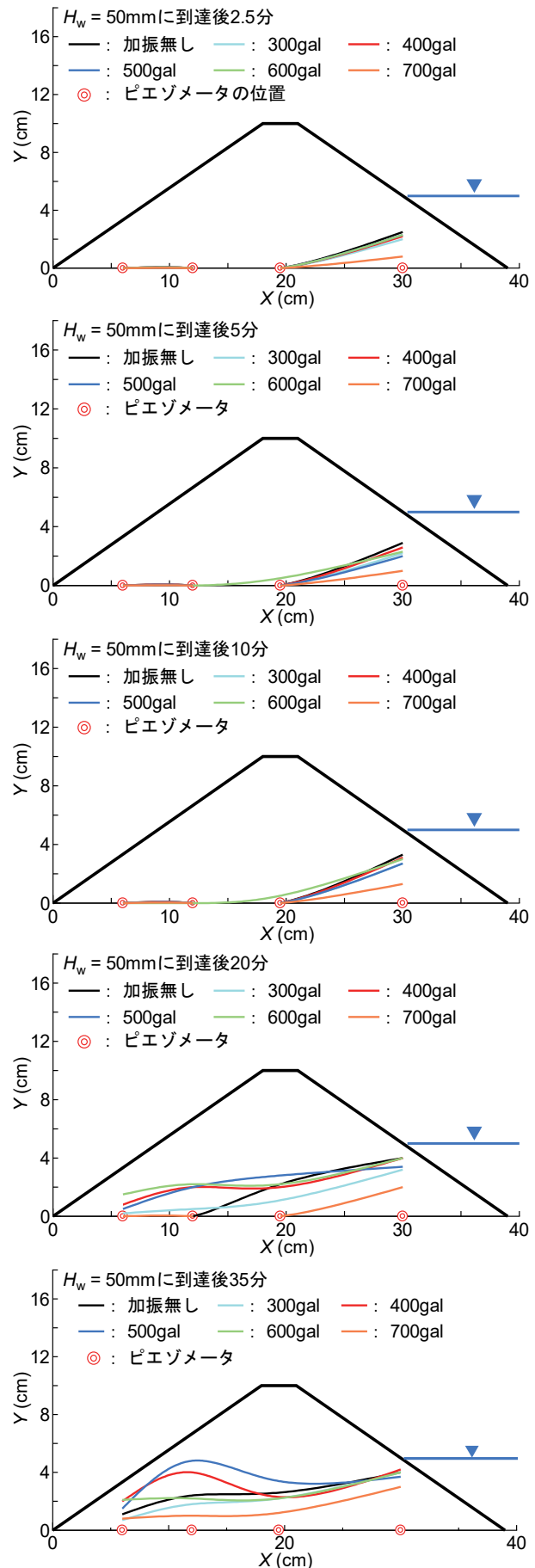


図-5 外水位 $H_w = 50\text{mm}$ での堤体内水位の時間変化

時間変化を示している。堤体内水位は表のり面から裏のり面へと時間とともに上昇する傾向があるが、この上昇傾向は加振外力の大きさによって明らかに異なる。 H_w に到達後10分後までは、最大加振加速度700galの堤体内水位は明らかに低い。一方で、他の最大加振外力については概ね同程度の堤体内水位を形成している。しかし、到達後20分後からは、最大加振加速度400, 500, 600galの裏のり面側の堤体内水位は、加振無しと比較すると高い。300galでは加振無しと概ね同程度の堤体内水位を呈しているものの、700galでは加振無しと比較すると堤体内水位が低い。さらに時間が進み到達後35分では400galおよび500galでは明らかに他の最大加振外力よりも堤体内水位が高いことわかる。堤体内水位の形成過程から、表のり面から裏のり面への浸潤線の進行過程が最大加振加速度の影響を受けていると考えられる。加振履歴や人工的なクラックを有する模型盛土への散水試験では、加振または人工的に設けた亀裂や緩み領域が水みちとなって雨水が浸透し、加振履歴が無い場合と比較して少量の降雨で水位が上昇した^{4),5)}。この結果を上述した $H_w = 50\text{mm}$ の結果に勘案すると、最大加振加速度400galや500galでは $X = 20\text{cm}$ より堤内側の領域付近で加振によって堤体内部でのクラックや緩み領域の水みちが発生し、当該箇所に浸潤線が到達すると水位上昇を促進したと推察できる。一方で、最大加振加速度300galでは加振外力が小さいためにクラックや緩み領域の発生は限定されており、加振無しの堤体内水位と同程度であったと予想できる。また、最大加振加速度700galについては、加振外力が大きいため堤体の圧縮沈下が発生し、水みちではなく、むしろ加振無しの場合よりも堤体の密度が増加して透水係数が低下したために堤体内水位の上昇が抑制された可能性がある。

図-6は入力波の10波目における入力加速度と堤体天端での応答加速度の関係を示している。300galでは入力加速度と応答加速度は線形関係であり、繰返し载荷による土の強度低下が発生していない。400galでは入力加速度に対して応答加速度が、300galと比較して大きくなっており、より大きな加振外力を受けたことで土の強度が低下したと言える。さらに700galの結果では、入力加速度と応答加速度の非線形性が強くなり、堤体天端での応答加速度は入力加速度の1.5倍程度であり、この加振外力では土の強度低下は顕著に進行して堤体の圧縮沈下が発生したと予想される。図-7は加振中における堤体天端の鉛直変位を示している。図-6の加速度応答の結果を反映し、700galにおいて堤体天端の鉛直変位が大きくなり、堤体の圧縮沈下および密度増加が伺える。

図-8および図-9は、 $H_w = 60\text{mm}$ および70mmに到達後35分の堤体内水位を示している。外水位が高い場合については、300galでは結果にややバラツキがあり、 $H_w = 70\text{mm}$ における $X < 20\text{cm}$ の領域では加振無しと比較して水位が高い状態にある。これは先述の2.で記載したよう

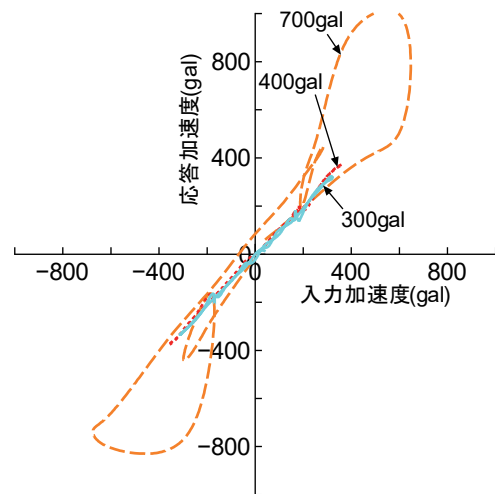


図-6 入力加速度と応答加速度の関係

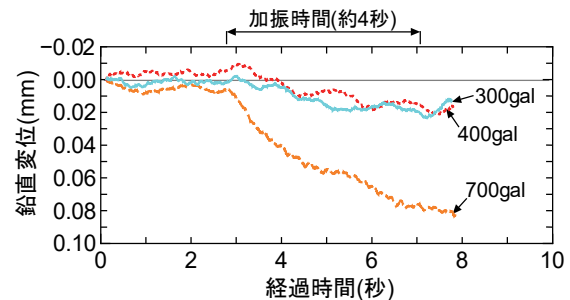


図-7 加振中の堤体天端の鉛直変位

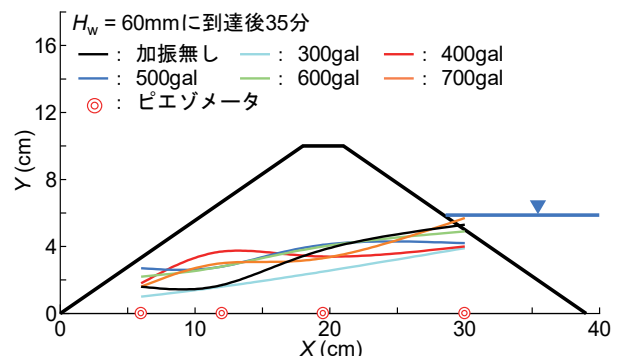


図-8 外水位 $H_w = 60\text{mm}$ に到達後35分の堤体内水位

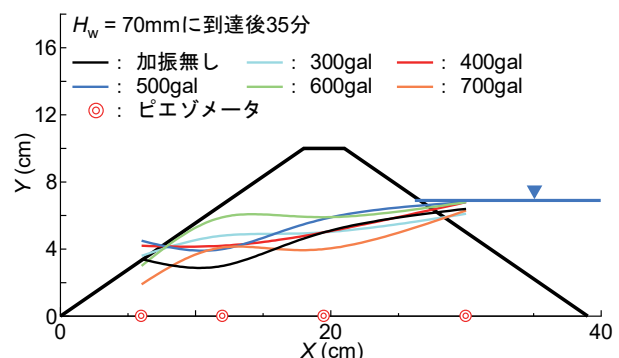


図-9 外水位 $H_w = 70\text{mm}$ に到達後35分の堤体内水位

な実験の再現性確保の方法では不十分だった可能性があり、今後の課題である。しかし、この $H_w = 70\text{mm}$ における $X < 20\text{cm}$ の領域での結果を除くと、300galでは加振無しと比較すると概ね同程度もしくはやや低い堤体水位を形成している。一方で、400, 500, 600galでは加振無しより

も堤体内水位が高い状態を呈している。一方で700galについては、 $H_w = 50\text{mm}$ で示したように加振無しよりも明確に堤体内水位が低い状態とはなっていない。これは加振に伴う密度増加による浸透性の変化よりも外水位が大きくなったことによる影響が大きくなったためと考えられる。これらの影響をより定量的に評価するためには、加振時における堤体の局所的なクラックや緩みの発生領域を画像解析などによって明確⁴⁾にし、飽和・不飽和浸透流解析においてクラックや緩みの発生領域の浸透性を変化させるなどによって本実験結果の再現計算を行う必要があると考えており、今後の課題である。

図-10および図-11は、それぞれ代表的な結果として $H_w = 50\text{mm}$ における図-1に示したCh.1およびCh.2の間隙水圧計の計測データを圧力水頭に換算したものである。なお、圧力水頭は間隙水圧計の設置位置である支持地盤上面を0として計算している。また、経過時間は外水位が $H_w = 50\text{mm}$ に到達した時間を0としている。この結果から、堤外に近いCh.1（天端下）から圧力水頭が増加するものの、最大加振外力の大きさによって増加し始める時間が大きく異なる。また、Ch.2（裏のり面下）についても同様である。さらに、局所的に設置した間隙水圧計で計測した圧力水頭は前述したピエゾメータで推定した堤体内水位よりも高い値を示しているため、間隙水圧計では局所的に形成された水みちに入力している動水圧的な水圧を計測している可能性があり、これは先述した加振による水みちの形成を伺わせる結果となっている。

(2) 最大加速度と堤体内水位の関係

図-12は外水位上昇による裏のり面の変状が少なく、外水位上昇後に余震の影響を考慮した再加振を行った $H_w = 50\text{mm}$ における再加振5回目での堤体形状について、外水位上昇前の加振履歴無し（図-12a）と500galでの加振履歴有り（図-12b）の結果を比較している。なお、

再加振は本加振と波形、波数は同じであるが最大加振加速度を300galとしている。この図より、加振履歴を有する場合には、先述したように堤体内水位が上昇した状態にあるため、再加振後の変形が大きくなることがわかる。これは、地震による損傷の影響で外水位上昇時に堤体内水位が上昇し易くなった堤体では、降雨や出水後の余震によって堤体の天端沈下などの損傷程度が大きくなる可能性があることを示唆する結果と言える。このことから

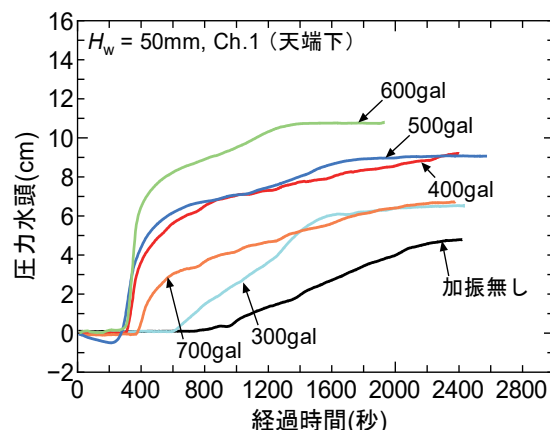


図-10 天端下(Ch.1)の圧力水頭の経時変化($H_w = 50\text{mm}$)

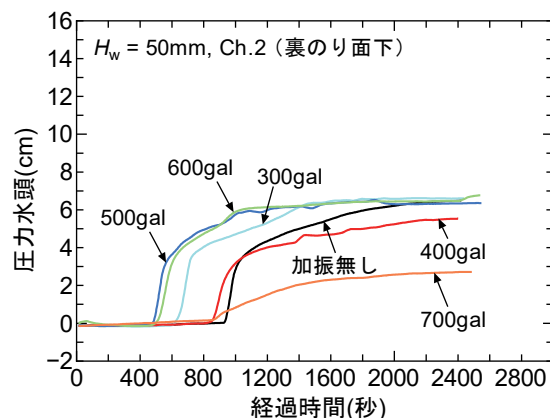
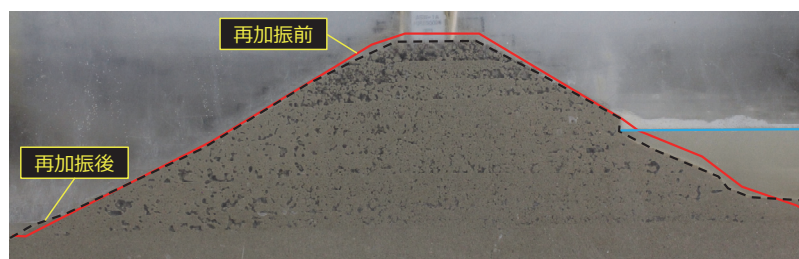


図-11 天端下(Ch.1)の圧力水頭の経時変化($H_w = 50\text{mm}$)



a) 外水位上昇前の加振無し



b) 外水位上昇前に500galで加振

図-12 300galでの再加振5回目での堤体状況($H_w = 50\text{mm}$)

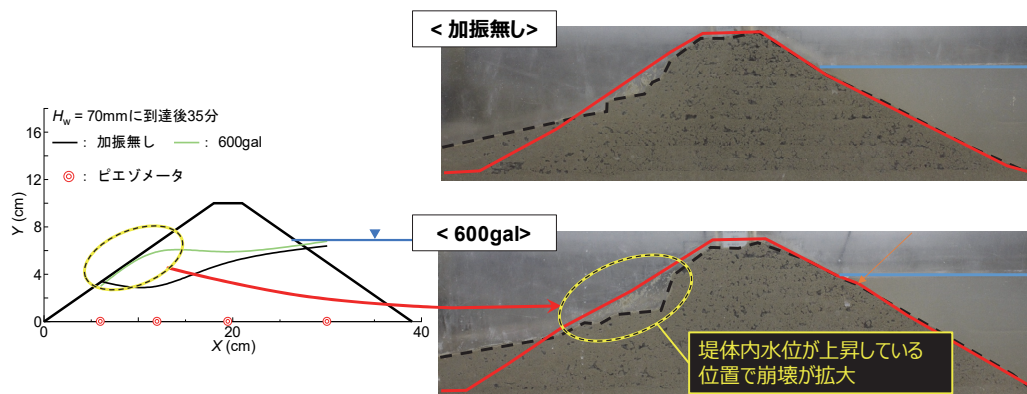


図-13 外水位上昇による浸透崩壊の状況 ($H_w = 70\text{mm}$)

地震による被災堤体の出水に対する応急対策では、各機関から発表される最大加振加速度のデータを活用し、被災堤体に優先順位を設けることで効率的に対策工の実施を展開できる可能性がある。

図-13は今回の実験内で最も高い外水位条件である $H_w = 70\text{mm}$ における堤体の崩壊状況を、外水位上昇前の加振なしと600galで加振した結果について比較している。 $H_w = 70\text{mm}$ では、加振履歴に依らず目標としている外水位到達後2.5分程度で、図に示すような天端中央部から裏のり尻にかけて円弧状のすべり破壊が発生した。このことから、 $H_w = 70\text{mm}$ では外水位上昇による浸透破壊が発生したと判断できる。ここで注目すべき点は、破壊形態の概略は上述したような円弧すべりではあるものの、図中の挿絵にあるように詳細には堤体内水位が上昇している箇所では崩壊範囲が拡大しており、浸透崩壊が発生するような高水位作用においても加振履歴の影響は幾分残存している。このような堤体断面欠損の違いは、越流時の破堤時間に影響すると考えられるため、今後は加振後の越水破堤に着目した実験が必要であると考えている。

4. まとめ

本研究では、地震動の最大加速度の違いが堤体内水位の上昇挙動に及ぼす影響や、外水位作用時の崩壊挙動を明らかにすることを目的として、地震規模の違いを想定して異なる最大加速度を与えた堤体模型に対し、外水位上昇を想定した給水を行い、模型堤体の断面観察と堤体内水位の変化に加えて、堤体内の間隙水圧を計測した。これらの結果から加振外力が堤体内水位と崩壊挙動に及ぼす影響について考察した。

一連の実験から、地震動の規模によって外水位上昇における浸透性が異なることがわかった。今回の実験範囲では、最大加振加速度に応じて堤体の浸透性が変化し、加振履歴が無い場合と比較して堤体水位が上昇する場合があることがわかった。また、余震による堤体変状の程度は、本震による堤体損傷に伴う浸透性の変化による

堤体内水位の上昇程度が影響している。

以上の結果から、地震動を受けた堤体の出水を想定した応急対策では、堤体に作用した最大加振加速度に応じて浸透に対する損傷度を評価し、対策工の対象となる堤体に優先順位を設けることで効率的に対策工の実施を展開できる可能性がある。

今後は、実験の再現性確保について堤体模型の作製方法を再度検討した上で、堤体の築堤履歴を考慮した実験や地震後の堤体内水位を再現可能な浸透流解析のモデル化について検討を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 中央防災会議：災害教訓の継承に関する専門調査会，1948福井地震，<http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1948_fukui_jishin/index.html>，（閲覧日2018.4.2）
- 2) 桜庭拓也，二瓶泰雄，倉上由貴，入江美月：2016年熊本地震と6月20日豪雨による複合災害の発生状況調査，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 73, No. 4, pp. I_1297-I_1302, 2017.
- 3) 地震調査研究推進本部，地震調査委員会：千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版），<http://www.jishinonbu.jp/main/chousa/kaikou_pdf/chishima3.pdf>，（2018.1.10閲覧）
- 4) 川尻峻三，布川修，伊藤賀章，西田幹嗣，松丸貴樹，川口貴之，太田直之，杉山友康：実験的検討による地震後の降雨による盛土崩壊メカニズムについて，地盤工学ジャーナル，Vol.9, No.2, pp.153-168, 2014.
- 5) 川尻峻三，布川修，太田直之：亀裂が散水時の模型盛土内の水分挙動に及ぼす影響，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.71, No.3, pp.204-217, 2015.
- 6) 倉上由貴，二瓶泰雄，安井智哉，桜庭拓也，佐藤佑太，入江美月：地震・洪水複合災害用実験水路を用いた浸透条件下の堤防の耐震性に関する基礎的研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 74, No. 4, pp. I_1261-I_1266, 2018.

（2018. 4. 3受付）