

新施設「遠心力载荷装置」の紹介 —小型模型実験で実規模の挙動を高精度に再現—

西尾 竜文^{*1}・足立 有史^{*1}・室山 拓生^{*1}

2023年9月に新施設「遠心力载荷装置」の運用を開始した。本装置は、地盤・基礎分野の小型模型実験において、実物の挙動を高精度に再現できる遠心模型実験に使用する装置である。遠心模型実験では、遠心力载荷装置により、小型模型に対して、模型縮尺に応じた重力よりも大きい遠心力を载荷する。これにより、小型模型地盤で、実物と同等の応力状態を再現できる。本報では、当社新施設の仕様・付帯設備の紹介および、遠心力载荷装置を用いた堤体盛土の安定化工法開発の取組みについて報告する。

キーワード：遠心模型実験、豪雨、地震、堤体盛土

1. はじめに

近年、地盤・基礎分野では、頻発化・激甚化する豪雨や地震などの自然災害への対策や建設工事の生産性・安全性向上、カーボンニュートラルなどの環境に対する配慮・取組みなど、多様なニーズへの対応が求められている。これらのニーズに対する新技術・新工法の開発や現象の把握・解明では、実大規模の実験を行うことが理想的である。しかし、実大実験は多大なコストと時間を要するため、実施が困難である場合が多く、実物に対する縮尺模型を用いた模型実験が活用されている。模型実験は実大実験に対して簡易かつ安価に実施できることに加え、豪雨や地震などの実大実験において再現が難しい自然現象を再現できるというメリットがある。一方で、縮尺模型を用いて実物の挙動を適切に評価するためには、実物同等の応力を再現する必要がある。表-1に実物に対する模型実験の相似率を示す¹⁾。特に地盤材料を扱う場合、材料の強度や変形は地盤に作用する応力に依存するため、模型縮尺に応じ

て小さくなり、縮尺模型において適切に再現することが難しい。

このような背景から、近年、地盤・基礎分野を中心に小型の縮尺模型において実物と同等の応力状態を再現できる「遠心模型実験」が活用されている。当社では、2021年11月より「遠心载荷実験棟」の建設を開始し、2023年9月に「遠心力载荷装置」の運用を開始した。本報では、当社新施設「遠心力载荷装置」の仕様および付帯設備と本装置を活用した堤体盛土の安定化工法開発の取組みについて紹介する。

表-1 実物に対する模型実験の相似率

物理量	記号	1/Nの縮尺模型を用いた模型実験の相似率	
		1g場の模型実験 (重力場模型実験)	Ng場の模型実験 (遠心模型実験)
加速度	a	1	N
模型寸法	l	1/N	1/N
土密度	ρ	1	1
土粒子寸法	d	1	1
間隙比	e	1	1
飽和度	Sr	1	1
内部摩擦角	ϕ	1	1
土粒子強度	σ_c	1/N	1
粘着力	c	1/N	1
剛性	E	1/N	1

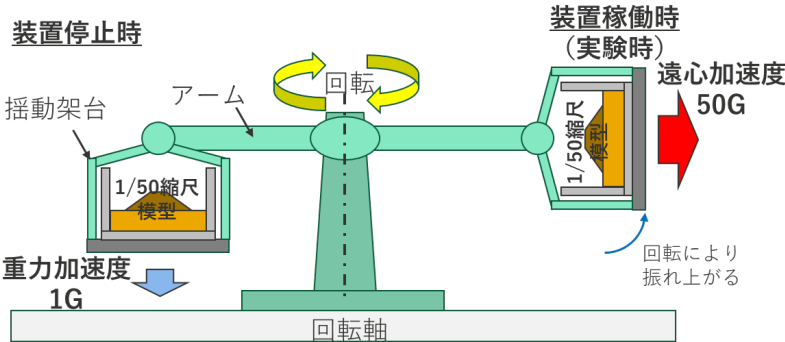
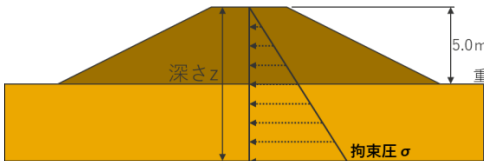
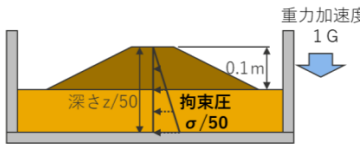
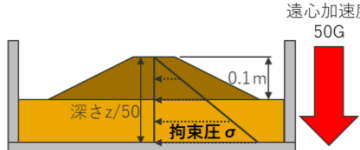


図-1 遠心力载荷装置の概要図 (1/50の模型を用いた場合)

^{*1} 地盤・基礎研究部

表－２ 実物と模型実験の関係

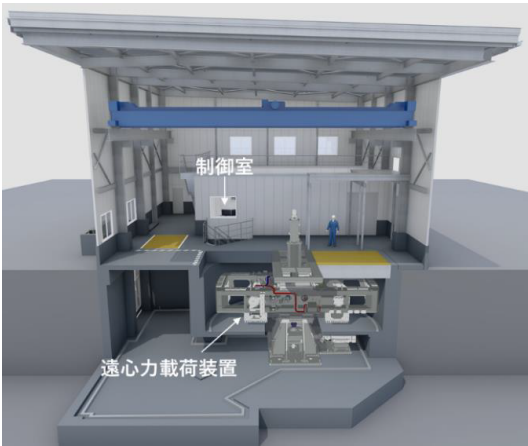
モデル		縮尺	土の密度	下向きの加速度	深さ z における拘束圧
実物	 深さ z 5.0m 重力加速度 1G 拘束圧 σ 拘束圧 σ = 土の密度 ρ × 重力加速度 1G × 深さ z	1	ρ	1G	$\sigma = \rho \cdot 1G \cdot z$
1G 場での縮尺模型実験	 重力加速度 1G 0.1m 深さ z/50 拘束圧 σ/50 拘束圧 σ/50 = 土の密度 ρ × 重力加速度 1G × 深さ z/50	1/50			$\sigma/50 = \rho \cdot 1G \cdot z/50$
遠心模型実験	 遠心加速度 50G 0.1m 深さ z/50 拘束圧 σ 拘束圧 σ = 土の密度 ρ × 遠心加速度 50G × 深さ z/50			50G	$\sigma = \rho \cdot 50G \cdot z/50$

2. 遠心力载荷装置とは

図－１に遠心力载荷装置の概要図を示す．本装置は、小型模型に対して遠心力を载荷する装置であり、本装置を用いて遠心力を载荷した状態で実施する模型実験を「遠心模型実験」という．遠心模型実験は、実物の1/50 程度の縮尺模型に重力の50 倍程度（50G）の遠心力を、見かけの重力として载荷した状態で地震や浸透、静的载荷などの外力を与えて、模型の挙動を計測・観察する実験手法である．

遠心模型実験では、遠心力载荷装置中央の回転軸から左右に伸びたアーム先端の揺動架台と呼ばれる部分に縮尺模型（1/50 縮尺）を搭載する．装置停止時（図中左側）には、縮尺模型に対して1G の重力加速度が作用している．これに対して、本装置稼働時には回転軸を中心として、水平方向にアームおよび揺動架台が回転し、揺動架台上の縮尺模型に対して遠心力が作用する．アームと揺動架台の接続部はピン構造となっており、装置の回転により作用する遠心力の増加に合わせて、揺動架台が徐々に振れ上がる仕組みである．装置が高速で回転することで、図中右側のように揺動架台が水平近くまで振れ上がり、縮尺模型の下向き（装置回転軸から外向き）に遠心力（と重力の合力）が载荷される．この遠心力を模型に対する見かけの重力として载荷した状態で模型実験を行う．表－２に実物と模型実験の関係を示す．実物に対する縮尺模型を用いた1G 場における模型実験の場合、模型地盤に作用する拘束圧は、模型縮尺に応じて小さくなる．

そのため、作用する応力に依存する地盤材料の強度や変形は実物と異なり、実物の挙動を高精度に再現することができない．一方、縮尺模型に対して模型縮尺に応じた遠心力を载荷する遠心模型実験の場合、拘束圧は実物と同等となるため、実物の強度や変形を再現した高精度な模型実験が可能となる．



図－２ 遠心载荷実験棟パース図

表－３ 遠心力载荷装置の仕様

項目		仕様
有効回転半径 (m)		3.5
最大遠心加速度 (G)		100
最大搭載容量 (G・ton)		200
载荷スペース (m)	L	1.2
	W	1.2
	H	1.0

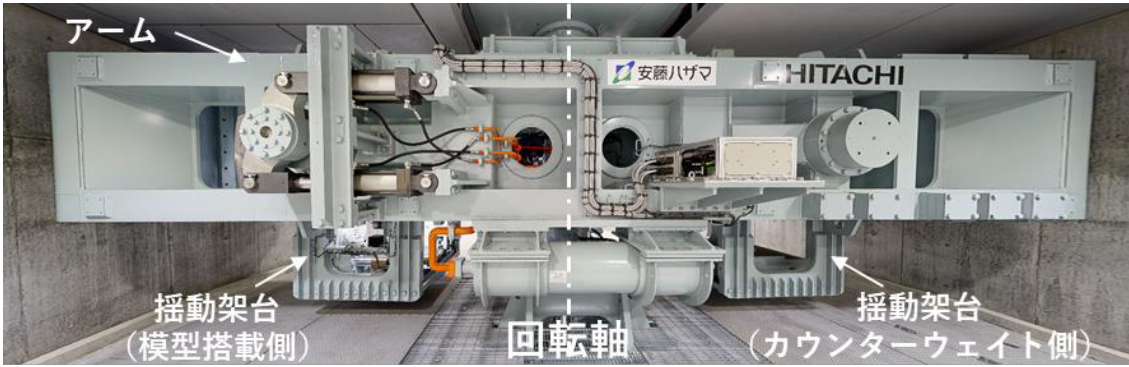


写真-1 遠心力载荷装置全景

3. 当社の遠心力载荷装置

3.1 遠心力载荷装置の仕様

図-2に当社の遠心载荷実験棟のパス図を示す。遠心力载荷装置の導入に合せて、新たに遠心载荷実験棟を建設した。遠心载荷実験棟は地下2階、地上1階の構造となっており、地下2階は動力装置を設置しているモーターピット、地下1階は遠心力载荷装置本体を設置している遠心ピット、地上1階は制御室および模型作製スペースで構成されている。実験模型は地上部で作製した後、天井クレーンを用いて、遠心力载荷装置上部のピット開口部から地下1階の遠心ピット内に搬入する。

表-3、写真-1に遠心力载荷装置の仕様および装置全景を示す。本装置は、有効半径が3.5mであり、国内に存在する遠心力载荷装置の中で中規模の装置である。最大遠心加速度は100Gであり、実物の1/100の縮尺模型を用いた遠心模型実験が可能である。最大搭載容量は200G・tonであり、最大遠心加速度100Gの遠心模型実験では、最大2tonの模型を搭載して遠心力を载荷することができる。最大搭載容量には、模型および模型土槽に加え、加振や静的载荷など外力を与えるための载荷装置や計測装置などの重量も含まれる。

写真-2に本装置の揺動架台（模型搭載側）を示す。模型土槽搭載スペースの上部に、計測器を接続する中継盤、実験用回転ジョイントの接続ケーブルが配置されており、側面に模型観察用カメラが配置されている。表-4～6に計測装置、回転ジョイントおよび模型観察用カメラの仕様を示す。計測装置は全チャンネル同一周波数でサンプリングするノーマルモードと、高速・低速の2種類の周波数で同時にサンプリングするデュアルモードの2種類のモードで計測できる。ノーマルモードは、主に静的実験での計測を対象としており、計測開始および停止は手動である。デュアルモードは、主に振動台を用いた動的加振実験での計測を対象としており、計測開始は

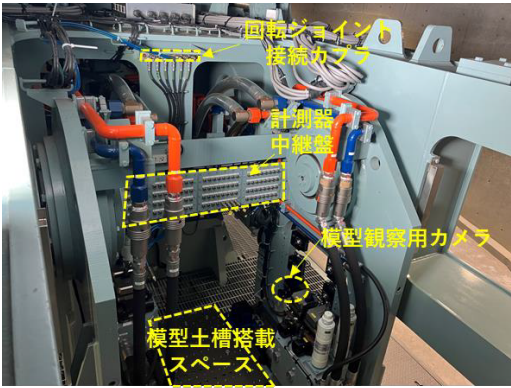


写真-2 揺動架台（模型搭載側）

表-4 計測装置の仕様

項目	仕様
チャンネル数	128ch
サンプリング周波数	1Hz～100kHz
測定モード	ノーマル／デュアル
測定開始	手動／加振トリガ
測定停止	手動／計測時間設定

表-5 実験用回転ジョイントの仕様

	耐圧仕様
水	0.7MPa
空気	0.7MPa
油	9.8MPa

表-6 模型観察用カメラの仕様

カメラ種別	有効画素数	撮影速度 (フレーム/s)
CCDカメラ	約210万画素	観察のみ
高速度カメラ	1,280×960	500～1,000
	640×480	4,000

手動に加え、振動台の加振をトリガとすることが可能である。

実験用回転ジョイントは、遠心力载荷中に水、空気、油を地上部から遠心力载荷装置の回転軸を通して、揺動架台上の模型土槽に供給・回収する経路である。この経

路を利用して、外部から液体を供給することで長時間の水の供給が必要となる降雨や洪水を再現することができる。なお、実験排水は回転中に揺動架台上から遠心ピット壁面に向けて排出し、ピットの床に設けられた排水溝により回収する。模型観察用カメラは、CCD カメラと高速度カメラがそれぞれ 1 台ずつ配置されている。CCD カメラは、実験中に模型の状況をリアルタイムに観察でき、高速度カメラは、主に動的加振実験において画像解析に使用する高精細な画像を連続的に撮影できる。また、高速度カメラは、計測装置と同様に振動台の加振システムと連動しており、振動台の加振をトリガとして撮影を開始できる。

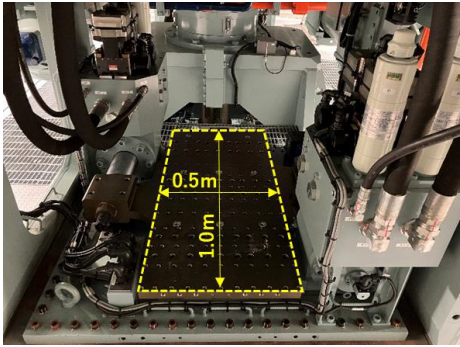
3.2 付帯設備

(1) 振動台

写真－3、表－7 に振動台の写真と仕様を示す。遠心力载荷装置には、電気油圧サーボ式の水平一軸振動台が設置されており、遠心力を载荷した状態で地震動などを再現した加振実験を行うことができる。最大で 370kg の模型を搭載した状態で加振でき、地震波、正弦波およびランダム波を入力できる。入力波の制御は、加速度制御および変位制御から選択でき、目標とする入力波に対して複数回の試加振と波形補正を行って、実験に使用する入力波を作成する。

(2) 模型土槽，真空脱気槽

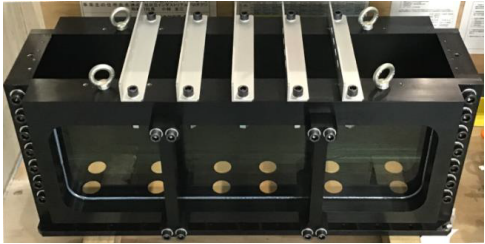
写真－4～6 および表－8 に剛土槽，せん断土槽および真空脱気槽の写真と仕様を示す。剛土槽は，土槽側部の一面が強化ガラスとなっており，実験中に模型断面を観察できる。また，土槽底面にはφ35mm，厚さ10mm のポーラスストーンが12 箇所に配置されており，土槽底面より液体の供給および排出が可能である。土槽上部には，最大 30kg までの試験器具を搭載でき，レーザー変位計などの計測装置や静的载荷装置を載せた状態で実験が可能である。せん断土槽は，土槽壁面が14 段のアルミフレームとゴムメンブレンで構成されており，アルミフレームが土槽長手方向に±35mm の範囲で水平変位する構造である。せん断土槽も剛土槽と同様に土槽底面にポーラスストーン（φ50mm，厚さ10mm）が合計8 箇所配置されており，土槽底面より水などの液体の供給，排出が可能である。真空脱気槽は，剛土槽およびせん断土槽を格納できる寸法であり，土槽を格納した状態で真空脱気が可能である。真空脱気した状態で外部から液体を供給でき，模型地盤の飽和に使用する。



写真－3 振動台

表－7 振動台の仕様

項目		仕様
最大搭載質量 (kg)		370
加振可能な遠心加速度 (G)		25～100
最大加振加速度 (G)		50
最大速度 (cm/sec)		100
最大変位 (mm)		±5.0
加振周波数 (Hz)		10～300
テーブル寸法 (m)	L	1.0
	W	0.5



写真－4 剛土槽



写真－5 せん断土槽



写真－6 真空脱気槽

表－8 土槽および真空脱気槽の仕様

項目		剛土槽	せん断土槽	真空脱気槽
内寸法 (m)	L	1.0	0.6	2.0
	W	0.2	0.4	1.2
	H	0.4	0.35	1.0
重量 (kg)		216.8	196.0	-

4. 遠心模型実験による堤体の安定化工法の開発

4.1 背景

当社の遠心力载荷装置を用いた、河川堤防の安定化工法開発の取組みについて紹介する。近年、降雨の激甚化、集中化により河川堤防の被害が増加しており、特に令和元年台風第19号では全国で142箇所の河川堤防が決壊し、甚大な被害が生じた。決壊した堤防のうち86%は「越水」が決壊の主な要因であると推定されており、降雨により越水が生じた場合であっても決壊するまでの時間を少しでも長くできる「粘り強い河川堤防」の整備が求められている²⁾。このような背景から透水性を有する被覆工および地盤改良工を併用した越水対策工法の開発に取り組んでいる³⁾。本章では、本工法の適用効果確認を目的として実施した遠心模型実験について報告する。

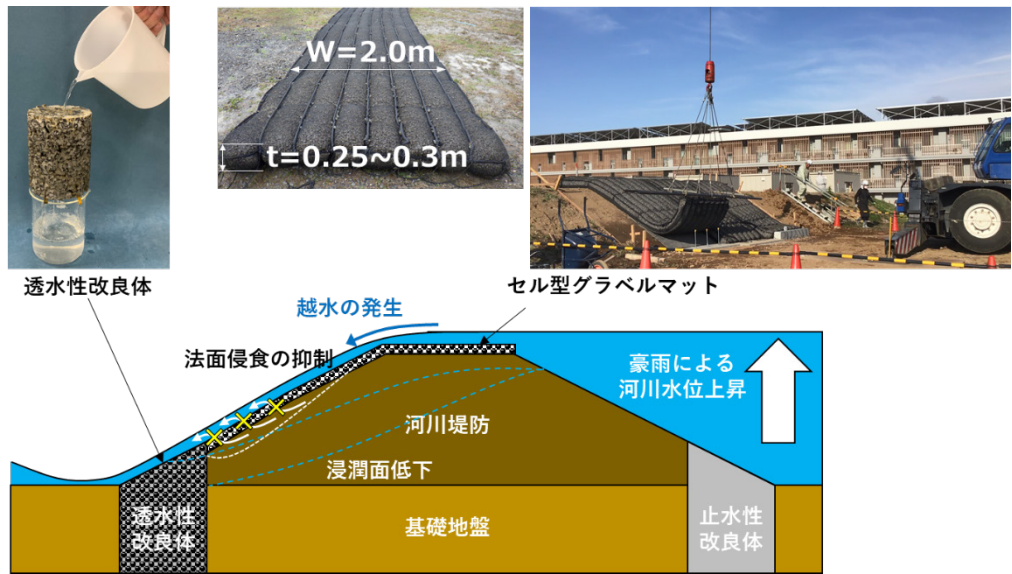
4.2 安定化工法の概要

図－3に本工法の概要図を示す。本工法では、河川堤防の川表側法尻部に止水性改良体、川裏側法尻部に透水性改良体、堤体天端および下流側法面にセル型グラベルマットを配置する。止水性改良体は一般的な現地攪拌方式のセメント系固化改良体である。透水性改良体は、

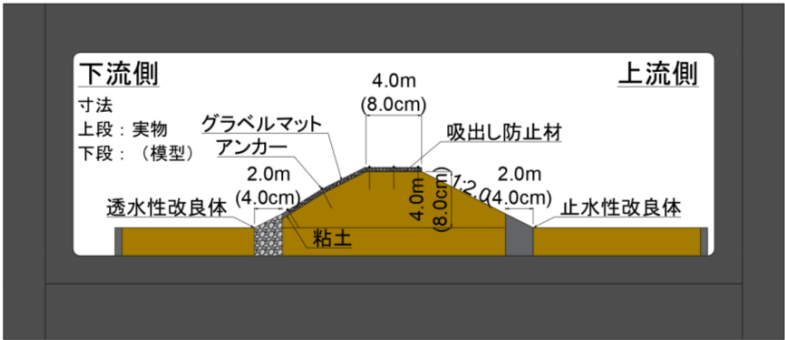
透水性の高い砕石に少量のセメントスラリーと混和材を混合して、空隙を確保した状態で固化する改良体であり、優れた透水性とせん断強度を有している。セル型グラベルマットは、実寸法で目開き10mmの化学繊維製ネット素材の袋に最大粒径10～80mmの砕石材を充填した被覆工であり、透水性改良体と同様に透水性を有することに加え、法面等の凹凸に追従できる柔軟な被覆工である。河川堤防の越水時には、透水性改良体により川裏側法尻部の洗堀を防止するとともに、堤体内の浸透水を効率的に排水する。また、セル型グラベルマットにより天端および法面部を拘束するとともに、マット内を越流水が流れることによる流速低下効果によって天端および法面の侵食を抑制する。これらの効果により、越水時の堤体盛土の侵食を抑制し、河川堤防を越水に対して粘り強い構造とする工法である。

4.3 遠心模型実験の概要

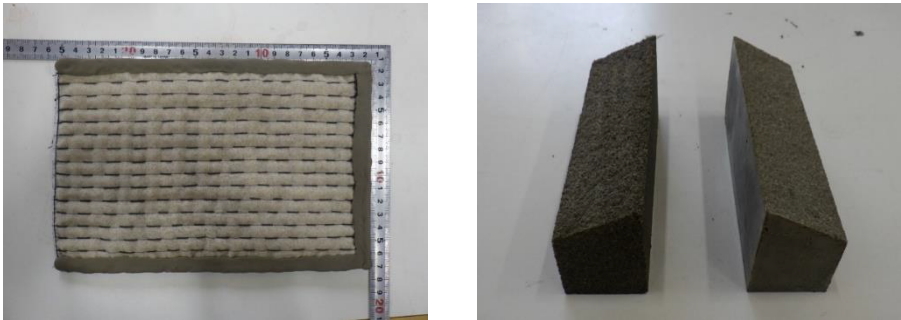
図－4、表－9に模型概要図と模型材料一覧を示す。本実験は遠心加速度50G場にて行った。模型土槽は前述した内寸法幅1.0m、高さ0.4m、奥行0.2mの剛土槽を使用し、遠心力場の相似則に基づいて実物の1/50の寸法で模型を作製した。図－5に堤体盛土および基礎地盤の粒度分布を示す。図中には模型材料および実物換算の粒度分布を示している。本実験では、洗堀現象を再現するための無次元数であるシールズ数を実物と模型で一致させた⁴⁾。堤体盛土および基礎地盤は砂質土を想定し、模型縮尺に合わせて模型材料の粒径が実物の1/50となるように、珪砂4～9号およびカオリン粘土を混合した。堤体盛土および基礎地盤は同一材料とし、最適含水比に



図－3 安定化工法の概要図



図－４ 模型概要図



写真－７ 対策工模型（左：セル型グラベルマット，右：透水性改良体および止水性改良体）

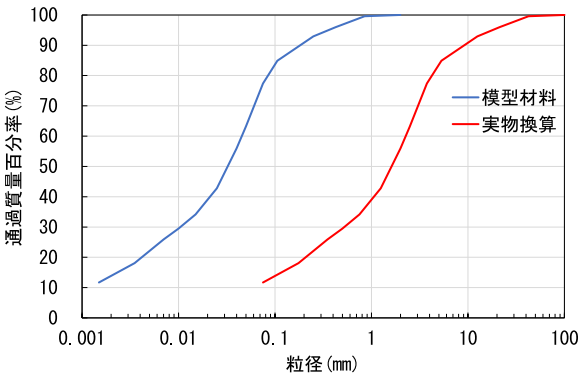
調整した混合土を用いて湿潤締固めで作製した。写真－７にセル型グラベルマットと透水性および止水性改良体の模型を示す。対策工として設置した法尻改良体はプレキャストとし、上流側法尻に止水性改良体、下流側法尻に透水性改良体を配置した。グラベルマットは、粒度調整した珪砂５号を目開き 0.25mm のメッシュ状の袋に充填して作製した。堤体盛土の天端および下流側法面上に不織布製の吸出し防止材とグラベルマットを重ねて敷設し、アンカーを模擬した針で固定した。グラベルマットと透水性改良体、土槽壁面との境界部は粘土で接続した。本実験では、遠心加速度 50G に到達後、河川の急激な水位上昇を模擬して堤体上流側の水位を上昇させた。目標越流水深を 30cm として上流側水位を保持し、越水に伴う侵食状況を観察した。

4.4 実験結果

図－６に越水に伴う堤体の侵食状況を示す。無対策では越水直後に堤体下流側法尻部に侵食が発生し、その後下流側法面全体に侵食が広がった。堤体侵食は下流側から上流側に向かって徐々に進行し、越水開始から約 80 分後に堤体上流側法肩に侵食が到達して、堤高が維持できず決壊に至った。対策有では、約 180 分の越水に対して堤体に侵食等の変状は確認されなかった。その後、越水開始約 210 分より、グラベルマットと透水性改良体の境界部分より堤体土の流失が確認され、それに伴ってグラベルマットの表面に沈下が発生した。

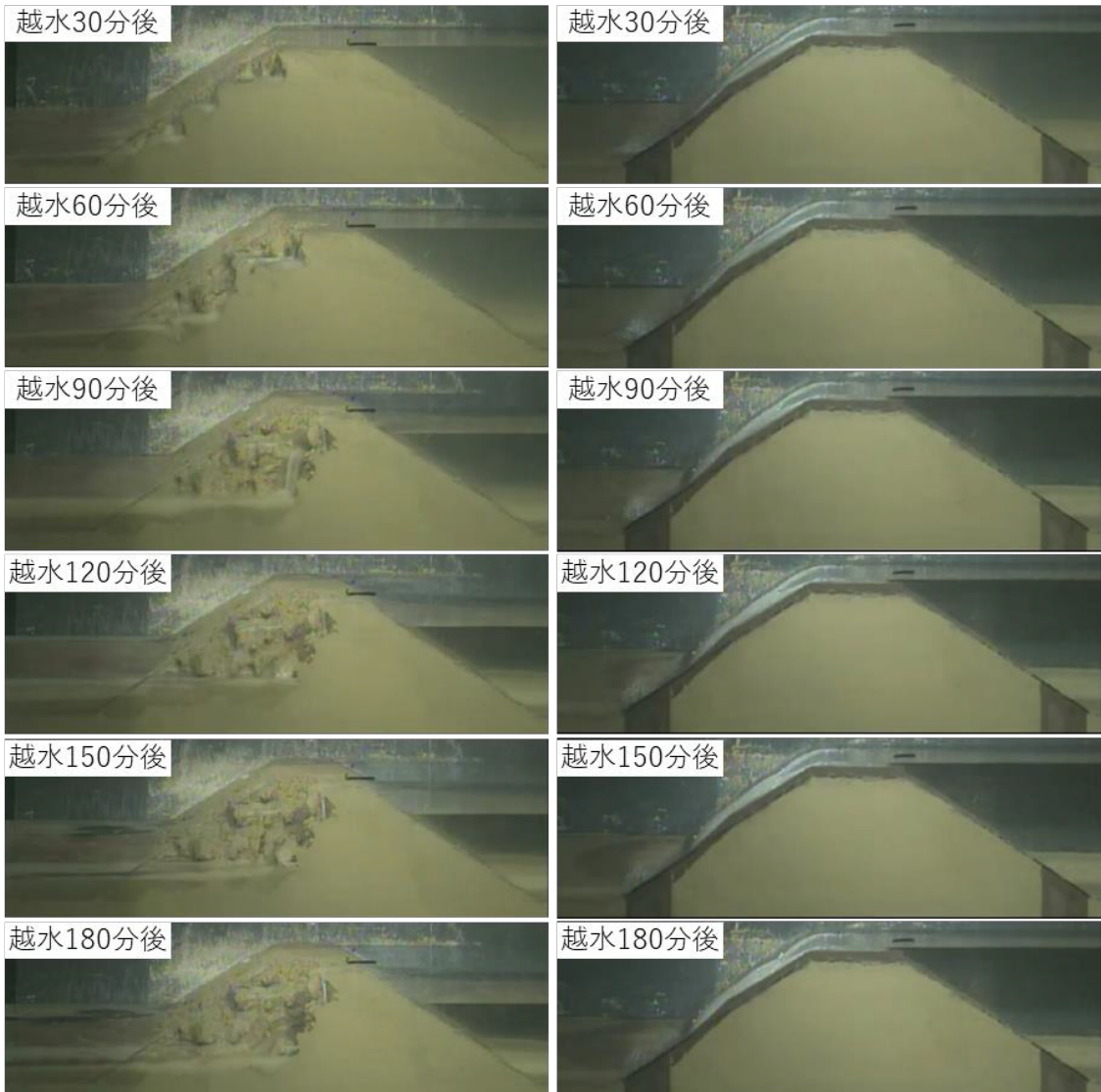
表－９ 模型材料一覧

モデル名	材料	材料物性
堤体盛土	珪砂， 加リン粘土の 混合土	$\rho_{\text{dmax}}=1.852\text{g/cm}^3$ ， $w_{\text{opt}}=13.6\%$ ， $\rho=1.667\text{g/cm}^3$ ， $w=13.6\%$ ， $D_c=90.0\%$ ， $k=3.38\times10^{-7}\text{m/sec}$
基礎地盤		
止水性改良体	セメント 改良体	$\rho=2.039\text{g/cm}^3$ ， $k=6.76\times10^{-10}\text{m/sec}$
透水性改良体	セメント 改良体	$\rho=1.881\text{g/cm}^3$ ， $k=1.56\times10^{-4}\text{m/sec}$
グラベルマット	メッシュ材 珪砂 5 号	$D_{\text{max}}=0.3\text{mm}$ ， $t=6\text{mm}$ ， $\rho=1.466\text{g/cm}^3$
吸出し防止材	不織布	$t=1.0\text{mm}$
間隙水	脱気水	-



図－５ 堤体盛土および基礎地盤の粒度分布

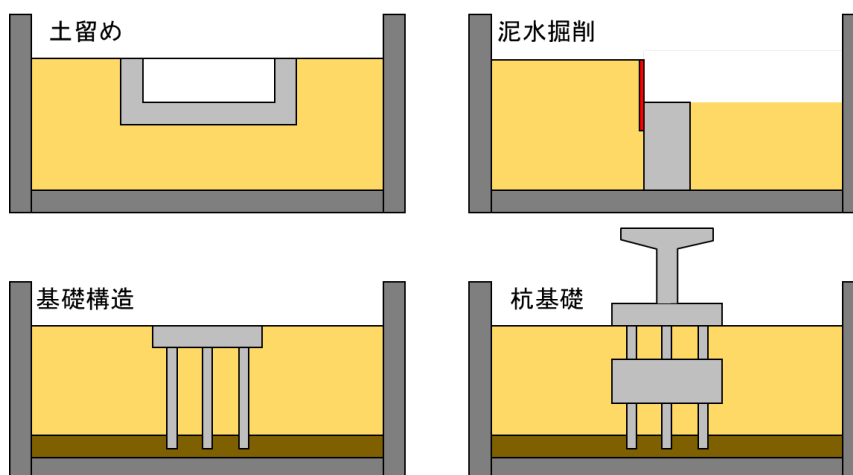
写真－８に実験終了後の模型下流側の状況を示す。対策有では、グラベルマットを撤去した状況を合わせて示す。無対策では、土槽ガラス面側の決壊に至った侵食箇所



図－6 越水に伴う堤体の侵食状況（左：無対策，右：対策有）



写真－8 実験終了後の模型下流側法面の状況
（左：無対策，中：対策有，右：対策有（被覆工撤去状況））



図－7 遠心模型実験の活用例

所に加えて、土槽壁面側の残存している堤体において複数のガリ侵食が確認できる。越水初期において堤体下流側法面全体に侵食が発生した後に、決壊箇所に侵食が集中し破堤に至ったと考えられる。対策有では、下流側法面の中段部におけるグラベルマットの沈下に加え、グラベルマットと透水性改良の境界部分の浮上りと透水性改良体下流側に堤体土の流出が確認できる。越水の継続に伴い、グラベルマットと透水性改良体の境界部に隙間が発生したことが堤体侵食およびグラベルマットの沈下につながったと考えられる。対策有では、最終的に沈下等の変状が発生したものの、無対策に対して侵食開始を抑制でき、本工法の適用により越水に対して粘り強い構造となることが確認できた。

5. まとめ

2023年9月に地盤・基礎分野の高精度な小型模型実験を実現する遠心力载荷装置の運用を開始した。

本装置を活用して、豪雨災害に備えた粘り強い河川堤防に関する技術開発に取り組んでいる。遠心模型実験に

よる堤体の安定化工法の適用効果検証の結果、透水性を有する被覆工および地盤改良工を併用した越水対策工法の適用により無対策に対して、侵食を抑制でき越水に対して粘り強い構造となることが確認できた。

今後は、図－7に示すように土留め形式や基礎構造の合理化、泥水掘削や杭基礎耐震補強の高度化などの実験を予定している。地盤・基礎分野の様々な課題に対して本装置を積極的に活用し、当社独自の差別化技術の開発や技術力向上に繋げていく。

参考文献

- 1) 岡村未対, 竹村次朗, 上野勝利: 講座 遠心模型実験－実験技術と実務への適用－2 遠心模型実験の相似則, 実験技術－利点と限界, 土と基礎, 52(10), pp. 37-44, 2004.
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室, 土木研究所 地質・地盤研究グループ (土質・振動): 粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料 (案), p. 6, 2023. 3.
- 3) 上田ら: 河川堤防の越水対策に関する遠心模型実験, 第58回地盤工学研究発表会, 2023. 7.
- 4) 土木学会 海岸工学委員会: 水理模型実験の理論と応用－波動と地盤の相互作用－, 丸善出版, 2021. 9.

Introducing new equipment, the "Geotechnical Centrifugal Loading Device" - Reproducing full-scale behavior with high accuracy through small-scale model experiments -

Tatsufumi NISHIO, Yuji ADACHI and Takuo MUROYAMA

In September 2023, we began operating our new equipment, the Centrifugal Loading Device. This device is used in centrifugal model experiments that can reproduce the behavior of real objects with high accuracy in small-scale model experiments in the fields of ground and foundations. In centrifugal model experiments, this centrifugal loading device applies a centrifugal force greater than gravity according to the scale of the model to the small model. This makes it possible to reproduce the same stress state in the ground as in the real thing in a small model ground. In this report, we will introduce the specifications and ancillary equipment of our new facility, as well as report on a stabilization method for embankments that we are developing using the centrifugal loading device.