

水位急降下時のフィルダムの安定性に関する研究

Stability evaluation of fill-type dams due to a rapid draw-down of the reservoir water

大森康次[†], 奥村哲夫^{††}, 木村勝行^{††}, 成田国朝^{††}, 大根義男^{††}

Koji OMORI, Tetsuo OKUMURA, Kunitomo NARITA, Katsuyuki KIMURA, Yoshio OHNE

Abstract Fill-type dams for power generation and irrigation purposes have often experienced severe damages of slope failure due to a rapid draw-down of the reservoir water in seasons of full operation. This paper concerns seepage flow behavior in earth slopes and distribution of pore water pressure in the dam body and their influence on slope instability, due to a rapid draw-down of the reservoir water. Centrifuge model tests were carried out on several model earth fills to discuss and propose an appropriate procedure of stability evaluation of slopes. The test results and stability analysis showed that the residual pore water pressure generated in the dam body due to a rapid-draw down of the reservoir water has a serious influence on slope stability.

1. はじめに

発電や灌漑を目的としたフィルタイプのダムでは、短期間の放水により貯水位が急激に降下するときがある。このとき、貯水位の降下速度と堤体内間隙水の排水速度の相対関係により、堤体内間隙水の排水が遅ければ、堤体内には多量の間隙水圧が残留することになる。この残留間隙水圧は、土の有効応力を減じ、せん断抵抗力を低下させるとともに、貯水位の降下によって堤体内の水頭値分布が急激に変化するから浸透は貯水位側に向かって起こり、透水力が堤体内斜め下方向に働くようになるので滑動力が増し、最終的に上流側法面破壊などの被害が発生する恐れがある。この貯水位の急降下に伴う堤体内の浸透挙動や間隙水圧の挙動を把握することは、ダムをより安全な構造物として設計する上で極めて重要なことと考えられる。

本研究は、水位急降下に伴う堤体内の浸透挙動、間隙水圧挙動および破壊挙動を遠心模型実験で再現し、盛土斜面の安定性を検証するとともに、このような現象を FEM 浸透解析で定量的に評価するために必要となる不飽和土の浸透特性を遠心力作用下で把握することを目的

としている。具体的には以下の項目に的を絞って研究を進めた。

- (1) 遠心模型実験による水位急降下時の堤体内の浸透現象の再現および残留間隙水圧挙動の評価
- (2) 水位急降下に伴うフィルダム堤体の破壊挙動の解明
- (3) 遠心法による不飽和土の浸透特性の把握および信頼性の評価

2. 水位急降下実験

実験装置の概略を図-1 に示す。内寸法 W460×D200×H460 のアルミ製土槽コンテナ内に間隙水圧計②～⑨および堤体下流側に鉛直ドレーン（珪砂 3 号）を埋設しながら 10 層に分けて均一に締固めた後、高さ 250mm の堤体模型を法面が対数らせん状となるように掘削して作製し、法先に貯水位の変化を測定するための水圧計①を設置した。

実験は、堤体底面に対して 30G の遠心加速度を与え（これにより実物換算で 7.5m の堤体に相当）、目標水位 210mm（実物換算で 6.3m）一定になるまで貯水し、堤体内浸透流が概略定常浸透状態となったのを確認した後、貯水位を急降下させて堤体内の間隙水圧の経時変化を測定する。同時に、遠心載荷実験装置外に取り付けられた

[†] 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 土木工学科（豊田市）

CCD カメラにより, 土槽前面の亚克力板を通して実験中の模型堤体を観察した. 表-1 に実験条件を示す. また, 実験に用いた試料の物理・力学的性質を表-2 に示す.

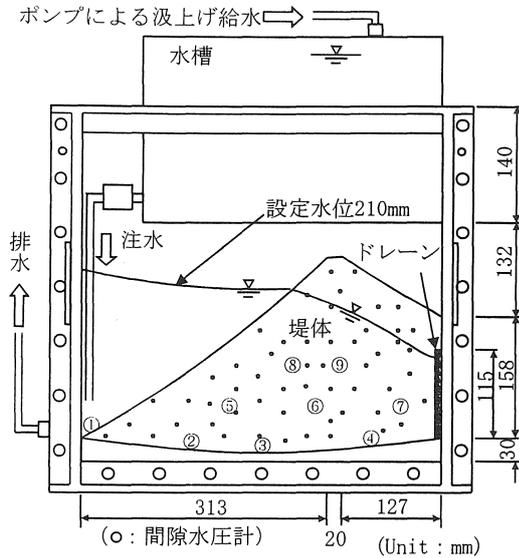


図-1 水位急降下実験装置の概略

表-1 実験条件

CASE	CASE1			CASE2	
	(a)	(b)	(c)	破壊実験	
試料	試料 A			試料 B	
斜面勾配	1:1.2			1:0.8	
貯水位	遠心場(s)	28	52	174	27
降下時間	実物換算(h)	7.0	13.0	43.5	6.75

表-2 試料土の物理・力学的性質

	試料 A	試料 B
土質名称	シルトまじり砂	
最大粒径 (mm)	2.0	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.636	2.545
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.842	1.819
最適含水比 (%)	13.0	13.6
締固め度 (%)	92	85
締固め乾燥密度 (g/cm ³)	1.695	1.546
初期含水比 (%)	13.0	6.0
飽和透水係数 (cm/s)	1.63 × 10 ⁻³	5.85 × 10 ⁻³

3. 不飽和土の浸透特性に関する遠心実験

実験装置の概略を図-2 に示す. なお, 試料は豊浦砂 ($\rho_s=2.641\text{g/cm}^3$) を用いた. 供試体モールド ($\phi 150$, $h266\text{mm}$) は厚さ 25mm の硬質ナイロン製であり, アルミ容器 (570×440, $h140\text{mm}$) の上部に設置している. サクシオンおよび体積含水率を測定するためのテンシオメーターおよび ADR (Amplitude Domain Reflectometry) はモールド側面に中心間隔 80mm で, それぞれ 3 本固定されている. ここで, 測定位置については供試体表面に近い方から位置 (A), (B), (C) とした. また, モールド底面には土粒子の流出を防ぐためのポラス板 ($\phi 150$, $t6\text{mm}$) が設置してある. 供試体 ($\phi 150$, $h260\text{mm}$) は ADR およびテンシオメーターをモールド側面に固定し, 脱気水を満たした状態のモールド内に飽和状態の豊浦砂を乾燥密度 $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3$ となるように水中落下させて作成した.

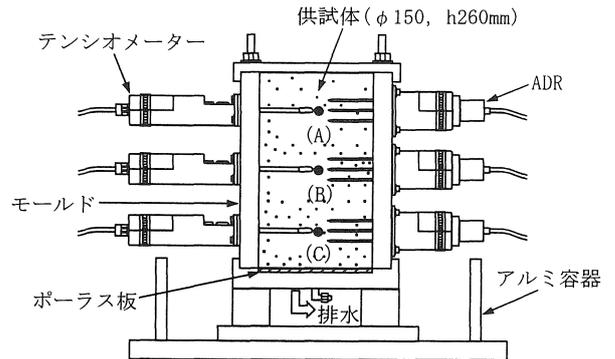


図-2 不飽和土の浸透特性実験装置の概略

実験は 1G 場で重力による排水を行った後, 実験装置底面に対して nG の遠心加速度を与え, 所定の加速度で排水がほぼ終了した後, 徐々に加速度を上げる方法を採用した. 本実験における実験装置底面に対して与えた遠心加速度は 5~50G である.

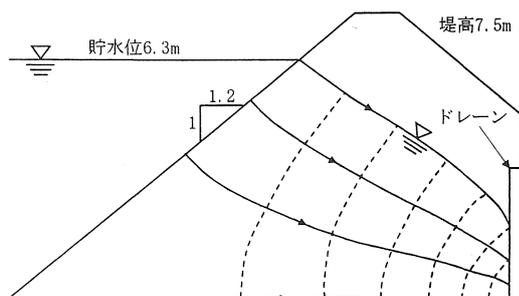
4. 結果と考察

4.1 水位急降下実験

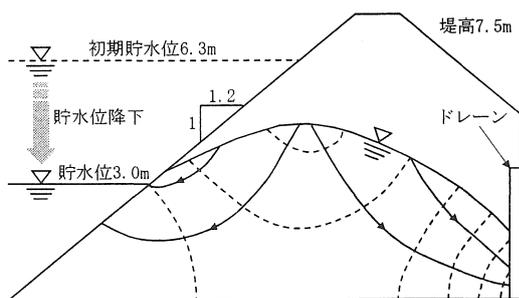
4.1.1 水位急降下に伴う堤体内の浸透挙動

水位急降下時の堤体内の浸透状況を把握するために, CASE1 (a) の結果をもとに描いた水位降下開始直前, 水位 1/2 時, および水位降下終了時の 3 つの状態におけるフローネットを図-3 に示す. 満水位からの水位降下により図 (a) のような定常的な浸透状態から図 (b), (c) のような非定常的な浸透状態に移り変わり, この状態で

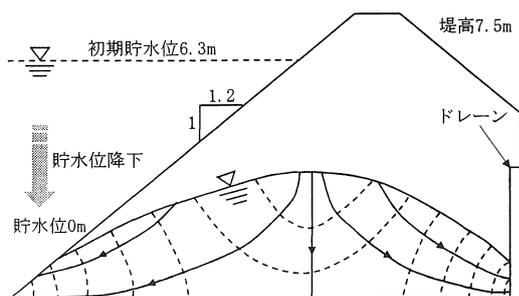
は貯水位側への浸透が発生しており、堤体内斜め下方向に透水力が作用していることが分かる。また、水位降下とともに貯水位と堤体内浸潤面最高位の差は徐々に大きくなり、貯水位が降下し終わった直後の差が最も大きくなる。したがって、この時に最も多量の間隙水圧が残留し、堤体の安定性上きわめて好ましくない状態が現われることになる。



(a) 水位降下開始直前 (定常浸透状態)



(b) 水位 1/2 時 (非定常浸透状態)



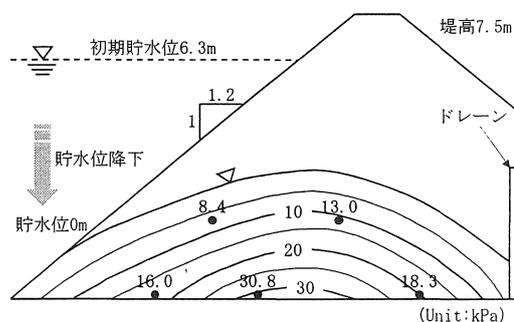
(c) 水位降下終了時 (非定常浸透状態)

図-3 水位降下時のフローネット [CASE1 (a)]

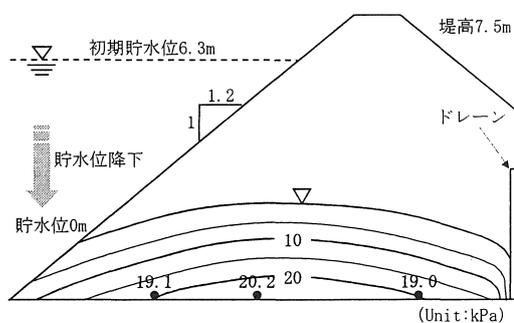
4. 1. 2 水位降下に伴う堤体内の間隙水圧

降下速度の相違による堤体内の間隙水圧分布を比較するために、CASE1 (a), (b), (c) の3ケースについて水位降下終了時における残留間隙水圧分布を図-4に示す。なお、図中の●は間隙水圧計の埋設位置を示しており、添字の値は測定値を示す。図に示した3ケースの水位降下時間はそれぞれ実物換算で7h, 13h, 43.5hであ

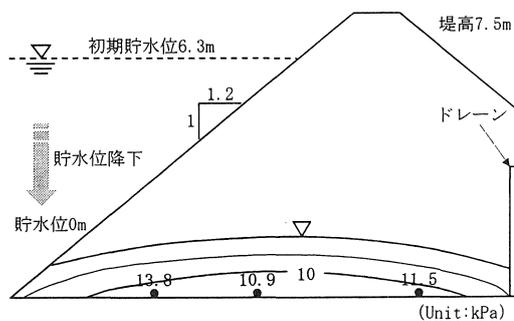
るが、これらの浸潤面形状を比べると、貯水位の降下時間が短いほど浸潤面形状が上に凸となるのが顕著に現われていることが見て取れる。また、残留間隙水圧について比較すると3ケースともに浸潤面最高点下部で最も大きな間隙水圧が残留しており、その大きさは約6mの貯水位を40h程度の時間をかけて降下させた場合 [CASE1 (c)] に対し、13hの降下 [CASE1 (b)] ではその約2倍、7hの降下 [CASE1 (a)] では約3倍もの残留が認められ、本実験で用いたシルトまじり砂のような比較的透水性の高い材料からなる堤体においても貯水位の降下が速ければ、堤体内に多量の間隙水圧が残留し安定性を損なう恐れがある。



CASE1 (a) 水位降下時間 28s (実物換算 7h)



CASE1 (b) 水位降下時間 52s (実物換算 13h)



CASE1 (c) 水位降下時間 174s (実物換算 43.5h)

図-4 水位降下終了時の残留間隙水圧分布

4. 1. 3 水位急降下時における堤体の安定性

堤体の安定性の検討については, 水位降下速度の相違が堤体上流側法面の安定性に与える影響について調べた. 安定解析は実験により得られた堤体内の間隙水圧の値をもとに描いたフローネットより堤体内の間隙水圧分布を求め, 間隙水圧を取り入れた有効応力法により行い, 計算方法は簡易 Bishop 法を用いた. すべり形状については, 土質が均一で比較的単純な斜面のすべり面形状は円弧と見なせることが多いことから円弧形状とした. またすべり帯片は 200 分割し, 貯水圧は上流側法面に作用する抵抗モーメントとして取り込んでいる. 各帯片における重量は飽和領域において $\gamma_{sat}=2.052g/cm^3$ を用い, 不飽和領域においては $\gamma_t=1.915g/cm^3$ を用いた. 土の強度定数は試料 A に対して行った三軸 CU 試験より得られた $c'=20.0kN/m^2$, $\phi'=31.4^\circ$ であり, 飽和・不飽和領域で一定とした. また, 安定計算は繰り返し行い, 安全率が最小となる円弧を探し, 比較には最小安全率を用いた.

図-5 に最小安全率を与える円弧形状を示し, 図-6 に CASE1 (a), (b), (c) の各ケースにおける水位低下率と安全率の関係を示す. ここで, 水位低下率とは満水位の定常浸透状態で 0%, 水位が 1/2 まで降下した状態で 50%, 降下終了時で 100%とし, この 3 つの状態における安全率を比較した. 図-5 に示したように, 最小安全率を与える円弧はいずれも法先付近を通っていることが分かる. この理由として, 本実験の堤体は砂質土で急勾配であるため法先から浅いすべりが生じやすいためであると考えられる. 図-6 の結果を見ると, 3 ケースともに水位低下率 0~50%の間で安全率の低下が著しいことが見て取れる. この理由として, 上流側法面に作用していた貯水圧が減少したこと, 間隙水圧が残留したことの 2 つが考えられるが, 水位低下率 50%から最も貯水位と堤体内浸潤面との差が大きい水位低下率 100%の間で安全率の低下がそれほど顕著に現われていないことから, この安全率の著しい低下は満水位から水位 1/2 間での貯水圧の減少による影響が大きいと考えられる. 降下速度の相違による安全率の差は, 水位低下率 50%, 100%ともに降下速度の最も速い CASE1 (a) と最も遅い CASE1 (c) で約 0.1 程度であり, これは降下速度の相違による堤体内残留間隙水圧の大きさによるものであると考えられ, 砂質土からなる透水性の高い堤体においても降下速度が速ければ排水遅れが生じ堤体の安定性に影響を及ぼすことが分かる.

図-7 は, 水位降下終了後の安全率の推移を示したものである. なお, 各ケースともに水位降下終了時から実物換算で 50h までの推移を示した. 図のように, 時間の経過に伴い安全率は徐々に上昇する. これは堤体内の残留間隙水圧が消散していくことによるものであると考え

られ, この間隙水圧の消散により堤体の安全率は貯水前の安全率 $F_s=2.115$ に近づいていくものと推察できる.

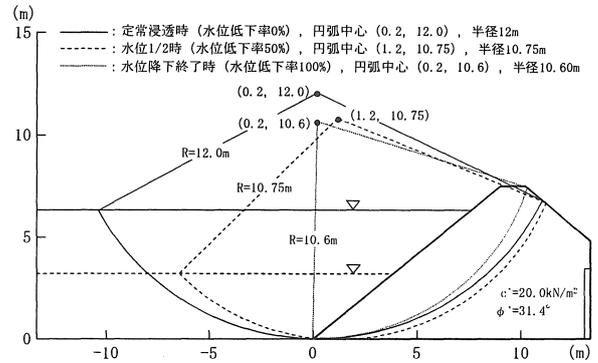


図-5 最小安全率を与える円弧形状

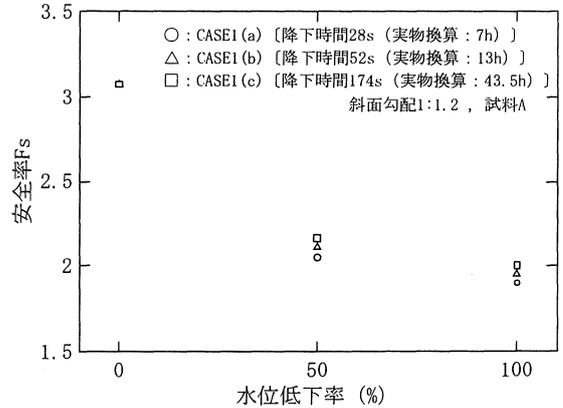


図-6 降下速度の相違による安全率の比較

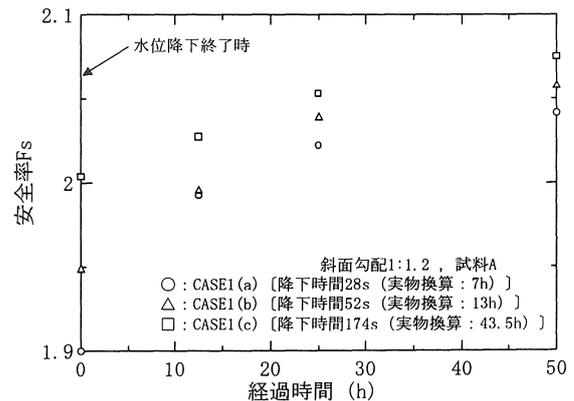


図-7 水位降下終了後の安全率の推移

4. 1. 4 水位急降下に伴う堤体の破壊挙動

堤体の破壊挙動を把握・検討するために CASE2 [斜面勾配 1 : 0.8, 試料 B, 水位降下時間 27s (実物換算で 6.75h)] の実験を行った. 図-8 は CASE2 の実験における水位降下時の貯水位および堤体内圧力水頭 (基盤面からの水柱高さ) の経時変化を示したものである. 図に

示した水位降下開始から 3s (実物換算で 0.75h), 貯水位約 170mm (実物換算で約 5.1m) で堤体上流側法面が表層すべりの形態で破壊した。堤体破壊時の写真を写真-1 に示す。写真-1 より表層すべりが開始していることが分かる。これに引き続き貯水位が降下することで, 貯水側へ土粒子が流出していく。この土粒子の流出は貯水位がすべり面以下となる t=10s (実物換算で 2.5h, 写真-2) まで続き, それ以降の水位降下終了までは堤体の破壊形態に変化は見られなかった。これより, 水位急降下に伴う堤体のすべり破壊は貯水位が降下し終わった時点では止まっており, 堤体が大崩壊に至る可能性は少ないと考えられる。

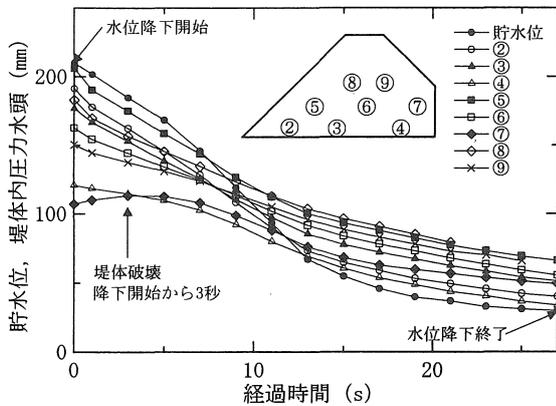


図-8 貯水位および堤体内圧力水頭の経時変化

実験後に土槽前面, 中間, 背面の3断面におけるすべり面の測量を行った。その結果を図-9 に示す。図に示したように, 土槽中間のすべり面に比べ前面, 背面のすべり面はやや浅い。これは, 模型堤体と土槽壁面との摩擦が影響しているものと考えられる。本実験では, この側壁摩擦を低減させる処理を行わなかったが, このような破壊実験を行う場合, この影響が大きく現われると考えられ, 土槽壁面への処理が必要である。

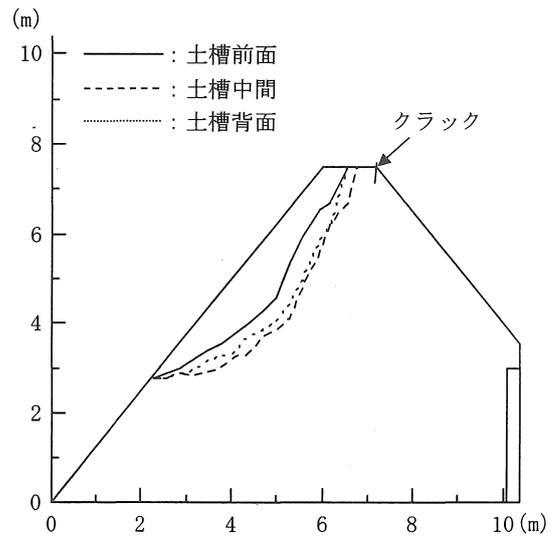


図-9 すべり面の測量結果

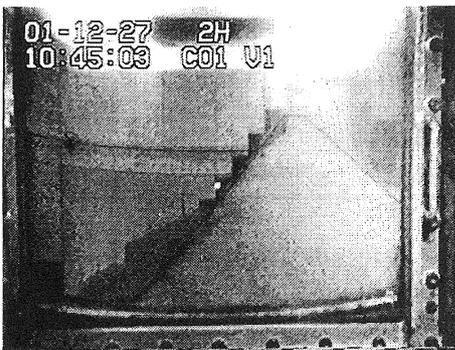


写真-1 破壊の開始 (降下後 3s)

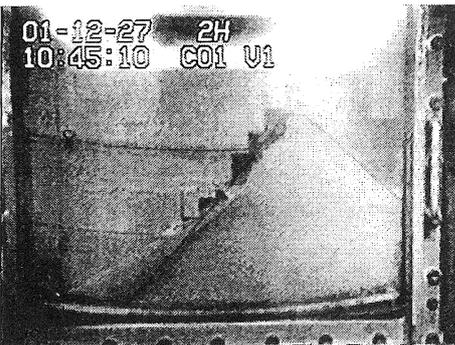


写真-2 土粒子の移動終了 (降下後 10s)

写真-3 は実験後に土槽上部から堤体を撮影したものである。写真から見て取れるように, 下流側法肩付近でクラックが生じている。なお, クラック深さは 1~1.5cm であった。この原因として, 貯水位の昇降, 上流側法面がすべり破壊したこと, および粘着力成分による抵抗があまり期待できなかったこと, などによるものと考えられ, このような変位量のごく小さい材料を用いた破壊実験を行う場合には精密な変位測定技術が要求されると考えられる。図-10 は破壊時の堤体内間隙水圧分布を示したものである。図のように間隙水圧はすべり土塊部で顕

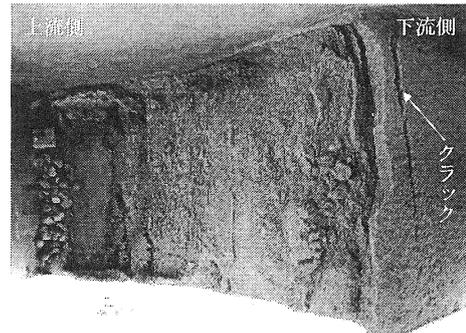


写真-3 下流側法肩付近に発生したクラック

著に残留していることが見て取れ, この残留間隙水圧の影響ですべり破壊が発生したことが分かる. なお, 本実験ではせん断による過剰間隙水圧の発生は見られなかった. この点については, 斜面表層付近に間隙水圧計を埋設して実験を行う必要があったと考えられる.

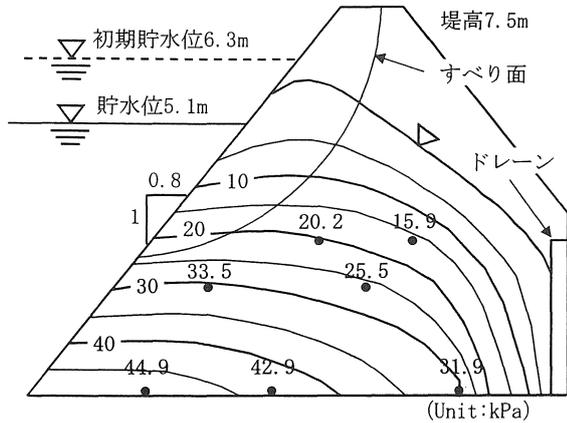


図-10 堤体破壊時の堤体内間隙水圧分布

破壊時の堤体の安定性については図-9 に示した 3 つのすべり面のうち土槽中間断面における測量結果を円弧近似したすべり面を対象として行った. また, 安定計算を繰り返し行い最小安全率を与える円弧を探し, 最小安全率についても求めた. なお, 計算方法については簡易 Bishop 法を用い, 各帯片における重量は飽和領域において $\gamma_{sat}=1.939\text{g/cm}^3$, 不飽和領域では $\gamma_t=1.639\text{g/cm}^3$ とし, 強度定数については試料 B に対して三軸 CU 試験を行い求めた. その結果である圧縮強さの 1/2 と主応力差最大時の平均有効応力の関係を図-11 に示す. 図に示したように, 強度定数は $c'=4.64\text{kN/m}^2$, $\phi'=23.92^\circ$ であり, 計算では飽和・不飽和領域で一定とした. 円弧近似結果および最小安全率を与える円弧形状を図-12 に示

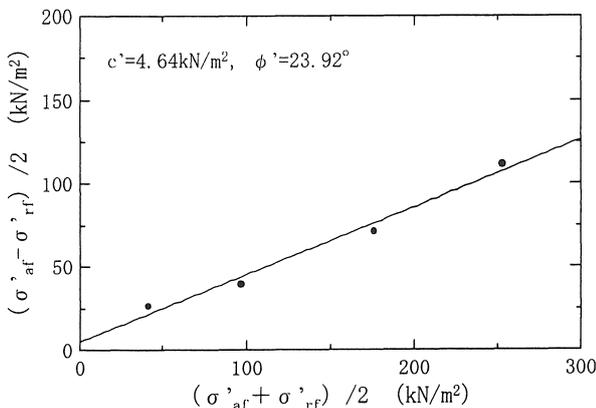


図-11 三軸圧縮試験結果 (試料 B)

し, 安定計算の結果を表-3 に示す. この結果, 測量結果を円弧近似したすべり面および最小安全率を与えるすべり面ともに安全率は 1.0 以下となり, いずれも破壊が説明できる結果となった. また, 本実験で発生した比較的浅いすべりの場合, すべり面上での土かぶり圧が小さく, 摩擦成分によるせん断抵抗が期待できないため, 堤体の安定性は有効粘着力の影響を大きく受けると考えられる.

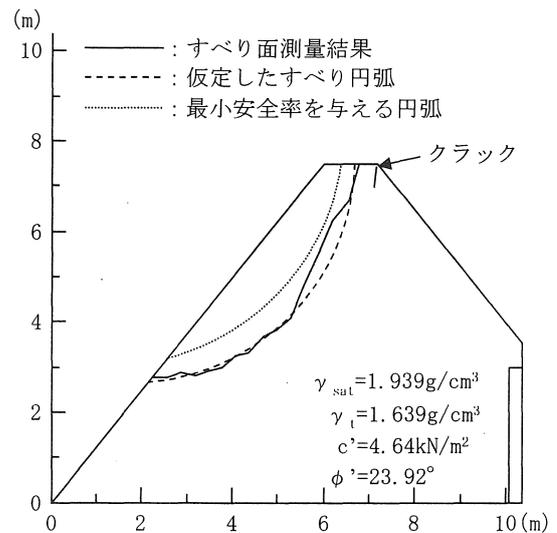


図-12 円弧近似結果および最小安全率を与える円弧

表-3 安定計算結果

	安全率 F_s
仮定したすべり円弧	0.921
最小安全率を与える円弧	0.828

4.2 不飽和土の浸透特性

本実験では排水により時々刻々と変化する体積含水率およびサクシヨンの測定に, ADR およびテンシオメータを用いたが, テンシオメータは先端にポーラスカップが取り付けられていることから, 測定中にテンシオメータの反応時間の遅れ (タイムラグ) が発生すると考えられた. これを調べるために, 図-13 に示すように自由水面を有した水容器とテンシオメータのポーラスカップ先端部とをビニールホースで繋ぎ, テンシオメータを固定した状態で水容器を上下に移動させ, その移動量とテンシオメータの応答値とを比較した. 図-14 に自由水面の移動量とテンシオメータの応答値 (圧力) を水頭値に換算した結果を示す. なお自由水面の移動量は, テンシオメータに負圧が作用する方向を正とした.

図よりテンシオメーターの反応時間の遅れは、圧力水頭 0mm からの容器降下時において 3~4 秒、約 550mm からの上昇時では両者にほとんど差が見られないことが分かる。本実験（排水実験）では降下時のタイムラグが問題となるが、全体的な測定精度を考え補正しないこととした。

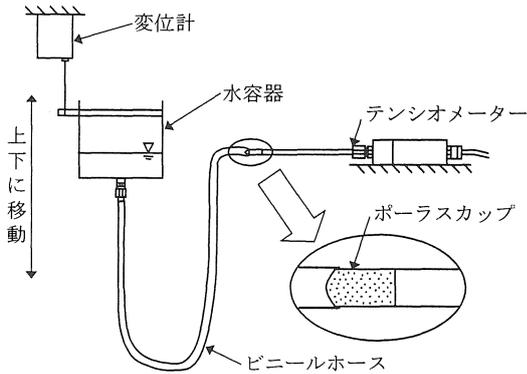


図-13 タイムラグ測定の概略

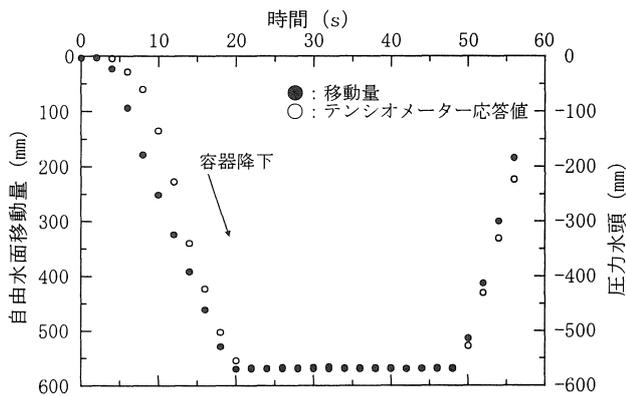


図-14 タイムラグの測定結果

図-15 に供試体の各位置に与えた遠心加速度の推移を示すとともに、図-16 および図-17 に本実験より得られた体積含水率および間隙水圧の経時変化を示す。図-16 および図-17 を見ると、設置位置 (C) の各測定値には 23~27 分の間で一時的に上昇する傾向が見られる。この理由として、設置位置 (C) では下方への水分移動量よりも上方からの水分供給量が多いために一時的に体積含水率が上昇し、これに伴って間隙水圧も上昇したことによるものと考えられる。なお、設置位置 (C) より上部の供試体表面に近い設置位置 (A), (B) ではこのような現象は見られない。以上のことから、遠心力による排水実験において、水分移動量が多い試料では初期段階における遠心力の増大間隔を小さくすること、ポラス板の選択に当たってはその透水性に十分注意を払うことが必要であると考えられる。

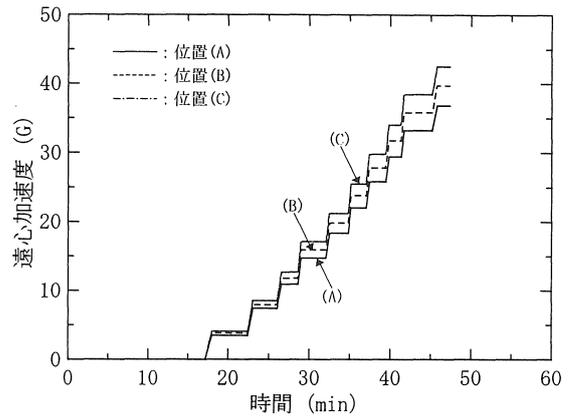


図-15 遠心加速度の推移

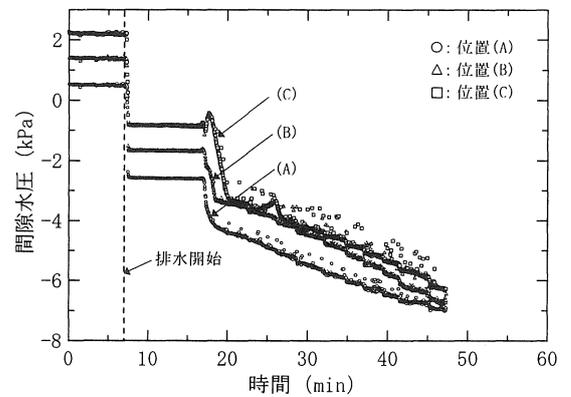


図-16 体積含水率の経時変化

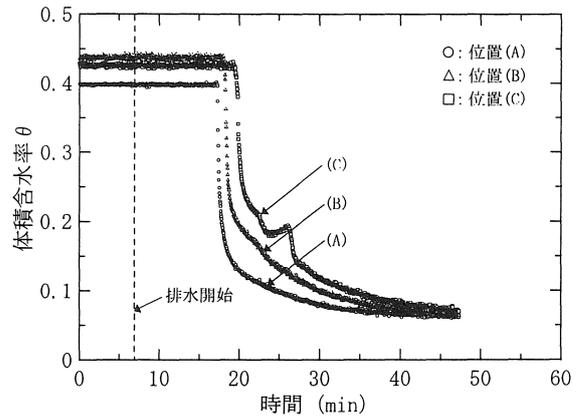


図-17 間隙水圧の経時変化

図-18 に図-15, 図-16 および図-17 の結果より求めた水分特性曲線および不飽和透水係数の結果を示すとともに杉井ら¹⁾が行った 1G 場における瞬時水分計測法の結果も示す。なお、図-16, 図-17 において、体積含水率および間隙水圧の上昇過程は計算から除いている。また、図中の実線は飽和体積含水率の理論値 ($\theta_s=0.432$) と定水位透水試験により得られた飽和透水係数 ($k_s=2.08 \times 10^{-2} \text{cm/s}$) を示したものである。本実験結果と杉井らが行った実験結果を比較すると、水分特性曲線について

は高飽和域を除いて本実験結果と杉井らの結果はほぼ一致している。高飽和域では本実験結果は飽和体積含水率の理論値と良好に一致している。不飽和透水係数については、本実験結果は杉井らの結果より高く現われているが、定水位透水試験より得られた飽和透水係数の値とほぼ一致している。以上の結果より、本実験の有効性が確認できるとともに、サクシオンおよび不飽和透水係数ともに体積含水率の低い範囲まで連続的に測定されており、測定時間は豊浦砂の場合 1 時間程度で十分である。

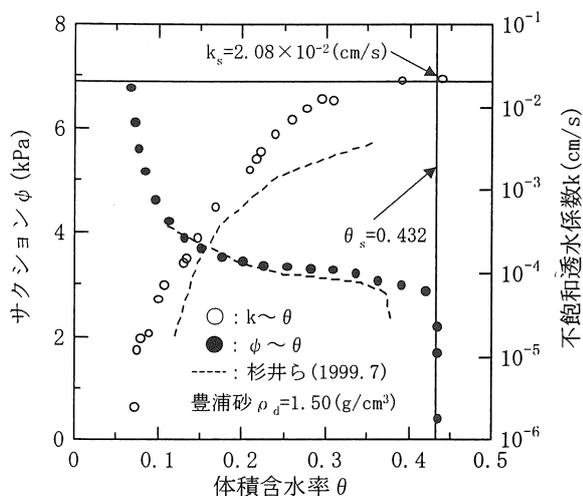


図-18 豊浦砂の不飽和浸透特性

5. 結論

本研究により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 水位急降下時の堤体内の浸潤面形状は上に凸形状となり、貯水位の降下が速いほど凸形状は顕著に現われる。そして、この凸形状が明確なほど堤体内斜め下方向に作用する透水力は大きく滑動力が増す。残留間隙水圧は、砂質土のような比較的透水性の高い堤体においても貯水位の降下速度が速ければ多量の間隙水圧が残留し、安定性を損なう恐れがある。堤体の安定性については、満水位からその 1/2 水位の間で安全率の低下が著しく現われ、これは貯水圧の影響による。
- (2) 水位急降下に伴う堤体の破壊挙動は良好に再現で

き、砂質土では表層すべりの形式で破壊が発生する。破壊時の堤体の安定性を検討した結果、安定性には土の強度定数、特に有効粘着力が支配的であることが判明した。

- (3) 遠心法による不飽和土の浸透特性は良好に把握できる。また、実験時間の短縮、低い水分領域に対する測定、遠心力が供試体全体に作用することによる間隙水のほぼ一様な排水など、従来の 1G 場の実験手法と比較して多くの利点が認められ、基本的に有効な試験法である。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金の援助を受けた研究であることを付記し、謝意を表する。

参考文献

- (1) 杉井俊夫・山田公夫・植村真美：瞬時水分計測法を用いた不飽和浸透特性の評価, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp. 1351~1352, 1999.
- (2) 山口柏樹・大根義男：フィルダムの設計および施工, 技報堂出版, 1973.
- (3) 土質工学会：講座・遠心模型実験, 土と基礎, vol. 35~36, 1987~1988.
- (4) 成田国朝・奥村哲夫・大根義男：遠心載荷模型実験に関する基礎実験, 愛知工業大学研究報告, No. 29-B, pp. 79~88, 1994.
- (5) 土質工学会：土質工学ハンドブック, pp222~263, 1982.
- (6) 宇野尚雄・宮下高昭：浸水による不飽和土の強度低下について, 土と基礎, vol. 26, No. 6, pp41~48.
- (7) 河野伊一郎・西垣誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 307, pp. 59~69, 1981.
- (8) 西垣誠・多田博光・吉岡進：粘性土の浸透特性に関する研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会, pp. 174~175, 1994.
- (9) 大森康次・木村勝行・奥村哲夫・成田国朝：豊浦砂の不飽和浸透特性に関する遠心実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp. 458~459, 2001.

(受理 平成14年 3月19日)