支持力模型装置を用いた飽和度の異なる法面の安定性に関する検討

STUDY ON THE STABILITY OF SLOPES WITH DIFFERENT DEGREES OF SATURATION USING A BEARING CAPACITY MODEL APPARATUS

田上 聖人[1]・酒匂 一成[2]・齋田 倫範[3]
Masato TAUE, Kazunari SAKO and Tomonori SAITA

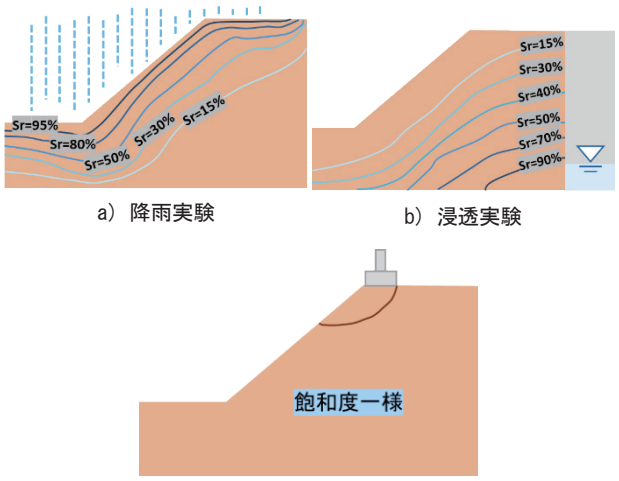
[1]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: taue@oce.kagoshima-u.ac.jp
[2]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp
[3]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: saita@oce.kagoshima-u.ac.jp

Key Words: *degree of saturation, limit equilibrium state, failure mode, suction, model test*

1. はじめに

鹿児島県本土を含む南九州地域には，火砕流堆積物の非溶結部と定義されるシラスを多く含む地盤が広く分布しており，この地域の盛土や堤体にはシラスを含む土質材料が用いられ，侵食されやすい土からなる盛土や堤体は，豪雨によりたびたび被災している．降雨時の盛土や堤体の法面の被害を軽減するためには，降雨や河川水位により時々刻々と変化する盛土および堤体の安定性を定量的に評価することが重要であり，例えば，河川堤防では，河川堤防設計指針が策定され，浸透に対する安全性照査として不飽和浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた安全性照査が行われてきている[1)]．

著者らは，これまでに安定解析の精度向上を目的とし，不飽和浸透特性を考慮した安定解析手法の提案[2)]に取り組んできた．その結果，従来の算定式では飽和度の上昇に伴う安全率低下を十分に評価できず，安全率を過大に見積もる可能性があることが示された．また，津山ら[3)]は極限平衡法の一つである無限斜面法において，不飽和土中の浸透力と圧力水頭差による体積力を考慮した体積力法と不飽和土中の負の間隙水圧を考慮した水圧法をそれぞれ提案し，不飽和土中の間隙水圧が作用する面積の考慮が重要であることを示した．しかし，現状では，これら提案手法の妥当性評価を行うための実験が必要となっている．妥当性を評価する盛土や堤体に関する模型実験には，降雨実験（図-1 a)）や浸透実験（図-1



a）降雨実験　b）浸透実験

c）飽和度が一様な盛土・提体の支持力模型実験

図-1　盛土および堤体に関する模型実験

b)）があげられる．安定解析において，安全率 F_s=1 となる状態は，すべり土塊に作用する滑動力と抵抗力がつり合う極限平衡状態に対応する．降雨実験や浸透実験では，破壊が発生した時点を極限平衡状態に達した状態とみなし，実験結果と解析結果を比較することで，安定解析手法の妥当性を評価することができる．しかし，降雨実験や浸透実験では，供試体内部の飽和度分布が時間的・空間的に変化するため，解析条件の設定が困難であり，解析結果の精度検証には適さない．一方で，解析条件の設定を簡易にするため，供試体内で飽和度が一様に変化する条件で実験を行うと，供試体の自重のみでは破壊が生じず，極限平衡状態に達する条件を実験的に確認することが困難であり，精度検証を実施できない．この条件で実験と解析の比較評価を行うためには，**図-1 c**）に示すように，実験と解析の双方の供試体に外力として上載荷重を作用させて破壊を発生させる必要がある．そのため，供試体を極限平衡状態に到達させるために必要な載荷応力と飽和度の関係を評価することが重要となる．

そこで本研究では，盛土および堤体の安定解析の妥当性評価に資する力学的な知見を取得するため，飽和度が一様な供試体に法肩部から上載荷重を作用させ，供試体が極限平衡状態に達する際の載荷応力，崩壊後に保持される載荷応力，およびすべり線の発達過程を明らかにすることを目的とする．特に，模型実験で得られるピーク載荷応力を，基礎地盤の支持力ではなく，安定解析における安全率 F_s=1 に対応する外力指標として位置づけ，飽和度の違いが上載荷重下の安定性に及ぼす影響について検討する．

2. 模型実験の概要

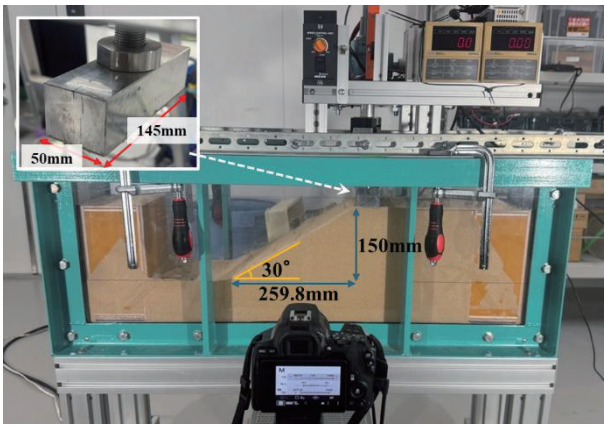


写真-1　模型実験装置

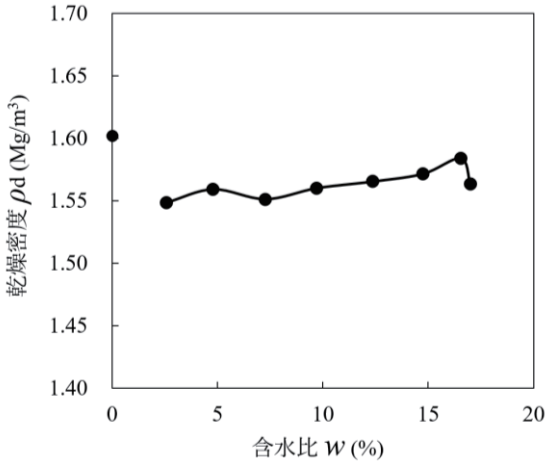


図-2　豊浦砂の締固め曲線

表-1　各含水比に対する締固め条件

含水比 %	0	2.5	5	10	15	20	22.5
落下高さ cm	1	10	10	10	10	10	7
落下回数	1	35	35	35	35	21	21

本実験で使用する模型実験装置（**写真-1**）は，土槽寸法が幅 900mm，奥行 150mm，高さ 300mm であり，さらに，幅 50mm，奥行 145mm の載荷板を備えた載荷装置で構成されており，支持力実験を行うための装置を用いた．載荷装置では，モーターで載荷板を等速で沈下させ，その際の荷重と変位を計測している．載荷板底面には，載荷によって生じる土の破壊範囲を大きくするため，木村らの研究 [4]を参考に，豊浦砂を接着剤で付着させて粗度を与えている．試料には豊浦砂(平均粒径 0.22mm，土粒子密度 2.635Mg/m^3)を使用した．供試体の傾斜角については，豊浦砂の乾燥状態における安息角が 34～34.7° である [5]ことから，すべてのケースで 30°とした．含水比については，22.5%を超えると模型実験装置の土槽から水漏れが発生するため， 0%，2.5%，5%，10%，15%，20%，22.5%を目標含水比とした．間隙比については，豊浦砂の締固め試験（**図-2**）から最適含水比が 16.5%で，最大乾燥密度 1.584Mg/m^3 であり，含水比 2.6%で乾燥密度が 1.550Mg/m^3 であったことから，乾燥密度 1.550Mg/m^3 に相当する間隙比 0.745 とし，**表-1** に示す締固め条件を設定した．ただし含水比 0%は，間隙比を 0.745 に設定すると明確な極限平衡状態における載荷応力を得られないため，明確な載荷応力のピーク値が得られる最も低い間隙比である 0.720 としている．このような条件で，飽和度のみを変化させた供試体を作製し，その法肩に，等速

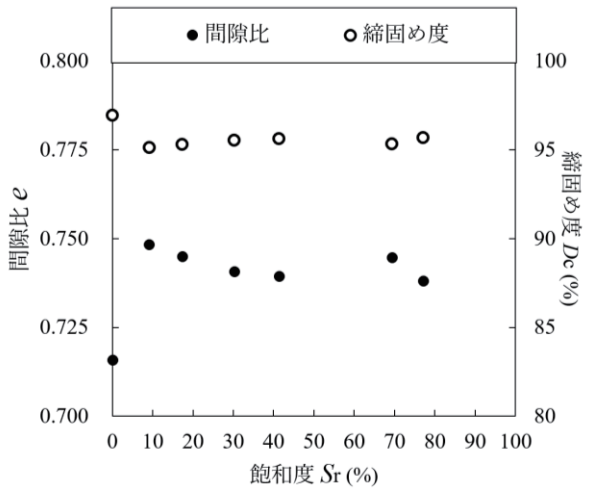


図-3　供試体作製時の間隙比と飽和度の関係

載荷による上載荷重を作用させることで，荷重および沈下量と供試体の画像を取得した．

実験手順を以下に示す．

1) 3kg の乾燥砂に対し，所定の含水比となるように水を加えた試料を土槽に投入する．
2) 1 層を**表-1** に示す締固め条件で，タンパー(質量 2.6kg，底面 100mm×148mm)を用いて，間隙比 0.745 となるように締固めを行い，計 12 層で土槽を満たす．
3) 余分な試料をスコップで除去し，傾斜角 30°の法面を形成する．
4) 法肩部に対して約 0.50mm/min の速度で 60 分間載荷し，30 秒ごとに供試体画像を撮影する．

図-3 に，供試体作製時の飽和度と間隙比の関係を示す．飽和度は 0%，9.2%，17.3%，30.2%，41.3%，69.4%，77.1%となり，*Sr*=0%を除いた全てのケースで，目標の 0.745 前後の間隙比，95%前後の締固め度になっていることが見て取れる．

3. 飽和度が上載荷重作用下の斜面崩壊挙動に与える影響

(1) 載荷応力と沈下量の関係

図-4 に載荷応力と沈下量の関係を示す．**図-4** から，*Sr*=0%の載荷応力は，他の飽和度の載荷応力に比べて著しく低くなっている．*Sr*=9.2%以上では，ピークの載荷応力は *Sr*=9.2%で最大となり，飽和度が上昇するに従って徐々に減少している．また，*Sr*=9.2%や *Sr*=17.3%では，ピークの載荷応力を過ぎると載荷応力が急激に減少するが，飽和度が上昇すると減少幅が小さくなっていることが分かる．

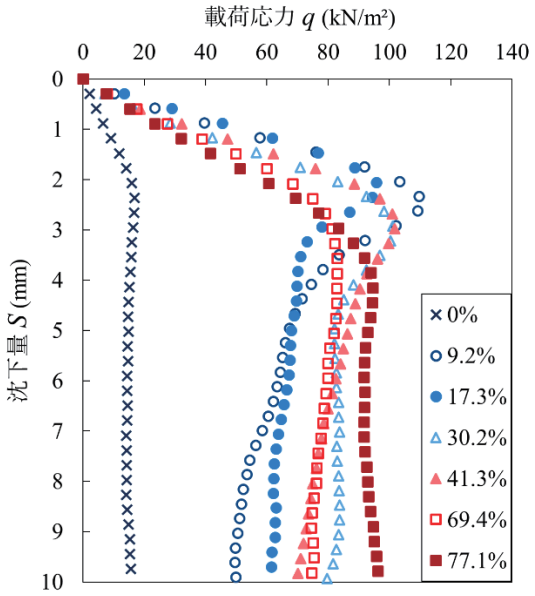


図-4　載荷応力と沈下量の関係

(2) 載荷応力増加率と飽和度の関係

次に，供試体が極限平衡状態に至るまでの載荷応力の挙動を検討するため，初期剛性に相当する載荷応力増加率に着目する．**図-5** に載荷応力増加率と飽和度の関係を示す．載荷応力増加率は，式(1)で算出している．

$$\text{載荷応力増加率} = \frac{q_a}{S_{p/2}} \qquad (1)$$

ここで，$S_{p/2}$ は，ピーク載荷応力の沈下量の 1/2 の沈下量であり，q_a は，$S_{p/2}$ における載荷応力である．

図-5 から載荷応力増加率は，*Sr*=0%で最小値 7.8 kN/m²/m を示し，*Sr*=9.2%で急激に増加し，17.3%で最大値 52.3kN/m²/m を示した後は，若干のバラツキがあるもののおおむね線形に減少することが確認さ

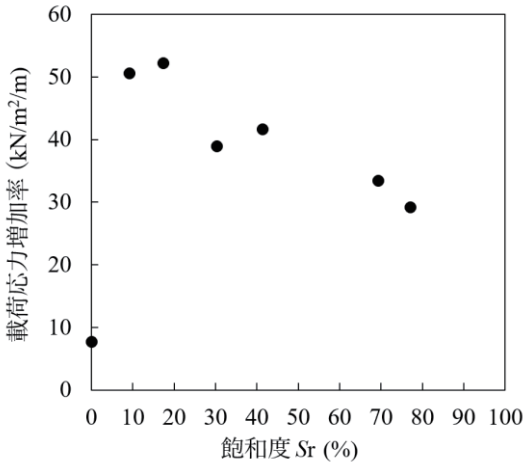


図-5　載荷応力増加率と飽和度の関係

れた．これにより豊浦砂の初期剛性は，乾燥状態が最も低く，*Sr*=10～20%の間で最も高くなり，*Sr*=20%を超えると飽和度の上昇に伴って，低下することを示していると考えられる．

(3) 極限平衡状態および残留状態における載荷応力と飽和度の関係

本研究では，ピークの載荷応力を，法肩への上載荷重によって供試体内にすべり破壊が発生し，供試体が極限平衡状態に達した時点の載荷応力と見なし，これ以降では，極限平衡状態における載荷応力と呼称する．また，供試体において円弧すべりが法面表層に到達した際の載荷応力を，すべり土塊形成後に供試体が保持し得る載荷応力とみなし，残留状態における載荷応力と呼称する．なお，本実験の残留状態における載荷応力は，ピークの載荷応力から低下して一定の値になる際の載荷応力と，おおよそ一致することを確認している．また，残留状態における載荷応力の考察を行っているのは，安定解析では円弧状の土塊に作用する力を計算しているためである．

図-6 に極限平衡状態および残留状態における載荷応力と飽和度の関係，**図-7** に極限平衡状態および残留状態における沈下量と飽和度の関係，**写真-2** に飽和度 9.2%における供試体，**写真-3** に飽和度 77.1%における供試体を示す．写真中の実線矢印は載荷応力がピーク値を示す際のすべり線，破線矢印は円弧すべりが供試体表層に到達した際のすべり線であり，矢印の周りの破線は，すべり線の幅を表している．

図-6 から極限平衡状態における載荷応力は，*Sr*=0%で最小値 16.9 kN/m^2 を示し，*Sr*=9.2%で急激に増加して最大値 109.7 kN/m^2 を示した後は，バラツキがあるものの，飽和度が上昇するとわずかに減少傾向に転じることが見て取れる．一方，残留状態における載荷応力は，飽和度 0%で最小値を示し，*Sr*=9.2%で急激に増加して約 80kN/m^2 を示した後は，*Sr*=17.3%を除いてほぼ一定の値を示し，*Sr*=77.1%で最大値 91.9 kN/m^2 を示すことが確認できる．*Sr*=17.3%の極限平衡状態と残留状態における載荷応力が，*Sr*=9.2%や *Sr*=30.2%に比べて小さいことは，すべり土塊の体積が小さく，すべり線が短かったことが要因と考えられる．極限平衡状態と残留状態における載荷応力の差に着目すると，*Sr*=0%では 0.84 kN/m^2 と非常に小さく，*Sr*=9.2%で急激に拡大して最大値 26.1kN/m^2 をとり，*Sr*=41.3%までは飽和度の上昇に伴って減少し，*Sr*=69.4%と *Sr*=77.1%ではほとんど差が生じていないことが確認できる．

図-7 から，極限平衡状態における沈下量はすべり

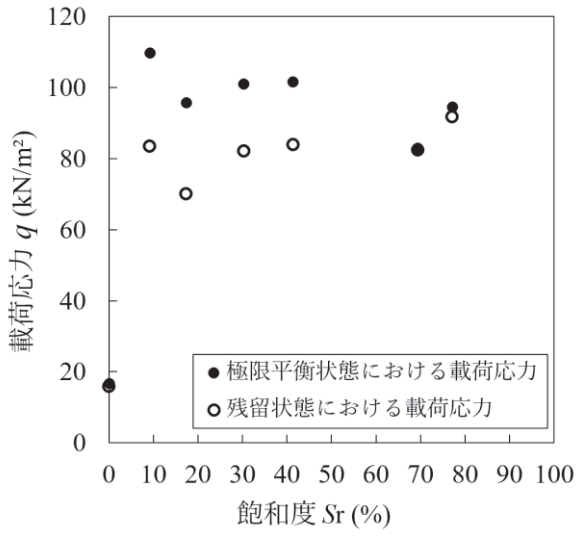


図-6　極限平衡状態および残留状態における載荷応力と飽和度の関係

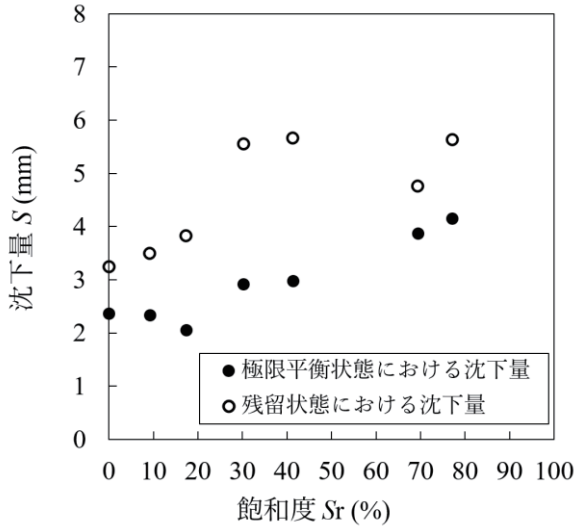


図-7　極限平衡状態および残留状態における沈下量と飽和度の関係

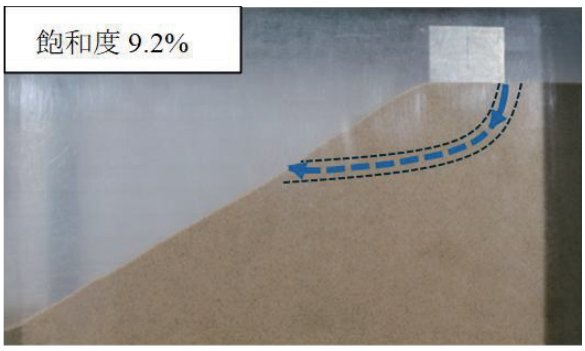


写真-2　飽和度 9.2%における供試体

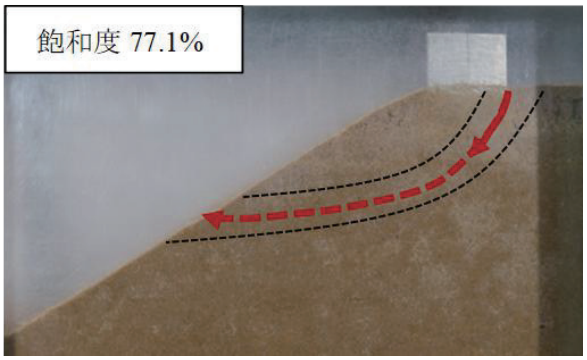


写真-3　飽和度 77.1%における供試体

土塊体積が小さい *Sr*=17.3%を除き，おおよそ飽和度の上昇に伴って増加している．残留状態における沈下量についても，極限平衡状態における沈下量に比べてバラツキが大きいものの，飽和度の上昇に伴って増加していることが分かる．

すべり土塊とすべり線に関しては，**写真-2** と**写真-3** に示すように，飽和度が高くなるほど，すべり土塊の体積が大きくなり，すべり線が長くなっていることが確認された．また，すべり線の幅についてもわずかではあるが，幅が広くなっていた．

(4) 飽和度が上載荷重作用下の崩壊挙動に与える影響

図-8 に，Oyama ら [6]が行った間隙比 0.750 の豊浦砂の Hyprop 試験による排水過程の水分特性曲線に対し，加筆したグラフを示す．

図-8 から，水分特性曲線の残留領域と推移領域の境界は *Sr*=10%程度であり，*Sr*=10%程度からメニスカスが粒子間に生じ，サクションに応じた粒子間力が発揮され，飽和度上昇に伴いサクションが低下すると考えられる．*Sr*=9.2%を境界として，載荷応力増加率や極限平衡状態における載荷応力，それぞれの沈下量および破壊形態の傾向が変化する現象は，不飽和土のサクションが影響していると推察される．

初期剛性に相当する載荷応力増加率および極限平衡における載荷応力に関しては，水分特性曲線の残留領域に位置する *Sr*=0%付近では，水分が存在しない，または，水蒸気の状態で存在するため，土粒子間の液架橋が生じず，見かけの粘着力が発現しなかったため，上載荷重に対する初期剛性が低く，小さい載荷応力で極限平衡状態に達したと考えられる．*Sr*=9.2%では，推移領域の低飽和度側に位置し，サクションによる見かけの粘着力が強く発揮され，載荷による粒子の移動が拘束されたことで，上載荷重に対する初期剛性が高く，極限平衡状態に達するため

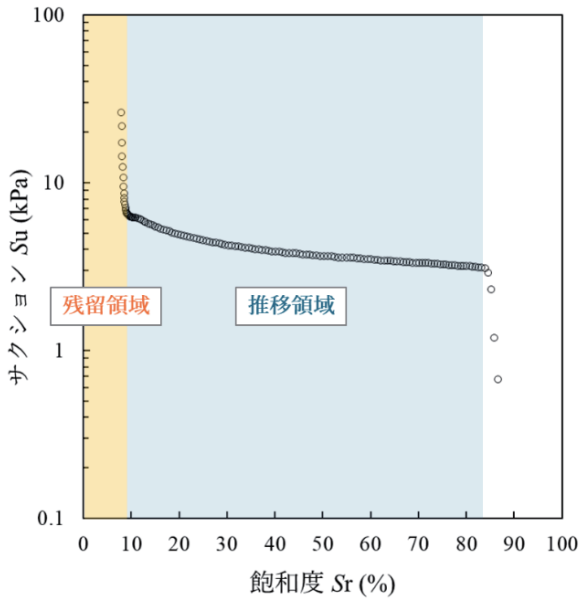


図-8　間隙比 0.750 の豊浦砂における水分特性曲線 [6]

に，より大きな載荷応力を要したと推察される．一方，*Sr*=9.2%を超えると，推移領域内に位置するものの，飽和度の上昇に伴ってサクションが低下するため，供試体は上載荷重に対して変形しやすくなり，より小さい載荷応力で極限平衡状態に達するようになったと考えられる．なお，載荷応力増加率に比べて極限平衡状態における載荷応力の減少の程度が小さかったのは，極限平衡状態における載荷応力はサクションだけでなく，載荷による局所ひずみに伴う粒子間摩擦や，すべり線の発達の程度などの影響を複合的に受けるためであると考えられる．

残留状態における載荷応力が，載荷応力増加率や極限平衡における載荷応力と異なり，*Sr*=9.2%以上でおおよそ一定の値を示したのは，サクションの低下によって，すべり線の単位長さあたりの強度が低下した一方で，すべり線が長くなったことによる強度増加が，本実験ではつり合ったことでほぼ一定になった可能性がある．

極限平衡状態と残留状態における沈下量が飽和度の上昇に伴って増加したのは，初期剛性が低下したことで，載荷応力-沈下量曲線が緩やかとなり，極限平衡状態や残留状態に達するまでにより大きな沈下量を要したためと考えられる．また，飽和度の増加に伴い，極限平衡状態や残留状態に至るまでの沈下量が増加したことに加え，剛性の低下によって供試体内部にせん断帯が発達しやすくなったことで，すべり線が長くなったと考えられる．

4. おわりに

本研究では，法面傾斜角 30°，間隙比 0.745 を基本条件とし，飽和度のみを変化させた豊浦砂の供試体に対して，法肩に上載荷重を作用させる模型実験を実施した．得られた載荷応力増加率，極限平衡状態および残留状態における載荷応力，およびそれぞれの沈下量について考察を行い，飽和度が上載荷重下の供試体の安定性および破壊挙動に与える影響を検討した．得られた知見を以下に示す．

1） 飽和度の上昇に伴い，供試体の初期剛性に相当する載荷応力増加率と極限平衡状態における載荷応力が減少することが確認された．また，減少の程度は，載荷応力増加率の方が大きかった．

2） 残留状態における載荷応力は，S_r=0%を除くすべての飽和度において 80kN/m^{2}前後の値を示すことが確認された．

3） 極限平衡状態と残留状態における載荷応力を比較すると，S_r=0%では差がほぼないものの，S_r=9.2%で差が最大となり，それ以降は飽和度の上昇に伴って差が減少し，S_r=69.4%を超えると再び差がほとんど生じなくなることが分かった．

4） 極限平衡状態および残留状態における沈下量は，飽和度の上昇に伴い，増加することが確認された．

5） 供試体の画像から，飽和度の上昇に伴い，すべり土塊の体積およびすべり線の長さが増加する傾向が確認された．また，同時にわずかではあるが，すべり線の幅が広くなっていることも確認された．

6） 間隙比 0.750 の豊浦砂の水分特性曲線から，本実験で得られた飽和度の変化に伴う 1）～5）の傾向は，推移領域におけるサクションの変化の影響を受けていることが推察された．

今後は，同一条件での追加実験を行うことで，実験結果のバラツキを考慮した極限平衡状態および残留状態における載荷応力の分析を行うとともに，画像解析により，土塊の体積やすべり線の長さおよび幅を定量的に評価していく．

謝辞：本研究の実験および結果の整理は，松尾拓俊氏（元鹿児島大学学生）にご協力をいただきました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

1) 国土技術研究センター編 : 河川堤防の構造検討の手引き，JICE 資料第 111002 号，pp.42-85，2012.

2) Sako, K., Tabata, M., Kitamura, R., Niisaka, M.: Slope stability analysis by considering unsaturated seepage force in unsaturated slope, Proc. of the sixth International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT2014), pp.1279-1285, 2014.

3) 津山雅徳，酒匂一成，伊藤真一，北村良介：不飽和土中の間隙水圧の影響を考慮した無限斜面法の改良に関する検討, 土木学会論文集 A2（応用力学）, Vol.75, No.2, pp.I_371-I_378，2019.

4) 木村孟，竹村次朗 : 帯基礎による正規圧密粘性土地盤の変形・支持力に関する研究，土木学会論文集，No.382/III-7，pp.157-166，1987.

5) 西田喜一，木原尚哉，田上聖人，酒匂一成，中田幸男 : 装置動作速度が礫混じり土の安息角に与える影響に関する一考察, 令和 6 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.353-354，2025.

6) Oyama, H. S., Sako, K., Ito, S., Jikuya, Y.: Method on simultaneous measurements of water retention, seepage, and evaporation properties in unsaturated soil, 令和 4 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.297-298，2023.

（2026.5.29　受付）