

遠心力場での降雨によるまさ土斜面内の間隙圧発生と斜面崩壊

Pore Pressures and Failure of Decomposed Granite Soil Slope
Caused by Artificial Rainfall in Centrifuge Tests

鬼塚 克忠 (おにつか かつただ)

佐賀大学教授 理工学部都市工学科

吉武 茂樹 (よしたけ しげき)

日本建設技術(株)コンサルタント事業部技術第一部 次長

竹屋 雄介 (たけや ゆうすけ)

国際航業(株)道路部

1. まえがき

まさ土地帯では、台風や梅雨時の集中豪雨に伴い斜面崩壊がしばしば発生している。まさ土斜面崩壊メカニズムの解明のために、人工降雨による斜面崩壊については著者らの研究^{1),2)}のほかにも数多くの報告^{3)~7)}がなされている。しかし、遠心力場での間隙圧の発生と斜面崩壊について言及した報告はあまり見られない。

そこで、遠心力载荷装置を用いたまさ土模型斜面の崩壊実験において、間隙圧を測定し、斜面崩壊時の間隙圧の発生状況および斜面崩壊形態、崩壊状況について考察した。

2. まさ土斜面の遠心力模型崩壊実験

降雨による斜面の崩壊実験としては、実物大の模型実験あるいは重力場における小型模型実験がよく行われ、その崩壊機構の解明が試みられている。

例えば、八木ら⁸⁾の模型実験によると、雨水浸透によるまさ土斜面崩壊は、斜面勾配が小さいと斜面先に発生した過剰間隙水圧によって斜面先に小さな崩壊が生じ、それが斜面上部に進行していく。斜面勾配が大きくなると、すでに安全率が小さくなっており、雨水が斜面全体に浸透する前に崩壊するものとしている。

また、久楽ら⁹⁾の、まさ土ではないが、含水比を再調整して締固めた関東ロームの大型盛土斜面において、雨水によって盛土内部の飽和度は表層部と違い容易には上昇しないとされている。しかしながら、斜面崩壊を多発しているまさ土斜面の降雨による遠心力模型崩壊実験は数少なく^{1),2)}、遠心力場での間隙圧発生状況と斜面崩壊について考察したものはほとんどない。

著者らの遠心力载荷装置を用いたまさ土斜面の崩壊実験結果^{1),2),10),11)}によると、その崩壊形態は、降雨がない場合(口絵写真—15)、降雨がある場合(口絵写真—16)ともに表層すべりを示している。これは我が国のまさ土実斜面の崩壊のほとんどがすべり面の浅い、表層剝離型である事実と同様である。

このように、自重応力が支配的な斜面の崩壊実験には遠心力模型実験が有効である。

表—1 試料の物理特性

土粒子の密度	ρ_s (g/cm ³)	2.66
有効径	D_{10} (mm)	0.03
均等係数	U_c	28.3
粒度分布	砂分 (%)	84.5
	シルト分 (%)	9.5
	粘土分 (%)	6.0
最大乾燥密度	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.80
最適含水比	w_{opt} (%)	16.0
透水係数	k (cm/sec)	8.91×10^{-3}

2.1 まさ土

使用した試料は佐賀県佐賀市川久保より採取したまさ土である。空気乾燥後、2 mm ふるいを通した試料を用いた。その試料の物理特性を表—1に示す。

2.2 実験方法

まさ土模型斜面は、試料を含水比=16.0% (最適含水比)に調整した後、締固め密度 $\rho_d = \rho_{dmax} \cdot 0.78 = 1.36$ (g/cm³)になるよう5層(各層2 cm)に分けて締固め、所定の勾配に切り出し作製した。実験は重力場であらかじめ形成した模型斜面に遠心力を付加する方法である。本文はこのようにして作製した模型斜面から自然斜面を想定して実験を行い、その結果についても自然斜面を考慮して言及している。なお、崩壊時の斜面内間隙圧の発生状況を調べることを目的としたため、斜面は崩壊発生が容易となるようなかなりの急勾配で作製した。

降雨によるまさ土斜面崩壊実験は、図—1に示す降雨実験システムを用いて実施した。遠心加速度を60Gまで上昇させた後、所定の強度の定常降雨を斜面崩壊が発生するまで与えた。なお、降雨強度は900 mm/h, 1 440 mm/h, 1 800 mm/h (実物換算: 15 mm/h, 24 mm/h, 30 mm/h)の3種類である。以後、文中の降雨強度は実物換算強度で示す。また、この模型斜面は斜面高さ6 mの実斜面に対応する。なお、斜面表層部には降水による表層浸食を防止するために、切り込みを入れたろ紙を敷いている。

八木ら⁸⁾の雨水浸透時の斜面内浸透解析では、「斜面内に不透水層が介在し、その不透水層上部の透水層が薄いと短時間で、すなわち少ない雨量で間隙圧は定常状態

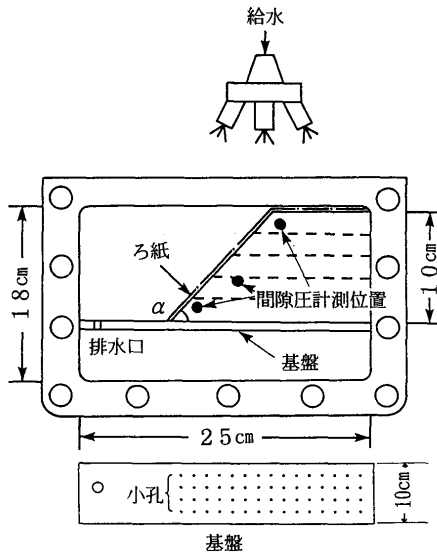


図-1 降雨による斜面崩壊実験システム

となり斜面は不安定になりやすい」と報告している。著者らは、斜面底部に不透水層がない場合とある場合のまさ土斜面内の間隙圧発生状況の相違を調べる目的で実験を実施した。本実験はまさ土実斜面において、斜面内に不透水層があり、その不透水層上のまさ土層厚が薄い場合と厚い場合の間隙圧の発生状況の違いを想定している。なお、図-1に示したように、小孔（直径約2mm）を開けた基盤を用いた場合が不透水層のない実験、小孔を開けない基盤を用いた場合を不透水層がある実験とした。

降雨時の斜面内の浸透状況を3箇所（斜面肩、斜面中腹、斜面先）に設置した間隙圧計により計測し、同時に降水開始から、連続写真撮影（2コマ/秒）を行った。

3. まさ土斜面の崩壊

3.1 まさ土斜面の崩壊形状と間隙圧

(a) 不透水層がない場合

不透水層がない場合には、降雨強度15~24 mm/hでは崩壊は起こらず、30 mm/hになると崩壊が生じている。その斜面崩壊形状は図-2の実線で示すように、斜

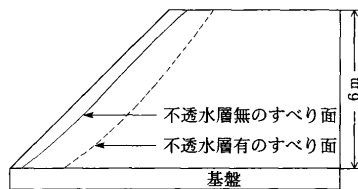


図-2 降雨による斜面崩壊形状に及ぼす不透水層の影響

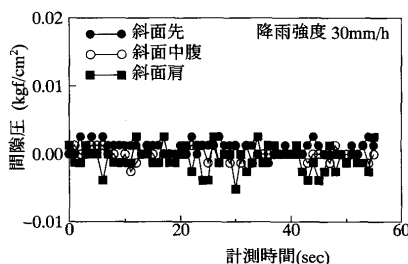


図-3 不透水層がない場合の間隙圧の経時変化

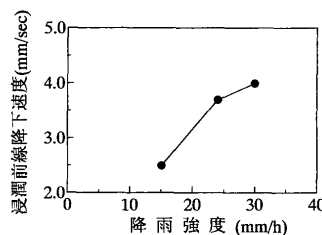


図-4 降雨強度と浸潤前線の降下速度

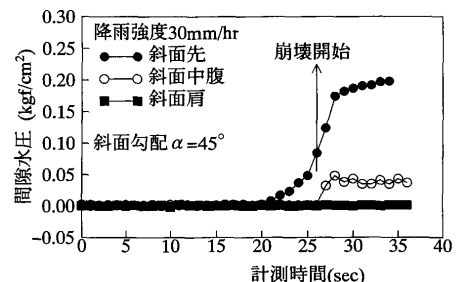


図-5 不透水層がある場合の間隙圧の経時変化

面表層部での非常に浅いすべりである。降水中の間隙圧の経時変化を示したのが図-3であり、模型斜面下方からの排水が可能のために、模型斜面内の間隙内の空気が排水と共に排出され、空気閉塞に伴う間隙圧の顕著な上昇はどの降雨強度の場合にも観察されなかった。

次に、降雨強度と浸潤前線降下速度の関係を図-4に示す。この浸潤前線降下速度は斜面底部の間隙圧計の位置とその反応時間から求めている。図-4より、降雨強度が大きいくほど浸潤前線降下速度は大きくなる。しかし、降雨強度が24 mm/hを越えると浸潤前線降下速度の増加傾向が小さくなることから、浸潤領域の飽和度は高くなると言える。

よって、まさ土の浸透能を越える降水の影響、すなわち降雨強度が24 mm/hより大きくなると、斜面肩表層部の飽和度が上昇し、自重の増加、あるいはサクシジョンの消失による見かけの粘着力の低下（図-8の飽和度の上昇に伴う強度定数 c_d , ϕ_d の変化により）が生じる。その結果、斜面肩から変形が増大し、斜面表層部が水に浮いたような形で崩壊するものと考えられる。

このように、間隙圧の顕著な上昇を伴わない崩壊現象は、透水性の良い砂質土の斜面崩壊実験¹²⁾でも観察されている。なお、この崩壊形態は降雨がない場合のまさ土斜面の崩壊実験^{8),9)}で見られた、斜面先の変形の増大による崩壊過程とは異なる。

(b) 不透水層がある場合

不透水層がある場合は、図-2の破線で示すように深いすべり面を形成している。この時の間隙圧の発生状況を図-5に示す。斜面先で間隙圧の急激な上昇の兆候を示した時に崩壊は発生している。この崩壊時に、浸潤前線が不透水層に到達しているのは斜面先近傍だけであり、それ以外の斜面の大部分では浸潤前線の不透水層への到達は見られない。斜面先近傍において浸潤前線が不透水層に到達した後、水面が上昇していく「跳ね返り現象⁵⁾」が生じて、間隙圧が上昇し、崩壊が引き起こされるものと思われる。

3.2 まさ土実斜面と模型斜面の間隙圧発生比較

遠心力載荷装置を用いたまさ土斜面の崩壊実験は崩壊挙動をつぶさに観察できる利点がある。一方、間隙圧計などの計測器を取り付けた場合、通常の小型模型実験に比べて問題となるのは、模型が回転運動をしていることと、計測器自体にも遠心力が作用することである。計測

器はこの遠心力に耐え正常に作動しなければならず、当然のことながら、計測値の解釈には注意を要する。

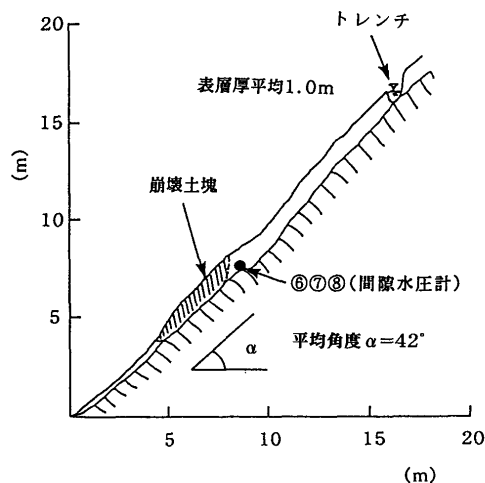
そこで、八木ら⁶⁾が実施した雨水浸透によるまさ土実斜面の崩壊実験と著者らの模型斜面における間隙圧の発生と崩壊機構の比較検討を行った。

図一6はその実斜面の縦断面図⁶⁾である。かなり風化した花崗岩の基岩上に約1 m厚さの緩い ($e \approx 0.80$) まさ土 (腐食土を含む) を載せた、平均 42° の勾配の斜面である。降雨は、降雨強度 $20 \sim 30$ mm/h となるよう与えてある。

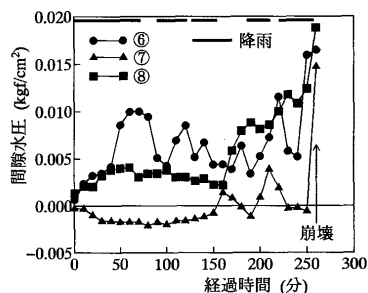
斜面崩壊部近傍の間隙水圧測定結果は図一7のようになっている。崩壊直前には、大きな間隙水圧が発生しており、崩壊の前ぶれとして間隙水圧の顕著な上昇が現れている。この現象は著者らの遠心力模型実験でも、不透水層がある場合に観察されている (図一5参照)。

ただ、実斜面では降雨開始、中断、再開と不連続の降雨を与えており、その間に斜面内の飽和度が上昇し、降雨に鋭く反応したため、崩壊以前にも間隙水圧の発生が見られる。一方、遠心力模型実験では崩壊以前には間隙圧の発生はほとんど見られない。

このようにまさ土斜面において、その斜面内の浅い箇所不透水層の基岩あるいは表層部に比べて極端に小さい透水係数を有する地盤が存在する場合には、地表から浸透してきた水が基岩あるいは地盤に達した後、「跳ね返り現象」によって間隙圧が急激に上昇し崩壊に至るものと考えられる。



図一6 八木らの実験斜面の縦断面図⁶⁾ (一部修正)



図一7 崩壊部近傍の間隙水圧の経時変化⁶⁾

4. 間隙圧を考慮したまさ土斜面の安定解析

計算に用いた強度定数は圧密排水一面せん断試験結果より求めた。せん断速度は 0.5 mm/min で実施した。

最適含水比で静的に締固めた供試体の飽和度は 44% であり、飽和度 60% 、 80% については含水比を変えて (乾燥密度一定) 供試体を作製した。図一8に飽和度と強度定数の変化を示す。締固め時の斜面表層部 (表面からの厚さ 1.5 m \sim 2.0 m 程度) には低拘束圧域¹³⁾ ($\sigma = 0.02 \sim 0.18$ kgf/cm²) から得られた値を、その他の部分には常圧域¹³⁾ ($\sigma = 0.2 \sim 3.0$ kgf/cm²) の値を用いた。

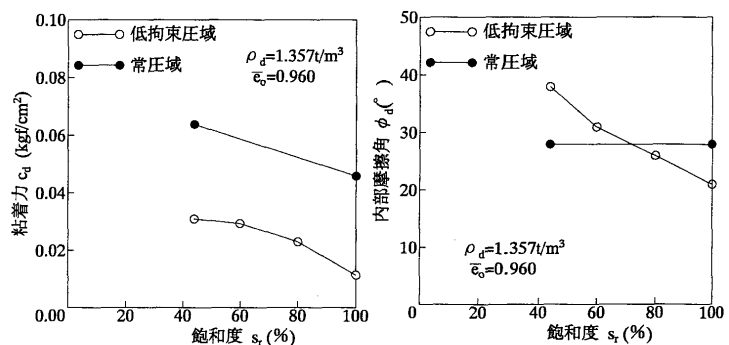
図一5の間隙圧測定結果を基に斜面崩壊時の飽和領域帯を作製し、測定された間隙圧を静水圧とみなし地下水位面を想定した。想定した地下水位面を考慮し、簡便分割法の有効応力法により求めた臨界円 (実線) を図一9に示す。同図には実験から得られたすべり面 (破線) と想定した地下水位面 (鎖線) も示している。計算結果より、実験のすべり面に近い位置でのかなり深いすべり面が得られた。飽和領域帯を考慮せずに計算を行うと、斜面表層部での浅いすべり面しか得られない。

このことから、不透水層がある場合の斜面崩壊には間隙圧の発生が大きく影響しているものと考えられる。

不透水層がある場合の降雨によるまさ土斜面の崩壊実験の連続写真撮影を行った。これより、まさ土斜面の変形・崩壊過程はまず斜面先から変形が生じ、それに引きずられるような形で斜面中腹、斜面肩と変形が増大し、ついには崩壊に至る逐次破壊が確認された。

このまさ土斜面の変形・崩壊過程との対応を検討するために、浸潤前線の降下速度、飽和領域の上昇を基に、時間経過に伴う斜面の安全率の低下を求めた。図一10のように浸潤前線の降下位置、飽和度、飽和領域を設定した。実験から得られたすべり面が円弧に近い形状を示しているため、斜面先を通る円弧すべりと仮定して安全率を算定した。

飽和度の上昇に伴う強度定数 (c_d , ϕ_d) の変化は図一8の値を用い、安全率の経時変化をプロットしたのが図一11である。斜面表層部を浸潤前線が通過した時点で安全率が若干低下し、浅いすべり面の形成が考えられる。その後、浸潤前線が斜面底部に到達するまでは安全率は低下しないが、浸潤前線が斜面底部に到達した後、飽和領域帯が形成され始め、安全率の著しい低下が見られる。



図一8 飽和度の上昇に伴う強度定数 (c_d , ϕ_d) の変化

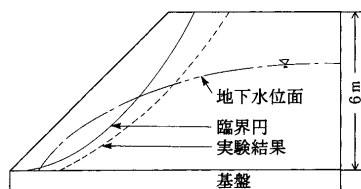


図-9 間隙圧を考慮した計算結果と実験より得られたすべり面の位置の比較 (不透水層がある場合)

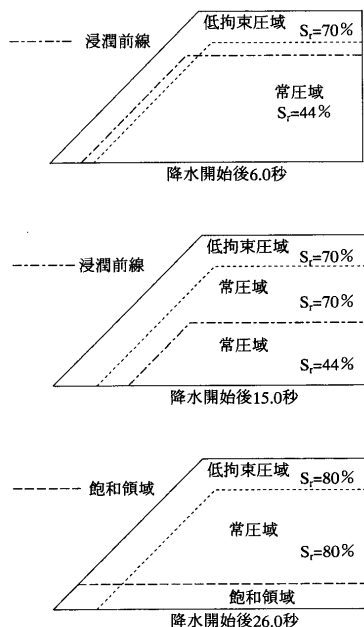


図-10 浸潤前線の降下に伴う斜面内の飽和度の変化 (不透水層有: $\alpha=45^\circ$)

浸潤前線が最も早く不透水層に到達するのが斜面先近傍であり、斜面先近傍からの飽和領域の上昇に伴い、斜面先部での小崩壊が引きがねとなって、順次崩壊が斜面上部へと移動していくことが確認された。

なお、図-11に示したように、崩壊は実験よりも早く生じている。また、実際の崩壊時の安全率は0.70程度とかなり小さな値になっている。これらの理由としては、実際には完全に取除くことが困難である斜面側面と容器の摩擦の問題、あるいは測定された間隙圧を静水圧とみなし、その静水圧に見合う斜面底部からの高さの部分が完全に飽和しているとした飽和領域の設定方法などが考えられる。

5. まとめ

遠心力载荷装置を用いたまさ土模型斜面の人工降雨による崩壊実験を実施し、まさ土斜面内の間隙圧の発生状況およびまさ土斜面の崩壊形態、崩壊状況について考察した。

- (1) まさ土斜面の崩壊要因として、不透水層がない場合は、飽和度の上昇に基づくサクシヨンの消失による表層部の見かけの粘着力の減少が考えられる。一方、不透水層がある場合には、間隙圧の発生の影響が大きい。
- (2) 不透水層がある場合は、崩壊直前に間隙圧の顕著

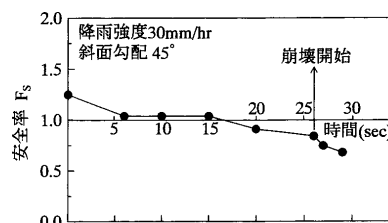


図-11 安全率の経時変化

な上昇が見られる。この傾向はまさ土斜面においても同様である。不透水層がない場合は、間隙圧発生がほとんど見られない。

- (3) すべり面の位置は不透水層がある場合の方が不透水層のない場合よりも深くなる。
- (4) まさ土斜面の崩壊形態は、不透水層がある場合、飽和領域の増大に伴い、斜面先部での小崩壊が引きがねとなり、順次斜面上部へと進行していく逐次崩壊を示す。

参考文献

- 1) 吉武茂樹・鬼塚克忠：降雨によるまさ土斜面崩壊に関する研究，第27回土質工学研究発表会講演集，pp. 1873～1874, 1992.
- 2) 鬼塚克忠・竹屋雄介：雨水浸透によるまさ土斜面の崩壊実験，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 510～511, 1997.
- 3) 土屋 智：まさ土と川砂の模型斜面を用いた降雨浸透時の崩壊発生機構について，平成4年砂防学会ワークショップ研究成果報告書「崩壊機構の実験的研究の現状と課題」，pp. 9～18, 1993.
- 4) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，第330号，pp. 107～114, 1983.
- 5) 八木則男・矢田部龍一・中岡計雄：斜面内降雨浸透解析と斜面崩壊，第18回土質工学研究発表会講演集，pp. 1285～1286, 1983.
- 6) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一・仁尾雅人：雨水浸透による現地斜面崩壊実験，第19回土質工学研究発表会講演集，pp. 1281～1282, 1984.
- 7) 紀 淳・網干寿夫・中ノ堂裕文・中田順憲・山本康治：まさ土自然斜面における降雨実験，第20回土質工学研究発表会講演集，pp. 1411～1412, 1985.
- 8) Yagi, N., Yatabe, R. and Enoki, M.: Slope failure in decomposed granite soil due to rainfall, Residual Soils in Japan, Research Committee on Physical and Mechanical Properties of Residual Soil Ground of JSSMFE, pp. 159～166, 1990.
- 9) 久楽勝行・石塚広史：雨水の浸透と盛土の安定性，土と基礎，Vol. 30, No. 9, pp. 37～43, 1982.
- 10) 吉武茂樹・鬼塚克忠・竹屋雄介：写真撮影によるまさ土模型斜面の崩壊形態の観察，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 560～561, 1995.
- 11) 鬼塚克忠・竹屋雄介・吉武茂樹：粒度組成の異なるまさ土模型斜面の崩壊実験，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 538～539, 1995.
- 12) 工藤賢二・吉松弘行・青木隆典・服部泰英：斜面崩壊前兆現象計測のための基礎実験，平成2年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 354～357, 1991.
- 13) 鬼塚克忠・吉武茂樹：せん断変形に伴う強度定数 c, ϕ の変化に関する考察，土木学会論文報告集，No.382, III-7, pp. 265～268, 1987.

(原稿受理 1998.5.29)