

降雨時の盛土斜面の安定性に関する研究

Stability evaluation of earth fills during rainfall

定岡直樹[†], 奥村哲夫^{††}, 成田国朝^{††}, 木村勝行^{††}

Naoki SADAOKA, Tetsuo OKUMURA, Kunitomo NARITA and Katsuyuki KIMURA

Abstract : This paper concerns the behavior of seepage flow through embankment during rainfall. Centrifuge model tests and associated FEM saturated-unsaturated seepage analysis were carried out on several model fills to discuss the validity of centrifuge tests to reproduce actual phenomena of rainfall and seepage flow in embankment, and the influence of the rainfall strength on the slope stability of earth fills. The results of model tests and analytical investigations have revealed that both approaches show a close correlation and can be a useful tool to examine and predict the actual behavior of earth fills.

1. はじめに

梅雨末期の長雨や台風時の集中豪雨により斜面を有する盛土構造物が崩壊し、人的にも経済的にも多大な被害がもたらされることが多い。この問題は、浸透と安定の複合問題であるため盛土内の浸透挙動を解明し、これらが盛土の安定性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。しかし、この種の降雨浸透に基づく盛土内部の浸透・浸潤挙動や間隙水圧挙動、これらが盛土の安定性に及ぼす影響などについては未だ不明な点が多い。

降雨浸透現象を通常の 1G 場における模型実験において再現する場合、毛管上昇高および自重応力の相似性を満たすことができないが、遠心模型実験においてはこのような相似性を満たすことができる。

本研究では、 r/k (r : 降雨強度, k : 飽和透水係数) が 1.0 以下の条件で降雨浸透挙動を遠心模型実験で再現し、1G 場でのガラス玉と潤滑油を用いた浸透実験¹⁾ との比較、また非常常・飽和・不飽和浸透流の FEM 解析により、降雨浸透挙動を明らかにし、降雨が盛土の安定性に及ぼす影響を検討することを目的としている。

2. 実験概要

図-1 に実験装置の概略を示す。内寸法 W460×D200×H460mm のアルミニウム製土槽コンテナ(前面アクリル板)内に、高さ 16.5cm、斜面勾配 1:2 の盛土を締固めて作製した。実験は盛土底面に 30G の遠心加速度を与えた後(実物で盛土高 5m 程度に相当)、土槽コンテナ上部の水槽から降雨発生装置に水を供給し斜面上に雨を降らせ、盛土内の間隙水圧の変化を盛土底部に埋設した計 8 個の間隙水圧計

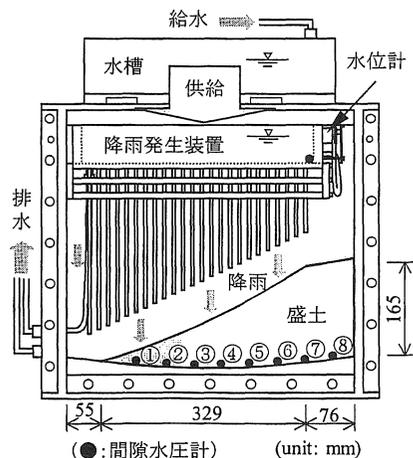


図-1 実験装置および計測機器配置の概略

[†] 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)

から測定する方法で行った. 同時に, 遠心载荷装置外に取り付けた CCD カメラと写真撮影により, 前面アクリル板を通して盛土内の浸透状況を観測した実験に用いた盛土の材料は砂質土であり, その性質を表-1 に示す. 実験は表-2 に示すように降雨強度, 試料を変えた 3 ケースについて行った.

表-1 実験試料の性質

	試料 A	試料 B
土質名称	粘土質砂	シルト質砂
最大粒径 (mm)	2.0	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.602	2.621
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.937	1.818
最適含水比 (%)	11.9	13.7
締固め度 (%)	95	
締固め密度 (g/cm ³)	1.840	1.727
初期含水比 (%)	8.3	7.1

表-2 実験ケース

		CASE. 1	CASE. 2	CASE. 3
試料		A	B	
降雨強度 (mm/h)	遠心場	251.0		473.5
	1 G 場	8.37	15.78	
飽和透水係 k (cm/s)		2.89 × 10 ⁻³		1.10 × 10 ⁻³
r / k		0.08	0.21	0.40
初期体積含水率 θ _i		0.147	0.123	0.124
飽和体積含水率 θ _s		0.341		
有効間隙率 θ _s - θ _i		0.146	0.218	0.217

3. 実験結果と考察

図-2 に CASE. 1 (r/k=0.08) の降雨発生装置内と盛土底部の間隙水圧の経時変化を示す. 図より降雨発生装置内の水位は経過時間 t'=90~900 秒間で一定に保たれていることが分かる. 盛土内の間隙水圧は, 斜面先から随時増加し, t'=400 秒までの増加が著しい. 実験開始後, 盛土内の間隙水圧計が反応した時間は各水圧計の位置で飽和域が生じた時間であり, この時間は斜面表面から降下してくる湿潤前線が各水圧計に達した時間に等しい. これらの時間と湿潤前線の降下距離の関係を図-3 に示す. 図より湿潤前線降下距離と経過時間 t' の関係は比例関係

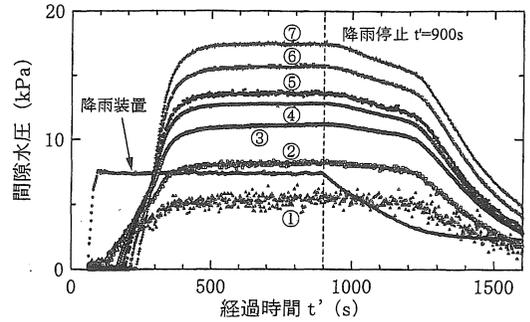


図-2 盛土内間隙水圧の経時変化 (CASE. 1)

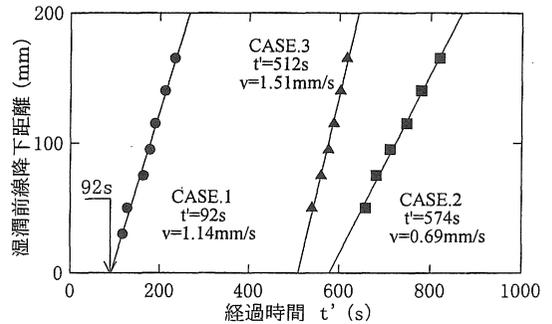


図-3 湿潤前線降下速度と修正原点

にあり, 降下速度が一定であることがわかる. なお, CASE. 1 では, 降雨開始時間は t'=92 秒であることがわかり, 湿潤前線の降下速度は v=1.14mm/s となる. 以下の実験結果の整理にはこのように修正した時間を降雨開始点とし修正原点 (t=0) とした.

CCD カメラと写真撮影による観測は, CCD カメラによる撮影では両試料ともに, 飽和域の成長過程および湿潤部の変化は確認できなかった. 写真撮影では, CASE. 1 では t=830 秒後のみ飽和域が確認でき, CASE. 2 ではすべての時間において飽和域が確認できた. 写真-1 (a), (b) はそれぞれ間隙水圧計の計測値より推定した浸潤面と写真撮影による浸潤面を比較したものである. 間隙水圧の計測値からの浸潤面の推定は, 水圧値を水頭値に換算し, 間隙水圧計から鉛直上方の水頭値の高さに浸潤面があるものと仮定した. この仮定は, 飽和領域内では等ポテンシャル線が鉛直になる, すなわち鉛直方向の速度成分は無視できるという準一様流の仮定を適用したことと同義であるが, 実際の飽和領域内では底面付近を除いて鉛直方向の速度成分を有するので, 正しい浸潤面は推定によるものより少し高くなる. 両写真より, CASE. 1 では 1.5cm, CASE. 2 では 2cm 程度写真

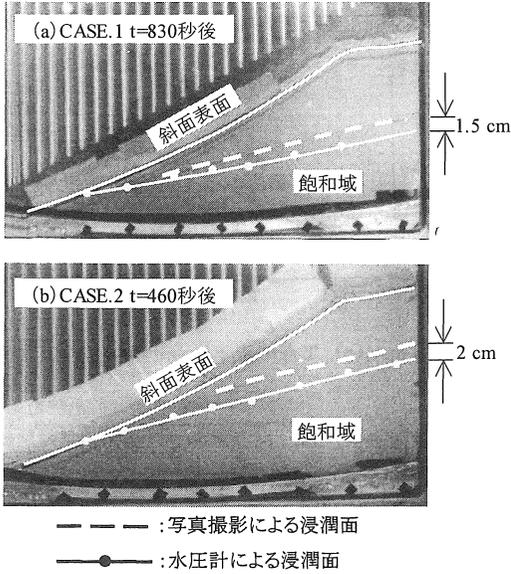


写真-1 写真撮影と水圧計による浸潤面の比較

撮影による浸潤面の方が間隙水圧計による測定値より高くなっているが、これは1G場で行った毛管上昇確認実験結果(CASE.1:38cm/30≒1.3cm, CASE.2:60cm/30≒2.0cm)と近似している。したがって、間隙水圧計の計測値を用いて上記の方法で飽和域形状を概略推定できるものと考えられる。

飽和域の最高点を $T(x_T, y_T)$ とし、基盤面との交点を $B(x_B, 0)$ とすると、斜面内の飽和域と湿潤域は近似的に図-4のように示すことができる。ここで θ_s : 飽和体積含水率、 θ_i : 初期体積含水率、 θ : 湿潤域の体積含水率、 r : 降雨強度、 t : 経過時間、 β : 斜面勾配である。斜面表面からの排水がないと仮定し、図のTB面を通る鉛直なa-a断面に連続式をたてT点、B点の座標を代入すると次式を得る。

$$x_T = r t / (\theta_s - \theta_i)$$

$$y_T = r t / (\theta_s - \theta_i) \tan \beta$$

$$x_B = r t / (\theta - \theta_i) \tan \beta$$

以下では、これらの式を理論値として実験値と比較し検討した。

図-5(a),(b)はそれぞれ雨水の浸透により斜面内に生起する飽和域形状の経時変化を、盛土底部に埋設した間隙水圧計の測定値を水頭値に換算し推定したものである。両図より、いずれのケースも湿潤前線が斜面先より順次基盤面に達し、それに伴い斜面先より飽和域を形成し、徐々に高さを増しながら盛土内部へ拡大していくのが分かる。

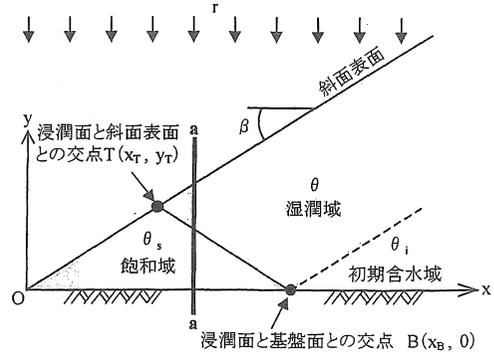
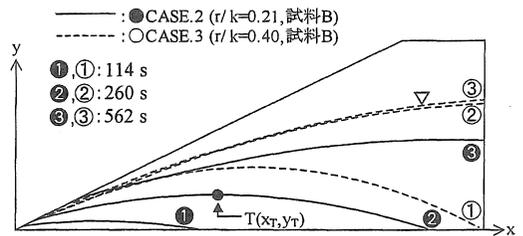
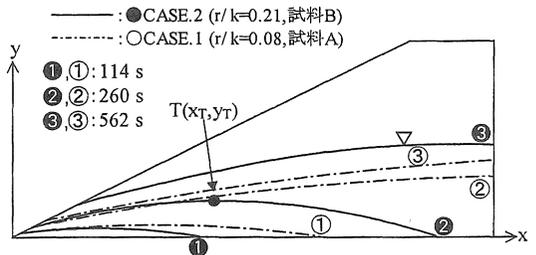


図-4 降雨時の飽和域と湿潤域



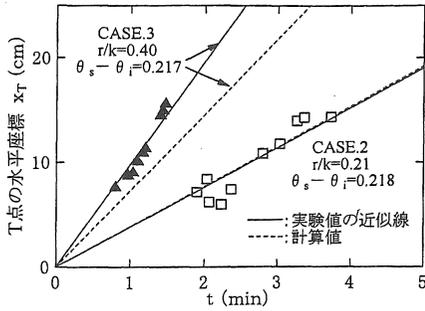
(a) 同一試料の場合



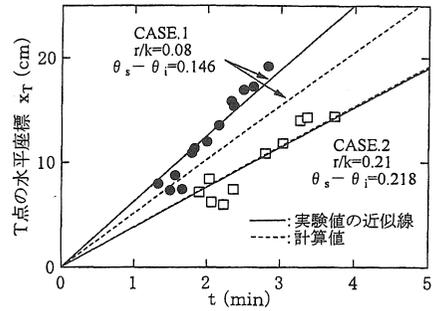
(b) 降雨強度一定の場合

図-5 飽和域成長過程の比較

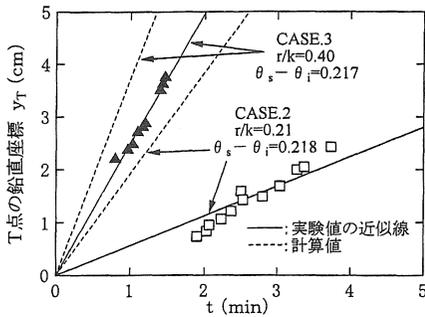
この飽和域の成長過程は、 $r/k < 1.0$ の条件で行われた1G場での浸透実験結果と一致する。飽和域の成長速度は、同一試料で r/k 値の異なるCASE.2($r \approx 16\text{mm/h}$)とCASE.3($r \approx 8\text{mm}$)を比較した(a)図では r/k 値の大きいCASE.2のほうが速い。これに対して、異なる試料で r/k 値の違うCASE.1とCASE.2を比較した(b)図では、飽和域拡大の初期の段階では r/k 値が小さいCASE.1のほうがより速く飽和域が成長している。以上より、飽和域の成長速度は同一試料においては r/k 値、つまり降雨強度 r の影響を大きく受けていると考えられるが、試料が異なる場合は降雨強度だけでなく試料の性質も影響していると考えられる。



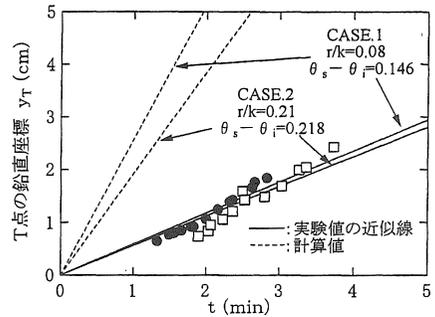
(a) T 点の水平方向の変化



(a) T 点の水平方向の変化



(b) T 点の鉛直方向の変化



(b) T 点の鉛直方向の変化

図-6 飽和域の最高点 T の比較(同一試料)

図-7 飽和域の最高点 T の比較(降雨強度一定)

図-6 (a), (b) および図-7 (a), (b) は飽和域の最高点 T (x_T, y_T) の経時変化をそれぞれ、 x_T (T 点の水平座標), y_T (T 点の鉛直座標) に着目し実験値と理論値で比較したものである。両図より、直線の勾配は飽和域の最高点 T の進行速度を表し、T 点は水平方向、鉛直方向ともに比例的に進行しているのが分かる。同一試料で降雨強度が異なる CASE. 2, 3 を比較した図-6 では、T 点の進行は水平、鉛直方向ともに r/k 値が大きいかほど速くなっているのが確認でき、その差は鉛直方向に大きく見られる。降雨強度一定で試料が異なる CASE. 1, 2 を比較した図-7 では先の傾向は確認できず、有効間隙率 ($\theta_s - \theta_i$) が大きな CASE. 1 のほうが T 点の進行が速くなっている。これより飽和域の最高点 T の進行は、 r/k 値のみではなく、有効間隙率 ($\theta_s - \theta_i$) も大きく影響していると考えられる。

実験結果と理論値を比較すると、両図ともに水平座標は概ね一致しているが、鉛直座標に大きな差が見られる。この原因の 1 つとして理論値が斜面表面からの水の排水がないと仮定し得られたためだと思われる。

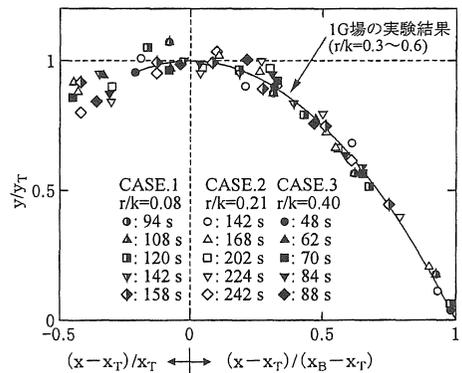


図-8 浸潤面形状

図-8 は浸潤面形状を任意時間について示した結果である。図より、本実験は 1G 場での浸透実験結果と良く一致しており、浸潤面形状は r/k 値、土質に無関係で 2 次曲線で近似できることがわかる。

4. FEM 解析および安定解析手法

有限要素法による定式化には Galerkin 法による重み付き残差法を採用し、時間項には中央差分法を

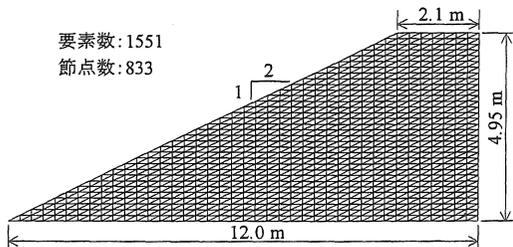


図-9 解析モデル

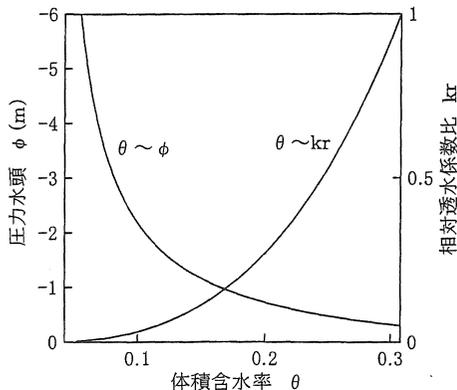


図-10 不飽和透水特性(仮定)

適用して計算時間刻みごとに解(圧力水頭)が許容収束条件を満たすまで反復計算した。解析モデル(遠心模型の実物堤体)は図-9のように遠心模型の寸法、浸潤面高さを30倍、時間を30²倍して、斜面勾配1:2、盛土高4.95m、底面長12m、天端幅2.1mとなり、鉛直方向を33分割、水平方向を40分割し、三角形要素で構成した。これにより解析領域は833節点、1551要素となる。盛土の初期条件は盛土底部に飽和度50%程度の水分を含有するものとした。境界条件は、斜面表面および天端は圧力水頭既知とし、盛土底面および盛土側面は法線流速ゼロとした。盛土材料の不飽和透水特性は図-10のような関係を仮定した。なお、計算時間刻み $\Delta t=3600\text{sec}$ 、圧力水頭値の許容収束誤差 $\Delta E=0.001\text{m}$ とした。

盛土の安定性評価には有効応力法による斜面安定解析を行い、解析方法には簡易 Bishop 法を採用した。解析は盛土材料としてよく用いられる砂質土を対象とし行った。砂斜面ではせん断応力が斜面先に集中する傾向にあるため、図-11のような斜面先を通る①R=3m、②R=6m、③R=12mの3つのすべり面を想定し、降雨強度 $r=8, 25, 40, 60\text{mm/h}$ に対して想定した3つのすべり面の安定率の経時変化を調

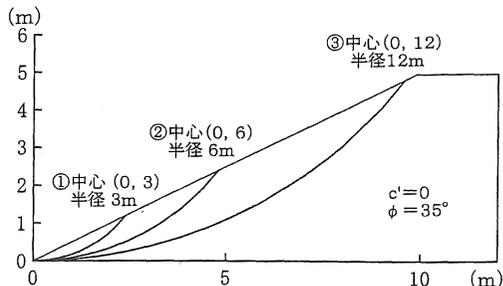


図-11 砂斜面の想定すべり面

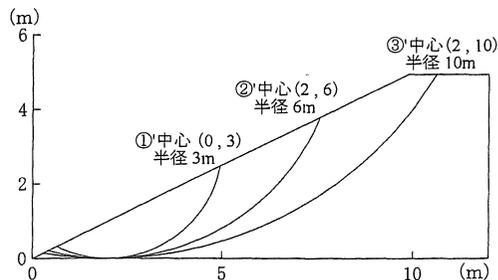


図-12 粘性土斜面の想定すべり面

べた。解析堤体は初期体積含水率 $\theta_i=0.147$ 、飽和体積含水率 $\theta_s=0.293$ とした。また、 $\phi'=35^\circ$ の砂斜面と $\phi'=20^\circ$ 、 $c=0.98\text{kN/m}^2$ の粘性土斜面について調べた。

5. 解析結果と考察

5.1 FEM解析結果

図-13は降雨浸透実験のCASE.1に対する実験結果とFEM解析結果の浸潤面を比較したものである。図より、 $t=40\text{h}$ までの両浸潤面はよく一致しているといえる。また、図-14の実験値と解析値の浸潤面高さ(遠心実験における間隙水圧計埋設地点の浸潤面高さ)の相関図より、 $t=40\text{h}$ までの相関係数が0.875となり両者の相関性は強いといえる。通常の1降雨の継続時間は40時間程度まで考えれば十分であるので、この一致は遠心模型実験およびFEM浸透解析の信頼性と遠心模型実験の実物に対する再現が可能であることを意味する。60hおよび100hの浸潤面は、斜面先付近ではFEM解析の方が高く、内部に向かうにしたがって実験の方が高くなる傾向にある。これは斜面表面からの浸入水のコリオリ力による偏向が時間とともに大きくなっていくためと推察される。

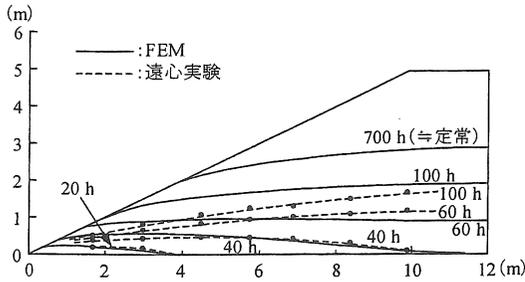


図-13 実験と FEM 解析の浸潤面比較

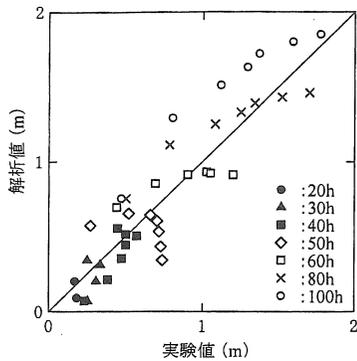
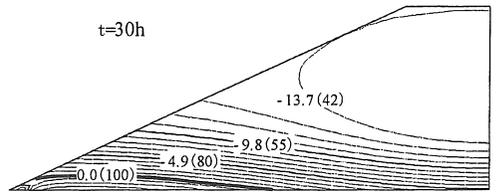
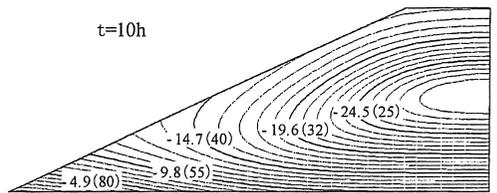
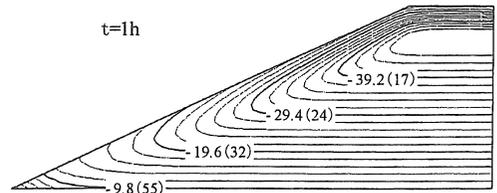
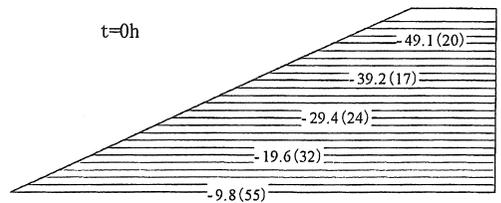


図-14 実験と解析の浸潤面高さの相関

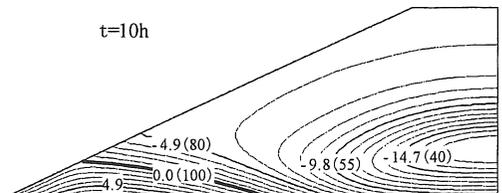
図-15 に降雨強度 $r=8\text{mm/h}$ の盛土内間隙水圧 u の経時変化を示す。なお、図中の () 内は飽和度 S_r を表す。図より、降雨開始とともに浸入水によって、盛土表層部の飽和度が高くなっていくことがわかる。その後、飽和度の高い領域は盛土下方へと移行し、斜面表面からの鉛直距離の短い斜面先より基盤面に達し飽和域を形成していく。降雨浸透による飽和度の上昇は、天端下方でもみられるが、基盤面までの鉛直距離が長いいため、飽和度の最も低い領域が盛土内部に分布している。斜面先で形成された飽和域は、徐々に高さを増しながら盛土内部に進行し、これに伴い盛土内部の飽和度は増加していく。また図-16 に示す $r=40\text{mm/h}$ の場合と比較すると、降雨強度が大きいほど短時間で斜面先付近に高い飽和域が形成され盛土内の間隙水圧の増加も速いことが確認できる。

図-17 に累積降雨量 480mm の降雨強度の違いによる飽和域の最高点の鉛直座標 y_b および基盤との交点座標 x_b の関係を示す。図より、降雨強度の大きな降雨が短時間継続するより、降雨強度の小さな降雨が長時間継続した場合のほうが鉛直方向には大きな差異は見受けられないが、飽和域と基盤との交点



unit: kPa (%)

図-15 間隙水圧分布の経時変化 ($r=8\text{mm/h}$)



unit: kPa (%)

図-16 $r=40\text{mm/h}$ の間隙水圧分布

は盛土内部方向に大きく進行する。これは降雨強度が大きな降雨ほど盛土全体の飽和度を増加させながら飽和域を形成してゆくとと思われる。

次に天端幅、盛土高が等しく斜面勾配が異なる盛土に対して飽和域形状の比較をした結果を図-18 に示す。図より、鉛直方向に差は見られないが、斜

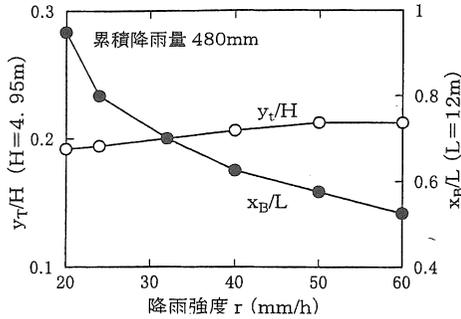


図-17 累積降雨量 480mm の浸潤面の比較

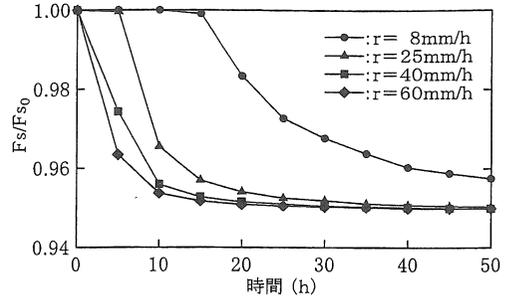


図-20 安全率変化(すべり面①, R=3m)

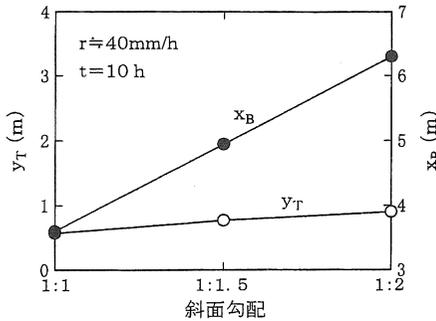


図-18 斜面勾配による浸潤面の比較

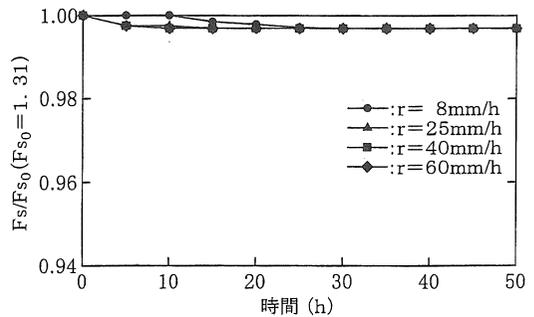


図-21 安全率の変化(すべり面①', R=3m)

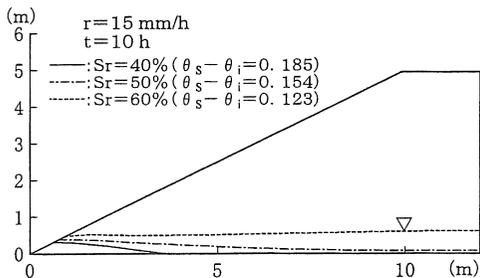


図-19 盛土の初期状態の違いによる浸潤面

面勾配が緩いほど水平方向への進行は速い。これは斜面表面からの垂直距離が短いため、飽和度の上昇も速く浸潤面が盛土内部に進行したと考えられる。

盛土の初期状態の違いによる浸透挙動について、実験結果より飽和域拡大に影響していると思われる有効間隙率 ($\theta_s - \theta_i$) を、初期体積含水率 θ_i を変化させて盛土内の飽和域形状を比較した。結果を図-19 に示す。図より、遠心実験結果と同様に有効間隙率が小さいほど飽和域の成長は速いのが確認できる。これは飽和体積含水率 θ_s が一定の場合、不飽和透水特性における $\theta \sim S_r$ の関係が J 字形を有していることより初期飽和度が大きいほど不飽和透水

係数が大きくなるためと思われる。

5.2 安定解析結果

降雨開始前のすべり面の安全率を F_{s0} ($=1.56$)、降雨開始 t 時間後の安全率を F_s として、降雨が 50 時間継続する時のすべり面の F_s/F_{s0} 値の経時変化を調べた。図-20 にすべり面① ($R=3m$) の安全率の経時変化を示す。降雨開始後、安全率は低下していき、その低下の度合はすべり面①が最も大きく、すべり面③ ($R=12m$) が最も小さいことが確認できた。これより、飽和度の増加に伴う自重増加によるせん断応力の増加や、間隙水圧の発生によるせん断抵抗の低下が、斜面先の小さいすべり面に対して最も影響を及ぼしていると考えられる。

すべり面③に対して、降雨強度 $r=8$ mm/h の場合、降雨開始 15 時間後までは安全率に変化は見られず、その後の安全率は徐々に低下している。 $r=25, 40, 60$ mm/h の場合は、降雨開始直後から安全率は低下を始め、降雨開始後 15 時間後までの低下が最も大きく、その後の安全率の変化はあまり見られない。粘性土斜面では図-21 のように、安全率の低下が最も速い時間で起こるのは、飽和部の影響の大き

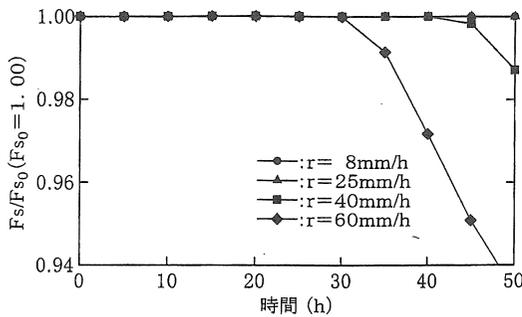


図-22 安全率の変化(すべり面③', R=10m)

なすべり面①'(R=3m)であるが, 降雨開始後 30 時間までの安全率は降雨開始前の安全率が最も低いすべり面③'(R=10m)が最も低い。30 時間以降は図-22 のように, すべり面③'に対して, 降雨強度 40, 60mm/h の降雨強度の大きな降雨が著しく安全率を低下させている。

6. まとめ

本研究で行った降雨浸透実験より得られた結果は, 1 G 場での浸透実験結果および FEM 解析と良く一致しており, 本実験の信頼性, 実物への再現性が確認できた。

$r/k < 1.0$ の盛土内の降雨浸透挙動は, まず降雨によって斜面表層の飽和度が増加する。この領域は不飽和であり, 一定の速度で降下してくる。斜面表面からの鉛直距離が短い斜面先付近では, 飽和度の高い領域が基盤面に達し斜面先より飽和域を形成する。飽和域形状は 2 次曲線で近似でき, 飽和域の最高点の水平, 鉛直座標は比例的に増大し, 時間の経過に伴い最高点は盛土内部に進行していく。この過程は盛土材料が同じで, 降雨強度が大きい場合, 初期飽和度が高く斜面勾配が緩い方が速く起こる。

砂斜面では飽和度の影響の大きな斜面先付近のすべり面に対し, 降雨強度が 40mm/h 以上の大きな降雨が, 降雨開始から短時間で著しく安全率の低下に影響を及ぼす。これは降雨浸透により斜面先から飽和域が形成されるため飽和度の上昇に伴うせん断抵抗の減少とせん断力の増加によるものといえる。粘

性土斜面では, 砂斜面と同様に斜面先付近のすべり面の安全率が降雨開始とともに低下するが, 降雨開始前に最も安全率の低い深いすべり面の安全率が最も低い。

謝辞

本研究は文部省科学研究費補助金の補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) 木村勝行, 大根義男: 降雨による斜面内浸透流の模型実験, 第 23 回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1835-1836, 1988.
- (2) 定岡直樹, 奥村哲夫, 木村勝行, 成田国朝: 降雨による斜面内浸透に関する遠心模型実験, 平成 10 年度土木学会中部支部研究発表会講演集, pp.301-302, 1999.
- (3) 定岡直樹, 奥村哲夫, 木村勝行, 成田国朝: 降雨による斜面内浸透流の浸透性状, 平成 11 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 255-256, 2000.
- (4) 口石孝幸・木村勝行: 非定常一飽和・不飽和浸透流に対する有限要素の解, 愛知工業大学「研究報告」, No. 32, pp. 103-110, 1997.
- (5) 西垣誠: 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する 2, 3 の考察, 土質学会論文報告集, vol. 23, No. 3, pp. 165-177, 1983.
- (6) 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, 第 29 号 B, Vol. 29-B, 1994.
- (7) 大槻光雄, 本條忠応: ファイルダムの設計における簡便スライス法の合理的な応用, 土と基礎, vol. 31, No4, pp. 47-54, 1983.
- (8) 河野伊一郎: 有限要素法による堤体浸透問題の解析, 土と基礎, Vol. 21, No. 8, pp13~19, 1973.
- (9) 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.

(受理 平成 12 年 3 月 18 日)