遠心模型実験における降雨再現と斜面の変形観察

(独)労働安全衛生総合研究所 〇玉手 聡,遠藤 明 武蔵工業大学工学部 末政直晃,片田敏行,齊藤雅英

1.はじめに

斜面の崩壊災害が多く発生している。斜面の崩壊要因に は、斜面高さの増加による不安定化、斜面勾配の増加によ る不安定化、ならびに降雨などによる土の軟化や重量の増 加による不安定化が挙げられる。

本研究では遠心模型実験用降雨装置の開発を行った。そ の目的は、近年災害が多発した豪雨による斜面崩壊を実験 的に再現し、そのメカニズムを調べるためである。本報告 では、装置開発の検討過程とその性能、ならびに、これを 用いた崩壊実験の結果を述べる。

2. 降雨模擬装置の開発

神品¹は、遠心載荷装置を用いた降雨による斜面崩壊実験 を行っている。この実験では崩壊に与える斜面角度と降雨 強度の影響が調べられている。そして実験の結果、浸潤前 線の降下中に法肩から瞬時に崩壊するタイプと、飽和領域 の上昇に伴い法先で局所的に崩壊するタイプの2通りの破 壊形状が明らかにされている。しかし、この実験では、降 雨分布の不均一さと、地盤洗掘の発生が問題点として指摘 されていた。そこで本研究ではこの問題点を解決する為、 微霧発生ノズルを使用した降雨装置の開発を行った。 1)降雨模擬に必要なノズルの噴霧性能:遠心模型実験で発

<u>1)</u>
中国領域に必要なアメルの債務性能・速化候主失機で発生させる降雨強度(R_m)の計算には、透水条件による相似則 を用いた。降雨強度は通常mm/hrで表現される。従って、 実物の降雨強度(R_p)と R_m は、それぞれ式(1)と式(2)で表され る。

$$R_{n} = L_{n} / t_{n}$$
 (1) , $R_{m} = L_{m} / t_{m}$ (2)

ここで、 L_p は実物降雨量、 L_m は模型降雨量、 t_p は実物降雨 時間、 t_m は模型降雨時間である。さらに、実物と模型の間 には式(3)と(4)の関係が成り立つ。

$$L_p = n \cdot L_m$$
 (3) , $t_p = n^2 \cdot t_m$ (4)

ここで、nは遠心加速度である。従って、 $R_p \ge R_m$ の関係 は式(5)の通り導かれる。すなわち、実験では実際のn倍の 降雨強度の再現が必要である。

$$R_m = n \cdot R_p \tag{5}$$

本研究では豪雨による斜面崩壊再現のための標準条件を 表1の通り決定し、ノズル²⁾の選定を行った。表2は降雨模 擬装置に使用したノズルの噴霧性能を示す。噴霧量(S_c)と雨 粒径(d)は空気圧(P_a)と液圧(P_w)によって決定される。今回の ノズル選定では、既往の研究に見られた地盤洗掘の発生を 防ぐためにdの減少を重要条件に位置づけた。これと同時に、 雨滴の初速を小さくするために、 P_a の値は極力小さく設定 する必要があった。以上の条件を考慮して、ノズルの供給 圧力の標準条件を P_a =0.3MPa、 P_w =0.15MPaに決定し、 d<20µmとした。次にこの条件に基づいてノズルの必要本数 を検討した。本数は式(6)に示す実験での降雨強度(R_m)とノ ズルの噴霧量(S_c)の関係より、17本と決定した。

キーワード:斜面,降雨装置,遠心模型実験,表層変形

〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6 Tel 0424-91-4512, Fax 0424-91-7846)

表1 降雨換算值

| | 実物(p) | 模型(m) |
|---|--------|--------------|
| 降雨強度 R(mm/hr) | 30 | $1500(=R_m)$ |
| 降雨時間 t | 10(hr) | 14(sec) |
| 雨粒径 d(mm) | 1 | 0.02 |
| 実験容器(面積 1000cm ²)に おける必要噴霧量(S _r) | 30/hr | 1500/hr |

表2 ノズルの噴霧性能(いけうちMIMV45075)

| | | 空気圧(MPa) | | | | |
|---------|------|----------|-----------|-----|-----|--|
| | | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | |
| 液圧(MPa) | 0.1 | 9.5 | 4 | | | |
| | 0.1 | 20 | 10 | | | |
| | 0.15 | 19 | $9(=S_c)$ | 4.4 | | |
| | | 30 | 15 | 5 | | |
| | 0.2 | 30 | 17 | 9 | 4 | |
| | | 40 | 20 | 10 | 10 | |
| | 0.3 | | 41 | 24 | 17 | |
| | | | 40 | 25 | 15 | |

上段は、降雨の1本当たりの噴霧量(*S*)(mm/hr)を示す. 下段は、雨滴の粒径 d(µm)を示す.

2) ノズル設置角の補正:遠心場では落下する物体に、回転 方向と逆向きのコリオリカが作用する。本研究では理論解 析による雨滴の落下軌跡と遠心実験による推定軌跡の比較 を行った。その結果、2 つの軌跡には差が見られた。差が 生じた原因は、土槽容器内に生じる気流が雨滴の落下に影 響を与えるためと考えられる。すなわち、微小な雨滴と気 流の相互作用によって落下軌跡は変化したと思われる。そ のため、ノズルの設置角は、実験的なキャリブレーション によって補正を行った。その結果に基づいて設置角は回転 方向に対して上手側を72度と下手側を48度に決定した。 3) 水圧と空圧の供給システム:図1は水圧と空圧の供給フ ローを示す。空圧はロータリージョイントを介して遠心装 置内に供給した。供給は2系統であり、それぞれが圧力調 整バルブを備える。一方の系統はPaとして直接ノズルに供 給した。他方は、水タンクに接続し、水圧を発生させた。 水タンク底面では水圧を実測し、P_wの設定精度を高めた。



3. 斜面表層の変形観察

降雨実験においてはLVDT やレーザー変位計を用いた従 来型の計測は困難である。その理由は、斜面上部にセンサ ーを設置すると、降雨の落下阻害や降雨集水による地盤洗 掘が発生するためである。そこで、本研究では斜面の表層 に図2のような小型のひずみ計(以下、表層ひずみ計と呼ぶ) を図3のように設置して、斜面の動態計測を行った。表層 ひずみ計は、斜面の不安定化に伴って表層に生じる微小な せん断変形を高感度に検知できるものであり、長さ40mm, 厚さ 0.3mm の鋼材にひずみゲージを貼り付けたものであ る。その表面は FR コート(常温硬化フッ素ゴム塗料)を塗布 して、耐水性と耐久性の向上が図られている。



図2 表層ひずみ計の概要(左:外観,右:内部構造) 4. 遠心場における降雨実験

1)模型地盤:実験に用いた土試料は、豊浦砂と関東ロームの混合土である。この土試料の配合は乾燥質量比が 1:1 であり、その物理的性質を表2に示す。模型地盤は含水比が



表2 混合試料の物理特性

表3 隆雨後の含水比分布

| | | | X • 1410X•2010001 | | | |
|---------------------------|------------------------|--|-------------------|------|--------------------------|------|
| 透水係数 Ks(cm/s) | 1.212×10 ⁻² | | No. | w(%) | No. | w(%) |
| 湿潤密度pt(t/m ³) | 1.106 | | 1 | 51.7 | 6 | 54.6 |
| 乾燥密度ps(t/m³) | 0.737 | | 2 | 55.5 | $\overline{\mathcal{O}}$ | 56.9 |
| 塑性限界ω _p (%) | 55.97 | | 3 | 57.7 | 8 | 55.0 |
| 液性限界ωL(%) | 79.19 | | 4 | 57.9 | 9 | 54.7 |
| 塑性指数Ip | 23.22 | | 5 | 53.3 | 10 | 55.9 |

2)実験方法:実験時の降雨条件は、遠心力場において降雨 強度 1750mm/hr(実物降雨強度 35mm/hr)、粒径 20 μ mの降 雨を再現できる条件である。遠心加速度を 50gまで増加さ せた後にgを一定に保ち、降雨実験を行った。図4 は遠心実 験の経過を示す。実験中に降雨は 2 回与えた。1 回目の降 雨は経過時間(t_m)が約2100秒の時に15秒間与えた。その後, 16 分間放置し、変形の収束を待った。そして 2 回目の降雨 は t_m =約 3100 秒より 150 秒間連続的に与えた。

3)実験結果: 加速度の増加と降雨による斜面の変形を図 3 により考察する。50gを与えた斜面には沈下が見られる。 沈下量には,法先から法肩に向って増加が見られる。天端 における沈下量は約2cmであった。この沈下は、自重の増 加に伴う鉛直応力(土被り圧)によって生じたものである。 降雨後は斜面全体に顕著な変形が発生したものの、崩壊に は至らなかった。天端には最大で1cm程度の沈下増分が発 生している。地盤内の点線と実践を比較すると2つの線の

差は表層付 近で大きく 下層では小 さい。また、 法肩には勾 配の減少が 見られる。 図4は実 験過程にお ける表層ひ ずみ計の応 答を示す。 遠心加速度 の増加に伴 って、表層 ひずみの値 には増加が 見られた。 50g 場到達 後は出力が 一定値を示 しており、 斜面の変形 は収束して いることが わかる。第 一降雨を与 えた時の値 には顕著な 変動は見ら れない。し かし次の第



二降雨を与えた時には、応答値に顕著な変動が見られる。

図5は第二降雨による応答を拡大して示す。正の値は上 に凸の変形を意味する。斜面の不安定化における表層ひず み計の反応については、負の値の出力が崩壊前に増加する ことを別の掘削遠心実験において確認している。本実験に おいても類似した傾向が現れている。すなわち、降雨によ る斜面は不安定化していたことがわかった。実験終了後に 地盤を観察した結果、斜面には目立った浸食や水流の跡、 ならびに洗掘は見られなかった。実験後に計測した含水比 の分布を図6と表3に示す。含水比には鉛直方向に5%程 度の差が見られる。浸潤がA地点からC地点に向って移動 していたと考えられる。また、欄外に示した図より同深度 における含水比の値とその分布は、ほぼ一致していること がわかる。含水比はC地点における含水比が最も高く、水 分が右から左方向に移動したと推測できる。

5. まとめ: 遠心場において豪雨を再現可能な実験装置を開発した。 微霧の発生と初速の抑制により、均一な降雨を再現できた。 斜面の不安定化を表層ひずみ計で計測できた。 参考文献:1)神品英夫:東京工業大学修士論文,豪雨時の斜面の崩壊 機構に関する基礎的研究, 1989 2)株式会社いけうち: BIMV シリーズ微霧 発生ノズルhttp://www.kirinoikeuchi.co.jp/catalogs/2ryu/02_bim.pdf,