

降雨強度の違いがパイプを有する斜面の崩壊発生時刻に及ぼす影響

京都大学防災研究所 ○多田泰之
鳥取大学農学部 奥村武信, 本田尚正
九州大学農学研究院 久保田 哲也

1. はじめに 多くの崩壊の滑落崖で湧水やその痕跡が現認されることなどから、パイプ流の斜面崩壊への関与が指摘されてきた。多田ら(2002)は、パイプを模した多孔管を模型土層底に設置し崩壊実験を行い、土層内の排水システムが崩壊の発生時刻に影響することを明らかにした。この崩壊発生時刻の差は土層内に形成される特徴的な間隙水圧分布に起因するが、これはパイプの排水能と降雨強度とのバランスによって定まると考えられる。模型実験での検討は1降雨強度(34.5mm/hr)条件下で得られた知見にすぎない。そこで、本稿では浸透解析と安定解析を用いた数値解析的手法によって、閉塞条件の異なるパイプをもつ斜面の崩壊発生時刻への降雨強度の影響を検討した。

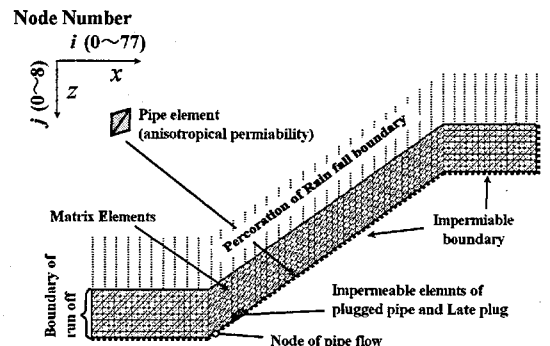


図1 要素分割, 境界条件とパイプ要素の設定

2. 解析方法 解析は、多田ら(2002)の模型土層に降雨強度 10~100mm/hr の定常降雨があった場合を想定した。パイプの閉塞条件は、①No pipe:パイプの無い場合。②Open pipe:パイプ経路が閉塞せずに土層外へ開口する場合。③Plugged pipe:土層の一部でパイプ経路が閉塞している場合の3 ケースを考えた。

降水が不飽和土層へ浸透し飽和帯を形成する過程は有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析で、斜面の安定性は簡便 Janbu 法による安定解析で検討した。

2.1 飽和-不飽和浸透流解析 飽和-不飽和領域の浸透過程は、連続式と Darcy 則を飽和・不飽和領域に拡張した(1)式で評価した(赤井 1977)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_r K_{xx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{xz}^s \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_r K_{zx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_r K_{zz}^s \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) - q = (\alpha S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $K(\psi)$: 不飽和透水係数、 ψ : 圧力水頭、 q : 流量、 S_s : 比貯留係数、 $C(\psi)$: 比水分容量、 K_r : 相対透水係数($=K(\psi)/K_s$)、 K_{ij}^s : 各座標方向への飽和透水係数、 t : 時間、 x, z : 水平・鉛直座標。 α は0; 不飽和領域、1; 飽和領域である。

土層は図1に示すように、 x, z 方向へ5cmの三角形要素に分割した。境界条件は、地表面を降雨浸透境界、土層下端開放部を流出境界、他は不透水境界とした(図1)。パイプは鉛直方向には地盤と同じ透水係数($K_z=0.938 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$)、傾斜方向には K_z の約100倍(北原 1988)の値に相当する $K_x=1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ をもつ透水異方性土層に置き換えた。パイプの閉塞は、パイプ要素の一部に不透水要素(図1中■)を設けることで模した。土層の $\psi - \theta$ 、 $\psi - K(\psi)$ 関係は実験によって求めた値を用いた。

図2に、多田ら(2002)の実験で測定された間隙水圧分布と上記手法によって算定した間隙水圧分布を、閉塞条件毎に比較した。両者は合致し、本手法によってパイプに起因する間隙水圧分布の変異がよく再現できることを確認した(多田ら 2004)。

2.2 安定解析 斜面安定度を表す安全率(F_s)は、久保田ら(1991)が提案した動的計画法を用いた臨界すべり面解析に準じたプログラムを作成し算定した。本プログラムは、利得を最小化することで最小の F_s を与える臨界すべり面を決定し、そのすべり面を用いて(2)式に示した簡便 Janbu 法により F_s を算定する。土の強度定数は、せん断試験によって求めた $c'=0.0$ と逆算より求めた ϕ' を用いた。 $c'=0.0$ であるので修正係数は $f_0=1.0$ とした。

$$F_s = f_0 \cdot \left(\frac{\sum R_i}{\sum D_i} \right) = \left(\frac{50d}{L} \right)^{\frac{1}{33.6}} \frac{\sum [\{ c'_i l_i \cos \alpha_i + (W_i - U_i l_i \cos \alpha_i) \tan \phi'_i \} / \cos^2 \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \tan \phi'_i / F_s)]}{\sum W_i \tan \alpha_i} \quad (2)$$

ここに、 R_i, D_i : スライス片のせん断抵抗力及び滑動力、 c'_i, ϕ'_i : 有効応力表示の粘着力及び内部摩擦角、 l_i, α_i : スライス i のすべり面長さ及び傾斜角、 W_i : 土層の湿潤単位体積重量、 U_i : 間隙水圧、 i : スライス要素番号、 f_0 : 修正係数である。

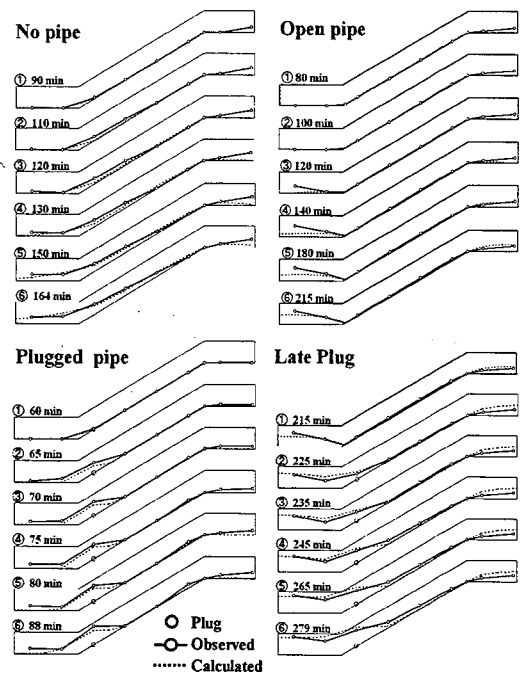


図2 実測した間隙水圧分布と数値計算結果の対応

3. 結果と考察

3.1 斜面不安定化開始時刻と不安定化速度へ与えるパイプの影響 F_s の経時変化を、パイプの閉塞条件、降雨強度別に図3, 4に示した。①いずれの閉塞条件においても降雨強度が大きい場合ほど F_s は短時間で低下し始める。(図3) ②Open pipeの場合、降雨強度が10, 20, 30 mm/hr以下では F_s の低下はない。(図3) ③いずれの降雨強度においても F_s は Plugged pipe, No pipe, Open pipeの順で早く低下する。(図4) ④No pipeに対する Plugged pipeと Open pipeの F_s 低下開始時刻の差は、降雨強度が大きい場合ほど短い。(図4) ⑤降雨強度が大きい場合ほど F_s の低下勾配は急であるが(図3), 同一降雨強度条件下での閉塞条件による F_s の低下速度勾配の差はさほどない。(図4)

3.2 パイプの崩壊発生時刻へ与える影響 模型実験で得られた崩壊発生時の F_s は No pipe:0.7968, Plugged pipe:0.8605, Open pipe:0.8226であった。ここでは、これらの F_s を下回った時刻に崩壊が発生すると考え、崩壊発生時刻を評価した。

【崩壊発生の有無】(表1) ①No pipeで崩壊しない小さい降雨強度(10mm/hr)でも Plugged pipeでは崩壊する。②No pipeで崩壊する降雨強度(20~50 mm/hr)でも Open pipeは崩壊しない。

◆同じ降雨強度条件下でも、パイプの閉塞条件によって崩壊の発生する場合としない場合がある。

【降雨強度と崩壊発生時刻の関係】(図5) ①パイプの閉塞条件に関わらず降雨強度が大きい場合ほど短時間で崩壊が発生する。②いずれの降雨強度においても、Plugged pipeはNo pipeよりも短時間で崩壊し、Open pipeは崩壊発生時間が遅延される。あるいは崩壊そのものが発生しない。それらの差は、降雨強度が50mm/hr以下の場合で顕著である。

◆パイプ閉塞条件は、降雨強度が小さいほど崩壊発生時刻に大きな影響を与える。

4. まとめ 飽和-不飽和浸透解析と臨界すべり面解析によって、閉塞条件の異なるパイプを有する斜面の10種類の降雨強度条件下での崩壊発生時刻の差異を検討した。結果として、パイプの崩壊発生時刻へ与える影響は台風や梅雨時など現実にある降雨強度の範囲で顕著に現れることが明らかとなった。

引用文献

赤井浩一・大西有三・西垣 誠(1977): 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析. 土論集 264 115-124
北原 曜・清水 晃・真島征夫(1988): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性. 日林誌 70(7) 318-323

久保田哲也・中村浩之(1991): 臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり-崩壊危険度の判定法. 地すべり 27(4) 18-25

多田泰之・奥村武信・久保田哲也(2002): パイプの存在が斜面安定に与える影響の実験的検討. 砂防学会誌 55(3) 12-20

多田泰之・奥村武信・久保田哲也・本田尚正(2004): 閉塞条件の異なるパイプを有する斜面における間隙水圧分布の再現計算. 鳥大演研報 27 13-26

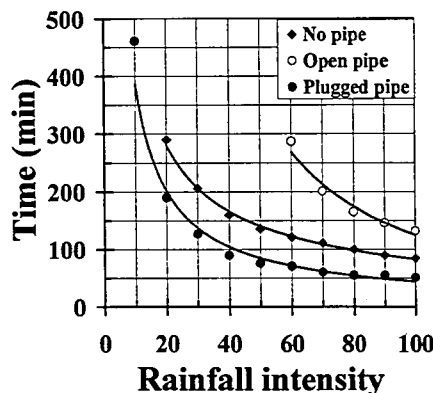


図5 強雨強度と崩壊発生時刻の関係

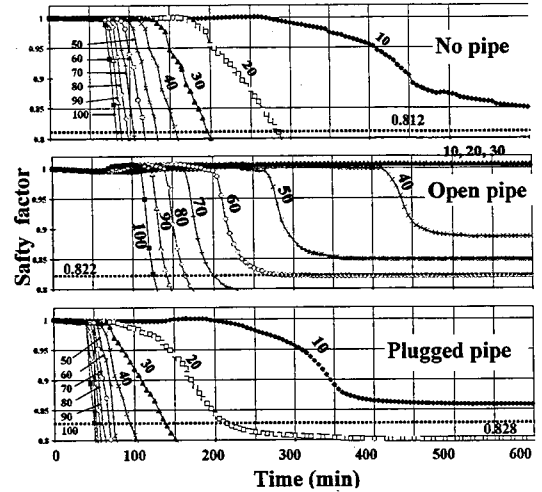


図3 パイプ閉塞条件毎の F_s の経時変化

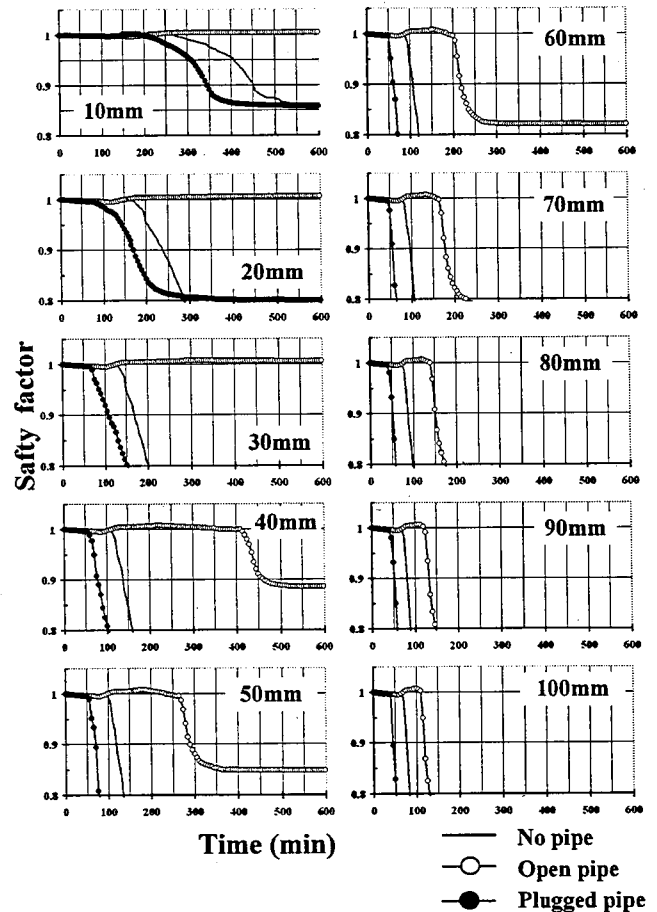


図4 降雨強度毎の F_s の経時変化

表1 各降雨強度における崩壊発生の有無

降雨強度 mm/hr	No pipe	Open pipe	Plugged pipe
10	×	×	○
20	○	×	○
30	○	×	○
40	○	×	○
50	○	×	○
60	○	○	○
70	○	○	○
80	○	○	○
90	○	○	○
100	○	○	○

○:発生 ×:発生せず