

降雨による土中水分量変化と土の強度変化に関する実験的研究

広島大学大学院総合科学研究科 ○海堀 正博
 同上、復建調査設計株式会社 中井 真司
 元、広島大学総合科学部 鈴木あゆみ

はじめに

豪雨による土砂災害に対する警戒・避難を効率よく行うために雨量指標を使う手法が各地で用いられている。筆者らもその一環として使いやすさの観点から新しい雨量指標 R' 値の提案と適用例等について発表してきたところである^{1),2)}。一方で、それら指標の物理的な意味づけが明瞭でないことが指摘されてきた。ここではこの物理的な意味づけを考えるために確認的な実験を行い、雨量指標の理解を深めることにした。

1. 人工降雨実験

人工降雨装置の下で、一面せん断試験用の試料箱を覆うようにかぶせた土層をセットし、その上から人工降雨を降らせるものである。土層箱内側の大きさは $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 100\text{cm}$ で、上面と底面には蓋等をしていないので水の出入りが可能な形態である。土層の深さは表層崩壊の深さに多い数値である約 70cm とした。人工降雨装置は高さが 250cm 、幅が 120cm 、奥行きが 120cm の大きさで、縦横 8 列合計 64 本のノズルが 10cm 間隔で付いている。その先端部は外径 1.1mm 、内径 0.9mm の注射針でできている。バルブ調節により最小で 10mm/h 以下の降雨を与えることが可能である。また、ただ一点のみに降雨が集中しないようノズルを振動させ、降水が分散するようにしている。

実験に用いた試料土は広島県では典型的なマサ土で風化花崗岩地域にふつうに見られるものであるが、東広島市内の過去の土石流発生地周辺で採取した。

実験条件としては、いずれも総雨量が 80mm になるような4つの降雨パターン、すなわち、 $10\text{mm/h} \times 8\text{h}$ 、 $40\text{mm/h} \times 2\text{h}$ 、 $80\text{mm/h} \times 1\text{h}$ 、 $10\text{mm/h} \times 4\text{時間} + 40\text{mm/h} \times 1\text{h}$ を設定した。なお、雨量強度の設定値には多少の誤差を伴うので、実験ごとに前もって雨量強度を計測して確かめるようにした。

また、降雨前に土層の深さ方向の含水比分布を把握するために、外径 48mm 、内径 44mm 、長さ 1m の塩ビ製パイプを用いて、 10cm 深さごとに土を採取し、求めることにした。

降雨後には、塩ビ製のサンプラー(内径 100mm 、高さ 60mm)を用いて、表面から順に不攪乱試料を採取する要領でサンプリングし、その密度と含水比を求めた。また、土層にあらかじめ埋めておいたせん断試験箱を取り出し、一面せん断試験機にセットし、そのままの含水比条件で強度試験を行った。なお、この場合のせん断試験に用いた垂直応力は土層深さ程度に対応する $\sigma = 9.14\text{ kN/m}^2$ とした。

降雨前後の土層の含水比変化について見てみる。図1は白抜きプロット3本が降雨前、黒塗りプロット3本が降雨後の含水比分布を示し、◇と◆、△と▲、□と■が1回の実験に対応した結果の例である。降雨前の初期状態の含水比が数～10%程度以下の場合と15%前後より大きな場合の例で、それぞれ $40\text{mm/h} \times 2\text{h}$ の降雨を与えたものである。これを見ると、最初の含水比が高くない事例では、降雨によって土層の表面近くでは含水比が20%を超える部分もある一方、土層の中間深さでは15～18%程度の値であり、明らかに表面付近より含水比の小さな部分がある。これに対し、初期状態ですでに15%程度以上の含水比を持つ土層については、降雨

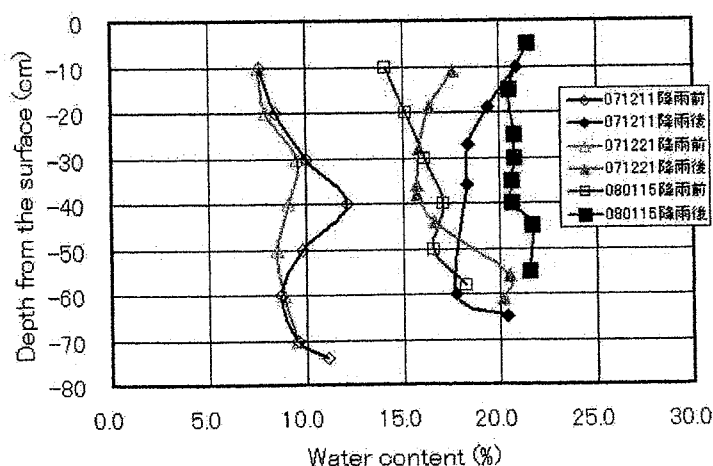


図1 降雨実験結果の一例
 白抜きプロットは降雨前、黒塗りが降雨後。同じ形のプロット同士が対応する。降雨はいずれも $40\text{mm/h} \times 2\text{h}$ 。

後には全層で含水比が20%を超え、かつ、深さ方向にあまり勾配のないほぼ一様な含水比分布となった(図1)。この他、 $10\text{mm/h} \times 8\text{h}$ の降雨実験では土層の上から下までほぼ全体的に15～20%という同じような値まで含水比の上昇が起きた。 $80\text{mm/h} \times 1\text{h}$ では表面近くの含水比は大きな値を示したものの、深さ50～60cm

前後では含水比が初期状態に近いままのところも存在した。10mm/h×4h + 40mm/h×1h では中間深さ程度までは深さ方向の含水比勾配は小さく、その下ではやや含水比の低いままのところが見られた。

降雨実験から見ると、浸潤前線は上部から下降しながら含水比が数～10%までの比較的乾燥した状態の土を時間をかけて 15%程度以上に上昇させるが、最初から 15%程度以上の含水比を持つ条件下では一気に土層の中を 20%以上の高含水比にまで増加させる傾向がある、といえる。すなわち、いきなり短時間強雨があっても土中の内部にその影響がすぐには現れずごく表層のみにとどまるのに対し、長時間の雨によってあらかじめ土中の含水状態が高くなっている場合には、その後の短時間強雨の影響が一気に土中の内部まで及ぶようである。

2. セン断試験

一面せん断試験機を使って含水状態の異なる供試体の強度を調べることにした。用いた試料は降雨実験で使ったのと同じマサ土である。あらかじめ所定の密度になるよう詰め固めて供試体を作製する。その後、前節で扱った人工降雨を加えたり、あるいは、所定の含水比にするのに要する量の水を供試体の上部から湛水させるような形態で加えた。(これとは別に、あらかじめ 5%、10%程度に湿らせた土試料を詰め固めるときは突き棒以外に上から約 1kg の質量を持つ鉄製のおもりの平面を使って加圧も行った。しかし、所定の密度の供試体を得るのが困難であった。)

用いた垂直応力は表層崩壊深さ程度を考慮して $\sigma = 2.1 \sim 15.2 \text{ kN/m}^2$ の範囲とした。試料箱の大きさ 100 mm×100 mm×(50 mm + 50 mm) に対して変位を 30mm まで与えた。その間の抵抗力の最大値をピーク強度とし、変位の最終段階での抵抗力を残留強度と呼ぶことにする。また、毎回の実験の最後に垂直応力を除去し、残留強度値の低下についても計測し、また、数回だけだが上面から水を加えることによる強度値の変化についても確認を行った。

図 2 はそれぞれ上からピーク強度、残留強度、垂直応力除去後の残留強度の含水比に対する分布を示したもので、 σ が 15.2 kN/m^2 、初期乾燥密度が $1.51 \sim 1.66 \text{ g/cm}^3$ のときのものである。この図からは含水比の高い条件下ではピーク強度も残留強度も小さいこと、数～十数%の含水比条件下では大きめの強度値を示すことが読みとれる。

なお、試験後、この大きめの残留強度値を示す供試体に加水することによって強度値が低下することも確認することができた。

また、10mm 変位までの応力－変位の関係(図 3) から、せん断強度と含水比の関係が以下の形で表現できることがわかった。すなわち、 $\ln(K_1 - Y) = \ln K_2 + K_3 \cdot X$ (ただし、 Y はせん断強度、 X は含水比、 K_1 、 K_2 、 K_3 は定数)。

以上のことから、土砂災害発生に至らないような降雨では崩壊面となり得る深さの土の強度低下が大きくはなっていないが、ある程度以上の雨によって含水状態が高くなっているところに短時間強雨が加わると、土中のある程度の深さまで一気に飽和度の高い状態がつけられるようになり、強度低下も急激なものとなることが推測された。このプロセスは雨量指標 R' の考え方とも合致し、 R' 値を使つての土砂災害の警戒が有効であることを示すものであると考えている。

参考文献 1) 中井・海堀ら(2007): 砂防学会誌、Vol. 60、No. 1、pp. 37-42. 2) 中井・海堀ら(2008): 砂防学会誌、Vol. 60、No. 6、pp. 4-10.

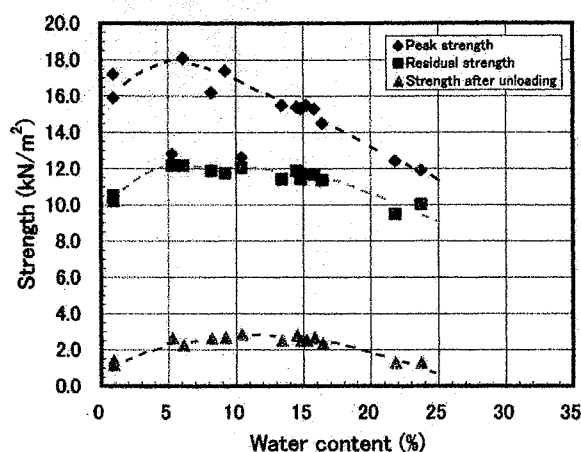


図 2 強度－含水比関係
上からピーク強度、残留強度、垂直応力除去後の残留強度。せん断試験中の $\sigma = 15.2 \text{ kN/m}^2$ 。

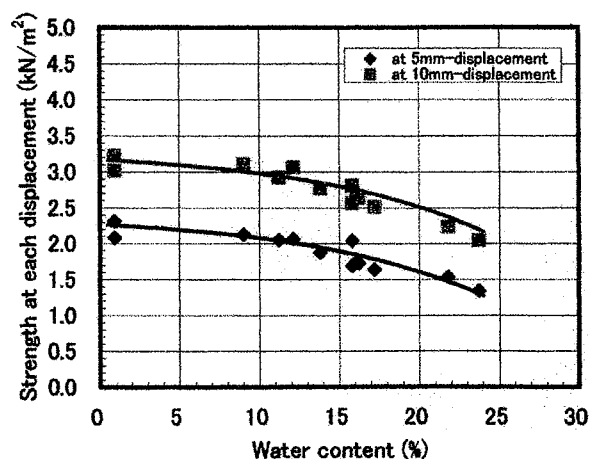


図 3 含水比ごとの変位と強度の関係
上は 10mm 変位時、下は 5mm 変位時の強度