

施工中の降雨に伴う斜面の浅い部分のせん断ひずみの反応

東京都市大学 学生会員○渡田洋介 正会員 末政直晃
 (独)労働安全衛生総合研究所 正会員 玉手 聡 正会員 堀 智仁

1. はじめに

道路拡幅工事において発生した斜面崩壊の復旧において斜面のモニタリングを行った。このモニタリングで用いたセンサーは表層ひずみ棒 (MPS) であり、工事現場においても簡易的な設置と計測を可能にするために開発したものである。そのデータの収録には MPS 用の警報器も用いた。この警報器は市販の乾電池を電源として用いて、データの収録、解析及び警報の一連の処理を行うものである。本報告では MPS の概要を紹介すると共に、崩壊した斜面工事現場に設置した MPS の計測結果について、主に降雨との関係から考察を述べる。

2. 表層ひずみ棒 (MPS) の概要

2.1. 計測原理

崩壊に伴うせん断ひずみはすべり面から離れた表層の浅い部分でもわずかに発生すると考えられる。MPS はこのせん断ひずみを簡易的に計測するための装置である¹⁾²⁾。図-1 に MPS の模式図を示す。MPS はその曲げ変形から斜面内のせん断ひずみをとらえ、換算せん断ひずみを算出する。換算せん断ひずみ $\theta(\%)$ は MPS の貫入スクリュー側を固定端とした片持ち梁条件における、MPS のたわみ s と有効長さ L の割合から式(1)と計算したものである。

$$\theta(\%) = s/L \times 100 \quad (1)$$

2.2. 崩壊予知の考え方

斜面の崩壊前において、 θ は一定の増加をした後、加速度的な増加をする。これは土のクリープ現象に基づいたものである。図-2 にクリープ現象における時間とひずみ増加を示す。MPS もこの現象を基にして斜面の崩壊予知を行う。クリープ現象とは材料に荷重を加えたとき、時間とともに変形が増大し、破壊に至る現象である。この現象ではまずひずみの増加が時間とともに減少する状態である遷移クリープ

(1次クリープ)、次にひずみの増加が一定になる定常クリープ(2次クリープ)及びひずみ増加が加速度的に見られる加速クリープ(3次クリープ)の3段階のひずみの変化を経て材料が破壊する³⁾。土において、応力制御型の三軸圧縮試験及び一軸圧縮試験により、クリープ破壊試験を行うことによってクリープ現象が同様に見られた。また斜面崩壊実験を行い、その結果からクリープ破壊試験で求めた関係が適合できることが既往の研究で明らかになっている⁴⁾。このような θ の増加から、 θ の単位時間あたりの増分をひずみ速度 v としたときの v の絶対値の逆数を示している逆速度 $1/v$ が 100min/%を下回ったとき D1 警報という警報が作動する。これは2次クリープのひずみ増加に対応している。また3次クリープは D2 警報に対応している。図-3 に D2 警報の判別の考え方を示す。収録されたデータから時刻 t_e と θ の回帰分析を行い、せん断ひずみの増加速度 A (v と同様) と回帰分析で求められる定数 B から、式(2)の示す近似式を求める²⁾。

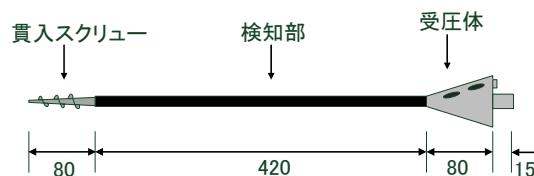


図-1 表層ひずみ棒

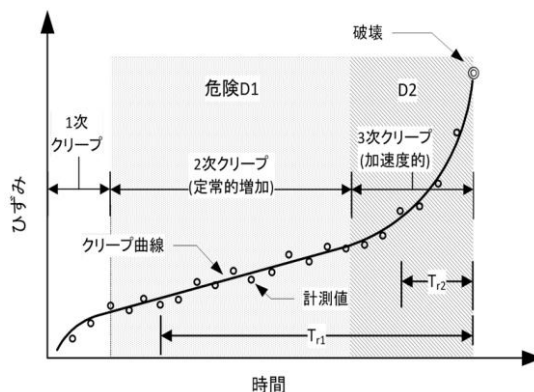


図-2 クリープ現象における時間とひずみ増加¹⁾

キーワード 現場計測、表層ひずみ棒、降雨強度、土のクリープ現象、箱ひげ図

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 地盤環境工学研究室 TEL. 03-5707-2202 E-mail: g1118100@tcu.ac.jp

$$\theta = A \cdot t_e + B \quad (2)$$

ここでの A と B は回帰分析で求まる定数である。式(2)から算出した予測値と比較し、実測値がそれを2回(図-3のrs1及びrs2)上回ったとき、加速度的な増加と見なし、D2警報が作動する²⁾。

2.3. 警報器の種類

MPSは警報器を用いて、作業者に避難を呼びかけることが可能である。警報器は従来型と新型の2種類ある。写真-1に従来型と新型の警報器を示す。従来型の警報器はD1警報のときはパトライトの点滅のみ、またD2警報はパトライトの早い点滅と警報音が作動する。一方、新型の警報器はD1警報のときはオレンジ色のパトライトの点滅、またD2警報は赤色のパトライトの点滅と警報音の作動と、D1警報及びD2警報が視覚的に分かりやすく示せる警報器となっている。また無線により設置場所から離れた地点においても警報が受信可能になっている。

3. 工事斜面における現場計測

3.1. 設置現場の概要

MPSによる計測は埼玉県内の斜面工事現場で行った。この現場では道路改良(拡幅)をするための掘削が行われていた。図-4に現場の断面図を示す。斜面表層には礫質砂が1.5~2.0m堆積しており、その下層に泥質片岩の基礎岩がある。この現場付近の観測所において合計95cmの降雪を観測⁵⁾した2014年2月14日から18日の間に、幅27m、高さ7.3m、深さ3mの法面崩壊が発生した。写真-2に崩壊直後の様子を示す。復旧工事を行った後、MPSを2014年5月23日から同年8月6日までの約2か月半計測を行った。警報器は従来型のものである。

3.2. 降雨による影響の検討

MPSによって得られた計測結果について、降雨量との比較を行い分析した。これは降雨時に θ の変化が計測されたためである。図-5に計測開始時から終了までの1日あたりの降雨量 R 及び θ の増分 $\Delta\theta$ を表した図を示す。図-5より雨の日は R の増加に伴って $\Delta\theta$ のマイナスの増加が見られ、降雨と $\Delta\theta$ の関連性が見られた。

3.2.1. 集中的な降雨に対するひずみ増分の反応

7月27日の計測結果において、降雨の影響と考えられる θ 増分の変化が見られた。図-6に7月27日の13時5分から13時30分における θ 増分、逆速度 $1/v$ 、10分間の降雨強度 r_{10} と気温 T を示す。この時間帯に現場近くの観測所において24.5mm/hrの降雨を観測した⁵⁾、特に13時20分においては、

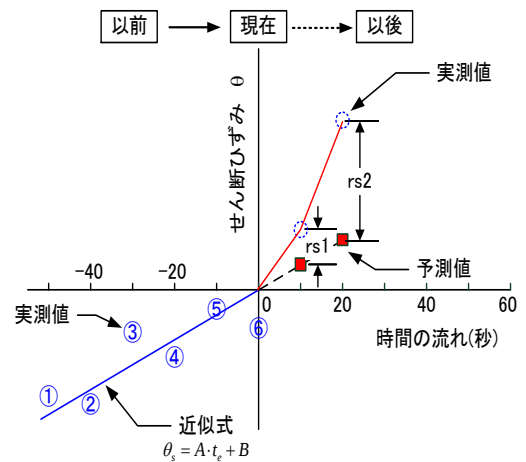


図-3 D2 警報判別の考え方²⁾

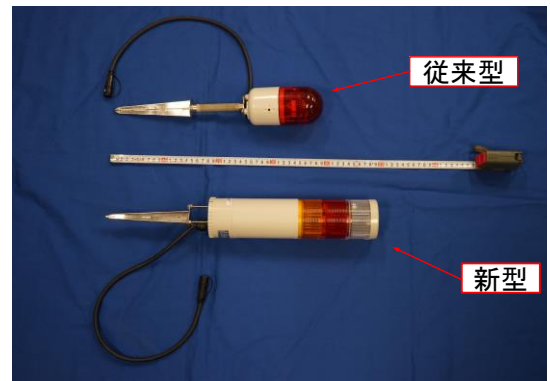


写真-1 新型及び従来型の警報器

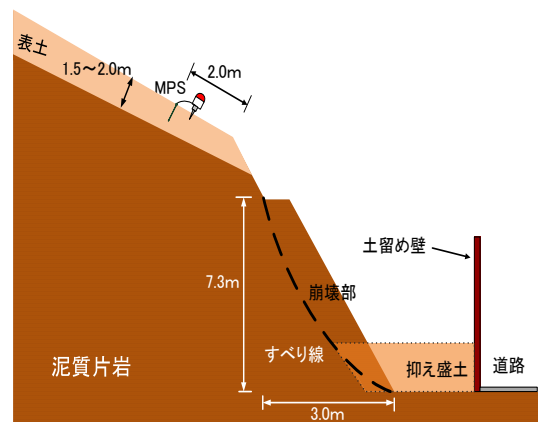


図-4 現場の断面図



写真-2 崩壊直後の様子

1 時間換算で 96mm/hr 相当の降雨が観測された。このとき r_{10} の増加に伴って θ 増分の一定の増加が見られ、 $1/v$ も D1 警報の閾値である 100min/%を下回り、D1 警報が作動した。また θ 増分には加速度的な増加も見られ、D2 警報も作動した。よって集中的な降雨によって工事斜面における崩壊の危険性が一時的に増加していたことが、計測結果によって示された。このような降雨と θ 増分の変化が生じたとき、崩壊の危険性が増加するということが計測結果から考えられる。また 7 月 27 日の計測結果では 2 次クリープ及び 3 次クリープと見られる θ 増分の増加があった。図-6 より D1 警報及び D2 警報が作動した 13 時 16 分の 2 分前から θ 増分は D1 警報の閾値を下回らない程度の定常増加と 10 秒ほどの加速度的な増加があった。よって各警報が作動した直前において 2 分程度の 2 次クリープ及び、10 秒程度の 3 次クリープが見られた。またその急激な増加後の 13 時 18 分から 13 時 26 分においても、 θ 増分が D1 警報の閾値を下回らない程度の定常増加を伴う 2 次クリープが見られた。そのとき $1/v$ の最小値が 236min/%、最大値が 546min/%、平均値が 343min/%と 200min/%から 550min/%程度の一定の値を示した。このような変化は既往の実大模型斜面実験における崩壊直前の逆速度の変化²⁾に類似していた。

3.2.2. 連続的な降雨に対するひずみ増分の変化

6 月 6 日の計測結果においても降雨の影響による θ 増分の変化が見られた。図-7 に 6 月 6 日における θ 増分、逆速度 $1/v$ 、降雨強度 r と気温 T を示す。この日は現場付近において 223mm/day と計測期間中における最大の R を観測した⁵⁾。また θ 増分の絶対値には 6 月 6 日以前の他の日と比べて約 4 倍の増加が見られた。しかし計測結果からは大きな $1/v$ の変化が見られず、D1 警報の閾値を下回らなかったことから、 v の顕著な増加は少なく、崩壊の予兆と考えられる θ 増分の増加は見られなかった。

3.2.3. 平均降雨強度と逆速度の関係

$1/v$ の分布から 2 次クリープが発生すると考えられる降雨強度を検討した。図-8 に降雨による θ 増分の変化が見られた日時における $1/v$ の箱ひげ図及びその時の換算平均降雨強度 r_a を示す。箱ひげ図とはデータのばらつき具合を示した図である。また r_a はその時間帯に降った 10 分間の単位時間あたりの降雨を 1 時間あたりの降雨に換算した値である。この図は降雨によって θ 増分の変化が見られた日時を横軸に列記し、 r_a が小さい順に日時とそれに対する

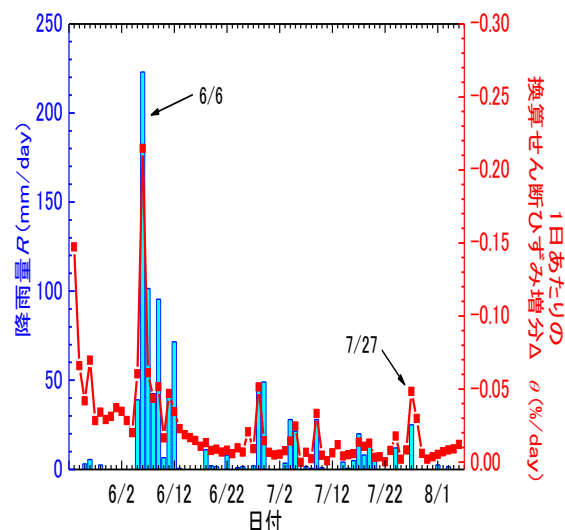


図-5 日付-降雨量及び換算せん断ひずみ増分

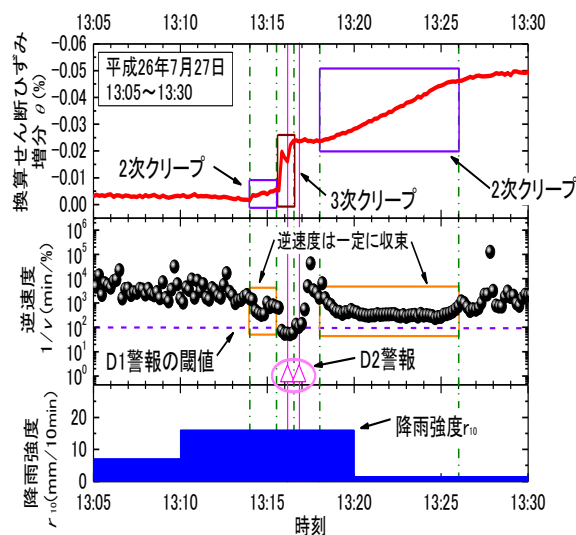


図-6 7 月 27 日 13 時 5 分から 13 時 30 分における換算せん断ひずみ、逆速度及び降雨強度

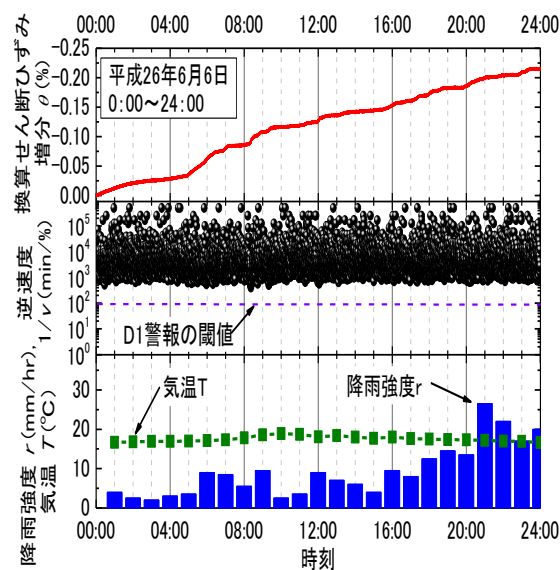


図-7 6 月 6 日における換算せん断ひずみ、逆速度及び降雨強度と気温

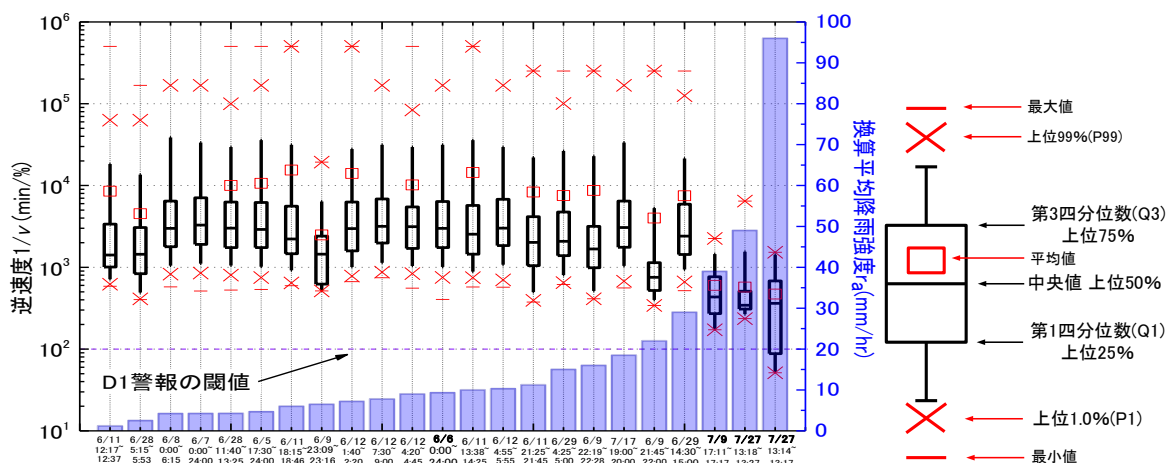


図-8 降雨による θ 増分の変化が見られた日時における $1/v$ の箱ひげ図及びその時の換算平均降雨強度

$1/v$ の箱ひげ図を並べたものである。また箱ひげ図は最小値、上位1.0%(P1)、第1四分位数Q1(上位25%)、中央値(上位50%)、平均値、第3四分位数Q3(上位75%)、上位99%(P99)及び最大値を凡例のように示した。図-8より7月9日17時11分から17分の間における r_a である $r_a=39\text{mm/hr}$ を上回った場合から、Q3は $1000\text{min}/\%$ を下回った。この場合から $1/v$ は一定の値に収束した。また θ 増分もそれに伴った定常的な2次クリープの増加が見られた。次に図-9に図-8より算出した $1/v$ のP1、Q1及び中央値とそれに対応する r_a の関係及びその $1/v$ の近似曲線を示す。 $1/v$ の近似曲線からP1、Q1及び中央値共に r_a の増加に伴って、 $1/v$ が減少した。 r_a が最大を示した7月27日13時14分からのデータと2番目だった同日13時18分のデータの r_a に 47mm/hr の差が生じており、差分間における $1/v$ について検討した。またD1警報の閾値を下回るような v が大きくなる2次クリープの発生と r_a の関係性についての検討のため、近似曲線からD1警報が作動する r_a の計算した。まずP1における近似曲線は

$$1/v_{P1}=829.52e^{-0.028r_a} \quad (3)$$

となり、式(3)より $r_a=75.6\text{mm/hr}$ のとき、D1警報の閾値を下回った。同様にQ1では $r_a=99.2\text{mm/hr}$ 、中央値では $r_a=128.2\text{mm/hr}$ でD1警報の閾値を下回った。よってこの工事斜面では $r_a=75.6\text{mm/hr}$ の降雨が見られた場合からD1警報の閾値を下回るような v の増加をする場合が発生し、 $r_s=128.2\text{mm/hr}$ の降雨でD1警報の閾値を下回る割合が50%になるような v の増加があると考えられる。

4. まとめ

MPSを道路の拡幅のため、掘削した工事現場に設置し、約2か月半の現場計測を行った。計測結果から $\Delta\theta$ は降雨による影響により変化することが判明した。しかし崩壊の危険性という観点から計測結果を考慮すると、断続的な降雨より、集中的な降雨の方が崩壊の予兆を捉えるような θ 増分の変化が見られ、崩壊の危険性が増加した。また平均降雨強度と逆速度の関係について検討し、D1警報が作動するような2次クリープが見られる場合における降雨強度を計算した。

＜参考文献＞

1)玉手聡,堀智仁,三國智温,伊藤和也,吉川直孝,末政直晃: 斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊予兆の把握に関する大型模型実験,土木学会論文集C(地圏工学),Vol.69,NO.3,pp.326-336 2013. 2) 玉手聡,堀智仁,三國智温,末政直晃: 施工時斜面における浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の検討,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70,NO.2,pp213-225 2014. 3) 機械用語集 材料力学 クリープ現象, <http://www.mterm-pro.com/machine-yougo/strength-materials/creep.html>, 閲覧 2014/12/5. 4) 齋藤迪孝: 斜面崩壊発生時期の予知,土と基礎,Vol.17,NO.2,pp.29-38,1969.. 5) 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, 閲覧 2015/1/5.

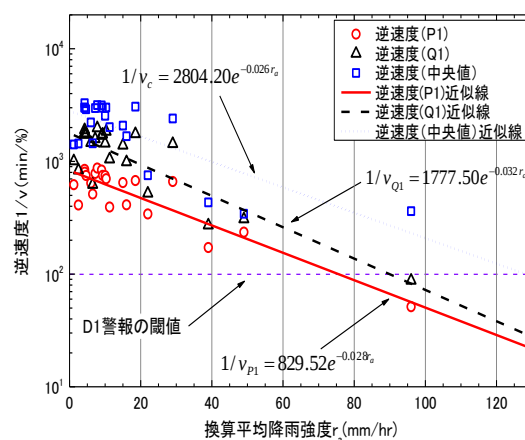


図-9 換算平均降雨強度と逆速度P1、Q1及び中央値の分布及び近似曲線