

2010年庄原土砂災害における平行斜面の崩壊事例に関する調査と考察

Geotechnical Investigation and Consideration of a disaster site of parallel slope
on Landslide disaster occurred at Shobara City in 2010

花岡 尚	Takashi HANAOKA	(広島大学大学院工学研究科)
川口将季	Masaki KAWAGUCHI	(鳥取市環境下水道課)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究科)
中川翔太	Shouta NAKAGAWA	(広島大学大学院工学研究科)
加納誠二	Seiji KANO	(呉工業高等専門学校環境都市工学科)

2010年7月16日夕方、広島県庄原市において、突然3時間累積雨量173mmの集中豪雨(大戸雨量計)が発生し、約4km×4kmの狭い範囲において200箇所以上の斜面が崩壊した。この災害では、平行斜面の中腹のみが崩壊する形態が多数確認された。本論は、この平行斜面の崩壊について調査し、崩壊のメカニズムについて考察した。調査の結果、斜面中腹から下部にかけて、風化流紋岩層の上に透水性の低い黒ぼく層が存在していることがわかった。その黒ぼく層が地下水の流下を妨げ、すぐ上流の風化流紋岩層の地下水位が局所的に上昇したと考えられる。そのため、斜面中腹で崩壊が生じ、多量の水分を含んだ土砂が下部の地盤を侵食することなく流下していったと考えられる。

キーワード：土砂災害，平行斜面，黒ぼく，現地調査 (IGC：C-8, C-7)

1. 災害の概要

2010年7月16日15時から18時にかけて、広島県庄原市において、突然、最大時間雨量72mm、3時間累積雨量173mm(広島県の大戸雨量計)の集中豪雨が発生した。この集中豪雨により、約4km×4kmの狭い範囲において200箇所以上の同時多発的な斜面崩壊と崩壊土砂による土石流が発生し、それらが木々を巻き込みながら溪流から流出して山間地の集落を押しつぶし、道路や農地にあふれ出すという被害が生じた¹⁾。

1.1 被害の概要と降雨の状況

被害の概要を図-1に示した。被災した地域は、県道445号線の両側を中心とした東西約4km、南北約4kmの範囲である。県道445号中迫川北線に平行して西側に大津恵川、篠堂川、東側に大戸川が流れている。県道445号線の両側の山地で山腹崩壊と崩壊土砂の土石流化が集中的に発生し、洪水被害と複合して445号線沿いの住宅、道路、農地に壊滅的な被害を与えた。土石流災害の発生箇所は37箇所、崖崩れ災害の発生箇所は5箇所であった。

本災害による被害は、広島県のまとめによると表-1の通りである。

図-2に被災地周辺に設置されている雨量計の位置情報を示す。図-3は大戸雨量計における7月1日からの7月17日までの累積雨量と1時間雨量の推移である。図-4は

表-1 被害の概要 (広島県まとめ)

被害概要	被害内容
人的被害	死者1名、負傷者1名
住宅被害	全壊家屋12棟、半壊11棟ほか
農地および農業用施設	502箇所、14億85百万円
林業(山地・溪流崩壊、林道)	65箇所、13億51百万円
河川	51箇所、13億54百万円
砂防	2箇所、30百万円
道路	21箇所、9億8百万円

表-2 被災地周辺の雨量情報

雨量計	7月16日までの 7月の累積雨量 (mm)	7月16日 15時~18時の 3時間の雨量(mm)	7月16日 15時~18時の 最大時間雨量 (mm)
永田	265	3	3
比和	299	8	7
庄原	262	3	3
川北	265	125	54
大屋	300	72	30
大戸	267	173	72
西城中野	257	51	33
本村	262	3	3

大戸雨量計における7月16日の時間雨量の推移を示している。図-3に示す通り、断続的な降雨によって、7月の累積雨量は7月16日の段階で大戸では267mmに達していた。図は省略するが、近くの川北では265mmに達していた。したがって、地盤は高含水比状態になっていたと考えられる。このような状態で、図-4に示す通り、16日の15時~18時の3時間に大戸で173mm(川北では125mm)の集中豪雨が発生した。この間、大戸雨量計では最大60分間雨

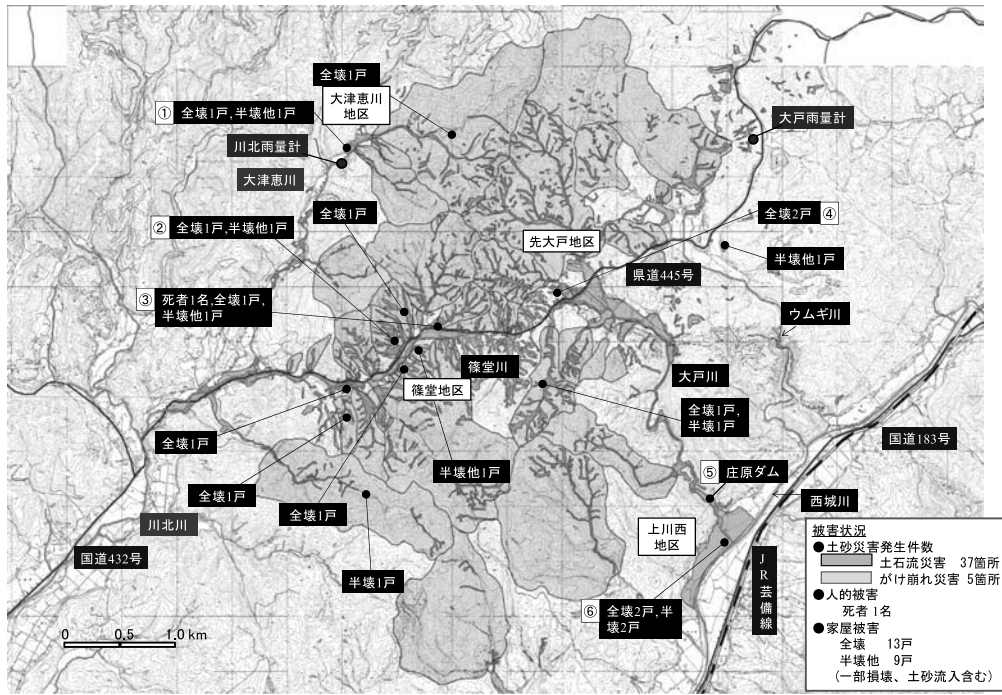


図-1 2010年7月16日に発生した広島県庄原市土砂災害の概要（広島県砂防課）

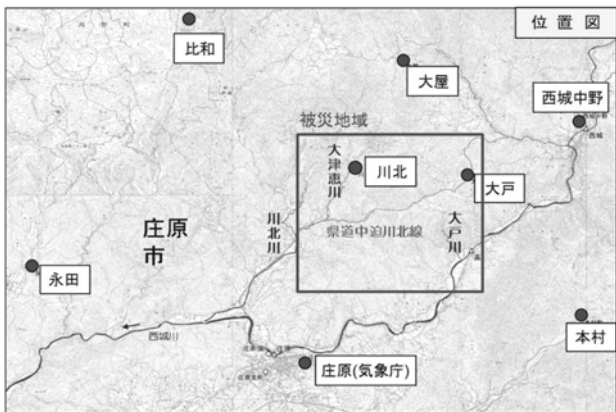


図-2 被災地周辺の雨量計の位置

量 91mm/hr (15:40~16:40) を記録している。観測された時間最大雨量 64mm が気象台の観測史上最大であるが、大戸の県の雨量計ではその値の約 1.5 倍の最大時間雨量 91mm を観測しており、今回の雨がこの地域にとってこれまでの経験をはるかに上回る豪雨であったことを示している。表-2 に図-2 に示す雨量計の 7 月 16 日までの 7 月の累積雨量、7 月 16 日 15 時~18 時の 3 時間の雨量、7 月 16 日 15 時~18 時間の最大時間雨量を示す。図-2 に示した雨量計では、全ての雨量計が 7 月 16 日までの 7 月の累積雨量が 250mm 以上であったことがわかる。7 月 16 日 15 時~18 時の 3 時間雨量および最大時間雨量には大きな差が見られ、3 時間雨量で 100mm を超えたのは川北と大戸の 2ヶ所のみで、極端に狭い範囲に、限定的に集中豪雨が発生したことがうかがえる。

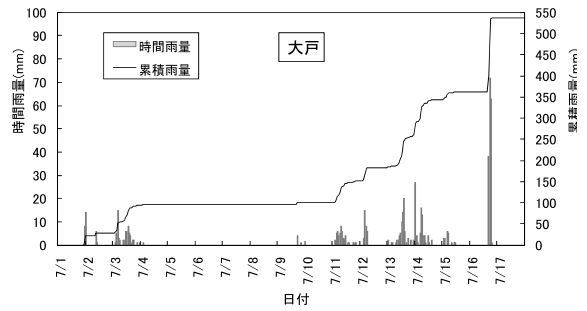


図-3 7月1日からの累積雨量と1時間雨量の推移

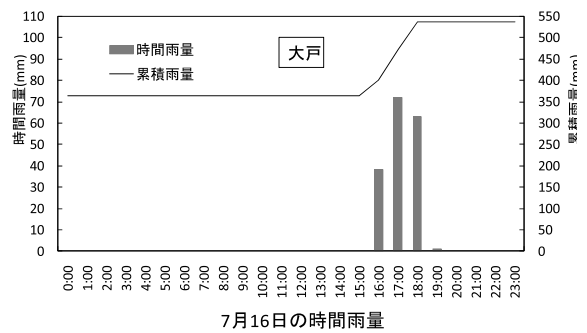


図-4 7月16日における時間雨量の推移(大戸)

1.2 被災個所の地質特性

被災地の基盤地質は流紋岩類（高田流紋岩類，中生代後期白亜紀）であり一部は吉舎安山岩類（中生代後期白亜紀）となっている。さらに、これらの層の上に備北層群（第三期中新世中期）が覆っている箇所や、火山灰質土である黒ぼくが覆っている箇所もある。

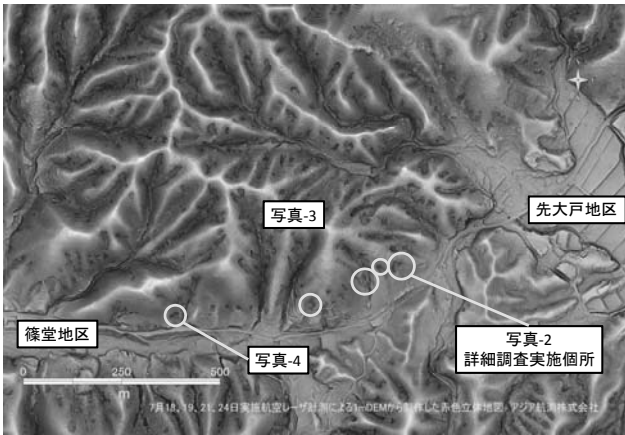


図-5 ヘリコプターからのレーザー測量による先大戸地区と篠堂地区の赤色立体地図

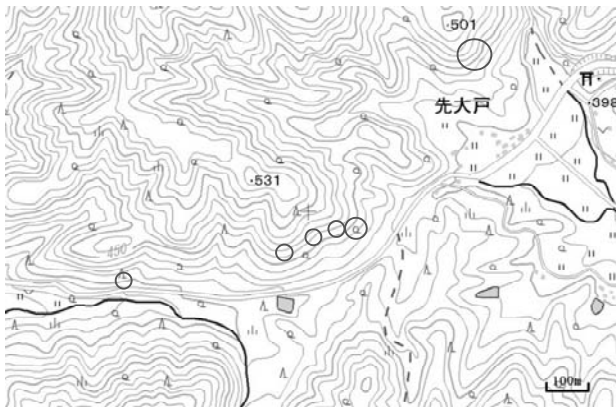


図-6 図-5中に示す範囲の崩壊前の地形図
(国土地理院公開の電子国土基本図)

広島県は土砂災害危険箇所が 31,987 箇所あり、全国一であるが、豪雨による土砂災害の多くは広島県西部や呉市などを中心とした風化花崗岩（まさ土）層が分布している地域である。今回庄原で起こった災害は、風化流紋岩や黒ぼく層によって表土が覆われている地域においても、豪雨による斜面災害が多発することを示した。

1.3 斜面崩壊と土石流の発生

写真-1 は山腹崩壊が集中的に発生した篠堂川流域の航空写真である。篠堂川および平行する県道 445 号線の両側の斜面において多数の山腹崩壊が発生し、崩壊土砂が土石流となって道路、河川、道路沿いの家屋、農地の上に流下している。

図-5 は、ヘリコプターからのレーザー測量によって作成した最も被害が大きかった先大戸地区と篠堂地区の赤色立体地図である（アジア航測(株)提供）。この図から、斜面の崩壊形態は2つに大別される。1つは、写真-1の中にも多くみられる、谷地形が崩壊しているケースである。そのほとんどは、尾根より 20~40m 下部が源頭部となって崩壊し、土石流が発生している。もう 1 つは、写真-2 や写真-3、写真-4 に示すような、谷地形ではない平行斜



写真-1 篠堂地域の斜面崩壊の状況



写真-2 平行斜面中腹の崩壊 1



写真-3 平行斜面中腹の崩壊 2



写真-4 平行斜面中腹の崩壊 3



写真-5 崩壊上部の様子

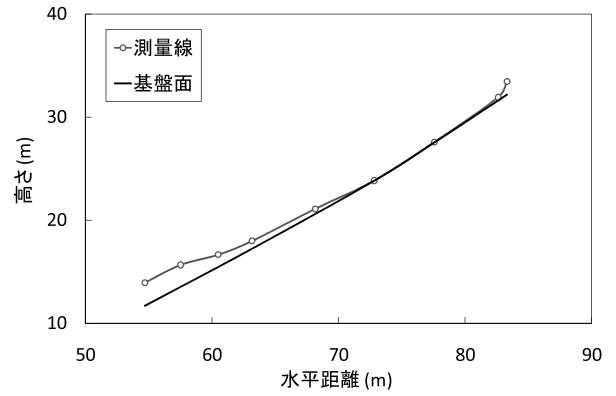


図-7 崩壊地の測量結果と軽量動的コーン貫入試験結果から推定した基盤面



写真-6 崩壊下部の様子（右岸側）



写真-7 詳細に調査を行った平行斜面の崩壊（写真-2の拡大図）

面の中腹のみが崩壊するといったケースである。図-5 中に示す黄色の丸は、現地調査によって確認することのできた平行斜面の崩壊地であるが、図-5 中にはそれら以外にも同様の崩壊形態と思われるものが複数確認できる。図-6 は国土地理院が公開している電子国土基本図である。この図は崩壊前のものであり、この図の等高線からもこれらの崩壊は谷地形ではなく平行斜面であったことが確認できる。このような平行斜面中腹のみが崩壊するといったケースは、風化花崗岩地帯ではあまり見られない崩壊形態であったため、本論文では、この平行斜面中腹の崩壊について現地調査を行い、崩壊のメカニズムについて考察を行った。

2. 平行斜面崩壊地の調査

本論文では、平行斜面中腹の崩壊について着目し、写真-2 に示す平行斜面中腹の崩壊地を調査し、崩壊に至った過程について検討した。

写真-2 を見ると、崩壊は斜面中腹のみで起きており、斜面下部は植生が残存しており崩壊していないことがわかる。しかし、崩壊土砂は斜面途中で留まることなく斜面下端まで流下しており、崩壊土砂が多量の水分を含み、流動性が高くなっていたことが推測される。写真-5 は、崩

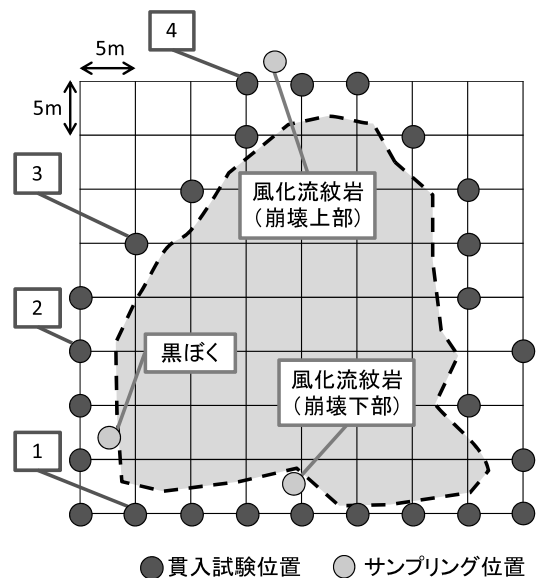


図-8 崩壊地の形状とメッシュ分割

壊斜面の上部の写真である。崩壊上部では表層と基盤層の間に水みちらしき孔が多数確認された。近年、自然斜面が豪雨時に崩壊する要因として、山腹斜面内にパイプと呼ば

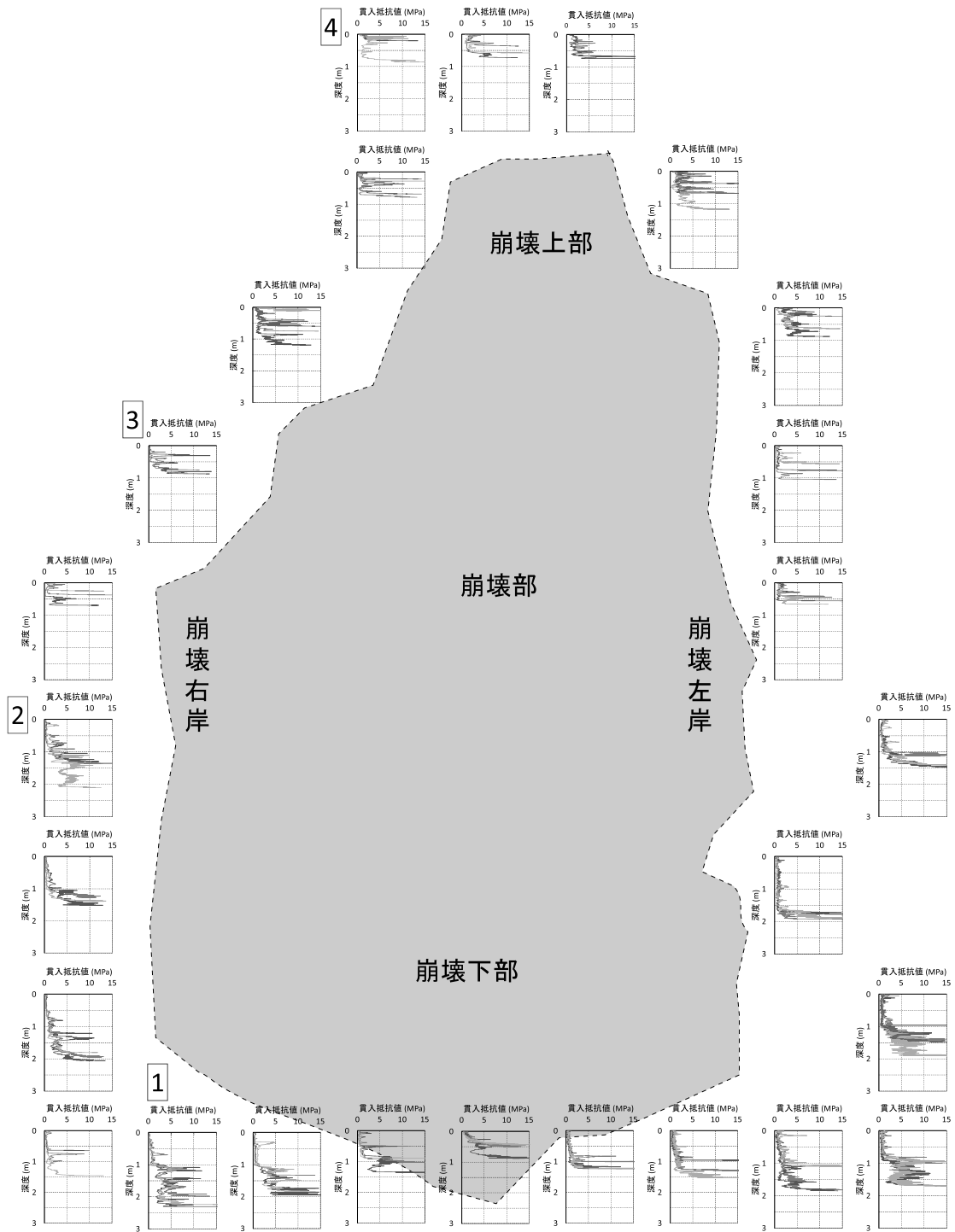


図-9 崩壊地周辺全体の軽量動的コーン貫入試験の結果

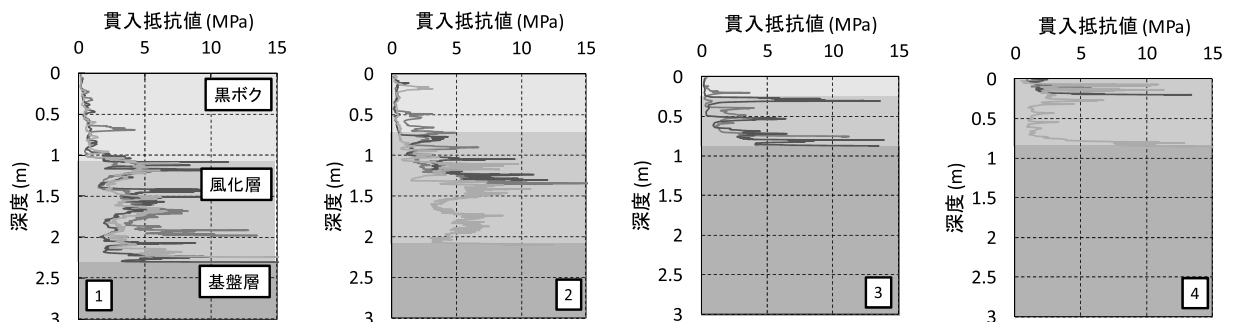


図-10 軽量動的コーン貫入試験の結果の代表例 (図-8および図-9中の1, 2, 3, 4)

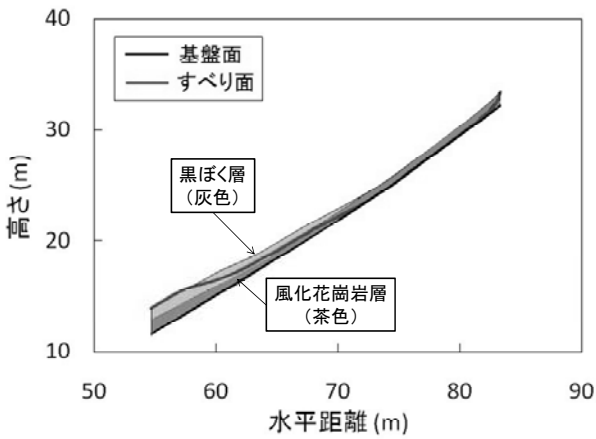


図-11 推測される崩壊前の断面

れる小動物の活動や植物根の腐朽、地下水による浸食などにより形成された空洞を通じた水の流れの重要性が指摘されている²³⁾。パイプは排水機能の効果があるとされており、良好な排水システムとしては地下水低下効果があるが、不完全な排水システムは水の集中を招き、斜面崩壊の要因となりえたとされている。今後崩壊メカニズムを考える上で、源頭部付近で観測された孔がパイプを形成している可能性を考慮する必要がある。これは、地盤に浸透した降雨が、水みちにより集約された可能性を示唆している。写真-6は崩壊斜面下部(右岸側)である。斜面上部には黒ぼく層が存在していないのに対し、斜面中腹から下部にかけて黒ぼく層が存在していた。

崩壊の形状を把握するために、測量を実施した。図-7に崩壊地の測量結果と軽量動的コーン貫入試験結果から推定した基盤面を示す。崩壊斜面長は約38m、崩壊斜面幅は約31m、崩壊斜面勾配は約32°であった。また、図-8に崩壊部の形状および崩壊部を5mメッシュで分割したものを示す。

また、崩壊部分周辺の層厚分布を把握するために、写真-7に示す崩壊部周辺の未崩壊地において軽量動的コーン貫入試験を実施した。実施箇所は、図-8に示す、崩壊部最近傍の節点(図-8中の赤い点)である。また、地盤の透水係数を調べるため、図-8中の青い点で不攪乱試料を採取した。採取した試料は、崩壊部上部および下部の風化流紋岩、崩壊下部に存在する黒ぼくの3種類である。これらの試験結果は後述する。

3. 軽量動的コーン貫入試験

軽量動的コーン貫入試験の特徴は、器材総重量20kgと小型軽量で作業も簡単であることから、使用に慣れていない作業員でも一人で安全に作業を行うことができ、斜面や狭い作業現場での調査に適していることである。土田らはこれまでに風化花崗岩地盤への適用性について検討し、本手法が適用可能であることを示している⁴⁾⁵⁾⁶⁾。図-8に示す崩壊地周辺の未崩壊地において軽量動的コーン貫入試験

を実施し、風化流紋岩層と黒ぼく層の分布を調べ、崩壊前の地形の推定を行った。

図-8に示すように、崩壊部周辺の未崩壊地の赤い点において、軽量動的コーン貫入試験を実施した。試験結果の信頼性を高めるために、1か所において3回の貫入試験を実施した。図-9に崩壊地周辺全体の試験結果を示し、図-10に代表例として、図-8および図-9中に示す地点1, 2, 3, 4における軽量動的コーン貫入試験の結果を示す。1MPa前後の低い貫入抵抗値を示す層は黒ぼく層である。2MPa~10MPaを示す層はこの地域に広く分布している風化流紋岩層であると推測される。左の図ほどより崩壊下部を示しており、基盤層からの表層までの厚さは、崩壊下部に向かって厚くなっていることがわかった。黒ぼく層は、崩壊最上部には存在しておらず、崩壊の中腹部より崩壊下部に向けて徐々に厚く堆積していることがわかった。

また、図-10は、崩壊の右岸側の貫入試験の結果を示しているが、それぞれの図の同じ水平位置での左岸側の結果と比較したところ、基盤層から表層までの厚さおよび貫入抵抗値の分布が類似していた。このことから、崩壊部も崩壊前は周辺と同じ地形・地層分布であったと推測することができる。図-11に推測される崩壊地の縦断図を示す。赤色の実線はすべり面で、測量によって測定したものである。その上の層は、左右の未崩壊地の貫入試験から推測されるものである。このように、軽量動的コーン貫入試験を崩壊地周辺の未崩壊地で実施することにより、崩壊前の地形を推測することが可能である。

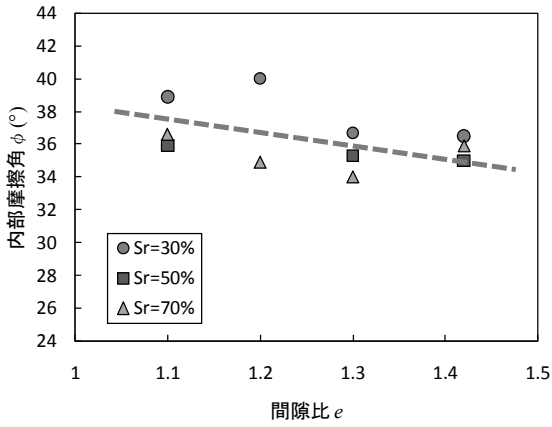
4. 地盤調査結果

崩壊地の攪乱試料を持ち帰り、飽和度および間隙比を変化させ、一面せん断試験を行った。また、土田らはまさ土地盤を対象に、軽量動的コーン貫入試験から得られる貫入抵抗値 q_a と地盤の飽和度 S_r を用いて地盤の強度定数を推定すること提案しており⁴⁾⁵⁾⁶⁾、推定強度と一面せん断試験の結果を比較した。

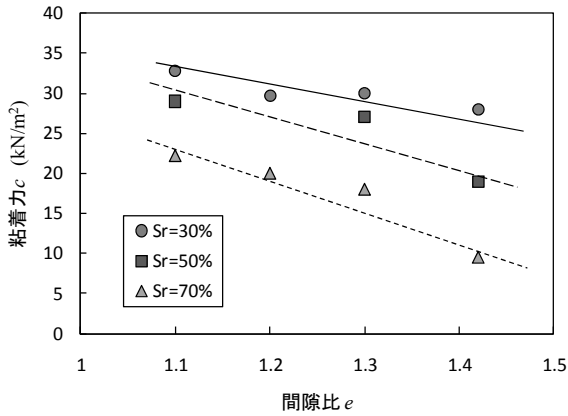
また、崩壊地より不攪乱試料を採取し、変水位透水試験を実施し、透水係数を求めた。

4.1 風化流紋岩の強度定数

崩壊地における地盤の間隙比および飽和度の変化における強度定数の変化を検証するため、飽和度 $S_r = 30, 50, 70\%$ の3条件、初期间隙比 $e_0 = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ の4条件を組み合わせた計12種類の条件下で定圧非排水条件の一面せん断試験を実施した。試料は2mmフルイを通過したものをを用いた。一面せん断試験の結果から得られた風化流紋岩層の強度定数と間隙比の関係を図-12に示す。粘着力は、飽和度が高いほど小さい傾向が明確に現れている。飽



(a)間隙比と内部摩擦角の関係



(b)間隙比と見かけの粘着力の関係

図-12 風化流紋岩層の一面せん断試験の結果

和度が高いと砂粒子間に働くサクションが消失するためと考えられる。また、間隙比が大きくなるとやや小さくなる傾向にある。内部摩擦角についても同様に e_0 が大きく S_r が大きいほど小さい傾向にあるが、飽和度に対する依存性は、粘着力に比べて極めて小さいといえる。一面せん断試験の結果より、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を飽和度 S_r と間隙比 e の関数で表した以下の式が導かれる。

$$c = (0.47S_r + 34.6) + (-0.63S_r + 4.5)e \quad (1)$$

$$\phi = (-0.30S_r + 57.6) + (0.18S_r - 14.3)e \quad (2)$$

また、土田らは軽量動的コーン貫入試験から得られる貫入抵抗値 q_d と地盤の飽和度 S_r を用いて地盤の強度定数を推定すること提案している²⁾³⁾⁴⁾。推定式は、以下の式(3)、(4)である。

$$\phi_d = 29.9 + 1.62 \ln(q_{d5}) + 0.142S_r \quad (3)$$

$$c_d = 10.6 + 1.19 \ln(q_{d5}) - 0.041S_r \quad (4)$$

$$q_{d5} = q_d - 0.01 \times (\gamma_t \cdot z - 5) \quad (5)$$

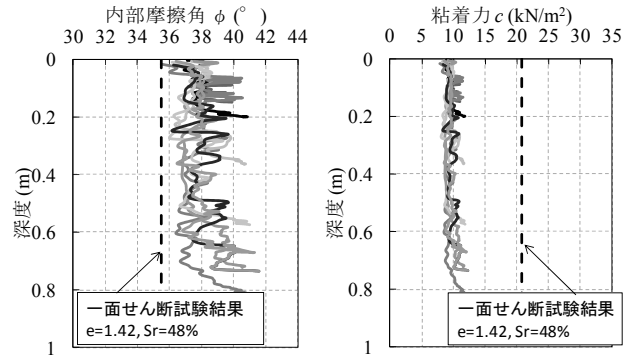


図-13 地盤の強度定数の推定 (図-9中の地点4)

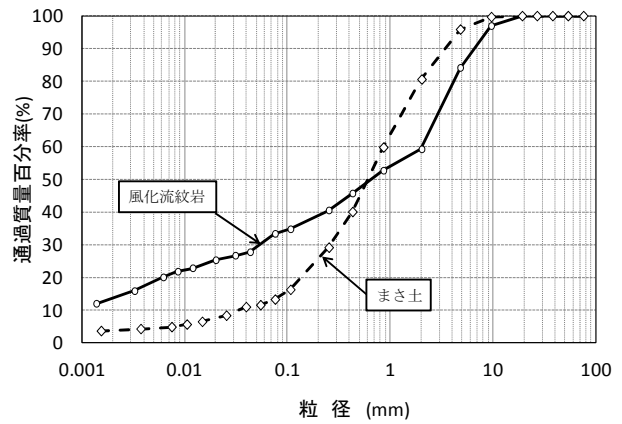


図-14 まさ土と風化流紋岩の粒度曲線

ここに、

ϕ_d : 見かけの内部摩擦角 (°)

c_d : 見かけの粘着力 (kN/m²)

S_r : 飽和度 (%)

q_{d5} : 土被り圧 5kPa における貫入抵抗値 (MPa)

q_d : 貫入抵抗値 (MPa)

γ_t : 土の単位体積重量 (kN/m³)

z : 深さ (m)

図-9中の地点4における貫入試験の結果から、式(3)、(4)を用いて粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を推定する。貫入試験実施と同時にやったチューブサンプリングから原位置の飽和度 S_r および間隙比 e を求めたところ、 $S_r = 48\%$ 、 $e = 1.42$ であった。図-13に式(3)、(4)を用いて推定した粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を示す。また、図中には、一面せん断試験から得られた式(1)、(2)による結果も載せている。推定値のグラフにバラつきがあるが、土田らは下限値を推定値とするとしている²⁾³⁾⁴⁾。粘着力に関しては約 10kN/m²程度の過小評価、内部摩擦角に関してはほぼ差は見られないが、約 1°程度過大評価している。式(3)、(4)の推定式は、貫入抵抗値と飽和度の関数であるが、地質の違いからこのような誤差が発生したと考えられる。まさ土と風化流紋岩の違いとして、図-14に示す粒度曲線のように、

風化流紋岩の細粒分含有率の方が高い点が挙げられる。細粒分が多いために、粘着力が過小評価されたのではないかと推測される。

4.2 透水係数

図-9 中の青い点で深度 30cm の不攪乱試料を採取し、変水位透水試験を行った。採取した試料は、崩壊部上部および下部の風化流紋岩、崩壊下部に存在する黒ぼくの3種類である。採取した試料は、完全飽和状態に近づけるため、脱気水を満たした水浸減圧容器内に入れ、真空ポンプを用いて減圧していき、試料内の空気を排除した。また、黒ぼく層においては、サンプル内に大きな空隙が確認され、この空隙が水みちとなり、透水係数が大きくなる可能性が考えられた。そのため、同じ間隙比の再構成試料を作成し、同様に変水位透水試験を実施した。

変水位透水試験は、1つのサンプルに対し5回ずつ行い、5回の平均値をそのサンプルの透水係数とした。図-15に間隙比と透水係数の関係を示す。黒ぼくの透水係数が最も小さく、風化流紋岩の試料に比べ、約1/3~1/5程度であった。黒ぼく層の不攪乱試料と再構成試料を比較すると、再構成試料の透水係数は不攪乱試料に比べ、同等の間隙比にもかかわらず、約1/4~1/5程度となっている。このことから、黒ぼく層中に存在する間隙の形状・分布の不均一性、堆積構造の違いが地盤の透水性に寄与していることが考えられる。

5. 考察

降雨の状況や地層の分布を考慮し、本論で取り上げた平行斜面中腹の崩壊のメカニズムについて考察する。平行斜面崩壊地の地層分布の特徴は、図-10に示したように、風化流紋岩層の上に、崩壊部中腹から下部にかけ、黒ぼく層が徐々に厚く存在していることである。黒ぼく層の透水係数は、風化流紋岩層の透水係数に比べ約1/3~1/5程度であり、透水性が低いことがわかる。また、先行降雨により飽和度の高まっていた地盤状態で、集中豪雨が発生したことにより、地盤内に地下水位が形成されやすい状態であったと考えられる。まず、形成された地下水位は基盤より上昇していく。次に、地下水位が黒ぼく層の存在する位置まで上昇すると、黒ぼく層が地下水の流下を妨げ、すぐ上流の風化流紋岩層の地下水位が局所的に上昇すると考えられる。そのため、図-11に示すような斜面中腹のすべり面で崩壊が発生し、その崩壊土砂は水分を多量に含んでいるため流動性が高く、下部の地盤を侵食することなく流下していったと考えられる。

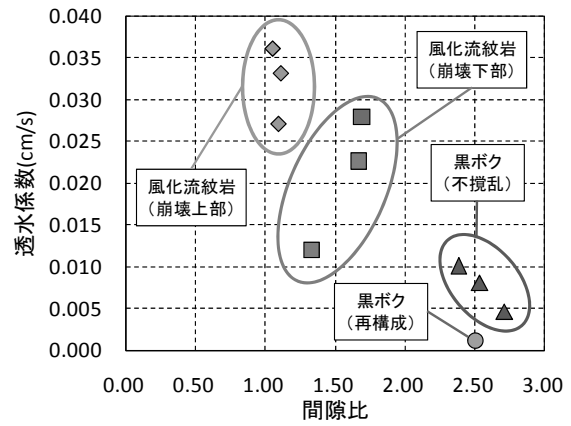


図-15 各試料の間隙比と透水係数の関係

6. 結論

2010年7月16日に広島県庄原市で発生した同時多発的な土砂災害において、多数確認された平行斜面中腹の崩壊について調査を行い、以下のことがわかった。

- 1) 7月16日15時~18時の3時間において大戸で173mm、川北で125mmの降雨量が記録されたが、周辺の雨量計で100mmを超えた記録はなく、大戸や川北を中心に、ごく狭い範囲で集中豪雨が発生したと考えられる。
- 2) 平行斜面中腹の崩壊地では、崩壊上部は風化流紋岩層のみの層であるが、崩壊下部では黒ぼく層が確認された。崩壊地周辺の未崩壊地において軽量動的コーン貫入試験を実施することにより、崩壊地中腹から下部にかけて、黒ぼく層が徐々に厚く存在していたことがわかった。
- 3) 風化流紋岩層の粘着力は、飽和度が高いほど小さい傾向が明確に現れている。飽和度が高いと砂粒子間に働くサクションが消失するためと考えられる。また、間隙比が大きくとやや小さくなる傾向にある。内部摩擦角についても同様の傾向にあるが、粘着力に比べてその依存度は極めて小さい。
- 4) 黒ぼくの透水係数は風化流紋岩の試料に比べ、約1/3~1/5程度であった。黒ぼく層の不攪乱試料と再構成試料を比較すると、再構成試料の透水係数は不攪乱試料に比べ、同等の間隙比にもかかわらず、約1/4~1/5程度だった。このことから、黒ぼく層中に存在する間隙の形状・分布の不均一性が地盤の透水性に寄与していることが考えられる。
- 5) 斜面中腹から下部にかけて存在する黒ぼく層が地下水の流下を妨げ、すぐ上流の風化流紋岩層の地下水位が局所的に上昇すると考えられる。そのため、斜面中腹のみで崩壊が発生し、その崩壊土砂は水分を多量に含んでいるため流動性が高く、下部の地盤を侵食することなく流下していったと考えられる。

参考文献

- 1) 土田孝, 武田吉充, 小川紀一郎, 中井真司 : 2010 年 7 月 16 日の豪雨による広島県庄原市土砂災害調査速報, 自然災害科学, Vol.29, No-2, pp.245-257, 2010.
- 2) 北原曜・寺嶋智巳・中井裕一郎 : 側方浸透流量に占めるパイプ流量の割合, 日本森林学会誌, Vol.76, No.1, pp.10-17, 1994.
- 3) 内田太郎・小杉賢一朗・大手信人・水山高久 : パイプ流が斜面安定に与える影響, 水文・水資源学会誌, Vol.9, No.4, pp.330-339, 1996.
- 4) Athapaththu A.M.R.G., Tsuchida, T., and Suga, K., and Kano, S., : A Lightweight Dynamic Cone Penetrometer for Evaluation of Natural Masado Slopes, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp. 403-416, 2007.
- 5) Athapaththu AMRG, 土田孝, 菅和暁 : 軽量動的コーン貫入試験によるまさ土斜面地盤の強度評価と自然斜面の危険度評価への適用, 地盤工学会誌, Vol.55, No.6, pp. 27-29, 2007.
- 6) Athapaththu A.M.R.G., Tsuchida, T., Suga, K., Nakai, S and Takeuchi J : Evaluation of in-situ strength of Masado slopes, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp. 848-861, 2007.

(2011 年 6 月 27 日 受付)

