7. 強降雨による斜面崩壊調査と安定解析に基づく施工法についての考察

吳工業高等専門学校 吳工業高等専門学校 吳工業高等専門学校 ○ 岡本 有希加 重松 尚久 小堀 慈久

1. はじめに

瀬戸内海沿岸部では「風化花崗岩」,通常「まさ土」と言われる特殊土が広く分布している。広島県の沿岸部も大部分が花崗岩地帯であり,雨量が比較的少ないために,深層風化を受けたまま浸食されずに堆積残留したところが多い。¹⁾このようなまさ土地盤では,梅雨の長雨,台風時の集中豪雨により,地滑りや崖崩れが毎年多数発生している。近年,集中豪雨の頻度や降水量が変化してきており,降雨時の土砂災害が多く,予測も難しいことが現状である。

本研究では、2010年7月豪雨による大規模な表層斜面崩壊が発生した広島県庄原市の場合と、2010年3月降雨による広島県坂町小屋浦地区斜面の岩盤崩壊について現場調査及び、物理的試験、力学的試験から降雨時の崩壊地の力学的特性を検討することで、近年のまさ土斜面崩壊の特性とその土質性状を比較検討し、今後の地盤災害防止対策と施工法を考察する。

2. 斜面崩壊のメカニズム

表層に降雨が浸透し、地表面は乾燥地盤から湿 潤地盤に変化していく。この時土中に土粒子間力 が働き、いわゆるサクション(負圧)が発生し、 降雨量とともに一時的にサクションは上昇する。 さらに降雨が増すと不飽和土からの飽和状態へと 移り、サクション(負圧)は減少する。このサク ションは土質の強度定数の粘着力の働きを示す。 これは飽和度により増減するため見掛けの粘着力 とも言われる。さらに降雨浸透が続くとサクショ ンは減少し、地盤は飽和土となる。また、降雨浸 透が進むと地下水位が上昇し, 間隙水圧が発生す る。傾斜面の土粒中を移動し細粒分を流下させな がらさらに真の粘着力 c を奪う。地下水位が上昇 し土粒子に浮力が働き、土粒子のかみ合わせによ る摩擦力を低下させる。したがってせん断抵抗力 が消失し,有効応力が低下し,粘着力 c,内部摩擦 角φの強度がなくなり同時に斜面の地盤の自重が 降雨により増加し、斜面におけるせん断力のつり 合いが崩れ、斜面崩壊が発生する。これが斜面崩 壊のメカニズムである。

3. 調査対象地域

3.1 広島県庄原市の場合

(1) 災害状況

写真-1 は庄原市の表層災害の状況である。2010年7月16日の夕方, 広島県庄原市の川北町篠堂地区において3時間で173mm(広島県大戸雨量計)の集中豪雨によって大規模な土砂災害が発生し, 住宅, 道路, 河川, 農地に甚大な被害をもたらした。5km四方の範囲で200箇所以上の斜面がほぼ同時に崩壊するという過去に例をみない集中的な土砂災害であった。

3.2 広島県坂町小屋浦地区の場合

(1) 災害状況

写真-2 は坂町小屋浦地区の岩盤風化状況である。 2010年2月24日から3月2日の7日間総降雨量は72mmであった。3月3日トンネル上部の岩盤が崩壊した。なお2日,3日の降雨は測定されていない。崩壊の原因として風化を受けやすい花崗岩であること、岩盤亀裂部の粘土化した細粒土に降



写真-1 庄原市災害状況

雨が浸透し岩盤自重等のせん断力が働き崩壊に至ったと考えられる。また現場調査で過去の防災工 跡が見られた。

4. 現場調査と試料採取及び試料形成

三軸圧縮試験に用いるまさ土の不撹乱試料の採取方法は、表面の腐蝕土の部分を取り除きまさ土層を露出させ、シンウォール・チューブを利用したサンプリング・リングで採取した。採取寸法は径7cm,高さ15cmで一つの現場で3本ハンドトリミング法により採取した。持ち帰った試料は冷凍庫(-30℃)に12~24時間凍結保存した。成形時には特に端面の成形は注意深く行った。成形は径5cm,高さ10cmの標準試料寸法とした。室内一面せん断試験の試料は同様に不撹乱試料としトリミングリングを静かに押し込みながら径6cm,高さ2cmの成形試料が取れるような土塊を採取した。

5. 室内試験方法

基本的には JIS 規格に基づき試験を行ったが,条件を設定した試験については詳細を明記する。2)

5.1 物理的試験

(1) 粒度分析試験

JIS A 1204 に基づき行った。

(2) 密度試験

JIS A 1202 に基づき行ったが,設定として各試料5 つずつ行い土粒子密度の平均値を測定した。また,煮沸時間は1時間とした。

(3) 細粒分含有率試験

JIS A 1223 に基づき行った。

(4) 透水試験

JIS A 1218に基づき変水位透水試験を行った。

5.2 力学的試験

(1) 三軸圧縮試験

JGS 0520~JGS 0524 に基づき行ったが、採取試料や設定した拘束圧飽和時間について以下に記す。現場で採取した撹乱土、不撹乱土を用いる。撹乱土は,広島県庄原市上部,下部と坂町小屋浦上部,



写真-2 坂町小屋浦地区災害状況

下部で採取した試料を用いる。不撹乱土は広島県 庄原市上部,下部と坂町小屋浦上部で採取した試 料を用いる。撹乱土は締め固め法を用いて試料作 成する。不撹乱土は現場で採取した試料を冷凍保 存後,試料作成する。拘束圧は,まさ土の表層厚 により,40kN/m²,80kN/m²,120kN/m² とし坂町小屋 浦下部では拘束圧 100kN/m²,200kN/m²,300kN/m² と した。なお,飽和試料とする場合は 6 時間排水を 行い,不飽和試料とする場合は 20 分の給排水を行った。また,試料内の間隙水圧を荷重として作用 させないために、軸速度は 0.16mm/min としひずみ が 15%になるまで,圧縮を続けた。

6. 結果と考察

6.1 物理的試験

(1) 粒度分析試験

図-1 に庄原上部下部の粒度分布加積曲線を示す。 上部下部ともに大きな相違は見られなかった。 50%粒径は 0.1~0.2mm 径に見られた。

図-2 は坂町小屋浦上部下部の粒度分布加積曲線を示す。坂町小屋浦上部は、平均的な粒径であり、50%粒径は0.7mm、下部は、50%粒径は3mmであり、礫土となったことがわかる。

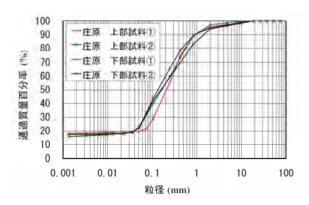


図-1 粒径加積曲線 庄原市

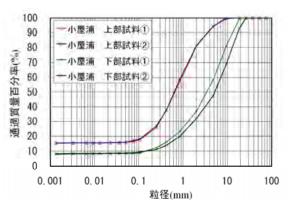


図-2 粒径加積曲線 坂町小屋浦

(2) 密度試験

表-1 に各現場のまさ土の密度を比較する。一般的に砂質土の ps は 2.65g/cm³ である。坂町小屋浦上部下部は 2.6g/cm³ 前後である。一方,庄原上部下部は, 2.5g/cm³ で低い密度で細粒分が多いことがわかった。地質的に風化を受けやすい地層と考えられる。

(3) 細粒分含有率試験

表-2 に細粒分含有率試験の結果を示す。庄原下部の試料が16~23%の低い値となった。庄原上部は、55%の細粒分が含まれており、シルト質に近い土であるとわかる。坂町小屋浦上部は60%となり、風化堆積物が多いことがわかる。また、値が若干大きいのは採取時のバラツキが考えられる。坂町小屋浦下部は、粗骨材を破砕し、粗砂としたため細粒分が4%と低い値となった。

(4) 透水試験

表-3 に透水試験の結果を示す。全ての値で微細砂であることを示している。

6.2 力学的試験

(1) 三軸圧縮試験

供試体は不撹乱土の間隙比に調整し突き固め法で成形した。飽和度は $Sr=90\sim93\%$ 程度となった。これを飽和土とし,他の試料についても同様に行った。図-3,図-4 にモール円から幾何学的に破壊式を得た。図-3 の庄原市上部の撹乱土では,内部摩擦角 $\phi=29^\circ$,粘着力 $c=14kN/m^2$ を得た。同様に図-4 の庄原市上部の不撹乱土では内部摩擦角 $\phi=18.5^\circ$,粘着力 $c=26kN/m^2$ となり, ϕ は低い値となり c が増加している。この撹乱土と不撹乱土の相違として,不撹乱土は土粒子間の構造に乱れがないが風化が進行していると構造自体がもろくなっている事がある。この庄原市の場合も不撹乱土の

表-1 密度比較表

試料名	標準砂	庄原上部	庄原下部	小屋浦上部	小屋浦下部
密度 ρ s(g/cm)	2.645	2.522	2.532	2.656	2.589

表-2 細粒分含有率試験

試料名	庄原上部	庄原下部	小屋浦上部	小屋浦下部
細粒分含有率 P(%)	55.12	23.19	60.76	4.21

表-3 透水試験

現場名称	透水係数	
	k ₁₅ (cm/s)	
庄原市上部	7.97 × 10 ⁻⁴	
庄原市下部	5.48 × 10 ⁻⁴	
坂町小屋浦上部	5.83 × 10 ⁻⁴	

粘着力 c が大きいことから、強風化まさ土と言え る。表-4 の内部摩擦角と粘着力の比較表より、庄 原市の下部試料の**b**と c でも同様に強風化を受け、 撹乱土で $\phi=26^{\circ}$, $c=18 \text{ k N/m}^2$, 不撹乱土で $\phi=17.5^{\circ}$, c=30kN/m²となった。一方, 坂町小屋浦岩盤崩壊 地では撹乱土は $\phi=35^\circ$, $c=1kN/m^2$, 不撹乱土は ϕ $=31^{\circ}$, $c=0kN/m^{2}$ となり弱風化まさ土である事が わかる。崩壊した岩石を物理的に破砕した粗粒土 でせん断試験を行った。結果、 $\phi=38^{\circ}$ 、 $c=5kN/m^2$ となり大きな強度定数を得た。未風化試料の強度 と言える。坂町小屋浦岩盤崩壊の現地調査で深層 に風化進行が推測されるのは次の知見を得たから である。①崩壊地上部の岩盤調査で、岩壁に縦長 の亀裂が多数見られたこと。②亀裂幅が 1~2mm あり、細粒土及びシルト質土が間隙を埋め、植物 根が見られた。③斜面下部の岩盤に亀裂が多数見 られ強風化により容易に剥離欠落した。

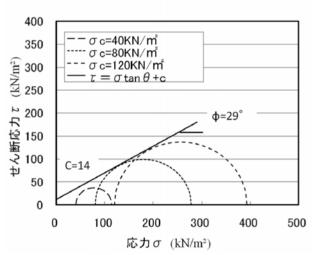


図-3 庄原市上部撹乱飽和のモール円による破壊線

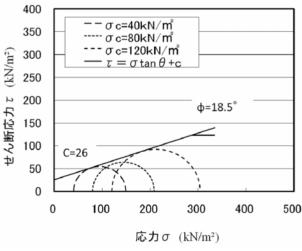


図-4 庄原市上部不撹乱飽和のモール円による破壊線

7. 安全率の検討

今回の研究と施工法の関係として、降雨による斜面崩壊現場の調査と試料採集を行い、現地の状況と室内土質試験により土の現在の強度を調べる。強度が不足であれば、地盤改良等により安全率が十分得られるように設計及び施工する事となる。設計で用いる内部摩擦角ゆや粘着力cは現場試料を力学的試験及び物理的試験により求める。表-5は三軸圧縮試験の数値を用いた不飽和土斜面の安全率と飽和土斜面の安全率である。

式(1)は、無限斜面の飽和土の安全率 Fs を示す。

$$F_s = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_{sat}} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \cdot \dots (1)$$

φ: 土の内部摩擦角(°)

α:斜面勾配(°)

γ_{sub} 土の水中単位体積重量 γ_{sat}: 土の飽和単位体積重量

表-4 を基に計算した各現場の安全率を表-5 に示す。全ての現場において安全側の値を示している。しかしながら、安全率が十分であっても崩壊が起きた。崩壊が発生した原因として、異常な降雨量とかなりの風化進行が考えられる。これは、表-1 の密度比較表からも言える。坂町小屋浦は岩盤崩壊で表層も薄く、長期に渡り岩盤亀裂部に雨水が浸透し深い所まで亀裂に沿った風化が進行していたと考えられる。また過去に取り付けられた防災

表-4 内部摩擦力と粘着力の比較表

	三軸圧縮試験		
現場名称	内部摩擦角	粘着力	
	φ(°)	c(kN/m²)	
庄原上部 撹乱飽和	29	14	
庄原上部 撹乱不飽和	26	27	
庄原上部 不撹乱飽和	18.5	26	
庄原下部 撹乱飽和	26	18	
庄原下部 撹乱不飽和	27.5	12	
庄原下部 不撹乱飽和	17.5	30	
坂町小屋浦上部 撹乱飽和	35	1	
坂町小屋浦上部 撹乱不飽和	32.5	0	
坂町小屋浦上部 不撹乱飽和	31	0	
坂町小屋浦下部 撹乱飽和	38	5	

表-5 各現場における安全率

現場名称	安全率Fs	
庄原上 撹乱飽和	1.73	
庄原上 撹乱不飽和	6.52	
庄原上 不撹乱飽和	1.21	
庄原下 撹乱飽和	1.57	
庄原下 撹乱不飽和	6.69	
庄原下 不撹乱飽和	1.16	
坂町小屋浦上 撹乱飽和	1.56	
坂町小屋浦上 撹乱不飽和	1.02	
坂町小屋浦上 不撹乱飽和	1.40	
坂町小屋浦下 撹乱飽和	1.69	

ネットのアンカーが残っていたが、これは以前から崩壊しやすい脆い岩質であったと考えられる。

8. 斜面安定施工における防災対策

- (1) 土構造物は降雨等の水による崩壊が多い。斜面上部(法肩),斜面下部(法尻)に排水路,雨水好を設ける。また,施工した斜面表面には排水パイプを各高さに数ヶ所設ける。パイプロが草類で詰まらないよう管理や排水パイプの裏めに砕石による集水部を設けるなど排水を十分行う事を考慮する必要がある。
- (2) アンカーによる安定施工として, 急傾斜地で地 山の基岩に強度があれば, アースアンカーで表 層部鉄筋コンクリート井桁を打ち止める。また 排水パイプも施工する。
- (3) 地盤の不安定な斜面の施工として、シルト質等で地滑り防止を考慮する場合では、斜面下部(法尻)に鋼矢板(シートパイル)を砂礫層まで打ち、地滑りに対し抑止工を施工する。また、斜面内に数ヶ所に集水層及び集水井戸を設け排水し、地下水位を低下させるために抑制工を施工する。
- (4) 基岩の強度の確保として,近年,岩盤の深層崩壊が課題となっている。長期間の地殻変動,今日の降雨強度の上昇等が考えられる。今後,岩盤深層部の強度を考慮して,斜面の安定設計,施工をしていく必要がある。

9. まとめ

本研究では2010年3月,7月の集中豪雨災害から 庄原市川北町篠堂地区斜面崩壊と、坂町小屋浦 地区岩盤斜面の調査と室内土質試験から次の事 柄が得られた。

- (1) 庄原市表層斜面崩壊土は、細粒分の多い強風化 まさ土であること、またシルト分が多く風化が 進行していると見られる。
- (2) 坂町小屋浦岩盤崩壊調査で岩盤が物理的,化学的,地質学的に強風化が見られると同時に深層に風化進行が見られた。岩盤中の亀裂に残る細粒土の雨水浸透が崩壊原因と見られる。
- (3) 近年の異常な降雨により、安全率が十分であっても崩壊が起きることがあると思われる。
- (4) 斜面施工には、斜面内外の排水の管理を十分行う必要がある。

参考文献

- 1) 小堀慈久:まさ土地盤における原位置力学試験と降雨による斜面災害の時系列特性に関する研究,愛媛大学学位請求論文,pp43-59,1997
- 2) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改 訂版),pp54-60,61-68,69-92,334-347,441-562,563-600,2000