

中国三峡ダム周辺における斜面崩壊 と構成岩石の力学特性について

Landslides and rock mechanical properties in the Three Gorges area

高 秀君*・大久保誠介**・福井勝則***

Xiujun GAO, Seisuke OKUBO and Katsunori FUKUI

More than 1.2 million residents have to resettle to the safe sites, due to construction of the Three Gorges Dam. However there are about 283 large scale landslides distributed in the Three Gorges area, of which over 90% occurred in the Triassic and Jurassic strata. In this paper, the mechanical properties of sandstone and mudstone, which are widely distributed in the landslide area, are investigated by laboratory test in dry and wet condition. It is shown that in wet condition the rock strength of both sandstone and mudstone is about 50% lower than that in the dry condition. And the rock strength of sandstone is very different in the upper and lower part even in the dry condition.

Key Words: three gorges area, landslide, rock mechanical properties, mudstone, sandstone

1. はじめに

中国長江に建設中の三峡ダムは、洪水調節、発電、航路改善を目的に行われる世界最大級の重力式ダムである。ダム建設工事は 1993 年に始まり、2009 年の完成を目指し三期に分けて実施中である。しかし、三峡ダムプロジェクトの推進には、環境保全上の問題も山積している。その中でも、斜面安定問題についてみると、三斗坪から江津まで背水距離 690km の三峡ダム湛水池の湖岸において、283 箇所の地すべりおよび斜面崩壊が存在する¹⁾。このうち、移動体の体積が数千万ないし一億 m^3 の大規模地すべり発生事例が全体の 80% 以上にのぼり¹⁾、また、2003 年 7 月発生の千将坪地すべり（湖北省秭帰、体積約 2400 万 m^3 ）など、最近でも新たな地すべりが発生している。この地区は人口も比較的多く、しかも斜面が重要な交通路である長江に隣接しているので、大規模な地すべりや崩壊をもたらす災害は極めて深刻な影響を与える可能性がある。このため、120 万人を超える住民の移住地の選定等に当たり、過去の地すべりの発生履歴を正しく把握し、地すべり予知、防止対策を緊急に検討する必要がある。

本研究では、今後予想される地すべり対策の一助となることを目的として、崩壊形態と力学特性の関連の解明を目指し、資料収集、現地調査、試料採取および室内試験を行っている。以下、三峡ダム地域における地すべりの構成岩石の特性と地質災害の分布、地すべりの概要と寸法効果に関する調査検討結果を述べる。

2. 三峡地区の概要

2.1 地質、構造、地形

三峡ダムサイトは、良好な花崗岩の岩盤上に位置するのに対し、三峡ダムサイト以外の地区では、砂岩、泥岩、

* 東京大学大学院博士課程 工学系研究科地球システム工学専攻

** 正会員 工学博士 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

*** 正会員 工学博士 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

砂泥互層、頁岩（石炭を含む）、ジュラ紀と三畳紀上統の地層が分布している³⁾。長江周辺の90%以上の地すべりは、ジュラ紀と三畳紀の地層に発生している。ジュラ紀の地層は砂質泥岩、砂岩、赤色砂質泥岩、炭質頁岩及び石炭層である。三畳紀地層では石灰岩、ドロマイトが多い。中期三畳紀の巴東層は、長江兩岸に広がっており、地すべりが多発する地層である。巴東層では赤色泥岩、泥質石灰岩、泥質砂岩、粉砂質泥岩が互層しているところが多い。

三峡地区の河谷では、地質構造、第四紀以後の構造運動の影響が地質図からはっきり認められ、奉節を境に二種類の地形単元に分けられる。大規模な地すべりに大きな影響がある断層は香溪断層、江黔断層、建始断層、巫山断層、齐岳山断層、方斗山断層、及び長寿断層である²⁾。

長江水面の標高は65m程度、両側山頂の標高は約1,000-2,000mである。ダム建設前の長江本流の川幅は150-300mで、兩岸斜面の勾配は、山頂付近では急なところがある（約75°）が、30-50°の場合が多い。

2.2 降雨、水位

三峡地区では5-9月の降雨量が年降雨量の70%を占める。気象資料によると、三峡地区の中で①忠県-雲陽、②秭帰-宜昌及び③重慶長寿の3地域は特に雨が多い。①では最大降雨量243mm/日、最大連続降雨量は488mm、②では最大193mm/日に達し、頻度は毎年4回程度であり、③では最大196mm/日、最大連続降雨は293mmになる。三峡地区では大部分の洪水は7-8月の間に発生する。

長江の最大洪水と渇水期の水位差は、年と場所により異なるが20mから72mに及ぶ。ダム建設前、最大水位上昇速度は6.73m/日、最大水位低下速度は3.4m/日に達した。支流の水位上昇速度、下降速度は長江本流より速い。三峡ダムの完成後には、貯水と発電のため最高水位は標高175mとなり、かつ洪水調節のため水位を標高145mから175mの間で変動させることになっている。長江の川幅も平均で約800mになる。水位と水位変化速度は長江兩岸地区の地下水位と動水圧を変化させ、両側斜面の安定性に大きな影響を引き起こすと考えられる。

3. 構成岩石の特性

3.1 試料

水位上昇時の岩盤強度の変化についてのパラメータを得ることを目的に、室内試験を行うこととした。調査地・湖北省巴東で、巴東層群の砂岩および泥岩を、縦約15cm、横約20cm、高さ約20cmの試料として採取した。ボール盤を改良した装置を用い、岩石試料を直径10mmにてボーリングした。次に、ボーリングコアをバンドソーで長さ約24mmに切り、平面研削盤で端面を研磨して、直径10mm、長さ20mmの円柱形小型試験片を作成した。泥岩の色は、岩石試料の状態、ボーリングコアの状態とも赤色であった。一方、砂岩の色は、岩石試料の状態では泥岩より薄い赤色であったが、長さ約15cmのボーリングコアの観察では、上部が淡灰色、下部が赤色を呈していることが認められた(写真-1)。そこで、赤色泥岩、淡灰色砂岩、赤色砂岩の3種類の試験片を作成し、試験を行った。

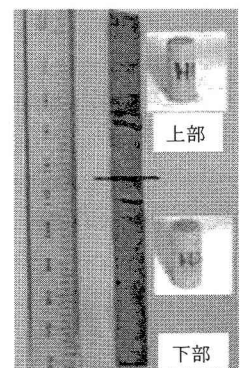


写真-1 砂岩のボーリングコア及び小片試験片

3.2 物性

(1) 空隙率

一軸圧縮試験に先立ち、岩石の空隙率を求めた。試験片作成後、乾燥器で105℃、24時間試験片を乾燥させ、デシケータに入れ真空ポンプを用い24時間脱気した。24時間脱気したあと、試験片を置いているデシケータに蒸留水を注ぎ一日以上浸水させた。浸水前後の重量差から空隙率を計算した。各岩石の値を表-1に示した。空隙率は砂岩の上部と下部で10%以上の差がある。泥岩の空

隙率は 4.37%で、砂岩の下部の値に近い。

(2)岩石の強度

①気乾状態と浸水状態における一軸圧縮強度

気乾状態における一軸圧縮強度は、試験片作成後、2週間以上、温度・湿度の管理された試験室内で自然乾燥させ、強度を測定したものである。浸水状態における一軸圧縮強度は、空隙率測定において浸水させた試料を、そのまま用いて強度を測定したものである。一軸圧縮試験の載荷装置として容量 500kN のサーボ試験機を用いて、荷重は歪ゲージ式ロードセルで、変位は試験機に設置された差動変圧器で測定した。試験は定歪速度 $10^{-5}/s$ のもとで行った。

表-1 に示したように、気乾状態では、砂岩下部の強度が最も高く、砂岩上部の強度は最も低いことが分かった。砂岩と泥岩のいずれも、浸水状態では強度が気乾状態より約 50%低下した。3種類の岩石を比較すると、空隙率が高い岩石では、気乾状態でも強度が低く、かつ浸水状態では強度低下が大きい傾向が見られる。これは、岩石/土質力学で一般的な、含水比の増大に伴い強度が低下する性質に一致している⁹⁾。

表 - 1 三峡ダム地区巴東層群砂岩、泥岩試料の空隙率と一軸圧縮強度

岩種	試料記号	比重(室温) (g/cm ³)	比重(湿潤) (g/cm ³)	空隙率 (%)	一軸圧縮強度 (MPa)	強度変化率 (%)
砂岩	上部 H17	2.234			43.2	
	H13*	2.286	2.420	14.9	18.0	58.3
	下部 H24	2.613			128	
	H6*	2.631	2.650	3.12	75.8	41.0
泥岩	R2	2.689			103	
	R21*	2.682	2.715	4.37	52.5	48.9

* 湿潤状態； 他は気乾状態で試験を行った

② 三軸圧縮実験

三軸圧縮試験は、一軸圧縮試験と同じ載荷装置に大久保他⁷⁾が開発した可視化ベッセルを用いて、周圧 3MPa および 10MPa で行った。試験は定歪速度 $10^{-5}/s$ である。3種類の岩石の応力-歪曲線を図-1, 2, 3 に、ヤング率および強度を表-2 に示す。砂岩上部のヤング率は砂岩下部の値より約 58%小さい。泥岩のヤング率は砂岩下部の値より 27%小さい。一軸圧縮および三軸圧縮試験の結果により、強度破壊点での最大主応力 σ_1 と最小主応力(周圧) σ_3 の関係を図-4 に示した。Coulomb の破壊標準⁹⁾である、式 (1) に基いて C 、 ϕ を求めた。

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + 2C \tan\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

ただし、 ϕ は内部摩擦角、 C は粘着力である。

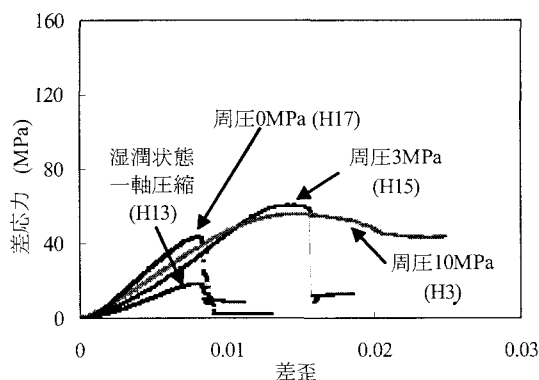


図-1 巴東層群砂岩上部の応力-歪曲線

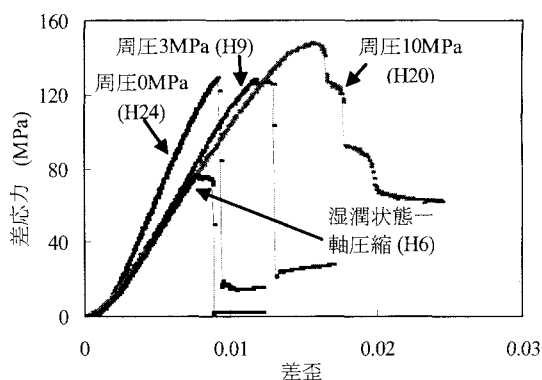


図-2 巴東層群砂岩下部の応力-歪曲線

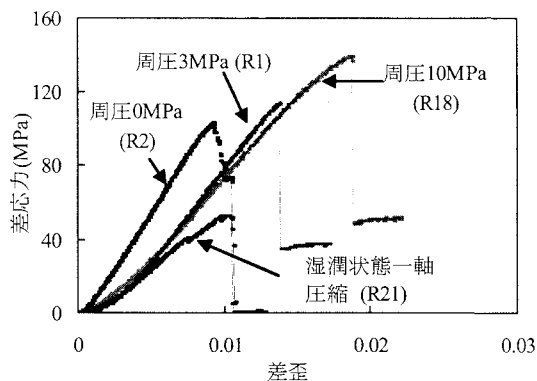


図-3 巴東層群赤色泥岩の応力-歪曲線

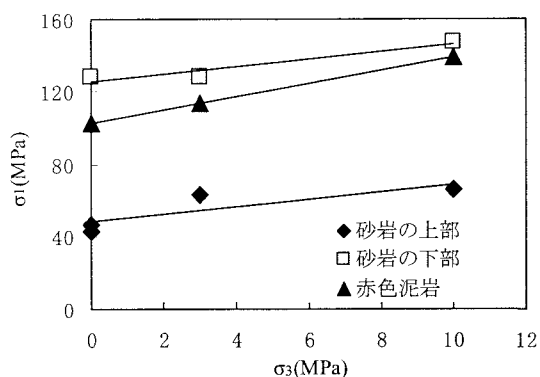


図-4 強度破壊点での最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3

表-2 三峡ダム地区巴東層群砂岩、泥岩試料の圧縮試験結果

地層	岩種	試料 記号	直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)	σ_3 (周圧) (MPa)	ヤング率 (GPa)	σ_1 (σ_3 +強度) (MPa)	ϕ, C (MPa)
巴東 県 三 疊 紀 巴 東 層 群	砂 岩	上 部	H13*	9.40	20.35	3.228	0	3.09	$\phi=19.8^\circ$ $C=16.9$
			H17	9.50	20.35	3.222	0	7.07	
			H15	9.40	20.40	3.181	3	5.93	
			H3	9.40	20.30	3.237	10	5.36	
		下 部	H6*	9.60	20.35	3.875	0	12.7	$\phi=30.4^\circ$ $C=36.0$
			H24	9.60	20.50	3.878	0	18.4	
			H9	9.60	20.40	3.812	3	13.4	
			H20	9.55	20.00	3.696	10	12.0	
	赤 色 泥 岩	R21*	9.70	20.15	3.993	0	7.36	52.5	$\phi=40.0^\circ$ $C=23.9$
		R2	9.70	20.70	4.113	0	12.6	102.8	
		R1	9.70	20.70	4.072	3	10.2	116.3	
		R18	9.70	19.95	3.876	10	9.12	148.6	

* 湿潤状態； 他は気乾状態で試験を行った

求めた結果は表-2に示したように、砂岩の内部摩擦角は上部の方が下部より約 10° 低下する。強度は上部の方が下部に比べ半分以下である。砂岩下部の強度は泥岩の値より大きい、内部摩擦角は泥岩の値より小さい。

4. 三峡ダム地区斜面崩壊の概要と寸法効果

三峡ダム地区の地すべりでは、土質の斜面もあるが、大規模なものは岩盤斜面が多い。そこで、崩壊土塊の流動性に関する Scheidegger の研究⁴⁾の方法により、岩盤斜面で大規模な地すべりに限って、見通し角度と規模の関係を整理した。

Scheidegger は、大規模崩壊を対象として統計的に崩壊土量(V)と‘落下高さ(H)/水平距離(L)’との関係を調べ、大規模であるほど効率よくすべるとしている。その原因として、①滑り面における鉛直応力が高いこと、②高速で滑るので温度が上昇しやすいこと、などにより、摩擦係数が低下することが挙げられているが詳しいところはわかっていない。なお、H/Lは等価摩擦係数 f あるいは斜面の見通し角度(α)と呼ばれることもある。

4.1 三峡ダム地区大規模地すべりの寸法効果

三峡ダム地区の大規模地すべり・崩壊 21箇所(図-5)について、崩壊斜面移動の距離 l と f の関係を図-6に、崩壊土量 V と f との関係を図-7に示す。 f が小さいほど、崩壊斜面移動の距離が長くなる傾向にある。図-6、図-7

によれば、基本的に崩壊土量が大
きいほど、遠くまで流下する可
能性が高いといえる。ただし長江流
域では、斜面下部に広い川(長江)
があるので、崩壊土砂は滑った後
に川に埋没してしまい、
Scheidegger の研究対象に比べ、
移動距離が短くなる可能性はあ
る。

4.2 低角度で発生する地すべりの 分析

三峡地区では流れ盤斜面が多く
分布しており、表-3 に示した 21
箇所の大規模地すべりに限って
も、半分以上が流れ盤地すべりで
ある。三峡ダム地区では硬軟岩石
互層の流れ盤地すべりが多く、軟
層は主に強度が低い泥岩、頁岩、
石炭層及び地層間の構造面から
なる。下期ジュラ紀と中期三疊紀
の泥岩、石灰岩は砂岩と互層をな
しているの、弱面が地すべり面
と一致する斜面では、降雨浸透や
水位上昇により、地すべりが発生
しやすい条件にあると考えられ
る。泥岩と砂岩が互層となってい
る部分では、泥岩の一部が粘土化
しているのが認められる²⁾。また、
上期三疊紀地層は厚い砂岩に石
炭層を挟在していることが多く、
石炭層の強度が低いため、地すべ
りが発生しやすい。石炭層の大規
模な地すべりとして、新灘、鍊子
崖などがある。

砂岩・泥岩試料を用いた今回の試験では、同じ岩石でも強度が著しく低い層があることがわかった。また、一軸圧縮試験により浸水状態では強度が大幅に低下することが確認でき、三軸圧縮試験により、内部摩擦角は斜面の見通し角度に近いという結果を得た。

5. まとめ

三峡ダム地区では硬軟岩石互層の流れ盤地すべりが多く、基本的に崩壊土量が大

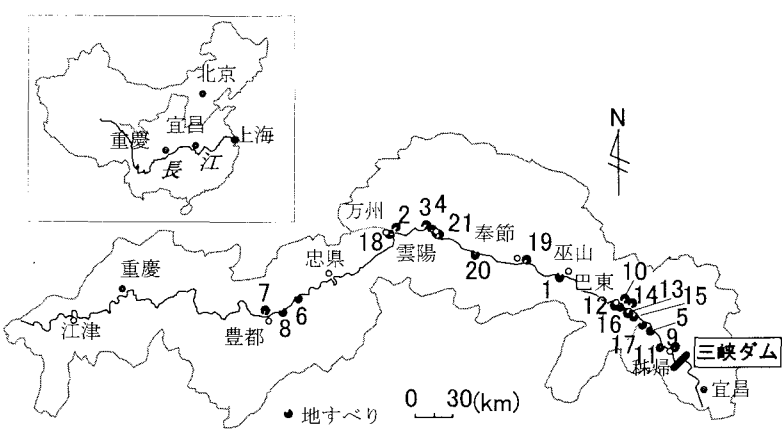


図-5 三峡ダム地区大規模地すべり分布(番号は表-3 の地すべりと対応する)

表-3 三峡ダム地区大規模地すべり諸元

No.	地すべり	長さ (m)	体積 (万m ³)	α (°)	$f = \tan \alpha$	地すべりの 形態
1	巫山・王家屋場	600	700	15	0.27	流れ盤
2	万州・呉家湾	—	66.22	20	0.36	再活動
3	雲陽・塞壩	450	1210	35	0.70	再活動
4	雲陽・五峰山	225	5	45	1.00	流れ盤
5	秭帰・淹鍋沙堤	1250	2300	17	0.31	流れ盤
6	豊都・楠竹地すべり	1750	1880	12	0.21	再活動
7	豊都・盧家坡	180	144	20	0.36	流れ盤
8	豊都・下楼梯	120	18	22	0.40	流れ盤
9	秭帰・新灘地すべり	2000	3000	23	0.42	流れ盤
10	巴東・黄蠟石	1050	4000	20	0.36	受け盤
11	秭帰・流来観	800	2600	35	0.70	受け盤
12	巴東・新城地すべり	1100	1540	25	0.47	流れ盤
13	秭帰・範家坪地すべり	1460	10900	21	0.38	流れ盤
14	巴東・大坪(柴湾)	460	530	35	0.70	受け盤
15	巴東・趙樹嶺	900-950	5000	27	0.51	流れ盤
16	巴東・黄土坡	1100	3500	25	0.47	流れ盤
17	秭帰・千将坪	1000	2400	14	0.25	流れ盤
18	万州・関塘口	500	1280	5	0.09	再活動
19	奉節・白衣庵	1400	3600	12	0.21	流れ盤
20	雲陽・故陵地すべり	1180	18900	13.3	0.24	流れ盤
21	雲陽・旧県坪地すべり	1740	5200	13	0.23	流れ盤

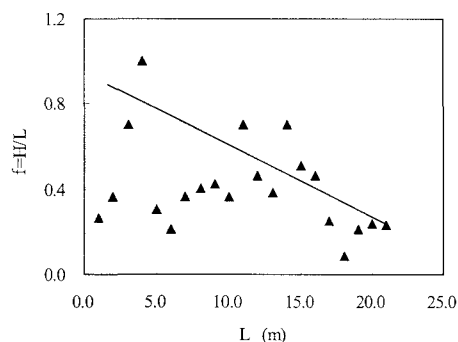


図-6 地すべり水平長さと見通し角度の関係

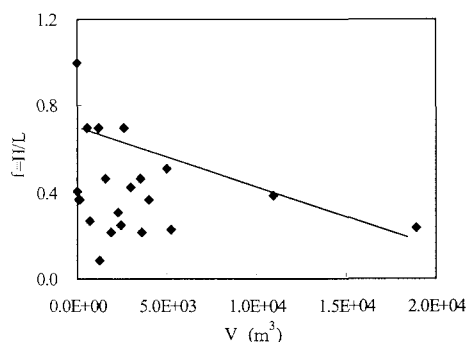


図-7 地すべりの崩壊土量と見通し角度の関係

傾向にある。崩壊形態と力学特性の関連を調べるため、岩石試料の空隙率、浸水前後の一軸圧縮強度、および三軸圧縮強度を調べた結果、岩石層の不均質性の影響で、同じ岩石でも強度が著しく低い部分があり、弱面になりうることがわかった。また、一軸圧縮試験により浸水状態では砂岩・泥岩とも強度が大幅に低下することが確認でき、三軸圧縮試験により、内部摩擦角は斜面の見通し角度にほぼ一致するという結果を得た。弱面を探知することにより、降雨浸透や水位上昇にまつわる地すべりが発生しやすい斜面を抽出することに途を開く分析結果であると考えられる。

大規模な地すべりの影響要素は内在と外在がある。内在の要素として、地質、地形、構造などがあり、外在の要素として降雨、人為的な活動などがある。ダム建設に伴うさらなる水位上昇と、本格運用に伴う水位変動の発生により、斜面が不安定となる状況がこれまで以上に増加すると予想されるので、調査対策の指針となるような詳細な特性値の実測は早急になされるべきである。

長江三峡地区では、これまでも地すべりと崩壊が多数生じてきた。大規模な地すべりや崩壊のもたらす災害は極めて深刻な影響を与える可能性がある。本研究の結果によれば、大規模であるほど、低角度の斜面でも地すべりが生ずる可能性があり、この結果を念頭においた対策が必要と考えられる。今後さらに資料分析、現地調査、力学試験を実施し、それらの結果を対策方法への提言としてまとめる予定である。

参考文献

- 1) Yin Yaopin: Migrant resettlement site and geological hazard in the Three Gorges area, 33, 2004
- 2) Wang Yao, et al.: Study on the formation and distribution of landslide geological hazard in the Three Gorges Reservoir area, The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 11(2), 24-29, 2000
- 3) 湖北省区域地質誌, 湖北省地質鉱産局, 北京, 地質出版社, 1990
- 4) Theodor H. Erismann & Gerhard Abele: Dynamics of rockslides and rockfalls, Springer, 145, 2001
- 5) 高橋博, 大八木規夫等編纂: 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, 東京, 117-124, 1986
- 6) 蔣宇静: 三峡ダムプロジェクトと湛水池周辺の地盤環境の評価監視システムの構築計画, 土と基礎, 46-8, 29-32, 1998
- 7) 大久保誠介他: 資源と素材, 118, 165-170, 2002
- 8) 大久保誠介他: トンネルと地下, 33, 45-50, 2002
- 9) 大西有三他: わかりやすい岩盤力学, 鹿島出版会, 東京, 53-56, 1984
- 10) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門(第3版), 東京大学出版会, 16-19, 1991
- 11) 羽柴公博他: 2004 資源・素材学会, 71-72, 2004
- 12) 高 秀君他: 2004 資源・素材学会, 107-108, 2004