

# 広島県庄原市土砂災害現地に見られた 土壌の膨潤性に関する実験的研究

上 森 弘 樹・海 堀 正 博

広島大学大学院総合科学研究科

## An experimental study on the swelling properties of soils gathered in the field of the Shobara disaster, Hiroshima Prefecture

Hiroki UEMORI and Masahiro KAIBORI

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

### Abstract

A lot of slope failures and debris flows occurred at Shobara on July 16, 2010. Some characteristic phenomena were seen by the course that the failure materials flowed down. In many places, surface soils were left without being eroded deeply, though debris materials passed on them. To clarify the cause, we have made some experiments with the soils of Shobara. From the analysis using the X-ray diffraction device, we found out that vermiculite with the swelling characteristic was mainly included. From the swelling check examination between 1000 hours, water more than the volume of initial void before the test was absorbed. Also, from the measuring of the swelling pressure, the maximum value of 9.68 kPa was recorded between 500 hours. These results suggest that the soils of Shobara remained in a kind of unsaturated condition in spite of heavy rainfall during 3 hours, therefore, they were not eroded deeply.

### 1 はじめに

広島県庄原市では、2010年7月16日の15時過ぎから集中豪雨に見舞われ、多数の斜面崩壊が発生した。発生した斜面崩壊の多くは、山の稜線近くの急傾斜地から、基盤岩の砂礫を含んだ褐色森林土壌の混合土壌層（以下、褐色土壌層と記す）が崩れて土石流化し、流路の谷筋を流れ下った。土石流が通過した場所では、基盤岩の砂礫を含ん

だクロボク土壌の混合土壌層（以下、黒色土壌層と記す）があまり侵食されていない状態で斜面に広く露出していた。この状態は、今回発生した土砂災害の中でも特徴的な現象の一つとして報告された（例えば、海堀ら、2010）。

筆者らは、この現象の要因として黒色土壌に焦点を当てて、黒色土壌の物理特性について調べた（上森ら、2011）。その結果、黒色土壌には吸水することで膨張する性質（膨潤性）がみられること

がわかった (写真1-1)。

白水 (1988) や伊藤 (1980) らは、土壌の膨潤は特殊な粘土鉱物が吸水過程で膨張するために発生すると報告し、地下ら (2008) は、膨潤性粘土鉱物のスメクタイト類を含んだ基岩や粘土層は、斜面災害との関連性がみられることを示唆している。

筆者らは、黒色土壌層があまり侵食されなかった現象も、膨潤性に関係があるのでないかと考えた。そこで、①土壌に含まれる粘土鉱物の分析、②土壌の吸水や膨潤の量を把握するための試験、③土壌の膨潤圧の測定を行い、考察を進めることにした。



写真1-1 庄原の黒色土壌の膨潤の一例  
吸水することによって黒色土壌が膨張し、容器からはみ出している。

## 2 土壌の粘土鉱物分析

表層土壌中に含まれている粘土鉱物の種類を、X線回折装置 ((株) Rigakuの粉末X線回折装置) を用いて分析した。この分析では、装置からCuK $\alpha$ 線を照射し、特定の底面半径に相当した特性X線量を測定した。その際、特性X線量のピーク値とピーク時の底面半径から含有粘土鉱物を特定した。

測定に用いた土壌は、篠堂地区 (図1-1 (b) 参照) を流れる篠堂川右岸側溪流沿い (図2-1) の黒色土壌 (1~4の地点)、及び褐色土壌 (5~6の地点) で採取したものである。なお、この土壌はいずれも攪乱試料として採取されたものである。

供試体に対しては、水ひ処理 (UT) とエチレングリコール処理 (EG) の2種類の処理を行った。水ひ処理では、粒子半径が2 $\mu$ m以下の粘土を凝集させ、エチレングリコール処理では、測定を行った水ひ処理の供試体に、エチレングリコールを噴霧し30分程度置くという方法で測定した。

X線回折装置で測定された黒色土壌の結果を図2-2に、褐色土壌の結果を図2-3に示す。今回の測定では、各土壌のピーク推移がほぼ同じ傾向で

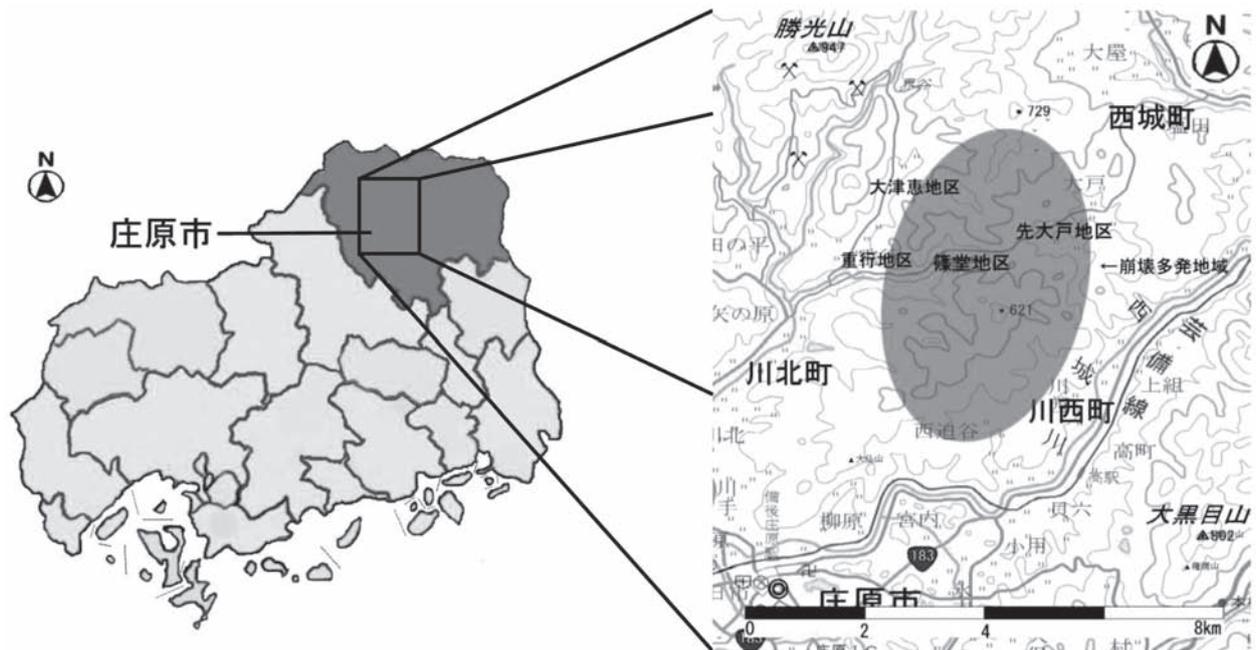


図1-1 (a) 広島県地図上の被災地の位置 (b) 拡大図 (電子国土7万5千分の1地形図を使用)  
塗りの部分は斜面崩壊が多発した範囲

あったため、★印で示した地点の結果を示すことにする。

黒色土壌の水ひ処理でみられたピークは、底面半径14.3Å、10Å、7Å、5Å、4.3Å、3.6Å、3.3Åであった。一方、褐色土壌は14.3Å、7.0Å、5.0Å、4.25Å、3.3Åにピークがみられた。10Åや3.6Åを除き類似したピークがみられた。また、エチレングリコール処理のピークは、双方の土壌ともに水ひ処理とほぼ同じ底面半径の位置を示していた。

それぞれのピークに対応する粘土鉱物について表2-1で示す。ピークの高さに違いがあるものの、黒色土壌・褐色土壌ともにほぼ同一の粘土鉱物で構成されていることが分かった。

膨潤性を示す粘土鉱物としては、14Å～15Åでピークがみられるスメクタイトや緑泥石、パーミキュライトが挙げられる。中でもスメクタイトや緑泥石はエチレングリコール処理によって15Å～17Åに底面半径が広がり、ピーク位置が推移することが知られている。しかし、エチレングリコール処理による結果では、測定結果の底面半径に変化がみられなかった。現地の土壌は、スメクタイトなどをほとんど含んでおらず、パーミキュライトが膨潤性を有する粘土鉱物として含まれていることが考えられた。

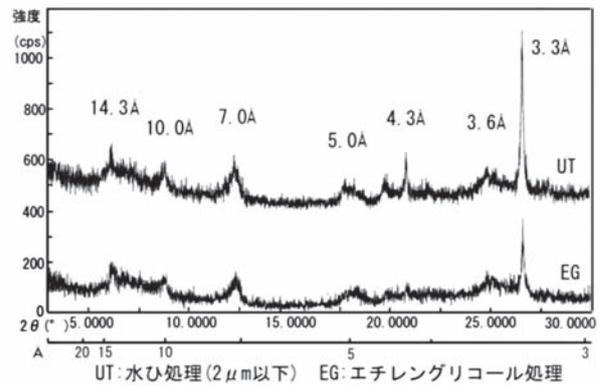


図2-2 黒色土壌に含まれていた粘土鉱物のX線回折結果

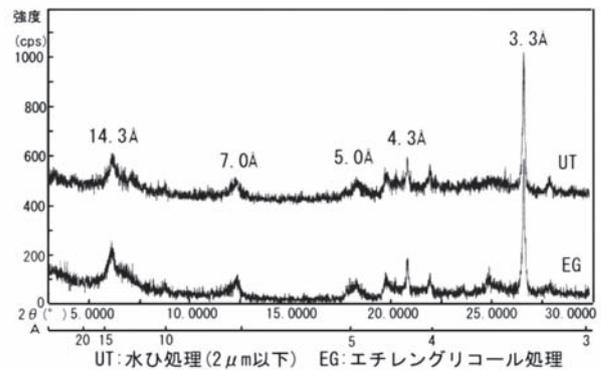


図2-3 褐色土壌に含まれていた粘土鉱物のX線回折結果

表2-1 ピーク時の底面半径と底面半径に対応する粘土鉱物

14.3 Å	14 Å～15 Åでピークがみられる スメクタイトや緑泥石、 パーミキュライト
10 Å・5 Å	イライトなどの雲母類、 5 Å付近はギブサイトも
7 Å・3.6 Å	カオリナイト
4.3 Å・3.3 Å	一次鉱物の石英

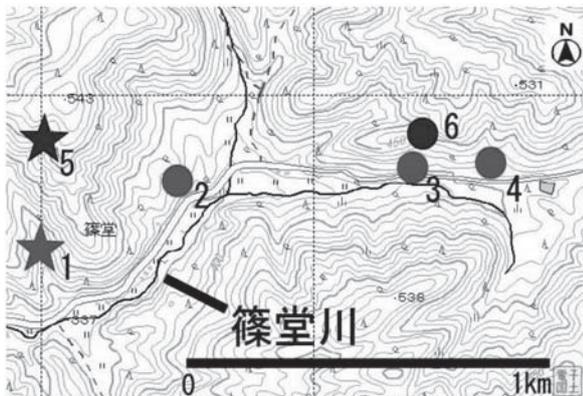


図2-1 土壌採取地点

※図1-1(b)篠堂地区付近を拡大  
(地形図は電子国土9千分の1を使用)

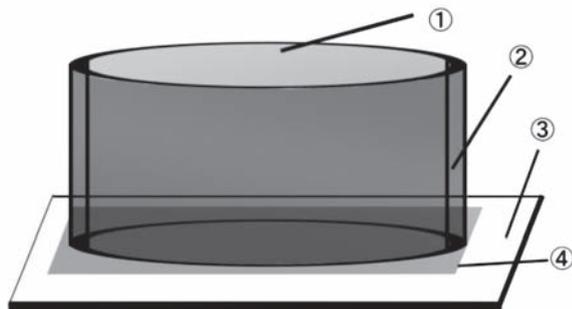
- 1-4の地点:黒色土壌採取場所
- 5-6の地点:褐色土壌採取場所
- :粘土鉱物分析のみ行った
- ★:すべての試験で使用した

### 3 土壌の吸水量・膨潤量

次に、膨潤性粘土鉱物を含んだ土壌が、吸水過程で内部に取り込む量を把握する試験を行った。この試験では、模式図(図3-1)のように黒色土壌及び褐色土壌を、現地の乾燥密度になるよう容

器に詰めて吸水させた。その際、測定中に土壌が流出しないようにするため、容器の上面が水に浸からない形で水を張った。板と容器の間にはネットを挟んでいるが、これは、水の通り道を確保するためである。

試料として、図2-1の★印で示されている地点の攪乱土壌を使用した。なお、供試体作成の関係で、黒色土壌①～⑦、⑧～⑬がそれぞれ同一の初



- ①: 土壌試料
- ②: 容器(半径4.9cm×高さ6cm, 円形)
- ③: 木製の板(容器とテープで固定)
- ④: ネット(板と容器間に水の通り道を確保するため)

図3-1 供試体の模式図

期含水状態である。褐色土壌①～④についても同一の攪乱試料を使用した。一部の供試体には初期含水状態に違いが生じている。

図3-2に、吸水経過時間と飽和度との関係で結果を示す。飽和度は、試験開始前と開始後の間で土粒子自身の体積変化はないと仮定し算出した。ただし、実際には、土粒子自身の体積も増加していることが推測される。そのため、ここで示される飽和度は吸水前の初期間隙量を基準としたものであり、実際の土壌飽和度とは異なっている可能性はある。

吸水開始前の初期飽和度は、黒色土壌①～⑦が平均8.3%、⑧～⑬が67.0%、褐色土壌①～④が85.0%であった。吸水開始後の飽和度は、褐色土壌で10時間、黒色土壌で100時間の間に100%を超えた。1000時間では、黒色土壌が平均115%、褐色土壌が130%まで上昇した。

今回の試験で、時間経過とともに飽和度が100%を超えるのは、図3-3のように土壌が初期間隙量まで吸水しても、なお水を取り込み続けたためである。この状態で取り込まれた水(膨潤水)は、主に膨潤性粘土鉱物によるものと考えられる。

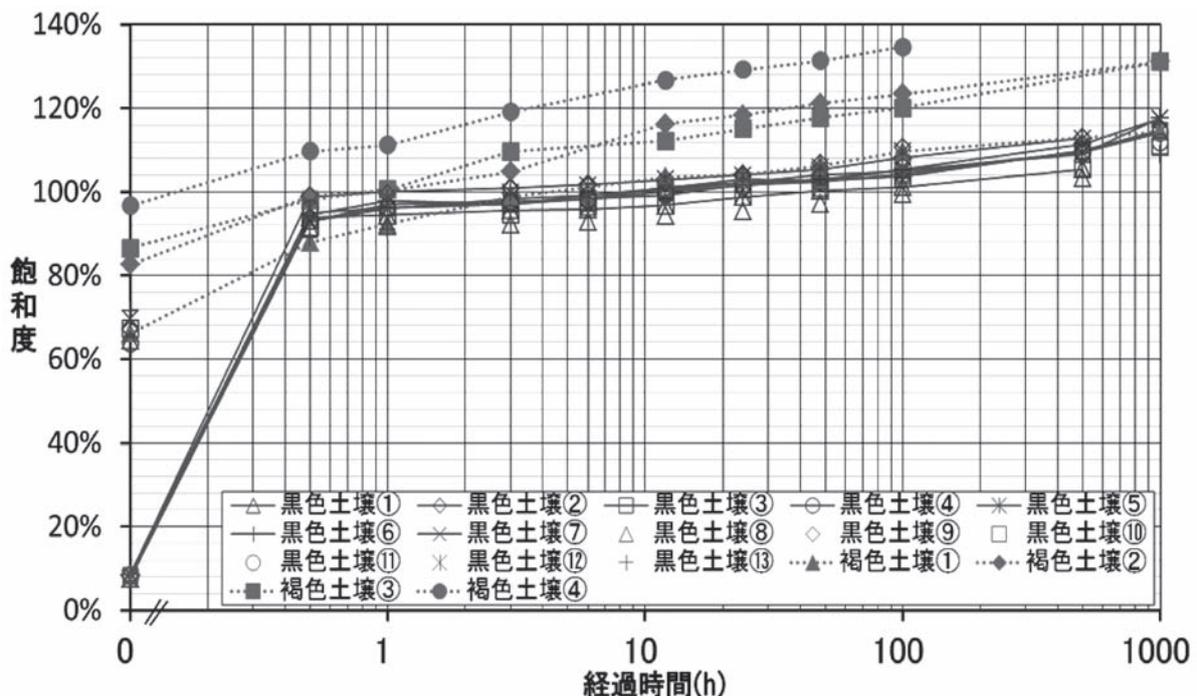


図3-2 吸水経過時間と飽和度との関係

(乾燥密度は黒色土壌①～⑦: 1.06 ~ 1.17g/cm<sup>3</sup>, ⑧～⑬: 1.16 ~ 1.26g/cm<sup>3</sup>, 褐色土壌: 1.58 ~ 1.65g/cm<sup>3</sup>)

前述の結果から、現地の土壌には、バーミキュライトが膨潤性粘土鉱物として確認されている。したがって、このバーミキュライトが、1000時間の間に黒色土壌で15%、褐色土壌で30%に相当する水分を土粒子内部へ取り込んだものと思われる。

#### 4 土壌の膨潤圧

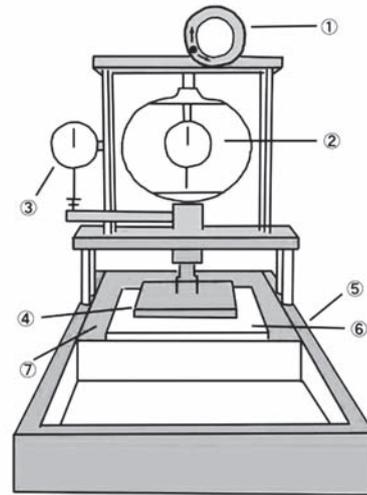
この膨潤圧試験では、模式図（図4-1）のような定体積一面せん断試験で使用するせん断箱を利用して行った。試験は、供試体を作成後に試験箱に設置し、試験箱に水を張る方法で行った。その際、吸水過程で膨潤しようとする供試体を定体積状態に維持できるようにするため、垂直荷重をかけてコントロールし、垂直荷重の変化から膨潤圧を読み取ることにした。なお、供試体には押さえ板やリングなどの死荷重が0.71kPaかかっているため、これ以上の荷重をかけた場合に初めて膨潤圧として読み取れることになる。

供試体は、黒色土壌について集中的に試験を行うことにした。その際、試料として吸水試験と同様、図2-1で示された★印の攪乱試料を用いて作成した。

膨潤圧の測定結果について、吸水経過時間と膨潤圧との関係を図4-2に示し、試験時の含水比

や飽和度の推移、及び試験後の吸水量について表4-1に示す。膨潤圧は、測定した400時間で1.43kPa（黒色土壌①）～9.68kPa（黒色土壌②）となった。

土壌の膨潤傾向について詳しくみると、初期の飽和度が低い膨潤圧ほど、吸水後高い膨潤圧がみられた。例えば、黒色土壌①と④では乾燥密度及び吸水後の含水比はほぼ同じ値であったが、膨潤



- ①: ハンドル
- ②: 荷重計
- ③: 変位計 (垂直変位測定)
- ④: ガイドローラー付き押さえ板
- ⑤: 試験箱 (灌水可)
- ⑥: 供試体
- ⑦: 水

図4-1 膨潤圧試験機の模式図

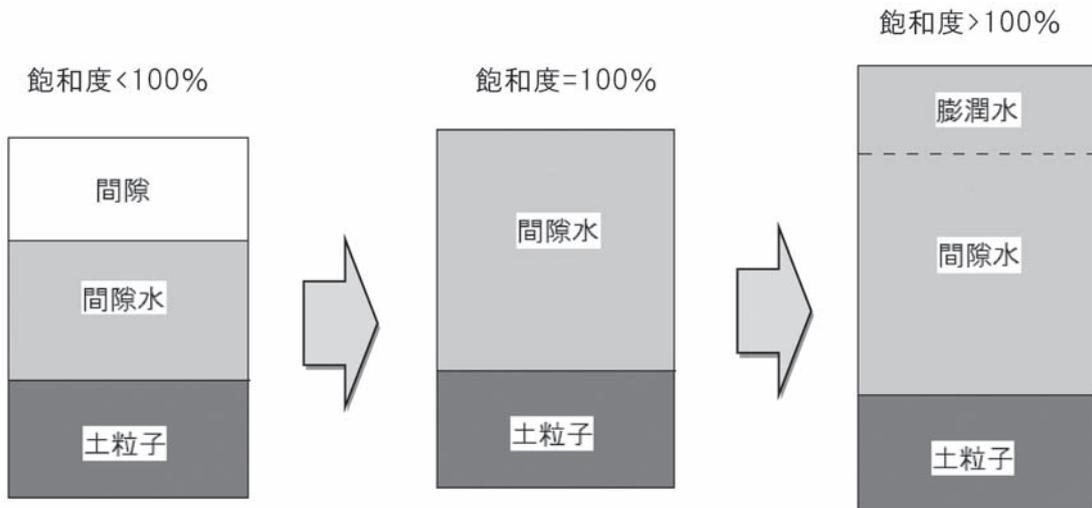


図3-3 飽和度の推移と土壌内での吸水の変化  
実際の膨潤水は土粒子内部に取り込まれているものと考えられる

圧は、吸水前の飽和度の違いによって大きな差が生じていた。これは、吸水前の飽和状態が大きく影響しているものと思われる。飽和度の低い状態の土壌では、土壌間隙内の水分や土粒子内部の水分を多く放出していたと考えられる。このような形で水を受けると、土壌の間隙や土粒子内部に容易に水が浸入して膨張しやすい状態であったと思われる。一方で、飽和度の高い状態の土壌では、吸水前から土壌の間隙の多くに水が存在しているため、既に土粒子内部へ水を取り込んでいたと推測される。このような状態では、土壌には吸水できる余地があまりなかったと考えられる。そのため、吸水を開始してもあまり膨潤しなかったもの

と考えられる。

膨潤圧の上昇速度に関してみると、黒色土壌②や④は吸水開始から20時間程度まで大きく、その後は、多少の増減はありながらもほぼ一定の膨潤圧を保っているような状態であった。このような供試体は空隙が多く、土壌内部へ移動する水の移動速度が大きくなるため、吸水直後に上昇することが考えられる。一方で乾燥密度が高い黒色土壌③や⑤の膨潤圧は、吸水開始後はあまり増加しないものの、時間経過とともに膨潤圧が増加し、100時間以降になり最大値に至っている。土壌の乾燥密度の高い土壌は、空隙が少なく、また土壌の透水性が低くなるため、吸水開始後もあまり水

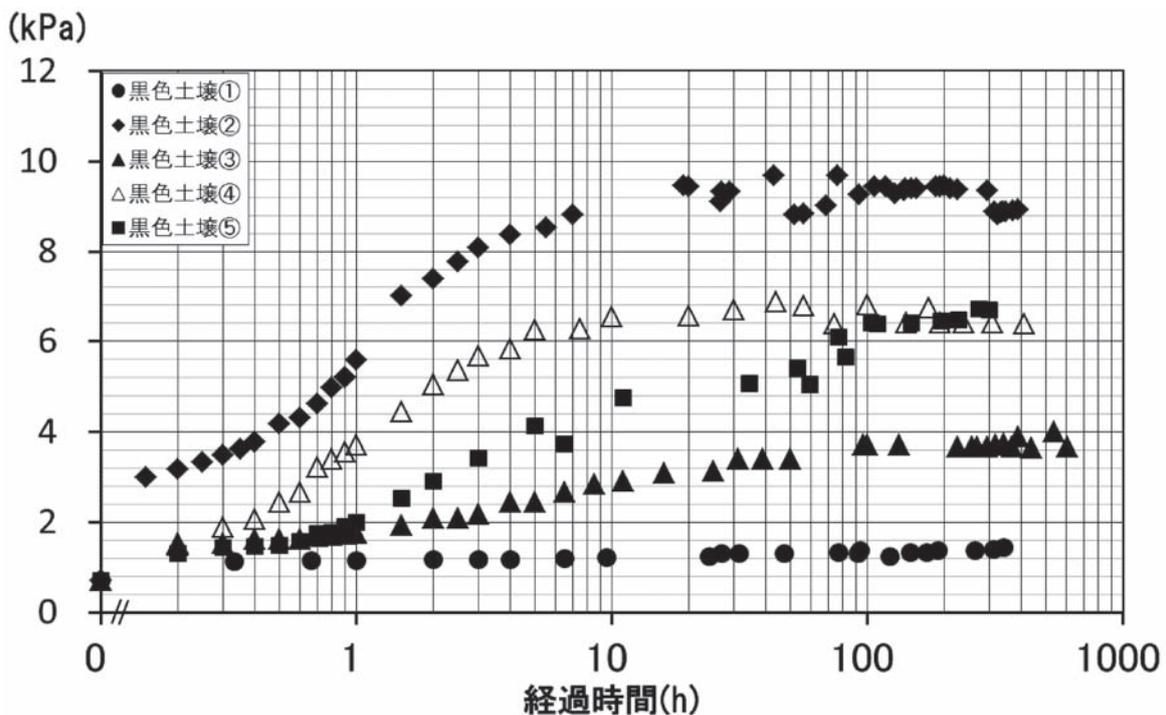


図4-2 吸水経過時間と膨潤圧との関係

表4-1 試験時の供試体

	乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	膨潤圧試験前		膨潤圧試験後		最大膨潤圧 (kPa)	吸水量変化 (g)
		含水比(%)	飽和度(%)	含水比(%)	飽和度(%)		
黒色土壌①	1.34	32.0	89.1	34.8	96.8	1.43	143.34
黒色土壌②	1.28	23.4	59.3	38.6	97.8	9.68	781.20
黒色土壌③	1.52	21.8	80.5	26.1	96.4	4.00	263.82
黒色土壌④	1.34	19.3	53.7	34.4	95.9	6.86	822.90
黒色土壌⑤	1.40	23.9	73.0	32.1	98.1	6.70	920.97

が浸透しないことが予想される。そのため、膨潤圧が徐々に発揮される結果になるもの考えられる。

## 5 総合的考察

ここでは個々の試験結果が、吸水時の土壌に対してどう作用していたか、特徴的な現象としてどう関係していたか考察を行っていくことにする。

吸水試験では、土壌の膨潤によって土粒子内部へ水を取り込んでいることが分かった。その現象は、不飽和時に働くサクション作用と類似した状態を発生させると推測させる。そのため、膨潤が継続する間、土壌にはみかけの粘着力が継続して働くことが考えられる。

また、膨潤圧が生じている時、膨張しようとする力が、応力として働いていたことも考えられる。この応力は、土層全体の密度を一時的に高めることで、透水性の低下や粒子間の摩擦力の継続に寄与していたと推測される。これらが土壌の強度低下を抑える因子となっていると思われる。

次に黒色土壌層にみられた特徴的な現象に対して考えてみる。現地では、災害発生2週間前から1週間ほど無降雨の期間があった後、前日までの5日間に約270mmの雨が降った。これは、無降雨期間に土壌内の水分が放出され、降雨によって再び土壌内に大量の水分を取り込んだものと思われる。その際、表層土壌の一部には膨潤圧が生じただろう。膨潤圧は、土層の透水性を低下させることへつながるため、災害当日の集中豪雨があまり地中へ浸透しないような状態を形成したことが推測される。この結果、急斜面に薄く堆積していた褐色土壌層に比べ、土層厚が大きい黒色土壌層はあまり強度低下せず、土石流の通過によっても深い侵食を受けることなく残存できたのではないかと考えられる。

## 6 まとめ

本論文で今回得られた知見をまとめると以下のようなになる。

1. X線回折による分析の結果、現地の土壌内に含まれていた膨潤性粘土鉱物は主にパーミキュライトであり、スメクタイトなどの膨潤性粘土鉱物はほとんど含まれていなかった。
2. 吸水試験の結果、黒色土壌には15%、褐色土壌には30%の水分が初期間隙量を上回る形で土壌内部に取り込まれた。この結果から、サクション作用を1000時間程度は継続させていることが示唆された。
3. 膨潤圧試験の結果、黒色土壌で最大約10kPaの膨潤圧が測定された。膨潤性が一時的に土層全体の透水性を小さくすることや膨潤圧としての応力が粒子間の摩擦力を継続させることにつながったと考えられ、土壌の強度低下の抑制作用として働いていたことが示唆された。
4. 災害発生前日までの天候の変化が、土壌の膨潤性を大きく発揮させたことで、上記の強度低下の抑制作用が生じたと思われる。特に土層厚の大きい黒色土壌層でこの傾向が顕著に見られ、黒色土壌層は土石流の通過によってもあまり深い侵食を受けることなく残存していたものと推測された。

## 引用文献

- 伊藤 駿 (1980) : 土の膨潤挙動からみた地盤災害, 土と基礎, (社)地盤工学会, 28(2), p.31-38
- 上森弘樹・海堀正博・田畑絵利葉・矢野香那子 (2011) : 広島県庄原市の土砂災害発生場における表層土の物理的特性に関する研究, 平成23年砂防学会発表要旨, p.118-119
- 海堀正博・杉原成満・中井真司・荒木義則・山越隆雄・林真一郎・山下裕一 (2010) : 2010年7月16日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol.63, No.4, p.30-37
- 白水晴雄 (1988) : 粘土鉱物学-粘土科学の基礎-, 朝倉書店, p.152-154
- 地下まゆみ・上野宏共・王濱濱・坂本尚史 (2008) : 沖縄県中城村で発生した地すべりと粘土鉱物の関係, 土木学会西部支部, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p.67-70