

応用地質

第 48 卷 第 2 号

2007年6月

日本応用地質学会

結晶片岩中のスメクタイト含有破砕帯の膨潤特性と隆起メカニズム

田村 栄治*・浄内 明**・松崎 伸一**・長谷川 修一***

要 旨

基礎岩盤中の破砕帯は沈下だけでなく、膨張により地盤に障害を発生させることがある。三波川帯の泥質片岩域で、最大厚さ25mの切土がなされた破砕帯上に直接設置したコンクリート基礎が、基礎設置後7年間で最大66mm隆起した。基礎隆起の発見後の調査から、基礎の隆起原因は、破砕帯に膨潤性の粘土鉱物であるスメクタイトが多く含まれているためであることがわかった。本論では、破砕帯の室内試験、原位置試験によって、スメクタイト含有破砕帯の膨潤特性を明らかにし、その結果、地山の掘削に伴う土被りの除去後、スメクタイトの膨潤を伴う吸水膨張が地表から地下へ進行することによって、徐々に地盤隆起が発生した可能性が高いことが判明した。土被り圧がスメクタイト含有破砕帯の膨張圧より大きい深度約8m以深では、膨張は発生していない。スメクタイトは未風化域の破砕帯に一樣に含まれており、その生成要因は熱水変質である可能性が高い。基礎のレベル観測データから将来の隆起予測を行うとともに、地質構造とスメクタイト含有破砕帯の載荷圧力と吸水膨張率の関係をを用いて隆起モデルを構築し、FEM解析による隆起予測解析を行い、レベル観測による隆起予測の妥当性を検証した。

Key words : 地盤隆起 ground upheaval, 破砕帯 crush zone, スメクタイト smectite, 膨潤 swelling

1. はじめに

岩盤の大規模掘削による地盤隆起には、弾性的変形と塑性的変形がある。弾性的変形は、地山の応力開放によりリバウンドを生じる場合で、この変形は応力開放とともに進行し、掘削後短時間で収束する。大規模掘削時の岩盤変位の報告事例として、新第三系の凝灰角礫岩地盤を35m掘削した開閉所造成時の観測事例¹⁾がある。この事例では、掘削とともに地盤は徐々に隆起し、掘削終了後の切土地盤の盤膨れは4mm程度でほぼ収束している。

塑性的変形は泥質岩などでゆっくりとした変形をもたらす。海外では掘削した頁岩からなるダム基礎岩盤の盤膨れ²⁾や、頁岩からなる宅地地盤の盤膨れの例³⁾などの報告がある。

国内において、切土地盤の盤膨れ現象を扱った研究として、大山⁴⁾による宅地切土地盤における石膏の結晶圧による盤膨れの研究がある。大山は岩石中の黄鉄鉱が酸化して

硫酸を生成し、岩石中の方解石を溶解させて硫酸イオン、カルシウムイオンが生じ、それらが建物の床下の地盤で石膏の結晶として析出し、その際の結晶圧で盤膨れを生じたとしている。植本⁵⁾は、新第三系の安山岩地盤からなる東北地方の高速道路の切土路面における盤膨れ事例を報告している。植本によれば、盤膨れ地盤は熱水変質を受けた変質安山岩からなりスメクタイトを含有し、切土道路盤で最大24cm隆起していることを報告している。そして、室内膨潤試験結果を用いて、膨潤量予測と膨潤による強度低下について検討している。石田⁶⁾はスメクタイトを含む軟岩の劣化防止に関する観点からスメクタイト含有地盤の室内膨潤試験を行い、スメクタイトの交換性陽イオン組成によって、水浸法と養生マット法とシール法を使い分ける必要があるとしている。伊藤⁷⁾は室内試験から、粘土中のスメクタイトの含有率が高いほど膨潤圧が大きいことを示し、含有率の違いによる膨潤圧の例を示した。以上のように、スメクタイト含有地盤についていくつかの研究例はあるが、原位置データを用いた地盤の盤膨れと膨潤に関する研究例は数少ない。

切土地盤の盤膨れの多くは、一般に膨潤性の粘土鉱物を含む主に泥岩で発生し、結晶片岩などの硬質岩盤では発生しにくいと考えられている。一方、硬質岩盤中にある破砕帯においては一般に変形係数が小さいため、重要構造物の

* (株)四電技術コンサルタント Yonden Consultants Co., Inc. (会員)

E-mail : e-tamura@yon-c.co.jp

** 四国電力(株) Shikoku Electric Power Co., Inc.

*** 香川大学工学部 Faculty of Engineering, Kagawa University (会員)

基礎岩盤としては不同沈下対策が検討されることが多い。これは、硬質岩盤中の破砕帯が掘削後に隆起した事例がほとんど報告されていないためと考えられる。

四国地方では、御荷鉢緑色岩類や黒瀬川構造帯中の蛇紋岩を源岩とする粘土にはスメクタイトが含まれることがあり、トンネル施工時には盤膨れを生じる^{8),9)}など、スメクタイト含有地盤は、土木地質上、問題となる地盤であることが知られている。しかし、三波川帯の泥質片岩分布域では、スメクタイトが含有される事例として中央構造線に近接する地すべり地における報告例¹⁰⁾はあるが、一般的に盤膨れが問題となることはまれである。

トンネル地盤では、地山応力の開放に伴う押し出しとスメクタイト含有地盤の盤膨れの両者の結果として変状が発生するため、スメクタイト含有地盤そのものの膨潤特性は評価しにくい。また、前田¹¹⁾による熱水変質に伴うスメクタイト帯およびスメクタイト混合層帯の熱水性粘土を地すべりの素因とする研究などがあるが、スメクタイト含有地盤そのものの膨潤特性の研究例は少ない。

本論では、四国の三波川帯における切土岩盤に直接設置されたコンクリート基礎が、1997年の基礎設置後、7年間で最大66mm隆起した事例¹²⁾をもとに、破砕帯の室内試験、原位置試験によって、破砕帯の膨潤特性を解明し、地質構造を考慮した地盤の隆起メカニズムを検討した。また、FEM解析による隆起量予測解析を行い、隆起観測結果による隆起予測と整合する結果を得た。

2. コンクリート基礎の地質と隆起状況

2.1 コンクリート基礎の地質

調査地点は四国地方、三波川帯南縁の泥質片岩分布域に位置し、鮎喰川断層系の北約2kmの地点にあたる(図-1, 2)。隆起したコンクリート基礎地盤は、切り取り深さ25mの切土地盤で、主に泥質片岩、一部塩基性片岩の破砕帯からなる(図-3)。掘削面における破砕帯の幅は約20mで、コンクリート基礎は破砕帯上にある。

破砕帯はコンクリート基礎の長手方向にはほぼ直交するN

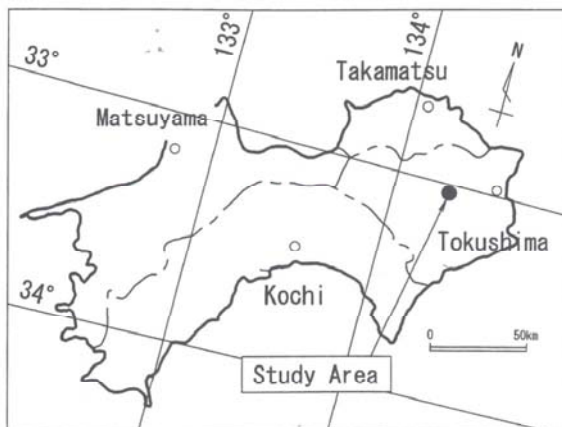
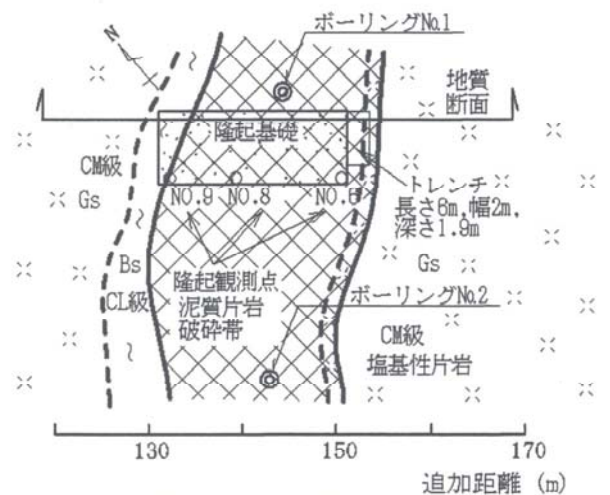


図-1 調査地点位置

60°Eの走向で分布し、南東側へ約50度傾斜している。基礎部における破砕帯の鉛直方向の厚さは南東側で最大約20mである。泥質片岩破砕帯は原岩と同じ黒灰色を呈し、電



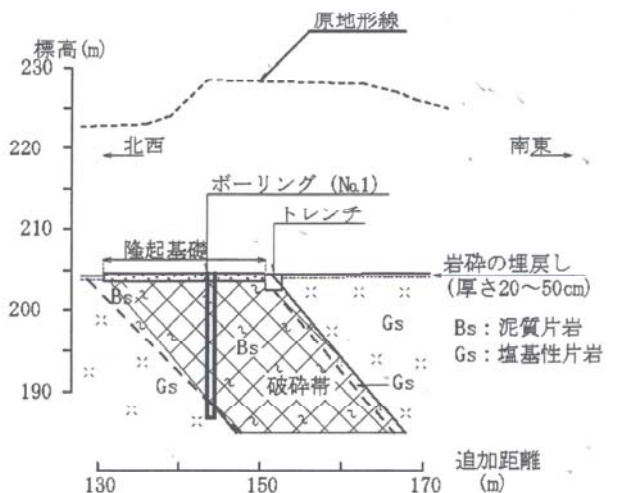
図-2 調査地点周辺の地質



凡例 ~Bs 泥質片岩 Gs 塩基性片岩

破砕帯

(1) 掘削面上の破砕帯分布と調査孔の配置



(2) 地質断面図

図-3 隆起基礎部の調査孔配置と地質断面

研式岩盤分類のD級岩盤に相当する。施工時には、破碎帯は乾燥下では非常に硬い粘土地盤をなし、設置基礎の荷重が25kN/m²と比較的小さいことから、有害な沈下を生じない地盤と評価して施工された。

なお、この破碎帯の150m南東には活断層研究会による確実度Ⅲのリニアメント¹³⁾が図示されている。このリニアメントは基盤岩中の規模の大きな断層破碎帯を反映している。この大規模断層破碎帯を対象とした道路切土工事では予想外の地すべりが発生しているが、その原因は解明されていない¹⁴⁾。

2.2 コンクリート基礎の隆起状況

破碎帯地盤の盤膨れにより隆起した基礎は、長辺20m、短辺8m、厚さ1mの長方形の鉄筋コンクリート構造物である。1997年に切土造成し、基礎設置後7年で27~66mmの隆起を生じた(図-4)。基礎のレベル観測は、切土造成地の外の遠方に基準点を設け、2級水準測量により実施した。レベル観測の観測誤差は±2~3mmである。

敷地造成による切土地盤300m区間のうち盤膨れ箇所は、基盤岩中の破碎帯に対応する(図-4)。基礎の隆起形状は、

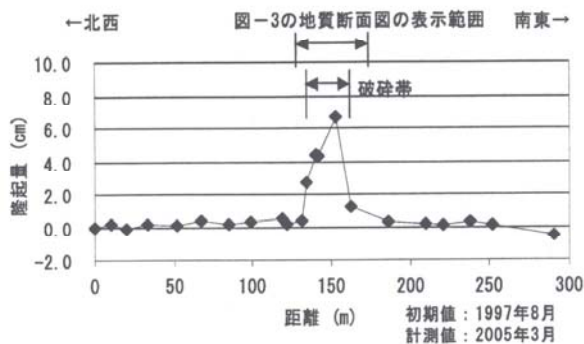


図-4 切土地盤における破碎帯箇所とその周辺の高さ変化

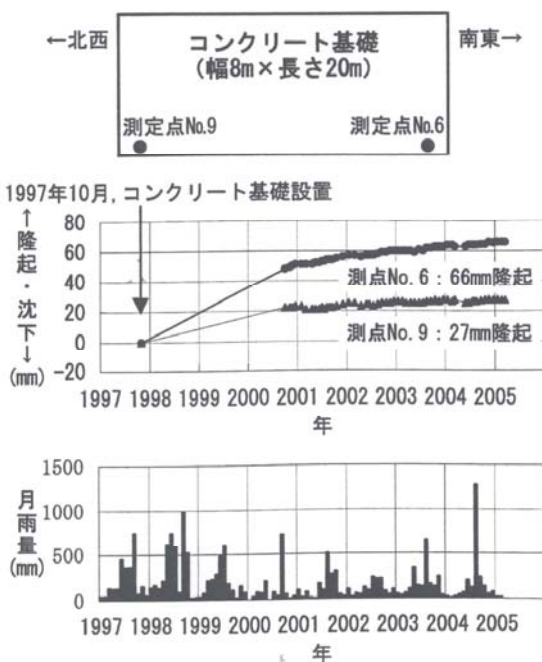


図-5 基礎隆起の経時変化

破碎帯が厚く分布する南東側で約66mmと大きく、薄く分布する北西側で約27mmと小さく隆起量が異なる(図-5)。破碎帯の延長部の切土擁壁部では、コンクリート擁壁の打ち継ぎ目に食い違いなどの変状が認められる。

3. 破碎帯の工学的性質

掘削直後の破碎帯は、見かけ上、乾燥した固結粘土であった。コンクリート基礎の隆起発見後、ボーリング調査およびトレンチ調査を行いコンクリート基礎地盤である破碎帯の地質状況を調査した(図-3)。その結果、この破碎帯には後述するようにスメクタイトが多く含有されていることがわかった。

泥質片岩破碎帯とこれに付随して分布する塩基性片岩破碎帯の現場試験・室内試験を行い、破碎帯の物性値、膨潤特性を解明した。室内試験試料は、トリプルコアチューブを用いた直径70mmのボーリングコアと、トレンチ壁面から採取したブロックサンプリング試料とした。

3.1 破碎帯の物理・化学・変形特性

(1) 物理的特性

泥質片岩破碎帯は、土粒子の密度2.701~2.770g/cm³、単位体積重量22.9~23.3kN/m³、自然含水比5.3~7.6%、粘土分含有率7~42%、塑性指数5.6~13.7の砂質粘土ないし粘土質砂からなる(図-6、表-1)。破碎帯の間隙比は0.21~0.26であり、飽和度は68~83%と不飽和である。

(2) 化学的特性

破碎帯にはスメクタイトが多く含有されていることから繰り返し遠沈法により、陽イオン交換容量(CEC)¹⁵⁾を調べた。陽イオン交換容量は、膨潤性地山判定の指標の一つとして利用されている。

当破碎帯の陽イオン交換容量は、泥質片岩破碎帯で1.6

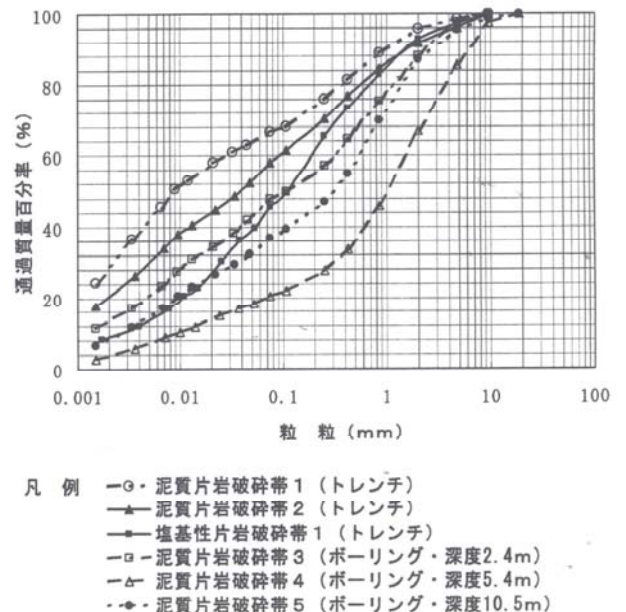


図-6 破碎帯の粒度分布

表-1 破砕帯の物理特性、変形特性

深度 (m)	物理特性						変形特性	
	土粒子の密度 (g/cm ³)	単位体積重量 (kN/m ³)	自然含水比 (%)	塑性指数	間隙比	飽和度	変形係数 (MN/m ²)	弾性係数 (MN/m ²)
2.5	2.701	22.9	5.9	13.7	0.22	68	12.1	-
5.2	2.770	22.9	6.6	5.6	0.26	70	26.8	51.1
5.8	2.764	23.2	7.6	11.9	0.25	83	-	-
9.0	-	-	-	-	-	-	56.4	181
11.0	2.742	23.3	5.3	11.5	0.21	69	-	-
13.5	-	-	-	-	-	-	84.8	227

表-2 破砕帯の陽イオン交換容量

項目	単位	泥質片岩破砕帯								塩基性片岩破砕帯
		ボーリングNo.1					ボーリングNo.2	トレンチ		
		深度 (m)								
		2.6m	5.6m	7.6m	11.1m	12.8m	5.8m	1.6m	1.1m	
スメクタイト含有量	wt%	12.9	12.3	9.8	13.1	15.1	-	15.6	27.3	
陽イオン交換容量		2.9	3.5	1.6	1.9	3.0	2.7	2.4	13.1	
交換性陽イオン合計*		36.4	36.3	27.7	48.2	68.6	24.7	26.7	113	
交換性ナトリウム*	cmol(+)	0.6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.6	
交換性カリウム*	/kg	0.9	1.4	0.6	0.8	0.9	0.6	0.4	1.1	
交換性カルシウム*		31.4	24.2	25.4	45.4	64.1	21.6	21.8	101	
交換性マグネシウム*		3.5	10.2	1.4	1.7	3.2	2.1	3.9	10.5	

*1回目の洗浄により溶出した陽イオン量を示す

～3.5cmol(+)/kg, 塩基性片岩破砕帯で13.1cmol(+)/kgであり, トンネルの膨張圧発生の指標¹⁶⁾値の20cmol(+)/kgより小さい値を示した(表-2). 反応性陽イオンの量比を見るため, 1回目の酢酸アンモニウムによる洗浄液をろ過し, ろ液100mℓ中のNa⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺を分析し交換性陽イオンとして表-2に示した. 交換性陽イオンはカルシウムイオンが圧倒的に多く, 本破砕帯に含有されるスメクタイトはCa型と判定される. Ca型のスメクタイトはNa型のそれに比べて膨潤性が小さいとされている. 1回目の洗浄ろ液の分析による交換性陽イオンのカルシウムイオンが, 全体に高い値となっている. これは, 破砕帯中に水溶性の炭酸塩鉱物(方解石)が含有されていたためと考えられる.

(3) 変形特性

2本のボーリング孔を用いた孔内水平載荷試験による泥質片岩破砕帯の変形係数は12.1～84.8MN/m², 弾性係数は51.1～227MN/m²と小さい(表-1). 一方, 破砕帯を取り巻く塩基性片岩は堅硬であり, その変形係数は1,600MN/m², 弾性係数は3,920MN/m²と大きい. このため, 破砕帯は堅硬な岩盤に拘束された状態となっている.

3.2 破砕帯の透水性と地下水

単孔のボーリング孔を用いて破砕帯の透水試験を行った. 透水試験は透水性が低いとの判断から注水法とした. 破砕帯の透水係数は, 1.2×10⁻⁶～3.8×10⁻⁷cm/sと小さく, 粘土質の難透水地盤である(表-3). 基礎設置後の破砕帯中の孔内水位観測では, 孔内水位は常時深度0.5～1m程度と浅い深度に観測された. 本破砕帯は土被りが最大25mであり, 地下水に飽和された状態にあったと推定されるが, 掘削後も地下水が高い状態が継続しているものと考えられる.

表-3 破砕帯の透水係数

(単位: cm/s)

試験深度 (m)	ボーリング孔	
	No.1	No.2
3.0～4.0	4.6×10 ⁻⁶	1.2×10 ⁻⁶
6.0～7.0	-	4.3×10 ⁻⁶
7.8～8.0	3.8×10 ⁻⁷	-
12.0～13.0	3.5×10 ⁻⁶	-

3.3 破砕帯のスメクタイト含有量

泥質片岩および塩基性片岩破砕帯の水ひ試料(2μm以下の粘土試料)を用いて, X線回折により粘土鉱物の分析を行った. X線回折では, マックサイエンス社製MXP-18システムを用い, X線のターゲットをCu, 管電圧40kV, 管電流40mA, 走査速度2°/分とし, 無処理試料とエチレングリコール処理試料を分析して粘土鉱物の同定を行った. その結果, 本破砕帯の細粒分は白雲母, 緑泥石を主体とし,

膨張性粘土鉱物であるスメクタイトを多く含むことが確認された(図-7). 白雲母と緑泥石は石英, 長石とともに泥質片岩の主要構成鉱物であり, ゲーサイト等の風化鉱物は認められなかった.

反射強度がシャープな亜鉛を指標鉱物として内部標準法¹⁷⁾により検量線を作成し, 亜鉛に対するスメクタイトの相対強度比から破砕帯粘土試料中のスメクタイト含有率を求めた. その結果, スメクタイトは泥質片岩破砕帯で10～15%, 塩基性片岩破砕帯で27%程度含有されていることがわかった(図-8). ボーリングNo.1孔の泥質片岩破砕帯粘土試料中のスメクタイト含有率は10～15%で深度方向への変化はほとんどなく, 原岩と同じ黒灰色を呈する泥質片岩破砕帯にスメクタイトが生成されている(図-9). ボーリング口元がすでに上載岩盤を25m切土した新鮮岩盤領域であることから, スメクタイトが風化により生成されたとは考えにくい地質状況である. したがって, スメクタイトは熱水変質により生成された可能性が高い.

3.4 破砕帯の吸水膨張圧・膨張率試験

破砕帯の吸水膨張圧・膨張率は, 地盤工学会基準案JGS 2121-1998の『岩石の吸水膨張試験方法』¹⁸⁾に従って求めた. 供試体は, 直径70mmのボーリングコアとトレンチ掘削時に採取したブロックサンプルを直径6cm, 高さ2cmの不攪乱試料として整形し作製した. 試験試料は採取時に高分子フィルムでラップし, 試料の乾燥を防止し, 速やかに試験を行った. ボーリングコアは削孔水の影響を除去するために, 整形時にコア表面を削って試料を作製した.

吸水膨張圧は, 泥質片岩破砕帯で約30～60kN/m², 塩基性片岩破砕帯で90～140kN/m²であった. 室内試験にお

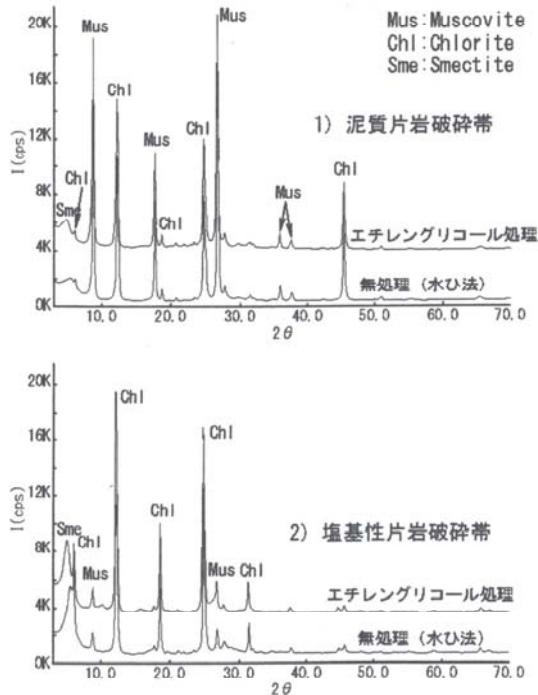


図-7 破砕帯のX線回折チャート

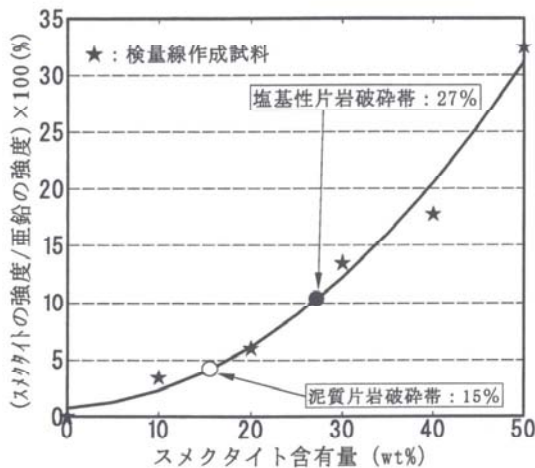


図-8 検量線および破砕帯のスメクタイト含有量

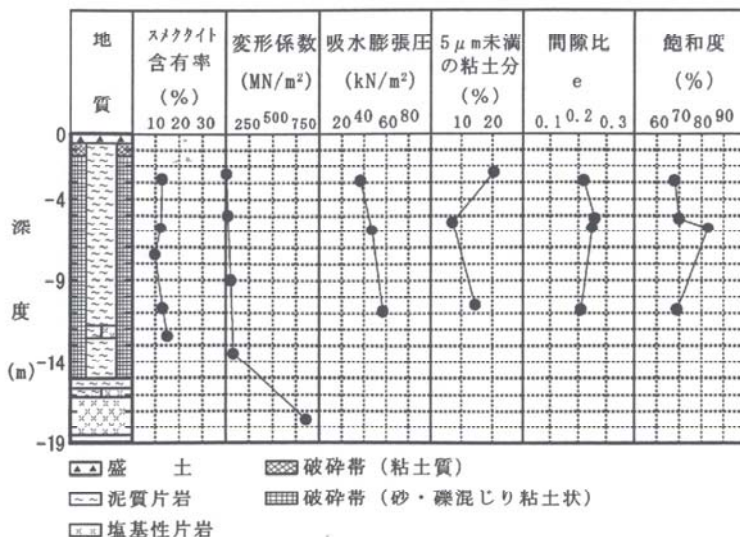
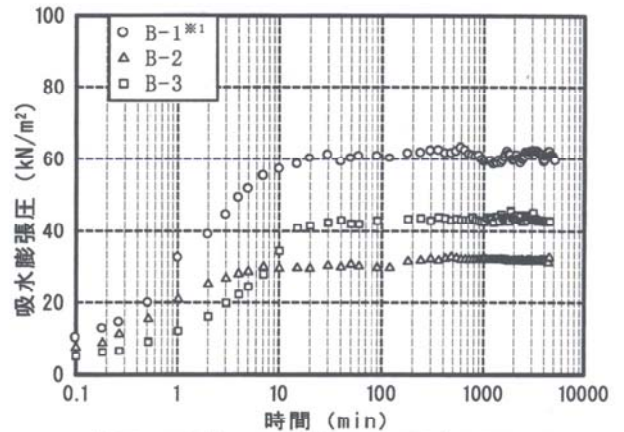
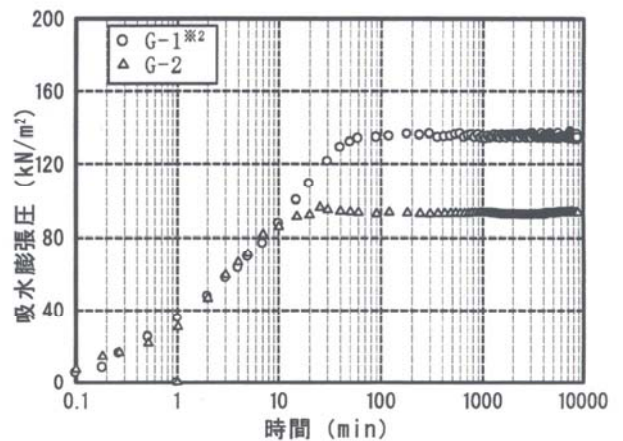


図-9 泥質片岩破砕帯のスメクタイト含有率の深度変化



*1 B-1はボーリングNo.1孔の深度5.75m, B-2は同孔の深度5.9m, B-3は同孔の深度6.0mの試料を示す。

(1) 泥質片岩の試験例



*2 G-1、G-2はトレンチ壁面の深度1.5mから採取した試料

(2) 塩基性片岩の試験例

図-10 泥質片岩、塩基性片岩破砕帯の吸水膨張圧試験例

ける吸水膨張反応はいずれの試料も浸水後即時に発生し、ほぼ30分で収束しており、強制湿润状態では吸水膨張反応が急速に発生している(図-10)。

スメクタイト含有量と吸水膨張圧の間には、正の相関関係が認められ、図-11に示すように、スメクタイト含有量の増加とともに吸水膨張圧が増加している。

吸水膨張率試験では、荷重圧力に応じた吸水膨張率を求めるため、試料に0、25、49、98kN/m²の各圧力を作用させ、荷重状態で強制湿润させて吸水膨張率を測定した。泥質片岩破砕帯の吸水膨張率は、荷重圧力0~98kN/m²下では0~11%であり、荷重圧力と吸水膨張率には図-12に示す負の相関が認められ、双曲線で近似できる。図-12では、破砕帯の最大吸水膨張率は168kN/m²で、土被り厚さ7.3mに相当する。

3.5 CCDカメラを用いた地中変位測定

破砕帯の隆起深度を把握するため、ボーリング

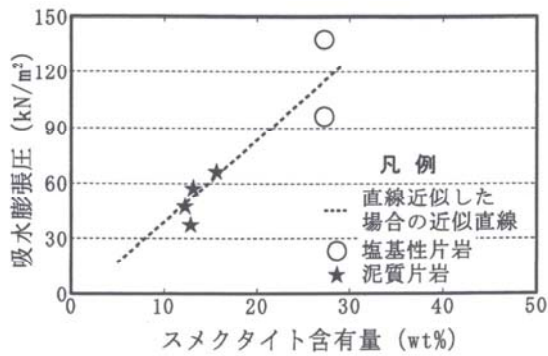


図-11 破砕帯のスメクタイト含有量と吸水膨張圧の関係

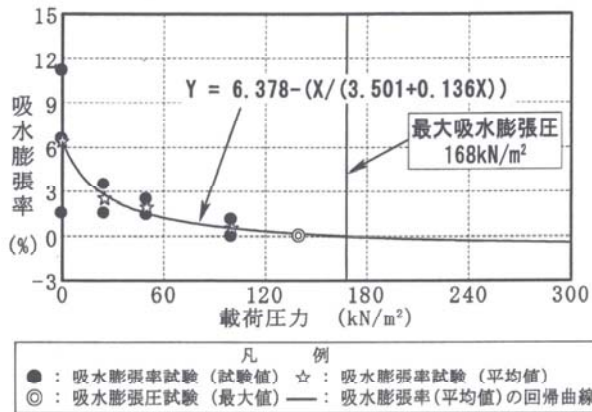


図-12 破砕帯の載荷圧力-吸水膨張率の相関

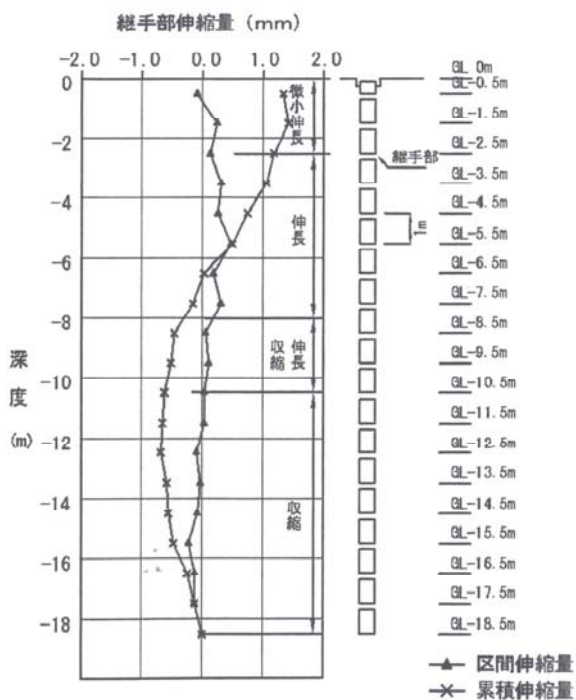


図-13 6か月間の地中変位測定による測定深度ごとの区間伸縮量と累積伸縮量

(No.1 孔)を利用してCCDカメラを用いた地中変位測定を実施した。地中変位測定は、伸縮継ぎ手を有する長さ1mのケーシングパイプを継ぎ足してボーリング孔に孔底深度まで挿入し、パイプ内部の継ぎ手部の伸縮をCCDカメラで検出する手法である¹⁹⁾。ケーシングパイプと孔壁との隙間はモルタルで充填した。

地中変位測定は基礎設置後、4年目に観測した。地中変位測定孔の設置から6か月後の測定から得られた隆起深度は、継ぎ手部の伸長が認められる深度1.5~7.5mの範囲である(図-13)。それ以深ではバラツキを伴うが収縮傾向があり、地盤隆起の反力が作用している可能性を示している。図-13の計測深度0.5mの箇所では、継ぎ手部の伸長が認められず、深度1.5m以深から継ぎ手部の伸長が認められる。このことから、深度0.5mでは膨張が終了していたものと考えられる。また、深度3.5~7.5m区間の区間伸縮量は、深度1.5~2.5mに比較してわずかに大きく、すでに上部は吸水膨張反応が収束に向かっていたことが想定される。以上のことから、破砕帯のごく表層部は吸水膨張反応がすでに終了していた、ないし収束に向かっていたものと評価でき、吸水膨張反応が切土地盤の表層から深度8m付近まで達していたことが示唆される。

4. 破砕帯の隆起メカニズムとスメクタイトの成因

4.1 破砕帯隆起の要因とメカニズム

本地点の破砕帯隆起の要因とメカニズムは以下のようまとめられる。

(1)コンクリート基礎の隆起は地表幅20mの破砕帯のみに発生していることから、スメクタイトを含むこの破砕帯が基礎の隆起の原因であることがわかる。また、破砕帯は粘土含有量が7~42%の砂質粘土ないし粘土質砂からなり、間隙比が0.21~0.26、飽和度が68~83%の不飽和状態であった。破砕帯が不飽和であることから、吸水膨張を起こしやすい状態にあったと考えられる。

(2)破砕帯の大半を占める泥質片岩破砕帯の細粒分は、白雲母と緑泥石を主体とし、粘土試料中のスメクタイト含有率は10~15%程度、塩基性片岩破砕帯は27%程度である。スメクタイトを含む破砕帯の吸水膨張圧は30~140kN/m²、吸水膨張率は1.5~11%と、破砕帯の膨張能力が確認された。

表-4に破砕帯地盤の試験結果とトンネルの膨張圧発生指標との比較を示す。表-4では、トンネルの膨張圧発生指標をスメクタイト含有量20%以上、イオン交換容量CEC値20cmol(+)/kg以上と設定されているが、本破砕帯ではこれ以下の少ないスメクタイト含有率やCEC値でも膨張圧が発生している。

(3)スメクタイト含有破砕帯では、掘削により地山の土被り約25m相当である約600kN/m²の土被り圧が開放され、スメクタイトを含有する破砕帯で吸水膨張が始まり、破砕帯上のコンクリート基礎が隆起したと推定される。破砕帯の吸水膨張反応は、土被り圧と膨張圧がバランスする深度まで進行し、スメクタイトの膨潤は終了するものと考えられる。地中変位測定から地下の膨張は深度7.5mまで達している。これは、破砕帯が土被り7.3m相当の載荷圧力168

表-4 破碎帯の試験結果と膨張圧発生指標

試験項目	泥質片岩 破碎帯	膨張圧発 生の指標*
自然含水比 (%)	5.3~ 7.6	20 以上
塑性指数	5.6~ 13.7	25 以上
2 μ m 以下粒子の含 有率 (%)	4~28	20 以上
スメクタイト含有率 (%)	10~27	20 以上
CEC 値 (cmol (+)/kg)	1.6~13	20 以上
変形係数 (MN/m ²)	12~85	780 以下
吸水膨張率 (%)	1.5~11	20 以上
吸水膨張圧 (kN/m ²)	30~140	—

*吉川¹⁶⁾を引用。

kN/m²以下の圧力で膨張することと整合しており、吸水膨張は約8m以深には進行しないと評価できる。すなわち、この破碎帯は土被りに応じた吸水膨張率を有すると評価できる。

(4) 泥質片岩破碎帯の変形係数は12~85MN/m²程度と小さい。一方、破碎帯周辺の塩基性片岩は硬質岩盤からなり、その変形係数は約1,600MN/m²程度と大きい。したがって、破碎帯で吸水膨張反応が生じた場合、変位は硬質岩盤で拘束された側方より開放面である上方へ現れやすい。

(5) 室内試験結果による吸水膨張は短時間で終了しているが、破碎帯地盤の隆起は掘削直後から始まり6年以上継続している。地中変位測定からは、地表付近の膨張はすでに収束ないし収束に向かっているように見える。これは、破碎帯の膨張が地表から地下へ徐々に進行していることを示している。

以上のように、大規模掘削による土被りの除去により、膨潤能力を有する破碎帯でスメクタイトの膨潤を主体とする吸水膨張反応が地表付近で発生し、膨潤反応は徐々に地下へ反応が進行し、土被り圧と膨張圧がバランスした深度で反応は収束するものと考えられる。

4.2 スメクタイトの成因

本サイトの南端には鮎喰川断層系に併走するリニアメントが北東—南西方向に認められ、サイト内の破碎帯もこれに併走する断層の一つと考えられる。

スメクタイトは一般に、風化と熱水変質により生成されると考えられている²⁰⁾。本地点の破碎帯は、約25mの切土がなされ、破碎帯は原岩と同じ黒灰色を呈し深度方向に一様にスメクタイトが生成されている。また、X線回折ではゲートサイト等の風化鉱物は認められないため、熱水変質作用によってスメクタイトが形成された可能性が高い。

田村²¹⁾は、四国中央構造線沿いの中期中新世熱水変質作用に関連して、四国中央構造線沿い

の破碎帯には、スメクタイトを伴う断層ガウジと伴わない断層ガウジがあり、スメクタイトを伴う断層ガウジは、中期中新世の貫入岩に伴う熱水変質によって形成された可能性が高いことを報告している。長谷川^{22),23)}は、中期中新世の熱水変質作用は、中央構造線のみでなく四国外帯にも14Ma花崗岩体が伏在し、地質帯を問わず四国地方に広く熱水変質帯が存在する可能性を指摘している。

以上を総括して、スメクタイトの成因を考察すると、鮎喰川断層およびそれに付随する断層に沿って、中期中新世に熱水変質作用が及び、スメクタイトが生成されたものと考えられる。

5. 破碎帯の隆起予測

5.1 レベル観測データによる隆起予測

経時的に実施した5年間のレベル測量データを用いて、時間依存型の指数関数(収束型関数)で隆起データを回帰し、50年後の隆起量を予測した。予測において収束型関数を用いた理由は、図-10のスメクタイト含有破碎帯の吸水膨張圧試験では30分程度で吸水膨張反応が終わり、以後に膨潤が認められないこと、また、伊藤⁷⁾も室内試験結果からスメクタイト粘土の膨潤圧は拘束下では飽和収束し一定値に落ち着くとの結果を得ていることによる。式(1)に隆起量観測による隆起予測式を示す。

$$\delta = \delta_{\infty}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

δ : 現在の隆起量(mm)

δ_{∞} : 収束隆起量(mm)

e : 自然対数の底

t : 経過時間(年)

τ : 遅延時間(年)

隆起観測値を用いた将来の予測結果を図-14に示す。図-14では、式(1)による近似曲線は観測値を良好に近似している。隆起量の大きいコンクリート基礎上の観測点No.6では、現時点の隆起量は基礎設置後6年半で66mmの隆起に対し、50年後では69mmの隆起量と予測され、本手法からは、基礎の隆起がほぼ収束しているものと評価できる。

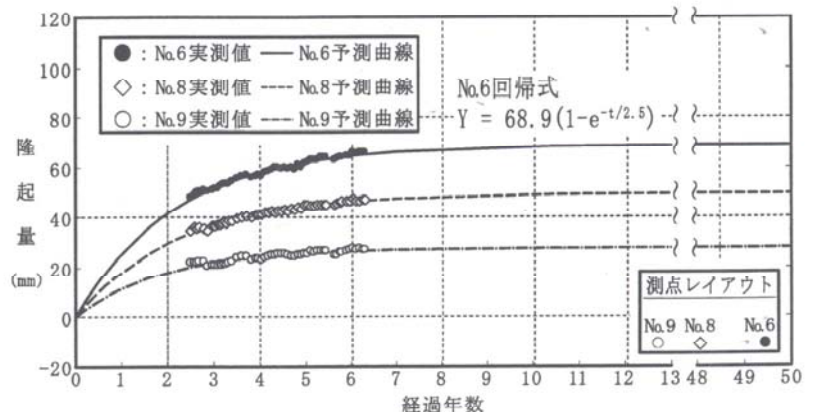


図-14 隆起観測データによる隆起予測の回帰

5.2 二次元FEM解析による隆起予測

5.2.1 破砕帯の隆起モデル

隆起メカニズムの検討から、二次元FEM解析による破砕帯隆起の再現モデルを以下のように設定した(図-15)。

(1)造成切土による上載圧の除去により、不飽和状態のスメクタイト含有破砕帯でスメクタイトの膨潤を主体とした吸水膨張反応が起こり膨張圧を発生させる。

(2)破砕帯は図-3の地質断面に示すように幅20mで、水平面から約50度南東方向に傾斜している。

(3)破砕帯は図-12の载荷圧力-吸水膨張率の相関図に示すように上載圧に応じた吸水膨張率を有する。

(4)破砕帯の変形係数、弾性係数は小さく、周辺地盤は硬い岩盤からなり変形係数、弾性係数が大きい。

解析に用いた地盤物性を表-5に示す。表-5の単位体積重量はボーリングコアの試験から、弾性係数はボーリング孔を用いた孔内水平载荷試験から求めた。

5.2.2 二次元FEM解析による隆起予測結果

FEM解析では初期地山状態、地盤の掘削後、基礎コンクリート設置後の各段階の応力変位解析を実施した。二次元FEM解析による膨潤過程は、温度応力解析コードを使用した。解析では破砕帯の膨張は基礎掘削直後から始まるものとし、図-12の载荷圧力-吸水膨張率の相関図からスメクタイト含有破砕帯の膨張を線膨張係数の大小による熱膨張に置き換えて解析した。

解析の手順を以下に示す。

(1)初期地山状態、地盤掘削後、基礎コンクリート設置後の各段階における応力解析を実施し、基礎設置直後の要素

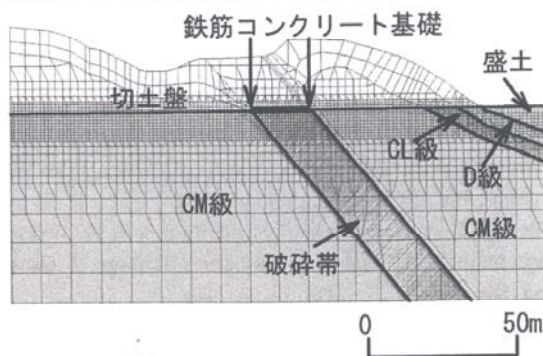


図-15 破砕帯の隆起モデルとFEM解析メッシュ

表-5 FEM解析に用いた物性値

	物理特性	変形特性 (静的)			
		単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	弾性係数 E (MN/m^2)	ポアソン比 ν	吸水膨張率 %
自然地盤	D級岩盤	22.1	490	0.40	—
	C ₁ 級岩盤	24.0	1,470	0.35	—
	C _w 級岩盤	26.5	3,920	0.30	—
	破砕帯	23.0	150	0.40	図-12参照*
盛土地盤	盛土	24.5	34	0.35	—
	鉄筋コンクリート	24.0	24,500	0.20	—

*図-12により上載圧に応じた吸水膨張率を設定。

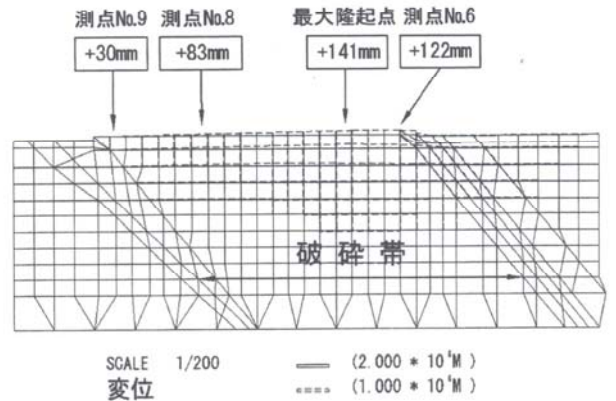


図-16 FEM解析による隆起予測結果(隆起部のみ拡大表示)

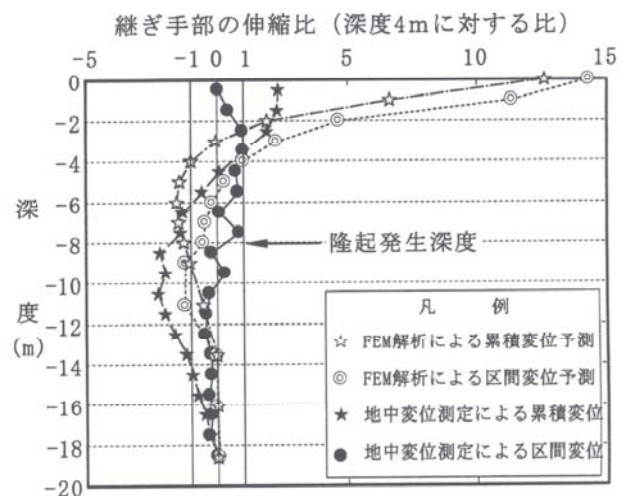


図-17 FEM解析による隆起予測と地中変位測定の変位形態の比較

応力を算出した。

(2)図-12の载荷圧力-吸水膨張率の回帰曲線から、基礎設置直後の要素応力に対応する破砕帯の膨張率を算出した。
(3)線膨張係数を $1/^\circ\text{C}$ と仮定し、膨張前の温度を 1°C 、膨張後の温度を $[1 + \text{膨張率}(\%) / 100(\%)]^\circ\text{C}$ とすることで、膨張率を模擬した。

FEM解析による最終隆起予測量は、基礎の北西端で30mm、南東端で122mm、ブロック内の南東寄りで最大141mm隆起し、収束型関数による最終隆起量より大きい。この隆起傾向は現地計測の傾向と一致し、破砕帯の傾斜を反映しているものと解釈できる。また、FEM解析による隆起予測結果のうち深度方向の解析結果と、CCDカメラを用いた地中変位測定結果を比較し、図-17のFEM解析の隆起予測と地中変位測定の変位形態の比較図に示す。図-17では、変位形態を比較するため、FEM解析値では深度4mに対する伸縮比を、地中変位測定では深度3.5mに対する伸縮比を深度ごとに示した。図-17によれば、FEM解析値と地中変位測定で得られた変位発生深度、変位傾向は類似しているが、深度3m以浅では、FEM解析値と地

表-6 FEMの隆起予測とレベル測定による隆起予測の比較
(単位: mm)

測点	No.6	No.8	No.9
FEM解析	122	83	30
レベル観測データによる予測 (50年後)	69	50	28

中変位測定値との間に乖離が認められる。これは、FEM解析では時間依存性を考慮せず、最終の収束変位を求める一方、地中変位測定値では基礎設置4年後の6か月間の測定データであるためと考えられる。この3m以浅の乖離は吸水膨張反応がすでに収束に向かっていることを示していると評価できる。

5.2.3 隆起モデルの妥当性

コンクリート基礎上の測点No.6地点におけるレベル測量による50年後の隆起予測結果は69mmで、FEM解析による最終隆起量は122mm程度と推定された。FEM解析による隆起予測とレベル測定による隆起予測の比較を表-6に示す。

隆起予測値に差異はあるものの、破碎帯の傾斜による隆起の偏りや深度方向の隆起傾向はFEM解析の隆起モデルで再現することができており、破碎帯の隆起モデルとして適切であると評価できる。表-4では、レベル測定による隆起予測に比較して、FEM解析による予測値が1.1~1.8倍程度と大きい。この差異は室内試験結果から設定した載荷荷重段階ごとの吸水膨張率より、実地盤の吸水膨張率がやや小さい可能性を示唆している。

6. ま と め

本研究では、スメクタイト含有率と吸水膨張圧の関係、載荷圧力と吸水膨張率の相関を示し、スメクタイト含有破碎帯の膨潤特性を明らかにした。また、これらの特性からFEM解析による最終隆起量の予測モデルを構築し、コンクリート基礎の隆起観測値と比較して、隆起モデルの妥当性を検証した。その結果は以下のようにまとめられる。

(1) スメクタイト含有破碎帯は、粘土含有量が7~42%の砂質粘土ないし粘土質砂からなり、間隙比が0.21~0.26、飽和度が68~83%の不飽和状態であり、吸水膨張反応を起こしやすい。

(2) 破碎帯の粘土試料はスメクタイトを含有量が10~27%含み、室内試験から破碎帯の吸水膨張圧は30~140kN/m²、吸水膨張率は1.5~11%の膨潤能力がある。

(3) スメクタイト含有破碎帯には、載荷圧力と吸水膨張率に負の相関があり、上載圧に応じた吸水膨張率を有していると評価できる。大規模掘削により地山の土被り約25mの上載圧が開放され、スメクタイトの膨潤を主体とする吸水膨張による破碎帯の盤膨れによりコンクリート基礎の隆起が発生したと評価できる。

(4) 破碎帯の吸水膨張による地盤隆起は、周辺岩盤が硬質

であることから、変位は側方より開放面である上方へ現われやすく、破碎帯が厚く分布する箇所では変位が大きくなる。(5) CCDカメラを用いた地中変位測定では、深度0.5m付近では吸水膨張反応は終了し、深度1.5~2.5mでは反応が収束に向かっていると評価されることから、スメクタイトの膨潤は破碎帯の地表付近から始まり、地下深部へと進行したと推定される。また、地中変位測定では破碎帯の膨張は深度7.5mまで達し、それ以深では膨張は発生していない。

(6) スメクタイト含有破碎帯の吸水膨張は、上載圧と膨張圧がバランスする深度8m付近まで進行し、スメクタイトの膨潤は終了するものと考えられる。

吸水膨張の室内試験における反応速度に比較して、現地での反応速度ははるかに遅い。これは不飽和の破碎帯が難透水地盤であり、スメクタイトの膨潤を主体とした吸水膨張反応がゆっくりと進行していたためと推定される。しかしながら、吸水膨張反応による透水係数や飽和度の詳細な深度方向への変化データは得られていない。吸水膨張速度の支配要因については今後の研究課題である。また、破碎帯の膨張量とスメクタイトの交換性陽イオンのタイプとの関係を明らかにすることも今後の課題である。

謝辞 本研究におけるX線回折によるスメクタイト含有率の分析は、(株)四国総合研究所顧問、金山清一博士のご指導のもとに実施した。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

引用文献

- 1) 地盤工学会(1988): 豊前系統開閉所切取り斜面の例, 地盤工学会ライブラリー33, 岩盤挙動の予測と実態, pp.7-22.
- 2) Goodman, R. E.(1993): Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.124-127.
- 3) Meehan, R. L., Dukes, M. T., and Shires, P. O.(1975): A case history of expansive claystone damage, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*101(GT9), pp.933-948.
- 4) 大山隆弘・千木良雅弘・大村直哉・渡辺良朋(1998): 泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ, *応用地質*, Vol.39, No. 3, pp.261-272.
- 5) 植本直之・大塚康範・満 弘之(1988): 膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果, *土と基礎*, Vol.36, No.5, pp.43-48.
- 6) 石田良二・神藤健一(1994): スメクタイトを含む軟岩劣化防止に関する研究, *応用地質*, Vol.35, No.5, pp.1-14.
- 7) 伊藤 駿(1980): 土の膨潤挙動からみた地盤災害, *土と基礎*, Vol.28, No.2, pp.31-38.
- 8) 朝倉俊弘・小島芳之(1995): 膨張性地山の調査・試験・解析, *地質と調査*, No.63, pp.7-14.
- 9) 土木学会(1992): 軟岩評価一調査・設計・施工への適用, pp.130-137.
- 10) 八木則男・矢田部龍一・丸山 圭・宮本 晃(1995): 中央構造線の断層破碎帯における一地すべりの特性, 平成7年度

- 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, pp.272-273.
- 11) 前田寛之(1996): 熱水変質帯地すべり—北海道紋別郡生田原町仁田布川流域の例—, 地すべり, Vol.33, No.3, pp.8-12.
- 12) 田村栄治・浄内 明・松崎伸一・萩原英樹(2002): スメクタイト含有破砕帯の膨潤特性と隆起予測, 日本応用地質学会平成14年度研究発表会講演論文集, pp.83-86.
- 13) 活断層研究会(1991): 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東海大学出版会, p.300.
- 14) 末峰 章(1998): 結晶片岩地域の予測しがたい地すべりの事例, 地すべり, Vol.34, No.4, pp.27-34.
- 15) 土質工学会(1989): CEC試験, 岩の調査と試験, pp.516-523.
- 16) 吉川恵也(1986): 軟岩地山におけるトンネル施工(1), 土と基礎, Vol.34, No.6, pp.69-76.
- 17) 白水春雄(1988): 粘土鉱物学—粘土科学の基礎—, 朝倉書店, pp.75-77.
- 18) 地盤工学会(1997): 地盤工学会基準案, 岩石の吸水膨張試験方法JGS 2121-1998, 土と基礎, Vol.45, No.10, pp.63-67.
- 19) 松元和伸・近石博志・小林 薫・中原博隆・筒井雅行・熊谷幸樹(2000): 画像処理技術を取り入れた地中変位計による室内傾斜実験について, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集Vol.3, pp.622-623.
- 20) 吉村尚久編者(2001): 粘土鉱物と変質作用, 地学団体研究会地学双書32, pp.18-19.
- 21) 田村栄治・長谷川修一・大野裕記(2001): 四国中央構造線沿いの中期中新世熱水変質作用, 日本地質学会第108年学術大会講演要旨, p.168.
- 22) 長谷川修一(2002): 四国の地すべりの素因としての中期中新世熱水変質作用, 愛媛大学・地盤工学会四国支部・地盤災害・地盤環境問題論文集, Vol.1, pp.47-54.
- 23) 長谷川修一(2002): 四国の地質現象の黒幕としての中期中新世珪長質火成岩体, 日本応用地質学会平成14年度研究発表会講演論文集, pp.23-26.

(2006年9月13日受付, 2007年1月19日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.48, No.2, pp.80-89, 2007

Swelling Characteristic and Upheaval Mechanism of Smectite-bearing Crush Zone in Crystalline Schist

Eiji TAMURA, Akira JYONAI, Shin-ichi MATSUZAKI and Syuichi HASEGAWA

Abstract

The concrete foundation set up on the cut ground has upheaved by 66 mm in seven years after unloading of ground which is 25 m in thickness. The upheaval of the foundation has been caused only at smectite-bearing crush zone in unweathered crystalline schists. The smectite content in the fault gauge is 10-15 %, and the smectite was generated by the hydrothermal alteration. In this paper, the swelling characteristic of the crush zone is shown by the in-situ investigation and the laboratory test. The upheaval of crush zone is estimated to have swelled gradually from the surface to in the ground. The observed swelling depth is coincident with overburden load. The upheaval model was made by the geological structure and using the relation between the load and the swelling rate of the smectite bearing crush zone. The upheaval convergence by the FEM analysis roughly coincides with that by the level observation.

Key words : ground upheaval, crush zone, smectite, swelling