

膨張性の風化軟岩を模擬したベントナイト混合試料の吸水膨張に伴う発生変位・応力の評価

電源開発 正会員 ○工藤 寛史, 中村 洋一
早稲田大学 正会員 伊藤 大知, 王 海龍, 小峯 秀雄
学生会員 藤縄 凱
応用地質 正会員 山本 有雅, 植村 一瑛
非会員 亀谷 裕志

1. 背景・目的

膨潤性粘土鉱物のスメクタイトは、水を吸収して体積膨張する性質を有する。その膨張特性自体は、市販のベントナイト材料を用いた室内試験により評価した事例¹⁾が主であり、得られた結果を自然地盤材料と比較および検討した報告例²⁾は少ない。

そこで本研究では、風化軟岩の膨張特性を定量的に評価することを目的とする。著者らは先行研究^{3),4)}にて、風化軟岩による自然試料およびベントナイト混合試料を対象とした吸水膨張率試験等の各種室内試験を実施し、結果を垂直応力ー吸水膨張率関係等に取りまとめた。今般、次のステップとして、市川らの研究⁵⁾を参考に、膨張性の風化軟岩を模擬したベントナイト混合試料の吸水膨張に伴う発生変位および応力を測定した。

2. 先行研究の室内試験結果の概要

まず、先行研究³⁾の概要を述べる。自然試料として、風化の進行度で分類された3種類の火山礫凝灰岩を用意し、その膨張特性を評価した。例として、3種類のうち風化進行度：小の自然試料の試験結果を表-1に示す。特徴として、乾燥密度は概ね1.2 (g/cm³)、交換性陽イオンはCa²⁺やMg²⁺の割合が多く、メチレンブルー（以下、MB）吸着量は22 (mmol(+)/100g)であった。純スメクタイトのMB吸着量を140 (mmol(+)/100g)とすると、スメクタイト含有率は16%と求まった。上載圧15 (kN/m²)の条件での吸水膨張率試験結果は、不攪乱試料で0.5%、攪乱試料で17.1%と試料状態で異なった。

次に、先行研究⁴⁾の概要を述べる。ベントナイト混合試料により自然試料の膨張特性を模擬するため、交換性陽イオン、スメクタイト含有率、供試体の乾燥密度に着目して配合設計を行った。ベントナイト材料にはCa型ベントナイトのクニボンド（クニミネ工業(株)製）を、混合する母材には非膨張性の珪石粉を採用し、乾燥密度が1.2 (g/cm³)となるよう静的締固めにより供試体を作製した。試験結果を表-2および表-3に示す。上載圧15 (kN/m²)の条件での吸水膨張率試験結果は7.6~16.1%と、混合試料と自然試料は概ね同等の膨張特性を示した。

表-1 先行研究³⁾における試験結果

名称	試料 状態	供試体 乾燥 密度	XRD	CEC	交換性陽イオン					MB 吸着量	吸水膨張率
			スメクタイト 含有量	cmol (+) /kg	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	総量	mmol(+) /100g (スメクタイト含有率%)	上載圧 : 15kN/m ² %
					cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	cmol (+)/kg		
自然試料 (風化進行度：小)	不攪乱	1.243	少量	38.3	1.6	1.5	25.4	12.6	41.1	22 (16%)	0.5
	攪乱	1.200									17.1

3. 吸水膨張特性試験

3.1 試験条件

市川らの研究⁵⁾を参考に、垂直方向の上載圧作用下にて、吸水膨張挙動時の吸水膨張率および側方応力を測定する吸水膨張特性試験を実施した。図-1に試験装置の模式図を示す。対象試料としては、先行研究⁴⁾にて自然試料と最大膨潤圧が同程度となった、表-3の混合試料②とした。供試体は乾燥密度が概ね1.2 (g/cm³)となるよう、静的締固めにより試験装置内で作製した。垂直方向の上載圧条件は、先行研究⁴⁾と結果を比較するため、15, 50, 150, 200, 300 および 400 (kN/m²)の6ケースとし、測定期間は1~3週間程度とした。

3.2 試験結果・考察

表-4に吸水膨張特性試験の結果を示す。なお、①静的締固めによる供試体作製過程、②上載圧載荷過程、③吸水膨張過程の全てで側方応力を計測し、供試体を試験装置内で作製したため、①以降に側方残留応力が存在する。図-2に示す垂直応力ー吸水膨張率関係より、吸水膨張率は垂直応力の増加に伴って小さくなる傾向にあり、上

表-2 先行研究⁴⁾における試験結果（材料特性）

名称	XRD	CEC	交換性陽イオン					MB 吸着量
	スメクタイト 含有量	cmol (+) /kg	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	総量	mmol (+) /100g
			cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	cmol (+)/kg	
ベントナイト材料 (クニボンド)	多量	72.6	11.5	1.3	52.8	13.2	78.8	94(67%)

表-3 先行研究⁴⁾における試験結果（吸水膨張率%）

名称	ベントナイト混合率 (スメクタイト含有率)	上載圧 (kN/m ²)			
		15	50	150	300
混合試料①	25% (17%)	7.6	2.6	-1.5	-2.8
混合試料②	35% (23%)	11.6	4.6	0.9	-2.3
混合試料③	45% (30%)	16.1	8.7	2.1	-1.5

載圧 300 (kN/m²)以上では体積膨張せず圧縮している。また、吸水膨張率が 0%となるときの垂直応力は約 200 (kN/m²)となり、これが本試験で用いた試料の最大膨潤圧と想定される。先行研究⁴⁾にて吸水膨張率試験結果から求めた最大膨潤圧は約 170 (kN/m²)であり、本試験でも概ね一致した傾向が得られた。

一方、図-3 に示す垂直応力-側方応力関係より、側方応力は垂直応力の増加に伴って大きくなる傾向となった。吸水膨張後の側方応力は、最大膨潤圧の約 200 (kN/m²)を境に、これより小さい領域では静止土圧係数 $K_0=1.0$ 付近、大きい領域では $K_0=0.5\sim1.0$ 程度、大きくなるほど $K_0=0.5$ に近づいていく傾向となった。本試験のベントナイト混合試料は、表-3 の通り、スメクタイト含有率は 23%程度で含有量自体が少ない。垂直応力が最大膨潤圧未満の領域では、膨張挙動の効果により、市川⁵⁾と同様に垂直応力=側方応力の傾向が現れて $K_0=1.0$ 程度となったと考えられる。一方、垂直応力が最大膨潤圧以上の領域では、膨張挙動に伴う変形が起きていないことから、膨張挙動の効果が弱く、一般的な土質地盤材料相当の $K_0=0.5$ に近づいていく傾向となったと考えられる。

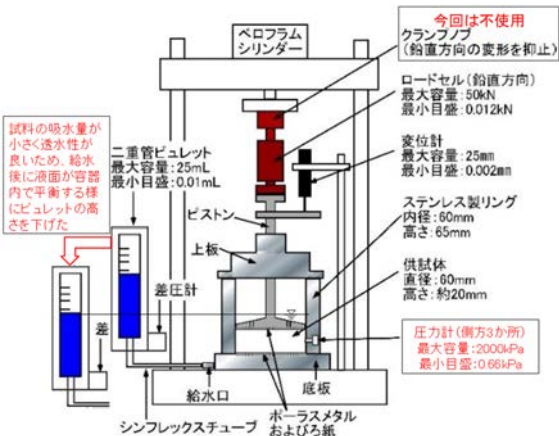


図-1 試験装置の模式図 (市川ら⁵⁾に加筆)

表-4 混合試料②による吸水膨張特性試験結果

試験過程	試験段階	応力 (kN/m ²) ・ 膨張率 (%)	試験ケース (応力 (kN/m ²)または吸水膨張率 (%))					
			15	50	150	200	300	400
①供試体作製過程	上載圧載荷前	垂直応力	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
②上載圧載荷過程		側方応力	22.7	20.7	26.0	17.6	15.4	12.8
③吸水膨張過程	吸水膨張前	垂直応力	15.0	55.1	151.7	195.1	297.0	393.2
		側方応力	29.2	45.1	83.3	87.5	120.1	166.7
	吸水膨張後	垂直応力	15.0	60.7	151.7	199.4	294.8	394.5
		側方応力	41.5	75.2	133.9	144.1	163.4	216.6
		吸水膨張率	8.4%	3.3%	2.1%	1.3%	-1.5%	-2.8%
	吸水膨張前後	側方応力増分	12.4	30.1	50.6	56.6	43.3	49.9

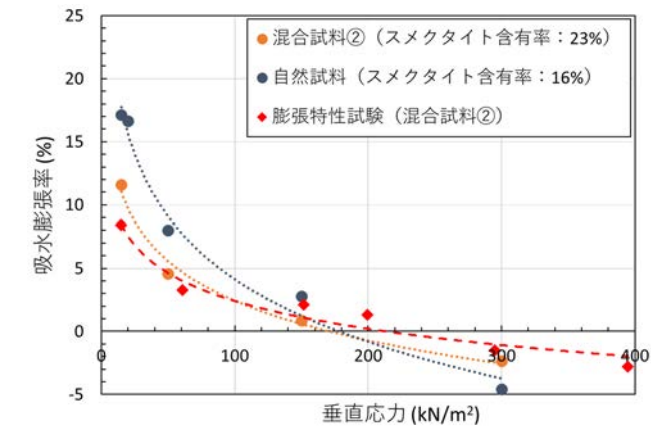


図-2 垂直応力-吸水膨張率関係

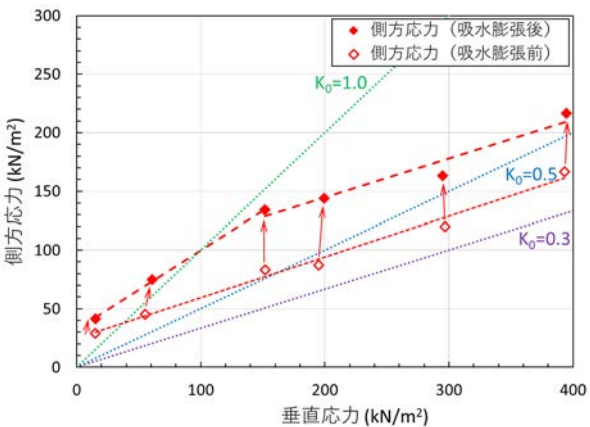


図-3 吸水過程の垂直応力-側方応力関係

4. 結論・今後の課題

- ベントナイト混合試料を対象とした吸水膨張特性試験結果から、結論と今後の課題を以下に挙げる。
- 風化軟岩を模擬したベントナイト混合試料により、吸水膨張特性試験を実施したところ、垂直応力-吸水膨張率の関係では先行研究と同様の傾向が見られたほか、垂直応力-側方応力の関係では垂直応力と最大膨潤圧の関係から、膨潤挙動時の静止土圧係数の評価に関して考察した。
 - 今後は、得られた試験結果を基に、膨張性地盤が構造物周辺に存在する場合に、構造物に作用する膨潤圧に関して検討する。

参考文献

1) 小峯秀雄, 緒方信英: 砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨張特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.378-385, 2002.
2) 田村栄治, 浄内明, 松崎伸一, 長谷川修一: 結晶片岩中のスメクタイト含有破砕帯の膨張特性と隆起メカニズム, 応用地質, Vol.48, No.2, pp.80-89, 2007.
3) 工藤寛史, 中村洋一, 藤縄凱, 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄, 亀谷裕志, 若林徹: 風化の影響を受けた自然地盤材料を対象とした膨張特性の評価, 土木学会第 76 回年次講演会, III-321, 2021.
4) 工藤寛史, 中村洋一, 藤縄凱, 伊藤大知, 王海龍, 小峯秀雄, 亀谷裕志, 若林徹: 風化の影響を受けた自然地盤材料を模擬としたベントナイト混合材料の膨張特性の評価, 土木学会第 77 回年次講演会, III-87, 2022.
5) 市川雄太, 小峯秀雄, 伊藤大知, 関口高志, 北原慎也: 締固めた粒状ベントナイトの吸水に伴う鉛直方向および側方の発生応力同時測定, 土木学会第 73 回年次講演会, III-127, 2018.