

수정 fluid loss 시험을 이용한 연직 차수벽에 생성된 벤토나이트 필터케익 특성 평가

Characteristics of Bentonite Filter Cake on Vertical Cutoff Walls Evaluated by Modified Fluid Loss Test

웡 테 바오¹ Nguyen, The-Bao

박 문 서² Park, Moonseo

임 지 희² Lim, Jeehee

최 항 석³ Choi, Hangseok

한 신 인⁴ Han, Shin-In

Abstract

During the construction of vertical cutoff walls, filtration of bentonite slurry into the adjacent soil formation fabricates a layer of bentonite filter cake on the wall surface. The bentonite filter cake possesses much lower hydraulic conductivity compared to that of backfill materials in the cutoff wall. Hydraulic conductivity of bentonite filter cakes formed with three different types of bentonites has been measured by performing the modified fluid loss test under various pressure levels. Three different mixture ratios, 4, 6, and 8%, were selected for fabricating bentonite filter cakes to represent common field conditions. Two analysis methods for interpreting the experimental data from the modified fluid loss tests were employed to estimate hydraulic conductivity of the bentonite cakes. The range of hydraulic conductivities of the three bentonite cakes is between 2.15×10^{-11} m/s and 2.88×10^{-10} m/s which is 1 to 2.7 orders of magnitude lower than that of the design cutoff wall backfill. The stress distribution and thickness of the bentonite cakes were also evaluated in this paper.

요 지

연직 차수벽 시공 시, 벤토나이트 슬러리는 토양층으로 여과되면서 차수벽의 측벽 표면에 필터케익 층을 형성하고 이렇게 형성된 필터케익은 차수벽의 자체 투수계수보다 매우 낮은 값을 갖는다. 본 연구에서는 수정 fluid loss 시험을 수행하여 다양한 작용압력 하에서 슬러리될 시공현장에서 주로 사용되는 세 가지 종류의 벤토나이트로 형성된 필터케익의 투수계수를 평가하였다. 수정 fluid loss 시험에서는 일반적인 연직 차수벽 시공 조건을 반영하기 위해 중량비 4, 6, 8% 농도의 벤토나이트 슬러리를 적용하였다. 벤토나이트 필터케익의 투수계수를 예측하기 위해 수정 fluid loss 시험 결과를 기존에 제안된 두 가지 방법을 이용하여 해석하였다. 본 연구결과로부터 평가된 세 가지 벤토나이트 필터케익의 투수계수는 2.15×10^{-11} m/s와 2.88×10^{-10} m/s 범위로 이는 일반적인 연직차수벽 뒤채움재의 설계값 보다 10-1000배 가량 작음을 알 수 있다. 또한, 필터케익 내 응력분포와 필터케익의 두께가 각 조건에 대해 비교되었다.

Keywords : Hydraulic conductivity, Bentonite slurry, Bentonite cake, Filtration, Cutoff wall, Modified fluid loss test

1 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

4 정희원, (주)서영엔지니어링 연구소/상무 (Member, Director, R&D Center, Seoyeong Engrg. Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

벤토나이트 슬러리는 연직 차수벽 시공 중, 굴착된 트렌치 벽면붕괴에 대한 안정성 확보를 위하여 사용된다. 굴착면의 안정성은 슬러리에 의해 가해지는 수평방향 슬러리 압력에 의해 유지되고 이러한 연직 차수벽 시공 중에는 벤토나이트 필터케익이 형성된다(Xanthakos, 1979; Filz 등, 1997; Henry 등, 1998; Britton 등, 2004; Soroush 과 Soroush, 2005). 벤토나이트 슬러리는 트렌치 측벽 지반 내 간극수와 슬러리 간의 포텐셜 차이로 인해 토양 내로 침투된다. 만약 토양의 간극이 슬러리 입자에 비해 충분히 작다면, 필터케익은 측벽 표면에만 형성된다. 반면, 토양 입자가 충분히 크다면 슬러리 내의 부유성 실트 및 미세 입자들은 지반 내로 침투될 것이고, 필터케익은 지반 내 흠 입자 사이를 매우며 형성된다(Xanthakos, 1979; Filz 등, 1997).

필터케익의 낮은 투수성과 이들이 형성되는 위치는 연직 차수벽의 차수 성능에 큰 영향을 미친다. 이는 필터케익 층의 상대적으로 낮은 투수계수가 수평 방향 지하수의 흐름을 제어하는 연직 차수벽의 성능을 향상시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 필터케익은 상대적으로 불투수성 막과 같은 역할을 하므로 연직 차수벽의 수리경계조건을 변화시킨다. 결국, 필터케익과 연직 차수벽의 투수성을 모두 고려한 등가 투수계수는 연직 차수벽의 차수 성능을 평가하는데 매우 중요한 요소이다. 등가 투수계수는 필터케익과 뒷채움재의 투수계수를 각 두께를 가중한 조화평균으로 구할 수 있다.

Fluid loss 시험은 여과지 위의 생성된 필터층에 일정한 압력을 가할 때 연속적으로 필터 층으로 빠져나오는 물의 양을 측정함으로써 필터층의 수리학적 특성을 평가하는 시험이다(ASTM D 5891, 2002). Fluid loss 시험은 API(American Petroleum Institute) RP 13B-1(1990)에 명시된 Filter press 시험을 수정한 시험 방법이다. 지금까지 API Filter press 시험으로부터 필터층의 투수계수를 측정할 수 있는 방법에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다(Barvenik과 Ayres, 1987; Grube, 1992; Heslin 등, 1997; Henry 등, 1998; Filz 등, 2001). 하지만, 이러한 방법들은 시험 절차가 복잡하거나 결과해석에 어려움이 있어 적용성이 제한적이다. Henry 등(1998)은 굴착면에 형성된 벤토나이트 필터케익의 투수계수를 예측하는데 있어, 다음과 같이 Nash(1974)가 제시한 질량 보존 관계를 적용하였다.

$$k_c = \frac{\gamma_w(1-n_s)V^2}{2tp_0A^2(n_s-n_c)} \quad (1)$$

여기서, k_c =필터케익의 투수계수, γ_w =유출수(물)의 단위 중량, n_s =슬러리의 간극률, V =시간에 따른 여과된 물의 부피, p_0 =슬러리에 작용하는 압력, A =필터케익의 단면적, n_c =필터케익의 간극률을 의미한다. Henry 등(1998)이 제안한 방법은 슬러리의 간극률을 구하기 위해 슬러리의 함수비를 직접 측정해야 하고 산정된 투수계수 값의 범위가 매우 커질 수 있는 단점을 갖는다(Chung, 2004; Chung과 Daniel, 2008).

Chung과 Daniel(2008)에 의해 제안된 수정 fluid loss 시험법은 벤토나이트 필터케익의 투수계수를 측정하기 위해 기존 fluid loss 시험을 개선한 방법으로서 Rushton 등(2000)의 여과이론(filtration theory)을 기초로 한다. 본 연구에서는 필터케익의 투수계수 산정시, 여과 과정시 필터층의 수리적 저항을 무시하여 Chung과 Daniel(2008)이 제안한 방법과 필터층의 수리적 저항을 고려할 수 있는 Ruth(1935)가 제안한 방법을 적용하여 그 결과를 비교하였다.

2. 수정 fluid loss 시험 방법 및 시료의 기본 물성

앞서 언급한 것과 같이 포화된 필터케익의 투수계수를 구하기 위해 기존 Fluid loss 시험법(ASTM D5891, 2002; API RP 13B-1, 1990)을 적용하는 것은 정확도가 떨어지므로 신뢰성 있는 투수계수를 측정하기 위한 API filter press 시험법에 대한 많은 개선들이 이루어져 왔다(Henry 등, 1998; Filz 등, 2001; Chung, 2004; Chung과 Daniel, 2008). Chung과 Daniel(2008)이 제안한 수정 fluid loss 시험법은 필터케익의 투수계수를 측정하기 위해 여과이론(filtration theory)을 기초로 하여 제안되었다. 이 방법에서는 필터케익의 투수계수와 간극비 관계를 규명하기 위해 여과율 및 필터케익의 함수비를 측정해야 한다. 수정 fluid loss 시험은 여과된 유출수의 부피 측정 빈도와 작용압력 범위를 제외하고는 ASTM D5891(2002)에 기술된 절차를 따른다.

Chung과 Daniel(2008)은 영국 단위계에 기초하여 69, 138, 207, 345, 483, 690kPa의 압력을 적용하였으나 본 논문에서는 SI 단위계에 기초하여 70, 140, 210, 350, 480, 690kPa의 압력을 적용하였다. 이 작용압력은 연직 차수벽 시공 현장에서 필터케익이 형성될 때 발생하는

일반적인 슬러리의 압력범위이다. 그림 1은 개략적인 수정 fluid loss 시험장비 모식도를 보여준다.

수정 fluid loss 시험에서는 일정 시간동안(일반적으로 1시간) 여과과정 중 유출수의 부피가 5~6회 측정된다. 이 때 셀에는 작용압력이 일정하게 유지되어야 한다. 유출수의 부피 측정이 종료된 후에는 필터케익의 함수비를 측정하기 위해 필터케익 상부 표층에 슬러리 부유물을 제거한 후, 필터케익을 추출하여 함수비를 측정한다. 필터케익은 완전 포화상태이므로 필터케익의 평균 간극비는 측정된 함수비와 흡 입자의 비중을 이용해 계산한다. 이 필터케익의 간극비와 여과시간 특성 곡선을 이용하여 필터케익의 투수계수를 산정한다.

본 연구에서 적용한 벤토나이트 시료는 Tixoton, Bentonil GTC4, DY-100S 세 가지이며, 연직 차수벽 시공시 굴착면을 안정시키는데 일반적으로 사용되는 토목용 벤토나이트이다. Tixoton과 Bentonil GTC4는 팽창성과 수밀성 향상을 위해 고분자 첨가물(carboxymethyl cellulose, 이하 CMC)로 처리된 벤토나이트이고, DY-100S는 미처

리 벤토나이트이다. 표 1은 세 가지 시료의 X-ray 회절(XRD) 분석 시험결과를 보여주는데 Tixoton과 Bentonil GTC4는 Akther et al.(2007)에 제시한 값이고, DY-100S는 이 연구에서 측정된 값이다. Tixoton과 Bentonil GTC4는 각각 85.0%, 83.0%의 몬트모릴로나이트를 함유하고 있어 62.9%를 함유한 DY-100S 보다 재료의 팽윤성이 우수할 것으로 예상할 수 있다. 본 시험에 사용된 슬러리의 벤토나이트 배합 비율은 현장에서 일반적으로 사용되는 값인 중량비 4, 6, 8%를 적용하였다.

각 벤토나이트의 양이온 치환능력(Cation Exchange Capacity, CEC)은 메틸렌 블루(MB) 시험법(ASTM C 837, 2009)으로 측정하였다. 또한 벤토나이트 시료의 팽창지수(swell index)는 ASTM D5890(2006)에서 규정하는 자유팽창시험(free swell test)을 수행하여 측정하였다. 세 가지 벤토나이트의 양이온 치환능력과 팽창지수는 표 2에 나타냈다. CMC로 처리되고 높은 몬트모릴로나이트 함유량을 갖는 Tixoton과 Bentonil GTC4가 DY-100S 보다 상대적으로 큰 팽창지수를 보임을 알 수 있다.

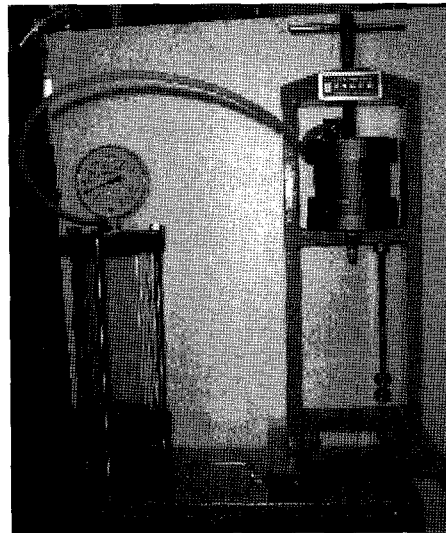
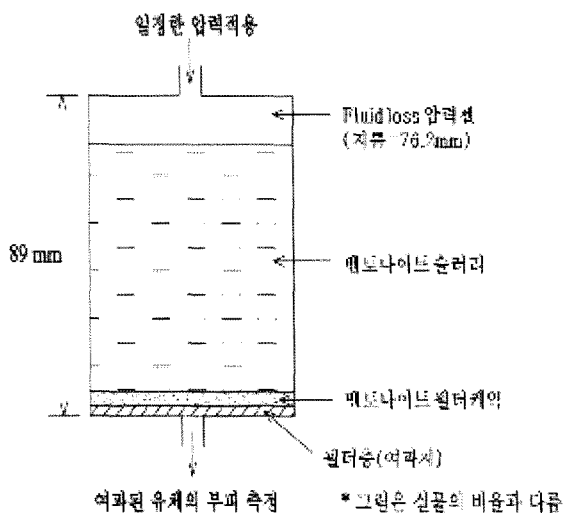


그림 1. Fluid loss 시험장비 모식도

표 1. XRD 분석에 의한 벤토나이트 시료의 광물 성분 구성비(%)

광물 성분 구성비 (%)	Qtz	Pl	K-f	Hbl	Cal	Mnt	Op	Py	Syl
벤토나이트 종류									
Tixoton ¹	1.0	2.2	6.0	-	-	85.0	3.3	-	2.5
Bentonil-GTC4 ¹	2.0	5.3	6.0	1.5	0.4	83.0	0.5	0.2	1.1
DY-100S	4.4	18.7	-	-	3.4	62.9	0.6	3.3	6.7

¹After Akther et al. (2007)

*Qtz: 석영, Pl: 사장석, K-f: K-장석, Hbl: 각섬석, Cal: 방해석, Mnt: 몬모릴로나이트, Op: 오파, Py: 황철광, Syl: 칼리암염

표 2. 벤토나이트 시료의 양이온 치환능력과 팽창지수 결과

벤토나이트 종류	Tixoton	Bentonil-GCT4	DY-100S
CEC(meq/100g)	58	78	64
팽창 지수(ml/2g)	26.3	27.5	23.8

3. 여과이론(filtration theory)의 적용

수정 fluid loss 시험은 연직 차수벽 시공시, 형성되는 필터케익과 동일한 조건을 재연할 수 있다. 시험에 사용된 벤토나이트 슬러리는 시공 현장에서 사용되는 것과 동일한 종류이며 적용된 작용압력도 연직 차수벽의 필터케익 형성시 현장에서 슬러리에 의해 가해지는 압력 범위이다.

필터케익이 형성되는 과정에 대한 이론적 해석은 Rushton 등(2000)에 의해 제시된 여과이론(filtration theory)을 적용하였다. 여과이론은 유체가 필터층을 통과할 때 발생하는 압력저하와 필터층을 통과한 유체의 유량 사이의 관계에 기초한다(Darcy, 1856). 필터층(즉, 섬유, 여과지 또는 토사층) 내 간극에서의 브리징(bridging) 현상에 의해 필터케익에서 여과가 발생하게 되고 Rushton 등(2000)은 이러한 여과과정을 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 p_0}{\mu c V \alpha} \quad (2)$$

여기서, V =필터층을 통과한 유체 부피, t =여과 시간, A =여과 면적, p_0 =압력저하(=셀에 작용하는 총 압력), μ =유체의 점성, c =여과된 유체 체적당 형성된 필터케익의 건조질량, α =필터케익의 수리 비저항을 의미한다. 압축성이 큰 필터케익의 경우 여과된 유체 체적당 형성된 필터케익의 건조질량(즉, 식 (2)에서 c)은 다음과 같이 표현된다.

$$c = \frac{s\rho}{1-sm} \quad (3)$$

여기서, s =슬러리 내 점토 입자의 질량비, ρ =유체의 밀도, m =필터케익의 함수율(Cake moisture ratio)이다. 필터케익의 함수율, m 은 다음과 같이 표현된다.

$$m = \frac{\text{습윤 필터케익 질량}}{\text{건조 필터케익 질량}} = 1 + \frac{(1-C)\rho}{C\rho_s} \quad (4)$$

여기서, C =필터케익 내 점토 입자의 체적비($C=1-n$, n =

필터케익의 간극률), ρ_s =점토 입자의 밀도이다. 식 (2)에서 제시된 필터케익의 수리 비저항(α)은 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{1}{kC\rho_s} \quad (5)$$

여기서, k =필터케익의 고유투수계수(intrinsic permeability)이다. 따라서, 필터케익의 수리 비저항(α)은 필터케익의 고유투수계수와 반비례의 관계를 갖음을 알 수 있다. 필터케익의 투수계수 k_c 는 필터케익의 고유투수계수(k)로부터 구해지며 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_c = \frac{k\gamma_w}{\mu} \quad (6)$$

식 (2)에서의 압력저하(p_0)는 유체가 필터층과 필터케익을 통과할 때 발생하는 총 압력저하를 의미한다. Darcy의 법칙을 적용하면 다음과 같은 일반적인 필터케익에 대한 여과이론식이 얻어진다.

$$p_0 = \frac{\mu c \alpha}{A^2} V \frac{dV}{dt} + \frac{\mu}{A} R_m \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

여기서, $R_m = L_m/k_m$ (L_m =필터층의 두께, k_m =필터층의 고유투수계수)이다. 식 (7)에서 우변의 첫 번째 항은 유체가 필터케익을 통과할 때 발생하는 압력저하이며 두 번째 항은 필터층을 통과할 때 발생하는 압력저하이다.

수정 fluid loss 시험에서는 여과 과정 동안 작용압력이 일정하게 유지된다. 따라서 식 (7)의 좌변과 우변을 정리하여 각각 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^t dt = \frac{\mu c \alpha}{A^2 p_0} \int_0^V V dV + \frac{\mu R_m}{A p_0} \int_0^V dV \quad (8)$$

식 (8)을 적분하여 결과를 정리하면 선형화된 포물선 관계로서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 p_0} V + \frac{\mu R_m}{A p_0} \quad (9)$$

수정 fluid loss 시험에 의해 얻어지는 V 에 따른 t/V 관계를 이용해 식 (9)의 기울기 및 절편을 구할 수 있다. 따라서 필터케익의 투수계수(혹은 수리 비저항)는 이 기울기를 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서 V 와 t/V 의 기울기를 θ (즉, $\theta = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 p_0}$)로 정의한다. 절편 값은 필

터층의 투수계수(혹은 수리 비저항)를 구하는데 사용된다. 필터층의 수리적 저항을 고려할 수 있는 Ruth(1935)가 제안한 방법을 적용하여 기울기로부터 유도한 필터케익의 투수계수는 다음과 같다.

$$k_c = \frac{\gamma_w s \rho}{2A^2 \Delta PC \rho_s \left(1 - s \left(1 + \frac{1-C}{C} \frac{\rho}{\rho_s}\right)\right) \theta} \quad (10)$$

Ruth(1935)가 제안한 방법과는 달리 Chung과 Daniel(2008)이 제안한 해석 방법에서는 유체가 여과되는 동안 필터층의 수리 비저항은 무시하였다. 이러한 가정은 필터층의 유체 흐름에 대한 저항이 필터케익에 비해 상당히 작은 경우에 적합하다(본 시험에 사용된 필터층은 여과지이므로 이 Chung과 Daniel(2008) 가정이 타당하다 사료됨). 이러한 가정을 바탕으로 Chung과 Daniel(2008)이 유도한 $p_0 t / V$ 와 V 의 선형 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{p_0 t}{V} = \frac{\beta \gamma_w}{2A^2 k_c} V \quad (11)$$

여기서, β =여과된 유체의 체적에 대한 필터케익 체적비이다. β 는 여과 시스템을 통과하는 유체와 점토 입자의 질량 보존 법칙으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{s \rho}{(1-s) C \rho_s - s(1-C) \rho} \quad (12)$$

수정 fluid loss 시험으로부터 얻어진 V 에 대한 $p_0 t / V$ 의 그래프를 통해 식 (11)의 기울기를 구할 수 있으며, 본 연구에서는 이 기울기를 ϕ 로 정의하였다(즉, $\phi = \frac{\beta \gamma_w}{2A^2 k_c}$). 따라서 필터케익의 투수계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$k_c = \frac{\beta \gamma_w}{2A^2 \phi} \quad (13)$$

본 연구에서는 벤토나이트 필터케익의 투수계수를 측정하기 위해 Ruth(1935)가 제안한 방법과 Chung과 Daniel(2008)이 제안한 방법을 이용하여 상호 비교하였다.

또한, 필터케익 내 유효응력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_z' = p_0 \left(1 - \frac{z}{L}\right)^{1/(1-\eta)} \quad (14)$$

여기서, σ_z' =필터케익 내 깊이 z 에서의 유효응력, L =필터케익 층의 두께, 또한 η 는 $\log k - \log p_0$ 그래프의 기울기를 의미한다.

또한, 지금까지 유도된 여과이론식을 통해 필터층 표면에 생성되는 필터케익의 두께를 다음 식에 의해 이론적으로 계산될 수 있다.

$$L = \frac{\beta V}{A} \quad (15)$$

식 (15)는 필터케익 체적과 여과된 유체의 체적 간의 선형관계를 기초로 한다(Rushton 등, 2000). 생성된 필터케익의 두께는 수정 fluid loss 시험이 완료된 후 직접 측정할 수도 있고, 여과된 유체의 체적과 여과된 유체의 체적에 대한 필터케익 체적비(β)의 관계를 이용하여 식 (15)와 같이 계산하여 구할 수도 있다.

4. 시험 결과 및 분석

필터케익의 투수계수는 일반적으로 작용압력 8 kPa에서 100kPa 범위에서 약 3.0×10^{-11} m/s에서 2.0×10^{-10} m/s 범위의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Henry 등, 1998). Chung과 Daniel(2008)은 Barakade, CG50, Bentomat ST의 세 가지 벤토나이트에 대해 69kPa에서 690kPa 범위의 작용압력 하에서 필터케익의 투수계수가 8.2×10^{-12} m/s에서 3.5×10^{-10} m/s 사이의 값을 갖는다고 보고하였다. 앞에서 제안된 모든 투수계수의 범위는 오직 6% 농도의 벤토나이트 슬러리에 대한 시험 결과이다. 본 연구에서는 Tixoton, Bentonil GTC4, DY-100S의 세 가지 다른 종류의 벤토나이트에 대해 4, 6, 8%의 다른 슬러리 농도를 고려하여 수정 fluid loss 시험을 수행하고, 그 결과를 이용하여 필터케익의 투수계수를 평가하였다.

그림 2와 그림 3은 각각 Chung과 Daniel(2008) 방법을 적용한 $p_0 t / V - V$ 그래프와 Ruth(1935) 방법을 적용한 $t / V - V$ 그래프를 보여준다. 두 그래프 모두 각 작용압력 70, 140, 210, 350, 480, 690kPa 하에서 6% 농도의 Tixoton 슬러리에 대한 시험 결과를 대표적으로 보여준다. Chung과 Daniel(2008) 방법에서는 유체가 여과되는 동안 필터층의 수리적 저항을 무시했기 때문에 $p_0 t / V - V$ 그래프를 원점을 지나는 직선으로 나타낸다. 반면, Ruth(1935) 방법에서는 필터층의 수리적 저항을 고려하여 $t / V - V$ 그래프로 원점을 지나지 않고 t / V 축과 절편을 갖는다. Chung과 Daniel(2008)의 방법에서 $p_0 t / V - V$ 그

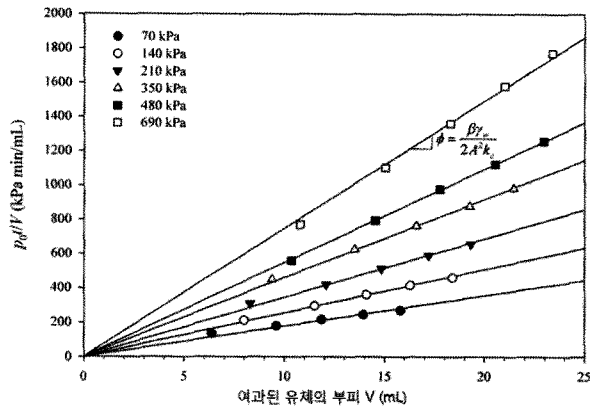


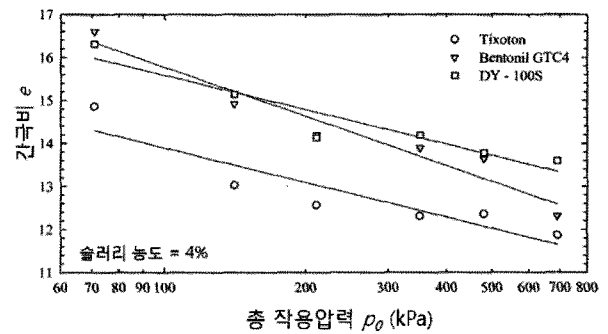
그림 2. Tixoton 필터케익의 $p_0t/V-V$ 관계(6% 벤토나이트 슬러리)



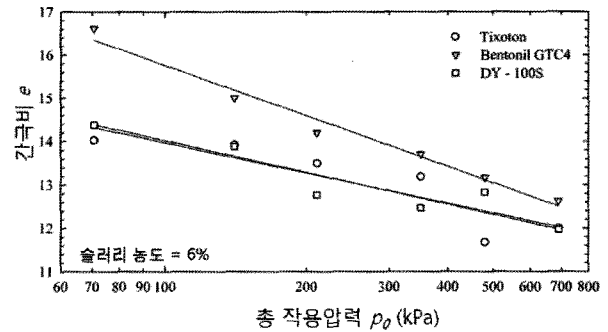
그림 3. Tixoton 필터케익의 $t/V-V$ 관계(6% 벤토나이트 슬러리)

래프의 기울기는 총 작용압력(p_0)이 증가할수록 증가한다. 반면 Ruth(1935)의 방법에서 $t/V-V$ 그래프의 기울기(θ)가 총 작용압력에 대해 정규화 되어(식 (9) 참조) 총 작용압력이 증가할수록 감소한다. 그림 4에서 7은 수정 fluid loss 시험을 통해 구해진 $p_0t/V-V$ 및 $t/V-V$ 를 이용한 각 해석결과를 보여준다.

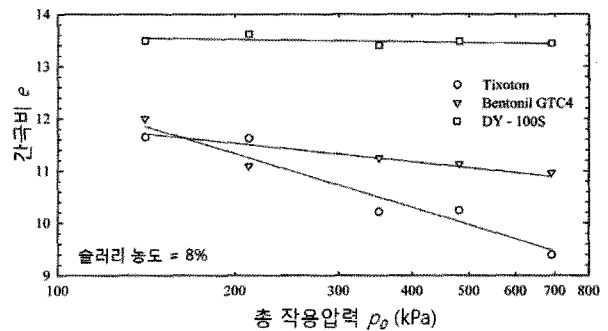
그림 4는 총 작용압력이 증가할수록 필터케익의 간극비가 감소하는 전형적인 경향을 보여준다. 8% 농도의 벤토나이트 슬러리의 경우, 총 작용압력 70kPa 이하는 여과를 발생시킬 수 없었다. 세 가지 종류의 벤토나이트 필터케익의 간극비는 총 작용압력 70~690kPa 범위에서 9.0에서 17.0 사이의 값을 갖는다. 동일한 작용압력에서 Tixoton 필터케익은 Bentonil GTC4와 DT-100S 필터케익에 비해 가장 작은 간극비를 갖는다. 벤토나이트 슬러리 농도가 증가할수록 필터케익의 간극비는 감소하는 경향을 보이는데, DY-100S 필터케익의 경우, 간극비에 대한 슬러리 농도의 영향이 가장 적었고, 반면에 Bentonil GTC4 필터케익이 간극비에 대한 슬러리 농도의 영향이 가장 크다.



(a) 4% 벤토나이트 슬러리



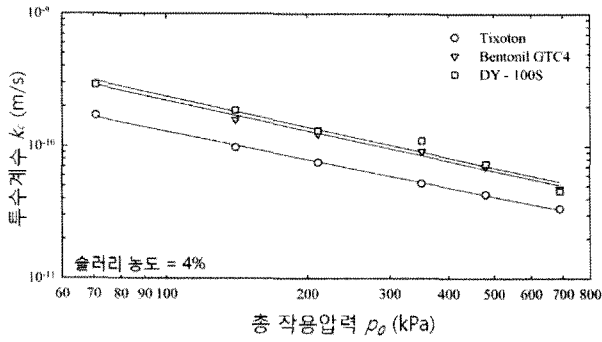
(b) 6% 벤토나이트 슬러리



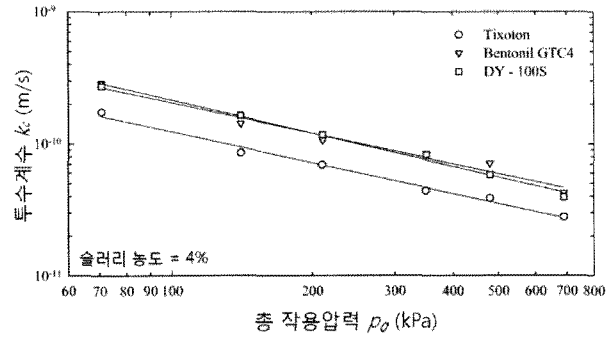
(c) 8% 벤토나이트 슬러리

그림 4. 슬러리 농도에 따른 필터케익의 간극비-총 작용압력 관계

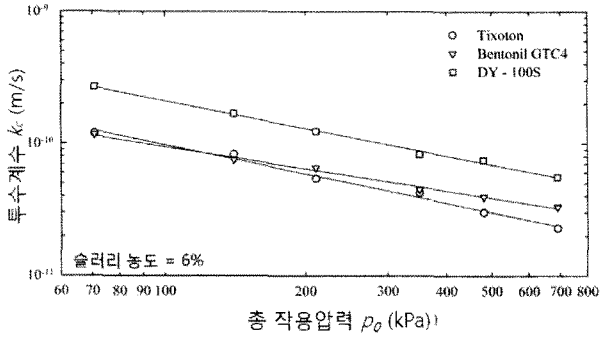
그림 5과 그림 6에서는 Chung과 Daniel(2008) 방법과 Ruth(1935) 방법을 사용하여 Tixoton, Bentonil GRC4, DY-100S 벤토나이트 필터케익의 투수계수와 총 작용압력 사이의 관계를 보여준다. 일반적으로 Chung과 Daniel (2008) 방법은 필터케익의 투수계수를 과대평가하는 경향이 있다고 보고되는데, 이는 이 방법이 필터층의 수리적 저항을 고려하지 않기 때문이다. 하지만, 본 연구에서는 여과지를 필터층으로 적용하였으므로 필터층의 수리 저항이 상대적으로 무시할 만큼 작기 때문에 두 방법을 적용한 결과 차이가 매우 작아 두 방법이 유사한 k_c-p_0 관계를 도출함을 확인할 수 있다. 그러나, 필터층으로 여과지가 아닌 토양층과 같은 수리저항이 큰 매질이 사용될 경우, 필터케익의 투수계수 사정시, 필터층의



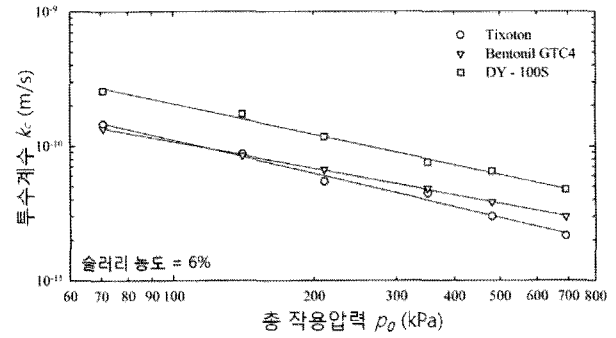
(a) 4% 벤토나이트 슬러리



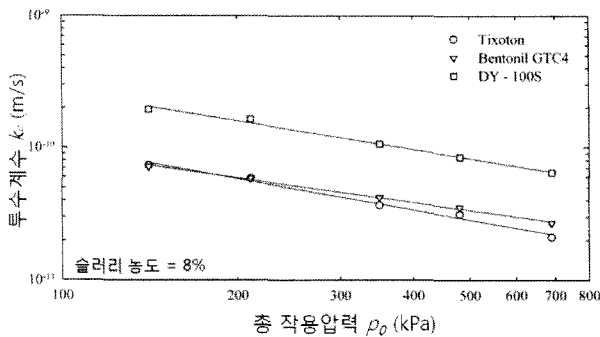
(a) 4% 벤토나이트 슬러리



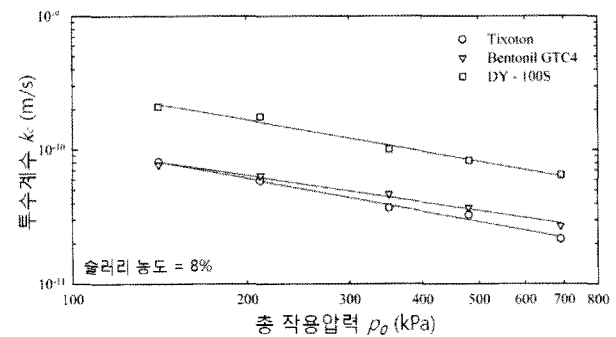
(b) 6% 벤토나이트 슬러리



(b) 6% 벤토나이트 슬러리



(c) 8% 벤토나이트 슬러리



(c) 8% 벤토나이트 슬러리

그림 5. 슬러리 농도에 따른 필터케익의 투수계수-총 작용압력 관계 (Chung과 Daniel(2008) 방법)

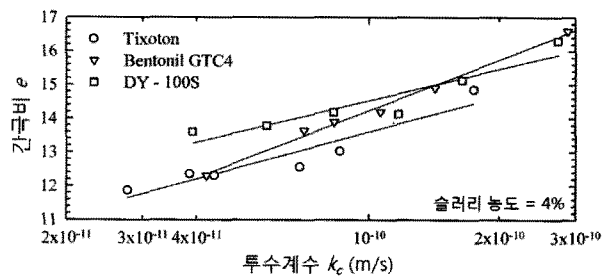
그림 6. 슬러리 농도에 따른 필터케익의 투수계수-총 작용압력 관계 (Ruth(1935) 방법)

저항을 고려하기 위해서는 Ruth(1935) 방법을 적용해야 한다. 필터케익의 투수계수는 두 방법에서 모두 총 작용압력이 증가할수록 간극비가 감소하므로 투수계수도 감소하는 경향을 보였다. DY-100S 필터케익의 투수계수는 세 가지 벤토나이트 필터케익의 투수계수 중에서 가장 큰 값을 갖고, 특히 모든 범위의 총 작용압력에서 Tixoton 필터케익의 투수계수보다 약 2배정도로 큰 값을 보였다. 이는 CMC로 처리되고 높은 몬트모릴로나이트 함유량을 갖는 Tixoton과 Bentonil GTC4가 DY-100S 보다 팽윤성이 좋아 상대적으로 두꺼운 확산이중층(Diffuse double layer)이 존재하므로 낮은 투수계수를 갖기 때문이다.

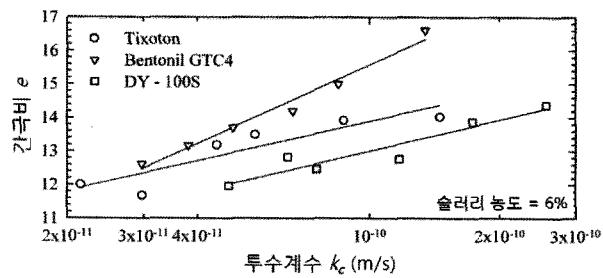
Bentonil GTC4 필터케익의 투수계수는 슬러리 농도의 영향을 크게 받았다. Bentonil GTC4 필터케익의 투수계수는 4% 벤토나이트 슬러리 농도에서 DY-100S 필터케익의 투수계수와 거의 유사한 값을 보이고 6%와 8%의 벤토나이트 슬러리 농도에서는 Tixoton 필터케익의 투수계수와 유사하였다.

그림 7은 필터케익의 투수계수와 간극비의 관계($k_c - e$)를 보여준다. 앞에서 언급한 두 방법의 결과가 유사하기 때문에 Ruth(1935) 방법으로 해석한 결과만 그림 7에 대표적으로 나타냈다. 본 연구에서 얻어진 Tixoton, Bentonil GTC4, DY-100S 벤토나이트 필터케익의 투수계수는 2.2×10^{-11} m/s에서 2.9×10^{-11} m/s로 앞에서 언급한 선행 연

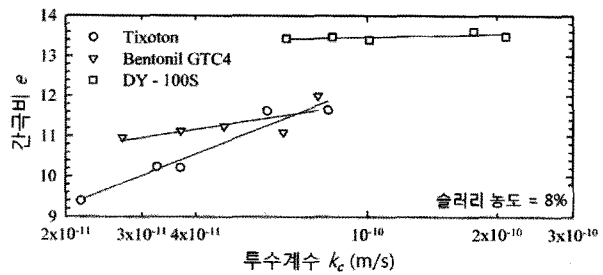
구들에서 보고된 범위와 유사한 값을 보인다(Henry 등, 1998; Chung과 Daniel, 2008). 그림 7에서 $\log k_c$ 와 간극비 그래프의 기울기, 즉 C_k 를 구하여 Tixoton, Bentonil GTC4, DY-100S 벤토나이트 필터케익에 대해 표 3에 각각 정리하였다. 필터케익의 C_k 값은 Tixoton 필터케익의 경우, 벤토나이트 슬러리의 농도가 증가할수록 증가하였고, Bentonil과 DY-100S 필터케익의 C_k 값은 벤토나이트 슬러리 농도가 증가할수록 감소하였다. DY-100S 슬러리의 이러한 특성은 낮은 필터케익 형성 능력을 예측할 수 있고 여과시, DY-100S 슬러리의 유체 손실은 많아지게 되고 이에 상응하여 DY-100S 필터케익의 투



(a) 4% 벤토나이트 슬러리



(b) 6% 벤토나이트 슬러리



(c) 8% 벤토나이트 슬러리

그림 7. 슬러리 농도에 따른 필터케익의 간극비-투수계수 관계

표 3. 슬러리 농도에 따른 C_k 값

벤토나이트 농도	4%	6%	8%
Tixoton	3.51	2.97	4.28
Bentonil GTC4	5.01	5.90	1.68
DY - 100S	3.12	3.09	0.24

수계수 역시 가장 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 8은 식 (14)를 이용하여 계산한 Bentonil GTC4 벤토나이트 필터케익 내의 간극 수압과 유효응력의 분포를 보여준다. 벤토나이트 필터케익은 압축성이 매우 크기 때문에 필터케익 층 내의 유효응력의 분포는 깊이 별 간극비에 변화를 가져올 수 있다(Filz 등, 2001).

그림 9에서는 수정 fluid loss 시험이 종료된 후에 식 (15)에 의해 계산된 필터케익의 두께를 총 작용압력에 대하여 도시하였다. Tixoton 필터케익의 두께가 가장 얇

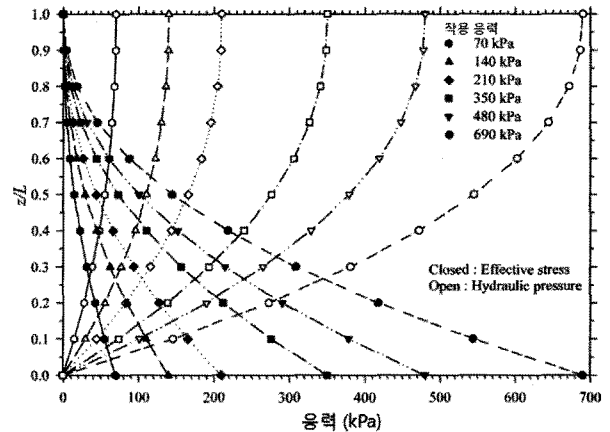


그림 8. 총 작용압력 하에서 6% Bentonil GTC4 슬러리에 의해 형성되는 필터케익 층 내 유효응력과 수압 분포

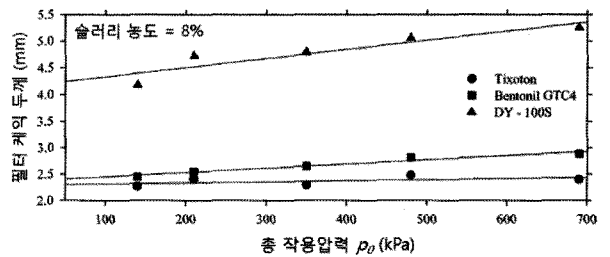
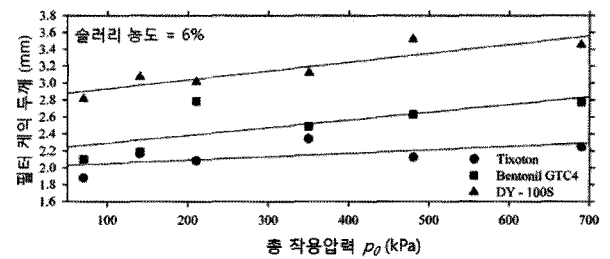
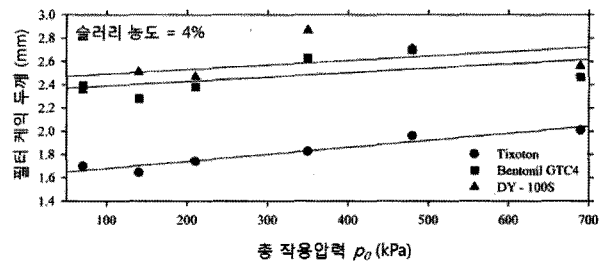
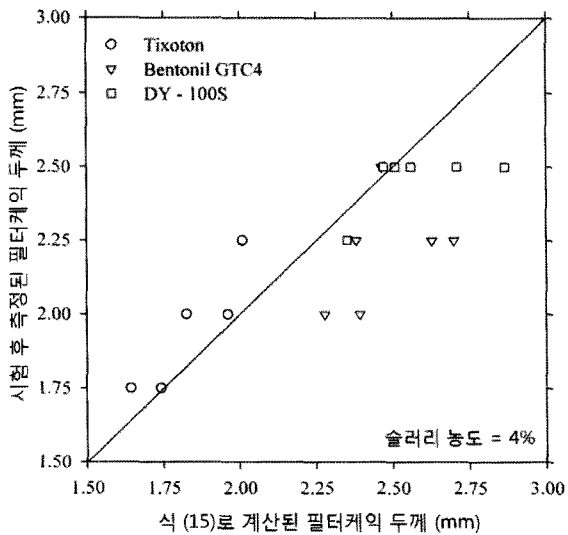
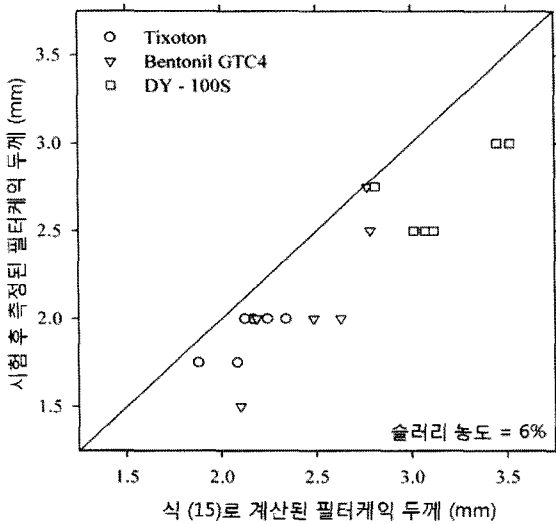


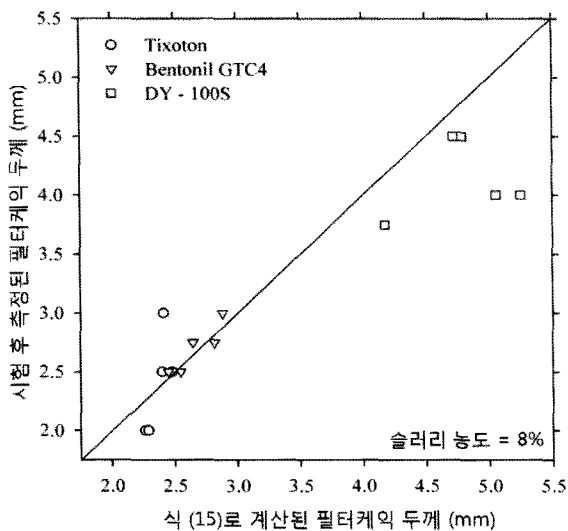
그림 9. 슬러리 농도에 따른 필터케익의 두께-총 작용압력 관계



(a) 4% 벤토나이트 슬러리



(b) 6% 벤토나이트 슬러리



(c) 8% 벤토나이트 슬러리

그림 10. 실험 결과를 이용하여 계산된 필터케익 두께와 시험 후 직접 측정된 필터케익 두께 비교

았고, 슬러리 농도 변화에 대한 영향도 작았다. DY-100S 필터케익의 두께는 가장 두꺼웠으며 슬러리의 농도가 증가할수록 두께도 증가하였다. Bentonil GTC4 필터케익의 두께는 슬러리 농도에 따른 변화가 거의 없었다. 그림 10에서는 각 시험결과를 이용하여 식 (15)를 통해 구한 필터케익 두께와 수정 fluid loss 시험 완료 후 직접 측정된 필터케익의 두께를 비교하였다. 비교 결과 약간의 오차는 존재하지만 세 종류 벤토나이트 모두 대체로 측정값과 계산값이 유사함을 알 수 있다. 본 연구에서 얻어진 필터케익의 두께는 D'Appolonia(1980)와 Britton(2001)이 제안한 3mm에서 5mm 범위와 잘 일치하였다.

6. 요약 및 결론

필터케익의 투수계수를 측정하기 위해 수정 fluid loss 시험(Chung과 Daniel, 2008)을 적용하였다. 본 연구에서는 Tixoton과 Bentonil GTC4, DY-100S의 세 가지 벤토나이트가 사용되었다. 필터케익의 투수계수 산정에 있어서 필터층의 수리적 저항을 고려하는 Ruth(1935)의 방법과, 필터층의 수리적 저항을 무시한 Chung과 Daniel (2008)의 방법을 비교 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 본 연구에서와 같이 필터층으로 여과지를 사용한 경우, Ruth(1935) 방법과 Chung과 Daniel(2008) 방법은 거의 유사한 결과를 나타낸다. 그 이유는 필터층(여과지)의 수리적 저항이 무시할 만큼 작았기 때문으로 사료된다. 하지만 실제 토사와 같이 수리적 저항이 비교적 큰 필터층을 사용하는 경우에는 투수계수를 산정할 때 Ruth(1935) 방법을 적용하는 것이 타당하다.
- (2) 세 가지 벤토나이트의 필터케익의 투수계수가 $2.2 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 에서 $2.9 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 의 범위로 측정되었다. 이 범위는 Henry 등(1998)과 Chung과 Daniel(2008)에 의해 보고된 범위와 매우 유사하다. DY-100S 필터케익의 투수계수는 전체 적용 압력 범위를 통틀어 Tixoton 필터케익 투수계수의 두 배정도로 컸다. 세 가지 벤토나이트 필터케익 중에서 Tixoton 필터케익이 가장 낮은 투수계수를 보였다. 이는 CMC로 처리되고 높은 몬트모릴로나이트 함유량을 갖는 Tixoton과 Bentonil GTC4가 DY-100S 보다 팽윤성이 좋아 상대적으로 두꺼운 확산이중층(Diffuse double layer)

이 존재하므로 낮은 투수계수를 갖기 때문이다.

- (3) 마지막으로, 본 시험에서 측정된 필터케익의 두께는 D'Appolonia(1980)과 Britton(2001)이 보고한 3~5mm 범위와 유사한 결과를 보였다. 측정된 필터케익의 투수계수와 뒷채움재의 투수계수를 이용해 연직 차수벽의 등가 투수계수를 계산할 수 있으며 이는 연직 차수벽의 전반적인 차수 성능 평가에 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 신진교수지원(No. D00477)과 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(10기술혁신 E08)의 지원을 받았으며 이에 깊은 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Akther, S., Hwang, J. Y., and Lee, H. (2008), Sedimentation characteristics of two commercial bentonites in aqueous suspensions. *Clay Minerals*, 43, 449.
2. API (1990), Standard procedure for field testing drilling fluids. API Specification 13B, American Petroleum Institute.
3. ASTM D5890, 2006. Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners. American Society for Testing and Materials.
4. ASTM D5891 (2002), Standard test method for fluid loss of clay component of geosynthetic clay liners. American Society for Testing and Materials.
5. Barvenik, M. J., Ayres, J. E. (1987), Construction quality control and post-construction performance verification for the Gilson Road hazardous wastesite cutoffwall. EPA/600/287/065, USEPA, Washington.
6. Britton, J. P. (2001), Soil-bentonite cutoff walls: hydraulic conductivity and contaminant transport. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute & State Univ., Blacksburg, Va.
7. Britton, J. P., Filz, G. M., Herring, W. E. (2004), Measuring the hydraulic conductivity of soil-bentonite backfill. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 130(12), 1250-1258.
8. Chung, J. (2004), Hydraulic conductivity of GCLS permeated with inorganic chemical solutions. Ph.D. thesis, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, Ill.
9. Chung, J., Daniel, D. (2008), Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 31(3), 1-9.
10. D'Appolonia, D. J. (1980), Soil-bentonite slurry trench cutoffs. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 106(4), 399-417.
11. Darcy, H.P.G. (1856), The public fountains of the city of Dijon, Victor Dalmont, Paris, France.
12. Filz, G. M., Boyer, R. D., Davidson, R. R. (1997), Bentonite-water slurry rheology and cutoff wall trench stability, in: Evans, J. C. (Ed.), Proc. of In Situ Remediation of the Geoenvironment. ASCE, GSP 71, pp.139-153.
13. Filz, G.M., Henry, L.B., Heslin, G.M., Davidson, R.R. (2001), Determining hydraulic conductivity of soil-bentonite using the API filter press. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 24(1), 61-71.
14. Grube, W. E. Jr. (1992), Slurry trench cutoff walls for environmental pollution control, in: Paul, D. B., Davidson, R. R., Cavalli, N. J. (Eds.), Slurry Walls: Design, Construction, and Quality Control. ASTM, STP 1129, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp.69-77.
15. Henry, L.B., Filz, G.M., Davidson, R.R. (1998), Formation and properties of bentonite filter cakes, in: Reddi, L. N., Bonala, M. V. S. (Eds.), Filtration & Drainage in Geotechnical and Geoenvironmental engineering. ASCE, GSP 78, pp.69-88.
16. Heslin, G. M., Filz, G. M., Baxter, D. Y., Davidson, R. R. (1997), An improved method for interpreting hydraulic conductivity tests performed in the API filter press, in: Proc. of International Containment Technology. US DoE, DuPont Company, and USEPA, pp.71-77.
17. Nash, K. L. (1974), Stability of trenches filled with fluids. *Journal of the Construction Division*, ASCE, 100(CO4), 533-542.
18. Rushton, A., Ward, A.S., Holdich, R.G. (2000), Solid-Liquid Filtration and Separation Technology, 2nd Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
19. Ruth, B.F. (1935), Studies in filtration: III. Derivation of general filtration equations. *Industrial and Engineering Chemistry* 27, 708-723.
20. Soroush, A., Soroush, M. (2005), Parameters affecting the thickness of bentonite cake in cutoff wall construction: case study and physical modeling. *Canadian Geotechnical Journal* 42(2), 646-654.
21. Xanthakos, P. P. (1979), Slurry Walls. McGraw-Hill, New York.

(접수일자 2010. 10. 1, 심사완료일 2011. 1. 6)