벤토나이트 케익을 고려한 연직차수벽의 순간변위시험(slug test) 해석

Consideration of Bentonite Cake Existing on Vertical Cutoff Wall in Slug Test Analysis

임 지 희¹ Lim, Jeehee
이 동 섭³ Lee, Dongseop
최 항 석⁵ Choi, Hangseok

웡 테 바오² Nguyen, The-Bao
안 재 윤⁴ Ahn, Jaeyoon

Abstract

Slug tests can be adopted to estimate hydraulic conductivity of the slurry trench wall backfill for its abilities to reflect the in-situ performance of the construction. A comprehensive three-dimensional numerical model is developed to simulate the slug test in a slurry trench wall considering the presence of bentonite cake on the interface boundaries between the wall and the surrounding soil formation. Influential factors such as wall width (i.e., proximity of wall boundary), well deviation, vertical position of well intake section, compressibility of wall backfill, etc. are taken into account in the model. A series of simulation results are examined to evaluate the bentonite cake effect in analyzing practical slug test results in the slurry trench wall. The results show that the modified line-fitting method can be used without any correction factor for the slug test in the slurry trench wall with the presence of bentonite cake. A case study is reanalyzed with the assumption of existing bentonite cake. The results are compared with the previously reported results by the approaches assuming no bentonite cake (constant-head boundary) or upper-bound solution (no-flux boundary). The case study demonstrates the bentonite cake effect and the validity of the modified line-fitting method in the estimation of the hydraulic conductivity of the slurry wall backfill.

요 지

순간변위시험(slug test)은 현장의 지반 상태를 반영할 수 있어 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 결정하는데 적용할 수 있다. 본 논문에서는 연직차수벽과 주변 지반 사이에 형성되는 벤토나이트 케익을 고려하여 순간변위시험을 모사할 수 있는 3차원 모델이 개발되었다. 연직차수벽의 폭(즉, 경계 조건과의 근접 정도), 우물의 편심, 우물에 지하수가 유입되는 수직 위치, 뒷채움재의 압축성 등의 영향변수들이 모델에 고려되었다. 수치해석 결과를 이용하여 연직차수벽 시공 중에 존재할 수 있는 벤토나이트 케익이 순간변위시험 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 통해, 수정 Line-fitting법은 벤토나이트 케익을 고려한 연직차수벽의 순간변위시험 해석에서 다른 경계조건에 대해 제시된 보정 계수 없이 직접 적용될 수 있음을 밝혔다. 본 논문에서는 기존의 현장 사례를 벤토나이트 케익을 고려하여 재분석하여 벤토나이트 케익이 존재하지 않는 경우(일정 수두 경계 조건)와 보수적인 경계조건(불투수 경계 조건)으로 가정했던 기존의 사례분석 결과들과 비교하였다. 결론적으로 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수 평가시 벤토나이트 케익의 영향

1 비회원, (미)퍼듀대학교 토목공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil Engrg., Purdue Univ., USA)

2 비회원, GS건설 사원 (GS E&C, HCM City MRT CP2, Viet Nam)

3 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3742, Fax: +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr; 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

및 수정 Line-fitting법의 유효성을 확인하였다.

Keywords : Slug test, Modified line-fitting method, Vertical cutoff wall, Bentonite cake, Numerical analysis, Hydraulic conductivity

1. 서 론

연직차수벽(slurry trench wall 또는 vertical cutoff wall)은 지하수 오염에 대한 관심이 증가한 이래로 가장 많이 사용되는 지반환경 구조물 중 하나로 떠올랐다. 지하수 또는 오염물의 이동을 제한하는 지중 차수벽으로서, 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수는 $1 \times 10^{-8} m/s$ 이하의 작은 값을 가져야 한다. 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수는 연속벽 내 설치되는 단일정을 통한 순간변위시험(slug test)에 의해 평가될 수 있다(Teeter and Clemence, 1986; Yang et al., 1993; Britton, 2001; Britton et al., 2002; Choi, 2002; Britton et al., 2005; Daniel and Choi, 1999; Choi and Daniel, 2006a, 2006b; Choi, 2007; Lee and Chang, 2007). Choi and Daniel(2006a, 2006b)과 Choi(2007)는 연직차수벽 뒷채움재의 압축지수와 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계 조건, 응력 수준을 고려한 지반의 수리적 특성을 반영할 수 있는 순간변위시험 수치해석 프로그램인 Slug_3D를 개발하였다.

연직차수벽 시공시 형성되는 벤토나이트 케익의 존재는 기존 많은 연구들에서 보고된 바 있다(Nash, 1974; Xanthakos, 1979; D'Appolonia, 1980; Filz et al., 1997; Henry et al., 1998; Britton et al., 2004; Soroush and Soroush, 2005). 벤토나이트 케익은 투수계수가 매우 낮고 연직차수벽과 주변 지반 사이에 형성되기 때문에 연직차수벽의 수리적 경계조건에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 순간변위시험 결과를 분석하여 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 평가할 때 벤토나이트 케익의 영향을 신중히 고려해야 한다. Britton et al.(2002, 2005)은 연직차수벽의 순간변위시험 결과를 해석하는데 유효한 형상계수를 일련의 실내 및 현장시험을 통해 제시하였다. 각각의 계수들은 연직차수벽과 벤토나이트 케익의 기하학적 형상 및 우물의 편심, 벤토나이트 케익의 낮은 투수계수를 고려할 수 있다. 그러나 Britton et al.(2002, 2005)이 제안한 형상계수는 연직차수벽 뒷채움재의 압축성을 직접적으로 고려할 수 없다. Nguyen

et al.(2010b, 2011)은 벤토나이트 케익의 영향에 관한 상한치를 제시하기 위해 연직차수벽과 지반 사이의 경계조건으로 불투수 경계를 적용하여 해석하였다. 이를 통해, 기존 벤토나이트 케익의 영향에 관한 검토를 바탕으로 불투수 경계조건에서의 적용이 벤토나이트 케익이 존재하는 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 보수적으로 평가할 수 있음을 밝혔다.

본 논문에서는 연직차수벽에 순간변위시험을 모사하기 위해 벤토나이트 케익의 대표적 물리적 특성(투수계수, 비저류계수, 두께)들을 반영할 수 있는 확장된 Slug_3D 모델을 적용하였다. 해석결과를 바탕으로 연직차수벽에서 순간변위시험 결과를 분석하여 벤토나이트 케익의 영향을 평가하였다. Choi와 Daniel(2006a)이 제시한 방법(즉, Type Curve법과 수정 Line-fitting법)을 통해 벤토나이트 케익이 존재하는 경우에 대해서 기존의 현장 사례를 재분석하였다.

2. 벤토나이트 케익의 수리적 특성

Nash(1974), Xanthakos(1979), D'Appolonia(1980), Filz et al.(1997), Henry et al.(1998), Britton et al.(2004), Soroush and Soroush(2005)는 벤토나이트 케익의 형성 및 특성에 관한 연구를 수행하였다. 벤토나이트 케익은 주변 지반에 벤토나이트 슬러리가 침투하면서 여과되는 과정에서 트렌치 표면에 형성된다. 벤토나이트 케익은 주변 지반의 입도 분포와 슬러리 내에 부유하는 벤토나이트 입자의 입도 분포에 의해서 좌우된다(Filz et al., 1997; Henry et al., 1998). Xanthakos(1979)는 슬러리와 트렌치 표면 사이에 발생하는 수두 차이가 벤토나이트 케익이 생성되는 원인으로 보고 슬러리와 지하수, 지반간의 상호작용에 의해 발생하는 전기화학적 에너지 차이가 벤토나이트 입자들을 트렌치 표면으로 많이 이동하게 만들고, 그로 인해 벤토나이트 케익이 형성된다고 보고하였다.

벤토나이트 케익을 실내시험에서 재현하려는 많은 시도가 이루어졌다(Xanthakos, 1979; Henry et al., 1998;

Chung and Daniel, 2008; Nguyen et al., 2010a). Xanthakos (1979)는 fluid loss 시험에서 적용된 압력차가 50, 100, 200kPa일 때의 벤토나이트 케익 투수계수가 $1 \times 10^{-10} m/s$ 임을 제안하였다. 또한, Henry et al.(1998)은 압력차가 10kPa에서 100kPa일 때의 벤토나이트 케익 투수계수가 $3 \times 10^{-11} m/s$ 에서 $2 \times 10^{-10} m/s$ 임을 제시하였고, Chung and Daniel(2008)은 압력차 69~690kPa에서 $8.16 \times 10^{-12} \sim 3.51 \times 10^{-10} m/s$ 를, Nguyen et al.(2010a)은 압력차 70~690kPa에서 $2 \times 10^{-11} \sim 2.6 \times 10^{-10} m/s$ 를 제안하였다. 트렌치 내 슬러리와 지반 내 지하수간의 압력차의 범위는 일반적으로 100~200kPa이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연구결과들을 고려하여 벤토나이트 케익 투수계수의 대푯값으로 $1 \times 10^{-10} m/s$ 를 적용하였다. 이 값은 일반적으로 설계에 적용되는 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수인 $1 \times 10^{-8} m/s$ 보다 매우 낮은 값이다. 벤토나이트 케익의 두께는 3mm 이하(D'Appolonia, 1980) 또는 5mm 이하(Britton, 2001; Britton et al., 2004)로 제안된 바 있다. Soroush and Soroush(2005)는 지반에 슬러리가 침투되는 시간에 따라 벤토나이트 케익의 두께가 20mm까지 증가할 수 있다고 보고하였으나 본 논문에서 연직차수벽의 순간변위시험 해석을 위해 사용한 벤토나이트 케익의 두께를 5mm로 가정하였다.

연직차수벽과 주변 지반의 경계면에 형성되는 벤토나이트 케익의 특성에 관하여 D'Appolonia(1980), Tallard (1984), Teeter와 Clemence(1986), Britton et al.(2002, 2004, 2005), Choi and Daniel(2006b), US ACE(2010), Nguyen et al.(2010b, 2011)에 의해 논의되었다. Britton et al.(2002, 2005)은 연직차수벽 내 순간변위시험시 벤토나이트 케익의 영향을 고려하기 위해 수치해석 프로그램인 GMS 3.1(Brigham Young University, 1994)를 적용하였다. Choi and Daniel(2006b)은 기존의 해석결과들을 바탕으로 벤토나이트 케익의 영향을 연직차수벽과 주변지반의 경계면을 불투수 경계조건으로 고려하여 반영하였다. US ACE(2010)는 연직차수벽의 실제 투수계수는 연직차수벽 표면에 형성된 벤토나이트 케익과 뒷채움재의 모두에 의해 영향을 받지만 각각의 두께 및 투수계수에 따라 그 영향 정도는 달라진다고 보고하였다. 한편, US ACE(2010)는 실제 설계에서 벤토나이트 케익의 존재를 직접 고려하는 것이 어려우므로 설계적 측면에서 연직차수벽의 투수계수 산정시 벤토나이트 케익의 영향을 무시하고 뒷채움재만 고려할 것을 제안

하였다. Nguyen et al.(2010b)은 Bouwer and Rice법을 통한 연직차수벽 내 순간변위시험 결과 분석에서 벤토나이트 케익의 영향을 고려하기 위해 벤토나이트 케익을 불투수 경계조건으로 가정하여 유선망을 이용하는 방법을 제안하였다. 또한, Nguyen et al.(2011)은 벤토나이트 케익이 존재하는 경우에 대하여, 뒷채움재의 투수계수를 보수적으로 평가할 수 있는 상한치를 제안하였다.

3. 벤토나이트 케익을 고려한 Slug_3D 모델

Slug_3D 프로그램은 연직차수벽 내 순간변위시험을 모사하기 위해 개발되었다(Choi, 2007). Slug_3D 초기 모델에서는 벤토나이트 케익을 고려하지 않고 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계조건으로 일정 수두 경계가 적용되었다. 본 연구에서는 벤토나이트 케익과 주변 지반을 동시에 해석에 고려할 수 있도록 Slug_3D 프로그램을 보완 확장하였다. 즉, 기존 Slug_3D는 연직차수벽 내 순간변위시험에 대한 수치모사시, 연직차수벽만 해석 도메인에 고려하고 벤토나이트 케익의 영향은 외부 경계조건으로 단순화하여 주변 지반을 별도로 고려하지 않은 것에 비해서 확장된 Slug_3D 프로그램에서는 연직차수벽, 벤토나이트 케익, 주변 지반이 모두 해석 도메인에 고려되어, 벤토나이트 케익의 투수계수 및 비저류계수 그리고 케익의 두께를 해석에 반영하였다.

Fig. 1은 벤토나이트 케익을 고려한 연직차수벽 내에서 순간변위시험의 모식도를 보여준다. Fig. 1의 평면도상에서, 벤토나이트 케익(연직차수벽의 경계면)과 해석 영역의 x 방향 지반 경계 사이의 거리는 L_x 로 표시하였고, 우물의 중앙과 해석 모델 영역의 y 방향 지반 경계 사이의 거리는 L_y 로 표시하였다. 연직차수벽의 폭은 W 로 표시하였고, r_w 와 r_c 는 각각 필터팩(filter pack)의 외경 및 우물 케이싱의 내경을 의미한다. 우물이 편심되어 시공되는 경우를 고려하기 위해, 연직차수벽의 중앙에서부터 우물의 중앙까지의 거리를 D_v 로 설정하였다. Slug_3D 프로그램 해석과정에서 우물의 편심 정도는 $2D_v/(W-2r_w)$ 로 무차원화하여 적용하였다. 연직차수벽의 시공 깊이는 L 로 표시되며, L_t 와 L_w 는 각각 지하수면에서 우물 유입부까지의 거리 및 필터팩의 높이를 나타낸다. 또한, Fig. 1에서 연직차수벽 내 우물 유입부(필터팩)의 연직방향의 상대적 위치는 s 를 사용하여 표기하였고, 그 범위는 0부터 무한대까지이다. 만약 s 가

Fig. 1. Model configuration for slug test in vertical cutoff wall with bentonite cake

1이면, 우물 유입부는 연직차수벽의 중간 깊이에 존재한다. Slug_3D 프로그램은 우물 케이싱 내 초기수위 H_0 일 때의 rising-head 순간변위시험을 모사하여 임의의 시간에서의 수두를 $H(t)$ 라고 할 때, $H(t)$ 는 점차 감소하여 순간변위시험 종료 시에는 0으로 수렴한다. 순간변위시험에서 시간에 따른 수두회복을 무차원 시간변수 β_p ($\beta_p = kL_w t / r_c^2$, 여기서 k 는 투수계수를 의미)에 따른 초기 수두 강하로 정규화한 $H(t)/H_0$ 로 표현할 수 있다. Choi and Daniel(2006a)은 무차원 압축계수 α_p ($\alpha_p = S_s L_w r_w^2 / r_c^2$, 여기서 S_s 는 지반의 비저류계수를 의미)에 따른 각각의 수위 회복 곡선을 제시하였다. Slug_3D 해

석모형을 구성하는 지배방정식과 수치해석에 관한 상세한 사항은 Choi(2007)에 제시되어 있다.

해석모형에서 벤토나이트 케익의 두께는 5mm로 적용하였으나, Fig. 1에서는 시각적 편의를 위하여 실제보다 두껍게 표시하였다. 벤토나이트 케익의 얇은 두께 및 케익 내 발생하는 큰 수두 변화를 고려하기 위해 벤토나이트 케익에 적용한 최소 격자 간격은 1.25mm로 모델링하였다(즉, 동일한 4개의 격자를 사용). 격자 구성의 효율성을 위해 수평방향으로 연직차수벽에서 멀어질수록 격자 간격은 Anderson and Woessner(1992)가 제안한 1.1의 비율로 증가시켰다. 해석모형에서 적용한 격자 간

격은 격자 크기에 대한 매개변수 연구를 통해 mass balance 오차를 최소화하고 수치적 안정성을 얻을 수 있는 값을 산정하였다.

일반적으로 필터팩의 투수계수가 주변 지반의 투수계수보다 충분히 크므로 필터팩을 통과하는 물의 수두 손실은 무시한다(Butler, 1996). 연직차수벽 시공규정에 따르면, 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수는 대략 10^{-8} m/s 이므로 해석모델에서 지반의 투수계수는 Freeze and Cherry(1979)가 제안한 대수층의 대표적인 값인 1×10^{-5} m/s를 적용하여 뒷채움재 투수계수보다 1000배 큰 값을 적용하였다. 또한, 벤토나이트 케익의 투수계수는 앞서 언급했듯이 기존 연구결과를 바탕으로 10^{-10} m/s 로 설정하였다.

연직차수벽의 기능적인 측면에서, 투수계수가 작은 벤토나이트 케익의 존재는 연직차수벽 전체 투수계수를 낮춰줌으로써 지하수 흐름을 제한하는 연직차수벽의 성능을 향상시켜 주는 효과를 가진다. 그러나, 벤토나이트 케익 유무에 따라 연직차수벽 내 발생하는 지하수 흐름이 달라지므로 순간변위시험을 통해 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 평가할 때 오차를 발생하도록 한다. 그러므로, 벤토나이트 케익이 연직차수벽 내 순간변위시험 해석에 미치는 영향을 평가해야 한다. Choi and Daniel(2006b)은 연직차수벽과 주변 지반 사이에 다양한 경계 조건을 적용하는 방식으로 연직차수벽 내 순간변위시험 결과에 미치는 벤토나이트 케익의 영향에 대한 연구를 통해 경계 조건에 따라 산정되는 투수계수가 크게 차이남을 보였다. Choi and Daniel(2006b)의 매개변수 연구에서 벤토나이트 케익의 영향은 뒷채움재의 무차원 압축계수가 $\alpha_p=0.01$ 인 경우에 대해서 k_{wall}/k_{cake} (여기서 k_{wall} 과 k_{cake} 는 각각 연직차수벽 뒷채움재와 벤토나이트 케익의 투수계수를 의미)이 증가할수록, 순간변위시험의 수두 회복곡선은 일정 수두 경계 조건에 대한 수두 회복곡선에서 불투수 경계 조건의 수두 회복곡선으로 근접한다. 특히, $k_{wall}/k_{cake}=1000$ 인 경우, 수두 회복곡선은 불투수 경계 조건의 경우와 거의 일치하였다. 본 논문에서는 벤토나이트 케익을 고려한 모든 경우에 대해 연직차수벽 내 순간변위시험을 모사하였다. 그리고 순간변위시험에 미치는 벤토나이트 케익의 영향을 설명하기 위해 모사된 수두 회복곡선 결과를 분석하였다.

4. 벤토나이트 케익을 고려한 순간변위시험 해석

연직차수벽 내 순간변위시험 해석에서 벤토나이트 케익의 영향을 고려하기 위해 전형적인 연직차수벽 조건과 뒷채움재의 압축성을 고려한 Slug_3D 수치해석을 수행하였다. 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 증가할수록, 케이싱 내부의 초기 수두변화(rising-head 순간변위시험인 경우 수두강하)에 의한 연직차수벽 내 지하수 수두변화의 영향범위가 작아진다. 따라서, 우물의 유입부가 연직차수벽과 지반의 경계면에 근접하더라도 지하수의 수두변화 영향범위가 이 경계면에 도달하기 어렵고, 이로 인해 경계면 조건이 순간변위시험의 수두 회복곡선에 미치는 영향이 매우 작다. 반면에, 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 작은 경우는, 연직차수벽 내 수두변화 영향범위가 커져 연직차수벽 경계면에 쉽게 도달하므로 우물 유입부와 연직차수벽과 지반의 경계면 사이의 근접할수록 수두 회복곡선에 미치는 영향이 커진다(Choi and Daniel, 2006b). 따라서, 벤토나이트 케익이 순간변위시험에 미치는 영향을 평가할 때 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 반드시 고려되어야 한다.

4.1 Type Curve법

먼저 일반적으로 알려진 순간변위시험 해석법인 Type Curve법(Cooper et al., 1967)을 적용하여 벤토나이트 케익을 고려한 순간변위시험을 통해 연직차수벽의 투수계수를 산정하였다. 연직차수벽 뒷채움재의 압축성을 고려하기 위해 무차원 압축계수(α_p)가 10^{-3} 에서 1 사이에 7 가지 조건에 대하여 해석에 적용하였다. 이 범위는 일반적인 흙-벤토나이트 뒷채움재의 압축성을 대표한다(Freeze and Cherry, 1979; Khoury et al., 1992; Filz et al., 2001).

Fig. 2는 벤토나이트 케익이 존재하는 연직차수벽에 대해 수행한 순간변위시험 모사에서 α_p 에 따라 산정된 몇 가지 전형적인 Type Curve를 보여준다. 주어진 연직차수벽의 기하학적 조건($r_w=0.1\text{m}$, $r_c=0.02\text{m}$, $W=0.8\text{m}$, $L_w=1.0\text{m}$, $L=11.0\text{m}$, $s=1$, $D_v=0$)에 대해 α_p 가 10^{-3} 과 1인 경우는 뒷채움재의 비저류계수(S_s)가 각각 $4 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$, $4 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ 를 의미한다. Fig. 2에서는 실제로 벤토나이트 케익이 존재하는 경우에 대한 해석결과와 더불어 연직차수벽과 주변 지반의 경계면에 일정 수두 경계조건

Fig. 2. Effect of bentonite cake on Type Curve method

및 불투수 경계조건을 적용하는 경우에 대한 Type Curve를 비교하였다. 벤토나이트 케이크 존재하는 경우에 대한 Type Curve는 연직차수벽과 주변 지반의 경계면에 일정 수두 경계조건 및 불투수 경계조건을 적용한 Type Curve 사이에 위치함을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 2는 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 Type Curve 형상에 미치는 영향을 보여준다. 압축성이 상대적으로 작은 경우($\alpha_p < 1.0 \times 10^{-1}$), Type Curve가 세 가지 해석조건, 즉 실제 벤토나이트 케이크를 고려한 경우 (consideration of real bentonite cake)와 연직차수벽과 주변 지반의 경계면에 일정 수두 경계조건(constant-head boundary)과 불투수 경계조건(no-flux boundary)을 적용한 경우에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 특히, Nguyen et al.(2011)이 벤토나이트 케이크를 고려하기 위해 불투수 경계조건을 도입한 해석방법은 불필요하게 보수적인 해석결과(즉, 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수로 과대 평가)를 유발하므로 실제로 해석모델에 벤토나이트 케이크를 고려하는 경우만이 정확한 순간변위시험을 통한 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 평가할 수 있음을 보여준다. 반면, 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 상대적으로 큰 경우($\alpha_p \geq 1.0 \times 10^{-1}$), 세 가지 경우의 Type Curve가 모두 오차범위에서 유사하므로 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계면 조건이 순간변위시험 해석결과에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 결과적으로, $\alpha_p \geq 1.0 \times 10^{-1}$ 인 경우에 대해서만, 벤토나이트 케이크의 영향을 고려하기 위해 Nguyen et al.(2011)이 제안한 불투수 경계조건을 적용할 수 있다. Nguyen(2011)은 벤토나이트 케이크 존재하는 경우, 다양한 연직차수벽의 기하학적 조건에 대해 순간변위시험 결과해석에 적용할 수 있는 120가지 Type Curve를 제시하였다. 순간변위시험 결과를 이용한 Type Curve법은 일반적인 양수시험의 Type Curve법과 동일한 방법으로 투수계수를 산정할 수 있다(Freeze and Cherry, 1979).

4.2 수정 Line-fitting법

Choi and Daniel(2006a)은 순간변위시험을 통해 벤토나이트 케이크 존재하지 않는 경우에 대해 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 산정할 수 있도록 보정계수(f)를 도입하여 수정 Line-fitting법을 제시하였다. 보정계수(f)는 $\ln(R_e'/r_w)_{cutoff\ wall}$ 과 $\ln(R_e'/r_w)_{aquifer}$ 의 비를 의

미하며, 여기서 R_e' 는 케이싱 내부의 초기 수두변화에 의한 연직차수벽과 지반 내 지하수 수두변화의 영향범위의 유효 반경(즉, 수두변화가 도달하지 않는 경계의 등가 반경)을 의미한다. R_e' 는 연직차수벽의 기하학적 형상뿐 아니라 우물의 형상과 연직차수벽과 지반의 압축성에 따라 달라진다. Choi and Daniel(2006a)은 $\ln(R_e'/r_w)$ 를 $2\beta_{p,0.37}(\beta_p = kL_w t/r_c^2)$ 로 정의하고 무차원 시간변수 $\beta_{p,0.37}$ 는 Hvorslev(1951)가 제안한 basic time lag formula에서의 $H(t)/H_0=0.37$ 일 때의 β_p 값을 적용하였다. Choi and Daniel(2006a)과 Choi et al.(2008)은 다양한 대수층 조건에 대한 $\ln(R_e'/r_w)_{aquifer}$ 값을 제시하였다. 연직차수벽과 주변 지반 사이의 경계조건 때문에, 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 산정하기 위한 $\ln(R_e'/r_w)$ 는 보정계수(f)를 이용해 $f \times \ln(R_e'/r_w)_{aquifer}$ 로 수정되어야 한다. Choi and Daniel(2006a)은 수정 Line-fitting법을 이용하여 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 다음 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$k = \frac{r_c^2 \left[f \times \ln \left(\frac{R_e'}{r_w} \right)_{aquifer} \right]}{2L_w} \frac{1}{t_{0.37}} \quad (1)$$

본 논문에서는, 세 가지 해석조건, 즉 실제 벤토나이트 케이크를 고려한 경우(consideration of real bentonite cake)와 연직차수벽과 주변 지반의 경계면에 일정 수두 경계조건(constant-head boundary)과 불투수 경계조건(no-flux boundary)을 적용한 경우에 대해 수정 Line-fitting법을 적용하여 각 조건에 대한 해석결과를 비교하였다. Fig. 3은 연직차수벽의 특정 기하학적 조건($L/L_w = 11$, $s = 1$)과 우물의 편심이 없는 조건($2D_v/(W-2r_w) = 0$)에 대해 세 가지 해석조건에 대한 보정계수(f)를 비교하였다. 벤토나이트 케이크를 고려하지 않은 일정 수두 경계조건은 동일한 연직차수벽과 우물 형상에 대해서 순간변위시험 도중 케이싱 내 수두 회복이 실제보다 빠르다. 따라서 연직차수벽에서의 $\beta_{p,0.37}$ 값이 무한 대수층의 경우보다 작게 되므로 이를 고려해서 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 산정하기 위해 식 (1)의 보정계수(f)는 항상 1과 같거나 작게 된다(Fig. 3 참조). 이와는 반대로 Nguyen et al.(2011)이 제시한 벤토나이트 케이크를 고려하기 위해 불투수 경계조건을 적용하는 경우는 경계면에서 물의 흐름이 제한되므로 순간변위시험 도중 케이싱 내 수두

Fig. 3. Modification factor (f) for three analysis conditions($L/L_w = 11$, $s = 1$, $2D_v/(W - 2r_w) = 0$)

회복이 실제보다 느리게 되므로 연직차수벽 뒷채움재 투수계수를 과소평가하게 된다. 따라서, 이를 보정하기 위해 식 (1)의 보정계수(f)는 1과 같거나 크게 된다(Fig. 3 참조). Fig. 3에서 제시한 우물의 편심이 없는 조건($2D_v/(W - 2r_w) = 0$)에 대한 실제 벤토나이트 케익을 고려하는 경우, 보정계수(f)는 뒷채움재의 압축성에 상관없이 거의 1에 수렴함을 알 수 있고, 이는 식 (1)을 적용하여 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 산정할 때 $\ln(R_c'/r_w)$ 값에 대한 보정이 별도로 필요 없음을 시사한다.

한편, Fig. 4는 동일한 연직차수벽의 기하학적 조건($L/L_w = 11$, $s = 1$)에 대해 우물의 편심이 비교적 큰 경우($2D_v/(W - 2r_w) = 0.8$)에 대한 보정계수(f)를 비교하였다. 벤토나이트 케익을 고려하지 않은 일정 수두 경계 조건은 우물의 편심이 없는 경우에 비해 보정계수(f)가 전반적으로 더 작고, Nguyen et al.(2011)과 같이 벤토나

이트 케익을 고려하기 위해 불투수 경계조건은 우물의 편심이 없는 경우에 비해 보정계수(f)는 더 크다. 즉, 연직차수벽과 주변 지반 사이 경계면의 영향이 우물의 편심에 의해 더 커진 것을 간접적으로 알 수 있다. 또한, 실제 벤토나이트 케익을 고려하는 경우, 보정계수(f)가 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 매우 큰 경우($\alpha_p > 1.0 \times 10^{-1}$)를 제외하고는 거의 1에 수렴한다.

Fig. 3과 4의 비교로부터 Choi and Daniel(2006a)이 제안한 수정 Line-fitting법을 적용할 때, 연직차수벽에 벤토나이트 케익이 실제로 존재하는 경우 순간변위시험 결과에 경계조건 영향은 무시할 수 있을 만큼 작아진다(즉, 보정계수(f)가 1에 근접한다). 결론적으로, 실제 벤토나이트 케익이 존재하는 경우, 수정 Line-fitting법은 보정계수 도입 없이 사용할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4. Modification factor (f) for three analysis conditions($L/L_w = 11$, $s = 1$, $2D_v/(W - 2r_w) = 0.8$)

5. 실제 벤토나이트 케익을 고려한 사례 분석

벤토나이트 케익의 영향을 분석하기 위해 기존의 EMCON (1995) 사례조사를 재분석 하였다. 이를 위해, 본 논문에서의 벤토나이트 케익을 고려한 해석결과와 Choi and Daniel(2006a)과 Nguyen et al.(2010b, 2011)이 수행했던 기존의 해석결과를 비교 분석하였다. 연구 대상지역은 1990년 초에 건설된 캘리포니아 리치몬드의 West Contra Costa Sanitary 매립장이다. 연직차수벽의 기하학적 형상조건은 Table 1에 제시되었다. 본 현장의 연직차수벽은 West Contra Costa Sanitary 매립장 외주를 둘러싸고 있는 형태이다. 사례분석에서는 서로 이격된 두 연직차수벽에 대해 비교란 시료 채취와 현장 순간변위시험이 수행되었다. Case 1은 M-11/15 연직차수벽에 93-1로 명명된 순간변위시험이 수행된 경우고, Case 2는 M-17/21 연직차수벽에 94-15로 명명된 순간변위시험이 수행된 경우이다.

연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 평가하기 위해 비교란 시료를 사용하여 실내 시험을 수행하였다. 비교란 시료의 투수계수는 Case 1(M-11/15 연직차수벽) 경우, $6.0 \times 10^{-9} m/s$ 에서 $4.0 \times 10^{-8} m/s$ 의 범위로 Case 2(M-17/21 연직차수벽) 경우, $8.0 \times 10^{-10} m/s$ 에서 $1.0 \times 10^{-8} m/s$ 의 범위로 나타났다. 유효 구속응력 34.5kPa에서 38.0kPa 범위로 평균 체적변형율은 9.1%였으며, 이를 통해 뒷채움재의 비저류계수는 $2.5 \times 10^{-2} m^{-1}$ 로 평가되었다(EMCON, 1995).

M-11/15 연직차수벽(Case 1)과 M-17/21 연직차수벽(Case 2)의 현장 투수계수는 각 연직차수벽에서 수행된 93-1과 94-15 순간변위시험의 결과를 Type Curve법과 수정 Line-fitting법을 이용하여 산정하였다. Type Curve법은 벤토나이트 케익을 고려할 수 있도록 수정된 Slug_3D 프로그램을 통해 얻어진 Type Curve를 사용하였다. 또한, Choi and Daniel(2006a)가 제시한 수정 Line-fitting법에 보정계수(f)를 고려하여 투수계수를 산정하였다. 순간변위시험 결과 및 해석절차는 대표로 Case 1(M-11/15

Table 1. Geometric condition for vertical cutoff wall (Choi and Daniel, 2006a)

Type	Geometry variables	Values	
		Case 1 (M-11/15 wall)	Case 2 (M-17/21 wall)
Well	r_c (m)	0.025	0.025
	r_w (m)	0.105	0.036
	L_w (m)	1.15	0.55
Vertical cutoff wall	L (m)	9.04	9.26
	L_t (m)	4.72	4.42
	W (m)	0.92	0.92
	D_v (m)	0	0.23
Model variables	L_w/r_w	11.0	15.1
	L/L_w	8.0	16.8
	s	0.7	0.97
	W/r_w	8.8	25.4
	$2D_v/(W-2r_w)$	0	0.54

Fig. 5. Case study for Case 1 (M-11/15 vertical cutoff wall) considering bentonite cake

연직차수벽에 수행된 93-1 순간변위시험)에 대해서 Fig. 5에 나타냈다. Type Curve법의 경우는 우물 케이싱 내부의 수위회복을 Type Curve와 동일한 무차원 시간변수(β_p) 축에 도시하였다(Fig. 5(a) 참고). Fig. 5(a)는 Case 1의 수위회복 곡선을 이용하여 Type Curve와 일치성 평가(matching process)를 통해 무차원 압축계수($\alpha_p = 5.62 \times 10^{-2}$)를 찾는 과정을 보여준다. 동일한 방법으로 Case 2(M-17/21 연직차수벽)는 $\alpha_p = 3.16 \times 10^{-2}$ 로 산정되었다. 또한, Type Curve법을 이용하여 뒷채움재의 비저류계수와 투수계수를 산정하기 위해 필요한 β_p 가 1일 때의 수위회복 시간은 Case 1의 경우 $t_{1.0} = 1.65 \times 10^4$ 초, Case 2의 경우 $t_{1.0} = 3.55 \times 10^4$ 초로 각각 산정되었다. Fig. 5(b)는 Case 1에 대하여 Choi and Daniel(2006a)이 제안한 수정 Line-fitting법을 적용하는 절차를 보여주고, 이 경우 basic time lag은 $t_{0.37} = 1.2 \times 10^4$ 초이다. 동일한 방법으로 구한 Case 2의 경우는 $t_{0.37} = 3.0 \times 10^4$ 초이다.

세 가지 해석조건, 즉 본 논문에서 수행한 실제 벤토나이트 케익을 고려한 경우(consideration of real bentonite cake)와 연직차수벽과 Choi and Daniel(2006a)가 제안한 주변 지반의 경계면에 일정 수두 경계조건(constant-head boundary), 그리고 Nguyen et al.(2011)이 제안한 불투수 경계조건(no-flux boundary)을 적용한 경우에 대한 해석 결과를 Table 2에 비교하였다. Type Curve법을 이용할 경우는 Table 2에 표시된 식 a, b를 통해 뒷채움재의 비저류계수 및 투수계수를 산정하였다. Choi and Daniel(2006a) 또는 Choi et al.(2008)이 제시한 데이터를 바탕으로 무차원 압축계수(α_p)에 따른 $\ln(R_e'/r_w)$ 를 산정하였다. 보정

Table 2. Comparison of hydraulic conductivities for different cutoff wall boundary conditions

Type Curve method					Modified Line-fitting method			
Consideration of real bentonite cake (current study)								
Case	α_p	$t_{1.0}$ at $\beta_p=1.0(s)$	S_s^a (m^{-1})	K^b (m/s)	$t_{0.37}$ (s)	$\ln(R_e'/r_w)$	f	K^c (m/s)
Case 1 (M-11/15 & 93-1)	5.62×10^{-2}	1.65×10^4	2.77×10^{-3}	3.3×10^{-8}	1.2×10^4	1.45	1.03	3.4×10^{-8}
Case 2 (M-17/21 & 94-15)	3.16×10^{-2}	3.55×10^4	2.77×10^{-2}	3.2×10^{-8}	3.0×10^4	1.60	1.14	3.5×10^{-8}
No-flux boundary condition (upper-bound) (Nguyen et al., 2011)								
Case	α_p	$t_{1.0}$ at $\beta_p=1.0(s)$	S_s^a (m^{-1})	K^b (m/s)	$t_{0.37}$ (s)	$\ln(R_e'/r_w)$	f^*	K^d (m/s)
Case 1 (M-11/15 & 93-1)	7.9×10^{-3}	8.0×10^3	3.9×10^{-4}	6.8×10^{-8}	1.2×10^4	1.89	0.63	6.8×10^{-8}
Case 2 (M-17/21 & 94-15)	7.1×10^{-3}	2.2×10^4	6.2×10^{-3}	5.2×10^{-8}	3.0×10^4	2.13	0.82	4.9×10^{-8}
No consideration of bentonite cake (Choi and Daniel, 2006a)								
Case	α_p	$t_{1.0}$ at $\beta_p=1.0(s)$	S_s^a (m^{-1})	K^b (m/s)	$t_{0.37}$ (s)	$\ln(R_e'/r_w)$	f	K^c (m/s)
Case 1 (M-11/15 & 93-1)	1.3×10^{-1}	2.2×10^4	6.7×10^{-3}	2.5×10^{-8}	1.2×10^4	1.15	0.98	2.6×10^{-8}
Case 2 (M-17/21 & 94-15)	3.9×10^{-2}	4.0×10^4	3.5×10^{-2}	3.0×10^{-8}	3.0×10^4	1.71	0.92	3.1×10^{-8}

$$a: S_s = \frac{\alpha_p}{L_w} \left(\frac{r_c}{r_w} \right)^2 \quad b: k = \frac{1.0r_c^2}{L_w t_{1.0}} \quad c: k = \frac{r_c^2 \left[f \times \ln \left(\frac{R_e'}{r_w} \right) \right]}{2L_w} \frac{1}{t_{0.37}} \quad d: k = \frac{r_c^2 \left[\ln \left(\frac{R_e'}{r_w} \right) / f^* \right]}{2L_w} \frac{1}{t_{0.37}}$$

계수(f)는 Fig. 3과 4와 같이 Slug_3D 프로그램을 통해 결정하였다. 마지막으로, 연직차수벽 뒷채움재 투수계수는 Table 2에 표시된 식 (c)를 통해 산정되었다. Nguyen et al.(2011)은 불투수 경계 조건을 적용할 때 수정계수(f^*)를 적용하여 Table 2의 식 (d)를 이용하여 연직차수벽 뒷채움재 투수계수를 산정하였다. Nguyen et al.(2011)이 도입한 수정계수(f^*)는 본 논문의 보정계수(f)의 역수와 같다.

Table 2의 비교에서 벤토나이트 케익을 고려하여 Type Curve법과 수정 Line-fitting법을 통해 산정된 투수계수는 Choi and Daniel(2006a)의 벤토나이트 케익을 고려하지 않은 기존 결과(일정 수두 경계 조건)보다는 약간 크고, Nguyen et al.(2011)의 불투수 경계 조건으로 산정한 투수계수보다는 매우 작음을 알 수 있다. 즉, 벤토나이트 케익의 존재를 불투수 경계 조건으로 고려하게 되면 순간변위시험을 통해 구해진 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수가 상한치(upper bound)값을 갖게 되고 이는 연직차수벽의 과다한 보수적 설계를 야기할 수 있다. 또한, 각 해석조건에 대해서 Type Curve법과 수정 Line-fitting법을 통해 유사한 투수계수가 산정되었는데 이는 Type Curve법에 비해 해석절차가 간단한 수정 Line-fitting법의 적용성 및 효율성을 보여준다.

본 사례분석 뿐만 아니라 일반적으로 순간변위시험을 통해 산정된 투수계수는 일반적으로 실내시험을 통해 산정된 값보다 크다. 이러한 차이는 각 시험법이 다른 크기의 영향범위(scale effect)를 갖기 때문이다(Herzog and Morse, 1986; Bradbury and Muldoon, 1990; Bruner and Lutenegeger, 1994). Daniel and Choi(1999)는 현장의 순간변위시험이 고려할 수 있는 영향범위가 실내시험 시 적용되는 시료 크기보다 매우 크기 때문에 현장시험 영향범위에 균열이나 얇은 모래층을 포함할 확률이 높기 때문에 순간변위시험에 의해 평가되는 투수계수가 실내시험 결과보다 크다고 언급하였다.

6. 결 론

연직차수벽 뒷채움재의 현장 투수계수는 순간변위시험을 통해 평가될 수 있다. 본 논문에서는 연직차수벽에 생성되는 벤토나이트 케익의 영향을 평가하기 위해 기존의 Slug_3D 프로그램을 보완하여 일련의 해석결과들을 바탕으로 벤토나이트 케익이 순간변위시험에 미치는 영향을 평가하였다. 마지막으로, 확장된 Slug_3D의 모델을 통해 산정된 Type Curve와 보정계수(f)를 이용해 Choi

and Daniel(2006a)와 Nguyen et al.(2011)이 제안했던 기존의 두 가지 방법으로 현장 사례를 재분석하였다. 본 논문에서 얻은 결론 및 토의사항을 요약하면 다음과 같다.

- (1) Type Curve법을 사용하는 경우, 연직차수벽 뒷채움재의 압축성이 큰 경우(즉, 무차원 압축계수, $\alpha_p \geq 1.0 \times 10^{-1}$)에 대해서만, 벤토나이트 케익이 순간변위시험에 미치는 영향을 고려하기 위해 Nguyen 등(2011)이 제안한 불투수 경계 조건을 적용할 수 있다. 하지만, 뒷채움재의 압축성이 작은 경우($\alpha_p \leq 1.0 \times 10^{-1}$), 불투수 경계 조건으로 가정하는 것은 연직차수벽의 뒷채움재의 투수계수를 과도하게 보수적으로 평가할 수 있다(즉, 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 실제 보다 크게 평가).
- (2) 수정 Line-fitting법을 적용하는 경우, 실제 벤토나이트 케익을 고려하기 위한 보정계수(f)는 우물 편심과 뒷채움재의 압축성이 아주 큰 경우를 제외하고, 거의 1에 수렴한다. 이는 연직차수벽에 벤토나이트 케익이 실제로 존재하는 경우 순간변위시험 결과에 경계조건의 영향은 무시할 수 있을 만큼 작아짐을 의미한다. 즉, 벤토나이트 케익을 고려하지 않는 경우나 벤토나이트 케익을 고려하기 위해 경계면에 불투수 경계조건을 적용한 경우와 달리, 연직차수벽 뒷채움재의 투수계수를 산정할 때 $\ln(R_e'/r_w)$ 값에 대한 별도의 보정이 필요 없다.
- (3) 기존 사례에 대한 재분석에서 벤토나이트 케익을 고려하여 Type Curve법과 수정 Line-fitting법을 통해 산정된 투수계수는 Choi and Daniel(2006a)의 벤토나이트 케익을 고려하지 않은 기존 결과(일정 수두 경계 조건)보다는 약간 크고, Nguyen et al.(2011)의 불투수 경계 조건으로 산정한 투수계수보다는 매우 작았다. 또한, 각 해석조건에 대해서 Type Curve법과 수정 Line-fitting법을 통해 산정된 투수계수가 유사하므로 Type Curve법에 비해 해석절차가 간단한 수정 Line-fitting법을 대체하여 적용할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 논문을 위한 연구는 한국학술진흥재단의 지원을 받는 연구비(신진교수지원연구-기초과학분야-D00477)와 BK21(T0901451)로 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Anderson, M. and W. Woessner (1992), *Applied ground water*

modeling: Simulation off low and advective transport, Academic Press Inc., SanDiego, Calif.

2. Bouwer, H. and R. C. Rice (1976), "A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifer with completely or partially penetrating wells", *Water Resource Research*, 12(3), 423-428.

3. Bradbury, K. R. and M.A. Muldoon (1990), "Hydraulic conductivity determinations in unlithified glacial and fluvial materials", *Ground Water and Vadose Zone Monitoring*, ASTM, STP No. 1053, edited by D. M. Nielsen and A. I. Johnsen, pp.138-151, ASTM, Philadelphia, Penn.

4. Brigham Young University (1994), GMS, version 3.1, Provo, Utah.

5. Britton, J. P. (2001), *Soil-bentonite slurry trench walls: hydraulic conductivity and contaminant transport*, Ph.D. diss., Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Virginia.

6. Britton, J. P., G. M. Filz, and J. C. Little (2002), "Shape factors for single-well tests in soil-bentonite cutoff walls", *Proceeding of 4th International Congresson Environmental Geotechnics*, edited by deMello and Almeida, pp.639-644, Balkema Publishers, Rio de Janeiro, Brazil.

7. Britton, J. P., G. M. Filz, and W. E. Herring (2004), "Measuring the hydraulic conductivity of soil-bentonite backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(12), 1250-1258.

8. Britton, J. P., G. M. Filz, and W. E. Herring (2005), "Slug tests in soil-bentonite slurry trench walls using a push-in piezometer tip", *Waste Containment and Remediation*, ASCE, GSP No. 142 (CD-ROM), edited by J. C. Evans, ASCE, Reston, Virginia.

9. Bruner, D. G. and A. J. Lutenegeger (1994), "Measurement of saturated hydraulic conductivity in fine-grained glacial tills in Iowa: Comparison of in situ and laboratory methods", *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM, STP No. 1142, edited by D. E. Daniel and S. J. Trautwein, pp. 255-265, ASTM, Philadelphia.

10. Butler, J. J. (1996), "Slug tests in situ characterization: Some practical consideration", *Environmental Geosciences*, 3(2), 154-163.

11. Choi, H. (2002), *Analysis of slug tests to determine hydraulic conductivity of vertical slurry trench walls*, Ph.D. diss., University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois.

12. Choi, H. (2007), "Numerical model for analyzing slug tests in vertical cutoff walls", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(10), 1249-1258.

13. Choi, H. and D. E. Daniel (2006a), "Slug test analysis in vertical cutoff walls. I: Analysis Methods", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(4), 429-438.

14. Choi, H. and D. E. Daniel (2006b), "Slug test analysis in vertical cutoff walls. II: Applications", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(4), 439-447.

15. Choi, H., T.-B. Nguyen, and C. Lee (2008), "Slug test analysis to evaluate permeability of compressible materials", *GroundWater*, 46(4), 647-652.

16. Chung, J. and D. E. Daniel (2008), "Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 31(3), 243-251.

17. Cooper, H.H., J.D. Bredehoeft, and I.S. Papadopoulos (1967), "Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water", *Water Resource Research*, 3(1), 263-269.

18. Daniel, D. E. and H. Choi (1999), "Hydraulic conductivity evaluation

of vertical barrier walls”, *Geo-engineering for under ground facilities*, ASCE, GSP No. 90, edited by G. Fernandez and R. A. Bauer, pp. 140-161, ASCE, Reston, Virginia.

19. D’Appolonia, D. J. (1980), “Soil-bentonite slurry trench cutoffs”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 106(4), 399-417.

20. EMCON (1995), *West Contra Costa Sanitary Landfill*, Richmond, California.

21. Filz, G. M., R. D. Boyer, and R. R. Davidson (1997), “Bentonite-water slurry rheology and slurry trench wall trench stability”, *In Situ Remediation of the Geoenvironment*, ASCE, GSP No. 71, edited by J. C. Evans, pp.139~153, ASCE, Reston, Virginia.

22. Filz, G.M., L.B. Henry, G.M. Heslin, and R.R. Davidson (2001), “Determining hydraulic conductivity of soil-bentonite using the API filter press”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 24(1), 61-71.

23. Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.

24. Henry, L. B., G. M. Filz, and R. R. Davidson (1998), “Formation and properties of bentonite filter cakes”, *Filtration and Drainage in Geotechnical/Geoenvironmental Engineering*, ASCE, GSP No.78, edited by L. N. Reddi and M. V. S. Bonalo, pp.69-88, ASCE, Reston, Virginia.

25. Herzog, B. L. and W. J. Morse (1986), “Hydraulic conductivity at a hazardous waste disposal site: Comparison of laboratory and field-determined values”, *Waste Management & Research*, 4(2), 177-187.

26. Hvorslev, M. J. (1951), “Time lag and soil permeability in ground water observation”, *Bulletin No. 36, Water ways Experiment Station*, U. S. Army Corps of Engineering, Vicksburg, Mississippi.

27. Khoury, M. A., P. H. Fayad, and R. S. Ladd (1992), “Design, construction and performance of a soil-bentonite cutoff wall constructed in two stages”, *Slurry wall: Design, construction, and quality control*, ASTM, STP No.1129, edited by D. B. Paul et al., pp.289-308, ASTM, Philadelphia.

28. Lee, H. W. and P. W. Chang (2007), “Correlation between the laboratory and in-situ permeability for the embankments”, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, 11(1), 1-5.

29. Nash, K. L. (1974), “Stability of trenches filled with fluids”, *Journal of the Construction Division*, ASCE, 100(CO4), 533-542.

30. Nguyen, T.-B. (2011), *Performance of soil-bentonite slurry walls: Flow rates and contaminant containment*, Ph.D. diss., Korea University, Seoul, Republic of Korea.

31. Nguyen, T.-B., C. Lee, and H. Choi (2010a), “Estimation of hydraulic conductivity of bentonite filter cake in laboratory”, *Proceeding of 6th International Congress on Environmental Geotechnics*, edited by M. Datta et al., pp.1393-1396, McGraw-Hill, New Delhi, India.

32. Nguyen, T.-B., C. Lee, S. Kim, and H. Choi (2010b), “Modification of the Bouwer and Rice method to a cutoff wall with a filter cake”, *Groundwater*, 48(6), 898-902.

33. Nguyen, T.-B., C. Lee, and H. Choi (2011), “Slug test analysis in vertical cutoff walls with consideration of filter cake”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 137(8), 785-797.

34. Soroush, A. and M. Soroush (2005), “Parameters affecting the thickness of bentonite cake in cutoff wall construction: case study and physical modeling”, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 646-654.

35. Tallard, G. (1984), “Slurry trenches for containing hazardous wastes”, *Civil Engineering*, ASCE, 54(2), 41-45.

36. Teeter, R. M. and S. P. Clemence (1986), “In-place permeability measurement of slurry trench cutoff walls”, *Proceeding of Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, ASCE, GSP No.6, edited by S. P. Clemence, pp.1049-1061, ASCE, New York.

37. US ACE. (2010), *Guide specification for construction soil-bentonite (S-B) slurry trench*, U. S. Army Corps of Engineers, UFGS-02 35 27.

38. Yang, D. S., U. Luscher, I. Kimoto, and S. Takeshima (1993), “SMW wall for seepage control in levee reconstruction”, *Proceeding of 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, edited by S. Prakash, pp.487-492, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri.

39. Xanthakos, P.P. (1979), *Slurry Walls*, McGraw-Hill, New York.

(접수일자 2012. 11. 14, 심사완료일 2013. 6. 18)

기 호

$\alpha_p = S_s L_w r_w^2 / r_c^2$ = 무차원 압축계수

$\beta_p = k L_w t / r_c^2$ = 무차원 시간변수

D_v = 슬러리 월의 중앙에서 우물의 중앙까지의 수평방향 편차

$2D_v / (W - 2r_w)$ = 무차원 우물 편차계수

f = 수정 Line-fitting법의 보정계수(Choi와 Daniel, 2006a)

f^* = 불투수 경계 조건에서의 수정 Line-fitting법의 보정계수 (Nguyen 등, 2011)

H_0 = 초기 수두 강하

$H(t)$ = 우물 케이싱에서 임의의 시간에서의 수두

$H(t)/H_0$ = 우물 케이싱에서의 정규 수두

k_{cake} = 벤토나이트 케익의 투수계수

k_{soil} = 주변 지반의 투수계수

k_{wall} = 슬러리 월 뒷채움재의 투수계수

L = 슬러리 월의 깊이

L_t = 지하수면에서 우물 유입부까지의 거리

L_w = 필터팩의 높이

R_e' = 수정된 유효 반경

r_c = 우물 케이싱의 내경

r_w = 필터팩의 외경

S_s = 지반의 비저류계수

s = 슬러리 월에서 우물 유입부의 연직 방향의 상대적인 위치($0 \rightarrow \infty$)

$t_{0.37}$ = Bouwer and Rice법에서 기본 경과 시간($H(t)/H_0 = 0.37$ 일 때의 시간)

$t_{1.0}$ = Type Curve법에서 $\beta_p = 1.0$ 일 때의 시간

W = 슬러리 월의 폭