수치해석을 통한 해상처분장 연직차수공 안정성 및 지반 내 흐름특성 평가

Numerical Analysis on the Flow and Stability of Vertical Hydraulic Barrier at Offshore Containment Facility

채광석* · 오명학**

*GS건설 스마트건설연구팀

**한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터

Kwangseok Chae* · Myounghak Oh**

*Smart construction Research Team, GS Engineering & Construction, Seoul, Korea

**Department of Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea

Abstract

Preventing leakage and structural stability of vertical barrier at offshore containment facilities are very important. Two-dimensional numerical analysis were performed to evaluate seepage and flow characteristics regarding to different embedded depths and hydraulic permeability of vertical barrier. In addition, stress and displacement at corner of vertical barrier were evaluated by using 3-dimensional numerical analysis. The effluent flux in the case of vertical barrier with insufficient embedded depth was significantly increased by 200 ~ 240 times compared with the case of embedded barrier in low permeable clay layer. The effluent flux was increased by 4.5 and 45 times according to 10 and 100 times increase of hydraulic permeability of vertical barrier, respectively. The seepage and flow analysis results imply that the most important factor to prevent leakage is to embed the vertical barrier in low permeable layer. The 3-dimensional stress and displacement analysis results showed small displacement but large moment and shear stress at the corner of vertical barrier. Therefore, the stiffness and strength at the corner of vertical barrier compared with other parts should be increased to secure stability of vertical barrier at offshore disposal facilities.

Keywords : offshore containment facility, waste disposal, vertical hydraulic barrier, PLAXIS

1. 서론

지속적인 폐기물 매립수요에도 불구하고 육상 신규 매립지 확보의 어려움으로 인한 폐기물 처리공간 부족 문제의 대안으로 해상처분장이 제시되고 있다(Oh et al. 2014; Oh et al. 2016; Park et al. 2016; Kim et al. 2018). 일본의 경우 대도시 인근을 포함하여 전국적으로 다수의 해상처분장을 조성하여 준설토, 소각재, 무기성 고형폐기물 등을 해상처분장에 매립하고 있으며 매립이 완료되면 공원이나 항만부지 등으로 개발하여 활용하고 있다. 그러나, 우리나라는 아직까지 해상처분장의 설계 및 시공경험이 없기 때문에 해상처분장 도입을 검토하는 단계에서부터 해상처분장의 건설 및 운영을 고려한 심도있는 연구가 필요하다.

해상처분장에서 내부 침출수의 외부 유출 방지를 위해서는 차수시스템이 가장 중요하다. 해상처분장 내부 해저면 차수를 위한 바닥차수층의 경우에는 해저지반이 저투수성 점토층이 두텁게 존재하는 경우 이를 그대로 이용할 수도

있으나 지반의 투수성이 큰 경우에는 저투수성 지반으로 개량하거나 차수시트를 설치하여 하부지반으로의 침출수 침투를 최소화한다. 또한, 연직차수공을 설치하여 해상처분장 내부 침출수의 유출을 방지하게 된다. 바닥차수층 및 연직차수공의 성능요구조건 항목으로는 일반적으로 투수계수와 두께가 기준으로 적용된다. Hwang et al.(2018)은 침투이류분산 해석을 통해 차수시스템의 투수계수 및 두께 변화에 따른 오염물질 유출 저감성능을 평가하여 해상처분장 차수시스템의 투수계수 및 두께에 대한 최소 요구기준을 제안한 바 있다. 연직차수공을 현장에 설치함에 있어서 연직차수벽체로 완전히 차폐하는 것은 비경제적이고(Mitchell & Rumer, 1997) 현실적으로도 쉽지 않으므로 유출방지 기능을 충분히 발휘할 수 있는 적정 근입깊이까지 설치하게 된다(Park et al., 2016). 그러나, 연직차수공의 투수계수 및 두께가 최소 요구기준을 만족하더라도 연직차수공이 적정 근입깊이까지 설치되지 않거나 시공중 또는 운영중에 차수벽체에 손상이 생겨 누수가 발생하는 경우에는 처분장 내

의 해수와 빗물 등이 섞인 침출수가 외부로 유출될 수 있다. 또한, 해상처분장 연직차수공의 과다한 변위 발생이나 우각부 응력집중으로 인한 연직차수공 파손이나 파괴시 폐기물과 침출수가 주변 해역으로 유출되어 환경오염을 초래할 수 있다. Kim et al.(2018)은 해상최종처리장 개념설계 기반의 기초 위험성 평가를 수행하여 연직차수공에 대한 위험요소로 강관 부식, 이음부 변형, 근입심도 미확보를 제시한 바 있다. 이들 요소는 연직차수공의 구조적 안정성에 영향을 주고 궁극적으로 해상처분장에서 기본적으로 요구되는 차수성능의 유지에 영향을 주기 때문이다. 따라서 연직차수공의 차수성능 및 구조적 안정성 확보는 해상처분장의 안전한 운영을 위해 매우 중요하다.

본 연구에서는 연직차수공 주변 지반에서의 침투 및 흐름 특성을 파악하고 연직차수공 우각부의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 유한요소해석기법의 지반해석 프로그램인 PLAXIS를 이용하였다. PLAXIS 2D flow를 이용하여 외해 조위변화 반영 여부에 따른 연직차수공의 근입깊이 및 손상에 따른 연직차수공 주변 지반에서의 침투 및 흐름 특성을 파악하기 위한 2차원 수치해석을 수행하였다. 또한, 연직차수공의 구조적 안정성에 대해서는 일반적으로 2차원적 토압이론에 의해 검토하지만, 연직차수공 우각부 구간에 대한 단면조건과 구속조건의 변화 등을 정확히 모사하여 우각부에서의 응력 간섭과 집중, 변위 발생 특성 등을 평가하고자 PLAXIS 3D를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석방법

2.1 2차원 침투흐름해석 방법

본 연구에서 해석을 수행한 단면조건은 Fig. 1과 같다. 평

균해수면 기준으로 수심은 10m이고, 해저지반 조건은 상부에 실트질 모래층이 14m 두께로 존재하고 그 하부에 저투수성 점토층이 존재하는 조건으로 가정하였다. 연직차수벽체는 점토층에 근입된 경우와 점토층에 근입되지 않은 경우로 구분하였다.

Fig. 2는 PLAXIS 2D flow 해석을 위한 유한요소망을 나타낸 것이다. 2차원 침투흐름 해석을 위한 유한요소망에서의 변위경계조건은 좌우연직면은 수평변위를 구속하였고, 최저면은 연직변위를 구속하였다. 모델링에 적용된 요소 개수는 1,408~1,430개, 절점수는 11,701~11,877개로 연직차수공 근입깊이 조건에 따라 약간의 차이가 있다. 각 재료에 적용된 요소와 해석모델은 15절점 삼각형요소와 Linear-Elastic 모델을 적용하였다. 2차원 침투해석에서 입력변수로서 투수계수가 가장 중요하다. Table 1에 본 해석에 적용된 입력변수를 정리하였다. 본 해석에 적용된 투수계수는 일반적인 모래와 점토의 투수계수를 적용하였다. 연직차수공의 투수계수값은 Japanese Geotechnical Society(1991)에서 제시한 방법을 적용하였다. Japanese Geotechnical Society(1991)는 실제 시공조건에 가까운 상태에서 강제 시트파일의 차수성능 평가시험 결과로부터 연결부에 차수재를 도포한 시트파일의 투수계수는 두께 50cm인 차수벽체로 환산하여 10^{-8}cm/s 이하로 평가할 수 있다고 제시하였다(Chae and Oh, 2020). 이에 본 해석에서는 손상이 없는 차수시트파일을 두께 50cm, 투수계수 $1.0 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ 인 균질재료로서 모델화하였다. 연직차수공 손상으로 인한 차수성능의 저하를 모사하기 위하여 연직차수공에 손상 정도를 투수계수를 변화시키는 방식으로 수치해석에 반영하였다. 연직차수공의 손상 정도에 따라 투수계수가 각각 10배, 100배 증가된 것으로 가정하여 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서 수행한 수치해석 조건을 Table 2에 정리하였

Fig. 1. Cross-sectional view for numerical analysis on vertical hydraulic barrier and ground condition

다. 일반적으로 해상처분장에서는 침출수의 외부 유출 가능성을 저감시키기 위해서 외부에서 내부 방향으로 흐름 포텐셜이 형성되도록 내부 수위를 외부 수위보다 낮게 관리하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 근입깊이 조건과 연직차수공 차수성(투수계수) 확보 수준에 따라 침투 및 흐름 특성을 비교·평가하는 것이 목적이기 때문에 내부에서 외부로 유출이 발생하는 조건에 대해 해석을 수행하기 위하여 내부 수위를 평균해수면보다 2m 높은 조건으로 가정하

였다. 침투해석을 위한 수두경계조건은 수위가 일정한 경우는 해측과 내측수두를 일정하게 유지하는 것으로 적용하였다. 또한, 조위변동을 고려한 경우에 대해서는 해측의 수두가 시간에 따라 변화되도록 수두경계조건을 설정하였다.

2.2 3차원 응력변위해석 방법

연직차수공의 우각부 응력변위 해석을 위한 3차원 유한요소망은 Fig. 3과 같다. 3차원 유한요소망에서의 변위경계

Fig. 2. Mesh configuration for PLAXIS 2D analysis on seepage and flow

Table 1. Input parameters for 2-D seepage and flow analysis

Component		void ratio	hydraulic permeability (cm/s)	
			vertical	horizontal
Silty sand layer		0.2	1.0×10^{-5}	
Clay layer		0.2	5.0×10^{-7}	7.0×10^{-7}
Vertical barrier	without damage	0.1	1.0×10^{-8}	
	with small damage		1.0×10^{-7}	
	with large damage		1.0×10^{-6}	

Table 2. Summary of numerical analysis cases

Cases	Vertical barrier		Water level	
	embedded condition	hydraulic permeability (cm/s)	Sea	inside
Case_n0_c	not embedded in clay layer	1.0×10^{-8}	EL 0.0m	EL(+).2.0m
Case_n0_v			EL(+).4.0~EL(-).4.0m	
Case_e0_c			EL 0.0m	
Case_e0_v	embedded in clay layer	1.0×10^{-7}	EL(+).4.0~EL(-).4.0m	
Case_e1_c			EL 0.0m	
Case_e1_v		1.0×10^{-6}	EL(+).4.0~EL(-).4.0m	
Case_e2_c			EL 0.0m	
Case_e2_v			EL(+).4.0~EL(-).4.0m

Fig. 3. Mesh configuration for PLAXIS 3D analysis on stability of vertical barrier

Table 3. Input parameters for 3-D analysis on stress-strain of vertical barrier

Materials	Unit weight (kN/m ³)	E (kN/m ²)	Poisson's ratio (ν')
Silty sand layer	18.0	50,000	0.3
Clay layer	18.0	50,000	0.3
Sheet pile	26.22	33.37×10^6	0.1
Filling material between double sheet piles	18.0	10,000	0.3
Inside reclamation layer	17.0	20,000	0.3

조건은 X 및 Y방향 좌우연직면은 수평변위를 구속하였고, Z방향 최저면은 연직변위를 구속하였다. 3차원 해석에서 요소 개수는 161,588개, 절점수는 214,571개로 모델링되었다. Soil 요소는 15절점 삼각형요소와 Linear Elastic 모델을, 강관시트파일(Steel Pipe Sheet Pile, SPSP)은 Plate요소와 Linear Elastic 모델을 각각 적용하였다. 3차원 응력변위 해석에서 2중 연직차수벽체의 외벽과 내벽 사이에는 모래채움재를 적용하였고 해상처분장 내부의 매립하중을 고려하기 위하여 배면매립토를 추가로 적용하였다. 3차원 응력변위 해석에 적용된 입력변수는 Table 3과 같다. 또한, 내진해석에 필요한 시간-가속도 곡선은 PLAXIS에 내장된 시간-가속도 곡선을 적용하였다.

3. 침투흐름 해석결과

3.1 연직차수공 근입깊이 영향

Fig. 4와 5는 해상처분장 내부 수위는 EL.(+)2m로 일정하고 외부 수위가 각각 (+)4m, (-)4m인 조건에서 연직차수공이 근입된 지반 내에서 발생하는 흐름 벡터를 나타낸 지반 단면을 도시한 그림이다. 손상이 없는 연직차수벽체가 설치된 경우 벽체를 통한 흐름은 발생하지 않았으나 연직차수공 선단부 지반을 통해 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 연직차수공이 저투수성 점토층에 근입된 경우 선단부에서는 흐름 발생이 상대적으로 억제되고 있으나, 근입깊이가

불충분한 경우에는 선단부를 통하여 더 큰 흐름벡터가 형성되는 것을 알 수 있다. 또한, 해수면이 (+)4m인 경우에는 흐름벡터의 방향이 외측에서 내측으로(그림의 연직차수벽체 기준으로 좌측에서 우측으로) 형성되고 해수면이 (-)4m인 경우에는 반대로 내부에서 외측으로 흐름벡터가 형성된 것을 확인할 수 있다. 즉, 해수면의 변동에 따라 외부 해수면의 수위변화가 존재하는 경우 수위가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 흐름 방향이 형성되었다.

침투흐름해석을 통해 연직차수공 및 하부지반을 통한 유출입 유량을 평가하였다. 외해 수위가 평균해수면으로 일정하게 유지되는 경우에는 내부 수위가 상대적으로 높기 때문에 지하수이동은 시간에 관계없이 내측에서 해측으로 일정한 유량이 지속적으로 유출되는 것으로 나타났다. 연직차수공이 점토층에 관입되지 않은 경우(Case_n0_c)에는 0.2 m³/day/m의 유출량을 나타내었으나, 연직차수공이 점토층에 관입된 경우(Case_e0_c)에는 0.0009 m³/day/m로 유출량을 크게 감소시켜 차수효과가 있는 것으로 나타났다.

조위변화를 고려한 경우에는 연직차수공 하부지반을 통과하는 흐름 방향과 유량이 외부 조위변화에 따른 변동성을 나타내었다. Fig. 6은 조위변동시 1일 동안 시간별 유량의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 (-)유량은 연직차수공 내측에서 해측으로 유출되는 유량, (+)는 해측에서 연직차수공 내측으로 유입되는 유량으로 나타내었다. 연직차수공이 점토층에 근입된 경우(Case_e0_v)에는 연직차수공으로

(a) Sea water level: EL.(-)4m

(b) Sea water level: EL.(+)4m

Fig. 4. Flow vector in the case of vertical barrier not embedded in clay layer

(a) Sea water level: EL.(-)4m

(b) Sea water level: EL.(+)4m

Fig. 5. Flow vector in the case of vertical barrier embedded in clay layer **Fig. 6.** Flux variation with time due to tidal variation during one day

인한 차수효과가 충분히 발휘되어 지반을 통한 흐름이 거의 발생하지 않아 조위변동을 고려하더라도 유량변동은 $(-)0.004 \sim (+)0.002 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 양과 변화가 크지 않았다. 그러나, 연직차수공이 점토층에 근입되지 않은 경우(Case_n0_v)

에는 해수면 수위가 낮아져서 내외부 수위차가 6m로 되는 시점에서 최대 $(-)0.63 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 의 유량이 내부에서 외부로 유출되는 것으로 나타났다. 이는 연직차수공 선단부가 저 투수성 지층에 근입되지 않았기 때문에 Fig. 5에 나타난 바

와 같이 연직차수공 선단부 지반을 통해 흐름이 발생하기 때문이다. 해측 조위변화로 발생하는 내외부 수위차의 변동으로 인하여 지하수이동은 내측에서 해측으로 또는 해측에서 내측으로 주기적으로 변동하는 것을 알 수 있으며 변동양상은 내외부의 수위차 변화경향과 동일하게 나타났다.

Fig. 7은 50년간의 장기간에 걸쳐 지반을 통해 유출입되는 누적유량을 나타낸 것이다. 그림에서 (-)는 내부에서 외부로 유출되는 상태를 의미한다. 연직차수공이 점토층에 근입된 경우 50년 경과시점에서 누적유출량은 $24.6\text{ m}^3/\text{m}$ (Case_e0_v) ~ $29.5\text{ m}^3/\text{m}$ (Case_e0_c)으로 나타났다. 이에 비해 연직차수공을 점토층에 근입하지 않은 경우에는 50년 경과시점에서의 누적유출량은 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 연직차수공의 저투수성 지층의 관입여부가 침출수 등의 유출방지를 위한 차수성능의 확보에 매우 중요한 요인임을 나타낸다. 따라서, 연직차수공 시공시 선단을 불투수층까지 근입하여야 하부 지반을 통한 침출수 또는 지하수의 유출을 효과적으로 방지할 수 있을 것이다. 한편, 조위변동을 고려한 경우에 해수면이 평균해수면으로 일정하게 유지된 경우보다 누적유출량이 작게 나온 것은 해수면이 변동하는 경우 하부 지반을 통한 흐름방향이 내외부 수위차에 따라 주기적으로 바뀌게 되므로 외부에서 내부로 유입되는 흐름 발생시의 유입량이 누적유출량의 일부를 상쇄시키는 효과 때문인 것으로 판단된다.

3.2 연직차수공 손상 영향

Fig. 8~9는 해상처분장 내부 수위는 EL.(+)2m로 일정하고 외부 수위가 각각 (+)4m, (-)4m인 조건에서 연직차수공의 투수계수가 각각 10배, 100배 증가된 경우의 흐름벡터를 나타낸 그림이다. 연직차수공에 손상이 없는 상태를 모사한 Fig. 5에서는 벽체를 통한 흐름이 발생하지 않았으나, Fig. 8~9에서는 벽체 전면에 걸쳐 수위가 높은쪽에서 낮은 쪽으로 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 투수계수가 커질수록 흐름이 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

연직차수공의 손상정도를 모사한 투수계수 변화에 따른 연직차수공 및 하부지반을 통한 유출입 유량을 평가하였다. 외해 수위가 평균해수면으로 일정하게 유지되는 경우에는 내부 수위가 상대적으로 높기 때문에 시간에 관계없이 내측에서 해측으로 일정한 유출량이 지속되는 것으로 나타났다. 연직차수공에 손상이 없는 경우(Case_e0_c)에는 $0.0009\text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 의 유출량을 나타내었으나, 연직차수공 손상으로 투수계수가 증가한 경우(Case_e1_c, Case_e2_c)에는 각각 $0.005\text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$, $0.04\text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 투수계수에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 조위변동시 1일 동안 연직차수벽체와 하부지반을 통과하는 유량의 변화는 Fig. 10에 도시하였다. 조위변화를 반영한 경우 연직차수벽체 및 하부지반을 통한 흐름 방향과 유량의 변화는 외부 조위변화로 인한 내외부 수위차 변화와 동일한 변동성을 나타내었다. 또한, 조위변화에 따른 유량의 크기와 변동성은 연직차수공의 투수계수가 커질수록 비례해서 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 시간경과에 따라 내측에서 해측으로 유출되는 누적유량을 보여주고 있다. 연직차수공 손상정도에 따른 (-) 누적유량 증가량은 연직차수공에 손상이 없는 경우(Case_e0)를 기준으로 연직차수공 손상이 적은 경우(Case_e1) 약간 증가하며, 손상이 큰 경우(Case_e2) 더욱 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 해석결과를 바탕으로 향후 해상처분장 유지관리 시 유량의 모니터링을 통해서 유량 증가정도에 따라 연직차수공의 손상여부를 간접적으로 평가하는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

연직차수공 투수계수 증가에 따른 누적유출량(Fig. 11)을 연직차수공 근입 조건에 따른 누적유출량(Fig. 7)과 비교해보면, 연직차수공 손상에 의한 유출량보다 연직차수공이 저투수성 점토층에 근입되지 않은 경우의 유출량이 약 5배 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 이는 연직차수공에서 저투수성 지층으로의 근입여부가 차수기능을 확보하는 데 가장 중요한 요소임을 나타낸다. 그러나, 연직차수공이 저투수성 지층까지 근입되더라도 투수계수가 확보되지 못하거

Fig. 7. Accumulated flux with time for 50 years simulation

Fig. 8. Flow vector in the case of vertical barrier with small damage (hydraulic permeability= 1×10^{-7} cm/s)

Fig. 9. Flow vector in the case of vertical barrier with large damage (hydraulic permeability= 1×10^{-6} cm/s)

Fig. 10. Flux variation due to tidal change variation during one day in the cases of different hydraulic permeability of barrier

Fig. 11. Accumulated flux with time for 50 years simulation

나 손상으로 인해 투수계수가 증가되면 연직차수공을 통한 누출이 발생할 수 있다. 따라서 해상처분장에서 내부 침출수의 유출을 방지하기 위해서는 우선적으로 연직차수공이 저투수성 지층에 근입되도록 설치해야 하며, 이후 연직차수공의 투수계수가 유지될 수 있도록 관리하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

4. 우각부 거동해석 결과

4.1 우각부 응력변위 특성

연직차수공 우각부 구간을 포함한 단면조건과 구속조건 등을 모사하여 우각부에서의 변위 발생 및 모멘트와 전단력 분포 특성을 평가하기 위하여 PLAXIS 3D를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다.

Fig. 12는 매립하중을 고려하여 수행된 정적 응력변위 해석결과를 제시한 것이다. Fig. 12(a)와 (b)는 내측 및 해측 연직차수벽체의 변위발생 특성을 보여주고 있다. 중앙구간에는 변형이 다소 크며, 우각부 구간에서는 구속응력 증가로 변위가 작게 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 외측 변위량에 비해 내측의 변위가 크게 나타나는데 이는 매립에 따른 수평하중을 내측 연직차수벽체에서 우선적으로 받기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 12(c)는 내측 및 해측의 연직차수벽체에서 발생하는 모멘트 분포를 보여주고 있다. 중앙구간에는 모멘트가 다소 작으며, 우각부 구간에서는 응력집중으로 모멘트가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 내측에 작용하는 모멘트가 외측에 작용하는 모멘트보다 크게 작용하고 있는데 이는 구속하중과 변위차로 인해 내측 모멘트가 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12(d)는 내측 및 해측의 연직차수벽체에서 발생하는 전단력 분포를 보여주고 있다. 중앙구간에는 전단력이 다소 작으며, 우각부 구간에서는 응력집중으로 전단력이 크게 발생하고

있음을 알 수 있다. 그리고 내측에 작용하는 전단력이 외측에 작용하는 전단력보다 크게 작용하고 있는데 이는 구속하중과 변위차로 인해 내측 전단력이 크게 작용하는 것으로 판단된다.

4.2 지진시 우각부 응력변위 특성

정적 응력변위해석에 지진 가속도를 추가로 고려하여 동적 응력변위해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 13에 제시하였다. Fig. 13(a)와 (b)는 내측 및 해측의 연직차수벽체 변위를 보여주고 있다. 중앙구간에는 변형이 다소 크며, 우각부 구간에서는 구속응력 증가로 변위가 작게 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 13(c)는 동적 응력변위해석에 의한 내측 및 해측 연직차수벽체에 발생하는 모멘트를 보여주고 있다. 중앙구간에는 모멘트가 다소 작으며, 우각부 구간에서는 응력집중으로 모멘트가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 내측에 작용하는 모멘트가 외측에 작용하는 모멘트보다 크게 작용하고 있는데 이는 구속하중과 변위차로 인해 내측 모멘트가 크게 작용하는 것으로 판단된다. Fig. 13(d)는 동적 응력변위해석에 의한 내측 및 해측 연직차수벽체의 전단력 분포를 보여주고 있다. 중앙구간에는 전단력이 다소 작으며, 우각부 구간에서는 응력집중으로 전단력이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 내측에 작용하는 전단력이 외측에 작용하는 전단력보다 크게 작용하고 있는데 이는 구속하중과 변위차로 인해 내측 전단력이 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

우각부의 변위, 모멘트, 전단력 거동 특성을 분석한 결과, 우각부는 변위는 작으나 모멘트 및 전단력이 크게 나타나 연직차수공의 구조적 파괴가능성 높은 구간으로 판단된다. 따라서 해상처분장의 장기안정성 확보를 위해 우각부 구간 연직차수공의 강성 및 강도를 증가시킬 필요가 있다. 변형은 적으나 응력이 집중되는 구간(우각부 및 주변)에는 응력

Fig. 12. Static analysis results on stress and strain of vertical barrier using Plaxis 3D

Fig. 13. Dynamic analysis results on stress and strain of vertical barrier using Plaxis 3D

집중구간 연직차수공 단면을 적용하고, 변형은 다소 크나 응력집중이 발생하지 않는 구간에는 일반구간 연직차수공 단면을 적용함으로써 안정성과 경제성을 동시에 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연직차수공 주변 지반에서의 침투 및 흐름 특성을 파악하고 연직차수공 우각부의 구조적 안정성을 평

가하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

연직차수공을 저투수성 점토층에 근입하지 않은 경우에는 저투수성 점토층에 근입한 경우에 비해 유출량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 연직차수공의 저투수성 지층의 관입여부가 침출수 등의 유출방지를 위한 차수성능의 확보에 매우 중요한 요건임을 나타낸다. 따라서, 연직차수공 시공시 선단을 불투수층까지 근입하여야 하부 지반을 통한 침출수 또는 지하수의 유출을 효과적으로 방지할 수 있을 것이다. 다만, 연직차수공 최적 근입깊이 산정을 위해서는 현장지반조건과 수위조건 등을 고려하여 차수성능과 구조적 안정성, 경제성을 종합적으로 고려한 연구가 추후 필요할 것으로 생각된다.

연직차수공이 저투수성 지층까지 근입되더라도 투수계수가 확보되지 못하거나 손상으로 인해 투수계수가 증가되면 연직차수공을 통한 누출이 발생할 수 있다. 연직차수공 손상에 의하여 투수계수가 10배, 100배 증가됨에 따라 유출 유량도 그에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 해상처분장에서 내부 침출수의 유출을 방지하기 위해서는 연직차수공이 저투수성 지층에 근입되도록 설치한 이후 연직차수공의 투수계수가 장기적으로 유지될 수 있도록 관리하는 것이 중요하다.

우각부의 변위, 모멘트, 전단력 거동 특성을 분석한 결과, 우각부는 변위는 작으나 모멘트 및 전단력이 크게 나타나 연직차수공의 구조적 파괴가능성 높은 구간으로 나타났다. 따라서 해상처분장의 장기안정성 확보를 위해 우각부 구간 연직차수공의 강성 및 강도를 증가시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받은 연구(폐기물 해상 최종처리기술 개발) 및 한국해양과학기술원 주요사업(PE99933)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chae, K. and Oh, M. (2020). "Contaminant transport characteristics through double vertical hydraulic barrier at offshore containment facility considering tidal change." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 3, pp. 147-154 (in Korean).
- Hwang, W. K., Oh, M. H., Kim, T. H. and Kim, H. E. (2018). "Evaluation of optimal performance of hydraulic barriers in offshore landfill using seepage-advection-dispersion analysis under steady state flow." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 30, No. 2, pp. 61-68 (in Korean).
- Japanese Geotechnical Society (1991). Digging work and groundwater - from investigation, design to construction, pp. 70-71 (in Japanese).
- Kim, S. W., Oh, S. H., Oh, M. and Seo, S. N. (2018). "Preliminary hazard analysis based on a conceptual design of the offshore waste disposal facility." *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 6, pp. 395-404 (in Korean).
- Mitchell, J. K. and Rumer, R. R. (1997). "Waste containment barriers: Evaluation of the technology." In: J. C. Evans (ed.). *In situ remediation of the geoenvironment*. Geotechnical Special Publication No. 71, ASCE, pp. 1-25.
- Oh, M., Park, H. and Kwon, O. (2016). "Analysis on seepage behavior according to extended length of HDPE sheet of rubble mound revetment at offshore landfill." *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol. 15, No. 3, pp. 39-47 (in Korean).
- Oh, M., Kwon, O., Park, S., Jin, S. and Oh, Y. (2014). "Economic feasibility on construction of offshore final disposal facility." *Journal of Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 1, No. 4, pp. 156-161 (in Korean).
- Park, H., Oh, M. and Kwon, O. (2016). "Analysis on contaminant transport according to the embedded depth of vertical barrier of offshore landfill." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 8, pp. 29-37 (in Korean).