

조위 변화에 따른 제체의 침하 특성에 관한 연구

A study on characteristics of seadike settlement according to the change of tidal level

유현구¹⁾, Hyun-Gu Yoo, 김종윤²⁾, Jong-Yun Kim, 윤명석²⁾, Myung-Seok Yoon, 김수삼³⁾, Soo-Sam Kim

- 1) 한양대학교 공학대학 토목공학과 석사과정, Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. Hanyang.
- 2) 한양대학교 공학대학 토목공학과 박사과정, Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. Hanyang.
- 3) 한양대학교 공학대학 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. Hanyang.

SYNOPSIS : Seepage condition by sea water may appears on sea dike due to the gap of tidal, which generated by the sealevel repeatedly moves up and down result of the change of tidal level. In this study, apparatus was developed to apply similitude after setting the critical section. It was found that the soil loss was dramatically increased by increasing hydraulic gradient step by step. Also, to understand the change of seadike which considered the changes of the change of tidal level and inside sealevel, it was executed the experiments which divided the sea level condition of inside by continually changes the sealevel difference which is outside of the high tide and ebb tide.

Keywords : seadike, seepage, hydraulic gradient, sealevel

1. 서론

방조제는 조위 변화에 따라 해수면이 상승과 하강을 반복하여 조위차에 의한 해수의 반복적인 침투 현상이 발생한다. 침투 현상은 지속적으로 바닥보호공 내의 유로를 형성시켜 성토 재료의 유실에 의한 제체의 침하를 유발시킨다. 기존 연구에서 오남선 등(2000) 조위변동을 고려한 파이핑 해석을 실시하였고 정신택(2002)은 비정상 상태의 방조제 침투해석을 수행하였다. 조위 변화를 고려한 제체의 거동을 파악하기 위한 기존의 수치해석적인 접근은 실제 제체내에서 발생하는 다양한 인자들을 반영하는데에 한계가 있다. 이러한 수치해석의 불확실성을 극복하기 위해서 상사법칙을 적용하여 제체의 한계구간을 모사한 실내 실험을 통하여 방조제 제체 변형에 관한 실질적인 거동을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 방조제의 침하 특성을 파악하기 위하여 동수경사 제어와 조위 변화 모사가 가능한 실험기를 제작하였다. 실험기는 방조제의 한계 구간을 설정한 후 상사법칙을 적용하여 1/25의 축소 모형을 제작하였다. 내측의 수위를 일정하게 유지시킨후 외측의 수위를 조절하여 동수경사를 증가시켜 침하 및 유실이 급격히 발생하는 구간을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 또한, 조위 변화와 내측수위 변화를 고려한 방조제 제체의 변형을 파악하기 위하여 외측의 만조위와 간조위 상태의 수위차를 지속적으로 변화하여 내측의 수위조건을 구분하여 각각 실험을 수행하였다.

2. 파이핑의 원리

제체는 파이핑이 쉽게 발생할 수 있는 토목구조물이다. 제체는 홍수시 유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 토질재료 등으로 축조한 구조물이다. 하천이나 바다에서 물이 흐르면 제외지에서 제내지로 제체 및 제체 하부 기초지반으로 물이 침투된다. 이 침투력이 어느 한계를 넘어서 침투수가 토립자를 이동시킬 만큼 충분한 속도를 가지게 되면 유출면에서 침식이 시작되고 공동을 형성하면서 내부로 진행되는 파이핑 현상이 발생한다. 파이핑에 의한 붕괴는 갑작스럽게 일어나는 특징이 있다. 파이핑이 진행되는 동안 제체는 제체 구성 재료의 결합력에 의해 버티고 있다가 더 이상 지탱하지 못할 때 갑자기 가라앉는다. 이러한 붕괴는 파이핑이 제내지로부터 시작하여 상당히 진행되었을 때 발생하기 때문에 대규모의 제체붕괴를 초래할 수 있다.

Terzaghi(1943)는 파이핑에 대한 이론을 이용하여 모래지반에 설치된 Sheet Pile에 대해 한계수두를 도입한 해석을 수행하였다. 그림 1에서 한계동수경사에 의한 파이핑의 발생원리를 나타내었다. 물이 A수조에서 B수조로 흘러 C지점에서 상향으로 침투력이 형성될 때 C지점의 유효응력을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma' = \gamma_{sub} \cdot z - i \cdot \gamma_w \cdot z \quad (1)$$

유효응력이 0 ($\sigma' = 0$)일 때의 동수경사를 한계동수경사(i_{cr})로 정하면 다음을 도출할 수 있다.

$$\sigma' = \gamma_{sub} \cdot z - i \cdot \gamma_w \cdot z = 0 \quad (2)$$

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (3)$$

$$\left(\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \right)$$

$$\therefore F_s = \frac{i_{cr}}{i} \quad (4)$$

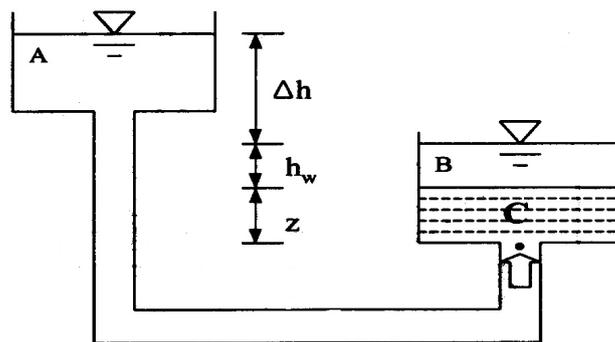


그림 1. 한계동수경사에 의한 파이핑

3. 실내실험

3.1 대상시료 및 실내실험 장치

본 실험에서 사용한 준설햄사의 물성치를 표1에 제시하였으며 실트분이 함유된 균등한 입도를 가진 세립질 모래로서 흙의 통일분류법 SM으로 분류되었다. 하부 사석층의 크기는 1/25 축척의 입경 40mm 골재를 사용하였다.

표 1. 준설햄사의 기본 물성

구분	D ₁₀ ,mm	D ₃₀ ,mm	D ₆₀ ,mm	C _u	C _c	비중	통일분류법 (USCS)
Test 1	0.0854	0.1225	0.1785	2.09	0.99	2.673	SM
Test 2	0.0875	0.1301	0.1866	2.13	1.04	2.674	SM
Test 3	0.0802	0.1125	0.1668	2.07	0.95	2.670	SM
Average	0.0840	0.1217	0.1773	2.10	0.99	2.672	SM

본 연구에서 제작한 침투모형시험기는 동수경사와 조위차 등 다양한 영향인자가 변화하는 조건에서 실시간으로 모형 방조제의 거동을 관찰하기 위해 총 3가지의 영역(모형토조, 수두조절장치 및 방조제거동 분석용 계측기)으로 분리하여 제작하였다.

먼저 실제 방조제의 한계구역을 1/25로 축소하여 모형토조를 길이 1.2m, 높이 1.0m, 폭 0.5m 크기로 제작되었다. 특히 모형토조 내부의 우측 하부에는 내성토 구역에서 바닥보호공으로 충전된 토사의 유실을 정량적으로 계측하기 위해 유실저류조를 설치하였다. 수두조절장치의 경우, 모형토조의 유입구 부분에는 조위조건 변화를 자동조절하기 위해 2개의 수두조절장치를 배치하였으며, 유출구 부분에는 현재수위, 향후관리수위, 향후최저수위 등 방조제 내측의 수두변화의 구현이 가능하도록 별도의 수두조절장치를 배치하였다. 준설햄사의 유실에 따른 제체내 변위발생량을 계측하기 위해 제체표면에 다이얼게이지를 설치하였다.

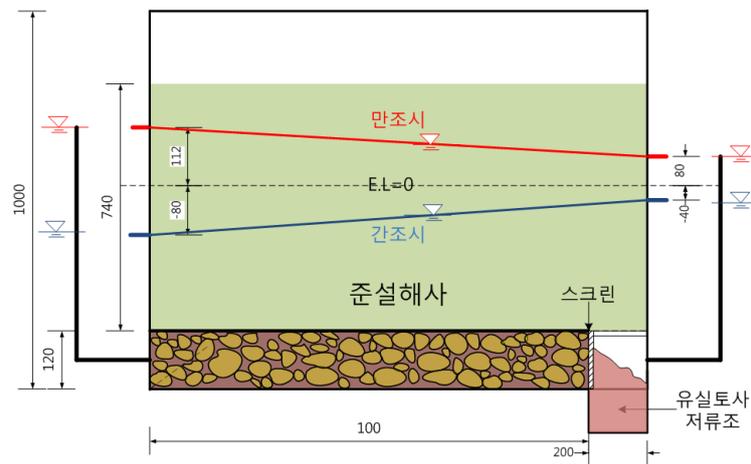


그림 2. 침투모형 토조에서의 모사

본 연구에서는 방조제의 1지점과 2지점을 한계구간으로 고려하여 침투모형시험을 수행하였다. 또한 외측과 내측의 수두는 조위변화에 따라 1지점과 2지점에서 실시간으로 계측된 데이터 값을 기본으로 현재수위 경계조건을 설정하였다. 실제 방조제의 계측 결과와 침투모형토조에 모사된 조건을 다음 표 2에 나타내었다.

표 2. 만조위시와 간조위시의 실측 수위 및 침투모형토조에서의 상사수위

조위구분	위치	Elevation		비 고
		실측 수위	모형토조수위	
만조위	1	E.L(+) 2.8m	E.L(+) 112mm	1/25 축소
	2	E.L(+) 2.0m	E.L(+) 80mm	
간조위	1	E.L(-) 2.0m	E.L(-) 80mm	
	2	E.L(-) 1.0m	E.L(-) 40mm	

3.2 실험방법 및 조건

사석층과 준설해사층은 모형시험 대상구역인 각각 12cm, 74cm까지 성토하였으며 준설해사 성토시 총 5층으로 나누어 물다짐을 실시하였다. 수두 조절 장치를 이용하여 내측과 외측의 수두를 각 조건에 맞도록 조절한 후 유입수를 공급하였다. 유입수를 공급할 때 만조위시에는 외측의 수두가 내측의 수두보다 높아서 외측에서 공급하였으며, 간조위시에는 내측의 수두가 외측의 수두보다 높아서 내측에서 공급하였다. 제체내 변위량을 파악하기 위하여 실시간으로 변위량을 측정하였다.

본 실험은 침투압에 의한 토사의 침강 및 소류현상을 관찰하고 바닥보호공내로 충전된 토립자의 이동이 유발되는 한계동수경사를 도출하기 위해서 내측과 외측의 수두차(Δh)를 증가시키며, 그에 따른 제체의 변위와 바닥보호공에서의 유실량을 정량적으로 측정하였다. 본 실험조건에서는 바닥보호공에 충전된 준설해사가 유로를 따라 외부로 이동하기 시작하는 한계동수경사(i_{cr})를 결정하고자 하였다. 이에 따른 조건은 표 3에 나타내었다.

또한, 조위변화에 따른 해수면이 상승과 하강을 반복될 경우, 조위차에 의한 해수의 반복적 침투 거동에 따른 방조제 제체변형의 안정성을 검토하는데 목적이 있다. 이를 위해 만조와 간조 상태의 수위차를 반복적으로 변화하여 현재수위 조건, 향후관리수위 조건, 향후최저수위 조건으로 나누어 실험을 수행하였다. 표 4의 조건별로 시간에 따른 변위량이 수렴할 때까지 변위를 측정하고 제체의 거동 특성 및 안정성을 검토하고자 하였다.

표 3. 동수경사 증가에 따른 조건

경과시간	Δh	동수경사	외측높이	내측높이
0~12	0cm	0.000	EL=0cm	EL=0cm
12~24	0.5cm	0.005	EL=0.5cm	EL=0cm
24~36	1.0cm	0.010	EL=1.0cm	EL=0cm
36~48	1.5cm	0.015	EL=1.5cm	EL=0cm
48~60	2.0cm	0.020	EL=2.0cm	EL=0cm
60~72	2.5cm	0.025	EL=2.5cm	EL=0cm
72~84	3.0cm	0.030	EL=3.0cm	EL=0cm
84~96	3.5cm	0.035	EL=3.5cm	EL=0cm
96~108	4.0cm	0.040	EL=4.0cm	EL=0cm

표 4. 조위차와 내측수위변화에 따른 조건

수위구분	조위	경과시간(hr)	Δh	외측높이	내측높이
현재 수위	만조	0~6	$\Delta h=+3.2\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=0cm
	간조	6~12	$\Delta h=-4.0\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=0cm
	만조	12~18	$\Delta h=+3.2\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=0cm
	간조	18~24	$\Delta h=-4.0\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=0cm
	∴	∴	∴	∴	∴
	만조	60~66	$\Delta h=+3.2\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=0cm
향후 관리 수위	간조	66~72	$\Delta h=-4.0\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=0cm
	만조	72~78	$\Delta h=+4.7\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=-1.5cm
	간조	78~84	$\Delta h=-2.5\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=-1.5cm
	만조	84~90	$\Delta h=+4.7\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=-1.5cm
	간조	90~96	$\Delta h=-2.5\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=-1.5cm
	∴	∴	∴	∴	∴
향후 최저 수위	만조	108~114	$\Delta h=+4.7\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=-1.5cm
	간조	114~120	$\Delta h=-2.5\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=-1.5cm
	만조	120~126	$\Delta h=+5.2\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=-2.0cm
	간조	126~132	$\Delta h=-2.0\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=-2.0cm
	만조	132~138	$\Delta h=+5.2\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=-2.0cm
	간조	138~144	$\Delta h=-2.0\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=-2.0cm
∴	∴	∴	∴	∴	
향후 최저 수위	만조	156~162	$\Delta h=+5.2\text{cm}$	EL=+3.2cm	EL=-2.0cm
	간조	162~168	$\Delta h=-2.0\text{cm}$	EL=-4.0cm	EL=-2.0cm

4. 실험결과

그림 3과 그림 4는 동수경사에 따른 변위량과 유실량 측정 결과를 나타내고 있다. 측정된 바에 의하면, 제체의 변위는 동수경사의 증가에도 불구하고 전 구간에서 걸쳐서 거의 유사한 형태를 보였으나 유실 토사량은 동수경사별로 큰 차이를 나타냈다. 특히 수두차가 $\Delta h=1.5\text{cm}$ 일 때 유실 토사량은 수두차가 $\Delta h=1.0\text{cm}$ 보다 약 2배가량 증가하였으며, 사석층과 토사층의 경계면에서 침강된 미세 토립자가 사석층의 유로를 통하여 외부로 급속히 이동하는 현상도 육안으로 충분히 관찰 할 수 있었다. 따라서 사석층에 충전된 준설향사의 유실을 발생시키는 수두차는 약 1.5cm이며, 한계동수경사는 (i_{cr}) 0.015로 판단할 수 있었으며, 제체의 동수경사가 한계동수경사를 상회할 경우, 제체의 변위 및 토사의 유실량도 더욱 증가하여 제체의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

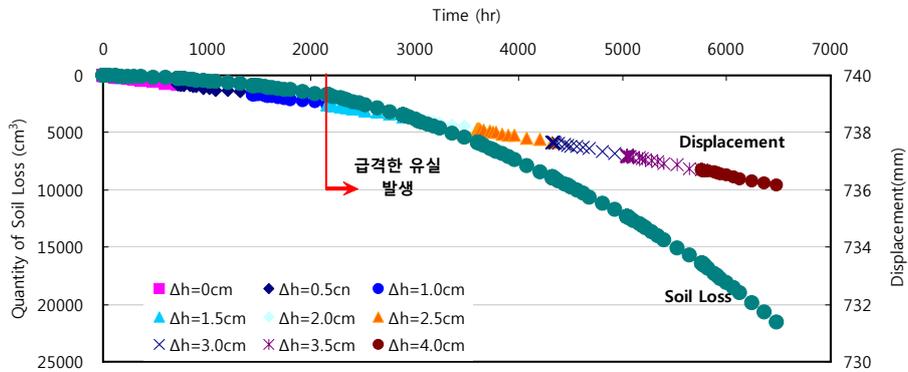


그림 3. 동수경사에 따른 누적변위량 및 유실량

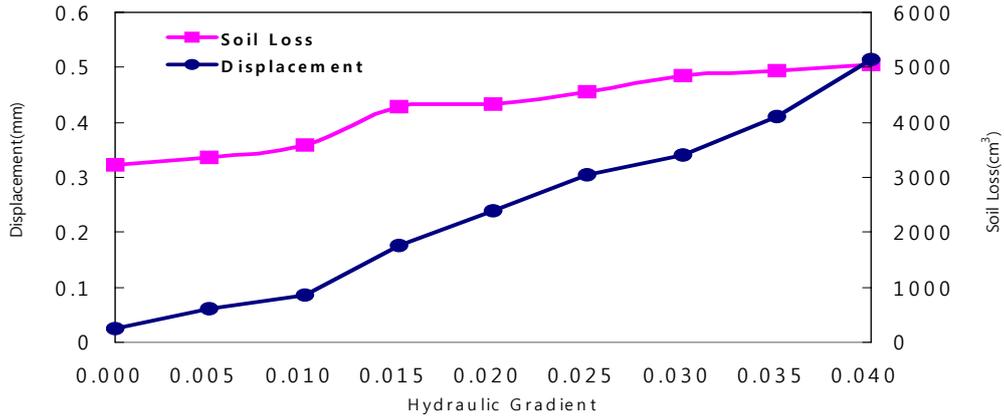


그림 4. 동수경사에 따른 변위량과 유실량

조위변화를 6시간 간격으로 만조위시와 건조위시로 지속적으로 변화시키면서 현재수위, 향후관리수위, 향후최저수위 조건별로 제체 변위가 수렴할 때까지 결과를 측정하였다. 시간에 따른 변위는 현재수위 < 향후관리수위 < 향후최저수위로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다.

그림 5에서는 조위변화시 관리수위에 따른 누적 변위량을 시간에 따라 제시되어 있으며, 약 7일간의 실험을 수행한 결과, 총 변위량은 14.557mm로 조위변동에 따라 지속적인 유로가 형성된 상태에서 수두차가 증가할 경우 제체의 변위가 더욱 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

그림 6은 조위차를 고려한 관리수위별 시간에 따른 변위량 형태를 나타낸 결과이다. 현재수위시 제체의 변위는 향후관리수위와 향후최저수위의 변위량과 비교하였을 때 초기단계에서 많은 변위가 발생하기 보다 시간에 경과함에 따라 변위량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 반면에 향후관리수위와 향후최저수위 조건에서는 전체적으로 변위량이 급격히 증가하다 경과시간 40시간 무렵에 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 조위변화를 고려하지 않고 동수경사를 증가하였던 그림 4의 결과처럼 제체의 변위 형태가 전구간에서 비슷한 모습을 보이는 것과 달리 지속적인 조위변화의 영향을 받은 상태에서는 동수경사가 증가하여 사석층 내의 충전된 토사 유실량의 증가로 인하여 초기 변위량이 크게 나타난 것을 알 수 있다.

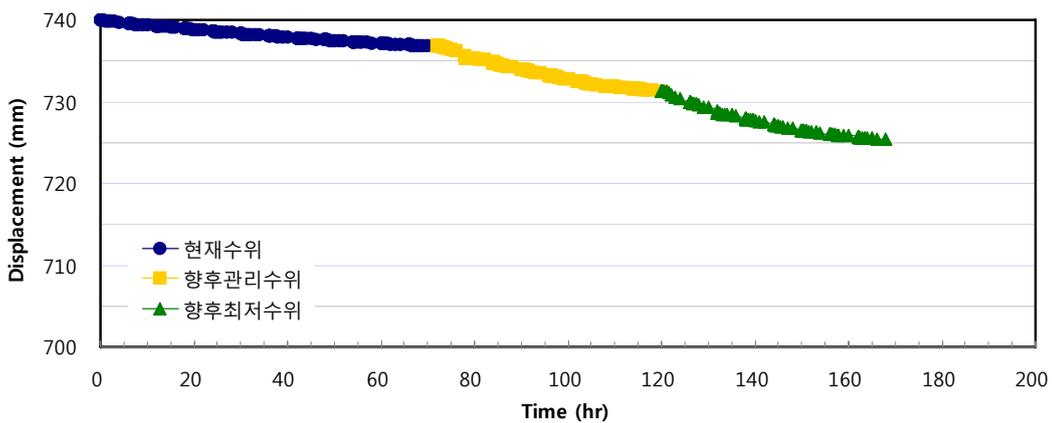


그림 5. 관리수위에 따른 누적 변위량

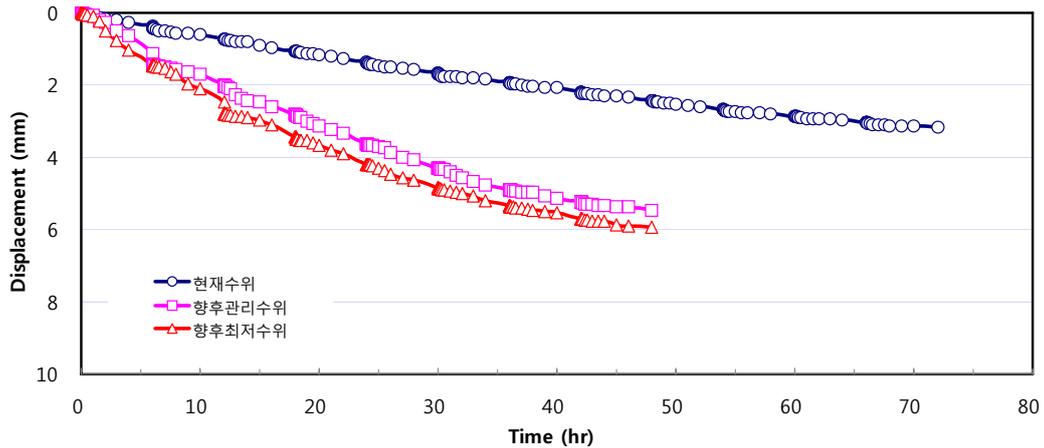


그림 6. 관리수위에 따른 제체 거동 특성

5. 결론 및 요약

본 연구는 침투로 인한 제체의 변위량과 토사 유실량을 측정하고 사석층 내의 토사 충전여부를 파악하여 제체의 안정성을 검토하기 위하여 침투모형 실내시험을 진행하여 그 결과를 다음에 제시한 바와 같이 정리하였다.

1. 동수경사 조건별로 제체의 변위와 유실량을 측정한 결과, 제체의 변위는 완만하게 증가한 반면, 유실량은 동수경사가 작은 초기 단계에서 증가하는 경향을 띄었으나 그 크기는 무시할 정도로 미세하게 나타났다. 반면에 수두차(Δh)가 1.5cm, 동수경사가 0.015이후부터는 준설해사의 유실량이 급격히 증가됨을 확인할 수 있었는데, 동수경사가 0.040일 때 유실량은 0.015일 때의 유실량보다 약 2.94 배 증가한 것으로 나타났다.
2. 제체의 변위는 동수경사의 증가에도 불구하고 전 구간에 걸쳐서 거의 유사한 형태를 보였으나 유실 토사량은 동수경사별로 큰 차이를 나타냈다. 특히 수두차가 $\Delta h=1.5\text{cm}$ 일 때 유실 토사량은 수두차가 $\Delta h=1.0\text{cm}$ 보다 약 2배가량 증가하였으며, 사석층과 토사층의 경계면에서 침강된 미세 토립자가 사석층의 유로를 통하여 외부로 급속히 이동하는 현상도 육안으로 충분히 관찰 할 수 있었다. 따라서 사석층에 충전된 준설해사의 유실을 발생시키는 수두차는 약 1.5cm 이고, 한계동수경사는 (i_{cr}) 0.015로 판단할 수 있었으며, 제체의 동수경사가 한계동수경사를 상회할 경우, 제체의 변위 및 토사의 유실량도 더욱 증가하여 제체의 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있었다.
3. 조위변화를 6시간 간격으로 만조위시와 간조위시로 지속적으로 변화시키면서 현재수위, 향후관리수위, 향후최저수위 조건별로 제체 변위가 수렴할 때까지 측정한 결과, 현재수위 조건시 제체 변위가 수렴할 때까지 제체 변형율은 0.42%이며, 이후 향후관리수위 조건으로 내측 수위를 더욱 감소시킬 경우 추가 변형율은 0.74%로 나타났다. 이는 조위변화를 모사하지 않은 수위경계 변화에 따른 실험에서 향후관리수위 변형율은 0.67%보다 약 0.07% 더 큰 값을 나타내는 것으로 이를 통해 제체의 전체 거동은 조위에 따른 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.
4. 향후최저수위(내측 EL=-2.0cm)에서는 48시간 동안 추가적으로 발생된 변위는 5.923mm 였으며 이는 제체 변형율 0.80%에 해당하는 수치다. 즉, 시간에 따른 변위는 현재수위 < 향후관리수위 < 향후최저수위로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 허재은 (1996) “방조제의 소성침하예측 및 파이핑의 해석”, 전남대학교대학원 석사학위논문, pp 115~117
2. 오남선, 고영찬 (2000), “방조제 전후면 조위변동을 고려한 파이핑해석”, 목포해양대학교 논문집, 8 (Ⅱ) pp 143~152.
3. 정신태 (2002), “비정상 상태의 방조제 침투해석”, 원광대학교 공업기술개발연구소, 제22권, pp. 30~34.
4. Terzaghi, K (1943) *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and sons Inc, New York.
5. Lakshmi N. Reddi (2003) *Seepage in Soils Principle and Applications*, John Wiley and sons Inc, New Jersey.