토목섬유 매트 파손이 방조제 내 준설성토에 미치는 영향

Influence of Damaged Geosynthetic Mat to Dredged Sea Sand Fill inside a Tide Embankment

이충원* · 장동수** · 박성용*** · 김용성****

Lee, Chung-Won*, Chang, Dong-Su**, Park, Sung-Yong***, Kim, Yong-Seong****

Abstract

In order to investigate the behavior of dredged sea sand fill compacted inside tide embankments with damaged geosynthetic mat, centrifugal model tests were conducted with sea level variations. Results of vertical displacements, investigation by observation and excavation, and image analysis from the three centrifugal model tests considering particle size conditions of rubble mound and filter layers, and damage of geosynthetic mat were examined. The results demonstrate that the subsidence of the dredged sea sand fill inside tide embankments with the damaged geosynthetic mat was strongly affected by the loss of dredged sea sand into the filter layers for large filter particles and by a decrease in the bearing capacity of the filter layers for small filter particles.

Key words : Sea level variation, Damaged geosynthetic mat, Loss of dredged sea sand, Centrifugal model test

요 지

토목섬유 매트가 파손된 경우의 방조제 내측에 시공된 준설성토의 거동을 분석하기 위하여 조위승강을 고려한 원심모형실험을 실시하였다. 이를 위하여 모형방조제의 필터재층 및 사석의 입도조건, 토목섬유 매트의 파손여부를 고려하여 3개 Case의 원심모형실험을 수행하였으며, 각 Case에 대하여 연직변위의 계측, 관찰 및 굴착조사와 함께 화상해석을 실시하였다. 실험 결과, 토목섬유 매트의 파손을 전제로 필터재의 입경이 상대적으로 크면 준설해사의 유실이, 반대의 경우에는 필터재층의 지지력 감소가 준설성토의 주된 침하원인으로 판단되었다.

핵심용어 : 조위승강, 토목섬유 매트 파손, 준설성토 유실, 원심모형실험

1. 서 론

방조제는 간척지를 조성, 파랑, 해수 침투 등으로부터 보호하기 위하여 만드는 제방으로, 고조시에 해수가 월류하지 않고, 파랑에 견디며, 해수침투가 없도록 크기와 재료 및 시공법을 정해서 축조한다. 해일이 발생할 경우 바닷물이 육지로 침입하는 것을 방지하기 위하여 해안을 따라서 설치하기도 한다. 국토의 면적이 협소한 한국에서는 국토이용의 효율성을 제고하기 위하여 다수의 간척지가 개발되고 있으며, 이에 따라 방조제의 건설 또한 지속적으로 진행되고 있다. 이러한 방

조제의 제체는 일반적으로 준설해사로 축조되며, 해측 사석과 필터재층을 통한 제체의 유실을 방지하기 위하여 필터재층에 토목섬유 매트를 설치한다(Oh *et al.*, 2005).

그러나 방조제의 끝막이 구간의 경우, 빠른 유속에 의해 필터재가 유실되거나 수중부의 열악한 시공여건으로 인하여 토목섬유 매트의 연결부가 파손되는 등 방조제의 시공에 악영향을 미치게 된다. 또한, 이러한 토목섬유 매트의 파손은 향후 해측의 조위 승강에 의해 준설해사가 필터재 쪽으로 유출되어 방조제의 침하 및 제체상에 건설된 도로 및 구조물의 안정성을 저하시킬 가능성이 있다. 따라서 조위 승강 및 토목섬유

*정회원. 강원대학교 석재복합건설소재연구소 연구원(E-mail: kucivil@hanmail.net)
Member. Researcher, Institute for Advanced Construction Materials, Kangwon National University

**정회원. 강원대학교 지역건설공학과 석사과정
Member. Master Course Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

***정회원. 강원대학교 지역건설공학과 박사과정
Member. Ph.D. Candidate Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

****교신저자. 정회원. 강원대학교 지역건설공학과 부교수(Tel: +82-33-250-6463, Fax: +82-33-251-6440, E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

매트의 파손을 고려한 방조제의 거동을 실증적으로 검토할 필요가 있으며, 이를 위한 방법으로 원심모형실험을 활용할 수 있다.

원심모형실험은 현재 지반공학 전 분야에서 구조물의 거동 연구에 활용되고 있으며, 제체 및 제방에 대해서도 다수의 연구가 수행되었다. Dunn *et al.*(1984)은 원심장에서 월류를 모사하여 필댐의 거동을 고찰하였으며, Sharma and Bolton (2001)은 원심모형실험을 이용한 제방의 안정성 평가 및 대책 공법 수립에 중점을 두어 연구를 수행하였다. 또한, Manso and Schleiss(2003)는 월류시의 제체 보호를 위해 하류사면에 콘크리트 라이닝을 설치하는 공법을 제안하였으며, Narita *et al.*(2008)은 저수지의 수위 급강하에 따른 제체 내의 간극수압 거동과 제체 파괴의 연관성을 원심모형실험 및 수치해석을 통해 고찰하였다. 도로성토에 대해서도 다수의 원심모형실험이 수행되었다. Hayashi *et al.*(1998)은 성토고, 성토의 경사, 함수비, 성토재료가 상이한 불포화 편성토에 대하여 상이한 입력가속도를 입력하여 성토고, 성토의 경사, 함수비, 성토재료 및 입력가속도의 차이가 성토의 변형, 응답가속도에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, Matsuo *et al.*(2002)은 다짐도, 침투수의 수위, 지진가속도의 차이가 편성토의 안정성에 미치는 영향을 동적원심모형실험에 의해 검증하였다. 또한 Lee *et al.*(2011), Lee(2012)는 침투를 고려한 불포화 도로성토에 대한 동적원심모형실험 및 흙-물의 연성(Coupling)을 고려한 수치해석을 통해 강우 및 침투 등으로 수분이력을 갖는 도로성토의 내진성능이 저하됨을 확인하였으며, 이에 대한 대책공법으로서 드레인의 적용성을 검토하였다.

이와 같이 제체 및 제방, 도로성토 등에 대해서는 다수의 연구가 진행되고 있으나, 침투가 발생하는 지반구조물로서의 유사성을 갖는 방조제에 대한 연구는 현재까지도 대단히 제한적인 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현장응력상태 및 조위승강 과정을 재현한 3개 Case의 원심모형실험을 통하여 토목섬유 매트의 파손여부에 따른 방조제 내 준설성토의 거동을 분석하고자 한다. 다만 본 연구는 제한된 Case의 실험을 통하여 결론을 도출하고 있으므로, 향후로도 지속적인 연구를 통해 방조제 내 준설성토의 거동특성을 명확히 할 필요가 있다고 사료된다.

2. 원심모형실험

2.1 원심모형실험의 원리

원심모형실험을 수행하기 위해서는 대상 구조물의 축소모형을 제작할 필요가 있다. 축소모형의 설계에는 상사법칙이 적용되며, 각 실험의 목적이나 방법에 맞추어 적절한 상사법칙을 선정하여야 한다. 모형과 실물의 상사성은 모형과 실물에서 발생하는 현상에 포함되어진 변수 전체가 상사 관계에 있음을 의미하나, 실물과 모형의 완전한 상사관계를 달성하는

것은 불가능하다. 즉, 실물의 크기를 $1/N$ 로 축소된 모형이 현장 조건과 같은 응력수준을 유지하려면 Ng 의 원심가속도가 필요하게 되나, 단순히 모형과 실물의 비례관계를 원심가속도의 비례인자인 N 으로만 정의할 수 없으며, 응력 이외에도 모형의 경계조건에 따라 반응특성들이 상이한 경우가 많기 때문에 비례법칙은 더욱 복잡한 형태가 된다. 그러므로 상사성이란 여타 분야에서의 마찬가지로 지반공학 분야에서도 요구되는 범위 내에서 요구되는 정도의 현상을 예측하는데 필요한 것이라고 할 수 있다(Im *et al.*, 2005; Schofield, 1980).

지반의 역학적 거동은 지반의 응력상태에 따라 크게 변화하기 때문에 실물과 동일한 모형지반의 역학적 특성을 확인하기 위해서는 실물과 모형지반에 동일한 응력이 작용하여야 한다. 즉, 원심가속도장에서의 모형지반의 자중에 의한 응력을 σ_m 이라 하고, 실물에서의 자중에 의한 응력을 σ_p 라 할 때 다음의 식 (1)이 성립하여야 한다.

$$\sigma_m = \sigma_p \quad (1)$$

여기서, 중력상태에서의 가속도 a 는 g 이고 원심력장에서의 가속도 a 는 rw^2 (r =반지름, w =각속도)이므로 원심력장의 가속도와 중력상태의 가속도의 비 $N(=rw^2/g)$ 을 Scale factor라고 하면, 실물에서의 자중에 의한 응력 σ_p 은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_p = r \cdot h_p = \rho_p \cdot g \cdot h_p \quad (2)$$

또한, 원심가속도장에서의 모형지반의 자중에 의한 응력 σ_m 은 식 (3)과 같다.

$$\sigma_m = r \cdot h_m = \rho_m \cdot a \cdot h_m = \rho \cdot N \cdot g \cdot h_m \quad (3)$$

한편, 간극유체가 물인 경우 투수계수 k_w 는 $k_w = K \cdot r_w / \mu$ (여기서, K =절대투수계수, μ =물의 점성계수)와 같이 표현할 수 있으며, 재료정수는 응력이 달라져도 변하지 않으므로 실물과 모형의 상사성은 식 (4)의 관계가 성립한다.

$$\frac{(k_w)_m}{(k_w)_p} = \frac{(k \cdot (r_w)_m) / \mu}{(k \cdot (r_w)_p) / \mu} = N \quad (4)$$

또한 실물과 모형지반의 간극수압의 차, 수두차, Darcy의 법칙을 적용하면 유속은 다음의 식 (5)과 같은 상사성이 성립된다.

$$\frac{(v_w)_m}{(v_w)_p} = \frac{(k_w)_m \cdot (i_w)_m}{(k_w)_p \cdot (i_w)_p} = N \quad (5)$$

그리고, 침투현상에 있어서의 시간 t ($=l/v$)는 아래의 식 (6)과 같은 상사관계를 갖는다.

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{l_m(w_w)_m}{l_p(w_w)_p} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N} = \frac{1}{N^2} \quad (6)$$

위와 같은 원리가 원심모형실험의 상사법칙으로서 지진, 지

Table 1. Similarity Rules in Centrifugal Model Test

Properties	Size of model	Size of soil particle	Soil density	Stress	Displacement	Strain	Time (Consolidation and infiltration)
Scale factors (model/prototype)	1/N	1	1	1	1/N	1	1/N ²

반동역학, 기초, 사면안정, 굴착 및 가시설, 지반환경, 터널 및 지하구조물, 연약지반에서의 지반개량 및 지반보강, 기타 토목구조물의 안정성 검토 등에 이용된다. 각 물리량에 대한 상사법칙을 Table 1에 나타내었다.

2.2 원심모형실험 장비

본 연구에서는 중형의 Beam형 원심모형실험기(한국과학기술원 소재, Fig. 1 참조)를 이용하였으며, 회전반경 5.0 m, 유

Fig. 1. Centrifugal Model Test Apparatus (KOCED Geocentrifuge Center at KAIST).

효반경 4.5 m의 제원을 갖는다. 본 실험기는 최대 2,400 kg의 모형하중에 대해 100 g까지의 원심재하가 가능하며, 실험 최대용량은 240 g-ton이다. 모형은 플랫폼 회전팔의 단부에 거치하며, 플랫폼 크기는 1.2 m×1.2 m×1.2 m, 모형 토조의 크기는 1.2 m×0.45 m×0.7 m이다. 본 실험기는 계측용 컴퓨터를 원심모형실험기의 중앙부에 설치하여 장비와 함께 회전하도록 구성하였으며, 광섬유 로터리 조인트(Fiber Optic Rotary Joint, FORJ)를 이용한 컴퓨터 통신을 활용함으로써 효과적인 계측을 수행할 수 있고, 실험기 하단에 Fluid Rotary Joint가 설치되어 원심재하 중에 실험에 필요한 용수, 공압, 유압 등을 모형토조 내로 공급할 수 있다(Kim *et al.*, 2013).

2.3 원심모형실험 과정

2.3.1 모형방조제 단면설계

원심모형실험을 위한 모형방조제의 단면은 조석간만의 차가 큰 서해에 접하고 있는 한반도 남부에 시공되어 있는 실제 방조제의 설계단면에 근거하였다. Table 2에 각 Case의 실험 조건을 정리하였으며, Fig. 2에 각 Case에 대한 모형방조제의 단면을 도시하였다. 여기서 사석(Rubble mound), 필터재(Filter layer), 토목섬유 매트(Geosynthetic mat) 및 준설성토(Dredged sea sand fill)를 편의상 R, F, G 및 D로 표시하였다.

Table 2. Centrifugal Model Test Conditions

Experiment*	Particle sizes	
	Rubble mound (R)	Filter layer (F)
Case 1	1.0 m to 1.5 m	100 mm to 250 mm
Case 2	0.1 m to 1.5 m	1 st layer(F1) : 100 mm to 250 mm
Case 2-1		2 nd layer(F2) : 16 mm**
Case 2-2		

*Damage to the geosynthetic mat (G) was simulated in Cases 1 and 2-1 but not in Case 2-2.

**Standard sand, D₅₀=0.32mm(in model scale)

Fig. 2. Schematic Figures of Model Tide Embankment on Each Case (unit : m, prototype). (R: rubble mound; F: filter layer; G: geosynthetic mat; D: dredged sea sand fill)

이 방조제의 단면은 근고공, 사석, 필터 및 준설토로 구성되어 있으며 사석 전면부에 완만한 경사의 근고공이 설치되어 있으나, 모형토조의 길이가 1.2 m로 제한되어 있어 본 실험에서는 근고공을 생략하고, 사석의 사면경사 유지를 위해 투수를 완전히 허용하는 $t=1\text{ mm}$ 두께의 다공철판을 해측 사석면에 설치하였다. 여기서, 실제 방조제의 필터재층은 3층으로 설계되어 있으나, 각 필터재층의 입경이 육측 사석면으로부터 500 mm 이상, 14~200 mm, 1.5~76 mm로서 그 범위가 대단히 넓게 구성되어 있어 시공여건 및 위치에 따라 필터재의 입도가 범위 내에서 충분히 변화할 가능성이 있다. 또한 사석의 경우에도 끝막이구간에서 약 1.0 m~1.5 m 크기의 규격석을 사용하는 데 반해, 일반구간에서는 재료의 입경을 구분하지 않아 넓은 입경범위를 갖는 재료를 사용하고 있다.

따라서 본 실험에서는 모형방조제의 필터재가 상대적으로 큰 입경(100 mm~250 mm, 모형에서는 2 mm~5 mm)으로만 구성되며 사석 또한 1.0 m~1.5 m(모형에서는 20 mm~30 mm)의 큰 입경의 재료로 시공된 경우(Case 1)와, 필터재가 큰 입경(100 mm~250 mm, 모형에서는 2 mm~5 mm) 및 작은 입경(16 mm, 모형에서는 0.32 mm)의 2개 층으로 구성되며 사석 또한 넓은 입경범위(0.1 m~1.5 m, 모형에서는 2 mm~30 mm)를 갖는 재료로 시공된 경우(Case 2)를 모사하였으며, Case 1은 토목섬유 매트가 파손된 상태를, Case 2-1과 Case 2-2는 각각 토목섬유 매트가 파손된 상태 및 토목섬유 매트가 파손되지 않은 상태를 고려하여 조위승강에 따른 방조제 내 준설토의 거동을 고찰하였다. 여기서 토목섬유 매트는 두께 3 mm의 투수성 토목섬유를 사용하였으며, 토목섬유 매트의 일부를 절단하여 파손상태를 모사하였다.

준설토는 실제 방조제의 건설에 활용된 준설퇴사를 사용하였으며 통일분류법상으로 SM으로 분류된다. 정수위 투수 시험 결과, 투수계수는 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로 나타나, 일반적인 실트의 투수성이 $\alpha \times 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 의 범위에 있음을 고려할 때 투수성이 큰 실트로 평가된다. 또한, 실제 방조제에서의 준설토의 상부는 90%의 다짐도로 관리되었으며 준설토의 하부는 물다짐에 의해 시공되었고 상대밀도(D_r)는 70%로 나타났다. 이러한 상대밀도는 중간~조밀한 상태의 범위에 해당되며($D_r=50\sim85\%$), Lee and Singh(1971)의 경험식인 $R_c=80+0.2D_r$ 에 의해 다짐도(R_c)는 90%~97%로 계산할 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 준설토 전체의 다짐도(R_c)를 90%로 설정하였으며 물다짐 등의 영향으로 실제 함수비가 높을 것으로 예상되므로, 본 실험에서는 준설토의 함수비를 최적함수비보다 습윤측인 18%로 설정하였다. 실험에 사용된 준설토의 재료적 성질을 Table 3에 나타내었다. 여기서부터 특별

한 언급이 없는 한, 길이를 포함한 모든 물리량은 50 g 원심장에서의 실규모(Prototype)로 환산된 값을 서술한다.

2.3.2 모형방조제 제작

모형방조제의 제작시, 50 g의 원심가속도를 설정하여 1/50의 축소모형을 제작하였다. 먼저, 토조에 모형방조제의 형상을 유성펜으로 그리고, Fig. 3의 계측기 배치도를 참고하여 토조의 저면에 24시간 이상 포화시킨 간극수압계(P1~P6)를 부착한다. 이후, 사석의 자립을 위해 두께 1 mm의 다공철판을 사석의 해측부에 설치한다. 모형 축소시 변형 및 붕괴를 방지하기 위하여 목형을 제작 및 활용하였으며(Fig. 4 참조), 각 층마다 사석, 필터재, 토목섬유 매트 및 준설토를 시공한다. 토목섬유 매트의 파손을 고려한 Case 1과 Case 2-1은 토목섬유 매트를 준설토의 제3층, 제5층에 분리하여 설치하고, 토목섬유 매트의 파손을 고려하지 않은 Case 2-2는 토목섬유 매트를 준설토의 제3층에서 제5층까지 한 번에 설치하였다. 이후, 준설토의 층별 체적을 계산하여 다짐도(R_c)=90%로 시공하였다($\rho_{dmax}=1.622 \text{ g/cm}^3$). 여기서, 변형율의 국소화를 고찰하여 조위승강에 따른 모형방조제 내 준설토의 거동을 분석하기 위한 화상해석을 PTV(Particle Tracking Velocimetry)법에 의거하여 수행하기 위하여(Higo, 2003; Lee, 2012), 준설토의 각 층이 시공될 때마다 직경 5 mm, 길이 7 mm의 표점을 설치하였다. 또한, 준설토부에는 토조의 벽에 인접한 유로를 차단하기 위해 실리콘 그리스(Silicon grease)를 도포하여 지수를 시행하였다. 준설토의 다짐 시공 후에는 실제 방조제의 건설 후 방치에 따른 압밀을 고려하고 원심장에서 안정성을 확보하기 위하여, 현 상태에서 50 g의 원심하에 의한 안정화작업을 30분간 수행하였다. 이후, 설계된 기

Fig. 3. Model Configuration and Location of the Measuring Instruments (unit: m). (HWOST: high water of ordinary spring tides; LWOST: low water of ordinary spring tides)

Table 3. Material Properties of Dredged Sea Sand

Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	USCS	D_{50} (mm)	ρ_s (g/cm ³)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
65.8	28.7	5.5	SM	0.13	2.665	13.6	1.802

(a) Formwork installation (model scale, unit : cm)

(b) Cutting extra soil

Fig. 4. Construction of Model Tide Embankment.

울기에 맞게 준설성토를 성형하고 표점을 최종적으로 설치하여 모형방조제의 제작을 완료하였다.

2.3.3 간극유체의 투입 및 실험전 화상 촬영

동적원심모형실험의 경우, 침투시간과 동적시간과의 상사 법칙을 일치시키기 위해 실리콘 오일 또는 메토로즈 수용액의 점성을 N g의 원심장에서 실험시 N배로 조정하여 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 원심모형실험에서는 동적 조

건을 고려하지 않으므로, 간극유체로서 물을 사용하였으며 이때의 실규모(Prototype)에서의 시간은 Table 1에서 정리한 바와 같이 N^2 배가 된다. 여기서, 침투수면의 가시화를 위하여 수돗물 150L에 수공학 분야에서 추적자 조사 등에 사용되는 색소인 우라닌(Uranine: Fluorescein sodium, Yellow No. 202) 12 g을 희석하여 우라닌 수용액을 제조하여 실험에 사용하였다. 우라닌의 희석이 점성에 미치는 영향은 미소할 것으로 사료되었다(Lee, 2012). 본 우라닌 수용액을 모형방조제의 간조위(EL.(-)3.0 m)까지 투입하고 24시간동안 방치하여 수면 아래를 포화시키고(Fig. 5 참조), 화상해석을 위한 실험전 표점들의 위치를 확보하기 위해 모형방조제의 화상을 디지털 카메라로 촬영하였다.

Fig. 5. Saturation on Model Tide Embankment Constructed.

2.3.4 원심모형실험기 내 토조 거치 및 계측기 연결

Fig. 6에서 보는 바와 마찬가지로, 토조를 원심모형실험장치 내에 거치하고, 조위승강을 위하여 1축 액추에이터(Actuator) 및 더미(Dummy)를 결합한다. 여기서, 1축 Actuator를 최대속도인 5 mm/sec로 가동하는 경우, 간조위에서 만조위까지 도달하는 시간은 50 g의 원심장에서 약 1.59일로 나타났으며, 조위승강의 반복을 고려하는 경우에는 Actuator의 역전에 소요되는 시간을 포함할 때 약 1.80일이 소요되는 것으로 나

(a) Connecting uniaxial actuator and dummy

(b) Shape of dummy

Fig. 6. Shape of Dummy Connected to Uniaxial Actuator.

타났다. 따라서, 실제 소요시간인 0.25일을 만족하기 위해선 Actuator의 성능을 향상시킬 필요가 있으나 본 실험에서는 조위승강의 모사 자체에 주안점을 두었다. 이후, 준설성토의 변위 측정을 위하여 3개의 변위계(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)를 설치한다. 또한, 간극수압계 및 변위계를 데이터 로거(Data logger)에 연결하여 계측 데이터를 자동으로 기록한다. 본 실험에서의 계측 데이터의 취득 시간간격(Sampling rate)은 100 msec로 설정하였다.

2.3.5 원심모형실험기로부터 토조 철거, 실험후 화상 촬영 및 굴착조사

실험 완료 후, 원심모형실험기로부터 토조를 철거하고 실험 후 화상을 촬영하여, 실험전후의 화상을 통해 각 표점의 변위를 분석하여 화상해석에 반영함으로써 모형방조제 내 준설성토의 변형 메커니즘을 분석하였다. 또한, 굴착조사를 통해 필터재 내로의 준설해사 유실여부를 확인하였다.

2.4 원심모형실험 결과

2.4.1 간극수압 및 연직변위

Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 Case별 간극수압 및 연직변위의 시간이력을 나타내었다. 본 실험에서는 실규모(Prototype) 환산 200일간 조위승강을 수행하였으며, 방조제를 구성하는 각 재료(사석, 필터재, 토목섬유 매트 및 준설성토)의 투수계수가 크므로 모든 Case에서 간극수압은 정수압(P1)과 유사하게 거

동하는 것으로 나타났다. 따라서 토목섬유 매트 파손부 인근의 준설성토는 조위승강과 유사한 수위변동을 경험할 것으로 사료된다.

실험 종료시 변위는 Case 1에서 L1(사면중양부)에서 91.3 mm, L2(사면어깨부)에서 144.5 mm, L3(천단부)에서 40.7 mm로 전체적으로 큰 침하량이 발생하며 사면어깨부인 L2에서 최대의 변위가 발생하였으며, Case 2-1에서는 L1에서 41.7 mm, L2에서 27.5 mm, L3에서 11.4 mm 발생하여, 사면중양부인 L1에서 최대의 변위가 발생하였다. 그러나, Case 2-2에서는 L1에서 24.6 mm, L2에서 26.0 mm, L3에서 22.8 mm 발생하여, 전체적으로 침하량은 작으며 등침하의 경향이 나타났다. 이와 같은 변위경향의 차이로부터 조위승강에 따른 준설성토부의 거동양상이 Case에 따라 다른 것으로 나타났으며, 그 원인을 명확히 하기 위해 모형방조제의 준설성토를 토목섬유 매트 부근까지 굴착하여 관찰을 실시하고, 화상해석을 통하여 준설성토의 변형메커니즘을 구체화하였다.

2.4.2 관찰 및 굴착조사

원심모형실험 종료 후, Case 1에서는 준설성토의 사면중양부, 사면어깨부 및 천단부에서 부등침하에 의한 인장균열이 나타났으며(Fig. 9상의 점선), 토조의 스크린을 통해 관찰한 결과 토목섬유 매트 파손부를 중심으로 다량의 준설해사가 유실되어 필터재 내에 혼입되었음을 알 수 있었다(Fig. 10(a)상의 점선). 이와 같은 상황은 토목섬유 매트가 설치된 위치

Fig. 7. Time Histories of the Pore Water Pressure.

Fig. 8. Time Histories of the Vertical Displacement.

Fig. 9. Surface Condition of Embankment (Case 1).

Fig. 11. Surface Condition of Embankment (Case 2-1).

(a) Window view of cross-section

(b) Excavation of the filter layer

Fig. 10. Investigation on Dredged Sea Sand Fill by Observation and Excavation (Case 1).

까지의 굴착조사 결과 더욱 명백히 확인되었다(Fig. 10(b)). 즉, 조위승강에 의한 침투수의 지속적인 유입 및 유출로 인해 토목섬유 매트 파손부에 인접한 필터재층 내로 준설향사가 유실된 것이 준설향토부 침하의 직접적 원인이 된 것으로 판단되며, 이로 인해 토목섬유 매트 파손부의 직상부인 L2의 침하량이 가장 크게 나타나는 것으로 판단된다.

한편, Case 2-1에서는 준설향토 표면의 균열은 나타나지 않았으며(Fig. 11), 토목섬유 매트의 파손에도 불구하고 토조의 스크린 관찰 및 토목섬유 매트 설치 위치까지의 굴착조사로부터 준설향사의 유실은 확인되지 않았다(Fig. 12(a)-Fig.

(a) Window view of cross-section

(b) Excavation of the filter layer

Fig. 12. Investigation on Dredged Sea Sand Fill by Observation and Excavation (Case 2-1).

12(b)). 이는 두 필터재층 중 작은 입경으로 조성된 층과 준설향토의 D_{50} 이 model scale로 각각 0.32 mm, 0.13 mm로서 필터재의 입경이 준설향토보다는 다소 크나, 준설향토의 입자가 유실되기에는 필터재층의 간극이 충분히 크지 않았던 것으로 사료된다. 그러나, 이 Case에서는 토목섬유 매트의 인장강도에 의한 필터재층의 지지력 증가효과를 기대할 수 없으므로, 작은 구속응력으로 인해 지지력이 가장 작을 것으로 예상되는 필터재층 상부에 인접한 L1의 침하량이 가장 크게 나타난 것으로 판단된다.

토목섬유 매트의 파손을 고려하지 않은 Case 2-2 또한 준설향

Fig. 13. Surface Condition of Embankment (Case 2-2).

성토 표면의 균열은 나타나지 않았으며(Fig. 13), 토조의 스크린 관찰 및 토목섬유 매트 설치 위치까지의 굴착조사로부터 준설향사의 유실은 확인되지 않았다(Fig. 14(a)-Fig. 14(b)). 이 Case에서는 준설향사의 침하량이 전체적으로 작게 나타났으며, 등침하의 경향이 확인되었다. 이는 토목섬유 매트의 인장강도가 필터재층의 지지력에 기여하였기 때문으로 판단된다.

(a) Window view of cross-section

(b) Investigation of surface of filter layer

Fig. 14. Investigation on Dredged Sea Sand Fill by Observation and Excavation (Case 2-2).

(a) Displacement vector (15 times)

(b) Shear strain (γ)

Fig. 15. Results of Image Analysis (Case 1).

2.4.3 화상해석

조위승강에 따른 준설향토부의 거동 분석을 위하여, 실험 전 후의 화상을 통해 위치별 표점의 변위를 구하고 유한요소법에서 사용하는 변형율-절점변위 매트릭스(B Matrix)를 이용하여 준설향토부의 변형율 분포를 구하였다. 여기서 전단변형율 γ 는 편차변형율텐서의 제2불변량으로 정의되며 $\gamma = \sqrt{e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + 2e_{xy}^2}$ 으로 계산된다. e_{xx} , e_{yy} , e_{xy} 는 변형율의 편차성분들이다. Case 1, Case 2-1 및 Case 2-2에 대한 화상해석 결과를 각각 Fig. 15, Fig. 16 및 Fig. 17에 나타내었다.

Case 1의 변위벡터 검토결과, 토목섬유 매트 파손부에서 필터재 방향으로 최대 480 mm의 변위가 발생하여, 토목섬유 매트 파손부로 준설향사의 유실경향이 명백히 나타났다. 또한 토목섬유 매트 파손부로부터 준설향사 사면중앙부에 걸쳐 A-A'와 같은 전단변형율의 집중대가 나타나, 준설향사의 유실이 토목섬유 매트 파손부의 직상부에 위치한 L1 및 L2에 큰 변위를 유발하는 것으로 판단된다(Fig. 15(a)상의 점선). 또한, 토목섬유 매트 파손부로부터 준설향사 천단부에 걸쳐서도 B-B'와 같이 전단변형율이 탁월하게 나타났다. 이와 함께 필터재층 상부와 접하는 사면선단부의 변위 및 전단변형율이 비

Fig. 16. Results of Image Analysis (Case 2-1).

Fig. 17. Results of Image Analysis (Case 2-2).

교적 크게 평가되었으며(Fig. 15(a)상의 일점쇄선), 이는 필터 재층 상부의 상대적으로 작은 구속응력에 기인한 낮은 강성 및 지지력이 원인인 것으로 판단된다.

Case 2-1의 변위벡터 검토결과, 사면중앙부에서 최대 130 mm의 변위가 발생(Fig. 16(a)상의 점선)하여 L1에도 큰 변위가 나타나는 것으로 판단되며, 준설성토가 필터재층과 접하는 부분에서는 사면선단부로부터 토목섬유 매트 파손부까지의 변위가 비교적 크게 평가되었다(Fig. 16(a)상의 일점쇄선). 이 또한 필터재층 상부의 상대적으로 작은 구속응력에 의한 낮은 지지력에 기인하는 것으로 사료되며, 이로 인해 사면중앙부, 사면선단부, 토목섬유 매트 파손부에서 전단변형율이 집중되는 경향이 나타난다. 여기서, 우측 경계부의 전단변형율의 집중은 토조의 경계효과(Boundary effect)로 사료되며, 토조 크기가 확대되어 경계부가 더 멀리 있을 경우에는 본 위치에서의 전단변형율 집중이 일어나지 않을 것으로 판단된다.

Case 2-2는 토목섬유 매트가 파손되어 있지 않아 준설해사의 유실이 없으며, 토목섬유 매트의 인장강도가 필터재층의 지지력에 기여하므로, 토목섬유 매트가 파손된 Case에 비해 벡터의 크기는 고르게 분포하며, 전단변형율 γ 는 비교적 미

소하였다. 이 Case에서도 우측 경계부에는 토조의 경계효과로 사료되는 전단변형율의 집중이 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 원심모형실험을 이용한 현장응력상태 및 조위승강 과정의 재현을 통하여 토목섬유 매트의 파손여부에 따른 방조제 내 준설성토의 거동을 분석 및 구체화하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 모형방조제의 필터재가 상대적으로 큰 입경으로 구성되며 토목섬유 매트의 파손을 고려한 Case 1에서는 조위승강에 의한 침투수의 지속적인 유입 및 유출에 의해 준설해사가 토목섬유 매트 파손부에 인접한 필터재층 내로 유실됨을 굴착조사를 통해 확인하였다. 또한, 화상해석 결과 토목섬유 매트 파손부의 대변위 및 토목섬유 매트 파손부로부터 준설성토의 사면중앙부 및 천단부에 걸쳐 전단변형율이 집중되는 경향이 나타나 준설해사의 유실 경향이 명백히 나타났다. 이로 인해 준설성토의 사면중앙부, 사면어깨부 및 천단부에서 부등침하에 의한 인장

균열이 나타났으며, 토목섬유 매트 파손부의 직상부인 L2의 침하량이 가장 크게 나타난 것으로 판단된다.

- 2) 필터재가 큰 입경 및 작은 입경의 2개 층으로 구성되며 토목섬유 매트의 파손을 고려한 Case 2-1에서는 필터재 층의 간극이 작아 준설향사의 유실은 확인되지 않았으나, 토목섬유 매트의 인장강도에 의한 필터재층의 지지력 증가효과를 기대할 수 없으므로 작은 구속응력으로 인해 지지력이 가장 작을 것으로 예상되는 필터재층 상부에 인접한 L1의 침하량이 가장 크게 나타난 것으로 판단된다. 화상해석 결과, 사면중앙부, 사면선단부 및 토목섬유 매트 파손부에서 전단변형율이 집중됨은 여기에 기인한 것으로 사료된다.
- 3) 필터재의 구성은 동일하나 토목섬유 매트의 파손이 없는 Case 2-2에서는 토목섬유 매트의 인장강도가 필터재층의 지지력에 기여함에 의해 준설향사의 침하량이 전체적으로 작게 나타났으며, 등침하의 경향이 확인되었다. 화상해석 결과, 변위벡터는 토목섬유 매트가 파손된 Case에 비해 고르게 분포하였으며, 전단변형율은 비교적 미소하였다.
- 4) 실제 방조제의 필터재층은 입도범위가 대단히 넓게 구성되어 있어 시공여건 및 위치에 따라 필터재의 입도가 범위 내에서 충분히 변화할 가능성이 있다. 따라서, 토목섬유 매트의 파손시 실제 준설향사의 침하에는 준설향사의 유실 및 필터재층의 지지력 감소가 복합적으로 작용할 것으로 판단된다. 그러므로, 방조제 내 준설향사의 안정성을 확보하기 위해서는 토목섬유 매트의 파손을 최대한 억제하여 준설향사의 유실을 막고, 불가피하게 준설향사가 유실되는 경우 그라우팅 또는 널말뚝 시공 등을 통해 방조제를 유지보수할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 재난안전기술개발기반구축사업인 '재개발 저수지의 안정성 평가 및 차수 보강공법 개발'[2013-NEMA15-014-01010000-2013] 과제의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Dunn, R.J., Simantob, E., and Ko, H.Y. (1984) Centrifuge Modeling of Earth Dam Overtopping, *Proc. of 5th Engineering Mechanics Division Specialty Conference*, ASCE, pp. 1320-1323.
- Hayashi, H., Nishikawa, J., and Taniguchi, K. (1998) Seismic behavior of road embankments, *Centrifuge* 98, 1, Kimura, T., Kusakabe, O. and Takemura, J. eds., pp. 243-248.
- Higo, Y. (2003) *Instability and strain localization analysis of water-saturated clay by elasto-viscoplastic constitutive models*, Ph.D. dissertation, Kyoto University, Japan.
- Im, E.S., Seo, M.W., Ha, I.K., and Kim, W.G. (2005) Simulation of Earth-fill Dam Behavior Subjected to Water Level Variation Using Geotechnical Centrifuge, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 2C, pp. 95-102.
- Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W., and Cho, G.C. (2013) A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in South Korea, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-84.
- Lee, C.W. (2012) *A study on dynamic stability of unsaturated road embankments using dynamic centrifugal model tests*, Ph.D. dissertation, Kyoto University, Japan.
- Lee, C.W., Doi, T., Kinugawa, T., Higo, Y., Kimura, M., Kimoto, S., and Oka, F. (2011) Dynamic centrifuge modeling tests for the partially saturated embankments considering seepage flow, *the 24th KCCNN Symposium on Civil Engineering*, Hyogo, Japan, December 14-16, pp. 455-458.
- Lee, K. and Singh, A. (1971) Compaction of Granular Soils, *Proceedings of the 9th Annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, 5-7, April.
- Manso, P.A. and Schleiss, A.J. (2003) Improvement of embankment dam safety against overflow by downstream face concrete macro-roughness linings, *International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams*, Balkema, pp. 459-468.
- Matsuo, O., Saito, Y., Sasaki, T., Kondoh, K., and Sato, T. (2002) Earthquake-induced flow slides of fills and infinite slopes, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 1, pp. 89-104.
- Narita, K., Kimura, K., and Okumura, T. (2008) Seepage Behavior and Safety Evaluation in Embankment Dam during Rapid Drawdown, *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp. 10-20.
- Oh, Y.I., Ryu, J.Y., and Kim, S. W. (2005) Fatigue Effect and Particle Rearrangement of Geosynthetic Filter Layer in Sea Dike by Cyclic Tidal Flow Model Tests, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 4C, pp. 293-301. (in Korean)
- Schofield, A.N. (1980) Cambridge geotechnical centrifuge operation, *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp. 227-268.
- Sharma, J.S. and Bolton, M.D. (2001) Centrifuge and Numerical Modelling of Reinforced Embankments on Soft Clay Installed with Wick Drains, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 19, pp. 23-44.

Received November 22, 2013

Revised November 25, 2013

Accepted December 9, 2013