

# 모형시험을 통한 방수제 파이핑 안정성 평가사례(새만금 동진 3공구)



안용수  
헤인E&C 지반부 과장  
(ays0401@nate.com)



김홍식  
헤인E&C 항만부 전문



박준영  
헤인E&C 지반부 부장



김영용  
헤인E&C 지반부 과장

## 1. 개요

최근 본격적인 새만금 내부개발사업에 앞서 동진강 수역으로부터 내부개발지를 보호하기 위한 방수제 건설공사가 착공되었다.

하천수역에서 내부개발지(제내지)보호라는 방수제 목적상 침투류에 대한 안정성이 중요한바 본 과업에서는 파이핑안정성 평가시 이론식과 경험식의 제한성을 보완함

과 동시에 보다 실제적인 안정성평가를 위해 모형토조시험과 원심모형시험을 이용한 파이핑 안정성 평가사례를 설명하고자 한다(그림 1, 그림 2).

## 2. 지반조건

본 과업대상지는 동진강하구에 위치하여 오랜기간 퇴



그림 1. 전체 조감도



그림 2. 방수제 조감도

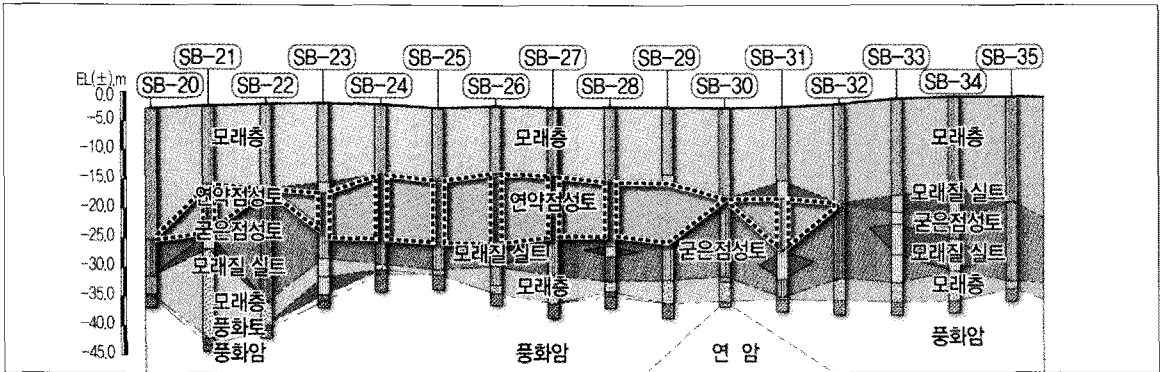


그림 3. 지층단면도

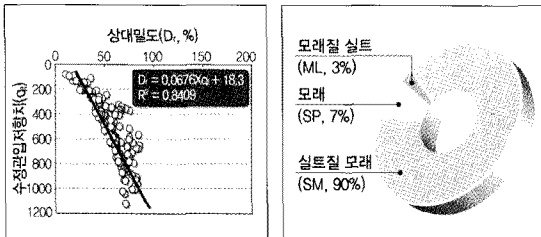


그림 4. 상부퇴적 사질토 물리적 특성

적으로 지층이 복잡하며 대표적인 퇴적양상은 그림 3과 같이 상부는 느슨~보통조밀 상태의 사질토 지반이 약 10m두께로 구성되어 있으며 그 하부에 중간 내지 굵은 점성토 층이 내재하는 것으로 조사되었다.

상부에 퇴적된 사질토층의 상태는 매우 느슨한 상태로 표준관입시험 N치는 10이하, 상대밀도 20~40% 범위이며, 투수계수가 크고 침투류 발생시 파이핑에 대하여 취약한 토질로 나타났다(그림 4).

### 3. 파이핑 평가방법

#### ① 한계동수경사

다음 그림 6과 같이 물이 A수조에서 B수조로 흘러 C지점에서 상향으로 침투력이 형성될 때 C지점에서의 유효 응력을 구하면,

$$\sigma' = \gamma_{sub} \cdot z - i \cdot \gamma_w \cdot z$$

응력이 0( $\sigma' = 0$ )일 때의 동수경사를 한계동수경사( $i_{crit}$ )로 하면 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\sigma' = \gamma_{sub} \cdot z - i \cdot \gamma_w \cdot z = 0$$

$$한계동수경사 i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

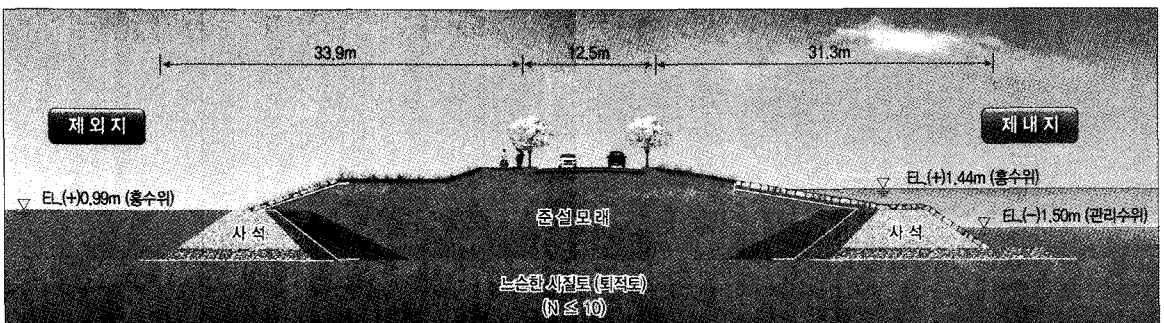


그림 5. 방수제 단면계획

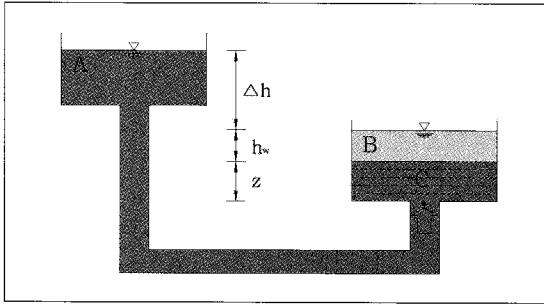


그림 6. 한계동수경사에 의한 파이핑

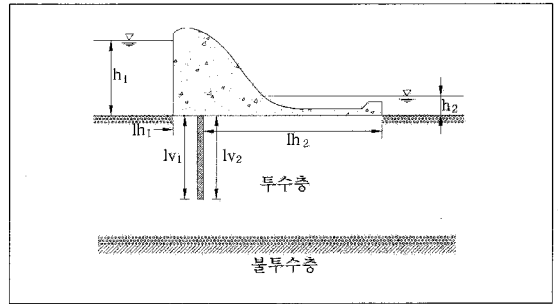


그림 7. Creep비

### ② Creep비

Lane(1935)는 가중크리프비(Weighted creep ratio)를 기준으로 하여, 파이핑에 대한 안전을 검토하는 경험적인 방법을 제안하였다. 가중크리프비(CR)는 다음과 같이 표현된다.

$$CR = \frac{l_w}{h_1 - h_2}$$

여기서,  $h_1 - h_2 = \Delta h$ 는 상하류면의 수두차이고,  $l_w$ 는 유선이 구조물 아래지반을 흐르는 최소거리이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{가중크리프거리 } l_w = \frac{\sum lh}{3} + \sum l_b$$

### ③ 한계유속(Justin, 1923)

흡입자의 입경에 대한 침투유속의 한계치(즉, 입자가 이동하여 파이핑이 발생되는 한계유속)를 다음과 같이 구하고 있다.

$$\text{입자가 받는 힘: } P = 2A \frac{V^2}{2g} \gamma_w (g)$$

여기서, P는 입자가 받는 힘(g)이고, A는 흐름을 받는 입자의 면적( $\text{cm}^2$ ), V는 유속( $\text{cm/sec}$ ),  $\gamma_w$ 는 중력가속도( $\text{cm/sec}^2$ ), 는 물의 단위체적중량( $\text{g/cm}^3$ )이다.

흡입자의 수중중량을 W로 하면 한계유속은 다음과 같이 표시된다.

$$W = P = A \frac{V^2}{g} \gamma_w,$$

$$V_C = \sqrt{\frac{W \cdot g}{A \cdot \gamma_w}} = \sqrt{\frac{2}{3} (G_s - 1) \cdot d \cdot g}$$

여기서,  $V_C$ 는 한계유속( $\text{cm/sec}$ )이고 d는 토립자입경( $\text{cm}$ , 유효경  $D_{10}$ )이다.

상기와 같은 파이핑 안정성 검토방법 중 해당 구조물인 방수제는 토사로 축조되는 수리구조물로 제체를 통한 침투를 허용하는 특성상 파이핑안정검토시 Creep비에 의한 방법을 제외하고 한계동수경사, 한계유속에 의한 파이핑 안정평가를 실시하였다.

## 4. 파이핑 모형토조시험

### 1) 시험장치

그림 8은 시험장치의 모식도를 나타낸 것으로 직경 200mm, 높이 500mm의 원통형 아크릴 프레임을 사용하였다. 시험기 측면에는 수두 측정을 위한 스텐드파이프를 50mm 간격으로 설치하여 파이핑시 시료 위치별 수두의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

동수경사 조절을 위한 장치로 그림 8에서 보는 바와 같이 유출수조와 유입수조가 있으며, 유입수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 시험기 하부를 통해 시료 내부로 유입되어 상부 배수관로를 통해 유출수조로 나오게 된다. 이때, 물의 흐름은 두 수조의 수두차로 조절된다. 유출수조에서 나온 유출수의 양을 측정하기 위하여 전자저울을 이용한 유량계 시스템을 구성하였다.

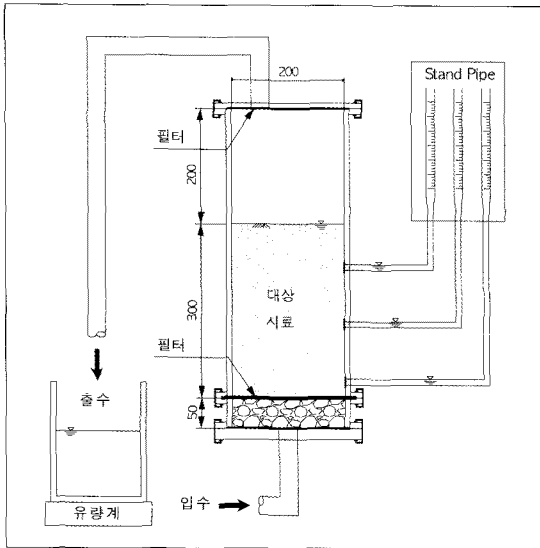


그림 8. 모형토조시험 개요

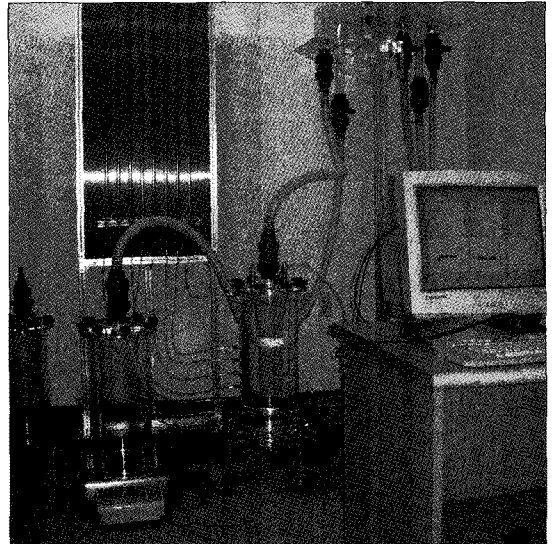


그림 9. 모형토조 실험장비 전경

## 2) 시험조건 및 방법

### ① 시험조건

검토대상인 사질토(퇴적토)의 위치별 조밀도가 다른 점을 재현하기 위해 상대밀도 평가시험결과(표 1 참조)를 바탕으로 대상시료를 느슨(Dr≒25%, 수중침강), 보통(Dr≒50%), 밀함(Dr≒70%), 매우밀함(Dr≒90%)의 네 가지 조건으로 재조성하여 파이프파괴 모형시험을 진행하였다.

### ② 시험방법

시료의 사전 포화작업을 위해 동수경사를 약  $i=0.05$  이하 상태로 부유사 및 파이프의 발생에 주의하면서 상향침투시키며 유출량이 일정해 질 때까지 시료를 포화시켰다.

본격적인 시험은 동수경사를  $i=0.5$ 에서 시작하여 단계적으로 상향시키며, 시료가 파괴될 때까지 시험을 실시하였다.

표 1. 시험조건

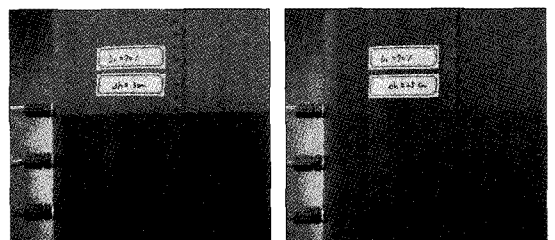
시료명	구분	시료입경	상대밀도
퇴적모래	CASE-1	$d) > 0.075\text{mm}$	25%
	CASE-2		50%
	CASE-3		70%
	CASE-4		90%

각 시료별 설정 동수경사당 스탠드파이프(Stand pipe)에서 물 높이의 변화가 없고, 부유사가 없을 때 시험을 실시하여 하부저수조의 유출량의 변화가 없이 일정해질 때까지(대략 20분 정도) 시험하였다. 측정은 10초~1분 간격으로 유출량을 측정하였으며, 파괴도달까지 스탠드파이프를 통한 시료 위치별 수두 변화를 측정한다.

## 3) 시험결과

### ① 한계동수경사 결정

한계동수경사는 표면고, 수두증분, 유량증분, 유속이 실험시작대비 급변화되는 시점이며, 각 항목별로 결정한 동수경사중 안전측 평가를 위해 최소값을 한계동수경사로 결정하였다. 파이프가 발생하였을 것으로 예측되는 한



파이핑전

파이핑후(부유사발생)

그림 10. 파이프 발생 전후광경

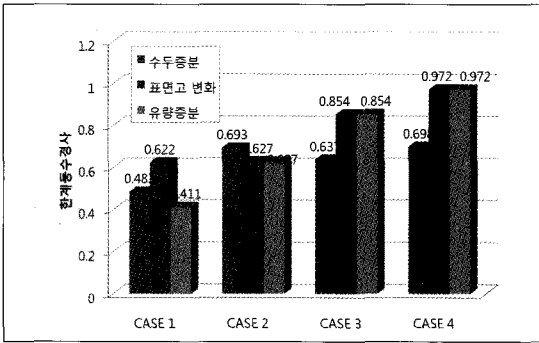


그림 11. 파이핑발생 예측지점

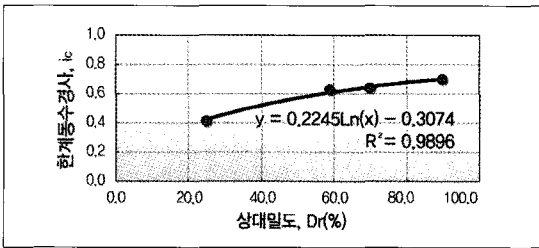


그림 12. 상대밀도별 한계동수경사

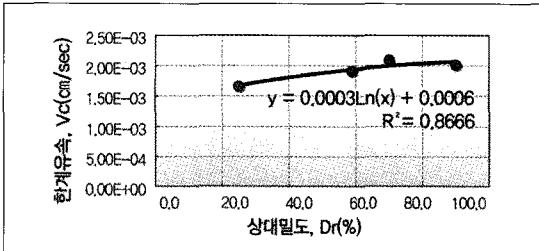


그림 13. 상대밀도별 한계유속

표 2. 한계동수경사의 결정

실험조건	수두증분	표면고 변화	유량증분	결정값
Case 1	0.483	0.622	0.411	0.411
Case 2	0.693	0.627	0.627	0.627
Case 3	0.673	0.854	0.854	0.637
Case 4	0.698	0.972	0.972	0.698

표 3. 한계유속의 결정

실험조건	한계유속, $V_c$ (cm/sec)		
	측정(1)	측정(2)	결정값
Case 1	1.46E-03	1.85E-03	1.66E-03
Case 2	1.75E-03	2.07E-03	1.91E-03
Case 3	1.97E-03	2.20E-03	2.09E-03
Case 4	1.91E-03	2.10E-03	2.01E-03

계동수경사는 각 조건에서 값이 증가하기 직전의 동수경사와 직후의 동수경사의 평균값을 적용하였다.

모형실험을 통해 산정된 한계동수경사와 경험식(Terzaghi, 1922)을 비교한 결과 실험값( $i_{c\text{평균}} = 0.59$ )이 경험식( $i_{c\text{평균}} = 0.86$ )보다 작은 값에서 한계동수경사가 형성되는 것으로 분석되었다.

## ② 한계유속 결정

한계유속은 표 3에 나타난 바와 같이 앞서 산정된 한계동수경사에 해당하는 유량측정결과로부터 계산된 값이며, 결정값은 한계동수경사 발생 직전 유속측정값(1)과 직후 측정값(2)의 평균을 취하였다.

실험에 의한 관측치와 경험치(Justin, 1923)의 한계유속을 분석 비교한 결과 고전적인 경험식( $V_{c\text{최소}} = 2.0E-02\text{cm/sec}$ )에 의한 한계동수경사는 실험값( $V_{c\text{최소}} = 1.66E-03\text{cm/sec}$ )에 비해 적게 나타나 본 과연구간의 준설토는 경험식을 통해 한계유속을 결정할 경우 한계유속 이하에서 파이핑이 발생할 우려가 있는 것으로 나타났다.

## 4) 수치해석을 통한 파이핑검토

모형토조 파이핑시험 결과 산정된 한계동수경사와 한계유속결과 값을 이용하여 수치해석을 통한 파이핑 안정성을 검토하였다. 검토조건은 하천수위 변동조건에서의 가장 불안한 조건인 홍수시와 수위급강하시를 기준으로 파이핑 안정검토를 실시하였다.

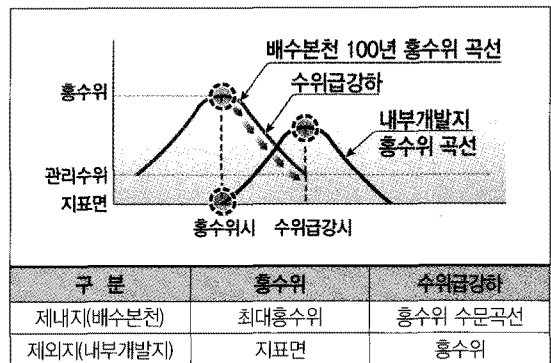


그림 14. 내·외수위 변동조건 고려

모형시험을 통한 방수제 파이핑 안정성 평가사례(새만금 동진 3공구)

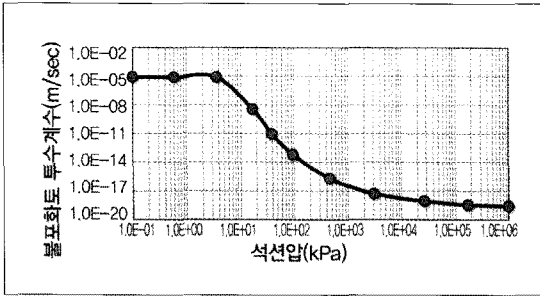


그림 15. 불포화 투수특성

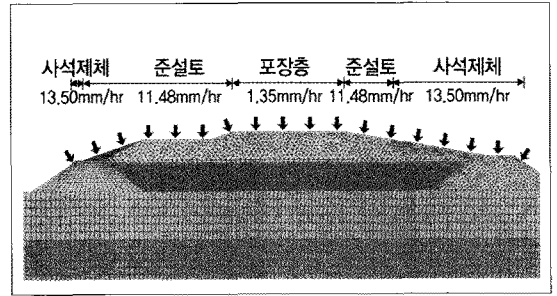


그림 16. 강우침투 조건(부안 100년 빈도)

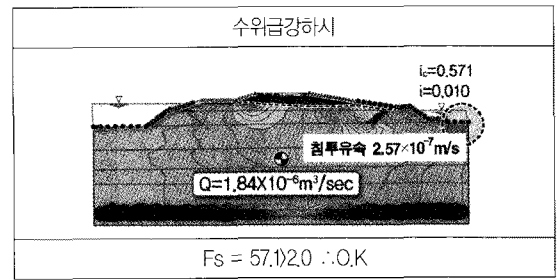
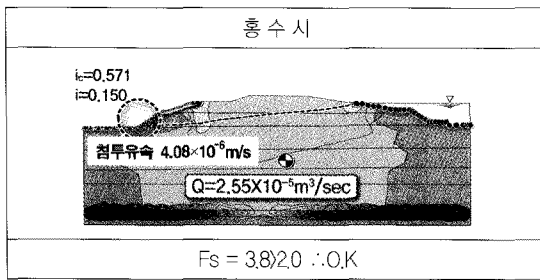


그림 17. 파이핑 안정검토(한계동수경사법)

표 4. 파이핑안정성 검토결과

구분	한계동수경사		한계유속 (10 <sup>-6</sup> m/sec)		판정
	i	i <sub>c</sub>	V <sub>n</sub>	V <sub>nc</sub>	
홍수시	0.15	0.571	0.408	1.77	안정
수위 급강하시	0.01	0.571	0.0257	1.77	안정

수리특성 반영사항으로는 지표투수시험 역해석을 통해 산정한 불포화 투수특성과 100년 빈도 강우강도 침투 조건을 함께 고려하여 보다 실제적인 안정성 평가를 실시 하였다.

파이핑 안정성 검토 결과 홍수위시 발생하는 동수경사 (i)=0.15, 침투유속(V<sub>n</sub>)=4.08×10<sup>-6</sup>m/s 이며, 수위급강하 시 동수경사(i)=0.01, 침투유속(V<sub>n</sub>)=2.57×10<sup>-7</sup>m/s으로 나타나 실내시험에서 산정한 한계동수경사 및 한계유속 이하로 파이핑에 대한 안정성이 확보된 것으로 분석되었다.

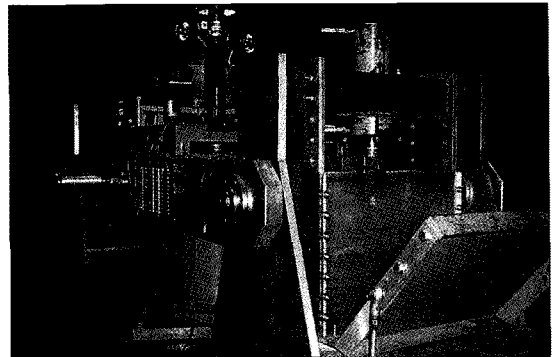


그림 18. 원심모형시험기 전경

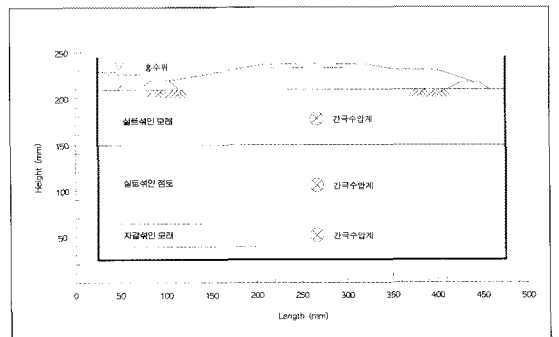


그림 19. 원심모형시험 모델(단면)

5. 원심모형시험

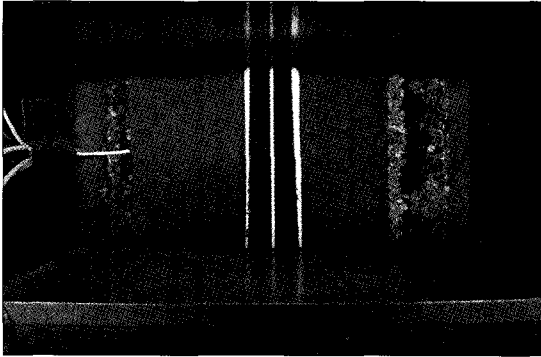


그림 20. 방수제 완성모델(평면)

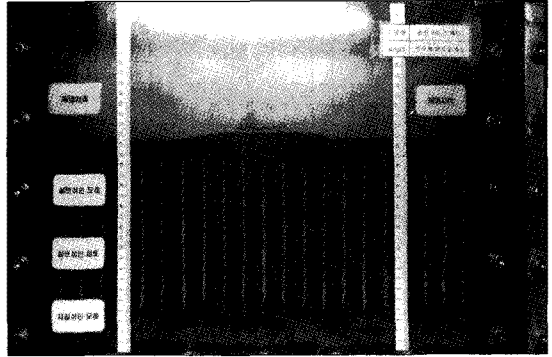


그림 21. 홍수위 적용시 모델형상

원심모형시험은 원심력으로 흙의 자중을 증가시켜 축소모형에 대해 현장응력을 구현함으로써 원형구조물의 거동을 실내에서 재현할 수 있는 축소실험이다.

본 실험을 위해 공사 예정현장에서 직접 채취한 현장토(실트섞인 모래 및 실트섞인 점토)를 실험모형제작시 사용하고 실험중 동수경사 측정을 위해 간극수압계를 그림 19와 같이 매설하였다.

시공단계를 고려한 원심모형실험을 50g의 중력수준에서 수행을 계획하고, 방수제 축조 완료 후 원심력 가속조건에서 제외측에 홍수위를 적용하여 파이프에 대한 안정검토를 수행하였다. 파이프 안정검토 항목으로 육안관찰, 제내측 지반변위, 한계유속 등을 비교하여 안정성을 평가하였다.

실험결과 50g 중력수준에서 제외측 수위를 홍수위까지 상승시켰을 때 그림 21과 같이 제내측에서 세립토 유실이나 과대한 변위등이 발생되지 않은 것으로 나타났다.

파이프에 대한 안정성검토를 위해 제내측 방수제 유속을 Darcy의 법칙으로 산정하고 이를 한계유속과 비교하였다. 매설된 간극수압계에서 간극수압은 5.8kPa로 측정되었으며, 동일한 유선상 제내측 경사면 수두는 0.5m, 준설토내 유선 길이는 약 6.0m 이므로 동수경사는 0.013으로 산정되었다. 이 구간의 투수계수를  $1.1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 적용하면, 침투유속( $V_n = i \cdot K$ )은  $1.43 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 가 된다. 산정된 침투유속은 한계유속 0.0109cm/sec (투수계수에 의한 제안식중 최소값, Kovac)에 비하여 작아 파이프에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

표 5. 파이프안정성 검토결과

간극수압	동수경사	침투유속	한계유속
5.8kPa(제내측)	0.013	$4.55 \times 10^{-3} \text{cm/s}$	0.0109

\*참고 : 한계유속은 Kovac(1982)제안값

## 6. 결론

본 과업의 중요수리구조물인 방수제의 파이프안정성 평가에 있어 고전적인 평가법인 Terzaghi방법과 Justin에 의한 방법은 현장 지반조건에 따라 실제 파이프파괴시 한계동수경사 및 한계유속과 상당한 오차를 나타내는 경우가 많아 안전율을 과다하게 적용해야 하는 등 안정성 문제점을 내포하고 있어 이를 보완하기 위해 모형시험을 이용한 침투류에 대한 안정성 평가를 실시하였다. 모형토조 시험결과 급격한 수두저하, 표면고의 변화, 유량증가 등 파이프 발생시 수반되는 현상 등을 종합하여 현장여건에 부합하는 신뢰성 높은 한계동수경사와 한계유속을 결정하였으며, 산정된 결과를 이용한 수치해석을 통해 파이프 안정해석을 실시하였다. 또한 실제 방수제 형상의 축소모형시험인 원심모형시험을 이용 파이프안정성에 대한 검증을 통해 보다 현장여건에 부합되고, 신뢰성 높은 침투류 안정해석을 실시 할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 이형우, 장병욱(2005a), "2층 성토제 침투해석모형(SAMTLE)의 개발 및 적용", 대한토목학회 논문집, 제25권, 제5C호, pp.353~360
2. 장남주(2009), "제체의 파이핑 안정성 평가에 대한 실험적 연구", 한양대학교 석사학위논문
3. Bloomquist, D. G., and Townsend, F. C.(1984), "Centrifugal Modeling of Phosphatic Clay Consolidation", Sedimentation/Consolidation Models, pp. 565-580.
4. Desai, C.S.(1973), "Approximate solution for unconfined seepage", J.Irrig. Drain. Div., ASCE 99, pp.71~87
5. Jafroudi, S. (1983), "Experimental Verification of Bounding Surface Plasticity Theory for Cohesive Soils", Ph D Thesis of University of California , Davis.
6. Kovacs, G.(1981), "Seepage Hydraulics", Elsevier Scientific Publishing Co. pp.349~362
7. Townsend, F. C.(1984), "Centrifuge Modeling of Time-dependent Deformations", Sedimentation/Consolidation Models, pp. 60-64.

