

하천제방 배수통문의 저판확폭을 통한 공동발생 억제기법 연구

An Experimental Study on Suppression of Cavity Development by Enlargement of Base Plate of Box-Culvert Installed at River Levee

김진만¹ Kim, Jin-Man

최봉혁² Choi, Bong-Hyuck

이대영³ Lee, Dae-Young

진영지⁴ Jin, Young-Ji

Abstract

Generally, the Box-Culvert in levee is destroyed by various reasons. Especially when Box-Culvert is installed over the pile foundation in soft ground, the failure occurs for 1) the weakness of compaction in Box-Culvert side by the differential settlement between outer ground and inner soil prism, 2) hydraulic fracturing and disturbance of Box-Culvert side soil by the repeated acting of seepage pressure at flood time. Also the side of Box-Culvert is difficult to compact and the shear resistance is reduced by more than 1/3 for the reduction of friction caused by the difference of material property. In this study, a series of model tests are conducted for the analysis of the development mechanism of outer ground and inner soil prism by the differential settlement using the pile foundation in soft ground, and cavity suppressed technique is suggested by the analysis of base plate enlargement effect.

요지

일반적으로 하천제방 배수통문은 다양한 원인에 의하여 붕괴가 발생하며, 특히 연약지반 상에 말뚝기초를 이용하여 설치된 경우 1) 주변 지반(외부토체)/말뚝기초 처리된 암거 상단(내부토체)의 상대적 침하 차에 의한 배수통문 암거 측벽부의 다짐도 약화, 2) 하이드로릭 플랙처링에 의한 홍수 시 침투수압의 지속적 반복에 의한 측벽부 교란 등에 의해 붕괴가 발생한다. 특히 측벽부는 시공여건상 다짐장비의 접근이 어려운 다짐 취약부이고, 이질재료에 의한 마찰력 감소로 전단저항력이 일반 흙의 전단강도에 비해 1/3 이상 감소하여 발현된다. 이에 본 연구에서는 주변 지반에 인위적인 변형을 발생시키는 방법으로 침하를 모사한 실내 모형실험을 통하여 연약지반 상 말뚝 기초된 배수통문 암거의 상대적 침하에 따른 외부토체/내부토체 발현 메카니즘과 저판확폭에 따른 배수통문 암거 측벽부 다짐도 향상 효과를 비교·분석함으로써 배수통문 저판 확폭을 통한 주변지반 공동 확장 억제기법을 제시하였다.

Keywords : Levee, Box-culvert, Cavity, Model test, Settlement

1. 서론

하천제방 배수통문은 제방을 횡단하는 암거형식의

수로구조물로, 농업용수의 취득 또는 배수 등의 목적으로 설치된다. 또한, 배수통문은 연속적으로 시공되어져야 하는 제방의 특성에 반하여 불연속적인 단면을 제

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Eng., KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원 (Member, Researcher, Dept. of Geotechnical Eng., KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Eng., KICT, dylee@kict.re.kr, 교신저자)

4 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 Post-Doc. (Member, Post-Doc., Dept. of Geotechnical Eng., KICT)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

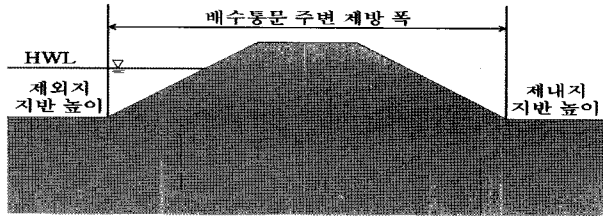
공함으로써 제방의 취약부를 형성하고, 침하가 큰 지반에 말뚝기초로 지지된 배수통문 주변에 공동 및 상대적 지반침하에 의한 단차(파이핑 발생 원인), 제방 쪽의 감소(그림 1 참조) 등이 발생되기 때문에 하천제방 안전성을

을 저하시키는 구조물로 여겨진다.

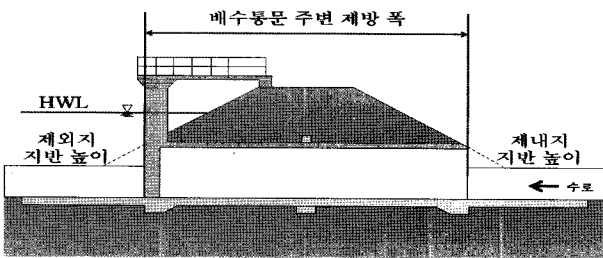
특히, 연약지반 상에 말뚝기초를 이용하여 설치된 배수통문의 경우 그림 2에서 보듯이 1) 주변 지반(외부토체)/말뚝기초 처리된 암거 상단(내부토체)의 상대적 침하 차에 의한 암거 측벽부의 다짐도 약화, 2) 수압할렬(hydraulic fracturing) 및 홍수 시 침투수압의 지속적 반복에 의한 측벽부 교란 등이 붕괴의 주원인이며, 상호간의 복합적인 작용에 의해 배수통문 하부 및 측벽부에 공동을 발생시키고 시간경과에 따라 확장된 공동에 의해 하천제방의 붕괴를 야기시키는 것으로 알려져 있다.

이때, 배수통문 붕괴 영향인자는 1) 외부토체/내부토체 사이의 상대적 침하면(취약부) 발생, 2) 홍수시 상대적 침하경계면(취약부)에 침투수압의 교란(하이드로릭 프랙처링), 3)콘크리트/흙으로 구성된 측벽부 재료의 다짐도 저하에 따른 전단저항력 감소 등이다. 특히 측벽부는 시공여건상 다짐장비의 접근이 어려운 다짐 취약부이고, 이질재료에 의한 마찰전단력 감소로 전단저항력이 일반 흙의 전단강도에 비해 1/3 이상 감소하여 발생된다. 따라서, 측벽부 취약구간은 배수통문 구조를 그림 3에서와 같이 저판확폭 형태로 변경하여 측벽부와 외부토체/내부토체 취약부를 일치시키켜 적용하는 것이 침투수압에 대한 저항력을 증가시켜 측벽부 안정성이 증가될 것으로 판단된다. 배수통문의 안정성 평가를 위한 연구가 일본에서 진행되고 있으며 中山修(1999)는 통문 주변제방의 누수위험도조사를 위한 연통시험법의 적용에 관한 연구를 수행하였으며, 김진만(2007)은 연통시험을 통한 배수통문 저면 공동평가기법에 대한 연구를 수행하였다. 한국건설기술연구원(2005)은 하천제방 배수통문의 안정성 향상을 위해 배수통문의 안정성 평가, 탐사기법 개발, 배수통문의 보수 보강기법 개발을 통한 배수통문 설계 및 안정성 평가기법 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 하천제방 배수통문의 안정성 평가기법



(a) 통문이 설치되지 않은 제방



(b) 통문이 설치된 제방

그림 1. 통문 설치 위치 제방 쪽 감소

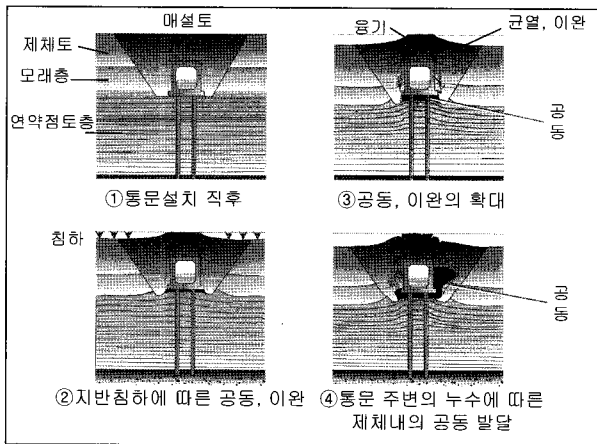


그림 2. 말뚝 처리된 배수통문의 붕괴 메카니즘(中山修 등, 1999)

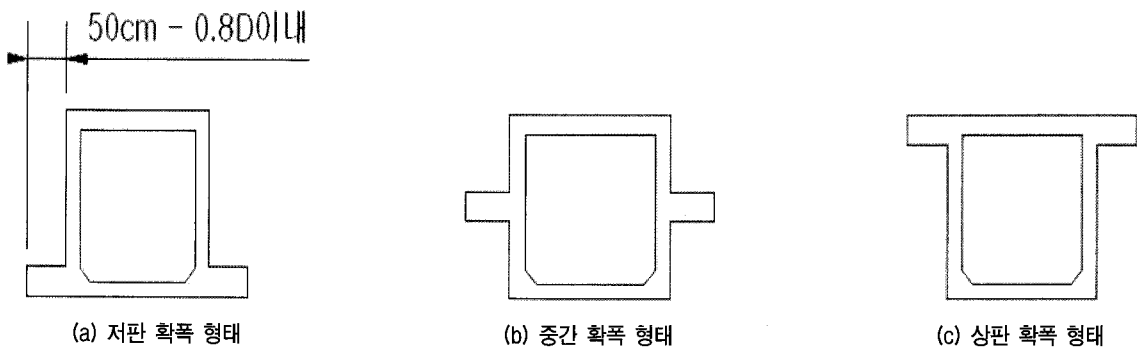


그림 3. 배수통문 위치 별 확폭 형태

의 일환으로 주변지반에 인위적인 변형을 발생시키는 방법을 통하여, 말뚝 기초된 배수통문의 침하를 모사한 실내축소모형실험을 수행하였다. 실내모형실험을 통해 상대적 침하에 따라 암거 측벽부에 발생하는 외부토체/내부토체 취약부 발현 메카니즘과 제안된 저판확폭에 의한 외부토체/내부토체 취약부 이동 효과를 비교·분석함으로써 배수통문 저판 확폭에 따른 배수통문 암거 주변 지반 공동의 확장을 억제하는 기법의 적용성을 제시하고자 한다.

2. 실내 모형토조실험 개요

2.1 시험 장비 및 재료

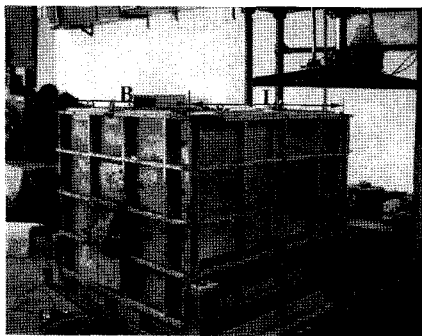
(1) 시험장비

모형토조실험에 사용된 주요장비로는 모형토조, 강사장치, 모형암거, 저판 확폭을 위한 플레이트 및 침하유도장치 등이 있다. 여기서 실험에 사용된 모형토조는 그림 4(a)에서 보듯이 140cm×102cm×90cm 크기의 철제 박스를 이용하였으며, 박스의 전면은 15cm 간격의 그리드가 표시되어 있는 투명아크릴을 이용하여 암거의 설치, 성토 및 모형지반의 침하에 따른 거동을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 모형토조내의 모래 포설은 강사장

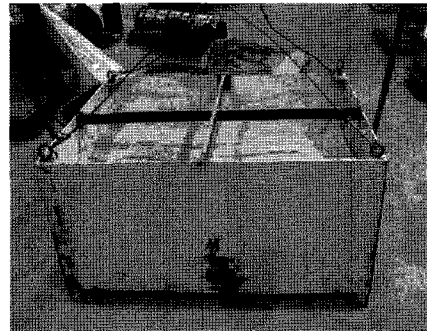
치를 이용하여, 토조내 균질한 단위중량을 가질 수 있도록 모래성토시 일정한 낙하높이를 유지하였다. 이때 강사장치는 그림 4(b)에서 보듯이 모형토조의 내부치수를 고려하여 130×100×40cm의 크기로 제작되었다.

한편, 실험에 사용된 모형암거 및 저판확폭을 위한 플레이트의 재질은 실제 현장에서 철근콘크리트의 강성이 지반에 비해 상대적으로 매우 큰 것을 고려하여 철제를 이용하여 제작하였다. Okabayashi 등(1995)은 강성암거에 작용하는 토압특성을 규명하기 위한 원심모형시험을 수행하였으며, 이때 상사비율을 1:5로 제안하였다.

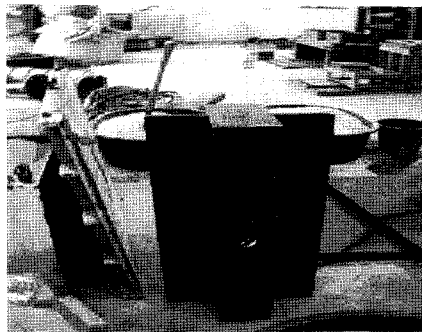
본 실험에서 암거의 크기는 Kojiro 등(1995)의 연구결과를 참조하여 암거의 내경과 암거 상부지반은 치수비를 약 1:5(14 : 70(cm))로 설정함으로써 실제 현장의 1.5m~2.0m 높이의 배수통문에 7.5m~10.0m의 제방고를 가진 하천제방 배수통문을 모사하도록 하였다. 한편, 저판 확폭을 위한 플레이트는 모형암거의 폭(D)에 비례하여 0.2D, 0.4D, 0.6D, 0.8D, 1.0D로 변화시켰다. 이때, 배수통문 암거 주변 지반의 침하는 그림 4에서 보듯이 침하유도 장치와 주변 지반을 지지하는 철제 플레이트를 이용하여 기계적인 방법으로 1.5cm~4.5cm의 주변 지반 변형에 따른 침하량을 단계적으로 모사할 수 있도록 하였으며, 배수통문 암거의 경우 모형토조 바닥면에



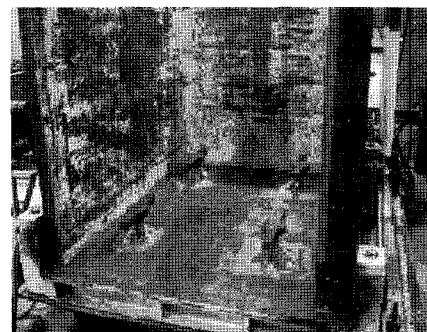
(a) 모형토조



(b) 강사장치(모래낙사장치)



(c) 모형암거 및 플레이트



(d) 침하유도장치

그림 4. 모형토조 개요도

고정 시켜 변형을 억제하였다.

(2) 모래 및 슬래그 시료

본 연구에 사용한 뒤채움용 모래시료는 표 1에서 보듯이 우리나라 주문진 지역에서 채취되는 비중 2.63, 내부마찰각 35°, 최대다짐밀도 1.68t/m³인 주문진 규사를 이용하였다. 그림 5에서는 모래시료의 입도분포곡선을 보여주는데, 모래시료의 최대다짐밀도의 경우 ASTM 523 규정인 ‘진동다짐에 의한 최대진조밀도 결정 방법’을 이용하여 수행되었다(Bowles, 1978).

모형토조실험은 그림 6에서 보듯이 다짐밀도에 따라 압거 상부에 성토되는 표준모래의 특성을 조사하기 위하여 여러 단계의 낙하고에 대해 상대다짐도를 측정하였다. 낙하고 변화에 따른 모래시료의 단위중량은 그림 6에서 보듯이 80cm 이상인 경우 낙하높이에 무관한 것으로 나타났다. 한편, 모형토조실험에 이용된 낙하높이는 그림 6의 실험결과를 이용하여 낙하고 50cm, 상대다짐도 87.5%를 기

준으로 하였다. 이때, 모형토조실험 중 모래시료의 함수비는 표면건조상태로서 2.0%~3.0% 정도가 유지되었다.

또한, 본 실험에서는 선철 작업시 발생하는 슬래그 시료를 이용하여 모형토문 주변의 침하특성을 시각적으로 보여주었다.

2.2 모형토조 실험방법

모형토조실험은 모형암거, 저판 확폭을 위한 플레이트 및 침하유도장치 설치, 압거상부의 단계별 모래 및 슬래그 포설, 단계별 침하 유도 및 침하량 계측 등의 순으로 수행되었다. 이때 침하량 계측은 압거주변지반의 침하를 유도한 후 상부지반 전체 및 각 높이별 15cm 간격으로 압거측면 8개 지점의 침하량을 측정하는 방식으로 수행되었다.

(1) 모형토조 내부구조물 설치

모형토조 내부구조물은 앞서 언급한 바와 같이 모형

표 1. 흙시료의 역학적 특성

비 중	함수비(%)	모형토조실험시 평균 단위중량(t/m ³)	내부마찰각(°)
2.63	2.0~3.0	1.44(낙하고 20cm), 1.48(낙하고 50cm)	33

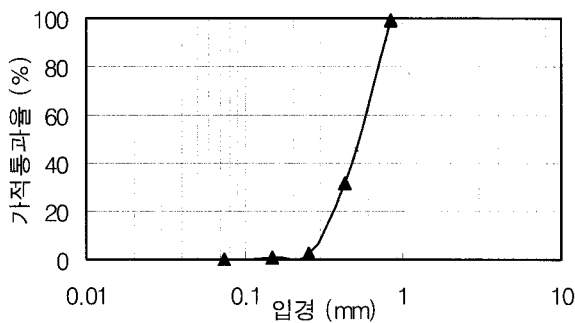


그림 5. 시험 대상 모래시료의 입도분포곡선

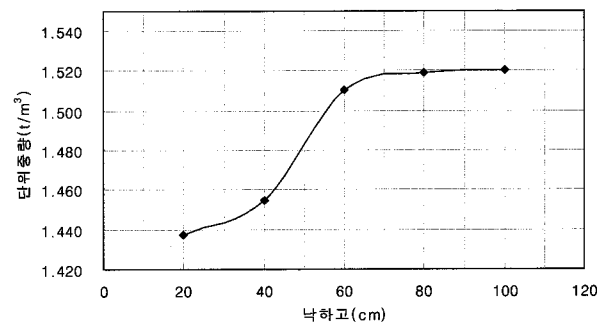
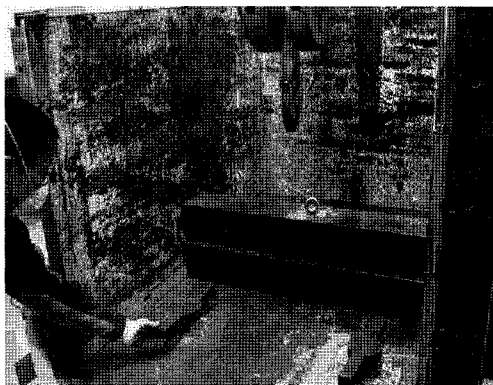


그림 6. 낙하고에 따른 모래시료의 단위중량



(a) 토조내 암거설치전경



(b) 암거주변지반 성토

그림 7. 모형토조 내부 구조물 설치

암거, 암거 저판 확폭을 위한 플레이트, 기초지반 침하를 모사하기 위한 침하유도장치 등이 있다. 각 구조물의 설치 순서는 그림 7에서 보듯이 먼저 모형토조 내부에 침하유도장치를 설치한 후, 양 측면에 저판 확폭 플레이트를 부착한 모형암거를 설치하는 순이다.

(2) 모래 채움 및 슬래그 포설

모래 채움 및 슬래그는 그림 8에서 보듯이 실험실 내에 설치되어 있는 크레인에 강사기를 거치하여 낙하높이를 지표면에서 50cm 높이로 일정하게 하여 모래를 포설한 후 모형토조 높이 16cm, 30cm, 50cm, 70cm 지점에 4cm 두께의 슬래그를 겹침 포설하였다.

(3) 실험 내용

연약지반상 말뚝기초된 암거의 상대적 침하에 따른 외부토체/내부토체 발현 메카니즘과 저판확폭 효과를 분석하기 수행된 실험내용은 표 2에서 보듯이 외부토체

표 2. 저판확폭효과 분석을 위한 실험내용

암거 저판	유	무
변화 인자	0.2D, 0.4D, 0.6D, 0.8D, 1.0D	0.0D
비 고	암거 주변지반 유발 침하량 : 1.5cm, 3.0cm, 4.5cm	

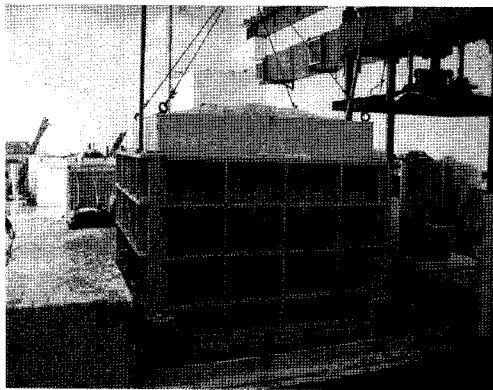
※ D : 암거의 외측 폭

/내부토체 유발 침하량(1.5cm, 3.0cm, 4.5cm) 변화에 따른 암거 저판확폭(0.0D, 0.2D, 0.4D, 0.6D, 0.8D, 1.0D) 별 효과를 평가분석하였다.

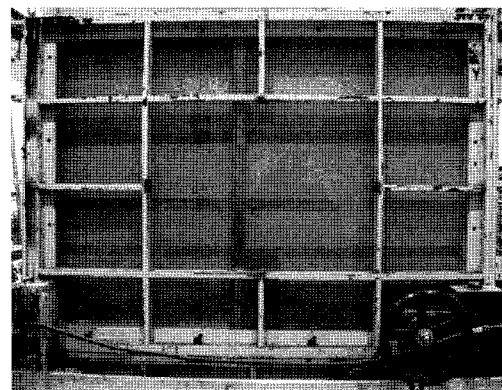
3. 실험 결과 및 분석

3.1 유발 침하량 변화에 따른 외부토체/내부토체 침하 특성

그림 9에서는 기존 배수통문의 저판 형태인 저판확폭이 없는 경우(0.0D)와 저판확폭된 경우(0.4D)의 유발 침하별 수평거리-연직침하량 관계 곡선을 보여준다. 유발 침하량

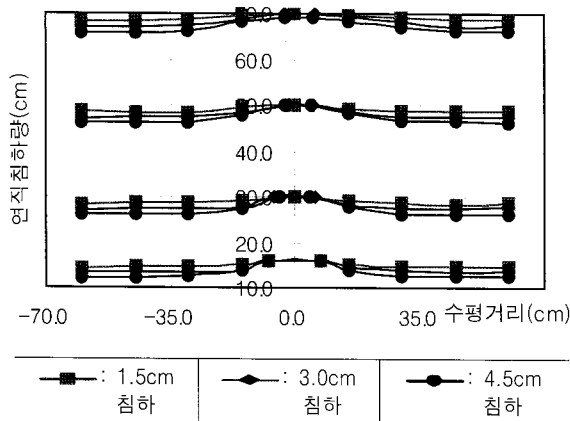


(a) 낙사를 이용한 구사 채움

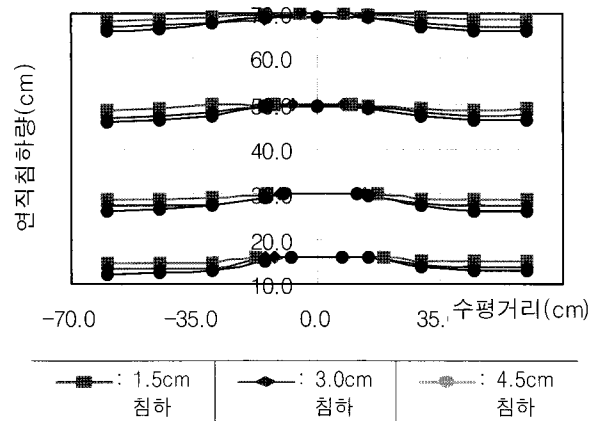


(b) 낙사 후 채움 완료 모습

그림 8. 모형암거 지반의 채움



(a) 저판확폭 : 0.0D



(b) 저판확폭 : 0.4D

그림 9. 유발 침하별 수평거리-연직침하량 관계곡선

변화에 따른 외부토체/내부토체의 침하특성은 그림 9에서 보듯이 유발침하량이 커질수록 저판확폭 유무에 상관없이 암거 주변 침하의 경우 암거 거리별로 암거 직상단과 같이 침하량이 없는 부분(내부토체, I구간), 침하의 변곡이 발생되는 구간(외부토체, II구간), 멀리 떨어져서 최대 균등침하량이 발생하는 구간(외부토체, III구간) 등으로 구분되어 순차적으로 침하량이 커지는 것으로 나타났다.

한편, 지반 내 전단응력의 발생은 침하의 변곡이 나타나 상대적 변위가 발생하는 II구간에서 발생하고, I구간 및 III구간의 경우 수직방향만의 변형(침하) 및 압축이 발생함으로써 상대적 변위가 발생하지 않아 토체 내 전단응력이 발생되지 않는 것으로 평가 되었다. 특히 유발침하량 변화는 유발침하량이 커질수록 침하의 변곡이 발생하는 II구간의 변곡 곡률을 크게 유발시켜 토체내 변곡에 따른 발생 전단응력을 크게 하여 지반의 파괴를 유발시키는 것으로 판단된다.

본 실험 결과는 말뚝 주변의 상대적 침하가 발생한 경우 침하의 변곡이 발생하는 II구간이 진전되어 침투가 용이한 토체영역이 침하량에 따라 점진적으로 형성된다는 것을 실증적으로 보여준다. 따라서 말뚝 시공된 배수통문은 물의 침투 경로인 II구간에서 발생하는 전단응력의 최소화 및 다짐도에 문제가 있는 암거 측벽부로부터 멀리 떨어뜨릴 구조적 방안을 모색하여야 한다.

3.2 암거 저판확폭 변화에 따른 외부토체/내부토체 침하특성

그림 10 및 그림 11에서는 최대 침하량(4.5cm)시 암

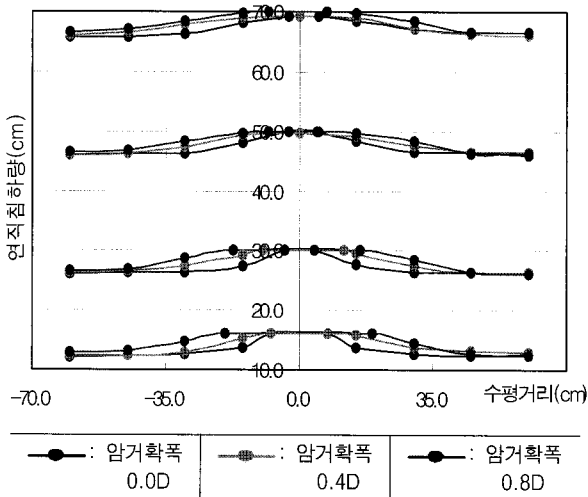
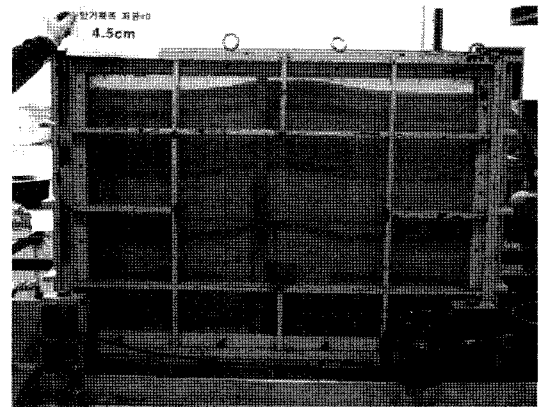


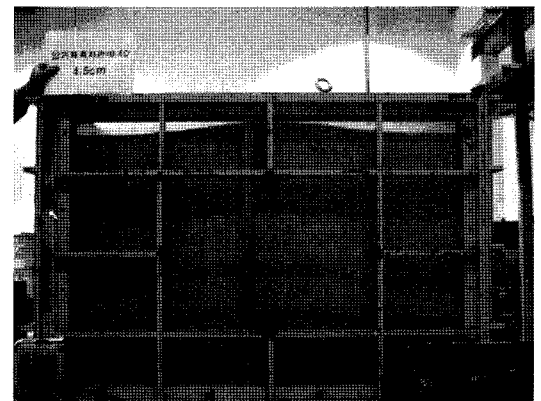
그림 10. 저판확폭 변화별 수평거리-연직침하량 관계 곡선(침하량 =4.5cm)

거 저판 확폭 변화에 따른 수평거리-연직침하량 관계 곡선 및 관련 실험장면을 보여준다. 암거 저판확폭 변화에 따른 외부토체/내부토체의 침하특성은 그림 10 및 그림 11에서 보듯이 저판확폭이 커질수록 침하의 변곡이 발생하는 II구간(침투영역)의 곡률(인장응력 발생)이 작아지고, 내부토체 영역이 커져 암거측벽부로부터 II구간 발생 거리가 멀어지는 특성을 나타냈다.

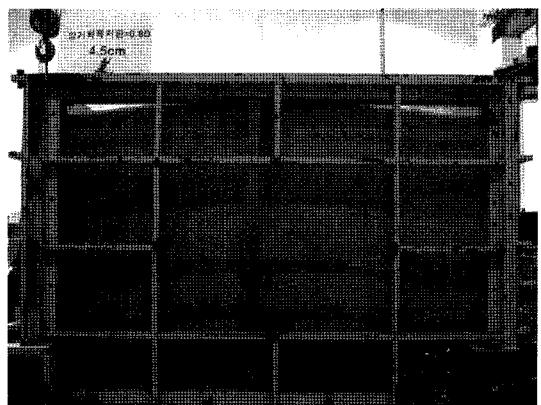
이러한 경향은 암거의 연직하중계수(α)의 결정시 성



(a) 암거확폭저판=0.0D



(b) 암거확폭저판=0.4D



(c) 암거확폭저판=0.8D

그림 11. 저판확폭 변화별 관련 실험 장면(침하량=4.5cm)

토높이(H)/암거의 외폭(B)의 비 관계에서 알 수 있듯이 B가 커질수록 따라 작용 설계하중이 작아지는 경향(아칭영역이 커져서 내부토체의 분담하중이 작아지는 경향)과 일치한다. 즉, 암거 저판확폭효과는 II구간의 변곡곡률을 작게 하여, 변곡영역의 확산을 통해 II구간에서 발생하는 전단응력을 작게하는 특성을 나타낸다.

한편, 본 연구를 통한 암거저판 확폭 효과는 암거저판 확폭 크기가 클수록 즉, 0.8D 및 1.0D에서 가장 좋은 특성을 보였으나, 시공 시 다짐 어려움 영역의 크기(통상 1m 미만) 및 저판 확폭에 따른 말뚝의 시공비 증가 등을 고려하여 최적 암거 저판확폭 길이는 50cm~80cm 정도가 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 연약지반상 말뚝 기초된 암거의 상대적 침하에 따른 주변 지반(외부토체)/말뚝기초 처리된 암거 상단(내부토체)의 발현 메카니즘과 저판 확폭에 따른 공동억제기법을 제시하고자 실내 모형실험을 통하여 저판 확폭 효과를 평가하였다. 본 연구에서 수행한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유발침하량이 커질수록 저판확폭 유무에 상관없이 암거 주변 침하의 경우 암거 거리별로 암거 직상단과 같이 침하량이 없는 부분(내부토체, I구간), 침하의 변곡이 발생하는 구간(외부토체, II구간), 멀리 떨어져서 최대 균등침하량이 발생하는 구간(외부토체, III구간) 등으로 구분되어 순차적으로 침하량이 커지는 것으로 나타났다.
- (2) 저판확폭이 커질수록 침하의 변곡이 발생하는 II구

간(침투영역)의 곡률(인장응력 발생)이 작아지고, 내부토체 영역이 커져 암거측벽부로부터 II구간 발생 거리가 멀어지는 특성을 나타냈다.

- (3) 암거 저판확폭효과는 암거 저판확폭 크기가 클수록 즉, 0.8D 및 1.0D에서 가장 좋은 특성을 보였으나, 최적 암거 저판확폭 길이는 저판확폭길이가 클수록 그 효과가 클지라도 시공 시 다짐 어려움 영역의 크기(통상 1m 미만) 및 저판 확폭에 따른 말뚝의 시공비 등을 고려하여 50cm~80cm 정도가 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구는 제안된 조건에 대해 수행된 한정적인 실험연구로서 향후 침투수와 토질 변화 등 다양한 현장 조건을 모사할 수 있는 후속 연구가 수행된다면, 본 연구를 통하여 제안된 암거 저판확폭기법은 하천제방 배수통문 주변 지반에 발생하는 공동억제에 있어서 유용한 기법으로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김진만 (2007), “연통시험에 의한 배수통문 저면 공동평가기법”, *한국방재학회지*, 제 7권 제2호, pp.122-128.
2. 한국건설기술연구원 (2005), “하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 연구”, 2003 건설기술기반구축사업 최종보고서, R&D/03기반기술-A12, 건설교통부.
3. 中山修 (1999), “통문주변제방의 누수위험도조사를 위한 연통시험법의 적용 예”, *제34회 지반공학회 연구발표회*, pp.167-168.
4. Bowles, J. E. (1978), “Engineering Properties of Soils and Their Measurement”, 2nd ed. McGraw-Hill Book company, New York, pp.213.
5. Kojiro Okabayashi (1995), 강성칼버트에 작용하는 토압의 경감 공법에 관한 원심모형재해실험, *일본토목학회논문집*, No. 529, III-33, pp.37-45.

(접수일자 2010. 8. 30, 심사완료일 2011. 1. 24)