

## 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형특성

### Deformation Characteristics of Underground Pipe with In-situ Soil CLSM

박 재 현<sup>1</sup> Park, Jae-Heon

이 관 호<sup>2</sup> Lee, Kwan-Ho

조 재 윤<sup>3</sup> Jo, Jae-Yun

김 석 남<sup>4</sup> Kim, Seok-Nam

#### Abstract

During the construction of circular underground pipe, the non-proper compaction along the pipe and the decrease of compaction efficiency have been the main problems to induce the failure of underground pipe or facility. The use of CLSM (controlled low strength materials) should be one of the possible applications to overcome those problems. In this research, the small-scaled model test and the numeric analysis using PENTAGON-3D FEM program were carried out for three different cases on the change of backfill materials, including the common sand, the soil from construction site, and the CLSM. From the model test in the lab, it was found out that the use of CLSM as backfill materials reduced the vertical and lateral deformation of the pipe, as well as the deformation of the ground surface. The main reason for reducing the deformation would be the characteristics of the CLSM, especially self-leveling and self-hardening properties. The measured earth pressure at the surround of the corrugated pipe using the CLSM backfills was smaller than those in the other cases, and the absolute value was almost zero. Judging from the small-scaled model test and FEM analysis, the use of CLSM as backfill materials should be one of the best choices reducing the failure of the underground pipes.

#### 요 지

내원형지하매설관의 경우 관의 하단부의 다짐이 매우 어렵고, 또한 다짐효율이 떨어져서 지하매설물의 안정을 저감시키고, 이로 인해 각종 파손이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 하나의 대안으로 저장도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 유동성 채움재를 이용하는 것이다. 본 연구에서는 같은 조건에서 뒤채움재(일반모래, 방식사 CLSM, 현장발생토사 CLSM)의 종류를 변화시킨 3가지 사례에 대한 실내모형실험과 PENTAGON-3D 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 실내모형실험과 수치해석을 실시한 결과 뒤채움재로 유동성 채움재를 사용하는 경우에 일반모래를 사용한 경우보다 관의 수직·수평변위 및 지표면변위를 감소시키는 것으로 평가되었다. 이는 유동성 채움재의 특징 중 초기 유동성과 자기강도발현특성에 의해 양생이 진행됨에 따라 파형강관 주변의 유동성 채움재가 굳어 강성화되고, 이것이 파형강관과의 일체화를 통한, 파형강관의 단면 강도를 증진시켜준 효과로 해석할 수 있다. 그리고 뒤채움재의 종류에 따른 파형강관의 토압특성은 뒤채움재로 일반 모래를 대체하여 유동성 채움재를 사용한 경우에 관에 작용하는 수직·수평토압이 거의 0에 가까운 값으로 현저히 작아짐을 알 수 있었다. 이는 실내모형실험과 수치해석결과로부터 뒤채움재로 유동성 채움재를 사용하는 것이 지하매설관에 발생하는 각종 파손을 감소시키고, 안정성을 높이는 최선의 대안으로 판단된다.

**Keywords :** Backfill materials, CLSM, Numeric analysis, Small - scaled model test, Underground pipe or facility

1 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungshu Univ.)

2 정희원, 경성대학교 건설·환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungshu Univ., khlee@ksu.ac.kr)

3 정희원, 동의공업대학 토목과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng. Dongguk Coll.)

4 정희원, 한국토지공사, 공학박사 (Member, Ph.D., Korea Land Corporation)

# 1. 서론

도로하부 지하매설물은 주로 정부에서 관리하는 중요한 토목구조물로서, 주로 상하수도관, 각종통신선로, 도시가스관 등이 있고, 이외에도 고속도로변의 배수관거 등이 있다. 이러한 지하매설물의 설치과정은 기존의 도로 또는 지반을 굴착한 후 굴착면을 정리하고, 콘크리트 또는 모래를 이용하여 베딩재(bedding materials)를 설치하고, 이 위에 지하매설물을 설치한다. 지하매설물 설치가 끝나면 굴착된 나머지 부분에 모래 또는 토사를 이용하여 뒤채움을 실시한다. 이러한 시공과정에서 베딩면과 뒤채움재의 적절한 다짐정도가 필요하고, 이것이 지하매설물의 안정성에 있어서 절대적인 역할을 한다. 그러나 기존에 시공법의 경우 특히 원형 지하 매설관의 경우 관의 하단부의 다짐이 매우 어렵고, 또한 다짐효율이 떨어져서 지하매설물의 안정성을 저감시키고, 이로 인해 각종 파손이 발생한다(Young & Trott, 1984). 지하매설물의 파손은 그 특성상 공공의 이익을 해치는 것으로, 특히 시민의 기본생활을 침해할 수 있으므로 이의 시공 및 유지관리에 많은 관심을 가져야 할 필요가 있다. 이러한 지하매설물의 시공 및 유지관리상에서 발생하는 많은 문제점을 해결할 수 있는 방법 중의 하나가 유동성 채움재(Controlled Low Strength Materials, CLSM)를 이용하는 것이다. 유동성 채움재(CLSM)는 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 것으로, 비수축 채움재(unshrinkage fill), 강도조절 채움재(controlled strength fill), 유동성 모르타르(flowable mortar), K-Krete 등으로 불린다(이관호 등, 2002; 조재윤, 2000; 조성민 등, 2002; Lee et al., 2001; Naik and Sight, 1997; Peindle et al., 1992; Rogers, 1988). 이의 대표적인 특성은 초기 유동성(self-leveling), 자기다짐(self-compacting), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절, 시공 후 재굴착이 용이, 시공단계를 줄여 시공비 절감이 가능하다는 것이다. 이러한 다양한 특성을 가진 유동성 채움재(CLSM)는 기존의 뒤채움재 사용시 발생하는 부적절한 다짐(과다짐 또는 빈다짐)으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수 있다.

이에 본 연구에서는 지하매설물 설계에 적용되고 있는 기존의 토압 및 변형이론에 의한 예측값, 같은 조건에서 뒤채움재의 종류를 변화시킨 3가지 사례에 대해서 실내모형 실험을 실시한 계측 결과값, 상용 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 이용한 사례별 수치

해석 결과값을 상호 비교 검토하였다. 이를 통하여 유동성 채움재(CLSM)를 대체 뒤채움재로 적용하기 위한 도로하부 지하매설물용 뒤채움재 및 매설관의 변형거동 특성을 규명하는 것이 본 연구의 최종 목적이다.

# 2. 지중 매설관에 작용하는 토압 및 변형이론

## 2.1 Marston-Spangler 토압이론

지하매설관에 작용하는 수직토압은 암거의 설치조건에 따라서 상당히 변하게 되므로 설계자들은 일반적으로 터널식, 고랑식, 제방식 암거 등으로 구별하여 각각에 대하여 약간씩 다른 방법으로 수직하중을 산정하게 된다. 이들은 모두 지하매설관 상단에 작용하는 전체 사하중에 근거를 둔 것이다. 그림 1과 같은 단위길이의 도랑형 매설관의 한 단면에서 굴착면에서 지표면하 깊이에 위치한 두께의 뒤채움재 수평요소의 상하방향 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$q B_d + dq B_d + 2\mu K q dh = q B_d + \gamma B_d dh$$

여기서,

$q B_d$  : 요소의 상부에 작용하는 하향 연직력

$q B_d + dq B_d$ : 요소의 저면에 작용하는 상향 연직력

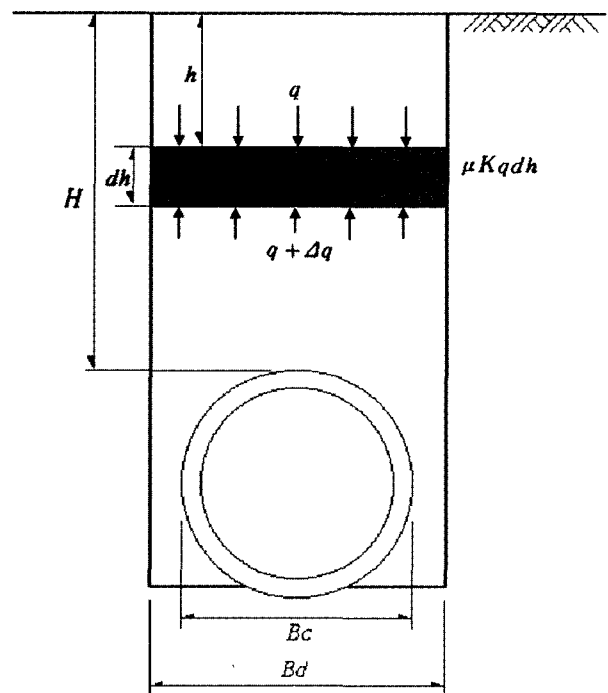


그림 1. 도랑형 매설관에 작용하는 토압(Spangler, 1951)

$\gamma B_d dh$  : 요소의 중량(하향)  
 $K q dh$  : 요소의 각 측면에 작용하는 수평력  
 $\mu K q dh$  : 요소의 각 측면에 작용하는 마찰력(상향)

매설관의 정부에 맞닿은 수평면 위의 연직응력은

$$q = C_d \gamma B_d$$

$$C_d = \frac{1 - e^{-\frac{2K\mu H}{B_d}}}{2K\mu}$$

따라서, 강성관인 경우의 연직력은

$$W_c = C_d \gamma B_d^2$$

여기서,  $W_c$ 는 압거 단위길이당 압거 상부의 전체 사하중,  $\gamma$ 는 압거 상부에 위치한 흙의 단위중량,  $B_d$ 는 압거 상단부에서의 고랑폭,  $C_d$ 는 흙의 마찰각, 고랑폭에 대한 깊이의 비, 고랑 측부 경사각, 베딩상태 등에 영향을 받는 하중전달계수이다. 그리고 연성관(파형강관(corrugated pipe), PVC관)의 경우 매설관에 작용하는 토압은 매설관과 흙의 상대적인 강성에 의해 변화한다. 관이 강성인 경우에는 굴착폭의 연직응력을 모두 다 받으나, 연성인 경우에는 흙과 관의 상호작용에 의해 관의 외경만큼의 연직응력이 작용한다고 본다.

따라서, 연성관인 경우의 연직응력과 연직력은

$$q = C_d \gamma B_c$$

$$W_F = C_d \gamma B_c^2$$

여기서,  $B_c$ 는 압거의 수평폭이다.

## 2.2 토압에 의한 관의 변형에 관한이론(Spangler의 방법)

토압에 의한 연성관의 수평변형은 아래에 나타나 있는 Lowa의 변형공식에 의해서 구한다.

$$\Delta X = \frac{\gamma_B \gamma_T W_c R^4}{EI + 0.061 k R^3}$$

여기서,

$\Delta X$  : 압거의 수평방향 변위 혹은 압거 직경의 변화(cm)

$\gamma_B$  : 베딩계수(일반적으로 연성압거의 경우, 설치시 베딩계수( $\gamma_B=0.1$ ))

$\gamma_T$  : 시간에 따른 흙의 체적변화를 반영한 체짐지체 계수( $\gamma_T=1.5$ )

$W_c$  : 단위 길이당 압거 하중(kgf/cm)

$R$  : 압거 평균 반경(cm)

$E$  : 압거 재료의 탄성계수(kgf/cm<sup>2</sup>)

$I$  : 압거의 관성모멘트(cm<sup>4</sup>/cm)

$k$  : 압거양단의 수동저항계수(kgf/cm<sup>3</sup>)

## 3. 실내모형실험

### 3.1 실험재료의 물성

#### (1) 시료

본 실험에 사용된 일반모래의 기본특성은 최소건조단위중량( $\gamma_{dmin}$ ) 1.33 t/m<sup>3</sup>, 최대건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ ) 1.47 t/m<sup>3</sup>, 조립률 2.88, 균등계수(Cu) 2.37, 곡률계수(Cg) 0.78, 비중 2.556으로 통일분류법상 입도분포가 나쁜 모래 또는 자갈질의 모래인 SP 판명되었다. 뒤채움재로 사용한 현장발생토사는 한국토지공사 “양산·물금지구 택지개발사업” 현장에 넓게 분포되어있는 시료로 기본특성은 현장 자연함수비 14.06%, 조립률 2.84, 균등계수(Cu) 7.29, 곡률계수(Cg) 1.70, 비중 2.565로 통일분류법상 입도분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래인 SW로 판명되었다. 그림 2는 일반모래 및 현장발생토사의 입도분포곡선이다.

베딩재로는 일반모래를 사용하였으며, 모형토조 바닥면에서 15cm성토하였다.

#### (2) 뒤채움재

본 연구에 사용된 뒤채움재로는 일반모래와 유동성 채움재(CLSM)를 사용하였다. 일반모래 뒤채움재의 경우는 베딩재와 기본특성이 동일한 시료를 사용하였으며, 유동성 채움재(CLSM)의 뒤채움인 경우는 표 1에 나

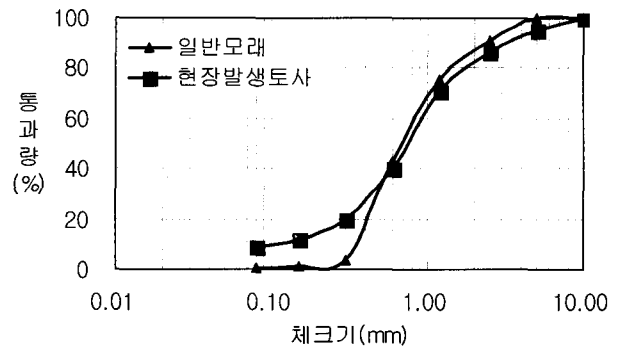


그림 2. 입도분포곡선

표 1. 실험재료의 배합비 (%)

재료별	시료	플라이애쉬	물	시멘트
방식사CLSM	45.71	28.97	23.81	1.50
현장발생토사CLSM	54.02	19.89	22.84	3.24

표 2. 실험재료의 일축압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)

재료별	양생시간	1일양생	7일양생
방식사CLSM		1.78	4.33
현장발생토사CLSM		1.24	2.43

표 3. 실험재료의 기본물성치 (C,  $\phi$ )

재료별	양생시간	1일양생		7일양생	
		C(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	C(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
방식사CLSM		0.25	13.97	0.73	27.33
현장발생토사CLSM		0.50	11.61	0.95	12.61

타난 실험재료의 배합비와 같이 방식사와 현장발생토사에 플라이애쉬와 물, 1.5~3.24%정도 소량의 시멘트를 혼합하여 사용하였다. 아래에 나타난 표 2와 표 3은 유동성채움재(CLSM)의 양생일(1, 7일)별 일축압축강도와 기본물성치(C,  $\phi$ )를 나타내고 있다.

(3) 파형강관의 물성

본 연구에 사용된 파형강관은 원형 1S형의 직경 300mm, 두께 2.0mm를 선택하였으며, 탄성계수는  $2.1 \times 10^7 \text{tonf/m}^3$ , 단위중량은  $7.85 \text{tonf/m}^3$ 이다.

3.2 실험장치

실험장치는 모형토조 및 재하장치, 계측센서 및 장비로 구성되었다.

(1) 모형토조 및 재하장치

실내모형 실험에 사용된 모형토조의 크기는 가로 140cm, 세로 60cm, 높이 90cm의 강재로 제작하였으며, 관의 직경을 변화시켜 실험할 수 있도록 그림 3과 같이 제작되었다. 실험조건을 단순화하기 위해 벽면마찰의 영향을 최소화할 수 있도록 모형 토조 표면에 페인트를 설치하여 매끈하게 하였다. 모형토조 상부에 직경 30cm의 원형판을 중앙부에 설치하고, 그림 4에 보이는 로드셀과 하중 재하장치를 이용하여 정하중을 재하하였다.

(2) 계측센서 및 계측장비

관의 내공변위(수직·수평변위)측정을 위하여 변위계를 사용하였으며, 이 변위계는 PI-5-100 이었다. 관의 수직·수평에 걸리는 토압을 측정하기 위하여 KDC-200KPA 토압계를 사용하였다. 관의 횡단·종단방향의 변형특성을

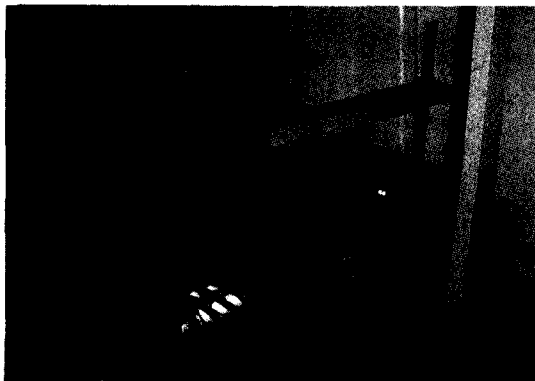


그림 3. 실내모형 실험장치

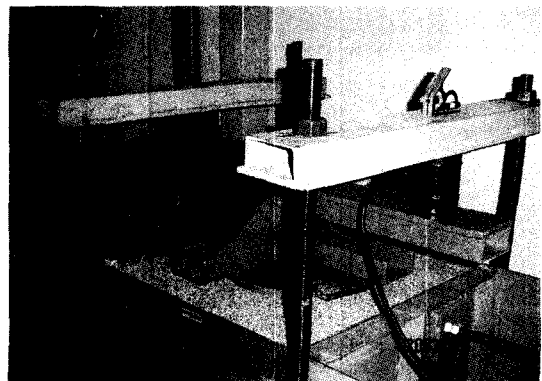


그림 4. 하중재하장치

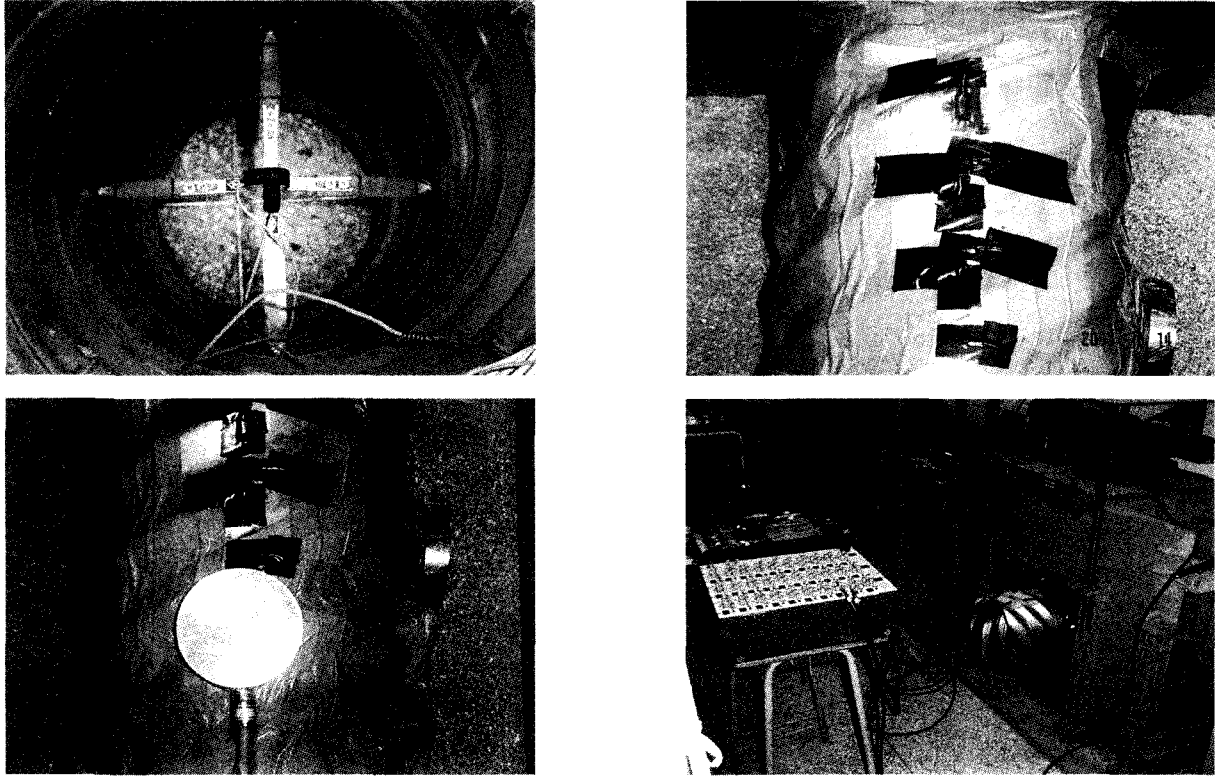


그림 5. 설치된 계측센서 및 자동계측장비

알기 위하여 스틸용(WFLA-3-11-1L) 변형률 게이지를 사용하였다. 또한, 하중재하를 위하여 CCDM-30000 제품을 사용하였다. 위에서 언급한 계측기를 이용한 측정을 위해 정적변형시스템(Static data logger)을 사용하였으며, 이는 그림 5와 같이 TDS-302, 스위치박스로 각각 10개와 50개의 채널로 구성되었다.

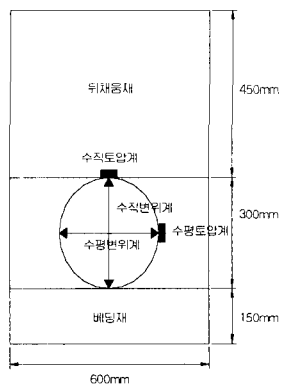
### (3) 계측기 설치단면

아래에 있는 그림 6은 본 연구에 사용된 계측기의 설

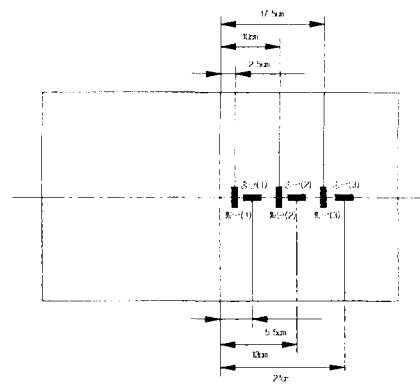
치단면을 나타내고 있다.

### 3.3 실내모형 실험단면의 조건

실험은 표 4에 나타난 것과 같이, 실내모형 실험에서 고려해 볼 수 있는 여러 가변 조건 중 뒤채움재의 종류를 변화시키는 3가지 사례에 대해서 제작된 모형토조를 이용하여 실내모형 실험을 실시하였다.



수직·수평 변위계, 수직·수평토압계



횡단·종단 변형률 게이지

그림 6. 계측기 설치단면

표 4. 실내모형 실험단면의 조건(3가지사례)

사례	베딩재	관종류	뒤채움재
1	일반모래	파형강관	일반모래
2	일반모래	파형강관	방식사
3	일반모래	파형강관	현장발생토사

### 3.4 실험절차

실험조건을 단순화하기 위해 벽면마찰의 영향을 최소화할 수 있도록 모형토조 표면에 페인트를 칠하고, 매끈하게 아스테이지를 부착하였다. 베딩재를 조성하기 위하여 1층에 일반모래 25kg를 채운 후 자체 제작된 다짐롤러를 이용하여 100회 다짐을 3층 실시하였다. 베딩재위에 파형강관을 설치하고, 수직·수평 변위계와 횡단·종단방향 변형률 게이지를 관의 내·외부에 부착하였다. 중간층을 조성하기 위하여 일반모래를 15cm 채운 후 몸무게 80kg인 사람을 기준으로 50회 발다짐을 2층 실시하였다. 발다짐을 1층 실시 후 변위계, 토압계 및 변형률 게이지를 TDS - 302와 스위치박스에 연결하였다. 상부층을 조성하기 위하여 1층에 일반모래 60kg를 채운 후 자체 제작된 다짐롤러를 이용하여 60회 다짐을 4층 실시하였다. 하중재하는 뒤채움재의 종류에 따라 다르게 적용하였다. 일반모래의 경우 타설직 후, 유동성 채움재(CLSM)는 타설 후 7일 양생기간을 거친 후에 하중재하와 하중제하 과정을 2회 반복 실시하였다. 하중재하 과정은 300, 600, 900kgf 씩으로 하중을 증가시킨 후 1분 정도의 안정화를 실시하고, 재하가 가능한 최고치까지 하중재하 후 2분 정도의 안정화를 실시하였다. 그리고 하중제하 과정은 최고치 하중의 반을 재하 후 1분 정도의 안정화 실시하고, 하중을 완전하게 제거 후 2분간의 안정화를 실시하였다.

표 5. 하중에 따른 수직변위

사례	실험값(mm)			유한요소해석값(mm)	비고
1	0.12			0.21	차량하중 재하 전
2	0.37			0.21	
3	0.18			0.22	

사례	실험값(mm)			유한요소해석값(mm)	비고
	①	②	평균		
1	2.97	3.39	3.18	0.90	차량하중 재하 후
2	0.49	0.73	0.61	0.72	
3	0.28	0.35	0.32	0.81	

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 하중에 따른 변위 특성 평가

#### 4.1.1 수직변위

표 5는 하중에 따른 관의 수직변위를 실험값과 유한요소 해석값을 비교 검토하였다. 또한 사례별로 차량하중 재하 전·후의 수직변위의 변화양상도 나타내었다. 차량하중 재하 전 하중에 따른 수직 변위의 실험값은 사례 1과 같은 조건에서 뒤채움재의 종류를 달리 이용한 경우 사례 1에 비해 사례 2와는 0.25mm, 사례 3과는 0.06mm정도의 차이를 보였으나, 유한요소해석에 의한 수직변위값은 사례 2와 사례 3의 경우 사례 1의 경우와 같은 수준으로 나타났다. 또한 차량하중을 재하 한 경우 실험값에 의한 수직변위는 사례 2는 사례 1경우의 19%, 사례 3은 10%정도 수준으로 나타났으며, 유한요소 해석값은 사례 2는 사례 1경우의 80%, 사례 3은 90%정도의 수준인 것으로 나타났다. 사용한 유동성 채움재(CLSM)종류 중 사례 2와 사례 3을 비교하여 본 결과 방식사를 이용한 유동성 채움재(CLSM)의 수직변위가 현장발생토사를 이용한 유동성 채움재(CLSM)경우보다 크게 나타났다. 이는 방식사와 현장발생토사를 사용하여 배합·타설 후 일정기간 양생하는 동안 방식사는 표면화학처리에 의하여 플라이애쉬, 물, 시멘트와의 결합상태가 양호한 반면에 현장발생토사는 플라이애쉬, 물, 시멘트와의 결합상태가 불량하여 양생이 됨에 따라 물이 배수될 때 혼합된 다른 재료가 같이 배출됨에 따른 단위중량감소에 의한 것으로 판단된다.

#### 4.1.2 수평변위

표 6은 하중에 따른 관의 수평변위를 이론값(토압이론, Marston), 실험값, 유한요소해석값을 비교 검토하

표 6. 하중에 따른 수평변위

사례	이론값( $\Delta X$ )(mm)		실험값(mm)	유한요소해석값(mm)	비고
	토압이론	Marston			
1	0.12	0.05	0.07	0.06	차량하중 재하 전
2	0.12	0.06	0.08	0.05	
3	0.12	0.06	0.22	0.06	

사례	이론값( $\Delta X$ )(mm)		실험값(mm)			유한요소해석값(mm)	비고
	토압이론	Marston	①	②	평균		
1	0.90	0.83	1.69	2.05	1.87	0.35	차량하중 재하 후
2	0.76	0.69	0.13	0.27	0.20	0.26	
3	0.76	0.69	0.26	0.33	0.30	0.31	

였다. 이론값에서 토압이론값은 Rankine의 토압이론과 Boussinesq이론에 의해서 구해진 토압을 적용하였으며, Marston값은 Marston토압이론과 Boussinesq이론에 의해서 구해진 토압을 이용하여 수평변위를 구하였다. 그 결과 차량하중 재하 전 하중에 따른 수평변위값은 사례 1과 같은 조건에서 뒤채움재의 종류를 달리 이용한 경우 사례 1의 경우와 이론값, 실험값, 유한요소해석값이 같은 수준으로 나타났다. 차량하중을 재하 한 경우 이론값은 사례 2와 사례 3은 84%정도 수준이었고, 실험값에 의한 수평변위는 사례 2는 사례 1경우의 11%, 사례 3은 16%정도의 수준이었으며, 유한요소해석에 의한 수평변위는 사례 1경우의 사례 2는 74%, 사례 3은 89%정도 수준으로 나타났다. 이론값, 실험값, 유한요소값을 사례 별로 비교 검토하여본 결과 사례 1의 경우는 실험값이 이론값, 유한요소값에 비해서 다소 크게 나타났으며, 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 사례 2와 사례 3의 경우는 약간의 차이는 보이나 거의 같은 수준의 값을 나타내고 있다. 사례 1에서 실험값이 다소 크게 나온 이유는 실내모형실험시 벽면마찰을 고려하지 않은데서 나타난 결과로 판단할 수 있으며, 같은 조건에서 단지 뒤채움재

의 종류를 일반모래에서 유동성 채움재(CLSM)로 대체한 경우 수평변위값이 감소한 이유는 유동성 채움재(CLSM)의 특징 중 자기강도발현특성에 의해 양생이 진행됨에 따라 파형강관 주변의 유동성 채움재(CLSM)의 재료가 굳어 강성화되고, 이것이 파형강관과의 일체화를 통한, 파형강관의 단면강도를 증진시켜준 효과에 의한 것으로 해석할 수 있다.

#### 4.2 하중에 따른 토압 특성 평가

##### 4.2.1 수직토압

연성 관거의 토압은 수직토압의 경우, 관거 주변 아칭 효과의 발생 형태 및 크기, 영향 정도에 따라 그 크기가 결정되고 수평토압의 경우, 관의 압축에 따른 관거의 수평방향 변형 증가로 인한수동토압의 발현 정도에 좌우되는것이 일반적이다. 본 연구에서는 뒤채움재의 종류에 따른 파형강관의 토압 특성을 분석하였다. 표 7은 하중에 따른 수직토압을 나타내고 있다. 차량하중 재하 전 뒤채움재의 종류에 따른 실험값은 사례 1의 경우와 비교하여 본 결과 사례 2는 38%정도의 수준인 것으로 나

표 7. 하중에 따른 수직토압

사례	이론값(kgf/cm <sup>2</sup> )		실험값(kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
	토압이론	Marston		
1	0.07	0.03	0.008	차량하중 재하 전
2	0.08	0.04	0.003	
3	0.08	0.04	0.010	

사례	이론값(kgf/cm <sup>2</sup> )		실험값(kgf/cm <sup>2</sup> )			비고
	토압이론	Marston	①	②	평균	
1	0.50	0.46	0.174	0.189	0.182	차량하중 재하 후
2	0.51	0.47	0.005	0.011	0.008	
3	0.51	0.47	0.015	0.016	0.016	

타났고, 사례 3은 20%정도 크게 나타났다. 그리고 실험값이 이론값에 비해서 4~13%정도 작게 나타남을 알 수 있다.

차량하중 재하 후 뒤채움재의 종류에 따른 실험값은 사례 2는 사례 1의 4%, 사례 3은 9%정도의 수준이었다. 또한 일반모래 뒤채움인 경우 이론값에 비해서 실험값이 36~40%정도 작게 나타났으며, 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우는 실험값이 이론값의 4~25% 정도 수준인 것으로 나타났다. 이는 사례 1의 경우 하중에 따른 일반모래 작은 입자 하나 하나가 토압계에 작용하는 반면에 사례 2와 사례 3은 유동성 채움재(CLSM)의 강도특성과 상당한 관계가 있는 것으로 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고, 강도가 발현된 유동성 뒤채움재(CLSM)가 하나의 암반(rock mass)과 같은 거동 특성을 가진 형태로 토압계에 작용하여 현저하게 토압이 감소한 것으로 해석된다.

#### 4.2.2 수평토압

표 8은 하중에 따른 수평토압을 나타내고 있다. 차량하중 재하 전 실험값은 사례 1경우의 사례 2는 75%정도, 사례 3은 38%정도의 수준으로 나타났으며, 이론값과 실험값은 다소 토압값의 차이는 보이나 같은 수준의 양상을 나타내고 있다. 차량하중 재하 후 실험값은 유동성 채움재(CLSM)를 뒤채움재로 사용하였을 때 일반모래를 사용한 경우의 12~15%정도의 수준으로 나타났고, 이론값에 비해 실험값은 3~50%정도 수준이었다.

이는 유동성 채움재(CLSM)의 재료적인 특성인 일정시간 양생이 진행되는 과정에서 자기강도가 발현된 유동성 채움재(CLSM)가 암반과 같은 거동특성으로 인한 것과 유동성 채움재(CLSM)의 배합·타설 후 물과 다른재료와의 결합상태 불량으로 시간에 따른 양생이 진행됨에 따라 기존에 가지고 있던 유동성 채움재(CLSM)의 고유의 단위중량이 배합된 재료가 물에 의해서 배출됨에 따른 감소로 해석할 수 있다.

### 5. 수치해석 및 결과분석

#### 5.1 수치해석사례

본 연구에서는 표 9에 나타난 것과 같이, 수치해석은 고려해 볼 수 있는 여러 가변조건 중 뒤채움재의 종류를 변화시키는 3가지 사례에 대해서 유한요소프로그램인 PENTAGON-3D(에메랄드 소프트, 1998)를 이용하여 해석을 수행하였다. 그림 7은 수치해석에 사용된 유한요소망 및 수치해석단면의 물성치 분포도이다. 본 연구의 수치해석에서는 원지반은 탄소성모델(Mohr-Coulomb)을 적용하였고, 나머지는 선형탄성모델을 적용하였다. 수치해석에 이용된 해석단면의 설계정수(표 11)는 실제 실험을 통해 결정된 값이다.

본 연구에서 적용한 3차원 유한요소 해석프로그램인 Pentagon-3D에서 원지반, 베딩재, 뒤채움재는 4절점 솔리드 요소로 모델링하였으며, 파형강관은 4절점 셸

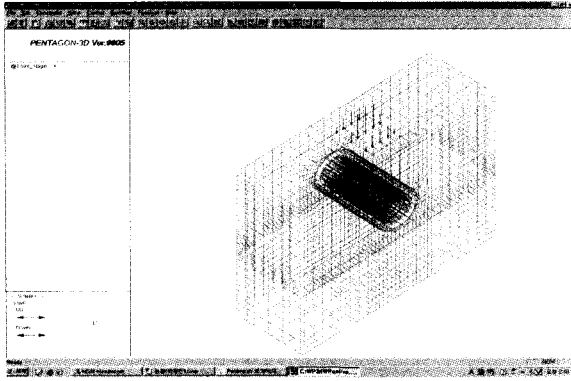
표 8. 하중에 따른 수평토압

사례	이론값(kgf/cm <sup>2</sup> )	실험값(kgf/cm <sup>2</sup> )	비고		
1	0.03	0.008	차량하중 재하 전		
2	0.04	0.006			
3	0.07	0.003			
사례	이론값(kgf/cm <sup>2</sup> )	실험값(kgf/cm <sup>2</sup> )			비고
		①	②	평균	
1	0.104	0.048	0.056	0.052	차량하중 재하 후
2	0.123	0.007	0.008	0.008	
3	0.213	0.006	0.006	0.006	

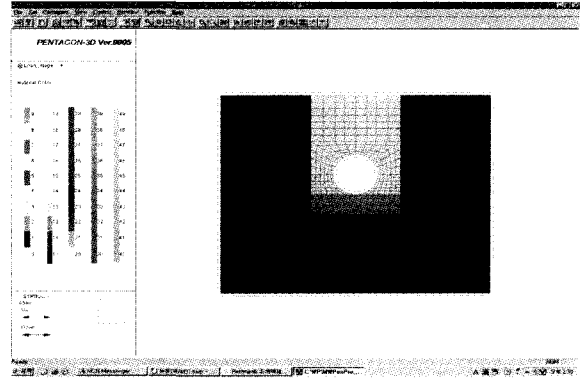
표 9. 수치해석단면의 조건 (3가지 사례)

사례	베딩재	관종류	뒤채움재
1	일반모래	파형강관	일반모래
2	일반모래	파형강관	방식사
3	일반모래	파형강관	현장발생토사





수치해석에 사용된 유한요소망



수치해석단면의 물성치 분포도

그림 7. 수치해석에 사용된 유한요소망 및 수치해석단면의 물성치 분포도

표 10. 수치해석단면의 설계정수

Description	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	E (t/m <sup>2</sup> )	$K_0$	$\nu$	비고
원지반	1.90	1.5	35	7000	0.43	0.3	
일반모래	1.50	-	30	1760	0.43	0.3	베딩재
일반모래	1.50	-	30	1000	0.43	0.3	뒤채 움재
방식사 CLSM	1.80	7.3	27.33	3026	0.026	0.3	
현장발생토사 CLSM	1.80	9.5	12.61	1737	0.026	0.3	

요소로 모델링 하였다. 쉘 요소는 파형강관의 종방향으로의 파형을 모델링 할 수 없으므로, 파형강관의 파형을 고려한 환산단면의 적용이 필수적이다(육정훈, 2002, 박응호, 2002). 이를 위해서 본 연구에서는 Moore & Brachman(1994)에 의해 제시되어진 파형강관의 단면 환산방법을 적용하였다. 이 방법은 단면의 휨강성(EI)과 축강성(EA)을 동시에 고려하여 유한요소해석에서의 쉘 요소의 두께(t)와 탄성계수(E)를 수정하는 방법으로 그 산출식은 다음과 같으며, 이 식에 의해 3차원 유한요소 모델에 실제 적용된 파형강관의 환산물성은 아래에 있는 표 11과 같다.

$$t' = \sqrt{\frac{12I}{A}} \quad E' = \frac{12EI}{t'^3}$$

여기서,

표 11. 실제 파형강관의 물성과 3차원 유한요소 해석상 사용된 환산 물성

관직경	구분	물성	실제관	환산시
	ø300		탄성계수(t/m <sup>2</sup> )	21,000,000
		두께(m)	0.002	0.0152

- $t'$  : 환산된 유한요소 해석상 쉘 요소의 두께
- $E'$  : 환산된 유한요소 해석상 쉘요소의 탄성계수
- $I$  : 실제 파형강관의 단면 2차모멘트
- $A$  : 실제 파형강관의 단면적
- $E$  : 실제 파형강관의 탄성계수

본 연구에서 적용시킨 3차원 유한요소 해석 프로그램인 Pentagon-3D에서 해석상 적용시킨 시공과정에 따른 모델링은 초기단계(원지반), 시공 1단계(터파기), 시공 2단계(관이 놓일 위치의 베딩재 성토 및 관의 설치), 시공 3단계(산정된 토피고까지 단계별 성토), 시공 4단계(정하중 재하)로 구성하였다.

## 5.2 수치해석 결과 및 분석

Pentagon-3D 유한요소프로그램을 이용하여 해석한 해석사례별 관변위 및 지표면변위는 표 12에 나타난 것과 같다. 해석에서 기준이 되는 사례는 사례 1로, 베딩재와 뒤채움재로 일반모래를 이용하고, 관의 종류로 파형강관을 이용한 것이다. 이 경우 차량하중 재하 전의 경우 관변위는 0.21mm이고, 지표면변위는 0.21mm이었으며, 차량하중을 재하 후의 경우 관변위는 0.90mm이고, 지

표 12. 해석사례별 지표면변위 및 관변위

사례	베딩재	관종류	뒤채움재	관변위(mm)	지표면변위(mm)	비고
1	일반모래	파형강관	일반모래	0.21	0.21	차량하중 재하 전
2	일반모래	파형강관	방식사	0.21	0.21	
3	일반모래	파형강관	현장발생토사	0.22	0.22	
1	일반모래	파형강관	일반모래	0.90	7.16	차량하중 재하 후
2	일반모래	파형강관	방식사	0.72	2.71	
3	일반모래	파형강관	현장발생토사	0.81	4.37	

표 13. 해석사례별 관자체의 주요부위에서의 변형량(mm)

사례	Crown	Shoulder	Springings	Haunch	Invert	비고
1	0.21	0.20	0.19	0.18	0.15	차량하중 재하 전
2	0.21	0.19	0.18	0.17	0.15	
3	0.22	0.20	0.19	0.18	0.16	
1	0.90	0.77	0.71	0.65	0.54	차량하중 재하 후
2	0.72	0.63	0.58	0.54	0.46	
3	0.81	0.70	0.64	0.59	0.50	

표면변위는 7.16mm이다. 사례 1과 같은 조건에서 단지 뒤채움재를 유동성 채움재(CLSM)종류를 달리 이용한 경우 차량하중을 재하 하기 전의 관변위와 지표면변위는 사례 1의 경우와 같은 수준으로 나타났고, 차량하중을 재하한 경우 지표면의 변위는 사례 2는 사례 1경우의 38%, 사례 3은 61%정도 수준으로 나타났고, 관변형은 사례 2는 80%, 사례 3은 90%정도의 수준인 것으로 나타났다. 이는 파형강관 시공시 유동성 채움재(CLSM)를 뒤채움재로 이용하면 유동성 채움재(CLSM)재료의 특징중 자기강도 발현특성에 의해, 양생이 됨에 따라 파형강관 주변의 유동성 채움재(CLSM)재료가 굳어 강성화되고, 이것이 파형강관과의 일체화를 통한, 파형강관의 단면강도를 증진시켜준 효과로 해석할 수 있다. 사용한 유동성 채움재(CLSM)의 종류중에서는 방식사와 현장발생토사를 비교검토해 본 결과 방식사를 이용한 유동성 채움재(CLSM) 재료의 특성이 지표면의 변위 및 관 변형을 최소화할 수 있는 것으로 나타났다.

표 13은 해석사례별 관자체의 주요부위에서의 변형량을 나타낸 것이다. 파형강관의 경우 천단부와 저부에서의 발생 변형량의 차이가 차량하중을 재하하지 않은 경우 0.06mm정도인 것으로 나타났고, 차량하중을 재하한 경우는 0.26~0.36mm 정도의 차이를 보였다. 그리고 관의 주요절점에 대한 변형량을 비교 검토하여 본 결과 관의 천단부에서 가장 큰 변형량이 나타났으며, 관의 저부로 내려갈수록 변위값이 작아짐을 알 수 있었다. 또한 뒤채움재로 유동성 채움재(CLSM)를 사용한

경우가 일반모래를 사용한 경우보다 주요절점의 변형량이 작게 나왔으며, 사용한 유동성 채움재(CLSM)의 종류에 따라 사례 2와 사례 3을 비교하여 본 결과 방식사를 이용한 경우가 현장발생토사를 사용한 경우보다 주요절점의 변형량이 작게 나왔다. 뒤채움재의 종류에 따른 관의 주요부위에서의 변형특성은 사용한 유동성 채움재(CLSM)의 종류 및 유동성 채움재(CLSM)의 강도특성과 상당한 관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고, 강도가 발현된 유동성 채움재(CLSM)가 하나의 암반(Rock Mass)과 같은 거동특성을 나타내는 것을 의미한다.

## 6. 결론 및 향후 연구방향

본 논문은 도로하부 지하매설물용 유동성 채움재(CLSM)를 적용한 지하매설물의 거동을 파악하기 위하여 원형 지하 매설관에 대한 실내모형실험을 수행하였다. 같은 조건에서 뒤채움재의 종류에 따른 관의 수직·수평변위, 횡단·종단변형률, 관의 수직·수평토압의 비교검토로부터 유동성 채움재(CLSM)를 이용한 지하매설관의 변형특성을 연구하였다. 그리고 상용 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 사용하여 도로하부 지하매설물용 유동성 채움재(CLSM)를 적용한 지하매설물의 수치해석을 수행하여 실내모형실험에서 확인된 뒤채움재에 따른 관의 변위, 지표면의 변위 및 관의 천

단·하부에서의 변위와 주요 절점 변위를 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내모형실험과 수치해석을 실시한 결과 뒤채움재로 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우에 일반모래를 사용한 경우보다 관의 수직·수평변위 및 지표면변위를 감소시키는 것으로 해석되었다. 이는 유동성 채움재(CLSM)의 특징중 자기수평능력과 자기강도발현특성에 의해 양생이 진행됨에 따라 파형강관 주변의 유동성 채움재(CLSM)가 굳어 강성화되고, 이것이 파형강관과의 일체화를 통한, 파형강관의 단면강도를 증진시켜준 효과로 해석할 수 있다.
- (2) 뒤채움재의 종류에 따른 파형강관의 수직·수평토압특성은 뒤채움재로 일반모래를 대체하여 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우에 관에 작용하는 수직·수평토압이 거의 0에 가까운 값으로 현저히 작아짐을 알 수 있었다. 이는 실내모형실험과 수치해석결과로부터 뒤채움재로 유동성 채움재(CLSM)를 사용하는 것이 지하매설관에 발생하는 각종 파손을 감소시키고, 안정성을 높이는 최선의 대안으로 판단된다.
- (3) 수치해석결과로부터 관의 주요부위에서의 변형특성은 관의 천단부에서 가장 큰 변형량이 나타났으며, 관의 저부로 내려갈수록 변위값이 작아짐을 알 수 있었다. 또한 뒤채움재로 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우가 일반모래를 사용한 경우보다 주요절점의 변형량이 작게 나왔으며, 사용한 유동성 채움재(CLSM)의 종류에 따라 방식사를 이용한 경우가 현장발생토사를 사용한 경우보다 주요절점의 변형량이 작게 나왔다. 이는 유동성 채움재(CLSM)의 종류 및 강도특성과 상당한 관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고, 강도가 발현된 유동성 채움재(CLSM)가 하나의 암반(rock mass)과 같은 거동특성을 나타내는 것을 의미한다.
- (4) 본 연구에 이어 현재 실내실험결과와 유한요소해석 결과를 기초로 현장발생토사CLSM경우에 대해서 증차량하중을 이용한 대규모 현장적용성 시험을 계획중에 있으며, 기존의 Marston - Spangler이론을 유동성 채움재(CLSM)와 차량하중 등을 반영할 수 있도록 이론을 수정제안 할 것이다. 또한 기존의 이론을 이용한 값, 실내모형실험결과, 유한요소해석

및 현장시험결과상의 상호비교를 통해 설계에 필요한 설계입력변수를 결정하고, 이를 통한 적절한 설계법을 제시할 것이다. 마지막으로 본 연구의 궁극적인 향후 연구방향은 현재의 강성관 위주의 지하매설관 정책을 연성관으로 대체할 수 있는 공학적 근거제시 및 시방기준을 제시하는데 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2004학년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 연구되었고, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박응호 (2002), "파형강관 지중구조물의 토피고 및 이격거리에 관한 연구", 한양대학교 공학 석사 학위 논문.
2. 이관호, 이인모, 조재운, 윤여준 (1999), "유동성 뒷채움재로 사용하기 위한 플라이애쉬-폐주물사 혼합재료의 특성 연구", 한국지반공학회 1999년도 정기 봄학술발표회, pp.489-496
3. 이관호, 조재운, 조운호 (2002), "폐주물사를 이용한 유동성채움재의 절토구간 옹벽 뒤채움시 사일로 토압 및 토압경감효과 연구", 한국도로포장공학회논문집, 제 4권 2호, 통권 12호, pp.19-32.
4. 육정훈 (2002), "파형강관 지중구조물의 거동특성에 관한 연구", 한양대학교 공학 석사 학위 논문.
5. 정진호 (1998), "금속-폴리에틸렌 복합관의 뒤채움하중에 관한 연구(1)", 대한토목학회지, 제 18권 제 III-5호, pp.609-624.
6. 조성민, 이종구, 김명모 (2002), "실규모 현장시험을 통한 원형 지중강관 구조물의 거동 분석", 대한토목학회논문집, 제 23권 제 1C호, pp.47-58.
7. 조재운 (2000), "폐주물사 혼합재를 이용한 유동성 뒤채움재의 지반공학적 적용성 연구", 공학박사, 고려대학교 토목환경공학과, pp.130
8. 조재운, 이관호, 이인모 (2000), "유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구", 한국지반공학회, Vol.16, No.4, pp.17-30
9. 한국건설기술연구원 (2000), "파형강관의 설계기준 및 시공지침에 관한 연구", pp.29-106.
10. Bulson, P.S. (1985), "Buried Structures (Static and Dynamic Strength)", Chapman and Hall.
11. Lee, K., Cho, J., Rodrigo, S. & Lee, I (2001), "Retaining Wall Model Test with Waste Foundry Sand Mixture Backfill", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol.24, No.4, pp.401-408 (SCI).
12. Naik, T.R. & Singh, S.S. (1997), "Permeability of Flowable Slurry Materials Containing Foundry Sand and Fly Ash", ASCE, Vol.123, No.5, pp.446-452.18.
13. Peindl, R.D., Janardhanam, R., and Burns, F. (1992), "Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill. Part I: Static loading", *Journal of Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.118, No.3, pp.449-463.
14. Spangler, M.G. (1948), "Underground Conduits", Transaction ASCE, Vol.113.
15. Young, O.C. & Trott, J.J. (1984), "Buried Rigid Pipes", Elsevier Applied Science Publishers.

(접수일자 2003. 12. 17, 심사완료일 2004. 4. 13)