



파형강관을 이용한 지하매설물용 뒤채움재 설계 및 시공성 평가

Evaluation of Construction Operation and Design Properties of CLSM for Corrugated Pipe in Underground

이 관 호* 박 재 현**

Lee, Kwan Ho Park, Jae Heon

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 full-scaled field 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 full-scaled test in field, the use of in-situ 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 the smaller than the other cases, and the absolute value was almost zero. Judging from the full-scaled field 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.

Keywords : *underground structure, CLSM, bedding materials, backfill materials, rigid pipe, flexible pipe*

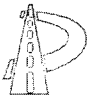
요 지

원형지하매설관의 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 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 유동성 채움재(CLSM)를 이용하는 것이다. 본 연구에서는 같은 조건에서 일반모래 뒤채움재, 방식사를 이용한 유동성뒤채움재 및 현장발생토사를 이용한 유동성 뒤채움재 종류를 변화시킨 3가지 사례에 대한 PENTAGON -3D 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 또한 현장발생토사의 파형강관용 유동성 뒤채움재로서 현장 적용성을 평가하기 위하여 현장실험을 수행하였다. 현장시험 및 해석을 실시한 결과 뒤채움재로 유동성 채움재를 사용하는 경우에 일반모래를 사용한 경우보다 관의 수직·수평변위 및 지표면변위를 감소시키는 것으로 해석되었다. 이는 유동성 채움재의 특징 중 자기수평능력과 자기강도발현특성에 의해 양생이 진행됨에 따라 파형강관 주변의 유동성 채움재가 굳어 강성화되고, 이것이 파형강관의 일체화를 통한, 파형강관의 단면강도를 증진시켜준 효과로 해석할 수 있다. 그리고 뒤채움재의 종류에 따른 파형강관의 토압특성은 뒤채움재로 일반모래를 대체하여 유동성 채움재를 사용한 경우에 관에 작용하는 수직·수평 토압이 거의 0에 가까운 값으로 현저히 작아짐을 알 수 있었다. 이는 현장발생토사 재활용 유동성 뒤채움재를 사용하는 것이 지하매설관에 발생하는 각종 파손을 감소시키고, 안정성을 높이는 하나의 대안으로 판단된다.

핵심용어 : *지하매설물, CLSM, 베딩재, 뒤채움재, 강성관, 연성관*

* 정회원 · 경성대학교 건설 · 환경공학부 · 부교수

** 정회원 · 경성대학교 토목공학과 · 석사



1. 연구배경 및 목적

라이프라인은 인간에게 필요한 각종 생활편의를 제공하고 있지만 지중에 매설되는 각종 관들은 그 위험성이 쉽게 노출되면서 피해가 엄청나게 발생할 수 있다. 또한, 집중강우강도, 빗물의 적절한 배수로 미 확보, 관로의 파손, 연결부의 결함 등으로 인한 피해 사례가 발생하고 있는 실정이다. 이 외에도 현재 국내의 주요 사용 관종인 콘크리트 홉관의 경우 관부식의 문제로 오수관으로는 부적합하다는 인식이 기술자들 사이에서 나오고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 대체관들에 대한 연구들이 진행되어 왔으며, 상당수의 관들이 제품으로 출시되어 현장에서 배급 및 시공되고 있다.

최근에 들어 파형강관, PE관, PVC등의 연성관은 부식에 강할 뿐 아니라 자재의 무게가 경량이어서 시공성이 탁월하다. 이러한 이점 때문에 콘크리트 홉관이 점령하고 있는 하수관 시장은 연성관으로 점차 이동중에 있고, 특히 오수관의 경우는 상대적으로 빠른 속도로 진행되고 있다. 반면에 연성관은 강성관에 비해 관의 강도가 떨어지며 따라서 관 변형이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해 관 뒤채움에 대한 다짐을 철저히 하는 방법을 주로 취하고 있으나, 국내의 여러 현장에서의 보고에 따르면 철저한 다짐을 한 경우에 있어서도 지반조건, 토질 등에 따라 과대한 변형을 일으키는 빈도가 자주 발생한다는 지적들이 있는 실정이다.

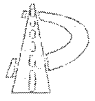
파형강관(Corrugated Steel Pipe)은 현재의 출시된 연성관들 중에서는 상대적으로 좋은 강성을 가지고 있으나, 이 또한 지반내에서 상당한 변형이 보고되고 있어 다짐 이외의 방법에 의한 뒤채움재에 대한 보완 대책이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 파형강관용 뒤채움재 연구를 수행하였다. 연구의 주안점은 두 가지 상이한 특성에 대한 내용으로, 첫 번째는 뒤채움재의 강도특성을 강화하여 파형강관의 변형을 최소화 하는 것으로, 즉 관상부의 하중을 뒤채움재로 분산되도록 하는 기능을 수행할 수 있는 재

료이어야 한다. 둘째는, 뒤채움재의 강도가 충분히 작아서 재굴착이 가능하여야 한다는 것이다. 도로하부에는 다양한 라이프라인이 매설되어 있으며, 이들 라이프라인은 일시에 시공되지 않고, 또한 유지보수 공사를 위해 빈번한 굴착 및 재시공이 이루어지고 있는 실정이다. 상기의 두가지 특성을 만족하는 뒤채움재인 유동성 뒤채움재(Controlled Low Strength Materials, CLSM)에 대한 기본물성과 파형강관용 뒤채움재 적용시 발생하는 공학적인 문제를 규명하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

2. 유동성 뒤채움재의 연구현황

국내의 경우 기존의 토사 뒤채움재를 사용하는 경우에 매립된 관의 거동에 대한 연구는 있었으나 유동성 채움재와 관련된 기 수행된 연구는 초기단계이다. 최근 조 등(2000), 이 등(1999, 2001, 2002), Lee et al.(2001)의 관련연구가 진행되었다. 이들의 연구결과로는 첫째, 혼합재료의 강도를 약 1kgf/cm²에서부터 10kgf/cm²정도까지 인위적으로 조절이 가능하고, 둘째, 투수계수가 모래질 흙과 점토질흙의 중간정도인 실트질 흙과 비슷한 10⁻⁵cm/sec의 크기를 가진다. 셋째, 기존의 저장도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여, 시간에 따른 강도증진효과가 있기는 하지만, 사용되는 시멘트량이 전체 재료의 약 5% 미만으로 재료의 특징이 콘크리트와는 상당히 다른 성질을 보여준다. 넷째, 혼합재료의 성질이 건조 및 포화가 반복되어도 크게 차이가 나지 않는다. 다섯째, 혼합재료의 특성이 초기에는 많은 유동성을 보이고, 시간이 지나면서 강도가 증진되므로, 각종 도로/지반구조물 시공시 시공방법을 단순화 할 수 있다.

국외의 경우, Bulson(1985)는 유한요소법을 사용하여 강성매설관 둘레의 응력분포에 대한 연구를 발표하였다. 이 연구의 결과로는 관의 측면부(springings)와 천단부(crown)는 주 응력방향으로 접선방향응력이 0임을 알 수 있으며 천단부의 압축



응력이 상재하중(overburden pressure, 9.8N/m^2)보다 커서(-)의 아칭효과(arching effect)가 발생함을 알 수 있었고, 베딩재가 모래인 경우 응력의 분포가 연속적으로 나타나나 암인 경우에는 베딩재가 시작되는 부분에서 불연속적인 양상(응력이 집중)을 보임을 알 수 있었다. Peindl 등(1992-a,b)에 의해 수행된 유동성 재료(fly-ash+concrete mixture)의 매설관 뒤채움재 적용에 관한 연구는 연속적인 교통하중을 받는 환경에서 플라이애쉬와 콘크리트 혼합체(해당논문에서는 ashcrete로 명칭)의 뒤채움재로서의 편리성과 안정성을 증명하기 위해 대규모 현장시험을 실시하여 자료 및 결과를 정리하였다. Naik와 Singh(1997)는 플라이애쉬가 대부분을 차지하는 유동성 슬러리와 플라이애쉬의 85%정도를 폐주물사로 대체한 재료와 강도시험을 하여 비교하였다.

3. 실험재료

본 연구에 이용된 실험재료는 크게 뒤채움재와 지하매설관용 파형강관으로 구분된다. 파형강관의 시공성능개선을 위하여 현장시험을 실시하였다. 시험에 이용된 실험재료의 지반 및 도로공학적 기본 물성치는 다음과 같다.

3.1 베딩재

본 시험시공현장에 베딩재로 사용된 일반모래의 기본특성은 최소건조단위중량(γ_{dmin}) 1.33t/m^3 , 최대건조단위중량(γ_{dmax}) 1.47t/m^3 , 조립률 2.88, 균등계수(C_u) 2.37, 곡률계수(C_g) 0.78, 비중 2.556으로 통일분류법상 입도분포가 나쁜모래 또는 자갈질의 모래인 SP로 판명되었다.

3.2 지하매설물용 뒤채움재

3.2.1 현장발생토사

뒤채움재로 사용한 현장발생토사는 한국토지공사 “양산·물금지구 택지개발사업” 현장에 넓게 분포되어 있는 시료로 기본특성은 현장 자연함수비 14.06%, 조립률 2.84, 균등계수(C_u) 7.29, 곡률계수(C_g) 1.70, 비중 2.565로 통일분류법상 입도분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래인 SW로 판명되었다.

3.2.2 현장발생토사 재활용 유동성뒤채움재

현장발생토사 재활용 유동성뒤채움재의 중량 배합비는 현장발생토사 54.03%, 플라이애쉬 19.88%, 물 22.85% 및 소량의 시멘트 3.23%를 혼합하여 사용하였다. 사용된 시료의 채령별 압축강도는 1일 양생시 1.24kgf/cm^2 , 7일 양생시 2.01kgf/cm^2 , 28일 양생시 2.25kgf/cm^2 로 측정되었다. 또한, 양생일(1, 7일)별 전단강도정수인 점착력과 내부마찰각은 표 1에 나타내었다.

표 1. 실험재료의 기본물성치 (C, ϕ)

양생시간 재료별	1일양생		7일양생	
	C(kgf/cm ²)	ϕ (°)	C(kgf/cm ²)	ϕ (°)
현장발생토사 재활용 유동성뒤채움재	0.50	11.61	0.95	12.61

3.3 파형강관

파형강관은 역학적으로 연성관으로 분류되어 있는 매설관이다. 파형강관은 KS D 3506에 의한 열연용 아연 도금강관으로 만들고, 파형강관의 제조에 사용되는 재료는 KS D 3503(일반구조용 압연강재)의 것을 사용하며, 성형 후 용융 아연도금하여 사용한다. 이 때 파형강관의 아연도금 부착량은 0.6kgf/m^2 이상 되어야 한다. 또한 파형강관은 아연도금 강관을 일정한 규격의 파형으로 제작하여 구조적으로 안정성과 외압강도가 뛰어나다. 파형강관의 연결방식은 커플링 밴드에 의해 연결이 이루어지며, 커플링 밴드는 그 형태에 따라 D형과 S형의 두 가지가 있다.

파형강관의 내구수명은 보통 50년~100년 사이로



서 최대 매설 가능 토파고는 관경이나 관두께에 따라 다르지만 최대 약 30m까지 매설이 가능한 것으로 알려져 있다. 또한 시공에 있어서 파형강관은 중량이 가벼워 취급이 용이하고 인력 또는 소형 장비로 시공이 가능하며, 커플링 밴드 방식으로 연결을 하기 때문에 접합시공이 간단하다. 또한 계절에 관계없이 전천후 시공이 가능하며, 시공시 균열, 파손의 우려가 없다. 또한 관 자체의 특성 때문에 연약지반 및 부등침하의 우려가 있는 곳에서 시공이 가능하다 (한국건설기술연구원, 2000). 경제성 측면에서 본다면 파형강관은 표준길이 6m로 생산되며 요청에 따라 그 길이의 변화를 줄 수 있기 때문에 접합개소의 숫자를 줄일 수 있어 공기를 단축시킬 수 있으며, 또한 기초공사와 되메우기 시공이 간편하여 시공비가 적게 드는 장점이 있다.

본 시험시공현장에 사용된 파형강관은 원형 1S형의 직경 800mm, 두께 2.0mm를 선택하였으며, 단면의 구체적인 제원은 표 2에 나타내었다. 파형강관의 탄성계수는 $2.1 \times 10^7 \text{tonf/m}^2$, 단위중량은 7.85tonf/m^3 이다. 그림 1은 파형강관 구조 단면형상을 나타내고 있다.

표 2. 파형강관 구조의 단면제원(원형 1S형)

기호	치수		
	파의 피치(P)	파의 깊이(H)	파의 굽힘 반지름(r)
SGHC	68mm	13mm	17.5mm

두께 t mm	단면적 A cm ² /m	접선장 TL cm	접선각 Δ °	단면2차모멘트 I cm ⁴ /cm	단면계수 S cm ³ /m	회전반경 r cm	전개폭계수 b
2.0	21.600	1.92	26° 54'	0.0414	5.6302	0.4377	1.080

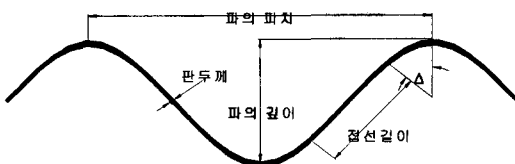


그림 1. 파형강관 구조 단면형상

4. 파형강관을 이용한 현장시험시공

4.1 시공방법

파형강관의 시공은 터파기 수행, 베딩재조성, 파형강관의 설치, 단계별 성토·다짐하는 순으로 중간층 및 상부층 조성, 하중재하 순으로 실시한다. 이때 다짐장비는 파형강관의 주변 다짐의 경우 소형 컴팩터를 사용하였고, 파형강관의 상부층 조성의 경우는 1ton 롤러를 사용하였다. 특히 일반모래 베딩재는 백호우를 이용하여 양질의 모래를 20cm 두께로 포설하였다.

시험시공에 이용한 파형강관은 직경 80cm이고, 총 길이는 12m이다. 관의 조인트부분에서의 응력-변형관계를 확인하기 위하여 6m 길이의 관 2개를 접합하여 이용하였다. 그림 2는 현장발생토사 재활용 유동성 뒤채움재의 시공과정을 보여준다.

4.2 현장계측

본 연구에서는 파형강관의 현장 적용성 검토를 위하여 그림 3과 같이 LVDT, 스트레인 게이지, 토압계 등을 설치하여 시공중과 시공후의 현장계측을 수행하였다. 파형강관의 수직 및 수평변위 측정을 위한 LVDT를 설치하였고, 파형강관의 종방향 및 횡방향의 변형특성을 파악하기 위하여 부착면을 깨끗하게 한 후, 스트레인 게이지를 3m 간격으로 부착하고, 방수처리를 위해 방수테이프를 붙이는 방식으로 수행되었다.

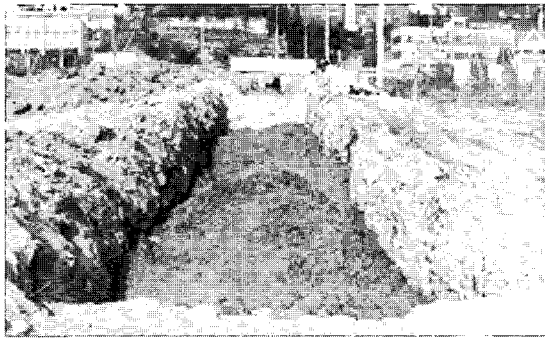
본 현장시험에서는 택지개발현장에서 보편적으로 이용하는 성토용 잡석을 가득 실은 덤프트럭(총중량 30톤)을 이용하여 하중재하시험을 수행하였다. 덤프트럭은 총 3축 10개의 타이어로 구성되었고, 총중량을 앞축에 20%, 나머지 80%를 뒤의 2개축에 작용하는 것으로 해석하였다. 파형강관 바로위에 뒤차축이 <정면도>에 나타난 것과 같이 하중이 재하되도록 하였다.



(a) CLSM 배합 장면



(b) CLSM의 타설장면



(c) CLSM의 타설장면



(d) 하중 재하 장면

그림 2. 현장발생토 CLSM을 이용한 파형강관 뒤편체움 시공순서

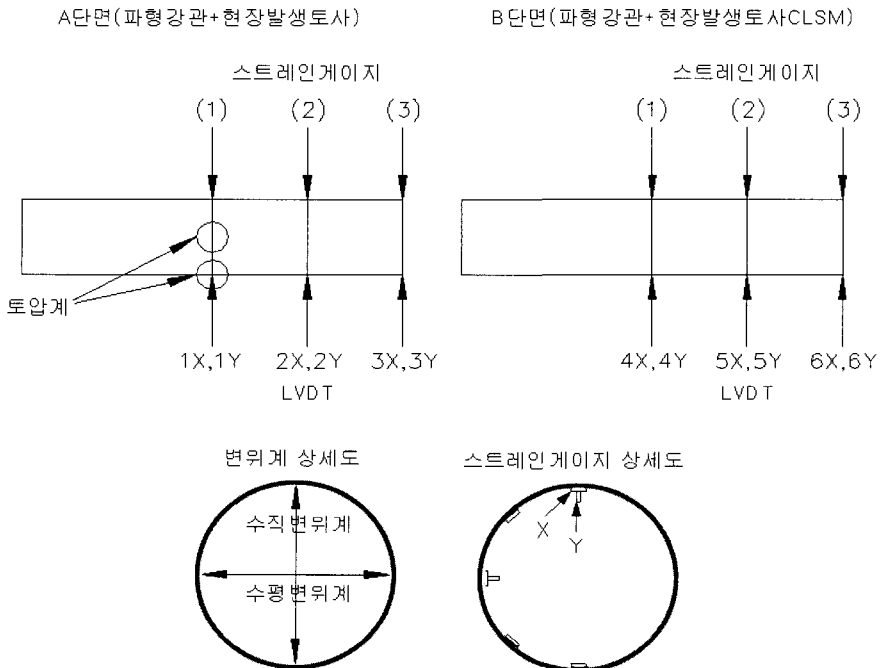


그림 3. 계측기 매설 위치

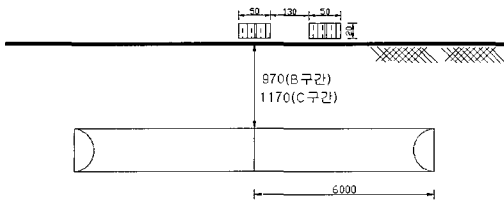
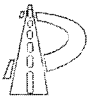


그림 4. 차량하중재하위치

4.3 계측결과 및 분석

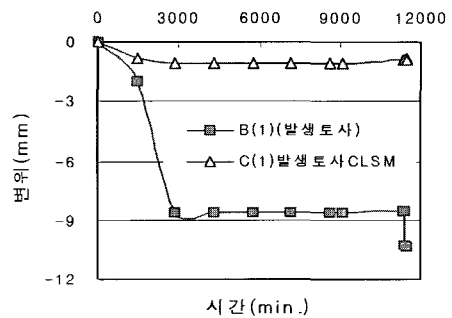
4.3.1 변위측정 결과

① 수직변위

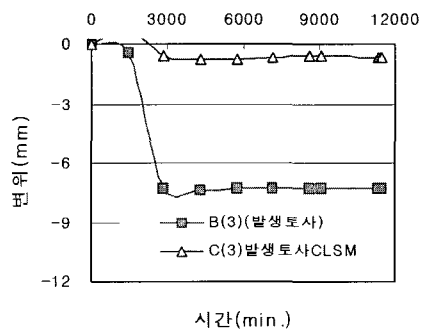
그림 5에 나타난 것과 같이 관의 길이 방향에 따라 수직변위를 측정하였다. 측정된 자료를 시공과정의 순서에 맞추어 정리한 결과를 그림 5에 나타내었다. 현장발생토를 이용한 뒤채움의 경우 최대변위는 하중제거 직전에 발생한 10.34mm이고, 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재의 경우 최대변위는 0.935mm로 측정되었다. 파형강관의 최외곽부에서의 변위는 관의 중심부변위의 약 60~70%수준으로 측정되었다. 뒤채움재의 종류에 따른 관의 변위는 매우 큰 것으로 나타났다. 같은 조건에서 현장발생토 재활용 유동성 뒤채움재를 이용한 경우 변위를 약 1/10수준으로 감소하였다. 다만, 시험에서 측정된 연직변위의 경우 초기시공과정에서 발생하는 변위량이 전체 변위량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

차량하중을 이용한 하중재하 및 하중 제거시 발생하는 변형량의 경우 뒤채움재의 종류에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 현장발생토사를 뒤채움재로 이용한 경우 차량하중 재하시 연직변위 값이 약 1mm 이상 증가하였다. 그러나, 현장발생토사 재활용 유동성 뒤채움재의 경우 연직변위의 변화가 없는 것으로 계측되었다. 이는 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재에 사용된 2%의 시멘트 및 30%의 플라이애쉬가 뒤채움재의 강도특성을 매우 크게 증가시키고, 이로 인해 차량하중에 의한 요인을 최소화하는 것

로 판단된다. 또한, 관의 길이에 따른 차량하중에 의한 변위값을 확인해 본 결과, 차량하중 바로 아래 부분에는 차량하중에 의한 영향이 있으나, 하중에서 수평으로 이동한 위치에서는 차량하중에 의한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 차량하중이 뒤채움재의 타설깊이 및 위치에 의해 크게 영향을 받음을 의미한다. 또한, 일반적으로 지하매설물의 경우 도로 포장체 아래에 시공되므로, 도로포장체의 강성값을 고려한다면, 차량하중자체에 의한 영향은 더욱 작아질 것으로 판단된다. 다만, 뒤채움재의 시공 상태가 나쁠 경우, 뒤채움재의 침하 등으로 인한 차량하중 이외의 외적인 조건에 의한 관의 변형 및 파손이 야기될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 관 중앙 조인트부에서



(b) 관 최외곽부에서

그림 5. 뒤채움재 종류 및 관의 길이방향에 따른 관의 연직변위

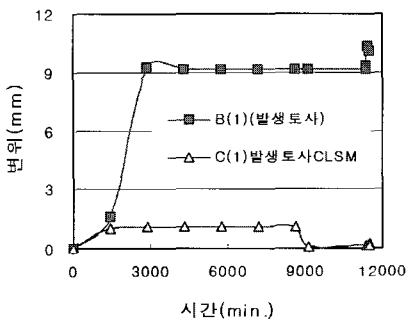
② 수평변위

그림 6은 뒤채움재의 종류에 따른 시공과정순서별 발생한 수평변위를 나타내고 있다. 현장발생토를 이

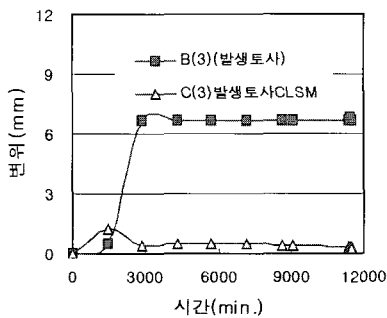


용한 뒤채움의 경우 최대변위는 하중제거 직전에 발생한 10.057mm이고, 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재의 경우 최대변위는 0.173mm로 측정되었다. 파형강관의 최외곽부에서의 변위는 관의 중심부변위의 약 60~70%수준으로 측정되었다. 뒤채움재의 종류에 따른 관의 변위는 매우 큰 것으로 나타났다. 같은 조건에서 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재를 이용한 경우 변위를 약 1/10수준으로 감소하였다. 다만, 시험에서 측정된 수평변위의 경우 초기시공과정에서 발생하는 변위량이 전체변위량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

차량하중을 이용한 하중재하 및 하중 제거시 발생하는 변형량의 경우 뒤채움재의 종류에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 현장발생토사를 뒤채움재로 이용한 경우 차량하중 재하시 수평 변위값이 약 1mm 이상 증가하였다. 그러나, 현장발생토사 재활용 유동성뒤채움재의 경우 수평변위의 변화가 없는 것으로 측정되었다.



(a) 관 중앙 조인트부에서



(b) 관 최외곽부에서

그림 6. 뒤채움재 종류 및 관의 길이방향에 따른 관의 수평변위

4.3.2 토압측정 결과

토압의 측정은 현장발생토사 뒤채움구간에 설치된 토압계를 이용한 것으로 연직토압의 경우 약 1.79kgf/cm²에서 1.86kgf/cm²의 범위에서 측정되었고, 수평토압의 경우 0.79kgf/cm²에서 0.84kgf/cm²의 범위에서 값이 결정되었다. 수평토압과 연직토압과의 상관관계를 이용하여 시공시간에 따른 정지토압계수를 산정하였다. 정지토압계수의 변화는 최소 0.433에서 최대 0.460까지의 범위에서 결정되었다. 이는 Jacky의 공식을 이용할 경우 약 0.43정도 이므로, 측정된 정지토압계수는 어느 정도 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다. 하중이 재하된 시점에서의 토압 역시 변형값과 거의 유사한 경향을 나타내고 있는데, 차량하중에 의한 토압의 변화는 무시할 정도로 작은 것으로 측정되었다.

4.3.3 변형률 게이지 측정결과

그림 7은 스트레인 게이지를 이용하여 측정된 결과값을 나타내고 있다. 측정값은 현장발생토 구간과 현장발생토 CLSM 구간으로 구분되고, 스트레인 게이지 설치 위치를 관의 최외곽부분(a, f), 3/4부분(b, e), 중앙부(c, d)로 나누어진다. 또한, 각각의 그림에서 맨뒤의 숫자는 관의 원주를 상단에서부터 45도씩 나누어 총 5개의 측정 포인트를 의미한다. 즉 숫자 1은 관의 상단중앙부, 2는 상향 45도 방향, 3은 관의 수평중앙부, 4는 하향 45도 방향, 그리고 5는 관의 하단 중앙부를 의미한다. 그림에 나타난 것과 같이 상단중앙부 및 하단중앙부에서는 주로 인장 변형률이 발생하고, 수평중앙부는 인접 45도 상하단부에서는 압축변형률이 다소 지배적인 형태를 나타내고 있다. 발생한 변형률은 초기의 시공과정에서는 시간에 따라 다소 커지는 양상을 보이다가 일정시점 이후에는 거의 일정한 값을 나타낸다. 차량하중에 의한 하중재하 결과 역시 앞의 변위 특성과 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 보여준다.

그림 8은 같은 위치에서 관의 뒤채움재에 따른 변형률을 나타내고 있다. 관의 상단부 및 하단부에서의

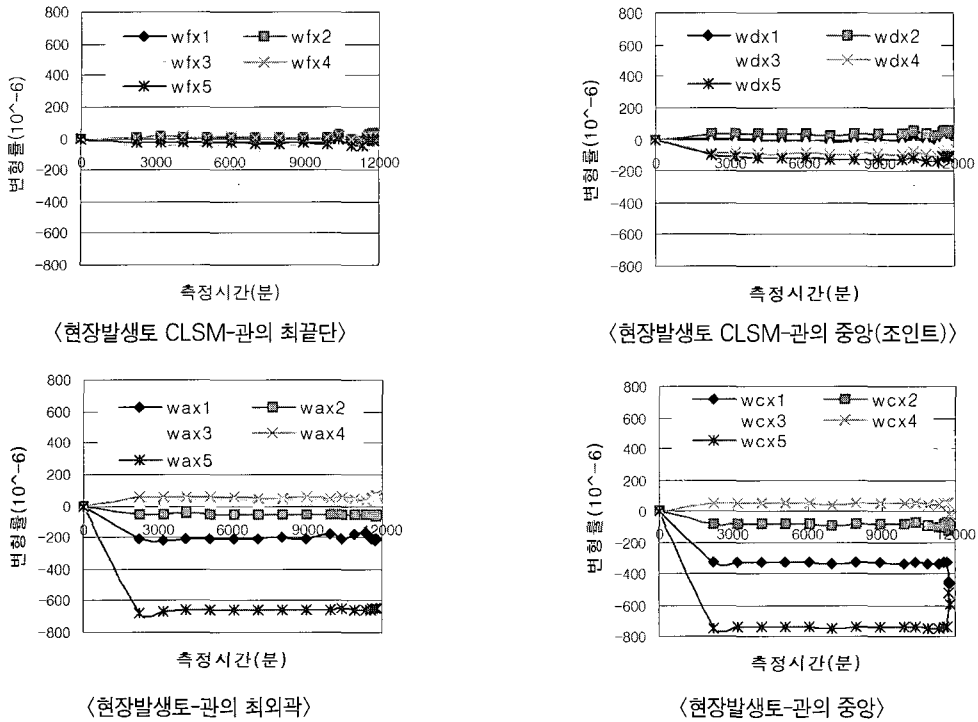


그림 7. 스트레인 게이지 설치 위치별 변형률 측정값

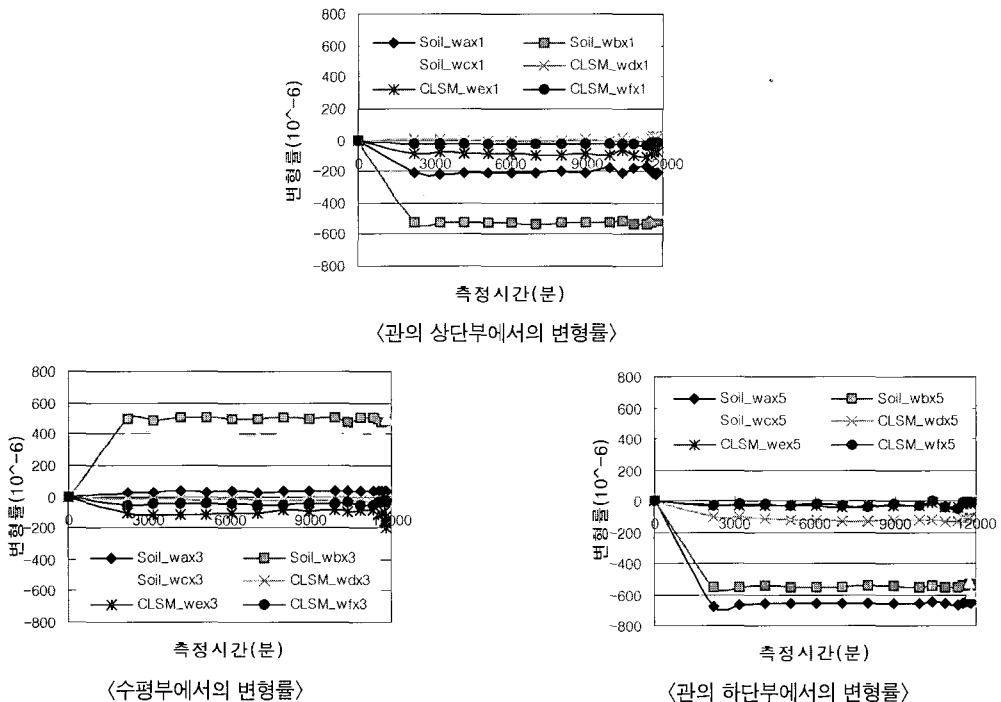


그림 8. 같은 위치에서의 변형률 변화 특성



변형특성은 같은 경향을 보여주고, 수평부에서의 변형특성은 이와는 반대의 경향을 나타낸다. 또한, 상단부 및 하단부 45도 위치에서의 변형특성 역시 서로 상반되는 경향을 나타내고 있다. 뒤채움재의 특성을 고려한 변형률의 변화특성을 살펴보면, 현장발생토를 이용한 CLSM 뒤채움재에서 발생한 변형량이 현장발생토를 이용한 경우에 비해 상대적으로 작게 나타난 것을 확인하였다.

5. 수치해석 및 결과분석

5.1 수치해석사례

본 연구에서 수치해석은 고려해 볼 수 있는 여러 가변조건 중 뒤채움재의 종류를 변화시키는 3가지 사례에 대해서 유한요소 프로그램인 PENTAGON-3D(에메랄드 소프트웨어, 1998)를 이용하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 수치해석에서는 원지반은 탄소성모델(mohr-coulomb)을 적용하였고, 나머지는 선형탄성모델을 적용하였다. 수치해석에 이용된 해석

단면의 설계정수는 표 3과 같이 실내실험을 통해 결정된 값이다.

본 연구에서 적용한 3차원 유한요소 해석프로그램인 PENTAGON-3D에서 원지반, 베딩재, 뒤채움재는 4절점 솔리드 요소로 모델링 하였으며, 파형강관은 4절점 쉘 요소로 모델링 하였다. 쉘 요소는 파형강관의 종방향 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. 3차원 유한요소 모델에 실제 적용된 파형강관의 환산물성은 표 4와 같다.

5.2 수치해석 시공과정 모델링 및 결과분석

본 연구에서 적용시킨 3차원 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON-3D에서 해석상 적용시킨 시공과정에 따른 모델링은 다음과 같다.

- ① 초기단계 : 원지반
- ② 시공 1단계 : 터파기

표 3. 수치해석단면의 설계정수

description	bulk-modulus (t/m ²)	shear-modulus (t/m ²)	γ_t (t/m ²)	c (t/m ²)	ϕ (°)	E (t/m ²)	K_0	V	비고
원지반	5833.33	2692.31	1.90	1.5	35	7000	0.43	0.3	
일반모래	1466.67	676.92	1.50	-	30	1760	0.43	0.3	베딩재
일반모래	833.33	384.62	1.50	-	30	1000	0.43	0.3	뒤채움재
방식사 유동성뒤채움	2521.67	1163.85	1.80	7.3	27.33	3026	0.026	0.3	
현장발생토사 유동성뒤채움	1447.50	668.08	1.80	9.5	12.61	1737	0.026	0.3	

표 4. 실제 파형강관의 물성과 3차원 유한요소 해석상 사용된 환산물성

관직경	구분	물 성	실 제 관	환 산 시
	ø 300		탄성계수(t/m ²)	21,000,000
		두께(m)	0.002	0.0152



- ③ 시공 2단계 : 관이 놓일 위치의 베딩재까지 성토 및 관의 설치
- ④ 시공 3단계 : 산정된 토피고까지 단계별 성토
- ⑤ 시공 4단계 : 정하중 재하

PENTAGON-3D 유한요소프로그램을 이용하여 해석한 해석사례별 관 변위 및 지표면변위는 표 5에 나타난 것과 같다. 해석에서 기준이 되는 사례는 사례 1로, 베딩재와 뒤채움재로 일반모래를 이용하고, 관의 종류로 파형강관을 이용한 것이다. 이 경우 차량하중 재하 전의 경우 관 변위는 0.21mm이고, 지표면변위는 0.21mm이었으며, 차량하중 재하 후의 경우 관 변위는 0.90mm이고, 지표면변위는 7.16mm이다. 사례 1과 같은 조건에서 단지 뒤채움재를 유동성 채움재(CLSM)종류를 달리 이용한 경우 차량하중을 재하 하기 전의 관 변위와 지표면변위는 사례 1의 경우와 같은 수준으로 나타났고, 차량하중을 재하한 경

우 지표면의 변위는 사례 1 경우의 사례 2는 38%, 사례 3은 61%정도 수준으로 나타났고, 관 변형은 사례 2는 80%, 사례 3은 90%정도의 수준인 것으로 나타났다. 이는 파형강관 시공시 유동성 뒤채움재를 뒤채움재로 이용하면 재료의 특징중 자기강도 발현 특성에 의해, 양생이 됨에 따라 파형강관 주변의 재료가 굳어 강성화 되고, 이것이 파형강관과의 일체화를 통한, 파형강관의 단면강도를 증진시켜준 효과로 해석할 수 있다. 사용한 유동성 뒤채움재의 종류 중에서는 방식사와 현장발생토사를 비교 및 검토해 본 결과 방식사를 이용한 유동성 뒤채움재 재료의 특성이 지표면의 변위 및 관 변형을 최소화할 수 있는 것으로 나타났다.

표 6은 해석사례별 관 자체의 주요부위에서의 변형량을 나타낸 것이다. 파형강관의 경우 천단부와 저부에서의 발생 변형량의 차이가 차량하중을 재하하지 않은 경우 0.06mm정도인 것으로 나타났고, 차량

표 5. 해석사례별 지표면변위 및 관변위

구 분	사 례	베딩재	관종류	뒤채움재	관변위(mm)	지표면변위(mm)
차량하중 재하 전	1	일반모래	파형강관	현장발생토사	0.21	0.21
	2	일반모래	파형강관	방식사 CLSM	0.21	0.21
	3	일반모래	파형강관	현장발생토사 CLSM	0.22	0.22
차량하중 재하 후	1	일반모래	파형강관	현장발생토사	0.90	7.16
	2	일반모래	파형강관	방식사 CLSM	0.72	2.71
	3	일반모래	파형강관	현장발생토사 CLSM	0.81	4.37

표 6. 해석사례별 관 자체의 주요부위에서의 변형량(mm)

구 분	사 례	crown	shoulder	springings	haunch	invert
차량하중 재하 전	1	0.21	0.20	0.19	0.18	0.15
	2	0.21	0.19	0.18	0.17	0.15
	3	0.22	0.20	0.19	0.18	0.16
차량하중 재하 후	1	0.90	0.77	0.71	0.65	0.54
	2	0.72	0.63	0.58	0.54	0.46
	3	0.81	0.70	0.64	0.59	0.50



하중을 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 뒤채움재를 사용한 경우가 일반모래를 사용한 경우보다 주요절점의 변형량이 작게 나왔으며, 사용한 유동성 뒤채움재의 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 뒤채움재의 종류 및 유동성 뒤채움재의 강도특성과 상당한 관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고, 강도가 발현된 유동성 뒤채움재가 하나의 암반(rock mass)과 같은 거동특성을 나타내는 것을 의미한다.

6. 결론

실내물성시험, 현장시험 및 유한요소해석을 이용한 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- ① 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재의 지반공학적인 강도정수, 즉 양생시간에 따른 내부마찰각 및 점착력의 크기는 1일 양생시 11.6도 및 0.5kgf/cm², 7일 양생시 12.6도 및 0.95kgf/cm²으로 나타났다. 양생시간에 따라 점착력의 크기의 변화가 더욱 큰 것은 사용된 시멘트의 양생효과에 따른 것으로 판단된다.
- ② 현장발생토를 이용한 뒤채움의 경우 최대변위는 하중제거 직전에 발생한 10.34mm이고, 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재의 경우 최대변위는 0.935mm로 측정되었다. 파형강관의 최외곽부에서의 변위는 관의 중심부변위의 약 60-70%수준으로 측정되었다. 뒤채움재의 종류에 따른 관의

변위는 매우 큰 것으로 나타났다. 같은 조건에서 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재를 이용한 경우 변위를 약 1/10수준으로 감소하였다. 다만, 시험에서 측정된 연직변위의 경우 초기시공과정에서 발생하는 변위량이 전체 변위량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

- ③ 차량하중을 이용한 하중재하 및 하중제거시 발생하는 변형량의 경우 뒤채움재의 종류에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 현장발생토사를 뒤채움재로 이용한 경우 차량하중 재하시 연직 변위값이 약 1mm 이상 증가하였다. 그러나, 현장발생토사 재활용 유동성뒤채움재의 경우 연직변위의 변화가 없는 것으로 계측되었다. 이는 현장발생토 재활용 유동성뒤채움재의 사용된 2%의 시멘트 및 30%의 플라이애쉬가 뒤채움재의 강도특성을 매우 크게 증가시키고, 이로 인해 차량하중에 의한 요인을 최소화하는 것으로 판단된다. 또한, 관의 길이에 따른 차량하중에 의한 변위값을 확인해 본 결과, 차량하중 바로 아래 부분에는 차량하중에 의한 영향이 있으나, 하중에서 수평으로 이동한 위치에서는 차량하중에 의한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 차량하중이 뒤채움재의 타설 깊이 및 위치에 의해 크게 영향을 받음을 의미한다. 또한, 일반적으로 지하매설물의 경우 도로포장체 아래에 시공되므로 도로포장체의 강성값을 고려한다면 차량하중자체에 의한 영향은 더욱 작아질 것으로 판단된다.
- ④ PENTAGON 3D를 이용한 유한요소해석의 경우 해석 결과값의 절대값은 현장시험 및 모형챔버시험과 다소 차이가 있으나, 현장발생토 및 현장발생토 CLSM의 뒤채움재의 변화에 따른 수직/수평변위, 토압 및 변형률의 변화 경향은 같은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2004년 경성대학교 교수연구년 지원사



업으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박응호 (2002), "파형강관 지중구조물의 토피고 및 이격거리에 관한 연구", 한양대학교 공학 석사학위 논문.
2. 에메날드 소프트 (1998), PENTAGON-3D 사용설명서.
3. 육정훈 (2002), "파형강관 지중구조물의 거동특성에 관한 연구", 한양대학교 공학 석사학위 논문.
4. 이관호, 이인모, 조재윤, 윤여준 (1999), "유동성 뒷채움재로 사용하기 위한 플라이애쉬-폐주물사 혼합재료의 특성 연구", 한국지반공학회 정기 봄학술발표회 논문집, pp. 489-496.
5. 이관호, 조재윤, 신현무, 김남호 (2001), "폐주물사 및 방식사를 이용한 유동성 채움재의 최적배합설계 및 다짐특성연구", 폐기물학회지, 제 18권 4호, pp. 389-396.
6. 이관호, 조재윤, 조윤희 (2002), "폐주물사를 이용한 유동성채움재의 절토구간 옹벽 뒤채움시 사일로 토압 및 토압경감효과 연구", 한국도로포장공학회논문집, 제 4권 2호, 통권 12호, pp. 19-32.
7. 조재윤, 이관호, 이인모 (2000), "유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒤채움재 연구", 한국지반공학회지, Vol. 16, No. 4, pp. 17-30.
8. 한국건설기술연구원 (2000), "파형강관의 설계기준 및 시공지침에 관한 연구", pp. 29-106.
9. Bulson, P.S. (1985), "Buried Structures (Static and Dynamic Strength)", Chapman and Hall.
10. 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.
11. Marston, A. (1930), "The Theory of External Loads on Closed Conduits", Bulletin No. 96, *Iowa Engineering Experimental Station, Ames, IA*, pp. 5-8.
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.
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. Peindl, R.D., Janardhanam, R., and Burns, F. (1992), "Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill. Part II: Dynamic loading", *Journal of Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 118, No. 3, pp. 464-474.
15. Spangler, M.G. (1948), "Underground Conduits", *Transaction ASCE*, VOL. 113.

〈접수 : 2006. 3. 22〉