

유동성 채움재를 이용한 지하매설관의 변형특성 연구

Deformation Behavior Underground Pipe with CLSM

박재현* · 이관호** · 조재윤*** · 송창섭****

Park, Jae-Heon Lee, Kwan-Ho Jo, Jae-Yun Song, Chang-Seop

1. 서론*

도로하부 지하매설물은 주로 정부에서 관리하는 중요한 토목구조물로서, 주로 상하수도관, 각종통신선로, 도시가스 관등이 있고, 이외에도 고속도로변의 배수관거 등이 있다. 이러한 지하매설물의 설치과정은 기존의 도로 또는 지반을 굴착한 후 굴착면을 정리하고, 콘크리트 또는 모래를 이용하여 베딩재를 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.

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 방법중의 하나가 유동 성채움재(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. 이의 대표적인 특성은 자기수평능력(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(과다다짐 또는 빈다짐)으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수 있다.

이에 본 논문에서는 지하매설물 설제에 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 수치해석 결과값을 상호 비교 검토하였다. 이를 통하여 유동성 채움재(CLSM)를 대체 뒤채움재로 적용하기 위한 도로하부 지하매설물용 뒤채움재 및 매설관의 변형거동특성을 규명하는 것이 본 연구의 최종 목적이다.

2. 유동성 뒤채움재(CLSM)

유동성 뒤채움재(CLSM)는 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 것으로, 유동성 뒤채움재, 비수축 채움재(unshrinkage fill), 강도조절 채움재(controlled strength fill), 유동성 모르타르(flowable mortar), 흙-시멘트 슬러리(soil-cement slurry), K-Krete 등으로 불린다. 이의 대표적인 특성은 자기수평능력(self-leveling), 자기다짐(self-compacting), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절, 시공 후 재 굴착이 용이, 시공단계를 줄여 시공비 절감이 가능하다는 것이다.

국내의 경우 기존의 토사 뒤채움재를 사용하는 경우에 매립된 관의 거동에 대한 연구는 있었으나 유동성 채움재와 관련된 기 수행된 연구는 초기단계이다. 최근 조재윤 등(2000), 이관호 등(1999, 2001, 2002), Lee et al.(2001)의 관련 연구가 진행되었고, 이들의 연구결과로는 첫째, 혼합재료의 강도를 약 100kPa에서부터 1030kPa정도까지 인위적으로 조절이 가능하고, 둘째, 투수계수가 모래질 흙과 점토질흙의 중간강도인 실트질 흙과 비슷한 10^{-5} cm/sec의 크기를 가

* 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정(Graduate Student, Dept. of CivilEng., KyungSung Univ.)

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

*** 정회원, 동의공업대학 토목과 교수(Member, Prof., Dept. of Civil Eng. Dongeui Colle.)

**** 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정(Graduate Student, Dept. of CivilEng., KyungSung Univ.)



진다. 셋째, 기존의 저장도콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여, 시간에 따른 강도증진효과가 있기는 하지만, 사용되는 시멘트량이 전체 재료의 약5% 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. 이외에 국내연구진이 외국에서 수행한 연구결과로는 정진호(1998)의 매설된 금속폴리에틸렌 복합관에 대해 유한요소법을 이용하여 기존의 설계방법에서는 고려하지 않고 있는 흙-관구조의 상호작용특성과 매설관의 거동에 관계되는 제반 요인을 고려한 뒤택음재 연구가 있다. 또한, 조성민 등(2002)이 수행한 연구결과로는 파형강관을 성형하여 조립한 지중 강관 구조물의 하중지지 거동을 파악하고 구조적인 안정성을 분석하기 위하여 직경 6.25m인 원형 구조물 2기를 시험 시공하고 이에 실규모 현장시험을 실시한 결과가 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 압축응력이 상재하중(overburden pressure, 9.8N/m²)보다 커서(-)의 아칭효과(arching effect)가 발생함을 알 수 있었고, 베딩재가 모래인 경우 응력의 분포가 연속적으로 나타나나 압인 경우에는 베딩재가 시작되는 부분에서 불연속적인 양상(응력이 집중)을 보임을 알 수 있었다. Rogers(1988)는 뒤택음 흙의 종류에 따른 연성매설관의 변형 양상에 대한 연구로써 트렌치(trench)내부에 채워진 흙의 강성도에 따라 연성관의 어떠한 변형양상을 보이는지를 파악하였다. 그 연구결과로써 뒤택음 흙의 강성도가 작은 경우에는 관은 일반적으로 타원모양의 변형양상을 보이나 보다 단단한 흙에서는 조금의 편차가 발생함을 밝히고 있다. Peindl 등(1992-a,b)에 의해 수행된 유동성 재료(fly-ash+concrete mixture)의 매설관 뒤택음재 적용에 관한 연구는 연속적인 교통하중을 받는 환경에서 플라이애쉬와 콘크리트 혼합체(해당논문에서는 ashcrete로 명칭)의 뒤택음재로서의 편리성과 안정성을 증명하기 위해 대규모 현장시험을 실시하여 자료 및 결과를 정리하였다. 그 연구결과로써 일반적인 토사 성도와 플라이애쉬에 의한 성도 후 차량하중을 정적, 동적으로 가했을 때, 성도 중에 매설한 파이프의 변위를 측정·비교함으로써 플라이애쉬가 일반 토사보다 성도재로서 우수함을 증명하였다. Naik와 Singh(1997)는 플라이애쉬가 대부분을 차지하는 유동성 슬러리와 플라이애쉬의 85%정도를 폐주물사로 대체한 재료와 강도시험을 하여 비교하였다.

3. 실내모형실험 및 결과분석

표 1,2,3은 실내모형 실험에 사용된 배합비와 기본물성 실험의 결과를 보여주고 있다.

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/cm²)

재료별	양생시간	1일양생	7일양생
	방식사CLSM		1.78
현장발생토사CLSM		1.24	2.43

표 3. 실험재료의 기본물성치(C, ϕ)

재료별	양생시간	1일양생		7일양생	
		C(kgf/cm ²)	ϕ (°)	C(kgf/cm ²)	ϕ (°)
방식사CLSM		0.25	13.97	0.73	27.33
현장발생토사CLSM		0.50	11.61	0.95	12.61



3.1 하중에 따른 변위 특성 평가

3.1.1 수직변위

표 4은 하중에 따른 관의 수직변위를 실험값과 유한요소해석값을 비교 검토하였다. 또한 사례별로 차량하중 재하 전·후의 수직변위의 변화양상도 나타내었다. 차량하중 재하 전 하중에 따른 수직 변위의 실험값은 사례 1과 같은 조건에서 뒤택음재의 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 1경우의 사례 2는 19%, 사례 3은 10%정도 수준으로 나타났으며, 유한요소해석값은 사례 1경우의 사례 2는 80%, 사례 3은 90%정도의 수준인 것으로 나타났다.

표 4. 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	

3.1.2 수평변위

표 5은 하중에 따른 관의 수평변위를 이론값(토압이론, Marston), 실험값, 유한요소해석값을 비교 검토하였다. 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 뒤택음재의 종류를 달리 이용한 경우 사례 1의 경우와 이론값, 실험값, 유한요소해석값이 같은 수준으로 나타났다.

표 5. 하중에 따른 수평변위

사례	이론값(ΔX)(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(ΔX)(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	



3.2 하중에 따른 토압 특성 평가

3.2.1 수직토압

본 연구에서는 뒤채움재의 종류에 따른 파형강관의 토압 특성을 분석하였다. 표 6은 하중에 따른 수직토압을 나타내고 있다. 차량하중 재하 전뒤채움재의 종류에 따른 실험값은 사례 1의 경우와 비교하여 본 결과 사례 2는 38% 정도의 수준인 것으로 나타났고, 사례 3은 20%정도 크게 나타났다. 그리고 실험값이 이론값에 비해서 4~13%정도 작게 나타남을 알 수 있다.

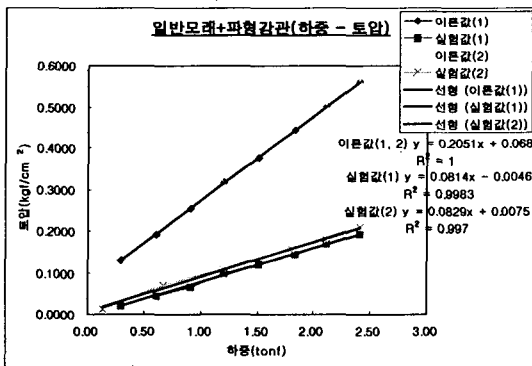
차량하중 재하 후 뒤채움재의 종류에 따른 실험값은 사례 1의 사례 2는 4%, 사례 3은 9% 정도의 수준이었다. 또한 일반모래 뒤채움인 경우 이론값에 비해서 실험값이 36~40%정도 작게 나타났으며, 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우는 실험값이 이론값의 4~25%정도 수준인 것으로 나타났다. 이는 사례 1의 경우 하중에 따른 일반모래 작은 입자 하나 하나가 토압계에 작용하는 반면에 사례 2와 사례 3은 유동성 채움재(CLSM)의 강도특성과 상당한 관계가 있는 것으로 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고,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

표 6. 하중에 따른 수직토압

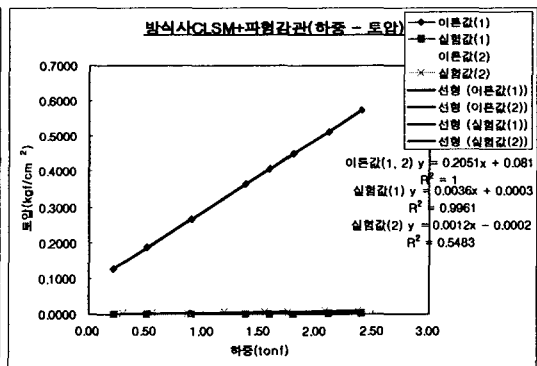
사례	이론값(kgf/cm ²)		실험값(kgf/cm ²)	비고
	토압이론	Marston		
1	0.07	0.03	0.008	차량하중 재하 전
2	0.08	0.04	0.003	
3	0.08	0.04	0.010	

사례	이론값(kgf/cm ²)		실험값(kgf/cm ²)			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	

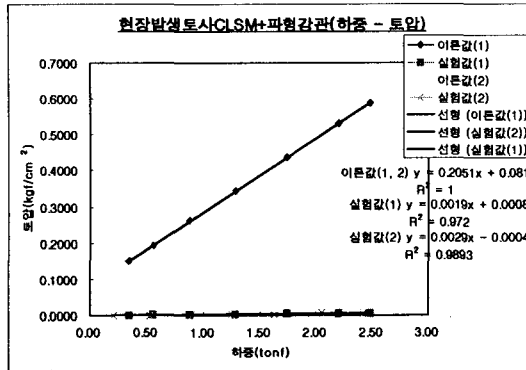
그림 1은 사례별로 하중에 따른 수직토압 분포를 이론값과 실험값을 비교 검토하여본 결과이다.



사례 1.



사례 2.



사례 3.

그림 1. 사례별 하중에 따른 수직토압

3.2.2 수평토압

표 7는 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.

표 7. 하중에 따른 수평토압

사례	이론값(kgf/cm ²)	실험값(kgf/cm ²)	비고
1	0.03	0.008	차량하중 재하 전
2	0.04	0.006	
3	0.07	0.003	

4. 수치해석 및 결과분석

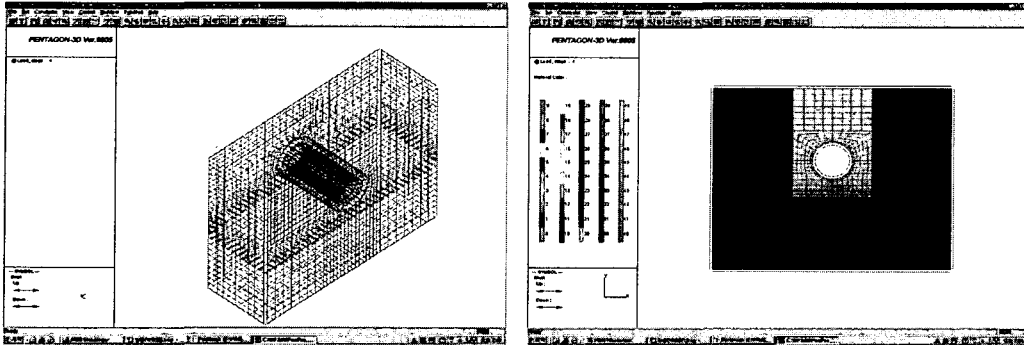
4.1 수치해석사례

본 연구에서는 표 8에 나타난 것과 같이, 수치해석은 고려해 볼 수 있는 여러 가변조건 중 뒤택움제의 종류를 변화시키는 3가지 사례에 대해서 유한요소프로그램인 PENTAGON-3D(에메랄드 소프트웨어, 1998)를 이용하여 해석을 수행하였다. 그림 13은 수치해석에 사용된 유한요소망 및 수치해석단면의 물성치 분포도이다. 본 연구의 수치해석에서는 원지반은 탄소성모델(Mohr-Coulomb)을 적용하였고, 나머지는 선형탄성모델을 적용하였다. 수치해석에 이용된 해석단면의 설계정수(표 9)는 실내실험을 통해 결정된 값이다.



표 8. 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 2. 수치해석에 사용된 유한요소망 및 수치해석단면의 물성치 분포도

표 9. 수치해석단면의 설계정수

Description	γ_t (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ ($^{\circ}$)	E (t/m ²)	K_0	ν	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	뒤채움재
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	

표 10. 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 11는 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.

표 11. 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	

5. 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, 관의 수직·수평토포압의 비교검토로부터 유동성 채움재(CLSM)를 이용한 지하매설관의 변형특성을 연구하였다. 그리고 상용 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 사용하여 도로하부 지하매설물용 유동성 채움재(CLSM)를 적용한 지하매설물의 수치해석을 수행하여 실내모형실험에서 확인된 뒤채움재에 따른 관의 변위, 지표면의 변위 및 관의 천단·하부에서의 변위와 주요 절점 변위를 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

○ 실내모형실험과 수치해석을 실시한 결과 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우에 관의 수직·수평변위 및 지표면 변위를 감소시키는 것으로 해석되었다. 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.

○ 뒤채움재의 종류에 따른 파형강관의 수직·수평토포압특성은 유동성 채움재(CLSM)를 사용한 경우에 관에 작용하는 수직·수평토포압이 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.

○ 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.

본 연구에 이어 현재 실내실험결과와 유한요소해석결과를 기초로 현장발생토사CLSM경우에 대해서 중차량하중을 이용한 대규모 현장적용성 시험을 실시하였으며, 결과를 분석중이며, 기존의 이론을 이용한 값, 실내모형실험결과, 유한요소해석 및 현장시험결과상의 상호비교를 통해 설계에 필요한 설계입력변수를 결정하고, 이를 통한 적절한 설계법을 제시할 것이다.



참고문헌

1. 박응호(2002), “파형강관 지중구조물의 토피고 및 이격거리에 관한 연구”, 한양대학교 공학 석사학위 논문.
2. 이관호, 조재윤, 조윤희(2002), “폐주물사를 이용한 유동성채움재의 절토구간 옹벽 뒤채움시 사일로 토압 및 토압경감효과 연구”, 한국도로포장공학회논문집, 제 4권 2호, 통권 12호, pp. 19-32.
3. 유정훈(2002), “파형강관 지중구조물의 거동특성에 관한 연구”, 한양대학교 공학 석사학위논문.
4. 정진호(1998), “금속-폴리에틸렌 복합관의 뒤채움하중에 관한 연구(1)”, 대한토목학회지, 제 18권 제 III-5호, pp. 609-624.