재활용재료를 이용한 지하매설물용 뒤채움재 - 설계입력변수 정량화

Backfill Materials for Underground Facility with Recycling Materials - Quantification of Design Parameters

이관호* · 김성겸**

Lee, Kwan-Ho · Kim, Seong-Kyum

Abstract

The design, construction and management of underground facilities as infrastructure of nation should be properly carried out. One of reasons for underground facilities failure is a non-proper construction of backfill materials. This is common for circular underground pipes. A non-proper compaction is the cause of settlement and decrease of performance of underground facilities. The use of controlled low strength materials is an alternative to reduce the couple of failure problems. The flowability, self-cementation, and non-compaction are the major advantages to use the controlled low strength materials. In this research, couple of recycled materials, such as in-situ soil, water-treatment sludge, and crumb rubbers, were adopted. The basic properties of each materials were determined according to KS or ASTM. Also, couple of laboratory tests were carried out to get the design parameters for geotechnical and roadway area.

Key words : Impact Resonance Test, Controlled Low Strength Materials, Unconfined Compression Test, Watertreatment Sludge, In-Situ Soil

요 지

지하매설물은 국가기간시설물로서 설계, 시공 및 유지관리가 적절하게 이루어져야 한다. 이러한 지하매설물 파손의 주요 원인 중의 하나는 부적절한 뒤채움재의 시공이다. 부적절한 뒤채움재 시공은 특히, 원형관로의 시공시 발생하며, 부적절한 다짐으로 인한 침하 및 내구성저하로 인한 파손이 발생한다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 하나의 대안으로 유동성뒤채움재를 이용할 수 있다. 유동성뒤채움재는 초기유동성, 시간에 따른 자기강도발현, 무다짐공법 적용 등 많은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 현장발생토사, 정수장슬러지 및 폐타이어분말 등 재활용 재료를 이용한 유동성 뒤채움재의 기본물성을 평가하였다. 각각의 재활용재료에 대한 입도 및 비중을 평가하였고, 최적배합설계를 결정하였다. 지반 및 도로공학적 설계입력변수 결정을 위해 일축압축시험, 삼축압축시험, 공진주시험 등을 수행하였다.

핵심용어 : 공진주시험, 유동성뒤채움재, 일축압축시험, 정수장슬러지, 현장발생토사

1. 서 론

라이프라인은 인간에게 필요한 각종 생활편익을 제공하고 있지만, 지중에 매설되는 각종 관들은 파손위험에 쉽게 노출되어 큰 피해가 발생할 수 있다. 또한, 최근의 기후변화로 인한 폭우성 집중강우, 부적절한 빗물 배수로, 관로 연결부의 결함 등으로 인한 단시간에 매우 큰 피해가 그림 1과 같이 발생하고 있는 실정이다. 이 외에도 현재 국내의 주요 사용관종인 흙관의 경우 관부식의 문제의 대두로 오수관으로는 부적합하다는 인식이 기술자들 사이에서 나오고 있는 실정이다.

다. 이러한 문제를 해결하기 위해 대체관들에 대한 연구들이 진행되어 왔으며 상당 수의 관들이 제품으로 출시되어 현장에서 보급 및 시공되고 있다.

최근 들어 파형강관, PE관, PVC 등의 연성관은 부식에 강할 뿐만 아니라 자재의 무게가 경량이어서 시공공성이 탁월하다. 이러한 이점 때문에 흙관이 점령하고 있는 하수관 시장은 연성관으로 점차 이동 중에 있으며, 특히 오수관의 경우는 상대적으로 빠른 속도로 진행되고 있다. 반면에 연성관은 강성관에 비할 때 관의 강도가 떨어지며 따라서 관변형이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이러한 결점을 보완하기

**정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : khlee@kongju.ac.kr)

**공주대학교 방재공학과 석사과정

그림 1. 지하매설관의 파손 사례

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 과도한 변형으로 인한 매설관의 파손이 자주 발생하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 문제점에 대한 개선책이 필요할 것으로 판단되며, 곧 상당수의 지자체 등에서 많은 예산 투입과 지하매설관의 파손에 대한 관리가 이루어질 것으로 판단된다.

이에 본 연구과제에서는 지하매설관 파손의 대부분을 차지하는 부적절한 뒤채움재 시공으로 인한 관의 파손을 원천적으로 제어하기 위하여 신개념 유동성 뒤채움재(Controlled Low Strength Materials, CLSM)의 적용성을 평가하고자 한다. 유동성 뒤채움재는 다짐을 생략할 수 있는 재료로서, 자기양생 효과를 가지는 재료로서, 초기에는 충분한 유동성이 있어 펌핑을 통한 뒤채움재 타설이 가능하고, 이후 시간에 따라 양생되는 특성을 가지는 재료이다(Neelam, 2000). 특히, 연성관의 뒤채움재 시공시 연성관의 변형을 최소화하기 위해 뒤채움재의 강도가 충분히 커야하고, 이를 통해 관 상부의 하중을 뒤채움재로 분산되도록 하는 기능을 가져야 한다. 지하매설관은 그 특성상 빈번한 보수공사가 필요하다. 유지관리 및 보수를 위한 공사시 기존 시공된 구간의 재굴착이 선행되어야 하므로, 굴삭기 또는 인력으로 굴착할 수 있을 정도의 강도수준을 유지하여야 한다.

본 연구에서는 상기의 특성을 만족하는 뒤채움재인 유동성 뒤채움재(Controlled Low Strength Materials, CLSM)에 대한 연구로서 현장에서 발생하는 현장발생토사, 정수장처리장의 정수슬러지, 화력발전소의 플라이애쉬, 폐타이어 고무분말 등을 혼합한 유동성 뒤채움재의 최적배합설계 및 설계에 필요한 특성치를 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 국내외 연구동향

국내의 경우 기존의 토사 뒤채움재를 사용하는 경우에 매립된 관의 거동에 대한 연구는 있었으나 유동성 채움재와 관련된 기 수행된 연구는 초기단계이다. 최근 김주득 등(2007), 이관호 등(2003), 차민경 등(2007)의 관련연구가 수행되었다. 연구결과로는 과형강관을 성형하여 조립한 지중강관 구조물

의 하중지지 거동을 파악하고 구조적인 안정성을 분석하기 위하여 직경 6.25 m인 원형구조물 2기를 시험시공하고 이에 실규모 현장시험을 실시한 결과가 있다. 이관호, 박재현(2006년)은 과형강관을 이용한 하수관의 설계 및 시공에 관한 연구를 수행하였다. 현장발생토사의 재활용을 위하여 유동성 뒤채움재 활용에 관한 실내 및 현장시험을 수행하였다. 현장시험에서는 유동성 뒤채움의 현장타설시 발생 가능한 문제점 등을 평가하였다.

국외의 경우, Young(1984)은 뒤채움 흙의 종류에 따른 연성매설관의 변형양상에 대한 연구로써 트랜치(trench)내부에 채워진 흙의 강성도에 따라 연성관의 변형양상을 비교 및 분석하였다. 그 연구결과로써 뒤채움 흙의 강성도가 작은 경우에는 관은 일반적으로 타원모양의 변형양상을 보이나 보다 단단한 흙에서는 조금의 편차가 발생함을 밝히고 있다. Janardhanam 등(1992)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. 그 연구결과로써 일반적인 토사 성토와 플라이애쉬에 의한 성토 후 차량하중을 정적, 동적으로 가했을 때, 성토중에 매설한 파이프의 변위를 측정·비교함으로써 플라이애쉬가 일반 토사보다 성토재로서 우수함을 증명하였다. Halmen(2005년)은 텍사스주립대 토목공학과 박사학위 논문으로 “Physio-Chemical Characteristics of Controlled Low Strength Materials Influencing the Electro-Chemical Performance and Service Life of Metallic Materials”를 연구하였다. 주요 연구내용으로는 유동성 뒤채움재의 전기·화학적 특성이 메탈관의 수명에 미치는 영향을 검증하였다.

3. 실험재료의 물성평가

3.1 현장발생토사

시험에 이용된 현장발생토사의 지반/도로공학적 기본물성 평가를 위해 실내물성시험을 수행하였다. 실내 시험결과로 부터 통일분류법상 현장발생토사는 SP로 평가되었고, 단위중량 약 1.98t/m³로 나타났다. 액성한계, 소성한계 및 소성지수는 각각 27.06%, 24.84% 및 2.22%이다. 입도시험으로부터 균등계수(C_u) 14.0, 곡률계수(C_c) 1.06으로 측정되었다.

3.2 정수장 슬러지

본 시험에서는 천안-아산 수도관리단 정수 처리장에서 채취한 슬러지를 사용하였다. 국내 정수장의 슬러지 발생 및 처분 현황으로는 수처리 공정에서 응집 및 응집보조제인 황산알루미늄(Alum)과 폴리염화 알루미늄(PAE), 알칼리제인 소석회, 분말활성탄 등이 주로 사용된다. 또한, 수도용 고체 황산알루미늄(SAS)은 산화알루미늄(Al_2O_3)으로서 16.0% 이상, 액체 황산알루미늄(LAS)은 산화알루미늄으로서 8.0% 이상의 제품이 정수처리에 사용되었다.

정수슬러지의 기본물성시험 결과, 비중은 약 2.172, 초기합

그림 4. 정수슬러지 입자의 확대사진

그림 5. 정수슬러지의 원소분석 그래프

수비 373.2%, 액성한계 105.4%, 소성한계 39.9%로 나타났다. 정수슬러지의 구성요소를 분석하기 위해 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)시험을 통한 정수슬러지의 화학적 특성을 평가를 하였다. EDS시험은 원소의 분석 장비중 하나로서 보통 주사전자현미경(SEM)에 악세서리로 부착되어 일반적으로 사용한다. 즉, 일정 범위의 파장대를 샘플에 주사할 경우 각 원소마다 일정한 파장값에서 에너지를 나타내는 원리로 원소를 분석한다. **그림 4**는 정수슬러지를 확대한 사진 자료이다. **그림 5**는 정수슬러지의 성분분석 그래프를 보여주고 있고, 산소와 알루미늄 등의 비중이 큰 것으로 나타났다.

3.3 고무분말

국내 C사에서 판매되는 1 mm 규격의 스티렌-부타디엔 고무소재의 고무분말을 사용하였다. 고무 분말은 페타이어를 절단 분쇄하며 철심과 섬유질을 제거하여 분말형태로 만든 것이다. 현재 고무매트, 고무블럭, 탄성포장, 미끄럼 방지포장재 등에 쓰이고 있다. 주요특징으로는 천연고무보다 내마모성, 내노화성이 양호하고 값이 저렴하다는 것이 특징이다. **그림 6**은 고무분말형태이고, 고무의 비중은 0.93~0.94, 사용온도 범위는 -35°C~90°C이다.

그림 6. 고무분말

3.4 시멘트 및 플라이 애쉬

시멘트는 국내 A사에서 생산 및 판매되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트의 비중은 3.15를 적용하여 사용하였다. 플라이 애쉬는 국내 I사에서 판매되는 2종 플라이애시를 사용하였다. 입형은 대체적으로 일부 결정성 물질과 함께 약간의 탄소를 함유하는 유리구상이다. 플라이애시는 구형입자 속에 여러점의 구면을 포함하는 단단한 입자와 내부에 이산화탄소와 질소가스로 채워져 있는 중공체의 다공성입자로 구분된다. 또한 플라이 애시는 입자가 구상으로 되어 있어, 콘크리트에 혼합하였을 때 볼 베어링 작용에 의해 콘크리트의 유동성을 증가시키고 골재 사이의 공극을 충전시켜 블리딩 수의 통로를 적게함으로써 블리딩 현상을 감소 시켜주는 등 콘크리트의 제 성질에 양호한 영향을 미치는 요인으로 작용한다. 일반적인 물리실험 결과 밀도의 경우 1.9~2.3정도로 시멘트 비중의 2/3정도이며 분말도의 경우 3,000~4,000cm²/g범위이다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 최적배합설계

현장발생토사, 정수장슬러지 및 페타이어분말을 이용한 유동성뒤채움재의 최적배합설계 결정을 위해 표 1의 국외유동성뒤채움재 기준을 이용하여 표 2와 같은 목표기준값을 설정하였다.

유동성뒤채움재의 최적배합설계비 결정은 유동성시험과 일축압축강도 결과를 이용한다. 유동성시험은 실린더 몰드를 이

표 1. 국외 유동성뒤채움재의 기준

분류	일본	미국*
특성	현장 잔토 사용	현장잔토 사용하지 않음
대상시료	모래+점토	Fly Ash+모래 폐주물사+모래
유동성 (실린더법)	180~300 mm	31.5 mm이상
일축압축강도(q_u), kg/cm ²	- 1시간: 0.3상 - 4시간: 1.3이상 - 28일 : 5.6이하	- 4시간: 규정없음 - 3일 강도: 1.3이상 - 28일 강도: 2.1 -10.6
블리딩율	1%이하	-
침하	3 mm	3~6 mm

*ASTM(2004), National Ready Mixed Concrete Association(2006)

표 2. 설계 목표 기준치

목록	목표기준치
유동성(흐름값)	180~300 mm
일축압축강도(qu)	- 3일 강도: 1.3 kg/cm ² 이상 - 28일 강도: 2.1~5.6 kg/cm ²
블리딩율(%)	1%이하

그림 7. 유동성 시험

용한 ASTM D 6133 기준을 적용하였다.

유동성 채움재는 뒤채움재로써 충분한 유동성을 갖도록 하여 자기 수평능력을 가지게되고 뒤채움공간을 공극 없이 채울수 있어야한다. 이로 인해 다짐장비가 필요없는 것이 CLSM의 장점 중 하나이다. 그림 7과 같이 유동성 채움재의 유동특성을 결정하기 위해 7.5 cm(직경)×15 cm(높이) 한 면이 뚫린 실린더 및 30.4 cm×30.5 cm의 매끄러운 표면을 가진 유리판을 이용하였다. 한 면이 뚫린 실린더에 시료를 가득 채운 후 표면을 스트레이트 에지를 이용하여 정리한 후, 실린더를 유리판 위에 거꾸로 올려놓고, 유리판 위의 실린더를 들어올리면 실린더 안의 유동성 채움재가 유리판 위에 원형 상태로 퍼지게 되며, 이때 크기가 약 20~30 cm 정도가 되면 재료의 유동성이 확보되는 것으로 평가하였다.

일축압축시험 장비를 이용하여 유동성 뒤채움재 혼합물의 강도특성을 평가하였다. 시험은 원주형 공시체를 측방 구속이 없는 상태로 압축하여 파괴 시키는 시험으로 축 변형량과 하중을 측정하면, 파괴전 최대 전단강도를 결정하는 방법이다. 공시체는 선정된 배합비로 혼합한 후 Ø5 cm×10 cm의 몰드에 부어 3일, 7일, 28일을 양생 시켜 KS F 2314에 의해 변형속도를 분당 1.0 mm/min로 파괴시켰다. 본 실험에서는 28일 강도 기준치를 3.0~5.6 kg/cm²로 설정하였는데, 이 강도는 인력으로 굴착이 가능 한 정도의 강도이다. 강도 기준치의 만족하는 배합비를 얻기 위하여 예비실험의 배합범위 내에서 강도를 측정하여 이를 바탕으로 최적배합비를 결정하였고, 이를 표 3에 나타내었다.

4.2 일축압축강도 및 탄성계수

각 재령별로 3개의 공시체를 제작하여 일축압축시험을 실시하여 평균값을 사용하였고, 결과는 표 4에 나타내었다. 그래프에서 보는 것과 같이 재령 3일, 28일 강도 기준을 만족하는 것을 볼 수 있다. 일축압축강도 특성 시험결과, 정수슬러지와 고무분말로 인해 CLSM의 압축강도가 28일 양생시 일부 저하되는 현상을 보였다. 특히 정수 슬러지의 경우 미량이 포함되어있어도 대부분이 수분으로 이루어져있어 28일 재령시 공시체의 무게가 상당량 줄어들어 경량화로 인한 강

표 3. 최적배합비 (중량비)

재료 혼합물	현장 발생토*	플라이 애시	고무 분말	시멘트	물	W/C
Case 1	44%	20%	0%	10%	26%	260%
Case 2	41%	20%	3%	10%	26%	260%
Case 3	39%	20%	5%	10%	26%	260%

*현장발생토+정수슬러지5%함유

표 4. 재령별 일축압축강도

양생기간 혼합물	3일(kPa)	7일(kPa)	14일(kPa)	28일(kPa)
Case 1	2.06	1.96	3.46	3.63
Case 2	1.82	2.11	3.51	3.15
Case 3	2.06	2.30	3.37	3.74

표 5. 재령별 탄성계수

양생기간 혼합물	3일(kPa)	7일(kPa)	14일(kPa)	28일(kPa)
Case 1	122.4	186.9	509.9	750
Case 2	122.4	254.9	500.0	620
Case 3	127.5	229.4	460.0	650

도 저하 현상을 보인 것으로 판단된다. 탄성계수의 경우 KS F 2314에 따라 변형률에 따른 응력그래프를 작성하여 $E_{50}=\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ 을 이용하였고, 이를 표 5에 나타내었다.

4.3 삼축압축시험

이 시험은 원주형 공시체의 지중에서 응력상태를 재현하도록 측방에서 액압을 가하고 측방향에서 압축하여 전단하는 시험이다. 전단속도는 1.0 mm/min으로 설정하였으며 배합당 3개의 공시체를 제작하여 변형률에 따른 삼축압축강도와 탄성계수를 구하였다. 비압밀 및 비배수조건(UU조건)에서 삼축 압축시험을 수행하였다. 지반의 구속압을 176 kPa를 가한 상태로 측방향 하중을 가하여 전단응력을 측정하였다. 그로 인

표 6. 재령별 삼축압축강도

양생기간 혼합물	3일(kPa)	7일(kPa)	14일(kPa)	28일(kPa)
Case 1	464.9	581.2	570.1	636.4
Case 2	430.7	559.0	541.9	587.7
Case 3	404.9	558.8	546.4	656.5

표 7. 삼축 압축을 이용한 탄성계수(MPa)

양생기간 혼합물	3일	7일	14일	28일
Case 1	7	8.3	11.0	56.3
Case 2	6.25	8.8	13.0	32.0
Case 3	7	9.5	20.0	35.0

그림 8. 공진주시험(Impact Resonance Test)

표 8. 자유단 공진주시험을 이용한 탄성계수 산정

혼합물	양생일	밀도(t/m^3)	E(Mpa)
Case1	7일	1.83	234.31
	14일	1.66	386.60
	28일	1.53	818.15
Case2	7일	1.81	140.48
	14일	1.60	344.84
	28일	1.48	701.27
Case3	7일	1.77	130.66
	14일	1.63	246.13
	28일	1.44	709.08

하여 발생한 변형률에 따른 전단응력 및 탄성계수를 측정하였고, 이를 표 6 및 표 7에 제시하였다.

4.4 자유단 공진주 시험을 이용한 탄성계수 평가

그림 8은 공진 주파수를 이용하여 시편의 탄성계수를 구하는 시험이다(ASTM). 충격반향식 자유단 공진주 시험을 통하여 측정된 값을 $E = \rho \times V_c^2$ 이 식에 따라 탄성계수를 산정하였다. 측정된 결과는 표 8에 나타내었다.

4.5 pH 측정시험

콘크리트 노화나 강철재료의 부식문제, 연약지반이나 고유기질토 등에서의 지반개량, 산업폐기물 처리나 무공해화를 위한 시공 등의 검토에 중요한 지표이다. 대체로 흙의 pH가 6.5이상인 구조물에 직접적인 영향은 없지만 5.5이하이면 직접적인 영향을 미치므로 그림 9와 같이 측정을 실시하였다(KS F 2013 규정). pH는 수용액의 산/알칼리성의 지표로, 배합 직후와 28일 후의 혼합물에 개한 시료를 채취하여 시료와 물을 1 : 2~3 비율로 혼합하여 pH-meter (Thermo-Orion5star)로 측정하였다. 실험결과 고화재 자체의 pH는 11.1로 측정되었다. 또한 표 9에 나타난 것과 같이, 배합직후와 28일 양생시킨 후 측정된 pH는 10.47~11.45 범위로 고화재와 비슷한 알칼리성을 나타내었다.

그림 9. pH 시험 측정 장비 및 세팅

표 9. pH 측정값

혼합물 \ 양생기간	배합직후	28일
Case1	11.2	10.47
Case2	11.28	10.58
Case3	11.45	10.59

5. 결 론

현장발생토사, 정수장슬러지 및 페타이어분말을 이용한 유동성 뒤펀재의 실내물성시험으로 부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 실험재료의 물리/화학적 특성평가 결과 사용 현장 발생토의 통일분류법상 흙의 분류는 SP이고, 단위중량은 1.98이다. 정수슬러지는 대부분이 수분으로 이루어 있고, 현장함수비가 매우 높으므로 취급시 주의가 필요하다.
- 2) 국외 유동성 뒤펀재의 기준을 바탕으로 CLSM 목표 기준을 정하여 예비실험을 실시하였으며 일축압축목표강도는 $3.0 \sim 5.6 \text{ kg/cm}^2$ 으로 기준을 하고 최적 배합비를 선정하였다. 그 결과 현장발생토 39~44%(정수슬러지 5%함유)플라이 애시 20% 고무분말0~5% 물26% 물/시멘트 비 260%로 설정하게 되었으며 초기 강도는 1.82~2.07/로 초기강도 기준치인 1.4보다 높은 값을 얻을 수 있었고 최종강도 또한 3.15~3.74/로 기준치인 $3.0 \sim 5.6 \text{ kg/cm}^2$ 범위에 포함되는 것으로 보아 목표로 한 기준치에 만족하다고 볼 수 있었다. 삼축압축강도 결과 지반의 구속압을 가정하여 176 kPa 가한 상태에서 $5.88 \sim 6.57 \text{ kg/cm}^2$ 의 축차응력 값을 얻을 수 있었다.
- 3) 공진주 실험을 이용한 탄성계수 산정결과 100~800 MPa의 결과가 산정되었다. 양생 시간이 증가함에 따라 측정된 탄성계수가 증가하다.
- 4) pH테스트의 경우 배합직후에서 보다 28일 측정값이 작게 나오는 것으로 보아 미세하지만 시간에 따라 pH 감소한다.

감사의 글

본 논문은 2010년 한국연구재단 일반연구지원사업의 지원하에 수행되었습니다.

참고문헌

- 김주득, 조경래, 이관호, 조재운, 이병식 (2007) 재활용 준설토를 이용한 지하매설물용 뒤채움재, **한국도로학회 봄 정기학술발표회**, pp. 115-122.
- 이관호, 박재현 (2006) 파형강관을 이용한 유동성뒤채움재의 설계 및 시공법 **한국도로학회**, 제8권, 제2호, pp. 63-74.
- 이관호, 박재현, 조재운, 조윤희 (2003) 유동성 채움재의 토압경감효과 연구, **대한토목학회 학술발표대회 논문집**.
- 차민경, 조경래, 이관호, 이병식, 조재운 (2007) 현장발생토사 재 활용을 위한 다짐특성평가, **한국폐기물학회 정기학술발표회**.
- ASTM (2004) Innovations in Controlled Low-Strength Materials(Flowable Fill), ASTM STP 1459, pp. 159.
- Halmen, C. (2005) Physiochemical Characteristics of Controlled Low Strength Materials Influencing the Eletrochemical Performance and Service Life of Metallic Materials, Ph.D Thesis, Texas A&M University, pp. 281.
- Janardhanam, R., Burns, F, and Peindl, R. D. (1992), Mix design for flowable fly-ash backfill material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 4, No. 3, August, pp. 252-263.
- National Ready Mixed Concrete Association (2006) Guide Specification for Controlled Low Strength Materials(CLSM), Specification Guide.
- Neelam, M.K. (2000) Influence of Backfill Matreials on the Performance of Thin Plastic Pipe, MS Thesis, Univeristy of Houston, TX, USA.
- Young, O.C. and J.J. Trott (1984) *Buried Rigid Pipes*, Elsevier Applied Science Publishers.

◎ 논문접수일 : 10년 12월 23일

◎ 심사의뢰일 : 10년 12월 24일

◎ 심사완료일 : 11년 04월 06일