

바툼애쉬를 이용한 환경친화적 뒤채움재의 실내모형실험

이관호^{1*}, 이경중¹

¹국립공주대학교 건설환경공학부

Small Scaled Laboratory Test of Eco-Friendly Backfill Materials with Bottom Ash

Kwan-Ho Lee^{1*} and Kyung-Jung Lee¹

¹Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요 약 바툼애쉬와 현장발생토사를 혼합한 유동성뒤채움재를 이용하여 실내모형실험을 수행하였다. 실내모형실험은 현장조건을 최대한 유사하게 모사하여 시공단계를 고려하여 실시하였다. 모형실험결과 뒤채움재 타설과정시 발생하는 최대수직변위는 4.43mm~6.6mm, 최대수평변위는 5.49mm~15.9mm로 나타났다. 하중재하시 최대 수직 변위는 2.41mm~8.69mm이고 최대 수평 변위는 3.02mm~4.25mm로 측정되었다. 하중을 제거한 후의 잔류변형은 수직방향 1.40mm~5.93mm, 수평방향 1.66mm~2.53mm로 나타났다. 동일한 크기의 하중재하시 일반모래뒤채움에 비해 유동성 뒤채움재의 수직 및 수평변위가 작게 나타났다. 유동성뒤채움의 경우 수평토압 경감효과가 크게 나타났다. 또한, 지표 침하량의 경우 모래에 비해 유동성 뒤채움재에서 크게 경감되는 것으로 나타났다.

Abstract A small-scale chamber test laboratory for controlled low strength materials with bottom ash and recycled in-situ soil have been carried out. Laboratory test which was simulated during construction stage was conducted. The vertical deflection of 4.43mm to 6.6mm, and the horizontal deflection of 5.49mm to 15.9 mm were measured during backfilling. In case of loading, the vertical deflection of 2.41mm to 8.69mm, and the horizontal deflection of 1.66mm to 2.53mm were measured. Its residual deflections were 1.40mm to 5.93mm for vertical and 1.66mm to 2.53mm for lateral. The vertical and horizontal deflection of controlled low strength materials were smaller than that of sand backfill. Also, it was same trend for the measured surface settlement.

Key Words : Bottom ash, Controlled low strength materials, Small-scale chamber test, Vertical deflection

1. 서론

산업과 문명의 발달로 도시는 과밀화되고, 이로 인해 주거공간 및 생활활동 공간이 부족한 실정이다. 사회간접 자본시설 중의 하나인 지하매설관은 일상생활 및 산업활동에 필요한 상수, 하수, 도시가스 및 전력을 공급하는 중요한 국가 기간시설물이다. 이러한 중요한 국가시설물의 설계, 시공 및 유지관리에 대한 많은 관심과 연구가 진행 중에 있다[1].

지하매설관의 파손은 주로 관자체의 문제 및 관주변에 채워지는 뒤채움재의 부적절한 재료선정과 부실시공에

의해 발생한다. 특히, 원형관로의 경우 관의 하단부 뒤채움시 다짐이 어려워 설계기준 다짐강도를 맞추기 어렵다. 이러한 조건에서 강우로 인한 빗물침투 및 지하수위의 상승·하강으로 인한 베딩제 및 뒤채움재의 침하가 발생한다. 이러한 침하는 관의 접촉부에 균열 및 파손을 일으키게 되고, 관로스시스템 전체의 효율성을 크게 감소시키게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유동성뒤채움재를 이용한 관로 뒤채움재 적용성을 평가하고자 한다. 유동성 뒤채움재의 경제성을 확보하기 위하여 현장에서 발생하는 현장발생토사, 화력발전소에서 발생

본 논문은 한국연구재단 기초연구사업 일반연구자지원사업(2009.09~2011.08)의 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kwan-Ho Lee

Tel: +82-10-9932-4798 e-mail: kholee@kongju.ac.kr

접수일 12년 01월 06일

수정일 12년 03월 07일

게재확정일 12년 04월 12일

하는 바텀에쉬[2] 등 재활용재료를 적극 이용하였다.

본 연구는 바텀에쉬와 현장발생토사를 이용한 유동성 뒤채움재의 지하매설물 적용성을 평가하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였다. 매설관은 연성관인 플라스틱관을 이용하였고, 지표면변위계, 관주변에서 발생하는 수평 및 수직토압을 측정하기 위한 토압계, 관의 수직 및 수평 변위를 측정하기 위한 내공변위계, 관의 표면에서 발생하는 변형을 측정하기 위한 스트레인게이지 등 다양한 계측기를 설치하여 하중에 따른 계측값의 변화를 측정하여 분석하였다.

2. 지하매설관의 설계법[3][4]

지하매설관의 설계는 토압 및 활하중등을 고려한다. 토압에 가장 널리 이용되는 공식으로 연직토압은 굴착도랑 바로위의 흙기둥 중량의 전체가 관에 전달되지 않고 굴착면에 인접하는 흙기둥 사이의 전단마찰력을 상쇄한 하중이 관에 작용하는 것으로 하여 구한다. 여기서, 마찰 전단력은 이들 토압의 상대적 침하로 결정되며, 여기에는 수평토압이 관련된다. Marston 공식에서는 이 수평토압에 랭킨(Rankine)공식을 이용한다. 일반적으로 사용되는 Marston 공식 $W=C_1 \times Y \times B$ 을 이용한다. W는 관이 받는 하중(t/m^2), Y는 매설토의 밀도(t/m^3), B는 폭요소(width factor)로서 관의 상부 90°부분에서의 관매설을 위하여 굴토한 도랑의 폭(m), C_1 은 토피의 두께의 두께와 종류에 따라 결정되는 상수이다.

관의 탄성계수(stiffness)는 ASTM D2412에 의거 산출한다.

$$P_s = \frac{EI}{0.149r^3}$$

관의 허용외압은 ASTM D2412에 의거하여 관의 5% 변형율을 적용한다.

$$W_c = \frac{0.149P_s + 0.061E'}{F_k \times F_d} \Delta D$$

여기서,

$$E' = 70kg/cm^2 \text{ 적용(흙의 반력 계수)}$$

$$F_k = 0.089 \text{ 적용(기초 지지각에 의한 계수)}$$

$$F_d = 1.50 \text{ 적용(변형 지연 계수)}$$

매설관에 작용하는 총하중에 의하여 관(연성관)은 변형을 가져온다. 관의 변형은 관 상부의 하중과 관의 탄성

계수와와 비로서 구할 수 있다. 그러나 관의 탄성계수는 관과 흙에 상호 복합적으로 하중이 작용하므로 흙의 강성과 관의 강성을 같이 고려해야 한다. 즉, 관의 변형 = 하중/(관의강성 + 흙의 강성) 이 된다. 이중벽관과의 허용 변형량은 보통 관내경의 5% 이하로 제한되며, 변형량은 Spangler공식에 의하여 산출한다

$$\Delta h = F_d \times \frac{F_k \times W \times R^3}{EI + 0.061E'R^3}$$

여기서,

$$\Delta h = \text{수평변형량(Cm)}$$

$$F_d = \text{변형지연계수(통상 1.5적용)}$$

$$F_k = \text{기초각에 의한 계수(통상 0.1적용)}$$

$$W = \text{관의 단위 길이당 연직하중(Kg/cm}^2 \text{)}$$

$$R = \text{관의 반경(Cm)}$$

$$E = \text{관 재료의 탄성계수(Kg/cm}^2 \text{)}$$

$$I = \text{관의 단면 2차 모멘트(cm}^4 \text{)}$$

$$E' = \text{관 재료의 탄성계수(Kg/cm}^2 \text{)}$$

3. 모형토조실험

3.1 실험재료

모형토조실험에 이용된 재료조합은 현재 사용되고 있는 일반모래뒤채움재(Case A)와 재활용재료를 이용한 유동성뒤채움재(Case B & C) 등 총 3개의 재료조합을 이용하였고 최적배합비는 표 1과 같다.

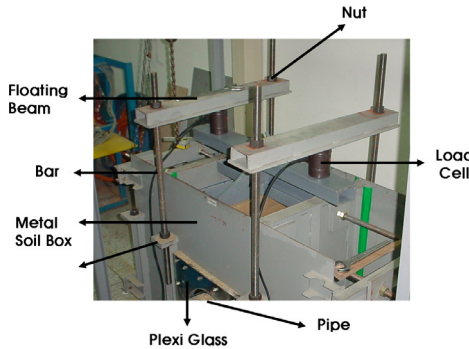
[표 1] 최적배합비(%) 결정
[Table 1] Optimum Mix Ratio(%)

혼합물	재료	모래/현장 발생토	바텀 에쉬	플라이 에쉬	고무 분말	시멘트	물
Case A		100	-	-	-	-	-
Case B		35	30	10	-	3	22
Case C		32	30	10	3	3	22

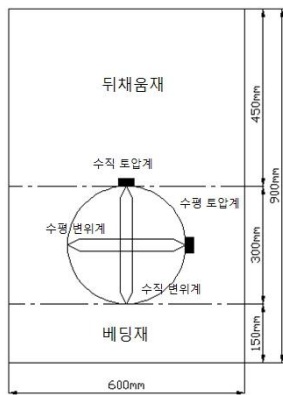
3.2 모형토조 실험장치

본 연구에서 사용된 모형 토조의 크기는 가로 140cm, 세로 60cm, 높이 90cm의 강재로 제작된 토조로 가로의 길이는 측면판의 위치를 이동하여 조절이 가능하게 제작하여 실제 실험에서 유동성 뒤채움재가 타설되는 가로 길이를 80cm로 설정하였다[그림 1]. 또한 실험에서 조건을 단순화하기 위해 토조 내부벽에 방청제를 도포한 후 페인트칠을 하고 비닐을 부착하여 벽면과 마찰의 경향이

최소화될 수 있도록 하였다. 모형 토조에 설치된 계측 장비는 총 3종류로 토압계와 변위계, 스트레인 게이지로 매설관의 내공변위를 측정하는 수직·수평 변위계와 관 주변에 발생하는 토압을 측정하기 위한 토압계를 매설관 수직부와 수평부에 설치하였고 관의 횡·종단에 변형특성을 측정하기 위해 스트레인 게이지를 그림 2와 같이 설치하였다.



[그림 1] 모형토조시험장비
[Fig. 1] Setup for Small-Scaled Lab. Test



[그림 2] 계측기설치
[Fig. 2] Installation of Measuring Devices

매설관으로 사용된 PVC관은 원형관으로 직경 300mm, 두께 3mm를 선택하였으며, PVC관의 탄성계수는 $2.7 \times 105\text{kN/m}^2$, 단위중량은 14.02kN/m^3 이다.

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 알기 위하여 스틸용(WFLA-3-11-1L) 변형률 게이지를 사용하였다. 또한, 하중재하 측정을 위하여 CRC-2T 제품을 사용하였고, 하중판과 관의 침하량을 측정하기 위해

KTR - 50mm 제품을 사용하였다. 위에서 언급한 계측기를 이용한 측정을 위해 정적변형시스템(Static data logger)을 사용하였다.

3.3 실험과정

실험을 그림 3에 나타난 것과 같은 순서를 따라 시행되었다.

- (1) 초기상태 : 실험조건을 단순화하기 위해 벽면마찰의 영향을 최소화할 수 있도록 모형토조 표면에 방청제를 칠한 후 페인트를 덧칠하고, 매끈하게 비닐을 부착하였다.
- (2) 베딩재 조성 : 베딩재를 조성하기 위하여 1층에 일반모래 25kg를 채운 후 자체 제작된 다짐롤러를 이용하여 100회 다짐을 3층 실시하였다.
- (3) 매설관의 설치 : 베딩재위에 PVC관을 설치하고, 수직·수평 변위계와 횡단·종단방향 변형률 게이지를 관의 내·외부에 부착하였다.
- (4) 뒤채움재 타설 : 타설될 뒤채움재를 8회에 나누어 토조내에 타설하며 베딩재와 설치되어 있는 계측장비의 파손이 없도록 1회 타설시마다 적당량의 바이브레이션 효과를 주어 재료 자체의 유동성을 통한 타설을 실시하였다.
- (5) 하중 재하 및 제하 : 30cm의 하중판을 이용하여 하중을 재하하였고, 로드셀에 의해 측정된 하중의 합산값이 최대값으로 판단하였다. 하중의 재하는 초기 재하시 가장 큰 하중을 받았으며 약 2분간 안정화를 거친 후 다시 재하 4회 실시 하여 최대 하중까지 하중을 가하였고, 제하 역시 한 번의 하중 제하를 거친 후 약 2분간의 안정화를 거쳐 하중을 제하하였다.



(1) 초기상태

(2) 베딩재



(3) 관 및 계측기 설치

(4) 뒤채움재시공



(5) 하중재하시험 (6) 계측장비

[그림 3] 실험과정
[Fig. 3] Process of Installation for Test

4. 결과분석

4.1 뒤채움재 타설과정 중 발생하는 변위

유동성 뒤채움재 타설시의 수직변위는 초기 압축 후 매설관이 모두 매설된 후부터 인장의 모습을 보여 유동성이 강한 재료의 특성 때문에 안정화 되는 모습을 보인다. 타설 초기 관주위로 뒤채움재가 채워졌을때는 뒤채움재로 인한 측압이 발생하여 수직변위는 (+)의 값인 인장을 보이고 수평 변위는 (-)값인 압축의 값을 보이나 뒤채움재가 관을 덮고 위로 계속적인 타설이 실행되면 뒤채움재의 자중에 의해 수직변위는 압축되고 수평변위는 인장된다. 측정된 최대수직변위는 압축으로 인한 0.443cm~0.66cm, 최대수평변위는 인장으로 인한 0.549cm~1.59cm로 나타났다. 관의 직경이 30cm이므로 수직 변형률은 약 1.476%~2.2%, 수평변형률은 약 1.83~5.3%의 결과값을 보였다. 타설 중 관내부의 수직·수평 변위는 타설 속도와 상관관계가 있는 것으로 보이며, 타설 후 유동성뒤채움재의 유동성에 의하여 시간이 지남에 따라 변위량이 적어지는 것을 확인할 수 있었다. 에 발생하는 변형에 대한 결과는 관의 길이방향의 변형을 나타내는 종단 변형과 관의 길이방향과 수직으로의 변형을 나타내는 횡단 변형의 결과값을 보여주고 있다. 타설과정에서 발생하는 변형은 하중을 재하 하였을 때보다 작은 값을 나타내었다. 관의 길이방향의 값을 측정할 종단변형보다 길이방향과 수직으로 설치된 횡단변형의 결과값이 다소 크게 나타났으며 관의 압축에 의한 결과값이라고 예상된다.

4.2 뒤채움재 타설후 하중에 의한 변위

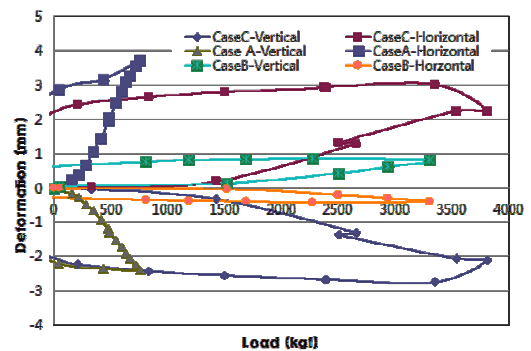
일반모래를 뒤채움재로 사용한 경우 뒤채움의 위에 도로포장등의 다른 조치가 없는 상태로 실험이 진행되었기 때문에 점착력등이 매우 낮은 모래의 특징에 의해 양생에 의해 강도를 발현하는 뒤채움재와 다르게 하중자체를 크게 받지 못하였다. 일반모래를 뒤채움재로 사용한 경우

의 총 하중은 약 760kgf까지 재하하였으며 이는 유동성 뒤채움재에서의 하중값과 비교하여보면 약 5배 정도 작은 값인 것을 확인할 수 있다. 일반모래 뒤채움인 경우는 하중 제거 역시 빠르게 하중에 제거되는 것을 확인할 수 있었다. 유동성 뒤채움재의 경우는 약 3300kgf~3800kgf까지의 하중을 재하하였으며, 이 무게는 짐을 적재한 소형트럭의 교통하중의 값이다.

하중 재하시 발생한 관의 수평 및 수직변위는 관내부에 설치된 내공변위계를 이용하여 측정하였고, 실험결과는 표 3 및 그림 4에 나타내었다.

[표 3] 하중에 의해 발생하는 변형
[Table 3] Strain during Loading

하중 및 변위		재료		
		Case A	Case B	Case C
최대하중(kgf)		760	3303	3809
하중 재하	수직 변위(mm)	2.41	8.69	2.74
	수평 변위(mm)	3.72	4.25	3.02
하중 제거후	수직 변위(mm)	1.40	5.93	1.99
	수평 변위(mm)	1.66	2.54	2.14

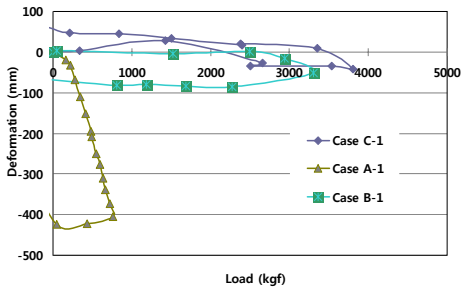


[그림 4] 관변형(mm)측정결과
[Fig. 4] The Deflection(mm) of Pipe

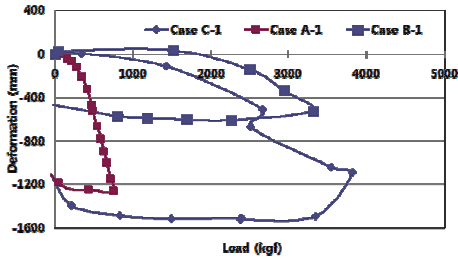
최대 수직 변위는 -2.41~ -8.69mm이고 최대 수평 변위는 3.02~4.25mm로 측정되었다. 하중을 제거한 후의 잔류변형은 수직방향 -1.40~-5.93mm, 수평방향 1.66~2.53mm로 나타났다. 하중 제거시 회복되는 변형량은 수직방향 -0.75~-2.76mm, 수평방향 0.88~2.06mm로 각각 회복 변형률은 27.37~41.91% 및 29.14~55.38%로 측정되었다. 일반 모래의 회복변형률이 수직과 수평 모두에서 가장 큰 값으로 나타났으며 이는 유동성 채움재보다 약 10~25% 정도 큰 값으로 유동성 뒤채움재와 다르게 입

자간의 점착력이 없는 성질에 의해 하중의 제거에 따른 회복이 큰 것으로 판단된다.

횡단 방향의 변형을 알아보기 위해 그림 5와 같이 설치한 스트레인 게이지의 결과를 보면 일반모래 뒤채움과 다르게 유동성 뒤채움재들의 양상은 하중이 재하됨에 따라 크게 증가하는 양상을 보이며 이는 양생으로 인한 매설관과 뒤채움재의 일체화 된 것으로 판단된다. 횡단 변형 게이지와 종단 변형 게이지의 양상은 비슷하게 보이나 결과값은 4 - 5배의 차이가 나는 것을 확인하였다. 이는 관의 변형이 횡방향으로 변형이 더 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다.



(a) Vertical



(b) Horizontal

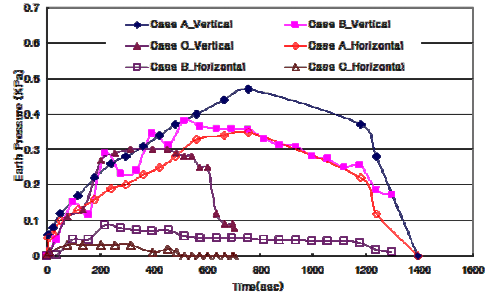
[그림 5] 스트레인게이지 측정결과
[Fig. 5] Results of Strain Gage

4.3 뒤채움재 타설후 하중에 의한 토압변화

유동성 뒤채움재를 사용한 실험에서 하중 재하시 측정된 최대수직토압과 하중 제거 후 잔류수직토압을 측정하였다. 하중 재하 후 재하시 수직토압의 경감효과는 각각 50%와 36.67%의 수준을 나타내었으며, 일반모래 뒤채움의 경우는 토압의 크기는 유사한 결과를 보였으나 재하된 하중과 함께 고려하여 본다면 증가되는 토압의 크기는 유동성 채움재의 약 4 - 5 배 작은 값이므로 토압에도 취약한 것을 알 수 있다. 그림 6의 시간대별 결과 그래프에서 보이듯이 시간대별 토압의 결과 중 수직 토압은 하

중의 재하 및 제하의 특성과 거의 동일한 특성을 보이는데 수직토압은 수직하중의 크기와 밀접한 관계가 있음을 의미한다.

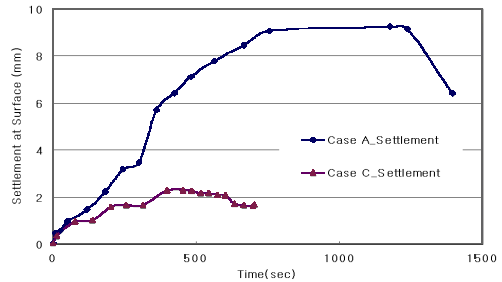
일반모래의 경우 수평 토압은 수직 토압보다 약간 작은 값을 보이거나 비슷한 경향을 보이며 하중의 증가에 따라 수평 토압 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 유동성 뒤채움재를 사용한 실험에서는 수평토압 상당부분이 감소하는 결과를 보였다. 이는 사용된 유동성 뒤채움재가 양생되면서 관과 일체화되는 것을 의미한다.



[그림 6] 토압(kPa)
[Fig. 6] Earth Pressure(kPa)

4.4 뒤채움재 타설후 하중에 의한 지표침하

지표침하량은 그림 7에 나타난 것과 같이 Case A 일반 모래의 경우 최대 9.25mm, Case C의 경우 최대 2.27mm의 침하량을 보였다. 유동성 뒤채움재의 경우 양생을 통한 자기강도발현의 효과로 인해 모래에 비해 하중으로 인한 지표침하량이 적게 발생하였다. 그림 8은 하중재하관 주변에 발생한 균열형상을 보여주고 있다. Case A의 경우 다짐밀도가 작아서 주로 연직방향으로 압축변형이 생겼고, 이에반해 Case B 및 C의 경우 유동성 뒤채움재의 강도로 인해 하중재하관 주변에 균열이 발생하였다.



[그림 7] 지표침하량(mm)
[Fig. 7] Settlement at Surface(mm)



Case A Case B Case C

[그림 8] 파괴형상
[Fig. 8] Failure Shape

5. 결론

바탕애쉬 및 현장발생토사를 이용한 지하매설관용 뒤채움재에 대한 실내모형실험을 수행하였다. 시공단계를 최대한 모사하여, 시공단계별로 각종 계측을 하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 측정된 최대수직변위는 압축으로 인한 0.443cm ~ 0.66cm, 최대수평변위는 인장으로 인한 0.549cm ~ 1.59cm로 나타났다. 관의 직경이 30cm이므로 수직 변형률은 약 1.476%~2.2%, 수평변형률은 약 1.83~5.3%의 결과값을 보였다.
- (2) 최대 수직 변위는 -2.41~-8.69mm이고 최대 수평 변위는 3.02~4.25mm로 측정되었다. 하중을 제거한 후의 잔류변형은 수직방향 -1.40~-5.93mm, 수평방향 1.66~2.53mm로 나타났다. 하중 제하시 회복되는 변형량은 수직방향 -0.75~-2.76mm, 수평방향 0.88~2.06mm로 각각 회복 변형률은 27.37~41.91% 및 29.14~55.38%로 측정되었다.
- (3) 수직토압의 경우 역시 재하된 하중의 크기가 작은 일반모래 뒤채움과 일반모래에 비해 비교적 큰 하중을 받은 유동성 뒤채움재의 결과값의 크기가 비슷한 범위로 확인되어 유동성뒤채움재가 일반모래에 비해 수직토압에 있어 더욱 안전한 것으로 사료된다.
- (4) 지표침하량은 Case A 일반 모래의 경우 최대 9.25mm, Case C의 경우 최대 2.27mm의 침하량을 보였다. 유동성 뒤채움재의 경우 양생을 통한 자기강도발현의 효과로 인해 모래에 비해 하중으로 인한 지표침하량이 적게 발생하였다.

References

- [1] Korean Society of Water and Wastewater (2011), "A Study on Deformation Guideline of Sewage Pipeline",

Final Report, KSWW, pp. 278

- [2] Korea Midland Power Co. LTD (2008), "Product Technology of Aggregate of Pavement with Bottom Ash, Final Report of KOMIPO, pp. 249.
- [3] Lee, K. & Kim, S. (2011), "Backfill Materials for Underground Facility with Recycling Materials - Quantification of Design Parameters", Vol. 11, No. 3, Korean Society of Hazard Mitigation, pp. 91-96
- [4] ASTM (2004), "Innovations in Controlled Low-Strength Materials(Flowable Fill), ASTM STP 1459, pp. 159.

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
도로공학 및 지반공학

이 경 중(Kyung-Jung Lee)

[준회원]



- 2010년 2월 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부(공학석사)

<관심분야>
도로공학 및 지반공학