

## 바텀애시를 이용한 환경친화적 뒤채움재

이관호<sup>1\*</sup>, 김성겸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 건설환경공학부

## Eco-Friendly Backfill Materials with Bottom Ash

Kwan-Ho Lee<sup>1\*</sup> and Seong-Kyum Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

**요 약** 바텀애시와 현장발생토사를 혼합한 유동성뒤채움재에 실험적 연구를 수행하였다. 유동성과 일축압축강도를 이용하여 4가지 다른 배합조건에 대한 각각의 최적배합비를 결정하였다. 현장발생토 25-45%, 바텀애시 30%, 플라이 애쉬 10-20%, 고무분말 0-3%, 시멘트 3% 및 물 22%의 범위에서 최적배합비가 결정되었다. 각각의 혼합물은 20cm 이상의 유동성, 3일 양생시 127 kPa 및 28일 양생시 206-980 kPa 일축압축강도 조건을 만족하였다. 시험재료는 상온 양생 및 습윤양생 2가지 조건을 이용하였다. 전체 혼합물에 대한 변형계수(E50)는  $0.07-0.08 * q_u$  로 나타났다. 또한, 습윤양생 시편의 일축압축강도가 상온양생 시편에 비해 약 10% 정도 큰 값을 나타내었다. 전체혼합물의 내부마찰각은 36.5-46.6도, 점착력은 49.1-180 kPa 범위로 측정되었다. 고무분말이 추가된 case 4번의 경우 다른 case에 비해 점착력은 크게, 내부마찰각은 작은 값을 나타내었다. 유동성채움재의 공용 성능을 위해 실시한 pH실험 결과 배합초기 12이상 강알칼리성으로 평가되었다.

**Abstract** Couple of laboratory for controlled low strength materials with bottom ash and recycled in-situ soil have been carried out. The optimum mix ratios for 4 cases with flowability and unconfined compressive strength were determined. The optimum mixing ratios were 25 to 45% of insitu soil, 30% of bottom ash, 10 to 20% of fly ash, 0 to 3% of crumb rubber, 3% of cement and 22% of water. Each mixture was satisfied the standard specification, minimum 20cm of flowability and 127 kPa of unconfined compressive strength. Two different curing methods, at room temperature and wet condition, were adopted. The average secant modulus(E50) was  $0.07$  to  $0.08 * q_u$ . The compressive strength at wet condition showed 10% larger than at room temperature. The range of internal friction angle and cohesion for mixtures were 36.5o to 46.6o and 49.1 to 180 kPa, respectively. The mixture with crumb rubber(case 4) showed higher cohesion and lower internal friction angle than the others. The pH of all the mixtures was over 12 which is strong alkali.

**Key Words** : Bottom ash, Cohesion, Controlled low strength materials, Unconfined compressive strength

### 1. 서론

현대 도시의 팽창과 산업화로 인하여 전력 사용량은 지속적으로 증가하고 있으며 그로 인해 2010년 현재 국내 화력발전소 10곳에서 전력을 생산하고 있으며, 화력발전기의 추가 건설 예정까지 확정되어 있어 화력발전소의 부산물인 석탄회 발생량이 2015년에는 800만톤을

넘어설 것으로 예상되고 있다. 석탄회 중 15~20%를 차지하는 바텀 애시의 경우 플라이 애시에 비해 연구 및 적용 실적이 미미한 실정으로 인하여 대부분 매립·폐기되고 있다. 그로인한 환경오염과 매립지 포화로 인한 새로운 매립지나 처리시설의 확충이 필요 불가결하게 되므로 바텀 애시를 효율적으로 이용하고 재활용할 수 있는 기술이 필요하다[1].

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

\*교신저자 : Kwan-Ho Lee

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

접수일 12년 01월 06일

수정일 12년 03월 07일

게재확정일 12년 03월 08일

또한, 각종 공공사업과 관련하여 해마다 많은 양의 현장발생토가 발생하고 있으며, 앞으로도 지속적인 도시건설 및 항만 유지 관리로 인하여 현장발생토의 발생량은 꾸준히 증가할 것으로 전망되고 있다. 국내에서 발생되는 현장발생토는 일반적으로 매립부지 확보 및 주변환경오염, 경관피해, 처리비용 상승과 연안환경의 심각한 오염 문제등과 같은 많은 문제점을 야기하고 있다[2].

이처럼, 지속적 발생이 확실하고 처리에 있어 많은 문제점들이 대두되고 있는 바텀애시와 현장발생토를 재활용할 수 있는 방안 중 효율적인 친환경복합지반재료의 개발의 연구가 수행되고 있다. 국외에선 이미 현장발생토를 단순매립하기 보다는 현장발생토의 특성에 따라 해양환경 복원 및 인공서식지 조성, 친환경적인 친수 공간 개발 등의 건설로 적극적으로 활용하고 있으며, 일본에서는 경량기포 혼합토가 개발되어 항만 구조물, 도로 성토재 및 뒤채움재료로써 다양한 공사 현장에 사용되어지고 있으며, 석탄회의 재활용역시 국토가 상대적으로 협소한 국가를 중심으로 재활용 기술 분야에 대해 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 허나, 국내에서는 바텀애시를 대상으로 한 연구 개발은 플라이애쉬에 비해 상대적으로 취약한 상태이며 현장발생토 및 바텀애시를 이용한 뒤채움재를 개발하여 도로 구조물 하부지반 구조물의 되메우기 재료로서 적용한 사례는 거의 전무한 상태이다.

본 연구는 바텀애시와 현장발생토사를 이용한 지하매설관용 유동성뒤채움재로 활용하기 위한 기초연구이다. 바텀애시와 현장발생토사를 이용한 유동성뒤채움재의 기본물성평가, 유동성과 일축압축강도를 이용한 최적배합설계, 삼축압축시험을 이용한 점착력 및 내부마찰각, pH 특성등을 평가하였다.

## 2. 국내외 연구현황

바텀애시의 재활용에 관한 국내의 연구 동향은 바텀애시를 콘크리트 잔골재로 치환하는 단순 건설재료로 활용하는 것이 주를 이루고 있다. 모르타르의 잔골재 대체로 바텀애시를 사용할 경우 바텀애시를 사용하는 경우 바텀애시의 다공질 특성으로 인해 동일 시공성을 만족시키기 위한 수량과 시멘트의 중량비인 겉보기 물시멘트비는 바텀애시 치환율이 증가 할수록 증가하는 것으로 밝혀졌으나 발전소 별로 발생하는 바텀애시의 종류에 따라 다른 값을 보였다. 바텀애시를 사용한 모르타르의 압축강도는 바텀애시 치환율이 증가 할수록 크게 저하되고 있으나 일부 바텀애시에서의 경우 치환율 25%에서의 강도 저하 비율이 10% 이내로 나타나 이는 활용가능성이 존재하였

다. CSA, CaSO<sub>4</sub>와 같은 팽창제를 첨가한 경우 초기 7일 재령보다 압축강도 발현율이 30% 이상 높았고, 초기 7일 재령부터 강도향상을 나타내어 칼슘이온(Ca<sup>2+</sup>)의 첨가 강도발현에 유리한 것으로 나타났다[1,3].

또한 본연구의 목적과 매우 유사한 현장발생토와 바텀애시를 재활용하여 복합지반재료를 개발하기 위한 연구가 이루어졌다. 바텀애시 혼합경량토의 응력-변형거동은 기존 경량토의 응력-변형 거동과 유사하여 배합된 각 재료의 함유율에 크게 의존하며, 최대 일축압축강도와 응력변형률 곡선의 기울기는 시멘트 함유율이 증가 할수록 증가하며, 기포함유율과 현장발생토 초기 함유비가 증가 할수록 감소하였다. 현장발생토로 이루어진 경량토에 입자 형상이 각지고 모난 모래와 유사한 바텀애시가 혼합되면 재료의 강성 및 내부 interlocking이 커져서 바텀애시 함유율이 증가 할수록 최대 일축압축강도가 증가하고 응력-변형곡선의 기울기가 커지는 것으로 판단되어 진다. 바텀애시 혼합 경량토의 단위중량은 바텀애시 함유율이 증가하고 기포함유율이 감소함에 따라 증가한다[4,5].

## 3. 실험재료 및 최적배합설계

### 3.1 현장발생토

사용된 현장발생토사는 천안시 북부대로와 천안 IC를 연결하는 도로공사에서 발생한 굴착잔토를 사용하였다. 흙의 분류결과는 SP로 판정되었고, #4번체에 거른 흙을 사용하여 너무 큰 입경의 입자들은 배제하여 시험하였다. 이의 물성실험 결과는 표 1과 같다.

[표 1] 현장발생토사의 기본물성

[Table 1] Properties of In-Situ Soil

항목	결과	항목	결과
최대입경	12.35 mm	균등계수	5.681
D <sub>10</sub>	0.22 mm	곡률계수	1.181
D <sub>30</sub>	0.57 mm	#200 통과	1.51 %
D <sub>60</sub>	1.25 mm	비중	2.701

### 3.2 바텀애시

바텀애시는 서천 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 세척, 분류하는 1사의 바텀애시를 사용하였으며 물성시험 결과값은 표 2에 나타내었다.

[표 2] 바텀애시의 기본물성

[Table 2] Properties of Bottom Ash

항목	결과	항목	결과
최대입경	1.5 mm	균등계수, $C_u$	3.19
$D_{10}$	0.94mm	곡률계수, $C_c$	1.17
$D_{30}$	1.82mm	#200 통과	0.7%
$D_{60}$	3.00mm	비중	2.240

### 3.3 시멘트 및 플라이애쉬

최대 시멘트는 국내 A사에서 생산 및 판매되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트의 비중은 3.15를 적용하여 사용하였다. 플라이 애쉬는 국내 I사에서 판매되는 2종 플라이애쉬를 사용하였다. 입형은 대체적으로 일부 결정성 물질과 함께 약간의 탄소를 함유하는 유리구상이다. 플라이애쉬는 구형입자 속에 여러겹의 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 블리딩수의 통로를 적게함으로써 블리딩 현상을 감소 시켜주는 등 콘크리트의 제 성질에 양호한 영향을 미치는 요인으로 작용한다. 일반적인 물리실험 결과 밀도의 경우 1.9-2.3 정도로 시멘트 비중의 2/3정도이며 분말도의 경우 3,000-4,000 $cm^2/g$ 범위이다.

### 3.4 고무분말

국내 C사에서 판매되는 1mm 규격의 스테렌-부타디엔 고무재질의 고무분말을 사용하였다. 고무 분말은 페타이어를 절단 분쇄하며 철심과 섬유질을 제거하여 분말형태로 만든 것이다. 사용된 재료의 비중은 0.93-0.94, 사용온도 범위는 -35°C에서 90°C이다.

### 3.5 최적배합설계

현장발생토사, 바텀애시 및 페타이어분말을 이용한 유동성뒤채움재의 최적배합설계 결정을 위해 표 3의 국외 유동성뒤채움재 기준을 이용하여 표 4와 같은 목표기준값을 설정하였다. 유동성뒤채움재의 최적배합설계비 결정은 유동성시험과 일축압축강도 결과를 이용한다. 유동성시험은 실린더 몰드를 이용한 ASTM D 6133 기준을 적용하였다[6]. 그림 1과 같이 유동성 채움재의 유동특성을 결정하기 위해 7.5cm(직경) × 15cm(높이) 한 면이 뚫린 실린더 및 30.4cm × 30.5cm의 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 20~30cm 정도가 되면 재료의 유동성이 확보되는 것으로 평가하였다.

[표 3] 외국의 시방기준

[Table 3] Specification of Foreign

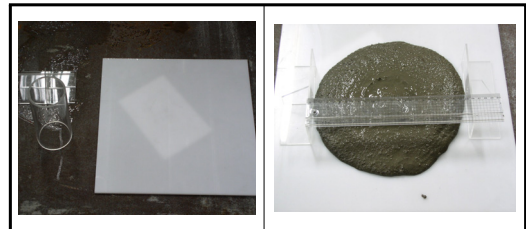
분류	일본	미국*
특성	현장 잔토 사용	현장잔토 사용하지 않음
대상시료	모래+점토	Fly Ash+모래 폐주물사+모래
유동성 (실린더법)	180-300mm	31.5mm이상
일축압축 강도( $q_u$ ), kg/cm <sup>2</sup>	- 1시간: 0.3상 - 4시간: 1.3이상 - 28일: 5.6이하	- 4시간: 규정없음 - 3일 강도: 1.3이상 - 28일 강도: 2.1 -10.6
블리딩율	1%이하	-
침하	3mm	3-6mm

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

[표 4] 시방기준

[Table 4] Target Specifications

목록	목표기준치
유동성(흐름값)	180-300mm
일축압축강도( $q_u$ )	- 3일 강도: 127kPa이상 - 28일 강도: 206-980kPa
블리딩율(%)	1%이하



[그림 1] 유동특성시험

[Fig. 1] Flowability Test

일축압축시험 장비를 이용하여 유동성 뒤채움재 혼합물의 강도특성을 평가하였다. 본 실험에서는 28일 강도 기준치를 206-980kPa로 설정하였는데, 이 강도는 인력으로 굴착이 가능 한 정도의 강도이다. 강도 기준치의 만족

하는 배합비를 얻기 위하여 예비시험의 배합범위 내에서 강도를 측정하여 이를 바탕으로 최적배합비를 결정하였고, 이를 표 5에 나타내었다. 시험에 이용된 시편은 2가지 양생조건(건조 및 습윤)을 달리하여 제작하였다. 시편의 직경은 50mm, 높이는 100mm이다.

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 Ø5cm×10cm의 몰드에 부어 3일, 7일, 28일을 양생 시켜 KS F 2314(흙의 일축압축시험 방법)를 준용하였다. 실험결과는 표 6에 나타내었다. 그림 2는 일축압축강도( $q_u$ )와 변형계수( $E_{50}$ )의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림 3은 양생방법에 따른 일축압축강도특성을 보여주는 것으로, 습윤양생 일축압축강도가 상온양생일축압축강도에 비해 약 10% 정도 크게 측정되었다.

[표 5] 최적배합비 결정

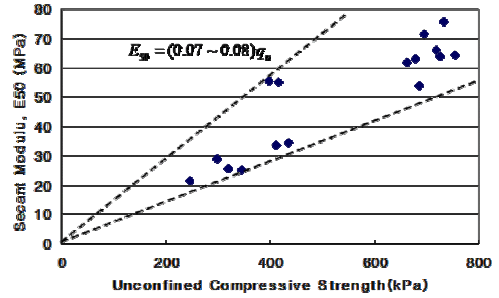
[Table 5] Optimum Mix Ratio

혼합물	재료	현장 발생토	바텀 애쉬	플라이 애쉬	고무 분말	시멘트	물
Case 1		45	30	10	-	3	22
Case 2		35	30	10	-	3	22
Case 3		25	30	20	-	3	22
Case 4		32	30	10	3	3	22

[표 6] 일축압축강도(kPa)

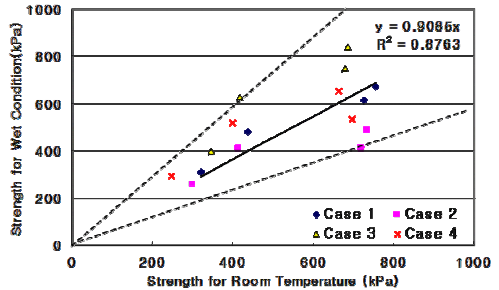
[Table 6] Unconfined Compressive Strength(kPa)

혼합물		양생일			
		3일	7일	14일	28일
상온 양생	Case 1	319.8	436.1	726.0	754.8
	Case 2	297.3	412.8	720.0	734.0
	Case 3	345.6	416.1	679.5	685.3
	Case 4	247.3	398.4	697.0	663.6
습윤 양생	Case 1	309.1	480.9	616.1	670.9
	Case 2	260.8	413.8	413.1	488.0
	Case 3	395.0	624.1	748.2	838.3
	Case 4	295.1	518.0	535.4	652.0
설계기준값		127이상			206-980



[그림 2] 일축압축강도와 변형계수(E50)

[Fig. 2] Compressive Strength vs E50



[그림 3] 양생방법별 일축압축강도

[Fig. 3] Compressive Strength by Curing Condition

## 4. 실험방법 및 결과분석

### 4.1 삼축압축시험

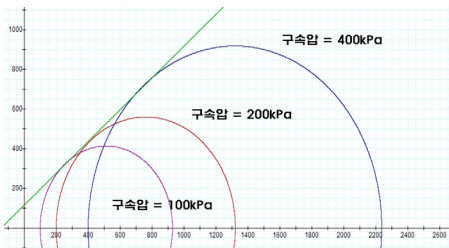
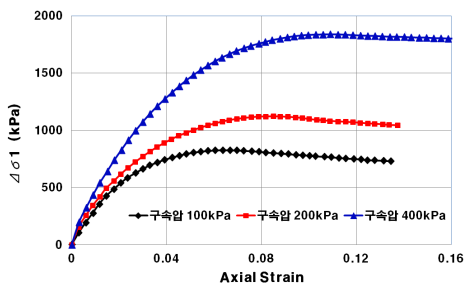
시험에 사용된 혼합재료의 전단강도특성(점착력 및 내부마찰각)을 결정하기 위하여 삼축압축시험을 수행하였다. 이 시험은 원주형 공시체(직경5 cm, 높이10cm)의 지중에서 응력상태를 재현하도록 측방에서 액압을 가하고 축방향에서 압축하여 전단하는 시험이다.

시험은 각각의 혼합물 배합당 3개의 공시체를 제작하여 구속압에 따른 삼축압축강도를 결정하였다. 그림 4는 Case 1 혼합물의 14일 양생 시편에 대한 실험결과이다. 또한, 전단강도특성(점착력과 내부마찰각) 및 응력경로에 이용되는 a 및 b 파라미터를 결정하여 표 7에 나타내었다. 전체적으로 습윤양생한 시료의 측정값이 상온양생한 시료에 비해 크게 나타났다.

전체혼합물의 내부마찰각은 36.5-46.6도, 점착력은 49.1-180 kPa 범위로 측정되었다. 고무분말이 추가된 case 4번의 경우 다른 case에 비해 점착력은 크게, 내부마찰각은 작은 값을 나타내었다.

### 4.2 pH 실험결과

실험에 고화제인 시멘트로 인해 제작이 된 콘크리트 구조물의 초기 pH값은 10~12정도의 강알칼리성을 보이며 배합중 첨가되는 바텀에시와 플라이애쉬의 pH값 역시 8~13의 사이로 만들어지는 화력발전소와 사용되는 재료에 따라 차이는 있으나 알칼리성을 보인다. pH실험 결과는 표 8과 같으며 배합 직후 강 알칼리성을 띠고 28일 양생 후 측정 결과는 배합 직후 보다 알칼리성이 조금 낮아지는 것을 확인하였으나 역시 강알칼리성을 띠며, 일반적으로 시멘트를 고화제로 사용한 콘크리트 구조물과 같은 양상을 보이고 있다.



[그림 4] 14일 재령 삼축압축시험 Case 1

[Fig. 4] 14th Last Triaxial Test for Case 1

[표 7] 삼축압축시험결과

[Table 7] Result of Triaxial Test

측정값		a	b	내부마찰각 $\Phi$ (°)	점착력 c (kPa)
양생/혼합물					
14일 상온양생	Case 1	0.69	73.2	43.4	100.8
	Case 2	0.73	46.5	46.6	67.7
	Case 3	0.69	66.9	43.9	93.1
	Case 4	0.65	121.5	40.6	160.2
14일 습윤양생	Case 1	0.70	86.4	44.5	121.2
	Case 2	0.70	63.9	44.1	89.0
	Case 3	0.68	104.9	43.1	143.8
	Case 4	0.65	115.0	40.2	150.7

28일 상온양생	Case 1	0.65	72.2	40.6	95.1
	Case 2	0.68	36.2	42.4	49.1
	Case 3	0.67	61.9	41.7	82.9
	Case 4	0.65	85.8	40.5	113.0
28일 습윤양생	Case 1	0.69	95.2	43.8	132.0
	Case 2	0.69	78.5	43.5	108.4
	Case 3	0.74	66.1	47.4	97.7
	Case 4	0.60	145.2	36.5	180.7

[표 8] pH 실험결과

[Table 8] Results of pH Test

양생기간	배합직후	28일
Case 1	12.26	11.37
Case 2	12.31	11.67
Case 3	12.62	12.19
Case 4	12.59	11.97

## 6. 결론

바텀에시 및 현장발생토사를 이용한 지하매설관용 뒤채움재에 대한 실내실험을 수행하였다. 유동성과 일축압축강도도를 고려한 최적배합설계, 삼축압축시험 및 pH 시험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 4가지 다른 배합조건에 대한 각각의 최적배합비를 결정하였다. 현장발생토 25-45%, 바텀에시 30%, 플라이애쉬 10-20%, 고무분말 0-3%, 시멘트 3% 및 물 22%의 범위에서 최적배합비가 결정되었다. 각각의 혼합물은 20cm 이상의 유동성, 3일 양생시 127 kPa 및 28일 양생시 206-980 kPa 일축압축강도 조건을 만족하였다.
- (2) 시험재료는 상온양생 및 습윤양생 2가지 조건을 이용하였다. 전체 혼합물에 대한 변형계수( $E_{50}$ )는  $0.07-0.08 * q_u$  로 나타났다. 또한, 습윤양생 시편의 일축압축강도가 상온양생 시편에 비해 약 10% 정도 큰 값을 나타내었다.
- (3) 유동성뒤채움재의 삼축압축시험 결과 전체혼합물의 내부마찰각은 36.5-46.6도, 점착력은 49.1-180 kPa 범위로 측정되었다. 고무분말이 추가된 case 4 번의 경우 다른 case에 비해 점착력은 크게, 내부마찰각은 작은 값을 나타내었다.

- (4) 유동성체움재의 공용 성능을 위해 실시한 pH실험 결과 배합초기 12이상 강알칼리성으로 평가되었다.

## References

- [1] Korea Midland Power Co. LTD, "Product Technology of Aggregate of Pavement with Bottom Ash, Final Report of KOMIPO, pp. 249, 2008.
- [2] Lee, K. & Kim, S., "Backfill Materials for Underground Facility with Recycling Materials - Quantification of Design Parameters", Vol. 11, No. 3, Korean Society of Hazard Mitigation, pp. 91-96, 2011.
- [3] KEPID Homepage, <http://www.kepid.co.kr>
- [4] Janardhanam, R., Burns, F, and Peindl, R. D., "Mix design for flowable fly-ash backfill material", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 4, No. 3, August, pp. 252-263, 1992.
- [5] National Ready Mixed Concrete Association, "Guide Specification for Controlled Low Strength Materials (CLSM)", Specification Guide, 2006.
- [6] ASTM, "Innovations in Controlled Low-Strength Materials(Flowable Fill), ASTM STP 1459, pp. 159, 2004.

김 성 겸(Seong-Kyum Kim)

[정회원]



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

<관심분야>  
도로공학 및 지반공학

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[정회원]



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

<관심분야>  
도로공학 및 지반공학