

(SCP)

Permeability and Shear Strength Characteristics of Oyster Shell-Sand Mixture for Application to SCP

Hyun-Suk Yoon,¹⁾ Ki-Ho Lee,²⁾ Jun-Bom Park,³⁾ Hyung-Joo Lee,⁴⁾

1) , Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National University

2) , Research Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National University

3) , Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National University

4) , Manager, Ph.D., R&D Team (Geotechnical Engrg.) Institute of Technology, Samsung Corporation

SYNOPSIS : The use of oyster shells is proposed as a substitute construction material for geotechnical applications. To investigate recycling possibility as a substitute of sand compaction pile (SCP) for oyster shells, the geotechnical characteristics including permeability and shear strength of crushed oyster shell, sand and crushed oyster shell-sand mixed soil. Experimental results show that the crushed oyster shells are lighter than sand in weight, and have similar characteristics on permeability to sand. The results of direct shear test show that the measured value of friction angle ϕ of crushed oyster shell was larger than that of sand. It would be expected that more angular particles (crushed oyster shells) would interlock more thoroughly than rounded particles (sand).

Key words : oyster shells, sand compaction pile (SCP), mixed soil, permeability, shear strength

1. 서 론

모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile: SCP)공법은 느슨한 모래지반이나 연약한 점성토지반의 압밀을 촉진시키고 지지력을 강화하여 지반을 개량할 목적으로 적용되는 개량공법이다. 연약지반은 일반 흙에서 관찰되지 않는 특별한 공학적 문제들을 보유한 지반으로서 압축성이 크고 그 현상 또한 시간 의존적이며 강도도 작고 교란에 의한 강도감소 현상도 크게 나타내는 특성을 가지고 있다. 따라서 연약지반의 개량을 위하여 압밀촉진공법과 지반보강공법의 적용이 전 세계적으로 점점 증가하고 있다. 이러한 연약지반의 대표적인 지반개량공법에는 약액주입공법, 고압분사주입공법 및 C.G.S, 표층고화처리공법, Soil-cement 및 Microcement공법, SCP 공법, Stone Column 공법 등이 있다. 그러나 기존의 연약지반 개량제로 사용되어온 모래는 대규모 건설공사의 건설재료로 막대한 양이 사용되고 있어 현재에도 연약지반의 주 개량재료로 이용하기에는 공급이 부족한 실정에 있어 물량확보의 문제점을 가지고 있으며, 또한 과도한 천연골재 채취에 의한 환경문제의 해결책이 시급한 실정이다. 일본의 경우 굴껍질을 연약

지반개량제, SCP공법에서 sand 파쇄재로 모래와 혼합하여 사용하고자 하는 연구가 진행되고는 있지만 시범시공에 그치고 있고 사용되는 양은 극히 제한적으로 알려져 있다(이기호, 2000, 2001). 국내에서는 깔굵공장 및 비료공장 등이 건설되어 재활용하고자 하는 노력이 시도되고 있으며, 굴폐각을 콘크리트용 잔골재로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. (윤현석 2002). 또한, 굴폐각을 지반공학적으로 활용하기 위한 대안으로 단독으로 사용하기보다 준서점토와 혼합하여 지반 개량재로서 활용성을 평가하고자 하는 연구가 진행되고 있으며(윤현석 2003, 이기호. 2001), 굴폐각의 흡착특성을 이용하여 중금속이나 유기오염물의 정화를 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서 제안하는, SCP 공법에서 충진배수재를 굴폐각으로 활용하기 위한 적용성 평가는 환경적 측면과 경제적 측면에서 모두 긍정적인 효과를 가져오는 것과 동시에, 건설 산업의 친환경적인 이미지를 통해 사회적 인식의 재고에도 기여할 것으로 판단된다. 이에, 본 연구에서는 SCP 공법에 사용되는 모래를 파쇄한 굴폐각으로 대체하여 그 적용성에 대한 검토를 실시하고자 한다.

2 파쇄 굴폐각의 특성

2.1 굴폐각의 성분 분석

굴폐각을 구성하고 있는 성분을 분석하기 위해 X선 형광분광분석(XRF: X-Ray Fluorescence Spectrometry)시험을 실시하였다. X선 형광분광분석은 서울대학교 공동기기원에 보유하고 있는 장비를 활용하였다. 성분 분석을 위한 굴폐각 시료는 다음의 방법에 의해 준비하였다. 굴폐각을 햇볕에 일주일 이상 말려 수분을 충분히 없앤 후 솔로 불순물을 제거하고 파쇄하여 200번 체를 통과할 정도의 분말을 10g 정도 준비하였다. 굴폐각의 XRF 실험 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. Results of XRF Analysis of Oyster Shell (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	L.I.*	Total
Oyster shell	0.62	-	0.01	0.32	0.78	52.94	0.93	0.03	-	0.17	44.02	99.81

L.I.* : loss of ignition

2.2 파쇄 굴폐각의 물리적 특성

본 연구에서는 SCP공법에서 모래의 대체 재료로서의 가능성을 평가하기 위하여 파쇄된 굴폐각을 입의 파쇄 하여 모래 입도의 범위의 굴폐각을 취하여 실험을 실시하였다. 적정 입도의 굴폐각을 얻기 위하여 먼저 원형 굴폐각을 분쇄기로 파쇄한 후 불순물을 제거하고 건조시키고 잔골재인 모래 입자 크기와 유사한 입도의 굴폐각 입자를 선별하였다. 파쇄 전 일반적인 원형 굴폐각의 크기는 길이 80~130mm, 폭 30~80mm, 두께 20~50mm이다. 분쇄된 굴폐각 입자 중 굵은 모래에 해당하는 입경(4.75mm-2mm)과 모래에 해당하는 입경(2mm-0.074mm)의 굴폐각을 각각 체 분리로 얻었다. 이를 본 논문에서는 각각 LOS(Large Oyster Shell), SOS(Small Oyster Shell)로 표기하였다(그림 1). 일반적으로 파쇄된 굴폐각의 입자 형태는 타원형의 입자형태를 나타내고 박편화 되는 경향을 보이며, LOS의 비중은 2.38, SOS의 비중은 2.41로 일반적인 토사의 비중에 비해 작기 때문에 일반적인 파쇄상태에서 굴폐각은 경량 재료로 판정할 수 있다. SOS의 균등계수(uniformity coefficient)는 4.67, 곡률계수(coefficient of curvature)는 1.01로 나타났다. 그리고 유효 입경(effective grain size)은 0.18mm이었다. 실험에 사용한 모래는 주문진 표준사를 사용하였으며, 비중은 2.64이다. 그림 2는 주문진 표준사 및 LOS, SOS굴폐각의 입도분포곡선을 도시한 것이다. 한편 파쇄된 굴폐각은 앞에서 언급된 바와 같이 일반적인 흙입자와는 달리 박편의 타원체의 형태로 가정할 수 있으며, 이를 보다 구체적으로 기하학적인 모델화를 위해

파쇄된 입자를 고해상도의 디지털 카메라를 이용하여 입자 형태를 구별하고자 하였다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 LOS와 SOS 굴폐각을 타원체로 가정하고 장축과 단축의 길이의 비를 구하였다. 분석 결과 LOS 굴폐각은 단축과 장축의 비가 약 1.6정도가 가장 많았으며, SOS굴폐각 입자는 약 1.4 정도의 형태가 가장 빈도가 높았다. 이를 통해 파쇄 굴폐각을 박편의 타원체 형태로 입자를 가정하는 경우 크기에 따라 다소 차이는 있지만 대표적으로 장축과 단축의 비가 약 1.5정도의 타원체로 볼 수 있는 것으로 판단된다.



(a) 원형 굴폐각 (b) LOS (c) SOS
그림 1. 굴폐각

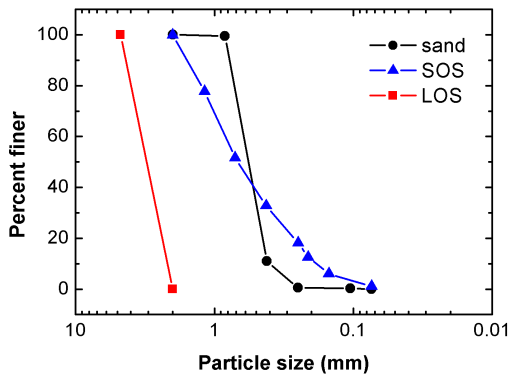


그림 2. 주문진 모래 및 굴폐각의 입도곡선

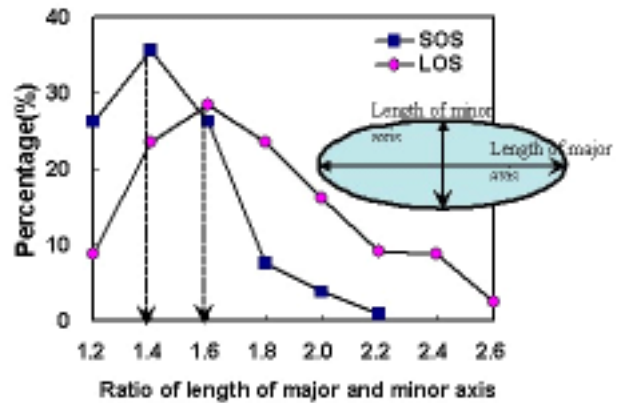


그림 3. 파쇄 굴폐각 입자의 형태분석

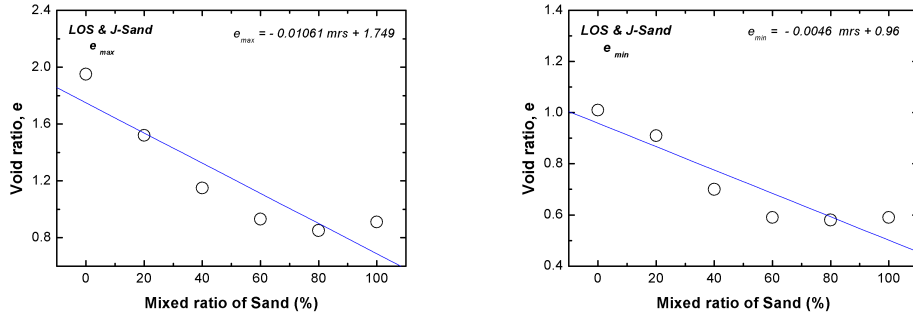
3 실험 내용 및 결과

본 연구에서는 SCP충진재료로서 파쇄 굴폐각의 대체 활용성을 평가하기 위하여 모래, LOS, SOS 굴폐각에 대하여 각각 실험을 실시하였으며, 또한 모래와 굴폐각이 일부 혼합된 혼합토에 대한 공학적 특성을 평가하기 위하여 표준사와 굴폐각의 혼합비율을 무게비로 4:1, 3:2, 2:3, 1:4인 혼합재료에 대하여 역시 같은 방법으로 실험을 실시하였다.

3.1 혼합율에 따른 간극비의 변화

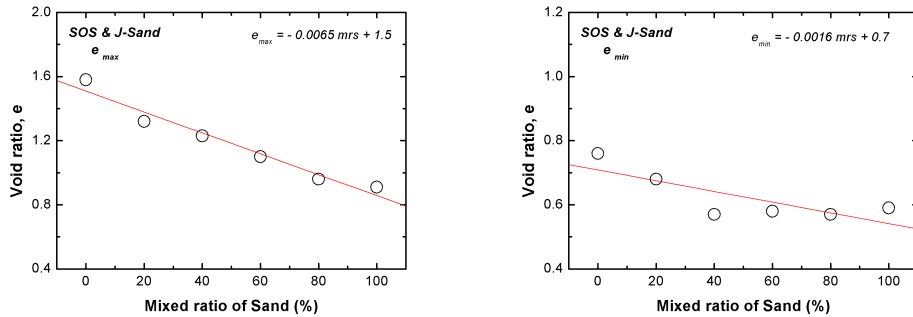
파쇄 굴폐각과 주문진 표준사 및 두 가지 재료를 혼합한 혼합토의 최대간극비(e_{max}) 및 최소간극비(e_{min})를 혼합비에 따라 구하였다. 실험 결과 LOS 굴폐각 입자가 혼합된 경우 상대적은 작은 입경인 모래 및 SOS 굴폐각 입자의 혼합체에 비하여 간극비의 변화율이 큰 것으로 분석되었다. 또한 입경이 유사한 SOS와 표준사의 혼합토인 경우 최대 간극비의 경우 혼합율에 따라 선형적이 특성을 나타내었다. 결과로부터 표준사와 비교하여 파쇄된 굴폐각은 일반적으로 간극비가 큰 것으로 판정할 수 있었으며, 혼합체에서 표준사의 비율이 커질수록 점진적으로 순수 표준사의 간극비에 수렴하는 것으로 나타났다.

그림 4는 LOS와 주문진 표준사의 혼합비에 따른 간극비의 변화를 나타낸 것이고 그림 5는 SOS와 주문진 표준사의 혼합비에 따른 간극비의 변화를 도시한 그래프이다.



(a) 최대간극비 (e_{max}) (b) 최소간극비 (e_{min})

그림 4. LOS와 주문진 표준사의 혼합시료의 혼합비에 따른 최대, 최소 간극비



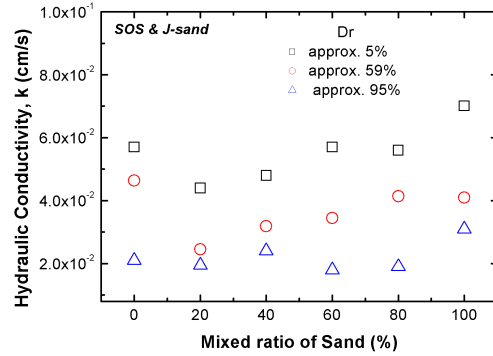
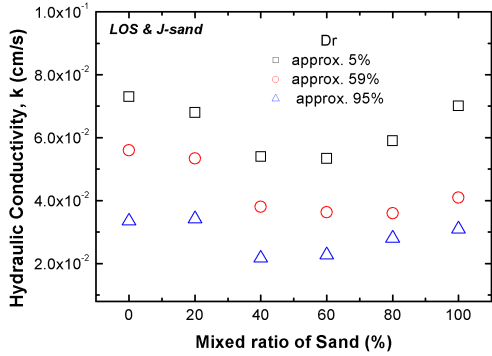
(a) 최대간극비 (e_{max}) (b) 최소간극비 (e_{min})

그림 5. SOS와 주문진 표준사의 혼합시료의 혼합비에 따른 최대, 최소 간극비

3.2 주문진 표준사와 굴폐각 혼합재료의 투수 특성

파쇄 굴폐각과 주문진 표준사의 혼합재료에 대하여 상대 밀도를 달리하여 정수두 투수 시험을 실시하였다. 이를 통해 SCP의 주요 인자인 투수특성을 평가하였다. 상대밀도는 각 혼합재료에 대하여 최대, 최소 밀도와 유사한 시료와 중간의 상대밀도를 갖는 시료를 조성하여 투수 시험을 실시하였다. 각 시료에 대한 투수계수를 그림 6에 도시하였다. 그림 6(a)는 LOS와 표준사의 혼합체의 상대밀도에 따른 투수계수를 도시한 것이다. 본 연구에서 조성한 혼합체 및 표준사의 경우 투수계수가 $2 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 그리고 투수계수는 LOS와 모래의 혼합체일 경우 다소 감소하는 것으로 나타났다. 그림 6(b)는 SOS와 표준사의 혼합체의 상대밀도에 따른 투수계수를 도시한 것이다. SOS 굴폐각의 경우 LOS 굴폐각이 표준사와 혼합된 경우에 비하여 투수계수는 상대적으로 작은 것으로 나타났으나, 차이는 크지 않았다. SOS 굴폐각과 표준사 혼합체의 경우 투수계수가 $1.8 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 값을 나타내었다. 기존의 연구에 의하면 일반적으로 흙의 투수성은 매질의 성질과 흐르는 유체의 성질의 상호 작용에 의하여 결정된다고 알려져 있다(Mitchell, 1993). 조립토의 투수계수에 대한 기존의 이론식을 이용하여 본 연구에서 구한 굴폐각-표준사 혼합토의 투수계수를 비교, 평가하기 위하여 대표적 이론식인 Kozeny-Carman식(1956) 이용하여 혼합토에 대한 투수계수를 구하였다. Kozeny-Carman식은 흙사이의 간극이 물이 흐르는 모세관 역할을 한다는 가정 하에 Hagen-Poiseuille 식으로부터 유도되었다. 여기에 실제 토체의 형상에서 물의 통로의 형상을 고려하는 형상계수(shape factor) Cs와 간극의 구불구불한 정도를 나타내는 비틀림계수(tortuosity factor) T를 고려하여 다음의

식이 제안되었다.



(a) LOS-표준사 혼합체의 혼합비에 따른 투수계수의 변화

(b) SOS-표준사 혼합체의 혼합비에 따른 투수계수의 변화

그림 6. 혼합비에 따른 주문진 표준사와 파쇄 굴폐각 혼합토에 대한 투수계수

$$k = \frac{1}{C_s S_s^2 T^2} \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \quad (1)$$

일반적인 조립토에서, 형상계수 C_s 는 약 2.5, 그리고 비틀림계수 T 는 약 $\sqrt{2}$ 의 값을 갖는다고 알려져 있다. 이를 이용하여 각 굴폐각과 표준사의 투수계수를 각각 구하였다. 식 (1)에서 S_s 는 입자의 표면적과 부피의 비로 여기에서는 입자를 구로 가정하여 S_s 값을 산정하였으며, 입자의 크기는 투수계수에 영향을 주는 대표적 입자 크기인 D_{10} 의 값을 이용하여 구하였다. 본 연구에서 사용한 시료의 D_{10} 은 표준사 0.41mm, LOS 2.3mm, SOS 0.18mm의 값을 각각 나타내었다. 물의 점성계수 μ 는 20°C라고 가정하여 약 10.1×10^{-3} poise의 값을 이용하였다. 이를 이용하여 구한 Kozeny-Carman이론식에 의한 투수계수 값은 표 2와 같다.

표 2. Kozeny-Carman식에 의한 투수계수 산정 (unit : cm/sec)

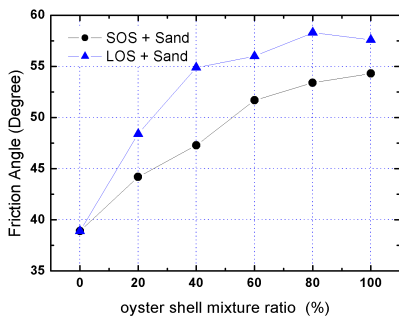
시료	최대간극비의 경우	최소간극비의 경우	상대밀도 약 60%인 경우
LOS	7.3×10^{-2}	1.5×10^{-2}	4.3×10^{-2}
SOS	2.7×10^{-3}	4.0×10^{-4}	1.5×10^{-3}
표준사	3.7×10^{-3}	1.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}

표 2에서 보는바와 같이 이론식으로 구한 투수계수는 LOS의 경우 상대적으로 실험치와 유사한 값을 나타내나 SOS와 표준사의 경우 차이가 나타남을 확인하였다.

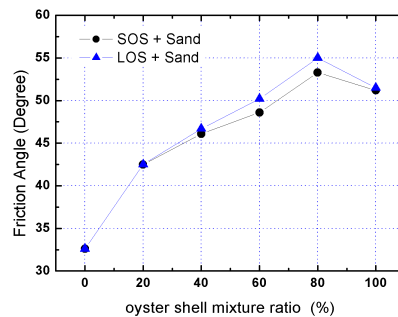
3.3 주문진 표준사와 굴폐각 혼합재료의 전단 특성

SCP 충전재료로서의 전단강도를 평가하기 위하여 주문진 표준사와 LOS, SOS, 그리고 표준사와 굴폐각과 혼합한 시료에 대하여 각각 직접전단시험을 실시하였다. 전단시험 시 전단 변형속도는 1%/min.으로 그리고 상재압력은 0.5, 1, 1.5kg/cm²(49kPa, 98kPa, 147kPa)에 대하여 실시하였다. 이는 일반적인 SCP의 설치 깊이는 10m 내외이며, 설치 시 다짐을 통한 유효응력의 증가분을 고려하여 1kg/cm² 전후의 응력에서 시험을 실시하게 되었다. 대상 시료로는 표준사와 굴폐각 및 이를 각각 혼합비율을 무게비로 4:1, 3:2, 2:3, 1:4로 균일하게 섞은 혼합 시료에 대하여 같은 방법으로 직접전단시험을 실시하였다. 전단시험 결과 구한 굴폐각-표준사 혼합체의 최대 내부마찰각을 굴폐각의 혼합율에 따른 내부마찰각으로

나타낸 것이 그림 7이다. 그래프에서 굴폐각 혼합율이 0%의 경우는 순수 표준사의 경우이고, 혼합율이 100%인 경우는 순수 굴폐각에 대한 시험 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 점착력을 무시한 경우의 최대전단마찰각을 구한 경우이고, 그림 7(b)는 점착력을 고려하여 마찰각을 산정한 경우이다. 순수굴폐각의 내부마찰각은 큰입자 굴폐각인 LOS와 작은입자 굴폐각 SOS, 두 경우 모두 큰 내부마찰각을 나타내었다(약 $\phi = 55^\circ$). 이는 일반적인 사질토에서 나타나는 값에 비하여 매우 큰 값이며, 시험에 사용된 주문진 표준사(약 $\phi = 38^\circ$)에 비해서도 큰 차이를 나타낸다. 이는 굴폐각 입자의 형태에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 모래 및 사질토의 경우 흙입자를 구형태로 간주할 수 있으나, 파쇄된 굴폐각의 경우 얇은 박편의 타원체의 형태를 나타내며, 또한 입자 자체의 강도는 흙입자에 비하여 작다고 할 수 있으나, 직접전단 시험과 같이 일정면을 강제로 전단시키는 경우 그 면에 위치한 입자의 엇물림이 상대적으로 큰 전단저항력을 나타낸다고 평가할 수 있다. 이와 같은 논지로 직접전단에서 구해진 내부마찰각은 다소 크게 평가된 것으로 사료된다.



(a) 점착력을 고려하지 않은 경우



(b) 점착력을 고려한 경우

그림 7. 굴폐각 혼합비에 따른 마찰각

4 결론

SCP 충전재료로써의 굴폐각의 사용 가능성을 평가하기 위하여 순수 굴폐각 및 표준사와 혼합토에 대하여 투수시험 및 전단시험을 실시하였다. 파쇄 굴폐각 중 통일분류법상 모래와 유사한 입도를 갖는 LOS와 SOS에 대한 투수시험 결과 굴폐각의 혼합율에 따라 조금씩 차이는 보이나 순수 표준사의 투수계수와 유사한 값을 나타내었다. 또한 직접전단 시험을 통해 파쇄 굴폐각의 전단 특성을 평가한 결과 굴폐각의 전단 마찰각은 주문진 표준사에 비해 다소 크게 나왔다. 최대전단응력을 기준으로 점착력을 고려하는 경우 산정된 마찰각은 두 시료 모두 약 50° 의 값을 나타내었다. 또한 표준사와 혼합된 경우의 전단 마찰각은 표준사의 마찰각에서 혼합비에 비례하여 증가하는 양상을 나타내며, 순수 굴폐각의 마찰각에 수렴하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 윤현석, 이기호, 박준범(2003), “혼합토의 압밀 특성”, 한국지반공학회 2003년 봄학술발표회논문집, pp.211~216.
2. 윤현석, 이기호, 박준범(2002), “에틸벤젠에 의한 굴폐각 혼합공시체의 압축강도 변화 특성”, 한국지반공학회논문집, 제 18권, 제 6호, pp.103~116.
3. 이기호, 박준범(2001), “굴폐각을 포함한 혼합토의 전단·변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용”, 한국지반공학회논문집, 제 17권, 제 4호, pp.183~190.
4. 이기호(2001), “폐기물을 포함한 이종혼합토의 강도·변형특성”, 한국지반환경공학회논문집, 제 2권, 제 2호, pp.33~39.
5. 이기호, 한종욱(2001), “굴폐각 혼합토의 압밀 및 투수특성”, 대한토목학회논문집, 제 21권, 제 4-C호, pp.375~384.
6. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley and Sons, pp.234~246.
7. Carman, P.E.(1956), *Flow of Gases Through Porous Media*, Academic, New York,