

순환골재를 활용한 연약지반개량용 다공질 콘크리트 말뚝의 전단특성

Shear Strength Characteristics of Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile for Soft Ground Improvement

윤 길 림¹ Yoon, Gil-Lim

윤 여 원² Yoon, Yeo-Won

강 오 람³ Kang, O-Ram

유 승 경⁴ You, Seung-Kyong

이 규 환⁵ Lee, Kyu-Hwan

Abstract

Recycled-aggregate porous concrete pile (RAPP) which forms a composite ground is one of new ground improvement techniques. In this paper, triaxial compression tests are carried out to investigate the shear strength characteristics of RAPP-Clay composite samples. The main purpose of the tests was to investigate the effects of area replacement ratio (15%~100%) on behaviors of RAPP-Clay samples during shearing. Also, triaxial compression tests using Sand-Clay composite samples were performed to compare with the behaviors of RAPP-Clay samples. The test results showed that the friction angle and cohesion of the RAPP-Clay composite were 18~34 degree and 557.0~588.0 kPa, respectively, whereas those of sand-clay composite samples were 26~35 degree of friction angel and 4.0~18.0 kPa.

요 지

순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP, Recycle aggregate porous concrete pile) 공법은 연약지반에서 원지반과 다져진 다공질 콘크리트 말뚝이 복합지반을 이루어 연약지반을 개량하는 공법이다. 본 연구에서는 순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 말뚝의 강도정수 및 응력-변형을 관계를 조사하기 위하여 현장조건을 재현하여 재성형한 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)-점토 혼합토에 대하여 삼축압축시험을 하였다. 삼축압축시험의 공시체는 치환율 15, 35, 60, 100%로 조성, 복합지반의 전단거동 특성을 규명하였다. 또한 현재 연약지반 개량공법 중 모래다짐말뚝(SCP, sand compaction pile)공법과의 비교를 위하여 모래-점토 혼합토의 시험도 실시하였다. 시험결과, RAPP-점토 혼합토의 경우, 내부마찰각은 18~34도의 범위를 나타냈으며, 점착력의 경우는 557.0kPa~588.0kPa의 범위를 나타냈다. 하지만 모래-점토 혼합토의 강도정수값은 내부마찰각은 26~35도의 범위를 나타냈으며, 점착력은 치환율별로 4.0~18.0kPa의 범위로 나타났다.

Keywords : Area replacement ratio, Porous concrete pile-clay composite, Recycled-aggregate porous concrete pile, SCP, Soft ground, Triaxial compression test

1 정회원, 한국해양연구원 연안개발 에너지 연구부 책임연구원 (Member, Korea Ocean Research & Development Institute, Coastal Development & Energy Lab., glyoon@kordi.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 인하대학교 사회기반시스템 공학부 교수 (Member, Inha Univ., Civil and Environmental ENG Dept.)

3 정회원, 한국해양연구원 연안개발 에너지 연구부 연수생 (Member, Korea Ocean Research & Development Institute, Coastal Development & Energy Lab.)

4 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Myungji College, Civil ENG Dept.)

5 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 부교수 (Member, Konyang Univ., Civil ENG Dept.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

국내에서는 연약지반개량공법으로 모래다짐말뚝(sand compaction pile, SCP) 및 쇄석다짐말뚝(granular compaction pile, GCP)공법 등을 많이 사용하고 있으며, 이 공법은 원지반과 다짐으로 인하여 밀도가 조밀해진 모래 및 쇄석에 의해 복합지반을 조성하여 강도의 증가 및 압축성축, 침하량 등의 공학적 성질을 개선하기 위한 공법이다 (Barksdale & Bachus, 1983). 하지만 국내에서의 모래다짐말뚝의 경우, 최근 들어 점차 양질의 모래가 고갈되어 감에 따라 경제성이 떨어지고 있으며, 이에 따라 대체 자원이 필요한 실정이다. 최근 우리나라에서는 건축 구조물의 노후화로 인한 재건축 등으로 기존의 콘크리트 구조물의 해체 폐기가 활발하게 진행되고 있다. 여기서 발생하는 건설폐기물 중 90%정도가 폐콘크리트, 폐아스콘, 토사로 이루어져 있다. 건설폐기물의 효율적인 재활용을 하기위해 적절한 분리, 선별, 처리 과정을 통하여 새로운 골재자원인 순환골재를 얻을 수 있다. 이 순환골재를 이용하여 현재 연약지반에서 많이 사용되고 있는 기존의 지반개량공법 중 다짐말뚝공법에 순환골재를 이용하면 천연자원의 고갈에 대비하고 골재채취로 인한 환경파괴를 경감 시킬 수 있다고 판단된다. 또한 최근 ‘건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률’에 따라 대형 공사현장에서는 순환골재를 의무적으로 사용해야 하기 때문에 순환골재를 이용한 연약지반 개량공법의 그 활용도가 양호할 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 친환경 지반개량공법을 개발하는데 기본 자료로 활용하고자 천연자원을 대체할 수 있는 순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 말뚝(recycled aggregate porous concrete pile, RAPP)의 공학적 특성을 평가하기 위하여 인위적으로 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)-점토 복합지반을 조성하고, 배수조건 및 배수 조건에 따라 치환율과 구속압을 변화시켜 삼축압축시험을 실시하였으며, 복합지반의 응력-변형률관계, 과잉 간극수압, 강도정수 등을 정량화하여 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝에 의하여 조성된 복합지반의 전단거동 특성을 규명하고 공학적 우수성을 기존 모래다짐말뚝과 비교 평가하였다. 여기서 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝은 순환골재, 시멘트, 물과 적절히 배합하여 만든 말뚝을 의미한다.

2. 재료 및 시험

본 연구에서 사용한 삼축압축시험기는 자동화 삼축 시험기로, 시험 중 축차응력, 축변형률, 구속응력, 간극수압 등이 시간에 따라 컴퓨터에 자동적으로 입력되고, 구속압을 사용자가 원하는 대로 제어할 수 있는 삼축압축 시험기이다. 그림 1은 실험에 사용된 자동화 삼축시험기의 구성을 나타낸 것이다.

2.1 시험에 사용된 재료

2.1.1 모래

순환골재를 이용한 다공질 콘크리트 말뚝 공법과의 비교검토를 위하여 현재 우리나라에서 연약지반 개량 공법으로 많이 사용되고 있는 SCP공법을 인위적으로 재현하기 위하여 모래를 사용하였다. 여기서 사용된 모래의 경우 일반 강모래를 사용하였다. 시험사용에 적합하도록 2mm 이상의 입자를 제거하여 사용하였다. 모래 시료의 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 몰드의 외벽을 타격봉으로 두드려 다짐하는 타격봉 시험으로 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 구했다. 최소건조단위중량(γ_{dmin})은 몰드 바닥에서부터 깔때기를 대고 시료를 채우는 깔때기 채우기 시험으로 가장 느슨한 상태의 건조단위중량을 구하였다.

2.1.2 순환골재

순환골재라 함은 건설폐기물중 90%이상을 차지하고

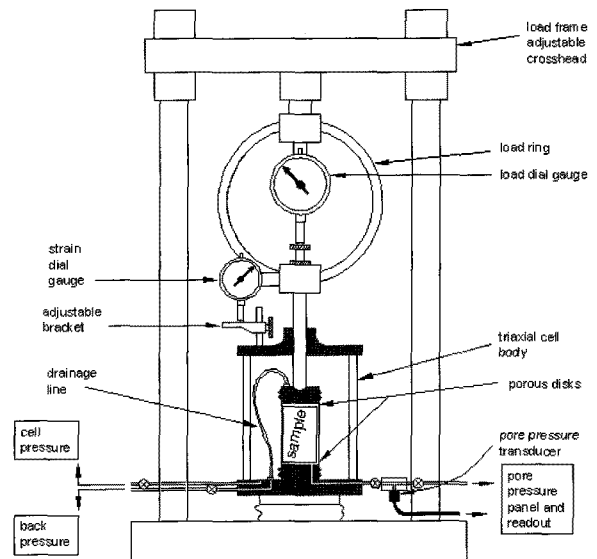


그림 1. 삼축압축시험장치

있는 폐콘크리트, 폐아스팔트, 토사로 이루어져 있는 것 중 적절한 분리, 선별, 처리과정을 통해 범람이 정하는 품질기준에 적합하게 하여 재차 건설공사에 사용하게 만든 골재를 말한다(이세현, 2006). 국내의 경우 약 200여개의 순환골재 생산업체는 물리적 방법에 의한 이물질 분리와 다양한 크러셔의 조합에 의한 2~3차 파쇄를 하고 물리, 화학적 처리를 거쳐 순환골재를 생산하고 있으며, 최근에는 양질의 순환골재 생산에 대한 노력이 이루어지고 있다. 현재 1종 순환골재, 2종 순환골재가 생산되고 있으며 본 연구에서는 품질이 상대적으로 우수한 1종 순환골재를 사용하였다. 그림 2는 현재 생산되는 순환골재를 보여준다.

이 중 치환율 15%의 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝을 고려하여 No. 4번체를 통과하고 No. 8번체에 잔류하는 크기의 순환골재 3.5mm±1.0mm를 사용하고 물, 시멘트와 배합하여 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝을 형성하였다. 여기서, 치환율 15%는 치환재로 사용되는 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝의 지름이 19.5mm로 치환재의 적절한 다짐효과를 발휘하기 위한 것이다.

물/시멘트의 배합비의 경우, 순환골재의 미립분과 흡수율을 고려하여 물/시멘트비를 결정하고 삼축압축시험에서의 결과치를 도출하기 위한 배합비를 결정하였다. 치환율 15, 35, 60%는 일반 실내에 비치된 상태의 순환골재를 이용하여 물/시멘트비 35%의 배합비를 결정하였다.

한편, 치환율 100%의 경우에는 순환골재의 겉표면에

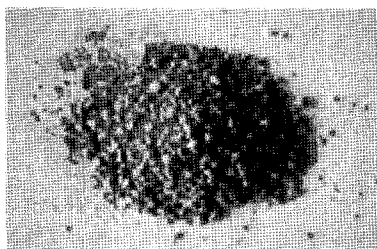
시멘트 미립분을 제거하고 순환골재를 24시간 수침한 상태로 거른 후 순환골재의 흡수율을 고려하여 물/시멘트비를 35%로 계산하여 배합비를 결정하였다. 이는 본 공법의 현장 적용에 있어서 시공환경이 현장마다 달라질 수 있으며, 굳지 않은 빈배합 순환골재를 타설 장비를 이용하여 연약지반에 타설하는 방법과 지상에서 미리 다공질 콘크리트 말뚝을 양생 제작하여 연약지반에 근입시키는 방법을 고려하기 위한 것이다(유승경 등 2008). 표 1은 본시험에 사용한 배합량이다. 본 연구에서는 이렇게 배합된 시료를 3일 양생 후, 삼축압축시험을 실시하였으며, 순환골재, 시멘트, 물과 배합된 시료의 명칭을 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)이라 정하였다.

2.1.3 점토시료

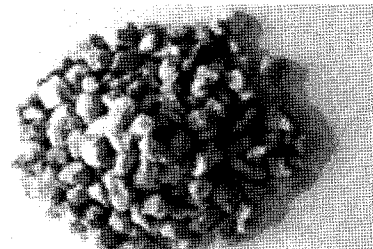
점토시료는 현장에서의 복합지반 형성 재현을 위하여 사용하였다. 본 연구에서는 불교란시료 채취의 어려

표 1. 순환골재 투수콘크리트의 배합량 설계치

목표단위중량 (tf/m ³)	치환율 (%)	W/C (%)	공시체 1개당 중량(g)		
			순환골재	시멘트	물
1.8	15	35	42.31	8.46	2.96
	35	35	96.82	19.36	6.77
	60	35	169.22	33.84	11.84
	100	35	284.96	58.87	9.42
치환율 100% 경우, 순환골재 24시간 수침후 체에 걸러 물/시멘트비 35%로 배합					



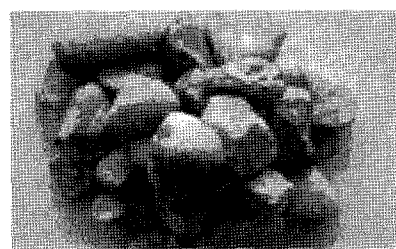
순환잔골재



순환골재(9mm)



순환골재(13mm)



순환골재(19mm이상)

그림 2. 현재 생산되고 있는 순환골재의 종류

음이 있어 일반적으로 사용하고 있는 방법으로 슬러리 상태의 시료에 소정의 선행압밀압력으로 예비 압밀을 하여 재성형 시료를 제작하였다. 이를 위하여 인천 해안 지역에서 점토시료를 채취하여 건조시킨 후 재성형 시료로 준비하였다. 시료준비는 액성한계의 2배의 함수비로 시료를 반죽하여 충분히 교반한 후, 슬러리 상태로 만들어 슬러리 상태에서 물이 증발되지 않도록 포장을 한 후, 2일간 방치하여 포화과정을 거쳐 재성형 장치에 저장하였다. 저장된 시료는 양면배수상태로 상재하중을 가하면서 재성형 시료를 만들었다. 이 때 상재하중은 표준압밀시험과 마찬가지로 10kPa, 20kPa, 40kPa 순으로 하중 증가비를 2배로 하고 배수거리를 고려하여 36시간 동안 압밀을 시켰다. 압밀이 완료된 시료는 공시체 규격에 맞게 해체하여 항온 항습기에 보관하여 실험에 사용하였다. 그림 3은 재성형 시료 제작 장치에 담긴 슬러리 모습을 보여준다.

이들 재성형 시료의 특성치를 표 2에 정리하였으며, 입도분포는 그림 4에 도시 하였다. 일반적으로 알려진 순환골재의 투수계수의 경우, 3일 양생한 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝의 투수계수이다. 선행된 연구에서는 물/시멘트비와 단위중량의 크기에 관계없이 평균적

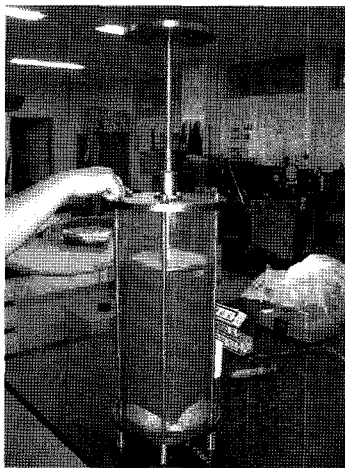


그림 3. 재성형 시료 제작 과정

으로 0.9×10^0 cm/sec의 값을 나타낸다고 밝히고 있다(유승경 등 2007).

2.2 시험 방법 및 복합지반 조성

2.2.1 모래-점토 혼합토

점토시료안에 소정의 상대밀도로 조성된 모래말뚝을 설치하여 모래-점토 혼합토를 조성하였다. 모래말뚝은 각 치환율별로 조성된 케이싱에 상대밀도 약 70%로 다짐봉을 이용하여 다지면서 조성하였으며(그림5(a)), 다짐시 물을 첨가하여 모래가 완전히 포화되도록 하였다. 그리고 혼합토를 조성할 때 발생할 수 있는 시료교란을 줄이고자 조성된 모래말뚝을 냉동장치를 활용하여 동결시켜 보관하여 사용하였다(이상익 등 2005). 동결된 모래말뚝을 점토시료에 설치하는 방법은 기 제작된 마이터박스와 상하부캡을 이용하였다. 치환율에 맞게 제작된 케이싱을 점토중앙에 삽입한 후에 점토시료가 교란되지 않도록 천천히 인발한다. 그 후 점토 안에 생긴 공동안에 얼린 모래말뚝을 주의깊게 천천히 밀어넣어 모래-점토 혼합토를 치환율별로 조성한 후, 동결된 모래말뚝이 해동될 때까지 방치한 후에 삼축시험을 실시하였다. 그림 5는 혼합토 조성과정을 나타내었다.

2.2.2 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)-점토 혼합토 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 경우 1종 순환골

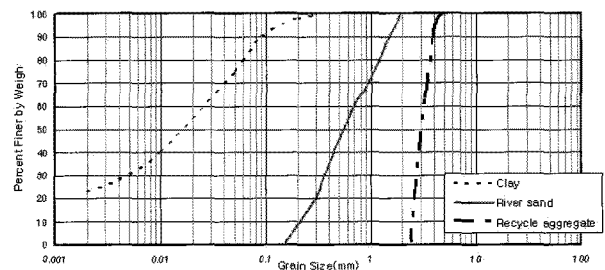
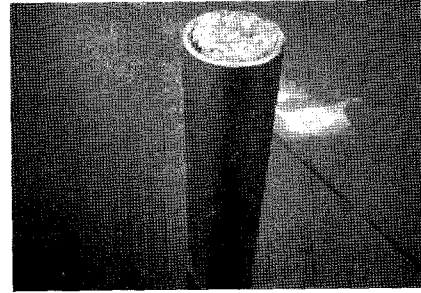


그림 4. 사용 시료의 입도분포곡선

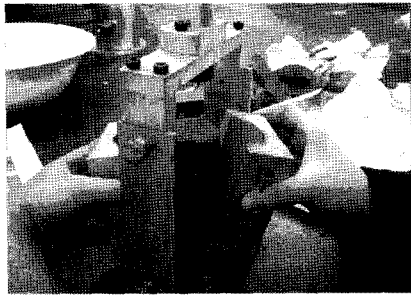
표 2. 시험에 사용된 재료의 특성치

Soil Type	물리적 특성치							
	액터버그 한계		USCS	투수계수 (cm/sec)	압축지수 (Cc)	건조단위중량		상대밀도, Dr (%)
	액성한계 (%)	소성한계 (%)				Max (kN/m ³)	Min (kN/m ³)	
Clay	32.4	23.1	CL	-	0.183	-	-	-
sand	-	-	SP	3.1×10^{-2}	-	17.5	12.8	71.2
Recycled Aggregate	-	-	GP	0.9×10^0	-	16.1	14.6	69.8

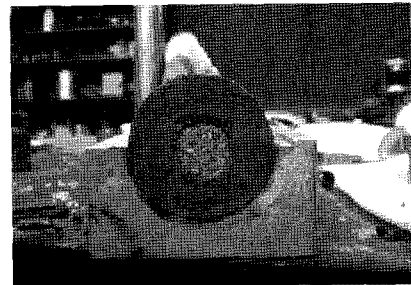
* 순환골재의 투수계수의 경우, 순환골재+시멘트+물과 배합한후 3일 양생한 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 투수계수임.



(a) 모래시료의 제조 및 동결된 모래시료



(b) 점토시료의 성형 및 케이싱 삽입



(c) 모래말뚝 삽입 및 혼합토 조성완료

그림 5. 모래-점토 혼합토 조성과정

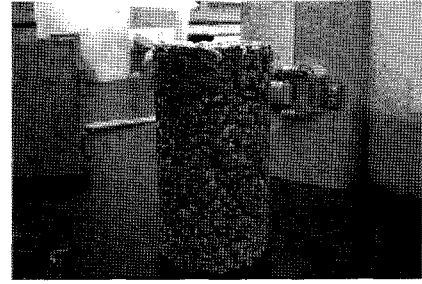
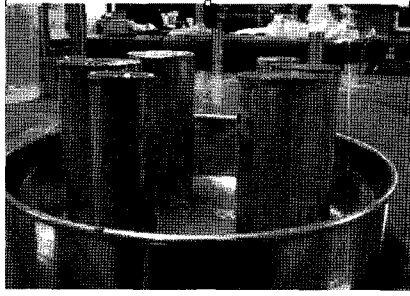
재를 사용하여 각 치환율별로 시료를 제작한 후 단위 중량 1.8ton/m^3 로 말뚝을 조성하여 3일간 양생을 시켰다(그림6(b)). 말뚝을 점토시료에 설치하는 방법은 기 제작된 마이트박스, 상하부캡, 케이싱을 이용하여 위에서 기술한 방법에 의거 모래-점토 혼합토와 같은 방법으로 제작하였다. 그림 6에는 혼합토 조성과정을 나타내었다.

2.2.3 삼축압축 시험방법

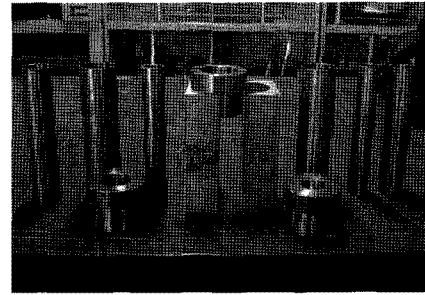
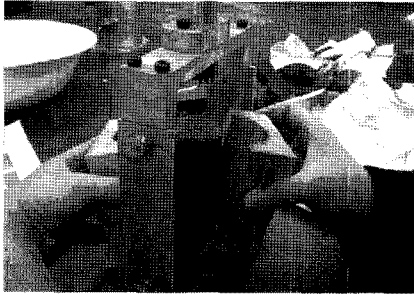
실제 현장의 경우 복합지반에 하중이 재하되면 내부 치환된 재료를 통하여 방사방향으로 배수가 되면서 상재하중에 대하여 저항한다. 이런 조건을 실내시험에서 재현하기 위해 본 연구에서는 배수조건 및 비배수조건으로 시험하고 현장응력상태를 재현할 수 있는 삼축압축시험이 현장여건에 가장 적합하다고 판단되어 복합

지반에 대한 삼축압축시험을 수행하였다. 치환재료의 입도를 고려하여 시료의 직경은 50mm, 높이는 100mm를 기준으로 시험을 실시하였다. 그리고 치환율 및 구속압조건을 달리하여 혼합토의 전단거동을 파악하였다. 먼저 혼합토의 공시체를 제작하여 그 후 공시체의 포화를 위하여 약 4kPa의 압력으로 이산화탄소를 공시체의 하부 캡으로 주입시키고 상부 캡을 통하여 공기가 빠져나가 시료 내에 이산화탄소로 치환되도록 1시간(60분) 순환시켰다. 이는 시료 내의 공기를 일정압력 이상에서 물에 잘 녹는 이산화탄소로 치환함으로써 시료의 포화도를 거의 100%까지 높일 수 있기 때문이다. 이산화탄소 치환이 끝나게 되면 동수경사를 이용하여 탈기수를 시료내부로 완전히 순환될 때까지 주입시켰다.

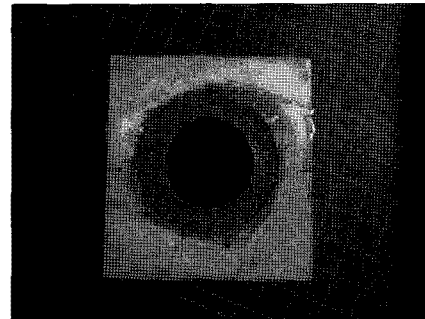
이러한 순환과정이 종료되면 삼축장비에 Cell을 장착하여 포화단계로 넘어가게 된다. 포화시에 구속압과 배



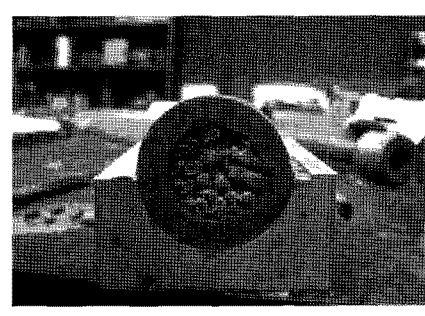
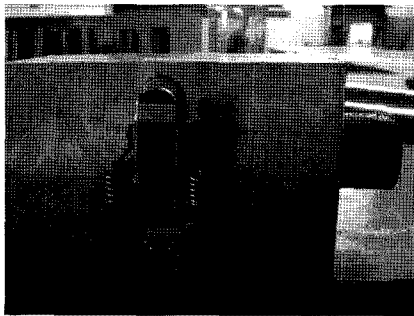
(a) RAPP시료의 제조 및 RAPP



(b) 점토시료 성형 및 케이싱과 케이싱 캡



(c) 케이싱 삽입 및 공동형성



(d) RAPP 삽입 및 혼합토 조성완료

그림 6. RAPP-점토 혼합토 조성과정

압을 단계별로 증가시켜 Skempton의 B-value가 0.95이상이 될 때까지 압력을 증가시켰다. 이러한 조건에 만족할 경우에 구속압을 고정하고 배압을 낮추어 배수를 시킴으로써 압밀을 유도하였다. 이때 원하는 구속압에 도달하게 되면 비배수 상태로 0.1%/min(배수시 0.01%/min)의 변형률로 전단을 하여 변형률에 따른 축차응력, 간극

수압 등을 측정하였다. 이와 같은 시험을 구속압을 50kPa, 100kPa, 200kPa로 달리 하여 3회 이상 반복함으로써 응력-변형률, 간극수압-변형률 및 파괴포락선을 작성하여 각 시료별 강도정수를 구하였다. 삼축압축시험의 조건을 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 삼축압축 시험조건

치환재 제원 (치환율%)	시료의 제원 (mm)	적용구속압 (kPa)	제어방식
19.5 (15)	50(직경) 100(높이)	50 100 200	strain controlled test
29.5 (35)			
39.0 (60)			
50.0 (100)			

주) 사용된 치환재의 직경(mm)을 나타냄. 치환율은 치환재의 단면적 /점토의 단면적

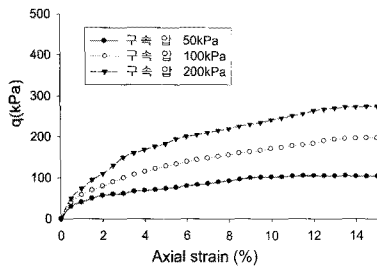
3. 시험결과 및 분석

3.1 응력-변형률 관계

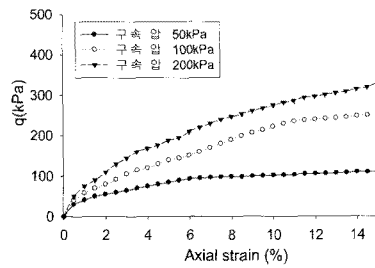
그림 7에서와 같이 모래-점토 혼합토에 대한 삼축압축시험의 응력-변형률 관계는 전반적으로 치환율과 구속압이 증가할수록 파괴시 응력이 계속 증가하는 변형

율경화(strain hardening)의 거동 양상을 보였다. 구속압이 증가할수록 파괴시 변형률은 계속 증가하는 거동양상을 보였다. 이는 비배수 전단시에는 체적변화가 발생하지 않아야 하지만 혼합시료내부의 치환재로 사용된 모래의 부피가 팽창하려는 다일리턴시(dilatancy)현상으로 인하여 시료가 연속적으로 파괴에 저항하기 때문인 것으로 판단된다.

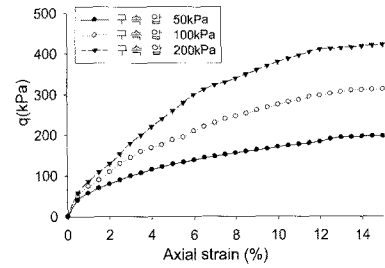
RAPP-점토 혼합토에 대한 삼축압축시험의 응력-변형률 관계는 치환율과 구속압이 증가할수록 파괴시 응력은 계속 증가하다가 최대응력을 지난후 계속 감소하는 변형율연화(strain softening) 현상을 보였다. 또한 구속압의 변화에 따른 응력증가는 크게 발생하지 않았는데 이는 혼합시료내부의 치환재로 사용된 다공질 콘크리트 말뚝의 강도에 크게 지배하는 것으로 판단되었다. 치환율이 15%에서는 최대주응력이 최소 1,655.0kPa에서



(a) 치환율 15%

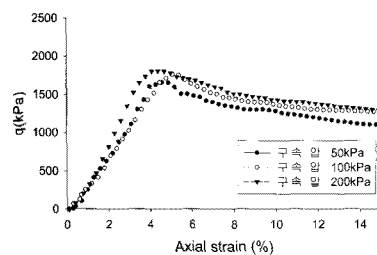


(b) 치환율 35%

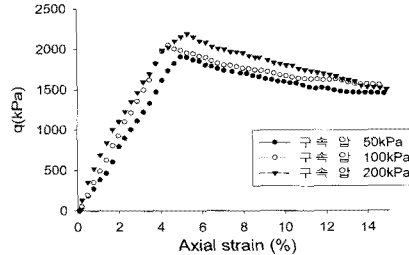


(c) 치환율 60%

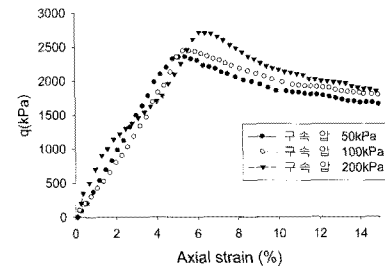
그림 7. 각 치환율별 모래-점토 혼합토의 응력-변형률 관계



(a) 치환율 15%

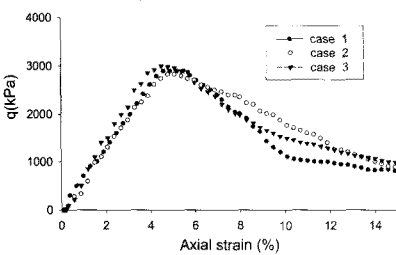


(b) 치환율 35%

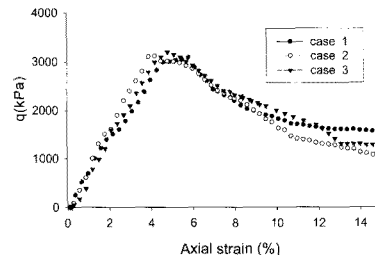


(c) 치환율 60%

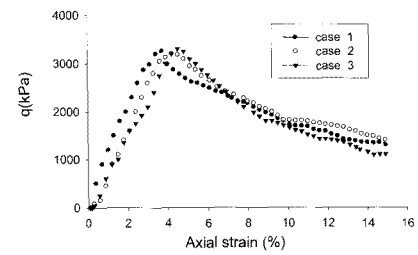
그림 8. 각 치환율별 RAPP-점토 혼합토의 응력-변형률 관계



(a) 구속압 50kPa



(b) 구속압 100kPa



(c) 구속압 200kPa

그림 9. 치환율 100%인 RAPP의 응력-변형률 관계

최대 1,801.0kPa까지 나타났다. 치환율 35%는 1,903.0~2,190.0kPa, 치환율이 60%는 2,352.0~2,716.0kPa까지 나타났다. 치환율 100%의 RAPP의 삼축압축시험 결과, 전반적으로 정점을 지난 후 취성파괴를 양상을 보였다. 구속압의 변화에 비해 응력증가는 크게 발생하지 않았으며, 이는 RAPP-점토 혼합토의 비배수 전단시의 결과와 비슷한 형태를 보였으며 이것은 순환골재 다공질 말뚝의 강도에 크게 지배되는 것으로 판단된다. RAPP-점토 혼합토와의 차이점은 정점을 형성한 후 잔류강도가 크게 감소한 것이었다.

그림 8에 치환율별 삼축압축시험에서 혼합토의 응력-변형률 관계를 나타냈으며, 그림 9에는 치환율 100%의 응력-변형률 관계를 나타냈다.

3.2 간극수압-변형률 관계

모래-점토 혼합토의 간극수압-변형률 관계는 그림 10과 같다. 그림 10에서 보는 것처럼 간극수압의 크기는 치환율이 커질수록 변형이 진행되면서 점점 감소하는 양상을 보여준다. 또한 간극수압-변형률 관계에서 모래 말뚝의 경우 간극수압이 점차 증가하다가 어떤 정점을 지난 이후에는 점차 감소하였다. 치환율이 높을수록, 구속압이 작을수록 간극수압은 비교적 작게 측정되었다.

또한, RAPP-점토 혼합토의 간극수압-변형률 관계는

그림 11에서 보는 것처럼 전반적으로 모든 간극수압에서 정점을 지난 후 크게 감소하다가 0에 가까운 값을 나타내었다. 간극수압의 크기는 치환율이 커질수록 변형이 진행되면서 점점 감소하는 양상을 보여준다. 그리고 치환율이 높을수록 간극수압이 다소 낮게 측정되었으며 구속압이 작을수록 낮게 측정되었다.

3.3 강도정수

삼축압축시험으로부터 강도정수를 구하기 위하여 재료의 파괴를 정의하는 여러 가지 이론 중 Mohr-Coulomb의 파괴이론을 적용하여 강도정수를 산출하였다. Mohr-Coulomb의 파괴이론은 재료가 파괴될 때 파괴면에서의 전단응력은 전단강도와 같다고 정의한다. 즉, 재료가 파괴될 때의 최대주응력과 최소주응력을 알면 y축은 전단응력을, x축은 수직응력으로 하여 Mohr원을 그려 이 모든 원들은 재료가 파괴될 때의 상태를 표시하므로, 여기에 접하는 선을 긋는다면 이 선상의 모든 점은 주어진 수직응력에 대하여 전단응력이 도달될 수 있는 한계를 의미한다. 이선을 Mohr의 파괴포락선이라 정의하고 그 좌표에서 파괴포락선을 닿는 y절편을 점착력 c로 정의하고 그 기울기를 내부마찰각으로 정의하였다.

모래-점토 혼합토 시험에서 전응력 개념의 내부마찰각(ϕ)과 점착력(c)는 치환율이 증가할수록 증가하는 것

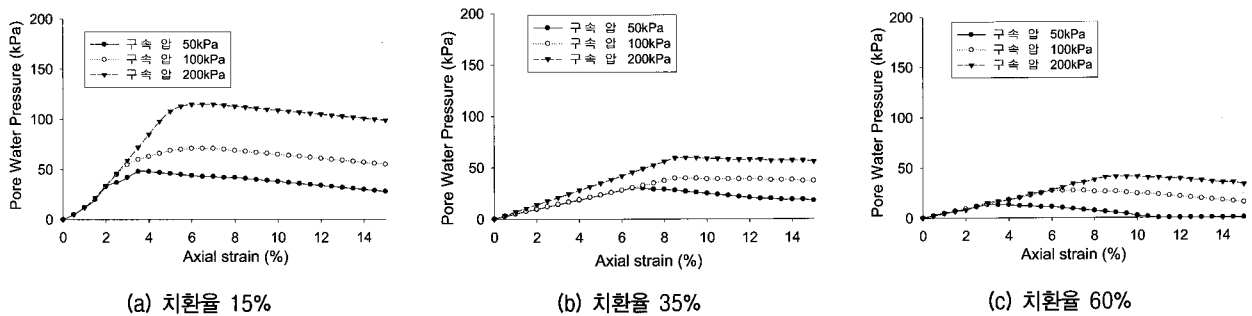


그림 10. 각 치환율별 모래-점토 혼합토의 간극수압-변형률 관계

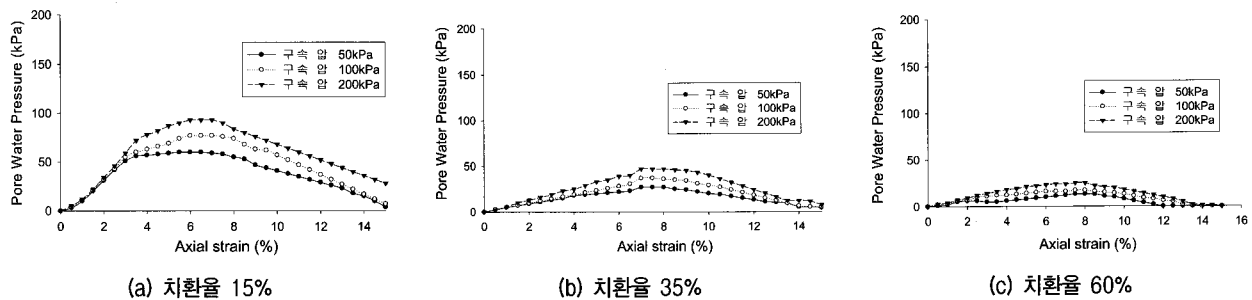


그림 11. 치환율별 RAPP-점토의 간극수압-변형률 관계

으로 나타났다. 강도정수값을 정리하면 내부마찰각(ϕ)은 26.2~35.0°의 범위로 나타났다. 또한 삼축압축시험에서 치환율이 증가함에 따라 혼합토의 강도가 증가하여 점착력이 4.0~18.1kPa로 증가하는 범위로 나타났다. 그러나, RAPP-점토 혼합토의 강도정수값은 내부마찰각(ϕ)은 18.9~33.9°의 범위로 나타났으며, 치환율이 증가함에 따라 치환재의 배수능력으로 인하여 점착력이 557.2~587.8kPa까지 증가하였다. 표 5에 강도정수값을 정리하였다. 또한 100%로 치환된 순수 순환골재 다공질 콘크리트만의 강도정수는 내부마찰각(ϕ)은 32.7~

34.2°의 범위로 나타났고 점착력의 경우에는 727.9~801.1kPa의 범위로 나타났다. 그림 12는 각 치환율별 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 그린 결과이다. 표 6에는 강도정수값을 정리하였다. 또한 비교를 위하여 모래-점토 혼합토와 RAPP-점토 혼합토의 강도정수값을 그림 13에 도시화 하였다.

4. 결론

연약지반개량을 위하여 많이 적용되고 있는 모래다짐말뚝의 대체 재료로서 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)의 활용성을 평가하고자 모래-점토, RAPP-점토로 조성된 시료를 치환율 변화에 따른 구속압을 달리 하면서 삼축압축시험을 실시한 결론은 다음과 같다.

(1) RAPP-점토 혼합토에 대한 삼축압축시험의 응력-변형률 관계는 전반적으로 치환율과 구속압이 증가하면서 정점을 지난 후에는 응력이 서서히 감소하는 변형률연화의 거동을 보였다. 이는 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝 내부의 시멘트의 Bonding효과 발생하여 응력에 저항하다가 파괴가 일어난 후에는 순환골재 시료만으로 응력에 저항하는 것에서 기인함으로 판단된다. 또한 구속압의 변화에 따라 응력 증가는 크게 발생하지 않았는데 이는 전단시에 복

표 4. 치환율별 강도정수

복합토	치환율(%)	c(kPa)	ϕ (°)	B-value
모래-점토	15	4.0	26.2	0.96
	35	9.3	30.9	0.97
	60	18.1	35.0	0.98
RAPP-점토	15	557.2	18.9	0.97
	35	572.2	27.7	0.98
	60	587.8	33.9	0.98

표 5. 치환율100% RAPP의 강도정수값

사례	치환율(%)	c(kPa)	ϕ (°)	B-value
Case 1	100	764.7	32.8	0.99
Case 2	100	727.9	34.2	0.99
Case 3	100	801.1	32.7	0.98

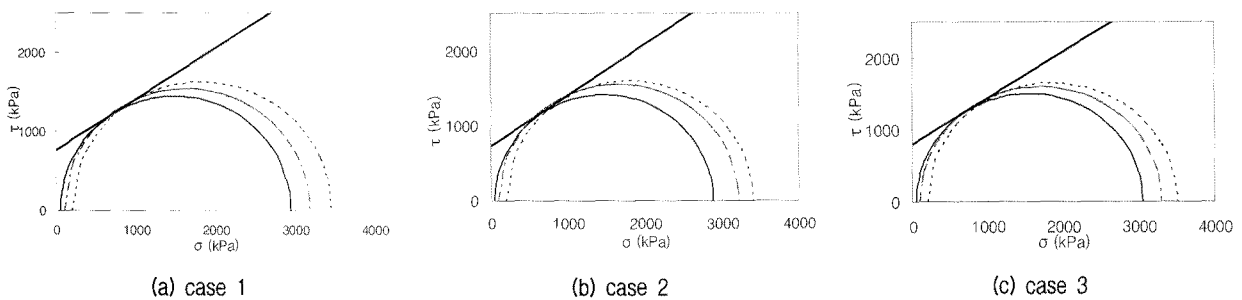


그림 12. 사례별 치환율 100%인 RAPP의 Mohr-coulomb의 파괴포락선

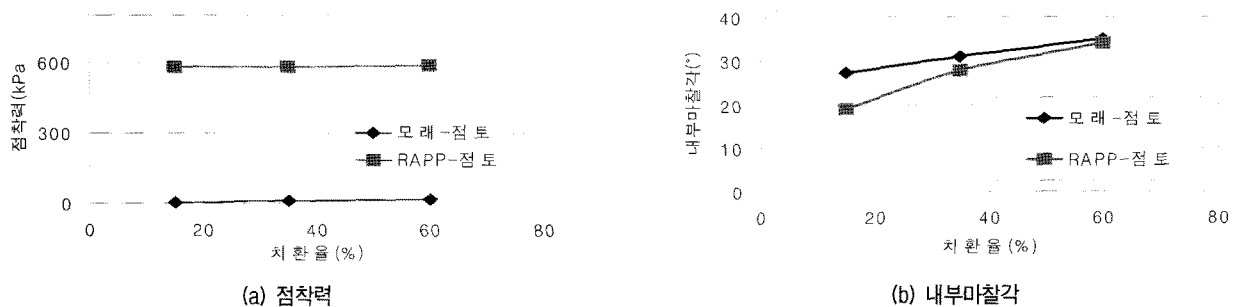


그림 13. 모래-점토, RAPP-점토 혼합토의 강도정수값 관계

합시료 내부의 강도보다는 치환재로 사용된 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝의 강도에 크게 지배되는 것으로 판단되었다.

- (2) 모래말뚝의 경우 응력-변형을 관계에서는 치환율과 구속압이 증가할수록 연직 응력이 계속 증가하는 변형율경화 거동을 보였다. 이는 비배수 전단시 체적변화가 발생하지 않아야 하지만 시료내부 모래의 체적이 팽창하려는 다일러턴시 현상이 발생하여 시료가 파괴에 저항하게 되는 것으로 판단되었다.
- (3) 간극수압-변형율의 관계에서 모래-점토, RAPP-점토 혼합토 모두 간극수압이 증가하다가 정점을 지난 이후에는 점차 감소하였고 치환율이 높을수록 간극수압이 다소 낮게 나타났다.
- (4) 모래-점토 혼합토의 강도정수값은 내부마찰각의 경우, 26~35°의 범위를 나타냈으며, 점착력의 경우는 치환율별로 4~18kPa의 범위로 나타났다. RAPP-점토 혼합토의 경우, 내부마찰각은 18~34°의 범위를 나타냈으며, 점착력의 경우는 557kPa~588kPa의 범위를 나타냈다. 또한 RAPP-점토 혼합토가 아닌 순수 RAPP(치환율 100%)만의 삼축압축시험에서의 강도정수는 내부마찰각의 경우, 32~34°의 범위를 나타냈고 점착력의 경우 727~801kPa의 범위를 보였다.
- (5) 새로운 치환재료인 RAPP와 모래를 비교했을때의 점착력의 경우, 시멘트의 Bonding효과와 골재의 저항이 크게 작용하여 모래말뚝에 비해 RAPP가 약 60%정도의 강도증가를 보였다. 내부마찰각은 10% 정도의 감소를 보였는데 이는 순환골재 다공질 콘크리트의 경우, 내부 치환된 순환골재 다공질 콘크리트에 크게 지배를 받아서 구속압의 변화에 대한 응력의 변화는 크지 않으며, 치환율에 따른 응력의 증가가 두드러지며, 혼합토 내부에 치환된 순환골재 다공질 콘크리트의 강도에 의해 응력이 크게 지배되는 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 이상익, 임준혁, 김병일, 박용원 (2005), “모래-점토 복합토의 전단 거동 특성”, *대한토목학회 논문집*, Vol.25, No.1C pp.1-8.
2. 이세현 (2006), “건설공사에서의 순환골재 재활용 기술과 정책현황”, *대한토목학회지*, 제54권 제4호, pp.135-140.
3. 유승경 (2003), “저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력 분담거동에 대한 실험적 연구”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.19, No.5, pp.253-261.
4. 유승경, 조성민, 김지용, 심민보 (2005), “모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 응력분담특성에 관한 비교 연구”, *한국지반공학회 연약지반 기술위원회 학술발표회 논문집*, pp.443-452.
5. 유승경, 조성민, 심민보, 유남재, 윤길립, 엄영진 (2007), “순환골재를 이용한 다공질 콘크리트말뚝 개발에 관한 연구”, *대한토목학회 정기 학술발표회 논문집*, pp.2136-2139.
6. 유승경, 유남재, 조성민, 심민보 (2007), “순환골재를 이용한 투수성 콘크리트의 역학특성”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제6권, 제2호, pp.17-20.
7. 유승경, 이창민, 김세원, 최항석 (2008), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법에 대한 실내모형실험”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제7권, 제2호, pp.23-29.
8. 윤길립, 박용원, 김병일, 이상익, 권오순 (2000), “모래치환율에 따른 모래다짐말뚝(SCP)지반의 거동특성”, *대한토목학회 정기 학술발표회 논문집*, pp.243-246.
9. 최은호 (2008), *시료 채취 방식에 따른 교란도 평가 석사학위논문*, 인하대학교, pp.26-31.
10. 한국도로공사 (2002), *건설폐기물 재활용 현황조사*.
11. 한상재, 신현영, 김수삼, 김재권 (2005), “저치환율 SCP 복합지반의 배수 전단거동 분석”, *대한토목학회 논문집*, Vol.25, No.3C pp.157-164.
12. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M., and Harada, K. (1979), “The compozer method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns, Proceedings” *International Conference on Soil Reinforcement: Reinforce Earth and other Techniques*, Vol.I, Paris, pp.211-216.
13. Barksdale & Bachus (1983), “Design and Construction of Stone Column” *Georgia Institute of Technology, Atlanta*, Vol.1.

(접수일자 2008. 8. 22, 심사완료일 2008. 12. 20)