

순환잔골재 혼합토의 전단강도 특성

Characteristics of Shear Strength for Recycled Fine Aggregates Mixed Soil

임 월 숙¹⁾ · 권 정 훈²⁾ · 김 민 옥³⁾ · 김 영 목[†]

Im, Weulsook · Kwon, Jeunghoon · Kim, Minwook · Kim, Youngmuk

ABSTRACT : The recycled fine aggregates were mixed with weathered granite soils typically used for fill materials and tested engineering properties, physical properties, and compaction characteristics according to the mixing ratio of the mixed soils. The results of this study were as follows. For the results of A-type compaction test, the recycled fine aggregates showed low effects compared to the weathered soils, but the mixed soils which were mixed with the weathered granite soils and the recycled fine aggregates showed good compaction effects. Especially, the mixing ratio of 70:30 by weight showed for maximum compaction result. From the results of the direct shear test, the cohesion was increased according to proportion of the weathered granite soils. The weathered granite soils neared the optimum moisture content showed for maximum shear strength parameters, while the cohesion of the mixed soil was relatively increased in the wet side of the optimum moisture content. This trend was seemed to remain the same composition in the recycled fine aggregates. The internal friction angle of the recycled fine aggregates and the mixed soils showed maximum value near dry side of the optimum moisture contents. And the internal friction angles of the mixed soils were increased according to higher proportion of the recycled fine aggregates.

Keywords : Recycled fine aggregates, Weathered granite soils, Shear strength, Fill materials, Mixed soil

요 지 : 화강풍화토와 상용화된 순환잔골재를 활용하여 정해진 혼합비율별로 제작한 혼합토에 대하여 물성 특성, 다짐특성 및 전단특성을 위한 시험을 행하였으며, 시험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. A다짐시험 결과 화강풍화토에 비해 순환잔골재는 다짐효과가 낮은 것으로 나타났으나 화강풍화토와 순환잔골재를 혼합한 혼합토의 경우에는 화강풍화토보다도 다짐효과가 높게 나타났으며, 화강풍화토와 순환잔골재의 혼합비율을 중량비 70:30으로 한 경우 최대의 다짐효과를 얻을 수 있었다. 직접전단강도시험 결과 점착력은 모든 함수비에서 화강풍화토의 혼합비율이 커질수록 증가하는 경향이 나타났다. 화강풍화토는 최적함수비 근처에서 최대점착력을 보인 반면 혼합토는 전반적으로 최적함수비의 습윤측에서 상대적으로 점착력이 크게 나타났는데, 이러한 경향은 순환잔골재에 잔류하고 있는 시멘트 성분의 영향으로 판단된다. 내부마찰각은 화강풍화토에서 최적함수비 근처에서 최대로 나타난 반면, 순환잔골재 및 혼합토에서는 건조측에서 오히려 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한, 순환잔골재의 혼합비율이 높아질수록 내부마찰각은 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 순환잔골재, 화강풍화토, 전단강도, 성토재, 혼합토

1. 서 론

최근 건설분야의 친환경구조로의 변화는 다양한 각도로 시도되고 있다. 건설공사가 환경과 조화롭게 시행될 수 있도록 관련기술 개발과 더불어 건설폐기물의 발생 억제와 재활용 촉진에 대한 관심과 노력이 요구되고 있다. 건설폐기물은 배출시기에 따라 차이가 있지만 대략 성상으로 보면 전체의 95%가 불연성이며, 특히 폐콘크리트와 같은 건설폐재료가 전체 건설폐기물의 약 85%정도를 차지하고 있다(건설교통부, 2006).

폐콘크리트에 대한 성토재료로서의 활용은 일정한 크기 이하로 파쇄한 것으로 일반적인 성토재료로는 최대입경 100mm

이하로 규정하고 있으며, 도로 성토재의 보조기층재 등의 목적으로 활용하기 위해서는 요구하는 표준입도에 적합하도록 입도조정이 필요하다. 폐콘크리트의 활용 가능성 및 활용 방안의 다각화를 위하여 물리적, 역학적 시험 및 특성 분석을 행하고 성토재료로서의 활용가능성을 제시한 바도 있다(건설기술연구원, 2000).

2003년 건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률(2009년 일부개정)이 제정되면서 순환골재에 대한 정의로부터 품질인증에 이르는 다각적인 조치가 규정되었는데, 건설폐재로는 주로 순환골재의 원료가 되는 것으로서 순환골재(recycled aggregates)라 함은 건설폐기물을 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 거쳐 규정에

1) 비회원, 한밭대학교 산업대학원 석사

2) 정회원, 한밭대학교 산업대학원 석사

3) 정회원, 한밭대학교 산업대학원 석사

† 정회원, 한밭대학교 공과대학 토목환경도시공학부 교수(E-mail : kym@hanbat.ac.kr)

의한 품질기준에 적합하게 한 것을 말한다(이세현, 2006).

순환골재의 활용은 주로 도로건설재료, 뒷채움재, 성토재, 레미콘 등에 활용되고 있는데, 2004년의 자료를 보면 도로보조기 층용 이상의 실질재활용율은 14%에 불과한 것으로 나타났다(환경부, 2007). 즉, 실질재활용율을 높이기 위한 노력에도 불구하고 순환골재의 성토재로 사용이 가장 높은 것이 현실이다.

성토재로써의 순환골재 재활용은 환경공학적인 분석뿐만 아니라 근본적으로 지반공학적인 특성에 대한 연구를 필요로 하며, 이는 향후 폭우나 지진 등에 의한 자연재해에 대한 대비를 위해서도 필수적으로 요구되는 사항이다.

지반공학적인 관점에서 도로의 노상이나 노체와 같은 도로 성토재로써의 성질을 규명하기 위해서는 일반적으로 입도 분포, 비중과 같은 물리적 성질, 다짐특성, 그리고 성토시 및 안정적인 유지관리를 위해서는 강도특성과 침하 등의 공학적 성질을 분석해야 한다.

일반적인 성토재로 많이 사용되고 있는 화강풍화토는 성질이 비교적 양호하여 성토재로써의 양질토사로 취급되는 경우가 많고 있으며, 화강풍화토의 지반공학적인 특성은 직접 전단시험이나 삼축압축시험을 이용하여 고찰할 수 있다(Wong, 1982; 김종열 등, 2001). 그러나 양질의 화강풍화토는 요구되는 위치에 따라 필요한 만큼 확보하는 것이 현실적으로 어려울 수 있으며, 이는 상대적으로 순환골재의 재활용을 높일 수 있는 계기가 될 수 있다.

대부분의 순환골재의 성토재 사용에 대한 연구는 주로 자갈과 같은 굵은 조립재에 대한 것으로(이용수 등, 2005) 건설폐기물에서 재활용되고 있는 순환골재의 활용을 확대하기 위해서는 모래와 같은 순환골재에 대한 성토재로써의 성질 규명이 필요하다.

따라서 본 연구는 순환골재 중 사질토사와 유사한 입도를 갖고 있는 순환골재의 지반공학적인 특성을 규명하기 위해 물리적 특성 시험, 다짐시험 및 전단강도시험을 행하였으며, 이를 일반적인 양질성토재료인 화강풍화토의 시험결과와 비교 분석하였다. 또한, 순환골재를 화강풍화토와 혼합하여 사용하는 혼합토의 경우에 대해 혼합비율을 달리하여 시험을 행하여 그 결과를 비교 분석하였다.

여기서 성토재로써의 성질 규명시 필요한 침하문제는 본 시험 재료가 연약토가 아니고 성토시 요구되는 다짐도를 충족하는 조건이 되어야 하므로 본 연구에서 배제하였다.

2. 재료 및 시험

2.1 시험 재료

본 연구에 사용된 순환골재는 순환골재 품질기준(KS F

2573)에 준하여 검증된 건조식으로 제조된 S사의 순환골재를 사용하였다. 이는 육안상으로 굵은 자갈의 크기는 포함하고 있지 않은 5mm이하의 모래질 상태이다.

또한, 본 연구에서 사용된 토사는 대전광역시외곽의 도로현장에서 채취한 것으로써 도로성토재로 사용하고 있는 화강풍화토이다. 시험용 시료는 도로구간의 절토부에서 채취하였으며, 채취시 육안상으로 볼 때 굵은 자갈과 같은 입자는 보이지 않았다.

시험을 실시하기 전 시료의 조건을 동일한 상태로 유지하고 함수비 조절을 위하여 덩어리를 손으로 부순 다음 2주간 상온에서 자연 건조시켰다.

자연 건조시킨 화강풍화토와 순환골재를 혼합하여 성토재로 사용하는 경우의 지반공학적인 특성을 분석하기 위하여 두 재료를 혼합한 혼합토를 제조하였다.

자연 상태에서 건조한 시료의 함수비를 구하여 시료상태를 확인한 다음 중량비로 화강풍화토와 순환골재를 수작업에 의하여 충분히 섞어 혼합하였다.

혼합비율은 현실적인 시공성을 고려하여 중량비로 50:50으로 혼합한 경우, 화강풍화토가 많은 조건인 화강풍화토와 순환골재의 혼합비 70:30, 순환골재가 많은 조건인 30:70으로 하였으며, 이를 정리하면 표 1과 같다.

또한, 시험 전 자연 건조상태에서의 각 시료 상태는 그림 1과 같다.

표 1. 화강풍화토와 순환골재의 혼합비율

구 분		화강 풍화토	혼합토 A	혼합토 B	혼합토 C	순환 골재
혼합 비율	화강풍화토	100	70	50	30	0
	순환골재	0	30	50	70	100



(a) 순환골재



(b) 화강풍화토



(c) 혼합토 A



(d) 혼합토 B

그림 1. 화강풍화토, 순환골재 및 혼합토의 모습

2.2 시험 방법

시험은 순환골재, 화강풍화토 및 각 혼합토에 대하여 물성시험을 실시하였으며, 일반적인 노체성토다짐 규격인 흙의 다짐시험방법(KS F 2312)의 A다짐시험을 행하고 그 결과로부터 다짐특성을 분석하였다.

다짐은 숙련도에 따라서 그 차이가 다소 발생할 수 있으므로 자동다짐기를 이용하여 다짐의 균일성을 확보하였다.

전단강도특성을 규명하기 위한 시험준비로써 다짐시험을 통해 각각의 시료에서 최적함수비의 조건을 구하였으며, 최적함수비 상태를 기준으로 건조측과 습윤측으로 나누어 시료를 준비하였다. 즉, 각각 최적함수비, 건조측 및 습윤측 다짐을 행하여 제작된 혼합토 몰드에 대하여 직접전단시험을 실시하기 위해 몰드의 상, 중, 하에서 컷팅링을 사용하여 전단시험용 시료를 채취하였다.

직접전단시험용 시료의 크기는 직접전단시험(KS F 2343)에 규정되어 있는 바와 같이 직경 60mm, 높이 20mm로 하였으며, 이때 사용된 시험기는 국내 J사에 의해 제작된 소형 직접전단시험장치로써 전단력을 디지털로 읽을 수 있도록 되어 있으며, 충분히 검증을 행한 후 사용하였다.

직접전단시험용 시료는 원칙적으로 최소 4개를 기준으로 하였으며, 시험을 실시하기 전 채취된 시료는 컷팅링 상태로 함수비의 변화가 없도록 하였다. 즉, 컷팅링 상태에서 수침 등에 의한 임의로 함수비 변화를 시키지 않았으며, 다짐시 조정된 함수비 상태를 유지하도록 하였다. 이때 시료 상태가 불균질하다고 판단되는 경우 시험에서 제외시켰으며, 그 외 필요시 재시험을 실시하여 시험에 의한 오류를 최소화하도록 하였다.

동일한 시료 3~4개에 대해 각각 수직응력을 달리 작용

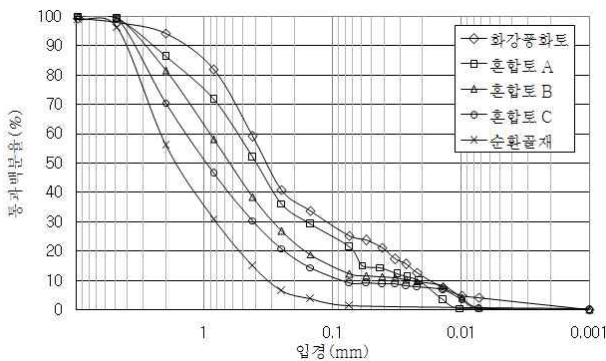


그림 2. 혼합토의 입도분포곡선

표 2. 화강풍화토와 순환골재의 물성시험 결과

	비중	75 μ m체 통과율	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	균등계수	곡률계수	액성한계	소성지수
화강풍화토	2.61	25.2	0.42	0.11	0.018	23.3	1.60	-	N.P
순환골재	2.63	1.2	2.12	0.82	0.32	6.6	0.99	-	N.P

시키면 전단저항력도 달라져 공시체별 수직응력과 전단응력 관계를 선형으로 나타낼 수 있다. 이때 수직응력은 각각 50kPa(0.499kg/cm²), 88kPa(0.874kg/cm²), 125kPa(1.243kg/cm²)의 총 3단계로 하였으며, 하중을 재하하고 시료에 급격한 변화를 주지 않기 위해 전단속도를 0.5mm/min로 유지하여 변형 제어방법으로 실험을 실시하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 물성 특성

3.1.1 화강풍화토

본 연구에 사용된 성토재의 물리적 특성을 확인하기 위하여 함수비, 비중시험, 액·소성시험 및 입도분석시험을 실시하였다.

풍화토의 경우 일반적으로 입자들이 서로 붙어 있는 경우가 많아 입도분석시험시 노건조 후 중량을 재고 이를 물로 세척하여 75 μ m체에 걸린 부분에 대하여 체분석을 하였다. 체분석은 시료를 자연 건조시킨 다음 체진동기를 이용하여 충분히 진동시켜 구하였으며, 또한 75 μ m체 통과분에 한해서 비중계분석시험을 실시하였다. 그 결과 입도분포곡선은 그림 2와 같다.

한편, 화강풍화토의 물성시험결과를 정리하면 표 2와 같이 나타났다. 시험결과 비중이 2.61로써 전형적인 화강풍화토의 값을 보였으며, 균등계수가 23.3이고, 곡률계수가 1.60인 입도분포를 보였다. 또한, 세립분이 25.2%로써 세립분은 주로 굵은 실트에 해당하는 우리나라의 전형적인 화강풍화토의 조건을 보이고 있다(박병기 등, 1998).

3.1.2 순환골재

본 연구에 사용된 순환골재는 순환골재 품질 기준(국토해양부, 2009)에 준한 제품을 사용하였다.

본 순환골재에 대한 시험은 순환골재를 도로의 노상이나 노체와 같은 성토용으로 사용할 때의 품질기준에 적합한지 여부를 판단하기 위한 것으로써 표 3에 제시되어 있는 성토용 순환골재의 품질평가기준에 의해 품질평가기준에 의해 품질평가를 실시한 것이다. 표 3에서 보는 바와 같이 순환골재의 품질기준을 만족하는 결과를 보이고 있어 성토용으로 충분히 사용 가능한 것으로 판단된다.

표 3. 성토용 순환골재의 품질 기준

구 분	흙쌓기의 최상부면으로부터 100cm 이내의 하부	흙쌓기의 최상부면으로부터 100cm 이상의 하부	시험방법	사용 순환골재
최대치수(mm)	100 이하	100 이하	-	5
수정 CBR(시방다짐)	10 이상	2.5 이상	KS F 2320	40.9
5mm체 통과율(%)	25~100	-	KS F 2502	100
0.08mm체 통과율(%)	0~25	-	KS F 2301, KS F 2309	1.2
소성지수	10 이하	-	KS F 2303	-
다짐 후 건조밀도(t/m^3)	-	1.5 이상	KS F 2312	1.68
이물질 함유량(%) <small>(유기이물질)</small>	1.0이하(용적)		KS F 2576	0.2

한편, 입도시험 결과 그림 2와 같은 입도분포를 보였으며, 통상적인 물성시험 결과는 표 2에 제시된 바와 같다.

3.1.3 혼합토

혼합토의 혼합비율에 따른 입도가 다짐 및 진단특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 혼합토를 조성한 후 입도분석 시험을 실시하였고, 시험결과 그림 2와 같이 나타났다.

세립분의 함유율이 혼합토의 공학적 특성에 미칠 수 있는 영향을 분석하기 위하여 75 μ m체의 통과율을 보면 그림 2에서 보는 바와 같이 화강풍화토의 경우 25.2%, 혼합토 A는 21.4%, 혼합토 B는 13.0%, 혼합토 C는 7.5%, 그리고 순환골재는 1.2%로 나타나 화강풍화토의 비율이 높을수록 세립분의 함유량이 높게 나타나고 있다. 이는 세립분이 거의 없는 순환골재가 화강풍화토에 혼합됨에 따라 그 혼합비율에 비례하여 세립함유율이 변하기 때문이다.

입도가 비교적 균등해 보이는 순환골재에 비하여 입도분포가 양호한 화강풍화토를 혼합한 경우 화강풍화토의 혼합비율이 높을수록 화강풍화토의 입도분포에 근접하는 모습을 보이고 있으며, 그만큼 공학적 성질이 양호해질 수 있음을 예측할 수 있다.

표 4. 혼합토의 함수비별 건조단위중량 및 최적함수비

혼합토	함수비(%)						비고	
	5	7.5	10	12.5	15	20	최대건조 단위중량 (kN/m^3)	최적 함수비 (%)
화강 풍화토	17.06	17.21	17.37	17.30	17.05	16.47	17.37	10.5
혼합토 A	17.37	17.55	17.78	17.84	17.65	16.96	17.86	11.8
혼합토 B	16.99	17.26	17.45	17.53	17.21	16.96	17.55	12.1
혼합토 C	16.91	17.37	17.59	17.67	16.42	16.78	17.69	12.3
순환 골재	16.07	16.28	16.39	16.45	16.40	16.32	16.46	12.5

3.2 다짐 특성

본 연구에 사용된 화강풍화토와 순환골재, 그리고 혼합토에 대하여 함수비를 달리하여 A다짐시험을 실시한 결과 표 4와 같으며, 표 4의 시험결과로부터 다짐곡선을 그리면 그림 3과 같다. 여기서 최적함수비와 최대건조단위중량은 그림 3으로부터 구하여 이를 표 4에 제시하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 다짐곡선을 보면 화강풍화토는 전형적인 형태의 다짐곡선을 보이면서 최대건조단위중량 및 최적함수비가 명확하게 나타나고 있다.

한편으로 순환골재의 경우에는 비교적 완만하게 다짐곡선이 그려지고 있는데, 이러한 다짐곡선의 변화는 입도가 균등한 조립재에서 흔히 볼 수 있는 것으로 함수비의 변화에 따른 건조단위중량의 변화가 크지 않기 때문이며, 특히 습윤측에서의 변화는 명확하게 나타나지 않고 있다(Das, 2002).

본 연구에서 사용된 순환골재는 그림 2의 입도분포곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 순환골재로써 비교적 입도가 균등한 모래질 입자의 크기로 구성되어 있기 때문에 이러한 다짐특성을 보이는 것으로 판단된다.

한편, 혼합토의 경우에는 화강풍화토나 순환골재에 비해 상대적으로 보다 명확하게 다짐곡선을 나타내고 있어 함수비 변화에 따른 다짐효과가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

최적함수비의 경우 화강풍화토로만 이루어진 경우 약 10.5%

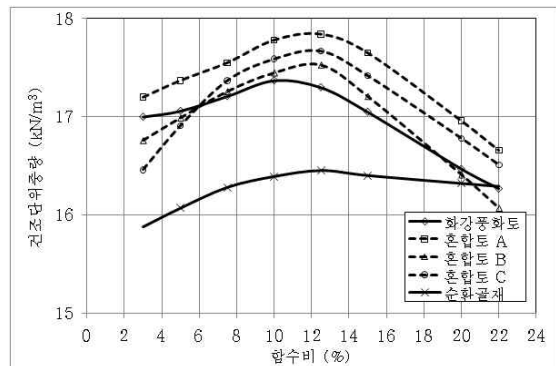


그림 3. 혼합토의 다짐시험결과

로 나타났으며, 순환골재의 경우 약 12.5%로써 화강풍화토에 비해 약간 크게 나타났다.

혼합토의 경우에는 혼합비율에 따라 순환골재의 혼합비율일 증가할수록 최적함수비가 조금씩 커지는 경향을 나타냈다. 이는 화강풍화토에 순환골재가 혼합됨에 따라 그 흙의 구성이 다르게 되었기 때문으로 보인다.

최적함수비에 따른 최대건조단위중량은 화강풍화토의 17.37kN/m³에 비해 순환골재의 경우 16.46kN/m³으로 나타나 상대적으로 작게 나타나고 있는데, 이는 순환골재가 화강풍화토에 비해 입도가 균등하기 때문으로 보인다.

결과적으로 토사의 혼합에 따른 다짐효과는 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 즉, 혼합토의 경우 최대건조단위중량이 화강풍화토나 순환골재에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있어 성토재료로 사용함에 있어 혼합토의 사용이 유용한 것으로 판단된다.

따라서 성토재료로 주로 쓰이는 화강풍화토만을 활용하기 보다는 순환골재와 혼합을 하게 되면 전체적으로 다짐효과가 커지는 것을 확인하였으며, 특히 본 연구의 다짐시험 결과에 의하면 화강풍화토와 순환골재의 혼합비율을 70 : 30으로 한 경우 최대의 다짐효과를 얻을 수 있었다.

한편, 혼합토 B와 혼합토 C는 거의 차이가 없었으며, 현장여건에 따라 다를 수 있지만 일반적으로 경제적인 관점에서 보면 재료구입비가 요구되는 순환골재의 혼합비율을 높이는 것보다는 화강풍화토의 혼합비율이 높은 것이 바람직한 선택이라 할 수 있을 것이다.

한국건설기술원(2000)에 의하면 도로의 노반재, 성토재 등으로 활용하기 위한 시험에서 40mm 크기로 파쇄한 폐콘크리트에 화강토를 혼합하여 다짐을 행한 결과 혼합토가 화강토보다 다짐 효과가 좋았으며, 특히 혼합비율에서는(화강토 : 폐콘크리트)가 (70~80) : (30~20)이었다고 한다. 즉, 이는 본 연구 결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

3.3 전단 특성

화강풍화토, 순환골재 및 각각의 혼합비율에 따른 혼합토에 대하여 최적함수비와 건조측, 습윤측 상태에서의 전단특성을 확인하기 위해 함수비를 각각 5%, 10%, 15%로 달리하여 직접전단시험을 행하였으며, 그 결과를 분석하면 다음과 같다.

3.3.1 화강풍화토

전단시험결과 화강풍화토는 수평변위 3mm내외에서 최대전단응력이 나타나고 있으며, 이후 점차 감소하여 거의 일정한 상태의 잔류전단응력을 갖는 모습을 나타내었다. 이러한 전단 특성은 화강풍화토의 경우 함수비가 낮은 경우

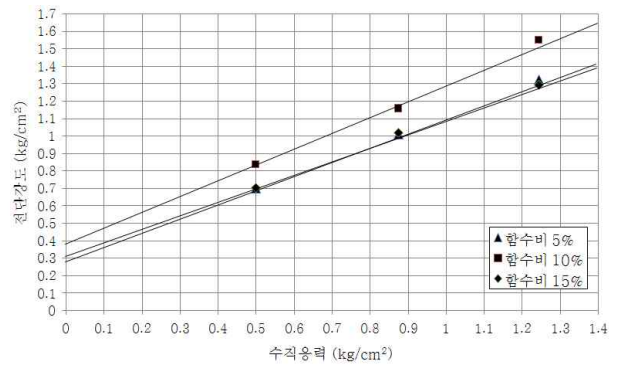


그림 4. 화강풍화토의 다짐함수비별 전단강도 시험결과

(19% 이하) 대략 수평변위 2~4mm 범위내에서 나타나는 다른 연구결과(정진섭과 양재혁, 2000)와 유사한 현상을 보이고 있다.

또한, 수직변위는 수직응력이 증가됨에 따라 압축되는 모습을 나타내었다가 전단변위가 증가될수록 점차 수직변위가 증가하는 dilatancy현상을 보이고 있으며, 수직응력이 증가될수록 압축되는 정도가 커지는 경향을 보였다.

최대전단응력과 수직응력의 관계를 나타내면 그림 4와 같으며, 여기서 절편값이 점착력(c), 선의 기울기가 내부마찰각(ϕ)이 되어 강도정수를 구할 수 있다.

그림 4에 의하면 강도정수는 최적함수비 부근인 함수비 10%에서 최대를 보이고 있으며, 건조측과 습윤측에서는 거의 유사한 크기를 보이고 있다. 즉, 최적함수비의 건조측의 경우인 함수비 5%인 조건에서는 최적함수비 상태보다는 강도정수가 약간 작게 나타나고 있으며, 습윤측인 15%인 경우에도 건조측에서의 값과 거의 차이가 없었다.

일반적으로 건조측과 습윤측에서의 전단강도 변화를 비교해 보면 최적함수비 부근에서 최대를 나타내고 있으며, 건조측과 습윤측으로 가면서 점차 작아지는 경향을 보이기도 하는데, 이러한 전단특성은 화강풍화토에서 일반적으로 볼 수 있는 특성으로 판단된다(임현경, 2004).

그러나 실제 이러한 경향의 차이는 흙의 구성 조건이나 풍화정도, 다짐시 입자의 파쇄정도 등에 따라 많이 달라질 수 있을 것으로 보인다(정진섭과 양재혁, 2000).

풍화토의 파쇄는 통상 100kPa의 구속압력에서도 전단시험에 의해 연속적으로 일어난다는 연구 결과(Miura and Yamaouchi, 1975) 등을 참고하여 볼 때 본 연구에서 전단시 가해지는 압력이 최대 125kPa인 점을 감안하면 입자 파쇄의 영향이 결과에 미칠 수 있을 것으로 추론할 수 있을 것이다.

3.3.2 순환골재

그림 5는 순환골재에 대한 다짐 후 최대전단응력과 수직응력의 관계를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보는 바와 같이

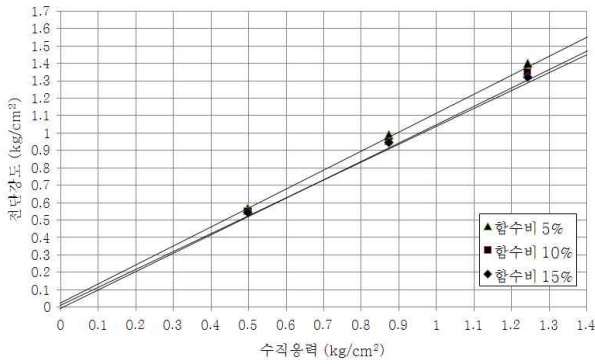


그림 5. 순환골재의 다짐함수비별 전단강도 시험결과

점착력은 전체적으로 무시할 정도의 아주 작은 값을 보이고 있다.

내부마찰각은 전체적으로 크게 나타나고 있는데 최적함수비보다 건조측에서 약간 크게 나타나고 있어 순환골재의 경우 강도정수의 변화에 대한 다짐함수비의 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 즉, 본 연구에서 사용되고 있는 순환골재의 입도분포를 보면 그림 2에서 보는 바와 같이 입도가 비교적 균등한 상태로써 다짐시의 함수비 영향이 크게 나타나지 않고 있고, 이러한 이유로 전단특성 역시 큰 차이를 보이지 않고 있다.

3.3.3 혼합토 A

전반적인 양상은 화강풍화토의 경우와 유사하게 나타났지만 건조측에서는 최적함수비 상태에 비해 점착력의 감소 효과가 나타나고 있다. 이는 조립토가 혼합됨에 따른 영향으로 입도분포가 달라졌기 때문으로 판단된다.

그림 6에서 보는 바와 같이 혼합토 A의 습윤측에서의 점착력은 건조측에 비해 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 최적함수비 부근에서의 점착력의 크기와 유사한 값을 보이고 있다. 이러한 경향은 화강풍화토와는 다른 것으로써 이는 순환골재 표면에 남아있는 시멘트 성분에 의해 함수비가 많아지면서 나타나는 것으로 보인다.

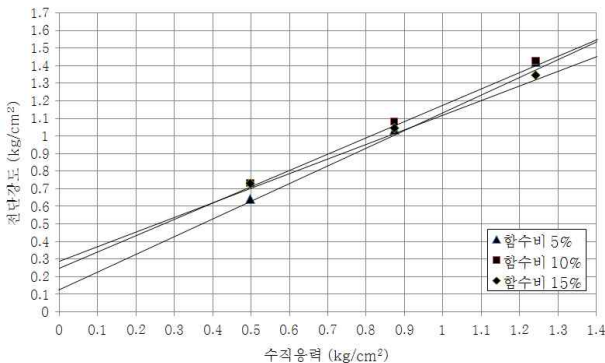


그림 6. 혼합토 A의 다짐함수비별 전단강도 시험결과

한편, 흙의 내부마찰각은 순환골재의 경우와 유사하게 건조측이 습윤측보다 약간 크게 나타나고 있는데 이는 혼합토 내에서의 조립재의 혼합비율이 높아졌기 때문으로 보인다.

3.3.4 혼합토 B

화강풍화토와 순환골재가 중량비로 50:50의 비율로 혼합된 혼합토 B의 경우에도 혼합토 A의 경우와 유사하게 전반적으로 수평변위 3mm 정도에서 최대전단응력이 나타났으며, 이후 전단응력이 일부 감소한 후 일정해져 잔류전단응력을 나타내었다.

그림 7에서 보는 바와 같이 점착력은 혼합토 A와 유사한 경향을 보이고 있는데 건조측에 비해 최적함수비 부근에서 크게 증가하고 있으며, 습윤측의 경우에도 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 역시 순환골재 표면에 남아있는 시멘트 성분에 의한 것으로 추정된다.

내부마찰각은 순환골재의 경우와 유사하게 건조측이 습윤측보다 약간 크게 나타나고 있는데 이는 혼합토 내에서의 조립재의 혼합비율이 높아졌기 때문으로 판단된다.

3.3.5 혼합토 C

그림 8은 혼합토 C에 대한 직접전단시험결과를 나타낸 것으로 점착력은 건조측에 비해 최적함수비 부근에서 크게

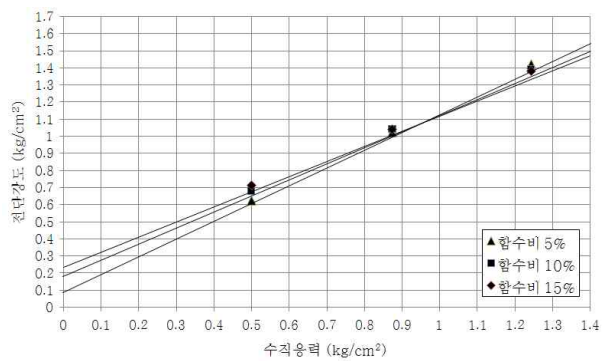


그림 7. 혼합토 B의 다짐함수비별 전단강도 시험결과

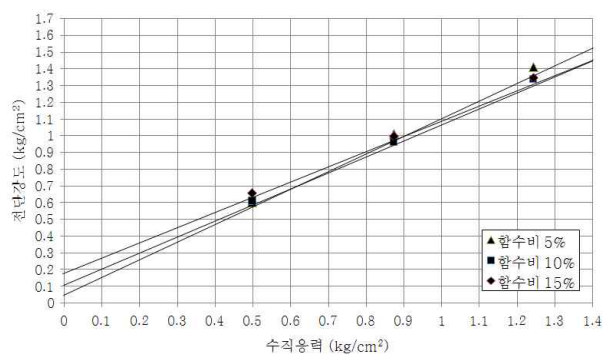


그림 8. 혼합토 C의 다짐함수비별 전단강도 시험결과

나타나고 있으며, 습윤층의 경우에는 보다 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 화강풍화토와 달리 순환골재의 양이 증가함에 따라 순환골재 표면에 남아있는 시멘트 성분의 영향을 받은 것으로 보인다. 즉, 순환골재와 화강풍화토가 혼합되는 경우 순환골재에 함유되어 있는 시멘트 성분이 점착력의 변화에 크지는 않지만 약간의 영향은 주고 있는 것으로 추정된다.

한편, 내부마찰각은 순환골재의 경우와 유사하게 건조층이 습윤층보다 약간 크게 나타나고 있는데 이는 혼합토 내에서의 조립재의 혼합비율이 높아졌기 때문으로 보인다.

3.4 혼합비율에 따른 전단강도정수의 변화

화강풍화토, 순환골재 및 각각의 혼합비율에 따른 혼합토에 대하여 전단강도정수의 변화를 보다 명확하게 알아보기 위해 앞에서 분석한 결과를 정리하면 표 5와 같다.

최적함수비와 건조층, 그리고 습윤층 상태에서의 전단강도정수의 변화를 분석하기 위하여 함수비를 각각 5%, 10%, 15%로 달리하여 직접전단시험을 행한 결과를 나타내고 있는 표 5로부터 점착력과 내부마찰각으로 분리하여 나타내면 각각 그림 9 및 그림 10과 같다.

그림 9에서 보는 바와 같이 점착력은 화강풍화토로부터 순환골재의 혼합비율이 높아질수록 점차 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 순환골재의 혼합으로 인해 혼합토내에서 조립재의 함유비율이 상대적으로 높아지기 때문으로 보인다. 즉, 순환골재의 혼합비율이 높아질수록 상대적으로 혼합토내에서의 세립분의 비율은 작아지게 되어 결과적으로

표 5. 혼합토의 다짐함수비별 전단강도정수

혼합토	함수비 (%)	전단강도정수	
		점착력, c (kPa)	내부마찰각, ϕ (°)
화강풍화토	5	28.42	39.21
	10	37.24	42.36
	15	31.36	37.35
혼합토 A	5	13.72	45.34
	10	25.48	43.13
	15	29.40	40.21
혼합토 B	5	9.80	46.23
	10	19.60	43.31
	15	25.48	41.40
혼합토 C	5	5.88	47.12
	10	11.76	44.70
	15	19.60	42.18
순환골재	5	0.98	48.14
	10	1.96	46.40
	15	4.90	45.34

점착력의 크기도 작아지는 것으로 판단된다.

화강풍화토는 최적함수비 근처에서 최대점착력을 보인 반면, 혼합토는 전반적으로 건조층에 비해 함수비가 높아져 최적함수비 이상으로 증가하여 습윤층이 되면 점착력은 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 경향은 순환골재에 잔류하고 있는 시멘트 성분의 영향으로 판단된다. 또한, 조립재의 비율이 증가함에 따라 부분적으로는 결보기점착력에 의한 효과도 기여하는 바가 있을 것으로 보인다.

내부마찰각은 그림 10에서 보는 바와 같이 순환골재의 혼합비율이 높아질수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 세부적으로는 화강풍화토에서는 최적함수비 근처에서 최대로 나타난 반면, 혼합토는 전반적으로 건조층에서 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 혼합토내에서 순환골재의 혼합비율이 높아짐에 따라 조립재의 혼합비율이 높아진 영향 때문으로 판단된다.

순환골재는 세립분이 거의 없는 상태이나 화강풍화토는 세립분을 어느 정도 갖고 있어 혼합시 세립분의 영향을 받을 수 있을 것이다. 또한, 순환골재에 미미하지만 시멘트 성분이 잔류되어 있어 이것이 전단강도정수에 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다.

그림 11은 혼합토에서 점착력에 대한 세립분의 영향을 분석하기 위해 각각의 혼합토에 포함되어 있는 세립함유율 별로 건조층, 최적함수비, 그리고 습윤층의 값에 대한 대략적인 추세 경향을 나타낸 것이다. 전반적인 변화추세는 세

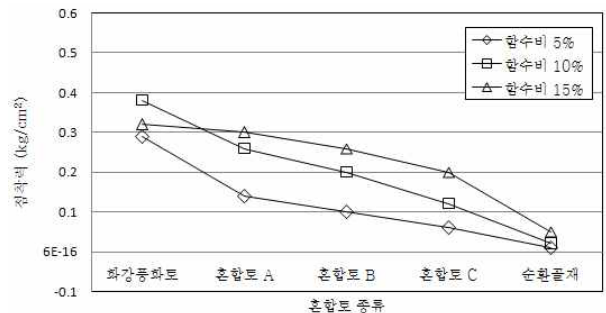


그림 9. 혼합토의 다짐함수비별 점착력의 변화

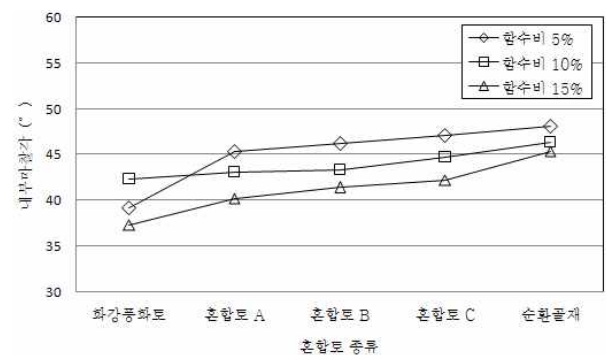


그림 10. 혼합토의 다짐함수비별 내부마찰각의 변화

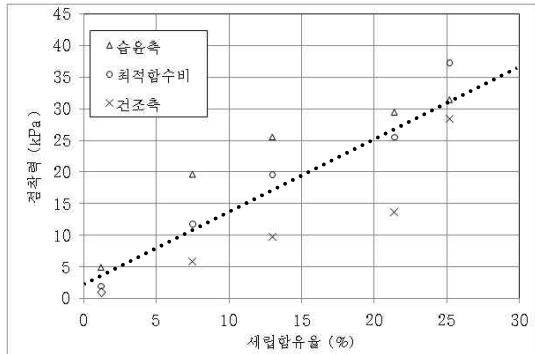


그림 11. 혼합토의 세립함유율에 따른 점착력의 변화 추세

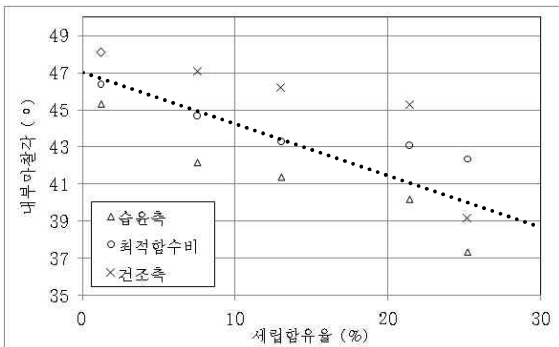


그림 12. 혼합토의 세립함유율에 따른 내부마찰각의 변화 추세

립함유율이 증가하게 되면 점착력이 증가하는 경향을 보이고 있다.

한편, 혼합토의 세립함유율에 따른 내부마찰각의 변화는 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 그림 12에 의하면 혼합토의 세립함유율이 증가함에 따라 전반적으로 내부마찰각이 감소하는 추세를 보이고 있다.

화강풍화토의 경우 75 μ m체 통과량이 증가함에 따라 내부마찰각은 감소하고 반대로 점착력은 다소 증가하는 성향을 보인다(김상규, 1996; 김종열 등, 2001).

이러한 화강풍화토의 특성을 참고하여 볼 때, 본 연구에서 보는 바와 같이 세립분을 갖고 있는 화강풍화토와 세립분이 거의 없는 순환골재를 혼합하는 순환골재의 혼합비율에 따라 상대적으로 세립분의 함유비율도 변할 수 밖에 없으므로 강도정수도 화강풍화토의 변화추세와 유사하게 변하는 경향을 보이는 것으로 보인다. 그러나 한편으로는 순환골재의 혼합비율에 따라 입도분포가 변하기 때문에 이에 대한 고려도 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 순환골재의 성토재료로의 활용을 위한 방안으로 공학적 특성을 규명하기 위해 대전의 도로현장에서 채취

한 화강풍화토와 상용화된 순환골재 증 순환잔골재를 대상으로 혼합비율별로 제작한 혼합토에 대하여 물리적 특성, 다짐 특성 및 전단특성을 위한 실내시험을 실시하고 이를 분석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다짐시험 결과 화강풍화토에 비해 순환잔골재는 다짐효과가 낮은 것으로 나타났으나 화강풍화토와 순환잔골재를 혼합한 혼합토의 경우에는 화강풍화토보다 오히려 다짐효과가 높게 나타났으며, 화강풍화토와 순환잔골재의 혼합비율을 중량비 70:30으로 한 경우 최대의 다짐효과를 얻을 수 있었다.
- (2) 전단강도시험 결과 점착력은 건조측 함수비 5%, 최적 함수비 인근의 10%, 그리고 습윤측 함수비 15%의 모든 조건에서 화강풍화토의 혼합비율이 커질수록 증가하는 경향이 나타났다.
- (3) 화강풍화토는 최적함수비에서 최대점착력을 보인 반면, 혼합토는 전반적으로 최적함수비의 습윤측으로 증가하면서 상대적으로 점착력이 크게 나타났는데, 이러한 경향은 순환잔골재에 잔류하고 있는 시멘트 성분의 영향으로 판단된다.
- (4) 내부마찰각은 화강풍화토의 경우 최적함수비에서 최대로 나타난 반면, 순환잔골재 및 혼합토에서는 건조측에서 오히려 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한, 순환잔골재의 혼합비율이 높아질수록 내부마찰각은 증가하는 것으로 나타나고 있는데, 이는 조립재의 혼합비율이 높아진 영향 때문으로 판단된다.
- (5) 혼합토의 경우에도 화강풍화토와 유사하게 세립함유율이 높아질수록 점착력은 증가하고 내부마찰각은 감소하는 추세를 보였다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2006), 제2차 건설환경기본계획, pp. 143~158.
2. 국토해양부(2009), 순환골재 품질기준, pp. 66~78.
3. 김상규(1996), 보강토구조물 뒤채움 재료로서 화강풍화토의 적용성 연구, 한국지반공학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 66~67.
4. 김종열, 이용희, 이진수(2001), 세립분 함유량이 다짐화강토의 역학적 특성에 미치는 영향, 대한토목학회논문집, Vol. 21, No. 4-C, pp. 465~470.
5. 박병기, 이진수, 이광찬, 문 용(1998), 풍화도에 따른 화강토의 파쇄특성, 대한토목학회논문집, Vol. 18, No. III-2, pp. 227~240.
6. 이세현(2006), 건설공사에서의 순환골재 재활용 기술과 정책 방향, 대한토목학회지, Vol. 54, No. 4, pp. 135~140.
7. 이용수, 권용완, 현재혁(2005), 도로건설재료로 순환골재의 공학적, 환경적 특성에 관한 기초연구, 한국지반환경공학회논문집, Vol. 6, No. 3, pp. 17~23.

8. 임헌경(2004), *충남지역 화강 풍화토의 다짐조건에 따른 전단 강도 특성*, 석사학위논문, 한밭대학교, pp. 1~90.
9. 정진섭, 양재혁(2000), 다짐화강토에 대한 다짐함수비와 입자과쇄의 영향, *대한토목학회논문집*, Vol. 20, No. 3-C, pp. 269~279.
10. 한국건설기술연구원(2000), *건설부산물 유효활용 기술*, 연구보고서, 건기연 2000-072, pp. 33~83.
11. 환경부(2007), *제2차 국가폐기물관리종합계획(2002-2011) 수정계획*, pp. 94~99.
12. Das, B. M.(2002), *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed., Brooks/Cole, pp. 100~138.
13. Miura, M. and Yamaouchi, T.(1975), Effect of Water on the Behaviour of a Quartz-rich Sand under High Stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp. 29~34.
14. Wong, H. Y.(1982), An Evaluation of Various of Triaxial Testing and Analysis for Residual Soils in Hong Kong, *Proceedings of the Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference*, Hong Kong, pp. 35~61.

(접수일: 2010. 3. 3 심사일: 2010. 3. 15 심사완료일: 2010. 4. 16)