

지반의 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도 정수의 변화

Effect of Varying Water Content on the Mohr-Coulomb Shear Strength Parameters for Soils

김범주[†] · 김기웅¹⁾ · 이승호²⁾ · 황영철³⁾ · 박동순⁴⁾

Kim, Bumjoo · Kim, Khiwoong · Lee, Seungho · Hwang, Youngcheol · Park, Dongsoon

ABSTRACT : In this study, the effect of water content condition was investigated on the Mohr-Coulomb shear strength parameters which are commonly used as the input data in the soil slope analysis. For the purpose, a series of direct shear test was conducted in different water content conditions on the two types of weathered soils and a dam core material, obtained from the domestic slope construction sites and the dam construction site, respectively. The comparisons between the values of the Mohr-Coulomb ϕ_{peak} and c_{peak} , estimated from the relationships between the normal stress and the peak shear stress for the samples in the four different water content conditions (i.e., dry side, optimum, wet side, and saturated), showed that overall, the values of c_{peak} decreased gradually while those of ϕ_{peak} did not vary much with increasing the water content. A rough estimate for the varying ratio of the values of ϕ_{peak} and c_{peak} indicated that the values of c_{peak} decreased by every 25% of the c_{peak} values in dry side, while those of ϕ_{peak} were constant, as the water content condition changed from dry, optimum, and wet to saturated, respectively.

Keywords : Water content, Mohr-Coulomb shear strength parameters, Soil slope analysis, Direct shear test

요 지 : 본 연구에서는 통상 토사비탈면 안정해석시 지반강도의 입력값으로 사용되는 Mohr-Coulomb 강도정수에 대하여 지반의 함수비 조건이 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여 국내 절토사면에서 채취한 두 종류의 풍화토 시료와 댐 건설시 사용되는 코아재를 대상으로 함수비 조건을 달리하며 직접전단시험을 수행하였다. 직접시험을 통해 결정된 4단계의 함수비 조건(건조측, 최적, 습윤측, 포화)에 대해서 각 시료들의 연직응력과 최대 전단응력간의 관계로부터 산정한 Mohr-Coulomb의 ϕ_{peak} 과 c_{peak} 를 비교한 결과, 전체적으로 모든 시료에 대해서 함수비가 증가함에 따라 ϕ_{peak} 은 큰 변화가 없으나 c_{peak} 은 점차적으로 감소하였으며, 개략적으로 각각의 변화 비율을 분석한 결과, 함수비 조건이 건조측에서 최적, 습윤, 포화의 순서로 진행되어 변함에 따라 ϕ_{peak} 값은 일정하되, c_{peak} 값은 건조측 c_{peak} 값을 기준으로 약 25%씩 감소하는 것으로 나타났다.

주요어 : 함수비, Mohr-Coulomb 강도정수, 토사면 해석, 직접전단시험

1. 서 론

최근 국내에서는 이상기후에 의한 여름철 장마, 태풍 등 집중호우 발생이 빈번해지면서 이에 따른 재해가 많이 발생하고 있으며, 특히 지난해인 2006년 7월 집중호우기간에도 전국적으로 여러 곳에서 토사유실, 사면붕괴 및 산사태 등이 발생해 많은 인명과 재산상의 피해를 입은 바 있다. 최근 조사에 따르면, 집중호우시 비탈면의 붕괴는 토사비탈면 지역이 주를 이루고 있는데(황영철 등, 2007), 강우 침투에 의한 토사면 붕괴는 대부분 강우 전 불포화 상태에서 존재하던 부(-)의 간극수압(모관흡수력)이 강우로 인해 사면 내 함수량이 증가함에 따라 점차 감소하고 결국 전단강도의 감소가 유발되어 발생한 경우라 할 수 있다(오재화

와 이광찬, 2003; 조성은과 이승래, 2000). 따라서, 강우 영향을 반영한 토사면의 엄밀한 해석을 위해서는 강우 조건 뿐 아니라 대상 사면의 불포화 수리특성 및 지반의 불포화 강도특성에 대한 신뢰성 있는 정보에 기초한 불포화 해석이 필수적이다. 그러나, 그러한 불포화 사면해석은 해석시 고려해야 할 요소들이 많고, 현실적으로 불포화 특성 파악을 위한 실내 및 현장시험이 복잡하고 까다로우며, 결과적으로 해석시 요구되는 입력 물성값의 결정이 간단치 않아 국내의 경우 실제 사면의 설계를 위해서는 일반적으로 사용되고 있지 않다. 대신에, 국내의 많은 기관에서는 사면 설계시 우기시 안정해석 방법으로 건기시 안정해석과 동일한 방법을 사용하되, 지하수위 위치를 달리하여 해석하는 방법을 설계기준으로 적용하고 있다(건설교통부, 2001,

† 정회원, 동국대학교 사회환경시스템공학과 조교수(E-mail : bkim1@dongguk.edu)

1) 정회원, 시립인천전문대학 토목과 교수

2) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

3) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 조교수

4) 비회원, 한국수자원공사 대리

2003; 한국도로공사, 2002; 한국토지공사, 2006). 그러나, 이 방법은 불포화 해석에 비해 매우 간단하기는 하나 강도에 따른 지반 강도 변화의 영향이 해석에 반영되지 않는다는 한계가 있다.

일반적으로 국내의 토사면 설계를 위해 수행되는 사면 안정 해석시 지반 강도에 대한 입력값으로는 전통적인 Mohr-Coulomb 강도 정수가 사용된다. 그리고 이 때 강도 정수의 값은 일반적으로 건기시와 우기시 해석 조건에 대하여 구별없이 일정한 값이 사용된다. 그러나, 우기시에는 함수비의 증가로 인해 강도의 변화가 있으며, 기존의 연구 결과들은 Mohr-Coulomb 강도 정수값이 함수비에 따라 변화한다고 보고하고 있다. Hvorslev (1937)은 Vienna Clay에 대한 일련의 직접전단시험을 통하여 Mohr-Coulomb 강도식의 점착력은 함수비가 감소함에 따라 지수함수적으로 증가한다고 보고하였다. 또한, 비교적 최근에 국내의 오재화와 이광찬(2003)은 현장 사면에서 채취한 화강토와 화강암, 점토 등을 이용하여 불포화상태와 포화상태의 두 조건에 대하여 토질 경계면상의 전단특성을 직접전단시험을 통하여 조사하고, 불포화 상태에서 포화상태가 됨에 따라 Mohr-Coulomb 강도식의 내부마찰각은 다소 감소하거나 큰 차이가 없는 반면, 점착력은 크게 감소한다고 보고하였다.

본 연구에서는 전통적 Mohr-Coulomb 파괴규준의 관점에서 함수비 조건에 따른 지반 강도 정수의 변화를 실내 직접전단시험을 통하여 조사하였다. 조사 대상은 국내 토사면의 주된 재료인 풍화토를 대상으로 하되 두 종류의 풍화토에 대하여 조사하고, 비교를 위하여 보다 균질하고 많은 세립분을 포함한 댐 코아재에 대해서도 조사함으로써 비교적 다양한 토질에 대하여 조사하고자 하였다. 또한, 함수비 조건도 비교적 다양화 해 함수비에 따른 강도정수의 변화 경향을 보다 면밀히 파악하고자 하였다. 이러한 조사 수행의 궁극적인 목적은 현행 사면 설계기준에 따라 우기시 사면 안정해석을 수행할 경우 설계자들로 하여금 본 조사 결과가 지반 강도 정수의 선택에 합리적인 판단 근거가 될 수 있도록 하기 위함이다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

본 연구를 위해 수행된 실내시험의 재료는 강원도의 서울-춘천간(8공구) 고속도로와 춘천-동홍천간(4공구) 고속도로 건설 현장의 절토사면에서 교란 상태로 채취하였다. 대상 현장에 대한 지반조사결과에 따르면, 서울-춘천간 고속도로 절토사면의 주요 구성 토질은 화강암 계통의 풍화토

(이하 화강암계 풍화토)이며, 춘천-동홍천간 고속도로 절토사면은 주요 구성 토질이 편마암계 계통의 풍화토(이하 편마암계 풍화토)이다. 또한, 풍화토 이외에 추가적으로 전남 장성의 평립댐 현장에서 댐 코아재를 채취하여 풍화토와 동일 시험을 수행하였다.

2.2 시험방법

서론에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 실내시험의 목적은 우기시 사면 내 함수량 변화에 따른 지반 강도의 변화를 인식하고 궁극적으로 설계자들로 하여금 현행 우기시 사면 해석기준을 적용하는 데 있어 합리적인 근거에 의해 강도 정수를 선택할 수 있도록 참고 자료를 제공하는데 있다. 비교적 간단한 방법을 통해 그러한 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 2.1절에 제시한 토사면 채취 재료들에 대하여 함수비 조건을 다양하게 변화시키며 실내 직접전단시험을 수행하였고 전통적인 Mohr-Coulomb 파괴규준에 따라 각 함수비 조건에서의 전단 강도정수를 측정함으로써 함수비 변화에 따른 변화 양상을 파악하고자 하였다.

직접전단시험시 시료의 함수비 조건은 다짐시험을 통하여 결정하였다. 통상 절토사면 재료에 대해서 다짐시험 결과는 불필요하나 본 연구에서는 각 재료별로 함수비 조건을 통일시키기 위한 기준으로 사용되었다. 다짐곡선으로부터 결정된 최적함수비를 기준으로 건조측과 습윤측으로 일정 함수비를 가감시켰으며 재료당 총 4종류의 함수비(즉, 건조측, 최적, 습윤측, 포화)를 적용하였다. 예를 들어, 건조측 다짐조건인 경우 다짐곡선상에서 건조측으로 최대 건조단위중량의 97%에 대응하는 함수비를 건조측 함수비로, 습윤측 다짐조건인 경우는 습윤측으로 최대건조단위중량의 97% 건조단위중량에 대응하는 함수비를 습윤측 함수비로 결정하였다.

시료의 제작은 미리 결정된 함수비에 대하여 다짐곡선상의 해당 건조단위중량이 얻어지도록 시료를 다지는 방법으로 이루어졌다. 즉, 건조된 시료에 미리 결정된 양의 물을 첨가, 혼합하고 수분이 시료 내에 충분히 스며들도록 한 후, 미리 결정된 양의 습윤시료를 전단상자 안에 넣고 소정의 건조단위중량이 얻어질 수 있도록 전단상자 내부에 표시한 위치까지 탬핑(tamping)을 통하여 시료를 다지는 방식으로 하였다. 이 때 다짐 층수는 총 3층으로 하였다.

시험 시편의 입도는 KS규정에 의거하여 No. 4체를 초과하는 입경을 버리고, No. 4체 통과분으로만 구성하였다. 또한 습윤측 함수비로 만들어진 시료에 대하여 24시간 수침을 통해 포화를 시킨 후 전단시험을 하여 불포화상태에서 시험한 결과들과 비교하고자 하였다. 수침을 통한 시료

의 포화도는 약 92% 이상 수준이었다.

전단시험시 연직응력은 2.1, 5.2, 8.2, 11.3, 14.3 tf/m² (20, 50, 80, 110, 140 kPa)의 총 5단계를 적용하였다. 전단시 1.0 mm/min의 속도를 유지하였으며, 각 연직응력에 대해서 얻은 응력-변위 관계로부터 최대 전단응력과 최대 수평변위에 대응되는 잔류 전단응력을 구하고 이들과 해당 연직응력의 관계들을 각각 선형회귀분석 하여 Mohr-Coulomb 파괴규준에 따른 강도 정수들을 산정하였다.

직접전단시험에 사용된 시험기로는 시료의 압밀과 전단 과정에 대해서 전자동 제어가 가능하도록 제작된 Geocomp社의 ShearTrac II-DSS 모델 시험기를 사용하였다. 해당 시험기는 압밀시 하중단계를 32 단계까지 적용 가능하고, 수평과 수직응력 및 변위 측정은 시험기에 부착된 로드셀과 변위계를 통하여 가능하며, 이를 통한 데이터 획득 현상은 컴퓨터 화면상에 나타날 뿐 아니라 파일로 저장된다.

한편, 다짐시험과 직접전단시험 수행에 앞서 시험 재료의 기본 물성 파악을 위해 동일 재료에 대하여 입도분포와 비중, 액·소성한계 및 투수시험을 수행하였다. 투수계수는 직접전단시험과 마찬가지로 No. 4체 통과분에 대하여 시료를 조성하여 변수위 투수시험 방법을 통하여 측정하였다. 이 때 시료의 다짐밀도는 전단시험시 습윤측 다짐밀도와 동일하도록 하였으며, 시료내 물의 흐름이 정상침투상태를 유지하도록 시험 전 약 2일간 통수를 시켜 시료가 포화되며 일정한 흐름 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 최종 시험값은 표준온도 15°C를 기준으로 온도 보정을 실시한 값으로 하였다. 기타 비중과 함수비, 액성한계와 소성한계 시험 등도 KS 규정에 의거하여 실시하였다.

3. 시험결과

3.1 기본물성

시험재료의 기본물성에 대한 시험결과는 표 1에 나타나

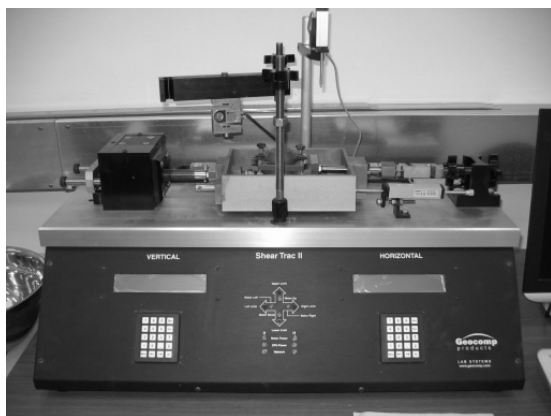


그림 1. 직접전단시험기

었다. 화강암계 풍화토와 편마암계 풍화토의 경우 전체적으로 전형적인 풍화토의 기본 물성을 나타내었다. 다만, 투수계수 시험결과 화강암계 풍화토의 투수계수가 일반적인 풍화토의 투수계수와 비교해 다소 큰 값을 나타내었다. 한편, 댐 코아재의 경우 댐 코아재에 대해서 전형적인 입도분포를 나타내어 No. 200체 통과량이 50%에 가까울 정도로 풍화토와 비교해 많은 세립분을 포함하고 있는 것으로 나타났다.

그림 3은 시험재료에 대하여 수행된 표준다짐시험결과를 나타낸다. 화강암계 풍화토와 편마암계 풍화토의 경우 최대건조단위중량은 약 1.95 tf/m³로 유사한 값을 나타내었으나 이 때의 함수비, 즉, 최적함수비는 화강암계 풍화토의 경우 9.5%, 그리고 편마암계 풍화토의 경우 다소 높은 11.7%를 나타내었다. 반면, 댐 코아재의 경우 최대건조단위중량이 1.76 tf/m³로 풍화토보다 상대적으로 낮은 값을 나타내었으나, 최적함수비는 16.7%로 풍화토보다 높은 값을 나타내었다. 이러한 함수비의 차이는 댐 코아재의 경우 세립분을 많이 포함하고 있으므로 다짐을 통해 최대건조밀도를 얻기 위해 풍화토보다 많은 수량을 필요로 했다는 것을 의미한다.

표 1. 시험재료의 기본물성

	화강암계 풍화토	편마암계 풍화토	댐 코아재
USCS 분류	SM	SC	SC
비중	2.63	2.68	2.65
D10	0.0508 mm	0.0503 mm	0.0059 mm
Cu	39.44	115.48	43.76
Cg	1.57	1.09	1.16
LL	n/a	27.22	33.44
PL	n/a	19.93	19.95
PI	n/a	7.29	13.49
#200 통과율	13.53 %	15.07 %	46.57 %
투수계수	3.63×10 ⁻⁶ m/s	7.37×10 ⁻⁷ m/s	3.37×10 ⁻⁷ m/s

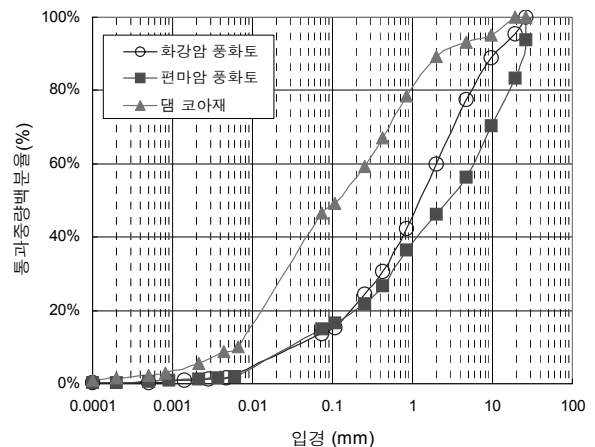


그림 2. 시험재료의 입도분포

2.2절에서 기술한대로, 그림 3의 다짐시험결과로부터 직접전단시험을 위한 시료의 함수비를 표 1에 나타낸 바와 같이 결정하였다.

3.2 직접전단시험결과

3.2.1 응력-변위 관계

그림 4~그림 6은 세 종류의 시험재료(화강암계 풍화토, 편마암계 풍화토, 댐 코아재)에 대한 직접전단시험결과로

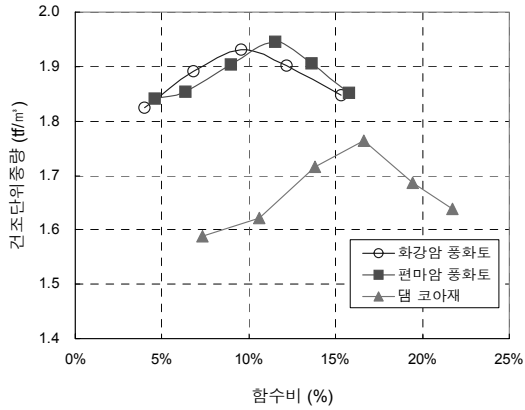


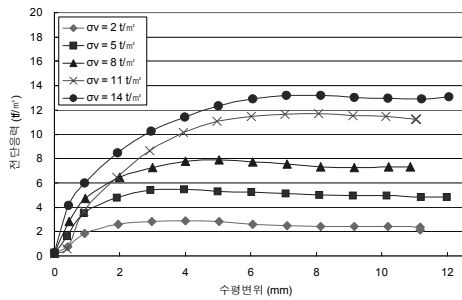
그림 3. 시험재료의 다짐곡선

표 2. 시험재료의 함수비(%)

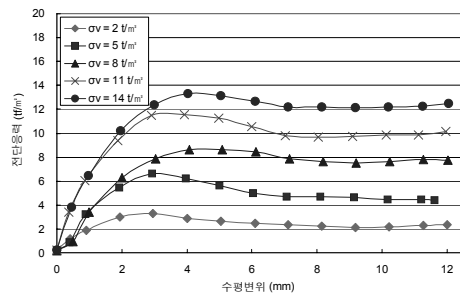
	건조측	최적	습윤측	포화
화강암계 풍화토	6.2	9.7	13.4	14.5
편마암계 풍화토	8.2	11.7	14.3	15.3
댐 코아재	13.5	16.7	19.0	20.4

부터 전단 중 전단응력과 수평변위, 그리고 수평변위와 수직변위의 관계를 각각 건조측과 습윤측 함수비에서 조성된 시료에 대해서 나타낸 것이다. 2.2절에 기술한 바와 같이, 한 종류의 재료에 대하여 입도분포와 밀도 등 다른 조건은 동일하게 유지한 채 표 1과 같이 4 종류의 서로 다른 함수비 조건(건조측, 최적, 습윤측, 포화)으로 조성된 시료에 대하여 시험을 하였으므로, 각 재료당 총 4 종류의 전단응력과 수평변위 관계, 그리고 수평변위와 수직변위의 관계가 얻어졌다.

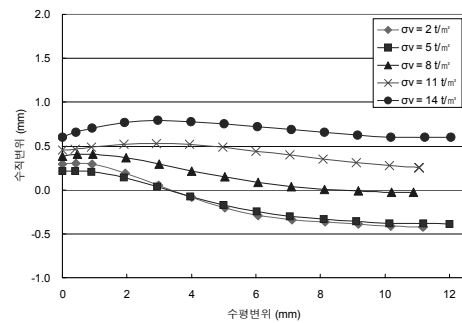
그림 4에서 보는 바와 같이, 화강암계 풍화토에 대하여 건조측 함수비 시료($w=6.2\%$)와 습윤측 함수비 시료($w=13.4\%$) 간 응력-변위 관계를 비교하면, 습윤측 시료의 경우 응력-변위 곡선의 형태가 상대적으로 전단 초기에 최대 전단응력에 도달한 후 점차 감소하는 형태인 반면, 건조측 시료의 경우 전단 초기 뚜렷한 최대값을 보이지 않으며 수평변위 증가와 함께 점차 전단응력이 증가하여 이후 최대에 도달함을 알 수 있다(그림 4 a와 b). 그리고 그러한 경향은 연직응력이 큰 경우에 더욱 두드러지게 나타났다. 그러나, 동일 연직응력 하에서 최대 전단응력의 크기는 두 시료간 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 그림 4의 (c)와 (d)는 동일 시료들에 대하여 전단 중 수평변위와 수직변위와의 관계를 나타낸 것으로, 일반적인 사질토에서의 경향과 유사하게 수직응력의 크기가 증가함에 따라 다이러턴시(dilatancy)가 억제되어 전단에 따른 수직변위의 크기는 점차 감소하는 것으로 나타났다.



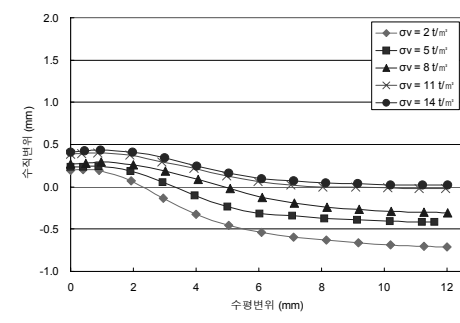
(a) 전단응력 vs. 수평변위 (건조측)



(b) 전단응력 vs. 수평변위 (습윤측)



(c) 수평변위 vs. 수직변위 (건조측)



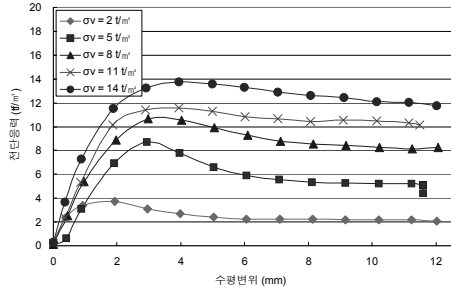
(d) 수평변위 vs. 수직변위 (습윤측)

그림 4. 화강암계 풍화토의 전단응력 vs. 수평변위 및 수평변위 vs. 수직변위 관계

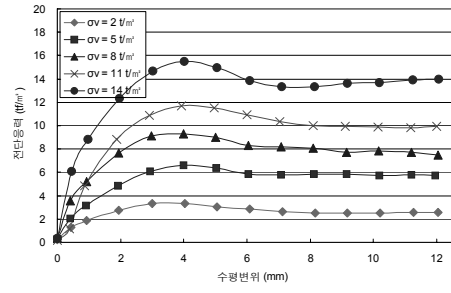
그림 5의 경우는 편마암계 풍화토에 대하여 그림 4의 화강암계 풍화토에 대해 나타낸 바와 동일하게 응력-변위를 관계를 나타낸 것이다. 건조축 시료의 경우 화강암계 풍화토와 비교해 상대적으로 전단 초기에 최대 전단응력에 도달하는 경향이 있으나, 건조축($\omega=8.2\%$)과 습윤축 시료($\omega=14.3\%$)를 비교하면, 전체적으로 화강암계 풍화토에서 나타난 경향과 유사한 경향을 보였다. 또한, 각 연직응력 하에서 최대 전단응력의 크기는 건조축과 습윤축에 대

하여 특정한 경향이 나타나지 않았다.

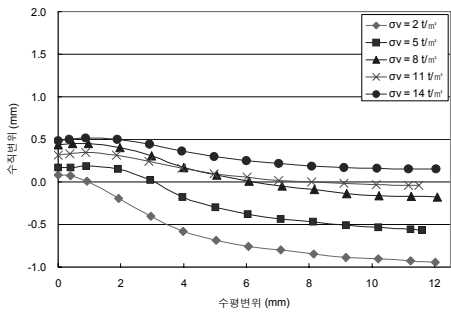
한편, 댐 코아재의 경우 건조축 함수비 시료($\omega=13.5\%$)와 습윤축 함수비 시료($\omega=19.0\%$)에 대하여 그림 6과 같이 응력-변위 관계를 비교한 결과, 풍화토의 경우와 큰 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 건조축 시료에 대하여 응력-변위 곡선의 형태가 상대적으로 전단 초기에 최대 전단응력에 도달한 후 점차 감소하는 경향을 나타낸 반면, 습윤축 시료의 경우 전단 초기 뚜렷한 최대값을 보이지 않으며 수



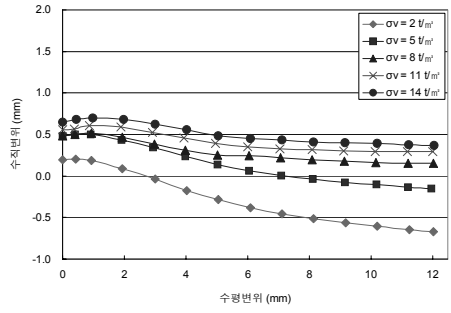
(a) 전단응력 vs. 수평변위 (건조축)



(b) 전단응력 vs. 수평변위 (습윤축)

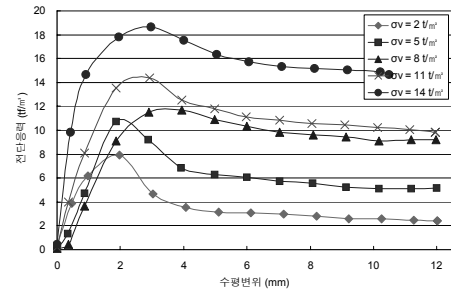


(c) 수평변위 vs. 수직변위 (건조축)

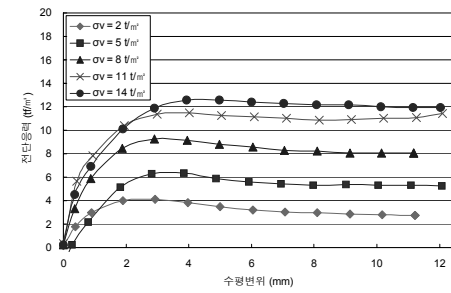


(d) 수평변위 vs. 수직변위 (습윤축)

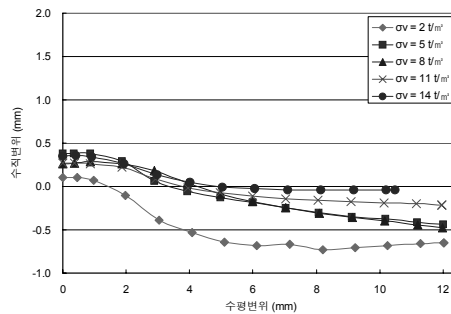
그림 5. 편마암계 풍화토의 전단응력 vs. 수평변위 및 수평변위 vs. 수직변위 관계



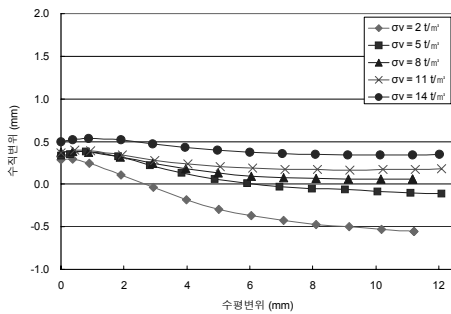
(a) 전단응력 vs. 수평변위 (건조축)



(b) 전단응력 vs. 수평변위 (습윤축)



(c) 수평변위 vs. 수직변위 (건조축)



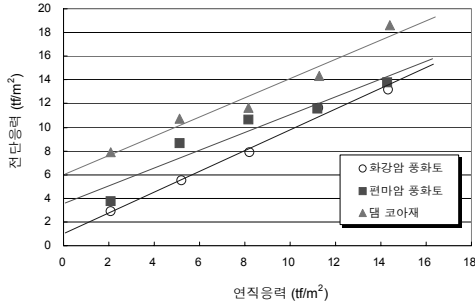
(d) 수평변위 vs. 수직변위 (습윤축)

그림 6. 댐 코아재의 전단응력 vs. 수평변위 및 수평변위 vs. 수직변위 관계

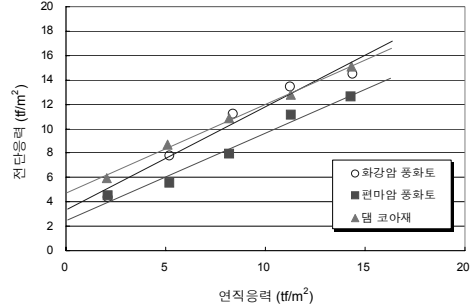
평면위 증가와 함께 점차 전단응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 전체적인 경향 뿐만 아니라 최대 전단응력의 크기에 있어서도 건조측과 습윤측간 뚜렷한 차이를 나타내 건조측 시료의 경우 습윤측 시료 보다 최대 전단응력의 크기가 약 4~5 tf/m^2 만큼 큰 값을 나타내었다. 이러한 차이는 건조측과 습윤측 시료간 시료 입자 사이에 작용하는 모관력 크기의 차이에 기인한 것으로 생각할 수 있다.

3.2.2 연직-전단응력 관계

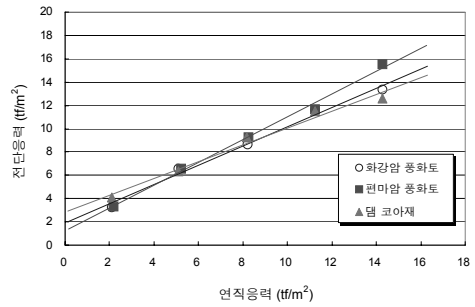
세 종류의 시험재료에 대하여 각 함수비 조건별로 연직응력과 최대 전단응력 및 잔류 전단응력과의 관계를 구하고 이들에 대한 1차 선형회귀곡선을 함께 표시하여 그림 7 과 그림 8에 각각 나타내었다. 전단시험에 사용한 연직응력 크기가 비교적 낮은 범위였으므로(140 kPa 이하) 거의 모든 시험 데이터에 대해서 연직응력과 전단응력의 관계



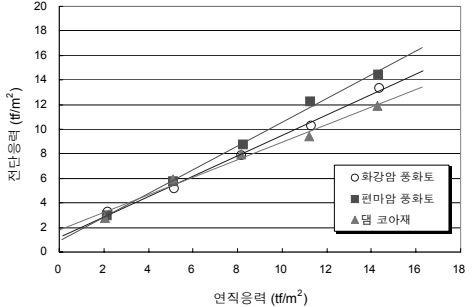
(a) 연직응력 vs. 전단응력 (건조측)



(b) 연직응력 vs. 전단응력 (최적)

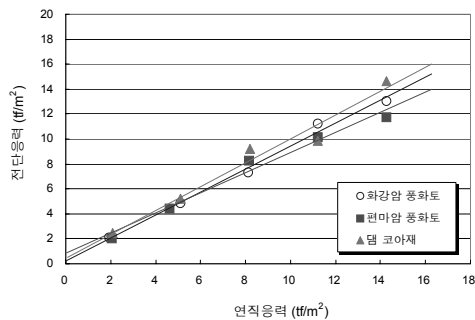


(c) 연직응력 vs. 전단응력 (습윤측)

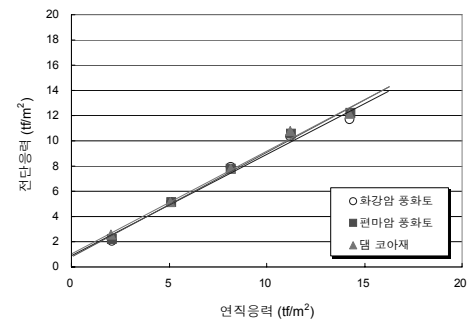


(d) 연직응력 vs. 전단응력 (포화)

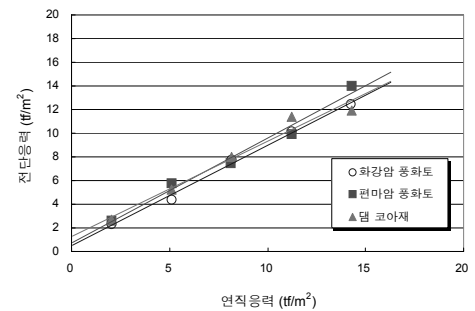
그림 7. 시험재료의 연직응력 vs. 최대 전단응력(peak) 관계



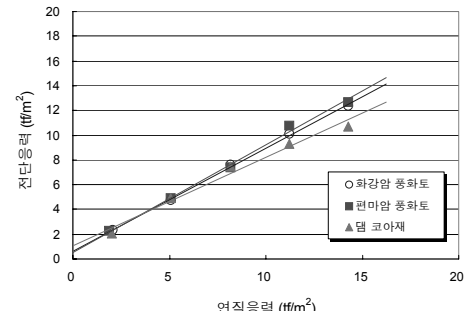
(a) 연직응력 vs. 전단응력 (건조측)



(b) 연직응력 vs. 전단응력 (최적)



(c) 연직응력 vs. 전단응력 (습윤측)



(d) 연직응력 vs. 전단응력 (포화)

그림 8. 시험재료의 연직응력 vs. 잔류 전단응력(residual) 관계

는 선형모형으로 높은 상관성을 나타내었다(결정계수 0.95 이상).

연직응력과 최대 전단응력 관계의 경우(그림 7), 시험재료별로 각 함수비 조건에 대해서 선형회귀곡선의 차이를 기울기와 y절편을 기준으로 비교한 결과, 화강암계 풍화토와 편마암계 풍화토의 경우 함수비 변화에 따른 선형회귀곡선의 변화에 특정한 경향이 나타나지 않은 반면, 댐 코아재에는 뚜렷한 경향이 나타났다. 즉, 댐 코아재에 대해서는 함수비 조건이 건조에서 포화상태로 변함에 따라 선형회귀곡선의 변화는 기울기는 거의 그대로 유지한 채 y-절편 값이 일정하게 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 다시 말해서, 재료에 대한 Mohr-Coulomb 강도규준 관점에서 볼 때, 재료 내 함수량이 증가함에 따라 재료의 최대 내부마찰각 ϕ_{peak} 에는 거의 변화가 없으나 점착력 c_{peak} 가 일정하게 감소했음을 나타낸다. 동일한 관점에서 볼 때, 풍화토의 경우 댐 코아재에서와 같이 함수비 변화에 따른 ϕ_{peak} 과 c_{peak} 의 변화 경향이 뚜렷하게 나타나지 않은 이유는 풍화토의 강도 특성이 댐 코아재와 달리 함수비 조건에 영향을 받지 않기 때문이라기 보다는 풍화토에 대해서 실제 현상과 관련 없는 외적인 요인이 보다 많이 개입되었기 때문인 것으로 보인다. 즉, 풍화토 시료는 댐 코아재보다 불균질하여 함수비를 제외한 동일 상태의 시료를 정확히 반복 조성하기가 어렵고 따라서 동일 조건의 시료라도 시험 결과에서 다소간 차이가 발생할 수 있었을 것으로 보인다. 그리고 그러한 차이는 연직응력과 전단응력에 대한 선형회귀분석시 단지 5점의 데이터(즉 5쌍의 연직-전단응력)만을 이용함에 따라 특정 데이터 포인트에 의해 선형회귀곡선의 기울기와 y-절편값이 민감하게 변할 수 있는 조건에서 더욱 커질 수 있다. 한편, 연직응력과 잔류 전단응력의 관계에서 선형회귀곡선은 연직-최대 전단응력 관계와 달리 기울기와 y-절편값을 기준으로 시험재료 간 차이가 상대적으로 크지 않았으며 y-절편값은 전체 시험재료에 대하여 공통적으로 0에 가까운 값을 나타내었다(그림 8).

3.2.3 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화

그림 9와 10은 3.2.2절의 각 함수비 조건에서 시험재료의 연직응력과 최대 전단응력 및 잔류 전단응력의 관계에 대한 선형회귀분석 결과를 바탕으로 Mohr-Coulomb 파괴규준에 따른 강도정수를 산정하여 함수비 조건과 강도정수와의 관계를 각각 나타낸 것이다.

그림 9에서 보는 바와 같이 시험재료의 종류별로 절대값의 차이는 존재하나 함수비 조건이 변함에 따라 강도정수(즉, ϕ_{peak} 과 c_{peak})가 변화하는 경향은 전체적으로 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 세 종류의 재료에 대하여 모두 ϕ_{peak} 는

전반적으로 함수비가 증가함에 따라 크게 변함이 없이 일정한 경향을 나타내나 c_{peak} 의 경우는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 풍화토의 경우 일부 시험결과(건조층 화강암계 풍화토의 c_{peak} 와 편마암계 풍화토의 ϕ_{peak})가 전체적인 변화 경향과 일치하지 않는 것으로 나타났으나, 이는 3.2.2절에서 기술한 바와 같이, 시료의 불균질성에 기인한 시험과정에 내재된 현상 외적인 요인이 어느 정도 작용한 결과인 것으로 판단된다. 한편, 그림 10의 경우 $\phi_{residual}$ 과 $c_{residual}$ 은 모두 함수비 조건이 변함에도 일정한 경향을 나타내었다. 즉, 잔류 전단응력으로 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따를 경우 모관흡수력의 영향이 반영되지 않음을 알 수 있다.

한편, 전체 시험결과를 바탕으로 함수비 조건에 따라 Mohr-Coulomb의 강도정수 크기가 변하는 정도를 개략적이라도 정량화해 파악하고자, 각 함수비 조건에서 전체 시험재료에 대해서 얻어진 강도정수(최대 전단강도 기준)의 평균값을 기준으로 함수비 조건 변화에 따른 강도정수 크기의 변화율을 산정하여 그림 11과 같이 나타내었다. 여기서, 강도정수 변화율이란 건조층 함수비 조건을 기준으로 했을 때(즉, 건조층 함수비 조건에 대응하는 강도정수 값을 1로

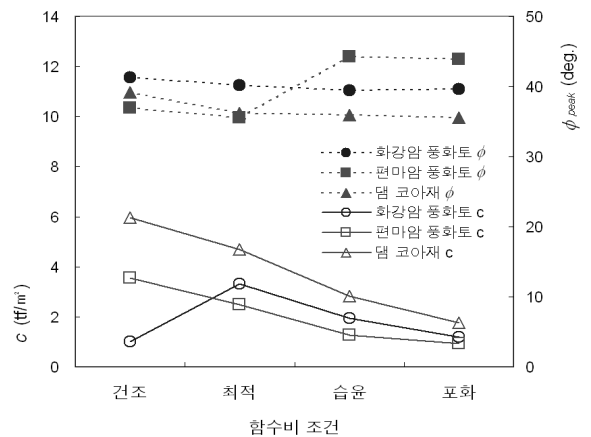


그림 9. 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화 (Peak)

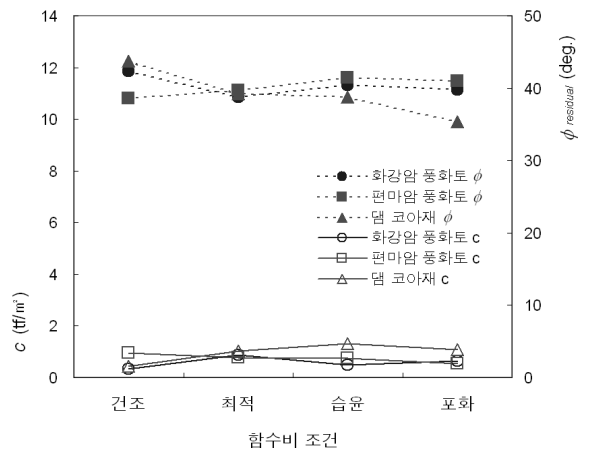


그림 10. 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화 (Residual)

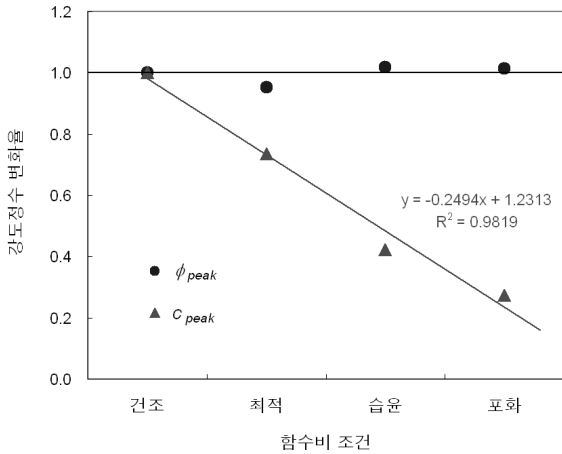


그림 11. 함수비 조건에 따른 Mohr-Coulomb 강도정수의 변화율 (Peak)

표기함), 함수비가 최적, 습윤 및 포화 조건으로 증가함에 따라 강도정수의 크기가 변화되는 비율을 의미한다. 이 때 그림 9에서 보여지는 건조측 함수비 조건에서 화강암계 풍화토에 대한 c_{peak} 값은 이상치(outlier)로 간주하여 분석에서 제외하였다. 그림 11로부터 함수비 조건이 건조측에서 최적, 습윤, 포화의 순서로 진행되어 변함에 따라 해당 함수비 조건에 대한 c_{peak} 값은 건조측 c_{peak} 값을 기준으로 약 25%씩 감소된 값을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 토사비탈면 설계시 사면안정해석을 위한 지반강도의 입력값으로 통상적으로 사용되는 Mohr-Coulomb 강도정수에 대하여 지반의 함수비 조건이 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여 국내 절토사면에서 채취한 두 종류의 풍화토 시료와 댐 건설시 사용되는 코아재를 대상으로 함수비 조건을 달리하며 직접전단시험을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 함수비 조건 변화에 따른 시료의 응력과 변위와의 관계를 관찰한 결과, 건조측 시료에서 습윤측 시료와 비교해 상대적으로 전단 초기 최대 응력에 도달 후 이후

점차 감소하는 현상이 두드러지게 나타나고 최대 전단 응력의 크기도 큰 것으로 나타났으며, 이러한 차이는 건조측과 습윤측 시료간 시료 입자 사이에 작용하는 모관력 크기의 차이에 기인한 것으로 생각할 수 있다.

- (2) 다짐시험을 통해 결정한 4단계의 함수비 조건(건조측, 최적, 습윤측, 포화)에 대해서 각 시료의 연직응력과 최대 전단응력간의 관계로부터 산정된 Mohr-Coulomb의 ϕ_{peak} 과 c_{peak} 를 비교한 결과, 전체적으로 두 종류의 풍화토와 댐 코아재 모두에 대해서 함수비가 증가함에 따라 ϕ_{peak} 는 큰 변화가 없으나 c_{peak} 은 점차적으로 감소하였고, 이러한 경향은 풍화토에 비해 비교적 균질한 재료인 댐 코아재에 대하여 매우 뚜렷이 나타남을 확인하였다.
- (3) 본 연구의 전체 시험결과를 바탕으로, 함수비 조건의 변화에 따라 Mohr-Coulomb의 강도정수 값이 변하는 비율을 산정한 결과, 함수비 조건이 건조측에서 최적, 습윤, 포화의 순서로 진행되어 변함에 따라 ϕ_{peak} 값은 일정하되, c_{peak} 값은 건조측 c_{peak} 값을 기준으로 약 25%씩 감소하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2001), 도로설계기준, 5장 토공, 건설교통부, pp. 95~98.
2. 건설교통부(2003), 국도건설공사 설계실무요령, 11. 공중별설계령 2. 비탈면 안정공, 건설교통부, 89p.
3. 오재화, 이광찬(2003), 실내시험에 의한 붕괴사면 경계면의 전단강도 특성, 대한토목학회논문집, Vol. 23, No. 6C, pp. 373~381.
4. 조성은, 이승래(2000), 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, 한국지반공학학회논문집, Vol. 6, No. 1, pp. 51~64.
5. 한국도로공사(2002), 도로설계요령, 제2권 토공 및 배수, 한국도로공사, pp. 123~124.
6. 한국토지공사(2006), 단지설계기법(Koland 설계기법 연구보고서), 다. 사면안정해석 최적기법 설계, 한국토지공사, pp. 1~3.
7. 황영철, 이홍성(2007), 국내 절토 비탈면 설계기준의 해석적 평가, 한국지반환경공학학회논문집, Vol. 8, No. 3, pp. 51~57.
8. Hvorslev, M. J.(1937), *Physical Properties of Remoulded Cohesive Soils*, U.S. Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss. Rep. No. 69-5 (English translation 1969).

(접수일: 2007. 11. 26 심사일: 2007. 11. 26 심사완료일: 2007. 12. 20)