한국지반공학회논문집 제22권 4호 2006년 4월 pp. 51 ~ 59

대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성 (II)

Characteristic of Shear Behavior of Coarse Grained Materials Based on Large Scale Direct Shear Test (II)

이 대 수[1] Lee, Dae-Soo　　김 경 열[2] Kim, Kyoung-Yul
홍 성 연[3] Hong, Sung-Yun　　황 성 춘[4] Hwang, Sung-Chun

Abstract

In this paper, the effect of variation of density and uniformity coefficient on shear strength was analyzed from the results of large scale shear test. In addition, the friction coefficient at critical state per vertical load was estimated using the equation proposed by Wood (1998). The test sample for the test was obtained from the local quarry sites. Tests results show that the shear strength of 2.10 g/cm^3 is relatively larger than that of 1.85 g/cm^3 and uniformity coefficient (5.0) has larger shear strength than that in 10.0. In the meantime, the friction coefficient at critical state shows 1.0～1.6 according to the test conditions.

요 지

본 고에서는 선행연구(홍성연, 2004)에서 개발한 대형직접전단시험기를 이용하여 조립질 토목재료의 시험밀도와 균등계수의 크기가 전단강도에 주는 영향을 분석하였으며, 아울러, 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수를 Wood(1998)가 제안한 방정식을 이용하여 산출하였다. 시험에 사용한 재료는 경상과 전라지역 석산에서 생산중인 조립재료이다. 시험결과 시험밀도 2.10g/cm^{3}의 전단강도의 크기가 1.85g/cm^{3}의 값보다 상대적으로 크게 나타났으며, 균등계수는 상대적으로 10.0보다 5.0일때 더 큰 전단강도를 갖는 것으로 나타났다. 한편, 조립질 토목재료가 갖고 있는 한계상태에서의 마찰계수는 각 시험조건별로 1.0～1.6의 범위로 나타났다.

Keywords : Coarse grained, Friction coefficient, Large scale shear test, Quarry, Shear strength

1. 서 론

"조립질 토목재료"라 함은 쇄석 또는 자갈 등과 같은 입상재료를 일컫는 말로써, 국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 기본재료이기도 하다. 이들 조립재료와 같이 대형 공시체를 필요로 하는 시험법에는 대형직접전단시험과 대형삼축압축시험이 대표적이다. 그러나 대형삼축압축시험의 경우에는 공시체의 제작과 장비의 운용적인 측면에서 매우 복잡하고 정교한 기술이 필요하며, 무한정 그 크기를 증가시킬 수 없기 때문에 시험의 간편성과 공시체 크기의 자유로운 조절이 용이한 대형직접전단시험이 다양한 크기의 조립재료를 시험하기에는 더욱 적합하다 하겠다.

이와 관련하여 그 동안 수행되었던 조립재료의 전단

1 정회원, 한전 전력연구원 책임연구원 (Member, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute, leedais@kepco.co.kr)
2 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원 (Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute)
3 정회원, 한전 전력연구원 일반연구원 (Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute)
4 정회원, 경주대학교 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Gyongju Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

강도에 관한 연구들을 살펴보면, 일본토질공학회(1985)에서는 통일되지 않은 시험법이 조립재료의 강도특성에 어떠한 영향을 주는가를 규명하기 위해 한 종류의 조립재료를 바탕으로 전단강도시험(대형전단, 대형삼축)을 수행하였으며, 이를 바탕으로 시험종류별 조립재료가 가지고 있는 전단강도 특성을 제시하였다. Matsuoka(1998a)는 전단중 발생하는 재료의 다일러턴시(dilatancy)를 없앤 새로운 전단시험법을 자체 개발하여 수직응력(29, 49, 118kPa)과 조립재료의 상대밀도(9, 52, 67%)에 따라 전단강도를 측정하였다. 시험결과 재료의 상대밀도가 작을수록 강도정수는 감소하며, 낮은 수직응력에서의 내부마찰각이 높은 수직응력에서보다 큰 값을 갖는다고 보고하였다. 또한 높은 수직응력에서 시험한 결과를 이용하여 전단강도 곡선을 도시하게 되면, 조립재료에도 점착력(apparent cohesion)이 나타난다고 제시하였다. Matsuoka(2001b)는 더불어 본 시험법을 한층 더 개량하여 현장에서 바로 사용할 수 있는 현장용 대형직접전단시험기를 개발하였으며, 이를 바탕으로 실제 성토 현장에서 사용하는 조립재료와 더불어 점토에 대한 전단거동특성을 삼축압축시험결과와 비교분석하였다.

한편 국내에서는 최근 들어 전단시험의 중요성이 인식되기 시작하여 이에 대한 연구가 진행중에 있다. 신동훈(1999a)은 댐축조용 조립재료들에 대한 대형전단시험을 수행하여 상대밀도별로 조립재료가 가지고 있는 강도정수를 측정하였다. 이상덕(2001)은 축조용 재료로 사용되는 자갈과 같은 입경에 대한 시료의 전단강도를 대형직접전단시험기를 이용하여 도출하였으며, 굵은 골재의 함유율에 따른 조립재료의 거동특성을 분석하였다. 최근에는 우리나라에도 대형삼축압축시험기(신동훈 등, 2001b)와 대형직접전단시험기(홍성연 등, 2004)가 개발됨에 따라 다양한 연구들이 시도되고 있는 실정이다. 그러나 대부분의 시험결과들이 강도정수의 산정에만 머물러 있을 뿐, 국내의 쇄석재료에 대한 전단강도특성의 규명에는 연구가 미약하였다. 이에 쇄석재료의 전단강도에 영향을 미치는 요인들로 알려진 항목들(최대입자의 크기, 함수비, 시험밀도 및 균등계수의 크기)을 바탕으로 전단시 쇄석재료의 거동특성을 분석하였다.

이의 일환으로 본 고에서는 선행연구(이대수 등, 2005b)에서 최대입경의 크기와 함수비가 전단강도에 미치는 영향을 분석한데 이어서 조립질 토목재료의 시험밀도와 균등계수의 크기가 전단강도에 주는 영향을 대형직접전단시험기를 이용하여 분석하였으며, 아울러, 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수를 Wood(1998)가 제안한 방정식을 이용하여 산출하였다. 시험에 사용한 석산재료는 경상과 전라지역에서 생산중인 조립재료이자 국내의 도로 및 성토 현장에서 현재 사용하고 있는 재료이다.

2. 재료의 기본 특성 및 시험 조건

시험에 사용한 대형전단시험기(전단상자 1.5m ×1.5m ×0.6m)는 최대허용입경이 150mm인 재료까지도 시험이 가능하도록 제작되었으며, 그 상세별 특징은 선행연구결과(홍성연 등, 2004)에 기록하였다. 시험에 사용한 조립재료는 모암을 파쇄하여 생산한 산림골재이며, 경상 및 전라지역에서 생산중인 재료이다.

시험조건인 시험밀도의 크기에 따른 전단강도 특성 시험에 사용한 재료는 경상지역의 석산재료를 이용하였으며, 균등계수 조건에 따른 특성시험은 전라지역의 석산재료를 이용하였다. 시험에 사용한 조립재료의 최대입경은 76.3mm이며, 시험밀도는 1.85와 2.10g/cm^{3}로 비교 시험을 수행하였으며, 균등계수 조건은 5.0과 10.0으로 나누어 시험을 수행하였다.

2.1 재료의 모암 특성

시험에 사용한 조립재료는 경상북도 달성군 가창면 소재의 석산과 전라남도 담양군 대덕면 소재의 석산에서 생산하고 있는 재료이며, 그 특징들은 다음과 같다.

2.1.1 경상모암의 암석학적 특징

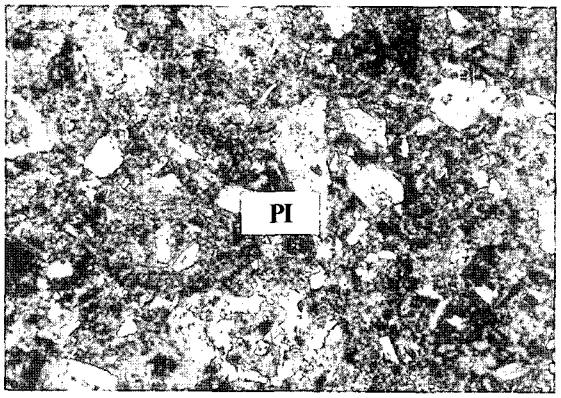
경상지역 석산에서 생산중인 조립재료의 암종을 확인하기 위하여 광학현미경을 이용한 결정분석을 실시하였다. 분석결과 재료의 모암은 사장석(pgioclase)과 정장석(orthoclase) 등으로 구성된 퇴적암(堆積岩, sedimentary rock)계열의 안산암질 응회암(凝灰岩, tuff)으로 나타났다(그림 1).

시험에 사용한 재료의 기본물성을 확인하기 위하여 물리적시험(비중, 일축압축강도, 흡수율, 탄성파속도, 입도분석)을 수행한 결과, 비중은 2.64~2.69, 흡수율은 0.71%, 암석의 일축압축강도는 약 133,868kPa정도로 나

타났다(표 1).

2.1.2 전라모암의 암석학적 특징

전라지역 재료의 모암은 사장석(Plagioclase)과 정장석(Orthoclase)으로 구성된 퇴적암(堆積岩, sedimentary rock)계열의 석질 응회암(凝灰岩, tuff)으로 나타났다(그림 2). 비중은 2.64~2.67, 흡수율은 0.71%, 암석의 일축압축강도는 약 64,680kPa로 나타났다(표 2).

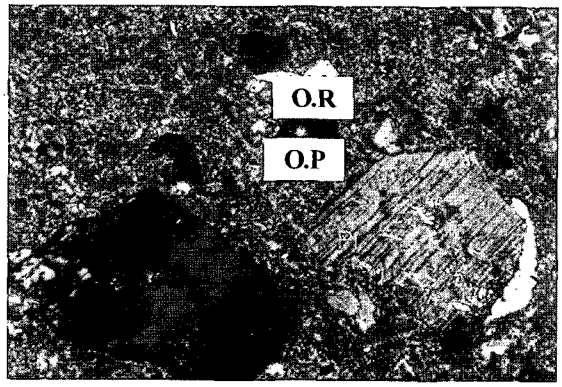


사장석(Plagioclase)

그림 1. 경상지역 모암(응회암)

표 1. 경상지역 모암 기본 물성(공시체수 4개)

구분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축 강도 (kPa)
	절대 건조	표면 건조	진			
평균	2.64	2.66	2.69	0.71	5.62	133,868



사장석(Plagioclase), 정장석(Orthoclase)

그림 2. 전라지역 모암(응회암)

표 2. 전라지역 모암 기본 물성(공시체수 5개)

구분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축 강도 (kPa)
	절대 건조	표면 건조	진			
평균	2.64	2.65	2.67	0.71	5.47	64,680

2.1.3 재료의 형상

시험에 사용한 재료의 입자형상을 그림 3에 나타내었다. Zingg(1935)가 제안한 입자형상에 따른 재료분류법으로 시료를 분류한 결과(그림 4), 재료는 덩어리모양, 판모양, 막대모양 및 잎사귀 모양 등 여러 가지 형상의 입자들이 혼합된 재료로 나타났다. 강자갈의 형상은 오랜 기간동안 풍화작용에 의해 대부분 둥글둥글한 덩어리 모양으로 구성되어 있으나, 본 재료는 이 과정이 없이 석산에서 모암을 직접 파쇄하여 임의로 조립재료를 생산하였기 때문에 여러 가지 형상의 입자들이 혼합되어 있다.

2.2 시험 조건

2.2.1 재료의 최대 및 최소 입경

일반적으로 댐제체 또는 항만공사에서 사용하는 재료의 최대 입경은 약 1,500mm의 크기까지 사용하고 있다. 그러나 이러한 크기의 입경으로 구성된 재료를 시험하기 위해서는 대형시험기의 크기 또한 이에 맞게 대형화되어야 한다. 하지만, 경제성과 시험결과의 신뢰도 측면에서 시험기를 무한정 크게 하기에는 무리가 있어 대부분 시험시 사용되는 재료의 입경은 줄여서 시험하게

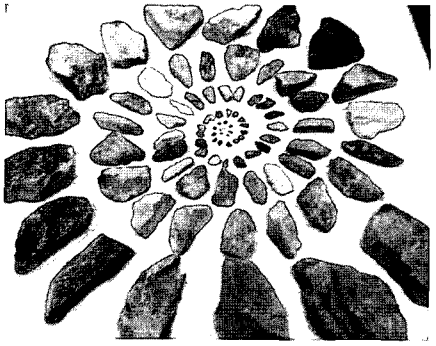


그림 3. 재료의 입자 형상

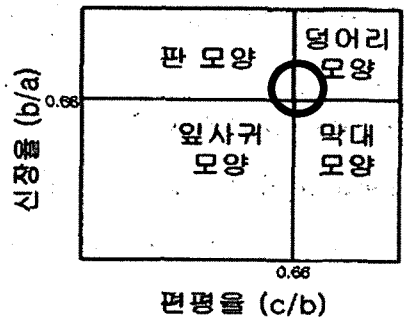


그림 4. Zingg의 형상분류법

된다. 그 방법에는 상사입도법(parallel grading method)과 전두입도법(scalping and repla cement method) 등이 있으며, 본 시험에서는 상사입도법을 이용하였다(이대수 등, 2005a).

일반적으로 전단시험을 대상으로 하는 시료의 허용 최대입경을 결정하는 방법에는 세가지 방법이 있는데, ①공시체 가로방향 길이(직경 또는 변)의 1/10~1/5, ②공시체 높이의 1/7~1/5, ③공시체의 가로방향 길이 또는 높이 최소치수의 1/9~1/5 중 적정한 최소값을 시험 최대입경으로 결정한다(日本土質工學會, 1985).

본 시험에서는 대형직접전단시험기의 전단상자 한변의 길이가 1.5m임을 고려할 때, 시험이 가능한 최대입경은 100~150mm가 되나, 실제 사용한 최대입경은 76.3mm로 하였다. 그 이유는 현재 국내에서 생산하고 있는 석산재료의 최대입경이 대부분 80mm 이하이고, 체의 크기를 고려한 결과 본 연구에서는 최대입경 76.3mm를 시험최대입경으로 선택하였다.

시료의 최소입경은 2.0mm로 제한하였는데 이보다 작은 크기의 시료가 많아질 경우 조립재료의 정확한 거동특성을 규명하기가 어렵고 미세입경에 대한 입도조정 등의 어려움이 예상되어 최소 입경은 2.0mm로 제한하였다. 시험에 사용한 각 재료의 입도분포곡선은 그림 5에 나타내었다.

2.2.2 시험밀도 선정

선행연구에 따르면(신동훈 등, 1999), 일반적으로 조립재료를 이용한 설계밀도는 1.40~2.15g/cm^{3}의 범위에 있으며, 시공밀도는 1.60~2.30g/cm^{3}의 범위로 나타난다고 보고하고 있다. 이처럼 밀도에 차이가 발생하는 것은 설계밀도로 시공시 실제 전달되는 다짐에너지가 현장에서는 더 많이 축적되기 때문에 시공밀도가 높아지는 것이다. 이에 본 밀도차에 따른 강도특성을 확인하기 위하여 시험밀도는 1.85와 2.10g/cm^{3}으로 나누어 비교시험을 수행하였다.

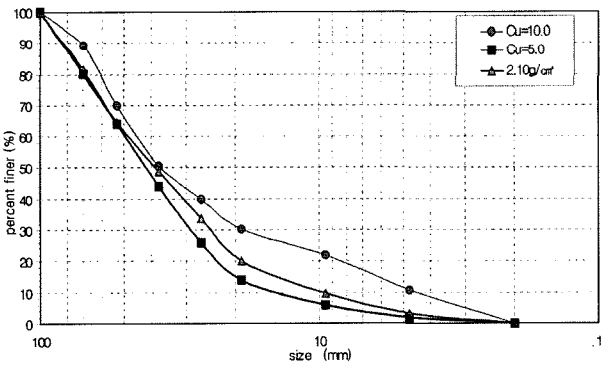


그림 5. 시험전 각 재료의 입도분포 곡선

2.2.3 균등계수 조건

일반적으로 조립재료의 간극비는 균등계수와 밀접한 관계가 있으며, 양호한 균등계수는 재료의 간극비를 최소화시켜 높은 시험밀도를 얻거나 원활한 다짐을 수행할 수 있도록 하는데 도움을 주게 된다. 이에 조립재료의 균등계수를 달리함에 따른 재료의 강도특성을 확인하고자 균등계수를 5.0과 10.0으로 조절하여 시험을 수행하였다. 이상에서 설명한 것과 같이 본 연구에서 계획한 조립재료의 기본시험조건을 표 3에 나타내었다.

2.3 시험 절차

상기와 같이 시험조건에 맞는 시료의 준비가 완료되면, 시료를 3층으로 나누어 전단상자 내부에 넣는다. 각 층별로 충격식램머(자중 90kg)를 이용하여 소요밀도가 되도록 무게비로 나누어 층별 다짐을 실시하며, 이때 한 층당 두께는 20cm가 되도록 다져 목표밀도를 관리한다. 제작이 완료된 공시체 상부에 가압판을 미세하게 상재시킨 후 소요 수직하중을 가압한다. 본 시험에서 사용한 수직하중의 크기는 98, 294, 490kPa이다. 이때 너무 순간적인 큰 하중을 상부에 가압하면 시료에 너무 많은 파쇄가 발생하여 강도에 영향을 줄 수 있으므로, 응력제어를 통하여 최초 98kPa를 1분에 걸쳐 상재시키고 5분이 지난 후, 다음 상재하중까지 증압시킨다. 증압이 완료되면 30분정도 압축을 시켜 시료의 재배열이 완료되도록 한다. 소요 수직하중에 도달한 후, 일정시간이 지나면 10mm/min의 속도로 시료를 전단시킨다. 첨두강도가 발생한 후 전단변형률 약 15%이상까지 추가 전단을 시킨다. 첨두강도가 없을 시에는 전단변형률 15%를 첨

표 3. 시험 조건 비교

구 분	경 상		전 라	
C_U	5.0		5.0	10.0
C_C	1.0		1.0	
시험밀도(g/cm^3)	1.85	2.10	1.85	
함수비(%)	공기 건조		공기 건조	
최대입경(mm)	76.3		76.3	
분 류	GW		GW	
비교 조건	시험 밀도		균등 계수	

두강도 또는 잔류강도로 산출한다(KS F2343). 이후 응력-변형률 곡선을 통해 전단강도를 산출하고 시험후 체분석을 실시하여 입자의 파쇄율을 분석한다(이대수 등, 2005a). 본 고에서의 파쇄율은 공시체의 제작과정에서 발생하는 다짐과 전단시 발생하는 재료의 파쇄정도를 나타내는 것이며, 수직응력재하시 전단상자 중앙부의 압축량을 공시체의 초기높이로 나눈값의 백분률을 수직변형률로 정의하였으며, 전단변형량을 전단상자의 길이로 나눈값의 백분률을 전단변형률로 정의하였다.

3. 시험결과 및 분석

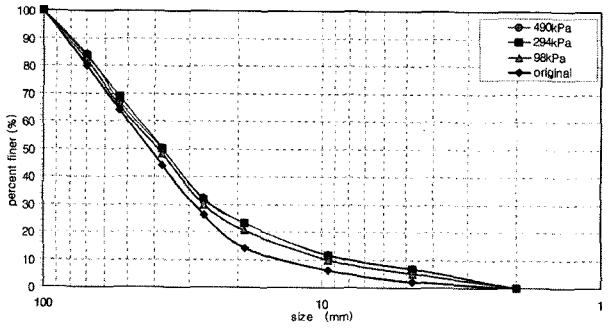
시험밀도와 균등계수의 크기가 조립재료의 전단강도에 어느 정도 영향을 주는지를 분석하고 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수의 크기를 산출한 결과는 다음과 같다. 본 고에서는 안전측의 구조물 설계를 위하여 전단강도중 내부마찰각만을 비교분석하였다.

3.1 시험밀도와 균등계수에 따른 전단강도

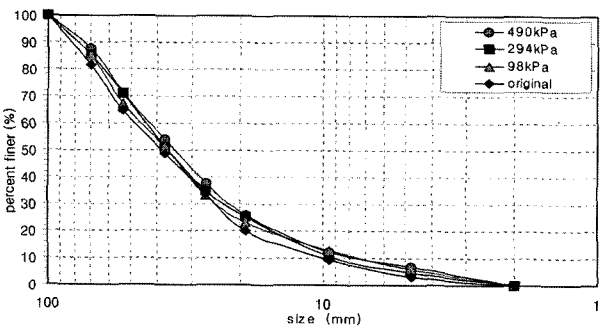
그림 7의 (a)에 시험밀도의 크기에 따른 전단강도곡선을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 시험밀도 2.10g/cm^{3}인 조립재료의 내부마찰각(48.4°)의 크기가 1.85g/cm^{3}의 값(44.5°)보다 약 1.1%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타나 밀도가 높은 조립재료의 내부마찰각이 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이때 발생하는 조립재료의 파쇄율의 크기를 확인하기 위하여 시험전후로 체가름시험을 수행한 결과, 시험밀도 2.10g/cm^{3}에서의 파쇄율(11%)이 1.85g/cm^3(8%)에서 보다 상대적으로 더 많이 발생하고 있는 것으로 나타났으며, 이는 시험전후의 입도분포곡선에서도 확인할 수 있다(그림 6(a), (b)). 즉, 밀도가 상대적으로 큰 재료는 높은 전단강도와 큰 파쇄율을 나타내는데, 이러한 현상이 발생하는 주요원인은 시험밀도를 2.10g/cm^{3}으로 맞추기 위하여 수행하는 다짐작업에서 다짐에너지가 상대적으로 1.85g/cm^{3}보다 많이 가해진 것과 밀도가 높은 재료의 입자상호간의 인터록킹(interlock ing)면적이 상대적으로 더 많아 전단시 입자의 파쇄가 더 발생하는 것으로 판단된다. 일

표 4. 시험 결과

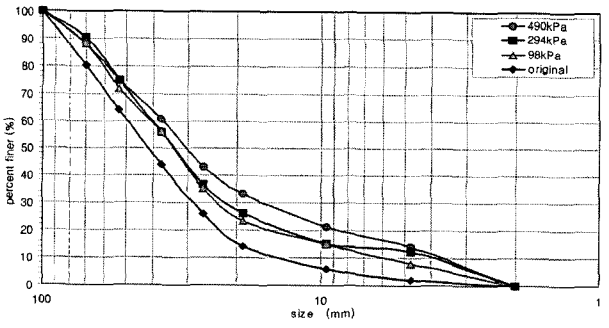
구 분		내부마찰각 (°)	파쇄율 (%)
시험밀도 (g/cm^3)	1.85	44.5	8
	2.10	48.4	11
균등계수	5.0	42.0	19
	10.0	40.2	25



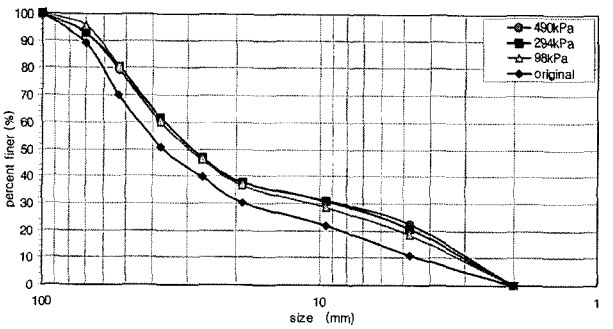
(a) 시험전후 입도분포(시험밀도 1.85g/cm^3)



(b) 시험전후 입도분포(시험밀도 2.10g/cm^3)

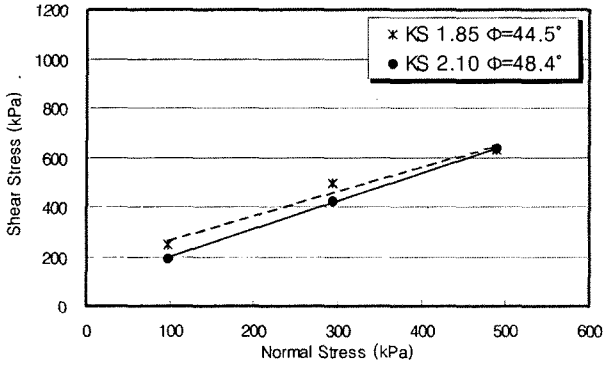


(c) 시험전후 입도분포(균등계수 5.0)

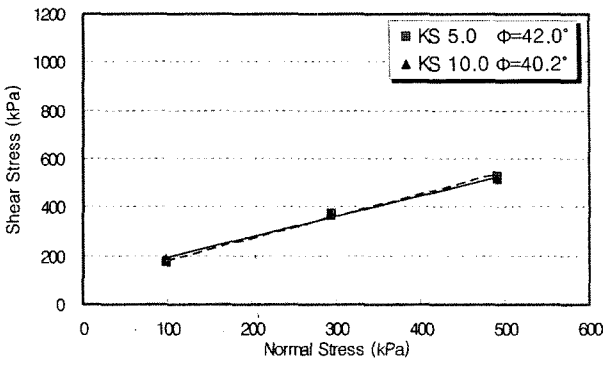


(d) 시험전후 입도분포(균등계수 10.0)

그림 6. 시험전후 입도분포곡선



(a) 시험밀도별 전단강도 곡선



(b) 균등계수별 전단강도 곡선

그림 7. 전단강도 곡선

반적으로 밀도가 일정할 때는 파쇄율이 커지면 내부마찰각은 감소하나, 밀도가 일정하지 않고 파쇄율이 클 경우에는 내부마찰각이 더 커질 수도 있음을 보여주는 것이다.

한편 균등계수에 따른 전단강도의 크기를 그림 7의 (b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전단강도의 크기는 균등계수 5.0의 내부마찰각(42.0°)이 10.0의 값(40.2°)보다 약 1.0%정도 크게 나타나 균등계수가 작은 곳에서 내부마찰각이 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이때 발생하는 재료의 파쇄율의 크기를 확인하기 위하여 시험전후로 체가름시험을 수행한 결과, 균등계수 10.0의 파쇄율(25%)이 5.0의 파쇄율(19%)보다 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타났는데(그림 6(c), (d)), 이는 높은 균등계수 일수록 입자간의 접촉면이 많아져 전단시 더 많은 파쇄가 발생하는 것으로 판단된다. 이 결과들은 선행연구에서 나타난 결과들과 유사한 경향을 보인다(日本土質工學會 , 1985).

3.2 조립질 토목재료의 응력-다일러턴시

Wood(1998)는 그의 저서에서 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)와의 관계를 평면변형상태에서 다음과 같이 표현하였다.

$$\delta W_t = \sigma dH + \tau dD \tag{1}$$

여기서, δW_t : 가해진 일

σdH : 수직방향에서 가해진 일

τdD : 수평방향에서 가해진 일

이때, 수평방향의 일은 수직응력(σ)과 마찰계수(μ)에 지배를 받는다는 Taylor(1948)의 기본가정을 이용하여 식 (2)를 구하고, 식 (1)과 식 (2)를 다시 전개하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\delta W_t = \mu \sigma dD \tag{2}$$

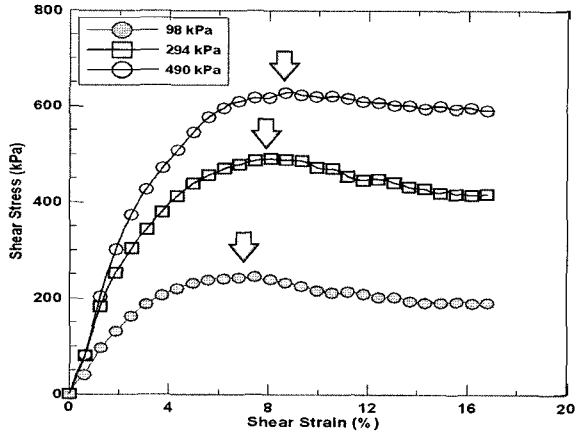
$$\tau/\sigma + dH/dD = \mu \tag{3}$$

즉, 평면변형상태에서 마찰계수는 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)의 항으로 표현할 수 있으며, 일정한 수직응력에서 더 이상 체적의 변화가 없는 상태인 한계상태(dH/dD가 0)의 응력비(τ/σ)는 마찰계수(μ)와 같은 값을 갖는다고 제시하고 있다. 이를 근거로 시험밀도의 크기에 따른 조립재료의 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)의 관계를 그림 8(a)~(f)에 도시하였다.

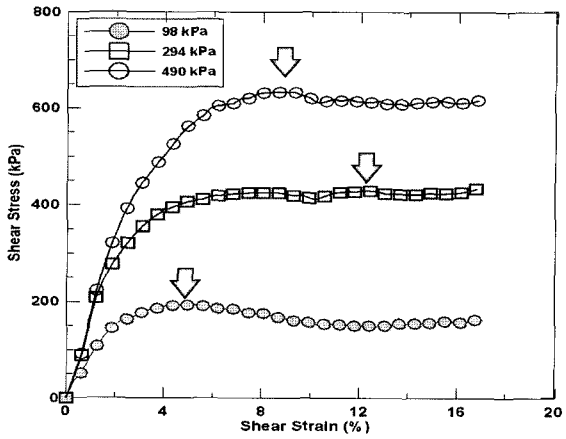
여기서, 전단변형에 따른 전단응력의 거동은 상대적으로 높은 시험밀도(2.10g/cm^3)에서 명확한 첨두강도가 나타나지 않고 있으며, 전단변형률-수직변형률 곡선에서도 높은 밀도에서의 수직변형률이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 다일러턴시는 수직응력이 클수록 작아지고, 첨두강도 보다는 잔류강도시에 더 커지는 경향을 보이고 있다. 이때의 마찰계수의 크기는 시험조건별 수직응력의 크기에 따라 1.0~1.6의 범위로 나타났다.

Taylor(1948)가 제안한 마찰계수 산출법은 첨두강도까지의 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)를 도시하고 그 점들을 잇는 직선을 그어 다일러턴시가 0이 되는 응력비를 구하는 방식이다.

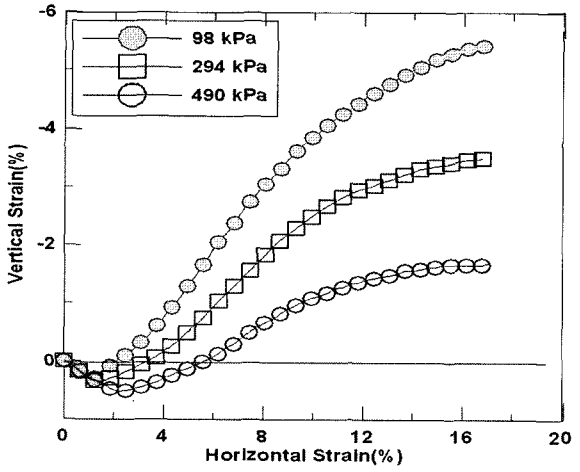
균등계수의 크기에 따른 조립재료의 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)의 관계는 그림 9의 (a)~(f)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전단응력의 크기는 수직응력이 커짐에 따라 커지고 있으며 수직변형률은 작아지고 있다. 또한 수직응력이 커지면서 첨두강도가



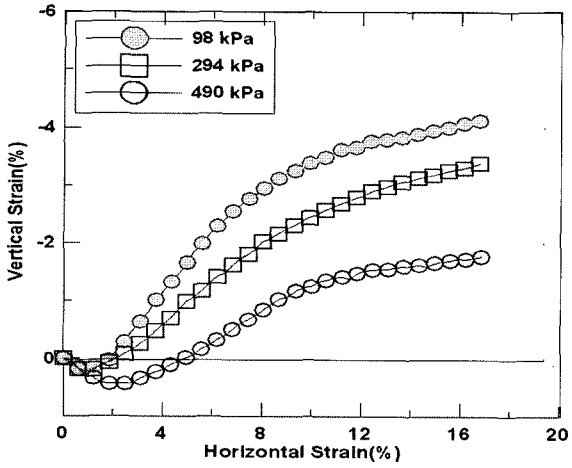
(a) 전단변형률-전단응력곡선(시험밀도 1.85g/cm^3)



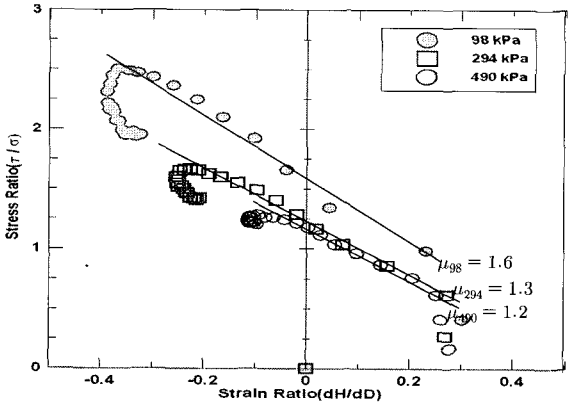
(b) 전단변형률-전단응력곡선(2.10g/cm^3)



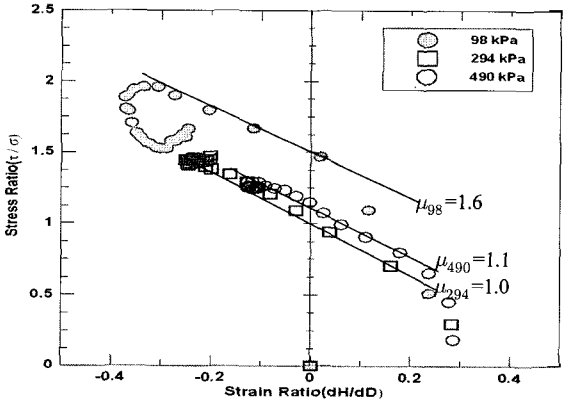
(c) 전단변형률-수직변형률(시험밀도 1.85g/cm^3)



(d) 전단변형률-수직변형률(2.10g/cm^3)



(e) 응력비(τ/σ)-dH/dD(시험밀도 1.85g/cm^3)



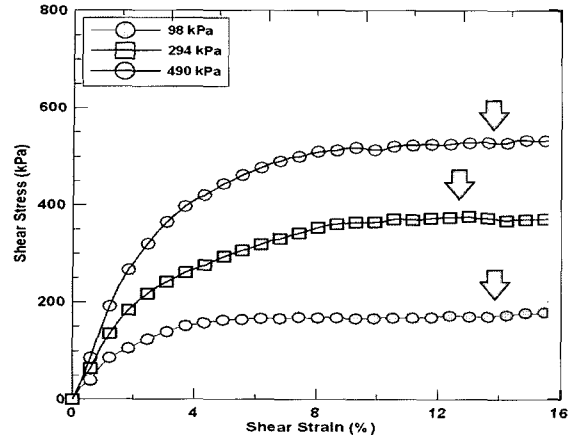
(f) 응력비(τ/σ)-dH/dD(시험밀도 2.10g/cm^3)

그림 8. 전단변형률과 응력비와 다일러턴시와의 관계(경상지역)

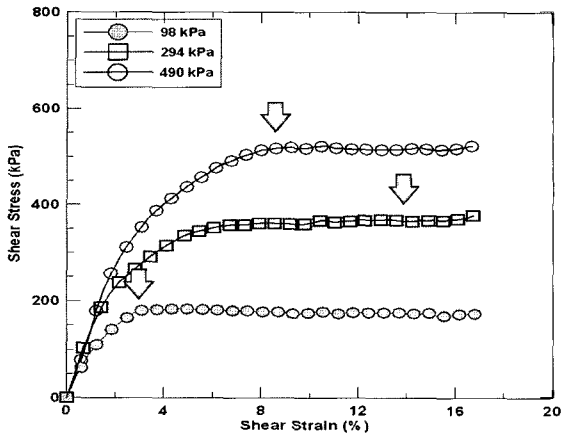
확연하게 나타나지 않고 있다. 이때의 마찰계수의 크기는 시험조건별 수직응력의 크기에 따라 1.1～1.4의 범위로 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이 조립재료의 내부마찰각의 크기는 상대적으로 높은 밀도(2.10g/cm^3)와 낮은 균등계수(5.0) 일때가 작은 밀도(1.85g/cm^3)와 높은 균등계수(10.0) 일때 보다 더 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 재료의 파쇄율은 이와는 반비례하는 것으로 나타났다.

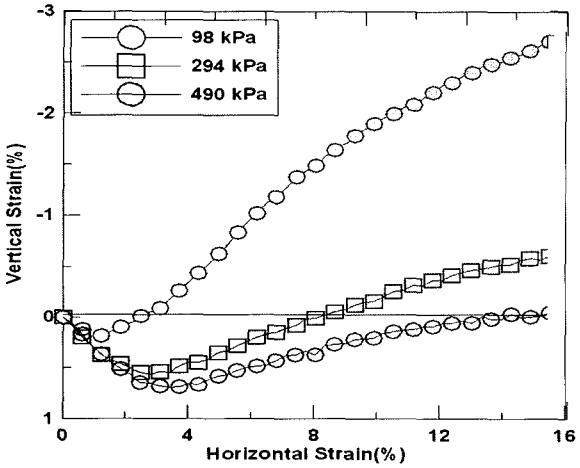
더불어, 지역별 내부마찰각의 크기를 단순 비교하면, 일축압축강도의 크기가 상대적으로 크게 확인된 경상지역의 내부마찰각(44.5°～48.4°)의 크기가 전라지역의



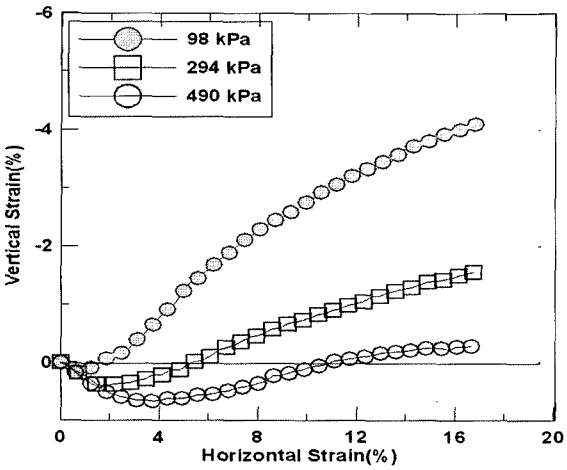
(a) 전단변형률-전단응력곡선(균등계수 5.0)



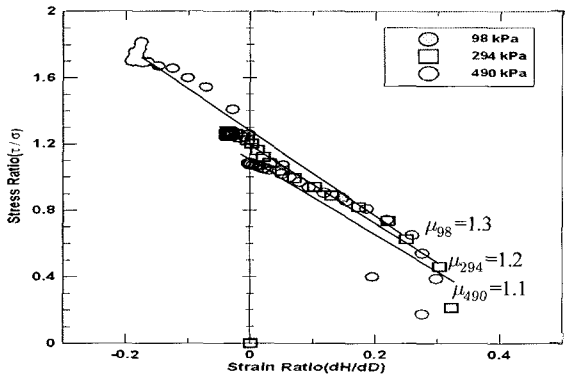
(b) 전단변형률-전단응력곡선(균등계수 10.0)



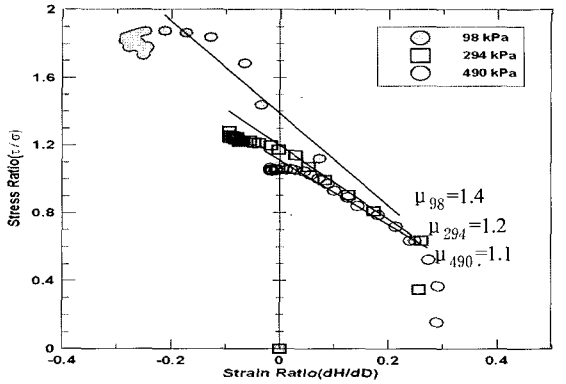
(c) 전단변형률-수직변형률(균등계수 5.0)



(d) 전단변형률-수직변형률(균등계수 10.0)



(e) 응력비(τ/σ)-dH/dD(균등계수 5.0)



(f) 응력비(τ/σ)-dH/dD(균등계수 10.0)

그림 9. 전단변형률과 응력비와 다일러턴시와의 관계(전라지역)

값(40.2°~42.0°)보다 최대 6.4°정도 크게 산출되었다. 이는 상대적으로 일축압축강도가 크게 나타난 경상지역(133,868kPa)의 조립재료가 전라지역(64,680kPa)의 조립재료보다 더 큰 강도정수를 가지고 있는 것으로 판단되며, 이와 관련된 구체적인 내용은 후속 논문에서 기술할 예정이다.

4. 결 론

시험밀도의 크기와 균등계수의 크기가 조립재료의 전단강도에 어느 정도 영향을 주는지를 확인하고, 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수를 산출하고자 대형직접전단시험을 수행한 결과를

요약하면 다음과 같다.

(1) 시험밀도의 크기에 따른 재료의 강도정수를 분석한 결과, 2.10g/cm^{3}에서의 내부마찰각(48.4°)이 1.85g/cm^{3}에서의 값(44.5°)보다 약 1.1%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타나 상대적으로 시험밀도가 높을 수록 내부마찰각이 더 크게 나타났다.

(2) 균등계수 크기에 따른 강도정수의 크기를 분석한 결과, 균등계수 5.0에서의 내부마찰각(42.0°)이 10.0의 값(40.2°)보다 약 1.0%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

(3) 전단시 조립재료가 나타내는 파쇄율과 시험조건과의 관계를 분석한 결과, 시험밀도가 크고, 균등계수가 높은 재료에서 더 큰 파쇄가 나타났는데, 이는 상대적으로 낮은 시험밀도와 균등계수에서 보다도 입자상호간의 접촉점이 더 많아지기 때문에 전단시 파쇄가 더 발생하는 것으로 판단된다.

(4) 전단시 발생하는 수직팽창량은 수직응력이 커질수록 작아지고, 첨두강도시보다 잔류강도시에 더 커지는 것으로 나타났다.

(5) 한계상태에서 재료가 가지고 있는 마찰계수를 각 수직응력별로 산출한 결과, 대부분 큰 수직응력에서 보다 작은 수직응력에서의 마찰계수가 더 큰 값을 갖는 것으로 확인되었다. 경상지역의 재료는 1.0~1.6으로 나타났으며, 전라지역의 재료는 1.1~1.4로 나타났다.

(6) 지역별로 나타난 내부마찰각의 크기를 단순 비교분석한 결과, 일축압축강도의 크기가 상대적으로 크게 확인된 경상지역의 내부마찰각(44.5°~48.4°)의 크기가 전라지역의 값(40.2°~42.0°)보다 최대 6.4° 정도 크게 산출되었다.

(7) 시험의 결과로부터 밀도와 균등계수의 크기가 조립재료의 전단강도의 크기를 결정짓는 중요 인자로 작용하고 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 김재영 (2004), "개량형 일면직접전단시험기의 제작과 정체적·정압조건의 전단시험에 대하여", *한국지반공학회지*, 제20권 제5호, pp.58-65.
2. 신동훈, 오병훈 등 (1999a), "*댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화방안 연구*", 한국수자원공사, pp.5-20.
3. 신동훈, 이종욱 (2001b), "*대형삼축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구*", pp.1-249.
4. 이대수, 김경열, 홍성연, 김대홍 (2005a), "*구조물 단면절감을 위한 조립질 토목재료 변형특성 연구*", 한국전력공사 전력연구원, pp.66-67.
5. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘 (2005b), "대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I)", *한국지반공학회논문집*, 제21권, 제6호, pp.81-91.
6. 이상덕, 유병모, 김양운, 서성호 (2001), "굵은 골재 함유율에 따른 직접전단거동 특성", *대한토목학회 학술발표회지*, pp.1-4.
7. 홍성연, 김경열, 이대수 (2004), "조립재료의 변형 및 강도특성에 대하여 - 대형일면전단시험기 개발-", *대한 토목학회 추계 학술발표회지*, pp.2362-2365.
8. 日本土質工學會 (1985), "組立材料の 變形强度", pp.5-85.
9. Wood, M. (1998), "Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics", pp.229-234.
10. Matsuoka, Y. (松倉公憲筑, 1988), "大型一面せん斷試驗機の作製とその目的", *波大學水理試驗 センター報告*, No.12, pp.37-41
11. Matsuoka, H. (1998a), "Simplified Direct Box Shear Test on Granular Materials and Its Application to Rockfill Materials", *Söils and Foundations*, Vol.38, No.4, pp.275-284.
12. Matsuoka, H. (2001b), "Development of a New In-Situ Direct Shear Test", American Society for Testing and Materials, *Geotechnical Testing Journal*, pp.92-102.
13. Zingg Th (1935), "Beitrag Zur schotteranalyse", S. Min. Pentrol. Mitt, 15. pp.5-25.

(접수일자 2005. 11. 14, 심사완료일 2006. 4. 18)