

대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성 (I)

Behavior of Shear Strength of Coarse Grained Materials Based on Large Scale Direct Shear Test (I)

이 대 수¹ Lee, Dae-Soo 김 경 열² Kim, Kyoung-Yul
홍 성 연³ Hong, Sung-Yun 조 화 경³ Jo, Hwa-Kyung
황 성 춘⁴ Whang, Sung-Chun

Abstract

“Coarse grained material” refers to crushed stones or gravels, and the behaviour of soil containing coarse grained material is not easily defined using the conventional soil mechanics theory due to the influences of large particles, therefore large scale test is essential to investigate their effects. Previous studies have identified the major factors affecting the properties of coarse grained materials by using large scale shear testing apparatus, such as maximum particle size, water content, density and uniformity coefficients. In this paper, the effect of variation of maximum particle size and water content 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 sample for the test was obtained from the local quarry sites. Tests results show that the shear strength for 50.8 mm maximum particle size is relatively larger than that of 76.3 mm and air-dry sample has larger shear strength than saturated sample. In the meantime, the friction coefficient at critical state shows 1.0~1.6 according to the test conditions.

요 지

“조립질 토목재료”라 함은 쇄석 또는 자갈 등을 일컫는 말로써, 조립재료를 포함하는 지반의 거동은 큰 입자의 영향에 의해 기존의 토질역학 이론으로는 그 특성을 명확히 설명하기는 곤란하기에 이와 같은 큰 입자의 영향을 파악하기 위해서는 그에 맞는 대형시험이 필수적이라 하겠다. 이에, 선행연구(이대수 등, 2005)에서 조립재료의 공학적 특성을 결정짓는 주요한 인자로 밝혀진 최대 입자의 크기, 함수비, 시험밀도 및 균등계수의 크기 등이 국내의 조립재료의 전단강도에 어느 정도 영향을 주는지를 대형직접전단시험기(홍성연 등, 2004)를 이용하여 확인하였으며, 그 중 본 고에서는 최대입경의 크기와 함수비의 변화가 전단강도에 주는 영향을 분석하였다. 아울러, 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수를 Wood(1998)가 제안한 방정식을 이용하여 산출하였으며, 시험에 사용한 재료는 경기와 충청지역 석산에서 생산중인 조립재료이다. 시험결과 최대입경 50.8mm의 전단강도의 크기가 76.3mm의 값보다 상대적으로 크게 나타났으며, 공기건조상태의 재료가 포화상태의 값보다 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 정회원, 한전 전력연구원 책임연구원 (Member, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute, dslee@kepri.re.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., School of Civil. Eng., Gyong Ju Nat'l Univ.)

1. 서론

“조립질 토목재료”라 함은 쇄석 또는 자갈 등과 같은 입상재료를 일컫는 말로써, 국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 기본재료이기도 하다. 우선 본 재료들이 사용되고 있는 곳들을 대표적으로 살펴보면 국책사업의 일환인 댐, 항만시설, 원자력폐기물 저장소, 철도노반 및 도로 노반 등을 들 수 있다. 하지만 이처럼 사용되고 있는 분야가 방대한 반면에 조립질 토목재료들의 특성 규명을 위한 시험절차 및 대형 시험장치의 개발은 매우 미미한 실정이다. 지반재료의 강도정수를 산정하기 위한 시험법에는 직접전단시험, 삼축압축시험, 전단비틀림시험 등 여러종류의 시험법이 있으나, 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 키울 수는 없기에 시험의 간편성과 공시체 크기의 자유로운 조절이 용이한 대형직접전단시험이 다양한 크기의 조립재료를 시험하기에는 더욱 적합하다 하겠다. 한편, 직접전단시험법은 약 200여년전 Coulomb이 제안한 이래로 현재까지 사용하고 있는 단순한 시험법이자 가장 많은 역사를 가지고 있는 시험법이기도 하다. 본 시험법은 공시체 상부에 수직하중을 가한 상태에서 수평력을 가하여 공시체의 분리면을 따라 강제로 파괴를 일으켜서 지반의 강도정수를 구하는 간편한 시험법이다. 이처럼 시험이 간편하고 단순함에도 불구하고 이 시험에 의한 결과가 삼축압축시험결과와 크게 차이가 나지 않아 지금까지도 많은 분야에서 이용 및 응용이 되고 있는 실정이다. 더불어 시험장비가 가지고 있는 오차를 줄여 시험결과의 신뢰도를 향상시키고자 이에 대한 많은 노력이 지금까지도 진행되고 있다.

이와 관련하여 그 동안 수행되었던 직접전단시험기의 개선에 관한 연구들을 살펴보면, Matsuoka(1988)는 기존의 소형전단시험기로는 시험이 불가능한 입경이 큰 재료에 대하여 전단강도를 도출할 수 있는 대형직접전단시험기(공시체직경=96cm)를 개발하였다.

본 시험기는 최대입경 100mm까지 시험이 가능하다.

또한, Matsuoka(1998)는 기존의 시험법과 달리 상부의 전단상자를 없애고 직접 가압판을 하부 전단상자에 가압하여 공시체를 전단시키는 방법으로 새로운 전단 시험법을 제시하였다. 이 시험법의 특징은 전단중 발생

하는 재료의 다일러턴시(dilatancy)가 자연스럽게 없어지는 특징을 가지고 있으며, 최대입경 150mm까지 시험이 가능하다. 특히, 1회 시험에 필요한 소요시간이 시료조제부터 시험완료까지 30분정도 밖에 걸리지 않는 특징이 있다. Matsuoka(2001)는 더불어 본 시험법을 한층 더 개량하여 현장에서 바로 사용할 수 있는 현장용 대형직접전단시험기를 개발하였으며, 전단상자의 규격은 가로×세로 각각 1.2 m의 크기이다. 본 시험기 역시 상부의 전단상자 없이 바로 전단을 시키는 형식이다. 시험결과에 있어서도 신뢰할 수준의 값을 얻고 있다고 밝히고 있다.

한편 국내에서는 최근 들어 전단시험의 중요성이 인식되기 시작하여 이에 대한 연구가 진행중에 있다. 이상덕(2001)은 축조용 재료로 사용되는 자갈과 같은 입경에 대한 시료의 전단강도를 구하기 위하여 가로×세로×높이 각각 1.0m의 대형직접전단시험기를 개발하였다. 김재영(2004)은 기존의 소형직접전단시험기가 갖고 있던 단점을 대폭 개량한 개량형 시험기를 소개하였다. 그 내용에는 주면마찰력의 저항을 최대한 억제하기 위한 정압조건과 가압판을 고정하여 체적변화를 방지한 경제적 조건이 시험의 신뢰도를 향상시키는 데에 중요한 역할을 한다고 보고하고 있다.

이에, 선행연구(이대수 등, 2005)에서 조립재료의 공학적 특성을 결정짓는 주요한 인자로 밝혀진 최대 입자의 크기, 함수비, 시험밀도 및 균등계수의 크기 등이 국내의 조립재료의 전단강도에 어느 정도 영향을 주는지를 대형직접전단시험기(홍성연 등, 2004)를 이용하여 확인하였으며, 그 중 본 고에서는 최대입경의 크기와 함수비의 변화가 전단강도에 주는 영향을 분석하였다. 이때 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수를 Wood(1998)가 제안한 방정식을 이용하여 산출하였으며, 시험에 사용한 석산재료는 경기와 충청지역에서 생산중인 조립재료이자 국내의 도로 및 성토 현장에서 현재 사용하고 있는 재료이다.

2. 대형직접전단시험기 제원 및 특징

본 시험기는 국내 자체 기술로 제작한 장비로 조립재료의 최대허용입경이 150mm인 시료까지도 시험이 가능하도록 제작되었으며 상세제원은 표 1과 같다.

직접적으로 조립재료를 담아 전단을 시키게 되는 전단상자의 규모는 1.5m(W)×1.5m(L)×0.6m(H)로써 국내 최대규모이다. 시료에 가하는 수직하중은 최대 200 ton

까지 가력이 가능하며, 수평하중은 최대 300 ton까지 가력이 가능하다.

수직 및 수평변위계는 총 4본으로 수평변위계 1개와 수직 변위계 3개이다. 이 변위계의 최소 측정변위량은 0.1mm이며, 최대 300mm까지 변위측정이 가능하다. 특히 본 시험기가 갖고 있는 가장 큰 특징은 기존의 직접

전단시험기가 가지고 있는 단점을 일부 보완한 것인데, 현재까지도 국내에 널리 보급되어 있으며 한국산업규격 KS F2343 “압밀배수조건에서 흙의 직접전단시험방법”에 규정되어 있는 직접전단시험기는 ①가압판이 가압축에 고정되어 있지 않기 때문에 전단중에 기울어지며 ② 수직, 수평변위계는 각각 1개의 다이얼게이지를 이용하

표 1. 대형 직접전단시험기 제원

시험 장치의 구조	전단부의 구조	전단 상자	상부상자크기(cm)	150 × 150 × 30
			하부상자크기(cm)	150 × 150 × 30
		수직 가압판	전단상자 사이 간격(cm)	1.0
			길이×폭×두께(cm)	148 × 148 × 31
	재하부의 구조	수직력 재하	수직하중의 고정형상	고정
		수평력 재하	이동상자와 구속방식	하부상자 수평이동
계측 항목	수직방향	하중	로드셀 1점(max 200 ton)	
		변위	LVDT 3점(max 300mm)	
	수평방향	하중	로드셀 1점(max 300 ton)	
		변위	LVDT 1점(max 300mm)	

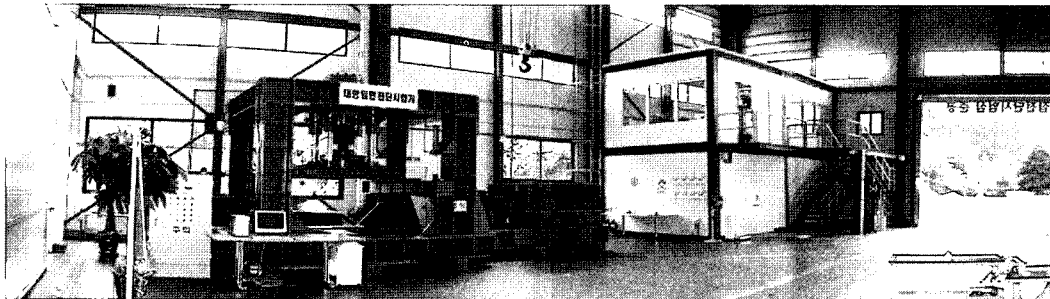


그림 1. 대형 직접전단시험기 전경

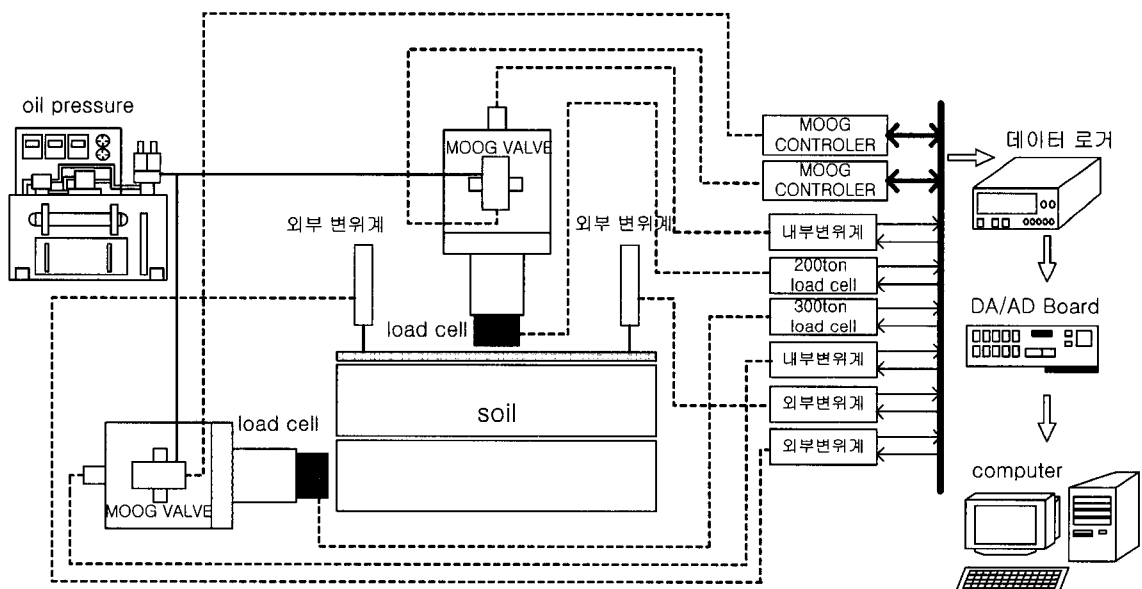


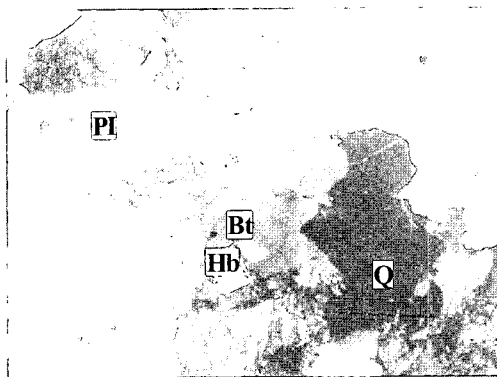
그림 2. 대형 직접전단시험기 계통도

여 정확한 변위측정의 정밀도가 떨어지며 ③전단시 전단상자 내부에 발생하는 정(+) 또는 부(-)의 체적팽창이 상부에 작용하는 수직하중을 변화시키는 단점이 있다. 이번에 개발된 대형직접전단시험기는 이러한 단점을 보완하여 시험의 신뢰성을 높이고자 하였으며 그 상세별 특징은 선행연구결과(이대수 등, 2005)에 기록하였다.

3. 재료의 기본 특성 및 시험 조건

시험에 사용한 조립재료는 석산에서 모암을 파쇄하여 생산한 산림골재이다. 2005년 3월 현재 한국골재협회에 등록되어 있는 전국의 석산 갯수는 경기지역 22곳, 강원지역 33곳, 충청지역 64곳, 전라지역 38곳 및 경상지역 60곳 등 총 217개소이다. 이중 강원지역의 석산은 주로 하천 및 육상골재를 생산하는 곳이며 환경부 법령에 의해 녹지자연도 8등급 이상인 지역에 해당되어 석산과 같은 산림골재의 개발은 불가능한 지역이다. 이에 본 시험대상에서는 제외하였다.

시험 조건중의 하나인 최대입경의 크기에 따른 전단강도 특성시험에 사용한 재료는 충청지역의 석산재료를 이용하였으며, 함수비 조건에 따른 특성시험은 경기지역의 석산재료를 이용하였다. 시험에 사용한 조립재료의 최대입경은 76.3mm와 50.8mm의 골재를 대상으로 시험을 수행하였으며, 함수비 조건은 대기중에서 건조시킨 자연 공기건조 상태와 포화상태로 나누어 시험을 수행하였다.



시장석(plagioclase), 석영(quartz), 각섬석(hornblende), 흑운모(biotite)
그림 3. 경기지역 모암(섬록암)

표 2. 경기지역 모암 기본 물성(공시체수 4개)

구분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축 강도(kPa)
	절대 건조	표면 건조	진			
평균	2.72	2.72	2.73	0.21	5.20	59,976

3.1 재료의 모암 특성

시험에 사용한 조립재료는 경기도 안성시 대덕면 소재의 석산과 충남 금산군 진산면 소재의 석산에서 생산하고 있는 재료이며, 그 특징들은 다음과 같다.

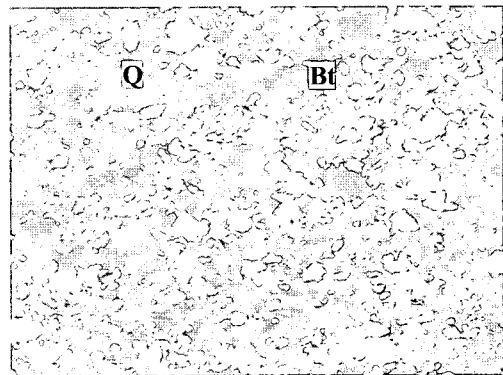
3.1.1 경기모암의 암석학적 특징

경기지역 석산에서 생산중인 조립재료의 암종을 확인하기 위하여 모암시료를 채취하여 광학현미경을 이용한 결정분석을 실시하였다. 분석결과 재료의 모암은 사장석(pagioclase), 석영(quartz), 정장석(orthoclase) 및 흑운모(biotite) 등으로 구성된 화성암(igneous)계열의 섬록암[閃綠岩, diorite]으로 나타났으며, 이 암종은 우리나라 전역에 고루 분포하는 종이다(그림 3).

시험에 사용한 재료의 기본물성을 확인하기 위하여 물리적시험(비중, 일축압축강도, 흡수율, 탄성파속도, 입도분석)을 수행한 결과, 비중은 2.72~2.73, 흡수율은 0.21%, 암석의 일축압축강도는 약 59,976 kPa정도로 나타났다(표 2).

3.1.2 충청모암의 암석학적 특징

충청지역 재료의 모암은 석영(quartz)과 흑운모(biotite) 등으로 구성된 변성암(metamorphic rock)계열의 저급 편암[semischist]으로 나타났다(그림 4). 비중은 2.61~2.66, 흡수율은 0.22%, 암석의 일축압축강도는 약 107,114kPa로 나타났다(표 3).



석영(Quartz), 흑운모(Biotite)
그림 4. 충청지역 모암(편암)

표 3. 충청지역 모암 기본 물성(공시체수 5개)

구분	비 중			흡수율 Q(%)	탄성파속도 (Vp, km/s)	일축압축 강도 (kPa)
	절대 건조	표면 건조	진			
평균	2.61	2.63	2.66	0.22	5.26	107,114

3.2 시험 조건

3.2.1 재료의 형상

시험에 사용한 재료의 입자형상을 그림 5에 나타내었다. Zingg(1935)가 제안한 입자형상에 따른 재료분류법으로 시료를 분류한 결과(그림 6), 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.

3.2.2 재료의 최대 및 최소 입경

일반적으로 맨체체 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 대

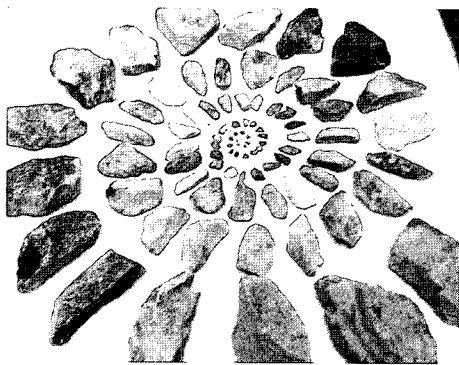


그림 5. 재료의 입자 형상

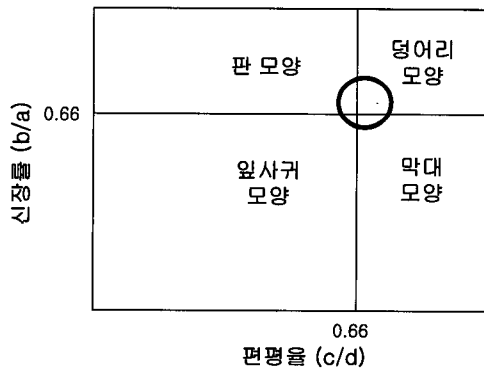


그림 6. Zingg의 형상분류법

부분 시험시 사용되는 재료의 입경은 줄여서 시험하게 된다. 그 방법에는 상사입도법(parallel grading method)과 전두입도법(scalping and replacement method) 등이 있으며, 본 시험에서는 상사입도법을 이용하였다(이대수 등, 2005).

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

본 시험에서는 대형직접전단시험기의 전단상자 한 변의 길이가 1.5m임을 고려할 때, 시험이 가능한 최대 입경은 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 선택하였으며, 최대입경의 크기효과에 따른 전단강도 특성을 비교하고자 50.8mm를 비교용 시험입경으로 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 7(c), (d)와 그림 8(c), (d)에 나타내었다.

3.2.3 시험밀도 선정

선행연구에 따르면(신동훈 등, 1999), 일반적으로 조립재료를 이용한 설계밀도는 1.40~2.15g/cm³의 범위에 있으며, 시공밀도는 1.60~2.30g/cm³의 범위로 나타난다고 보고하고 있다. 이처럼 밀도에 차이가 발생하는 것은 설계밀도로 시공시 실제 전달되는 다짐에너지가 현장에서는 더 많이 축적되기 때문에 시공밀도가 높아지는 것이다. 한편 시험밀도는 설계밀도와 같거나 약간 크게 시험을 수행하게 되는데, 본 연구에서는 선행연구(일본토질공학회)에서 수행한 시험밀도를 활용하여 모든 재료의 시험밀도를 공히 1.85g/cm³로 조절하였다.

3.2.4 함수비 조건

록필댐과 같이 상시수위 레벨에 의해 항상 재료가 포화상태가 되어 있거나, 하류측 부분과 같이 빗물의 침투

표 4. 시험 조건 비교

구 분	경 기		총 칭	
D_{10} (mm)	14.0		14.0	
D_{30} (mm)	29.0		29.0	
D_{60} (mm)	60.0		60.0	
C_u	4.3		4.3	
C_c	1.0		1.0	
시험밀도(g/cm^3)	1.85		1.85	
함수비(%)	기건	3%>	기건	
최대입경(mm)	76.3		76.3	50.8
분 류	GW		GW	
비교 조건	함수비		최대입경	

등에 의해 포화 및 건조상태가 반복되는 지역의 조립재료의 특성은 함수상태의 변화도 고려한 시험을 수행하여야 한다. 이에 대한 시험조건을 고려하여 본 연구에서는 24시간 이상 재료를 수침시킨 상태의 포화상태와 24시간 공기건조시킨 상태로 나누어 시험을 수행하였다. 그러나, 전단시 전단상자내부에는 전단상자 구조상 물을 가득 채우지는 않았다.

이상에서 설명한 것과 같이 본 연구에서 계획한 조립재료의 기본시험조건을 표 4에 비교하였다.

3.3 시험 절차

상기와 같이 시험조건에 맞는 시료의 준비가 완료되면, 시료를 3층으로 나누어 전단상자 내부에 넣는다. 각 층별로 충격식램머(자중 90kg)를 이용하여 소요밀도($1.85g/cm^3$)가 되도록 무게비로 나누어 층별 다짐을 실시하며, 이때 한 층당 두께는 20cm가 되도록 다져 목표밀도를 관리한다. 제작이 완료된 공시체 상부에 가압판을 미세하게 상재 시킨 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 98 kPa를 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

첨두강도 또는 잔류강도로 산출한다(KS F2343). 이후 응력-변형률 곡선을 통해 전단강도를 산출하고 시험 후 체분석을 실시하여 입자의 파쇄율을 분석한다(이대수 등, 2005). 본 고에서의 파쇄율은 공시체의 제작 과정에서 발생하는 다짐과 전단시 발생하는 재료의 파쇄정도를 나타내는 것이며, 수직응력재하시 전단상자 중앙부의 압축량을 공시체의 초기높이로 나눈값을 체적변형율로 정의하였다.

4. 시험결과 및 분석

최대 입경의 크기와 함수비의 변화가 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.

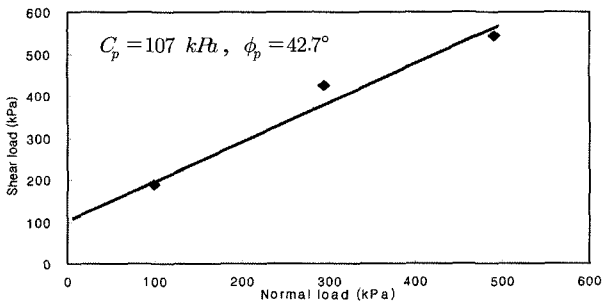
4.1 최대입경과 함수비에 따른 전단강도

그림 7(a), (b)에 최대입경의 크기에 따른 전단강도곡선을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 최대입경의 크기가 50.8mm인 조립재료의 내부마찰각(44.0°)의 크기가 76.3mm의 값(42.7°)보다 약 3%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타나 입경이 작은 조립재료의 내부마찰각이 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이때 발생하는 조립재료의 파쇄율의 크기를 확인하기 위하여 시험전후로 체가름시험을 수행한 결과, 최대입경 76.3mm에서의 파쇄율(15%)이 50.8mm(10%)에서 보다 상대적으로 더 많이 발생하고 있는 것으로 나타났으며, 이는 시험전후의 입도분포곡선에서도 확인할 수 있다(그림 7(c), (d)). 즉, 입경이 상대적으로 큰 재료는 낮은 전단강도와 큰 파쇄율을 나타내는데, 이러한 현상이 발생하는 주요원인은 전단시 입자상호간의 인터록킹(interlocking)에 의한 전단저항이 발생하기 전에 입자의 파쇄가 먼저 발생하기 때문에 파쇄율은 커지고 내부마찰각은 감소하는 것으로 판단된다.

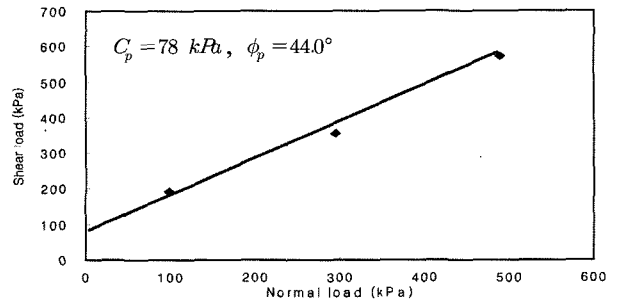
함수비에 따른 전단강도의 크기를 그림 8의 (a), (b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 함수비에 따른 전단강도의 크기는 공기건조상태의 내부마찰각(38.6°)이 포화상태의 값(38.1°)보다 약 1.3%정도 크게 나타나 건조상태의 내부마찰각이 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로

로 나타났다. 이때 발생하는 재료의 파쇄율의 크기를 확인하기 위하여 시험전후로 체가름시험을 수행한 결과, 포화상태에서의 파쇄율(19%)이 공기건조상태에서의 파쇄율(15%)보다 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타

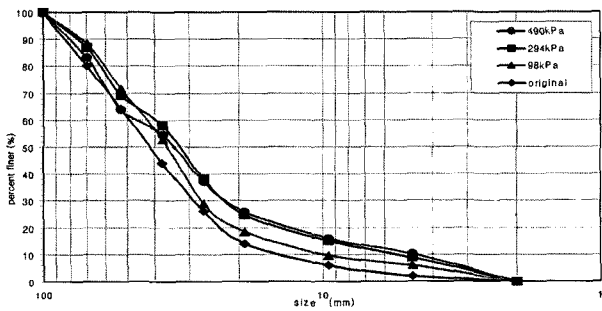
났는데(그림 8(c), (d)), 이는 입자의 균열이나 약한 부분에 수분이 스며들어 전단시 윤활유 역할을 하여 쉽게 절단과 변형 및 파쇄가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 이 결과들을 종합하면 표 5와 같으며, 이는 선행연구



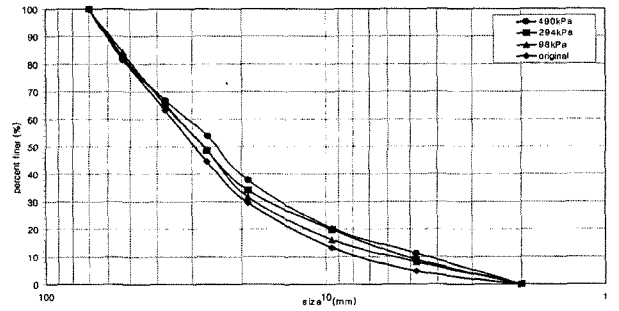
(a) 전단강도 곡선(최대입경 76.3mm)



(b) 전단강도 곡선(최대입경 50.8mm)

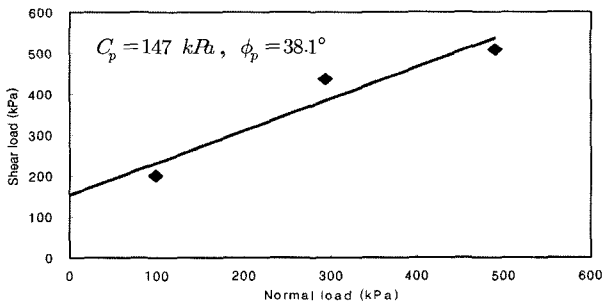


(c) 시험전후 입도분포(최대입경 76.3mm)

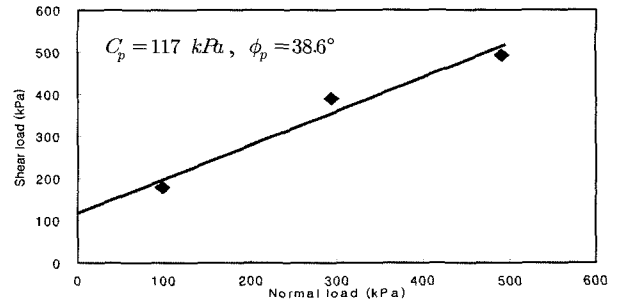


(d) 시험전후 입도분포(최대입경 50.8mm)

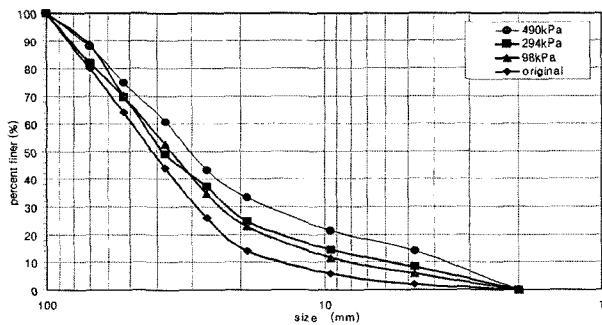
그림 7. 전단강도 곡선 및 시험전후 입도분포곡선(충청지역)



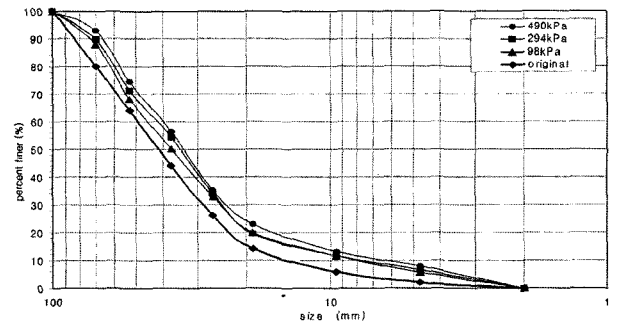
(a) 전단강도 곡선(포화)



(b) 전단강도 곡선(공기건조)



(c) 시험전후 입도분포(포화)



(d) 시험전후 입도분포(공기건조)

그림 8. 전단강도 곡선 및 시험전후 입도분포곡선(경기지역)

표 5. 시험 결과

구분	내부마찰각(°)	파쇄율(%)
최대입경 (mm)	76.3	42.7
	50.8	44.0
함수비	포화	38.1
	기건	38.6

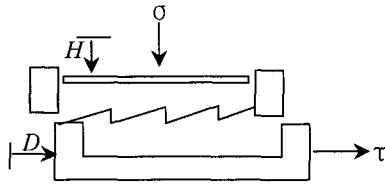
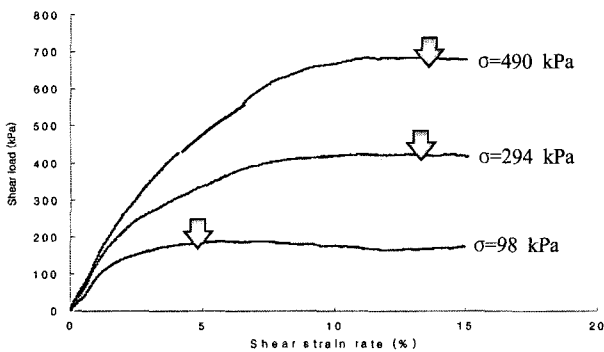
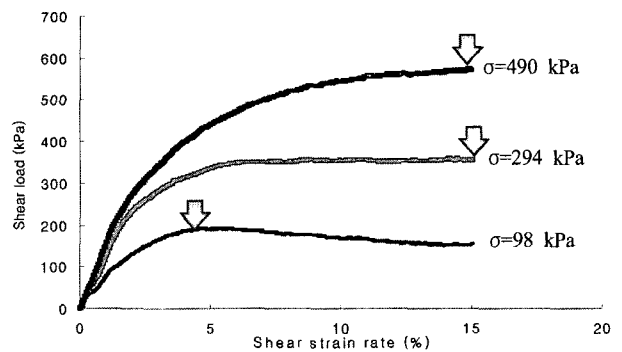


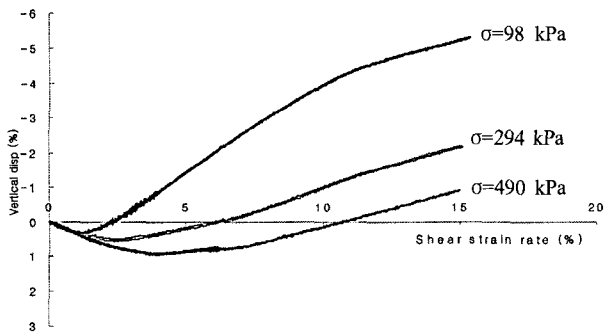
그림 9. 전단시험 개념도



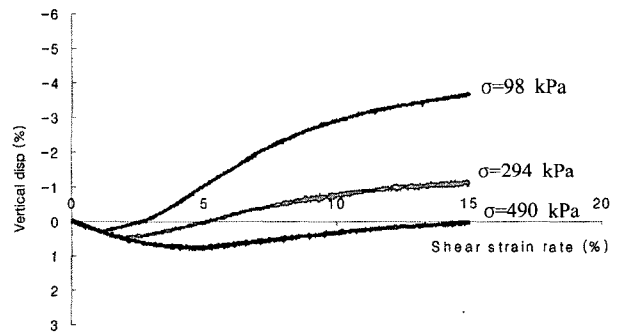
(a) 전단변형률-응력곡선(최대입경 76.3mm)



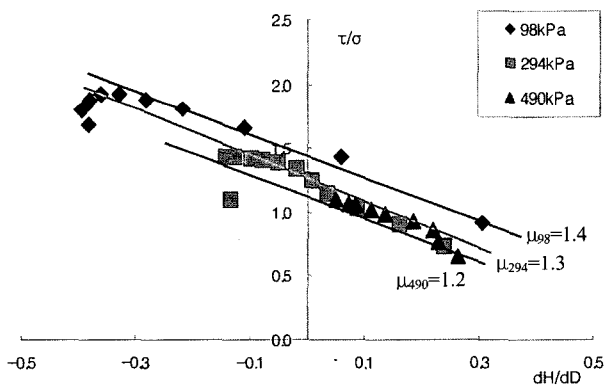
(b) 전단변형률-응력곡선(최대입경 50.8mm)



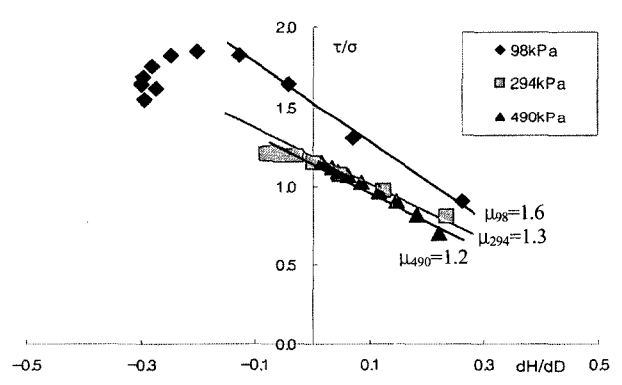
(c) 전단변형률-체적변형률(최대입경 76.3mm)



(d) 전단변형률-체적변형률(최대입경 50.8mm)



(e) 응력비(τ/σ)-dH/dD (최대입경 76.3mm)



(f) 응력비(τ/σ)-dH/dD(최대입경 50.8mm)

그림 10. 전단변형률과 응력비와 다일러턴시의 관계(충청지역)

에서 나타난 결과들과 유사한 경향을 보인다(日本土質工學會, 1985).

4.2 조립질 토목재료의 응력-다일러턴시

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

$$\delta W_t = \sigma dH + \tau dD \quad (1)$$

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.

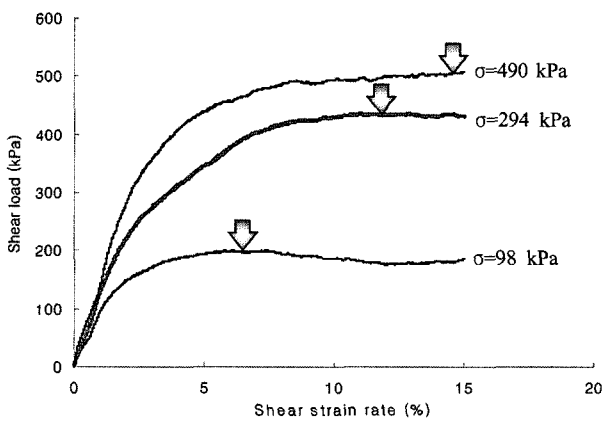
$$\delta W_i = \mu \sigma dH \quad (2)$$

$$\tau/\sigma + dH/dD = \mu \quad (3)$$

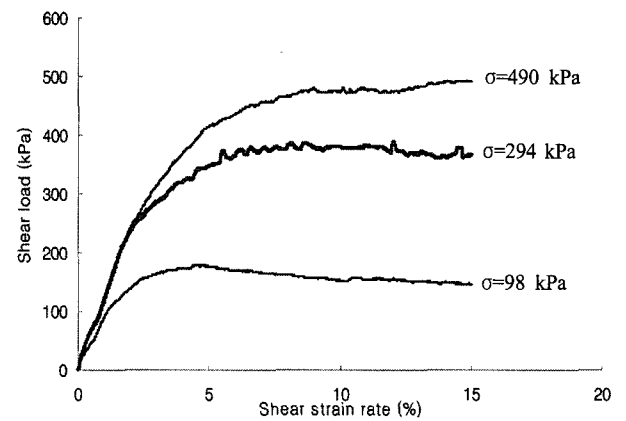
즉, 평면변형상태에서 마찰계수는 응력비(τ/σ)와 다

일러턴시(dH/dD)의 항으로 표현할 수 있으며, 일정한 수직응력에서 더 이상 체적의 변화가 없는 상태인 한계상태($dH/dD=0$)의 응력비(τ/σ)는 마찰계수(μ)와 같은 값을 갖는다고 제시하고 있다.

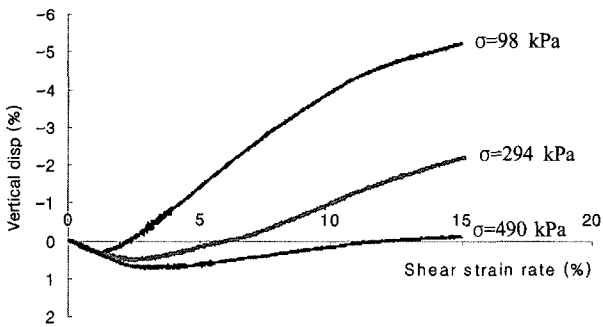
이를 근거로 최대입경의 크기에 따른 조립재료의 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)의 관계를 그림 10(a)~그림 10(f)에 도시하였다. 이때 전단변형에 따른 전단응력의 거동은 수직응력이 커짐에 따라 느슨한 모래와 같은 거동을 하고 있으며, 수직응력 98kPa을 제외하고는 피크강도가 나타나지 않고 있다. 또한 전단변형율-체적변형율 곡선은 조밀한 모래의 거동과 유사한 다일



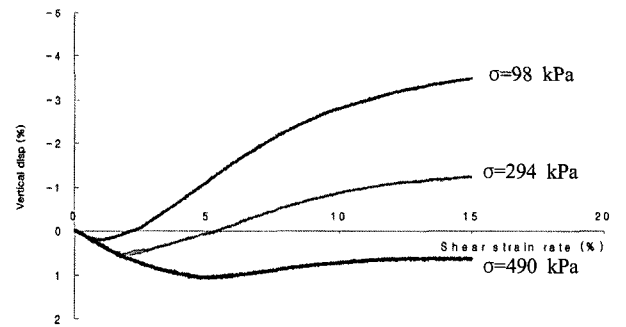
(a) 전단변형율-응력곡선(포화)



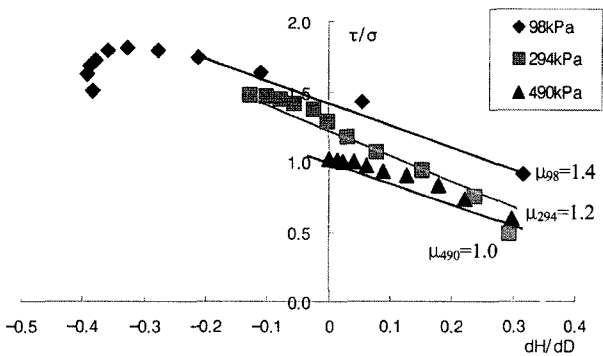
(b) 전단변형율-응력곡선(공기 건조)



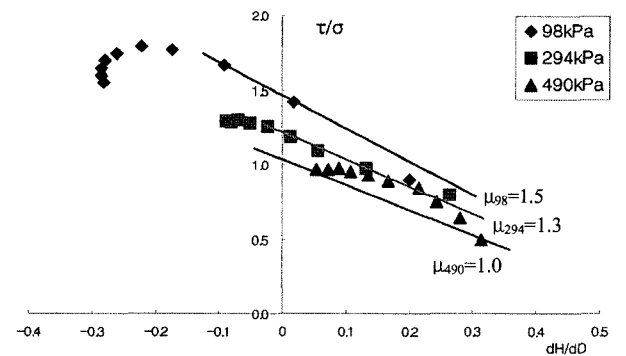
(c) 전단변형율-체적변형율(포화)



(d) 전단변형율-체적변형율(공기 건조)



(e) 응력비(τ/σ)- dH/dD (포화)



(f) 응력비(τ/σ)- dH/dD (공기 건조)

그림 11. 전단변형율과 응력비와 다일러턴시의 관계(경기지역)

러턴시현상을 나타내고 있으며, 다일러턴시는 수직응력이 클수록 작아지고, 피크강도 보다는 잔류강도시에 더 커지는 경향을 보이고 있다. 이때의 마찰계수의 크기는 시험조건별 수직응력의 크기에 따라 1.2~1.6의 범위로 나타났으며, 수직응력이 커질수록 마찰계수는 작아지는 것으로 나타났다. 즉, 최대입경의 크기에 따른 마찰계수의 크기는 최대입경이 크고 수직응력이 커질수록 마찰계수가 작아지는 것으로 나타났다. Taylor(1948)가 제안한 마찰계수 산출법은 침투강도까지의 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)를 도시하고 그 점들을 잇는 직선을 그어 다일러턴시가 0이 되는 응력비를 구하는 방식이다.

포화조건에 따른 조립재료의 응력비(τ/σ)와 다일러턴시(dH/dD)의 관계는 그림 11(a)~그림 11(f)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전단응력의 크기는 수직응력이 커짐에 따라 커지고 있으며 체적변형율은 작아지고 있다. 또한 수직응력이 커지면서 피크강도는 나타나지 않고 있다. 이때의 마찰계수의 크기는 시험조건별 수직응력의 크기에 따라 1.0~1.5의 범위로 나타났으며, 수직응력이 커질수록 마찰계수는 작아지는 것으로 나타났다. 한편 포화조건에 따른 마찰계수의 크기는 포화상태에서 다소 작아지고 있는데, 이는 수분이 유효유역활을 하여 포화상태에서 마찰계수의 크기가 작아지는 것으로 판단된다. 이는 김상규(1991)가 제시한 경향과 비슷한 결과이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 조립재료의 내부마찰각의 크기는 상대적으로 작은입경과 공기 건조상태일때가 큰 입경과 포화상태 일때 보다 더 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 재료의 파쇄율은 이와는 반비례하는 것으로 나타났다. 파쇄율의 크기는 포화(76.3mm)>공기 건조(76.3mm)>공기 건조(50.8mm)의 순으로 크게 나타났다.

더불어, 지역별 내부마찰각의 크기를 단순 비교하면, 일축압축강도의 크기가 상대적으로 크게 확인된 충청지역의 내부마찰각(42.7°~44.0°)의 크기가 경기지역의 값(38.1°~38.6°)보다 최대 6°정도 크게 산출되었으며, 이는 재료가 가지고 있는 모암의 기본적인 성질이 강도정수에도 직접적인 영향을 주기 때문이다.

5. 결론

최대 입경의 크기와 함수비의 변화가 조립재료의 전

단강도에 어느 정도 영향을 주는지를 확인하고, 각 수직응력별로 한계상태에서 조립재료가 갖고 있는 마찰계수를 산출하고자 대형직접전단시험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험에 사용한 재료의 모암에 대해 암석학적 특징을 분석한 결과, 경기지역은 비중 2.72, 흡수율 0.21%, 일축압축강도 59,976kPa의 섬록암으로 확인되었으며, 충청지역의 재료는 비중 2.61, 흡수율 0.22%, 일축압축강도 107,114kPa의 편암으로 확인되었다.
- (2) 최대입경의 크기에 따른 재료의 강도정수를 분석한 결과, 최대입경 50.8mm에서의 내부마찰각(44.0°)이 76.3mm에서의 값(42.7°)보다 약 3%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타나 상대적으로 작은 입경일 경우의 내부마찰각이 더 크게 나타났다.
- (3) 함수비조건에 따른 강도정수의 크기를 분석한 결과, 공기 건조상태에서의 내부마찰각(38.6°)이 포화상태의 값(38.1°)보다 약 1.3%정도 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.
- (4) 전단시 조립재료가 나타내는 파쇄율과 시험조건과의 관계를 분석한 결과, 최대입경의 크기가 크고 포화상태일때 재료의 파쇄율은 커지고 전단강도는 낮아지는 것으로 나타났다. 그 이유는 입경이 큰 재료는 전단시 인터록킹에 의한 전단저항이 발생하기 전에 입자의 파쇄가 먼저 발생하기 때문이며, 포화상태의 재료는 입자의 균열부분이나 약한 부분에 수분이 스며들어 전단시 유효유역활을 하여 강도가 약해지기 때문으로 판단된다.
- (5) 전단시 발생하는 체적팽창량은 수직응력이 커질수록 작아지고, 피크강도시보다 잔류강도시에 더 커지는 것으로 나타났다. 전단변형율-전단응력곡선은 느슨한 모래와 비슷한 거동을 보이고, 전단변형율-체적변형율 곡선은 조밀한 모래와 유사한 거동을 보였다.
- (6) 한계상태에서 재료가 가지고 있는 마찰계수를 각 수직응력별로 산출한 결과, 큰 수직응력에서 보다 작은 수직응력에서의 마찰계수가 더 큰 값을 갖는 것으로 확인되었다. 경기지역의 재료는 1.0~1.5로 나타났으며, 충청지역의 재료는 1.2~1.6으로 나타났다. 더불어, 최대입경의 크기와 포화조건이 마찰계수의 차이에 어느 정도 영향을 주고 있음을 확인하였다.

- (7) 지역별로 나타난 내부마찰각의 크기를 단순 비교분석한 결과, 일축압축강도의 크기가 상대적으로 크게 확인된 충청지역의 내부마찰각(42.7°~44.0°)의 크기가 경기지역의 값(38.1°~38.6°)보다 최대 6°정도 크게 산출되었는데, 이는 재료가 가지고 있는 모암의 기본적인 성질이 강도정수에도 직접적인 영향을 주기 때문이다.
- (8) 실험의 결과로 부터 입경의 크기와 함수비조건이 조립재료의 전단강도의 크기를 결정짓는 중요 인자로 작용하고 있음을 알 수 있었으며, 지역별 조립재료의 모암특성이 모두 다르기 때문에 조립재료를 이용하여 구조물을 설계할 경우에는 대형시험을 통한 강도정수를 산정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김상규 (1991), *토질역학 이론과 응용*, pp.172-173.
2. 김재영 (2004), “개량형 일면직접전단시험기의 제작과 정체적·정압조건에 대한 실험에 대하여”, *한국지반공학회지*, 제20권, 제5호, pp.58-65.
3. 신동훈, 오병훈 등 (1999), *댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화방안 연구*, 한국수자원공사, pp.5-20.
4. 이대수, 김경열, 홍성연, 김대홍 (2005), *구조물 단면절감을 위한 조립질 토목재료 변형특성 연구*, 한국전력공사 전력연구원, pp.66-67.
5. 이상덕, 유병모, 김양운, 서성호 (2001), “굵은 골재 함유율에 따른 직접전단거동 특성”, *대한토목학회 학술발표회지*, pp.1-4.
6. 홍성연, 김경열, 이대수 (2004), “조립재료의 변형 및 강도특성에 대하여 - 대형일면전단시험기 개발”, *대한 토목학회 추계 학술발표회지*, pp.2362-2365.
7. 日本土質工學會 (1985), *組立材料の變形強度*, pp.5-85.
8. Wood, M. (1998), *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, pp.229-234.
9. Matsuoka, Y. (松倉公憲, 1988), “大型一面せん断試験機の作製とその目的”, *波大學水理試験 センター報告*, No.12, pp.37-41.
10. Matsuoka, H. (1998), “Simplified Direct Box Shear Test on Granular Materials and Its Application to Rockfill Materials”, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.4, pp.275-284.
11. Matsuoka, H. (2001), “Development of a New In-Situ Direct Shear Test”, *American Society for Testing and Materials, Geotechnical Testing Journal*, pp.92-102.
12. Zingg Th (1935), “Beitrag Zur schotteranalyse”, *S. Min. Pentrol. Mitt*, 15, pp.5-25.

(접수일자 2005. 4. 18, 심사완료일 2005. 8. 16)