

다중회귀분석을 이용한 단층물질의 무게비와 전단강도의 상관성 분석

문성우¹ · 윤현석¹ · 김우석¹ · 나종화² · 김창용³ · 서용석^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과, ²충북대학교 정보통계학과, ³한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

Correlation Analysis between Weight Ratio and Shear Strength of Fault Materials using Multiple Regression Analysis

Seong-Woo Moon¹, Hyun-Soek Yun¹, Woo-Seok Kim¹, Jong-Hwa Na²,
Chang-Yong Kim³, and Yong-Seok Seo^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Department of Information Statistics, Chungbuk National University

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

Received 18 August 2014; received in revised form 2 September 2014; accepted 5 September 2014

터널 시공 중 나타나는 단층은 방향, 규모 및 강도를 예측하기 어려우면서 지반의 강도를 결정하는 중요한 요소이다. 그러나, 많은 시공 현장에서 단층대의 강도 및 암반분류를 경험적으로 적용하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 전국 9개의 지역의 단층에서 총 109개의 시료를 획득하여 직접전단시험과 입도분석을 수행하였다. 또한 6개의 다중회귀모델을 설정하고 97개의 데이터를 이용하여 회귀분석을 실시한 후 전단강도와 단층물질의 무게비의 상관성을 분석하였다. 분석된 6개의 모델을 대상으로 분석에 사용되지 않은 12개의 시험데이터를 이용하여 검증을 실시한 결과 모든 모델에서 결정계수 $R^2 \geq 0.6$ 을 보이며, Model 5에 비하여 상대적으로 수직응력을 세분화 하여 고려할 수 있는 Model 1과 3이 $R^2 \geq 0.69$ 으로 높게 나타났다. 향후 단층 물질의 전단강도 산정에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 단층 비지대, 단층 파쇄대, 무게비, 전단강도, 다중회귀분석

The appearance of faults during tunnel construction is often difficult to predict in terms of strike, dip, scale, and strength, even though this information is essential in determining the strength of the surrounding rock mass. However, the strength and rock mass classification of fault zones are generally determined empirically on the construction site. In this study, 109 specimens were collected from fault of nine area throughout Korea, and direct shear tests were conducted and the particle distribution was analyzed to better characterize the fault zones. Six multiple regression models were established, using 97 of the specimens, to analyze the correlation between the shear strengths and weight ratios of these fault materials. A verification of the six models, using the remaining 12 specimens, shows that in all of the models the coefficient of determination yielded $R^2 \geq 0.60$, with two models yielding $R^2 \geq 0.69$. These results provide useful information for determining the shear strength of fault materials in future studies.

Key words : fault gouge zone, cataclastic zone, weight ratio, shear strength, multiple regression analysis

*Corresponding author: ysseo@cnu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

최근 장대터널과 선형개량 시공이 많아짐에 따라 단층, 습곡, 용수대 등 굴착에 불리한 지질학적 요소가 공사구간에서 발견되고 있어 크고 작은 규모의 붕괴 및 변상 사례가 발생하고 있다. 단층대에서 발생하는 터널 변상은 지질조사의 불충분으로 인하여 불리한 지질조건이 설계에 반영되지 못하는 것이 주요 원인이며, 시공 중 지질 및 지반조사를 통한 굴진면 예측이 제대로 이루어지지 못하는 점도 원인 중 하나이다. 한편 시공 중 설계패턴 변경을 위하여 이루어지는 압판정 시 4 또는 5등급 지반에 속하는 경우 RMR 등 기존의 암반분류법에서 상세하게 세분되어 있지 않아 과보강으로 이어져 경제적인 시공을 저해하기도 한다. 지질학적 위해요소는 현장기술자에 의한 조사와 암반분류가 어려운 점도 터널의 안정성과 경제성을 저해하는 요인 중 하나이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 지질구조의 기하학적 특성과 강도특성 등이 밝혀져야 한다. 하지만 단층대 또는 단층암의 공학적 특성과 관련된 연구로는 단층대 구조와 투수성에 대한 연구(Caine et al., 1996; Evans et al., 1997; Rawling et al., 2001; Mizoguchi et al., 2008)가 활발히 이루어지고 있는 반면에 단층의 강도 특성에 대한 연구는 지진과 관련된 지구조적 규모에서의 해석(Iio, 1997; Gudmundsson, 2004; Hu et al., 2013)과 수치해석 또는 경험적 적용(Dalgic, 2003; Sausgruber and Brandner, 2003; Kun and Onargan, 2013)에 치우쳐 있다. 단층암의 역학적 특성을 획득하기 위해 실내에서 시험을 수행한 연구는 적은 편이다(Sulem et al., 2004; Kim et al., 2010).

단층대 중심부에는 주로 점토로 이루어진 비지대와 쇄편(또는 각력)이 포함된 미고결 물질이 분포한다(Fig. 1). 이러한 물질은 역의 원마도와 구형도가 낮고, 불균

질한 분포를 보이는 특징이 있지만 흙과 기본적인 거동이 유사한 점도 있다. 따라서 조립질 물질을 포함하는 흙을 대상으로 한 강도특성에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Varadarajan et al. (2003)은 0.075 mm~80 mm의 락필(rockfill) 물질을 10가지의 입도로 분류한 후 입도별 삼축압축 시험을 수행하였다. 락필 물질의 원재료에 따라 파쇄되기 쉬운 재료는 입자가 커질수록 삼축 압축 시험도중 입자의 파쇄율이 증가하기 때문에 전단 강도가 감소하였고, 같은 재료로 실험할 경우 시료 내 최대입자크기가 클수록 전단강도가 높아지는 결과를 얻었다. Lee et al. (2009)은 대형 직접전단시험기를 활용하여 석산에서 모암을 파쇄하여 만든 산림골재를 대상으로 최대입경, 수침조건, 밀도, 균등계수, 파쇄율 등의 변화에 따른 전단거동 특성을 연구한 결과 밀도가 크고 최대입경이 크기가 작으며 공극이 건조상태인 경우에 전단강도가 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있었으며, 일축압축 강도가 클수록 파쇄율이 작아지기 때문에 전단 강도가 높게 나타나는 결과를 얻었다. Teuten (2012)은 세립질 입자분포와 마찰각과의 상관성을 분석하기 위하여 링전단시험을 실시하였다. 시료를 모래, 세립질 입자, 점토로 구분하여 각각의 함량과 전단 속도에 따른 상관성을 검토하였다. 입도의 함량에 대한 연구결과는 점토의 함량이 높을수록 마찰각은 낮아지고, 모래의 함량이 많을수록 마찰각은 증가하는 경향을 확인함으로써 선행 연구와 유사한 결과를 얻었다. 또한 점토 시료에서는 전단속도가 빠를수록 마찰각이 증가하는 경향을 보이는 반면 세립질 입자의 시료에서는 전단속도가 느릴수록 마찰각이 증가하는 경향을 보였다.

단층대는 내부적으로 대상구조를 가지며, 가장 중심의 단층 비지대(gouge zone), 비지대를 둘러싸고 있는 파쇄대(cataclastic zone) 및 그 외각부의 두꺼운 손상대(damage zone)로 구성되어있다(Fig. 1a, Chester et al.,

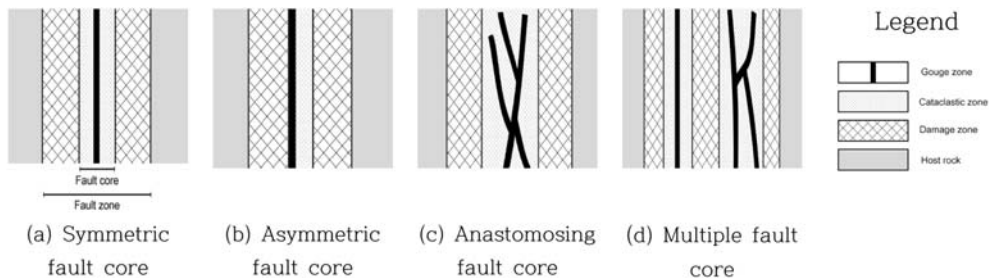


Fig. 1. Classification of the fault core, dependent on the positions of gouge zone and cataclastic zone within the fault zone (modified from Chester et al., 1993; Chang and Choo, 1998). The diagram is not to scale.

1993). 여기서 단층 비지대와 파쇄대를 묶어 단층핵(fault core)이라고 하며, 단층 비지대와 파쇄대의 위치 및 형태에 따라 대칭 단층핵, 비대칭 단층핵, 망상 단층핵, 다중 단층핵으로 4개의 유형으로 구분된다(Fig. 1; Chang and Choo, 1998). 한 번의 단층작용에 의해 단층이 생성된 경우는 Fig. 1(a)와 (b)처럼 단순한 모델로 산출되지만 단층작용이 두 번 이상 활동한 경우에는 주로 망상 단층핵과 다중 단층핵으로 산출된다(Fig. 1(c), (d)).

본 연구에서는 지하구조물 시공 시 위험요소로 분류되는 단층핵의 전단강도에 영향을 미치는 요소를 파악하기 위하여 전국 9개 지역의 단층에서 총 109개의 시료를 획득하여 전단시험과 입도분석을 수행하였다. 다중 회귀분석시 97개의 시험데이터를 이용하여 전단강도와 단층물질의 무게비의 상관성을 분석한 후 회귀분석에 사

용하지 않은 12개의 데이터로 적용성을 검토하였다.

시료채취 단층의 지질 및 야외 산상

본 논문에 이용된 단층암은 총 9개 지역에서 13종류의 시료로 구분된다. 각 단층에서는 단층비지, 파쇄암과 같은 단층암의 종류나 모암 등을 고려하여 불교란시료를 채취하였다. 채취된 시료의 위치, 종류, 모암 및 단층의 정보는 Table 1과 같다.

No.1의 시료는 충청북도 단양읍 내의 단양공설운동장 인근한 위치에서 채취한 시료로 도로확장공사를 위하여 절개한 사면노두에서 채취하였다. 이 지역은 중생대 쥐라기에 해당하는 퇴적층으로 수매의 탄층이 단층 또는 층리면을 따라서 협재 되어 있다. 시료를 채취한 부분은

Table 1. Summary of the fault rock samples.

Sample No.	Area	Sample type	Host rock	Information of fault
1	Danyang-eup, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do	Gouge zone	Coaly shale	Sedimentary boundary fault, slickenside 300/40, striation 26/228
2	Maegok-dong, Ulsan-si	Gouge zone & cataclastic zone	Shale & mudstone	Ulsan fault, Slickenside 154/66, striation 16/238
3	Jungsan-ri, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do	Gouge zone & cataclastic zone	Andesitic tuff	Yangsan fault, reverse, dextra,l slickenside 278/70, striation 20/190
4		Gouge zone & cataclastic zone	Shale	Yangsan fault, reverse, dextral, slickenside 280/84, 5 R-facture
5		Gouge zone & cataclastic zone	Andesite	
6	Yangseong-ri, Yeongdeok-gun, Gyeongsangbuk-do	Gouge zone & cataclastic zone	Andesitic tuff	Yangsan fault, slickenside 260/88, striation 12/350
7	Sowol-ri, Yeongdeok-gun, Gyeongsangbuk-do	Gouge zone	Sandy shale	Yangsan fault, reverse, sinistral, slickenside 140/60, striation 16/198
8		Gouge zone & cataclastic zone	Sandy shale	
9	Samnam-myeon, Ulsan-si	Gouge zone & cataclastic zone	Sand stone & shale	Yangsan fault, normal, slickenside 328/85
10	Maegok-dong, Ulsan-si	Gouge zone	Granite	Ulsan fault, reverse (thrust), dextral, slickenside 322/20, striation 12/086
11		Gouge zone	Granite	
12	Habuk-myeon, Yangsan-si, Gyeongsangbuk-do	Gouge zone & cataclastic zone	Andesite	Yangsan fault, slickenside 310/90
13	Ipsil-ri, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do	Gouge zone & cataclastic zone	Hornfelsic rock	Ipsil fault, reverse, dextral, slickenside 092/86, striation 48/328

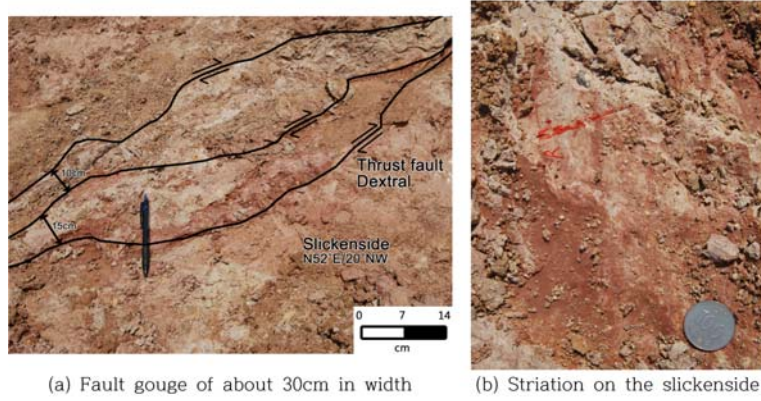


Fig. 2. Outcrop photographs of the area where samples 10-11 were collected.

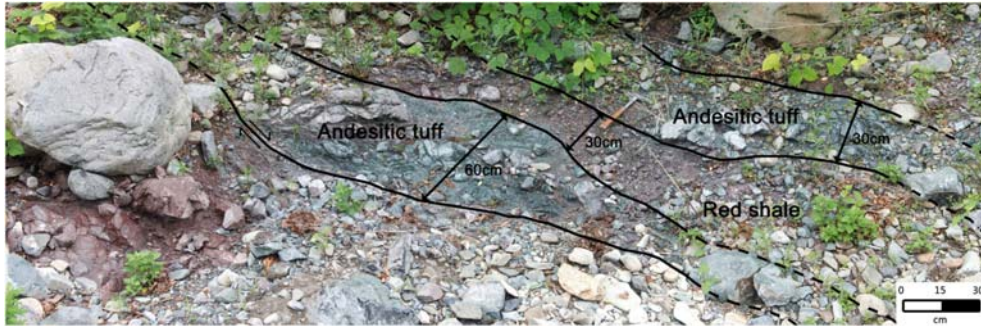


Fig. 3. Outcrop photograph of the fault zone in the area where samples 3-5 were collected.

단층 내에서 단층 점토의 상태로 단층이 협재 되어 있으며, 그 폭은 약 70 cm이다.

No.2, No.10, No.11 시료의 노두는 울산광역시 매곡동의 매곡일반산암단지 조성지 내에 위치하고 있으며, 울산단층의 영향을 받은 수반단층으로 판단된다. No.2 시료는 중생대 백악기 울산층에 해당하며 이암 및 셰일 기원의 단층물질이며, 단층 각력과 점토가 혼재되어 나타난다. No.10, No.11 시료의 경우 중생대 백악기 화강암 기원의 단층물질로 폭이 약 30 cm로 야외에서 신선한 상태로 노출되어 있다(Fig. 2a). 본 단층은 역성분(reverse) 및 우수향의 이동감각을 가지는 저각의 충상단층으로 발달하고 있다. 단층면은 $N52^{\circ} E/20^{\circ} NW$ 배향을 가지며, 면상에 발달하는 단층조선의 방향성은 $12/086$ 으로 관찰된다(Fig. 2b).

No.3~No.8 시료는 양산단층의 북쪽지역에 해당하며, 행정구역상 경상북도 포항시 및 영덕군에 걸쳐 분포하고 있다. No.3~No.5의 시료는 포항시 북구 송라면에 위치한 보경사 군립공원에서 채취하였다. 북서에서 남동방

향으로 동해로 흘러들어 가는 하천상에서 노출되어 있는 노두로써 중생대 백악기의 안산암 및 안산암질 응회암과 적색셰일의 경계지역이다. 이 지역은 양산단층이 지나가는 곳으로서 단층코어의 폭이 약 1m로 분포한다. 안산암 및 안산암질 응회암이 모암인 단층 파쇄대는 녹색 빛을 띠며 적색셰일이 모암인 단층 파쇄대를 포획한 것처럼 관찰된다. 단층은 우수향 감각의 역단층이며, 단층면은 $N10^{\circ} E/84^{\circ} NW$ 의 방향성을 가진다(Fig. 3).

No.6의 시료는 영덕군 남정면에 양성리의 도로가에 위치한 노두에서 채취하였으며, 중생대 백악기의 화산암류에 해당한다. 노두상 관찰되는 단층은 역단층으로 $N10^{\circ} W/88^{\circ} SW$ 의 방향성을 보여준다. 시료는 단층점토와 단층 각력이 혼재하는 형태로 산출되고 있다. No.7과 No.8 시료는 영덕군 강구면에서 7번국도 확장공사를 위한 사면 절개지에서 채취하였다. 이 노두는 중생대 지층에 해당하며, 자색의 셰일, 사암 등이 분포하고 있다. 단층은 $N50^{\circ} E/60^{\circ} SE$ 의 배향을 보이며, 역성분의 좌수향의 이동감각을 보인다. No.7 시료는 단층코어

부분의 단층점토가 우세한 부분에서 채취하였으며, No.8 시료는 단층각력을 비교적 많이 포함하는 부분에서 채취하였다.

No.9 시료는 울산시 삼남면에 위치한 양산단층 내에 발달하고 있는 하천 노두 상에서 채취하였다. 중생대 백악기의 퇴적층으로 사암과 셰일이 교호하고 있다. 셰일 층은 박리성을 보이고 있으며, 노두 상에 관찰되는 단층의 폭은 약 1 m이며, 층리면(N30° E/88° NW)과 평행하게 발달하고 있다.

No.12 시료는 경상남도 양산시 하북면에 위치한 내원사 진입도로 상에 위치한 사면에서 채취하였다. 양산단층 내에 위치하고 있으며, 관찰되는 암종은 중생대 백악기의 안산반암으로 단층면은 수직으로 N40° E의 주향을 가지며, 이와 평행하게 절리가 발달하고 있다.

No.13 시료는 경상북도 경주시 외동읍에 위치한 입실단층의 노두에서 채취하였다. 단층점토 및 단층각력대가 잘 발달하고 있으며, 중생대 백악기의 퇴적암이 열변성을 받아 혼펠스화 되어 있다. 단층면은 N02° E/86° SE의 방향성을 가지며, 우수향 이동성 역단층의 감각을 가지고 있다.

실내시험

본 논문에서는 단층 비지대와 파쇄대에서 채취한 불교란 시료를 이용하여 직접전단시험 및 입도분석을 실시하였다. 단층암은 점토의 비율이 높고, 원마도와 구형도가 매우 불량한 각력을 포함하고 있는 점 등 일반적인 흙과는 다른 특징을 가지고 있다. 따라서 기본적으로 흙의 표준시험법을 따르며, 단층대 시료 특성이 반영된 시험결과를 얻기 위하여 전단시험후 시료로 입도분포 분석을 진행하였다.

직접전단시험

단층물질의 직접전단시험은 ASTM D 3080-98 및 KS F 2343 시험법에서 제시하는 배수조건하의 흙 전단 시험법을 준용하였다. 전단시험기는 제일정밀 모델 JI-620이며 수평력은 2.5 kN이다. 전단시험상자는 Table 2와 같이 직경 60 mm와 80 mm 두 종류를 함께 이용하였다. 시험시의 수직하중은 무게 1,414 g의 추를 이용하여 3단계로 동일하게 증가시키며 시험을 실시하였다.

Figure 4는 직접전단시험의 시료준비 과정을 나타낸 것이다. 시료는 6~8시간 충분히 포화시켰으며, 전단속도

Table 2. Size of the shear boxes and normal stress conditions for the direct shear tests.

Shear box	Diameter (mm)	Height (mm)	Normal stress (kPa)		
			53	107	161
Type 1	60	20	53	107	161
Type 2	80	30	30	60	91

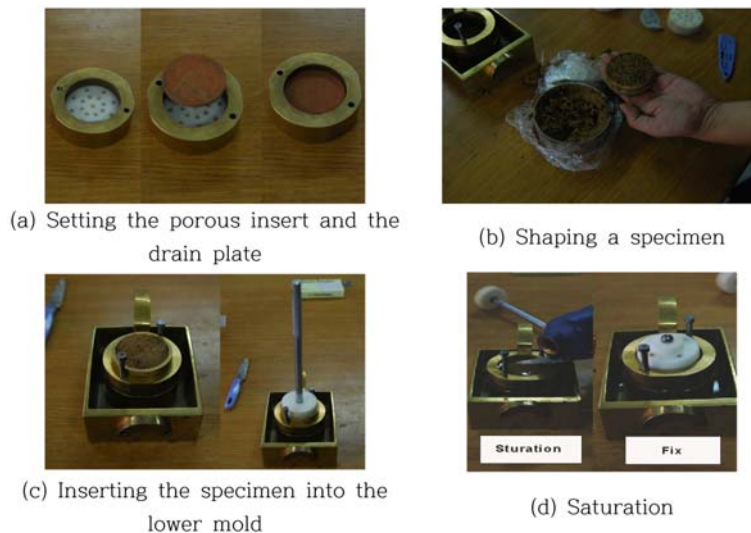


Fig. 4. Procedure of sample preparation for the direct shear test of fault materials under the drained condition.

는 ASTM에서 제시한 속도범위인 시료 직경의 0.5~2%/min에 맞춰 1 mm/min으로 시험을 진행하였다. 모든 시료에서 수직응력 당 최소 1회 이상 시험을 실시하였다.

입도분석

직접전단시험이 종료된 후 전단상자 별로 시료를 채취하여 건조한 후 입도분석을 실시하였다. 단층물질의 경우 일반적으로 점토광물을 많이 포함하고 있어 광물의 변질을 방지하기 위하여 일반적으로 60°C 이하에서

건조한다. 따라서 본 분석에서는 건조기 내부 온도센서와 시료위치에 따른 온도차를 감안하여 설정온도 40°C에서 건조시켰다.

입도분석을 위한 시험방법(KS F 2302)은 흙의 종류에 따라 체분석과 비중계분석으로 나뉘는데, 조립토의 경우 일반적인 체분석시험을 실시하는 반면 세립토의 경우 비중계분석을 실시하여 입도분포를 구한다. 본 논문에서 다루는 단층물질은 조립 및 세립이 혼합되어 있지만, 분류목적에 맞게 체분석 방법(KS F 2309-95,



Fig. 5. Sieving procedures to weigh each size fraction after the direct shear test.

ASTM D422-63)을 이용하였다. Riedmiiller et al. (2001)는 과쇄암의 입도분류에서 자갈-모래(coarse-grain)와 실트-점토(fine-grain)를 0.063 mm 기준으로 구분한 바 있다. 본 연구에서는 공학적 활용성을 고려하여 USCS (ASTM 2487-06) 및 JIS (Japanese Industrial Standards) 등의 규격인 자갈(4.75 mm 이상), 모래(4.75~0.075 mm), 실트와 점토(0.075 mm 이하)로 구분하여 체분석을 실시하였다.

일반적인 흙과는 다르게 단층 물질에는 높은 함유량의 점토성분이 분리되지 않고 덩어리로 남기 때문에 건조 상태로는 실험이 어렵다. 따라서 기존의 체분석 방법에서 점토를 걸러내기 위하여 흙의 씻기 시험방법(KS F 2309)을 함께 적용하였다. 체분석 과정을 설명하면 먼저 체분석 실시 전에 시료의 전체 건조무게를 측정하고, 시료를 포화시킨 후 체 위에서 물이 깨끗해 질 때 까지 흙의 씻기 과정을 거친다. 이 과정에서 #10(4.75 mm 이상), #200체(0.075~4.75 mm)에서 걸러진 입자들을 별도로 모아서 다시 건조시킨 뒤 전체 시료의 건조무게에서 빼주면 물에 의해 #200체를 통과한 입자(0.075 mm 이하)들의 무게를 얻을 수 있다(Fig. 5). 이렇게 얻어진 입도별 무게를 전체 흙의 무게로 나누어 자갈, 모래 및 실트/점토 각각에 대한 무게비를 산정하였다.

이 방식의 단점은 자갈과 모래사이의 입자는 체분석이 끝난 후에도 다시 회수가 가능하지만 물에 쓸려간 점토사이의 입자는 회수가 불가능하다는 것이다. 그러나 비중계 분석방법이나 63 μm 망에 시료를 넣고 물에 담그어 세립질 입자를 분리해내는 습식체질법(Oh et al., 2010)은 자갈 및 모래 입자를 걸러내기에는 불리하며 시간도 많이 걸린다. 본 논문에서는 실트와 점토를 하나의 카테고리로 분석하기 때문에 흙의 씻기 방법을 혼용한 개량형 체분석 방법을 적용하였다.

입도별 무게비와 전단강도의 상관성 분석

단층암의 강도특성은 각력, 기질 등 구성물질의 함유율, 모암의 종류, 점토의 팽창성 등 다양한 변수에 의해 결정된다. 또한 동일한 단층대에서 채취한 시료라 하더라도 동일한 구성물질비를 가지는 시료는 존재하지 않으므로 암석이나 흙과 달리 강도의 분산이 심하게 나타난다. 본 연구에서는 단층암의 강도특성을 밝히는 초기 단계 연구로서 단층의 구성물질비에 주목하여 97개의 전단시험과 입도분석 결과를 이용하여 구성물질의 무게비와 전단강도의 상관성을 분석한 후 나머지 12개의 결

과를 이용하여 적용성을 검토하였다.

다변량 산점도

앞 절에서 도출된 수직응력(N)당 전단강도와 자갈(G), 모래(S), 그리고 실트/점토(C) 시료의 무게비를 다변량 산점도로 도시하였다(Fig. 6). 수직응력에 따른 전단강도의 관계를 살펴보면 수직응력이 높아질수록 전단강도의 분포가 넓게 나타난다. 이는 수직응력이 높아질수록 구성물질의 불균질성에 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 입자 크기와 전단강도의 산점도에서는 자갈의 무게비가 커질수록 대체로 전단강도도 높아지지만, 모래의 경우 경향성이 뚜렷하지 못하며, 실트/점토의 경우는 약하게 반비례하는 경향성을 보인다. 구성물질별 무게비를 비교해 보면 자갈과 실트/점토, 모래와 실트/점토는 반비례하는 양상을 나타내지만 자갈과 모래의 경우는 뚜렷하게 경향성이 나타나지 않는다. 상기의 결과는 구성물질의 종류와 함량이 불균질한 단층암의 특징을 반영한 시험결과로 판단된다.

다중회귀 분석

앞 절의 산점도 분석은 변수 간 1:1 상관성을 분석한 것으로 복수의 변수가 동시에 영향을 미치는 경우 상관성을 찾기가 어렵다. 따라서 단층물질의 전단강도에 영향을 미치는 변수들(자갈, 모래, 실트/점토, 수직응력)을 동시에 고려할 수 있는 다중회귀분석을 실시하였다.

다중회귀분석은 일반적인 단순회귀모형과 비슷하나 독립변수가 2개 이상일 때, 각 독립변수들의 변화가 종속변수에 미치는 영향을 모델화 할 수 있다. 본 연구에서는 수직응력을 취급하는 방식에 따라 크게 3가지 유형으로 구분하여 분석을 수행하였다.

1. 수직응력을 하나의 변수로 구분한 경우(모델 1, 2)
다중회귀분석모형의 일반적인 형태는 식 (1)과 같다.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (1)$$

여기서, y 는 반응계수, x_1, x_2, \dots, x_k 는 독립변수, b_0 는 독립변수가 변하지 않더라도 일반적으로 반응계수가 갖는 값(절편), b_1, b_2, \dots, b_k 는 각 독립변수들이 반응계수에 미치는 영향으로서, 본 연구에서 \hat{y} 는 전단강도, x_1 은 자갈의 무게비, x_2 는 모래의 무게비, x_3 는 실트/점토의 무게비, x_4 는 수직응력을 독립변수로 설정하였다.

모델 1은 독립변수가 자갈만인 경우이고 모델 2는 독립변수가 모래 및 실트/점토로 구성되어 있다. 이는 자

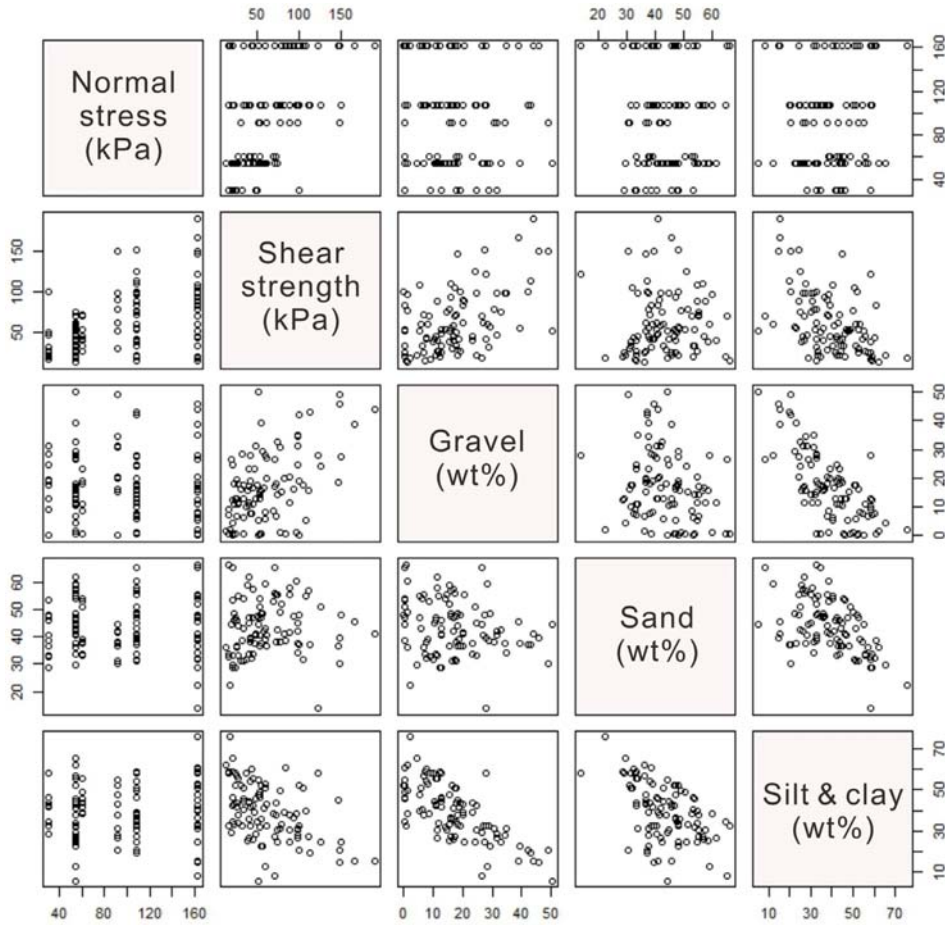


Fig. 6. Scatter plot matrix showing the relationships among normal stress, shear strength, gravel, sand and silt/clay.

갈, 모래 및 실트/점토의 합이 100%가 되는 상호 영향을 주는 독립변수들로서 3개의 변수 중에 2개를 같이 설명하게 되면 나머지 한 변수 또한 설명된다고 볼 수 있다.

따라서 세 변수와 수직응력 변수를 독립변수로 하는 모든 가능한 다중회귀를 적용한 결과 모래와 실트/점토를 같이 묶은 모델 2와 자갈만을 고려한 모델 1이 유의한 것으로 나타났다(Table 3).

2. 수직응력을 가변수로 구분한 경우(모델 3, 4)

다중회귀분석 시 진단시험시 적용한 6개의 수직응력을 범주로 설정하여 분석을 실시하였다.

수직응력은 각각 $I_{(x_3=30,53,60,91,107,161)}$ 로써 수직응력이 30 kPa인 경우에 나머지 수직응력에 대한 $I_{(x_3=53,60,91,107,161)}$ 는 0으로 고정된다. 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + (C_1I_{(x_3=53)} + C_2I_{(x_3=60)} + \dots + C_5I_{(x_3=161)}) \tag{2}$$

수직응력을 가변수로 취하였을 때 $\sigma_n=30$ 인 경우가 회귀식의 기본적인 기준이 되며, $\sigma_n=53, 60$ 은 범주로서 분석은 되나 각 요소의 p-value (Pr)가 0.05 이상으로 통계적으로 신뢰하기 어려운 수치로 나타난다. 그러나 수직응력이 증가할수록 요소(factor)들의 계수(Estimate)가 선형적으로 증가하는 관계로 나타나므로 Model 1, 2 처럼 수직응력을 하나의 변수가 아닌 가변수로 취급하여도 통계적으로 문제가 없다고 판단된다.

3. 수직응력을 가변수로 구분하여 4개의 범주로 묶은 경우(모델 5, 6)

식 (3)은 식 (2)에서 범주로 지정된 가변수들을 그룹화 시켜 회귀식을 단순화한 것이다.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + (C_1I_{(x_3=30)} + C_2I_{(x_3=50\sim60)} + C_3I_{(x_3=91\sim107)} + C_4I_{(x_3=161)}) \quad (3)$$

모델 3과 4는 수직응력 6가지 조건을 가변수로 취급하여 각각의 상관계수를 나타낼 수 있도록 분석하였지만, $\sigma_n=53, 60$ 의 경우 유의미한 통계수치가 나오지 않

Table 3. Results of the multiple regression analysis, showing the regression coefficients of the independent variables for each model.

Model No.		Estimate	Pr (> t)	Adjusted R-squared	p-value
Model 1 (G+N)	Intercept	-3.3365	0.66	0.4794	1.767×10^{-14}
	Gravel	1.6179	3.24×10^{-10} ***		
	Normal stress	0.4022	4.90×10^{-9} ***		
Model 2 (S+C+N)	Intercept	140.56615	2.90×10^{-19} ***	0.4985	1.48×10^{-14}
	Sand	-1.11068	0.00101 **		
	Silt/clay	-1.73127	4.40×10^{-11} ***		
Model 3 (G+6factor)	Normal stress	0.40416	2.51×10^{-9} ***	0.4672	7.714×10^{-12}
	Intercept	7.8147	0.424992		
	Gravel	1.6043	1.45×10^{-19} ***		
	Factor ($\sigma_n=53$)	6.8078	0.515753		
	Factor ($\sigma_n=60$)	18.5688	0.165140		
	Factor ($\sigma_n=91$)	31.9430	0.015241 *		
Model 4 (S+C+6factor)	Factor ($\sigma_n=107$)	35.9551	0.000997 ***	0.4919	2.636×10^{-12}
	Factor ($\sigma_n=161$)	51.2316	5.88×10^{-6} ***		
	Intercept	149.1268	2.79×10^{-9} ***		
	Sand	-1.0162	0.00398 **		
	Silt/clay	-1.7181	1.56×10^{-10} ***		
	Factor ($\sigma_n=53$)	3.0712	0.76658		
	Factor ($\sigma_n=60$)	17.7965	0.17319		
Model 5 (G+4factor)	Factor ($\sigma_n=91$)	33.2388	0.00996 **	0.4718	5.914×10^{-13}
	Factor ($\sigma_n=107$)	32.2197	0.00271 **		
	Factor ($\sigma_n=161$)	49.8639	6.53×10^{-6} ***		
	Intercept	59.6279	4.42×10^{-13} ***		
Model 6 (S+C+4factor)	Gravel	1.5693	1.31×10^{-9} ***	0.4934	2.978×10^{-13}
	Factor ($\sigma_n=30$)	-51.2006	5.32×10^{-6} ***		
	Factor ($\sigma_n=53\sim60$)	-41.5902	4.33×10^{-7} ***		
	Factor ($\sigma_n=91\sim107$)	-16.3388	0.0366 *		
	Intercept	198.5537	9.33×10^{-15} ***		
	Sand	-1.0355	0.0024 **		
Silt/clay	-1.6871	1.58×10^{-10} ***			
Factor ($\sigma_n=30$)	-49.9417	6.00×10^{-6} ***			
Factor ($\sigma_n=53\sim60$)	-43.1161	1.25×10^{-7} ***			
Factor ($\sigma_n=91\sim107$)	-17.2462	0.0247 *			

※ Pr (> |t|) : 0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 << 1 (signif. : < 0.05.)

※ signif. : p-value < 0.005

※ G : gravel, S : sand, C : silt/clay, N : normal stress, 6factor : N = 30, 53, 60, 91, 107, 161, 4factor : N = 30, 53~60, 91~107, 161

Table 4. Multiple regression equations for each model.

Model no.	Multiple regression equation
1	$\hat{y} = -3.3365 + 1.6179x_1 + 0.4022x_4$
2	$\hat{y} = 140.56615 - 1.11068x_2 - 1.73127x_3 + 0.40416x_4$
3	$\hat{y} = 7.8147 + 1.6043x_1 + (31.9430I_{(x_4=91)} + 35.9551I_{(x_4=107)} + 51.2316I_{(x_4=161)})$
4	$\hat{y} = 149.1268 - 1.0162x_2 - 1.718x_3 + (33.2388I_{(x_4=91)} + 32.2197I_{(x_4=107)} + 49.8639I_{(x_4=161)})$
5	$\hat{y} = 59.6279 + 1.5693x_2 + (-51.2006I_{(x_4=30)} - 41.5902I_{(x_4=53-60)} - 16.3388I_{(x_4=91-107)})$
6	$\hat{y} = 198.5537 - 1.0355x_2 - 1.6871x_3 + (-49.9417I_{(x_4=30)} - 43.1161I_{(x_4=53-60)} - 17.2462I_{(x_4=91-107)})$

\hat{y} : Shear strength, x_1 : Gravel, x_2 : Sand, x_3 : Silt and clay, x_4 : Normal stress

상관계수의 신뢰성이 매우 낮다. 이러한 현상은 가변 수 데이터의 편차 폭이 크거나 데이터의 개수가 너무 적기 때문에 발생하는 문제이다. 본 연구에서 다중회귀 분석에 사용된 $\sigma_n=60$ 의 데이터 개수는 8개로 다른 수직 응력 조건의 데이터를 중 가장 적다. 또한 $\sigma_n=53$ 의 경우는 데이터 개수가 25개로 많은 수를 차지하고 있지만, 진단강도가 최저 11.95 kPa, 최고 74.11 kPa, 평균 42.06 kPa으로 분포 범위가 넓게 나타나며 평균에서 최고와 최저의 편차 또한 크다. 반면 $\sigma_n=60$ 은 최저 25.87 kPa, 최고 71.77 kPa, 평균 47.26 kPa로서 평균에서 최고와 최저의 편차가 $\sigma_n=53$ 에 비해 상대적으로 작기 때문에 $\sigma_n=53$ 과 $\sigma_n=60$ 을 그룹화하여 데이터의 개수와 편차폭에 대한 문제를 완화시키도록 모델 5와 6을 작성하였다.

Model 1~6의 다중회귀분석 결과를 나타내면 Table 3과 같으며, 각 모델별 다중회귀식을 정리하면 Table 4와 같다.

상기 다중회귀분석의 기본 가정인 데이터의 정규분포 검정을 위한 Q-Q plot 그래프와 잔차의 분포를 그래프로 도시하여 오차에 대한 정규성(normality) 가정을 확인하는 density plot 그래프는 유의한 결과를 보이지만 생략하였다.

수직응력이 동일하게 취급된 유형별로 비교해보면 모래와 실트/점토를 고려한 모델(2번, 4번, 6번)이 자갈을 고려한 모델(1번, 3번, 5번)보다 R^2 값이 높게 나타난다. 그 이유는 자갈, 모래, 실트/점토의 합이 100%로서 상호 영향을 미치는 변수들이기 때문에 이러한 세 가지 변수들 중에 한 가지만 고려한 모델보다 두가지를 고려한 모델의 정확도가 높은 것이다. 예를 들어 모래와 실트/점토의 무게비를 알고 있는 경우 자갈의 무게비는 고

정 되지만, 자갈의 무게비만 알고 있는 경우는 모래와 실트/점토의 개별 무게비를 알 수 없기 때문에 모델의 정확도가 떨어진다.

회귀분석 모델의 적용성

6개의 회귀분석 모델의 적용성을 살펴보기 위하여 회귀분석에 사용한 97개의 데이터와는 다른 단층에서 채취한 12개 데이터의 실내시험 결과를 회귀모델에 적용하였다. 이들의 진단강도 시험치와 모델별 계산치를 나타내면 Table 5와 같다.

회귀식의 적합성을 검토하기 위해서 추정값과 추정값을 각각 x 축, y 축에 도시하여 $y=x$ 직선과의 결정계수 (R^2)를 도출하였다. 회귀식은 추정값과 측정값이 유사할수록 $y=x$ 직선에 가깝게 점시되며 적합성이 우수하다고 할 수 있다. 결정계수를 계산하기 위해서 식 (4)와 식 (5)를 이용하였다.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2,$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5)$$

여기서, SSR 은 회귀변동, SSE 는 오차변동, SST 는 전변동이라고 하며, 회귀직선과의 적합성을 통계량으로 측정하기 위하여 차의 제곱합을 정의한 것이다. \hat{y} 는 추정값, \bar{y} 는 평균값, y_i 는 측정값이다. 결정계수는 식 (5)와

Table 5. Measured and calculated shear strengths of each specimen.

Specimen No.	Measured shear strength (kPa)	Calculated shear strength (kPa)					
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
1	60.891	90.866	83.227	79.710	72.859	88.364	72.726
2	31.721	39.579	47.661	26.165	37.562	35.988	43.709
3	177.015	97.790	100.706	101.016	102.380	99.286	102.075
4	79.869	73.155	73.146	70.349	71.066	70.684	53.987
5	144.021	85.823	86.089	89.150	87.623	87.679	87.694
6	165.118	111.239	103.806	108.112	100.094	107.624	83.103
7	50.105	43.476	48.250	42.132	49.710	41.996	99.020
8	49.460	51.190	56.232	37.678	45.533	47.250	51.770
9	22.518	56.899	68.420	63.180	79.649	66.200	52.215
10	31.721	27.374	35.397	26.165	37.562	26.377	86.825
11	44.687	43.609	46.029	30.161	35.118	39.896	41.670
12	30.069	55.119	58.499	61.415	68.693	64.474	41.942

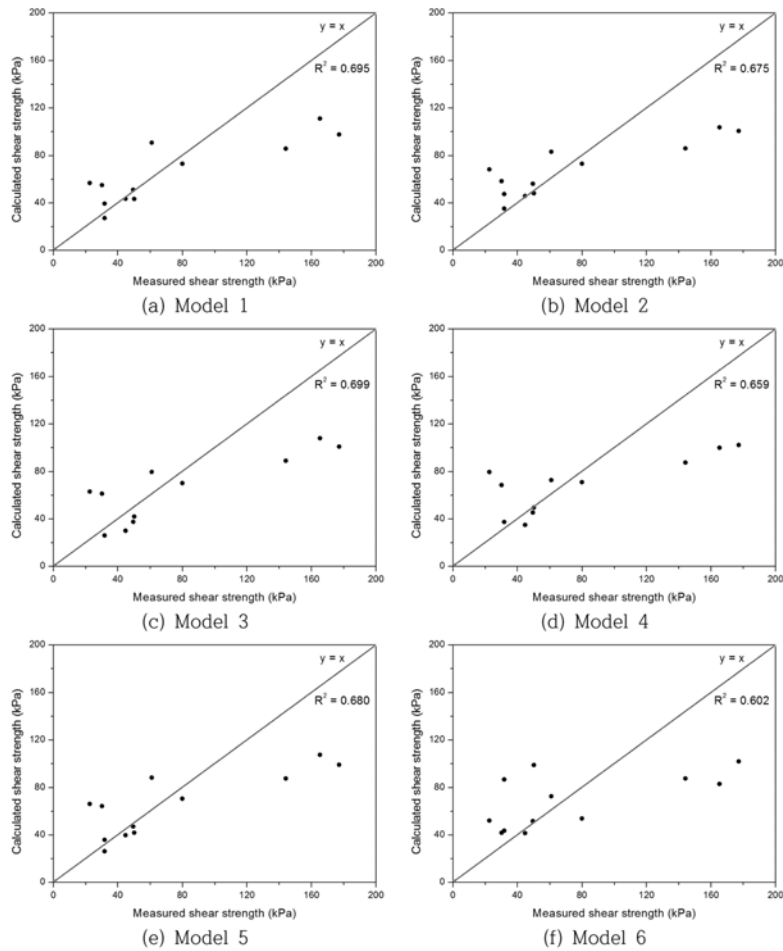


Fig. 7. Correlation between the measured and calculated shear strengths with the coefficient of determination.

같이 각 변동들과 상호관계에 있으므로 식 (4)에서 구한 SSR/SST를 이용하여 계산한다. 각 모델의 측정값과 추정값의 산포도와 결정계수 R^2 를 도시하면 Fig. 7과 같다.

Figure 7에 의하면 Model 3이 실제 시험으로 측정된 전단강도와 회귀식으로 구한 전단강도의 상관성이 $R^2=0.699$ 로 가장 높게 나타나며, 대부분의 모델이 0.6~0.7 사이에 분포한다. Model 5와 6이 다른 모델들에 비해 상대적으로 결정계수가 낮은 이유는 수직응력 값을 세분화한 타 모델에 비하여 넓은 범주로 취급함으로써 범주의 평균값으로 추정값을 계산했기 때문으로 보인다. 또한 측정값이 80 kPa 이하에서는 $y=x$ 그래프에 가깝게 분포하면서 높은 상관성을 보여주지만, 140 kPa 이상에서는 분산이 심하게 나타난다. 이는 단순히 적용성 검토에 활용한 데이터의 수가 적기 때문에 나타난 결과일 수도 있지만, 높은 수직응력하에서는 단층암의 쉘편의 영향도가 증가하기 때문에 편차가 반영된 것이 원인일 수도 있다. 본 연구에서는 단층암의 전단강도를 입도별 무게비만을 변수로 사용하여 분석하였지만 단층 쉘편의 원마도, 시료 내 분포도, 팽창성 점토광물의 함량 등이 전단강도에 영향을 미칠 것으로 예상되므로 향후 데이터수를 증가시켜 추가적인 분석이 필요하다.

결 론

본 연구에서는 단층핵에서 채취한 불교란시료를 이용하여 입도분석과 직접전단시험을 실시하고, 그 결과를 이용하여 다중회귀분석을 실시하여 단층암에 포함되어 있는 쉘편과 기질의 크기별 무게비가 전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. 다중회귀분석 시 전단강도에 영향을 미치는 변수로는 자갈, 모래, 실트/점토, 수직응력을 선정하였고, 이러한 변수들을 반영할 수 있는 다중회귀분석모델을 6개 작성하여 모델별 적합도를 분석하였다. 모델별 적합도에서는 수직응력을 개별적으로 고려하고 모래와 점토/실트의 무게비를 고려한 Model 2와 4가 높게 나왔다.

다중회귀모델의 적용성을 검토하기 위하여 회귀분석 시 사용하지 않은 별도의 시험자료 12개를 이용하여 이들의 측정값과 모델별 계산값과의 상관성을 분석한 결과 모든 모델에서 결정계수 $R^2=0.6$ 이상을 보이며, Model 1과 3이 $R^2=0.69$ 이상으로 높게 나타났다. 이 결과는 모델별 적합도와 상이한 결과이지만, 적용성 검증용 데이터 수가 한정적이고, 각 모델별 적합도에서도 큰 차이가 없기 때문에 분석결과의 신뢰도를 떨어뜨리

지는 않는 것으로 판단한다.

적용성 분석결과에 의하면 측정값과 계산값은 80 kPa 이하의 낮은 수직응력하에서는 $y=x$ 직선에 비교적 근접하여 분포하고 있으며, 140 kPa 이상에서는 상당히 벗어나는 형태를 보인다. 이는 높은 수직응력하에서 전단강도에 미치는 쉘편들의 영향도가 높아진 결과로 추정되나, 단층물질의 불균질성을 고려할 때 향후 더 많은 측정값을 이용한 검증이 요구된다.

본 연구결과는 앞으로 전단강도의 영향요소를 추가로 고려하고 시료수를 늘려서 모델의 적합성을 높이는 연구가 진행되면 지반구조물 설계 시 경험 또는 수치해석에 의존했던 단층대의 역학성을 결정하는 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업 13건설연구S03 “터널시공 중 디지털 맵핑을 통한 온라인 암관정 기술 및 운영모델 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- ASTM D422-63, 2007, Standard test method for particle-size analysis of soils, Annual Book of ASTM standard, 04.08.
- ASTM D2487-06, 2006, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System, USCS), Annual Book of ASTM standard, 04.08.
- ASTM D3080-98, 1998, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, Annual Book of ASTM standard, 04.08.
- Caine, J. S., Evans, J. P., and Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure, The Geological Society of America, 24(11), 1025-1028.
- Chang, T. W. and Choo, C. O., 1998, Formation processes of fault gouges and their K-Ar ages along the Dongnae Fault, The Journal of Engineering Geology, 8(2), 175-188 (in Korean with English abstract).
- Chester, F. H., Evans, J. P., and Biegel, R. L., 1993, Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault, J. Geophys. Res., 98(B1), 771-789.
- Dalgic, S., 2003, Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey, Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 453-465.
- Evans, J. P., Forster, C. B., and Goddard, J. V., 1997, Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones, Journal of Structural Geology, 19(11), 1393-1404.
- Gudmundsson, A., 2004, Effects of Young's modulus on

- fault displacement, C.R. Geoscience, 336, 85-92.
- Hu, C., Cai, Y., Liu, M., and Wang, Z., 2013, Aftershocks due to property variations in the fault zone : A mechanical model, Tectonophysics, 588, 179-188.
- Iio, Y., 1997, Frictional coefficient on faults in a seismogenic region inferred from earthquake mechanism solutions, Journal of Geophysical Research, 12(B3), 5403-5412.
- Kim, B. C., Jung, H. G., and Seo, Y. S., 2010, Effect of fault distribution on ground settlements, Korea Society of Engineering Geology Conference, 8-9, April 2010, Gyeongju Korea (in Korean).
- KS F 2302, 2002, Test method for particle size distribution of soils (in Korean).
- KS F 2309, 2009, Standard test method for amount of material in passing standard sieve 0.075mm in soils (in Korean).
- KS F 2343, 2007, Tsetting method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions (in Korean).
- Kun, M. and Onargan, T., 2013, Influence of the fault zone in shallow tunneling : A case study of Izmir Metro Tunnel, Tunneling and Underground Space Technology, 33, 34-45.
- Lee, D. S., Kim, K. Y., Hong, S. Y., Oh, G. D., and Jeong, S. S., 2009, Characteristics of shear behavior for coarse grained materials based on large scale direct shear test (III) -final comprehensive analysis-, Korean Geotechnical Society, 25(4), 39-54 (in Korean with English abstract).
- Mizoguchi, K., Hirose, T., Shimamoto, T., and Fukuyama, E., 2008, Internal structure and permeability of the Nojima fault, southwest Japan, Journal of Structural Geology, 30, 513-524.
- Oh, H. S., Shin, W. S., Kim, J. H., Hwang, I. S., Hur, J., Shin, H. S., Oh, J. E., Huh, I. A., and Kim, Y. H., 2010, Comparison of particle size analysis and distribution of heavy metals in river and lake sediments, Korean Geo-Environmental Society, 11(5), 15-23 (in Korean with English abstract).
- Rawling, G. C., Goodwin, L. B., and Wilson, J. L., 2001, Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types, 29, 43-46.
- Riedmiiller, G., Brosch, F. J., Klima, K., and Medley, E. W., 2001, Engineering geological characterization of brittle faults and classification of fault rocks, Felsbau 19(4), 13-19.
- Sausgruber, T., and Brandner, R., 2003, The relevance of brittle fault zones in tunnel construction - lower Inn Valley Feeder Line North of the Brenner Base Tunnel, Tyrol, Austria, Mitt. der Österr. Geol. Ges., 94, 157-172.
- Sulem, J., Vardoulakis, I., Ouffoukh, H., Boulon, M., and Hans, J., 2004, Experimental characterization of the thermo-poro-mechanical properties of the Aegion Fault gouge, C.R. Geoscience, 336, 455-466.
- Teuten, J. M., 2012, Shear characteristics of soils with varying silt/clay fractions, Civil and Environmental Engineering Student Conference, 25-26, June 2012, Imperial College London.
- Varadarajan, A., Sharma, K. G., Venkatachalam, K., and Gupta, A. K., 2003, Testing and modeling two rockfill materials, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, 129(3), 206-218.

문성우

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52
Tel: 043-261-2765
E-mail: msw2080@naver.com

윤현석

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52
Tel: 043-261-2765
E-mail: yhs0211@hanmail.net

김우석

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52
Tel: 043-261-2765
E-mail: peroxide@hanmail.net

나종화

충북대학교 정보통계학과
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52
Tel: 043-261-2232
E-mail: cherin@chungbuk.ac.kr

김창용

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
412-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0224
E-mail: cykim@kict.re.kr

서용석

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52
Tel: 043-261-2765
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr