

수치해석을 이용한 단층핵 내 각력의 배열 형태 및 함량에 따른 탄성계수의 비교 · 분석

윤현석¹ · 송규진¹ · 문성우¹ · 김창용² · 서용석^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과, ²한국건설기술연구원 지반연구소

Comparative Numerical Analysis of Elastic Modulus according to Distribution and Content of Breccia in Fault Core

Hyun-Seok Yun¹, Gyu-Jin Song¹, Seong-Woo Moon¹, Chang-Yong Kim², and Yong-Seok Seo^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Received 23 July 2015; received in revised form 29 July 2015; accepted 2 August 2015

단층핵 내에는 지각의 마찰에 기인한 암석의 파쇄 및 풍화 변질 작용 등으로 단층각력이 분포하며, 이러한 각력은 단층 운동 시 지각의 이동방향에 따라 일정한 방향으로 배열하게 된다. 본 연구에서는 단층핵 내에 분포하는 각력의 배열 형태 및 함량이 역학적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치해석을 통해 탄성계수를 산정하였다. 해석모델은 단층핵 내에서 각력이 선택 배향하는 모델과 무작위 분포하는 모델로 구분되며, 각력의 종류는 화강암과 셰일, 그리고 각력 함량은 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%로 구분된다. 해석결과에 의하면 변형률의 차이는 0.1~1.1% 범위 내, 그리고 탄성계수는 0.02~0.4 MPa 범위 내에 분포하여 각력의 배열에 따른 탄성계수의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

주요어: 단층핵, 단층각력, 각력 배열, 각력 함량, 탄성계수

Fault breccia, produced by fracturing and comminution of host rock during fault activity, is a common component within fault cores. Fault breccia may display a preferred orientation in accordance with the sense of motion on the fault. Here we use a numerical analysis technique to study the effects of the distribution and content of breccia in fault core on the elastic moduli. The analytical models are grouped into those in which breccias display a preferred orientation within fault core and those in which breccias are randomly oriented. The breccia compositions considered here are granite and shale, and the breccia contents are 10 wt%, 20 wt%, and 30 wt%. Our results show that for all the cases considered, differences in the deformation moduli fall within the range 0.1%~1.1% and differences in the elastic moduli fall within the range 0.02~0.4 MPa. Thus, the distribution and content of fault breccia have almost no effect on the elastic moduli.

Key words: fault breccia, fault core, distribution of breccia, content of breccia, elastic modulus

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

© 2015, 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.

서 론

단층대는 단층핵(fault core)과 이를 감싸는 단층손상대(fault damage zone), 혼합대(mixed zone)로 구성되며, 암상 및 구속압력, 깊이, 온도, 수압, 단층운동의 특성에 따라 여러 종류의 단층암으로 구분된다(Sibson, 1977; Caine et al., 1996; Heynekamp et al., 1999; Faulkner et al., 2003; Gudmundsson et al., 2010). 단층핵은 지구조적 운동에 의한 지각의 마찰로 인해 암석의 파쇄 및 풍화 변질 작용을 심하게 받은 지각의 일부로서 단층점토(fault gouge)와 파쇄암(cataclasite), 각력암(breccia)으로 구성된다. Sibson (1977)은 세립질의 기질부(matrix)와 각력(breccia)의 구성비에 따라 각력이 30% 이상인 경우 단층각력암, 30% 이하인 경우는 단층점토로 구분하였다. 이러한 단층핵은 일반적으로 복합적인 지구조적 작용에 의해 생성되기 때문에 구성 성분이 불균질한 분포를 보이며, 각력과 기질의 역학적 특성 차이에 의해 단층핵의 역학적 특성은 달라질 수 있다.

단층핵은 터널, 비탈면, 댐, 기초 등과 같은 구조물 시공 시 상대적으로 주변 지반에 비해 현저히 낮은 강도로 인해 지반 붕괴의 주요 요인이 되고 있어 단층점토의 역학적 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다. 이러한 이유로 Jung et al. (2004)과 Kim et al. (2004)은 터널 구조물이 시공되는 미고결 각력층 지반에서의 점하중 시험 및 입도분석, 공내 진단시험 등 다양한 실내 및 현장 시험을 통해 지반의 변형계수 및 일축압축강도 등을 분석하였으며, Baek et al. (2006)과 Seo et al. (2006)는 불균질성을 가지는 복합지반물질의 역학적 특성을 분석하기 위해 균질화법을 이용하여 역의 함량 및 크기, 기질의 고결도, 분급, 경사 등을 고려한 지반의 탄성계수를 산정한 바 있다. 또한 Henderson et al. (2010)은 단층 물질의 입도와 전단강도의 상관성에 대한 연구에서 각력이 우세한 단층암이 기질이 우세한 단층암에 비해 잔류 전단강도가 높다는 결과를 얻었다. 한편 단층 운동 시 생성된 각력들은 지층의 끌림에 따라 회전하여 일정한 방향으로 배열될 가능성이 있는데 Yount et al. (1987)은 단층대 내에 분포하는 쇄편들은 단층의 이동에 따라 주향과 경사 방향으로 배열된다고 하였으며, McCaIpin (1996)은 단층면에 인접한 역이나 쇄설편들의 배열이 후기의 단층 운동과 밀접한 관련이 있다고 하였다. 또한 Jin et al. (2013)은 구산단층 트랜치의 단면에서 쇄설편들이 단층의 경사 방향으로 배열하고 있는 단층 끌림대를 관찰하여 단층의 발달 특성을 연구한 바

있다. 그러나 이러한 단층대 내에 분포하는 각력의 배열이 단층핵의 공학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다. 왜냐하면 단층핵의 연약한 강도로 인해 각종 현장 및 실내 시험에 많은 제약이 있어 역학적 특성을 규명하는 것은 용이한 일이 아니기 때문이다.

본 연구에서는 단층핵의 기질부 내에 분포하는 각력의 배열 형태와 함량이 탄성계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각력의 함량이 30 wt% 이하인 단층핵 시료를 모델링하여 수치해석을 이용한 탄성해석을 수행하였다. 단층핵의 기질부 내에서 선택 배향된 각력과 무작위로 분포하는 각력의 함량을 달리하여 탄성해석을 각각 수행하였으며, 일정한 하중을 단계별로 가하여 응력과 변형률과의 관계로부터 도출된 탄성계수를 비교·분석하였다.

단층핵 내 각력의 함량 분석

각력을 포함하는 단층핵의 수치해석 모델링을 위해 국내에 분포하는 단층대에서의 단층물질을 대상으로 각력의 함량을 분석하였다. Moon et al. (2014)은 국내의 9개 단층에서 채취한 총 109개의 단층점토 시료를 대상으로 입도 분석(ASTM 2487-06)을 수행하여 단층핵 내 자갈(각력, 4.75 mm 이상)은 0~50 wt%, 모래(4.75~0.075 mm)는 0~70 wt%, 실트 및 점토(0.075 mm 이하)는 0~90 wt% 범위에 분포하는 것을 밝힌 바 있다. 또한 Yun et al. (2015)은 경주·울산 지역의 12개 지점에서 채취한 62개의 단층핵 시료를 대상으로 입도 분석을 수행하여 자갈의 분포 범위는 대부분 40 wt% 이하이며, 모래는 10~70 wt%, 실트 및 점토는 10~90 wt%에 분포하는 것을 밝힌 바 있다. Fig. 1은 상기 연구의 결과를 종합하여 단층핵 내 분포하는 자갈, 모래, 실트 및 점토의 무게비 분포 범위와 분포수를 분석한 것으로 자갈의 경우 전체 시료 중 약 90%가 무게비 0~30 wt%에 분포하는 것으로 나타났다.

수치해석

해석 모델

단층핵 내 분포하는 각력의 배열 형태 및 함량에 따른 탄성계수의 비교·분석을 위해 2차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 유한요소해석 프로그램인 MIDAS GTS/NX를 이용하였으며, 기질부와 각력을 탄성체로 가

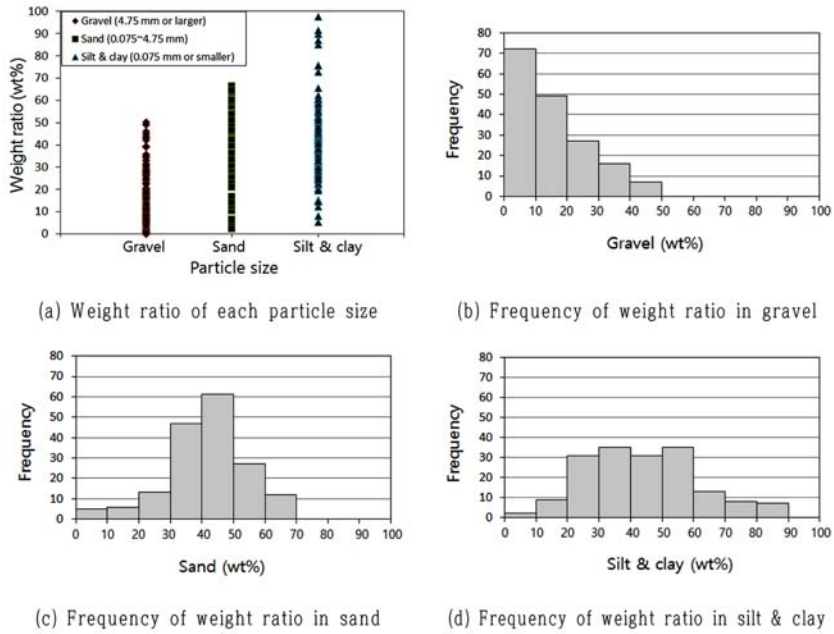


Fig. 1. Weight ratios and frequencies of materials within the studied fault core, estimated from the results of sieve analyses by Moon et al. (2014) and Yun et al. (2015).

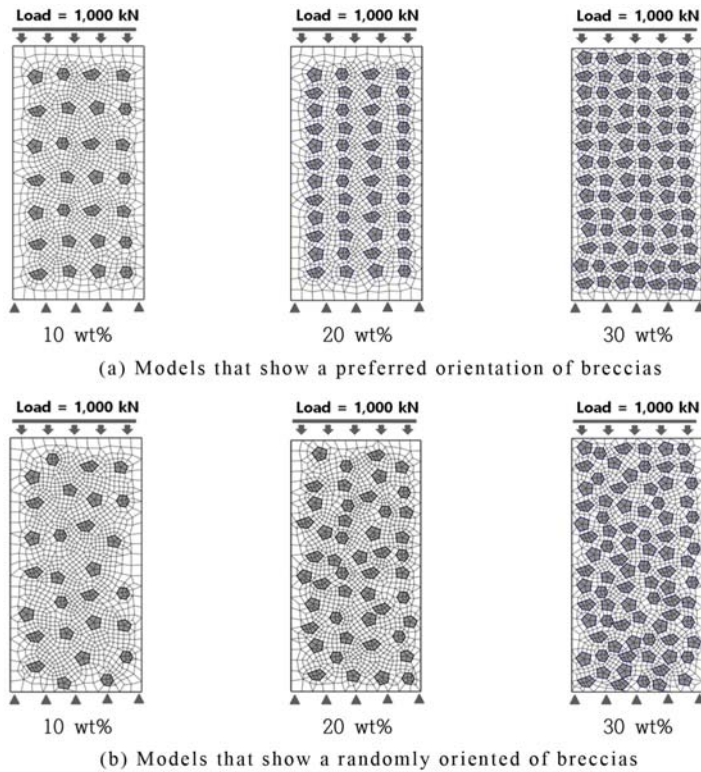


Fig. 2. 2D models of elastic numerical analysis according to the distribution and content of breccia.

정하여 탄성해석을 수행하였다. 시료 모델의 크기는 실내에서의 일축압축강도 시험과 동일한 조건으로 수행하기 위하여 6×12 cm로 모델링하였으며, 각력의 크기는 단층핵 내 분포하는 자갈의 크기(4.75 mm)를 고려하여 약 5 mm 내외로 설정하였다. 각력의 함량은 Fig. 1에서의 분석 결과를 바탕으로 각각 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%로 구분하였으며, 기질부 내 각력의 분포 면적을 각력의 함량으로 가정하여 모델링하였다. 또한 각력의 배열은 일정한 방향으로 선택 배향된 모델과 무작위로 배열된 모델 2가지로 구분하였으며, 시료 하부에 수직 방향으로 경계 조건을 구축한 상태에서 상부에 총 1,000 kN의 하중을 10단계에 걸쳐 단계별로 가하여 응력과 변형률과의 관계로부터 도출된 탄성계수를 비교·분석하였다. Fig. 2는 수치해석에 적용된 각력의 배열 형태와 함량에 따른 해석 모델을 나타낸 것이다.

재료정수

수치해석에 사용된 기질부와 각력의 재료정수는 탄성계수, 포아송비, 단위중량이다. 본 연구에서는 점토 및 모래로 구성된 기질부의 재료정수 산정을 위해 시료를 성형하여 일축압축강도 시험을 수행하였으며(Fig. 3), 시험 결과를 이용하여 활성탄성계수(E_{50})와 포아송비를 산정하였다. 대상 시료는 지름 6 cm, 길이 12 cm의 원기둥으로 성형하였으며, 단층핵 내 분포하는 기질부의 모래와 점토는 다양한 무게비를 보이기 때문에 Fig. 1에서의 분석 결과를 바탕으로 점토와 모래의 무게비를 달리 하여 총 4종류를 제작하였다. 일축압축강도 시험은 고온으로 인한 대상 시료 내 점토광물의 변질을 최소화하기 위해 대상 시료를 약 40°C에서 72시간 건조한 후 KS F 2314 시험법에서 제시하는 흙의 일축압축강도 시

험법을 준용하여 수행하였으며, 시험 직전에 중량을 측정하여 단위중량을 산정하였다. Fig. 4는 각 시료에 대한 일축압축강도 시험 결과로서 점토의 무게비가 높을수록 일축압축강도는 비례하여 증가하고 있다. Fig. 4의 4가지 성형 시료에 대한 시험 결과를 바탕으로 기질부의 재료정수를 산정하였으며, 산정값의 평균을 수치해석에 적용하였다. 각력의 재료정수는 Luis et al. (2004)가 여러 연구에서 암석의 탄성계수와 포아송비, 단위중량에 대하여 종합 분석한 결과를 참고하여 중위값을 산정하였으며, 강도가 강한 각력과 약한 각력이 분포하는 경우를 비교하기 위해 화강암과 세일의 재료정수를 각각 적용하였다. 4가지 성형 시료의 일축압축강도 시험을 통해 산정된 기질부의 재료정수와 화강암과 세일의 재료정수는 Table 1과 같다.

해석결과 분석

점토와 모래로 구성된 기질부 내에 각력이 선택 배향하는 경우와 무작위로 배열하는 경우를 각각 모델링하

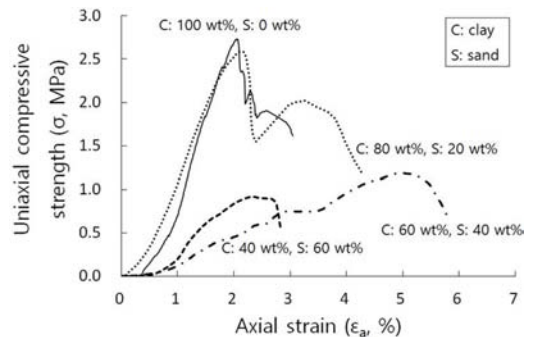


Fig. 4. Stress-strain curves from uniaxial compression tests performed on each specimen.



(a) Preparation of the specimen



(b) A specimen after unconfined compression test

Fig. 3. A specimen (80 wt% clay, 20 wt% sand) used for unconfined compression test.

Table 1. Results of unconfined compression tests for specimens containing mixtures of sand and clay, plus the input parameters used for elastic numerical analyses.

	Clay (wt%)	Sand (wt%)	q_u (MPa)	ϵ_a (%)	γ_t (kN/m ³)	E_m (MPa)	ν	Remarks
Matrix	100	0	2.8	2.1	19.4	109.3	0.42	$E_m = E_{s0}$
	80	20	2.6	2.1	19.2	115.3	0.29	
	60	40	1.2	5.0	19.2	24.4	0.20	
	40	60	0.9	2.3	18.3	35.7	0.25	
	Mean		6.5	2.9	19.0	71.2	0.29	
Breccia	Granite	-	-	-	26.5	47,000	0.21	Luis et al. (2004), Jung (1996)
	Shale	-	-	-	26.0	17,500	0.25	

q_u : uniaxial strength, ϵ_a : axial strain, γ_t : unit weight, E_m : elastic modulus, ν : poisson's ratio.

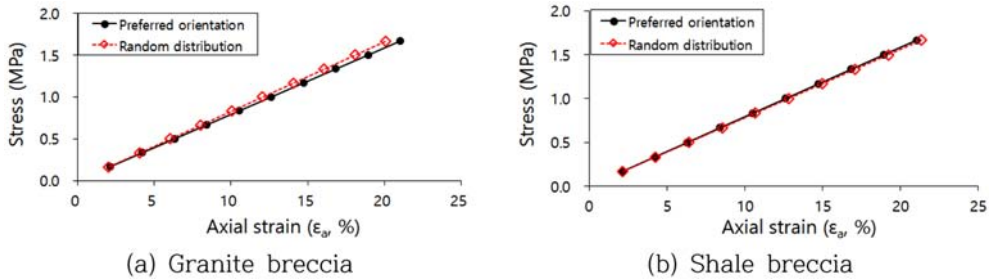


Fig. 5. Relationship between stress and axial strain for numerical models with a breccia content of 10 wt%.

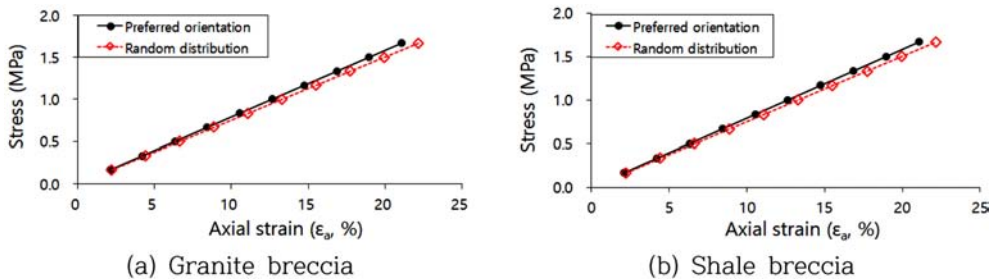


Fig. 6. Relationship between stress and axial strain for numerical models with a breccia content of 20 wt%.

여 각력 함량이 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%로 분포하는 단층핵 시료에 대하여 탄성해석을 수행하였다. 해석 모델의 상부에 10단계에 걸쳐 하중 100 kN 씩 증가시키면서 총 1,000 kN의 하중을 가하였으며, 모델 상부 중앙에서의 응력과 변형률의 관계를 도출하여 결과를 분석하였다. Fig. 5는 화강암과 셰일 각력의 함량이 10 wt%일 때 응력과 변형률의 관계를 나타낸 것으로서, 선택배향 모델과 무작위 배열 모델 사이의 변형률은 각력이 화강암인 경우 약 0.9%, 셰일인 경우 0.3%의 차이를 보여 두 모델이 거의 동일한 변형률을 보이며, 각력의 함량이 20 wt%인 경우는 화강암과 셰일 모두 약

1.1%의 변형률 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 6). 또한 각력의 함량이 30 wt%일 때에도 화강암과 셰일 각력이 선택 배향하는 모델과 무작위 배열하는 모델 사이에서 약 0.1%의 변형률 차이를 보여 각력의 배열 형태에 따른 변형률의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 7). 한편 각력의 함량이 증가할수록 변형률은 각력 종류에 상관없이 다소 증가하는 경향을 보인다. 이는 상부에서의 하중 재하 시 각력과 기질부의 역학적 차이로 인해 각력 경계부에서 변형이 발생하므로 각력의 함량이 많을수록 변형률이 증가하는 것으로 판단된다.

Table 2는 응력과 변형률의 관계로부터 산정한 탄성

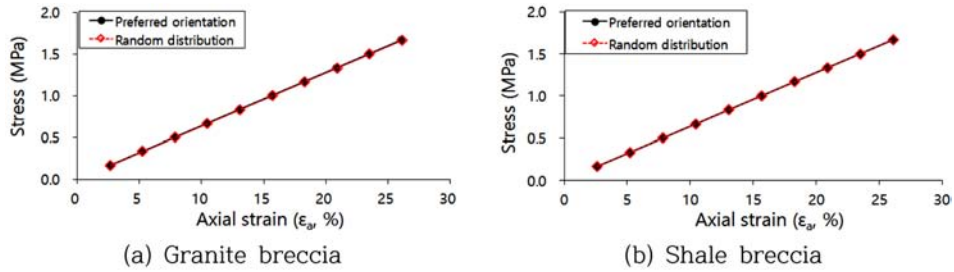


Fig. 7. Relationship between stress and axial strain for numerical models with breccia content of 30 wt%.

Table 2. The elastic modulus according to the distribution and content of breccia, as calculated from stress-strain relationships.

Breccia	Distribution pattern	Elastic modulus (E_m , MPa)		
		10 wt%	20 wt%	30 wt%
Granite	Preferred orientation	7.921	7.909	6.391
	Random distribution	8.293	7.529	6.373
Shale	Preferred orientation	7.926	7.907	6.390
	Random distribution	7.806	7.522	6.374

계수를 나타낸 것이다. 각력의 함량이 10 wt%인 경우 선택 배향 모델과 무작위 배열 모델 사이의 차이는 각력이 화강암인 경우 약 0.4 MPa, 셰일인 경우 0.1 MPa의 차이를 보이며, 각력 함량이 20 wt%인 경우는 화강암과 셰일 모두 약 0.4 MPa, 각력이 30 wt%인 경우는 약 0.02 MPa의 차이를 보여 변형률과 유사하게 배열 형태에 따른 탄성계수의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 또한 각력의 함량이 많아질수록 탄성계수는 감소하며, 화강암 각력이 10 wt%인 경우를 제외하고는 선택 배향 모델이 무작위 배열 모델보다 탄성계수가 높게 나타난다.

결 론

단층핵 내 분포하는 각력의 배열 형태와 함량이 탄성 계수에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치 모델을 대상으로 상부에 1,000 kN의 하중을 단계별로 가하여 수치 해석을 수행하였다.

1. 화강암과 셰일의 각력 함량 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%인 경우 각력의 배열이 선택 배향하는 모델과 무작위 분포하는 모델의 변형률을 비교하면 변형률이 0.1~1.1%의 범위에서 차이를 보여 각력의 배열에 따른 변형률의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

2. 응력-변형률 관계로부터 50% 할선 탄성계수를 산정하여 비교하면 0.02~0.4 MPa의 범위에서 차이를 보여 각력의 배열 형태에 따른 탄성계수의 차이는 미미한 것으로 나타났다.

3. 변형률은 각력의 함량이 증가할수록 미미하지만 다소 증가하며, 탄성계수는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

4. 상기의 결과에 의하면 단층핵에 대한 일축압축강도 시험 시 소성파괴가 발생하기 전의 단성거동 구간에서는 각력의 배열상태가 단층핵의 역학적 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

5. 본 연구는 단층 각력의 기하학적 분포를 단순히 설정한 모델의 일축압축시험을 위한 수치해석 결과이며, 추후 전단력에 의한 강도 특성 등 추가적인 연구가 수행된다면 각력의 배열에 따른 단층핵의 역학적 특성을 보다 명확히 규명할 수 있을 것이다.

사 사

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

References

- ASTM D2487-06, 2006, Standard practice for classification of soils for engineering purposes, Annual Book of ASTM standard, 04.08.
- Baek, Y., Yim, S. B., Seo, Y. S., Kwon, O. I., and Jeong, Y. J., 2006, Analysis of elastic behavior of conglomerate with sorting and dip using homogenization theory, Korea Society of Engineering Geology Conference,

- 297-305 (in Korean with English abstract).
- Caine, J. S., Evans, J. P., and Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure, *Geology*, 24(11), 1025-1028.
- Faulkner, D. R., Lewis, A. C., and Rutter, E. H., 2003, On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain, *Tectonophysics*, 367(3-4), 235-251.
- Gudmundsson, A., Simmenes, T. H., Belinda, L., and Philipp, S. L., 2010, Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones, *Journal of Structural Geology*, 32(11), 1643-1655.
- Henderson, I. H. C., Ganerod, G. V., and Braathen, A., 2010, The relationship between particle characteristics and frictional strength in basal fault breccias: implications for fault-rock evolution and rockslide susceptibility, *Tectonophysics*, 486(1-4), 132-149.
- Heynekamp, M. R., Goodwin, L. B., Mozley, P. S., and Haneberg, W. C., 1999, Controls on fault-zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, New Mexico: implications for fault-zone permeability and fluid flow, In: Haneberg, W. C., Mozley, P. S., Moore, J. C. and Goodwin, L. B. (Eds.), *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*, American Geophysical Union Geophysical Monograph, 113, 27-50.
- Jeoung, T. J., 1996, The variation of poisson's ratio for the cretaceous sandstones and shale in the Euseoung sub-basin, *The Journal of Engineering Geology*, 6(2), 397-409 (in Korean with English abstract).
- Jin, K. M., Kim, Y. S., Kang, H. C., and Shin, H. C., 2013, Study on developing characteristics of the Quaternary Gusan Fault in Uljin, Gyeongbuk, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(2), 197-207 (in Korean with English abstract).
- Jung, H. C., Chun, Y. C., Park, C. M., Lee, H., and Oh, S. M., 2004, A case study on design of road tunnels in uncemented breccia, *The Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, 1533-1538 (in Korean).
- Kim, T. K., Choi, S. S., and Jeong, Y. J., 2004, Geological, geotechnical characteristics and rock mass classification of the unconsolidated conglomerate in Gyeongju, *Journal of Korean Geophysical Society*, 7(4), 293-304 (in Korean with English abstract).
- KS F 2314, 2013, Standard test method for unconfined compression test of soils, Korean Agency for Technology and Standards (in Korean).
- Luis, I. G. V., Mercedes, F., Luis, O., and Carlos, O., 2004, *Geological engineering*, Pearson Education, Madrid, Spain, 119-153.
- McCalpin, J. P., 1996, *Paleoseismology*, Academic Press, SanDiego, 588p.
- Moon, S. W., Yun, H. S., Kim, W. S., Na, J. H., Kim, C. Y., and Seo, Y. S., 2014, Correlation analysis between weight ratio and shear strength of fault materials using multiple regression analysis, *The Journal of Engineering Geology*, 24(3), 397-409 (in Korean with English abstract).
- Seo, Y. S., Yim, S. B., Beak, Y., and Kim, J. S., 2006, Homogenization analysis for calculating elastic modulus of composite geo-materials, *The Journal of Engineering Geology*, 16(3), 227-233 (in Korean with English abstract).
- Sibson, R. H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms, *Journal of the Geological Society*, 133, 191-213.
- Yount, J. C., Shroba, R. R., McMasters, C. R., Huckins, H. E., and Rodriguez, E. A., 1987, Trench logs from a stand of the rock valley fault system, Nevada test site, Nye County, Nevada, United States Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map, MF-1824, Scale 1:20, 37p.
- Yun, H. S., Moon, S. W., and Seo, Y. S., 2015, Setting of the range for shear strength of fault cores in Gyeongju and Ulsan using regression analysis, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 17(2), 361-372 (in Korean with English abstract).

윤현석

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2765
E-mail: yhs0211@hanmail.net

송규진

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2765
E-mail: kj-life@hanmail.net

문성우

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2765
E-mail: msw2080@naver.com

김창용

한국건설기술연구원 지반연구소
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0092
E-mail: cykim@kict.re.kr

서용석

충북대학교 지구환경과학과
362-763 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2765
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr