

[기술보고]

국내에 분포하는 암반의 물리·역학적 특성 분석

서용석<sup>1\*</sup> · 윤현석<sup>1</sup> · 김동규<sup>2</sup> · 권오일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 지반연구소

[Technical Reports]

Analysis on Physical and Mechanical Properties of Rock Mass in Korea

Yong-Seok Seo<sup>1\*</sup>, Hyun-Seok Yun<sup>1</sup>, Dong-Gyou Kim<sup>2</sup>, and O-Il Kwon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>2</sup>Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Construction Technology

Received 11 December 2016; received in revised form 18 December 2016; accepted 23 December 2016

---

본 연구에서는 국내의 107개 터널 설계 과정에서 수행한 현장 및 실내시험 자료 4,280개를 이용하여 암반 및 무결암의 역학적 특성을 암종 및 강도별로 분석하였다. 분석된 물리 및 역학적 특성은 단위중량, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도, 인장강도, 투수계수, 비중이다. 평균값의 분석 결과에 의하면 편마암은 비중, 화강암은 투수계수, 퇴적암은 단위중량과 점착력, 내부마찰각, 화산암은 변형계수와 탄성계수, 일축압축강도, 인장강도, 변성암은 포아송비에서 가장 높은 값을 보인다. 역학적 특성의 분포 범위는 암종 및 강도를 고려한 분석에도 불구하고 넓게 분포하며, 이는 암반의 불균질성과 이방성에 기인하는 것으로 판단된다.

**주요어:** 암반, 역학적 특성, 터널, 암종, 강도에 따른 암석의 분류

To understand the mechanical properties of rock masses and intact rock in Korea, data from 4,280 in situ and laboratory tests from 107 tunnels on general national roads were analyzed. The mechanical properties (unit weight, cohesion, friction angle, modulus of deformation, Young's modulus, Poisson's ratio, uniaxial compressive strength, tensile strength, coefficient of permeability, and specific gravity) were analyzed by rock types and strength of rock in each rock type. The results of analysis, the mean specific gravity was highest in gneiss. The coefficient of permeability and Poisson's ratio show the highest mean values in granite and metamorphic rock, respectively. In addition, the unit weight, cohesion and friction angle in sedimentary rock, modulus of deformation, Young's modulus, uniaxial compressive strength and tensile strength in volcanic rock have the highest mean values. The values for each mechanical property showed wide ranges by the heterogeneity and anisotropy of rock masses in spite of detailed analysis by rock type and classification of rocks according to the strength.

**Key words:** rock mass, mechanical property, tunnel, rock type, classification of rocks according to the strength.

---

\*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

© 2016, 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

암반의 역학적 특성은 터널 및 비탈면과 같은 구조물의 설계 및 시공을 위해 매우 중요한 요소로서 수치해석을 통한 지반의 거동 및 안정성 분석에 주로 이용된다. 암반의 역학적 특성을 이용하여 지반 및 구조물의 안정성을 분석하기 위해서는 현장 상황에 가장 적절한 암석의 성질 및 역학적 특성을 파악하는 과정이 필요하고, 결정적인 인자를 선택할 수 있어야 한다(Singh and Goel, 2011). 변형계수, 탄성계수, 점착력, 내부마찰각, 포아송비 등은 수치해석 시 중요하게 이용되는 역학적 특성으로서 현장 및 실내시험을 통해 정량적인 값을 획득할 수 있다. 그러나 시험을 통해 산정되는 역학적 특성들은 시험 방법 및 기술자의 숙련도, 현장상황 등에 따라 다른 결과를 보일 수 있으며, 암종 및 지질 상태, 절리의 발달정도, 산출 지역, 암반의 생성시기 등에 따라 다양한 범위를 보인다. Bieniawski (1989)는 변형계수를 예로 들면서 균질하고 양호한 암반이라도 25%의 편차를 보인다고 하였으며, Kanji (2014)는 동일한 세일이라도 고결 정도에 따라 약하거나 강한 강도를 보일 수 있다고 하였다. 또한 Bosio and Kanji (1998)는 지질시대의 중요성을 강조하면서 Paraná Basin의 퇴적암에서 속성작용과 응력 등으로 인해 공극률과 일축압축강도가 암석의 생성시기에 따라 달라진다는 결과를 보여줬다. 이런 이유로 Clerici (1993)는 역학적 특성 산정 시 절대값을 제시하는 것보다 개략적인 크기를 산정하는 것이 중요할 수 있다고 하였다. 국내의 경우 이와 같은 암반의 특성을 반영하기 위해 구조물 설계 시 암반을 분류하여 역학적 특성을 결정하거나, 경험식, 참

고문헌, 기존사례, 통계적 접근 등 다양한 방법을 통해 역학적 특성을 분석하고 있다(Kim et al., 2005). 특히 통계적 방법을 이용한 분석은 다양한 범위에 분포하는 역학적 특성의 합리적인 평가 뿐 아니라 신뢰성 있는 결과를 제공하는 데 유용하다. Phoon and Kulhawy (1999)는 암반의 역학적 특성에 대한 변동성을 평가하기 위해 평균과 표준편차의 비로 대표되는 변동계수의 이용을 제안하였으며, Lee and Yoon (2008)은 암반의 역학적 특성에 대한 불확실성을 최소화하기 위해 지반조사 자료의 통계처리 기법에 대해 설명하였다. Kim et al. (2009)도 인천 송도지역에서의 지반조사 자료를 바탕으로 확률분포형을 추정하여 변동계수를 산정한 바 있다. 한편 통계적 접근 외에도 현장 및 실내 시험자료를 분석하여 역학적 특성의 범위 및 인자들 간의 상관성을 제안하는 연구도 수행되고 있다. Kim et al. (2005)은 확실적인 조사 방법과 장비의 적용, 조사 결과의 낮은 신뢰성, 불충분한 조사 및 설계 기간, 조사 자료의 공유 문제 등 국내 터널에서 지반정수 산정 시 발생하는 문제점에 대해 지적하면서 국내 8개 터널의 자료를 취합하여 암석 강도별로 역학적 특성을 분석하였다. Kim and Kim (2006)도 국내에 분포하는 세일 및 사암, 석회암, 화강암, 편마암에서 수행한 시험 자료를 분석하여 각 역학적 특성들의 상관식을 발표하는 등 암반의 역학적 특성을 이해하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다.

본 연구에서는 국내의 107개 국도 터널에서 수행한 각종 현장 및 실내시험 자료를 수집하여 암종에 따른 역학적 특성을 분석하였다. 암종은 화강암과 편마암, 퇴적암, 화산암, 변성암으로 구분하였고, 각 암종에서의 점착력과 내부마찰

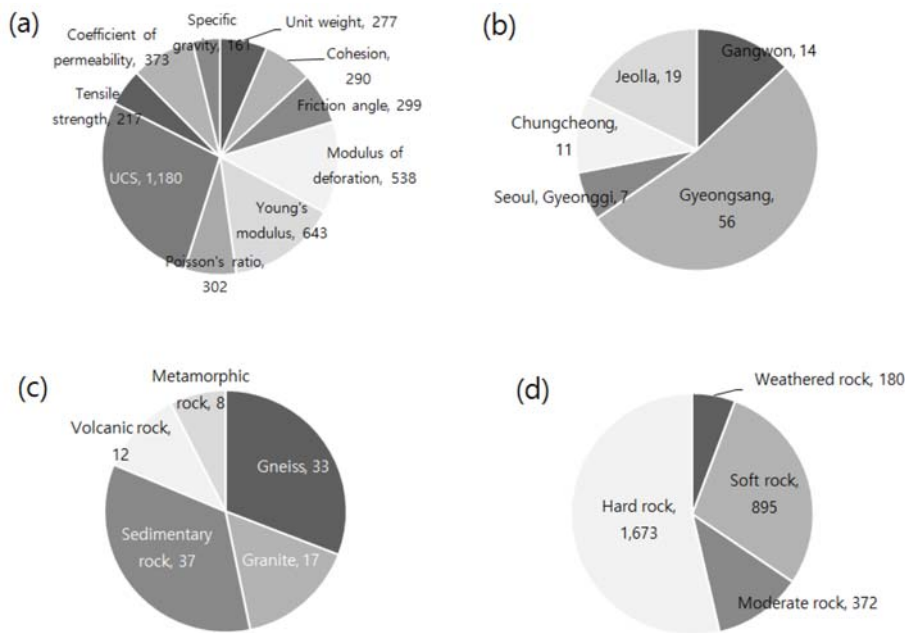


Fig. 1. Test data used for analysis in this study: (a) mechanical properties, (b) districts, (c) rock types, and (d) classification of rocks according to the strength.

각, 탄성계수, 변형계수, 일축압축강도 등 총 10개 종류의 역학적 특성을 분석하였다. 또한 토목 분야에서 일반적으로 사용하는 암석의 강도분류에 따라 상자그림(box plot)을 작성하여 역학적 특성의 분포 범위와 중앙값, 평균값을 산정하였다.

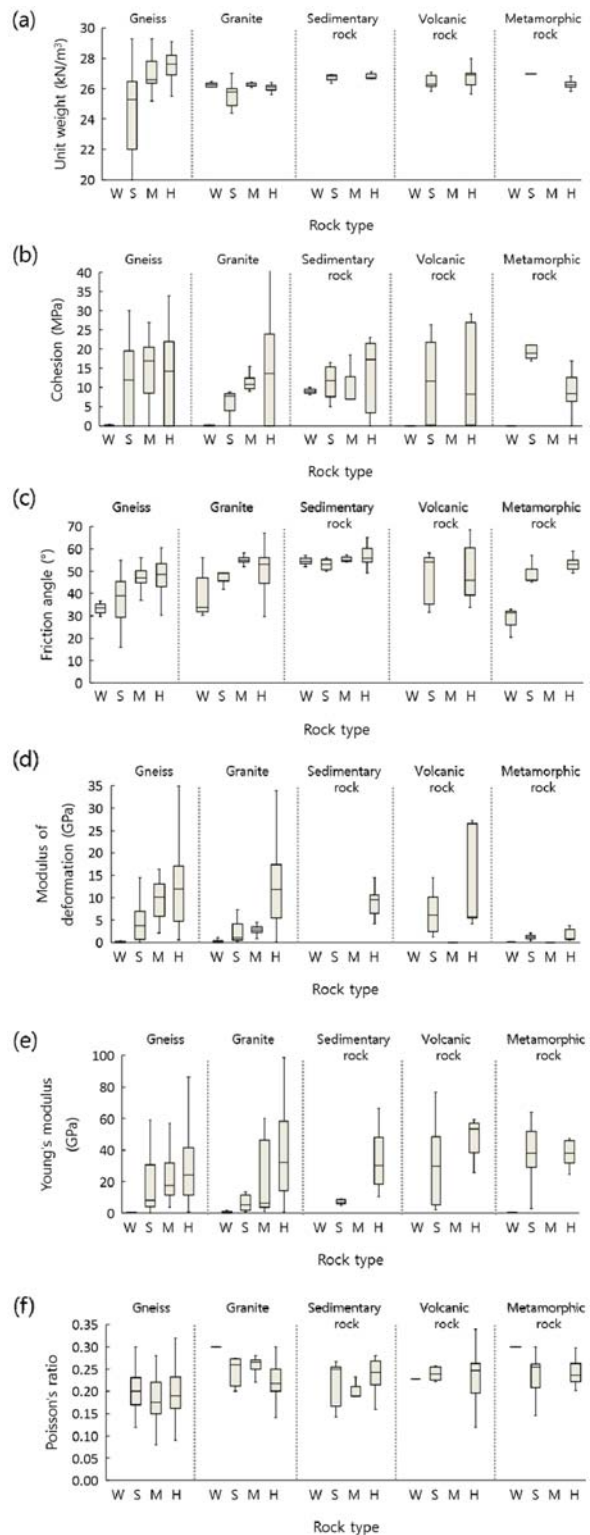
### 수집자료

수집된 자료는 국내의 107개 국도 터널에서 설계 시 수행한 현장 및 실내 시험 자료로서 국내 전역에서 수행한 시험 결과를 분석하였다(Fig. 1a). 이 자료들은 터널 설계 시 중요하게 분석되는 역학적 특성으로서 지반의 안정성을 확보하기 위한 수치해석 및 구조계산에 이용된다. 암종에 따른 역학적 특성 분석을 위해 터널 주변의 지질을 확인하여 편마암 33개소, 화강암 17개소, 퇴적암 37개소, 화산암 12개소, 변성암 8개소로 암종을 구분하였다(Fig. 1b). 총 10개 종류의 역학적 특성을 분석하였고, 각 인자별로 수집된 자료는 총 4,280개이다(Fig. 1c). 또한 동일한 현장의 시험 자료라도 암반의 지질 상태 및 풍화 정도에 따라 역학적 특성이 달라질 수 있기 때문에 각 암종별로 암석의 강도를 구분하여 역학적 특성의 범위 및 중앙값, 평균값을 산정하였다(Fig. 1d).

### 암종 및 암석의 강도분류에 따른 역학적 특성 분석

#### 역학적 특성의 분포 범위

암반의 역학적 특성은 암종별로 분석되었고, 동일한 암종이라도 다양한 범위를 보이는 역학적 특성을 고려하기 위해 시험을 수행한 대상 암석의 강도에 따라 풍화암과 연암, 보통암, 경암으로 세분화하여 분석하였다. 암석의 강도에 따른 분류는 시추 로깅(logging) 자료를 참고하였다. Fig. 2는 상자그림을 이용해 역학적 특성의 분포 범위를 도시한 것으로 시험 자료를 크기 순으로 배열한 후 누적 백분율의 25%에 해당하는 값인 1사분위수(lower quartile)와 누적 백분율의 75%에 해당하는 3사분위수(upper quartile)를 상자(box)로 표현한 것이다. 본 연구에서는 자료의 밀집 정도를 상세히 분석하기 위해 상자 안에 분포하는 사분위수간(interquartile) 자료를 분포 범위(IQR, interquartile range)로 산정하였다. 단위중량은 무결암에 대한 실내시험을 통해 산정한 값으로 암종에 따른 분포 범위의 분석 결과, 편마암이 22.0~28.2 kN/m<sup>3</sup>으로 다른 암종에 비해 상대적으로 높은 값과 넓은 범위를 보이며, 편마암을 제외한 다른 암종들은 24.9~27.0 kN/m<sup>3</sup>으로 비슷한 범위에 분포한다(Fig. 2a). 암석의 강도에 따른 분포 범위는 편마암의 연암에서 22.0~26.5 kN/m<sup>3</sup>으로 가장 넓게 분포한다. 삼축압축시험을 통해 산정한 점착력과 내부마찰각의 분포 범위는 각각 0.01~27.0 MPa과 25.9~



**Fig. 2.** Box plots of (a) unit weight, (b) cohesion, (c) friction angle, (d) modulus of deformation, (e) Young's modulus, (f) Poisson's ratio, (g) uniaxial compressive strength, (h) tensile strength, (i) coefficient of permeability, and (j) specific gravity by strength of rock in each rock type. The gray boxes are IQRs (inter-quartile ranges). The abbreviations of type of rocks according to the strength are as follows: weathered rock (W), soft rock (S), moderate rock (M), and hard rock (H).

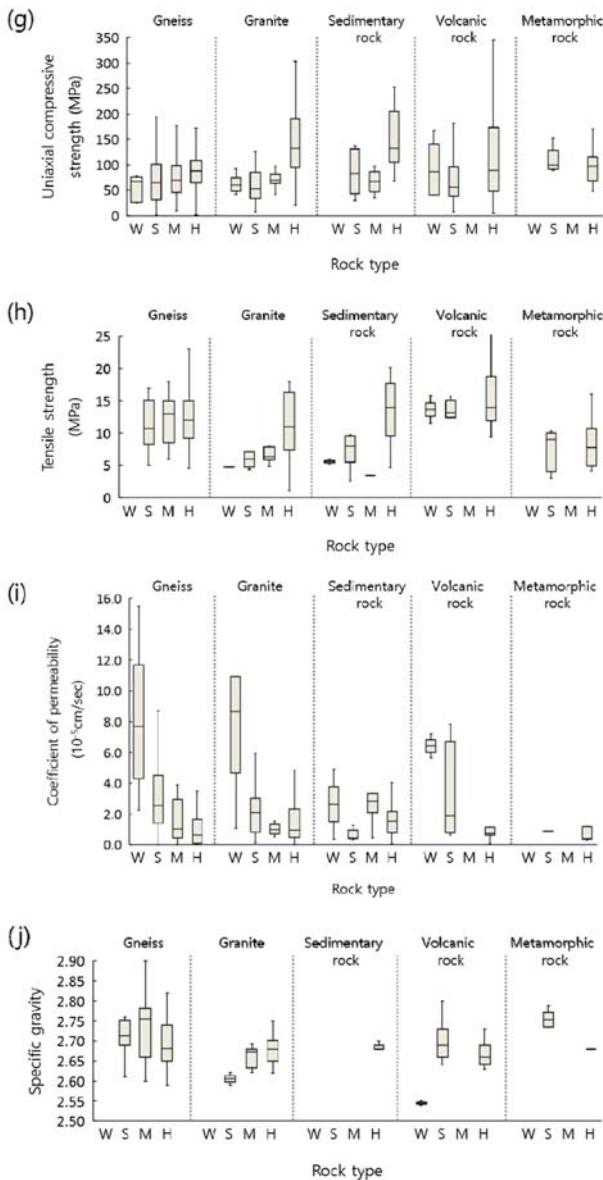


Fig. 2. continued.

60.5°로 대부분의 암종에서 넓은 범위에 분포하며, 경암에서 다른 암석보다 넓은 분포 범위를 보인다(Fig. 2b and 2c). 퇴적암의 내부마찰각은 50.8~60.3°로 좁은 범위에 분포하지만 높은 값을 보인다. 변형계수는 화산암에서 2.4~26.5 GPa로 가장 넓은 범위에 분포하는 반면 변성암은 0.1~3.0 GPa로 가장 좁은 범위에 분포한다(Fig. 2d). 또한 탄성계수는 모든 암종에서 0.2~58.2 GPa까지 상당히 넓은 분포 범위를 보이며, 풍화암의 경우 0.2~0.9 GPa의 좁은 범위에 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 2e). 변형계수와 탄성계수는 현장 암반의 공내재하시험을 통해 산정되었다. 포아송비는 대부분의 암종에서 0.15~0.31에 분포하고, 풍화암은 0.23~0.31의 범위를 보인다(Fig. 2f). 무결암에 대한 일축압축시험과 점착시험을 통해 산정한 일축압축강도는 편마암과 변성암에

서 각각 25.8~107.7 MPa, 51.0~128.7 MPa로 33.5~204.6 MPa에 분포하는 다른 암종에 비해 상대적으로 좁은 범위에 분포하며, 화강암과 퇴적암의 경암은 약 100 MPa 이상의 높은 일축압축강도를 가지고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2g). 변성암의 인장강도는 4.1~10.7 MPa로 다른 암종에 비해 낮은 강도를 가지며, 화강암과 퇴적암의 풍화암은 4.7~5.8 MPa의 낮은 강도와 좁은 분포 범위를 보인다(Fig. 2h). 현장 투수시험을 통해 산정된 투수계수는 변성암에서 10<sup>-6</sup> cm/s에 분포하여 가장 낮은 값과 범위를 보이고, 편마암과 화강암의 풍화암에서 10<sup>-4</sup> cm/s에 이르는 상대적으로 높은 투수계수를 보인다(Fig. 2i). 비중은 화산암의 풍화암에서 약 2.54로 가장 낮은 값과 범위를 보인다(Fig. 2j). 포아송비와 투수계수, 비중을 제외한 다른 역학적 특성들은 대부분의 암종에서 강도가 강한 경암으로 갈수록 대체로 높아지는 경향을 보이며, 분포 범위는 암종과 암석의 강도별로 매우 다양하게 나타난다.

역학적 특성의 평균값 비교 · 분석

Table 1~5는 Fig. 2에서 분석한 암석의 역학적 특성에 대한 분포 범위와 중앙값, 평균값을 정량적으로 나타낸 것이다. 각 역학적 특성의 평균값을 비교분석한 결과, 암종별 단위중량의 평균값은 퇴적암에서 26.7 kN/m<sup>3</sup>로 5개의 암종 중 가장 높은 값을 보인다. 강도분류별 평균값은 연암의 경우 퇴적암이 26.7 kN/m<sup>3</sup>로 가장 높고, 편마암이 24.0 kN/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 값을 보이나, 보통암과 경암은 편마암에서 각각 27.2 kN/m<sup>3</sup>과 27.6 kN/m<sup>3</sup>로 가장 높은 값을 보인다. 점착력은 풍화암의 경우 퇴적암에서 9.0 MPa로 가장 높지만, 다른 암종에서는 0.01~1.2 MPa의 낮은 평균값을 보여 퇴적암과 차이가 큰 것으로 분석되었다. 경암의 경우도 퇴적암은 13.7 MPa로 다른 암종에 비교하였을 때 가장 큰 점착력을 보인다. 또한 퇴적암은 내부마찰각도 풍화암에서 경암에 이르기까지 다른 암종보다 큰 값을 보이는 것으로 분석되었다. 변형계수와 탄성계수는 5개의 암종 중 화산암에서 각각 13.4 GPa, 45.2 GPa로 가장 높은 평균값을 보이고, 풍화암의 변형계수와 탄성계수는 화강암에서 각각 0.3 GPa와 0.6 GPa로 가장 큰 평균값을 보인다. 보통암은 편마암, 경암은 화산암에서 가장 큰 평균값을 보이는 것으로 나타났다. 포아송비는 암종 및 강도에 따른 암석별로 큰 차이를 보이지 않으나 변성암에서 0.26으로 가장 큰 평균값을 보이고, 풍화암이 연암 및 보통암, 경암에 비해 큰 평균값을 보인다. 일축압축강도는 경암의 경우 퇴적암에서 149.5 MPa로 가장 큰 평균값을 보이나 화강암과 화산암도 각각 138.6 MPa와 137.9 MPa로 퇴적암과 차이가 크지 않는 것으로 분석되었다. 인장강도는 화산암의 풍화암과 연암이 각각 13.7 MPa와 12.8 MPa로 다른 암종에 비해 큰 값을 보이며, 보통암과 경암은 각각 편마암과 화강암이 가장 큰 값을 보인다.

**Table 1.** Result of analysis for mechanical properties in gneiss. The symbols are follows: Lower quartile (Q<sub>1</sub>), Upper quartile (Q<sub>3</sub>), unit weight ( $\gamma_t$ ), cohesion (C), friction angle ( $\Phi$ ), modulus of deformation (E<sub>d</sub>), Young's modulus (E), Poisson's ratio ( $\nu$ ), uniaxial compressive strength ( $\sigma_c$ ), tensile strength ( $\sigma_t$ ), coefficient of permeability (k), and specific gravity (G).

Mechanical property of gneiss		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\Phi$ (°)	E <sub>d</sub> (GPa)	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	k ( $\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q <sub>1</sub>	-	0.03	31.3	0.02	0.5	-	25.8	-	4.3	-
	Q <sub>3</sub>	-	0.2	35.2	0.3	0.5	-	75.1	-	11.7	-
	Median	-	0.1	33.3	0.1	0.5	-	66.6	-	7.7	-
	Mean	-	1.2	32.3	0.1	0.5	-	54.1	-	8.3	-
Soft rock	Q <sub>1</sub>	22.0	0.04	29.4	0.7	4.3	0.22	31.2	8.3	1.4	2.69
	Q <sub>3</sub>	26.5	19.5	45.3	6.9	30.5	0.23	100.8	15.1	4.5	2.75
	Median	25.3	12.0	39.0	3.7	8.2	0.20	64.3	10.7	2.6	2.71
	Mean	24.0	11.1	36.4	5.4	18.9	0.19	76.6	11.2	3.6	2.70
Moderate rock	Q <sub>1</sub>	26.4	8.5	44.8	5.8	11.7	0.15	45.5	8.5	0.4	2.66
	Q <sub>3</sub>	27.8	20.5	50.1	13.0	31.8	0.22	98.6	15.0	2.9	2.78
	Median	26.6	17.0	46.9	10.0	17.4	0.18	69.0	13.0	1.0	2.76
	Mean	27.2	15.4	47.5	9.6	25.3	0.18	74.5	14.5	1.5	2.74
Hard rock	Q <sub>1</sub>	26.9	0.03	43.0	4.8	11.5	0.16	64.0	9.2	0.1	2.65
	Q <sub>3</sub>	28.2	22.0	53.3	17.1	41.6	0.23	107.7	15.0	1.6	2.74
	Median	27.6	14.2	48.6	11.9	24.4	0.19	87.2	12.0	0.6	2.68
	Mean	27.6	12.9	47.2	13.2	28.2	0.20	90.5	14.7	2.2	2.70

**Table 2.** Result of analysis for mechanical properties in granite. The symbols are the same as those of Table 1.

Mechanical property of granite		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\Phi$ (°)	E <sub>d</sub> (GPa)	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	k ( $\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q <sub>1</sub>	26.1	0.03	31.8	0.04	0.2	0.30	47.6	4.7	4.7	-
	Q <sub>3</sub>	26.4	0.09	47.0	0.5	0.9	0.30	74.6	4.7	10.9	-
	Median	26.3	0.03	33.7	0.2	0.6	0.30	59.3	4.7	8.7	-
	Mean	26.2	1.2	38.7	0.3	0.6	0.31	62.9	4.7	15.7	-
Soft rock	Q <sub>1</sub>	24.9	3.9	45.5	0.5	2.00	0.21	33.5	4.8	0.8	2.60
	Q <sub>3</sub>	26.0	8.3	49.0	4.1	11.7	0.27	85.0	7.1	3.0	2.61
	Median	25.8	7.8	49.0	1.1	5.2	0.26	52.9	6.0	2.1	2.61
	Mean	25.6	5.5	46.7	2.4	10.9	0.25	64.0	5.9	2.5	2.61
Moderate rock	Q <sub>1</sub>	26.2	9.7	54.0	2.3	3.7	0.25	62.9	5.9	0.7	2.63
	Q <sub>3</sub>	26.4	12.4	56.0	3.4	46.3	0.27	81.6	7.9	1.3	2.68
	Median	26.2	10.8	55.0	2.8	6.2	0.27	68.9	6.3	1.0	2.67
	Mean	26.3	12.1	53.8	6.3	21.1	0.26	81.1	11.2	1.0	2.66
Hard rock	Q <sub>1</sub>	25.9	0.02	44.7	5.4	14.2	0.20	94.6	7.4	0.5	2.65
	Q <sub>3</sub>	26.2	24.0	56.0	17.4	58.2	0.25	189.7	16.3	2.3	2.70
	Median	26.1	13.6	53.0	11.8	32.1	0.22	132.4	11.0	1.0	2.68
	Mean	25.9	13.7	49.8	12.3	35.8	0.21	138.6	26.6	2.9	2.68

**Table 3.** Result of analysis for mechanical properties in sedimentary rock. The symbols are the same as those of Table 1.

Mechanical property of sedimentary rock		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\Phi$ (°)	$E_d$ (GPa)	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	k ( $\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q <sub>1</sub>	-	8.5	53.3	-	-	-	-	5.4	1.5	-
	Q <sub>3</sub>	-	9.5	55.8	-	-	-	-	5.8	3.8	-
	Median	-	9.0	54.5	-	-	-	-	5.6	2.6	-
	Mean	-	9.0	54.5	-	-	-	-	5.6	2.6	-
Soft rock	Q <sub>1</sub>	26.6	7.6	50.8	-	6.1	0.17	42.8	5.5	0.4	-
	Q <sub>3</sub>	26.9	15.3	55.3	-	8.4	0.26	131.2	9.6	1.0	-
	Median	26.8	11.8	53.0	-	6.8	0.25	82.3	8.0	0.5	-
	Mean	26.7	11.3	53.0	-	9.1	0.22	84.4	7.1	1.5	-
Moderate rock	Q <sub>1</sub>	-	7.0	54.5	-	-	0.19	46.8	3.4	2.1	-
	Q <sub>3</sub>	-	12.8	56.2	-	-	0.21	86.6	3.4	3.3	-
	Median	-	7.0	55.0	-	-	0.19	67.1	3.4	2.8	-
	Mean	-	10.8	55.4	-	-	0.20	66.4	3.4	2.9	-
Hard rock	Q <sub>1</sub>	26.7	3.4	54.0	6.4	18.3	0.22	104.0	9.6	0.8	2.70
	Q <sub>3</sub>	27.0	21.6	60.3	10.6	48.0	0.27	204.6	17.7	2.2	2.70
	Median	26.7	17.3	55.8	9.5	30.2	0.24	132.0	14.0	1.5	2.70
	Mean	26.7	13.7	56.7	9.0	32.6	0.24	149.5	13.9	1.8	2.70

**Table 4.** Result of analysis for mechanical properties in volcanic rock. The symbols are the same as those of Table 1.

Mechanical property of volcanic rock		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\Phi$ (°)	$E_d$ (GPa)	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	k ( $\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q <sub>1</sub>	-	0.01	-	-	-	0.23	41.0	12.6	6.0	2.54
	Q <sub>3</sub>	-	0.01	-	-	-	0.23	140.7	14.7	6.8	2.55
	Median	-	0.01	-	-	-	0.23	86.4	13.7	6.4	2.55
	Mean	-	0.01	-	-	-	0.23	95.3	13.7	6.4	2.55
Soft rock	Q <sub>1</sub>	26.1	0.1	35.2	2.4	5.3	0.23	37.8	12.4	0.8	2.66
	Q <sub>3</sub>	26.9	21.9	56.0	10.1	48.5	0.25	96.4	15.1	6.7	2.73
	Median	26.3	11.6	54.0	6.1	29.8	0.24	55.9	13.2	1.9	2.69
	Mean	26.4	12.9	47.4	6.4	32.9	0.25	83.7	12.8	6.0	2.69
Moderate rock	Q <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Q <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Median	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hard rock	Q <sub>1</sub>	26.3	0.1	39.3	5.4	38.4	0.20	48.2	11.9	0.6	2.64
	Q <sub>3</sub>	27.0	27.0	60.5	26.5	57.0	0.26	173.6	18.8	1.2	2.69
	Median	26.9	8.2	46.0	5.7	53.5	0.25	89.0	13.9	0.8	2.66
	Mean	26.7	12.8	49.4	20.4	57.5	0.23	137.9	15.9	2.1	2.65



**Table 5.** Result of analysis for mechanical properties in metamorphic rock. The symbols are the same as those of Table 1.

Mechanical property of metamorphic rock		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\Phi$ (°)	$E_d$ (GPa)	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	k ( $\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q <sub>1</sub>	-	0.01	25.9	0.1	0.2	0.30	-	-	-	-
	Q <sub>3</sub>	-	0.03	32.2	0.1	0.3	0.30	-	-	-	-
	Median	-	0.02	31.4	0.1	0.2	0.30	-	-	-	-
	Mean	-	0.02	28.3	0.1	0.2	0.30	-	-	-	-
Soft rock	Q <sub>1</sub>	26.1	17.6	46.0	0.8	29.2	0.21	91.0	4.1	0.9	2.74
	Q <sub>3</sub>	26.3	21.0	51.0	1.7	51.8	0.26	128.7	10.0	0.9	2.77
	Median	26.2	19.0	46.0	1.1	38.1	0.26	99.5	9.0	0.9	2.75
	Mean	26.2	20.3	49.0	1.2	38.2	0.23	99.3	7.3	0.9	2.74
Moderate rock	Q <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Q <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Median	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hard rock	Q <sub>1</sub>	26.1	6.4	51.0	0.6	6.6	0.22	51.0	4.9	0.4	2.68
	Q <sub>3</sub>	26.5	12.6	55.0	3.0	34.2	0.26	56.9	10.7	1.2	2.68
	Median	26.2	8.3	53.0	0.7	18.3	0.24	54.0	7.8	0.4	2.68
	Mean	26.2	9.5	53.3	2.2	24.3	0.25	54.0	8.6	9.4	2.68

### 결론

국내의 107개 국도 터널에서 수행한 각종 시험자료를 수집하여 암종 및 암석 강도의 분류에 따라 암반의 역학적 특성을 분석하고, 분포 범위와 평균값을 산정하였다. 총 4,280개의 자료를 이용하여 10 종류의 역학적 특성을 분석하였다. 분석에 이용된 역학적 특성은 단위중량, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도, 인장강도, 투수계수, 비중이다. 편마암, 화강암, 퇴적암, 화산암, 변성암 등 5개의 암종으로 분류하여 분석을 수행했으며, 동일한 암종에서도 다양한 범위를 보이는 역학적 특성을 고려하기 위해 시험을 수행한 대상 암석의 강도에 따라 풍화암과 연암, 보통암, 경암으로 세분화하여 분석하였다.

1. 암종별 분포 범위에 대한 분석 결과, 편마암은 단위중량(22.0~28.2 kN/m<sup>3</sup>), 화강암은 탄성계수(0.2~58.2 GPa)와 포아송비(0.20~0.31), 퇴적암은 일축압축강도(42.8~204.6 MPa), 인장강도(3.4~17.7 MPa), 투수계수( $0.4 \times 10^{-5}$ ~ $3.8 \times 10^{-5}$  cm/sec), 화산암은 점착력(0.01~27.0 MPa)과 변형계수(2.4~26.5 GPa), 비중(2.54~5.73), 변성암은 내부마찰각(25.9~55.0°)에서 가장 넓은 범위를 보인다.

2. 암석의 강도분류에 따른 범위는 풍화암의 경우 화강암의 투수계수( $4.6 \times 10^{-5}$ ~ $1.6 \times 10^{-4}$  cm/sec), 연암은 퇴적암의 포아송비와(0.17~0.26), 편마암의 단위중량(22.0~26.5 kN/cm<sup>3</sup>), 보통암은 편마암의 비중(2.66~2.78), 경암은 화강암의 인장강도(7.4~26.6 MPa)와 탄성계수(14.2~58.2 GPa), 화산암

의 일축압축강도(48.2~173.6 MPa)와 변형계수(5.4~26.5 GPa), 점착력(0.1~27.0 MPa)과 내부마찰각(39.3~60.0°)에서 가장 넓게 나타났다.

3. 암종에 따른 각 역학적 특성의 평균값 분석 결과, 편마암은 비중(2.71), 화강암은 투수계수( $5.5 \times 10^{-5}$  cm/sec), 퇴적암은 단위중량(26.7 kN/m<sup>3</sup>)과 점착력(11.2 MPa), 내부마찰각(54.9°), 화산암은 변형계수(13.4 GPa)와 탄성계수(45.2 GPa), 일축압축강도(105.6 MPa), 인장강도(14.1 MPa), 변성암은 포아송비(0.26)에서 가장 높은 값을 보인다.

4. 암반의 역학적 특성에 대한 비교분석은 통계적이고 정량적인 결과로서 중요한 참고자료로 활용될 수 있다. 그러나 본 연구의 분석 결과에서 나타났듯이 역학적 특성은 암종 및 강도분류에 따른 세부적인 분석에도 불구하고 다양한 범위 및 평균값을 보이기 때문에 보다 합리적인 설계정수로 활용하기 위해서는 지질학적 생성과정에 대한 이해와 지질 상태 및 절리의 발달정도, 지역, 암석의 생성시기, 심도 등 다양한 변수를 고려한 분석이 필요하다.

### 사사

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

## References

- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons, 251p.
- Bosio, J. J. and Kanji, M. A., 1998, Soft rocks of the Rio de la Plata basin, In: International Symposium on Indurated Soils and Soft Rocks, AGI, Naples, Rotterdam, Balkema, A. A., 65-71.
- Clerici, A., 1993, Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses case histories, Proceedings of the Symposium, Eurock'93, 509-517.
- Kanji, M. A., 2014, Critical issues in soft rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6, 186-195.
- Kim, D. H., Lee, J. H., and Lee, W. J., 2009, Probabilistic distribution and variability of geotechnical properties with randomness characteristic, Journal of The Korean Geotechnical Society, 25(11), 87-103 (in Korean with English abstract).
- Kim, G. W. and Kim, S. J., 2006, Correlation between engineering properties of rocks in Korea, The Journal of Engineering Geology, 16(1), 59-68 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. J., Sin, H. S., Bae, G. J., and Lee, S. H., 2005, Problems and estimation methods of geotechnical parameter for tunnel design in south Korea, Conference of the Korean Society of Engineering Geology, 129-135 (in Korean).
- Lee, K. H. and Yoon, G. L., 2008, Statistical representation methods of ground data, Korean Geotechnical Society Fall National Conference, 85-110 (in Korean with English abstract).
- Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H., 1999, Characterization of geotechnical variability, Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 612-624.
- Singh, B. and Goel, R. K., 1999, Rock mass classification, Elsevier, 250p.

## 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
28644 충북 청주시 서원구 충대로 1  
Tel: 043-261-2765  
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

## 윤현석

충북대학교 지구환경과학과  
28644 충북 청주시 서원구 충대로 1  
Tel: 043-261-2765  
E-mail: yhs0211@hanmail.net

## 김동규

한국건설기술연구원 지반연구소  
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031-910-0238  
E-mail: dkkim2004@kict.re.kr

## 권오일

한국건설기술연구원 지반연구소  
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031-910-0512  
E-mail: kwonoil@kict.re.kr