

## 지질조건에 따른 자연사면 토층의 투수계수 산정모델 제안

전덕찬<sup>1</sup> · 송영석<sup>2\*</sup> · 한신인<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(주)서영엔지니어링 지반터널설계실, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부,

<sup>3</sup>(주)서영엔지니어링 기술연구소

## Proposal of Models to Estimate the Coefficient of Permeability of Soils on the Natural Terrain considering Geological Conditions

Duk-Chan Jun<sup>1</sup>, Young-Suk Song<sup>2\*</sup>, and Shin-In Han<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Geotechnical & Tunneling Division, Seoyeong Engineering Co. Ltd.

<sup>2</sup>Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

<sup>3</sup>R&D Center, Seoyeong Engineering Co. Ltd.

본 연구에서는 10여년 동안 국내 산사태 발생지역 및 인근 미발생지역에서 채취된 자연사면에서의 토층을 대상으로 획득된 약 1,150여개소의 토질시험결과를 토대로 지질조건에 따른 토층의 평균 물성치를 산정하고, 통계적인 분석을 실시하여 지질조건별 투수계수에 대한 간편식을 제안하였다. 투수계수는 화강암지역과 이암지역에서 큰 것으로 나타났으며, 셰립토함유량은 이암지역과 편마암지역에서 큰 것으로 나타났다. 지질조건에 따른 토층의 투수계수를 산정하기 위해서 상관성 분석을 실시한 결과 종속변수를 투수계수로 하고 독립변수를 셰립토함유량, 함수비, 건조단위중량 및 간극비로 선정하였다. 회귀분석결과 지질조건별 제안된 선형회귀식에서는 공통적으로 셰립토함유량 및 간극비가 가장 많이 포함되었다. 제안된 선형회귀식을 검증하기 위하여 타 지역의 토층을 대상으로 수행된 투수계수 측정결과와 선형회귀식으로 예측된 결과를 서로 비교하였다. 비교결과 일부 측정된 결과와 예측된 결과가 차이가 있는 것으로 나타났으나, 그 차이는 비교적 작은 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안된 지질조건별 투수계수 산정을 위한 선형회귀식은 국내 지반을 대상으로 적용이 가능할 것으로 판단되나, 추후 지속적인 검증 및 수정이 필요할 것으로 판단된다.

**주요어** : 지질조건, 자연사면, 투수계수, 선형회귀식, 통계분석

The soil tests have been performed on the specimens obtained from about 1,150 sites including landslides and non-landslides areas in natural terrains for last 10 years. Based on the results of those tests, the average soil properties are estimated and the simple equations for estimating permeability are proposed according to geologic conditions. The average permeability in Granite and Mudstone sites is higher than other sites and the content of silt and clay in Mudstone and Gneiss sites is higher than other sites. The correlation analysis and the regression analysis were performed to estimate the coefficient of permeability according to geological conditions. As the result of the correlation analysis, the coefficient of permeability is selected as a dependent variable, and the silt and clay contents, the water contents and the dry unit weights are selected as independent variables. As the result of the regression analysis, the silt and clay contents and the void ratio were involved commonly in the linear regression equations according to geological conditions. To verify the proposed the linear regression equations, the measured result of the coefficient of permeability at other sites was compared with the result predicted with the proposed equations. As the result of comparison, there were a little bit different between them for some data. However the difference was relatively small. Therefore, the linear regression equations for estimating the coefficient of permeability according to geological conditions may be applied to Korean soils. However, these equations should be verified and corrected continuously to improve the accuracy.

**Keywords** : Geological condition, Natural terrain, Coefficient of permeability, linear regression equation, statistical analysis.

\*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

## 서 론

흙은 입자로 구성되어 있는 물질로서 각개별 입자의 불규칙한 형태로 인하여 입자들 사이의 공간이나 간극을 포함하게 된다. 흙의 입자들은 자갈, 모래, 실트 등과 같이 둥글거나 비교적 정육면체에 가까운 입자들과 점토와 같이 평판형태의 입자들로 구성되어 있으며, 이들 입자를 둘러싸고 있는 간극은 서로 연결되어 있다. 물이나 공기들은 이들 흙 내부의 간극을 통과하여 이동할 수 있으며, 이때 물이 이동하는 속도를 투수계수라고 한다.

이러한 투수계수는 수리학적 조건하에서 지하침투수량을 산정하거나 지하구조물 건설시 지하양수량을 조사하는데 필요하다. 또한 침투력을 받는 흙담이나 사면구조물의 안정성을 해석하는데 매우 중요하다.

우리나라에서의 산사태들은 대부분 암반층 위의 상부토층에서 발생하고 있으므로, 상부토층의 특성을 파악하는 것은 사면의 안정성과 관련하여 매우 중요한 사항이다. 이러한 암반층위의 상부토층은 다양한 지질조건과 풍화 정도에 따라 심도 및 토질특성이 다르게 나타날 것이다(Hutchinson, 1988). 그리고 상부토층은 기반암 상부의 풍화잔류토와 퇴적물질 및 일부 풍화암편으로 구성되는데, 이들 물질들은 산사태가 일어나는 지역의 지질과 연관성을 가지며, 풍화잔류토나 퇴적물질들은 산사태 지역의 암석 풍화에 의하여 생성되므로 암석을 구성하고 있는 광물성분에 따라 토질특성이 다르게 나타난다(김원영 외, 1998; 김경수 외, 2000, 김경수, 2007). 그러므로 산사태의 발생을 예측할 경우에도 지질조건을 고려하여 수행되어야 할 것이다(채병곤 외, 2004; 송영석 외, 2007).

10여년 동안 국내 산사태 발생지역 및 인근 미발생지역에서 채취된 자연사면에서의 토층을 대상으로 획득된 약 1,150여개소의 토질시험 결과를 토대로 지질조건에 따른 토층의 투수계수, 세립토함유량, 함수비, 건조단위중량, 간극비 등을 구하고자 한다. 그리고 이들 토질시험결과에 대한 기초적 통계분석과 상관성 분석을 실시하여 지질조건별 투수계수에 대한 간편식을 제안하고자 한다.

### 시료채취 및 토질시험

자연사면을 구성하고 있는 물질들 중 암반의 상부에 위치한 토층의 여러가지 물리적 특성과 공학적 특성을 이해하기 위해서는 현장이나 실내에서 수행한 토질시험 결과가 필요하다. 토층에서 발생하는 급경사지재해들은 그 사면을 구성하고 있는 토층물질의 토질특성과 직접적으로 관계가

있으며, 특히, 우리나라와 같이 주로 집중호우에 의해 발생하는 급경사지재해들의 경우 토층의 기본적인 물리적 특성 외에 간극이나 밀도, 투수성 및 전단강도와 같은 공학적 특성과 관련되므로 이들에 대한 시험방법과 그 결과들의 적용방법 등을 이해하는 것은 매우 중요한 사항이다.

토층시료는 표토를 제거한 후 40-60 cm 깊이에서 교란 및 불교란시료를 각각 채취하였다. 교란시료는 비닐팩을 이용하여 채취하였으며, 불교란시료는 스테인레스(stainless)로 제작한 직경 10 cm, 높이 6 cm 크기의 원통형 몰드(ring sampler) 및 상하부 캡을 이용하였다. 특히, 투수시험용 불교란시료는 직경 10 cm, 높이 13 cm 크기의 원통형 몰드를 사용하여 채취하였다. 한편, 모든 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실로 운반하여 실내토질시험에 이용되었다. Fig. 1은 원통형 몰드를 이용하여 시료를 채취하는 모습을 나타낸 것이다.

실내토질시험은 현장으로부터 운반된 토층시료를 대상으로 변수위 투수시험, 입도분석시험, 함수비시험, 비중시험, 밀도시험 등을 실시하였으며, 시험방법은 모두 한국산업규격(KS)에 준하여 시험하였다. 이들 시험결과를 이용하여, 투수계수, 세립토함유량, 함수비, 건조단위중량 및 간극비를 산정하였다. 투수계수를 산정하기 위하여 불교란 시료를 채취하여 실내에서 변수위 투수시험을 실시하였다.

### 지질조건별 투수계수의 대표치 선정

본 연구에서는 최근 10여 년 동안 국내 산사태 발생지역 및 미발생지역에서 채취된 자연사면에서의 토층을 대상으로 획득된 약 1,150여개소의 토질시험 결과를 토대로 지질조건에 따른 토층의 투수계수, 세립토함유량, 함수비, 건조단위중량, 간극비 등을 구하였다. Table 1은 지질조건



Fig. 1. Soil sampling method.

**Table 1.** Data according to geological condition.

	Geological condition							total
	granite	gneiss	tuff	mudstone	sed. rocks	gabbro	schist	
landslides	516(52%)	183(18%)	217(22%)	40(4%)	36(4%)	-	3(0%)	995(100%)
non-landslides	46(29%)	48(30%)	2(1%)	37(23%)	-	24(15%)	3(2%)	160(100%)
total	562(49%)	231(20%)	219(19%)	77(7%)	36(3%)	24(2%)	6(1%)	1155(100%)

에 따른 토질시험 결과에 대한 자료 분포를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 지질조건은 화강암(Granite), 편마암(Gneiss), 응회암(Tuff), 이암(Mudstone), 반력암(Gabbro), 퇴적암류(Sedimentary rocks), 편암(Schist)으로 구분하였다. 화강암의 경우 562개소에서의 토질시험결과를 이용하였으며, 편마암의 경우 231개소, 응회암의 경우 219개소, 이암의 경우 77개소, 퇴적암류의 경우 36개소, 반력암의 경우 24개소, 편암의 경우 6개소에서의 토질시험결과를 이용하였다. 편암의 경우 통계적인 자료 분석에 활용하기에는 자료의 수가 너무 적어 적절하지 못하다. 따

라서 편암의 경우를 제외한 6개의 지질조건을 대상으로 자료 분석을 실시하였다.

Table 2는 투수계수, 세립토함유량, 함수비, 건조단위 중량 및 간극비에 대한 기초통계량 분석결과이다. 각각의 토질정수에 대한 기초통계량 결과를 토대로 각 지질조건별 토질정수의 대표치를 선정할 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 산사태 미발생지역에서의 화강암지역의 투수계수는  $7.9 \times 10^{-5}$ - $3.1 \times 10^0$  cm/sec, 편마암지역의 투수계수는  $6.3 \times 10^{-5}$ - $9.8 \times 10^{-2}$  cm/sec, 응회암지역의 투수계수는  $8.1 \times 10^{-5}$ - $2.3 \times 10^{-1}$  cm/sec, 이암지역의 투수계수는

**Table 2.** Basic statistical analysis result of major factors.

contents	coefficient of permeability(cm/sec)		silt and clay contents(%)		water contents (%)		dry unit weight (t/m <sup>3</sup> )		void ratio		
	non-occur.	occur-rence	non-occur.	occur-rence	non-occur.	occur-rence	non-occur.	occur-rence	non-occur.	occur-rence	
granite	N	513	45	500	28	500	27	513	45	497	27
	mean	2.2E-1	2.4E-1	5.63	7.76	19.53	16.16	1.35	1.32	0.96	1.08
	median	7.5E-3	7.6E-3	4.87	5.75	18.26	15.86	1.37	1.33	0.90	0.97
	standard deviation	1.4E-1	9.6E-1	3.78	6.69	7.66	5.55	0.15	0.08	0.25	0.45
	min.value	7.9E-5	3.0E-6	0.33	0.73	4.87	8.23	0.86	1.15	0.46	0.71
	max.value	3.1E+0	6.3E+0	27.83	32.56	54.87	31.84	1.78	1.55	2.22	3.21
gneiss	N	183	46	156	20	183	48	183	46	183	46
	mean	2.0E-2	3.5E-3	5.45	13.39	21.65	18.30	1.29	1.31	1.09	1.05
	median	1.0E-2	2.3E-4	4.67	7.70	19.93	18.72	1.30	1.33	1.04	1.02
	standard deviation	2.4E-2	9.8E-3	4.53	11.52	8.30	5.24	0.17	0.14	0.28	0.23
	min.value	6.3E-5	2.0E-6	0.37	2.78	6.86	8.72	0.99	1.03	0.55	0.70
	max.value	9.8E-2	6.0E-2	28.51	40.46	45.71	33.47	1.72	1.58	1.64	1.57
tuff	N	214	2	217	-	215	-	214	2	214	-
	mean	1.0E-2	2.1E-3	8.80	-	26.98	-	1.25	1.18	1.14	-
	median	5.4E-3	2.1E-3	8.00	-	26.17	-	1.25	1.18	1.10	-
	standard deviation	2.0E-2	1.0E-3	4.60	-	8.12	-	0.15	0.14	0.29	-
	min.value	8.1E-5	1.3E-3	1.45	-	10.20	-	0.65	1.08	0.60	-
	max.value	2.3E-1	2.8E-3	28.85	-	72.6	-	1.62	1.29	2.96	-
mud-stone	N	40	37	19	5	19	4	40	37	19	4
	mean	3.1E-1	9.0E-2	10.77	11.62	25.75	36.36	1.20	1.11	1.20	1.61
	median	8.5E-3	3.2E-3	9.38	12.35	25.20	37.61	1.20	1.12	1.24	1.74
	standard deviation	6.1E-1	3.5E-1	5.16	2.17	6.77	11.79	0.14	0.93	0.34	4.78
	min.value	8.6E-4	4.8E-4	4.22	8.42	11.30	21.83	0.86	0.84	0.60	0.98
	max.value	2.5E+0	1.9E+0	22.00	14.03	36.78	48.41	1.62	1.32	1.91	2.00

Table 2. Continued.

contents	coefficient of permeability(cm/sec)		silt and clay contents(%)		water contents (%)		dry unit weight (t/m <sup>3</sup> )		void ratio		
	non-occur.	occurrence	non-occur.	occurrence	non-occur.	occurrence	non-occur.	occurrence	non-occur.	occurrence	
sed. rocks	N	36	-	36	-	36	-	36	-	36	-
	mean	1.0E-2	-	10.32	-	27.45	-	1.27	-	1.12	-
	median	3.7E-3	-	8.89	-	29.04	-	1.28	-	1.05	-
	standard deviation	2.0E-2	-	6.16	-	9.47	-	0.15	-	0.29	-
	min.value	1.0E-4	-	2.15	-	9.60	-	0.83	-	0.65	-
	max.value	1.3E-1	-	21.80	-	45.33	-	1.59	-	2.18	-
gabbro	N	-	24	-	24	-	24	-	24	-	24
	mean	-	3.0E-2	-	7.03	-	37.55	-	1.18	-	1.35
	median	-	1.7E-2	-	7.06	-	38.06	-	1.16	-	1.38
	standard deviation	-	5.0E-2	-	2.99	-	9.17	-	0.15	-	0.30
	min.value	-	7.1E-4	-	2.14	-	23.15	-	0.94	-	0.83
	max.value	-	2.4E-1	-	14.17	-	53.21	-	1.48	-	1.97

8.6 × 10<sup>-4</sup>-2.5 × 10<sup>0</sup> cm/sec, 퇴적암류지역의 투수계수는 1.0 × 10<sup>-4</sup>-1.3 × 10<sup>-1</sup> cm/sec의 범위인 것으로 나타났다. 그리고 산사태 발생지역에서의 화강암지역의 투수계수는 3.0 × 10<sup>-6</sup>-6.3 × 10<sup>0</sup> cm/sec, 편마암지역의 투수계수는 2.0 × 10<sup>-6</sup>-6.0 × 10<sup>-2</sup> cm/sec, 응회암지역의 투수계수는 1.3 × 10<sup>-3</sup>-2.8 × 10<sup>-3</sup> cm/sec, 이암지역의 투수계수는 4.8 × 10<sup>-4</sup>-1.9 × 10<sup>0</sup> cm/sec, 반려암지역의 투수계수는 7.1 × 10<sup>-4</sup>-2.4 × 10<sup>-1</sup> cm/sec의 범위인 것으로 나타났다. 이들 결과를 살펴보면 지질조건에 따라 차이는 있으나 화강암, 편마암 및 응회암지역의 투수계수 범위는 산사태 발생지역과 미발생지역에서 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

다른 암종들과 비교하여 투수계수는 화강암지역과 이암 지역에서 큰 것으로 나타났으며, 세립토함유량은 이암 지역과 편마암지역에서 큰 것으로 나타났다. 그리고 평균적으로 함수비는 약 20%에서 40%범위에 있고, 건조단위 중량은 1.1 t/m<sup>3</sup>에서 1.3 t/m<sup>3</sup>범위에 있으며, 간극비는 주로 1.0에서 1.2정도인 것으로 나타났다.

**지질조건별 투수계수 산정 회귀모델식 제안**

일반적으로 흙의 투수계수를 결정하는 데는 정수위투수시험과 변수위투수시험의 두가지 표준실내시험법이 이용된다. 그러나 이 두가지 투수시험을 실행하기 위해서는 수시간에서 수일의 시간이 소요되기도 한다. 이들 방법은 정확성, 효율성 및 경제성 등에서 각각 장단점을 가지고

있기 때문에 어떠한 방법으로 투수계수를 산정하는 것은 실제의 활용도와 구조물의 중요도에 따라 선택되어야 할 사항이다.

투수계수를 산정하는 몇가지 경험식으로는 Hazen(1930), Taylor(1948), Kozney and Carman(1956), Amer and Awad(1974), Samarasinghe et al.(1982) 등이 있다. 이들은 주로 유효입경, 간극비, 균등계수 등을 활용하여 경험식을 제안하였다.

본 연구에서는 투수계수에 영향을 주는 몇가지 토질물성치를 이용하여 토층의 투수계수를 쉽고 효과적으로 산정할 수 있는 투수계수 산정모델을 개발하고자 한다. 산사태 발생지역과 미발생지역에서의 투수계수 실험결과를 모두 통합하여 자연사면의 토층에서 지질조건에 따른 투수계수 산정모델을 제안하고자 한다.

**모델 선정**

지질조건에 따른 토층의 투수계수를 간편하게 산정하기 위해서 회귀분석을 실시하여 투수계수 산정식을 제안하고자 한다. Table 3은 투수계수 산정식을 제안하기 위한

Table 3. Statistical model for estimating the coefficient of permeability.

dependent variable	k (permeability)
independent variables	F (silt and clay contents)
	ω (moisture contents)
	γ <sub>d</sub> (dry unit weight)
	e (void ratio)

통계적인 모델을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 종속변수를 투수계수로 하고 독립변수를 세립토함유량, 함수비, 건조단위중량 및 간극비로 하였다. 독립변수들을 이용하여 종속변수인 투수계수를 산정할 수 있는 회귀식을 도출하고자 한다.

**지질조건별 회귀분석**

투수계수 산정을 위한 통계적 모델에 대한 지질조건별 유효관측치는 Table 4와 같다. 지질조건별 유효관측치는 모든 지질조건에 대한 유효관측치의 수가 적당하므로 회귀분석이 가능한 것으로 나타났다.

**화강암**

화강암에 대한 유효관측치를 토대로 단계선택법(stepwise)을 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 세립토함유량은 유의하지 않으므로 통계적 모델에서 제외하였다. 화강암의 투수계수에 대한 회귀분석결과는 Table 5와 같다.

투수계수 산정을 위하여 선택된 간극비, 건조단위중량 및 함수비의 추정된 회귀계수를 살펴보면, 유의확률 값이 유의수준 5%이하이므로 통계적으로 유의하며, 공차한계가 0.1보다 크고, 분산팽창계수(VIF)값이 10보다 작으므로

**Table 4.** Effective data according to geological condition.

geology	total	effective data	missing data
granite	562	524	38
gneiss	231	174	57
tuff	219	214	5
mudstone	77	23	54
sedimentary rocks	36	36	-
gabbro	24	24	-

**Table 5.** Regression analysis result of granite.

predicted value	non-standardized coefficient		stand. coef.	t-value	significance prob.	collinearity	
	b	standard deviation	beta			tolerance limit	VIF
constant	-5.923	.276		-21.439	.000		
e	2.106	.083	1.787	25.513	.000	.172	5.806
$\gamma_d$	3.011	.146	1.480	20.574	.000	.163	6.126
$\omega$	-.007	.002	-1.179	-4.965	.000	.649	1.540

**Table 6.** Result of fitness to the regression analysis model of granite.

contents	sum of squares	degree of freedom	mean square	F-value	significance probability
linear regression analysis	29.679	3	9.893	221.196	.000
residual	23.257	520	.045		
total	52.936	523			

다중공선성이 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 화강암의 경우 투수계수 산정을 위하여 간극비, 건조단위중량 및 함수비로 최종적인 회귀식을 만들 수 있다. 선택되어진 변수들로 만들어진 회귀식에 대한 모형적합결과는 Table 6과 같다.

모형적합결과를 살펴보게 되면 유의수준 5%이하에서 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 간극비, 건조단위중량 및 함수비로 이루어진 선형회귀식은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

선형회귀식의 설명력은 Table 7과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 간극비, 건조단위중량 및 함수비로 이루어진 선형회귀식의 설명력 56.1%이다.

따라서 최종적인 회귀식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 선형회귀식은 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

$$k_{(Granite)} = -5.923 + 2.106 \cdot e + 3.011 \cdot \gamma_d - 0.007 \cdot \omega \quad (1)$$

**편마암**

편마암에 대한 유효관측치를 토대로 단계선택법을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 함수비는 유의하지 않으므로 통계적 모델에서 제외하였다. 또한 간극비 및 건조단위중량에 대해서는 다중공선성이 발생하므로 두 변수를 각각 제거하고 결정계수 값을 비교하여 더 큰 값을 가지는 모형을 선택하였다. 따라서, 건조단위중량(dry unit weight)을 제외하고 간극비와 세립토함유량으로 구성된 최종 모형을

**Table 7.** Explanatory to the linear regressive equation of granite.

R	R-square	corrected R-square
.749	.561	.558

**Table 8.** Regression analysis result of gneiss.

predicted value	non-standardized coefficient		stand. coef.	t-value	significance prob.	collinearity	
	b	standard deviation	beta			tolerance limit	VIF
constant	-.020	.006		-3.502	.000		
e	.047	.005	.544	9.688	.000	.998	1.002
F	-.002	.000	-.384	-6.848	.000	.998	1.002

**Table 9.** Result of fitness to the regression analysis model of gneiss.

contents	sum of squares	degree of freedom	mean square	F-value	significance probability
linear regression analysis	.050	2	.025	73.485	.000
residual	.058	171	.000		
total	.108	173			

선택하였다. 최종 모형에 선택된 변수들은 Table 8과 같이 나타낼 수 있다.

투수계수 산정을 위하여 선택된 간극비와 세립토함유량의 추정된 회귀계수를 살펴보면, 유의확률 값이 유의수준 5%이하이므로 통계적으로 유의하며, 공차한계가 0.1보다 크고, 분산팽창계수(VIF)값이 10보다 작으므로 다중공선성 또한 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 편마암의 경우 투수계수 산정을 위하여 간극비, 세립토함유량으로 최종적인 회귀식을 만들 수 있다. 선택되어진 변수들로 만들어진 회귀식에 대한 모형적합결과는 Table 9와 같다.

모형적합결과를 살펴보게 되면 유의수준 5% 하에서 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 간극비, 세립토함유량으로 이루어진 선형회귀식은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

선형회귀식의 설명력은 Table 10과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 간극비와 세립토함유량으로 이루어진 선형회귀식의 설명력은 46.2%이다.

따라서 최종적인 회귀식은 식 (2)와 같이 나타낼 수

**Table 10.** Explanatory to the linear regressive equation of gneiss.

R	R-square	corrected R-square
.680	.462	.456

**Table 11.** Regression analysis result of tuff.

predicted value	non-standardized coefficient		stand. coef.	t-value	significance prob.	collinearity	
	b	standard deviation	beta			tolerance limit	VIF
constant	.063	.012		5.155	.000		
F	-.002	.000	-.355	-5.371	.000	.939	1.065
$\gamma_d$	-.030	.009	-.222	-3.364	.001	.939	1.065

있으며, 이 선형회귀식은 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

$$k_{(Gneiss)} = -0.020 + 0.047 \cdot e - 0.002 \cdot F \quad (2)$$

### 응회암

응회암에 대해 유효관측치를 토대로 단계선택법을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 함수비와 간극비는 유의하지 않는 것으로 분석되어 통계적 모델에서 제외하였다. 최종 모형의 선택된 변수들은 Table 11과 같이 나타낼 수 있다.

투수계수 산정을 위하여 선택된 세립토함유량과 건조단위중량의 추정된 회귀계수를 살펴보면 유의확률 값이 유의수준 5% 하에서 통계적으로 유의하고, 공차한계가 0.1보다 크고, 분산팽창계수(VIF)값이 10보다 작으므로 다중공선성이 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 응회암의 경우 투수계수 산정을 위하여 세립토함유량, 건조단위중량으로 최종적인 회귀식을 만들 수 있다. 선택되어진 변수들로 만들어진 회귀식에 대한 모형적합결과는 Table 12와 같다.

모형적합결과를 살펴보게 되면 유의수준 5% 하에서 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 세립토함유량, 건조단위중량으로 이루어진 선형회귀식은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

선형회귀식의 설명력은 Table 13과 같이 나타낼 수 있

**Table 12.** Result of fitness to the regression analysis model of tuff.

contents	sum of squares	degree of freedom	mean square	F-value	significance probability
linear regression analysis	.013	2	.006	16.630	.000
residual	.080	211	.000		
total	.093	213			

다. 표에서 보는 바와 같이 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 세립토함유량과 건조단위중량으로 이루어진 회귀식의 설명력은 13.6%라고 말할 수 있다.

따라서 최종적인 회귀식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 선형회귀식은 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

$$k_{(tuff)} = 0.063 - 0.002 \cdot F - 0.030 \cdot \gamma_d \quad (2)$$

**이암**

응회암에 대해 유평관측치를 토대로 단계선택법을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 함수비와 건조단위중량 유의하지 않는 것으로 분석되어 통계적 모델에서 제외하였다. 최종 모형의 선택된 변수들은 Table 14와 같이 나타낼 수 있다.

투수계수 산정을 위하여 선택된 간극비와 세립토함유량의 추정된 회귀계수를 살펴보면 유의확률 값이 유의수준 5% 이하이므로 통계적으로 유의하고, 공차한계가 0.1보다 크고, 분산팽창계수(VIF)값이 10보다 작으므로 다중공선성은 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 이암의 경우 투수계수 산정을 위하여 간극비, 세립토함유량으로 최종적인

**Table 13.** Explanatory to the linear regressive equation of tuff.

R	R-square	corrected R-square
.369	.136	.128

**Table 14.** Regression analysis result of mudstone.

predicted value	non-standardized coefficient			t-value	significance prob.	collinearity	
	b	standard deviation	beta			tolerance limit	VIF
constant	.011	.399		.027	.979		
e	1.173	.223	.609	5.271	.000	.921	1.085
F	-.075	.018	-.471	-4.077	.001	.921	1.085

**Table 15.** Result of fitness to the regression analysis model of mud stone.

contents	sum of squares	degree of freedom	mean square	F-value	significance probability
linear regression analysis	20.537	2	10.269	69.184	.000
residual	3.117	21	.148		
total	23.654	23			

회귀식을 만들 수 있다. 선택되어진 변수들로 만들어진 회귀식에 대한 모형적합결과는 Table 15와 같다.

모형적합결과를 살펴보게 되면 유의수준 5% 하에서 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 간극비, 세립토함유량으로 이루어진 선형회귀식은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

선형회귀식의 설명력은 Table 16과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 간극비와 세립토함유량으로 이루어진 회귀식의 설명력은 75.4%라고 말할 수 있다.

따라서 최종적인 회귀식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 선형회귀식은 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

$$k_{(mud\ stone)} = 0.011 + 1.173 \cdot e - 0.075 \cdot F \quad (4)$$

**퇴적암류**

퇴적암류에 대해 유평관측치를 토대로 단계선택법을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 함수비와 건조단위중량 유의하지 않는 것으로 분석되어 통계적 모델에서 제외하였다. 최종 모형의 선택된 변수들은 Table 17과 같이 나타낼 수 있다.

**Table 16.** Explanatory to the linear regressive equation of mud stone.

R	R-square	corrected R-square
.868	.754	.729

**Table 17.** Regression analysis result of sedimentary rocks.

predicted value	non-standardized coefficient		stand. coef.	t-value	significance prob.	collinearity	
	b	standard deviation	beta			tolerance limit	VIF
constant	.007	.018		.371	.713		
F	-.002	.001	-.488	-3.449	.002	.994	1.006
e	.029	.014	.292	2.068	.047	.994	1.006

투수계수 산정을 위하여 선택된 간극비와 세립토함유량의 추정된 회귀계수를 살펴보면 유의확률 값이 유의수준 5%이하이므로 통계적으로 유의하고, 공차한계가 0.1보다 크고, 분산팽창계수(VIF)값이 10보다 작으므로 다중공선성은 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 퇴적암류의 경우 투수계수 산정을 위하여 세립토함유량, 간극비로 최종적인 회귀식을 만들 수 있다. 선택되어진 변수들로 만들어진 회귀식에 대한 모형적합결과는 Table 18과 같다.

모형적합결과를 살펴보게 되면 유의수준이 5%이하이므로 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 세립토함유량, 간극비로 이루어진 선형회귀식은 통계적으로 유의하다고 볼 수 있다.

선형회귀식의 설명력은 Table 19와 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 종속변위인 투수계수를 설명함에 있어 간극비와 세립토함유량으로 이루어진 회귀식의 설명력은 34.5%라고 말할 수 있다. 따라서 최종적인 회귀식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 선형회귀식은 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

$$k_{(Sed,rock)} = 0.007 - 0.002 \cdot e + 0.029 \cdot F \quad (5)$$

**Table 19.** Explanatory to the linear regressive equation of sedimentary rocks.

R	R-square	corrected R-square
.587	.345	.305

**Table 18.** Result of fitness to the regression analysis model of sedimentary rocks.

contents	sum of squares	degree of freedom	mean square	F-value	significance probability
linear regression analysis	.018	2	.009	16.114	.000
residual	.019	34	.001		
total	.038	36			

**Table 20.** Regression analysis result of gabbro.

predicted value	non-standardized coefficient		stand. coef.	t-value	significance prob.	collinearity	
	b	standard deviation	beta			tolerance limit	VIF
constant	.108	.022		4.885	.000		
F	-.011	.003	-.614	-3.653	.001	1.000	1.000

### 반려암

퇴적암류에 대해 유표관측치를 토대로 단계선택법을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 함수비, 건조단위중량 및 간극비가 유의하지 않는 것으로 분석되어 통계적 모델에서 제외하였다. 최종 모형의 선택된 변수들은 Table 20과 같이 나타낼 수 있다.

투수계수 산정을 위하여 선택된 세립토함유량에 대한 추정된 회귀계수를 살펴보면 유의확률 값이 유의수준 5%이하이므로 통계적으로 유의하고, 공차한계가 0.1보다 크고, 분산팽창계수(VIF)값이 10보다 작으므로 다중공선성은 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 반려암의 경우 투수계수 산정을 위하여 세립토함유량으로 최종적인 회귀식을 만들 수 있다. 선택되어진 변수들로 만들어진 회귀식에 대한 모형적합결과는 Table 21과 같다.

모형적합결과를 살펴보게 되면 유의수준이 5%이하이므로 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어서 세립토함유량으로 이루어진 선형회귀식은 통계적으로 유의하다고

**Table 21.** Result of fitness to the regression analysis model of gabbro.

contents	sum of squares	degree of freedom	mean square	F-value	significance probability
linear regression analysis	.023	1	.023	13.347	.001
residual	.038	22	.002		
total	.061	23			

**Table 22.** Explanatory to the linear regressive equation of granite.

R	R-square	corrected R-square
.614	.378	.349

볼 수 있다.

선형회귀식의 설명력은 Table 22와 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 세립토함유량으로 이루어진 회귀식의 설명력은 37.8%라고 말할 수 있다. 따라서 최종적인 회귀식은 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 선형회귀식은 종속변수인 투수계수를 설명함에 있어 통계적으로 유의하다고 할 수 있다.

$$k_{(Gabbro)} = 0.108 - 0.011 \cdot F \tag{6}$$

**회귀분석 결과**

Table 21은 회귀분석을 통하여 선정된 선형회귀식에 대한 결과를 요약한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 선형회귀식에 공통적으로 세립토함유량 및 간극비가 가장 많이 포함되는 것을 알 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 모든 선형회귀식은 유의한 것으로 나타났고, 응회암에 대한 선형회귀식의 설명력이 제일 낮은 것으로 나타났으며, 이암에 대한 선형회귀식이 설명력이 제일 높은 것으로 나타났다.

베타계수란 종속변수에 대한 독립변수의 민감도를 나타내는 것으로 베타계수가 높다는 것은 종속변수에 영향을 많이 미친다는 의미이다. Table 23은 지질조건별 선택된 독립변수들의 베타계수를 나타낸 것이다. 선택된 독립변수들의 베타계수를 살펴보면 각각의 지질조건에서 간극비가 종속변수인 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 투수계수에 대한 경험식 산정시 간극비는 가장 중요한 변수임을 확인할 수 있다.

**Table 23.** Beta coefficients of linear regressive equations according to geological conditions.

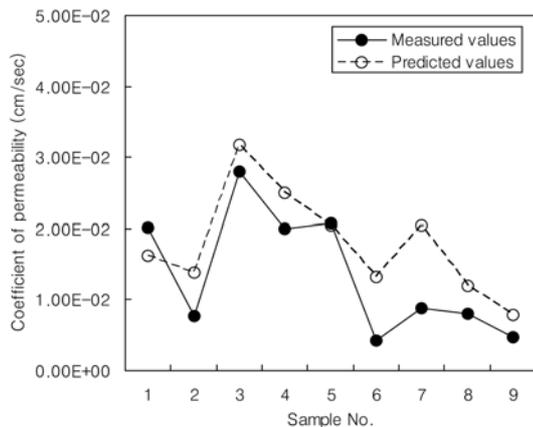
Geology	data	selected variables			
		F	e	$\gamma_d$	$\omega$
Granite	524	-	1.787 (1)	1.480 (2)	-0.179 (3)
Gneiss	174	-0.384 (2)	0.544 (1)	-	-
Tuff	214	-0.355 (2)	-	-0.222 (1)	-
Mudstone	23	-0.471 (2)	0.609 (1)	-	-
Sedi. rock	36	-0.488 (2)	0.292 (1)	-	-
Gabbro	24	-0.614 (1)	-	-	-

( ) : ranks of beta coefficient to the selected variables.

**제안된 선형회귀식의 검증**

본 연구에서 제안된 선형회귀식을 검증하기 위하여 기존에 수행된 투수계수 측정결과와 제안된 선형회귀식으로 예측된 결과를 서로 비교하였다. 본 연구에서는 화강암 풍화토 및 편마암 풍화토를 대상으로 실제 측정된 투수계수를 활용하였다(송영석 등, 2009). 본 검증에 활용된 투수계수는 본 선형회귀식의 산정에 활용되지 않은 자료이다. 화강암 풍화토는 강원도 횡성군 우천면 하대리 일대에서 채취된 것으로, 입도가 양호 혹은 불량한 모래로 이루어져 있다. 대상지역 토층의 비중은 2.49-2.67의 범위에 있으며, 평균 2.62인 것으로 나타났다. 대상지역 토층시료의 투수계수는  $4.27 \times 10^{-3}$ - $2.80 \times 10^{-2}$  cm/sec 범위에 평균  $1.47 \times 10^{-2}$  cm/sec의 값을 갖는다. 한편, 편마암 풍화토는 전남 무안군 일로읍 월암리 일대에서 채취된 것으로, 입도가 양호 혹은 불량한 모래로 이루어져 있다. 대상지역 토층의 비중은 2.64-2.70의 범위에 있으며, 평균 2.67인 것으로 나타났다. 대상지역 토층시료의 투수계수는  $3.77 \times 10^{-4}$ - $3.71 \times 10^{-2}$  cm/sec 범위에 평균  $6.94 \times 10^{-3}$  cm/sec의 값을 갖는다.

Fig. 2는 화강암 풍화토에 대한 투수계수 측정결과와 화강암에서의 선형회귀식을 이용하여 예측한 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 측정된 결과와 예측된 결과는 매우 유사한 것으로 나타났다. 한편 Fig. 3은 편마암 풍화토에 대한 투수계수 측정결과와 편마암에서의 선형회귀식을 이용하여 예측한 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일부 측정된 결과와 예측된 결과가 차이가 있는 것으로 나타났으나, 그 차이는 비교적



**Fig. 2.** Comparison between measured and predicted values to the weathered soils from granite.

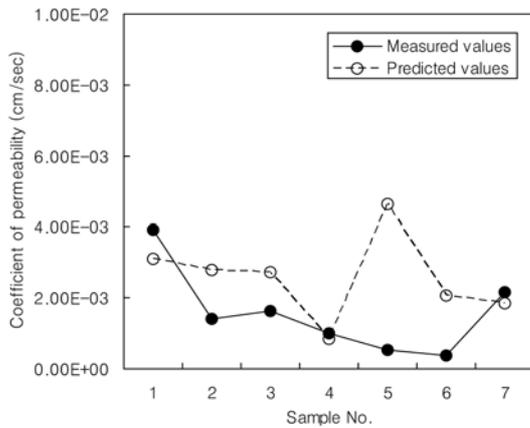


Fig. 3. Comparison between measured and predicted values to the weathered soils from gneiss.

작은 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제안된 지질 조건별 투수계수 산정을 위한 선형회귀식은 국내 지반을 대상으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 요약 및 결론

본 연구에서는 10여년 동안 국내 산사태 발생지역 및 인근 미발생지역에서 채취된 자연사면에서의 토층을 대상으로 획득된 약 1,150여개소의 토질시험결과를 토대로 지질조건에 따른 토층의 평균 물성치를 산정하고, 기초적 통계분석과 상관성 분석을 실시하여 지질조건별 투수계수에 대한 간편식을 제안하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 동일한 지질조건에서의 투수계수는 산사태 발생지역보다 산사태 미발생지역에서 약간 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 다른 암종들과 비교한 결과 투수계수는 화강암지역과 이암지역에서 큰 것으로 나타났으며, 세립토 함유량은 이암지역과 편마암지역에서 큰 것으로 나타났다.

(2) 지질조건에 따른 토층의 투수계수를 산정하기 위해서 상관성 분석을 실시한 결과 종속변수를 투수계수로 하고 독립변수를 세립토함유량, 함수비, 건조단위중량 및 간극비로 선정하였다.

(3) 투수계수 산정을 위한 회귀분석결과 지질조건별 제안된 선형회귀식에서는 공통적으로 세립토함유량 및 간극비가 가장 많이 포함되어 있으며, 이암에 대한 선형회귀식의 설명력이 제일 높은 것으로 나타났다.

(4) 제안된 선형회귀식을 검증하기 위하여 타 지역의 토층을 대상으로 수행된 투수계수 측정결과와 선형회귀식

으로 예측된 결과를 서로 비교하였다. 비교결과 일부 측정된 결과와 예측된 결과가 차이가 있는 것으로 나타났으나, 그 차이는 비교적 작은 것으로 나타났다.

(5) 본 연구에서 제안된 지질조건별 투수계수 산정을 위한 선형회귀식은 국내 지반을 대상으로 적용이 가능할 것으로 판단되나, 추후 지속적인 검증 및 수정이 필요하다.

### 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 그리고 통계분석을 도와주신 충북대학교 나종화 교수님께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 김경수, 2007, 부산지역 자연사면의 지질조건에 따른 토질특성, 지질공학, 17(3), 471-481.
- 김경수, 김원영, 채병근, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 지질공학, 10(2), 163-174.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병근, 1998, 지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천-철원지역을 대상으로-, 지질공학, 8(2), 115-130.
- 송영석, 김경수, 채병근, 2007, 자연사면의 산사태 발생 지역에서 지질조건에 따른 토질특성, 중앙대학교 방재연구소 논문집, 1, 43-49.
- 송영석, 조용찬, 서용석, 안상로, 2009, 의사결정나무모형을 이용한 급경사지재해 예측프로그램 개발 및 적용, 대한토목학회논문집, 29(2C), 59-69.
- 채병근, 김원영, 조용찬, 김경수, 이춘우, 최영섭, 2004, 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모형 개발, 지질공학, 14(2), 211-222.
- Amer, A.M. and Awad, A. A., 1974 Permeability of cohesive soils, Journal of the Geotechnical engineering division, ASCE, 100(GT12), 1309-1306
- Hazen, A., 1930, American Engineering Handbook, Wiley, New York, 1446p.
- Huchinson, J. N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, In Landslides, Proc. 5th. Int. Symp. on Landslides, 1, 3-35.
- Kozeny, J.S. and Carmen, P.E., 1956, Flow of gases through porous media, Academic, New York.
- Samarasinghe, A.M., Huang, Y.H. and Drnevich, V. P., 1982, Permeability and consolidation of normally consolidated soils, Journal of the Geotechnical engineering division, ASCE, 108(GT6), 835-850.
- Taylor, D. W., 1948, Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.

**전덕찬**

(주)서영엔지니어링 지반터널설계실  
137-739 서울특별시 서초구 양재동 275-7 트러스트타워  
Tel: 02-589-4170  
Fax: 02-589-4994  
E-mail: dcjun@seoyeong.co.kr

**한신인**

(주)서영엔지니어링 기술연구소  
135-240 서울특별시 강남구 개포동 14-4  
Tel: 02-6915-7296  
Fax: 02-6915-7009  
E-mail: sihan@seoyeong.co.kr

**송영석**

한국지질자원연구원 지구환경연구본부  
350-305 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3035  
Fax: 042-868-3414  
E-mail : yssong@kigam.re.kr