

단순회귀분석에 의한 토층의 투수계수산정모델 제안

이문세¹ · 류제천² · 임희대¹ · 박주환³ · 김경수^{4*}

¹충남대학교 토목공학과, ²충청대학 건설교통과

³대전광역시 서부교육청 시설과, ⁴한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Proposal for the Estimation Model of Coefficient of Permeability of Soil Layer using Linear Regression Analysis

Moon-Se Lee¹, Je-Cheon Ryu², Heui-Dae Lim¹, Joo-Whan Park³, and Kyeong-Su Kim^{4*}

¹Dept. of Civil Engineering., Chungnam National University

²Dept. of Civil & Transportation Engineering., Chung Cheong University|

³Facilities Div., Daejeon Seobu District Office of Education

⁴Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

이 연구는 토질특성을 평가하는 주요 영향인자인 투수계수를 몇 가지 토질물성만으로 쉽게 산정할 수 있도록 단순회귀 분석을 이용하여 투수계수산정모델을 개발하였다. 이를 위한 연구지역은 강원도 평창군 진부면지역으로 총 45개 지점에서 토층시료를 채취하여 실내에서 여러 토질시험을 실시하였다. 상관분석을 통해 시험결과들 중 투수계수에 유효한 토질인자를 선별한 후 선별된 인자들과 직접투수시험에 의한 투수계수간의 관계를 단순회귀분석으로 공식화한 투수계수산정모델을 개발하였다. 또한, 개발된 투수계수산정모델과 직접투수시험 및 각 경험식들에 의한 투수계수를 비교분석하여 모델의 적합성을 검증하였다. SPSS(statistical package for the social sciences)를 이용하여 여러 토질물성과 투수계수간의 상관관계를 분석한 결과 유효경, 간극비, 건조단위중량이 투수계수에 가장 크게 영향을 미치는 토질인자인 것으로 나타났다. 투수계수 산정모델에 의한 투수계수는 직접투수시험에 의한 투수계수와 거의 유사한 결과를 보였다. 따라서 개발된 투수계수산정모델은 연구지역과 같은 토질조건인 경우 토층의 투수계수 산정을 위한 모델로 이용이 가능할 것으로 사료된다.

주요어 : 투수계수, 단순회귀분석, 상관분석, 투수계수산정모델

To derive easily the coefficient of permeability from several other soil properties, the estimation model of coefficient of permeability was proposed using linear regression analysis. The coefficient of permeability is one of the major factors to evaluate the soil characteristics. The study area is located in Kangwon-do Pyeongchang-gun Jinbu-Myeon. Soil samples of 45 spots were taken from the study area and various soil tests were carried out in laboratory. After selecting the soil factor influenced by the coefficient of permeability through the correlation analysis, the estimation model of coefficient of permeability was developed using the linear regression analysis between the selected soil factor and the coefficient of permeability from permeability test. Also, the estimation model of coefficient of permeability was compared with the results from permeability test and empirical equation, and the suitability of proposed model was proved. As the result of correlation analysis between various soil factors and the coefficient of permeability using SPSS(statistical package for the social sciences), the largest influence factor of coefficient of permeability were the effective grain size, porosity and dry unit weight. The coefficient of permeability calculated from the proposed model was similar to that resulted from permeability test. Therefore, the proposed model can be used in case of estimating the coefficient of permeability at the same soil condition like study area.

Key words : coefficient of permeability, linear regression analysis, correlation analysis, estimation model of coefficient of permeability

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

서론

투수란 중력이나 자중 하에서 다공을 통한 유체의 이동을 말한다. 토층은 다양한 크기를 가진 입자들의 연속된 공극으로 구성되어 있고 일반적으로 모든 간극은 토립자가 어떤 형태로 다짐배열되든 간에 상호 연결되어 있다. 자갈 및 모래와 같은 조립토는 물론 심지어 실트에서조차도 주변 간극과 연결되어 있으며, 토층에서 연속된 공극은 높은 에너지에서 낮은 에너지로 물의 흐름을 이끌며, 투수성은 연속된 공극을 통해 유체가 유입되거나 유출되는 흙의 성질로서 정의된다(Schmid, 1957).

투수계수는 공학적으로 특히 중요한 특성으로서 침투문제, 흙댐의 내수성검토 및 누수율의 결정, 침하와 사면안정문제, 굴착공사 방법의 결정 및 지반침하 속도의 계산 등 공학적 문제와 많은 관계가 있고, 최근에는 산업폐기물 매립에 따른 차수재개발에 따라 다짐점토를 이용한 차수라이너(liner)의 연구가 활발히 진행되고 있다(박주환, 2007). 그러나 투수계수가 중요한 만큼 정확한 투수계수를 산출하는 것 또한 쉽지 않다. 투수계수는 토립자의 크기와 형상, 간극비, 포화도, 함수비, 다짐상태, 점토광물의 함유율, 토립자의 배열, 물의 밀도, 점성계수 등 많은 인자들에 의해 변하는 것으로 알려져 있다. 김경수와 이문세(2005)는 투수계수는 유효경과 서로 비례적 관계이고 균등계수는 비교적 높은 상관성을 가지며, 지질별로는 퇴적암지역의 투수계수가 화산암지역에 비

해 더 큰 것으로 보고하였다.

투수계수를 구하는 방법으로는 실내시험, 현장시험, 그리고 경험식에 의한 방법 등이 있다. 이러한 방법들은 정확성, 효율성 및 경제성 등에서 각각 장단점을 가지고 있기 때문에 어떤 방법으로 투수계수를 구하느냐는 실제의 활용도에 따라 이용자가 결정해야 할 매우 중요한 사항이다.

이 연구에서는 시간과 비용을 크게 소비하지 않고 투수계수에 영향을 주는 몇 가지의 토질특성치를 이용하여 토층의 투수계수를 쉽게 산정할 수 있도록 투수계수 산정모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해 강원도 평창군 진부면지역의 자연사면 토층을 대상으로 시료를 채취하고 실내에서 토질시험을 실시한 결과를 토대로 통계분석용 프로그램인 SPSS(statistical package for the social sciences)를 사용하여 토질특성치를 변수로 하는 새로운 투수계수산정모델을 제안하였다. 그리고 모델의 신뢰성 검증을 위해 연구지역에서 채취한 토층시료를 실험실에서 직접투수시험으로 구한 투수계수와 기존 경험식들에 의해 산정된 투수계수와 상호 비교분석하였다.

연구지역

연구지역은 강원도 평창군 진부면일대로 오대산(1,563 m), 발왕산(1,377 m) 등으로 둘러싸인 해발고도 500 m 이상의 고원지대며 하진부일대는 넓은 평지와 구



Fig. 1. Geological map of the study area.

통지를 이루고 있다. 토층시료를 채취하기 위한 연구지역은 시료채취가 용이하며 동일한 지질로 구성되어 있을 뿐만 아니라 다량의 산사태가 발생되어 투수계수와 관련한 토질특성을 분석할 가치가 충분한 점 등을 고려하여 선정하였다. 지질은 중립-조립질의 흑운모화강암이 넓게 분포하고 있는 지역으로 지형적으로는 풍화 및 침식현상 등으로 인해 비교적 낮은 산지를 형성하고 있다(Fig. 1).

연구방법

시료채취는 연구지역의 토질특성을 반영하기 위하여 일정한 간격으로 총 45개의 토층시료를 채취하였으며, 40개 시료로 투수계수산정모델을 구한 뒤 모델에 적용되지 않은 나머지 5개 시료로써 모델을 검증하였다. 시료는 표토를 제거한 후 40~70 cm 깊이에서 토층을 대상으로 채취하였으며, 불교란시료와 교란시료로 구분하였다. 불교란시료는 스테인리스로 제작한 직경 10 cm, 높이 5 cm 크기의 원통형몰드를 이용하였으며, 특히 투수시험용 불교란시료는 직경 10 cm, 높이 13 cm 크기의 원통형몰드를 사용하였다. 교란시료는 비닐팩을 이용하였으며 모든 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실에 운반하였다. 시료는 지형, 지질조

건, 토층분포 등을 고려하여 비교적 일정한 빈도를 갖도록 함으로써 토층의 특성이 균등하게 평가될 수 있도록 하였다(Fig. 2).

연구지역의 토질특성 분석을 위해 KS기준에 준해 자연함수비, 밀도, 액성한계, 소성한계, 단위중량, 간극비 및 간극율을 구하였고, 입도시험 결과로부터 유효경(D_{10}), 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_c)를 구하였다. 그리고 직접 투수시험은 변수위투수시험법으로 실시하였다.

실내시험을 통해 얻은 각각의 시험결과를 이용하여 상관분석을 실시하고 투수계수와 관련성이 있는 토질특성을 선별한 후 선별된 인자들과 투수시험에 의한 투수계수를 단순회귀분석 과정을 거쳐 새로운 투수계수산정모델을 제안하였다. 최종적으로는 세 경우에 따른 투수계수 즉, 직접투수시험, 경험식, 그리고 이 연구에서 제안된 모델에 의해 산정된 각각의 투수계수들을 상호 비교분석함으로써 투수계수산정모델의 신뢰성을 검증하였다.

연구지역의 토질특성

투수계수는 토층을 구성하고 있는 물리적 성질 및 공학적 특성에 따라 다르게 나타난다. 연구지역에서 채취된 45개 토층시료에 대한 시험결과를 정리하면 Table 1

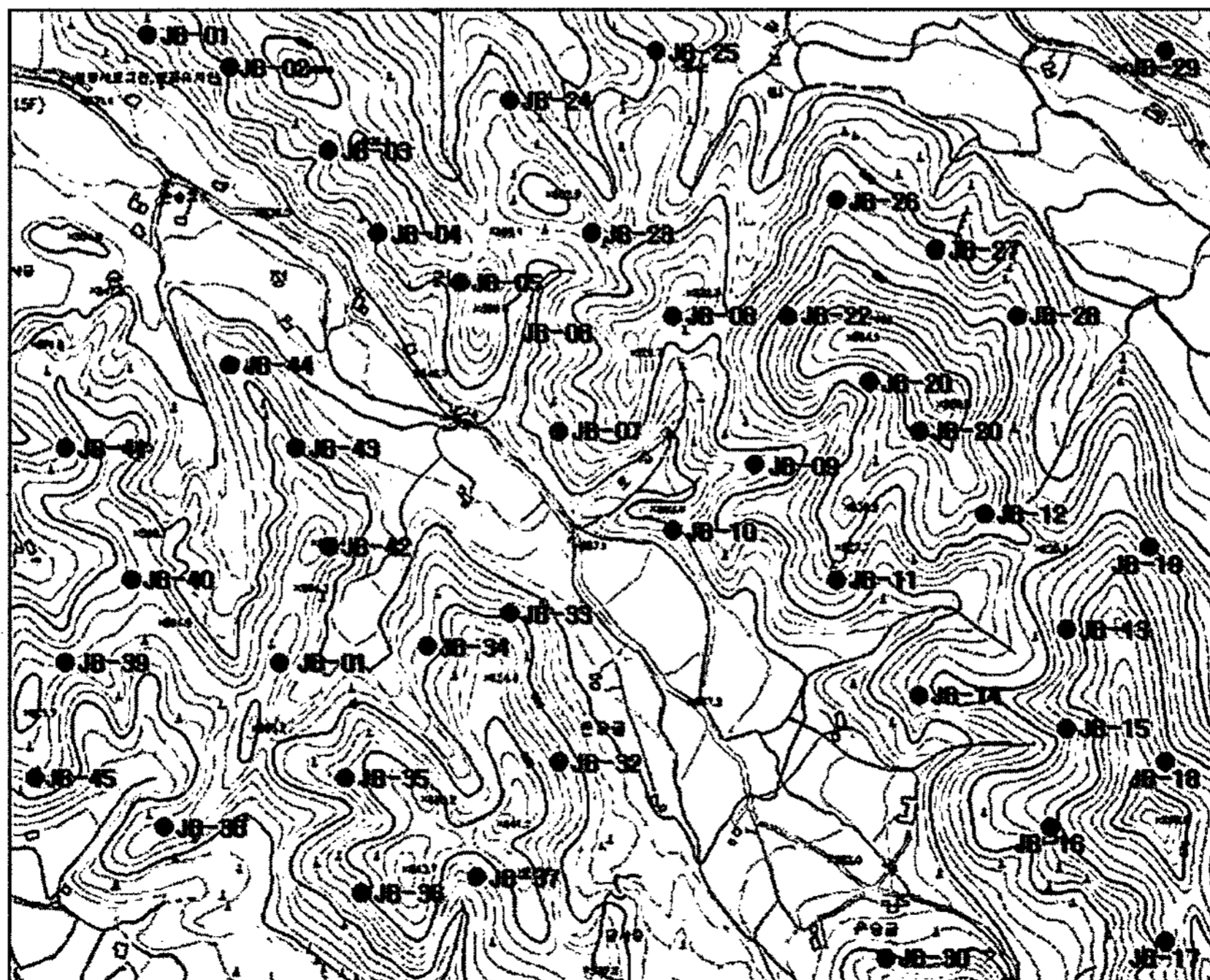


Fig. 2. Location map of sampled soils in study area: JB-17, sample number.

Table 1. Physical and engineering properties of sampled soils in the study area.

Sample No.	G_s	w (%)	Atterberg limits (%)			D_{10} (cm)	C_u	C_g	USCS	e	n (%)	Unit weight (g/cm ³)			k (cm/sec)
			LL	PL	PI							Wet	Sat.	dry	
JB-01	2.63	23.40	31.52	15.67	15.85	0.019	7.0	1.6	SW-SC	1.09	52.11	1.55	1.78	1.26	2.23E-02
JB-02	2.65	25.03	31.38	18.59	12.79	0.023	7.1	1.1	SW-SC	1.13	53.04	1.55	1.77	1.24	3.45E-02
JB-03	2.61	24.69	23.45	14.96	8.49	0.014	7.2	1.2	SW-SC	1.24	55.33	1.45	1.72	1.16	1.29E-02
JB-04	2.61	11.33	37.43	19.91	17.52	0.011	7.5	1.0	SW-SC	0.85	45.98	1.57	1.87	1.41	2.40E-03
JB-05	2.62	15.65	40.33	22.25	18.07	0.016	11.5	1.7	SW-SC	0.67	40.09	1.81	1.97	1.57	3.48E-03
JB-06	2.62	18.50	34.41	21.55	12.86	0.013	5.1	0.9	SP-SC	1.16	53.71	1.43	1.75	1.21	1.48E-02
JB-07	2.63	18.81	28.66	15.95	12.71	0.010	6.2	1.1	SW-SC	0.92	47.90	1.63	1.85	1.37	3.05E-03
JB-08	2.65	21.02	32.95	15.30	17.65	0.013	9.7	1.4	SW-SC	0.90	47.30	1.69	1.87	1.40	4.78E-03
JB-09	2.65	25.67	25.73	13.29	12.44	0.018	6.3	1.5	SW-SC	1.07	51.66	1.61	1.80	1.28	2.08E-02
JB-10	2.59	27.47	31.75	17.16	14.60	0.020	6.1	1.2	SW-SC	1.23	55.07	1.48	1.71	1.16	2.95E-02
JB-11	2.58	21.39	28.85	14.92	13.93	0.016	10.3	1.4	SW-SC	1.21	54.74	1.42	1.71	1.17	2.33E-02
JB-12	2.61	9.11	29.36	14.90	14.47	0.009	7.6	1.1	SW-SC	0.92	46.36	1.52	1.86	1.40	2.15E-03
JB-13	2.59	14.94	31.30	14.61	16.69	0.021	6.8	1.1	SW-SC	0.74	42.54	1.71	1.91	1.49	1.08E-02
JB-14	2.58	14.01	32.46	19.22	13.24	0.018	6.9	1.3	SW-SC	0.72	41.86	1.71	1.92	1.50	9.03E-03
JB-15	2.60	18.91	32.77	20.23	12.54	0.014	9.4	1.3	SW-SC	0.95	48.77	1.58	1.82	1.33	1.03E-02
JB-16	2.60	4.71	29.70	17.63	12.07	0.015	6.4	1.1	SW-SC	0.79	44.04	1.52	1.89	1.45	7.98E-03
JB-17	2.58	15.58	28.76	19.25	9.51	0.016	6.1	1.5	SW-SC	0.75	42.71	1.71	1.90	1.48	7.72E-03
JB-18	2.58	6.03	26.18	13.06	13.11	0.021	8.1	1.1	SW	0.86	46.28	1.47	1.85	1.38	2.39E-02
JB-19	2.62	28.06	30.37	15.91	14.46	0.013	6.6	1.4	SW-SC	1.43	58.80	1.38	1.67	1.08	2.79E-02
JB-20	2.62	33.28	36.36	24.86	11.50	0.015	5.2	1.3	SP-SM	1.43	58.78	1.44	1.67	1.08	3.12E-02
JB-21	2.60	34.54	38.15	22.61	15.54	0.014	10.1	0.8	SP-SC	1.39	58.19	1.46	1.67	1.09	2.56E-02
JB-22	2.57	20.13	37.03	19.50	17.53	0.011	6.1	0.9	SP-SC	1.03	50.69	1.52	1.77	1.27	3.99E-03
JB-23	2.61	20.13	35.31	20.39	14.93	0.010	5.9	1.0	SP-SC	1.06	51.44	1.52	1.78	1.27	3.75E-03
JB-24	2.61	21.18	38.60	30.38	8.22	0.026	6.8	1.2	SW	0.87	46.65	1.68	1.86	1.39	2.89E-02
JB-25	2.64	10.97	47.01	32.41	14.61	0.026	5.8	1.3	SP-SC	0.67	40.04	1.75	1.98	1.58	2.31E-02
JB-26	2.61	7.31	33.77	21.75	12.02	0.018	6.3	1.2	SW-SC	0.64	43.91	1.57	1.90	1.46	3.23E-03
JB-27	2.65	10.39	30.21	17.32	12.89	0.013	6.0	1.3	SP-SM	0.76	43.03	1.66	1.94	1.51	4.36E-03
JB-28	2.65	8.30	26.28	12.35	13.92	0.023	9.9	1.5	SW-SM	1.01	50.16	1.43	1.82	1.32	2.93E-02
JB-29	2.58	3.21	40.38	22.35	18.03	0.013	7.5	1.1	SW-SC	0.75	42.82	1.52	1.90	1.47	2.89E-03
JB-30	2.62	15.97	31.29	17.88	13.41	0.015	7.1	1.4	SW-SC	0.58	36.58	1.92	2.02	1.66	2.05E-03
JB-31	2.63	12.26	34.74	21.96	12.78	0.012	7.2	1.4	SW-SC	0.77	43.63	1.66	1.92	1.48	1.75E-03
JB-32	2.62	8.63	31.29	17.52	13.77	0.018	12.6	1.6	SW-SC	0.71	41.68	1.66	1.94	1.53	6.91E-03
JB-33	2.65	7.61	28.72	13.48	15.24	0.021	8.3	1.6	SW-SC	0.71	41.68	1.66	1.96	1.55	1.03E-02
JB-34	2.62	15.72	28.15	14.42	13.74	0.015	9.7	1.5	SW-SC	0.99	49.83	1.52	1.81	1.31	1.68E-02
JB-35	2.65	16.05	34.74	20.69	14.05	0.011	5.8	1.1	SP-SC	0.99	49.64	1.55	1.83	1.33	5.36E-03
JB-36	2.63	8.70	26.94	11.70	15.25	0.012	5.2	1.0	SP-SC	0.75	42.92	1.63	1.93	1.50	2.76E-03
JB-37	2.63	7.50	29.28	15.20	14.08	0.015	6.6	0.9	SP-SC	0.65	41.72	1.64	1.95	1.53	1.45E-03
JB-38	2.66	21.56	28.76	19.11	9.65	0.011	10.6	1.3	SW-SC	1.26	55.81	1.43	1.73	1.18	1.33E-02
JB-39	2.67	22.69	36.42	26.80	9.62	0.020	6.6	1.6	SW-SM	1.13	53.02	1.54	1.78	1.25	3.16E-02
JB-40	2.65	10.68	29.21	17.22	11.99	0.014	6.2	1.4	SW-SC	0.94	48.43	1.51	1.85	1.37	9.45E-03
JB-41	2.63	8.46	38.44	24.86	13.58	0.018	6.9	1.2	SW-SC	0.83	45.25	1.56	1.89	1.44	9.21E-03
JB-42	2.63	13.34	33.34	18.44	14.90	0.016	7.9	1.2	SW-SC	0.95	48.76	1.52	1.83	1.35	1.38E-02
JB-43	2.58	15.63	31.32	17.71	13.61	0.015	9.4	1.1	SW-SC	0.85	45.89	1.61	1.85	1.39	8.12E-03
JB-44	2.63	16.73	34.81	22.82	11.99	0.015	6.9	0.9	SP-SC	0.75	44.93	1.69	1.90	1.45	3.12E-03
JB-45	2.59	8.46	29.28	16.79	12.49	0.015	12.9	1.5	SW-SC	0.74	44.50	1.56	1.88	1.44	2.89E-03

G_s , density; w , natural moisture content; LL , liquid limit; PL , plastic limit; PI , plasticity index; D_{10} , effective size; C_u , uniformity coefficient; C_g , coefficient of gradation; USCS, unified soil classification system; e , void ratio; n , porosity; k , coefficient of permeability.

과 같으며, 이 중에서 투수계수에 유의한 영향인자로 인식되고 있는 여러 물성들의 상관성을 분석하였다.

토질분류

Fig. 3은 연구지역의 토층시료에 대한 액성한계 및 소성한계시험 결과를 소성도에 나타낸 것이다. 토립자에 함유된 점토광물 등의 함유비는 X-ray 회절분석법 등으로 알 수 있으나 토질시험에 의하여 액성한계와 소성지수를 소성도에 도시함으로써 점성토에 포함된 미세한 점토광물을 개략적으로 판단할 수도 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 토층시료 대부분이 활성점토인 일라이트(illite)와 몬모릴로나이트(montmorillonite) 영역에 점사되고 있으며, 일부는 비활성점토인 카올리나이트(kaolinite)에도 점사되었다. 또한, 소성지수 8~18, 액성한계 23~47%의 범위로서 다소 저소성의 점토성분을 지니고 있음을 알 수 있다. 그리고 통일분류법에 의하면 연구지역의 토층은 전체적으로 점토와 실트를 함유하는 모래질지반으로서 양입도의 SW, SW-SM 및 SW-SC로 분류되나 일부는 빈입도의 SP-SM 및 SP-SC 등으로 분류된다.

입도분포

입도분포는 다른 지역과 비교하여 퇴적물이 쌓인 과정이나 역사를 추정할 수 있으며, 흙의 조직에 의한 물리적 특성을 파악하는데 이용되는 매우 중요한 성질이다. 입도분포곡선은 흙 속에 존재하는 입자크기의 범위를 나타낼 뿐만 아니라 여러가지 크기를 가진 입자의 분포형태를 알 수 있다.

Fig. 4는 토층시료에 대한 입도분석 결과 대표적인 입도분포를 그림으로 나타낸 것이다. 입도분포곡선은 유효경,

균등계수 및 곡률계수 등과 함께 기본적인 토질 파라미터를 결정하는 중요 요소의 하나인데, 시험결과에 의하면 입도분포곡선이 대체로 완만한 기울기를 보이며 조립질과 세립질이 적당히 혼합되어 있음을 알 수 있다. 또한, 균등계수는 5~13의 범위이고 곡률계수는 0.8~1.7의 범위로서 양입도의 정량적 판별기준이 되는 균등계수 4내지 6 이상과 곡률계수 1~3의 조건을 대부분 충족하고 있다. 따라서 대부분의 토층시료가 입도조성이 비교적 양호한 흙으로 분류된다.

투수성

토층시료에 대한 변수위투수시험 결과, 투수계수는 $1.23 \times 10^{-3} \sim 3.45 \times 10^{-2}$ cm/sec(평균; 1.20×10^{-2} cm/sec)의 범위인데, 이는 Darcy(1856)에 의하면 대부분 세립질 모래~점토질실트 정도의 투수계수에 해당하는 것으로 보통~빠른 정도의 토층지반으로 평가되었다. 투수계수는 균등계수, 간극비, 간극율 및 단위중량 등과도 상관성이 있는 특성이며, 유효경과도 밀접한 관계가 있다. 따라서 토질공학 분야에서 Hazen(1930), Kozeny(1956) 및 Amer and Awad(1974) 등은 투수계수 값을 구하기 위하여 여러 경험식을 제안한 바 있는데, 제안된 식들은 대부분 균등계수, 간극비 및 유효경 등을 주요 인자로 적용하고 있다.

이 연구를 통해서도 유효경과 간극비가 투수계수와 비교적 높은 상관성이 있는 것으로 분석되었다. Fig. 5는 토층시료의 투수계수와 유효경 및 간극비의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이들은 서로 비례적인 관계에 있는 물성으로서 유효경이 증가하면 투수계수도 비례적으로 증가하는 경향성을 보였다.

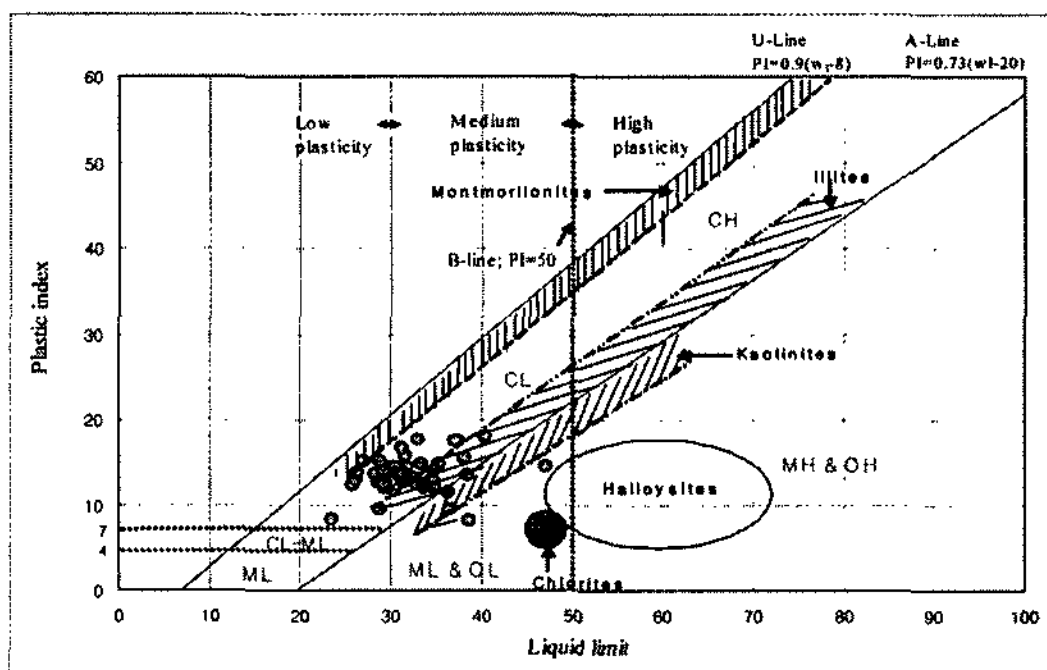


Fig. 3. Plasticity diagram using the relationship between liquid limit and plastic index of sampled soils from the study area.

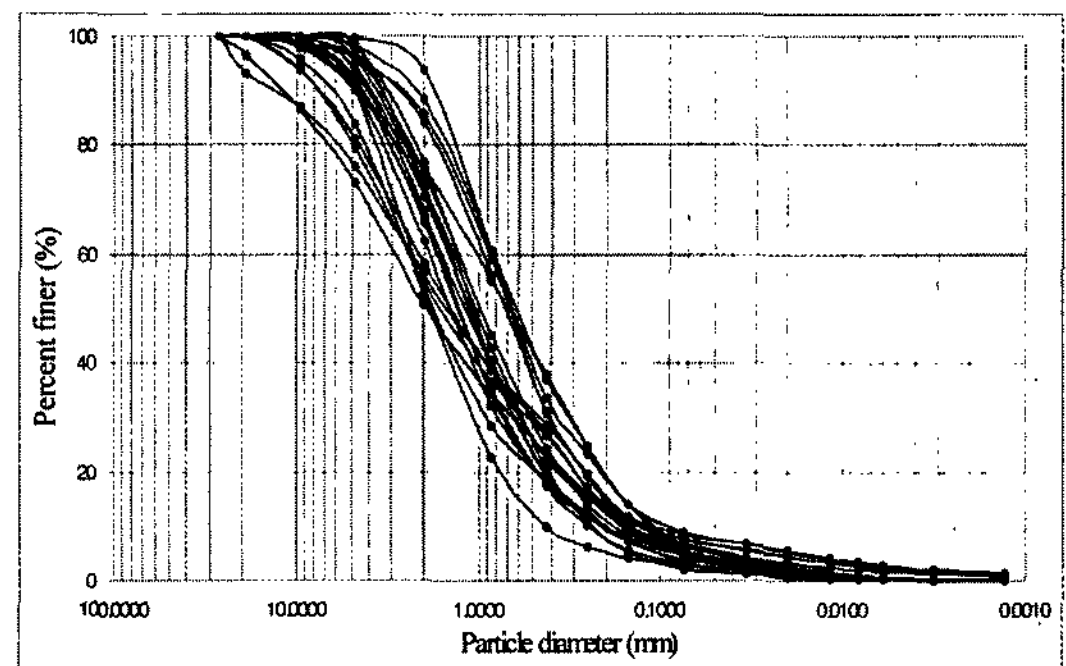


Fig. 4. Grain size distribution curves of sampled typical soils from the study area.

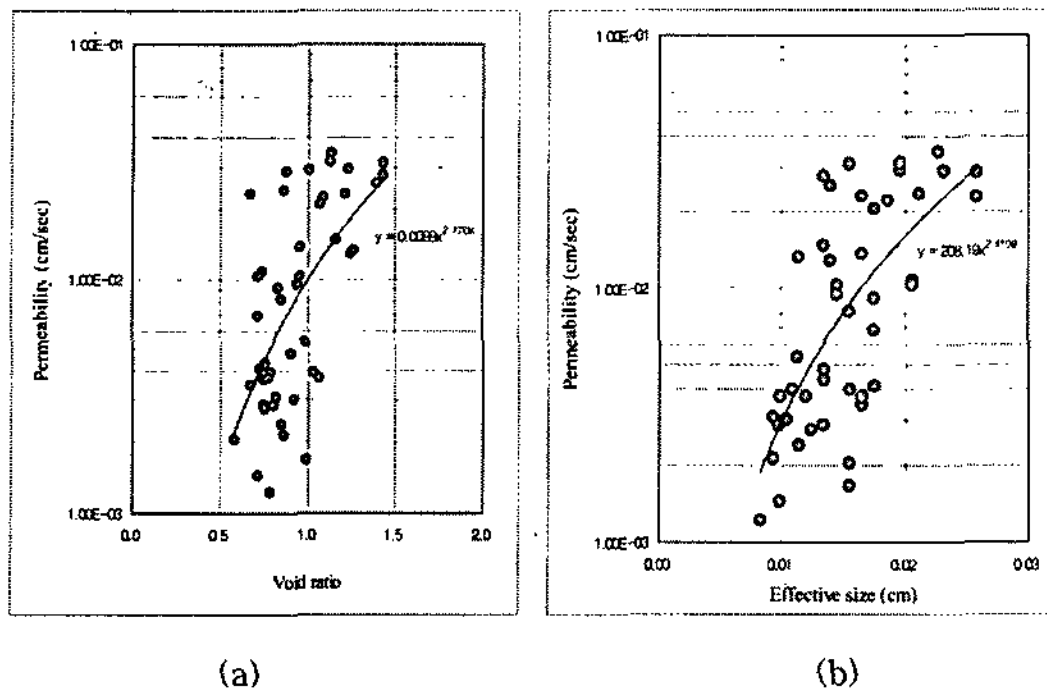


Fig. 5. Relationship between void ratio, effective size and permeability coefficient of sampled soils from the study areas: (a), void ratio and permeability coefficient; (b), effective size and permeability coefficient.

단순회귀분석에 의한 투수계수산정모델

이 연구의 주 목적은 실내시험을 통해 토질물성치를 구하고 이를 통계적인 투수계수산정모델에 적용하여 간단하게 투수계수를 산정할 수 있도록 함이다. 모델의 과정은 일차적으로 SPSS를 이용해 실내시험에서 구한 토질물성치에 대한 상관성을 분석한 후 상관성이 높은 토질인자를 선정하게 된다. 그리고 선정된 토질인자와 직접투수시험에 의한 투수계수를 단순회귀분석하여 기중치 즉, 선형적 계수 및 상수를 구함으로써 투수계수산정 모델이 완성된다(Fig. 6).

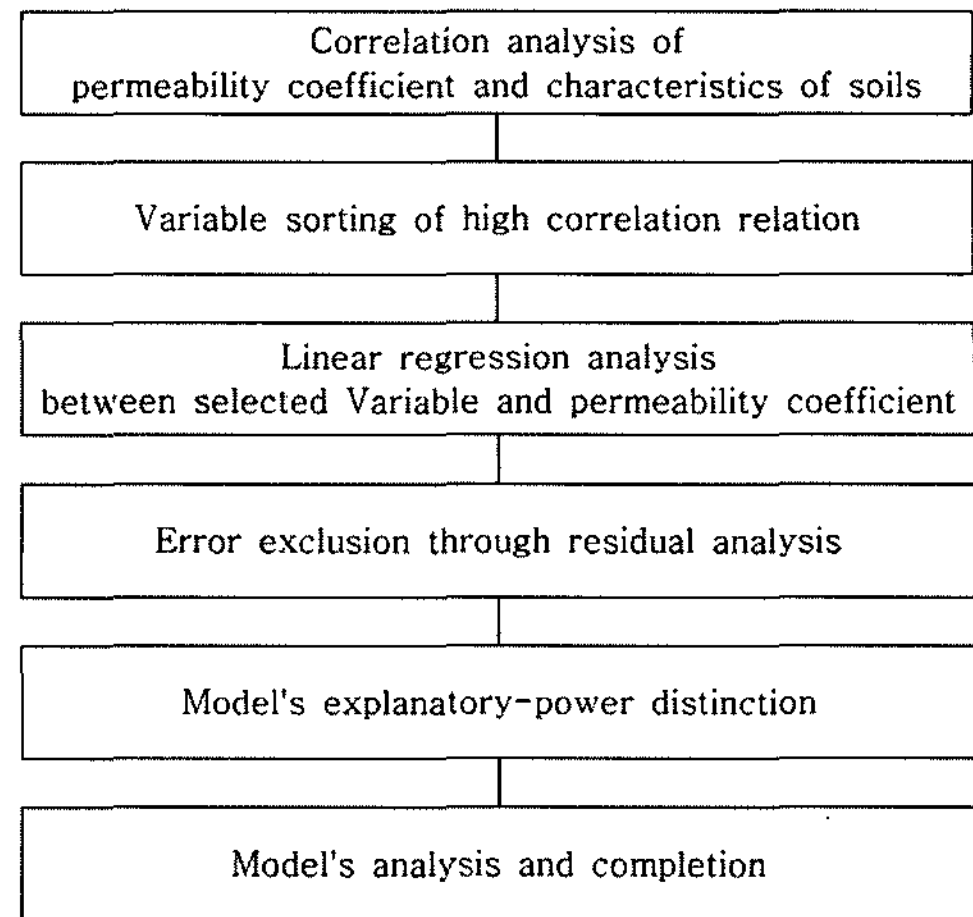


Fig. 6. The flow chart of statistical analysis.

상관성분석

투수계수를 포함한 18가지 토질특성치를 Pearson 상관계수를 이용하여 서로간의 상관관계를 분석하고 Fig. 7과 같은 상관행렬그래프(matrix plot)를 얻었다. 상관행렬그래프는 각각의 토질인자간 상관성을 점으로 표시한 선점도의 행렬형태 집합체로서 대각선을 중심으로 위아래의 그래프는 동일하다. 그리고 선형성이 높은 것이 상관성 또한 높음을 의미하는데, 몇몇 토질특성치들의 선점도 모양이 직선의 형태를 보이는 것으로 보아 상관성이 높은 토질특성치들이 있음을 알 수 있다. 그 외의

Table 2. Pearson correlation and significance.

Variable	Correlation	Permeability (cm/sec)	Variable	Correlation	Permeability (cm/sec)
Permeability (cm/sec)	Pearson correlation coefficient Significance	1.000	Liquid limit	Pearson correlation coefficient Significance	0.06339 0.69760
density	Pearson correlation coefficient Significance	0.16312 0.31456	Plastic limit	Pearson correlation coefficient Significance	0.21284 0.18730
Moisture content (%)	Pearson correlation coefficient Significance	0.57653 0.00010	Plasticity index	Pearson correlation coefficient Significance	-0.27415 0.08692
Void ratio	Pearson correlation coefficient Significance	0.63594 0.00001	Gravel (%)	Pearson correlation coefficient Significance	0 0.20973
Porosity (%)	Pearson correlation coefficient Significance	0.62053 0.00002	Sand (%)	Pearson correlation coefficient Significance	0.00178 0.99131
Degree of saturation (%)	Pearson correlation coefficient Significance	0.31557 0.04730	Silt/Clay (%)	Pearson correlation coefficient Significance	-0.55639 0.00019
Wet unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient Significance	-0.42623 0.00610	D ₁₀ (cm)	Pearson correlation coefficient Significance	0.65637 0.00000
Saturation unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient Significance	-0.59832 0.00005	Cu	Pearson correlation coefficient Significance	-0.01008 0.95078
Dry unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient Significance	-0.61062 0.00003	Cg	Pearson correlation coefficient Significance	0.13158 0.41832

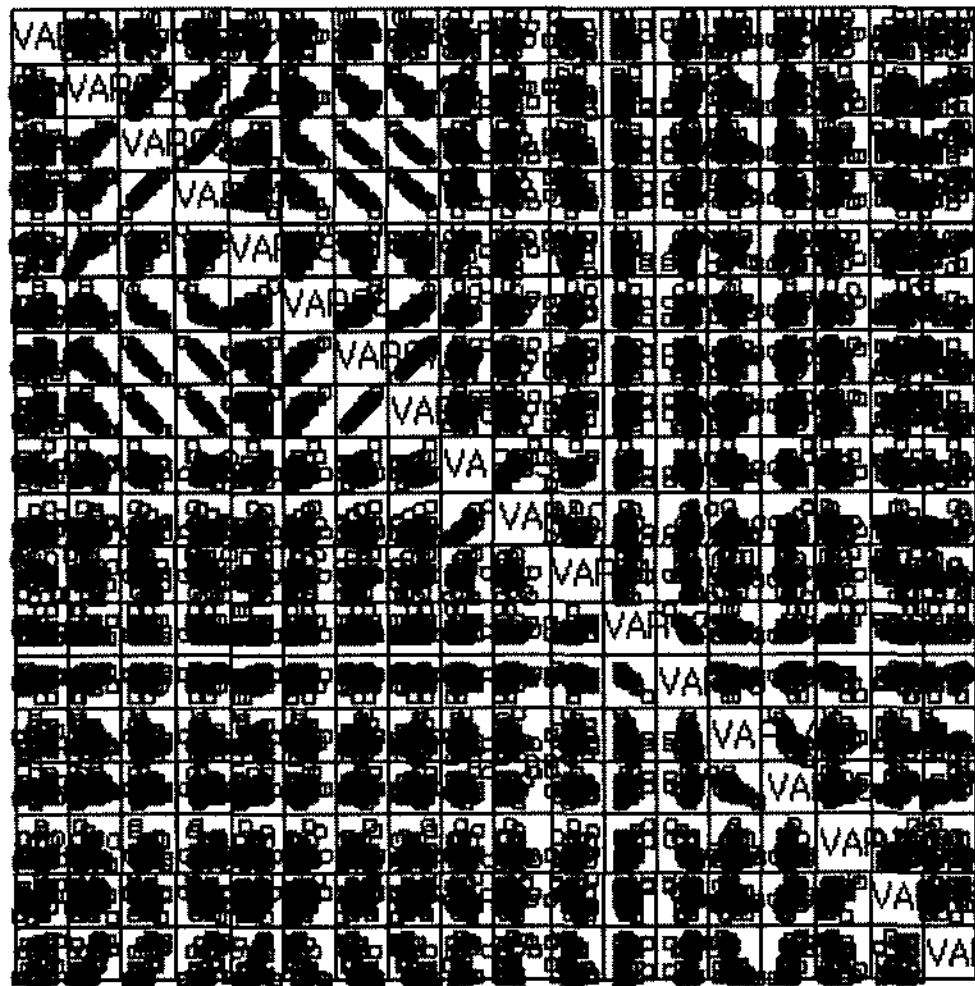


Fig. 7. Matrix plot.

토질특성치들 상호간에도 상관성이 높은 선형적 관계가 있는데, 이는 단순회귀분석법으로 회귀식을 얻을 수 있음을 의미한다.

진입 / 제거된 변수^b

모형	진입된 변수	제거된 변수
1	유효경 간극비 건조단위중량 ^a	

a, 요청된 변수 모두 입력; b, 종속변수는 투수계수

모형요약^b

모형	R	R 제곱	수정된 R제곱	추정값의 표준오차	Dubin-Watson
1	.948 ^a	.898	.889	3.649E-03	1.855

a, 예측값(상수)은 유효경, 간극비, 건조단위중량; b, 종속변수는 투수계수

분산분석^b

모형	제곱합	자유도	평균제곱	F	유의 확률
1 선형회귀분석	4.2161E-03	3	1.405E-04	105.505	.000 ^a
잔차	4.795E-04	28	1.332E-05		
합계	4.695E-03	31			

a, 예측값(상수)은 유효경, 간극비, 건조단위중량; b, 종속변수는 투수계수

계수^a

모형	비표준화계수		표준화계수	t	유의 확률
	B	표준오차	베타		
1 (상수)	-0.125	.053		-2.380	.023
간극비	6.003E-02	.018	1.235	3.398	.002
건조단위중량	4.084E-02	.027	.561	1.540	.132
유효경	1.648	.127	.694	12.975	.000

a, 종속변수는 투수계수

Table 2는 상관분석을 통해 얻는 투수계수와 각 토질물 성치간의 Pearson 상관계수와 유의도를 구한 것으로 Pearson 상관계수는 음과 양에 관계없이 클 수록, 유의도가 0에 가까울 수록 상관성이 높음을 의미한다. 그리고 상관계수의 음은 반비례관계를, 양은 비례관계를 뜻한다. 유의수준 0.01 이내에는 함수비, 간극비, 간극율, 포화단위중량, 건조단위중량, 실트 및 점토 함유율, 유효경 등이 상관성이 높음을 알 수 있다. 그러나 이 7개 토질인자 중 함수비와 포화단위중량은 물과 관계된 것으로 일기와 채취시기에 따라 달라질 수 있고, 간극율은 간극비와 비례관계식으로 얻을 수 있으므로 중복적용을 피하기 위해 제외하였다. 또한, 실트 및 점토 함유율은 모델을 간편화하기 위해 제외하였다. 결과적으로 유의수준이 가장 높은 3개 토질인자 즉, 유효경, 간극비, 건조단위중량을 선정하였다.

단순회귀분석

상관분석으로부터 상위 상관관계의 유의한 변수인 유효경, 간극비, 건조단위중량을 이용하여 직접투수시험에 의한 투수계수와 단순회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

잔차 통계량^a

모형	최소값	최대값	평균	표준편차	N
예측값	-5.74E-03	3.10E-02	1.25E-02	1.04E-02	40
표준화 예측값	-1.758	1.777	0.000	1.000	40
예측값의 표준오차	6.17E-04	1.86E-03	1.11E-03	3.06E-04	40
수정된 예측값	-6.64E-03	3.06E-02	1.25E-02	1.04E-02	40
잔차	-1.06E-02	6.97E-03	2.39E-17	3.51E-03	40
표준화 잔차	-2.905	1.909	0.000	0.961	40
스튜던트화 잔차	-2.987	2.029	0.009	1.009	40
삭제된 잔차	-1.12E-02	7.87E-03	6.75E-05	3.87E-03	40
삭제된 스튜던트화 잔차	-3.396	2.126	0.001	1.056	40
Mahal. 거리	0.138	9.169	2.925	2.254	40
Cook의 거리	0.000	0.177	0.026	0.040	40
중심화된 레버리지 값	0.004	0.235	0.075	0.058	40

a, 종속변수는 투수계수

앞에서의 단순회귀분석 결과로 잔차의 정규성과 등분산성은 모두 만족이며, 분산분석의 유의확률 $P = 0.000$ 이고, 수정된 R제곱은 설명력이 약 90%로서 회귀모형이 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한, 모델의 신뢰도 검증에 위해 추가로 준비한 나머지 5개 토층시료를 적용했을 경우 투수계수산정모델과 직접투수시험에 의한 투수계수간의 평균편차 $md = 0.0008$ 로서 그 차이도 매우 작은 것으로 나타났다. 따라서 최종적인 투수계수산정모델은 다음과 같이 정리된다.

$$\text{투수계수산정모델} = (1.648 \times D_{10}) + (6.003 \times 10^{-02} \times e) + (4.084 \times 10^{-02} \times rd) - 0.125$$

여기서 D_{10} , 유효경; e , 간극비; rd , 건조단위중량

각 방법에 의한 투수계수 상관관계

토질시험 결과를 이용하여 직접투수시험, 기 제안된 경험식, 그리고 이 연구에서 제안된 투수계수산정모델에 의한 투수계수를 각각 구하여 이들간의 상관관계를 분석하였다. 직접투수시험은 변수위투수시험법으로 실시하였고 경험식은 Hazen(1930), Kozney-Carman(1956), Kozney(1971) 및 Amer-Awad(1974)에 의해 제안된 식을 이용하였다.

Fig. 8은 직접투수시험, 경험식, 그리고 투수계수산정모델에 의한 투수계수 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 직접투수시험, 경험식 및 투수계수산정모델에 의한 투수계수 모두 상관성이 높음을 알 수 있다. 즉, 직접투수시험에 의해 투수계수가 큰 토층시료는 다른 두 방법에 의해서도 크게 나타나고 작은 토층시료는 작게 나타나는 일관성을 보였다. 이를 다시 투수계수

산정모델을 기준하여 직접투수시험과 각각의 경험식에 의한 투수계수관계로 나누어 살펴보면, Kozney-Carman 식에 의한 투수계수가 가장 작고, Hazen 및 Amer-Awad 식에 의한 투수계수가 가장 크게 나타났으며 값의 차이 또한 매우 크게 나타났다. 반면, 직접투수시험과 Kozney 식에 의한 투수계수는 Kozney-Carman 식

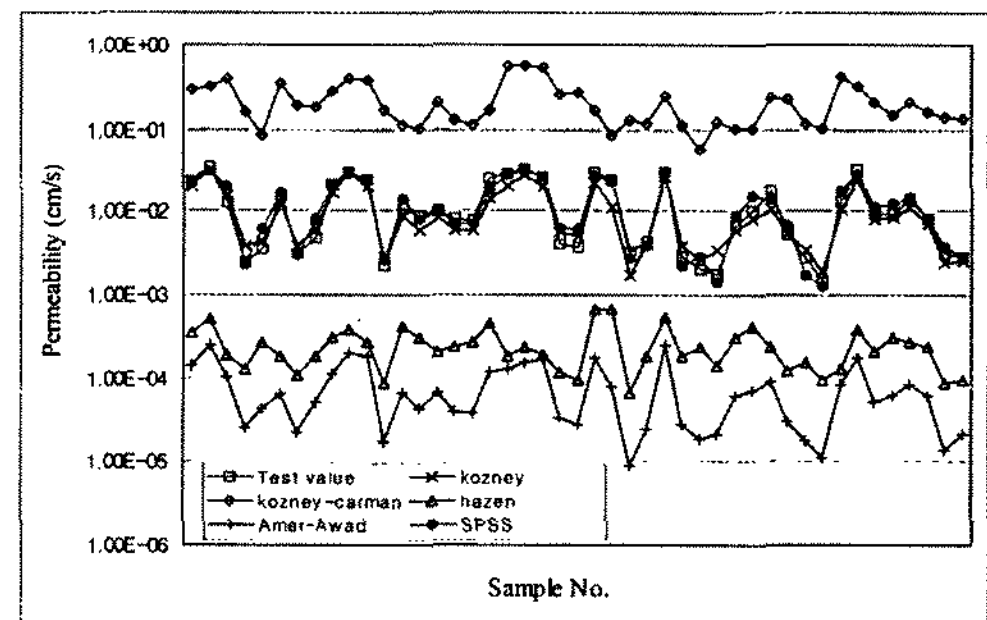


Fig. 8. Comparing the estimation model with permeability test result and empirical equation.

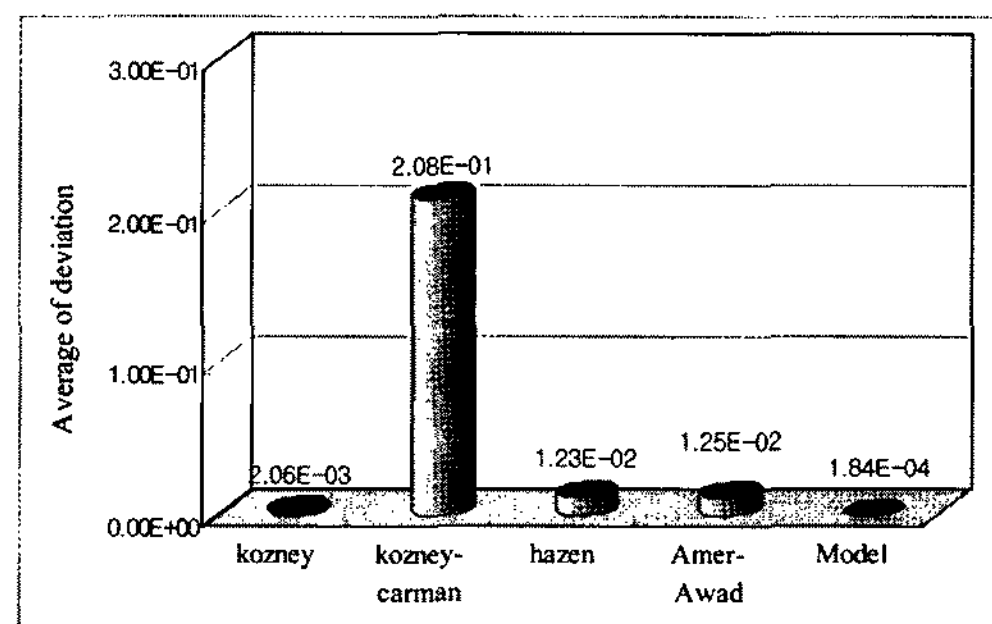


Fig. 9. The differences of coefficient of permeability among each method by standards of permeability test result.

에 의한 투수계수보다는 크고 Hazen 및 Amer-Awad 식에 의한 투수계수보다는 작은 결과를 나타내었고, 투수계수산정모델에 의한 투수계수와는 거의 유사한 경향성을 보임으로써 높은 상관성을 갖는 것으로 분석되었다.

Fig. 9는 직접투수시험과 경험식으로 구한 투수계수 그리고 이 연구에서 제안한 모델에 의해 산정한 투수계수간의 차이점을 알아보기 위해 직접투수시험을 기준으로 각각의 방법에 의한 평균 투수계수편차를 비교하였다. 그림에서 보아 알 수 있듯이 투수계수산정모델에 의한 투수계수가 직접투수시험에 의한 투수계수에 비해 가장 적은 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때, 이 연구에서 제안된 투수계수산정모델은 연구지역과 같이 양호한 입도의 중립-조립질 혹은모화강암 토질조건일 경우 투수계수를 산정하기 위한 모델로서 적합한 것으로 평가된다. 그리고 이 모델을 적용하여 투수계수를 산정해도 크게 무리가 없을 것으로 판단된다.

결 론

이 연구는 토질특성을 평가하는 주요 영향인자인 투수계수를 몇 가지 토질물성만으로 쉽게 산정할 수 있도록 단순회귀분석을 이용하여 투수계수산정모델을 개발하였다. 그리고 개발된 투수계수산정모델과 직접투수시험 및 각 경험식들에 의한 투수계수를 비교분석하여 모델의 적합성을 검증하였다. 투수계수산정모델의 개발을 위해 연구지역 자연사면의 총 45개 지점에서 채취한 토층시료를 대상으로 직접투수시험을 실시하여 투수계수를 구하였으며, 여러 토질시험 결과를 기존에 제안된 경험식들에 적용하여 투수계수를 산정하였다. 그리고 이 연구에서 개발한 모델에 의해 투수계수를 산정하여 상호 비교분석하였다. 그 결과 연구지역과 유사한 토질조건인 경우 이 연구에서 개발된 모델을 이용하여 직접투수시험에 의한 투수계수에 거의 근접한 투수계수를 산정할 수 있는 것으로 평가되었다.

연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 토층시료를 채취한 연구지역은 중립-조립질 혹은모화강암 분포지역으로서 토층은 전체적으로 점토와 실트를 함유한 양입도의 모래질지반이며 SW, SW-SM 및 SW-SC 등으로 분류된다.

2) 상관분석을 통해 여러 토질인자들과 투수계수간의 상관관계를 분석한 결과 유효경, 간극비 및 건조단위중량이 투수계수에 유의한 영향인자인 것으로 평가됨으로써 이들 토질인자는 투수계수산정시 고려되어야 할 요

소에 해당된다.

3) 직접투수시험, 경험식 및 투수계수산정모델에 의한 투수계수는 상관성이 높아 직접투수시험에 의해 투수계수가 큰 토층시료는 다른 두 방법에 의해서도 크게 나타나고 작은 토층시료는 작게 나타나는 일관성이 관찰되었다.

4) 투수계수는 경험식간에 다소 큰 차이를 보였는데, Kozeny-Carman 식에 의한 투수계수가 가장 작고, Hazen 및 Amer-Awad 식이 가장 크다. 그리고 Kozeny 식에 의한 투수계수는 중간정도로서 경험식 중 직접투수시험에 의한 결과와 가장 유사한 경향성을 보였다.

5) 이 연구에서 개발된 투수계수산정모델에 의한 투수계수가 직접투수시험에 의한 투수계수와 매우 유사한 결과를 보임으로써 그 적합성이 검증되었다. 따라서 이 모델은 연구지역과 같은 토질조건에서 간접적인 방법으로 투수계수를 산정할 경우 이용이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태 피해규모 정량화 및 최적 피해저감 기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김경수, 이문세, 2005, 경험식과 직접투수시험에 의한 자연사면 토층시료의 투수계수 비교분석, 대한지질공학회 학술발표회, 277-284.
- 박주환, 2007, 회귀분석에 의한 흙의 투수계수산정, 충남대학교 공학석사 학위논문, 113p.
- Amer, A. M., and Awad, A. A. 1974, Permeability of Cohesionless Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100, GT12, 1309-1306.
- Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Digion, Dalmont, Paris, 647p.
- Hazen, A., 1930, Water Supply in American Civil Engineers Handbook, Wiley, New York, 1444-1518.
- Kozeny, J., and Carman, P. E., 1956, Flow of gases Through Porous Media, Academic, New York.
- Kozeny, J. S., 1971, Uber Kapillare Leitung des wassers im Boden, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in SM10.
- Schmid, W. E. 1957, The Permeability of soil and Concept of Stationary Boundary Layer, Proceedings, American Society for Testing and Materials, ASTM, 57, 1195-1218.

이문세

충남대학교 토목공학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-868-3068
Fax: 042-861-9723
E-mail: eoehehr@hanmail.net

류제천

충청대학 건설교통과
363-792 충북 청원군 강내면 월곡리 330
Tel: 043-230-2310
Fax: 043-230-2319
E-mail: ryu-jecheon@hanmail.net

임희대

충남대학교 토목공학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-821-5679
Fax: 042-825-0318
E-mail: hdlim@cnu.ac.kr

박주환

대전광역시 서부교육청 시설과
302-162 대전광역시 서구 도마2동 172-16
Tel: 042-530-1254
Fax: 042-530-1259
E-mail: wowfanta@hanmail.net

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3054
Fax: 042-861-9723
E-mail: kks@kigam.re.kr