

흙의 전단강도 산정을 위한 선형회귀분석모델 개발

이문세¹ · 류제천² · 김경수^{3*}

¹충남대학교 토목공학과, ²충청대학교 건설교통과, ³한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Development of the Linear Regression Analysis Model to Estimate the Shear Strength of Soils

Moon-Se Lee¹, Je-Cheon Ryu², and Kyeong-Su Kim^{3*}

¹Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University

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

³Geologic Environment Research Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

이 연구는 토질역학에서 중요하게 취급되는 전단강도를 몇 가지 토질물성만으로 쉽게 산정할 수 있도록 통계적인 방법의 하나인 선형회귀분석법을 이용하여 전단강도산정모델을 개발하였다. 전단강도는 강도정수인 전단저항각(ϕ)과 점착력(c)으로 구분되므로 SPSS의 상관분석을 통해 토질시험 결과들 중 이들 강도정수에 유효한 토질인자를 선별한 후 선별된 인자들과의 관계를 선형회귀분석으로 공식화 하였다. 또한, 개발된 모델과 직접전단시험으로 구한 강도정수를 비교분석하여 모델의 적합성을 검증하였다. 여러 토질물성과 강도정수간의 상관관계를 분석한 결과 전단저항각에 가장 크게 영향을 미치는 토질인자는 간극비 및 건조단위중량이고, 점착력에 크게 유의한 토질인자는 간극비, 건조단위중량 및 소성지수인 것으로 나타났다. 한편, 전단강도산정모델에 의해 산정된 강도정수는 직접전단시험에 의해 구한 강도정수와 거의 유사한 결과를 보였다. 따라서 개발된 전단강도산정모델은 연구지역과 같은 토질조건인 경우 토층의 강도정수 산정을 위한 모델로 이용이 가능할 것으로 사료된다.

주요어 : 전단강도, 강도정수, 선형회귀분석, 상관분석, 전단강도산정모델

The shear strength has been managed as an important factor in soil mechanics. The shear strength estimation model was developed to evaluate the shear strength using only a few soil properties by the linear regression analysis model which is one of the statistical methods. The shear strength is divided into two part; one is the internal friction angle (ϕ) and the other is the cohesion (c). Therefore, some valid soil factors among the results of soil tests are selected through the correlation analysis using SPSS and then the model are formulated by the linear regression analysis based on the relationship between factors. Also, the developed model is compared with the result of direct shear test to prove the rationality of model. As the results of analysis about relationship between soil properties and shear strength, the internal friction angle is highly influenced by the void ratio and the dry unit weight and the cohesion is mainly influenced by the void ratio, the dry unit weight and the plastic index. Meanwhile, the shear strength estimated by the developed model is similar with that of the direct shear test. Therefore, the developed model may be used to estimate the shear strength of soils in the same condition of study area.

Key words : shear strength, friction angle, cohesion, linear regression analysis, correlation analysis, estimation model of shear strength

서 론

지반이 외력을 받았을 때 나타나는 현상은 침하와 변

형에 의한 파괴가 대표적인 현상이다. 흙은 엄격히 말하면 다른 재료들과 마찬가지로 인장과 전단에 의하여 파괴되나, 대부분의 경우 인장 저항력이 무시할 수 있을 만큼

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

작기 때문에 실질적으로는 전단저항력만의 문제가 되므로 구조물의 파괴시 점토사면의 비탈머리 부근에서 볼 수 있는 인장균열을 제외하고는 대부분 전단파괴에 속한다. 즉, 지반이 무너지는 경우는 흙에 작용하는 외력에 의해 생기는 전단응력이 흙의 전단저항력보다 커져서 흙이 파괴되는 현상이다(Duncan, 2007).

흙에 외력이 가해지면 흙 속의 각 점에는 전단응력이 생기고, 이 응력에 의한 전단변형이 일어난다. 흙이 파괴에 이르게 되는 것은 흙입자 자신이 파괴되는 것이 아니고, 접촉하고 있는 흙입자가 서로 미끄러져서 흙입자 상호간의 접촉점에는 마찰저항과 입자간의 맞물림에 의한 저항력이 생기는데, 이 힘을 전단저항력이라 한다. 흙 속의 전단응력이 커지면 전단저항도 증가하나, 전단응력이 어느 한도 이상 커지면 더 이상 저항하지 못하고 파괴에 이르게 된다. 이 전단저항의 최대값을 전단강도라 한다(Lambe, 1958).

전단강도는 직접적인 시험을 통해서 Fig. 1에서와 같이 수직응력(σ)과 전단응력(τ)의 관계를 선형으로 해석하여 구하는데, 이 직선의 관계식(1)이 Mohr-Coulomb의 파괴규준(Failure criterion)으로서 기울기인 전단저항각과 수직절편인 점착력으로 구성된다(Holtz, 1956).

$$\text{전단강도 } (\tau_f) = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

전단저항은 입자간의 마찰에 의하여 발휘되므로 이때의 마찰력 ϕ 를 전단저항각이라 하고, 이에 영향을 주는 인자로서 Terzaghi-Peck(1967)은 주로 상대밀도에 의하여 결정된다고 하였으며, Meyerhoff(1953)는 단위중량이 중요하다고 하였다. 점착력은 물의 수분이 흙입자 표면 또는 흙과 접촉하는 물체에 부착하는 힘을 말하며 흙의 점착력은 서로 인접하고 있는 입자간의 연결체 또는 막상으로 존재하고, 액체분자의 사이에 생기는 것이다(Baver, 1935).

전단강도는 공학적으로 매우 중요한 특성으로서 벽면에 작용하는 토압, 지지력, 지반개량공법, 사면안정, 지반침

하속도 및 기초설계 등 수많은 공학적 문제와 많은 관계가 있으나 정확한 강도정수를 산출하는 것은 쉬운 일이 아니다. 전단강도를 구하는 방법으로는 현장시험인 배인 전단시험 및 콘관입시험 등이 있으며, 실내시험으로 직접전단시험, 일축압축시험 및 삼축압축시험 등이 있다. 전단강도를 구하기 위해서는 이들 시험방법에 따라 수 시간에서 수일간의 시간이 소요된다. 이러한 방법들은 정확성, 효율성 및 경제성 등에서 각각 장단점을 가지고 있기 때문에 어떤 방법으로 전단강도를 구하느냐는 실제의 활용도에 따라 선택해야 할 매우 중요한 사항이다.

이 연구에서는 시간과 비용을 크게 소비하지 않고 전단강도에 영향을 주는 몇 가지의 토질물성치를 이용하여 토층의 강도정수를 쉽게 산정할 수 있도록 전단강도산정모델을 개발하였다. 이를 위해 강원도 평창군 진부면지역의 자연사면 토층을 대상으로 시료를 채취하여 실내에서 토질시험을 실시한 결과를 바탕으로 통계분석용 프로그램인 SPSS를 이용하여 몇 가지 토질물성치를 변수로 하는 새로운 전단강도산정모델을 제안하였다. 그리고 모델의 신뢰성 검증을 위해 연구지역에서 채취한 토층시료를 실험실에서 직접전단시험으로 구한 강도정수와 전단강도산정모델에 의해 산정한 강도정수를 상호 비교분석하였다.

연구지역

연구지역은 강원도 평창군 진부면 일대로 오대산(1,563 m), 발왕산(1,377 m) 등으로 둘러싸인 해발고도 500 m 이상의 고원지대이며 하진부 일대는 넓은 평지와 구릉지를 이루고 있다. 토층시료를 채취하기 위한 연구지역은 동일한 지질로 구성되어 있고 시료채취가 용이할 뿐만 아니라 다수의 산사태가 발생하여 전단강도와 관련한 토질특성을 분석할 가치가 충분한 점 등을 고려하여 선정하였다. 지질은 중립-조립질의 흑운모화강암이 분포하고 있는 지역으로 지형적으로는 풍화 및 침식현상 등으로 인해 비교적 낮은 산지를 형성하고 있다(Fig. 2).

연구방법

회귀분석의 인자로 이용될 토질물성치들을 구하기 위해 우선 시료채취는 연구지역의 토질특성을 충분히 반영하고 지형, 지질조건, 토층분포 등을 고려하여 비교적 일정한 빈도를 갖도록 함으로써 토층의 특성이 균등하게 평가될 수 있도록 총 30개 지점에서 토층시료를 채취하였다. 이 중 25개 시료의 시험결과로 전단강도산정모델을 개발하고

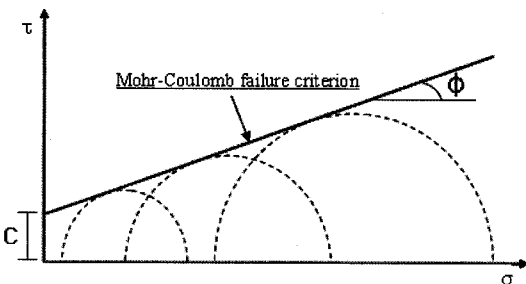


Fig. 1. Failure criterion by Mohr-Coulomb.

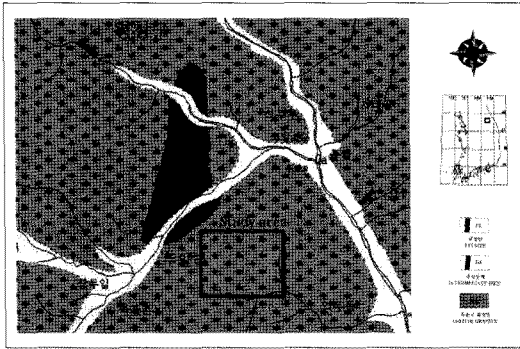


Fig. 2. Geological map of the study area.

모델에 적용되지 않은 나머지 5개 시료로써 모델과 비교 검증하였다. 시료는 표토를 제거한 후 40~70 cm 깊이에서 채취하였으며, 불교란시료와 교란시료로 구분하였다. 불교란시료는 스테인레스로 제작한 직경 10 cm, 높이 5 cm 크기의 원통형몰드를, 교란시료는 비닐팩을 이용하였다. 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실에 운반하였다.

토질시험은 KS기준에 의해 자연함수비, 밀도, 액성한계, 소성한계, 단위중량, 간극비 및 간극율을 구하였고, 입도 시험에 의해 유효경(D_{10}), 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_g)를 구하였다. 그리고 투수계수는 변수위투수시험을, 전단강도는 직접전단시험을 통하여 구하였다.

시험을 통하여 얻은 각각의 토질물성치를 이용하여 상관분석을 실시하고 강도정수와 관련성이 있는 토질특성을 선별한 후 선별된 인자들과 직접전단시험에 의한 강도정수인 전단저항각과 점착력을 각각 선형회귀분석 과정을 거쳐 새로운 전단강도산정모델을 제안하였다. 그리고 직접전단시험과 이 연구에서 개발한 모델에 의해 산정된 각각의 강도정수들을 상호 비교분석함으로써 모델의 신뢰성을 검증하였다.

연구지역의 토질특성

전단강도는 토층을 구성하고 있는 물리적 성질 및 공학적 특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 연구지역의 일반적인 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하기 위해 채취된 30개 토층시료에 대해 각종 토질시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

토질분류

애터비그한계시험은 흙이 수분을 흡수할 때 유동성의

정도를 알아보기 위한 시험으로 시료 중 작은 입자들 특히 점토입자들의 점착력을 산정하는데 유의한 자료가 될 수 있다. 흙의 연경도를 기능할 수 있는 액성한계 및 소성한계 시험결과 액성한계는 23.45~47.01%의 범위로서 평균 31.98%이고, 소성한계는 11.70~32.41%의 범위로서 평균 18.50%인 것으로 나타났다. 그리고 소성지수는 8.49~18.07의 범위로서 평균 13.48인 것으로 나타나 다소 저소성의 점토성분을 포함하고 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 3은 연구지역의 토층을 통일분류법(USCS)에 의하여 구분한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 점토를 소량 함유하는 모래질지반으로서 대부분 양호한 입도조건으로서 SW-SC, SW 및 SW-SM으로 분류되고 일부는 SP-SM 및 SP-SC로서 불량한 입도조건을 가지는 것으로 나타났다.

입도분포

입도분포는 흙의 조직에 의한 물리적 특성을 파악하는데 이용되는 매우 중요한 성질이다. 입도분포곡선은 흙속에 존재하는 입자크기의 범위를 나타낼 뿐만 아니라, 여러가지 크기를 가진 입자의 분포형태를 알 수 있다.

Fig. 4는 연구지역 토층시료에 대한 입도분석 결과를 삼각좌표로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분 모래크기 입자들의 구성비가 높고 실트나 점토크기의 세립들의 함유비율은 25% 이내로서 비교적 낮은 편이어서 모래질토로 구분됨을 알 수 있다. 한편, 입도분포곡선은 유효경, 균등계수 및 곡률계수 등과 함께 기본적인 토질 파라미터를 결정하는 중요 요소의 하나인데, 시험결과 입도분포곡선이 대체로 완만한 기울기를 보이며, 균등계수는 5.2~12.9의 범위이고 곡률계수는 0.8~1.7의 범위로서 양입도의 정량적 판별기준이 되는 균등계수 6 이상과 곡률계수 1~3의 조건을 대부분 충족하고 있어 토층시료는 입도조성이 비교적 양호한 흙으로 분류된다.

투수성

투수계수는 공학적으로 특히 중요한 특성으로서 침투 문제, 필댐의 내수성검토 및 누수율의 결정, 침하와 사면안정문제, 굴착공사 방법의 결정 및 지반침하 속도계산 등 공학적 문제와 많은 관계가 있다. 그리고 유효경과 서로 비례적 관계이고 균등계수는 비교적 높은 상관성을 가지고 있다(김경수, 2005).

Fig. 5는 연구지역 토층시료의 변수위투수시험에 의한 투수계수를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 투수계수는 1.23×10^{-3} ~ 3.45×10^{-2} cm/sec의 범위

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

Sample No.	Gs	w (%)	Atterberg limits(%)			D_{10} (cm)	C_u	C_g	USCS	e	n (%)	Unit weight(g/cm ³)			shear strength		
			LL	PL	PI							Wet	Sat.	dry	k (cm/sec)	f (°)	c (kg/cm ²)
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	31.5	0.048
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	30.2	0.052
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	30.9	0.066
JB-04	2.61	11.33	37.43	20.68	16.75	0.011	7.5	1.0	SW-SC	0.85	45.98	1.57	1.87	1.41	2.40E-03	33.8	0.044
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	35.3	0.025
JB-06	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	33.0	0.030
JB-07	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	31.4	0.062
JB-08	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	30.6	0.051
JB-09	2.61	9.11	29.36	14.90	14.47	0.009	7.6	1.1	SW-SC	0.86	46.36	1.52	1.86	1.40	2.15E-03	32.6	0.029
JB-10	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	34.8	0.031
JB-11	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	32.1	0.039
JB-12	2.58	15.58	28.76	13.76	15.00	0.016	6.1	1.5	SW-SC	0.75	42.71	1.71	1.90	1.48	3.72E-03	34.9	0.030
JB-13	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	33.3	0.032
JB-14	2.62	28.06	30.37	19.63	10.74	0.013	6.6	1.4	SW-SC	1.43	58.80	1.38	1.67	1.08	2.79E-02	29.0	0.060
JB-15	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	29.3	0.045
JB-16	2.61	20.13	35.31	26.74	8.57	0.010	5.9	1.0	SP-SM	1.06	51.44	1.52	1.78	1.27	3.75E-03	31.2	0.070
JB-17	2.64	10.97	47.01	32.41	14.61	0.026	5.8	1.3	SP-SM	0.67	40.04	1.75	1.98	1.58	2.31E-02	35.8	0.036
JB-18	2.61	7.31	33.77	21.75	12.02	0.008	6.3	1.2	SW-SC	0.78	43.91	1.57	1.90	1.46	1.23E-03	34.0	0.037
JB-19	2.65	8.30	26.28	12.35	13.92	0.023	9.9	1.5	SW-SC	1.01	50.16	1.43	1.82	1.32	2.93E-02	32.1	0.048
JB-20	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	35.0	0.026
JB-21	2.62	15.97	31.29	16.22	15.07	0.015	7.1	1.4	SW-SC	0.58	36.58	1.92	2.02	1.66	2.05E-03	36.3	0.024
JB-22	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	35.1	0.031
JB-23	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-03	31.8	0.028
JB-24	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	34.5	0.036
JB-25	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	29.5	0.064
JB-26	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	29.8	0.044
JB-27	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	33.6	0.030
JB-28	2.63	13.34	33.34	20.14	13.20	0.016	7.9	1.2	SW-SC	0.95	48.76	1.52	1.83	1.35	1.38E-02	32.6	0.054
JB-29	2.63	16.73	34.81	22.20	12.61	0.009	6.9	0.9	SP-SC	0.82	44.93	1.69	1.90	1.45	3.12E-03	33.1	0.027
JB-30	2.59	8.46	29.28	16.79	12.49	0.010	12.9	1.5	SW-SC	0.80	44.50	1.56	1.88	1.44	2.89E-03	34.2	0.040

Gs, 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; ϕ , friction angle; c, cohesion.

로서 평균 1.27×10^{-2} cm/sec인 것으로 나타났는데, 이는 Darcy(1856)에 의하면 대부분 세립질모래~점토질실트 정도에 해당하는 것으로 보통~빠른 정도의 투층지반으로 평가되었다.

전단강도

전단강도는 공학적으로 중요한 특성인데 토압, 지지력, 지반개량, 사면안정 및 지반침하 등 지반공학적인 요소

들의 해석 및 실시설계시 필수적으로 고려되는 강도정수이다. 연구지역 토층시료의 직접전단시험 결과에 의한 강도정수는 전단저항각이 29~36°로서 평균 33°이고 점착력은 0.024~0.07 kg/cm²로서 평균 0.040 kg/cm²인 것으로 나타났다. Fig. 6은 연구지역 토층시료에 대한 전단시험 결과를 전단저항각과 점착력간의 관계로 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이들은 뚜렷한 경향성을 보이지는 않으나 대체적으로 반비례관계에 있

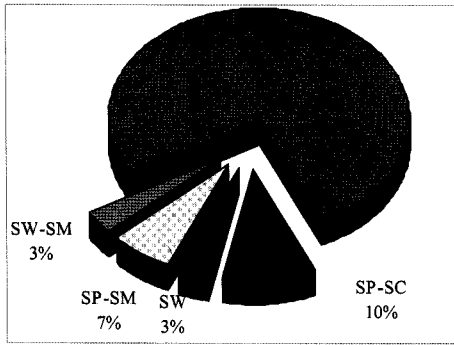


Fig. 3. Classification by USCS of sampled soils from the study area: SW, well graded sands; SW-SC, well graded sands to clayey sands; SW-SM, well graded sands to silty sands; SP-SC, poorly graded to clayey sands; SP-SM, poorly graded to silty sands.

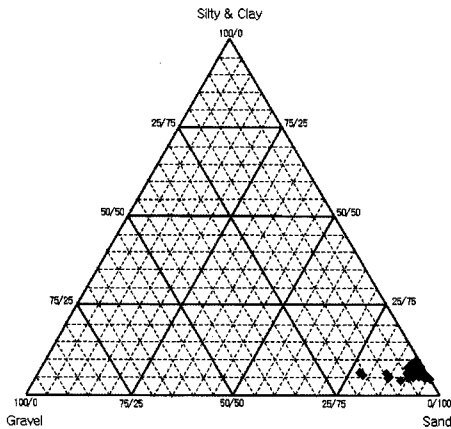


Fig. 4. Grain sizes distribution by the triangle diagram of sampled soils from the study area.

음을 알 수 있다. 이는 직접전단시험을 통한 강도정수 산출시 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 따라 직접전단시험의 최대전단응력 3개의 점을 추세선으로 연결하여 그 기울기를 전단저항각으로, 수직축과의 교점을 점착력으로 취하는데서 기인하는 결과이다. 추세선의 기울기 즉, 전단저항각이 크면 수직절편이 상대적으로 작아짐으로써 점착력도 작아지기 때문에 이들은 상호 반비례적 관계를 갖는 것으로 해석된다. 그러나 Fig. 6과 같이 산포되는 양상으로 보아 절대적으로 반비례 관계라고 단언하기는 무리가 있을 뿐만 아니라 시료의 특성에 따라 점착력의 크기가 달라지기 때문에 단순히 전단저항각만으로 점착력을 산정하기엔 부족함이 있다. 따라서 점착력을 산정하는 모델에 이용되는 토질인자는 전단저항각의 인자와는

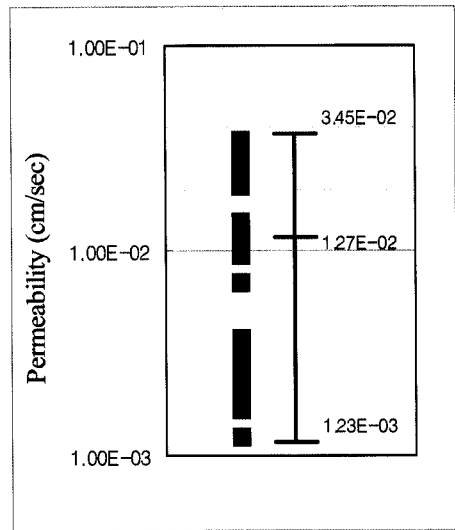


Fig. 5. permeability coefficient of sampled soils from the study area.

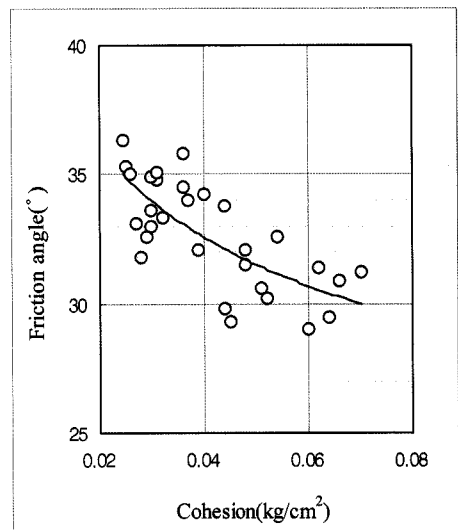


Fig. 6. Relationship between cohesion and friction angle of sampled soils from the study areas.

구분되어야 할 것이다.

Fig. 7은 연구지역 토층시료를 대상으로 직접전단시험에 의해 구한 전단저항각과 여러 토질물성치를 대비한 결과 중 상관성이 높은 것으로 나타난 간극비 및 단위중량과의 관계를 도기한 것이다. Fig. 7(a)에서와 같이 간극비는 전단저항각과 반비례의 관계이며 높은 수준의 선형관계를 보여주는데, 이는 회귀분석방법 중 단순방법인 선형회귀 분석법이 쉽게 적용될 수 있음을 지지하는 결과이다. 한편,

Fig. 7(b)는 전단저항각과 단위중량의 관계를 나타낸 것으로 전단저항각에 대해 습윤, 포화 및 건조 단위중량이 모두 비례적 관계로서 높은 상관성을 보이지만, 산포가 상대적으로 적은 건조단위중량이 습윤 및 포화 단위중량에 비해 더 높은 상관성이 있을 것으로 보인다.

Fig. 8은 점착력을 간극비 및 단위중량과 비교한 것으로

그림에서 보는 바와 같이 점착력은 간극비의 비례적이고 단위중량과는 반비례적 관계로서 전단저항각의 경우와는 반대적인 경향성을 보였다. 또한, 점착력의 경우 간극비와 단위중량 모두 전단저항각의 경우보다 산포가 많은 것으로 보아 정확도에 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 선형회귀분석서 모델의 정확성 및 신뢰성을 향

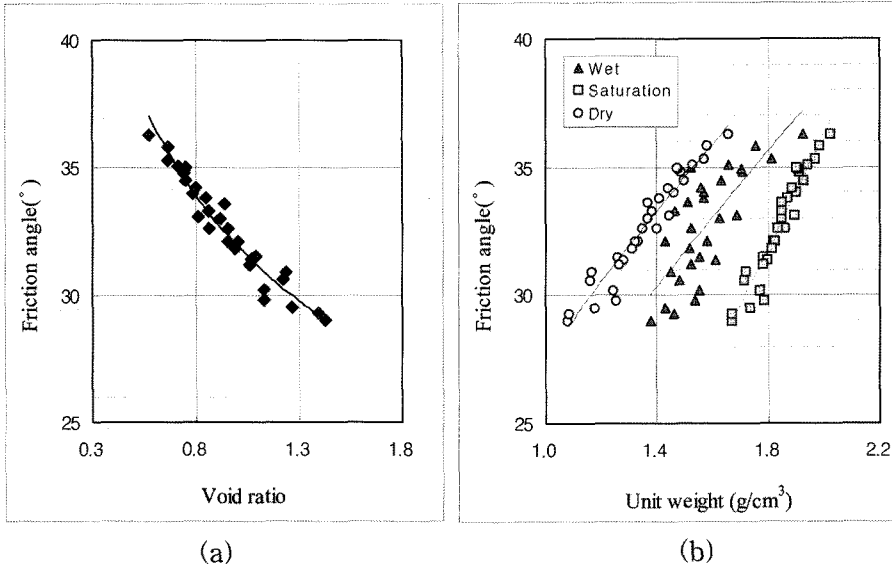


Fig. 7. Relationship between void ratio, unit weight and friction angle of sampled soils from the study areas: (a), void ratio and friction angle; (b), unit weight and friction angle.

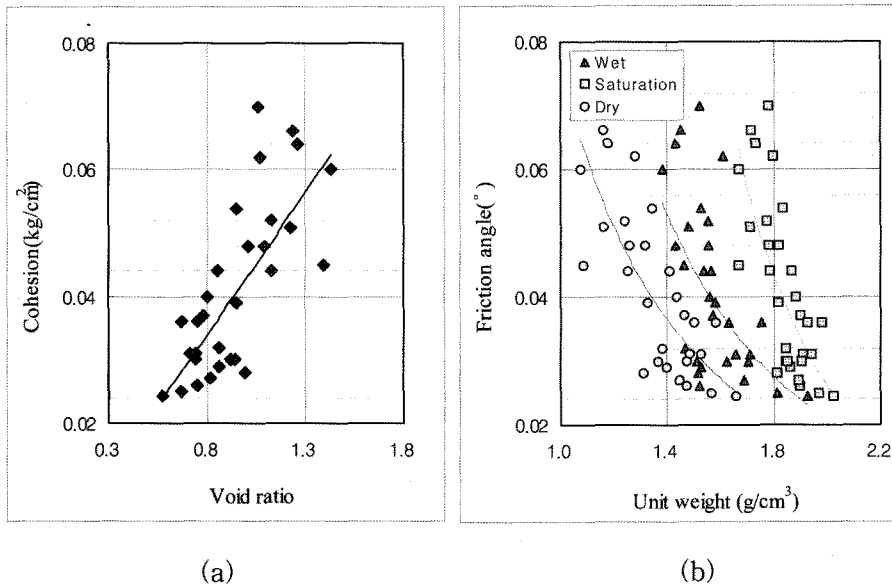


Fig. 8. Relationship between void ratio, unit weight and cohesion of sampled soils from the study areas: (a), void ratio and cohesion; (b), unit weight and cohesion.

상시키기 위해서는 상관성이 높은 인자를 추가로 선정할 필요성이 요구되는데, 이를 위해 Fig. 9와 같이 추가로 점착력과 상관성이 있는 소성지수도 비교분석하였다. 소성지수는 흙의 유동성과 직접적으로 관계되는 액성한계 및 소성한계와 상관성이 있는 물성으로서 점착력에 유의한 인자인 것으로 판단하였다. 점착력과 소성지수의 관계는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 다소 산포상을 보이기는 하나 대체로 반비례적 관계인 것으로 나타나 간극비 및 단위중량과 함께 점착력 산정을 위한 인자로 간주될 수 있다.

선형회귀분석에 의한 전단강도산정모델

본 연구는 실내시험을 통해 토질물성치를 구하고 이를 통계적 방법에 의한 전단강도산정모델에 적용하여 적은 시간과 비용으로 간단하게 전단저항각과 점착력을 산정할 수 있도록 하였다. Fig. 10은 통계적 방법으로 전단강도산정모델을 개발하기 위한 흐름도이다. 그림에서 보는 바와 같이 연구과정은 우선 실내시험에서 구한 토질물성치를 범용 통계프로그램인 SPSS를 이용하여 전단저항각과 점착력으로 나누어 각각 Pearson 상관계수를 이용하여 상관분석을 실시한 후 상관성이 높은 토질인자를 우선 선정한다. 그리고 선정된 토질인자와 직접전단시험에 의해 구한 강도정수를 선형회귀분

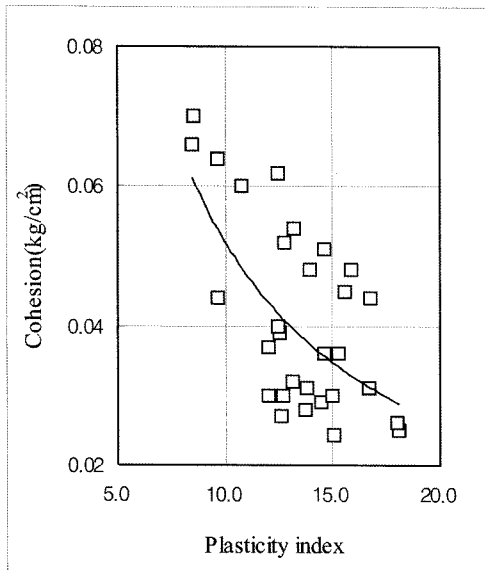


Fig. 9. Relationship between plasticity index and cohesion of sampled soils from the study areas.

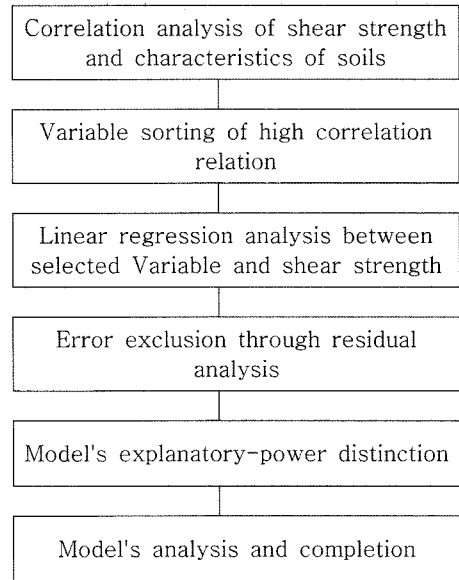


Fig. 10. The flow chart of statistical analysis.

석하여 기중치 즉, 선형적 계수 및 상수를 구함으로써 최종적으로 전단강도정수를 산정할 수 있는 모델이 완성된다.

전단저항각산정모델

전단저항각과 상관성이 높은 토질인자를 선별하기 위해 전단저항각을 포함한 18가지 토질특성치를 등비인 변수에 적용되는 분석이론인 Pearson 이변량 상관계수를 이용하여 상관분석한 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다. 이는 상관분석을 통해 얻은 전단저항각과 각 토질물성치간의 Pearson 상관계수 및 유의도를 구한 것으로 Pearson 상관계수는 음과 양에 상관없이 절대값이 클수록 상관성이 높으며, 유의도는 0에 가까울수록 상관성이 높음을 의미한다. 그리고 상관계수의 음은 반비례관계를, 양은 비례관계를 의미한다. Table 2에 따라 유의도의 기준인 0.01 이내에는 함수비, 간극비, 간극율, 습윤단위중량, 포화단위중량, 건조단위중량, 소성지수 및 투수계수 등이 상관성이 높음을 알 수 있다. 그러나 이 8개의 토질인자 중 함수비와 습윤단위중량은 물과 관계된 것으로서 시료를 채취한 시점의 토층상태나 계절 및 일기 등에 크게 영향을 받는다. 그리고 간극율은 간극비와 상관성이 매우 높아 비례관계식으로 얻을 수 있으므로 중복적용을 피하기 위해 이들을 제외하였다. 그리고 포화단위중량은 회귀분석시 건조단위중량과 같은 비율로 적용될

Table 2. Pearson correlation and significance.

Variable	Correlation	Angle of shearing resistance	Variable	Correlation	Angle of shearing resistance
Friction angle	Pearson correlation coefficient	1.000	Liquid limit	Pearson correlation coefficient	0.26596
	Significance	.		Significance	0.19877
density	Pearson correlation coefficient	-0.32046	Plastic limit	Pearson correlation coefficient	-0.03063
	Significance	0.11833		Significance	0.88444
Moisture content (%)	Pearson correlation coefficient	-0.77845	Plasticity index	Pearson correlation coefficient	0.55799
	Significance	4.60E-06		Significance	0.00375
Void ratio	Pearson correlation coefficient	-0.96495	Gravel (%)	Pearson correlation coefficient	0.16514
	Significance	6.99E-15		Significance	0.43019
Porosity (%)	Pearson correlation coefficient	-0.97399	Sand (%)	Pearson correlation coefficient	-0.18972
	Significance	1.11E-16		Significance	0.36371
Wet unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	0.775967	Silt/Clay (%)	Pearson correlation coefficient	0.03218
	Significance	5.16E-06		Significance	0.87863
Saturation unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	0.95644	D ₁₀ (cm)	Pearson correlation coefficient	0.08851
	Significance	8.63-E14		Significance	0.67395
Dry unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	0.96433	Cu	Pearson correlation coefficient	0.07385
	Significance	8.77E-15		Significance	0.72572
Permeability (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0.60915	C _g	Pearson correlation coefficient	0.20382
	Significance	0.00123		Significance	0.32845

것으로 보아 모델의 간편화를 위해 제외하였다. 따라서 상관계수가 크고 유의도가 가장 낮은 토질인자 즉 간극비 및 건조단위중량을 모델에 적용할 인자로 최종 선정하였다.

위의 상관분석으로부터 상위의 변수인 간극비, 건조단위중량을 이용하여 전단저항각산정모델을 만들기 위해 직접전단시험에 의한 전단저항각과의 선형회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

진입/제거된 변수

모형	진입된 변수	제거된 변수
1	간극비 건조단위중량	.

모형 요약

모형	R	R 제곱	수정된 R제곱	추정값의 표준오차	Dubin-Watson
1	.967	.936	.930	.5891	2.761

분산분석

모형	제곱합	자유도	평균제곱	F	유의확률
1 선형회귀분석	111.143	2	55.571	160.118	.000
잔차	7.635	22	.347		
합계	118.778	24			

계수

모형	비표준화계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
1 (상수)	28.487	10.225		2.786	.011
간극비	-4.813	3.420	-.513	-1.407	.173
건조단위중량	6.451	5.150	.457	1.253	.224

잔차 통계량

모형	최소값	최대값	평균	표준편차	N
예측값	28.57293	36.40544	32.708	2.151966	25
표준화 예측값	-1.92153	1.718168	-6.9E-16	1	25
예측값의 표준오차	0.12011	0.371349	0.195014	0.061387	25
수정된 예측값	28.37818	36.47495	32.69732	2.173885	25
잔차	-1.31344	0.896565	2.7E-15	0.564043	25
표준화 잔차	-2.22949	1.521862	4.58E-15	0.957427	25
스튜던트화 잔차	-2.31348	1.612273	0.008365	1.006161	25
삭제된 잔차	-1.41427	1.006255	0.010678	0.624365	25
삭제된 스튜던트화 잔차	-2.59834	1.677416	-0.00402	1.045162	25
Mahal. 거리	0.037597	8.575938	1.92	2.036476	25
Cook의 거리	0.000496	0.136946	0.035562	0.038291	25
중심화된 레버리지 값	0.001567	0.357331	0.08	0.084853	25

위의 선형회귀분석 결과로 잔차의 정규성과 등분산성은 모두 만족이며 분산분석의 유의확률 $P = 0.000$ 이다. 그리고 수정된 R제곱은 설명력이 93%로서 회귀모형이 매우 적합함을 알 수 있다. 또한, 모델의 신뢰도 검증을 위해 추가로 준비한 dummy용 5개 토층시료의 물성치를 적용했을 때 전단저항각산정모델과 직접전단 시험에 의한 전단저항각 간 편차의 평균 $md = 0.08$ 로서 모델에 적용한 25개 시료의 편차의 평균 0.46보다 오차가 오히려 적은 것으로 나타나 높은 신뢰도를 확보하였음을 알 수 있다.

최종적으로 전단저항각산정모델은 위의 선형회귀분석 결과 중 '계수' 부분의 비표준화계수 B의 값을 이용하여 다음과 같이 선형적인 식(2)으로 정리된다.

$$\text{전단저항각} = (-4.813 \times e) + (6.451 \times \gamma_w) + 28.487 \quad (2)$$

여기서 e, 간극비; γ_w 건조단위중량

이는 간극비와 건조단위중량만으로도 높은 신뢰도의 전단저항각을 산정할 수 있음을 의미 하는 것으로 전단저항각은 간극비의 반비례, 건조단위중량과는 비례관

계에 있음을 보여준다.

점착력산정모델

전단저항각의 경우와 마찬가지로 점착력을 포함한 18가지 토질특성치를 등비인 변수의 상관분석 이론인 Pearson 이변량 상관계수를 이용하여 상관성분석을 실시한 결과는 Table 3에서 보는 바와 같다. 유의도 0.01 이내로 함수비, 간극비, 간극율, 습윤단위중량, 포화단위중량, 건조단위중량 및 소성지수 등이 상관성이 높음을 알 수 있다. 그러나 전단저항각의 경우와 마찬가지로 이유로 7개 토질인자 중 함수비, 습윤단위중량, 포화단위중량 및 간극율 등은 제외하고 유의수준이 가장 높은 3개 토질인자 즉 간극비, 건조단위중량 및 소성지수를 모델에 적용할 인자로 선정하였다.

상관분석으로부터 상위의 유의한 변수인 간극비, 건조단위중량 및 소성지수를 이용하여 직접전단시험에 의한 점착력과의 선형회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

위의 점착력에 대한 선형회귀분석 결과는 전단저항각과 마찬가지로 잔차의 정규성과 등분산성은 모두 만족이다.

Table 3. Pearson correlation and significance.

Variable	Correlation	Angle of shearing resistance	Variable	Correlation	Angle of shearing resistance
Cohesion (kg/cm ²)	Pearson correlation coefficient	1.000	Liquid limit	Pearson correlation coefficient	-0.19159
	Significance			Significance	0.35891
density	Pearson correlation coefficient	0.22168	Plastic limit	Pearson correlation coefficient	0.16850
	Significance	0.28690		Significance	0.42074
Moisture content (%)	Pearson correlation coefficient	0.62574	Plasticity index	Pearson correlation coefficient	-0.65580
	Significance	0.00082		Significance	0.00037
Void ratio	Pearson correlation coefficient	0.77505	Gravel (%)	Pearson correlation coefficient	-0.26363
	Significance	5.38E-06		Significance	0.20290
Porosity (%)	Pearson correlation coefficient	0.77319	Sand (%)	Pearson correlation coefficient	0.24883
	Significance	5.86E-06		Significance	0.23035
Wet unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0.61261	Silt/Clay (%)	Pearson correlation coefficient	0.06953
	Significance	0.00113		Significance	0.74119
Saturation unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0.764184	D ₁₀ (cm)	Pearson correlation coefficient	-0.11147
	Significance	8.74E-06		Significance	0.59578
Dry unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0.76641	Cu	Pearson correlation coefficient	-0.14536
	Significance	7.93E-06		Significance	0.48813
Permeability (cm/sec)	Pearson correlation coefficient	0.43402	C _g	Pearson correlation coefficient	-0.18727
	Significance	0.03018		Significance	0.37004

그리고 분산분석의 유의확률 P=0.000이고 수정된 R제곱은 설명력이 85%로서 모형이 적합함을 알 수 있다. 또한, 모델의 신뢰도 검증을 위해 추가로 준비한 5개 토층시료의 물성치를 적용했을 경우 점착력산정모델과 직접전단시험에 의한 점착력간의 편차의 평균 md=0.01로서 모델에 적용한 25개 시료의 편차의 평균 0.006과 비슷한 수준의 신뢰도를 보였다. 결론적으로 점착력산정모델은 다음 식(3)으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \text{점착력} &= (0.037 \times e) + (0.003985 \times \gamma_d) \\ &+ (-0.0018 \times PI) + 0.02417 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 e, 간극비; γ_d , 건조단위중량; PI, 소성지수

점착력산정모델의 경우 전단저항각산정모델에 비해 점착력과 상관성이 있는 토질특성 즉, 토층시료의 세립자의 유동성과 직접적으로 관련되는 소성지수가 추가로 포함됨으로써 신뢰도가 더 향상된 것으로 생각 된다.

진입/제거된 변수

모형	진입된 변수	제거된 변수
1	간극비 건조단위중량 소성지수	

모형 요약

모형	R	R 제곱	수정된 R제곱	추정값의 표준오차	Dubin-Watson
1	.834	.895	.851	8.086E-03	1.577

분산분석

모형	제공합	자유도	평균제곱	F	유의확률
1 선형회귀분석	3.125E-03	3	1.042E-0.	15.932	.000
잔차	1.373E-03	21	6.538E-05		
합계	4.498E-03	24			

계수

모형	비표준화계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
1 (상수)	2.417E-02	.141		.172	.865
간극비	3.700E-02	.047	-.641	.786	.440
건조단위중량	3.985E-03	.071	.046	.056	.956
소성지수	-1.80E-03	.001	-.355	-2.544	.019

잔차 통계량

모형	최소값	최대값	평균	표준편차	N
예측값	0.022651	0.062029	0.04036	0.011411	25
표준화 예측값	-1.55194	1.898988	4.15E-16	1	25
예측값의 표준오차	0.001974	0.005116	0.003123	0.00086	25
수정된 예측값	0.021989	0.062954	0.040265	0.011557	25
잔차	-0.01326	0.016993	-1.9E-17	0.007563	25
표준화 잔차	-1.63981	2.101615	-2.3E-15	0.935414	25
스튜던트화 잔차	-1.71252	2.36087	0.006151	1.013218	25
삭제된 잔차	-0.01446	0.021444	9.46E-05	0.008915	25
삭제된 스튜던트화 잔차	-1.80179	2.688167	0.013267	1.064639	25
Mahal. 거리	0.470596	8.648845	2.88	2.20218	25
Cook의 거리	1.92E-05	0.36499	0.045394	0.077843	25
중심화된 레버리지 값	0.019608	0.360369	0.12	0.091758	25

모델과 직접전단시험에 의한 강도정수 비교

토질시험 결과를 이용하여 이 연구에서 제안된 전단 강도산정모델에 적용하여 전단저항각과 접착력을 각각 산정하고 이를 직접전단시험에 의해서도 구하여 두 경우에 의한 상관관계를 비교분석하였다.

Fig. 11은 전단저항각산정모델을 적용하여 산정한 전단저항각과 직접전단시험에 의한 전단저항각을 비교한 결과를 나타낸 것으로, 그림에서와 같이 높은 유사성의 동일한 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다. 모델에 의한 전단저항각과 직접전단시험에 의한 전단저항각 값의 차이를 평균한 수치인 편차의 평균은 두 값의 유사성을

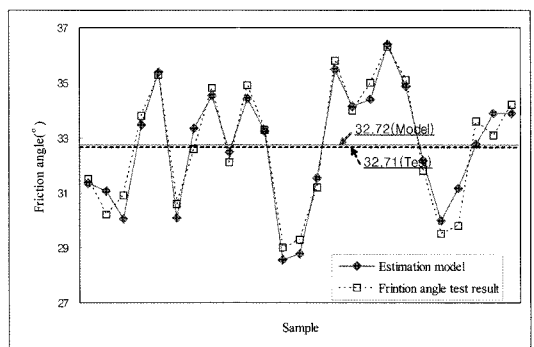


Fig. 11. Comparing the estimation model with friction angle result by direct shear test.

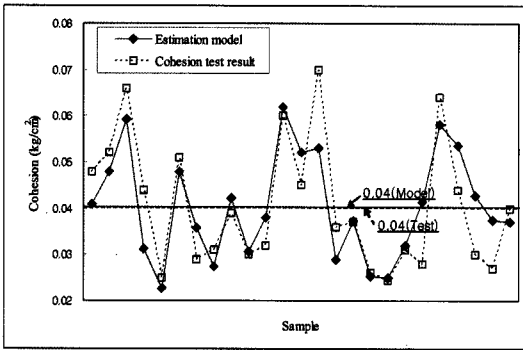


Fig. 12. Comparing the estimation model with cohesion result by direct shear test.

판단하는 척도인데, 그 값이 0.46으로서 직접전단시험 평균값 32.71 대비 1.4%에 해당하는 아주 적은 오차이다. 이는 간극비와 건조단위중량만으로도 전단저항각을 비교적 높은 정확도로 산정 할 수 있음을 의미하는 것으로 본 모델의 신뢰성이 확보되었음을 알 수 있다.

Fig. 12는 점착력산정모델에 적용하여 산정한 점착력과 직접전단시험에 의한 점착력을 비교한 것으로 전단저항각과 동일한 패턴을 보여주고 있으나 전단저항각의 경우보다는 편차가 상대적으로 크게 나타났다. 점착력의 경우 두 값의 편차의 평균은 0.006으로서 직접전단시험 평균값 0.04 대비 15%에 해당하는 오차로서 편차가 다소 크지만 이는 85%에 해당하는 신뢰도를 의미함으로써 상당한 유의수준을 확보하였음을 보여준다.

이상에서 살펴본 바와 같이 전단강도산정모델에 의한 강도정수와 직접전단시험에 의한 강도정수가 모두 상관성이 높음을 알 수 있다. 즉, 직접전단시험에 의한 강도정수가 큰 토층시료는 모델에 의해서도 크게 나타나고 작은 토층시료는 모델에 의한 결과도 역시 작게 나타나는 일관적인 경향성을 보였다.

결 론

이 연구는 토질특성을 평가하는 주요 영향인자인 전단강도를 몇 가지 토질물성만으로 쉽게 산정할 수 있도록 선형회귀분석을 이용하여 전단강도산정모델을 개발하였다. 그리고 개발된 전단강도산정모델과 직접전단시험에 의한 강도정수를 비교 분석하여 모델의 적합성을 검증하였다. 그 결과 연구지역과 유사한 토질조건인 경우 이 연구에서 개발된 모델을 이용할 경우 직접전단시험에 의한 강도정수에 거의 근접한 결과를 얻을 수 있는 것으로 평가되었다.

연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 연구지역은 흑운모화강암 분포지역으로서 시료를 채취한 자연사면의 토층은 전체적으로 점토와 실트를 함유한 양입도의 모래질지반이며 SW, SW-SM 및 SW-SC 등으로 분류된다.

2) 상관분석을 통해 여러 토질인자들과 강도정수간의 상관관계를 분석한 결과 전단저항각에 유의한 토질인자는 간극비 및 건조단위중량인 것으로 평가되었으며 이들 인자는 강도정수 산정시 고려되어야 할 요소이다.

3) 점착력의 경우는 간극비, 건조단위중량 및 소성지수가 유의한 토질인자인 것으로 평가되어 전단저항각의 경우에 비해 소성지수가 추가되었는데, 이는 소성 및 유동성을 나타내는 소성지수가 점착력에 영향을 미치는 요소이기 때문이다.

4) 전단강도산정모델과 직접전단시험에 의해 산정된 강도정수는 상관성이 높아 직접전단시험에 의해 전단강도가 큰 토층시료는 모델에 의한 결과 역시 크게 나타나고 작은 토층시료는 모델에 의해서도 역시 작게 나타나는 일관성이 확인되었다.

5) 이 연구에서 개발된 전단강도산정모델에 의한 강도정수가 직접전단시험에 의한 강도정수와 매우 유사한 결과를 보임으로써 그 적합성이 검증되었다. 따라서 이 모델은 연구지역과 같은 토질조건에서 간접적인 방법으로 전단강도를 산정할 경우 이용이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 “금경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김경수, 이문세, 2005, 경험식과 직접투수시험에 의한 자연사면 토층시료의 투수계수 비교분석, 대한지질공학회 학술발표회, 277-284.
 Baver, 1935, Sorption of liquids by soil colloids, Soil Science. 40, 403-419.
 Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris, 647p.
 Duncan, J. M. and Stephen, G. W., 2007, Soil strength and slope stability, 480p.
 Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE, 82, SM1, 867p.
 Lambe, T. W., 1958, The Engineering Behavior of Com-

pacted Clay, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE, 125, 718p.
Meyerhof, G. G., 1953, The Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads, Proc. 3rd Inter. Conf. Soil Mech. (Zurich), 1, 440-445.
Terzaghi, K., and Peck, R. B., 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edition John Wiley and Sons, New York. The first edition was published in 1948.

류제천

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

김경수

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

2009년 4월 2일 원고접수, 2009년 6월 15일 게재승인

이문세

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