동결 · 융해에 따른 풍화토의 강도특성 변화
Strength characteristic transformation of weathered soil caused by freezing-thawing

*김수삼, **박영목, ***정승용, ****김용수
Kim, Soo-Sam, Park, Young-Mok, Jung, Seong-Yong, Kim, Yong-Su

- ABSTRACT -

It's strongly recommended to check upon the slope stability of soil nearby railroad, since the freezing-thawing repeat in long term may cause decrease of slope stability. The study is, therefore, focused on the strength characteristic transformation of soil, measuring it experimentally, throughout physical and mechanical tests operated by the freezing-thawing repeat tests. The sampling of weathered soil used for the embankment materials along the domestic railway lines are classified by parent-rock, and then collected after it in the first hand. It tells that Uniaxial strength and axial strain were decreased simultaneously as the frequency of freezing-thawing repeat increased and its range was reduced into 25~85 percentage off comparing to uniaxial strength of unfreezing-soils when about 100 times of freezing-thawing repeats occurred. Following the result of direct shear tests, the cohesion of freezing-soil with freezing-thawing repeats shows 11~60 percentage less than that of unfreezing-soil but the change of internal friction angle of the soil is extremely slight, enough to ignore. As a result, it could be found that strength characteristic transformation has highly correlated with freezing-thawing repeat.

1. 서론

국가경제 발전 및 산업화의 가속으로 인하여 수송분담률이 가장 높은 철도의 이용이 점차적으로 증가되고 있어 노후된 철도시설의 안정성 강화 및 철도연변 사면의 안정성 검토가 요구되고 있다.

일반적으로 사면붕괴를 발생시키는 요인으로는 구성토질, 암석의 종류, 지질구조, 암반내 불연속면의 발달정도, 토사와 암석의 경계 심도, 사면의 삼차원 형태 등의 지반내 잠재요인(내인적 요인)과 집중호우, 폭설, 지하수, 지진, 하안 침식 등의 자연적 요인 및 절토, 성토, 댐 건설, 매립장 건설 등의 인위적 요인인 직접적 요인(외인적 요인)으로 대별할 수 있다. 철도연변 사면 붕괴의 경우도 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하며, 특히 동결 · 융해 작용이 반복되면서, 함수비의 변화, 간극수의 냉각, 입자구조의 변화, 입자구조의 파괴 등이 발생하여 사면의 안전율이 점차 감소한다(정영, 2000).

따라서, 본 연구에서는 국내 철도연변 사면의 성토재로 사용되어지는 풍화토를 모암을 기준으로 크게 화성암지역, 변성암지역, 퇴적암지역으로 구분하고, 화성암지역은 4개소(김제, 영주, 전주, 청주), 변성암지역은 3개소(사북, 곤지암, 제천), 퇴적암지역은 4개소(경산, 밀양, 군위, 영월)로 총 11개소의 대표적인 지역에서 성토재를 채취하였다. 채취한 시료를 대상으로 동결 · 융해 반복에 대한 여러 가지 실험을 실시하여 성토재의 특성 변화를 파악하고 성토재의 특성 변화로 인한 강도정수 변화를 알아보고자 하였다.

* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원
** 영남대학교 토목공학과 부교수
*** 지구환경전문가그룹 선임연구원
**** 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사수료

2. 동결·융해에 따른 특성변화

2.1. 입자의 구조적 변화

동결·융해로 인하여 지반의 상태는 상당히 변화되며, 이는 주로 토-수계 내의 구조변화에 의한 것이다. 동결·융해 작용은 토립자를 분쇄시키고 투수성을 감소시키는 한편 토립자를 크게 교란시킨다고 제시하였다(Broms et al., 1964; 悟郎, 1965). 또한 Chamberlain et al.(1972)은 세립토가 동결되었다가 다시 융해되면 토립자의 이합 및 균열이 발생되어 투수성이 증가되고, 특히 이 균열은 흐름의 저항성을 감소시키고 이를 위한 통로 역할을 한다고 하였다.

흙이 동결되면 매우 단단해지며(Chammarlain et al., 1972; Everett et al., 1965), 흙이 동결한다고 하는 것은 토립자 사이에 있던 중력수나 흡착수가 결빙하는 것을 의미한다. 동결·융해에 따른 흙의 역학적 성질을 좌우하는 요인으로는 온도, 토질, 염분농도, 얼음의 포화도, 건조밀도, 동결조건 등이 있다(한국건설기술연구소, 1992). 일반적으로 비동결토는 삼상(three-phase)으로 구성되어 있으나 동결토는 다상으로 구성된 복잡한 물질로써 주어진 체적내에서 사상(four-phase)으로 형성되어 있다. 동결토에는 중간상(interphase)이 존재하게 되는데, 가장 중요한 상태로서는 얼음-물, 얼음-규산염, 물-규산염, 공기-물, 공기-얼음 등이 있다. 이 같은 흙의 구성 사이의 상호관련성은 온도나 응력과 같은 외적요인뿐 아니라 각각의 상의 성질에 따라 변화한다(과학기술처, 1992).

2.2. 직접전단강도 특성변화

동결토의 전단강도는 2가지 요소로 구분할 수 있는데, 첫째는 변형에 대한 얼음의 저항이고, 둘째는 토립자에 의한 마찰이다(Ruedrich, 1973). 이 별개의 요소들은 아래 조건에 의해 개략적으로 산정할 수 있다. Vyalov(1962)는 변형된 Mohr-Coulomb 파괴 이론을 동결토에 적용하여, 동결토의 전단강도를 구하는 식을 제안하였다. 즉,

$$\tau = C_t + \sigma_n \tan \phi_t \quad \text{---------- (1)}$$

여기서, τ : 전단강도, σ_n : 수직응력, C_t, φ_t : 온도와 시간의 함수

점착력 성분인 C_t는 입자사이의 물리적, 화학적 결합력 및 분자간의 결합력에 의해 영향을 받으며, 또한 흙속에 얼음의 양, 강도, 흙과 접촉하는 얼음의 면적 등에 영향을 받는다.

Vyalov와 Shusherina(1970)는 실험을 통해 C_t를 구하는 식을 제시하였다.

$$C_t = \frac{\beta}{\log(t/B)} \quad \text{---------- (2)}$$

여기서, t는 시간이고, β와 B의 값은 log t에 대한 C_t를 취해서 얻어지는 상수

내부마찰각으로 표시되는 마찰성분은 얼음함량, 토립자의 배열, 토립자의 크기, 분포, 형태 등에 따라 좌우된다.

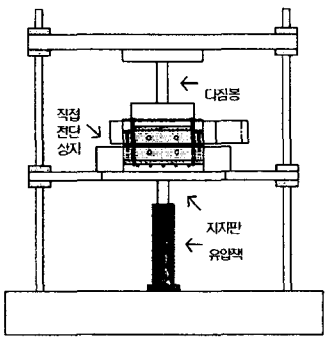
3. 실험 및 결과

3.1. 대상시료의 기본적 성질

대표적인 11개소에서 채취한 성토재를 대상으로 물리적 특성을 알아보기 위해서 KS F 규정에 의거하여 기본 토질 시험을 실시하였고, 그 결과를 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> 기본물성시험 결과

모암	지역	Atterberg Limit (%)			Gs	ω_{opt}	γ_{dmax}	0.95 γ_{dmax}	U.S.C.S
		LL	PL	PI					
화강암	김제	40.7	13.94	26.8	2.68	17.0	1.77	1.68	SC
	영주	33.8	16.6	17.3	2.73	8.2	1.95	1.85	SC
	전주	29.8	15.0	14.8	2.67	8.2	2.09	1.99	SC
	청주	33.3	NP	-	2.84	12.2	2.02	1.92	SW
변성암	사북	30.5	23.4	7.2	2.79	12.0	2.07	1.97	CL
	곤지암	26.3	17.3	9.2	2.70	9.0	2.13	2.02	SC
	제천	26.9	NP	-	2.71	9.40	2.00	1.90	SW
퇴적암	경산	44.8	24.9	19.9	2.71	18.3	1.72	1.63	CL
	군위	29.1	11.6	11.5	2.72	12.8	1.90	1.81	SC
	밀양	36.3	28.8	7.5	2.73	25.5	1.70	1.62	CL
	영월	40.0	17.3	22.7	2.81	14.7	1.88	1.79	CL



<Fig. 1> 정적시료 성형장치도

3.2. 동결·융해 시험

3.2.1. 시료성형

교란된 성토재의 재성형을 위해서 정적시료 성형장치를 이용하였다(<Fig. 1> 참조). 먼저, 노건조된 시료에 가수를 하여 다짐 시험에서 얻은 최대건조단위중량과 최적함수비를 기준으로 함수비 및 단위중량을 조절하여 시료를 성형한다. 각 층의 시료를 무게비로 계산하여 전체의 ⅓을 계량하여 준비(정종혁, 1999)한 후, 시료를 3층으로 나누어 다짐을 실시하였다. 시료를 성형하는데 있어서 가해지는 응력을 측정하거나 조절하기는 매우 곤란하기 때문에 함수비와 단위중량을 정확하게 조절하여 시료성형을 하였다.

3.2.2. 동결·융해 반복시험

흙 속에 존재하는 수분의 동결·융해 조건을 설정할 때는 상대습도의 과포화에 의한 응결을 유도할 것인지 침수시킬 것인지를 결정하여야 하며 결빙을 유도하는 온도와 융해시키는 온도도 고려하여야 한다. 어떤 실험조건을 설정하더라도 그것이 실제 자연환경을 그대로 모사할 수는 없기 때문에 어떠한 요소를 실험에 반영할 것인지를 적절히 선택하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 동결·융해를 위한 최저 및 최고온도와 유지시간을 결정하기 위한 기본 가정으로써 흙 내부의 수분이 완전히 결빙되고 빙정이 완전히 융해될 수 있도록 전국의 지역별 겨울철의 최고, 최저 기온을 참고로 하여 우리 나라의 실정에 맞게 동결온도를 영하 25℃로, 융해온도를 상온 20℃로 설정하였으며, 동결·융해시험을 위하여 온도조정이 영하 30℃까지 가능하며 정밀도 0.1℃인 냉동고를 이용하였다. 수분의 공급방법은 침수방식을 사용하지 않고 상대습도 유지에 의한 응결현상 유도방식을 사용하였으며 이는 강우나 지하수의 공급 등 특별한 상황이 아닌 빙점 이하의 온도에서 발생하는 일반적인 영향을 모사하기 위함이다.

3.2.3. 직접전단강도시험

각 시료에 대해서 동결·융해에 의한 강도특성변화를 파악하기 위하여 재성형 한 시료를 -25℃의 냉동고에 4시간 동결시키고, 다시 +20℃의 상온에서 4시간 융해시키는 과정을 동결·융해를 반복하면서 일축압축시험과 직접전단시험을 실시하였다. 각 시료에 대해 정방형으로 한변이 6cm, 높이 2cm의 전단상자에 직접전단시험용 시료를 재성형하여 -25℃의 규격 x×y×h= 205m×100m×85m인 냉동고에서 4시간 동결시키고 다시 +20℃의 상온에서 4시간 융해시키는 것을 1회로 해서 동결·융해에 의한 특성변화시험을 실시하였다. 시험 시 간극수압을 배제하기 위해서 0.5mm/min의 전단 속도로 실시하였다.

4. 시험결과 및 분석

11개지역의 시료를 대상으로 융해 4시간 후 직접전단시험을 실시한 결과 함수비의 변화는 거의 2% 내외에서 발생하였으며, 동결·융해를 반복함에 따라 각 시료의 점착력은 작아짐을 알 수 있으며, 내부 마찰각은 일정한 경향을 파악하기 곤란한 상태이다(Chamberlain, 1989). 이는 Ice lense에 의한 미소 균열의 발생, 흡착수막의 감소로 기인된 것이라 사료되며, 현상적으로는 과압밀비의 저하에 의한 흙의 전단강도 저하와 동일하다고 할 수 있으며(최상용, 1996) 동결·융해 작용에 의한 전단강도의 저하는 주로 점착력의 저하에 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다.

4.1. 모암분류에 따른 시험결과

4.1.1. 화성암

<Fig. 2>~<Fig. 3>에 나타낸 바와 같이 화성암지역의 점착력은 동결·융해 반복횟수가 증가함에 따라 크게 감소하며 100회의 동결-융해작용에 의해 22%~31%정도 감소한 반면, 내부마찰각은 일정한 경향을 보이고 있지는 않고, 100회의 동결·융해 반복에 대해 5%이내의 극히 미소한 변화를 나타내고 있다.

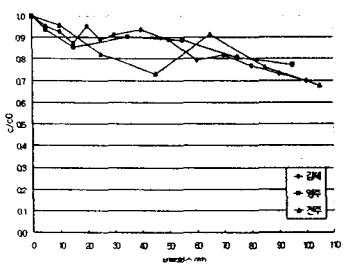
4.1.2. 변성암

<Fig. 4>~<Fig. 5>에서 보는 바와 같이 반복횟수를 증가시켰을 때 변성암지역의 점착력은 비동결토의 점착력을 기준으로 약 15%~55%정도 감소하는 현상을 나타낸다. 그러나 동결·융해 반복횟수와 내부마찰각의 관계를 도시한 결과 반복횟수의 증가로 인한 내부마찰각의 변화는 일정한

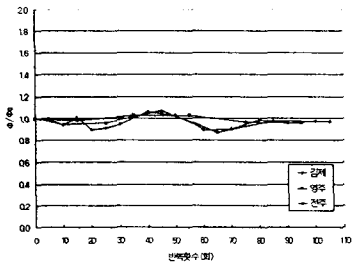
경향을 보이고 있지는 않는다.

4.1.3. 퇴적암

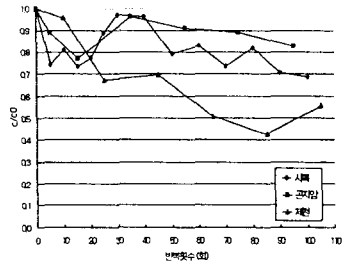
<Fig. 6>~<Fig. 7>에서 보는 바와 같이 반복횟수를 증가시켰을 때 퇴적암지역의 점착력 감소는 동결·융해 반복횟수 약 15회까지는 뚜렷한 감소를 보이지만 화강암지역 및 변성암지역과 비교하였을 때 대체적으로 미소한 점착력 감소가 나타남을 알 수 있다. 또한 밀양은 점착력의 꾸준한 감소 경향을 보이고 있으나, 경산은 점착력 회복과 감소의 변화가 불규칙한 경향을 나타내고 있다. 퇴적암지역의 대상시료는 동결·융해 100회 반복 후의 점착력은 비동결토에 대해 12~31%정도 감소하는 경향을 나타내고 있다. 동결·융해 반복횟수와 내부마찰각의 변화관계에서도 알 수 있듯이 내부마찰각의 변화는 크게 나타나지 않는다는 것을 보여주고 있다. 그러나 경산에서 채취한 시료는 비동결토보다 마찰각이 20%정도 증가하는 특이한 경향을 나타내고 있다.



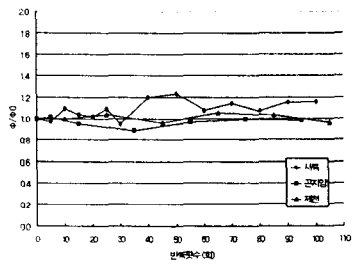
<Fig. 2> c/c_0-횟수 관계 (화성암)



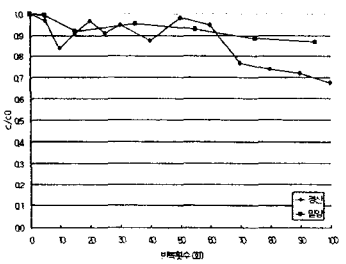
<Fig. 3> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (화성암)



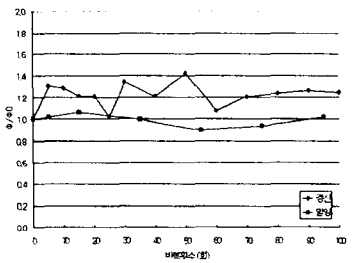
<Fig. 4> c/c_0-횟수 관계 (변성암)



<Fig. 5> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (변성암)



<Fig. 6> c/c_0-횟수 관계 (퇴적암)



<Fig. 7> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (퇴적암)

4.2. U.S.C.S에 따른 시험결과

4.2.1. SC 지역

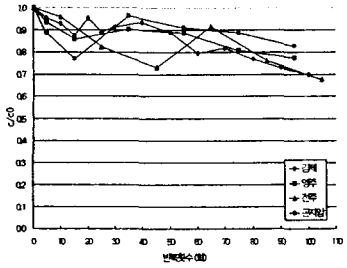
<Fig. 8>~<Fig. 9>에서 보는 바와 같이 SC지역은 대체적으로 점착력의 감소경향이 서서히 나타나는 것을 알 수 있으며, 전주의 경우 점착력 감소가 약 30%로 가장 크게 나타났으며 대체적으로 100회 동결·융해 반복으로 인하여 약 15%~30%의 점착력 감소가 나타났다. 약 100회의 동결·융해 반복으로 인한 내부마찰각의 변화는 비동결토와 비교하여 거의 비슷한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.2.2. SW 지역

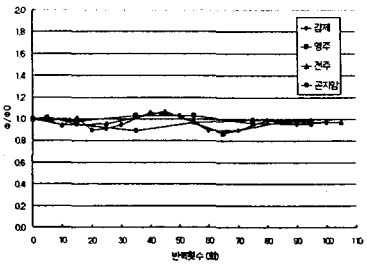
<Fig. 10>~<Fig. 11>에서 보는 바와 같이 SW지역은 동결·융해 반복횟수가 증가할수록 점착력은 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 반복횟수 105회 후의 점착력은 비동결토보다 60%정도 감소한 반면, 동결·융해 반복횟수가 증가할수록 내부마찰각은 거의 변화하지 않음을 알 수 있다.

4.2.3. CL 지역

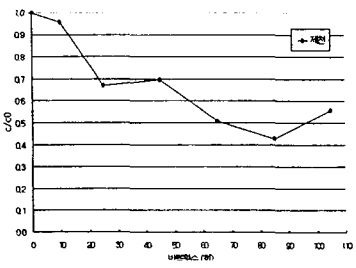
<Fig. 12>~<Fig. 13>에서 보는 바와 같이 CL지역에서도 SC지역과 마찬가지로 점착력이 서서히 감소하고 있지만, 점착력의 회복 및 감소의 폭이 불규칙하게 나타나는 것을 알 수 있다. 동결·융해 반복횟수와 내부마찰각의 변화를 나타낸 것으로 CL지역의 경우 동결·융해 반복횟수 100회에서는 비동결토의 내부마찰각보다 약 20% 증가했음을 알 수 있다. 대체적으로 CL지역은 점착력이나 내부마찰각의 변화의 폭이 불규칙하게 나타난다.



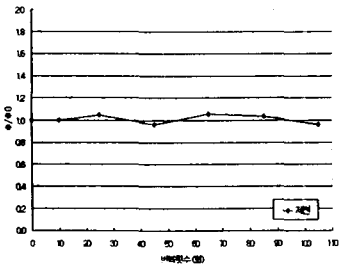
<Fig. 8> c/c_0-횟수 관계(SC 지역)



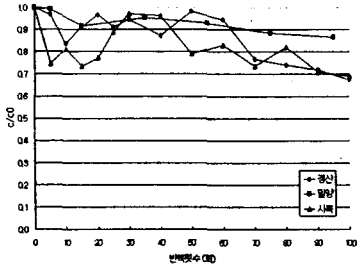
<Fig. 9> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (SC 지역)



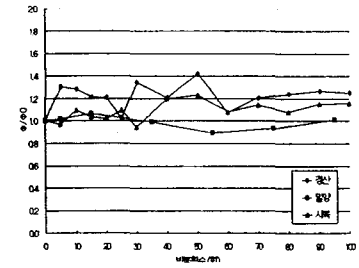
<Fig. 10> c/c_0-횟수 관계 (SW 지역)



<Fig. 11> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (SW 지역)



<Fig. 12> c/c_0-횟수 관계 (CL 지역)



<Fig. 13> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (CL 지역)

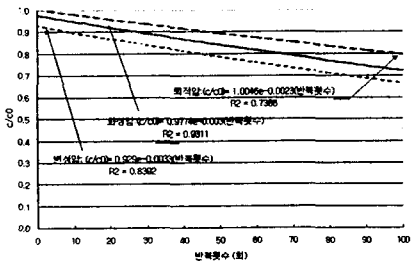
4.3. 직접전단시험 결과 분석

<Fig. 14>~<Fig. 17>은 직접전단시험의 결과를 종합하여 모암과 U.S.C.S로 구분하여 각각 하나의 식으로 표현한 것이다.

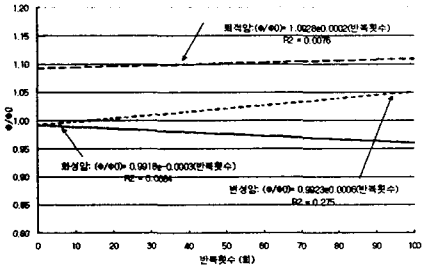
모암분류를 기준으로 동결-융해 반복횟수에 따른 점착력 및 내부마찰각의 변화 관계를 상관 관계식을 이용하여 나타낸 결과, 화성암지역과 퇴적암지역, 변성암지역 모두 동결·융해 반복횟수가 증가할수록 점차적으로 점착력이 감소함을 알 수 있다. 또한 화성암지역과 퇴적암지역은 동결-융해 반복횟수가 증가할수록 내부마찰각이 미소하게 감소하고 있으나, 변성암지역은 미소하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

직접전단시험 결과를 U.S.C.S분류를 기준으로 동결-융해 반복횟수에 따른 점착력 및 내부마찰각의 변화 관계를 상관 관계식을 이용하여 나타낸 결과 전체적으로 동결·융해 반복횟수가 증가할수록 점착력이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 SW지역의 경우 점착력 감소 경향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, SW 및 CL지역의 경우 동결-융해 반복횟수가 증가할수록 내부마찰각이 점차 증가하는 경향을 보이지만 SC지역의 경우에는 반대로 감소하는 경향을 보이고 있다.

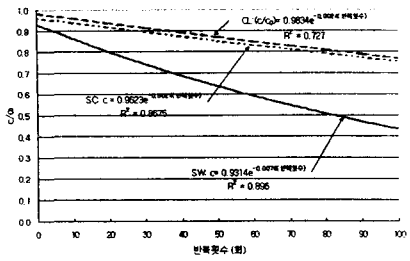
<Table 2>는 본 연구 대상시료 전체에 대하여 동결·융해 반복횟수 증가에 따른 전단강도(점착력 및 내부마찰각) 변화의 상관관계를 정리하여 나타낸 것이다.



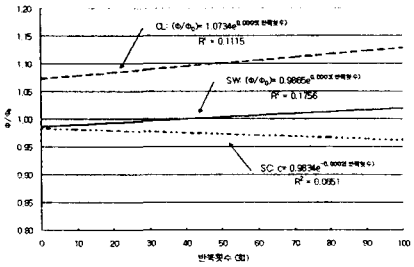
<Fig. 14> c/c_0-횟수 관계 (모암분류)



<Fig. 15> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (모암분류)



<Fig. 16> c/c_0-횟수 관계 (U.S.C.S분류)



<Fig. 17> ϕ/ϕ_0-횟수 관계 (U.S.C.S분류)

<Table 2> 동결·융해 반복횟수와 점착력 및 내부마찰각의 상관관계

성토재 분류		점착력 (c/c_0)	상관계수 (R^2)	내부마찰각 (ϕ/ϕ_0)	상관계수 (R^2)
모암분류	화성암	$c/c_0=0.9774e^{-0.0003x(반복횟수)}$	$R^2=0.9311$	$\phi/\phi_0=0.9918e^{-0.0003x(반복횟수)}$	$R^2=0.0684$
	변성암	$c/c_0=0.929e^{-0.0053(반복횟수)}$	$R^2=0.8392$	$\phi/\phi_0=0.9923e^{0.0006x(반복횟수)}$	$R^2=0.275$
	퇴적암	$c/c_0=1.0046e^{-0.0025(반복횟수)}$	$R^2=0.7386$	$\phi/\phi_0=1.0928e^{0.0002(반복횟수)}$	$R^2=0.0076$
U.S.C.S. 분류	SW	$c/c_0=0.9314e^{-0.0076(반복횟수)}$	$R^2=0.896$	$\phi/\phi_0=0.9865e^{0.0003x(반복횟수)}$	$R^2=0.1756$
	SC	$c/c_0=0.9623e^{-0.0024(반복횟수)}$	$R^2=0.8675$	$\phi/\phi_0=0.9834e^{-0.0002(반복횟수)}$	$R^2=0.0651$
	CL	$c/c_0=0.9834e^{-0.0024(반복횟수)}$	$R^2=0.727$	$\phi/\phi_0=1.0734e^{0.0003x(반복횟수)}$	$R^2=0.1115$

5. 요약 및 결론

전국의 철도연변에 분포된 성토재를 모암특성에 따라 화성암, 변성함 및 퇴적암으로 대별하여 각 3~4개소씩 총 11개 지역의 시료를 채취하여 100회에 걸친 장기간 동결·융해 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 직접전단시험결과, 동결·융해의 반복작용에 따라 점착력(c)은 비동결토에 비해 약 11~60% 저하하는 특성을 나타냈다. 모암에 따라 분류한 후 분석한 결과 퇴적암지역의 점착력 감소는 화강암지역 및 변성암지역과 비교하였을 때 대체적으로 미소한 점착력 감소가 나타남을 알 수 있다. 또한 대상시료를 U.S.C.S로 분류한 후 분석한 결과 SW로 분류된 지역의 시료가 다른 지역에 비해 점착력 감소 범위가 큰 것으로 나타났다.

(2) 동결·융해 반복에 따른 내부마찰각(ϕ)의 변화는 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 따라서, 동결·융해의 기상작용이 반복됨에 따라 토사의 점착력이 감소되어 흙의 강도 특성이 저하되는 것을 알았다.

(3) 동결·융해의 반복작용과 직접전단시험에서 얻는 c, ϕ값의 관계는 높은 상관계수를 나타내고 있으며 모암 및 U.S.C.S분류로 나타낸 c, ϕ값의 상관식을 <Table 2>와 같이 요약할 수 있었다. 이를 통하여 향후 경과시간에 대한 기상변화에 따른 성토재의 강도특성 변화파악에 참고가 될 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. 정영, 2000, "암반 불연속면내 충전재의 기상변화에 따른 특성에 관한 연구", 석사학위논문, 영남대학교, pp. 1~4
2. Chamberlain, E. J., (1989), "Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures", Proceedings of the International Symposium on Ground freezing, pp. 863~893
3. 梅田安治, 長澤徹明, (1975), "凍結·融解土の特性に關する研究", 農業土木學會論文集 60号, pp. 6~21.
4. 青山濟道, 小川正二, (1972), "凍結·融解を受けた土の力學的性質關する研究", 第7回土質工學研究發表會講演集, pp. 32~37