

# 풍화에 따른 풍화토의 특성 변화

Characteristics Changes of Weathered Soil by Weathering

권 오 순\*<sup>1</sup>

Kwon, O - Soon

정 충 기\*<sup>2</sup>

Chung, Choong-Ki

---

## Abstract

Since weathered soils are made by weathering process, the characteristics of weathered soils are strongly related to the originated rock and its forming process. Investigations on the originated rock and the weathering environments that decide the forming process are indispensable for the appropriate analysis on weathered soils. In this study, forming process of weathered soil is investigated by geological viewpoint. Test results show that weathering of rock is closely related to the distribution of rock-forming mineral and forming process. Weathered granite soils have the isotropic in-situ stress state and shearing behavior caused by the non-directional characteristics of originated rock. And weathered gneiss soils have the directional characteristics that mechanical behavior is determined by internal discontinuities. It is proved that the weathering resistance of quartz is greater than that of feldspar and mica, and it is concluded that the thickness of weathered region is greatly influenced by the distribution of rock-forming mineral.

## 요 지

풍화토는 암석이 풍화되어 생성되기 때문에 모암과 풍화과정에 따라 그 특성이 결정된다. 따라서, 풍화토의 특성을 고찰하기 위해서는 먼저 모암에 대한 고찰과 풍화과정을 지배하는 풍화환경에 대한 고찰이 이루어져야 한다. 이번 연구에서는 모암과 풍화정도에 따른 풍화토의 특성을 고찰하기 위해 화강암 풍화토와 편마암 풍화토를 불교란 또는 교란상태로 채취한 후, 기본 물성시험, 암석학적 시험 그리고 다양한 전단시험을 실시하였다. 여러 가지 시험의 결과에서 암석의 풍화는 모암의 조암광물 분포 및 생성특성과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 화강암 풍화토의 경우 모암의 비방향적인 성격 때문에 현장응력 상태와 전단특성이 동방적으로 나타났으며, 편마암 풍화토는 그 내

---

\*1 정희원, 한국해양연구소 연안항만공학연구센터 선임연구원

\*2 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

부에 존재하는 불연속면이 역학적 거동을 지배하는 방향적 특성을 갖는 것으로 나타났다. 또한 석영이 장석 또는 운모보다 풍화저항력이 크다는 사실의 확인과 함께 풍화대의 두께가 구성 조암광물에 크게 영향을 받는다는 결론을 얻었다.

Keywords : Weathered soils, Granite, Gneiss, Isotropy

## 1. 서론

풍화토는 암석이 풍화작용을 받아 깨어지고 변질되어 생성된 토사를 말한다. 좁은 의미에서 풍화토는 암석이 풍화되어 생성된 원래의 위치에 그대로 잔류하고 있는 풍화잔류토를 의미하지만, 풍화 이후에 붕락하여 원래의 위치에서 어느 정도 이동하여 퇴적된 붕적토와 풍화 이후에 여러 가지 원인으로 이동하여 풍화 이전의 모암과 풍화 상태를 추측할 수 없는 표토도 넓은 의미에서 풍화토의 범주에 속한다. 암석이 풍화됨에 따라 연암에 가까운 것에서부터 극단적으로 풍화·변질된 점성토까지 아주 넓은 범위의 형태를 가진 풍화토는 생성 과정에서 미루어 짐작할 수 있듯이 퇴적토와는 기본적으로 다른 특성을 가지고 있다. 풍화토가 암석의 풍화산물이라는 것으로부터 풍화토가 가지는 여러 가지 특성이 풍화 이전 모암의 광물학적인 특성과 지금까지의 풍화과정에 크게 지배된다는 것은 이미 기존의 많은 연구에서 증명된 바 있다. 이번 연구에서는 화강암과 편마암을 모암으로 하는 풍화토를 불교란 상태로 채취한 후, 기본 물성시험과 암석학적인 시험 방법을 통하여 광물조성과 암석의 미세 결합구조를 관찰하였으며, 다양한 방법으로 전단시험을 수행하여 모암과 광물조성에 따른 풍화토의 전단강도-변형 특성을 고찰하였다.

## 2. 풍화토의 생성

### 2.1 암석의 풍화

풍화란 암석이 '새로운 물리·화학적 환경에서 안정화되기 위해 부서지고 변화되는 과

정'을 말한다. 일반적으로 암석은 높은 압력과 온도의 물과 공기의 접촉이 없는 환경에서 생성되기 때문에 생성 이후의 낮은 온도와 낮은 압력의 환경에서 공기 또는 물과 접촉하여 풍화가 발생한다. 화성암의 주요 조암광물은 석영, 장석, 운모이며, 퇴적암의 주요 조암광물은 장석류, 방해석, 돌로마이트 및 다수의 점토광물이다. 변성암은 화성암과 퇴적암의 변성작용으로 생성되며 변성 이전의 조암광물과 유사하지만, 변성작용에 의해 새롭게 휘석, 사문석, 녹립석, 근청석, 녹니석 등이 생성된다.

석영은 물리적·화학적으로 가장 안정된 조암광물이며, 장석류는 물리적으로는 단단하지만, 물에 쉽게 변질된다. 조립질의 산성암인 화강암은 장석이 카올리나이트로 일부 변질된 조립의 사질토로 풍화되며, 석영분이 거의 없는 조립질의 염기성암인 반려암은 풍화가 되어 완전히 점토광물로 변질된다. 염기성 세립질의 현무암은 물에 의해 쉽게 감람석이 녹아내려 다공질 암석으로 변질된다. 방향성을 가지는 퇴적암과 변성암은 불연속면을 따라 물리적인 풍화가 쉽게 발생할 수 있다. 풍화는 모암의 조암광물들과 그 결합조건이 얼마나 풍화에 잘 견딜 수 있는가를 나타내는 풍화저항력(weatherability)과 암석이 놓여진 풍화환경에 의해 결정되는 풍화진행속도(rate of weathering)에 의해 그 특성을 달리한다.(Ollier, 1969)

풍화토는 생성조건이 퇴적토와 다르기 때문에 흙이 경험하는 응력이력과 응력조건도 크게 다르다. 퇴적토는 흙이 퇴적되어 쌓이면서 형성되기 때문에 횡방향 변위가 구속된 1차원 압축조건에서 퇴적과 함께 연직응력( $\sigma_v$ )이 계속 증가하고 이에 따라 횡방향 응력( $\sigma_H$ )은  $K_0$ 상

태에서 증가하게 되며, 침식 또는 지반굴착 등의 연직하중의 감소로 과압밀될 경우에는 연직 응력보다 횡방향응력의 감소율이 작게 되어  $K_0$ 값이 증가하면서 그림 1의 OA'C의 응력경로를 따르게 된다.(Vaughan, 1984) 그러나, 풍화토의 경우에는 일반적으로 암반의 응력상태가 풍화가 발생하는 지표면 근처에서는 횡방향 응력이 연직응력보다 크다는 점을 감안할 때 풍화 초기에는 연직응력이 횡방향응력보다 큰 상태( $K_0 > 1$ )로 존재하다가 풍화가 심화되면서 연직응력보다는 횡방향응력이 크게 감소하여  $K_0$ 값이 감소하게 되며, 그림 1에 나타난 바와 같이 ABC의 응력경로를 따르게 된다. 이 때 점 C의 위치는 풍화도에 관련되며  $K_0$ 값과도 상관성을 가진다는 것을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 풍화토의 현재의 응력상태는 과압밀된 퇴적토와 유사하지만 풍화토가 생성 과정에서 겪게되는 응력이력과 퇴적토의 응력이력은 큰 차이가 있으므로 전단강도-변형 특성도 퇴적토와는 상이할 것이라고 예측할 수 있다.

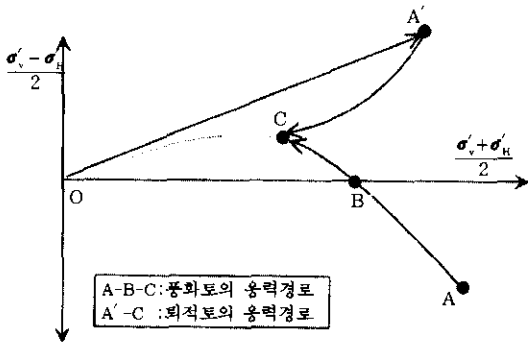
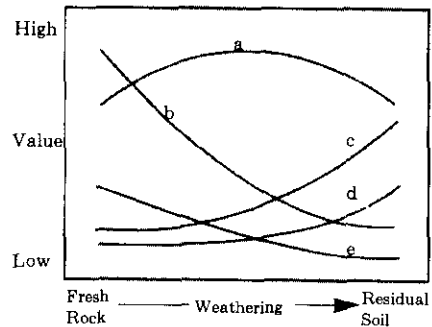


그림 1. 풍화응력경로

## 2.2 풍화에 따른 풍화토의 특성 변화

암석의 풍화에 의해 생성되는 풍화토는 모암의 조암광물과 결정 구조 및 입자의 배열에 따라 그 역학적인 특성이 크게 영향을 받는다. 풍화토는 모암의 구조적인 특성이 남아있기 때

문에 모암의 조암광물과 입자배열특성이 풍화토의 역학적인 특성을 좌우하게 된다. 또한, 대부분의 풍화토는 풍화 진행 단계에 있기 때문에 그 특성이 계속적으로 변화한다. 그림 2는 풍화진행에 따른 풍화토의 역학적인 특성의 일반적인 변화를 나타낸 것이다.(Lee, 1991) 풍화의 초기단계에서는 신선한 암에서 나타나는 높은 단위중량과 낮은 간극비를 가지지만, 점차 풍화가 진행됨에 따라 암석의 파쇄와 변질로 인하여 세립률이 증가하고 간극비가 증가하게 된다. 강도 정수는 초기에 높은 내부마찰각을 가지지만 점차 감소하고 점착력은 세립률의 증가로 인하여 증가하게 된다. 세립률의 증가로 압축성도 증가하게 된다. 투수 계수는 풍화 초기에는 암석이 파쇄되면서 증가하다가, 풍화가 심화되면서 세립률이 증가하기 때문에 감소되는 경향을 보인다.



- a: Permeability
- b: Peak friction angle, Density
- c: Cohesion intercept, Fine content
- d: Compressibility, Void ratio
- e: Ultimate friction angle, Specific gravity

그림 2. 풍화에 따른 풍화토의 특성변화(Lee, 1991)

## 3. 시험 계획

### 3.1 사용 시료 및 시료 채취방법

앞 절에서 언급한 바와 같이 풍화토는 복잡한 생성과정을 통해 아주 다양한 형태로 존재

하며, 그 특성도 아주 다양하다. 그러나, 이러한 풍화토에 대한 연구는 퇴적토에 비해 미진한데, 이것은 풍화토가 일반 시료채취기가 쉽게 관입할 수 없을 정도로 단단하면서도 쉽게 으스러지는 특성을 가졌기 때문이다. 즉, 양질의 불교란시료 채취가 어렵기 때문에 현장 풍화토의 특성 연구는 극히 제한된 범위에서만 이루어지고 있다. 최근에 들어와 지표면에서 풍화토를 불교란상태로 채취하는 못타입 시료채취법(nail sampling)과 3중 시료채취기(triple sampler)를 이용해 지중의 불교란 풍화토를 채취하는 방법이 많이 사용되고 있지만, 아직도 한정된 범위에서 사용되고 있다.

이번 연구에서 사용한 풍화토는 서울과 대전 및 평택에서 채취하였다. 표 1은 시료채취 현장의 위치와 현장의 종류를 요약·정리한 것으로 시료채취 현장의 지질주상도는 그림 3과 같다. 경기도 평택 현장에서는 3중 시료채취기를 이용하여 불교란시료를 채취하였으며, 대전시 탄방동 현장에서는 3중 시료채취기를 사용하여 불교란시료 채취를 시도하였으나, 석영결정체가 상당히 발달해 있었기 때문에 비트의 회전으로 시료가 완전히 파쇄되어 불교란시료의 채취가 불가능하였다. 지표에서 시추에 의한 시료채취에 실패함에 따라 차선책으로 굴착이 해당 토층까지 진행된 이후에 굴착 바닥면에서 황동관을 직접 지중에 타입한 후, 주변의 흙을 걷어내고 최종적으로 황동관 하단에서 절단하는 황동관 타입법을 사용하여 시료를 채취하였다. 서울시 수송동 현장에서는 지하수위가 풍화토층보다 아래에 위치하여 풍화토가 포화되지 않은 상대적으로 건조한 상태였기 때문에 불교란 상태로 시료를 채취할 수 없었다. 불교란상태로 채취한 풍화토의 실내시험을 위해 황동관에서 시료를 추출하는 과정에서 동결추출법을 적용하였다. 현장에서 박력관 또는 황동관에 밀폐된 상태로 채취된 풍화토 시료를 -15°C에서 12시간 냉동시켜 시료를 완전히 고형화한 후 황동관에서 추출하였다. 추출된 풍화토 시료를 냉동된 상태로 삼축시험기에 위치

시키고, 상온에서 완전히 용해시킨 후 삼축시험을 실시하였다.

표 1. 시료 채취 현장 및 시료 조건

구분	모 암	현장 조건	현장 위치	지하수위 (GL-m)	시료채취 방법	지하수위 (GL-m)
H	화강암	굴착	서울시 수송동	5.7, 15, 20	교란시료 채취	20.0
D	화강암	굴착	대전시 탄방동	7.8	황동관 타입법	2.0
P	편마암	말뚝	경기도 평택	11.14	Triple sampler	4.2

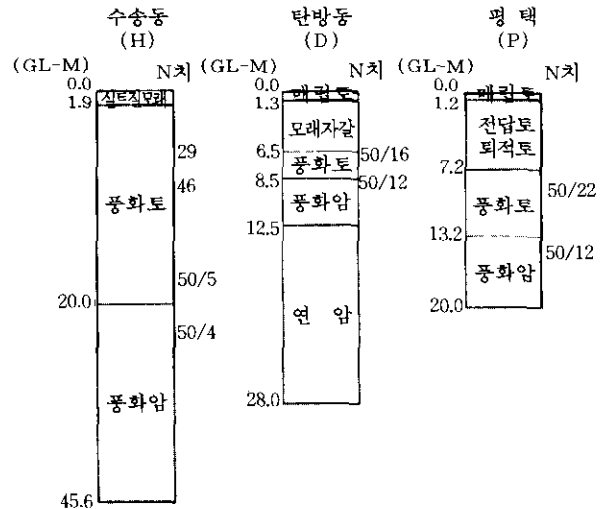


그림 3. 시료 채취 현장의 지질주상도

### 3.2 시험 계획

#### (1) 기본 물성시험

기본 물성시험인 입도분포, 함수비, 비중, 액·소성한계시험을 실시하였다

#### (2) 암석학적 시험

암석이나 토사의 조암광물과 조직 및 구조

에 대한 정보를 얻기 위해 암석학적인 방법을 사용하였다. 조암광물이나 점토광물의 정량적인 분석에 많이 사용되는 X선 회절분석과 강열감량을 측정하였으며, 전자현미경(SEM) 관찰을 통하여 암석의 구조적인 특성을 파악하였다.

### (3) 풍화모사시험

풍화토의 풍화 정도에 따른 역학적인 특성을 고찰하기 위해 불교란상태로 채취된 풍화토를 황동관에서 추출하기 이전에 동결-용해-건조 과정을 1회에서 50회까지 반복하여 인위적으로 풍화를 진행시킨 후 기본 물성시험과 광물 조성 분석과 함께  $K_0$ 압밀 배수압축전단을 실시하였다.

또한, 동결과 용해에 따른 구조적인 변화를 고찰하기 위해, 수송동 현장과 탄방동 현장 및 평택 현장에서 암편으로 채취한 풍화토를 전자현미경에 적합한 크기로 시편을 제작한 후, 원래 채취된 상태와 동결-용해 과정을 1회 반복한 시료 및 10회 반복한 시료에 대하여 전자현미경을 이용하여 구조적인 특성을 관찰하였다.

### (4) 삼축시험

채취된 불교란시료에 대하여 다음과 같이 포화, 압밀, 전단의 과정으로 삼축시험을 실시하였다. 교란상태로 채취한 풍화토는 사하중 재하방식의 시료성형기를 이용하여 수침상태로 압축·성형하여 불교란시료와 동일한 방법과 절차로 삼축시험을 실시하였다. 수송동 풍화토는 자연 건조시킨 시료를 현장의 단위중량에 맞추어 복층 건조다짐법으로 시료를 제작하였다.

현장에서 포화되지 않은 수송동 풍화토를 제외하고 다른 시료에 대해 진공압법과 배압법을 이용하여 시료를 포화시켰으며, 포화 후 간극수압계수  $B$ 값을 확인하여 0.95 이상이 되도록 하였다.  $K_0$ 압밀과 등방압밀 두 가지 방법으로 시료를 압밀하였다. 압밀압은 응력제어방식을 취하였으며, 압밀 후 시료내의 과잉간극수압이

발생하지 않도록 응력증분속도를 확인하여 5kPa/min의 속도로 압밀을 하였다. 배수강도의 결정을 위하여 압밀조건, 전단조건에 대하여 두 가지 이상의 연직압밀압으로 압밀을 실시하였다. 전단은  $K_0$ 압밀과 등방압밀 각각에 대한 이방성을 고찰하기 위하여 삼축압축과 삼축신장을 변형률제어방식으로 배수조건하에서 실시하였다. 구속압은 일정하게 유지한 상태에서 삼축압축은 축차응력을 증가시키면서 삼축신장은 축차응력을 감소시키면서 실시되었다. 전단시 과잉간극수압의 확실한 소산을 위하여 간극수압 측정을 통한 예비시험을 수행하였으며, 그 결과 0.0833%/min의 속도를 채택하여 시험하였다.

## 4. 시험 결과 분석

### 4.1 기본 물성치

채취한 풍화토 시료에 대하여 기본 물성시험을 실시하여 표 2와 같은 결과를 얻었다. 대부분의 풍화토가 통일분류법상의 입도분포가 좋은 사질토에 해당한다. 국제 지질학회에서 제안한 풍화도 분류법에 의하면 대부분이 완전히 풍화되었지만 모암의 구조가 입자에 남아 있는 CW 등급으로 분류되며, 수송동과 평택에서는 풍화가 많이 진행된 상태인 HW 등급에 해당하는 단단한 풍화토도 일부 포함되어 있는 것으로 나타났다. 현장에서 측정된 자연상태에서의 간극비는 0.28~0.49로 매우 조밀한 상태임을 알 수 있다.

### 4.2 사용 시료의 광물 조성

채취된 풍화토의 광물조성을 정량적으로 분석하기 위해서 X선 회절분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음 표 3과 같다. 또한, 풍화의 정도를 정량적으로 간단하게 측정하는 강열감량 측정치도 함께 제시하였다. XRD 분석 결과를 살펴보면, 화강암의 주요 조암광물인 석영과 운모 그리고 장석을 가장 많이 함유하고 있음

표 2. 사용 시료의 기본 물성치

구 분	채취 심도 (GL-m)	단위 중량 (t/m <sup>2</sup> )	함수비 (%)	비중	간극비	세립률 (%)	통일 분류	풍화 분류	액소성한계	
									PL	LL
수송동 (H)	5.0	1.62	-	2.59	-	21.2	SW-SM	CW	NP	NP
	7.0	1.60	-	2.59	-	14.2	SW-SM	CW	NP	NP
	15.0	1.66	-	2.60	-	7.3	SW-SM	CW	NP	NP
	20.0	1.80	-	2.59	-	1.8	SW	HW	NP	NP
탄방동 (D)	7.0	2.18	18.9	2.63	0.49	8.4	SW-SM	CW	NP	NP
	8.0	2.17	17.9	2.61	0.47	5.1	SW-SM	CW	NP	NP
평택 (P)	11.0	2.37	-	2.57	-	12.2	SW-SM	CW	NP	NP
	14.0	2.62	10.8	2.62	0.28	3.4	SW	HW	NP	NP

- : 현장에서 자연 함수비 측정 불가

표 3. 사용 시료의 XRD분석 결과(백분율) 및 강열감량

구 분 (GL-m)	석영	장석	운모	카올리 나이트	카보 나이트	일 라이트	클로 라이트	기타	강열 감량	
수송동 (H)	5	21	39	2	17	10	-	9	3	2.9
	7	26	41	3	5	2	4	11	9	2.4
	15	25	27	31	6	-	2	5	5	1.3
	20	39	26	26	2	-	-	-	7	0.6
탄방동 (D)	7	51	15	18	4	-	-	2	10	1.5
	8	55	16	17	7	-	-	-	5	1.4
평택 (P)	11	62	26	-	3	3	-	-	5	3.1
	14	78	5	7	2	-	-	-	9	2.7

을 알 수 있다. 또한, 편마암을 모암으로 하는 경기도 평택 풍화토 역시 석영을 주성분으로 하고, 장석과 운모를 일부 함유하여 조암광물의 측면에서는 화강암과 큰 차이를 보이지 않았다. 수송동 풍화토의 조암광물은 다른 지역의 풍화토에서보다 운모와 장석이 상대적으로 많은 것을 알 수 있다. 앞에서 조암광물의 특성에 대해 살펴본 바와 같이 석영은 풍화에 저항력이 매우 크고 운모는 풍화에 상대적으로 취약한 것으로 알려져 있어, 수송동 풍화토는 다른 지역의 풍화토보다 쉽게 풍화가 진행된 것으로 판단할 수 있다.

#### 4.3 정지토압계수( $K_0$ )

앞 절에서 언급한 바와 같이 풍화토의 지중 응력상태를 나타내는 정지토압계수( $K_0$ )는 풍화가 진행되면서, 그리고 풍화가 심화된 지표에 가까워지면서 1보다 큰 값에서 점차 작아진다. 흙의 전단특성에 중요한 영향을 미치는 요소인  $K_0$ 값은 지중의 응력상태를 대변할 뿐만 아니라 풍화토의 경우에는 모암과 풍화환경에 따라 그 크기의 차이는 있지만 풍화의 정도를 판정하는 중요한 척도가 된다.

이번 연구에서는 삼축시험시  $K_0$ 압밀을 수행하여 불교란 풍화토의  $K_0$ 값을 측정하였으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다. 화강암 풍화토

의 경우  $K_0$ 값이 1에 가까운 값을 가지며, 편마암 풍화토의 경우에는 0.45 내외의 값을 갖는 것으로 나타났다. 모암에 따라  $K_0$ 값이 이렇게 크게 차이가 나는 것은  $K_0$ 값이 풍화도와 함께 그 모암의 특성과 관련이 있다는 것을 의미한다. 화강암 풍화토의 경우 그 모암인 화강암이 방향성이 없는 등방적인 환경에서 형성되었기 때문에  $K_0$ 값이 풍화도에 의해서만 결정되며, 현재 풍화등급이 CW인 풍화 진행 중인 상태이기 때문에 일반 정규압밀 퇴적토( $K_0=0.4 \sim 0.6$ )보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나, 편마암 풍화토의 경우 그 단위중량이 앞서의 화강암 풍화토보다 크고 풍화도 덜 진행된 것(CW~HW)임에도 불구하고 더 작은  $K_0$ 값을 갖는 것으로 나타난 것은 모암의 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 즉, 편마암의 경우 방향성을 가지며, 특히 그 내부에 존재하는 편리면의 방향과 밀접한 관계가 있다. 이번 연구에서 사용한 편마암 풍화토를 육안으로 관찰한 결과 수평면에서  $65^\circ$ 각도의 편리면이 있는 것으로 나타났으며, 이러한 편리면의 방향이  $K_0$ 값에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서, 풍화토의  $K_0$ 값은 풍화도뿐만 아니라 모암의 특성 특히 방향성과 밀접한 관계가 있다.

표 4. 삼축시험  $K_0$  압밀과정에서 얻어진  $K_0$ 값 (\*:평균)

구분	모암	채취위치	정지토압계수
대전시 탄방동 풍화토 (불교란시료)	화강암	GL-7m	0.75~0.99(0.93)*
		GL-8m	0.59~0.83(0.72)*
경기도 평택 풍화토 (불교란시료)	편마암	GL-11m	0.45
		GL-14m	0.36~0.52(0.44)*

#### 4.4 시료 채취 깊이에 따른 풍화토의 특성

풍화대는 기반암에서부터 지표면으로 갈수록 풍화도가 점차 증가하며, 풍화 정도에 따라 풍화토의 물성치와 광물학적인 특성이 서로 일정한 상관관계를 가지며 분포하게 된다. 이번

연구에서 깊이에 따라 채취된 3개 현장의 풍화토에 대한 기본 물성시험과 강열감량시험을 통하여 채취 깊이에 따라 그 특성을 비교한 것이 그림 4이다. 그림에서 시료의 채취 깊이가 깊을수록 단위중량은 크고 세립률은 작으며 강열감량은 감소하는 것으로 나타났으며 3개 현장의 풍화토 모두에서 같은 경향을 보이고 있는 것을 확인하였다.

화강암은 다른 암석과 달리 풍화가 상당한 깊이까지 진행된다. 일반적으로 화강암을 제외 한 다른 암석에서는 표면이 먼저 풍화가 되더라도 풍화의 전파가 늦어 암의 내부는 신선한 상태로 남아있지만, 화강암은 표면이 풍화가 되면서 내부로 풍화가 빠르게 전파되어 풍화기간이 짧더라도 상당한 깊이까지 풍화가 진행되는 특징이 있다. 따라서, 화강암을 기반암으로 하는 지반에서는 풍화토층이 상당한 두께로 존재할 가능성이 높다.

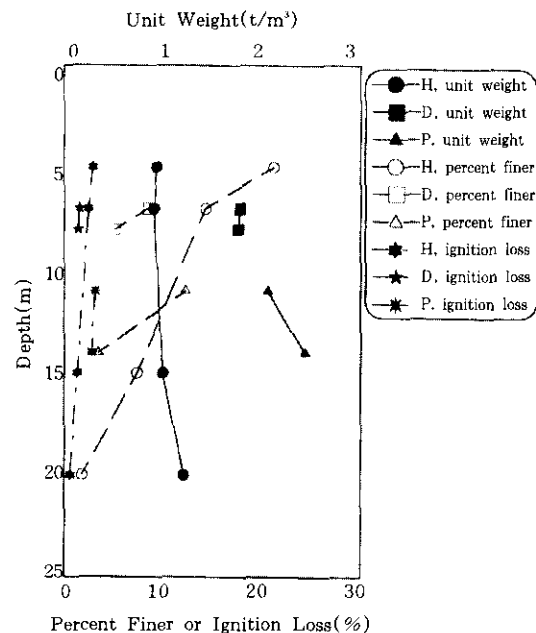


그림 4. 깊이에 따른 토질정수의 변화

암석의 풍화는 조암광물의 풍화를 의미하며, 풍화토의 조암광물의 분포특성이 풍화토의 풍화저항력을 결정한다. 지질학적인 변동을 겪은 경우를 제외한다면, 풍화진행시간보다는 조암광물의 분포특성에 따라 풍화의 형태가 결정된다. 따라서, 같은 화강암을 모암으로 하고 있지만 석영을 많이 함유하고 있는 풍화토 지반인 탄방동 현장에서는 풍화저항력이 강해 풍화대가 2m 정도로 얇게 나타났으며 운모나 장석을 많이 함유하고 있는 풍화토 지반인 수송동 현장에서는 18m의 두터운 풍화대가 발달하여, 풍화토층의 두께가 조암광물의 함유량과 상관성이 있다는 것을 알 수 있다. 편마암을 기반암으로 하는 평택 현장에서는 6m의 풍화토층이 나타났지만, 이것은 조암광물의 풍화저항력과의 상관관계에 기인한 것이 아니라 편리와 같은 변성과정에서 얻어진 불연속면과 풍화의 진전으로 생성되는 여러 가지 형태의 불연속면의 발달에 의한 것으로 판단된다. 즉, 편마암의 경우 조암광물뿐만 아니라 그 내부에 존재 가능한 불연속면의 특성이 풍화의 형태에 영향을 줄 수 있다.

#### 4.5 인위적인 동결-융해 반복으로 인한 풍화토의 특성 변화

##### (1) 풍화 모사 시험

풍화토에 대한 인위적인 풍화의 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 것이 동결-융해 반복 시험법이다. 이번 연구에서는 황동관으로 채취된 불교란시료를 -15°C에서 12시간 동결시킨 후, 상온에서 방치하여 완전히 융해 및 건조시키는 것을 1회로 하여 반복적으로 동결-융해-건조 과정을 실시하였다. 1회에서 50회까지 동결-융해-건조를 반복한 후, 삼축압축시험을 실시한 결과를 시험 종료 후 측정된 세립률 및 강열감량과 함께 표 5에 나타내었다.

그림 5는 동결-융해 반복횟수와 전단시의 응력-변형률 관계를 도시한 것이다. 표와 그림에서 동결-융해 반복횟수와 시료의 기본적인 물

성치, 강도정수 그리고 전단거동 특성 모두 뚜렷한 특성을 나타내지 못하고 있다. 다만, 삼축 시험의  $K_0$ 압밀과정에서 얻어진 정지토압계수는 동결-융해-건조의 반복횟수가 10회에서 크게 줄어든 것을 알 수 있다.

표 5. 동결-융해 반복에 따른 역학적 특성 변화

반복횟수	1	10	20	30	50
구 분					
세 립 률 (%)	5.1	8.6	5.3	11.5	5.3
강 열 감 량 (%)	1.4	1.0	1.1	1.3	1.1
$K_0$	0.81	0.61	0.43	0.63	0.57
강도정수( $\phi_{ave}$ )	40.1	43.2	39.9	38.8	41.8
탄성계수(kPa)	24680	22209	23900	22813	24875

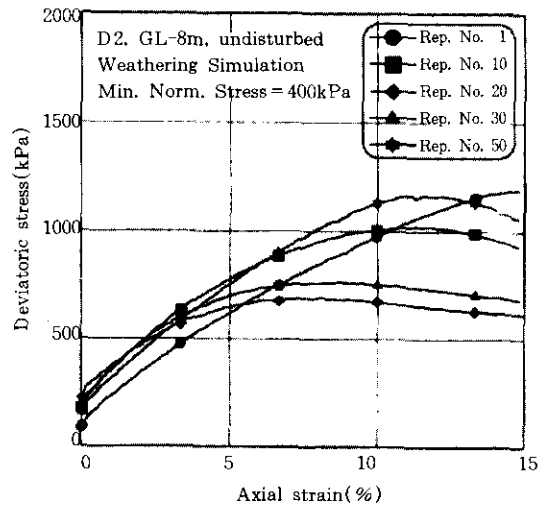


그림 5. 동결-융해 반복에 따른 전단 거동

##### (2) 동결-융해에 따른 구조적 특성의 변화

앞 절에서 언급한 바와 같이 불교란 풍화토의 동결-융해 반복으로 전단거동 특성의 변화를 고찰할 수는 없었다. 따라서, 정량적인 고찰보다는 전자현미경(SEM)에 의한 관찰을 통하여 풍화토의 동결과 융해에 따른 변화를 정성적으로 고찰하였다. 수송동(H) 풍화토, 탄방동



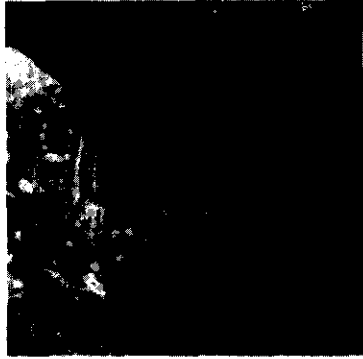


그림 6. 동결-융해 반복 이전의 수송동 풍화토의 균열(×480)

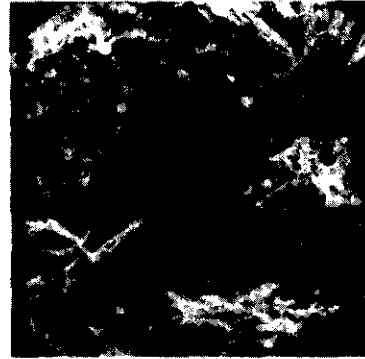


그림 7. 10회 동결-융해 반복 후의 수송동 풍화토의 균열(×480)

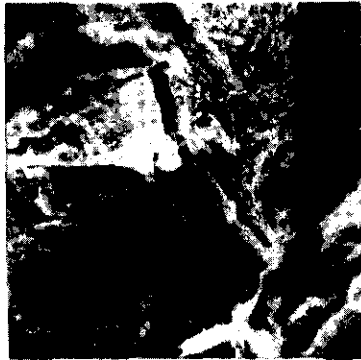


그림 8. 동결-융해 반복 이전의 탄방동 풍화토의 균열(×200)

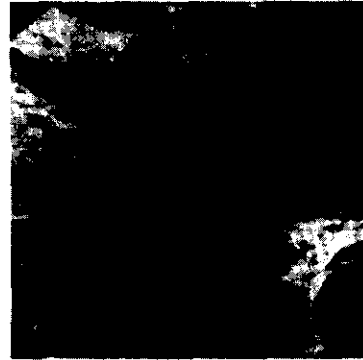


그림 9. 10회 동결-융해 반복 후의 탄방동 풍화토의 균열(×200)

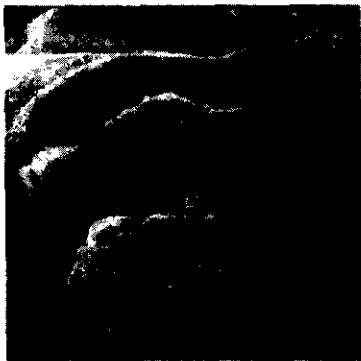


그림 10. 동결-융해 반복 이전의 평택 풍화토의 균열(×200)

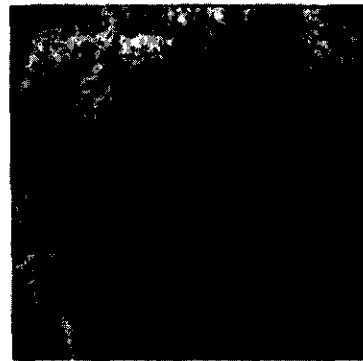


그림 11. 10회 동결-융해 반복 후의 평택 풍화토의 균열(×200)

(D) 풍화토, 평택(P) 풍화토에서 채취한 암편을 동결-용해 과정을 1회와 10회로 구분하여 실시한 후, 동결-용해 과정을 실시하지 않은 암편과 비교하여 전자현미경을 이용한 관찰을 실시하였다. 그림 6~그림 11은 수송동 풍화토와 탄방동 풍화토, 평택 풍화토에 대한 전자현미경을 통해 촬영한 사진을 나타낸 것으로 동결-용해 반복 이전과 동결-용해 10회 반복 후의 사진을 비교하여 제시하였다. 제시된 사진만으로 실제 시편의 구조적인 특성을 나타내기에는 충분하지는 않지만 제시한 사진뿐만 아니라 실제 전자현미경으로 관찰된 사실에 근거하여 다음과 같은 구조적인 특성을 알 수 있었다. 그림에서 풍화토의 암편에는 크고 작은 균열과 불연속면이 존재하고 있다는 것을 알 수 있다. 운모성분이 많은 수송동 풍화토는 동결-용해 작용 이전에도 많은 균열이 있으며, 동결-용해의 반복으로 인해 표면이 더욱 거칠어지고 작은 균열들이 증가된 것으로 관찰되었다. 그러나, 석영을 많이 함유하고 있는 탄방동 풍화토는 동결-용해 작용 이전과 이후 모든 경우에 표면이 매끄럽고 작은 균열이 많지 않은 것으로 관찰되었다. 평택 편마암 풍화토에 대한 전자현미경 사진을 나타낸 그림 10과 그림 11에서 편마암의 구조적인 특징인 편리가 뚜렷이 관찰된다. 그림 10은 편리의 횡방향에서 촬영된 것이며, 그림 11은 종방향에서 촬영된 것이다. 10회의 동결-용해 이후의 전자현미경 사진에서 편리의 관찰방향이 다른 점을 제외한다면, 편리 표면의 거칠기가 거의 변화가 없고 작은 균열이 뚜렷하게 증가한 것도 관찰되지 않았다. 이것은 편마암 풍화토의 조암광물의 대부분이 풍화저항력이 큰 석영인 점에서 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 앞에서 설명한 바와 같은 조암광물의 구성분포가 풍화저항력에 영향을 미친다는 사실(석영 성분이 많은 경우에 풍화저항력이 크다는 사실)을 인위적인 풍화 과정을 적용한 후 전자현미경의 관찰을 통하여 확인할 수 있었다.

#### 4.6 전단시험 결과

그림 12~그림 15는 탄방동 풍화토에 대한 삼축시험에서 얻어진 축변형률에 대한 전단 응력과 부피변형률 관계를 나타낸 것이다. 시료의 조건과 압밀방법에 상관없이 압축의 경우에는 10%의 축변형률에 도달할 때까지 축차응력이 증가하는 응력경화특성을 보이며, 신장의 경우에는 5% 이내에서 최대축차응력에 도달한 후 감소한다. 화강암 풍화토의 응력-변형률 곡선을 나타낸 그림 12에서 동방압밀과  $K_0$ 압밀에 따른 거동의 차이는 작게 나타났다. 이것은 화강암 풍화토의 삼축시험 압밀과정에서 얻어진  $K_0$ 값이 1에 가까운 값을 가진다는 점에서 압밀과정 종료후의 응력상태가 동방압 상태와 유사하기 때문에 전단과정에서 차이가 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다. 그림 13과 그림 15에 나타난 바와 같이 전단시 발생하는 시료의 부피는 압축측에서 대부분 감소하였으며 구속압밀압이 증가할수록 감소량이 증가하고, 평균압밀압이 가장 작은 경우에 한하여 부피 팽창이 발생하였다. 신장전단의 부피변화량은 압축전단보다 그 절대량이 작게 발생하며, 일부 시험에서는 부피 팽창이 발생하였다. 그리고 구속압의 크기에 따른 경향성은 나타나지 않았다.

그림 16과 그림 17은 편마암 풍화토의  $K_0$ 압밀 배수압축시험의 결과를 나타낸 것이다. 전단 초기에는 압밀과정에서 작은  $K_0$ 값으로 인하여 축차응력이 다소 크게 작용하며, 점차 전단이 진행됨에 따라 축차응력이 증가한다. 그러나, 화강암 풍화토와는 달리 어느 정도 전단이 진행되는 도중 축차응력이 특정한 값에 도달하면 급격히 변형이 발생하여 파괴에 도달하게 된다. 이것은 편마암 풍화토 내부에 존재하는 편리면을 따라 파괴가 발생하는 것으로 판단되며, 시험 후 나타난 파괴면이 편리면을 따라 발생한 것을 확인할 수 있었다. 신장시험에서도 마찬가지로 특정한 면을 따라 파괴되는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 편마암 풍화토의

경우 그 내부에 존재 가능한 편리면의 방향과 편리면상의 저항력의 크기에 따라 전단특성이 결정되며, 따라서 편리면이 존재하는 편마암

풍화토의 경우 일반적인 삼축시험으로 전단강도를 결정하는 것은 합리적이지 못할 것으로 판단된다.

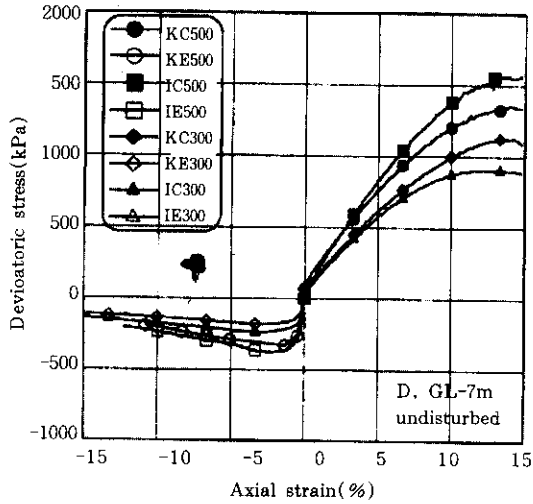


그림 12. 탄방동 풍화토(GL-7m)의 전단거동

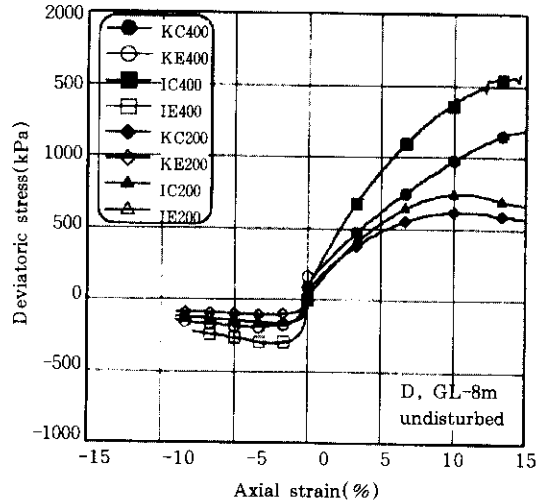


그림 14. 탄방동 풍화토(GL-8m)의 전단거동

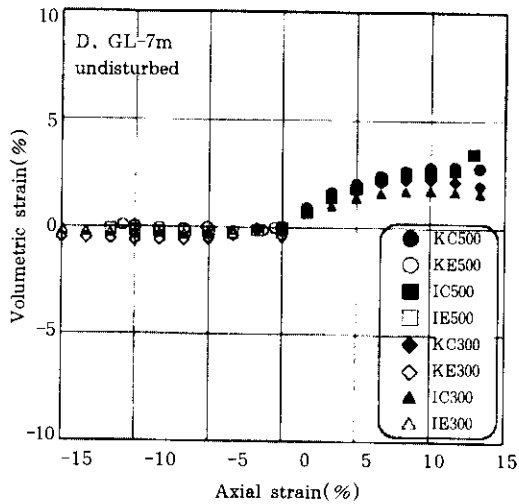


그림 13. 탄방동 풍화토(GL-7m)의 전단거동

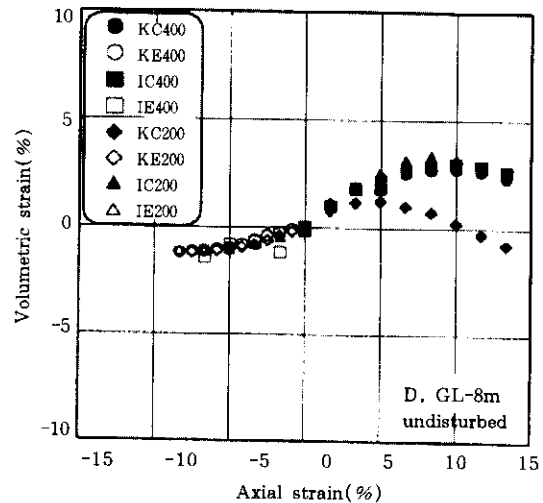


그림 15. 탄방동 풍화토(GL-8m)의 전단거동

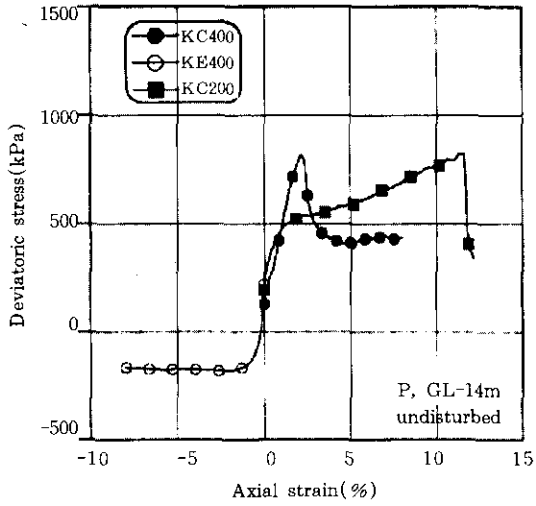


그림 16. 평택 풍화토(GL-14m)의 전단거동

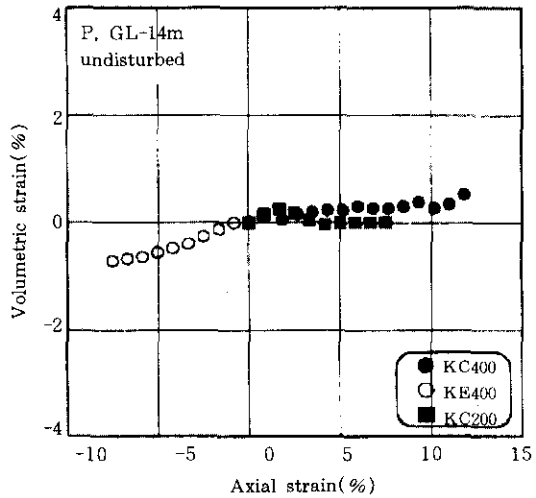


그림 17. 평택 풍화토(GL-14m)의 전단거동

다음 표 6은 전단시험 결과에서 얻어진 강도정수를 요약한 것이다. 강도의 적절한 비교를 위해서 점착력을 0으로 가정하여 내부마찰각을 재산정한 평균 내부마찰각을 사용하였다. 탄방동 풍화토의 강도정수를 살펴보면 압축과

신장에 대한 내부마찰각이 비슷하게 나타나는 등방적 강도특성을 보이고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 모암인 화강암의 비방향성 결정구조에서 비롯된다고 할 수 있다.  $K_0$ 압밀과 등방압밀에 따른 내부마찰각도 비슷하게 나타났으며, 이는  $K_0$ 압밀시  $K_0$ 값이 1에 가까운 등방압 조건에 가깝기 때문에 비롯된다고 할 수 있다. GL-7m시료와 GL-8m시료의 내부마찰각을 비교해 보면 GL-8m시료가 압밀방법과 전단조건에 상관없이 더 크게 나타났는데 이는 GL-8m 시료가 더 깊은 채취위치, 작은 간극비 그리고 작은 세립률에서 예상할 수 있는 바와 같이 풍화도가 상대적으로 낮은 데에 원인이 있다고 분석된다. 수송동 풍화토는 불교란 시료를 채취하지 못하였기 때문에 현장 간극비로 재성형한 시료에 대해 전단시험을 수행한

표 6. 풍화토의 전단시험에서 산출된 강도정수( $c, \phi$ )

구분	채취 위치 (GL-m)	불교란	선형회귀분석		평균내부 마찰각 $\phi_{ave}$ (°)
			$\phi$ (°)	$c$ (kPa)	
탄방동 (D)	7.0	CK <sub>0</sub> DC	38.2	6.1	39.0
		CK <sub>0</sub> DE	30.1	11.6	37.8
		CIDC	36.9	0.0	36.9
		CIDE	38.1	3.5	39.8
	8.0	CK <sub>0</sub> DC	40.1	0.0	40.1
		CK <sub>0</sub> DE	41.8	0.0	41.8
		CIDC	40.2	0.0	40.2
		CIDE	37.2	5.2	41.2
수송동 (H)	5.0	CIDC	42.6	2.3	43.1
		CIDE	40.1	2.0	42.4
	7.0	CIDC	41.9	5.3	42.9
		CIDE	47.7	4.1	52.8
	15.0	CIDC	42.2	4.5	43.1
		CIDE	40.4	5.1	45.9
	20.0	CIDC	40.8	5.4	41.9
		CIDE	42.9	6.4	50.6

결과에서 강도정수를 산정하였다. 탄방동 풍화토보다 간극비가 크지만, 내부마찰각은 대체로 더 크게 얻어졌다. 이것은 탄방동 풍화토와 달리 건조시료를 사용하였기 때문으로 판단된다. 대부분 신장축의 내부마찰각이 압축축보다 약간 크게 나타났다.

## 5. 결 론

이번 연구에서는 화강암 풍화토와 편마암 풍화토를 불교란 또는 교란상태로 채취한 후, 기본 물성시험, 암석학적 시험 그리고 여러 가지 방법으로 전단시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 암석의 풍화는 그 모암의 생성에서 비롯된 특성과 구성 조암광물과 밀접한 관련이 있다. 화강암 풍화토의 경우 모암이 방향성이 없는 등방적 특성을 가지고 있기 때문에 구성 조암광물의 분포가 풍화에 지배적인 역할을 하며, 편마암 풍화토의 경우 구성 조암광물의 분포뿐만 아니라 모암의 생성시에 생성된 편리면과 같은 불연속면의 특성도 풍화의 발생 형태에 영향을 미칠 수 있다.
- 2) 풍화모사시험 후 전자현미경으로 관찰한 결과 화강암의 주요 조암광물 중에서 석영이 장석, 운모에 비하여 풍화저항력이 큰 것으로 나타났다. 따라서 같은 화강암을 모암으로 하고 있지만 석영이 주성분인 탄방동 현장의 풍화대의 두께가 장석과 운모를 많이 함유하고 있는 수송동 현장보다 훨씬 작게 나타났다.
- 3) 화강암은 방향성이 없는 등방적인 환경에서 형성되었기 때문에 화강암 풍화토의 역학적 특성은 풍화도에 따라서 결정되며, 풍화등급이 CW인 이번 연구의 대상 시료인 경우  $K_0$ 값이 1에 가까운 등방적 현장응력상태를 가지며, 전단시 주응력방향에 상관없는 등방적 강도정수를 갖는다. 그러나, 편마암 풍화토는 그 내

부에 존재하는 불연속면에 따라서 현장 응력상태와 강도특성이 결정되는 방향적 특성을 갖는다.

## 감사의 글

이 논문은 1996년 한국과학재단의 핵심연구 과제(과제번호 951-1201-001-1) 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 권오순 (1998), "풍화토의 전단강도-변형 특성에 관한 실험적 연구," 박사학위논문, 서울대학교, pp 55~115
2. 권오순, 정충기 (1996), "불교란 풍화토의 전단거동 특성," 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 457~460
3. 권오순, 정충기 (1997), "화강암 풍화토의 전단강도-변형의 이방성," 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp 49~56
4. 中井喜一郎 (1973), "マサ土の風化について-深層風化," 第18回土質工學ツンホツウム-マサ土, pp 1~11
5. Blight, G.E. (1995), "The Geomechanics of Residual Soils," *Short Course on Behaviour of Unsaturated and Residual Soils and Soft and Hard Rocks in Design and Construction*, Asian Institute of Technology, Bangkok, pp 18~21
6. Geological Society (1990), "Tropical Residual Soils, Engineering Group Working Party Report," *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 1, pp 1~101
7. Hoshino, K. (1977), "Soil Sampling," Specialty Session 2, *Proceedings of 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 3, Tokyo, Japan, July, pp 469~478
8. Konrad, J.-M. (1990), "Sampling of Saturated and Unsaturated Sands by Freezing," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 13, No. 2, pp 88~96

9. Lee, I.K. (1991), "Mechanical Behaviour of Compacted Decomposed Granite Soil," PhD. Thesis, City University, pp 37~125
10. Lumb, P. (1962), "The Properties of Decomposed Granite," *Geotechnique*, Vol. 12, No. 3 pp 226~243
11. McCabe, E.Y. and Kettle, R.T. (1985), "Soil Freezing Response : Influence of Test Conditions," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 8, No. 2, pp 49~58
12. Ollier, C. (1969), *Weathering, Geomorphology Text 2*, Oliver and Boyd, pp 1~85
13. Rahardjo, H., Lim, T.T., Chang, M.F. and Fredlund, D.G. (1995), "Shear-Strength Characteristics of a Residual Soil," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp 60~77
14. Sandroni, S.S. (1985), "Sampling and Testing of Residual Soils in Barazil," In : Brand, E.W. and Phillipson, H.B. (Eds), *Sampling and Testing of Residual Soils*, Scorpion Press, Hongkong, pp 31~50
15. Singh, S. and Seed, H.B. (1982), "Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 108, No. GT2, February, pp 247~264
16. Townsend, F.C (1985), "Geotechnical Characteristics of Residual Soils," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 111, No. 1, January, pp 77~94
17. Vaughan, P.R. and Kwan, C.W. (1984), "Weathering, Structure and in situ Stress in Residual Soils," *Geotechnique*, Vol. 34, No. 1, 43~59
18. Wesley, L.D. (1990), "Influence of Structure and Composition on Residual Soils," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 116, No. 4, April, pp 589~603
19. Yoshimi, Y., Hatanaka, M. and Oh-Oka, H. (1978), "Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing," *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 18, No. 3, pp 59~73

(접수일자 1998. 3. 30)