

## 화강암 풍화토의 전단강도-변형의 이방성

### The Anisotropy Study on Shear Strength-Deformation of Weathered Granite Soil

권오순<sup>1)</sup>, O-SOON KWON, 정충기<sup>2)</sup>, CHOONG-KI CHUNG

<sup>1)</sup> 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정, Graduate student, Dep. of Civil Eng., Seoul Nat'l Univ

<sup>2)</sup> 정회원, 서울대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep. of Civil Eng., Seoul Nat'l Univ

**SYNOPSIS** : Deformation and shearing behaviors with index properties and mineral compositions for undisturbed samples of the weathered granite soil which is the representative soil type in Korea, are investigated by laboratory tests, throughout the well designed experimental scheme. Also, deformation and shearing behaviors for remoulded samples made by static compressive load in saturated state are studied by the same experimental works as undisturbed samples. It is confirmed that mechanical properties of weathered soils are highly influenced by the crystal structure of the originated rock. Considering the insitu stress condition similar to isotropic stress and no variation of strength parameters by rotation of principal stress, it is estimated that the weathered granite soil has an isotropic characteristics. In the remoulded sample which is made in similar condition as sedimented soil, anisotropic characteristics represented by anisotropic insitu stress state and significant variation of strength parameters by principal stress direction are shown.

**KEYWORDS** : Shearing behavior, Weathered granite soil, Undisturbed sample, Anisotropy

## 1. 서론

풍화토의 역학적 특성을 규명하기 위해 수행된 기존의 많은 연구들은 주로 교란 상태의 성형시료를 이용하여 수행되었기 때문에 성토재 등의 건설재료로 활용시를 제외하고는 그 결과가 실제 지반 내에서 존재하는 풍화토의 성격을 대표한다고 하기는 어렵다. 또한, 지반거동의 정확한 예측에 필요한 이방적인 특성에 관련한 연구는 전무한 실정이다. 이번 연구에서는 우리나라 화강암 풍화토의 역학적 특성, 특히 전단거동시의 이방성을 정확하게 파악하기 위해서 풍화토를 현장에서 불교란 상태로 채취한 후 기본 물성치 시험과 1차원 압축시험 그리고  $K_0$ 압밀과 등방압밀을 통한 삼축압축 및 삼축신장 시험 등을 체계적인 시험계획을 통하여 수행하여 그 거동을 분석하였다. 또한 실험실에서 성형한 시료에 대하여 동일한 조건으로 시험을 실시하여 불교란시료와 거동 특성을 비교·분석하였다.

## 2. 풍화토의 특성

### 2.1 풍화토의 생성과 정의

풍화란 암석이 새로운 물리·화학적 환경에서 안정화되기 위해 부서지고 변화되는 과정을 말한다<sup>9)</sup>. 국내에 주로 분포하는 암석은 화강암과 편마암이며, 풍화토 역시 화강암 풍화토와 편마암 풍화토가 주류를 이룬다. 통일분류법상 풍화토는 풍화 정도와 모암의 구성광물에 따라 SW, SP, SM, SC 또는 실트 및 점토상태로 광범위하게 존재한다. 국제 지질학회에서는 암석의 풍화 정도에 따라 풍화 등급을

제시하여 풍화도에 따른 암석의 분류방법을 제시하였는데, 그 중 풍화가 심화되어 암석으로서의 특성보다는 토사의 특성을 더 뚜렷하게 나타내는 풍화 등급을 HW(Highly Weathered), CW(Completely Weathered) 및 RS(Residual Soil) 3가지로 구분하였다<sup>7</sup>. HW와 CW는 암석의 특성은 상실하였지만 입자 내에 모암의 구조가 남아있는 풍화토에 해당하며, RS는 풍화가 더욱 심화되어 모암의 구조를 완전히 상실한 풍화토를 말한다. 일반적으로 국내 지반공학 분야에서는 풍화토와 풍화암의 분류를 표준관입시험의 결과로 얻어진 N치를 이용하고 있다. 그러나, 이 방법은 지질학적인 특성이나 역학적인 시험 결과를 토대로 하지 않은 간략법이기 때문에 풍화암과 풍화토의 판정에 적합한 방법이라고 하기는 어렵다.

## 2.2 풍화토의 역학적 특성

암석의 풍화에 의해 생성되는 풍화토는 모암의 조암광물이나 결정구조에 따라 그 역학적인 특성이 크게 영향을 받는다. 또한, 풍화토는 계속적인 풍화 진행 단계에 있기 때문에 그 특성이 계속적으로 변화하므로 역학적인 특성도 아주 광범위하게 나타나며, 따라서 풍화토의 특성을 확실적으로 정의하기는 어렵다. 국내에서 연구된 화강암과 편마암을 모암으로 하는 풍화토에 대한 많은 시험 결과를 살펴보면, 우리나라 풍화토는 #200체 통과량으로 나타나는 세립률이 대부분 20% 이내인 비소성의 조립토이며 간극비는 0.4~0.8의 범위로 나타났고 내부마찰각은 대부분 30° 이상으로 나타났다<sup>2</sup>.

## 2.3 이방성

풍화토가 가지는 비균질이고 이방적인 특성은 발생 원인면에서 퇴적토와는 크게 다르다. 풍화토는 암석이 풍화되어 생성되기 때문에 풍화 이전의 결정구조가 그 특성의 주요 원인이 된다. 비록 풍화가 심화되어 모암의 결정구조가 가지는 결합력을 완전히 상실한 풍화토라고 하더라도 토립자의 이동이 발생한 붕괴토의 경우를 제외하면 압에서 갖고 있던 입자의 배열상태가 유지될 것이기 때문에 풍화 이전 암의 결정구조에 상당한 영향을 받는다. 따라서, 풍화토에 대한 이방성을 고찰하려면 먼저 암석의 결정구조와 구성 광물입자의 배열에 대한 고찰이 필수적이다. 국내에 많이 분포하는 화강암 풍화토의 모암인 화강암은 다른 암석에 비해서 상당히 등방적인 특성을 가진 암석이기 때문에 화강암 풍화토 역시 상당히 등방적인 특성을 가질 것으로 예측된다. 풍화토가 지닌 이방적인 특성은 이러한 모암의 특성 뿐만 아니라 풍화 발생 양상에 의해 영향을 받는다. 풍화는 습곡, 단층, 지하수위 변화 등 그 원인에 따라 풍화진행방향이 나타나며, 이에 따라 역학적 특성이 방향성을 갖게 된다.

## 3. 시험계획

### 3.1 사용 시료

이번 연구에서 사용한 풍화토 시료는 대전시 탄방동 굴착 현장에서 채취하였다. 현장의 시료 채취 위치에서 현장 시추를 통해 얻어진 지질주상도는 다음 그림 1과 같다. 현장의 지하수위는 GL-2m이며, 시료는 풍화토가 위치한 GL-7m와 GL-8m에서 채취하였다. 일반적으로 시추 조사에서 얻어지는 표준관입시험 결과인 N치가 50/15 이상인 경우를 풍화암으로 그 이하를 풍화토로 구분하고 있는데, 풍화토 및 풍화암을 구분하는 이 기준은 국제 지질학회 분류법상 모암의 구조를 가지고 불연속면에 의해 파쇄된 암체로 나타나는 HW 등급과 완전히 풍화되었지만 모암의 구조를 가지고 있는 CW 등급의 중간 정도에 해당한다. 이번 현장에서 시료를 채취한 GL-7m와 GL-8m에서 실시한 표준관입시험의 결과 N치가 각각 50/16과 50/12로 나타났지만, 시료 채취 결과로 보면 CW 등급과 HW 등급의 중간 정도로 볼 수 있으므로 상대적으로 풍화도가 낮은 비교적 단단한 층으로 구분된다.

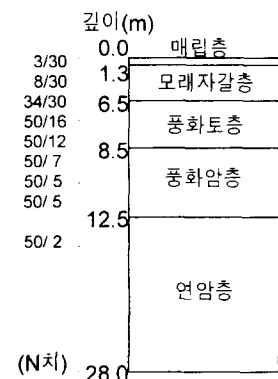


그림 1 지질주상도

### 3.1.1 불교란시료

불교란시료를 채취하기 위해 트리플 샘플러를 이용하여 시료 채취를 시도하였으나, 거정질 석영 결정체가 상당히 발달해 있어 완전한 불교란시료의 채취가 불가능하였다. 굴착진 지표에서 시추에 의한 시료 채취에 실패함에 따라 차선책으로 굴착이 해당 토층까지 진행된 이후에 노출된 지표면에서 황동관을 직접 지중에 타입한 후, 주변의 흙을 걷어내고 최종적으로 황동관 하단에서 절단하는 방법을 사용하여 채취하였다. 이와 같은 시료채취법은 응력이완에 따른 교란의 가능성이 있지만, 굴착 이전 시료 채취가 곤란한 경우에 교란을 최소화하여 적용할 수 있는 가장 현실적인 방법으로 판단되며, 여기서는 이렇게 채취된 시료를 불교란시료라고 정의하였다. 현장에서 불교란 상태로 채취한 풍화토에 대한 진단 시험을 실시하기 위해 황동관에서 시료를 추출하는 과정에 동결 추출법을 적용하였다. 이 방법은 사질토를 불교란 상태로 채취하기 위해 개발된 동결 시료채취법을 응용한 것으로, 사질토가 흐트러지는 것을 방지하기 위해 입자 속의 간극수를 동결시켜 시료를 고형화한 후 시료를 채취하는 동결 시료채취법을 풍화토의 시료 추출 과정에 적용하였다. 기존의 많은 연구에서 사질토에 대한 동결 시료 채취법의 적용성에 대한 연구가 이루어져 있지만<sup>61)</sup>, 풍화토에 대한 동결 시료 채취 혹은 동결 추출에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그러나, 동결 추출법은 시료 추출시에 흐트러지기 쉬운 풍화토와 같은 흙에서 현재까지 불교란시료의 추출 및 제작 과정에서 적용할 수 있는 유일한 방법으로 여겨진다. 다만, 풍화토의 동결에 따라 발생할 수 있는 여러가지 현상에 대한 추가적인 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 이번 연구에서는 현장에서 황동관에 밀폐된 상태로 채취된 풍화토 시료를 -15℃에서 12시간 냉동시켜 시료를 완전히 고형화한 후 황동관에서 추출하였다. 추출된 풍화토 시료를 냉동된 상태로 삼축시험기에 설치하고, 상온에서 완전히 용해시킨 후 압밀 및 진단시험을 실시하였다.

### 3.1.2 성형시료

풍화토는 불교란상태로 채취하기가 어렵기 때문에 실내시험으로 진단특성을 파악하기 위해서는 일반적으로 교란시료를 성형하여 진단시험을 수행하게 된다. 교란시료를 사용하는 경우에는 풍화토가 갖고 있는 구조적 특성이 파괴된 상태에서 시험이 수행되고 성형과정에서의 입자 파쇄와 성형에 따른 환경 변화 때문에 급격한 풍화가 유발될 수 있으므로 현장 풍화토의 정확한 진단특성을 규명하기는 어렵다. 다만, 성토재 등의 건설재료로 풍화토가 이용될 경우 그 진단특성의 예측을 위해서 활용될 수 있다. 따라서, 건설 재료로 활용되는 풍화토의 진단거동 예측의 필요성과 함께 불교란시료의 채취가 어렵기 때문에 성형시료에 대한 진단시험이 앞으로도 계속하여 수행될 점을 감안하여 그 결과의 문제점을 파악하기 위하여 불교란시료와 함께 성형시료를 이용한 시험을 수행하였다. 풍화토에 대한 시료 성형과정에서 발생할 수 있는 입자의 파쇄를 최소화 하기 위해 정적인 수침 압축성형법을 선택하였다. 성형 중 입자 파쇄에 따라 발생하는 세립물(200번체 통과중량비) 증가량은 1% 미만이며, 간극비는 불교란시료에 비하여 13~16% 크게 나타났다.

## 3.2 시험계획

채취된 시료에 대해 기본 물성시험인 입도분포, 함수비, 비중, 액·소성 한계 시험을 실시하였으며, 모압의 특성을 파악하기 위해 X선 회절 분석을 실시하였다. 채취된 풍화토의 압축 특성을 고찰하기 위해 황동관에 불교란 상태로 채취된 시료를 재하장치에 장치하여 1차원 압축시험을 실시하였다. 이번 연구의 주 목적은 풍화토의 진단 및 변형특성 파악을 위한 삼축 및 순수전단시험을 실시하였으며, 그 자세한 과정은 다음과 같다.

### 3.2.1 삼축 및 순수전단시험

#### (1) 불교란시료

채취된 불교란시료에 대해 포화, 압밀, 전단을 통한 삼축시험을 실시하였다. 삼축시험의 과정은 진공압밀과 배압법을 이용하여 시료를 포화시켰으며, 간극수압계수 B값이 0.95 이상이 되도록 하였다. 압밀과정에서는  $K_0$ 압밀과 등방압밀을 응력제어방식으로 적용하였다. 5kPa/min의 응력증분속도

를 사용하였으며, 압밀과정에서 시료내에 과잉간극수압은 발생하지 않았다. 전단강도의 결정을 위하여 각각의 시료, 압밀조건, 전단조건에 대하여 200kPa 이상의 연직 구속압밀압을 가하였다. 이방성을 고찰하기 위하여 삼축압축과 삼축신장 전단을 변형률제어 방식으로 배수조건하에서 실시하였다. 삼축상태에서 구속압은 일정하게 유지한 상태에서 압축은 축차응력을 증가시키면서 신장은 축차응력을 감소시키면서 실시되었다. 전단시 과잉간극수압의 확실한 소산을 위하여 간극수압 측정을 통한 예비시험을 수행하였으며, 그 결과 0.0833%/min의 속도를 채택 시험하였다. 불교란 풍화토시료에 대한 순수전단시험은 불교란시료를 시료의 제작이 불가능하였기 때문에 실시하지 못하였다.

(2) 성형시료

성형시료에 대해서도 불교란시료와 같은 방법과 절차로 삼축시험을 실시하였으며, 순수전단시험은 삼축시험에 사용한 시료와 동일한 함수비와 단위중량을 갖도록 복층다짐하여 성형한 시료를 이용하여 시험을 수행하였다. 순수전단시험은 100kPa 이상의 3가지 연직압으로 압밀을 한 후 과잉간극수압이 발생하지 않도록 전단속도를 0.111%/min의 속도로 순수전단 상태에서 전단시험을 수행하였다.

3.2.2 전단시험 방법의 적절성

삼축시험의 압밀과정에서 응력증분속도와 전단시 변형률 속도 등의 적절성 확인을 위한 예비시험을 실시하여 채택된 압밀 및 전단 속도에서는 과잉간극수압이 발생하지 않음을 확인하였다. 황동관에서 시료 추출시 적용한 동결추출법의 영향을 고찰하기 위하여 동결추출법을 적용한 성형시료와 동결추출법을 적용하지 않은 성형시료에 대하여 삼축시험을 실시하였다. 동결추출법의 적용이후 입자가 파쇄되어 세립율이 약간 증가하였지만(5%), 등방압밀과 K<sub>0</sub>압밀 각각에 대하여 동결추출법 적용시료와 적용하지 않은 시료의 삼축압축과 삼축신장으로 시험한 결과를 비교한 결과 응력-변형률 거동과 체적변형률 거동이 압밀방법이나 전단조건에 상관없이 거의 유사함을 알 수 있었다<sup>1</sup>. 따라서 본 연구에서 제안한 동결추출법이 시료의 전단거동에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다.

4. 결과분석

4.1 시료의 기본적 특성

GL-7m와 GL-8m에서 채취한 풍화토 시료에 대하여 기본 물성치 시험을 실시하여 다음 표 1과 같은 결과를 얻었다. 그림 2는 채취 시료의 입도분포를 나타낸 것이다. 두가지 시료 모두 비소성의 입도분포가 좋은 사질토(SW-SM)로 분류되었다. 또한, 풍화도 분류법상 완전히 흙으로 풍화되었지만 입자에 모암의 구조가 남아있는 CW로 분류되었다. X선 회절분석 결과 석영(GL-7m:51%, GL-8m:55%)이 아주 발달하고 장석(GL-7m:15%, GL-8m:16%)과 운모(GL-7m:17%, GL-8m:18%) 및 약간의 점토광물(GL-7m:12%, GL-8m:5%)로 이루어진 화강암을 모암으로 하는 풍화토로 확인되었다.

표 1 사용시료의 기본 물성치

구분	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	함수비 (%)	비중	간극비	세립률 (%)	통일분류	풍화분류	액소성한계	
								PL	LL
GL-7m	2.18	18.9	2.63	0.49	8.33	SW-SM	CW	NP	NP
GL-8m	2.17	17.9	2.61	0.47	5.09	SW-SM	CW	NP	NP

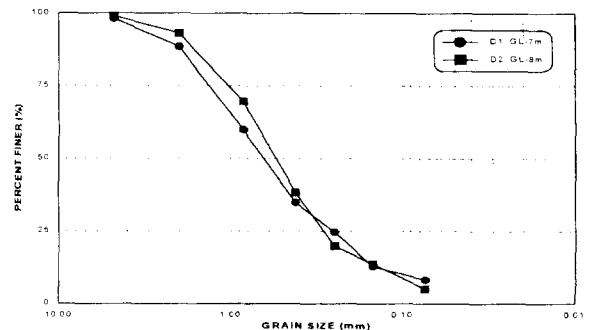


그림 2 사용시료의 입도분포

4.2 K<sub>0</sub> 값

풍화토의 현장응력상태는 풍화가 진행됨에 따라서 변화하게 된다. 풍화 초기에는 암의 성격이 지배적이므로 지표에 가까운 암에서 일반적으로 나타나는 바와 같이 정지토압계수가 1 보다 크게 나타나지

만 풍화가 진행됨에 따라서 점차 감소하게 된다.  $K_0$ 값은 흙의 전단특성에 영향을 미치는 주요한 요소 중의 하나로서 특히 이방적 특성과는 밀접한 관계가 있다. 따라서, 풍화토의  $K_0$ 값은 풍화의 정도를 판정하는 것뿐만 아니라, 전단시 발생하는 거동을 예측하는 척도로 활용될 수 있다. 이번 연구에서는 삼축시험시  $K_0$ 압밀을 수행하여 불교란 및 교란 풍화토의  $K_0$ 값을 측정하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 불교란 시료의 경우  $K_0$ 값이 일반 사질토의 값 보다 크고 1에 근접한 값으로 나타나 현장응력상태가 상당히 등방적인 것을 알 수 있다. 이러한 등방적 현장응력상태는 이번 연구에서 사용한 화강풍화토의 모암인 화강암의 등방적 특성이 풍화후에도 잔존하게 되었기 때문이라고 볼 수 있다. 성형시료의 경우  $K_0$ 값이 불교란시료 보다 작은 값을 갖는 것으로 나타났는데 이는 성형과정에서 모암의 구조를 완전히 상실하고 1차원압축 상태로 재배열되었기 때문으로 판단된다.

표 2 삼축시험  $K_0$ 압밀과정에서  $K_0$ 값 (\* : 평균값)

구 분	GL-7m	GL-8m
불교란시료	0.75~0.99 (0.93*)	0.59~0.83 (0.72*)
성형시료	0.57~0.71 (0.58*)	0.43~0.46 (0.44*)

### 4.3 전단 특성

#### 4.3.1 응력-축변형률 및 체적변형률 특성

그림 3~그림 8은 채취된 시료의 삼축시험시 응력-변형률과 체적변형률 특성을 나타낸 것이다. 시료의 조건과 압밀방법에 상관없이 압축의 경우에는 10%의 축변형률에 도달할 때까지 축차응력이 증가하는 응력경화 특성을 보이며, 신장의 경우에는 5% 이내에서 최대 축차응력에 도달한 후 감소한다. 그림 3과 그림 5 및 그림 7에서 알 수 있듯이 불교란 풍화토의 응력-변형률 곡선에서 압밀방법에 따른 거동의 차이는 작게 나타나며, 성형시료의 경우 크게 나타난다. 이는 불교란시료의  $K_0$ 값이 1에 근접하는 등방압 상태에 가깝다는 사실에 기인한다. 이러한 결과는 GL-7m시료에 대하여 축차응력을 평균압밀압으로 정규화시킨 응력-변형률 거동을 나타낸 그림 9에서 불교란시료와 성형시료의 전단거동이 압밀방법에 상관없이 거의 일치하는 것으로부터 확인할 수 있다. 즉, 압밀방법에 따라 성형시료의 응력-변형률 거동이 더 크게 차이가 나는 것은 평균압밀압이 압밀방법에 따라 불교란시료 보다 더 크게 차이가 난다는 사실이 주원인이다. 전단시 발생하는 시료의 파괴는 압축축에서 대부분 감소하였으며, 구속압밀압이 증가할수록 감소량이 증가하고, 평균압밀압이 가장 작은 경우에 파괴팽창이 발생하였다. 압축전단파괴시 파괴변형과 구속압밀압(평균유효응력)의 관계를 그림 10에 나타내었다. 전체 시험결과에 대하여 선형회귀분석한 결과 파괴변화가 발생하지 않는 한계구속압은 150~200kPa인 것으로 나타났다. 이러한 파괴변형 특성은 일반적으로 풍화토의 전단시 대표적인 특성<sup>2</sup>으로 제시되는 체적팽창현상과 상반된다. 풍화토의 압축전단시 파괴변형특성은 항상 파괴가 팽창되는 것이 아니라 초기간극비와 구속압밀압과 밀접한 관련이 있다는 기존의 한계상태이론을 토대로 하여 고려되어야 하며, 다만 초기 간극비가 작아 한계구속압이 상대적으로 크다는 점을 특징으로 한다. 신장전단시 파괴변화량은 압축 전단시 보다 그 절대량이 작게 발생하며, 일부 시험에서 파괴팽창이 발생하였다. 그리고 구속압의 크기에 따른 경향성은 나타나지 않고 있다.

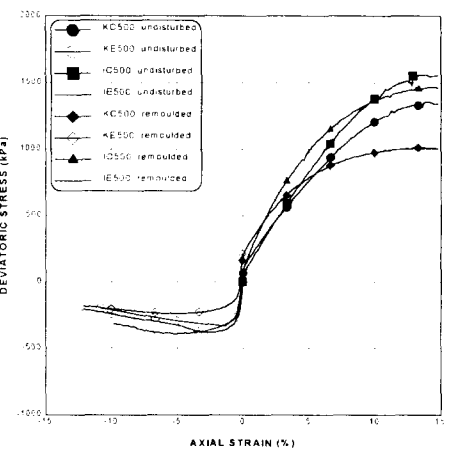


그림 3 GL-7m 불교란-성형시료의 전단거동 비교

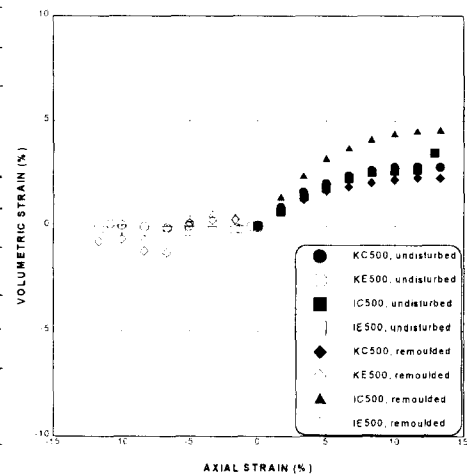


그림 4 GL-7m 불교란-성형시료의 체적변형률 비교

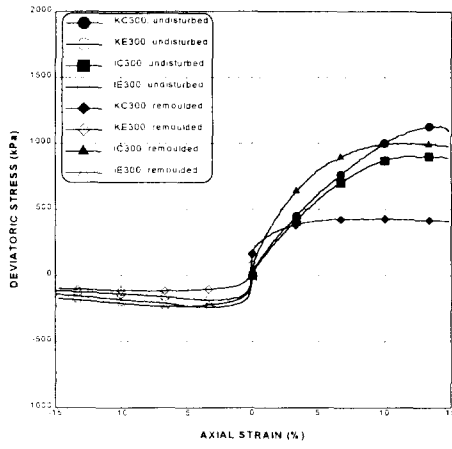


그림 5 GL-7m 불교란-성형시료의 전단거동 비교

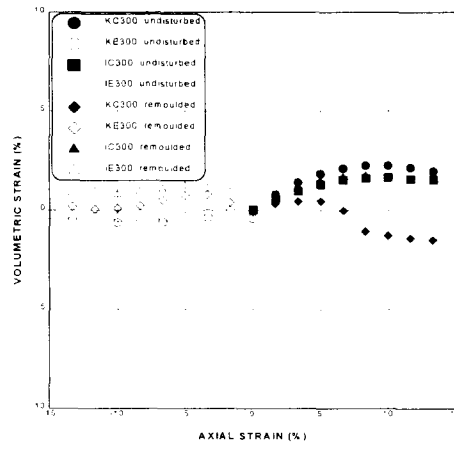


그림 6 GL-7m 불교란-성형시료의 체적변형률 특성 비교

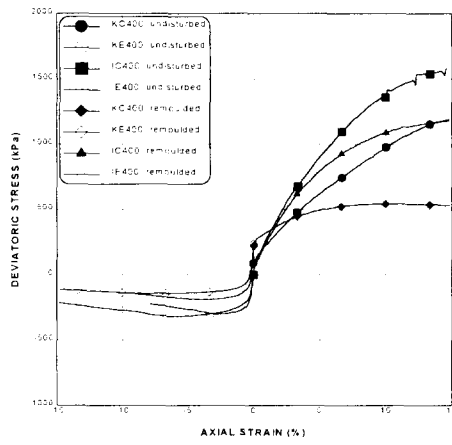


그림 7 GL-8m 불교란-성형시료의 전단거동 비교

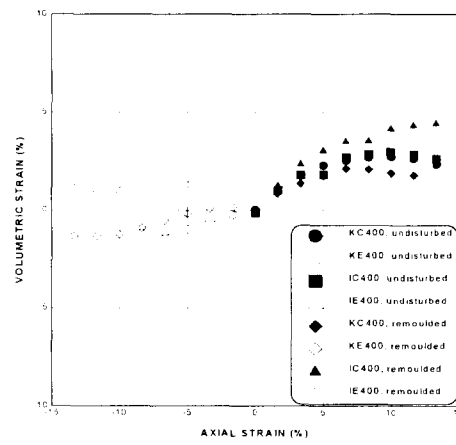


그림 8 GL-8m 불교란-성형시료의 체적변형률 비교

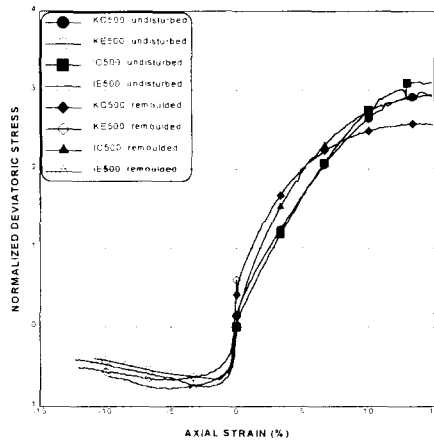


그림 9 GL-7m 시료의 축변형률-정규화축차응력 곡선

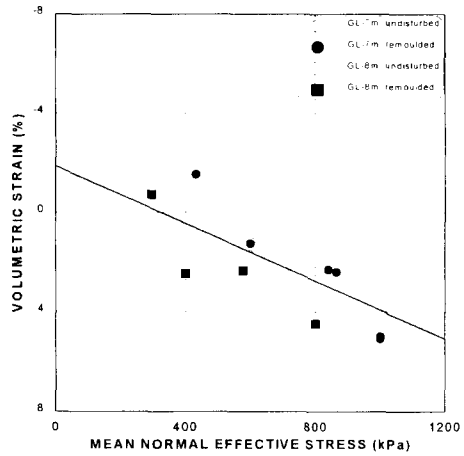


그림 10 유효구속압과 전단시의 체적변형률 관계

### 4.3.2 강도 특성

다음 표 3은 GL-7m와 GL-8m시료 대한 전단시험의 결과로 계산된 강도정수를 요약한 것으로, 적절한 비교를 위해서 점착력을 0으로 가정하여 내부마찰각을 재산정하였다. 불교란시료의 강도정수는 압축과 신장에 대한 내부마찰각이 비슷하게 나타나는 강도 특성을 나타내는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 모암인 화강암의 비방향성 결정구조에서 비롯된다. 압밀방법에 따라 내부마찰각도 불교란시료의 경우 비슷하게 나타났으며, 이는  $K_0$ 압밀시  $K_0$ 값이 1에 가까운 등방압 조건에 가깝기 때문이라 할 수 있다. 불교란 상태의 GL-7m시료와 GL-8m시료의 마찰각을 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.

성형시료의 경우에는 시료성형시 갖게 되는 1차원 압축 조건에서 발생하는 이방적 구조의 형성 때문에 표 3에 나타난 바와 같이 압축과 신장 그리고 순수전단의 주응력방향의 변화에 따라 내부마찰각이 다르게 나타나는 강도 이방성을 갖게 된다. 그리고, 이러한 내부마찰각의 이방적 경향성은 등방압밀의 경우, 압밀중 등방적 구조 재배열 때문에 감소하는 것으로 나타났다.

그러나, 압밀방법이 강도정수에 미치는 영향은 비록 성형시료가  $K_0$ 값이 1보다 작은 이방적 압밀압 조건에서 성형되었지만 뚜렷하지 않고, 다만 신장측에서 등방압밀이  $K_0$ 압밀 보다 작은 마찰각을 갖는 것으로 나타났다. 성형시료의 경우 GL-8m시료와 GL-7m시료의 강도특성의 차이는 불교란시료와 달리 이미 모암의 특성을 상실한 상태이기 때문에 나타나지 않는다. 그림 11은  $K_0$ 압밀에 대하여 전단 방법에 따른 주응력방향에 대한 내부마찰각의 변화를 나타낸 것으로, 불교란시료의 경우에는 순수전단시험을 수행하지 못했지만 삼축압축과 삼축신장의 결과로 판단할 때 앞서 설명한 바와 같이 등방적 특성을 갖는 것으로 나타났으며, 성형시료의 경우에는 최대주응력방향의 연직방향에 대한 각( $\beta$ )이 증가함에 따라 마찰각이 감소하다가 다시 증가하여 최대주응력 방향이 횡방향이 되는 경우에 가장 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

불교란시료와 성형시료의 강도정수를 비교해 보면, 삼축압축과 신장에서 그 차이가 각각  $3^\circ$  와  $6^\circ$  미만으로 나타났다. 연구결과에서 나타난 바와 같이 화강풍화도 불교란시료의 경우 강도의 이방성이 나타나지 않을 뿐만 아니라 압밀방법에 따른 영향도 작고 불교란시료의 내부마찰각과 성형시료의 등방압밀 삼축압축에 의한 내부마찰각의 차이가 크지 않기 때문에 일반적으로 사용되는 성형시료에 대한 등방압밀 삼축압축에 의해 강도정수를 결정하는 방법도 합리적인 결과를 도출할 것으로 판단된다. 다만, 표 3에서와 같이 내부마찰각이 성형시료의 등방압밀 삼축압축, GL-7m 불교란시료, GL-8m 불교란시료의 순으로 약간씩 크게 나타나는데, 이는 초기간극비의 차이 때문에 비롯된 것으로 판단된다. 따라서, 성형시 시료의 파쇄도를 최소화하면서 현장의 초기간극비를 얻을 수 있는 시료성형 방법이 개발된다면 화강풍화도의 전단강도를 불교란시료를 채취하지 않고 등방압밀 삼축시험을 통하여 간편하면서도 더욱 정확하게 구할 수 있을 것이다.

표 3 삼축 및 순수전단시험에서 산출된 강도정수 ( $c, \phi$ )

구분	불교란	선형 회귀분석		평균 마찰각 $\phi_{ave}(^\circ)$	성형	선형 회귀분석		평균 마찰각 $\phi_{ave}(^\circ)$
		$\phi(^\circ)$	$c(kPa)$			$\phi(^\circ)$	$c(kPa)$	
GL-7m	CK <sub>0</sub> DC	38.22	6.1	38.97	CK <sub>0</sub> DC	36.63	2.2	37.17
	CK <sub>0</sub> DE	30.07	11.6	37.76	CK <sub>0</sub> DE	44.21	0.0	44.21
	CIDC	36.89	0.0	36.89	CIDC	36.47	5.8	37.17
	CIDE	38.06	3.5	39.88	CIDE	38.64	0.0	38.64
	DSS	-	-	-	DSS	31.28	10.0	35.02
GL-8m	CK <sub>0</sub> DC	40.14	0.0	40.14	CK <sub>0</sub> DC	37.23	3.0	38.28
	CK <sub>0</sub> DE	41.83	0.0	41.83	CK <sub>0</sub> DE	46.91	0.0	46.91
	CIDC	40.21	0.0	40.21	CIDC	36.90	2.9	37.39
	CIDE	37.18	5.20	41.16	CIDE	39.45	3.1	41.73
	DSS	-	-	-	DSS	30.11	5.0	36.05

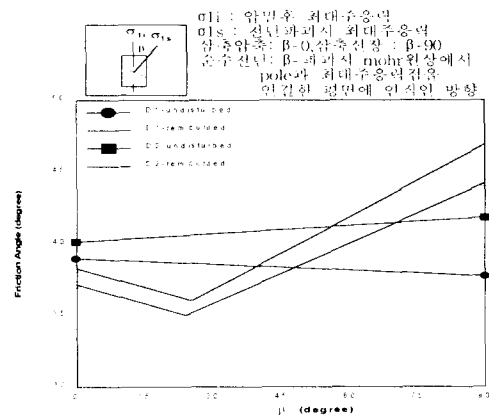


그림 11 파괴각과 내부마찰각의 상관관계

## 5. 결론

화강암 풍화토의 전단강도-변형의 이방성에 대한 고찰을 위하여 이번 연구에서는 불교란시료와 성형시료에 대한 기본 물성 시험과 1차원 압축시험과 함께 등방압밀과  $K_0$ 압밀을 통한 삼축압축 및 삼축신장 그리고 순수전단 시험을 실시하고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 풍화토의 역학적인 특성은 풍화이전의 모암의 광물 조성과 결합구조와 밀접한 관계가 있다. 이번 연구에서 사용한 화강암 풍화토는  $K_0$ 값이 1에 가까운 대체적으로 등방적인 응력 특성을 나타내며 삼축압축과 신장에 대한 내부마찰각도 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 비교적 등방적인 특성을 가진 화강암의 특성에서 비롯되었다고 판단된다.
- ② 불교란 화강암 풍화토는 등방압에 가까운 현장응력상태를 갖고 있기 때문에 압밀방법( $K_0$ 압밀과 등방압밀)이 응력-변형률 특성과 내부마찰각 등에 미치는 영향이 매우 작다.
- ③ 풍화토의 삼축압축전단시 파괴변형 특성은 항상 파괴가 팽창한다는 일반적인 인식과는 달리 초기간극비와 구속압밀압과 밀접한 관련이 있다는 한계상태이론을 토대로 하여 고려되어야 하며, 다만 초기 간극비가 작다는 점을 특징으로 한다.
- ④ 성형시료는 불교란시료와 다르게 생성과정이 퇴적도와 유사하기 때문에  $K_0$ 값이 불교란시료보다 낮은 이방압 상태에 있으며 주응력방향에 따라 내부마찰각이 다르게 나타나는 이방적 특성을 갖는다.
- ⑤ 포화된 불교란 화강암 풍화토의 경우, 강도 이방성이 나타나지 않을 뿐만 아니라 압밀방법에 따른 영향도 작고 불교란시료의 내부마찰각과 성형시료의 등방압밀 삼축압축에 의한 내부마찰각의 차이가 크지 않기 때문에 일반적으로 사용되는 성형시료를 이용한 등방압밀 삼축압축시험의 결과로도 강도 정수를 합리적으로 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 권오순, 정충기 (1996), "불교란 풍화토의 전단거동 특성", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 457~460
2. 박병기 (1974), "화강암질 풍화토의 특성연구 (주로 Dilatancy 특성에 대한 연구)", 대한토목학회지, 제 22권, 제 3호, pp 55~66
3. 西田一彦, 青山千彰, 小廣夫 (1978), "不カク亂マサ土の壓縮特性.", 土木學會關西支部年次學術講演概要, III-4~1-2, p. 78
4. 松岡元, 平尾淳一, 福武毅芳 (1984), "異方性を考慮した砂の變形・強度論," 土と基礎, Vol. 32, No. 11, pp 31~36
5. Geological Society (1990), "Tropical Residual Soils, Engineering Group Working Party Report," *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 1, pp 1~101
6. Konrad, J.-M. (1990), "Sampling of Saturated and Unsaturated Sands by Freezing," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 13, No. 2, pp 88~96
7. Lumb, P. (1962), "The Properties of Decomposed Granite," *Geotechnique*, Vol. 12, No. 3 pp 226~243
8. Oda, M. (1981), "Anisotropic Strength of Cohesionless Sands," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 107, No. 9, September, pp 1219~1231
9. Ollier, C. (1969), *Weathering*, Geomorphology Text 2, Oliver and Boyd, pp 1~85
10. 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
11. Yoshimi, Y., Hatanaka, M. and Oh-Oka, H. (1978), "Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing," *Soil and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 18, No. 3, pp 59~73