

화강풍화토의 전단정수(c, ϕ) 평가

An Evaluation of Shear Strength Parameters(c, ϕ)
for Weathering Decomposed Granite Soil

이 문 수*¹

Lee, Moon-Soo

이 광 찬*²

Lee, Kwang-Chan

Abstract

Both the chemical components and the physical and mechanical properties of the compacted and undisturbed weathered granite soils were estimated to investigate the influences of the degree of weathering and saturation on the shear strength. The weathered granite soils used in this study were taken from six different sites in Korea. The results showed that the shear strength of weathered granite soil decreased with increasing the degree of weathering and saturation. Under the normal stresses less than 40kPa, the shape of Mohr-Coulomb failure envelope followed curved or hyperbolic relationship and a half of cohesion value obtained by the common shear test was observed. Using the Sueoka's method, the values of CWI were ranged from 21.5 to 31.26 which can be characterized as a completely weathered granite soil. Large decrease in shear strength and remarkable variation in dilatancy were observed in saturated granite soil compared to unsaturated soil. It was also found that the shear strength of undisturbed weathered granite soil of Pungam site can be expressed approximately by the equation of $(\tau)_{\text{sat}} = 1.0(\tau)_{\text{unsat}} - 12.48$, and this equation can be extended to the other sites considered in this study.

요 지

본 연구는 6개소에서 채취한 교란 및 불교란 화강풍화토에 대해 화학적 성분분석, 물리 및 직접전단시험 등을 수행하여 화강풍화토의 전단정수가 풍화도와 전단변위 등에 어떠한 관계가 있는가를 고찰한 것이다. 그 결과 화강풍화토의 전단정수는 풍화도와 포화도가 클수록 전단정수가 작게 나타나고 연직하중 40kPa이하에서는 Mohr-Coulomb의 파괴포락선이 직선이 아니고 곡선 내지 포물선 형태를 보이며 통상의 시험법에서 얻은 점착력보다 1/2정도가 작게 나타났다. 또한 화강풍화토의 화학적 풍화지수가 21~31.26의 범위에 대응되고 Sueoka 분류법에 의하면 완전 화강풍화토로 판명되었다. 그리고 불포화 화강풍화토와 포화 화강풍화토의 강도를 비교할 때 포화시료가 전단강도의 저하가

*1 정회원, 전남대학교 농과대학 농공학과 교수

*2 정회원, 전남대학교 공기연 특별연구원

크고 다일러턴시의 변화가 현저함을 알 수 있었다. 또한, 광주 풍암지구 화강토의 전단강도는 $\{(\tau)_{sat} = 1.0(\tau)_{unsat} - 12.48\}$ 의 식으로 근사화시킬 수 있었으며 다른 화강풍화토에서도 유사한 결과를 보였다.

Keywords : Undisturbed decomposed granite, Chemical weathering index, Strength parameters

1. 서 론

화강토지반을 구조물의 기초지반으로 이용하거나 절토사면의 강도를 평가할 때는 불교란상태의 강도정수가 요구되며 특별한 경우를 제외하고는 현행 국내 설계시 통상 표준관입시험의 N값에 의존하는 경우가 대부분이므로 이는 지반을 평가하는데는 다소 불안감이 내포되어 있다고 할 수 있다. 특히 대기에 노출된 경우나 풍화도 및 물에 접촉하게 되면 화강토의 강도 변화는 심층에 있을 때의 강도와는 크게 달라진다고 알려져 있다. 이와 같은 경우는 보통 흙과 같이 불교란 시료를 대상으로 전단시험을 실시하여 강도정수를 결정해야 옳다고 생각된다. 그러나 화강토의 불교란 시료의 채취나 공시체의 제작은 매우 어렵고, 토립자가 불균질하고, 또한 풍화정도에 따라서 역학적 성질이 크게 달라지므로 불교란 화강토의 전단특성의 연구는 부진한 상태에 놓여있다. 최근에는 집중호우나 이상강우로 인해 화강토의 절·성토사면이 붕괴되는 현장을 우리 주변에서 종종 목격할 수 있는데 이러한 화강토의 사면붕괴는 절취 사면이 장시간 공기에 노출되거나 물과 접촉하면 전단강도의 저하 그리고 풍화가 진행되어 주로 얇은 파괴가 주종을 이룬다. 이에 즈음하여 설계나 시공시 화강토지반의 공학적 특성을 이해하려는 관심이 고조되고 있으며 특히 풍화도와 관련된 불교란 시료에 의한 전단강도의 추정은 매우 중요하다고 하겠다. 이러한 관점에서 본 연구는 현행의 실내전단시험을 통해 불교란 화강토와 교란 화강토의 전단특성을 파악하고 이들 시료가 풍화도 및 포화도에 따라 어떻게 변화되어가며 전단강도의 발현과정이 어떠한 mechanism에 의존하는가를 고찰하고자

한 기초적 연구이다.

2. 풍화도 판단

표 1은 화강토의 풍화도에 따른 분류와 공학적 특성을 나타낸 것인데(Ito, Kujime, Sincho, 1990) 여기서 M_L 는 점토질 흙이 많은 화강토이고 쉽게 분리되며 N치는 10~30이고 M_M 는 모래질 화강토로서 대부분 분리되어 있으나 부분적으로 결합된 상태로서 N치는 20~30을 갖는다. 그리고 M_H 는 조립질 모래 내지 자갈질 화강토로서 5mm~30mm의 입경을 가지고 있으며 N치는 50이상을 갖는 지반이다. 이들의 공통점은 주로 현장시험에 의한 탄성과 속도(V_p)를 이용하고 #200체 통과량, 비중, 습윤밀도 등의 물리적 특성을 이용하여 화강토 지반을 3가지 분류하고 있는 것이 특징이다. 또한, Matsuura와 Mukushiro(1976)은 화강토 지반을 지표에서부터 표층, 제1풍화대(잔적토), 제2풍화대, 제3풍화대, 암반 등으로 분류한 바 있고 반면에 Nosaki(1979)도 N치를 이용하여 풍화도를 판단하였는데 이는 협소한 지역이나 화강토가 관입 상태로 존재하는 경우 등에는 많은 문제점을 포함하고 있다고 알려져 있다. 앞으로 국내에서도 이러한 분야의 응용이 기대되지만 지금까지 제안된 풍화도 판정법 중 필자들은 Sueoka(1988)의 CWI(Chemical weathering index)에 의한 분류방법에 관심을 갖고 있다. 또한, Sueoka는 화강토가 전 세계적으로 분포되고 있으며 풍화환경에 따라 등종의 모암 조직을 갖고 있어도 풍화양식이나 풍화정도가 다르기 때문에 화학적인 조암광물의 변화로써 구분할 수밖에 없다고 보고 있다. 특히, Sueoka의 CWI 방법은 암반 및 풍화도에 대하여 ① 풍화 과정 전

체를 표현할 수 있고, ② 공학적 목적에도 적합하고, ③ 비교적 간단한 경험적 표현을 목표로 제안된 것이다. 이 방법은 풍화가 진행되면 H₂O(±)(강열감량)가 급격히 증가되고 이를 mole 단위로 표현하면 그 변화가 명확히 된다는 것을 구체적으로 1mole 당의 중량으로서 설명하고 있는 것이 지반공학 차원에서 흥미해 볼 때 흥미가 있다.

따라서 Al₂O₃ + Fe₂O₃ + TiO₂ + H₂O(±)의 성분 합계를 mole %로 풍화의 진행 정도를 정량적으로 나타내는 지표로 보고 CWI를 다음과 같이 정식화하여 제안하고 있다(Sueoka, 1988).

$$CWI = \left(\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{All\ Chemical\ Components} \right) \frac{mole}{100(\%)} \times$$

보통 CWI에 의한 풍화의 분류는 표 2에서 CWI<15는 신선한 화강암이고, 15<CWI<20은 풍화암으로서 이를 다시 3단계로 약풍화(Ⅱ), 중풍화(Ⅲ), 강풍화(Ⅳ)로 나누고 20<CWI<40은 완전풍화토(V)로 분류한다. 한편 강열감량 Li<2.0%는 신선암 내지 약풍화암이고, 2.0%<Li<4.0%는 중풍화토, Li>4.0%는 강풍화토로 분류되는데(residual soils in Japan, 1990) 이들은 각각 표준관입시험 N값과는 N>50, N=20~50, N=2~20의 대응관계를 보여준다. 이들 분류법은 물리적 또는 지반공학적인 관점에서 풍화대를 분류하고자하는 방법인데 실제의 풍화는 화학적 변화에 있으므로 특히 화강풍화토의 풍화도에 따른 구성성분의 화학적 변화에 주목할 필요가 있다.

표 1. 풍화정도에 의한 화강토 분류 및 공학적 특성(Ito et al, 1990)

| 분류 기호 | 강도상태 | | 결정(입자)의 결합상태 | 느낌 | 물리시험 | | 단위중량 | | N 값 | PS검층 V _p , V _s (m/sec) | 변형 계수 (kg/ cm ²) | 공내전단 시험 | | |
|----------------|----------------------------|-------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|-----------|--|--|----------------------------|--------------------------------|---------------|
| | | | | | #200 (%) | G _s | w _n (%) | 습윤 (g/cm ³) | | | | 건조 (g/cm ³) | c (kg/ cm ²) | φ (°) |
| M _L | 연약 | 점토질 화강토 | 적·갈색 해머나 꼭갱이 가 꽃임 | 모두 분리상태 | 거의 토양화 점토질로 서 굳은 느낌 | >30 | 2.65 | 10 | 1.70 | 1.40 | V _p = 300 ~400 V _s = 130 ~240 | 100 ~ 470 | 0.1 ~ 0.15 | 23 ~ 27 |
| | | | | | | ~ | ~ | ~ | ~ | | | | | |
| M _M | 다 소 연약 | 사질 화강토 | 해머나 꼭갱이 가 꽃임 | 모래같은 느낌 노두전체 갈색 | 10 | 2.66 | 5 | 1.90 | 1.70 | V _p = 500 ~800 V _s = 310 ~450 | 310 ~ 640 | 1.0 ~ 1.2 | 25 ~ 30 | |
| | | | | | ~ 30 | ~ 2.70 | ~ 20 | ~ 2.20 | ~ 2.10 | | | | | |
| M _H | 거친 화강토 | 해머나 꼭갱이 질로 패임 | 태반이 분리, 부분적으로 결합된 것도 있음 | 거친느낌 노두전체 가 백색 에 근사 | <10 | 2.69 ~ 2.73 | <10 | >2.3 | >2.25 | >60 | V _p = 1100 ~1500 V _s = 550 ~900 | 890 ~ 2100 | 1.5 ~ 2.0 | 30 ~ 35 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | 잔자갈 이 섞인 것 같은 화강토 | 해머나 꼭갱이 질로 자국남 | 직경5~30mm 정도 단위로 결정체가 붙어있으나 거의 손가락으로 분해가능 | 절리가 남아있고 겉보기는 암반과 같다. | | | | | | | | | | |

표 2. 화학적 풍화지수에 의한 암석분류와 공학적 특성 (Dearman et al, 1978)

| CWI (%) | Classification | Extent of weathering | Classification of weathered granite | Cohesion and porosity |
|---------|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 13 -15 | I | Fresh rock | Fresh rock | |
| 15 -20 | II | Slightly weathered | Weathered granite | |
| | III | Moderately weathered | Granular disintegration sand | |
| | IV | Highly weathered | Masado soil, Saprolite | |
| 20 -40 | V | Completely weathered | Lateritic soil | |
| 40 -60 | VI | Residual soil | Laterite or bauxite | |
| 60 -90 | VII | Weathered hard pan (as cemented) | | |

강토의 현장 함수비로 조제한 다음 일정 γ_d 가 되도록 전단용 몰드($\phi 60$, h20mm)에서 제작하였는데 다짐은 하바드식 spring tamper로 정적 압축하는 방법을 사용하였다. 또한, 직접전단시험은 Bishop형 상부이동식 시험기를 사용하고 전단속도는 0.5mm/분으로 하였으며 수직하중은 최저 6kPa부터 8단계로 재하를 실시하였다. 이와 같이 작은 하중에서 시험하는 이유는 화강풍화토의 절개 사면파괴는 주로 얇은 파괴가 발생되는데 이처럼 작은 하중과 통상의 하중이 어떠한 관계가 있는가를 고찰한다. 또한 풍화도가 화강토의 전단거동에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위해 시험전 강열감량과 화학적 구성성분조사 등을 실시하였다. 그리고 본 연구에 사용된 화강풍화토의 물리적 성질은 표 3과 같고 그리고 6개소 화강풍화토의 화학 성분 분석 결과를 표 4에 나타냈는데 이는 화강풍화토의 제반성질과 전단정수 평가에 이용하였다.

3. 시험

3.1 시료준비 및 시험방법

지금까지 화강토의 불교란 시료채취는 채취 지반을 동결시키거나 또는 가능한 한 교란의 영향을 받지 않도록 공시체를 큰 block으로 잘라내는 방법 등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같은 방법을 이용하였는데 이 채취기는 30×30cm면적을 갖는 아크릴판에 7mm 정도의 못구멍을 내고 이 구멍을 통하여 못(16.5 cm)을 정적으로 관입 시킨 후 이를 채취 즉시 시료를 랩으로 감아 함수비의 변화를 방지한 후 실내로 반입되어 분할하여 사용하였다. 또한 시험실에 반입된 시료는 직경이 6cm 이고 높이가 2cm인 소형 커터를 이용하여 시료상부에서 정적으로 압입한 후 커터 주변을 조심스레 잘라내어 사용하였으며 반면 다짐토는 시료의 동일성을 기하기 위해 #4체를 통과한 시료를 500g씩 자루에 넣고 2m 높이에서 30회 자연 낙하시켜 초기 처리한 후 불교란화

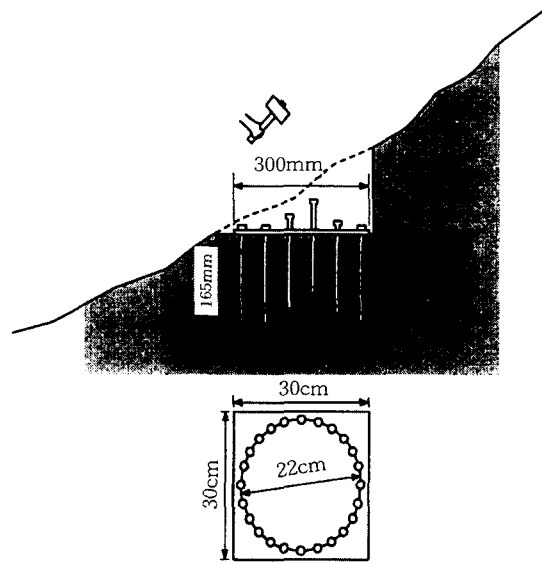


그림 1. 불교란 화강풍화토의 채취방법

표 3. 6개소 화강토의 물리적 성질

| 지역 | 구분 | Gs | W _n (%) | γ _t (kN/m ³) | e ₀ | Grain Size Distribution | | | | |
|----|-------|------|--------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------|----------------|
| | | | | | | D ₆₀ | D ₃₀ | D ₁₀ | #200 | c _u |
| 광주 | WGS-1 | 2.68 | 17 | 15.7 | 1.01 | 0.78 | 0.25 | 0.022 | 4 | 35 |
| | WGS-2 | 2.66 | 15 | 16.9 | 0.80 | 0.83 | 0.24 | 0.022 | 5 | 38 |
| | WGS-3 | 2.66 | 10 | 17.2 | 0.68 | 0.88 | 0.22 | 0.022 | 3 | 40 |
| | WGS-4 | 2.69 | 18 | 16.1 | 1.12 | 0.50 | 0.10 | 0.02 | 16 | 25 |
| 익산 | WGS-5 | 2.66 | 20 | 16.0 | 0.98 | 0.70 | 0.14 | 0.026 | 20 | 27 |
| 형성 | WGS-6 | 2.67 | 23 | 18.7 | 0.74 | 0.94 | 0.60 | 0.095 | 8 | 10 |

표 4. 6개소 화강토의 화학적 성분 분석결과

| 구분 | Al ₂ O | Fe ₂ O | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | MnO | SiO ₂ | Li(%) | CWI(%) |
|-------|-------------------|-------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|------------------|-------|--------|
| WGS-1 | 19.63 | 5.33 | 1.59 | 1.77 | 1.17 | 2.98 | 0.61 | 0.07 | 0.08 | 61.98 | 4.79 | 30.16 |
| WGS-2 | 17.31 | 4.55 | 1.52 | 2.90 | 2.44 | 2.82 | 0.57 | 0.16 | 0.08 | 65.36 | 2.29 | 21.00 |
| WGS-3 | 19.95 | 6.20 | 1.99 | 2.63 | 2.19 | 2.86 | 0.74 | 0.10 | 0.11 | 61.34 | 1.89 | 22.70 |
| WGS-4 | 19.07 | 5.17 | 1.20 | 1.49 | 1.40 | 2.95 | 0.71 | 0.09 | 0.09 | 63.58 | 2.51 | 28.37 |
| WGS-5 | 18.85 | 2.73 | 0.44 | 0.24 | 0.63 | 4.42 | 0.39 | 0.04 | 0.04 | 67.86 | 4.36 | 27.16 |
| WGS-6 | 15.96 | 3.85 | 0.95 | 1.63 | 3.28 | 3.67 | 0.55 | 0.06 | 0.06 | 63.22 | 2.70 | 25.27 |

4. 시험결과 및 고찰

4.1 전단정수의 특이점

그림 2는 광주풍암지구의 깊이별 3종의 다른 불교란 화강풍화토의 직접전단시험 결과인데 수직하중을 매우 작게 취한 경우에 대해 시험한 결과이다. 즉 수직하중 $\sigma = 32\text{kPa}$ (0.32 kg/cm^2) 이하를 최대 4단계로 나누어 최소 $\sigma = 6\text{kPa}$ (0.06 kg/cm^2)부터 재하시켜 점착력 c 의 변화를 조사한 것이다. 통상의 4단계 (50, 100, 150, 200kPa)로 재하하여 직선으로 추정하는 경우에 비해 c 값이 이들과 직선이 아닌 곡선형태

로 정해지는 것을 알 수 있다. 그리고 점착력 c 값이 그림에 기입된 것처럼 $34 \sim 11\text{kPa}$ ($0.34 \sim 0.11\text{ kg/cm}^2$)로 변하고 있으며 내부마찰각 ϕ 값도 어느 c 값을 선택하느냐에 따라 달라지고 있어 현행의 직접전단시험 결과는 점착력 c 에 대해서는 과대 평가될 가능성이 있음을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 그림 3은 그림 2의 결과를 전단응력과 수평변위(즉 Displacement의 약어 즉 Disp.)관계에서 재하 단계별로 수평변위가 같은 점을 찾아 전단응력과 수직응력의 관계로 도시한 것이다. 이는 깊이(-3m(그림-a), -13m(그림-b))에 따라 어느 변위에서 c, ϕ 값이 가장 크게 나타나는가를 살피기 위해서 인데 이 결

과를 그림 4에 나타낸다. 두 그림에서 -3m깊이의 시료는 -13m보다 풍화가 더 진행된 것인데, -3m의 화강풍화토는 6mm의 변위에서 최대의 $\tan\phi$ 를 가지며 c 는 2mm의 변위에서 최대를 갖는다(30kPa). -13m에서는 ϕ 의 최대치는 4mm의 변위에서 c 의 최대치는 2mm의 변위에서 나타나며(20kPa), 같은 c 끼리는 -3m의 풍화가 더 진행된 경우가 크고 ϕ 는 역으로 되고 있다. 한편 통상의 4단계 직접전단시험에 의한 c, ϕ 값을 기입하였는데 그림에서 -3m의 c 는 맨 윗선 $c=35$ kPa, ϕ 는 맨 아래선 $\tan\phi=0.68$ 로 평가되고 -13m의 경우는 $c=30$ kPa, $\tan\phi=1.17$ 로 평가되고 있다. 점착력 c 는 -3m, -13m의 경우 모두 위험측으로 평가되고 ϕ 는 모두 안전측으로 평가되고 있다.

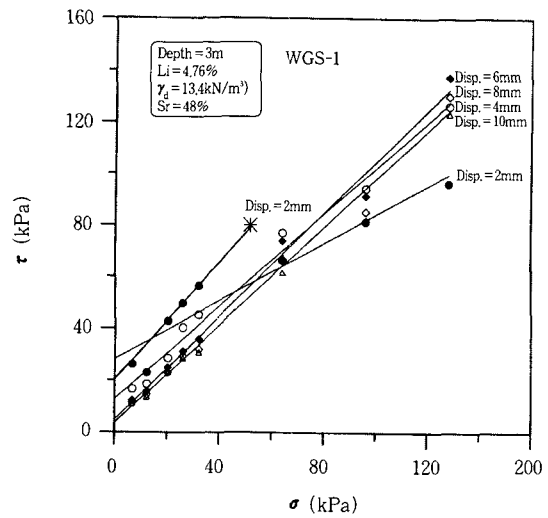


그림 3(a). 그림 2의 결과를 사용한 등변위별 시험결과 (-3m)

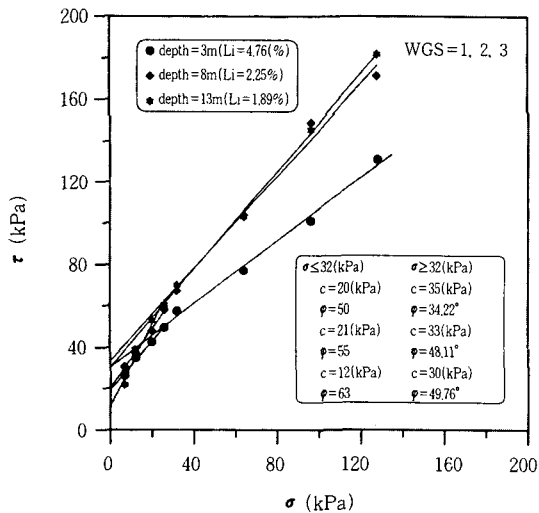


그림 2. 깊이별 WGS-1, 2, 3 화강풍화토의 시험 결과

따라서 통상의 직접전단시험결과와의 평가방법은 적어도 점착력값의 결정에 있어서는 현행 사실상 위험측으로 평가되고 있는 것 같고 동일한 위치에서도 얼마든지 변할 수 있으므로 한 두 개의 시험결과만으로 판단하는 것은 문

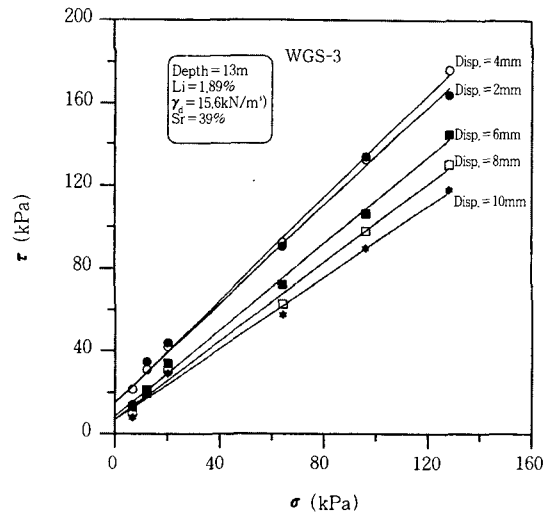


그림 3(b). 그림 2의 결과를 사용한 등변위별 시험결과 (-13m)

제가 있음을 시사하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 그림 5에서와 같이 직접전단 시험을 대략 수직응력 40kPa 이내에서 등간격

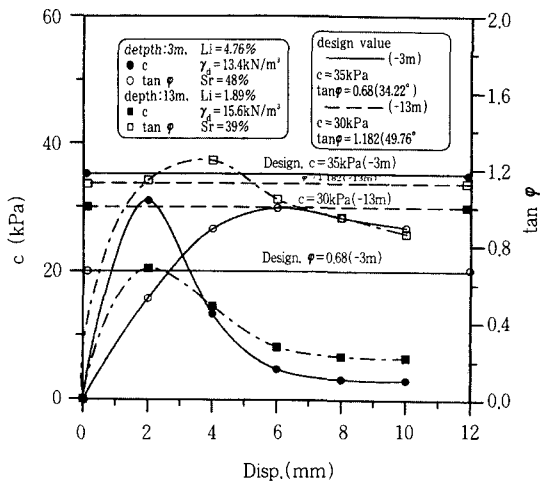


그림 4. 그림 3의 결과를 사용한 등변위별 전단상수의 관계

즉 10, 20, 30kPa 정도 세분하여 전단시험을 시행하고 점착력을 결정하고(Zone 1), 수직응력 $\sigma_v > 40\text{kPa}$ 에서는 통상의 전단시험법을 이용하여 내부마찰각을 결정한다면 과대평가는 감소할 것으로 판단된다(Zone 2). 만약, 이러한 과정이 번거로울 때는 수직응력 $\sigma_v = 10$ 또는 20kPa 에서 $\sigma_v = 40\text{kPa}$ 이하의 값에서부터 시작한다면 과대평가를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 결국 저구속압의 영역에서 파괴포락선이 크게 하향하여 점착력이 작게 결정될 수 있다. 특히 저압영역에서 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 형태는 그림 2에서와 같이 직선이 아니고 곡선형태로 표현되는 것 같다. 따라서 실제 현장문제에서 화강토의 절토사면의 안정성을 평가할 때 수직응력 σ_v 는 결코 크지 않으므로 이때의 설계 점착력은 통상의 직접전단시험시의 수직응력의 재하(대략 0.5, 1.0, 1.5, 2.0kg/cm²)에 의해서는 점착력이 과대평가 된다고 보며 내부마찰각의 변화는 오히려 저구속압일 때를 연결하여 근사적으로 직선으로 연장하면 훨씬 더 크다. 특히, 화강풍화토의 기초지반 해석시는 통상의 재하 방법과 함께 미소 범위에서 수직응력과 매우 큰 범위까지를 시험해 보면 아래의 그림 6에서 처럼 3개의 절곡선의 형태가 된다는 결과가 Miura(1979)등에 의해 연구되고 있다. 본 시험

기로는 고압부 시험을 할 수 없기 때문에 이를 확인하지 못하고 있지만 사실로 내지 모래의 고압 전단시험결과에서 Miura(1979)는 입자의 파쇄가 누적되어 내부마찰각이 감소된다는 것이다. 그러나 분명한 것은 저구속압에서 화강풍화토의 Mohr-Coulomb 파괴포락선은 직선이 아니고 곡선형태이고 그림 6에서 처럼 3단계 절곡선 형태이거나 또는 전체가 이 절곡선을 포괄하는 포물선 형태일 가능성이 매우 높다.

한편, 5m 깊이에서 채취한 강원 횡성 불교란

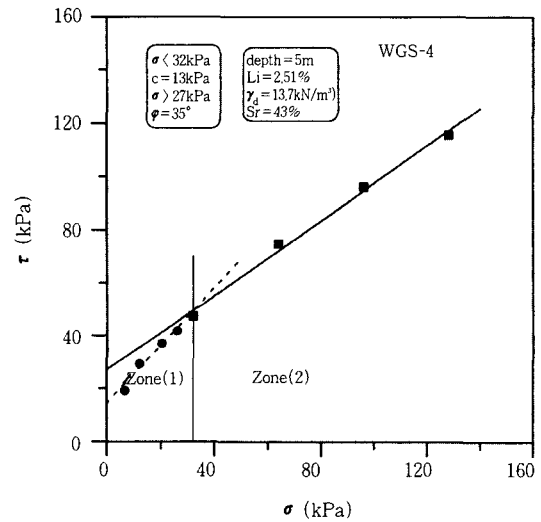


그림5. WGS-4 화강풍화토의 시험결과

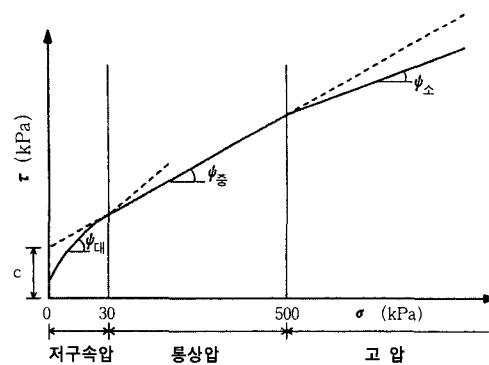


그림 6. Miura의 연구결과($\sigma_v > 5\text{kg/cm}^2$)

화강풍화토의 현장 포화도가 84%이고 건조단위중량 $\gamma_d = 15.4\text{kN/m}^3$ 인 직접전단시험 결과를 그림 7(a), (b), (c)에 나타내었다. 그림 7(a)의 관계에서 전단응력 및 수직변위와 수평변위 관계에서 전형적인 변형을 경화-연화 거동을 보이고 있다. 이의 시험결과를 전단응력과 수직응력의 관계로 도시한 것은 (b)인데 저압부($\sigma \leq 32\text{kPa}$)와 보통압($\sigma = 32\text{kPa}$)에서 평가되는 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 값에 큰 차이는 없는 것 같다. 그림(c)는 통상적 구속압의 결과를 등변위로 정리하여 c , ϕ 의 최대치 발현과정과 통상의 설계 c , ϕ 값을 대비시킨 것이다. 통상의 c , ϕ 값은 여유가 거의 없음을 알 수 있다. 이와 같이 포화도가 매우 큰 화강풍화토는 불포화 화강토에 비해 구속압의 영향이 적으며 통상의 시험 방법이 적용된다는 것을 의미한다. 그러나, 안전여유는 그림(c)에서 보는 바와 같이 발현강도에 접근하고 있어 전단정수의 선택에 여유가 없음을 보여주고 있다. 통상, 이와 같이 화강토의 기초지반이나 사면에서 강우나 지하수에 의해 포화가 예상될 경우, 설계시 시험값의 2/3를 취하는 방식이 있는데 이와 같은 상황을 감안한 것으로 보인다.

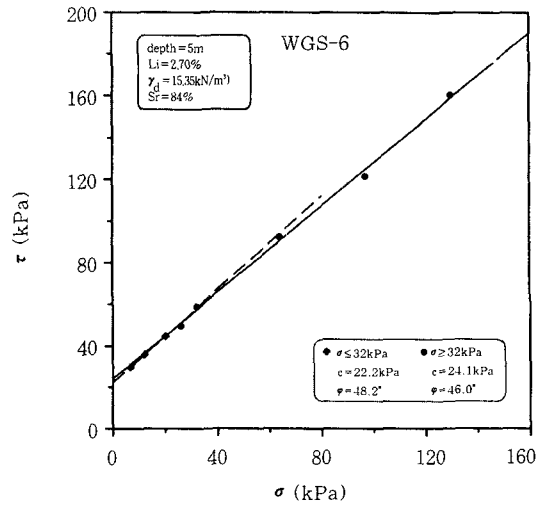


그림 7(b). WGS-6 화강풍화토의 시험결과

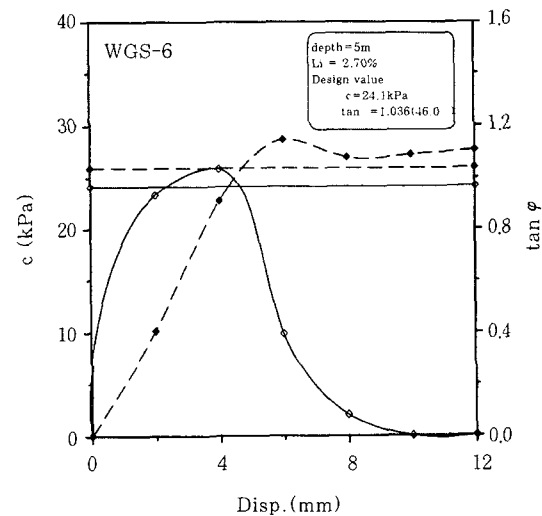


그림 7(c). WGS-6 화강풍화토의 시험결과

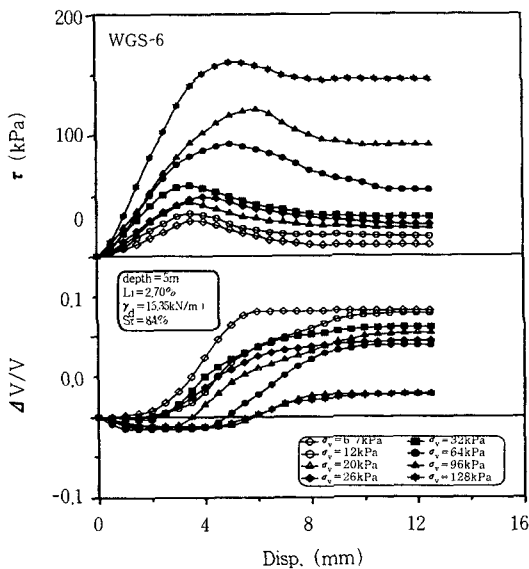


그림 7(a). WGS-6 화강풍화토의 시험결과

4.2 교란의 영향에 의한 강도와 변형 관계

그림 8(a)는 익산 불교란 화강풍화토를 전단응력과 체적변형률 및 수평변위의 관계로 나타내고 그림8(b)에는 같은 흙을 교란시켜 동일한

건조단위중량 13.5kN/m^3 으로 다져서 시험한 결과를 상호 비교한 것이다. 이들 그림 8(a)와 그림 8(b)을 비교해 보면 동일한 단위중량으로 재성형하여 시험하면 강도나 체적변형률($\Delta V/V$)에서 약화되어 나타나고 불교란 시료에서 그림 8(a)(b)도 전단응력과 수평변위 관계는 명확한 peak가 나타나지 않으며 교란 시료와 비슷한 경향을 보인다. 다만 교란시료는 체적변형률($\Delta V/V$)과 응력-변위곡선의 경사가 더 작게 나타나며 전단응력의 발현 경사나 다일러턴시의 변화가 현저하게 달라지고 있음을 알 수 있다.

4.3 화강풍화토의 Dilatancy 특성

직접전단시험에서 얻는 화강풍화토의 전단강도는 마찰, dilatancy, 입자과쇄 및 입자재배열 등의 3가지 요인을 포함한 강도인데 이 가운데 dilatancy는 전단에너지의 일부가 체적변화로 소비되므로 이를 보정하는 경우가 있다. 특히,

Taylor(1948)가 조밀한 모래질 흙에 행한 연구 결과에 의하면 interlocking이 peak 강도에 26% 정도 기여한다는 실험 결과를 발표하였다. 그림 9(a), (b)는 각각 광주풍암 불교란 불포화 화강풍화토와 교란 포화 화강풍화토의 시험결과를 Taylor가 제안한 dilatancy 보정식을 사용하여 보정한 후 $(\tau_f - \tau_{fP})/\tau_f$ 즉 τ_f 는 peak 강도, τ_{fP} 는 dilatancy 보정 후 강도로서 $\tau_f - \sigma_v (d\epsilon_v/d\epsilon_a)$ 을 의미한다) 결과를 수직응력의 관계로 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 교란 포화 및 불교란 불포화 화강토는 모두가 수직응력이 작은 범위(대략 40kPa이하)에서 보정치가 급격히 감소하고 수직응력이 증가함에 따라 그 변화가 둔감해지는 경향이 있다. 특히, dilatancy가 전단강도에 미치는 영향은 보통 구속압보다 저압영역에서 크게 미침을 알 수 있으며 이러한 사실은 전단시 포화에 의한 장석분의 세립화내지 입자자체의 결합력이 감소한 것으로 판단된다.

4.4 포화 및 불포화 화강풍화토의 강도 상관성

화강풍화토는 포화도가 낮은 데서 점차 포화

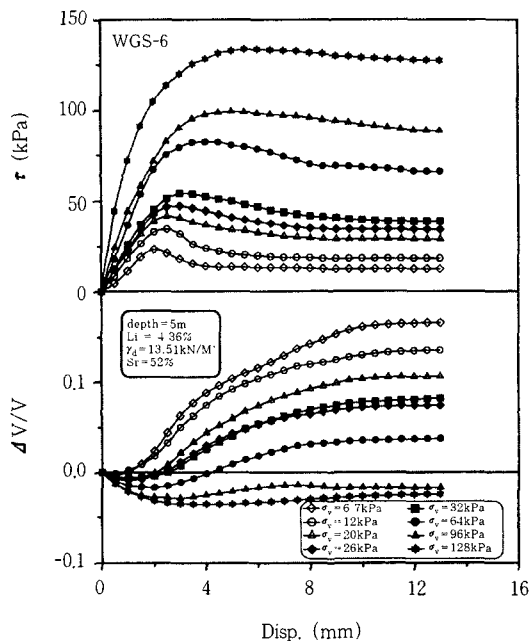


그림 8(a). WGS-5 불교란 화강풍화토의 시험결과

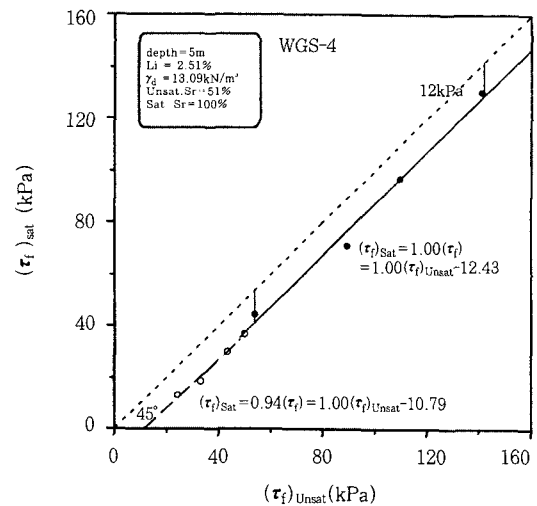


그림 8(b). WGS-5 불교란 화강풍화토의 시험결과

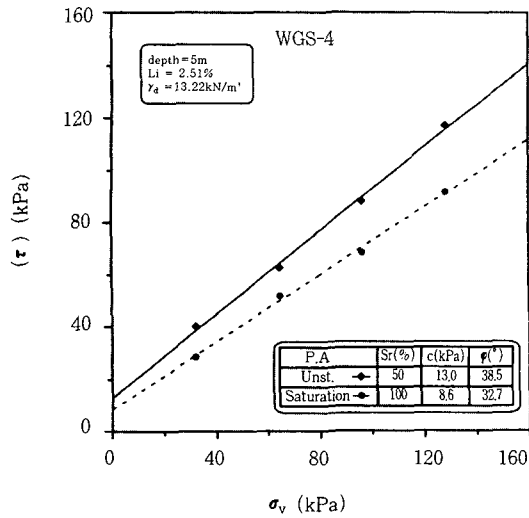


그림 9(a). WGS-4 불포화 화강풍화토의 수직응력과 dilatancy 효과

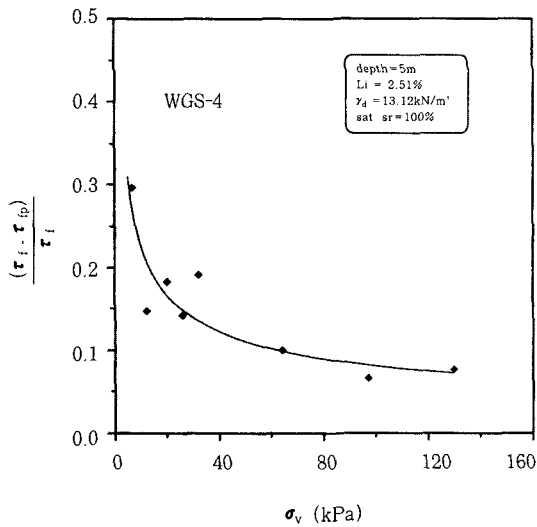


그림 9(b). WGS-4 포화다짐 화강풍화토의 수직응력과 dilatancy 효과

도가 높아지면 2차 광물이 급속히 약화되는 경향이 있으며 나아가 강도가 크게 저하된다. 따라서 자연상태의 화강풍화토가 포화되었을 때의 강도를 추정하는 것은 실제 설계시에 중요

한 지표가 된다. 실제로 화강풍화토를 성토재료로 이용할 경우 강도가 어떻게 저하되는가를 검토한다. 그림 10(a)는 광주 풍암 불교란 화강풍화토를 포화 및 불포화로 구분하여 직접 전단시험 결과를 $(\tau_f)_{unsat} - (\tau_f)_{sat} / (\tau_f)_{unsat}$ 과 수직응력의 관계로 나타낸 것이다. 여기서 $(\tau_f)_{unsat} - (\tau_f)_{sat} / (\tau_f)_{unsat}$ 은 강도저하비로 정의하며 $(\tau_f)_{sat}$ 는 포화상태의 peak강도, $(\tau_f)_{unsat}$ 는 불포화상태의 peak강도를 의미한다. 그리고 그림 10(b)은 포화에 의한 전단강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 수직응력 40kPa이하에서 강도의 감소가 급변하며 그 이후에는 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 전단시 dilatancy 영향, 포화에 의한 물의 운환작용, 입자 파쇄 활동의 증가 등으로 판단된다. 그림(b)에서 보인 바와 같이 포화화강토는 불포화 화강토에 비해 45° 경사를 기준으로 전단강도가 대략 12kPa 정도 감소하고 저압영역과 보통압에 관계없이 대략 하나의 식 $((\tau)_{sat} = 1.0(\tau_f)_{unsat} - 12.43)$, $((\tau)_{sat} = 0.94(\tau_f)_{unsat} - 10.79)$ 으로 직선화가 가능하는데 이는 불포화시 불교란 화강풍화토의 전단강도를 알면 포화시 전단강도를 추정할 수 있다는 의미로 이해된다. 다음은 교란 시료가 포화되었을 때의 경우를 살펴 본다. 풍화도와 포화도, 간극비가 다른 교란시킨 광주 풍암 시료를 불교란 화강풍화토의 함수비 및 건조단위중량과 동일하게 정적다짐을 실시한 후 전단정수의 변화관계를 고찰하기 위해 포화상태와 불포화상태로 나누어 시험을 실시하였다.

그림 11(a), (b)는 각각 광주풍암 시료를 불포화, 포화 다짐 화강토 전단강도의 차이를 보인 것이며 이를 다시 포화시와 불포화시의 좌표로 나타낸 것이 그림 10(b)이다. 그림 (a)에서 불포화 화강토가 포화되면 점착력은 34% 정도 감소한 반면에 내부마찰각은 15% 정도 감소하는 경향을 보였다. 이 그림 (b)에서는 포화 및 불포화 화강토는 하나의 직선 $((\tau)_{sat} = 0.80(\tau_f)_{unsat} - 1.69)$ 식으로 근사화시킬 수 있으며 점착력은 10~25kPa로 감소한다. 이와 같은 직선

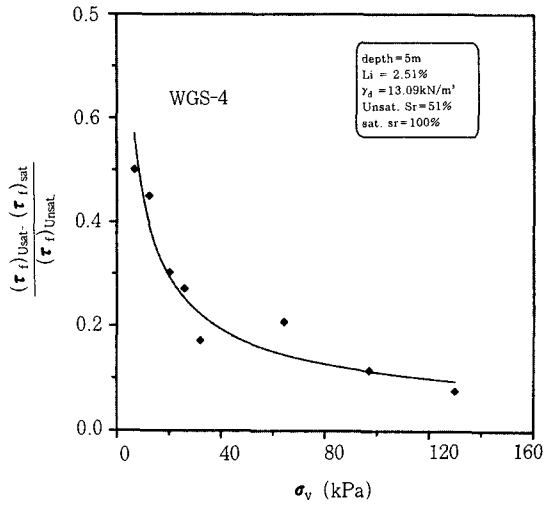


그림 10(a). WGS-4 불포화 화강풍화토의 수직응력에 따른 강도비

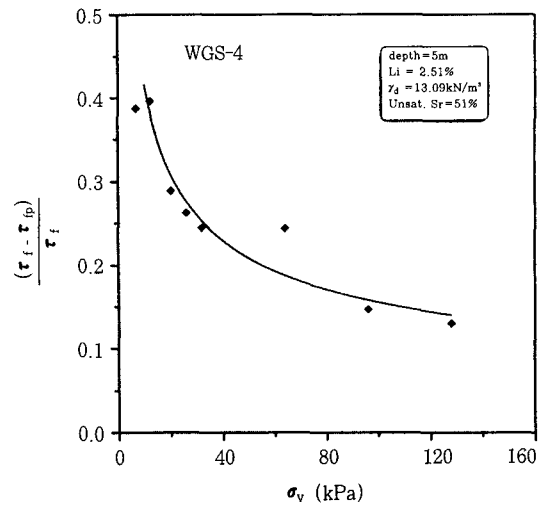


그림 11(a). WGS-4 불포화 및 포화 화강풍화토의 전단응력과 수직응력의 관계

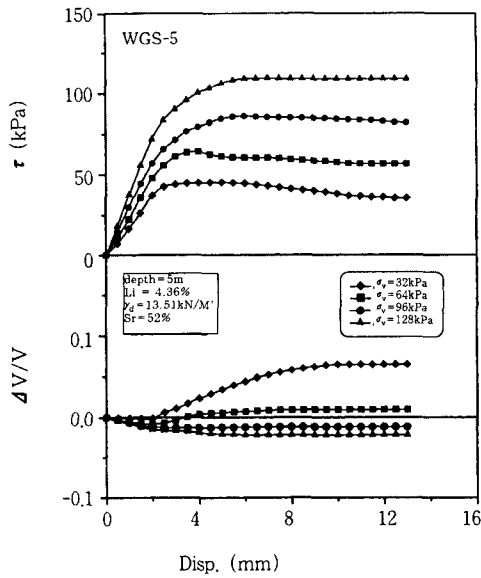


그림 10(b). WGS-4 불포화 및 포화 화강풍화토의 전단강도의 영향

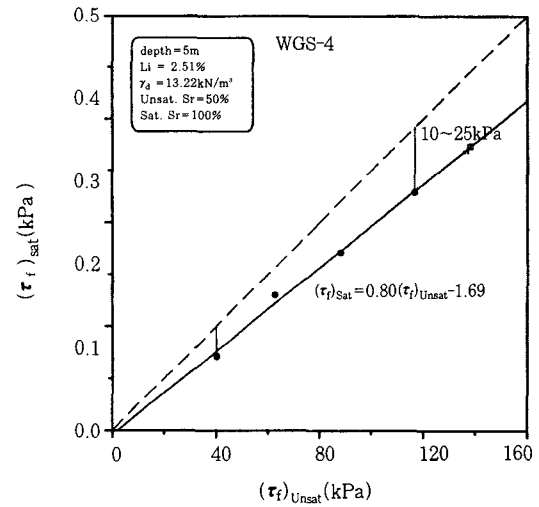


그림 11(b). WGS-4 다짐 화강풍화토의 포화에 따른 전단강도 변화

은 다른 화강토에서도 유사한 결과가 발견된다. 이처럼 화강풍화토가 포화가 되면 장석 내지 운모성분의 2차광물이 세립화되거나 전단시 입자자체의 결합력(Interlocking)이 감소한 것으로

판단된다.

4.5 화학적 풍화지수와 시험치 비교

그림 12는 Suoaka 분류법에 의한 화학적 풍화

지수와 제반 시험치를 상호 비교한 것이다. 그림에서 판단해 볼 때 화학적 풍화지수(CWI)가 21~31.26% 범위에 대응되고 풍화의 정도는 완전풍화로 분류되고 풍화 화강암단계를 지나 화강풍화토에 대응됨을 알 수 있다. 그리고 그림 13과 14는 각각 화학적 풍화지수와 내부마찰각 및 점착력을 비교한 것인데 내부마찰각은 포화 및 불포화 화강토에 관계없이 풍화의 정도(CWI)가 증가함에 따라 감소해가며 반면 점착력은 다소 분산되어 있지만 CWI의 25%까지는 감소하다가 그 이후에는 증가해 가는 경향을 엿볼 수 있어 전술한 표 3에 나타난 점착력의 변화와 유사한 결과를 나타낸다.

5. 결 론

본 연구는 풍화도가 다른 교란 및 불교란 화

| CWI(%) | 13~15 | 15~20 | 20~40 | 40~60 |
|------------|--------------------------------|--------|-------------------------|---------|
| 분류 | | II | IV | V |
| 풍화의 정도 | 신선암 | 약 풍화 | 중 풍화 | 이 정도 풍화 |
| 풍화 화강암의 분류 | 신선한 화강암 | 풍화 화강암 | 화강토 | 완전 풍화 |
| 물리·화학 시험 | SiO ² | | 강도 | 완전 풍화 |
| 강열 감량(%) | | | 점착도 | 완전 풍화 |
| 비중 (Gs) | | | 내부 마찰각 | 완전 풍화 |
| 직접 전단 | 점착력 (t/m ²) | | 내부 마찰각 (%) | 완전 풍화 |
| 현장 시험 | N치 | | 점착력 (t/m ²) | 완전 풍화 |
| | γ_1 (t/m ³) | | | 완전 풍화 |

그림 12. 화학적 풍화지수와 화강풍화토의 제성질 관계

강풍화토를 대상으로 실내시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 통상의 시험결과와 변형률을 고려한 결과를 비교할 때 점착력은 모두 위험측으로 평가

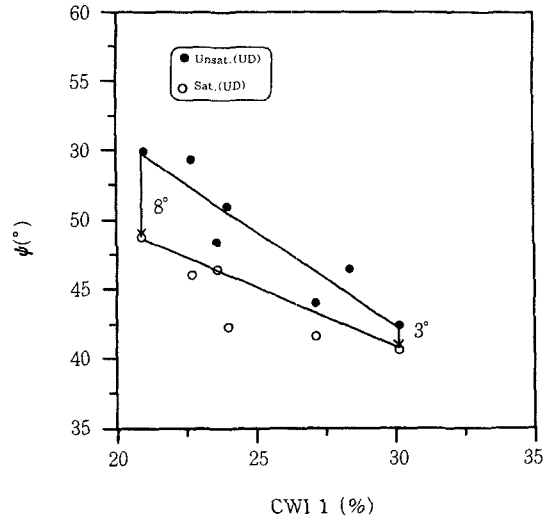


그림 13. 내부마찰각과 화학적 풍화지수의 관계

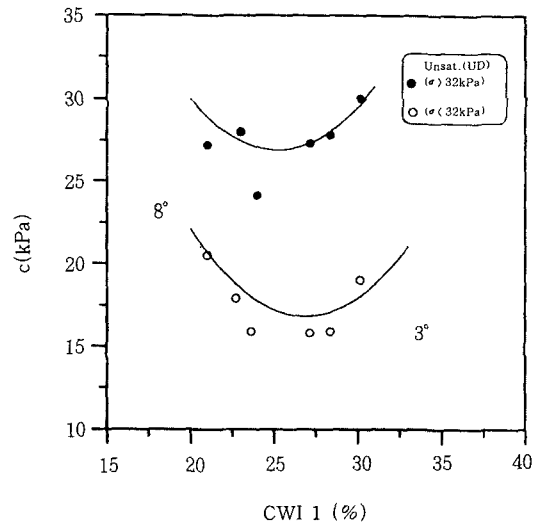


그림 14. 점착력과 화학적 풍화지수의 관계

되고 내부마찰각은 모두 안전측으로 평가되고 있다. 따라서 현행 통상의 평가방법은 적어도 점착력의 결정에 있어서는 사실상 위험측으로 평가하고 있다고 볼 수 있고 또한 동일한 위치

에서도 시료에 따라 얼마든지 달라질 수 있으므로 한 두 개의 시험결과만으로 판단하는 것은 문제가 있을 수 있다. 결론적으로 간편하면서도 실용성이 크기 때문에 많이 이용되는 직접전단시험을 대략 수직응력 $\sigma_v = 40\text{kPa}$ 이내에서 등간격 즉 $\sigma_v = 10, 20, 30\text{kPa}$ 정도 세분하여 전단시험을 시행하고 점착력을 결정하고, 수직응력 $\sigma_v > 40\text{kPa}$ 에서는 통상의 전단시험법을 이용하여 내부마찰각을 결정한다면 과대평가는 감소할 것으로 판단되었다.

2) 동일한 조건에서 불교란 시료와 교란시료(정적다짐)의 시험결과를 비교할 때 강도와 체적변화에서 차이를 보이는데 이는 입자파쇄에 의한 것으로 판단되며 특히 교란시료는 전단응력의 발현 경사나 dilatancy의 변화가 현저하게 달라지고 있음을 알 수 있었다. 또한 화강풍화토의 전단정수는 포화도에 따라 감소하는 경향이 있고 특히 포화된 시료는 구속압의 영향이 크지 않고 통상의 시험 방법이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

3) 교란 포화 및 불교란 불포화 화강풍화토는 모두가 수직응력이 작은 범위(대략 40kPa 이하)에서 dilatancy 보정치가 급격히 감소하고 수직응력이 증가함에 따라 그 변화가 둔감해지는 경향이 있는데 이는 dilatancy가 전단강도와 체적변화에 크게 영향을 미침을 알 수 있고 또한, 이는 전단시 포화에 의한 장석분의 세립화 내지 입자자체의 결합력이 감소한 것으로 판단된다.

4) 포화 및 불포화 불교란 화강풍화토 전단응력의 관계식은 직선 $(\tau)_{sat} = 1.0 (\tau)_{unsat} - 12.43$ 으로 근사화시킬 수 있었으며 다짐 화강풍화토에서도 이와 유사한 결과가 발견되었으며 또한 포화 및 불포화 불교란 화강풍화토의 내부마찰각은 화학적 풍화지수에 따라 감소한 경향이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 '95년도 한국과학재단 특정기초

(95-0600-02-01-3) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 당 재단에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 박병기(1973), "화강암질풍화토의 특성연구(II)", *대한토목학회지* 22권 3호, pp.83~96
2. 박병기, 이문수, 강권수, 양재혁(1996), "화강토의 전단특성", *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp.339~346
3. 박병기, 강병선, 이강일, 이광찬, 임은상, "화강토의 전단강도 및 변형특성", *한국지반공학회 논문집*, 제 13권, 제4호, pp.177~195
4. 박병기, 이진수, 이광찬, 문용(1998), "풍화도에 따른 화강토의 파쇄특성", *대한토목학회 논문집*, 제18권, 제III-2호, pp.227~240
5. 이광찬(1998), "풍화도에 따른 화강토의 토질공학적 특성", 전남대학교, 박사학위논문, pp.108~134
6. 박병기(1998), "풍화잔적토의 지반공학적 특성", *한국지반공학회 봄학술발표회 특별강연*, pp.32~64
7. 박병기, 이광찬(1999), "국내 화강풍화토 지반의 풍화도 평가방법", *한국지반공학회 논문집*, 제 15권 제1호, pp. 127~132
8. Dearman, W. R. and Infan, T. Y.(1978), "Engineering Classification and Properties of Weathered Granite", *Buletin of International Association Engineering Geology*, No. 17, pp. 79~90
9. Ito, T, Kujime, A and Sincho, S. (1990), "Classification of Decomposed Granite Soil and Engineering Properties", *Residual soils in Japan*, pp.63~66
10. Matsuo, S. and Nishida, K.(1968), "Physical and Chemical Properties of Decomposed Granite Soil Grains", *Soils and Foundations*, Vol. 8, No.4, pp.10~20
11. Miura, N. and Yamaouchi, T.(1975), "Effect of Water on the Behaviour of a Quartz-rich Sand under High Stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp.23~34
12. Miura, N. and O-hara, S.(1979), "Particle-crushing of a Decomposed Granite Soils under Shear Stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 19,

- No. 3, pp.1~14
13. Murata. H, Hyodo. M, Yasufuku. N.(1987),
"Compressive and Shear Characteristic of
Undisturbed Decomposed Granite Soils Paying
Attention to the Degrees of Weathering",
Proceedings of JSCE, No.382, III-7, pp.131~140
14. Onitsuka. K, Yoshitake.S., Nanri. M.(1985),
"Mechanical Properties and Strength Anisotropy
of Decomposed Granite Soils", *Soils and
Foundations*, Vol. 25, No. 2, pp.14~30
15. Residual Soils in Japan(1990). "Research
Committee on Physical and Properties of
Residual Soil Ground, Japanese Society of Soil
Mechanics and Foundation Engineering, pp.120~
127
16. Sueoka, T.(1988), "Identification and
Classification of Granite Residual Soils Using
Chemical Weathering Index" *Symposium on the
weathering residual soil*, pp.89~94
17. Sueoka, T.(1989), "The Relationship between
Shear Strength and Degree of Chemical
Weathering of Decomposed Granite Soils", *The
24th Japan National Conference on Soil
Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo,
Japan, Vol. 2, pp.257~258
18. Taylor. W.(1948). "Fundamentals of Soil
Mechanics", John Wiley & Sons, Inc. pp.341~
347

(접수일자 1999. 2. 10)