# 화강토의 전단강도 및 변형특성

A Characteristics of Shear Strength and
Deformation of Decomposed Granite Soil

박 병 기*1 강 병 선*2
Park, Byong-Kee Kang, Byong-Sun
이 강 일*3 이 광 찬*4
Lee, Kang-Ill Lee, Kwang-Chan
임 은 상*5
Im, Eun-Sang

## Abstract

Since decomposed granite soil shows various characteristics of shear behavior dependent on initial conditions such as weathering degree and grain breakage, it is nacessary to investigate stress-strain relationship and changes of shear characteristics for different initial conditions.

Associated with above-mentioned view, direct shear tests, and triaxial compression tests($\overline{CU}$, CD) were carried out in this study for undisturbed and disturbed compacted weathered granite samples obtained from 4 construction work sites with the various weathering degree and components of parent rocks. The deformation behavior of undisturbed samples under small confining stress shows hardening to softening, which is similar to that of overnsolidated clay whereas disturbed weathered granite soils do hardening-constant regardless of weathering degree, which is also similar to sedimentary clay. Conventional direct shear-tests for undisturbed samples show a tendency to overestimate cohesion. It is possible to approximate stress ratio($q/p'$) and volumetric increment ratio($dv/d\varepsilon$) in the triaxial compression tests by an equation, $dv/d\varepsilon=\alpha(M-\eta)$ irrespective of moisture content, weathering degree and disturbance.

## 요 지

화강토는 일반 퇴적토와는 달리 풍화도, 입자파쇄성등 시료의 초기상태에 따라 전단거동을 달

*1 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수
*2 정회원, 송원전문대학 토목과 부교수
*3 정회원, 대진대학교 토목공학과 전임강사
*4 정회원, 전남대학교 대학원 박사과정
*5 정회원, 전남대학교 대학원 석사과정

리하는 특성을 가지므로 각 경우에 대한 응력-변형률 관계를 밝히고 전단강도의 변화특성을 조사할 필요가 있다. 이와같은 관점에서 본 연구에서는 모암조성성분 및 풍화도를 달리하는 4개지역의 화강토를 채취하여 불교란 및 교란(정적다짐)상태에서 직접전단시험과 삼축압축시험($\overline{CU}$, CD)을 수행하였다. 이 결과 불교란화강토의 응력-변형률 거동은 구속압이 작을때는 과압밀점토의 응력경로거동처럼 경화에서 연화거동을, 교란화강토는 풍화도에 관계없이 퇴적점토와 같은 경화-일정거동을 나타내었다. 또한, 통상적인 직접전단시험에서 얻는 점착력은 특히, 불교란화강토에서 과대평가 되는 경향이 있으며 삼축압축시험에서의 응력비(q/p')와 체적변형률증분비($dv/d\varepsilon$)의 관계는 함수비, 풍화도, 구속압력, 교란에 관계없이 하나의 식($dv/d\varepsilon=\alpha(M-\eta)$으로 근사화 시킬 수 있었다.

Keywords : Undisturbed decomposed granite soil, Shear strength, Loss of ignition, Design value, Stress-strain curve

## 1. 서 론

화강토는 세계 여러 지역에 분포되어 있으며 우리나라에서도 흔하게 볼 수 있는 특수토의 일종이다. 국내에서는 박에 의해 1970년대 수년에 걸쳐 전남지방의 화강토를 중심으로 1차 및 2차광물의 추적과 그 심층풍화에 대하여 고찰한 바 있으며, 그 다짐특성이나 투수특성 그리고 전단특성에 대해 고찰한 바 있다. 1973년에는 임에 의해 서울 근교의 화강토에 대한 풍화, 지지력, 물과 전단강도의 변화에 대한 연구가 발표되었고, 1990년대에는 김, 이 등에 의해 구성식으로의 접근 연구가 행해진 바 있다. 우리나라의 화강토 연구는 지금까지 성토재료로서 많이 이용되어 왔기 때문에 교란시료의 화강토에 대해서는 꽤 연구가 진전되고 있으나 불교란 화강토에 대한 역학적특성이나 그 풍화에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 한편, 화강토지반을 구조물의 기초지반으로 이용하거나 절토사면의 강도를 평가할 때는 불교란상태의 강도정수가 요구되는데 특별한 경우를 제외하고는 통상 표준관입시험의 N값에 의존하는 경우가 대부분이다. 여러문헌에 의하면 화강토지반의 N치 측정은 매우 조잡한 결과를 보이고 상재하중이 제거 되었을 때의 그 신빙성에 대해서는 심사숙고가 필요하다고 보고되고 있다. 특히 대기에 노출된 경우의 강도변화는 심층에 있을 때의 강도와는 크게 달라지고 N값에 의존하는 것은 위험하다고 지적되고 있다. 이와 같은 경우는 전단시험을 통해서 강도정수를 결정해야 옳다. 그러나 화강토의 불교란 시료의 채취나 공시체의 제작은 매우 어렵고, 토립자가 불균질하고, 또한 풍화정도에 따라서 역학적 성질이 크게 달라지므로 불교란화강토의 전단특성의 연구는 부진한 상태에 놓여있다. 최근에는 집중호우때 사면붕괴를 일으키는 화강토지반이 눈에 띠게 증가되고 있으므로 불교란시료에 의한 전단강도의 추정은 매우 긴박한 상태에 놓여 있다고 보아진다. 이러한 관점에서 본 연구는 풍화도에 따른 불교란화강토와 교란화강토의 전단특성을 파악하고 이들 시료가 풍화도에 따라 전단강도가 어떻게 변화되어 가며 전단강도의 발현과정이 어떠한 mechanism에 의존하는가를 고찰하고자 한 기초연구이다.

## 2. 시 험

### 1) 시료채취 및 조제

#### (1) 불교란시료의 채취

지금까지 화강토의 불교란 시료채취는 채취지반을 동결시키거나 또는, 가능한한 교란의 영향을 받지 않도록 공시체를 처음에 큰 block

으로 잘라내는 방법 등이 사용되고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 화강토 시료의 채취방법과 성형(trimming)방법을 소개하면 표-1과 같다. 이 중 본 연구에 사용한 방법은 못을 박아 채취하는 방법(원통형 시료 채취)과 hand trimming법등을 이용한 것이다.

표 1. 불교란화강토의 채취방법

| Sampling법 | Trimming법 |
|---|---|
| 못을 박아 채취하는 방법 | hand trimming법 |
| block법 | tube법 |
| hand trimming법 | 동결법 |
| 관내압입법 | hand trimming법 |
| 불교란화강토채취기를 이용하는 방법 | hand trimming법 |

본 시험에 사용한 시료채취기는 35×35cm (전단, 압밀 시험용)와 15×15cm(삼축용)의 면적을 갖는 아크릴판에 7mm 정도의 못구멍(그림-1)을 내고 이 구멍을 통하여 못(16.5 cm)을 정적으로 관입 시킨후 이를 채취즉시 시료를 랩으로 감아 함수비의 변화를 방지한

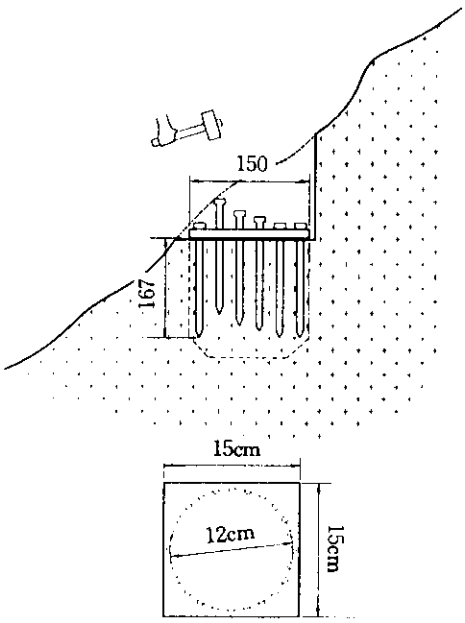



그림 1. 불교란화강토채취기(삼축시험용)

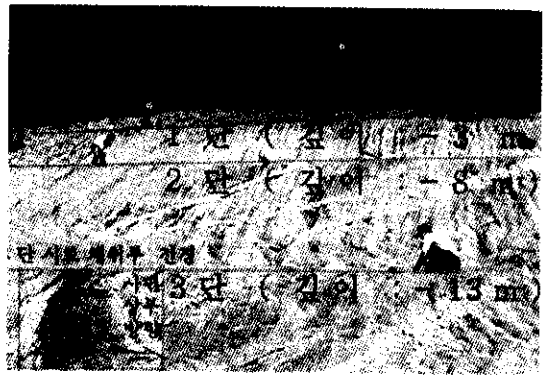


그림 2. 광주풍암 심층풍화대 불교란시료의 채취위치

후 실내로 반입하여 분할 사용하였다. 시료는 표-2에 보인 바와 같이 4개소에서 절토된 위치에서 채취하였으며 이 가운데 광주시료는 심층풍화대가 계단상으로 3단으로 절개된 곳(그림-2)에서 각각 채취한 것이다.

(2) 불교란시료의 조제

앞에서 언급한 대로 채취한 시료는 시험실에 반입하여 직경이 6cm이고 높이가 2cm인 소형 커터를 이용하여 시료상부에서 정적으로 압입한 후 커터 주변을 조심스레 잘라내고 직접전단시험용 시료를 성형한다. 또한 시험실에 반입된 불교란 삼축압축시험용 시료는 아크릴판 상단에 박힌 못을 조심스레 뺀다음 줄톱을 이용하여 공시체(φ50, h125mm)를 성형하였다. 그림-3은 불교란시료의 성형전 상태를 보인 것이다.

그림 3. 불교란화강토의 선형전 상태

(3) 다짐시료의 조제

다짐화강토는 시료의 동일성을 기하기 위해 #4체를 통과한 시료를 500g씩 자루에 넣고 2m 높이에서 30회 자연낙하시켜 초기처리한 후 불교란화강토의 현장함수비로 조제한 다음 일정 $\gamma_d$가 되도록 삼축압축용시료몰드($\phi$50, h125mm)에서 제작하였는데 다짐은 하바드식 spring tamper($\phi$50, spring 압력 18kg)로 정적 압축하는 방법을 사용하였으며, 직접전단시험용 공시체는 몰드에서 일정 $\gamma_d$가 되도록 다져 소정의 컷터를 정적으로 압입하여 제작하였다.

2) 시험내용

삼축압축시험은 영국 GDS삼축압축시험기(자동화 삼축시험기)를 사용하여 압밀비배수시험과 압밀배수시험을 실시하였다. 시료의 포화는 시료를 삼축실에 정착한 후 탄산가스를 서서히 15분간 주입하고 구속압력을 작용시킨 후 배압(back pressure)을 가하여 간극수압계수(B)가 0.95이상 도달하면 포화된 것으로 간주하여 60분 동안 등방압밀을 실시한 후 전단을 실시한다. 여기서 압밀시간의 예측은 예비시험결과 $t_{100}$이 약 15분정도 소요되기 때문에 압밀소요시간은 60분이면 충분한 것으로 판단하였다. 또한 압밀비배수시험의 압축변형률 속도는 0.5%/분으로 하고 압밀배수시험은 사전에 시험한 결과 간극수압이 감지되지 않는 범위에서 0.02%/분으로 하였으며 축압변형률이 16%에 도달할때까지 시험을 실시하였다. 본 시험기는 시료에서의 간극수의 출입이 계측되는 기능을 갖고 있어 시험중의 간극비나 함수비의 변화를 산정할 수 있다. 한편, 직접전단시

표 2. 불교란화강토의 물리적 성질

| 지역 | 심도(m) | Gs | $W_n$(%) | $\gamma_t$(kN/m³) | $e_o$ | Grain Size Distribution | | | | | Li(%) | 모암 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $D_{60}$ | $D_{30}$ | $D_{10}$ | #200 | $c_u$ | | |
| 광주풍암 | 3 | 2.68 | 17 | 15.7 | 1.01 | 0.78 | 0.25 | 0.022 | 4 | 35 | 4.79 | 편마암계 |
| | 8 | 2.66 | 15 | 16.9 | 0.80 | 0.83 | 0.24 | 0.022 | 5 | 38 | 2.29 | |
| | 13 | 2.66 | 10 | 17.2 | 0.68 | 0.88 | 0.22 | 0.022 | 3 | 40 | 1.89 | |
| 전북익산 | 5 | 2.66 | 20 | 16.0 | 0.98 | 0.70 | 0.14 | 0.026 | 20 | 27 | 4.36 | 화강암계 |
| 충남옥천 | 10 | 2.66 | 16 | 17.7 | 0.75 | 0.80 | 0.37 | 0.037 | 14 | 16 | 4.00 | 화강암계 |
| 강원횡성 | 5 | 2.67 | 23 | 18.7 | 0.74 | 0.94 | 0.60 | 0.095 | 8 | 10 | 2.70 | 화강암계 |

표 3. 지역별 화강토의 화학성분 분석결과

| 지역 | $Al_2O$ | $Fe_2O$ | MgO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | TiO | $P_2O$ | MnO | $SiO_2$ | CWI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 광주풍암(3m) | 19.63 | 5.33 | 1.59 | 1.77 | 1.17 | 2.98 | 0.61 | 0.07 | 0.08 | 61.98 | 30.16 |
| 광주풍암(8m) | 17.31 | 4.55 | 1.52 | 2.90 | 2.44 | 2.82 | 0.57 | 0.16 | 0.08 | 65.36 | 21.00 |
| 광주풍암(13m) | 19.95 | 6.20 | 1.99 | 2.63 | 2.19 | 2.86 | 0.74 | 0.10 | 0.11 | 61.34 | 22.70 |
| 전북익산 | 18.85 | 2.73 | 0.44 | 0.24 | 0.63 | 4.42 | 0.39 | 0.04 | 0.04 | 67.86 | 27.16 |
| 충남옥천 | 13.76 | 5.16 | 1.35 | 2.23 | 2.07 | 1.49 | 0.47 | 0.14 | 0.04 | 69.29 | 23.61 |

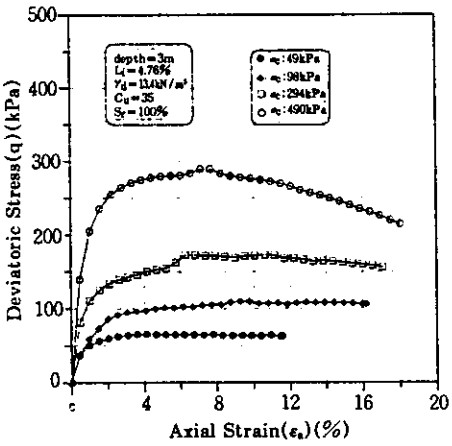
험은 일명 Bishop형 상부이동식 시험기(ELE 시험기)를 사용하고 전단속도는 0.5mm/분 으로 하였으며 수직하중은 최저 6kPa부터 단계별 재하를 실시하였다. 또한 풍화도 및 입자파쇄가 화강토의 전단거동에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위해 모든 공시체에 대해서 강열감량 및 시험 전, 후에 입도시험을 실시하였다. 본 시험에 사용된 불교란 화강토의 물리적 성질은 표-2와 같고 지역별 화강토의 화학성분 분석결과는 표-3과 같다.

## 3. 시험결과에 대한 고찰

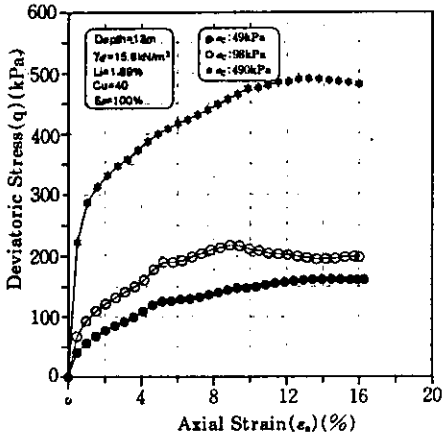
### 1) 삼축압축시험

#### (1) $\overline{CU}$ 시험

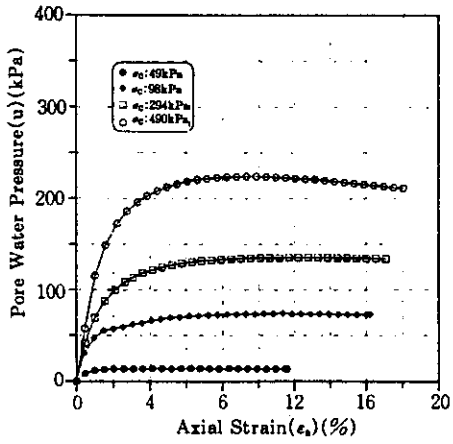
그림-4 (a)와 (b)는 광주풍암지구에서 채취한 심층풍화대의 동일장소에서 깊이가 다른 불교란화강토의 $\overline{CU}$시험 결과이다. 위치는 택지조성을 위해 계단식으로 절취하여 노출된 심층풍화대이나 미세하게 보면 각 위치마다 조암광물의 존재에 차이가 있어 결코 균질하지 않다. 원지표는 거의 완전 풍화되어 토양화되고 붉은색을 띠는 점성토이고 그 두께는 1~3m에 이른다. 화강토는 겉보기에 암석처럼 보이지만 (굴착직후) 손으로 만지면 부슬부슬 분해되고 흑운모 풍화물이 눈에 띤다. 그림-4 a)와 b)는 각각 원지표에서 3m절취된 지점과 13m절취된 깊이에서 채취한 불교란시료에 대한 것인데 전자가 후자보다 풍화가 더 진전된 것이다. 여기서 풍화도는 단순하게 강열감량(Li)의 크기로서 표현한다. Li와 풍화도 나아가 공학적 성질과의 상관성은 논란의 여지가 있으나 여기서는 동일풍화대이므로 단순하게 Li로만 상하를 비교한다. 통상 Li에 의한 풍화도는 Li<2.0%, 2%<Li<4%, Li>4%으로 나누어 각각 약풍화, 중풍화, 완전풍화로 구별한다. 대략, N값과의 대응은 N>50, N=20~50, N=2~20정도이다. 그림에서 (a-1), (b-1), (c-1), (d-1)는 응력-변형률 관계, (a-2), (b-2), (c-2), (d-2)등은 간극수압 발생을, (a-3), (b-3), (c-3), (d-3) 등은 유효응력경로를 나타낸 것으로 광주, 옥천, 익산화강토이다. 광주풍암 화강토는 거시적으로 동일한 풍화대의 같은 시료로 보이지만 미세하게는 차이가 많으며 $\gamma_d$, $e_0$에 차이가 있어 일련의 시험에서도 서로 조성에 차이가 있음을 어찌할 수 없었다. 시험결과, 공통적으로 강도의 발현은 구속압에 당연히 의존하지만 높은 구속압($\sigma_3$=294kPa이상)에서는 대략 $\varepsilon_a$=8~12%의 범위에서 peak를 갖는 변형률 경화-연화거동을 보이고, 구속압이 낮은 경우($\sigma_3$=98kpa이하)는 큰 경우에 비해 작은 $\varepsilon_a$에서 peak값이 출현한 후 일정한 값으로 진행되는 변형률 경화-일정거동(strain hardening-constant behavior)을 보인다. 이와 같은 경향은 강열감량이 큰(Li> 4%) 즉, 즉, 풍화가 크게 진전된 화강토에서 나타나고 있으며 광주풍암 화강토(-13m)에서와 같이 풍화가 덜 진전 되었다고 보는(Li=1.89%) 그림 (b-1)에서는 다른 것 보다 불명료하다. 한편, 그림 (a-3), (d-3)의 경우에서와 같이 구속압이 큰 경우의 유효응력 경로는 전형적인 정규압밀점토와 같이 간극수압이 크게 발달하여 만곡되어 가는 경로를 보인다. 그러나 모든 경우 구속압이 98kPa이하에서는 마치 과압밀점토처럼 간극수압 발생이 미미하여 직립 또는 역전의 경향을 보이고 있어 "화강토"라고 특별하게 통상의 퇴적점토의 거동과 본질적으로 차이는 없다고 볼 수 있다. 다만 10m이상의 깊이에서 채취된 시료는 그림 (b-3), (c-3)에서처럼 큰 구속압에서도 과압밀점토의 응력경로 거동과 같다. 그림에서 K$_f$선은 파괴가 이루어지고 더 이상 간극수압의 변화가 없는 점에서 p, q를 찾아 연결한 선이다. 대략 응력경로의 종점에 근접하고 있는데 그 경사를 M이라고 하였다. 여기서 유효응력 경로가 peak강도에 이르러 아래쪽으로 급격히 좌우방향으로 하강하는 현상이 보이는데 단순하게는 구속압이 작은 경우 평균주응력 p는 시험중에 감소하지 않고 증가하는 경향을 보이지만 구속압이 크면



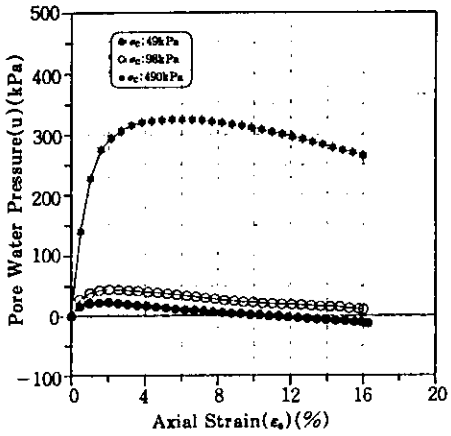

(a-1)



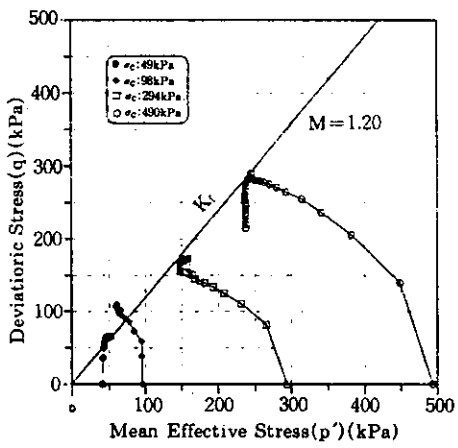

(b-1)




(a-2)

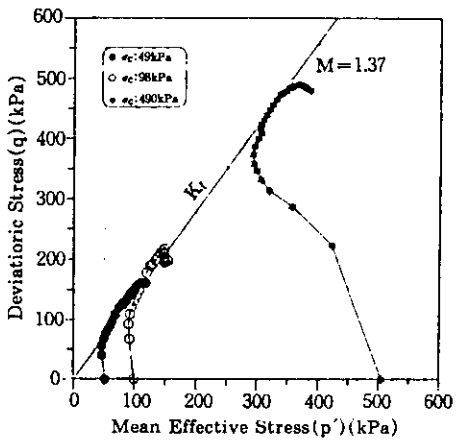



(b-2)



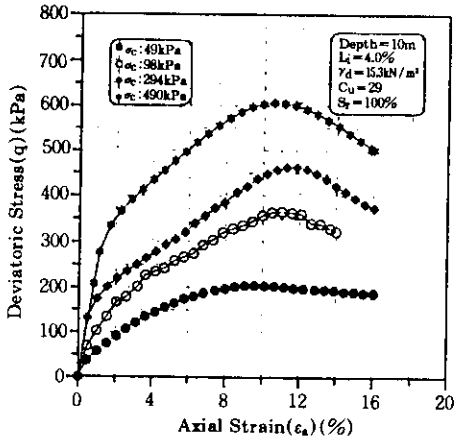

(a-3)

(a) 광주풍암(-3m)

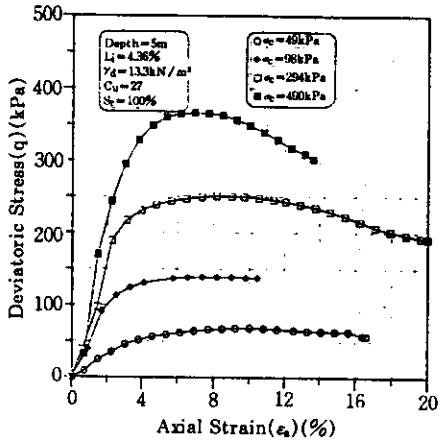



(b-3)

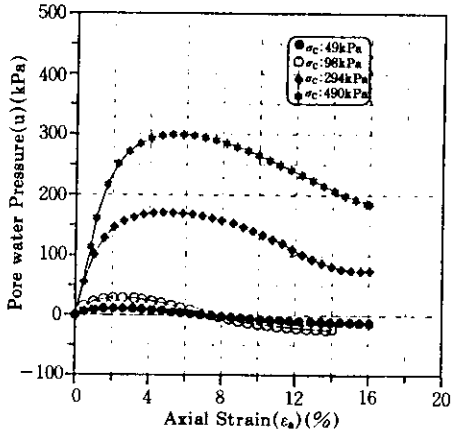
(b) 광주풍암(-13m)



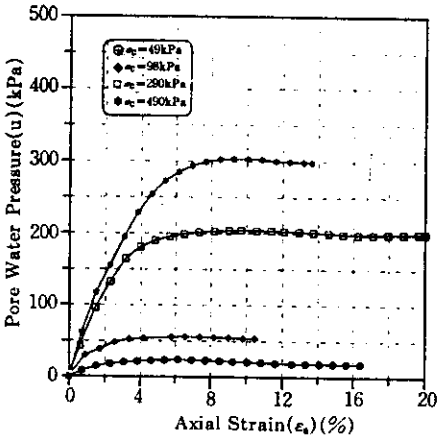

(c-1)



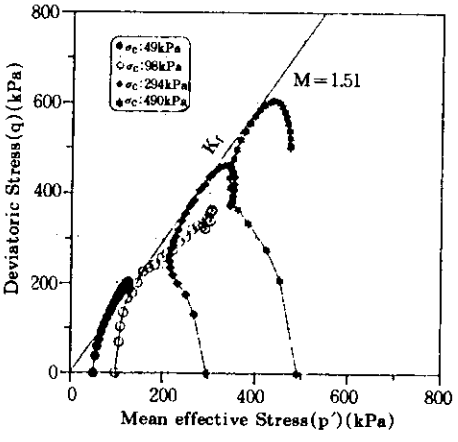

(d-1)




(c-2)

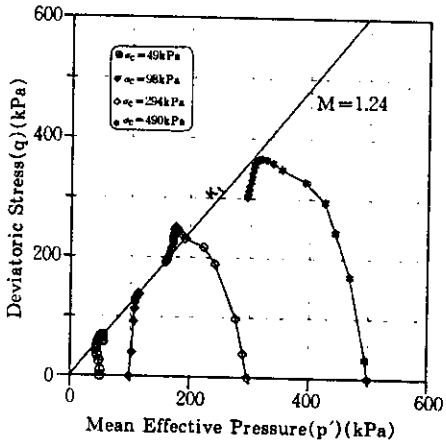



(d-2)




(c-3)

(c) 충남 옥천(-10m)




(d-3)

(d) 전북익산(-5m)

그림 4. 불교란 화강토의 축차응력, 간극수압 및 유효응력경로

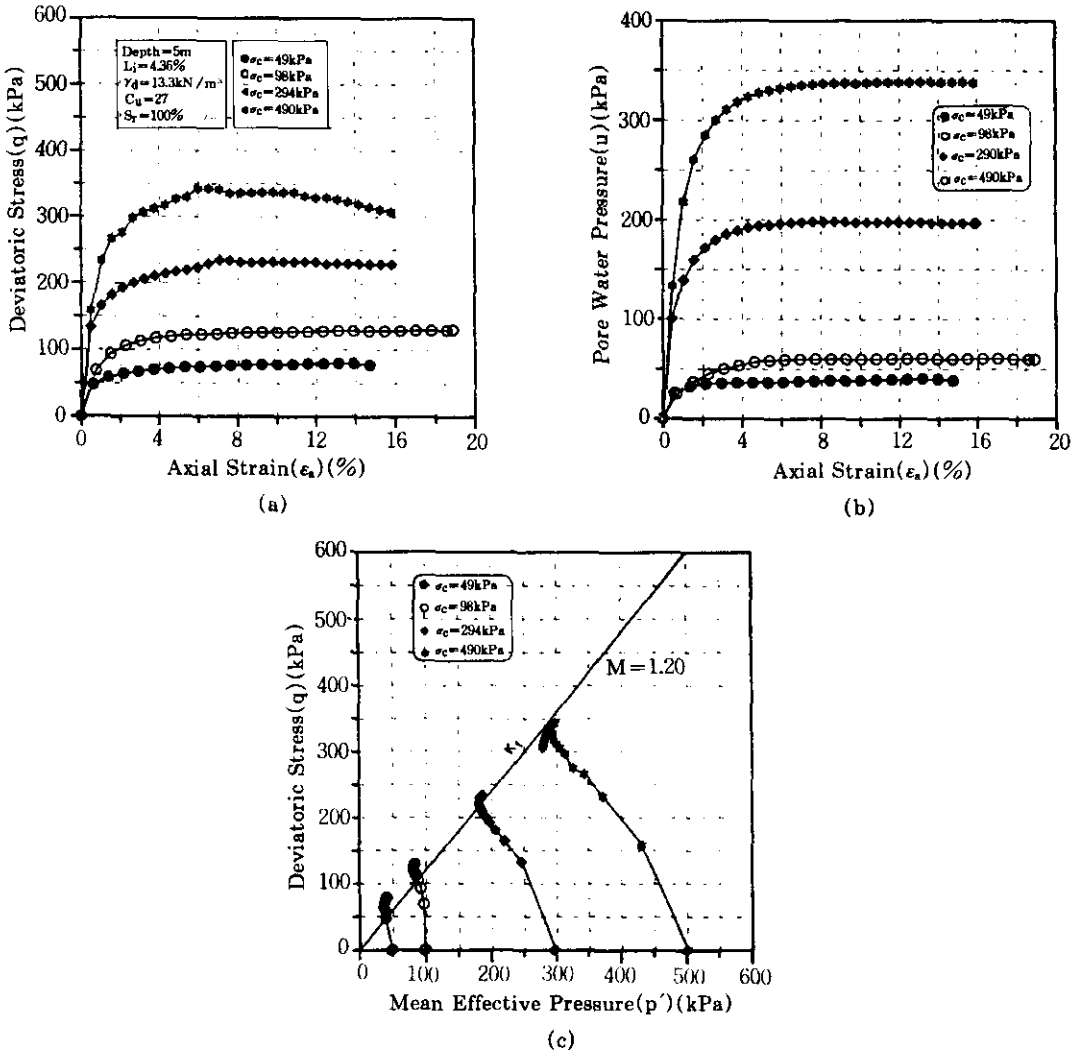



그림 5. 그림-4(d)와 동일한 $\gamma_d$로 다짐한 화강토의 축차응력, 간극수압 및 유효응력경로

전단초기에서부터 p가 서서히 감소되다가 그 이후에 증가해서 $K_f$에 접하여(그림 (b-3), (c-3))증가하다가 $K_f$에 이르러 급격히 아래로 굽는다. 한편(a-3), (d-3)는 구속압이 크면 p가 감소하다가 $K_f$선에 이르러 peak를 이루고 왼쪽으로 급격히 굽는다. q가 급격히 떨어지는 것은 파괴이후의 거동이지만 흥미로운 것은 그 방향이 깊은 곳에서 채취한 화강토(-10m이상)와 그 이외 화강토에서도 저압부에서 모두 우회전하고 있는 점이다. 이 점은 앞으로 더 연구가 필요하지만 과압밀토와 같은 거동을 하는 경로는 모두가 우회전 급강하하고(구속압이 작아도) 정규압밀점토와 같은 거동을 하는 경로는 좌회전 급강하를 나타낸다. p가 감소하다가 증가하는 변화거동은 다일러턴시(dilatancy)의 거동을 반영하는 것이므로 그림 (b-3), (c-3)의 응력 경로는 다일러턴시 현상이 활발이 이루어지고 있음을 보여주며 $\gamma_d$가 큰 것($\gamma_d \fallingdotseq 15kN/m^3$)과 작은 것($\gamma_d \fallingdotseq 13kN/m^3$)의 차이가 미묘하게 작용하는 것이 아닌가 추

정된다. 그림-5는 그림-4(d)의 전북익산 불교란화강토를 교란시켜 동일한 $\gamma_d$(14kN/m³)로 다져서 시험한 것으로 조건은 같다. 언급한 것처럼 불교란시료는 응력-변형률 관계가 큰 구속압에서 변형률 경화-연화거동이 나타나지만, 다짐시료는 peak이후 강도가 일정해지고 불교란 시료의 작은 구속압(98kPa)의 경우와 같다. 그리고 강도의 발현에는 큰 차이가 없다. 이는 다짐방법에 의존하지만 여러 가지 화강토에 대해 시험한 결과 현격한 차이는 보이지 않고 있다. 다만 응력경로는 다짐시료의 경우 과압밀토의 거동을 모든 경로에서 보이고 있고, 다일러턴시의 영향이 다짐을 통해서 더 이루어진 것으로 추측되나 그 양이 크지는 않다.

(2) CD 시험

화강토는 투수성이 크고 다일러턴시 거동이 큰 흙으로 알려져 있다. 화강토 자연사면의 파괴는 얕은상태에서 일어나고 거의 침투류상태 즉, 배수상태에서 이루어지리라는 견해도 많다. 이와 같은 현상에 근접하기 위해 CD 시험을 불교란시료와 다짐시료에 대해서 수행하였다. 그림-6은 강원도 횡성의 불교란화강토의 축차응력 및 체적변형률과 축변형률 관계를 대표적으로 선정하여 보인 것이다. 이 시료는 화강암계 화강토로서 중간정도 풍화도(Li=2.7%)이고 $\gamma_d$=15.3kN/m³이다.

시험기의 성능상 $\varepsilon_a$=16%이상의 시험이 수행되지 않아 아쉽지만 체적변형률은 $\sigma_3$가 저압일수록 수축에서 팽창하는 다일러턴시의 변화를 보인다. 대략 $\sigma_3$=49kPa(0.5kg/cm²)에서는 $\varepsilon_a$=10%정도에서 완전팽창 영역으로 진입하는 듯하며 $\sigma_3$가 크면 수축만이 크게 진행된다. 본 시료도 동일 위치이지만 그 광물조성에는 상당한 차이가 있다. 따라서 $\sigma_3$=98kPa의 시료는 다른 시료보다 강도가 작게 발현되고 있으나 체적변형율은 정상적인 것으로 보이며 이점은 화강토에 있어서 간극비의 구성이 매우 복잡한 mechanism을 갖고 있음을 보여준다. 그림-7은 이들의 유효응력경로이고 그림-8은 이를 규준화 한 것이다. 시료 차이에서 오는 오차를 감안한다면 이들 거동은 점성토의 CD시험 거동과 다를 바 없다.

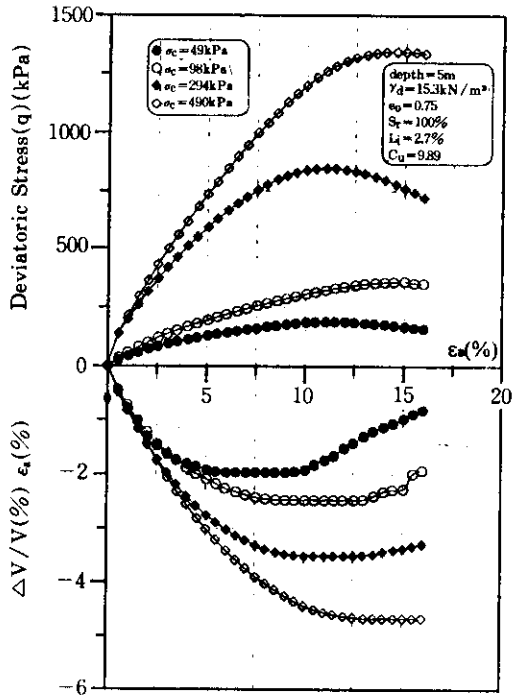



그림 6. 불교란 화강토의 축차응력－체적변형률－축변형률 관계

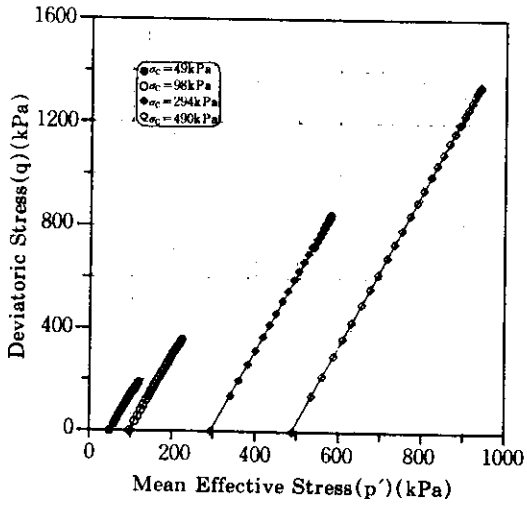



그림 7. 불교란 화강토의 유효응력경로

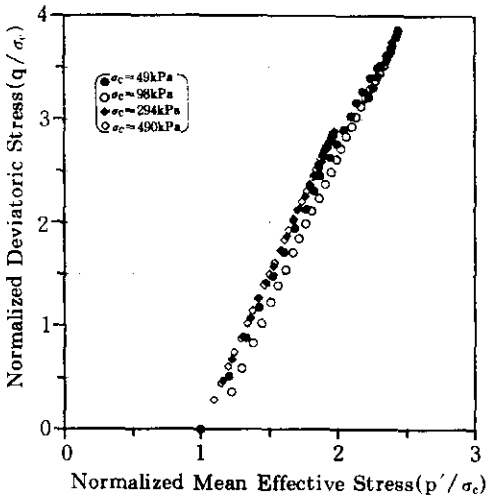



그림 8. 그림-7의 응력 규준화

그림 9는 그림 6의 결과를 응력비($\eta$=q/p)와 체적변형률증분비(dv/d$\varepsilon$)의 관계로 정리한 것이다. 아직은 연구가 진행중이지만 잠정적으로 이 그림에서 처럼 통상의 화강토는 이와 같이 거의 직선화가 가능하다고 보고 있으며, 이는 함수비, 풍화도, 구속압에 관계없이 대략 dv/d$\varepsilon$=$\alpha$(M-$\eta$)로 근사화 시킬수 있다고 하는 연구와 같다. 이 관계는 다진흙에서도 성립되며 그림-10은 광주풍암 다짐화강토의 예이다. 여기서 M는 dv/d$\varepsilon$=0 즉, 전단과정에서 체적변화율이 수축에서 팽창으로 반전되는 응력비이며 $\alpha$는 직선관계의 경사도이다. 아직은 더 많은 시험결과에 의해 자연상태 및 교란상태에서 특성차이를 규명해야 하지만 우리 화강토도 대략 외국의 경우와 비슷한 경향이 있음을 알 수 있다. 그림-11은 횡성화강토의 전단변형률에 대하여 규준화한 축차응력( q/$\sigma_3$)과 체적변형률($\Delta$V/V)를 나타낸다. $\sigma_3$=98kPa과 294kPa의 구속압을 받는 시료가 $\varepsilon_a$=8%까지 거의 겹쳐있다. 시료의 차이에서 오는 것이지만 체적변화는 일정한 관계를 유지하고 있다. 그림-12는 CD시험 과정에서 등방압축을 $\sigma_3$=49kPa, 98kPa, 196kPa, 294kPa까지 단계별 시행하여 배수량을 측정하고, 배수전단을 시행하여 이들의 간극비 또는 함수비를 계산하여 p′에 대해 정리한 것이다. 전단과정에서 평균주응력의 증가와 함수비 감소상태를 검은선으로 표시하였는데 강도가 peak에 이르고 이 점에서 다일러턴시에 의해 직선이 반전되고 있다. 등방압밀과 같은 mechanism으로 배수가 이루어진다면 그 연장선에 전단과정이 있고 경사가 거의 같으리라 보며 연장선에서 빗나가는 경우는 그 차이가 전단배수의 차이 즉, 다일러턴시의 크기를 말하는 것이 아닌가 보고 계속

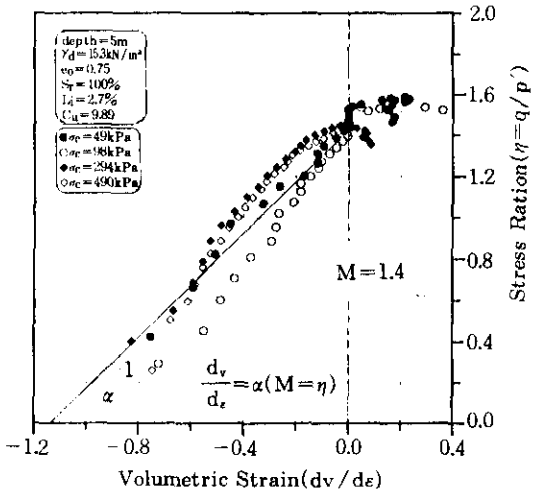



그림 9. 응력비와 체적변형률증분비와의 관계

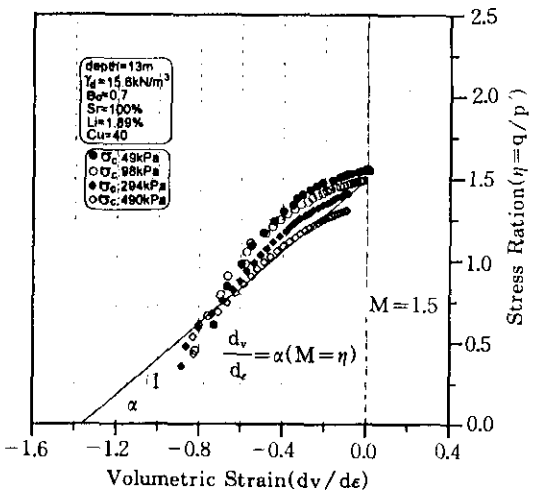



그림 10. 응력비와 체적변형률증분비와의 관계

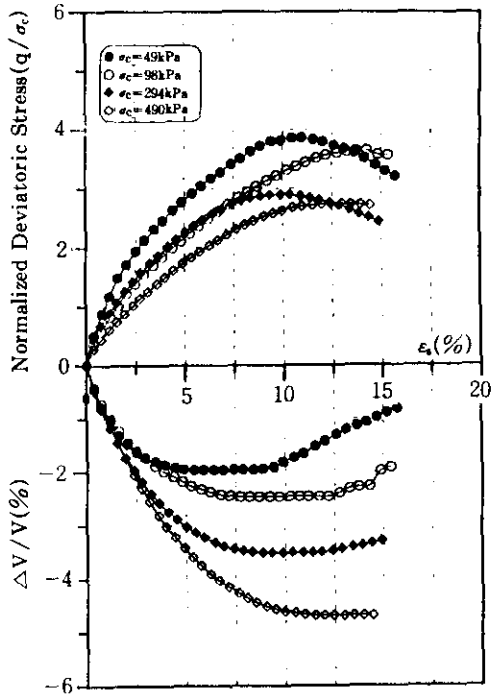



그림 11. 규준화된 축차응력－체적변형률 관계

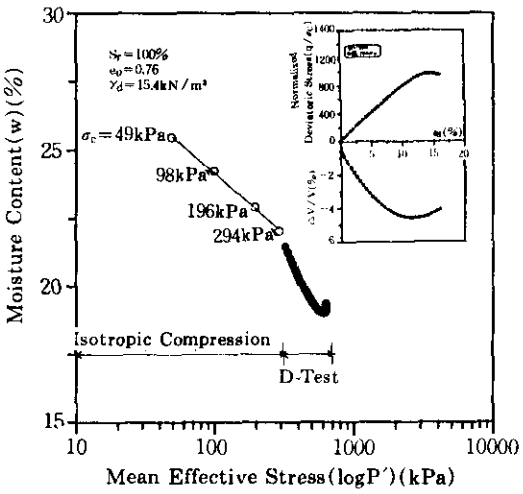



그림 12. 함수비 변화에 따른 다일러턴시의 관계

검토중에 있다. 이 점은 일본 화강토의 경향과 차이가 있다.

2) 직접전단시험

(1) 전단정수의 평가

화강토에 대해서 교란 및 불교란시료에 대해 삼축압축시험을 시행하는 것은 쉽지 않으며 특히, 불교란시료는 채취와 성형이 어렵고 성형시 실패하는 경우가 많다. 가장 손쉬운 방법은 시료가 작고 실패율이 적은 직접전단시험이다. 그러나 직접전단시험은 시험결과를 평가하는데 특히 화강토에서는 주의할 점이 있다.

그림13은 통상적인 직접전단시험에 수직하중($\sigma$)을 매우 작게 취한 경우의 광주풍암 불교란화강토에 대해 시험한 것이다.$\sigma$=40kPa(0.4kg/cm²)이하를 최대 4단계로 나누어 최소 $\sigma$=6kPa(0.06kg/cm²)부터 재하시켜 점착력 c의 변화를 조사한 것이다. 통상의 4단계(50, 100, 150, 200kPa)를 재하하여 직선으로 추정하는 경우에 비해 c값이 이들과 직선이 아닌 곡선으로 정해지는 것을 알 수 있다. 동일 풍화대의 깊이가 다른 풍암 화강토의 3종인데 c값이 그림에 기입된 것처럼 34～11kPa(0.34～0.11～kg/cm²)로 변하고 있다. $\varphi$값도 어느 c값을 통하느냐에 따라 달라진다. 따라서 현행의 직접전단시험 결과는 c에 대해서 과대 평가될 가능성이 있다. 그림-14는 직접전단시험의 전단응력과 수평변위 관계에서 수평변위가 재하단계별로 같은 점을 $\tau-\sigma$면에 도시한 것이다. 이 그림에서는 깊이가 -3m(그림-a), -13m(그림-b)에 대한 것만을 나타냈는데 어느 변위에서 c, $\varphi$값이 가장 크게 나타나는가를 살피기 위해 그 결과를 그림-15에 나타낸다. 그림에서 -3m깊이의 시료는 -13m보다 풍화가 더 진행된 것인데, -3m의 화강토는 6mm의 변위에서 최대의 $\varphi$를 가지며, c는 2mm의 변위에서 최대를 갖는다(30kPa). -13m에서는 $\varphi$의 최대치는 4mm의 변위에서, c의 최대치는 2mm의 변위에서 나타나며(20kPa), 같은 c끼리는 -3m의 풍화가 더 진전된 경우가 크고 $\varphi$는 역으로 되고 있다. 한편 통상의 직접전단시험에 의한 c, $\varphi$값을 기입하였는데 그림에서 -3m의 c는 맨

윗선 c=35kPa, $\varphi$는 맨 아랫선 tan$\varphi$=0.68로 평가되고 -13m의 경우는 c=30kPa, tan$\varphi$=1.17로 평가되고 있다. c는 -3m, -13m의 경우 모두 위험측으로 평가되고 $\varphi$는 모두 안전측으로 평가되고 있다. 같은 경우를 전북익산 화강토에 대해 정리한 것이 그림-16이다. 그림-16(a)는 $\sigma$<20kPa의 저압에서 그림-(b)는 $\sigma$>20kPa의 중간압력에서 시험한 결과를 똑같은 방식으로 등변위선을 $\tau-\sigma$면에 도시하여 얻은 결과를 나타낸 것으로 그림-14(a)의 ※도 같은 경우이다. 그림-16(a)는 그림-16(c)에서 ②시험에 의한 파괴선이고 그림(b)는 ①시험의 통상의 표준방법이다. 어느 경우나 모두 일단 안전권에 들고는 있지만 그림(b)의 c는 거의 안전율이 없고 $\varphi$도 큰 여유는 없다. 따라서 통상의 평가방법은 적어도 c값의 결정에 있어서는 사실상 위험측의 평가를 하고 있다고 볼 수 있다. 그렇다고 $\varphi$값이 충분히 안전한 것은 아니고 동일 위치에서도 시료에 따라 얼마든지 c, $\varphi$값이 달라져 한 두 개의 시험결과만으로 판단하는 것은 문제가 있음을 보여준다.

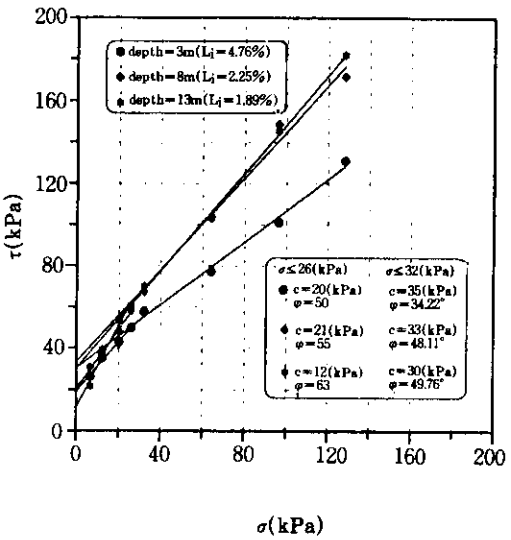
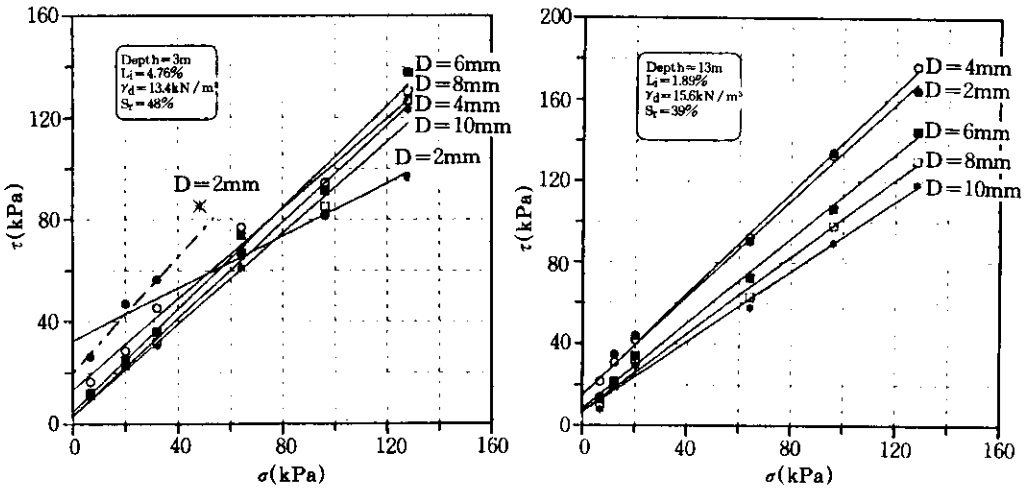



그림 13. 깊이별 불교란 화강토의 직접전단시험




(a) 깊이-3m (b) 깊이-13m

그림 14. 그림 13의 결과를 사용한 등변위별 $\tau$와 $\sigma$의 관계

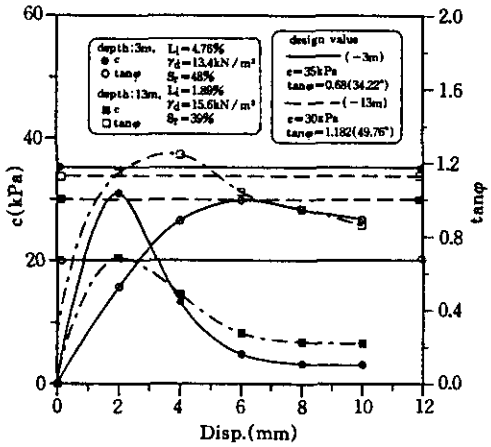
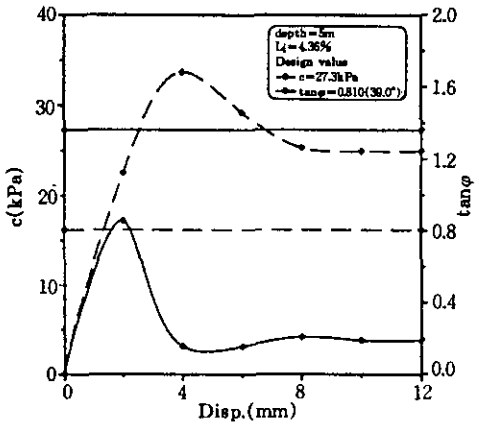
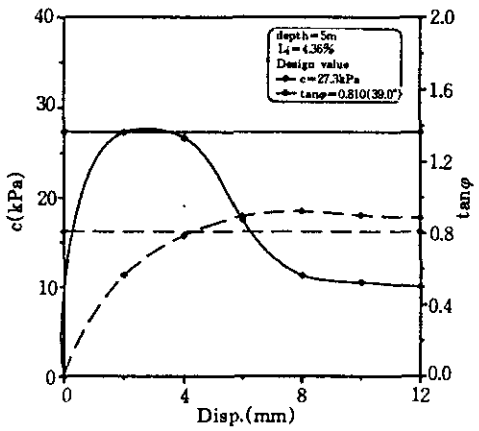


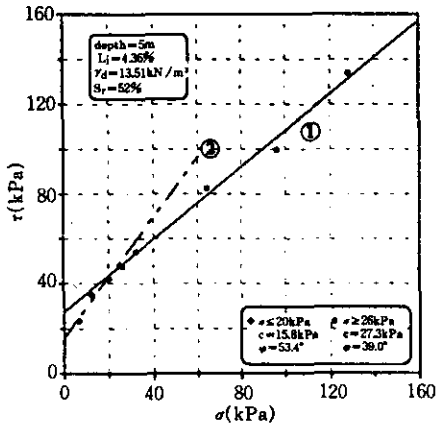

그림 15. 그림 14의 결과를 사용한 등변위에 대한 전단정수와의 관계




(a) 수직응력<20kPa시험




(b) 수직응력>20kPa시험



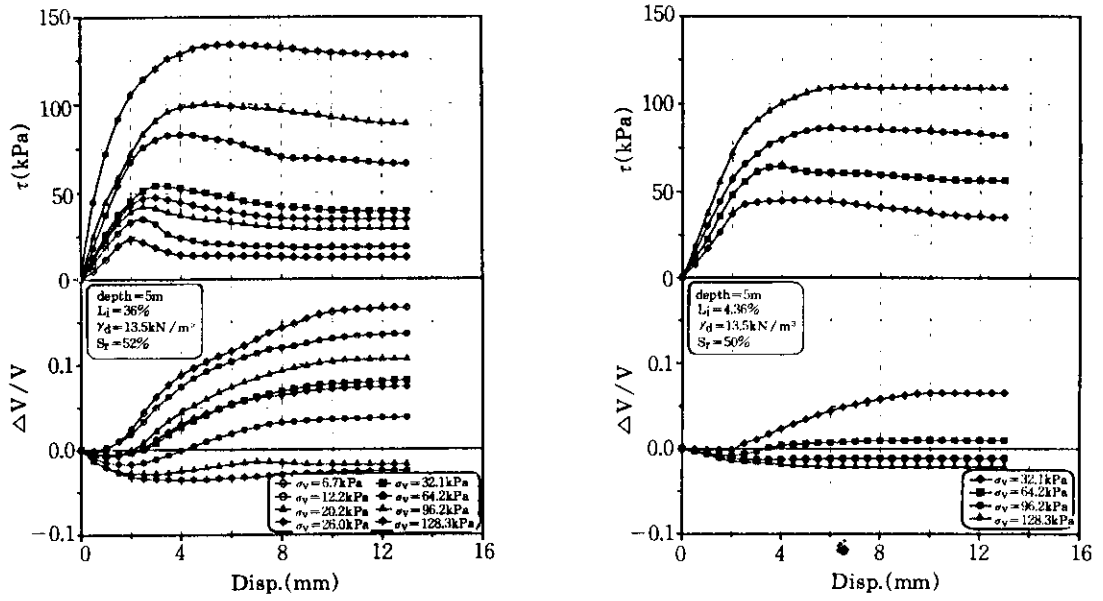

(c) 시험법의 차이

그림 16. 통상의 전단시험과 저구속압시험의 차이

(2) 강도-변형 관계

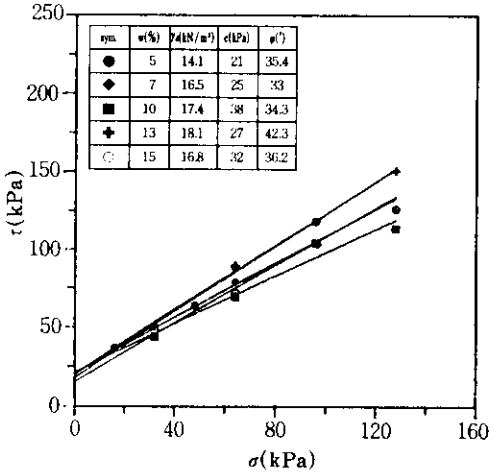
그림-16(c)의 익산 불교란시료의 전단응력 및 체적변형률와 수평변위 관계를 그림-17(a)에 나타낸다. 그리고 그림-17(b)는 같은 흙을 교란시켜 같은 $\gamma_d$(13.5kN/m³)로 다져서 시험한 결과를 보인다. 이들 시료는 $\gamma_d$가 비교적 작은 화강토인데(현재 본 실험실에 입수한 자연상태 화강토는 13.5~15.7kN/m³로서 외국에서 처럼 17kN/m³ 이상의 자연시료를 얻지 못하고 있다.) $\gamma_d$가 작은 불교란 시료는 같은 $\gamma_d$로 교란하여 재성형하여 시험하면 모든면(강도, ΔV/V)에서 약화되어 나타나지만 기본적으로 $\gamma_d$가 작은 불교란 시료도 전단응력과 수평변위 관계는 명확한 peak가 나타나지 않으며 교란 시료와 비슷한 경향을 보인다(그림-17(b)). 다만 교란시료는 체적변형율와 응력-변위곡선의 경사가 더 작게 나타난다. 반면에 그림-18(a)의 익산시료를 표준다짐하여 공시체를 만들어 시험한 결과는 다른 양상을 보인다. 이 가운데 OMC(13%)에 해당하는 다짐시료에 대해 그림-18(b)에 나타낸다. $\gamma_d$=18.1kN/m³이므로 $\tau$의 발현 경사나 다일러턴시의 변화가 현저하게 달라지고 있음을 알 수 있다. 이 화강토는 그림-18(a)에서와 같이 함수비의 변화에 따라 c값은 거의 변동이 없으나 $\varphi$의 변화가 나타나고 있다. 그러나 모든 화강토의 다짐결과가 꼭 이와 같지 않다는 것이 다른 지역(광주, 시흥)화강토에서도 확인되고 있다. 이는 당초의 모암 광물구성과 관계가 있을 것으로 추정된다.

한편, 현재 기초지반으로서의 공사가 진행중인 횡성화강토의 특성을 살펴본다. 5m 깊이로 굴착되고 현장 포화도가 84%(지하수위아래), $\gamma_d$=15.4kN/m³인 불교란 화강토의 직접전단시험결과를 그림-19(a), (b), (c)에 나타내고 이를 실험실에서 Sr=100%로 맞추어 시험한 결과를 그림-20(a), (b), (c)에 나타낸다. 구속압을 저압에서 통상의 압력범위까지 시험하였는데 전단응력 및 체적변형율와 수평변위 관계는 전형적인 변형률 경화-연화형태를 보여주고 있다. 이의 전단시험결과는 (b)인데 저압부($\sigma \leq$20kPa)와 고압부($\sigma \geq$26kPa)에서 평가되는

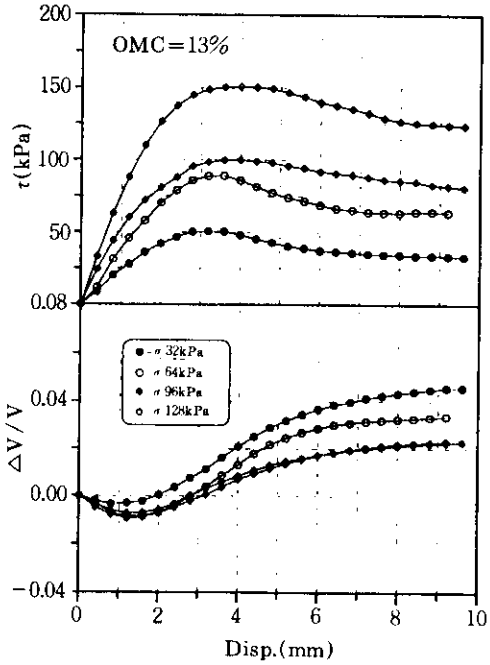



(a) 불교란 화강토 (b) 다짐화강토

그림 17. 익산 불교란화강토와 동일 $\gamma_d$로 다짐한 화강토에 대한 직접전단시험

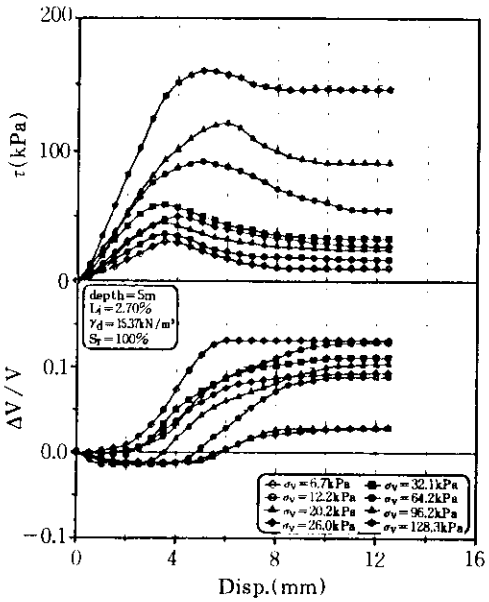



(a) 함수비별 $\tau$와 $\sigma$의 관계

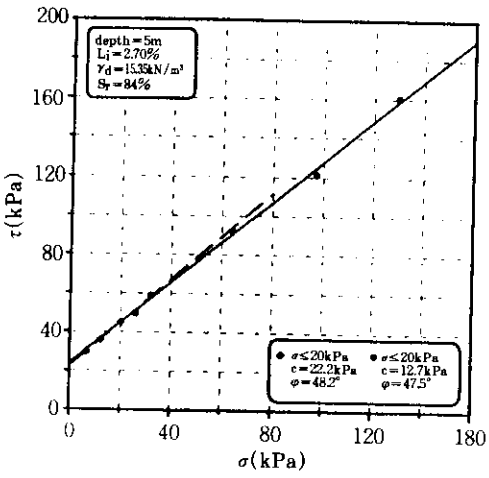



(b) $\tau-\Delta V/V-Disp.$의 관계

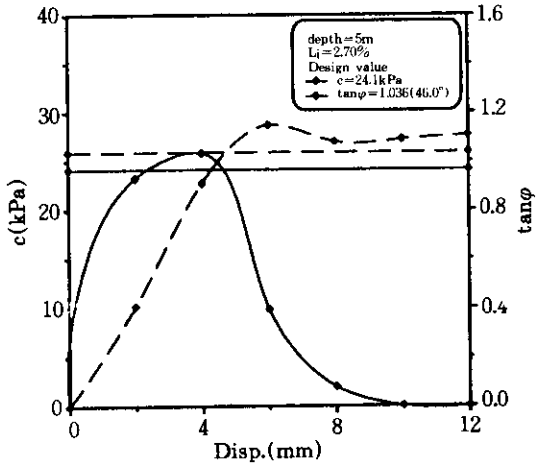
그림 18. 익산 화강토의 표준다짐시험을 통한 직접전단시험




(a) $\tau-\Delta V/V-Disp.$의 관계

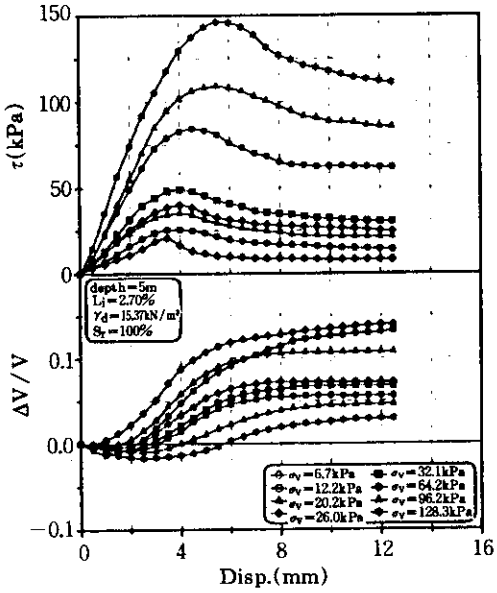



(b) $\sigma$와 $\tau$의 관계

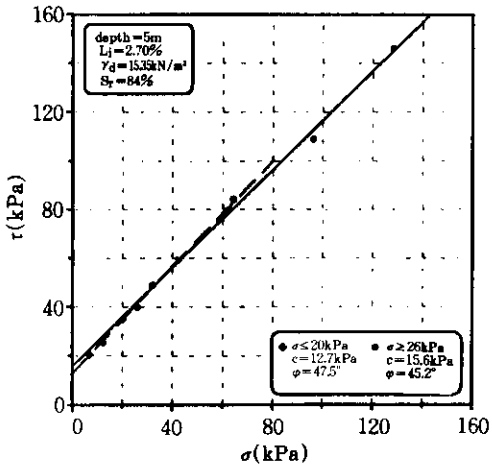



(c) 등변위와 전단정수의 관계

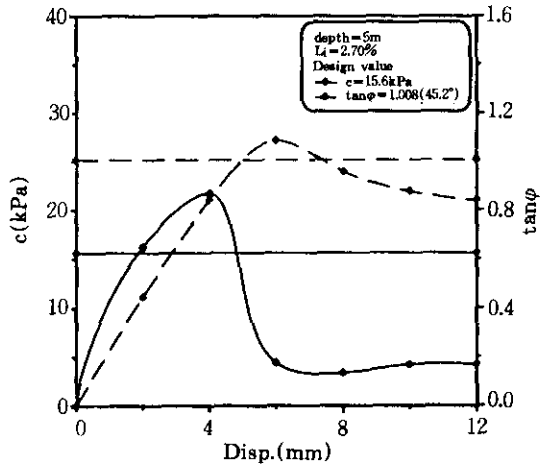
그림 19. 현장포화도 84%인 황성 불교란 화강토의 직접전단시험




(a) τ-ΔV/V-Disp.의 관계




(b) σ와 τ의 관계




(c) 등변위와 전단정수의 관계

그림 20. 포화도 100%인 홍성 불교란 화강토의 직접전단시험

c, $\varphi$값에 큰 차이는 없다. 그림-(c)에는 언급한 바와 같이 등변위선을 연결하여 c, $\varphi$의 최대치 발현과정과 통상의 설계 c, $\varphi$값을 대비시킨 것이다. 통상의 $\varphi$값은 거의 여유가 없음을 알 수 있다. 이 지반은 장차 100% 포화될 것이므로 시료를 수중에서(Sr=100%)전단시킨 결과는 그림-20이다. 강도가 그림-19(a)에 비해 전반적으로 낮아지고 있으나 체적변형율에는 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 이 경우의 직접전단시험결과(그림-20(b))는 큰 변화가 없으며 거의 같은 정도이다. 포화도가 매우 큰 화강토는 불포화 화강토에 비해 구속압의 영향이 크지 않으며 통상의 시험 방법이 적용된다는 것을 의미한다. 그러나 이 경우의 안전여유는 그림-20(c)에서 보는 바와 같이 발현강도에 접근하고 있어 전단정수의 선택에 여유가 없음을 보여주고 있다. 통상 이와 같이 포화가 예상될 경우 이들 설계값은 측정값의 2/3를 취하는 방식이 있는데 이와 같은 상황을 고려한 것으로 보인다.

## 4. 결 론

풍화도를 달리하는 우리나라 여러지역의 불교란화강토 및 다짐화강토에 대한 일련의 전단시험을 실시하고 전단특성을 조사한 결과 다음과 같이 요약할 수 있을 것 같다.

1) $\overline{CU}$시험의 높은 구속압에서 불교란화강토의 응력-변형률 거동은 변형률 경화-연화거동을 보이며 특히, 풍화도가 클수록 더 명료하다. 반면에 낮은 구속압상태 및 다짐화강토의 응력-변형률 관계는 퇴적토와 같이 경화-일정 거동을 나타낸다.
2) $\overline{CU}$시험에서 구속압이 큰 경우의 유효응력경로는 전형적인 정규압밀점토와 같이 간극수압이 크게 발생하여 만곡되어 가는 경로특성을 보이나 구속압력이 낮은 경우에는 간극수압발생이 미미하며 과압밀 점토의 특성을 나타낸다. 반면에 풍화가 덜 진전된 것으로 판단되는 심층의 화강토는 구속압에 관계없이 과압밀토와 같은 거동을 나타낸다. 또한, 다짐화강토의 경우 응력경로는 모든 경우에서 과압밀토와 같은 거동을 나타낸다.
3) 불교란시료에 대한 CD시험에서 구속압이 낮은 경우에는 다일러턴시의 변화를 보이며 구속압이 큰 경우에는 전단과정중에 수축만이 크게 진행된다. 또한 함수비,

풍화도, 구속압에 관계없이 체적변형률증분비과 응력비의 관계는 대략적으로 $dv/d\varepsilon=\alpha(M-\eta)$으로 근사화시킬 수 있다. 한편, 전단과정에서 평균주응력의 증가와 더불어 함수비가 감소되면서 파괴에 이르는데 측정오차를 감안한다면 전단중의 입자파쇄 및 다일러턴시로 추정되는 영향으로 평균주응력의 증가율은 감소하고 함수비는 증가하는 것으로 나타난다(그림-12). 이 점은 더 많은 시험결과에 의해 검토되어야 할 것으로 본다.

4) 직접전단시험에서의 전단정수는 수직응력의 저압부와 고압부로 구분되어 평가해야 하며 특히, 저압부의 파괴선에 의한 점착력은 통상의 시험에서 얻은 점착력의 1/2정도까지 저하되어 현행의 전단정수 결정법은 과대평가될 가능성이 있다. 특히, 풍화가 크게 진전된 화강토에서는 주의를 요한다.

5) 직접전단시험에서 불교란화강토와 다짐화강토의 전단정수는 전단변위에 따라 큰 변화가 있음을 알 수 있는데 변형률을 고려하지 않고 결정한 전단정수와 비교할 때 점착력은 과대평가 되고 내부마찰각은 미미하기는 하지만 과소평가 되는 경향이 있다.

6) 건조단위중량이 작은 불교란시료의 경우, 구속압의 크기에 따라 응력-변형률관계는 저압부에서는 과압밀거동, 큰구속압에서는 정규압밀거동을 보이고 다짐화강토는 과압밀거동을 보인다($\overline{CU}$ -test). 또한, 표준다짐시료는 함수비의 변화에 따라 대체적으로 점착력의 변화는 거의 없고 내부마찰각은 크게 변화하는데 이는 모암의 구성성분에 관계가 있을 것으로 추정되며 그렇지 않는 경우도 확인된다(직접전단시험).

## 감사의 글

본 연구는 '95년도 한국과학재단의 특정기초과제(95-0600-02-3)연구비지원에 의해 수행되었으며당 재단에 깊은 감사를 드립니다. 또한 시료채취와 시험을 허락해 주신 한국도로공사 및 금호, 라인 건설에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박병기, "화강암질풍화토의 특성연구(Ⅰ)", 대한토목학회지 21권 4호, 1973
2. 임병조, "물이 화강토의 공학적성질에 미치는 영향(특히 전단특성의 변화에 대하여)", 대한토목학회지 22권 2호, 1974
3. 김용진, "구성방정식을 이용한 다짐화강토의 공학적특성", 고려대학교 박사학위논문, 1993
4. 박병기, 이문수, 강권수, 양재혁, "화강토의 전단특성", 대한토목학회 학술발표회 논문집(Ⅲ), pp 339~346, 1996
5. Bishop and Henkel, "The Measurement of Soil Properties in the triaxial test(2nd edition)", Edward Arnold, 1962
6. Lee In-Keun, "Mechanical Behavior of Compacted Decomposed Granite Soil", Civil University Civil Engineering Department, Phd, 1991
7. Matsuo, S. and Nishida, K., "Physical and Chemical Properties of Decomposed Granite Soil Grains", Soils and Foundations, Vol. 8, No.4, pp10~20, 1968
8. Matsuo. S, Fukuda. M, Nishida. K., "Consistency of Decomposed Granite Soils and its Relation to Engineering Properties", Soils and Foundations, Vol. 10, No. 4, pp.1-9, 1970
9. Murata. H, Hyodo. M, Yasufuku. N.,"Compressive and Shear Characteristic of Undisturbed Decomposed Granite Soils Paying Attention to the Degrees of Weathering", Proceedings of JSCE, No.382, Ⅲ-7, pp131-140, 1987
10. Murata. H, Hyodo. M, Yasufuku. N.,"Yield Characteristic of Dense Sand Under Low and High Pressure", Proceedings of JSCE,

No.382, Ⅲ-7, pp131-140, 1987
11. Onitsuka. K, Yoshitake.S., Nanri, M. "Mechanical Properties and Strength Anisotropy of Decomposed Granite Soils", Soils and Foundations, Vol. 25, No. 2, pp.14-30, 1985
12. Onitsuka, K, and S, Yoshitake, "Consideration on the Variation of Strength Parameters, c, $\varphi$ with Shear Displacement", Proceedings of JSCE, No.382, Ⅲ-7, pp. 265-268, 1987
(접수일자 1997. 5. 20)