

배수전단시험을 이용한 화강토의 다일레이턴시 특성 고찰

Dilatancy Characteristics of Decomposed Granite Soils in Drained Shear Tests

강진태* · 김종렬** · 김승곤*** · 박화정****

Kang, Jin-Tae · Kim, Jong Ryeol · Kim, Seung-Gon · Park, Hwa-Jung

Abstract

Disturbed and undisturbed decomposed granite soils with different weathering degrees were extracted and analyzed through a series of tests (CD test, constant P test, etc.) to assess their dilatancy characteristics. Here, dilatancy refers to the volume change that takes place during shearing. As a result, the decomposed granite soil dilatancy impact increased the mean effective stress while concurrently lowering the water content in drained shear tests. In the case of undisturbed decomposed granite soil, which has a lower weathering degree, the water content increased at specific limits during the shearing process. A linear relationship of $\Delta V_d/V_1 = D \cdot ((\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c) / \sigma'_m$ forms between shearing-induced volume change and principal stress variance.

Keywords : decomposed granite soil, dilatancy, weathering degree, dilatancy index(d index), constant P test

요 지

풍화도가 다른 교란 및 불교란 화강토를 채취하고 일련의 실내시험(압밀배수시험, 평균주응력일정시험 등)을 실시하여 전단 중 발생하는 체적변화인 다일레이턴시(dilatancy) 특성을 분석하였다. 그 결과, 화강토의 다일레이턴시 영향으로 배수전단 시험에서 평균주응력의 증가와 더불어 함수비는 감소하고, 풍화도가 낮은 경우의 불교란 화강토는 전단과정 중 어느 일정계에서는 함수비의 증가를 보였다. 전단에 의한 체적변화량과 주응력차의 관계에서 $\Delta V_d/V_1 = D \cdot ((\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c) / \sigma'_m$ 의 직선관계가 성립된다.

핵심용어 : 화강토, Dilatancy, 풍화도, D계수, 평균주응력일정시험

1. 서 론

화강토는 화강암질계 풍화잔적토(Decomposed Granite Soil)를 이르는 용어로서 화강암질계 암석이 풍화작용에 의해 토양화되어 그 장소에 잔류해 있는 흙을 말하며, 우리나라뿐만 아니라 세계 여러 지역에서 흔히 볼 수 있는 흙이다.

화강토는 암석의 풍화 산물이라는 점에서 모암의 조성성분이 반영되는데, 풍화의 정도에 따라 1차 광물(석영, 장석, 운모)과 2차 광물(Illite, Kaolinite, Holloysite, Gypsite, Sericite, Vermiculite 등)의 구성비가 차이를 보이기 때문에 일반 흙과는 다른 공학적인 특성을 나타내며, 풍화의 정도에 따라 나타내는 특성들이 다르기 때문에 한마디로 정의하기에는 어려움이 있다. 이와 같이 풍화의 정도에 따라 공학적 특성이 다르게 나타나는 특징과 더불어 외력에 의해 쉽게 부서러지는 파쇄성이 탁월하다는 특징이 있다. 대부분의 화강토는 SM, SC로 분류되고 거정질의 입자로 구성되어 있어 그 역학적 거동이 사질토와 점토의 중간정도의 성격을 띠고 있으며, 특히 전

단시 다일레이턴시(dilatancy) 현상이 탁월한 흙이다.

위에서 언급한 바와 같이 화강토는 입자가 거정질이고 외력에 의해 쉽게 파쇄되기 때문에 불교란 시료의 채취 및 실험에 어려움이 따라 그동안 교란된 시료(다짐 화강토)의 역학적인 거동에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다(박병기, 1974; 이형수, 1984; 주승완 등, 2004). 따라서 본 연구에서는 화강토의 불교란 시료의 역학적인 거동, 특히 화강토와 같은 거정질 입자의 흙에서 전단시 탁월하게 나타나는 입자간의 맞물림(interlocking) 영향에 의한 체적의 변화(압축 및 팽창), 즉 다일레이턴시 효과의 특성을 풍화도가 다른 교란 및 불교란 시료를 채취하여 배수전단시험을 통하여 그 특성을 분석하였다.

2. 다일레이턴시의 정량적 해석

다일레이턴시란 흙과 같은 입상체가 전단과정 중에 일으키는 체적변화를 의미한다. 어느 일정 응력하에서 흙의 체적변

*정회원 · 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : jelo@chol.com)

**정회원 · 교신저자 · 전남대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : jrkim@jnu.ac.kr)

***전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : cool-turbo@hanmail.net)

****정회원 · 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · 남양건설(주) 이사 (E-mail : hpark1401@hanmail.net)

화가 발생하기 위해서는 이에 상응하는 에너지를 필요로 한다. 그러므로 전단시 전단에너지의 일부가 다일레이턴시를 일으키는데 소모된다. 그러므로 흙의 전단강도를 결정할 때 다일레이턴시 효과가 개입되지 않은 값을 구할 필요가 있다. 이와 같은 이유에서 많은 학자들이 그 성질을 규명하고, 다일레이턴시를 정량적으로 표현하기 위하여 많은 노력들을 해왔다(Taylor, 1948; Skempton, 1960; Rowe, 1963; Scott, 1963). 그 결과로 현재 다일레이턴시를 정량적으로 측정하기 위해 사용되어지고 있는 것이 dilatancy index(D계수)이다.

2.1 Taylor의 다일레이턴시 표현

Taylor(1948)는 삼축압축시험을 실시하여 그림 1과 같이 축변형률(ϵ)에 대한 축차응력($(\sigma_1 - \sigma_3)_f$) 및 체적변형률($\Delta V/V$)과의 관계를 도시하였다. 여기서 시료가 팽창하기 위하여 행한 일을 $\sigma_3 \cdot d(\Delta V/V)$, 흙의 점착저항과 마찰저항을 유발하는데 필요한 축차응력의 부분을 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 라 하면, 축변형($d\epsilon$) 사이에 출입된 일의 평형에 의해서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f - \sigma_3 \cdot \frac{d(\Delta V/V)}{d\epsilon} \quad (1)$$

여기서, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$ 및 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 는 각각 다일레이턴시 효과를 제거한 축차응력과 측정된 최대축차응력이며, $(d(\Delta V/V))/d\epsilon$ 는 다일레이턴시를 정량적으로 표시한 지수로서 D계수이다.

그러므로 σ_3 와 $\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$ 값을 사용하여 Mohr 원을 작도하고, 이때 구해진 점착력(c_d)과 내부마찰각(ϕ_d)을 이용하여 다일레이턴시 효과의 보정이 가능하다고 하였다.

2.2 Skempton 및 Scott의 다일레이턴시 표현

Skempton(1960)은 자신의 논문에서 체적변화는 평균주응력의 변화에 의한 것과 전단응력의 변화에 의한 다일레이턴시로 이루어진다고 보고 식 (2)를 제안하였다.

$$\frac{dV}{V} = C_c \cdot \Delta\sigma_m + 3D \cdot \Delta\tau \quad (2)$$

여기서, C_c 는 압축지수, D 는 D계수(dilatancy index)이다.

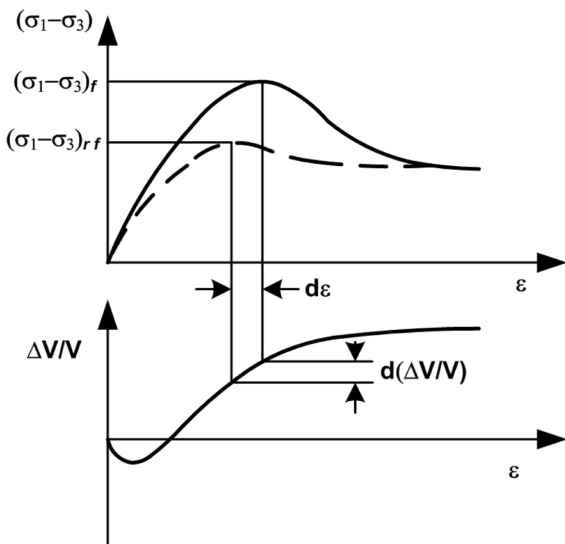


그림 1. 다일레이턴시에 의해 소모된 주응력차

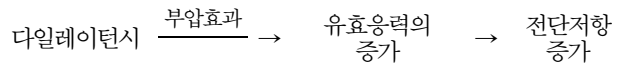
삼축압축시험(CTC)의 결과로부터 식 (2)의 우변 제2항의 다일레이턴시에 의한 체적변화를 계산할 수 있다. 시험조건이 비배수(非排水)일 경우 체적변화가 정(+)이면 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)의 증가단계에서 간극수압 $u = u_a + u_w$ 는 부(-)가 될 것 이므로 시료 내에 부압(負壓)이 발생하게 된다. 이와 같은 현 상에 대해서 Scott(1963)은 그림 2와 같은 설명으로 유효응 력의 증가와 점착력의 출현을 설명하고 있다. 즉, 유효응력은 간극수압이 부(-)일 경우 그 값만큼 전응력보다 크게 되며, $c_u = u_f \cdot \tan\phi_u$ 이므로 파괴시의 전단강도 τ_f 는 다음과 같다.

$$\tau_f = c_u + \sigma_f \cdot \tan\phi_u = u_f \cdot \tan\phi_u + \sigma_f \cdot \tan\phi_u = (u_f + \sigma_f) \cdot \tan\phi_u \quad (3)$$

식 (3)은 포화사질토의 경우로서 다일레이턴시의 발생으로 유효응력이 증가함을 볼 수 있다. 이와 같은 유효응력의 증 가원인은 체적팽창에 의한 부압(負壓)의 발현으로 보았으며, 내부마찰각보다는 점착력에 부압효과가 크게 나타날 것이라 하였다.

2.3 Rowe의 다일레이턴시 표현

2.2절에서 설명한 부압(負壓)효과를 화강토에 확장시켜 고찰하면, 화강토 특유의 입자구조와 더불어 다음과 같은 관계 로 전단특성을 설명할 수 있다.



화강토의 다일레이턴시를 지배하는 요소 중에서 가장 탁월 하게 작용하는 것은 입자간에 작용하는 맞물림(interlocking) 현상이다. 따라서 화강토의 다일레이턴시 효과를 설명하기 위해서는 반드시 맞물림의 영향을 고려한 연구가 되어야 한 다. Rowe는 1963년 자신의 연구에서 맞물림의 영향을 고려 한 다일레이턴시의 표현식을 제안하였다. 그는 입자배열이 불규칙적인 경우에 대하여 그림 3과 같은 모식(模式)을 사용 하여 식 (4)와 같이 표현하였다.

$$\frac{\sigma_1'}{\left(1 + \frac{dV}{V} \cdot \frac{1}{\epsilon_1}\right)} = \sigma_3' \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi_f'}{2}\right) + \tan \cdot \left(45 + \frac{\phi_f'}{2}\right) \quad (4)$$

여기서, σ_1' 과 σ_3' 은 각각 최대 및 최소주응력, V 는 시료 의 초기체적, dV 와 ϵ_1 은 최대주응력방향의 체적변화 및 축변 형률이며, ϕ_f' 과 c_f' 은 Rowe가 정의한 입자간의 진전단상수

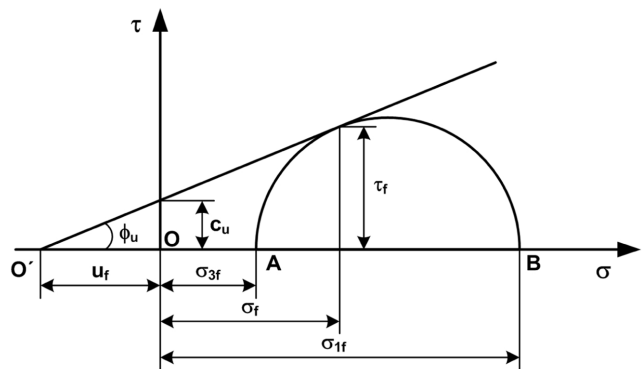


그림 2. 포화사질토의 비배수시험에 의한 부(-) 간극수압의 발생

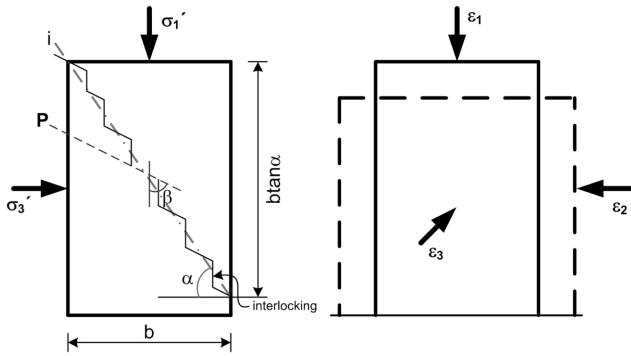


그림 3. Interlocking과 주응력 및 변형과의 관계

(眞剪斷常數) 값이다. 사질토의 경우는 식 (4)의 우항에서 $2c_f' \cdot \tan(45 + (\sigma_1'/2)) = 0$ 이 된다.

본 연구에서는 화강토의 특성상 전단시 맞물림현상이 탁월하기 때문에 Rowe의 제안식을 이용하여 다일레이턴시를 보정하였다.

3. 시험방법

3.1 시료의 채취 및 제조

본 연구에 사용된 시료는 광주 풍암 지역(WGS-01, 02)과 강원도 횡성 지역(WGS-03)에서 채취한 교란 및 불교란 화강토이며, 채취 위치 및 특징을 표 1에 나타내었다.

기본 물성 및 다짐시료에 사용할 교란된 모든 시료는 현장에서 일정량이 교란된 상태로 채취한 후 실험실로 반입하여 공기건조를 시킨 후 No.4체를 통과한 약 500g의 시료를 비닐봉지에 넣어 2m의 높이에서 30회 자유낙하 시킨 시료를 사용하였다. 그 이유는 화강토가 파쇄성이 매우 탁월한 시료이기 때문에 파쇄의 정도에 따라 거동이 매우 달라지기 때문이다. 그러므로 초기조건을 동일하게 하기 위하여 낙하법으로 자연스럽게 파쇄시켰다. 불교란 시료의 경우 본 연구에서는 nail sampling 방법을 이용하여 시료를 채취하였다.

3.2 물성시험

본 연구에서 실시한 물성시험 및 그에 대한 규정은 표 2에 나타내었다. 화강토는 실트질 이상의 입자가 다량 함유되어 있는 경우에 많으므로 일반적으로 N.P(Non Plastic)으로 분류된다. 따라서 통상적인 액성한계시험, 즉 KS F 2303의 규정에 따라 시험을 실시할 경우 시료가 성형이 되지 않았으며, 되더라도 낙하횟수가 1~2회를 넘지 못하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 KS F 2303의 규정을 따르지 않고 fall cone method에 의해 액성한계를 구하였다(JGS T 141).

표 2. 물성시험의 종류 및 기준

시험종류	기준
함수비	KS F 2306
비중	KS F 2308
입도분석	KS F 2302
#200체 통과량	KS F 2309
액성한계	JGS T 141

본 연구에 사용된 시료의 풍화정도를 판단하는 지표로서 강열감량(Loss on Ignition, 이하 L_i)을 사용하였다. L_i 를 이용한 풍화도의 판정은 $L_i < 2.0\%$ 이면 신선암 내지는 약풍화, $2.0\% < L_i < 4.0\%$ 이면 중풍화, $L_i > 4.0\%$ 이면 강풍화로 분류된다(문용, 1998).

3.3 삼축압축시험

본 연구에는 영국 GDS사에서 개발한 삼축압축시험기를 이용하여 압밀배수시험(CD-test), 다단계 압밀 후 배수시험(D-test), 평균주응력일정시험(constant P test)을 실시하였으며, 모든 시험은 압밀이 선행된 후 배수전단시험을 실시한 것이다.

본 연구에 사용된 시료는 모두 포화된 시료를 사용하였다. 포화는 시료를 삼축실에 정착한 후 탄산가스(CO_2)를 일정 시간(약 30분 정도) 동안 주입하고 구속압력을 작용시킨 후 배압(back pressure)을 가하여 간극수압계수(B)가 0.95 이상의 값에 도달하면 포화된 것으로 간주하였다.

포화 후 압밀은 100분간 진행하였다. 화강토는 점성도와 달리 크리프침하(2차 압밀침하)가 거의 없고, 1차 압밀에 의하여 압밀이 진행된다. 또한 1차 압밀은 거의 15분 정도에서 완료가 되며 삼축압축시험시에는 100분이면 충분히 압밀이 진행된다고 판단되어져 100분 동안 압밀을 실시하였다.

전단시 변형률속도는 예비시험을 통하여 간극수압이 발생하지 않는 범위 내에서 0.02%/min의 속도로 전단하였으며, 축변형률이 최대 16%에 도달하면 시험을 종료하였다. 표 3은 본 연구에서 실시한 역학시험 및 시료의 종류이며, 그림 4는 삼축압축시험기의 개략적인 구조를 나타낸 그림이다.

표 3. 역학시험의 종류 및 사용시료

시험방법	채취 번호	시료상태
CD test	WGS-02 WGS-03	불교란 불교란
D test	WGS-01 WGS-03	불교란 불교란, 교란
Constant P test	WGS-01	불교란

표 1. 채취 시료의 위치 및 특징

지역	시료 형태	색상	특징	모암 추정
광주 풍암	불교란	짙은 갈색	<ul style="list-style-type: none"> 모래질 최대입경 5mm 거정질 장석류, 흑운모 	편마암계
강원 횡성	불교란 교란	얇은 갈색에 백색 장석류	<ul style="list-style-type: none"> 모래질 최대입경 7mm 거정질 장석류 	화강암계

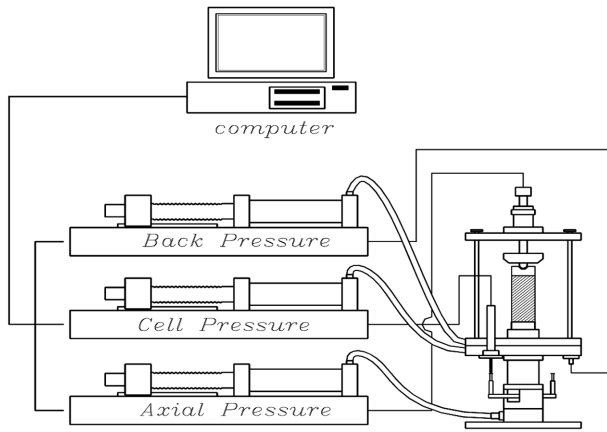


그림 4. 삼축압축시험기의 개략도

4. 실험결과 및 고찰

4.1 물리적 특성

화강토의 기본적인 물리적 특성을 파악하기 위하여 실시한 물성시험은 한국공업규격(KSF) 및 일본규정(JGS)을 준수하여 시험을 실시하였으며, 그 결과 값들은 표 4에 나타내었다.

4.2 다일레이턴시 특성

4.2.1 압밀배수시험에서의 다일레이턴시 특성

화강토는 풍화정도와 조성광물에 따라 비교적 투수성이 큰 흙이며 다일레이턴시가 탁월한 흙이다. 파괴시에는 거의 배수상태에서 파괴가 이루어지리라는 견해가 많다. 이와 같은 현상에 접근하기 위해서 압밀배수시험(이하 CD-test)을 교란 및 불교란 시료에 대하여 실시하였다.

그림 5는 광주 풍암지역(WGS-02; $L_i=2.29\%$, $\gamma_d=14.7\text{kN/m}^3$) 불교란 화강토의 축차응력-축변형률-체적변형률 관계를 나타낸 그래프이다. 구속압 $\sigma_c=49\text{kPa}$ 인 경우 약 6%의 변형률에서 수축에서 일정체적영역으로 들어서고 이후 약 13%의 변형률에서 팽창으로 반전되어 다일레이턴시 거동을 나타내고 있다. $\sigma_c=98\text{kPa}$ 인 경우에는 체적변형률이 팽창으로 반전되는 부분은 보이지 않지만 전반적인 거동이 $\sigma_c=49\text{kPa}$ 의 경우와 유사하므로 변형률이 좀 더 진행되면 다일레이턴시 거동을 보일 것이라 판단된다. 반면 구속압이 높은 경우($\sigma_c=294\text{kPa}$, 490kPa)에는 체적변형률이 계속 수축하는 경향

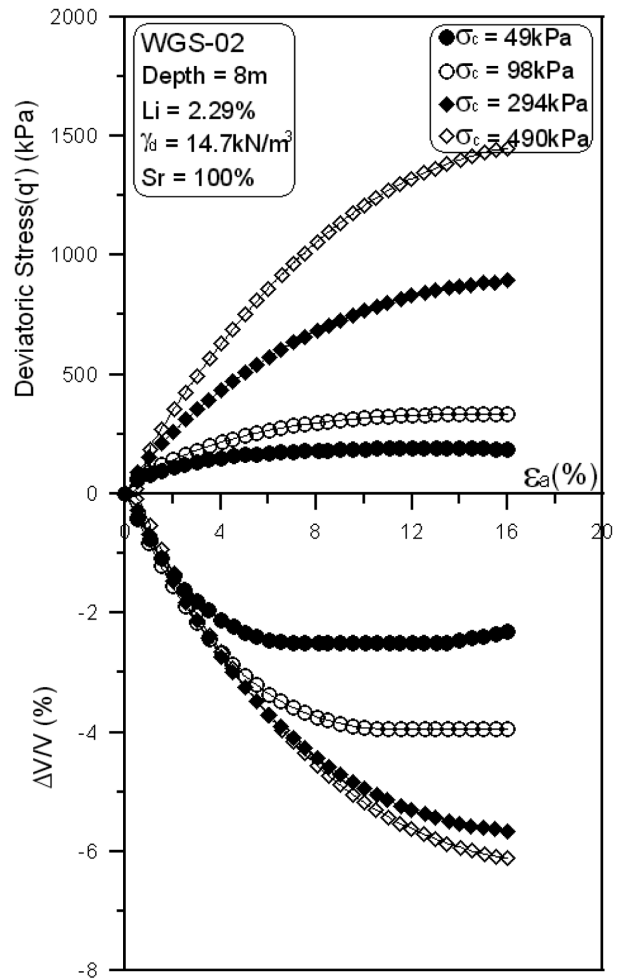


그림 5. 불교란 화강토의 축차응력-축변형률-체적변형률 관계 (WGS-02)

을 보이고 있다.

그림 6은 강원 횡성지역(WGS-03; $L_i=2.70\%$, $\gamma_d=15.2\text{kN/m}^3$) 불교란 화강토의 축차응력-축변형률-체적변형률 관계를 나타낸 것이다. 구속압이 낮은 경우($\sigma_c=49\text{kPa}$, 98kPa)는 체적변형률이 수축에서 팽창으로 반전되는 다일레이턴시의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 구속압이 선행하중보다 작을 경우의 과압밀된 점성토와 유사한 거동을 하는 것으로 판단되어진다. 반면 높은 구속압($\sigma_c=294\text{kPa}$, 490kPa)의 경우는 체적변형률이 수축에서 일정체적의 영역으로 변화하고 있다. 이와 같이 높은 구속압 하에서 체적변형률이 일정체적

표 4(a). 지역별 화강토의 물리적 성질

구분	지역	심도(m)	$w_n(\%)$	$\gamma_s(\text{kN/m}^3)$	비중(G_s)	e_o	유동지수(w_f , %)
WGS-01	광주-풍암	1	24	15.9	2.64	1.02	30.42
WGS-02	광주-풍암	8	15	16.9	2.69	0.80	41.93
WGS-03	강원-횡성	5	23	18.7	2.67	0.74	44.56

표 4(b). 지역별 화강토의 물리적 성질

구분	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_g	#200체 통과량 (%)	L_i (%)	풍화도	USCS
WGS-01	0.080	0.38	1.40	18	1.3	8.4	7.00	강풍화	SW
WGS-02	0.022	0.24	0.83	38	3.1	3.1	2.29	중풍화	SW
WGS-03	0.037	0.37	0.80	16	4.6	4.6	2.70	중풍화	SM

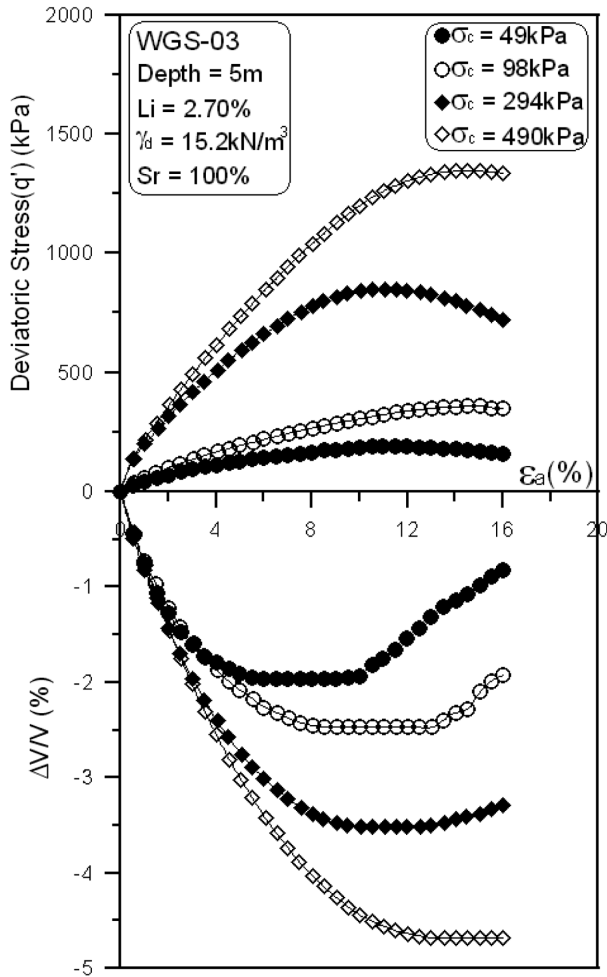


그림 6. 불교란 화강토의 축차응력-축변형률-체적변형률 관계 (WGS-03)

또는 수축되는 것은 구속압의 증가로 인한 strain softening 효과의 감소와 이에 strain hardening 효과의 증가에 기인한 것이라 판단되어진다. 그림 5와 6의 체적변형률 변화를 보면 두 시료 모두 체적변형률이 약 4%까지는 일정하게 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 다일레이턴시가 어느 변형률까지는 초기의 응력상태와는 무관하다고 판단되어진다.

그림 7은 강원 횡성(WGS-03) 불교란 시료를 단계별로 등방압밀 시킨 후 전단을 실시하여 평균주응력과 함수비와의 관계를 나타낸 그림이다. 다단계 등방압밀은 $\sigma_c=49\text{kPa}$, 98kPa , 196kPa , 294kPa 의 순으로 압밀하였으며, 최종의 단계가 끝난 후 그 상태에서 배수전단을 실시하였다. 그림에서 (●)로 표시된 부분은 전단이 진행된 부분이다. 전단과정을 살펴보면 어느 한계까지는 평균주응력의 증가와 더불어 함수비가 감소하는 경향을 보이다가 첨두강도(peak 강도)를 기점으로 반전되어 함수비가 증가하여 그래프가 왼쪽에서 오른쪽으로 변하고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 전단 중 화강토의 입자파쇄 및 골격구조의 변화에 의한 다일레이턴시의 영향으로 화강토만이 가지고 있는 특징으로 판단되어진다. 그림 8은 같은 장소에서 채취한 교란된 시료를 불교란시료와 동일한 γ_d 로 다짐하여 시료를 제작한 후 불교란 시료와 동일한 방법으로 배수시험을 실시하여 작도한 그래프이다. 전단 초기는 불교란 시료의 거동과 거의 유사하나, 전단이 더 진행되면서 불교란 시료와는 달리 반전되는 부분

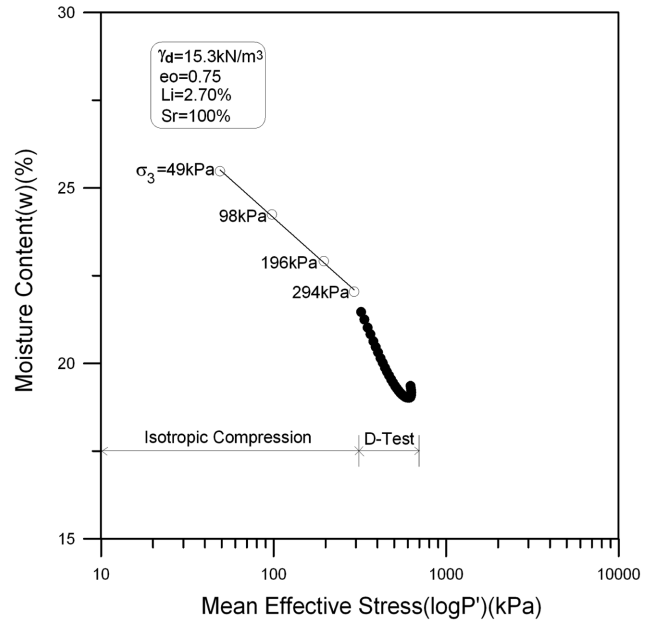


그림 7. 불교란 화강토의 함수비-평균주응력 관계 (WGS-03)

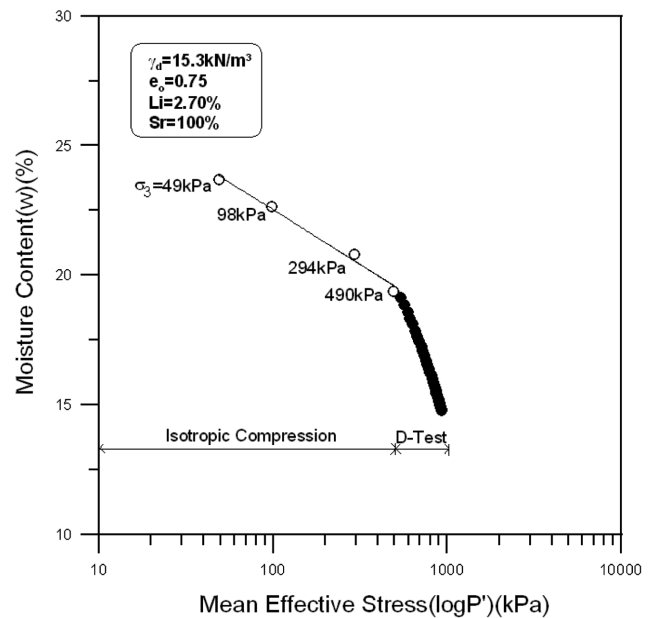


그림 8. 교란 화강토의 함수비-평균주응력 관계 (WGS-03)

이 없이 점성토와 매우 흡사한 거동을 보이고 있다. 이와 같이 동일한 시료를 이용하였음에도 거동이 상이한 것은 다짐으로 인한 골격구조의 변화와 입자파쇄가 이루어져 전단시 입자간의 마찰이나 맞물림에 의한 결합력이 상실된 것으로 판단되어진다.

그림 9는 풍화가 매우 많이 진행된 광주 풍암지역(WGS-01; $L_f=7.0\%$, $\gamma_d=12.8\text{kN/m}^3$) 불교란 화강토를 강원 횡성지역의 시료와 동일한 방법으로 시험을 실시하여 그 결과를 도시한 그림이다. 불교란 시료를 사용하였지만 강원 횡성지역(WGS-03) 불교란 시료의 시험결과와는 다른 양상을 보이고 있다. 강원 횡성지역 불교란 시료의 경우와 같이 전단시 반전되지 않고 점성토나 다짐 화강토와 유사한 거동을 보이고 있다. 이러한 거동을 보이는 이유는 두 지역 간의 풍화도 차에서 기인된 것으로 생각되어진다. 이 지역(WGS-01)은 풍화가 매우 많이 진행되어 입자가 세립화 되어 있어 전단

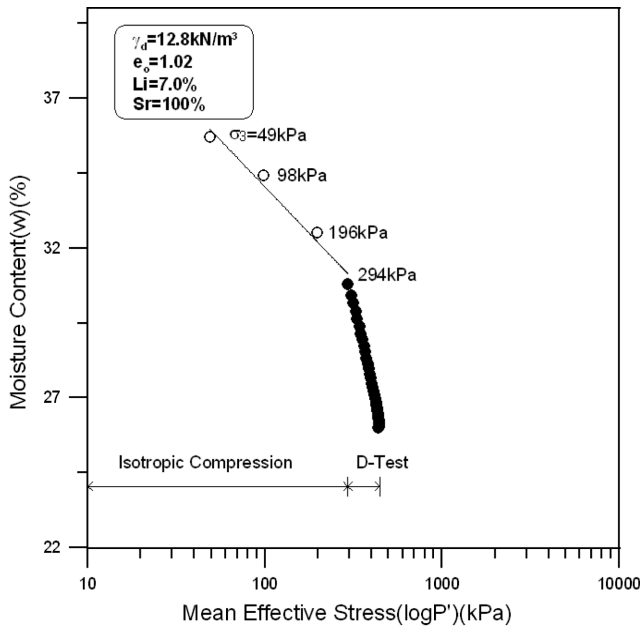


그림 9. 불교란 화강토의 함수비-평균주응력 관계(WGS-01)

시 입자파쇄와 입자간의 맞물림 영향이 현저하게 감소하여 반전하지 않는 것으로 판단되어진다.

4.2.2 압밀배수시험에서의 다이레이턴시 보정

본 연구에서는 앞의 2.3절에서 소개한 Rowe의 제안식을 이용하여 다이레이턴시를 보정하였다. 이 방법은 Peak 시의 $[\sigma_1' / (1 + ((dV/V)(1/\epsilon_1)))]$ 과 σ_3' 을 사용하여 Mohr 원을 그리고, 그때의 파괴포락선을 그려 보정된 과 을 얻을 수 있다.

보정에 사용된 시료는 광주 풍암지역의 심도 8m 위치의 시료(WGS-02)와 강원 황성지역의 심도 5m 위치의 시료(WGS-03)를 사용하여 실험을 하였다. 두 지역 모두 중풍화(WGS-02; $L_i=2.29\%$, WGS-03; $L_i=2.70\%$)에 해당하는 흙이다. 표 5는 Rowe의 제안식을 이용하여 보정한 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 비슷한 풍화도의 시료를 Rowe의 방법으로 보정했을 경우 미세하지만 c , ϕ 가 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 전단시 전단 에너지가 작게나마 다이레이턴시 거동에 영향을 미치고 있음을 의미한다. 하지만 이런 미세한 변화를 거시적인 관점에서 바라본다면 본 연구에 사용된 시료의 경우 다이레이턴시의 영향을 고려한 보정은 거의 영향을 미치지 않을 것이라 판단되어진다.

4.2.3 평균주응력일정실험(constant P test)에서의 다이레이턴시 특성

화강토의 다이레이턴시 특성을 파악하기 위하여 평균주응력(p)을 일정하게 유지하고 축차응력(q)을 변화시켜 일련의 시험을 실시하였다. 평균주응력일정시험은 원리적으로 순수 전단이기 때문에 시험 중 발생하는 간극수압이나 체적변화

표 5. 다이레이턴시 보정 후의 강도정수의 변화

시료 No.	보정 전		보정 후	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c_f' (kPa)	ϕ_f' (°)
WGS-02	9.75	36.61	9.80	36.53
WGS-03	27.65	33.92	27.5	33.91

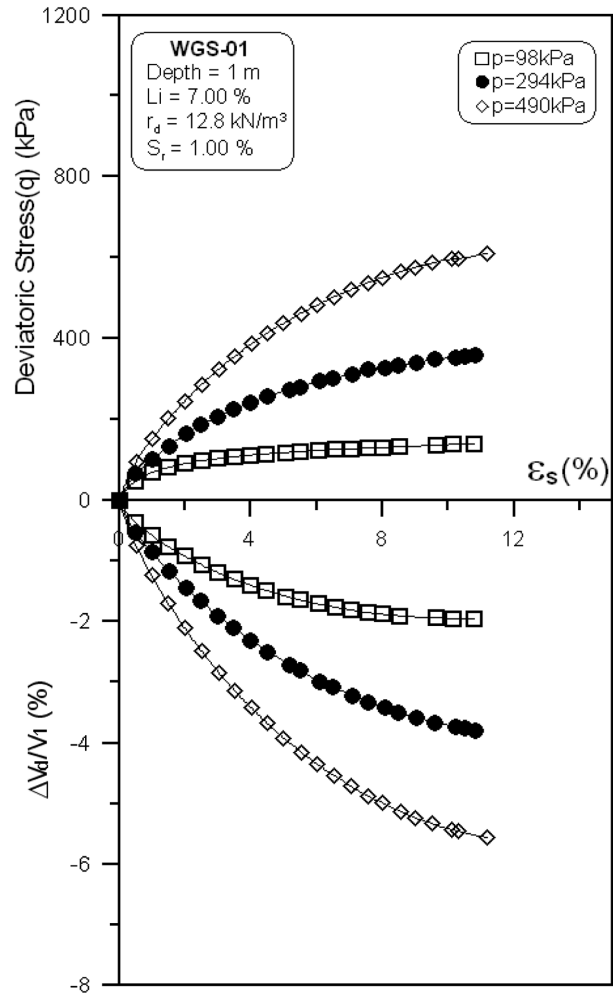


그림 10. 불교란 화강토의 축차응력-체적변형률-전단변형률 관계(WGS-01)

는 다이레이턴시에 의한 것으로 간주한다.

그림 10은 광주 풍암지역(WGS-01) 불교란 시료의 축차응력-전단변형률-체적변형률 관계를 나타낸 그래프이다. 각각의 평균주응력(p)에서 축차응력이 증가할수록 체적변형률은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 다른 지역(WGS-02, WGS-03) 불교란 시료와는 다른 거동을 보이고 있다. 이 지역의 시료는 다른 지역의 시료에 비해 초기간극비($e_0=1.02$)가 크며, 풍화가 가장 많이 진행($L_i=7.0\%$)되었고, 그로인해 입자의 세립화 및 맞물림 영향의 감소 등으로 체적변형률이 전단변형률의 증가에 따라 일정 체적 또는 반전하는 경향을 보이지 않고 다짐 화강토 또는 정규압밀점토와 같은 거동을 나타내는 것이라 판단되어진다.

그림 11은 축차응력을 평균주응력(p)으로 정규화 시킨 것이다. 평균주응력 $p=294\text{kPa}$, 490kPa 이 작용하는 경우는 두 곡선이 하나의 곡선으로 수렴되는 것을 볼 수 있으나, $p=98\text{kPa}$ 이 작용하는 경우는 다른 곡선과 수렴하지 않고 있다. 정규화 시켰을 경우 평균주응력이 큰 경우에 수렴하는 경향을 나타내는 것은 작용압력이 높을수록 시료가 구조적으로 안정되며 성형 또는 실험시에 발생하는 오차 등과 같은 초기의 불안정한 값들이 줄어들기 때문이라 판단되어진다.

그림 12는 다이레이턴시에 의한 체적변화($\Delta V_d/V_1$)와 응력 비와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 $V_1=V_0-\Delta V_c$ 은 전단 시작 전, 즉 압밀이 종료된 후의 체적을 의미하고 ΔV_d 는 다

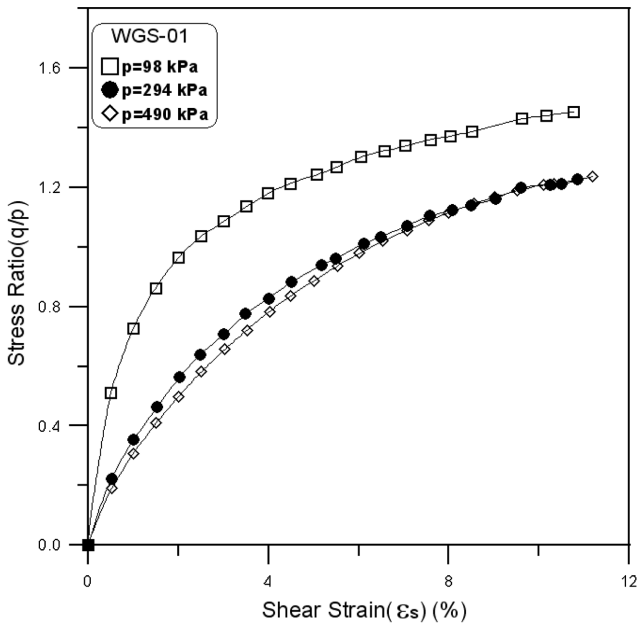


그림 11. 불교란 화강토의 응력비-전단변형률 관계 (WGS-01)

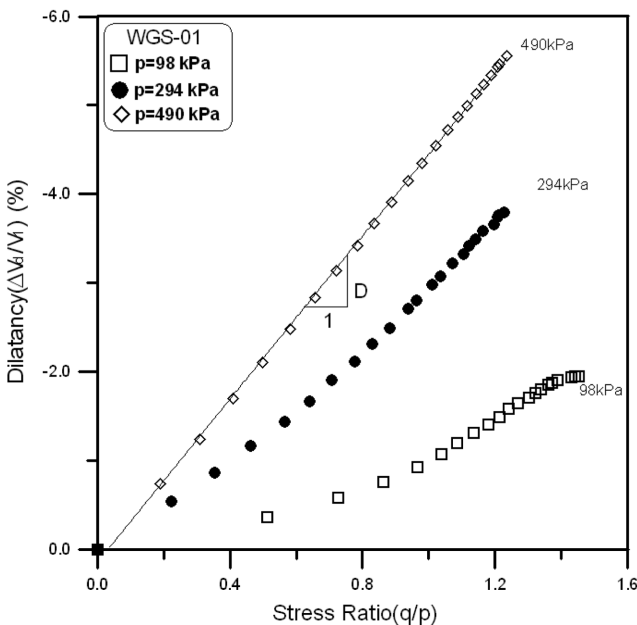


그림 12. 불교란 화강토의 Dilatancy($\Delta V_d/V_1$)와 응력비 관계 (WGS-01)

일레이턴시에 의한 체적변화량이다. 체적변화량은 주응력차에 비례하여 증가하지만 낮은 구속압에서는 steady state로 옮겨가고 있는 반면, 높은 구속압에서는 계속 체적이 감소하는 경향을 보인다. 이는 각각의 구속압에 따라 전단에 의한 입자파쇄에 차이가 있어 다일레이턴시에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 관계에서 체적변화량과 주응력비는 대략 직선관계($\Delta V_d/V_1 = D \cdot ((\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c) / \sigma_m'$)가 성립된다 (Shibata, 1963). 여기서 D는 다일레이턴시 계수(D계수)를 나타내고 σ_c 는 다일레이턴시가 시작되어 다시 다일레이턴시가 0이 되는 한계값을 의미한다.

5. 결 론

화강토의 다일레이턴시(dilatancy) 거동은 풍화의 정도, 교란의 유무에 따라 그 성질을 다르게 나타내고 있다. 본 연구에서는 중풍화($2.0\% < L_f < 4.0\%$) 및 강풍화($L_f > 4.0\%$)된 교란(다짐) 및 불교란 시료를 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압밀배수시험에서 구속압이 증가함에 따라 축차응력은 증가하지만 체적변형률은 약 4%까지는 일정하게 수렴하는 경향을 볼 수 있었다. 이러한 경향은 전단시 흡입자의 다일레이턴시 거동은 어느 변형률까지는 초기의 응력상태와는 무관하다는 것을 의미한다. 즉, 거동 초기에는 다일레이턴시와는 무관하게 거동할 것이라 판단되어진다.
2. 배수전단시험에서 다단계압밀 후 전단을 시행했을 때 평균주응력의 증가와 더불어 함수비는 감소하고, 풍화도가 낮은 경우의 불교란 화강토는 전단 과정 중 어느 일정 한계(강도가 peak)에서는 함수비의 증가를 보였다. 이는 화강토의 다일레이턴시에 의한 영향이라 판단되어지며, 풍화가 많이 진행된 화강토의 경우는 다짐 화강토의 경우와 마찬가지로 배수전단시험시 점성토의 거동과 유사함을 알 수 있었다. 이러한 거동을 보이는 이유는 풍화의 진전으로 입자의 세립화 및 구조적 재배열, 다짐으로 인한 입자파쇄 및 입자간의 마찰이나 맞물림(interlocking) 효과의 감소에 기인하는 것으로 판단되어진다.
3. 전단에 의한 체적변화량(즉 다일레이턴시량)과 주응력차의 관계에서 $\Delta V_d/V_1 = D \cdot ((\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c) / \sigma_m'$ 의 직선 관계가 성립되며, 다만 원점을 통과하지 않는 것은 전단초기에 체적감소가 발생하지 않는 것으로 판단되어진다.

참고문헌

- 문용(1998) 花崗土의 物性과 力學的 性質에 關한 研究. 석사학위논문, 전남대학교, pp. 52-62.
- 박병기(1974) 花崗岩質風化土의 特性 研究. 대한토목학회지, 대한토목학회, 제22권, 제2호, pp. 38-51.
- 박병기(1974) 花崗岩風化土의 剪斷特性 研究. 대한토목학회지, 대한토목학회, 제22권, 제3호, pp. 52-63.
- 이형수(1984) 花崗土의 다짐 및 剪斷特性에 關한 研究. 기술과학연구소 논문집, 중앙대학교 기술과학연구소, 제13권, pp. 79-89.
- 주승완, 김선학(2004) 다짐도에 따른 화강풍화토의 역학적 특성에 관한 연구. 지역발전연구:서강전문대, 서강대학 지역발전연구소, 제10권, pp. 145-163.
- Rowe, P. W. (1963) Stress-Dilatancy, Earth Pressure and Slopes. *J. of Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 89, No. SM3, pp. 37-51.
- Scott, R. F. (1963) *Principles of Soil Mechanics*, Addison Wesley
- Shibata, T. (1963) On the Volume Changes of Normally Consolidated Clays. *日本 京大防災研究所年報*, 第6戸, pp. 128-133.
- Skempton A. W. (1960) Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks. *Pore Pressure and Suction in Soil*, pp. 4-16.
- Taylor(1948) *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc.

(접수일: 2007.11.2/심사일: 2007.12.3/심사완료일: 2008.1.21)