

불교란 화강토의 강도정수 (c, ϕ) 및 Dilatancy 보정

Strength Parameter (c, ϕ) and Dilatancy Correction of Undisturbed Weathered Granite Soil

정진섭* · 양재혁**
Jeong, Jin Seob · Yang, Jae Hyouk

Abstract

In order to evaluate the shear characteristics of undisturbed weathered granite soil which is a typical residual soil in Korea, the mechanical properties are first investigated and discussed by carrying out a series of direct shear test and then dilatancy correction is performed by using Taylor's correction equation. In this study, specimens are sampled at Pungam(-3, -8, -13m below ground surface), Kwangju and Iksan(-5m below ground surface), Jeonbuk. The test results are summarized as follows: 1) Mohr-Coulomb failure criterion is not linear under the low confining pressure. 2) The value of cohesion is smaller than usually determined value in low pressure region. 3) The value of strength parameter c and ϕ which are corrected by Taylor's correction equation is a little bit small.

I. 서 론

우리 나라 건설현장에서 쉽게 접하게 되는 흙 가운데 하나가 화강토(weathered granite soil)이다. 화강토는 모암인 화강암질계 암석(화강암, 화강편마암, 흑운모화강암, 편마암, 석영조면암 등)이 원지반에서 직, 간접으로 대기나 물의 작용을 받아 풍화되어 잔적된 흙으로서 대부분 석영, 장석, 운모 등의 1차 광물과 기타의 2차 광물로 구성되어 있으나 모암의 분포지역이나 채취장소 및 심도에 따라 각 광물의 성분량이 다르다. 이 성분 가운데 풍화정도에 따라 석영은 풍화에 대해 안정

성이 높으나, 그 외의 장석류나 2차 광물(주로 유색광물)은 그 양이 화학적 성질에 따라 쉽게 변질되어 점성토화의 과정을 밟는다.^{1,2)}

그 외에 물리적 성질로서 큰 특징의 하나는 화강토는 물에 접촉하면 안정성이 저하되어 함수비가 많아짐에 따라 전단강도 등이 급격히 떨어지는 경향을 보인다. 이러한 풍화과정은 장기간에 걸쳐서 일어나는 현상이고 현시점의 풍화정도에 따라 공학적 성질에 큰 차이가 발생하므로 풍화정도를 측정하여 그에 알맞는 공학적 성질을 판단하여야 한다. 그러나 화강암의 조성광물은 천태만상이고 풍화작용도 환경에 좌우되므로 이와 같은 판단은

*원광대학교 공과대학

**원광대학교 대학원

키워드 : 불교란화강토, 직접전단시험, 저압부, 잔적토, Mohr-Coulomb 파괴규준, Dilatancy 보정

불가능하다. 또한 화강토에 대한 불교란상태의 역학적 특성을 조사한다는 것이 매우 어렵고, 따라서 그 특성이 교란토에 비해서 충분히 해명되지 않고 있는 것이 오늘의 현실이다.^{3~5)}

화강토는 지금까지 성토재료로서 많이 이용되어 왔기 때문에 교란시료의 특성에 대해서는 꽤 연구가 진행되고 있다. 그러나 화강토 지반을 구조물의 기초지반으로 이용하거나 절토사면의 강도를 평가할 때는 불교란상태의 강도정수가 요구되는데 특별한 경우를 제외하고는 통상 표준관입시험의 N값에 의존하는 경우가 태반이다. 여러 학자들이 지적한바와 같이 화강토 지반의 N값 측정은 매우 조잡한 결과를 보이고 상재하중의 영향을 반영하고 있기 때문에 그 신빙성에 대해서는 심사숙고할 필요가 있다. 특히 대기에 노출된 경우의 강도변화는 심층에 있을 때의 강도평가와는 크게 달라지므로 N값에 의존하는 것은 위험하다고 지적되고 있다.⁶⁾ 이와 같은 경우는 전단시험을 통해서 강도정수를 결정해야 옳다. 그러나 화강토의 불교란 공시체의 제작은 매우 어렵고, 토립자가 부스러지기 쉽고, 또한 풍화정도에 따라 역학적 성질이 크게 달라지므로 불교란시료에 의한 전단특성의 연구는 미진하다고 볼 수 있다. 최근에는 집중호우 때 사면붕괴를 일으키는 화강토 지반이 눈에 띄게 증가되고 있으므로 불교란시료에 의한 전단강도를 추정하는 것이 적절하다고 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 사질토에 가까운 화강토(광주, 풍암지역)와 점성토에 가까운 화강토(전북, 익산지역)를 택하여 불교란시료를 채취하고 직접 전단시험을 실시하여 전단강도의 발현과정이 어떠한 mechanism에 의존하는가를 규명하고자 한다. 또한 화강토는 역물림(interlocking)이 매우 강한 재료이므로 Dilatancy가 매우 탁월한 특성을 지니고 있다. 따라서 이 특성도 함께 조사, 연구하고자 한다.

II. 시료채취 및 시험방법

1. 불교란시료 채취방법

지금까지 화강토의 불교란시료 채취는 채취지반을 동결시키거나, 되도록 교란의 영향을 받지 않도록 공시체를 큰 block으로 잘라내는 방법 등이 사용되고 있다. 화강토의 sampling 방법과 trimming 방법은 Table 1과 같은 종류가 있다. 그 중 본 연구에서는 시료채취는 nailing method, trimming은 hand trimming method를 사용하였다.

Table 1. Sampling method of undisturbed weathered granite soil⁷⁾

Sampling method	Trimming method	Remarks
Nailing method	Hand trimming method	This study
Block method	Tube method	
Hand trimming method	Freezing method	
Tube method		
Undisturbed soil sampling apparatus		

본 연구에서는 못을 박아 채취하는 방법을 사용하였는데 시료채취기의 제작과정은 Fig. 1에 보인다. 바와 같이 일정 넓이를 갖는 두 개의 아크릴판(두께 : 약 1cm)에 35×35cm 정도의 면적을 갖은 판의 가장자리에 못구멍을 내고, 하판은 이 못구멍을 통해 관입되는 못을 이동하지 않도록 흠을 내고 16.7cm 정도의 높이를 유지하기 위하여 볼트로 고정시키도록 되어 있다.

시료 채취방법으로는 상판을 다듬어 놓은 채 취지반 위에 놓고 못구멍으로 못을 관입시킨 후, 삼으로 주위 흠을 파내고 손질 후 즉시 랩으로 감아 함수비의 변화를 막고, 하판과 조립한 다음 실내로 반입하여 실내에서 직접전단시험용으로 사용하였다.

본 시험에 사용된 시료의 물리적 성질은 Table 2와 같으며, 동일 장소에서도 위치에 따라 광물 조성 및 물리적 성질에 차이가 있으나 여기서는 대

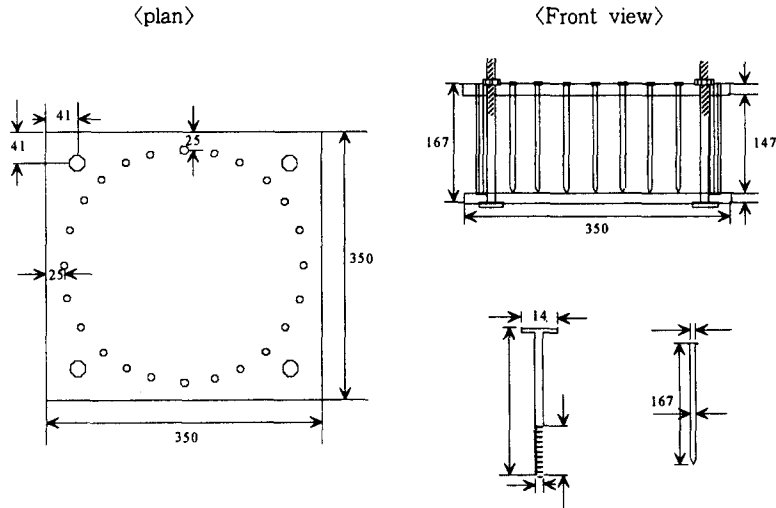


Fig. 1. Sampling apparatus of undisturbed weathered granite soil(unit : mm)

표적인 값을 채택한 것이다.

2. 시험방법

광주 풍암과 전북 익산에서 Fig. 1과 같은 방법으로 불교란시료를 채취한 후 cutter (ϕ : 63 mm, h : 20 mm)를 이용하여 공시체를 제작한 후 ELE 상부이동식 직접전단시험기로 시험을 실시하였다. 시험기의 level ratio는 10 : 1이고 전단속도는 0.5 mm/min으로 하였다. 전단방법은 파괴 이후의 거동을 쉽게 알 수 있는 변형제어법을 이용하였다. 수직응력을 저압부(0.07~0.26 kgf/cm²)와 고압부(0.32~1.28 kgf/cm²)로 나누어 시험을 실시하였는데, 이는 화강토의 절토사면은 큰 하중보다도 작은 상재하중에서 붕괴되므로 작은 상재하중의 영향을 알아보기 위하여 통상적인 하중재하와 더불어

어 작은 하중을 재하하여 저압부와 고압부로 구분하여 실시하였다. 이는 구속압의 크기에 따라 강도정수 c, ϕ 가 어떻게 달라지는가를 파악하기 위해서이다.

Ⅲ. 시험결과 및 고찰

본 연구에서는 광주 풍암, 전북 익산의 불교란시료를 채취하여 직접전단시험을 실시하였다. 동일 장소에서 시료를 채취하여 성형하여도 γ_d 에 차이가 있으며 실제 화강토 지반을 살펴보면 어느 곳이건 동질의 화강토는 없으며, 특히 풍화 장석류의 분포가 매우 불규칙하다. 그러나 현실적으로는 동질의 시료로 보고 일련의 전단시험을 실시할 수 밖에 없다.

Table 2. Physical properties of samples

Location	Color	Gs	#200 percent finer (%)	D ₆₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	LL (%)	PI	US CS
Pungam, Kwangju	Dark brown	2.68	4	1.5	0.048	0.30	35	4	SW
Iksan, Jeonbuk	Light brown	2.66	23	0.7	0.026	0.14	41	12	SM

직접전단시험의 경우 통상 구속하중을 0.5, 1, 1.5 kgf/cm² 또는 1, 2, 3 kgf/cm²로 재하하여 전단 시켜서 구한 파괴규준에 의해 c, ϕ 를 정의하는데 구속하중이 작은 경우, c 값은 위와 같은 표준적 시험법에 의한 c 값과는 차이가 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 본 연구에서는 위와 같은 통상의 하중 외에 0.26kgf/cm² 이하의 구속하중을 재하하여 c 의 변화를 조사하였다.

한편 화강토의 자연사면의 파괴 또는 화강토 기초지반의 지반파괴를 생각할 때 사면파괴는 주로 집중호우, 일시적인 응력해방에 따른 상재하중이 제거됨으로서 급격한 풍화가 진행되어 사면파괴가 나타나고, 전단저항의 발현은 그리 깊지 않은 얕은 곳에서 발생하므로 이와 같은 작은 재하중에서의 c, ϕ 값의 결정은 중요한 의미를 갖는다. 또한 화강토의 Mohr-Coulomb 파괴포락선은 엄밀하게는 직선이 아니고 곡선인 것도 잘 알려진 사실이다. 본 절에서는 이와 같은 경험적 추정을 전단시험을 통해 확인하고자 하며, 그 발현과정을 고찰하고자 한 것이다.

1. 깊이에 따른 강도정수(c, ϕ)의 변화특성

본 연구에 사용된 광주 풍암의 불교란시료 채취 장소는 화강토의 심층풍화대로서 절토사면의 안전

을 위해 소단 형식을 갖추어 지표면으로부터 -3, -8, -13m로 절취된 곳에서 각각 채취하여 시험을 실시하였으며, 전북 익산의 경우 지표하 -5m에서 채취하였다. 공시체의 물리적 성질과 수직응력은 Table 3과 같다.

Fig. 2는 광주 풍암(지표하 -3, -8, -13m)과 전북 익산(지표하 -5m)에서 채취한 불교란 화강토의 직접전단시험결과를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 2(a)~(c)에서 보인 바와 같이, 고압부의 점착력이 저압부에 비해 약 2배정도 크게 나타나고 있어 c 값의 결정에 있어서 기존의 관행결정법은 과대평가 될 가능성이 있다.

또한 깊이가 증가함에 따라 강도정수 점착력 c 는 깊이변화에 둔감한 반면, 통상의 방법으로 결정하는 내부마찰각 ϕ 는 깊이에 따라 점차 증가하는 경향을 보인다. 이는 아래쪽이 간극율이 더 작은, 상대적으로 풍화가 덜 진행된 심층풍화대의 특성일 것으로 추정된다. Fig. 2(d)는 전북 익산에서 채취한 불교란 화강토에 대한 직접전단시험결과를 보인 것인데 광주 풍암에서 채취한 불교란 화강토와 같이 저압부(0.26kgf/cm² 이하)에서 점착력 c 가 저하되고 있다. 이 시료는 세립분이 많은 화강토로서 광주 풍암의 화강토보다 강도면에서 작은 값을 보여주고 있다.

Table 3. Physical properties of specimens

Location & Depth	Physical properties	Normal stress(kgf/cm ²)							
		0.07	0.12	0.20	0.26	0.32	0.64	0.96	1.28
Pungam, Kwangju (-3m)	Water contents(%)	19.2	16.6	17.6	18.5	18.7	16.5	16.8	15.2
	γ_d (g/cm ³)	1.44	1.27	1.35	1.37	1.40	1.25	1.33	1.24
Pungam, Kwangju (-8m)	Water contents(%)	15.1	15.1	14.8	15.3	15.1	14.7	15.4	15.1
	γ_d (g/cm ³)	1.47	1.44	1.50	1.43	1.48	1.45	1.49	1.52
Pungam, Kwangju (-13m)	Water contents(%)	10.2	10.4	10.2	11.1	10.4	10.6	10.2	10.2
	γ_d (g/cm ³)	1.57	1.59	1.59	1.52	1.58	1.51	1.56	1.55
Iksan, Jeonbuk (-5m)	Water contents(%)	19.7	21.0	20.5	19.7	20.2	20.0	20.5	20.4
	γ_d (g/cm ³)	1.33	1.33	1.32	1.28	1.34	1.38	1.38	1.34

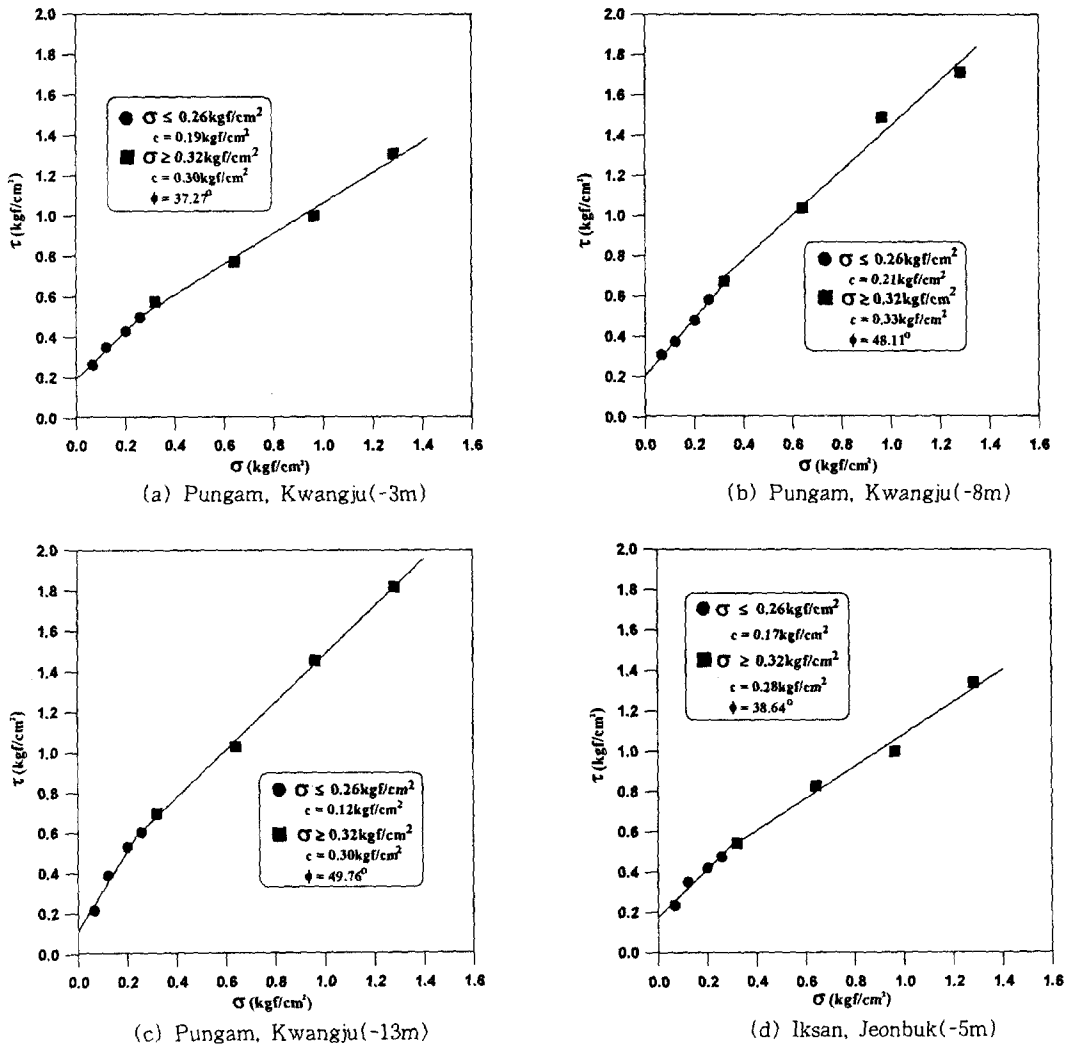


Fig. 2. Relationship between normal and shear stresses

2. 전단강도-변형 관계

Fig. 3은 광주 풍암(지표하 -3, -8, -13m)과 전북 익산(지표하 -5m)에서 채취한 불교란 화강토의 전단강도-수평변위-체적변형을 관계를 나타낸 것이다. 두 지역에서 채취한 시료는 모두 작은 수직응력(0.32 kgf/cm^2 이하)에서 최대전단강도는 약 2~3mm의 수평변위에서 발생하나, 큰 수직응력의 최대전단강도는 약 3mm 보다 더 큰 수평변위에서 발생하고 있다. 또한 체적변화는 큰 수직응력

에서 보다 작은 수직응력에서 (+)dilatancy 현상이 두드러지게 나타나는 경향이 있으며 구속압이 크면 dilatancy 현상은 감소되었다.

구속압이 클 경우 dilatancy가 억제되는 이와같은 현상은, 밀도가 작을 경우는 이해되지만 처음부터 밀도가 큰 경우는 입자간의 전위현상이 입자파쇄와 관련된다고 생각되므로 구속압별 입자파쇄를 조사할 필요가 있음을 시사해주고 있다.

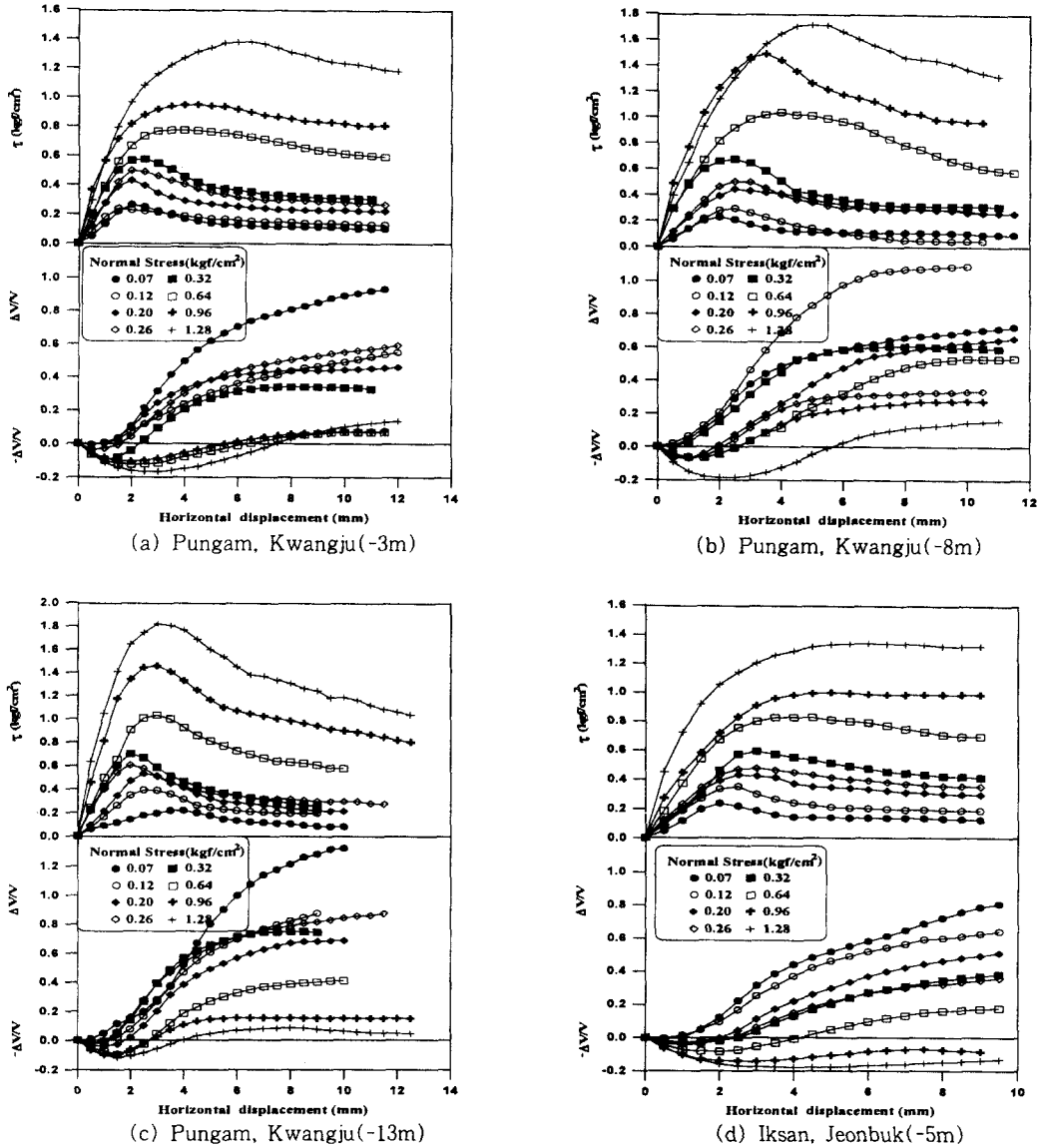


Fig. 3. Relationship between horizontal displacement, and shear stress and volume change

IV. 강도정수(c, ϕ)에 대한 Dilatancy 보정

1. Taylor의 Dilatancy 보정법

c 와 ϕ 가 물리적으로 어떤 발생 메커니즘을 갖고 있는가는 그 동안 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 Mitchell⁸⁾에 의해 통일된 견해가 발표되었으며, Scott⁹⁾는 그의 저서에서 같은 크기의 입상체를 면심입방배열(hexagonal packing prism, 입방배열집합체)로 생각할 경우, 입자간의 마찰계수를 $\tan \phi_m$ 라고 했을 때 가장 파괴되기 쉬운 방향의 전단력 T와 N의 비 $\tan \phi_m$ 은 다음의 식 (1)과 같

다고 한다.

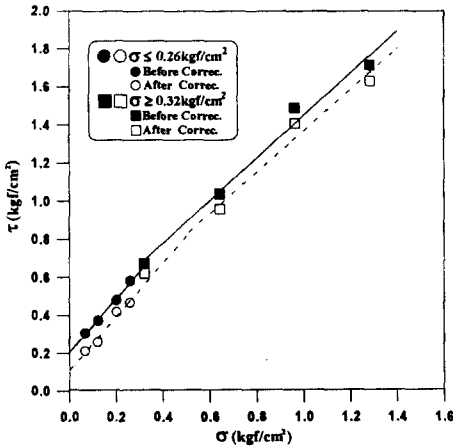
$$\tan \phi_m = \frac{\sqrt{3} + 4\sqrt{2} \tan \phi_u}{2(\sqrt{6} - \tan \phi_u)} \dots\dots\dots(1)$$

이 식에서 $\phi_u = 0$ 이라 하여도 집합체의 강도를 나타내는 ϕ_m 은 0이 되지 않고 기하학적 배열에 의한 저항이 있음을 보여준다.

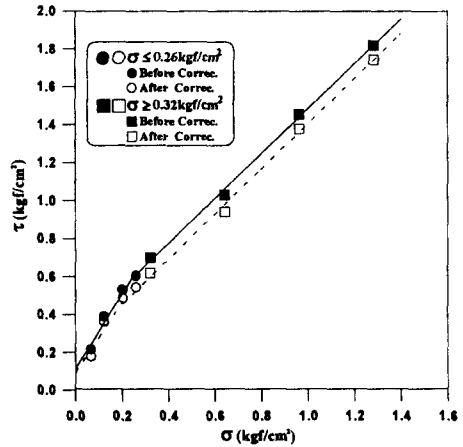
이와 같은 내부마찰각의 해석으로서 Rowe의 Stress-Dilatancy 이론¹⁰⁾이 있으며, 현재 Rowe에 의한 실험에서 관찰된 내부마찰각의 밀도의존성의

해석은 크게 타당성이 인정되고 있다. 그러나 그 역학적 검토는 아직도 충분하지 않다. 특히 입자의 재배열이 어떠한 메커니즘에 의한 것인지는 명확하지 않다.

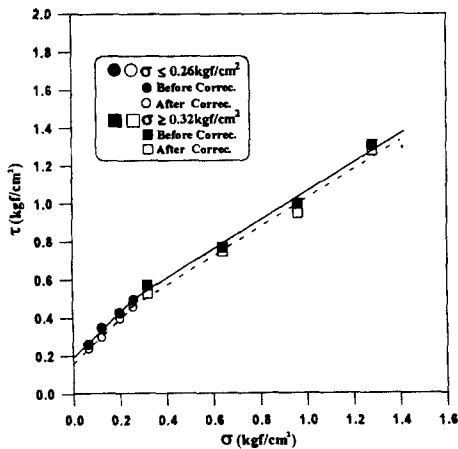
한편, Taylor는 입상체의 직접전단시험 결과에서 dilatancy 성분을 감한 형태로 τ_f 를 구하였다.¹¹⁾ 이를 에너지 보정식이라고 하는데 여기서, 에너지 보정이란 뜻은 밀도가 높은 사질토가 발휘하는 dilatancy와 그에 따라 결정되는 큰 내부마찰각 ϕ_f 로부터 잔류상태, 또는 비배수상태에서 발



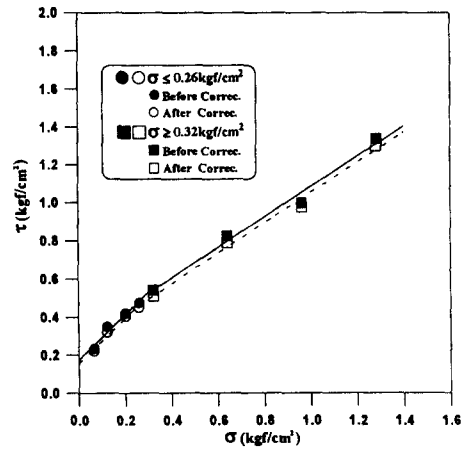
(a) Pungam, Kwangju(-3m)



(b) Pungam, Kwangju(-8m)



(c) Pungam, Kwangju(-13m)



(d) Iksan, Jeonbuk(-5m)

Fig. 4. Dilatancy correction of undisturbed weathered granite soil

Table 4. Dilatancy correction of undisturbed weathered granite soil

Location & Depth	Confining pressure	Before dilatancy correction		After dilatancy correction		Remarks
		c(kgf/cm ²)	φ(°)	c(kgf/cm ²)	φ(°)	
Pungam, Kwangju (-3m)	Low pressure region	0.19	-	0.16	-	Low pressure region (σ ≤ 0.26 kgf/cm ²) High pressure region (σ ≥ 0.32 kgf/cm ²)
	High pressure region	0.30	37.3	0.27	37.3	
Pungam, Kwangju (-8m)	Low pressure region	0.21	-	0.11	-	
	High pressure region	0.33	48.1	0.28	47.3	
Pungam, Kwangju (-13m)	Low pressure region	0.12	-	0.10	-	
	High pressure region	0.30	49.8	0.22	48.7	
Iksan, Jeonbuk (-5m)	Low pressure region	0.17	-	0.16	-	
	High pressure region	0.28	38.6	0.25	38.6	

현되는 내부마찰각 φ_r을 추정하기 위한 보정이란 뜻으로 침투시에 발생하는 마찰각이 물리적으로 잘못되었다는 의미는 아니다.

통상 직접전단시험에서 얻은 결과를 Taylor법으로 보정을 실시하며, 본 연구에서는 Taylor법을 이용하여 직접전단시험결과에 대해 dilatancy보정을 하였다.

Taylor의 보정식을 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\tau_d = \tau_{max} - \sigma_f' \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a} = \tau_r + \sigma_v \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, τ_d : Dilatancy 보정값, τ_{max} : 최대전단 강도

σ_f' $\frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a}$, σ_v $\frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a}$: 에너지 보정값, τ_r : 잔류강도

다시 말하면, 식 (5)는 dilatancy를 보정한 energy 값으로서 마찰항과 dilatancy 항의 합으로 표현된다.

2. c, φ의 보정결과

광주 풍암(-3, -8, -13m)과 전북 익산(-5m)의

불교란 화강토를 Taylor의 dilatancy 보정식을 이용하여 저압부(σ ≤ 0.26 kgf/cm²)와 고압부(σ ≥ 0.32 kgf/cm²)에 대해 Dilatancy 보정을 한 결과가 Fig. 4와 Table 4에 나타나 있다. 보정을 한 결과 저압부(σ ≤ 0.26 kgf/cm²)와 고압부(σ ≥ 0.32 kgf/cm²)에 대해 모든 지역의 불교란 화강토의 경우 점착력 c와 내부마찰각 φ는 같거나 작아지는 경향을 보이고 있다.

V. 결 론

광주 풍암과 전북 익산에서 채취한 불교란 화강토에 대한 직접전단시험을 실시하여 강도 및 변형 특성과 Taylor법에 의한 강도정수 c, φ를 dilatancy 보정한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 직접전단시험을 실시한 결과, 일반적인 흙과 마찬가지로 불교란 화강토는 고압부(0.32~1.28 kgf/cm²)에서는 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르지만 저압부(0.07~0.26 kgf/cm²)에서는 파괴포락선이 곡선적으로 변화한다는 것을 확인하였다.

2) 화강토의 점착력 추정은 작은 하중에서의 시험에 의해 확인할 필요가 있으며, 현행의 관행 결정법은 과대평가될 가능성이 있다. 본 시험에서는

0.26 kgf/cm²이하의 구속압에서 전단하였는데 모두 곡면으로 나타나며 점착력은 통상의 시험에서 얻은 값의 대략 1/2까지 저하된다.

3) 동일 풍화대(광주 풍암)일 경우 화강토의 내부마찰각(ϕ)은 깊이에 따라서 증가하는 경향을 보이나, 점착력은 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 광주 풍암과 전북 익산의 불교란 화강토는 모두 직접전단시험을 통한 최대전단강도가 작은 수직응력(0.32 kgf/cm²) 이하에서는 수평변위 2~3 mm에서 발생하였으며, 더 큰 수직응력에서는 3 mm보다 큰 변위에서 발생하였다.

4) Taylor법에 의해 dilatancy를 보정한 결과, 저압부 또는 고압부와 상관없이 강도정수 c 와 ϕ 는 같거나 작아지는 경향을 보였다.

이 논문은 2000년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 연구됨

참 고 문 헌

1. 日本道路公團.(1968) “マサ土の土質工學のおよび鑛物學的特性調査報告書”, 日本道路公團.
2. Lumb, P.(1962) “The Properties of Decomposed Granite”, Geotechnique 12, No. 3, pp. 226-243.
3. 土質工學會.(1979) “風化花崗岩とまさ土の工學的性質とその應用”, 土質基礎工學 라이프러리.
4. 西田一彦.(1970) “マサ土の工學的性質とその取扱い指針-基本的性質-”, 土質工學會マサ土研究委員會, pp. 9-31.
5. Murata, H. and Yasufuku, N.(1987) “Mechanical Properties of Undisturbed Decomposed Granite Soils”, Proc. of the 8th Asian Regional Conference on SMFE, Vol. 1, pp. 193-196.
6. 松尾 捻, 經部大歳.(1966) “室内せん断試験結果 設計への適用に際する 2, 3 の問題点”, 第11回土質工學シホシウム, pp. 98.
7. Brand, E. W. and Phillipson, H. B.(1985) “Review of International Practice for the Sampling and Testing of Residual Soils”, Scorpion Press, Hong Kong. 7-21.
8. Mitchell, J. K.(1976) “Fundamental of Soil Behavior”, John Willy & Sons, Inc, New York.
9. Scott, R. F.(1963) “Principles of Soil Mechanics”, Addison-Wesley, Reading, Mass.
10. Rowe, P. W.(1964) “Stress-Dilatancy, Earth Pressures and Slopes”, ASCE, Vol. 90, SM 4, pp. 145-180.
11. Taylor, D. W.(1948) “Fundamentals of Soil Mechanics”, Willy, New York.