

서울화강암과 화강풍화토 경계면에서의 전단거동 특성 연구

이 수 곤 · 임 창 호
(서울시립대학교 토목공학과)

A study on shear strength characteristics on the Seoul Granite rock – residual soil boundaries

Lee, Su Gon · Lim, Chang Ho

ABSTRACT

It is common that the soil layer is few meters below the earth surface and there are rock masses below the soil layer in the view of geological characteristics in Korea. The boundary between rock and soil is clearly divided. When dealing with the stability of rock masses, as in the case of rock slopes or dam foundations, the majority of the collapses is not within the soil layer, but within the soil-rock boundary. Therefore it is important to identify the shear strength characteristics between soil-rock contacts. It has been common practice to assume that the strength of the soil or shale represents the minimum strength present. However, it has been suggested by Patton(1968) that such an assumption may not be valid and that lower shear strengths might be obtained along the soil-rock interface than for either material alone. Then, in this thesis, introduce Seoul Granite-residual soil shear strength tests and the specimen preparation and testing procedures are described in detail and also the testing results are presented and discussed.

Key Words : Soil-Rock contact, Seoul Granite-residual soil, Shear Strength,
JRC

I. 서론

흙의 자중 또는 외력의 작용에 의해 토괴 내부에 전단응력이 생기면 토괴는 변형되고 변형이 크게 되면 결과적으로 토괴는 파괴가 일어나는데 이때 토괴가 나타내는 최대 전단저항을 그 흙의 전단강도라고 한다. 전단강도는 사면의 안정문제 외에 토압 지지력등 지반의 안정문제에 실제로 이용되는 흙의 성질이어서 실제 문제를 해결에 무시될 수 없는 것이다. 그러나 흙의 전단강도는 흙을 파괴시키고자 할 때의 조건에 따라 달라지기 때문에 실제로 지반공학 문제에 적용할 경우에는 그 흙이 지반 중에서 받는 것과 같은 조건하에서 발휘되는 최대 전단저항을 구해야만 한다.

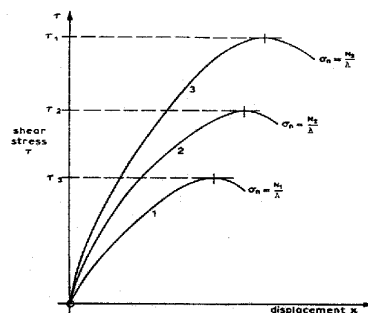
우리나라의 지질구조를 볼 때 토층은 지표면 아래로 수미터 이내로 존재하고 그 아래에는 암반이 존재하는 경우가 대부분이며 대체로 토층과 암석의 경계가 뚜렷한 것이 특징이다. 따라서 암반사면이나 댐기초에서 암반의 안정성 문제를 다룰 때 연암층과 경계를 가지는 토층과의 경계면에 대한 전단강도특성을 파악하는 것이 사면안정성 분석에 무엇보다 중요하다. 이러한 연약면들은 잠재적인 파괴가능성을 내포하고 있다. 일반적으로 soil 이나 셰일이 최소 전단강도를 나타낸다고 가정하는 것이 일반적인데 Patton(1968)은 한가지의 시험재료보다 soil-rock 접촉면에서 더 낮은 강도가 얻어질 수 있고, soil 이나 셰일이 최소강도를 나타낸다는 가정은 타당하지 않을 수도 있다고 제안했다. 그 후 soil과 rock 단독으로 얻어진 전단강도와 soil-rock 접

촉면에서의 전단강도 연구가 시작되었다 (Kanji,1974). 본 논문에서는 서울화강암과 화강암의 잔류토를 대상으로 시험하였고, soil-rock 접촉면에서 전단강도를 측정할 수 있도록 고안된 시험법과 그 결과에 대하여 연구하였다.

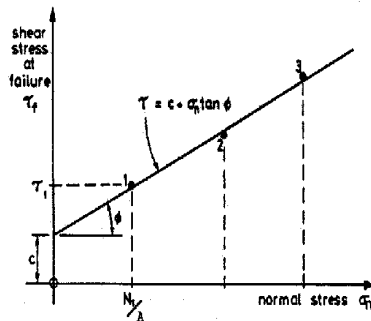
II. 이론적 고찰

2.1 Coulomb 의 파괴규준

전단강도의 기본 이론은 어떠한 평면을 갖는 두 물체를 그 면을 따라 미끄러짐이 발생시킬 때 발생하는 역학관계에 따른다. 한 면에 맞대어져 있는 두 물체에 수직응력(σ)이 가해져 있는 상태에서 전단하중(τ)을 발생시키면 전단변위(u)가 발생하는데 초기의 작은 변위 내에서는 접촉면이 탄성거동을 하며 전단응력은 변위에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 그러나 저항하고 있는 면사이의 힘들이 극복되면 그래프는 비선형적으로 변하고 전단응력은 최대값에 이르게 된다. <Fig 2.1> 과 <Fig 2.2> 는 각각 다른 수직응력하에서의 전단응력을 도시화하여 점착력(c)와 마찰각(Φ)을 구할 수 있다.



<Fig 2.1> 3개의 다른 수직응력에서 변위와 전단응력곡선



<Fig 2.2> 전단시험에서 수직응력과 관련된 최대전단응력도

2.2 지수함수의 파괴규준

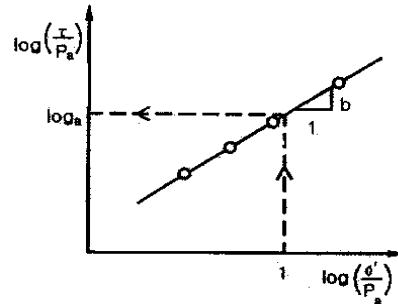
실제로 직접전단시험에서 수직응력이 증가하면 직선의 형태보다 포물선의 형태로 약간 굽어지게 되는데 이를 지수함수로 표현을 하면 그러한 경향을 비교적 잘 나타낼 수 있다. 그러나 이 지수함수의 파괴규준에는 점착력의 항이 없다. 다시 말하면, 수직응력이 0때 전단응력의 절편이 0이 되게 된다. 최근에 직접전단시험은 현장 유효 연직응력 범주가 실내 시험에 재현 적용되지 않기 때문에 지수함수로 표시한 경우가 잘 일치하는 것으로 생각할 수 있다고 보는 경향이 있기에 좀더 자세히 시험결과를 통해 알아보겠다. 먼저 지수함수의 강도 포락선을 그리기 위해 지수함수로 표현하면 아래식과 같고,

$$\tau = a \times Pa \times \left(\frac{\sigma}{Pa} \right) \quad (1)$$

여기서, a 와 b 는 무차원이고 Pa 는 τ, σ 와 동일한 단위를 가진 대기압 1.0 kg/cm^2 으로서 차원을 고려하기 위해 사용하였다.

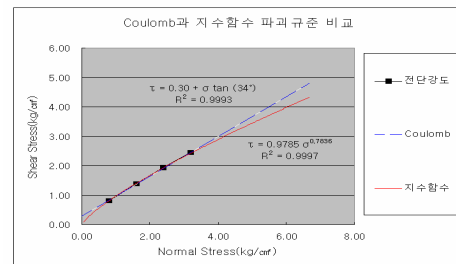
$$\log\left(\frac{\tau}{Pa}\right) = \log a + b \cdot \log\left(\frac{\sigma}{Pa}\right) \quad (2)$$

추세선을 그리기 위한 방법으로 양변에 $\log_{10}$ 을 취하고 도시하면



<Fig 2.3> log로 나타낸 지수함수파괴규준

가 되고 x 축이 1일때 y 축값이 $\log a$ 가 되고 직선의 기울기는 b 가 된다. 여기서 구한 a, b 를 지수함수 식에 대입하여 추세선을 그리면 다음과 같고 Coulomb의 파괴규준과 비교하면 <Fig 2.4>와 같다.



<Fig 2.4> Coulomb과 지수함수의 파괴규준 비교

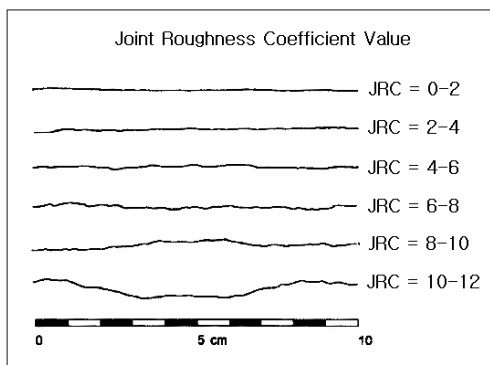
2.3 암석절리면의 거칠기(JRC)

기본적인 개념으로 JRC(Joint Roughness Coefficient)는 절리면의 거칠기를 수치적으로 나타내는 값으로서 일반적으로 절리 거칠계수라고 부른다. 이 JRC는 Barton(1973)이 제안한 것으로 각 절리면의 형상을 거칠기의 정도에 따라 구분하여 0 ~ 20 까지의 점수를 부여하고 있다. 그러나 이 JRC는 어떠한 정확한 물리적 측정에 의하여 계산되어진 것이 아니라 경험식에서 역으로 도출된 지표

이기 때문에 측정 방법에 따라 다소간의 차이가 발생할 수 있으며, 개인간의 차이도 발생할 수 있다. 아직까지 JRC는 그 자체 만으로 절리면의 특성을 구분할 수 있는 좋은 지표가 되며, JCS 등과 더불어 Barton이 1973년에 발표한 다음식을 사용하여 절리면의 전단특성을 예측하는데 유용하게 사용된다.

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{K_{CS}}{\sigma'_n} \right) + \phi' \right] \quad (3)$$

JRC측정에는 Barton & Choubey(1977)가 제안한 <Fig 2.5>를 사용하는 방법을 많이 쓴다



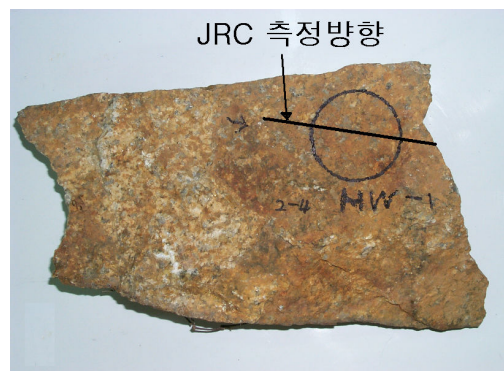
<Fig 2.5> 표준거칠기 종단면 및 JRC값

III. 실내 시험

시험에 쓰인 각각의 잔류토 시료와 암석시료에 대한 준비과정과 전단강도 측정을 위한 비교적 간단한 토질전단시험, 암과 흙 경계면에서의 시험을 간략히 소개하면 다음과 같다.

우선, 시험에 쓰인 재료의 선정은 soil-rock 접촉면의 전단강도를 얻는데 필요하고 soil 단독시험과 비교할 수 있

는 최소한의 변수로 한정하였다. 기본적으로 화강 풍화토의 시료채취는 현장에서 ring sample을 사용하였고, 불교란 시료를 채취하여 수분증발을 막기 위해 비닐 Wrap으로 포장한 뒤 아이스 박스에 담았다. 암석시료는 연암 정도의 강도를 가지며 우리나라 대표적인 JRC(S.G. Lee, 1987)를 포함하며 JRC(0(saw cut), 2~4, 4~6, 6~8, 8~10, 10~12)를 달리하는 화강암을 준비하였고 <Fig 3.1>에서와 같이직선방향으로 JRC를 측정하였다.



<Fig 3.1> 암석블록의 JRC측정과 전단방향

다음과 같이 정확한 결과를 얻을 수 있도록 알맞은 수의 시험을 실시하였다. 추가적인 시험조건은 다음과 같다.

- 각각의 soil 과 rock 표면에 대해 4개의 다른 수직응력 조건으로 시험하였다.
- 시험 Data의 편차를 없애기 위해 각각의 시험마다 3회 반복하여 평균값을 사용하였다.

3.1 화강풍화토의 물성시험

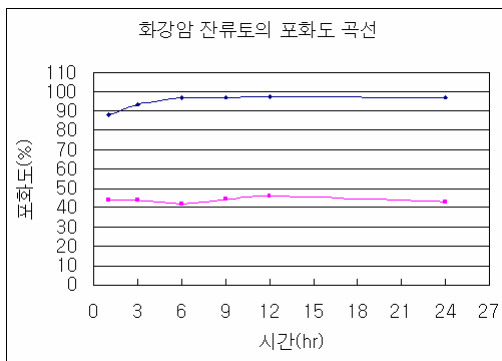
실내시험에 쓰인 시료는 서울 화강암(경기도 포천) 잔류토를 대상으로 시험하

있고 잔류토에 대하여 채분식, 비중시험, 함수비, 포화도 시험을 하여 분류하였다.

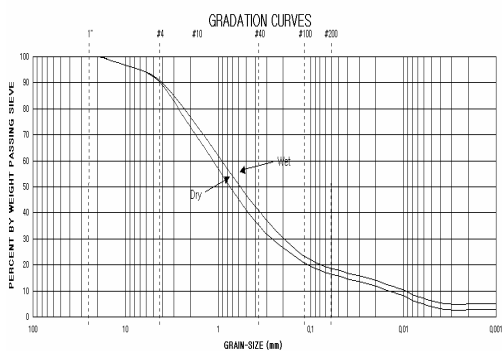
자연상태	단위중량 (t/m ³)	함수비 (%)	포화도 (%)	Gs	LL	PI	USCS	포화도 시험결과 (95% 도발시간)
화강암잔류토의 평균값	1.72	14.2	51.2	2.58	NP	NP	SM	5

<Table 3.1> 화강암 잔류토 10개의 Ring sample 의 물성치

포화도 곡선은 습윤상태에서 전단시험 할 때 침수시간을 측정하기 위하여 시험하였고, 그 결과 포화도가 약 95%에 도달하는 약 5시간 정도로 하였다.



<Fig 3.2> 화강암 잔류토의 함수비 곡선

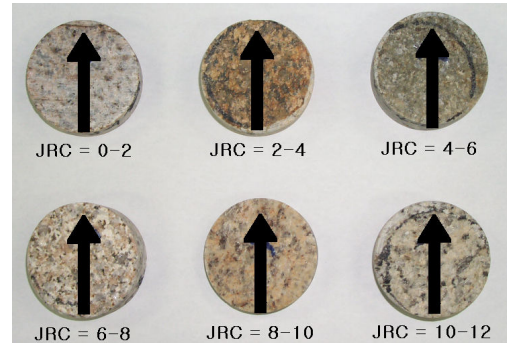


<Fig 3.3> 체분식결과

3.2 암석시료의 준비

시료는 도봉산에서 채취하였고 이 지역의 지질특성은 서울 화강암(Seoul Granite)과 호상편마암이 대체로 N10°E

방향으로 경계선을 이루며 접해 있다. 슈미트 해머 수치는 40~45정도이다. <Fig 3.4>는 화강암 블록을 <Fig 3.1>에서 보는 바와 같이 미리 표시해둔 형태로 천공하여 JRC에 따라 제작하였다.

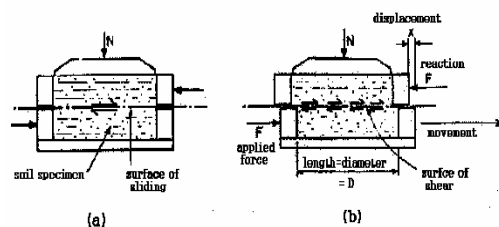


<Fig 3.4> 서울화강암의 전단방향과 JRC

3.3 시험기자재 및 절차

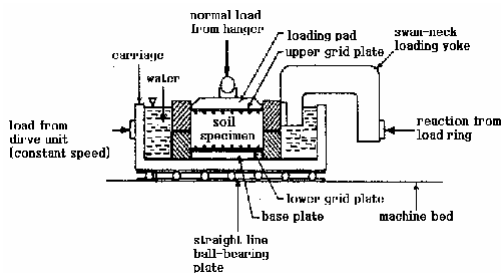
1) 토질전단시험

전단시험은 간편하면서도 오래되었고, 전체 응력에 대한 흙의 전단강도를 알 수 있으며 이해하기도 쉽다. 간단히 말하자면 '마찰각' 시험 이라고 할 수 있는데 수직하중이 일정하게 주어지는 동안 점차적으로 증가하는 수평 전단응력에 의해 한 개의 분할면이 미끄러지도록 만든 시험이다. 전단이 되는 과정에서 응력/변위의 곡선을 그릴 수 있도록 두 개의 분할면에 대한 상대변위와 전단력이 측정된다



<Fig 3.5> 전단시험의 원리: (a) 전단시작, (b) 상대변위발생

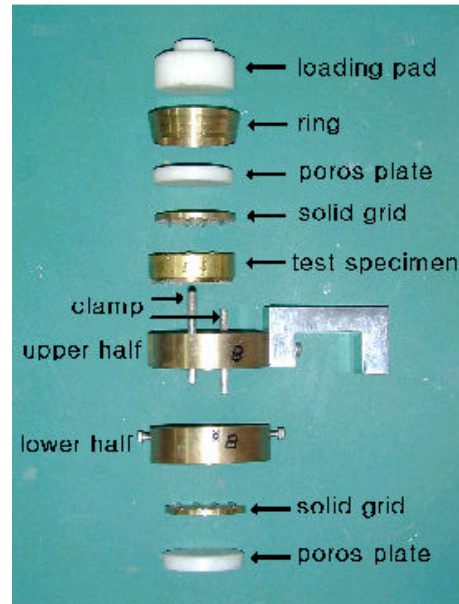
전단시험기의 배열은 다음과 같다



〈Fig 3.6〉 변위제어에 의한 전단시험기의 배열

시험절차는 다음과 같다.

- ① 현장에서 채취한 불교란 시료를 트리밍한다.
 - ② <Fig 3.7>와 같은 순서로 시료를 배치한다.
 - ③ 전단상자에 물을 부어 포화시킨다.(포화도를 참조)
 - ④ LVDT를 통한 계측기의 수치를 0로 맞춘다.
 - ⑤ 수직하중을 가하여 압밀시킨다.(수직변위가 정지할때까지)
 - ⑥ 고정나사를 풀고 전단프로그램을 실행시켜 데이터를 저장한다.
 - ⑦ 전단한다.(전단속도 = 0.3mm/min)
 - ⑧ 동일시료를 수직하중만 달리해서 전과정을 3회 반복한다.
- 직접전단시험의 결과는 배수조건에 따라 세가지의 방법으로 나뉜다
- ① 수직하중 재하 후 시료가 압밀되기전에 급속히 전단시키는 급속시험
 - ② 수직하중 재하 후 시료의 수직변위가 정지할 때까지 기다린 다음 급속히 전단시키는 압밀 급속시험
 - ③ 수직하중 재하 후 압밀이 완료될 때까지 기다린 다음 간극수압이 발생하지 않도록 천천히 전단시키는 압밀완



〈Fig 3.7〉 전단시험기 배치순서

소 시험

본 논문에서는 간극수압의 효과를 최대한 억제하기위해 ③번의 시험방법으로 시험하였다.

전단시험의 장단점은 다음과 같다.

단점

- 1) 흙 시료가 미리 정해진 전단면을 따라 파괴되도록 되어있다.
- 2) 전단면에서의 응력분배가 일정하지 못하다.
- 3) 전단비율을 조정하지 않는한 배수조건을 조절할 수 없다.
- 4) 간극수압을 측정할 수 없다.
- 5) 흙시료의 변형이 전단링의 크기에 제한되어 있다.
- 6) 전단과정에서 두 분할면의 접촉면적이 감소하게 된다. 그러나 그 효과는 수직응력과 전단응력에 같은 비율로 작용하기 때문에 Coulomb의 파괴곡선

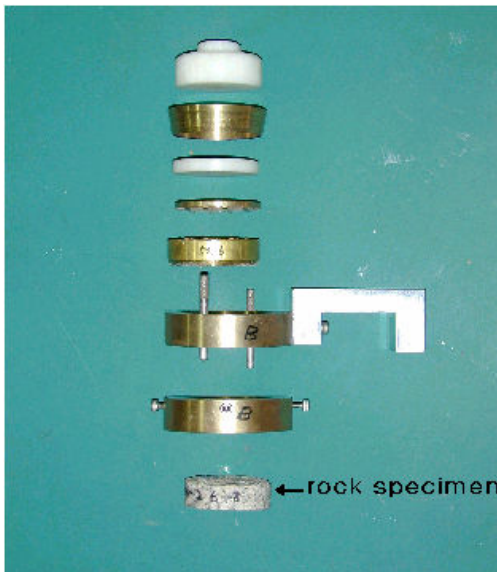
을 그릴 때 일반적으로 무시된다.

장점

위의 단점에도 불구하고 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 다소 빠르고 시험하기 간단하다.
- 2) 기본원리가 이해하기 쉽다.
- 3) 시료의 재성형이 쉽다.
- 4) 암석과 흙, 흙과 다른 공학적 재료(알루미늄, concrete 등)와도 시험이 가능하다
- 5) 다단계시험을 통해 잔류전단강도를 측정할 수 있다.

2) 경계면 전단시험



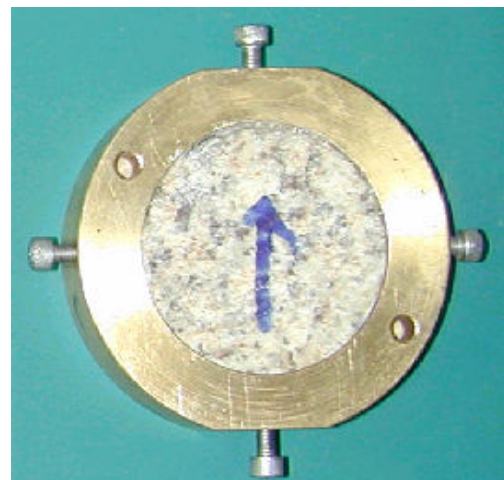
〈Fig 3.8〉 경계면전단시험 배치순서

기본적인 개념은 토질 전단시험과 동일하지만 암석을 고정시킬 수 있도록 고안된 하부 링, 암석시료의 배치와 암석 코어 준비등이 조금 달라진다. 조립순서는 <Fig 3.8>에서와 같고 토질전단시험과 다르게 하부링에 암석시료만 고정되

고 solid grid와 poros plate는 들어가지 않는다.

① 하부 링

하부링에 암석을 고정시킬 때 효과적인 방법으로 제안된(Kanji. M. A.1974) 금속썰기를 하부링의 밑면에서 삽입시키는 방법보다 링의 네 측면에서 나사로 고정시키는 방법을 사용하였다.



〈Fig 3.9〉 하부링에 암석을 고정시킨 모습

② 암석 시료의 배치

암석시료는 상부링과 하부링중에서 상부링은 수직하중이 일정하게 가해지는 때문에 흙시료에 생기는 수직변위에 대응하기 어렵다. 따라서 하부링에 글루를 이용 밑부분을 고정을 시킨다.

③ 암석시료 코어링

현장에서 채취해온 암석 블록을 최대한 천공기 코어비트 날의 면에 평행이 되도록 배치하고 내경 60mm 다이아몬드 코어비트로 천공을 한다.

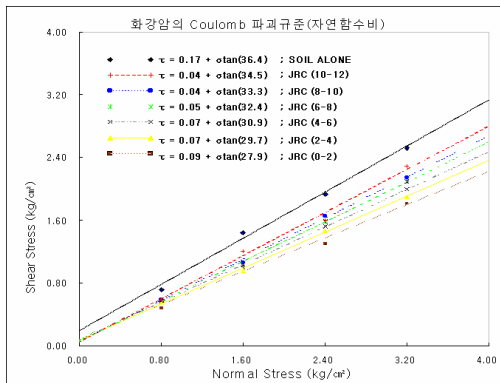
시험절차는 토질전단시험과 동일하지만 soil은 수직응력의 증가에 따른 압밀

이 충분히 되도록 시간을 조절하였다. 모든 시험은 현지조건과 습윤 조건하에서 이루어졌고 전단속도는 0.3mm/min로 하였다. 수직응력은 최대높이가 약 20m 인 토사사면을 기준으로 0.8kg/cm²부터 3.2kg/cm²까지 4단계로 증가시키며 재하하였다. 최대 전단 변위는 시료전체길이의 15%인 9mm로 하였다.

IV. 시험결과 및 결론

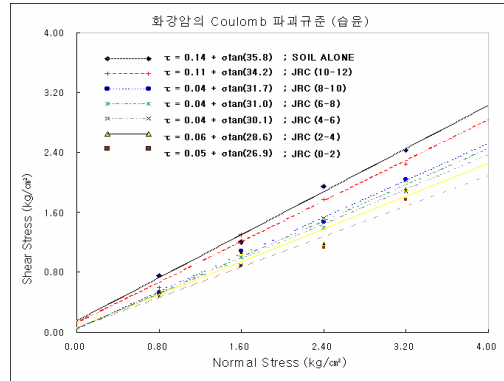
최대 전단강도 발생시에 soil 과 soil-rock 접촉면의 시험에서 Coulomb과 지수함수 파괴기준에 의한 c(마찰계수)값과 Φ (전단저항각)값이 나와있다.

4.1 Coulomb의 파괴기준에 의한 결과



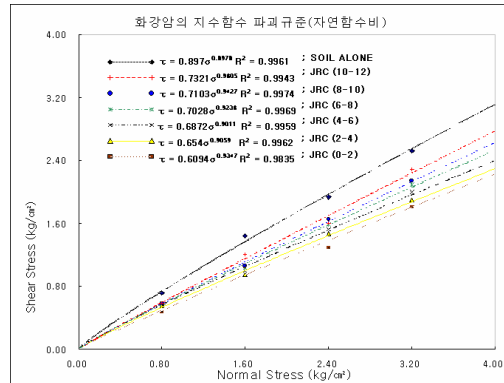
〈Fig 4.1〉 자연함수비에서 Coulomb의 파괴기준

Coulomb의 파괴기준에 의한 결과는 전체적으로 암석표면의 JRC가 낮아짐에 따라 전단저항값이 낮아지는 경향이 있으며, 자연 상태보다는 습윤상태 즉, 함수상태일때 더욱 작아지는 경향을 보인다.

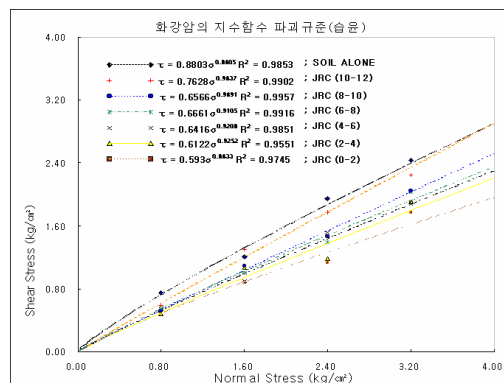


〈Fig 4.2〉 습윤상태에서 Coulomb의 파괴기준

4.2 지수함수의 파괴기준에 의한 결과



〈Fig 4.3〉 자연함수비에서 지수함수의 파괴기준



〈Fig 4.4〉 습윤상태에서 습윤상태의 파괴기준

지수함수 파괴기준에 의한 결과는 위의 그림에도 나타나듯이 전체적인 경향은 보이지만 단순히 전단저항각만을 비

교해볼때는 데이터의 분산에 의해 값의 차이가 날 수 있고, 지수함수의 파괴규준을 사용하는 목적이 높은 수직응력수준에서의 전단강도와 저항각을 보는것이기에 단순 비교는 어렵다고 판단되어진다.

4.3 결과분석

JRC	마찰각 $\phi(^{\circ})$: 토질시험에 대한 백분율		습윤/자연의 백분율
	화강암		
	자연	습윤	
토질	36.4(100%)	35.8(100%)	98%
10~12	34.5(94%)	34.2(96%)	99%
8~10	33.3(91%)	31.7(89%)	95%
6~8	32.4(89%)	31.0(87%)	96%
4~6	30.9(85%)	30.1(84%)	97%
2~4	29.7(82%)	28.6(80%)	96%
0~2	27.9(77%)	26.9(75%)	96%

<Table 4.1> 종합결과

1. soil-rock 시험에서는 soil 단독시험에서 보다 c , ϕ 값이 작으며, JRC값이 작아짐에 따라 전단 저항각이 작아짐을 알 수 있다.
2. soil alone에서의 전단 저항각을 1로 볼 때 soil-rock 시험에서는 JRC에 따라 현지함수비 조건에서 약 77% ~ 94% , 습윤조건에서 약 75% ~ 96% 까지 산출되었다.
3. Coulomb과 지수함수 파괴규준을 비교할 때 수직응력수준이 낮은 범위 ($0 \sim 2\text{kg/cm}^2$)에서는 지수함수 파괴규준의 전단 저항각이 높게 나오지만 높은 수직응력수준($5 \sim 10\text{kg/cm}^2$ 이상)에서는 Coulomb의 파괴규준의 전단 저항각이 높아진다.
4. 흙 입자가 작아질수록 전단 저항각이 낮아지는 경향이 있다.

V. 결론

서울화강암과 화강암 잔류토 접촉면에서의 전단시험결과로부터 유출된 결론은 다음과 같다.

1. 암사면이나 댐기초에서 암반의 안정성 문제를 다룰 때 연암층, 풍화암층 위에 존재하는 토사를 자주 접하게 된다. 토사가 경사진 암반 사면 위에 존재하게 되면 지질학적인 요인에 의해 soil-rock 접촉면이 평탄하게 되거나 낮은 JRC값을 갖게 된다. 이들은 JRC가 낮을 수록 전단 저항각이 낮아지게 되는데 이는 현장에서 안전진단 시 시험이 반드시 고려되어야 할 것이다.
2. 전단시험결과에서 Coulomb과 지수함수 파괴규준을 비교할 때 시험결과에서도 알 수 있듯이 수직응력 수준이 $5 \sim 10\text{kg/cm}^2$ 이 되려면 상부에 약 30m 이상의 토사가 존재할 때 가능할 것이다. 따라서 암석 절리면 전단시험이 아닌 이상 Coulomb의 파괴규준을 사용하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.
3. 마지막으로 soil-rock 접촉면에서 낮은 JRC를 갖는 암이 존재할 경우 파괴는 기대한 것 보다 적은 값에서 발생할 수 있기 때문에 soil 자체보다도 위험하다.

<참고문헌>

1. Kanji M.A. (1974). Unconventional Laboratory Tests for the Determination of the Shear Strength of Soil-Rock Contacts. *Proc. of the 3rd Congress of ISRM*. Denver 2, pp.241-247
2. Patton, F.D. (1968). The determination of shear strength of rock masses, *Paper presented to the Terrametric course of Measurement Systems for control of Construction and Mining*, Denver, Col. pp.37
3. S. G. Lee. (1987). *Weathering and geotechnical characterization of Korean granites*. PhD thesis, Imperial College, University of London.
4. K. H. Head (1981). Manual of soil laboratory testing vol.2. second edition. pp509~580, vol.1.pp159~234.
5. Patton, F.D., (1968), The determination of shear strength of rock masses, Paper presented to the terrametric course on measurement systems of control of construction and mining, Denver, Col. pp 37.
6. Jeager, C. (1972), *Rock Mechanics and Engineering*, Cambridge University Press.
7. 김용필외 2인 (1997). *지반공학 시험법 및 응용* pp 37~50, pp 283~310
8. 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회, 한국자원연구소 (1999) . *건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술*. pp 474.
9. 임창관. (1999). 화강암과 풍화토 경계면에서의 전단강도 특성. 석사학위논문, 중앙대학교 건설대학원, pp.23-25