

화강토 지반 절취사면의 풍화특성에 관한 연구

A Study of Characteristics on Weathering for Decomposed Granite Soils in Cutting Slope

이 송*
Lee, Song

김주현**
Kim, Ju-Hyun

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate shear parameters on cutting slope of weathered granite soils by using small dynamic cone penetration test on the very moment of its cutting. The results were ; On the relations among N_c , Li , and CEC , the condition of $Li > 6\%$, $CEC > 14(\text{meq}/100\text{g})$ corresponds to that of N_c values of $2 \sim 30$, and $3 < CEC < 14(\text{meq}/100\text{g})$ to $N_c = 30 \sim 50$. Comparing the smallest penetration depth from two small dynamic cone penetration tests done at 5m below from the top of the slope on April 15th, October 31st, there was a 10cm difference. So we could find out the degree of weathering on the slope. And dividing the difference by 190 days (the whole testing time), we could know it's being weathered 0.052mm each day. The more N_c value increases, the more shear parameters(internal friction angle ; ϕ , cohesion ; c) increase at a standard pressure($\sigma > 32\text{kPa}$). So the condition of $N_c = 2 \sim 50$ corresponds to that of $\phi = 27 \sim 50$, $c = 12 \sim 49\text{kPa}$. From the above testing results, the N_c values more correspond to ϕ values than c values. In conclusion, this study suggests that on small dynamic cone penetration test a penetration boundary line of 5 centimeters is decided at around $Li = 4\%$, $CEC = 3(\text{meq}/100\text{g})$ which is classified as a strong weathering soil. It also shows that as Li increases CEC increases as well, while N_c decreases.

1. 서론

화강토는 세계 여러 지역에 분포되어 있으며 우리 나라 건설현장에서도 쉽게 접할 수 있다. 화강토는 성토재료나 기초지반으로 이용되기도 하는데 특히 절개 지반에 이용될 경우 우기시 절개 사면의 붕괴가 자주 발생한다. 이와 같은 경우에 의한 화강토 사면의 붕괴 원인은 간극수압의 상승, 지반토의 단위중량증가, 풍화작용 등이 복합적으로 작용하지만 특히 풍화가 사면붕괴의 중요한 원인 중의 하나이다. 따라서, 원지반에 대한 전단정수의 정확한 파악이 중요하다. 원지반의 전단정수의 결정은 불교란시료를 채취하여 이루어져야 하는데 시료채취가 까다롭고 성형시 실패할 확률이 높다. 그러므로 현장에서 풍화의 진행정도를 추정하여 실내시험결과와의 상관성을 설정할 수 있다면 매우 편리하다. 또한 절토사면에서 표층부로부터 대략 1m 정도의 풍화의 진행정도가 사면붕괴에 직접관계되므로 그에 대한 풍화의 정도를 평가하고 전단정수를 파악하는 것이 중요하

* 서울시립대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

고 또한 필요한 사항이다. 따라서 본 연구는 주로 화강토지반 절개사면에서 불교란 시료를 채취하여 전단정수를 측정하고 아울러 사면의 표층부에 관입시험을 실시하여 5cm 관입되는데 필요한 타격횟수의 측정을 통해서 상관성을 규명하고자 한다.

2. 시험방법

2.1 시험종류

본 연구는 ○○지구에 위치한 화강토 절토사면을 대표지반으로 선정하여 교란 및 불교란시료를 채취하였으며 교란시료는 물성시험, 강열감량시험(Ignition of Loss, 이후 Li라 칭함), 양이온교환용량시험(Cation Exchange Capacity, 이후 CEC라 칭함)을, 불교란 시료에 대해서는 직접전단시험(E.L.E)을 실시하였고, 화강토 절토사면의 시간에 따른 풍화진행 여부를 개략적으로 판단할 목적에서 간이 동적 콘관입 시험기를 제작하여 현장시험도 병행하였다.

2.2 시료의 채취 및 성형

불교란 화강토의 시료채취 방법은 본 연구에서는 못을 박아 채취하는 방법과 Block법을 병행하여 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 즉시 랩으로 감아 함수비의 변화를 방지한 후 실내로 반입하여 분할사용하였다. 또한 시료의 성형은 직경이 6.3cm이고 높이가 2cm인 소형 커터를 이용하여 시료상부에서 정적으로 압입한 후 커터 주변을 조심스레 잘라내어 시험용 시료를 준비하였다.

2.3 시험방법

현장에서 실시하는 간이 동적 콘관입시험은 주로 절·성토사면의 표층부에 적용되는 시험으로 일본(JGS 1433-93) 규정에 따라 제작하였으며 시험방법은 Rod에 콘을 부착하고 5kgf의 해머를 낙하고 50cm 높이에서 자유낙하시켜 콘이 5cm 관입될 때의 타격횟수를 측정하는 것으로 이 측정값을 N_c 라 한다. 타격횟수가 50회를 초과할 경우 관입을 중지한다. 그리고 콘의 선단각은 30°, 45°, 60°를 사용하였으며, 저면적은 4.9cm²를 갖는다. 이와 같은 규정을 통해서 얻은 타격회수 N_c 를 통해서 여러 가지 공학적 성질과의 상관성을 연구하였다. 실내시험인 직접전단시험은 상하로 분리된 원형전단상자(D=6.3mm, H=2mm)속에 시료를 넣고 수직하중을 가한 상태로 수평력을 가해 전단상자가 상하로 분리된 면을 따라 강제로 전단시키는 방법으로 전단속도는 0.5mm/분으로 하였으며 수직하중은 최저 6.5kPa부터 7단계(저압부 : 6.5, 13, 19.5, 보통압 : 32.5, 65, 97.5, 130)로 재하를 실시하였다. Li는 건조토를 상온에서 1000℃ 까지 온도를 올려서 감량되는 양을 측정하여 건조도에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

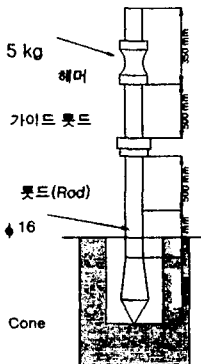


그림1. 소형동적콘관입시험기 개요

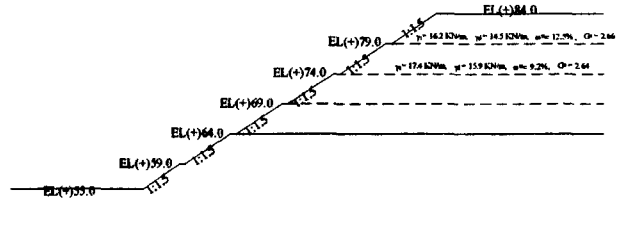


그림2. ○○지구 절토사면 단면도

즉, Li는 화강토뿐만 아니라 토립자의 2차 광물을 함유하고 있는 경우에는 그 함유량을 연소시켜 감량되는 양으로서 풍화의 판정에 이용되는 지표이다. 또한 CEC는 점토입자가 흡착할 수 있는 교환성이온의 최대량으로서 통상 노건조도 및 점토 100g 당의 밀리그램당량 meq 으로 표현하거나 또는 1kg 당의 cmol⁺로 나타낸다. CEC 측정은 1N- NH₄OAc법, 즉, 초산암모늄법으로 1N-NH₄OAc (pH 7.0) 용액으로 2.0mm체 통과시료를 통과시켜 즉효성인 NH₄⁺로 포화시키고 초산 암모늄을 80% 알콜로 세척한 후 NH₄⁺ 포화도를 Kjeldahl 증류장치에 의해 직접 정량하여 CEC를 산출한다.

본 연구에 사용된 간이 동적 콘관입 시험기의 개요 및 현장시험이 실시된 절토사면의 단면도는 각각 그림1과 그림2 에 나타냈다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 소형 동적 콘관입 시험

○○지구 화강토지반 절토사면에서 시간간격을 두고 소형 동적 콘관입 시험을 실시하여 관입깊이의 변화정도를 측정하고 전단정수 및 풍화측정결과(Li, CEC)와의 상관성을 얻는데 초점을 맞추어 2단(-10m)에서 시험을 실시하였다. 2단(-10m)은 Li≒4%, CEC≒10(meq/100g)로 나타났다. 2단(-10m)에서는 4월 15일에 1차 현장 시험을 실시하였는데 그에 대한 시험결과를 그림 3에 나타냈다. 심도가 깊어질수록 N_c가 증가하는 것으로 나타났으며 심도 -40cm 부근에서 N_c=50의 값을 얻을 수 있었다.

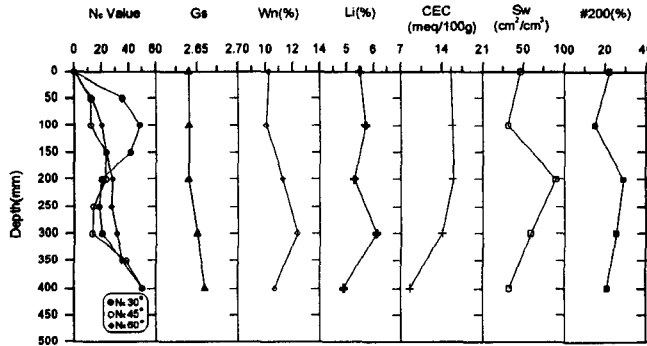


그림3. 심도에 따른 물성 및 풍화도 평가(4월15일, -10m)

대략 6.5개월(190일)이 경과한 후에 2단(-10m)에서 실시한 2차 현장시험에 대한 결과를 그림4에 나타냈다. 그림3에서 알수 있는 것과 같이 전체적으로 1차 현장시험 결과값과 비교할 때 관입깊이가 10~15cm 정도 증가하는 것으로 나타났는데 이를 통해서 N_c=50 부근에서 상대적으로 풍화가 활발하게 진행되는 것으로 판단된다. 1차시험(4월15일)과 2차시험(10월31일)에서 나타난 각각의 결과 값에 대해서 최소관입깊이를 놓고 비교해 볼 때 관입깊이에 있어서 10cm 차이가 발생하였다. 따라서 이 값을 시험을 실시한 시간간격인 190일로 나누면 하루에 대략 0.052mm씩 풍화가 진행되는 것으로 판단해 볼 수 있다. 한편, 시간경과에 따른 콘의 관입깊이의 변화와 전단정수와 상관성을 찾는다면 풍화도를 고려한 화강토 절개사면의 합리적인 사면설계가 가능할 것이다. 또한 콘의 각도에 따른 타격횟수가 달라지는데 이는 콘각도에 따른 관입되는 지반에서의 마찰저항력의 차이, 관입시험을 실시한 지반의 비균질성, 시험자에 따른 오차, Rod의 주변마찰력 때문으로 판단된다.

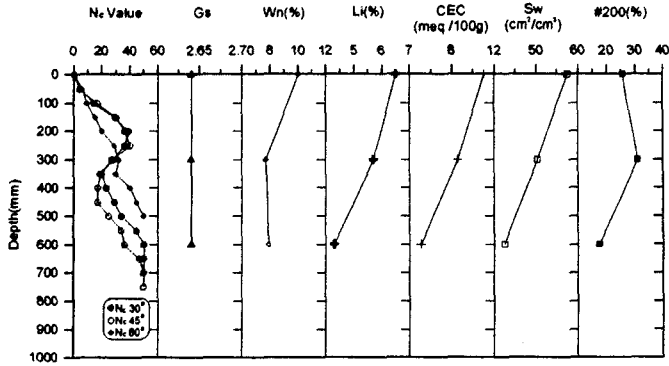
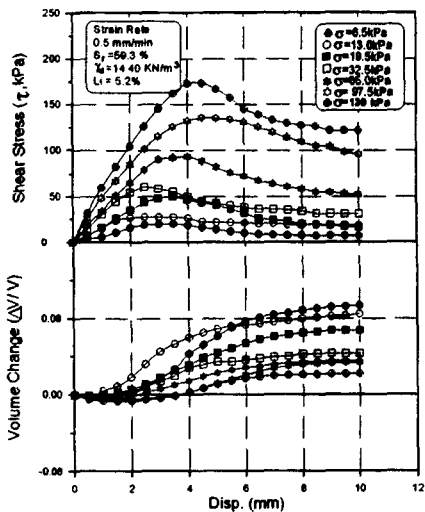


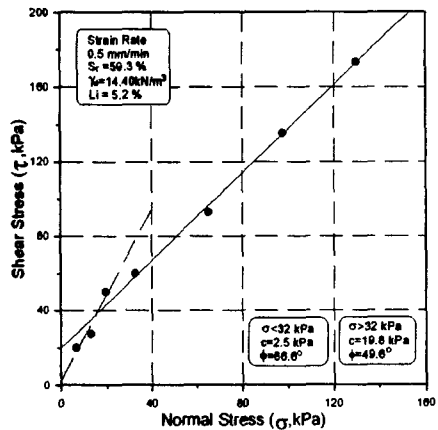
그림4. 심도에 따른 물성 및 풍화도 평가(10월31일, -10m)

3.2 직접전단시험

본 연구에서 직접전단시험을 통한 전단정수의 결정은 전단강도-전단변위 곡선에서 Peak 강도를 택하여 파괴포락선으로부터 전단정수를 결정하였다. 여기서 시간간격을 두고 화강토지반 절개사면에서 채취한 시료를 사용하여 소형 동적 콘관입 시험에서 얻은 N_c 와의 비교를 통해서 전단정수를 결정하고 이들의 변화를 비교분석하였다. 절개사면의 2단(-10m)에서 불교란 시료를 채취하여 시험을 실시하였다. 그림5에서 그림(a)는 수직응력을 7단계로 나누어 시험한 전단강도-전단변형-체적변화를 나타내는 그림이고, (b)는 전단응력과 수직응력의 관계를 나타낸 그림이다. 그림5에서 알 수 있는것과 같이 명확한 Peak 전단강도가 나타나는 경화-연화현상을 보이는데 이는 입자간 Interlocking과 전단중에 발생하는 Dilatancy의 영향으로 판단된다. 그리고 저압부와 보통압부에서의 전단강도-전단변위 관계를 살펴보면, 저압부에서는 통상적으로 2~4mm 내외에서 Peak 강도가 발생하였고, 보통압부에서는 통상적으로 4~5mm 내외에서 Peak 강도가 발생하였다. 통상의 4단계(보통압부)를 재하여 직선으로 전단정수를 추정하는 경우에 비해 파괴포락선이 직선이 아닌 곡선의 형태로 나타났다.



(a) 불교란화강토의 $\tau - \epsilon_v - Disp.$ 의 관계



(b) 불교란화강토의 $\tau - \sigma$ 의 관계

그림5. 직접전단시험의 결과(심도-10m(2단)-30cm, 10월 31일)

3.3 Nc와 전단정수 및 풍화도(Li, CEC)와의 상관성

화강토지반 절개사면에서 이루어진 소형 동적 콘관입 시험의 타격횟수와 불교란화강토의 직접 전단시험에서 얻은 전단정수와의 관계는 그림5~7에 나타났다. 그림5에서 점착력은 저압부, 내부마찰각은 보통압부 그리고 그림6에서 점착력과 내부마찰각 모두 보통압부에서 얻은 값을 또한 그림7에서 점착력은 저압부와 보통압부 모두를 나타냈고 내부마찰각은 보통압부에서 얻은 값을 나타냈다.

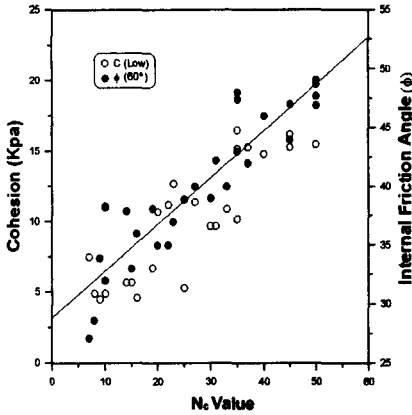


그림5. Nc와 (c,(보통압)) 및 φ의 관계

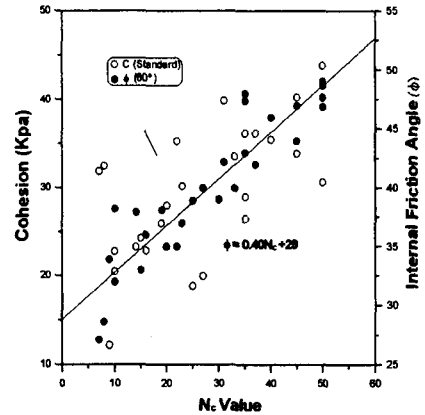


그림6. Nc와 (c,(보통압)) 및 φ의 관계

또한 타격횟수는 콘의 각도 30°, 45°, 60° 중 외국에서 일반적으로 사용하는 각도 60°를 통해서 각각의 상관성에 대해서 비교분석하였다. 그에 대한 결과를 살펴보면 타격횟수가 증가할수록 보통압부에서 얻은 전단정수가 증가하였는데 $N_c=2\sim50$ 에 대응되는 내부마찰각은 27~50°, 점착력은 12~49kPa의 범위로서 결과값을 놓고 볼 때 점착력보다는 내부마찰각이 좋은 대응관계가 성립되는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 좋은 상관성을 통해서 내부마찰각과 타격횟수와의 관계에서 $\phi=0.40N_c+29$ 라는 직선식을 유도할 수 있었다. 그리고 저압부에서 얻은 점착력은 원래 발현되는 값이 그렇게 크지 않으므로 타격횟수와의 관계에 있어서 좋은 상관성을 확인할 수가 없었다.

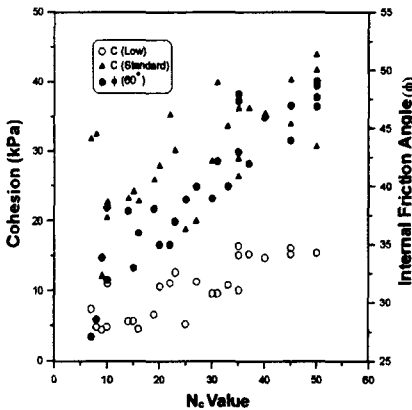


그림7. Nc와 c 및 φ의 관계

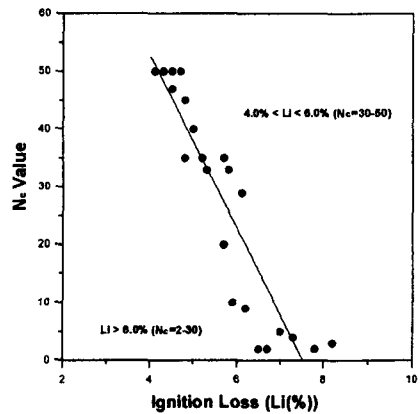


그림8. Li와 Nc의 관계

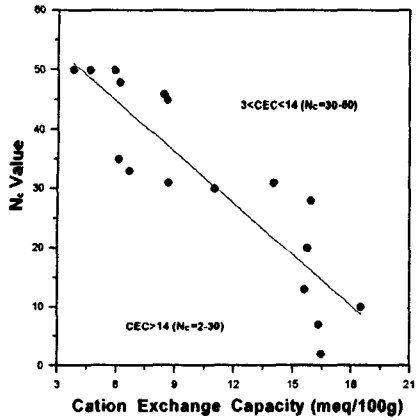


그림9. CEC 와 N_c 의 관계

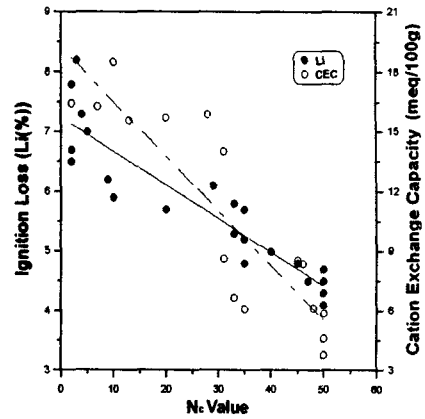


그림10. N_c 와 Li 및 CEC의 관계

그림8은 Li와 N_c 의 관계를 나타낸 것인데, Li가 증가할수록 N_c 가 감소한다는 것을 알 수 있고 Li>6%에 대응되는 $N_c=2\sim30$, 4%<Li<6%에 대응되는 $N_c=30\sim50$ 범위에서 좋은 대응관계를 보이는 것으로 나타났다.

그림 9는 CEC와 N_c 의 관계로서 CEC가 증가할수록 N_c 가 감소하는 것을 알 수 있는데, 여기서 CEC>14(meq/100g)에 대응되는 $N_c=0\sim30$, 3<CEC<14(meq/100g)에 대응되는 $N_c=30\sim50$ 범위에서 좋은 대응 관계를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 놓고 볼 때 소형 동적 콘관입시험은 강풍화도로 분류되는 Li≃4%, CEC≃3(meq/100g) 전후에서 5cm를 관입시키는 한계치가 아닌가 현재까지의 연구결과로부터 판단해 볼 수 있다. 또한 Li, CEC, N_c 와의 전체적인 관계를 그림 10에 나타냈다.

한편, Li와 CEC와는 아직 상관관계가 밝혀져 있지 않지만, 이들간의 관계를 살펴본 것이 그림 11이다.

이 그림에서 Li가 증가함에 따라 분산되는 폭이 약간은 크지만 CEC가 증가하고 있는데 이는 각각의 값이 증가함에 풍화가 진행되는 것으로 판단할 수 있으며, 기존의 연구결과인 Li와 CWI(Cheical Weathering Index, 이후 CWI라 칭함)간의 상관관계가 매우 높음을 볼 때 CWI, Li, CEC 모두 풍화의 정도를 나타내는 지표로서 적용 가능하다고 판단된다.

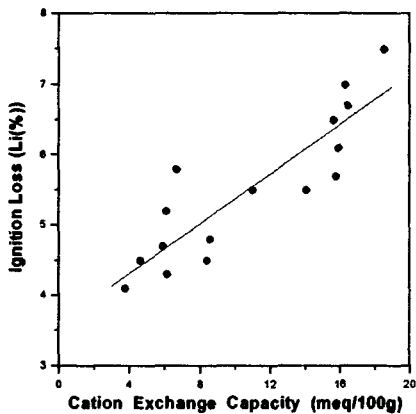


그림11. Li 와 CEC 의 관계

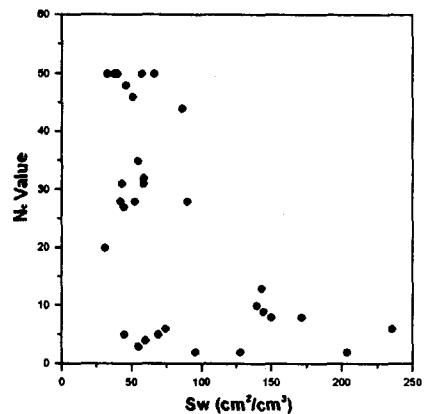


그림12. N_c 와 S_w 의 관계

그림 12는 타격횟수와 비표면적과의 상관관계를 나타내고 있다. 그림 12에서 보는 바와 같이 N_c 가 감소할수록 S_w 가 증가하고 있음을 나타내고 있는데, 이는 현재까지 여러 가지 연구결과를 종합해 볼 때 풍화가 진행될수록 입자가 세립화되어 비표면적이 증가하는 것으로 추정해 볼 수 있다.

4. 결론

○○지구 화강토지반 절토사면에서 실시한 소형 동적 콘관입시험과 역학시험, 물성 및 풍화도 평가 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 소형 동적 콘관입저항값(N_c), Li 및 CEC의 관계에 있어서 $Li > 6\%$, $CEC > 14(\text{meq}/100\text{g})$ 에 대응되는 $N_c = 2 \sim 30$ 이고 $4\% < Li < 6\%$, $3 < CEC < 14(\text{meq}/100\text{g})$ 에 대응되는 $N_c = 30 \sim 50$ 로 나타났는데 지반의 비균질성, 시험오차, Rod의 주변마찰력을 포함한다 해도 지금까지의 연구결과만을 놓고 볼 때 좋은 상관성이 있는 것으로 판단된다.
- (2) 2단(-10m)에서 실시한 간이 동적 콘관입시험의 1차시험(4월15일)과 2차시험(10월31일)에 대해서 각각의 시험에서 나타난 결과 값에 대해서 최소관입깊이를 놓고 비교해 볼 때 관입깊이에 있어서 10cm 차이가 발생하는데 이를 통해서 풍화의 진행정도를 파악할 수 있었다. 그리고 이 값을 시험을 실시한 시간간격인 190일로 나누면 하루에 대략 0.052mm 씩 풍화가 진행되는 것으로 나타났다.
- (3) 상대적으로 풍화가 덜 진행된 2단(-10m)에서 Li, CEC, S_w 는 심도가 깊어짐에 따라 그 값이 감소하는 경향을 나타낸 반면에 N_c 는 증가하는 것으로 나타났는데 이를 통해서 풍화의 진행정도를 파악할 수 있고 또한 표층부부터 심도가 깊어질수록 풍화가 덜 진행되는 것으로 판단된다.
- (4) 소형 동적 콘관입시험은 강풍화토로 분류되는 $Li \approx 4\%$ 그리고 $CEC \approx 3(\text{meq}/100\text{g})$ 전후에서 5cm를 관입시키는 한계치가 결정되는 것으로 판단된다.
- (5) 타격횟수가 증가할수록 보통압부에서 얻은 전단정수가 증가하였는데 $N_c = 2 \sim 50$ 에 대응되는 내부마찰각은 $27^\circ \sim 50^\circ$, 점착력은 12~49kPa의 범위의 값을 나타냈다. 그 결과값을 놓고 볼 때 점착력보다는 내부마찰각과 좋은 대응관계가 성립되는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 좋은 상관성을 통해서 내부마찰각과 타격횟수와의 관계에서 $\phi = 0.40N_c + 29$ 라는 직선식이 유도되었다.
- (7) 장기적으로 콘관입시험을 실시하여 관입깊이 변화의 확인을 통해서 풍화속도를 측정하고 S.P.T 시험과 관련된 기존의 경험식과 N_c 값과 c, ϕ 의 상관성에 관해서 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박춘식(1996), "풍화토의 특성", 도서출판 엔지니어즈
2. 박병기(1998), "풍화잔적토의 지반공학적 특성", 「한국지반공학회 학술발표회 논문집」
3. 日本土質工學會(1970), "マサ土の工學的性質と取扱い指針"
4. Matsuo, S, Nishida, K(1968), "Physical and Chemical Properties of Decomposed Granite Soil Grains", Soils and Foundation, Vol.8, No.4, pp. 10~20
5. Onodera, T, Oda, M, Minami, K(1976), "Shear Strength of Undisturbed Sample of Decomposed Granite Soil", Soils and Foundation, Vol.16, No.1, pp. 11~29
6. Onitsuka, K, Yoshitake, S(1988), "Shear Characteristics of Decomposed Granite Soil

Compressible Under Low Pressure”, 일본토목학회 논문집 제 400호/III-10.

7. “Guide to site investigation, Hong Kong”, pp. 286~287

8. G. A. Leonards, “Foundation Engineering”, 1962, pp. 342~468

9. James K. Mitchell(1976), “Fundamentals of soil Behavior”, John Wiley & Sons, Inc. pp. 24~46

10. Merlin G. Spangler · Richard L. Handy(1982), “Soil Engineering(Fourth Edition)”, pp.62~92

11. Sowers, George F.(1962), “Introductory Soil Mechanics and Foundation”, Geotechnical Engineering, pp.314~317

12. Sanglerat(1972), “The Penetration and Soil Exploration”, pp.85~87