

화강 풍화암의 풍화도 및 강도정수의 평가 (I)

Evaluation of Weathering Intensity and Strength Parameter for Weathered Granite Masses (I)

이 중 규*¹ Lee, Chong-Kyu

장 서 만*² Chang, Seo-Man

Abstract

The evaluation of the reliable strength and deformation characteristics of weathered granite masses is very important for the design of geotechnical structure under working stress conditions. Various types of laboratory test such as triaxial compression test can be performed to determine the strength parameters. However, it is very difficult to obtain the representative undisturbed samples on the site and also the rock specimen cannot represent rock mass including discontinuities, fracture zone, etc. This study aims to investigate the strength and deformation characteristics of granite masses corresponding to its weathering intensity and develop a practical strength parameter evaluation method using the results of PMT. To predict weathering intensity and strength parameters of the weathered granite masses in the field, various laboratory tests and in-situ tests including field triaxial test and PMT are carried out. Based on the results of weathering index tests, the classification method is proposed to identify the weathering degree in three groups for the weathered granite masses. Using the analytical method based on the Mohr-Coulomb failure criteria and the cavity expansion theory, the strength parameters of rock masses were evaluated from the results of PMT. It shows that weathering intensity increases with decreasing the strength parameters exponentially. The strength parameters evaluated with the results of PMT almost coincide with the results of field triaxial test.

요 지

본 연구는 국내의 대표적인 화강암 분포지역을 연구대상 지역으로 선정하여 풍화암층에 대하여 수행된 일련의 실내역학 및 원위치시험 결과로부터 풍화도에 따른 화강 풍화암의 강도 변형 특성을 규명하고 설계 단계에서 비교적 시행이 용이한 공내재하시험 결과로부터 풍화도에 따른 화강풍화암의 내부마찰각 및 점착력 등의 강도정수를 평가할 목적으로 수행되었다. 연구대상 지역의 화강 풍화암에 대한 흡수율 및 풍화내구성지수 시험결과를 분석한 결과 풍화도를 나타내는데 비교적 신뢰성 있는 방법으로 평가되어 이를 근거로 대상 지역의 화강 풍화암을 3등급의 풍화도로 구분할 수 있는 풍화도 분류 방법을 제시하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준 및 공동확장이론을 이용한 해석적 방법을 토대로 공내재하시험 결과로부터 연구대상 지역 풍화암의 점착력, 내부마찰각 및 팽창각 등의 강도정수를 풍화도별로 평가하였다. 해석결과 풍화도가 증가할수록 강도정수는 지수적으로 감소하는 것으로 나타났는데 본 연구에서 규정한 풍화등급의 경계에서 감소폭이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 공내재하시험 결과로부터 추정된 강도정수를 풍화도와 관련하여 수행한 현장삼축압축시험 결과와 비교 분석하여 검증할 목적으로 연구 중에 있으며 현재까지 수행된 1종의 풍화도에 대하여 수행된 현장삼축압축시험 결과와 비교한 결과 두 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 공내재하시험 결과를 이용한 강도정수 추정법이 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다.

Keywords : In-situ triaxial test, Pressuremeter test, Weathered granite masses, Weathering intensity

*1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dankook Univ.)

*2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Dankook Univ., changsm@dankook.ac.kr)

1. 서론

화강 풍화암은 국내 대다수 지역에 널리 분포되어 건설 공사시 흔히 접하는 대표적인 지반이다. 화강 풍화암의 합리적인 지반정수의 추정에는 지중 구조물 설계시 필수적인 요소이나 국내의 경우 화강 풍화암에 대한 불교란 시료채취의 난이성, 비교적 시료성형이 가능한 압석편에 대한 실내시험결과의 신뢰성 부족 및 설계 단계시 원위치시험의 어려움 등 여러가지 이유로 잔류토 또는 경암반과 달리 현재까지도 풍화암에 대한 역학적 특성이 명확하게 규명되지 않은 상태이다. 또한, 풍화암을 대상으로한 토목설계시 풍화도를 고려한 강도정수의 추정이 필수적이지만 일반적인 설계 관행은 풍화 정도가 높은 경우에는 표준관입시험치에 의존하고 경암반에 대하여는 주로 국외에서 제안된 암반분류법을 이용하여 강도정수를 추정하고 있는 실정인데, 모암의 형성 과정이나 환경에 따라 풍화 정도가 다르고 특히, 풍화도와 풍화암의 경계에 있는 풍화대 지반인 경우 크게 신뢰할 수 있는 방법으로 보기도 어렵다. 한편, 풍화암의 경우 토사지반과는 달리 암반의 불연속면 발달 정도에 따라 강도특성이 좌우되므로 소규모 공시체에 대한 실내역학시험 보다는 실물크기 현장에서의 원위치 시험을 통한 강도정수의 평가가 필수적인데, 설계 단계에서는 대규모 원위치시험을 소정의 심도에서 실시하기 어려우므로 비교적 수행이 용이한 원위치 시험 결과로부터 강도정수를 평가할 수 있는 방법의 개발이 요구되는 상황이다. 본 연구는 국내의 대표적인 화강암 분포 지역을 연구대상 지역으로 선정하여 풍화암층을 대상으로 수행된 일련의 실내역학 및 원위치시험 결과로부터 풍화도에 따른 화강 풍화암의 강도 변형 특성을 구명하고 설계 단계에서 비교적 수행이 용이한 공내재하시험 결과로부터 풍화도에 따른 화강풍화암의 내부마찰각 및 점착력 등의 강도정수를 평가할 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 연구대상부지에 대한 시추조사, 현장삼축시험 및 공내재하시험 등의 원위치 시험과 풍화 정도를 구분하기 위한 흡수율시험 및 풍화내구성지수 시험(slaking durability test) 등을 포함한 일련의 실내시험을 수행하였다. 실내시험 결과를 토대로 연구 대상지역의 풍화암을 3등급의 풍화도로 분류할 수 있는 방법을 제시하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준 및 공동확장 이론을 토대로한 해석적 방법을 이용하여 공내재하시험 결과로부터 점착력 및 내부마찰각 등의 강도정수를

풍화도에 따라 산정하였다. 한편, 공내재하시험 결과로부터 추정된 강도정수를 풍화도와 관련하여 수행된 현장 삼축압축시험 결과와 비교 분석하여 검증할 목적으로 연구 중에 있으며 현재까지 1종의 풍화도에 대하여 수행된 현장삼축압축시험 결과와 비교하여 공내재하시험 결과를 이용한 강도정수 추정법의 신뢰성을 검증하였는데, 다양한 응력수준 조건 및 풍화등급 조건을 달리하여 수행된 현장삼축압축시험 결과를 토대로한 연구는 현재 진행 중에 있다.

2. 연구대상부지 선정 및 지반조사

연구대상 부지는 경기도 ○○지역에 위치한 곳으로 본 지역의 지층 분포 및 암반 특성을 확인하기 위하여 지표지질조사, 시추조사, 실내시험 및 X선 회절분석 등을 실시하였다. 시추 조사는 총 8개소에 대하여 실시하였는데 잔류토 및 풍화암층에 대한 불교란 시료를 최대한 전 심도에 대하여 연속적으로 채취하였다. 또한, 시추시 잔류토 및 풍화암에 대하여 일정 간격으로 표준관입시험(80회) 및 공내재하시험(24회)을 병행하여 실시하였으며 현장 삼축시험은 대상 지역 풍화암의 풍화도 평가 결과에 따른 풍화등급을 고려하여 공내재하시험이 수행된 동일 위치까지 지반을 굴착한 후 시험을 수행하였다. 실내시험은 입도분석(24회), 흡수율시험(141회), 밀도시험(80회) 및 풍화내구성시험(80회)등의 물성시험과 공시체 제작이 가능한 경우에 대하여는 삼축압축시험(6회) 및 직접전단시험(6회)등의 역학시험을 실시하였다. 실내시험 결과를 참조하면 연구대상 지역의 풍화 잔류토는 통일분류법상 입도분포가 양호한 사질토에 해당되며 세립질 함량은 미소한 것으로 확인되었는데, 풍화암의 풍화정도를 국제지질학회에서 제시한 풍화분류기준(geological society, 1990)을 참조하여 정성적으로 구분하면 보통 정도의 풍화(moderately weathered) 내지 높은 정도의 풍화(highly weathered)에 해당되는 것으로 분류된다. 한편, 화강 풍화암에 대한 X선 회절 분석 결과를 요약하면 표 1과 같은데 분석 결과를 참조하면 연구대상 지역의 화강 풍화암은 석영, 정장석, 사장석, 운모 및 점토광물로 구성된 것으로 확인되었는데, 화강암의 주요 조암 광물인 석영과 정장석이 전체 광물 함량의 대부분(60%~80%)을 차지하는 것으로 나타났다. 본 X선 회절분석 시험 시료가 전체 암반의 대표성을 지닌다고 보기는 어려워 정량적인 평가는 어렵지만 풍

표 1. 연구대상 부지내 지층별 X선 회절분석 결과

구 분	심도(m)	환산 N값	석영	정장석	사장석	운모	Kaolinite
잔류토 I	2.0	25(25/30)	30.42	31.98	18.48	12.92	6.21
풍화암 I	7.5	100(50/15)	24.5	36.5	17.5	18.1	3.4
풍화암 II	14.5	500(50/3)	23.7	34.8	24.2	17.1	0.2

주) 환산 N값은 타격회수를 샘플러 관입이 30cm인 경우로 환산하여 표기한 것임(예 : 50/15→100).

화암에서 잔류토로 풍화가 진행될수록 점토 광물의 함량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

3. 화강 풍화암의 풍화도 평가

3.1 흡수율, 건조밀도 및 N값의 상관성 분석

일반적으로 암반의 풍화도를 정량적으로 표현하기 위하여 풍화지수(weathering index)를 사용하는데 풍화지수는 암석학적 풍화지수와 화학적 풍화지수로 구분할 수 있다. Irfan과 Dearman(1978)은 흡수율, 슈미트헤머 반발치 및 점착중 강도 등으로 화강암의 정량적인 풍화지수를 제안하였으며, Lee와 de Freitas(1988)등은 풍화내구성 지수가 화강암의 풍화도를 표현하는데 적합함을 규명하였다. 따라서, 본 연구에서는 연구대상 지역 풍화암의 풍화도를 비교적 수행이 간편하고 정량적인 방법으로 평가하기 위하여 흡수율, 풍화내구성 및 밀도 등의 암석학적 특성을 고려한 방법을 풍화지수로 사용하였다. 연구대상 지역의 화강 풍화암을 대상으로 수행된 흡수율, 밀도 시험 및 표준관입시험 시험 결과를 토대로 흡수율, 건조밀도 및 N값의 상관성을 분석한 결

과는 그림 1 및 그림 2와 같다.

화강 풍화암의 흡수율과 건조밀도의 관계를 분석한 결과를 참조하면 건조밀도의 분포는 $2.15\text{g/cm}^3 \sim 2.72\text{g/cm}^3$ 으로 나타났는데, 이때 해당되는 흡수율의 분포 범위는 0.89%~18.9%로 나타났다. 또한, 흡수율이 증가할수록 풍화암의 건조밀도는 지수적으로 감소하는 경향을 보이는데 이를 지수함수의 형태로 표현하면 식 (1)과 같으며 이때의 결정계수는 0.804로 비교적 높은 상관도를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 흡수율 시험 시료와 동일 위치에서 실시된 표준관입시험 결과와 흡수율의 관계를 분석한 결과(그림 2 참조)에 따르면 흡수율과 표준관입시험치의 관계는 건조밀도의 관계와 유사하게 N값이 증가할수록 흡수율은 지수적으로 반비례하여 감소하는 것으로 나타났다. 한가지 주목할 만한 것은 실무에서 일반적으로 토사와 풍화암의 경계를 구분할 때 적용하는 특정 N치 100(50/15)를 기준으로 하여 좌우측 구간의 흡수율 감소 형태가 차이를 보인다는 것인데 이에 해당되는 흡수율은 지수함수를 이용하여 회귀 분석한 결과(식 (2) 참조)에 따르면 10% 정도인 것으로 나타났다.

$$A_f = 11915 \cdot \rho_d^{-8.389} \quad (1)$$

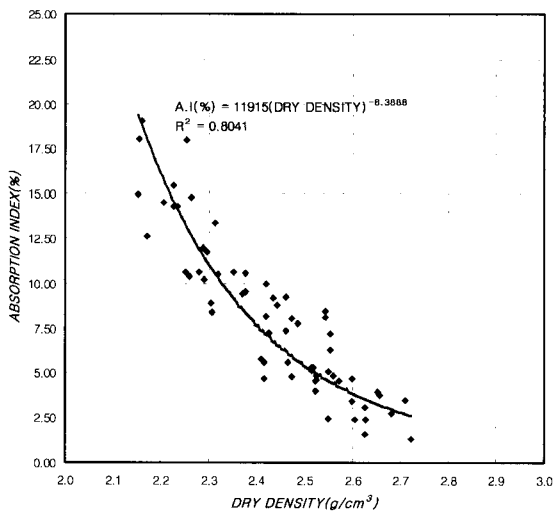


그림 1. 흡수율 및 건조밀도의 관계

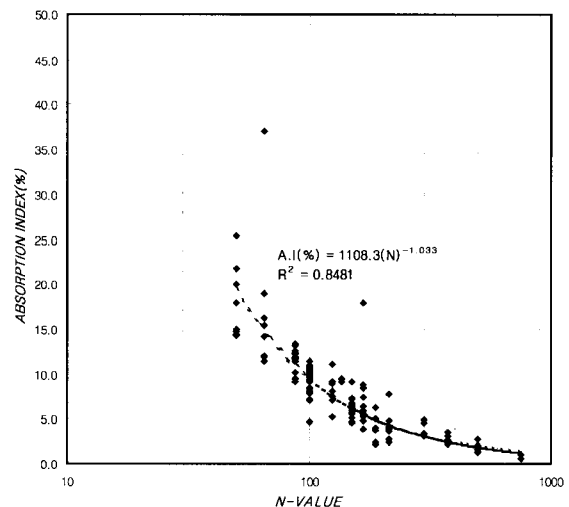


그림 2. 흡수율 대 N치의 관계

$$A_I = 1108.3 \cdot N^{-1.033} \quad (2)$$

여기서, A_I 는 흡수율(%), ρ_d 는 건조밀도(g/cm^3), N 은 표준관입시험값(환산 N 값)이다.

3.2 흡수율과 풍화 내구성지수와의 관계

암석의 풍화내구성지수는 풍화 정도를 정량적으로 파악할 수 있어 암석의 풍화도 산정에 유용한 자료로 활용될 수 있다(Irfan과 Dearman, 1978). Lee와 de Freitas(1988)는 화강암의 풍화 등급과 풍화 내구성지수와의 관계를 규명한바 있는데 신선(fresh)에서 중간 정도의 풍화(moderately weathered) 단계까지는 내구성 지수의 변화가 매우 미소함을 보이다가 높은 풍화단계(highly weathered)에 이르면 내구성 지수가 선형적으로 급격히 감소함을 규명한바 있다(그림 3 참조). 본 연구에서는 Lee와 de Freitas(1988)의 연구 결과를 참조하여 풍화암의 풍화도 평가의 한 요소로 풍화 내구성 지수를 이용하였는데 화강 풍화암에 대하여 흡수율 및 풍화내구성 지수 시험결과를 분석한 결과는 그림 4와 같다.

분석 결과를 참조하면 풍화내구성지수 시험의 건습 반복 1회시 조건(이하 SDI_1) 및 건습 반복 2회시 조건(이하 SDI_2) 모두 흡수율이 증가할수록 풍화 내구성지수는 감소하는 형태를 보이는 것으로 나타났는데, 흡수율 2% 미만의 영역에서는 내구성 지수의 변화 폭이 매우 미소한 반면, 흡수율 5~10% 구간에서는 내구성 지수가 급격하게 감소되는 것으로 나타났다. 본 결과를 Lee와 de Freitas(1988)의 결과와 비교해 보면 연구대상 지역 풍화암 중 흡수율 5%~10% 범위는 높은 풍화 단

계(highly weathered)에 해당됨을 추정할 수 있다. 이와 같은 결과는 SDI_1 과 SDI_2 의 관계에서 보다 명확하게 확인할 수 있는데, 흡수율 2% 지점에서부터 SDI_1 과 SDI_2 의 차이가 점차 증가하기 시작하여 흡수율 5%지점에 이르러 그 차이가 급격히 증가되는 것으로 나타나, Lee와 de Freitas(1988)가 구분한 중간 정도의 풍화 단계(moderately weathered)와 높은 정도의 풍화 단계(highly weathered)의 경계가 흡수율 5% 정도에서 형성되는 것으로 판단된다. 한편, 풍화 내구성 지수와 표준관입시험치의 관계를 분석한 결과는 그림 5와 같다. 분석 결과를 참조하면 앞에서 언급한 흡수율과 N 값의 관계와 유사하게 특정 N 값을 경계로 풍화 내구성 지수의 분포 특성이 변화하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 암반에서의 표준관입시험 결과가 시험 특성상 흡수율과 같이 풍화암반의 풍화정도를 나타내는 정량적인 자료로 활용하는 데는 어려움이 있으나, 정성적으로 풍화도를 판단하는 자료로서의 활용은 비교적 적합한 것으로 판단된다.

3.3 연구대상지역 암반의 풍화도 구분

연구대상 지역에서 풍화암 지층에 대하여 채취한 불교란 시료를 대상으로 수행한 흡수율, 풍화내구성 지수 및 건조밀도 등의 실내시험과 표준관입시험 결과 등의 상관성 분석 결과를 토대로 대상 풍화암의 풍화 등급을 3종으로 분류한 결과는 표 2와 같다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구 지역에 분포하는 풍화암은 보통(moderately) 내지 높은(highly) 정도의 풍화 영역에 해당되는데, 풍화도에 따른 흡수율 및 풍화 내구성 지

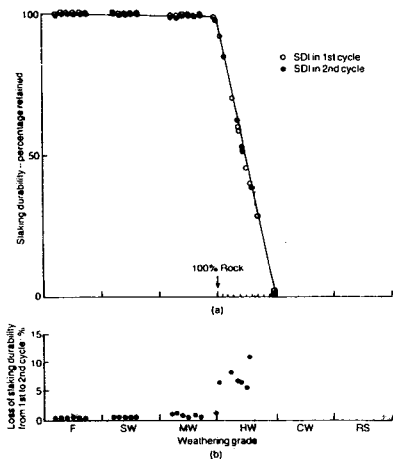


그림 3. 풍화등급에 따른 내구성 지수의 변화 (Lee와 deFreitas,1988)

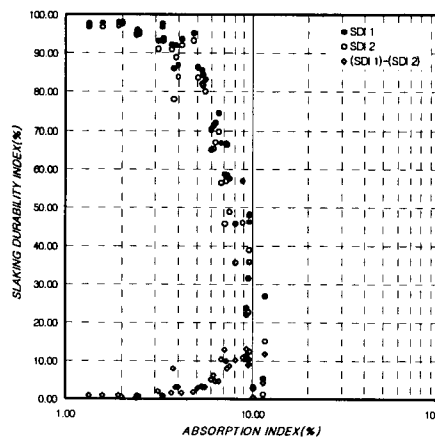


그림 4. 내구성지수 대 흡수율의 관계

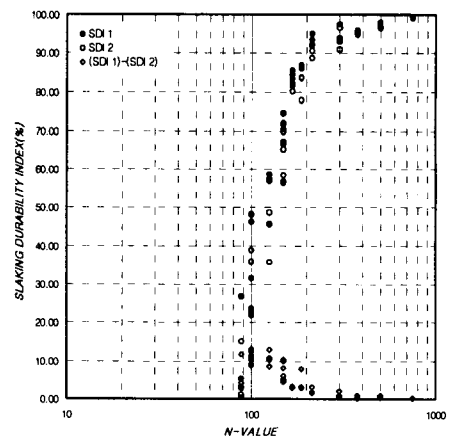


그림 5. 내구성 지수 대 N 값의 관계

표 2. 연구대상지역 풍화암의 풍화등급 설정

시험항목	풍화등급	weathered rock			residual soil
		W _R I	W _R II	W _R III	
흡수율(%)		2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~15.0	15.0 이상
건조밀도(g/cm ³)		2.55~2.65	2.35~2.55	2.25~2.35	2.25 이하
내구성지수(%)		90 이상	20~90	20 미만	-
환산 N 값		200 이상	100~200	50~100	50 이하

수의 분포 특성으로부터 시험 결과의 분산 정도는 있으나 흡수율 2%, 5% 및 10% 지점에서 건조밀도, 풍화내구성 지수 및 N값의 변화가 두드러지게 발생하는 것으로 확인되어 이때의 흡수율을 기준으로 대상 지역 풍화암의 풍화도를 3가지 등급으로 구분하였다. 또한, 흡수율 10% 이상인 구간의 경우 시험 결과간 뚜렷한 경계는 확인할 수 없었으나, 본 연구에서는 시료 채취시 암반 코어의 상태 및 풍화지수 판정을 위한 각 시험의 가능성 여부 등으로부터 흡수율 15% 지점을 토사와 풍화암의 풍화 경계면으로 구분하는데는 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

4. 풍화도에 따른 화강 풍화암의 응력-변형 특성

4.1 공내재하시험을 이용한 화강 풍화암의 응력-변형 특성 분석

연구대상 지역의 풍화암의 풍화도에 따른 응력 변형

특성을 파악하고 풍화암의 강도정수 평가를 위하여 공내재하시험을 실시하였는데 시추 8개소 위치의 잔류토 및 풍화암에 대하여 총 24회의 시험을 수행하였다. 또한, 공내재하시험이 실시된 위치에서 채취된 불교란 시료를 대상으로 풍화도 평가시 수행된 흡수율 및 풍화내구성지수 시험 등을 실시하여 풍화 등급을 확인하였다. 공내재하시험으로부터 풍화암의 한계응력을 평가하기 위해서는 probe 초기체적의 2배까지 시험이 수행되어야 하지만 시험시 probe 파손의 경우가 상당수 발생하여 한계응력은 실측된 응력 변형관계를 토대로 외삽기법을 이용하여 산정하였다. 각 풍화등급에 따라 수행된 공내재하시험 결과 산정된 대표적인 응력 변형곡선은 그림 6과 같은데 시험결과를 참조하면 풍화도가 증가할수록 항복 응력 및 한계 응력은 감소하고 반경 방향 변형율은 증가하는 일반적인 경향을 보이는데 항복이 발생하는 변형율은 약 2% 미만인 것으로 나타났다.

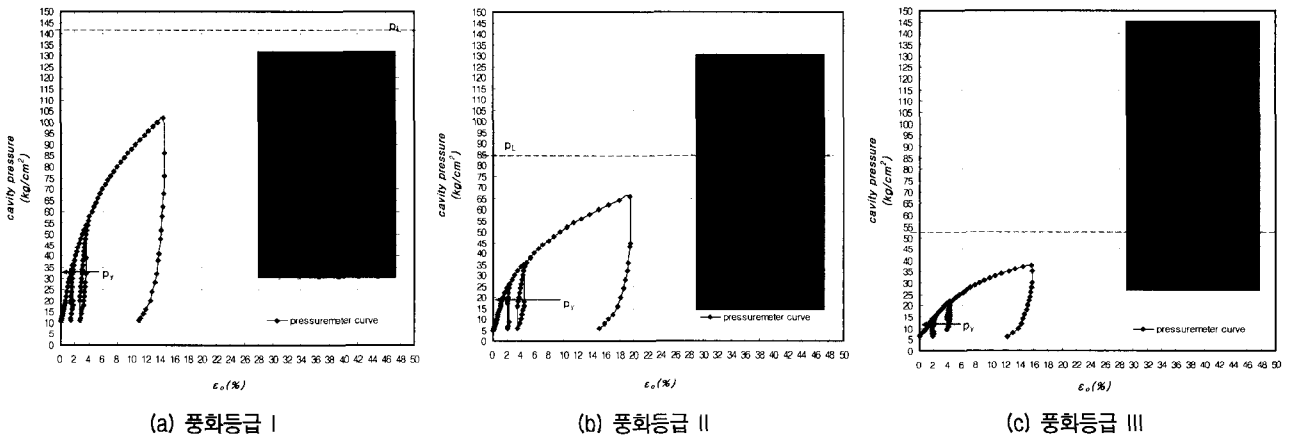


그림 6. 풍화 등급별 공내재하시험 결과 예

표 3. 풍화 등급별 공내재하시험 결과 요약

풍화등급	초기지중응력, P ₀ (kg/cm ²)	항복응력, P _y (kg/cm ²)	한계응력, P _L (kg/cm ²)	메나드변형계수, E _M (kg/cm ²)	전단탄성계수, G (kg/cm ²)
W _R I	7.0~11.0	28.0~58.0	115.0~285.0	1200~5000	680~1920
W _R II	4.5~11.0	13.0~30.0	62.0~180.0	550~1980	210~600
W _R III	5.0~10.0	10.0~16.0	50.0~60.0	220~400	90~155

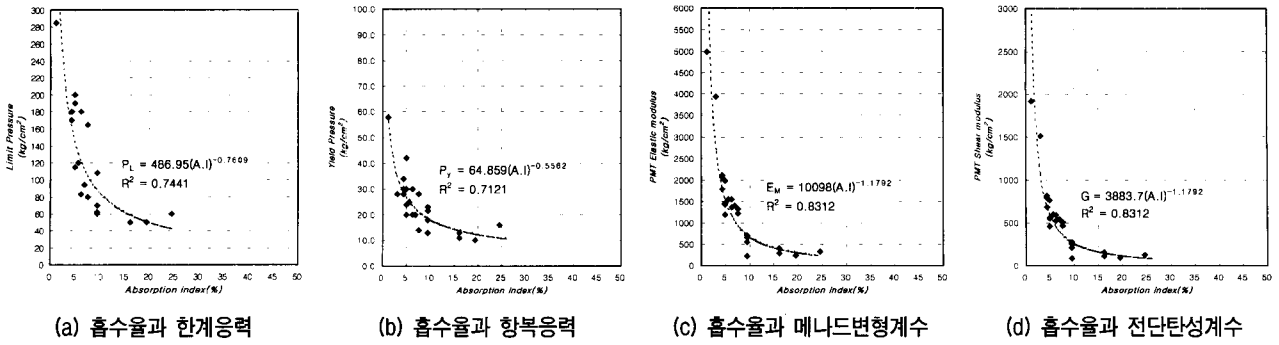


그림 7. 풍화도에 따른 화강풍화암의 공내재하시험 분석 결과

한편, 본 연구에서 제시한 풍화등급에 따라 수행된 공내재하시험 결과를 요약하면 표 3과 같고 공내재하시험 결과 산정된 한계응력, 항복응력, 메나드 변형계수 및 전단탄성계수와 흡수율과의 관계를 분석한 결과는 그림 7과 같다.

표 3을 참조하면 공내재하시험 결과로부터 평가된 메나드 변형계수는 풍화등급 I, II 및 III에 대하여 각각 $220\text{kg/cm}^2 \sim 400\text{kg/cm}^2$, $550\text{kg/cm}^2 \sim 1980\text{kg/cm}^2$ 및 $1200\text{kg/cm}^2 \sim 5000\text{kg/cm}^2$ 의 범위로 분포되는 것으로 나타났는데, 풍화도에 따라 최대 약 20배 가까운 변화를 보이는 것으로 나타나 풍화도에 따라 암반 변형 특성의 차이가 두드러지게 변화하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 흡수율 변화에 따른 건조밀도 또는 N값의 변화와 유사한 형태로 나타났는데, 이는 풍화 진행에 따른 암반내 간극 증가와 입자간 고결력 저하에 따른 것으로 판단된다. 그림 7을 참조하면 풍화 진행에 따른 풍화암의 응력 변형 특성의 변화를 판단할 수 있는데 풍화가 진행되어 흡수율이 증가할수록 한계응력, 항복응력, 메나드변형계수 및 전단탄성계수는 지수 함수적으로 감소하는 형태를 보이는 것으로 나타났는데, 앞서 풍화등급 결정시 경계가 된 흡수율 5%, 10% 및 15% 지점에서 감소 추이가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 공내재하시험 결과를 토대로 화강 풍화암의 항복응력, 한계응력, 메나드 변형계수 및 전단탄성계수와 흡수율과의 상관식을 제시하면 식 (3)~식 (6)과 같다.

$$P_y = 64.859 \cdot (A_I)^{-0.5562} \quad (3)$$

$$P_L = 486.95 \cdot (A_I)^{-0.7609} \quad (4)$$

$$E_M = 10098 \cdot (A_I)^{-1.1792} \quad (5)$$

$$G = 3883.7 \cdot (A_I)^{-1.1792} \quad (6)$$

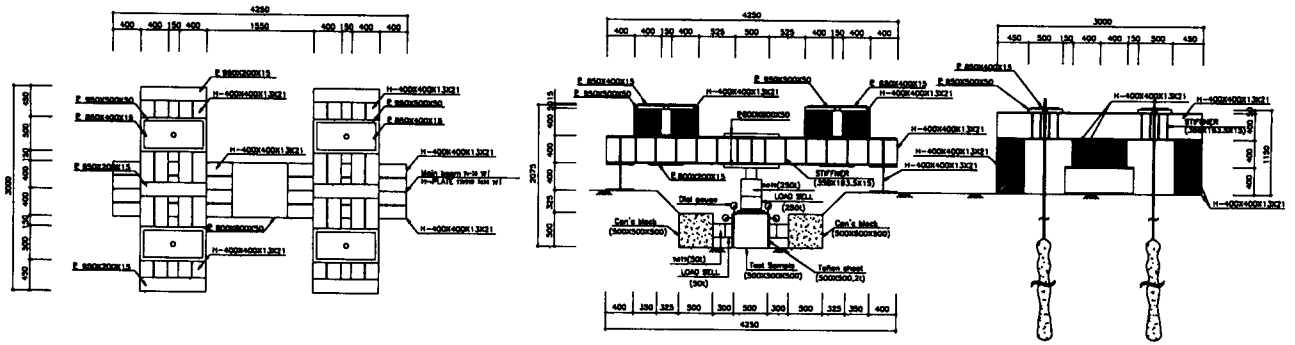
여기서, A_I 는 흡수율(%), P_y 는 항복 응력(kg/cm^2), P_L 은

한계 응력(kg/cm^2), E_M 은 메나드 변형계수(kg/cm^2), G 는 전단탄성계수(kg/cm^2)이다.

4.2 현장 삼축압축시험

4.2.1 현장 삼축압축시험 개요

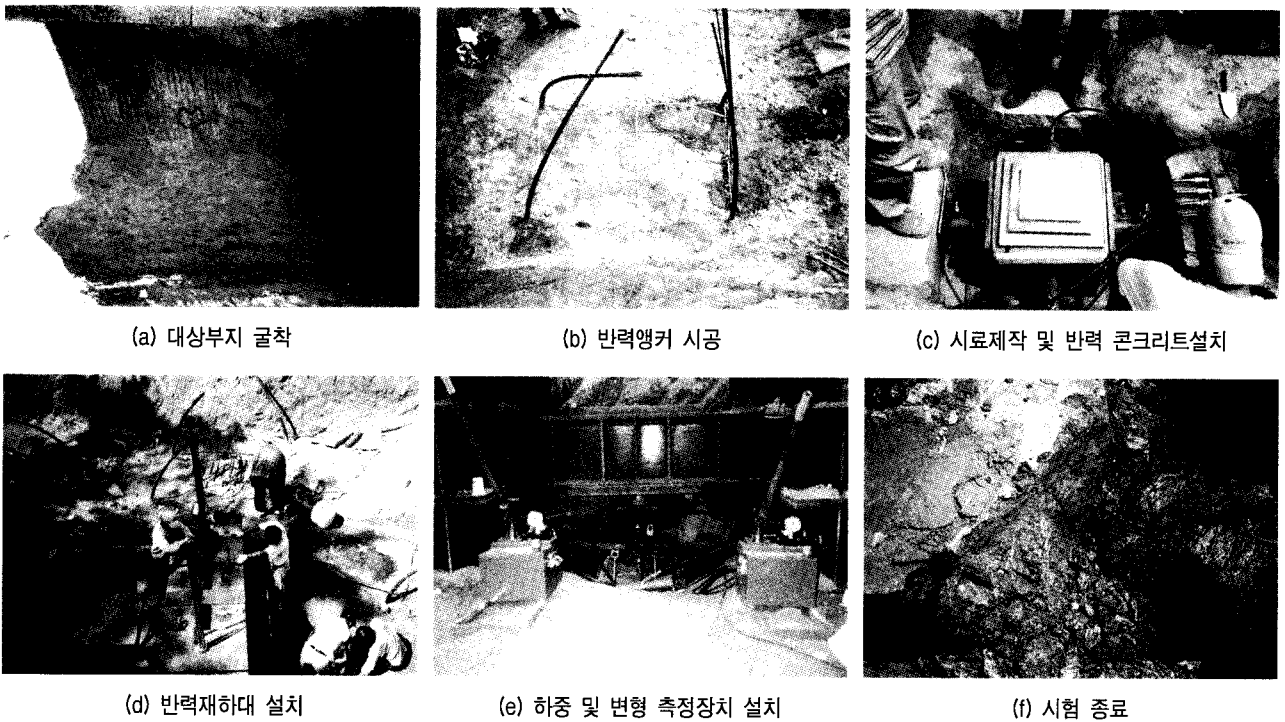
현장 삼축압축시험은 원위치 암반에 대하여 각주상의 암반 불력을 성형하여 암반 불력의 3방향 면에 하중을 재하하여 이때의 응력과 변형을 관계로부터 암반의 강도 및 변형특성을 파악하는 것으로 원리적으로는 실내에서 실시하는 각주형 공시체를 이용한 삼축압축시험을 원위치 암반에 확장한 것으로 볼 수 있다. 본 시험의 주된 목적은 교란되지 않은 원지반 조건의 풍화암에 대한 강도정수를 평가하기 위한 것으로 본 연구에서 제시한 풍화암의 풍화등급에 대하여 시험을 수행하였다. 한편, 본 연구에서는 현장 삼축압축시험 결과를 공내재하시험 결과로부터 추정된 풍화암의 점착력 및 내부마찰각 등의 강도정수와 비교 분석하여 추정방법의 신뢰도를 검증토록 계획하였다. 본 현장 삼축압축시험 결과는 본 연구에서 제시한 풍화등급 가운데 1종의 풍화도에 대하여 수행된 시험 결과를 토대로 한 것으로 다양한 응력수준 및 풍화등급에 따라 수행된 현장 삼축압축시험 결과를 토대로 한 연구는 현재 진행 중에 있다. 본 연구에서 설계 및 제작된 현장 삼축압축시험 장비는 크게 하중 재하장치, 하중 측정장치, 변형 측정장치, 반력 장치 및 재하 지지대로 구분할 수 있는데 제작 형태는 그림 8과 같고 시험 절차는 그림 9와 같다. 현재까지 국외에서 일부 수행된 사례의 경우 대부분의 현장 삼축압축시험이 터널 등과 같은 지중 내 굴착 단면에 대하여 실시되어 원지반을 하중반력 기구로 사용한 반면, 본 연구에서 실시된 현장삼축시험의 경우는 공내재하시험이 수행된 시험 위치까지 지반을 굴착한 후



(a) 현장삼축압축시험기 재하대 평면

(b) 현장삼축압축시험기 단면형태

그림 8. 현장삼축압축시험기



(a) 대상부지 굴착

(b) 반력앵커 시공

(c) 시료제작 및 반력 콘크리트설치

(d) 반력재하대 설치

(e) 하중 및 변형 측정장치 설치

(f) 시험 종료

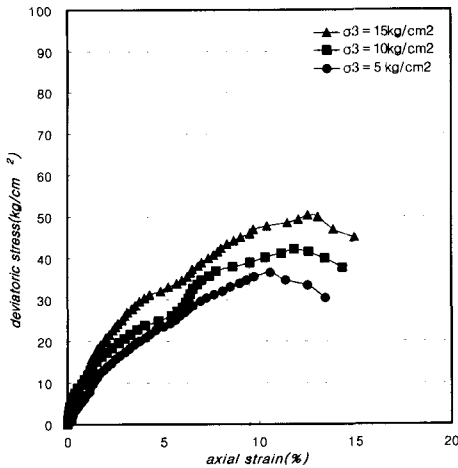
그림 9. 현장삼축압축시험 절차

노출된 바닥면에서 시험이 수행되어 별도의 반력 장치가 필요하므로 H형강으로 제작된 반력대에 4개의 어스앵커를 설치하였다. 한편, 시험 공시체 제작시 대상 지반이 자연 상태에 완전히 노출되어 원지반 풍화암의 2차적인 풍화가 발생할 수 있으므로 공시체 제작 직후 모형수지 석고를 이용하여 제작된 공시체를 마감 처리하였다. 시험시 사용된 하중 재하장치는 유압 실린더를 이용한 수동 제어방식을 적용하였는데 구속압 장치의 경우 시험 과정 중 일정한 구속압이 유지되어야 하므로 유압 실린더의 오일 압력을 조절할 수 있도록 실린더와 펌프를 개조하였으며 응력 제어 방식의 시험을 위하여 수평 및 연직방향 유압실린더에 로드 셀(load cell)을 부

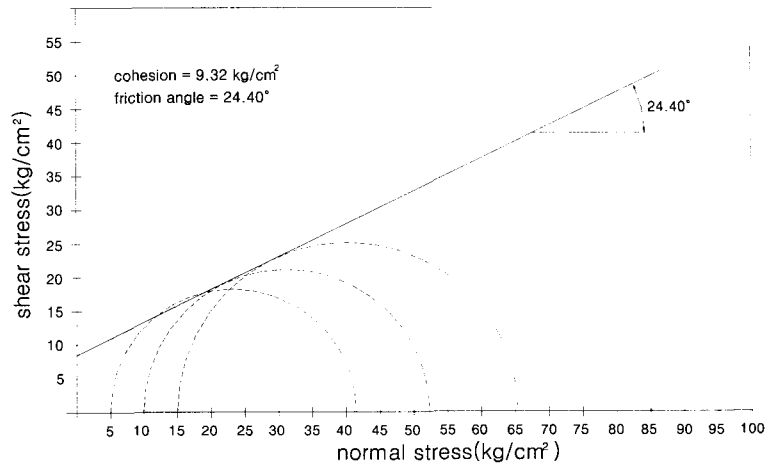
착하여 하중을 측정하였다. 현장 삼축압축시험시 구속압 조건은 각각 5kg/cm^2 , 10kg/cm^2 및 15kg/cm^2 를 적용하였는데, 이는 공내재하시험 결과로 추정된 강도정수와 상관성 분석시 동일한 응력 수준에서 비교될 수 있도록 계획한 것이다.

4.2.2 삼축압축시험 결과 및 분석

본 현장 삼축압축시험이 수행된 풍화암 지층의 흡수율은 약 10%이며 환산 N값은 100 정도로 본 연구에서 제시한 풍화등급 II에 해당되는 풍화암 지층이다. 현장 삼축압축시험이 수행된 지층과 동일 위치에서 수행한 공내재하시험 결과에서 산정된 대상 풍화암층의 항복



(a) 응력 변형 곡선



(b) Mohr의 응력원

그림 10. 풍화등급 II 영역의 풍화암에 대한 현장 삼축압축시험 결과

응력 및 한계 응력은 각각 18.3kg/cm^2 및 72.1kg/cm^2 정도로 나타났으며, 메나드 변형계수는 약 750kg/cm^2 정도인 것으로 확인되었다.

한편, 대상 지반의 풍화 등급 II에 해당되는 풍화암에 대하여 구속압 조건을 5kg/cm^2 , 10kg/cm^2 및 15kg/cm^2 으로 변화시켜 삼축압축시험을 수행한 결과는 그림 10과 같다. 시험결과를 참조하면 응력-변형율의 관계는 구속압 조건에 따라 차이는 있으나 최대강도가 발현되는 변형율 수준은 약 11~13%로 나타나 상당한 변형에도달될 때까지 지속적인 강도증가를 나타내는 변형을 경화 거동을 보이는 것으로 나타났는데, 최대 강도를 기준으로한 변형계수(E_{50})를 산정한 결과 각각의 구속압 조건에 대하여 각각 561kg/cm^2 , 666.7kg/cm^2 및 888.9kg/cm^2 로 산정되었다. 한편, 본 시험 결과를 토대로 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용할 경우 풍화암의 점착력은 9.32kg/cm^2 으로 나타났으며, 내부마찰각은 24.4° 로 산정되었다. 본 결과는 제한된 구속압 조건에 대한 강도정수 평가를 목적으로 한 것으로 화강 풍화암이 Hoek와 Brown(1980)의 파괴기준 등과 같은 비선형적인 강도특성을 만족한다면 본 시험결과를 낮은 응력 수준에 적용할 경우 점착력은 과다 평가되고 내부마찰각은 과소 평가될 수 있다. 즉, 현장삼축시험 결과에서의 파괴포락선은 구속응력 범위가 커서 직선으로 획일적으로 표현될 수 있으나 응력범위가 작은 경우 이를 만족하지 않을 수도 있으므로 다양한 응력 수준에서의 추가적인 연구를 통하여 이에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

5. 공내재하시험 결과를 이용한 풍화암의 강도정수의 평가

5.1 해석 방법 및 조건

본 연구는 연구대상부지에서 실시된 총 24개의 공내재하시험 결과를 이용하여 제시된 풍화등급에 따라 풍화암의 점착력, 내부마찰각 및 팽창각(dilation angle) 등의 강도정수를 추정하기 위하여 수행된 것으로 Haberfield와 Johnson(1990)이 제시한 해석적 방법을 이용하였다. 본 방법은 Mohr-Coulomb의 탄소성 이론, 응력팽창이론(stress dilatancy theory) 및 공동확장이론(cavity expansion theory)으로부터 전개된 이론식을 이용한 것으로 실측된 공내재하시험 결과와 이론식에 포함된 매개변수를 반복 가정하여 해석적 방법으로 평가된 결과간의 회귀 분석을 통하여 오차가 최소인 경우에 해당되는 매개변수로부터 강도정수를 추정하는 방법으로 재료는 선형 Mohr-Coulomb 파괴기준, 비관련 흐름법칙 및 응력팽창이론을 만족하며 반경방향 균열 효과는 고려하지 않는 가정 사항을 전제로 하는데 해석식 적용한 기본 이론식은 식 (7)~식 (10)과 같다.

$$p_o \leq p \leq p_f \text{ 인 경우 : } \frac{U_{r_o}}{r_o} = \frac{p - p_o}{2G} \quad (7)$$

$$p \geq p_f \text{ 인 경우 : } \frac{U_{r_o}}{r_o} = \frac{1}{2G} [b_1 \cdot \frac{r_f}{r_o}^{(m-1)/m} + b_2 \cdot \frac{r_f}{r_o}^{(n+1)/n} + b_3] \quad (8)$$

$$\sin \Psi = \frac{\sin \phi - \sin \phi_{cv}}{1 - \sin \phi \cdot \sin \phi_{cv}} \quad (9)$$

$$p_f = c \cdot \cos \phi + p_o \cdot (\sin \phi + 1) \quad (10)$$

$$\text{여기서, } b_1 = \frac{-2m}{m-1} [(1-\nu) \cdot (\frac{1+m \cdot n}{m+n}) - \nu] \cdot (p_f - p_o)$$

$$b_2 = 2n \cdot (1-\nu) \cdot (\frac{m+1}{m+n}) \cdot (p_f - p_o)$$

$$b_3 = (1-2\nu) \cdot (\frac{m+1}{m-1}) \cdot (p_f - p_o)$$

$$\frac{r_f}{r_o} = \left[\frac{p \cdot (m-1) + \sigma^*}{p_f \cdot (m-1) + \sigma^*} \right]^{m/(m-1)}$$

$$\sigma^* = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$m = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$n = \frac{1 + \sin \Psi}{1 - \sin \Psi}$$

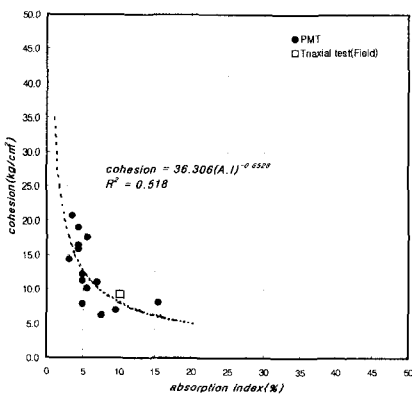
또한, r_o 는 공내재하시험시 시추 공벽의 초기 반경, U_{ro} 는 공벽 위치에서 발생하는 반경방향 변위, G 는 전단탄성계수, c 는 점착력, ϕ 는 내부마찰각, ν 는 포아송비, P_o 는 초기 반경방향 지중응력, P_f 는 항복응력, Ψ 는 팽창각을 나타낸다.

한편, Haberfield와 Johnson(1990)의 연구 결과는 가상의 공내재하시험 결과를 이용한 제한된 조건 하에서 수행된 것으로 실제 풍화암에 대한 검증은 수행되지 않은 결과이다. 따라서, 본 연구에서는 화강 풍화암에 대한 공내재하시험 결과로부터 해석적 방법으로 평가된 강도정수를 현장 삼축압축시험 결과와 비교 분석하여 해석적 방법의 적용성을 파악하고자 하였다. 또한, 본 연구에서는 실측된 공내재하시험 결과를 만족하는 매개변수를 얻는 과정이 매우 복잡하고 많은 해석시간이 소요되므로 선형회귀분석을 이용한 최적화기법을 적용

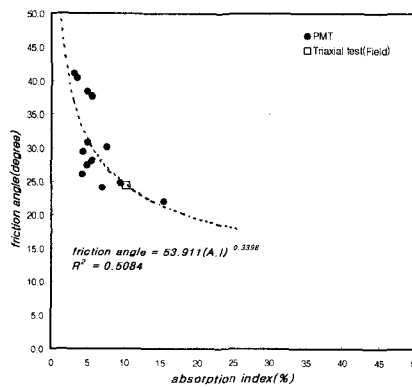
한 전산 프로그램을 개발하여 사용하였다. 해석시 필요한 입력 매개변수 중 풍화암의 포아송비는 금회 연구에서는 정확하게 산정된 결과가 없으므로 기존 연구결과를 참조하여 0.3을 사용하였고 잔류 마찰각은 대상 풍화암에 대한 직접전단시험 결과로부터 산정된 22° 를 적용하였는데, 강도정수 추정에 필요한 매개변수에 관한 연구는 차후 세부적으로 수행하여 보완할 계획이다.

5.2 공내재하시험 결과를 이용한 강도정수의 평가

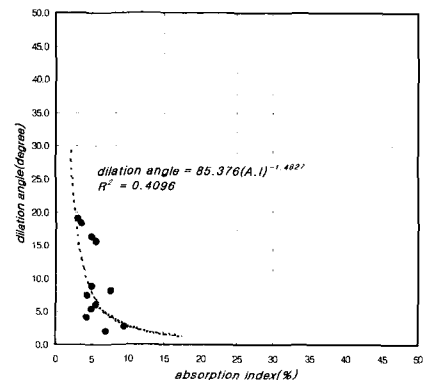
연구대상 지역의 풍화암에 대하여 수행된 공내재하시험 결과로부터 Haberfield와 Johnson(1990)이 제시한 해석적 방법을 이용하여 추정된 점착력, 내부마찰각 및 팽창각을 각각의 경우에 해당되는 흡수율에 따라 분석한 결과는 그림 11과 같다. 해석결과를 참조하면 분산 정도는 있으나 점착력, 내부마찰각 및 팽창각 모두 흡수율이 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 형태로 나타났다. 해석적 방법으로 평가된 점착력은 풍화등급에 따라 약 $5\text{kg/cm}^2 \sim 20\text{kg/cm}^2$ 의 범위로 분포되며, 내부마찰각 $20 \sim 40^\circ$, 팽창각은 20° 미만의 범위로 분포되는 것으로 나타나 풍화도에 따라 강도정수의 변화가 매우 큰 것으로 나타났다. 한편, 흡수율 5% 및 10% 지점에서 강도정수의 변화 폭이 큰 것으로 나타나 본 연구에서 제시한 풍화등급 구분이 연구대상 풍화암에 대하여 적절함을 확인할 수 있다. 또한, 공내재하시험 결과로부터 추정된 점착력 및 내부마찰각을 풍화등급 II의 풍화도에서 실시된 현장 삼축압축시험 결과와 비교한 결과 두 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났는데, 본 결과는 제한된 1종의 풍화도에서 수행된 것이므로 향후 다른 풍화도에서 보다 많은 현장 삼축압축시험을 수행하여 추가



(a) 흡수율에 따른 점착력의 변화



(b) 흡수율에 따른 내부마찰각의 변화



(c) 흡수율에 따른 팽창각의 변화

그림 11. 풍화도에 따른 화강 풍화암의 강도정수 추정 결과

적인 연구가 진행된다면 비교적 간단한 공내재하시험 결과로부터 깊은 심도에서의 강도정수를 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 공내재하시험 결과를 이용한 해석적 방법으로 추정된 강도정수는 원위치 상태의 응력수준에 대하여 결정된 값이므로 본 방법을 적용할 경우에는 재하중에 가까운 응력 수준의 범위를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 즉, 흙막이 구조물 및 사면과 같은 굴착 조건에 대하여 본 방법을 적용할 경우 응력이완 및 그에 따른 2차적인 풍화 등을 고려할 수 없어 풍화암의 강도정수를 과다 평가할 수 있으므로 세심한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결론

- (1) 본 연구 지역의 화강 풍화암을 대상으로 실시된 흡수율, 건조밀도 및 풍화내구성지수 시험 결과간 상관성 분석을 통하여 흡수율이 풍화도를 평가하는 유용한 지표가 될 수 있음을 확인하였으며 흡수율을 이용하여 중간 내지 높은 풍화정도에 해당하는 풍화암을 3등급으로 세분하여 분류할 수 있도록 제안하였다.
- (2) 대상 암반에 대하여 수행된 흡수율 및 풍화내구성지수 시험 결과와 표준관입시험 결과(N값)와의 상관성 분석을 실시한 결과 특정 N값을 기준으로 흡수율 및 풍화내구성지수의 분포 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있었으나, N값만으로는 풍화도를 구분하기 위한 정량적인 자료로 활용하는데는 다소 문제가 있는 것으로 판단된다.
- (3) Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 공동확장이론으로부터 유도된 이론식을 사용하여 공내재하시험 결과로부터 점착력, 내부마찰각 및 팽창각을 추정하여 본 연구에서 제시한 풍화등급에 따른 강도정수 변화를 분석한 결과, 풍화도가 증가할수록 강도정수는 지수적으로 감소하는 경향으로 나타났는데 본 연구에서 제안한 풍화등급의 경계 부근에서 감소폭이 큰 것으로 나타나 제안된 풍화도 분류방법이 신뢰성 있는 것으로 판단된다.

- (4) 공내재하시험 결과로부터 추정된 점착력 및 내부마찰각을 1종의 풍화도에서 실시된 현장 삼축압축시험 결과와 비교한 결과 두 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 제안된 강도정수 추정법의 신뢰성을 확인할 수 있었으나 향후 보다 다양한 응력 수준에 대한 추가적인 검증이 필요한 것으로 판단된다.
- (5) 공내재하시험 결과로부터 해석적 방법으로 추정된 강도정수는 원위치 상태의 응력수준에 대하여 결정된 값이므로 본 해석적 방법을 적용할 경우에는 재하중에 가까운 응력 수준의 범위를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2001년도 산학연 공동연구개발사업의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 이종규(2002), "굴착공법의 문제점과 개선방안", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.60-62.
2. Baquelin, F., Jezequel, J.F. and Shields D.H.(1978), "The pressuremeter and foundation engineering", *Tran. stech publication*, pp.336-404.
3. Carter, J. P., Booker, J. R. and Yeung, S. K.(1986), "Cavity expansion in cohesive frictional soils", *Geotechnique* 36, No.3, pp.349-358.
4. Geological Society(1990), "Tropical residual soils, engineering group working party report", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol.23, No.1, pp.1-101.
5. Haberfield, C.M. and Johnston, I.W.(1990), "The interpretation of pressuremeter tests in weak rock-theoretical analysis", *Pressuremeters, Thomas Telford Limited, London*, pp.169-178.
6. Hoek, E. and Brown, E.T.(1988), "The Hoek-Brown failure criterion" -a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.(ed. J.C. Curran), Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, pp.31-38.
7. Irfan, T.Y. and Dearman, W.R.(1978), "Engineering classification and index properties of weathered granite", *Bull. Inst. Ass. Engng. Geol.*, Vol.17, pp.79-90.
8. Lee, S.G. and de Freitas, M.H.(1988), "Quantitative definition of highly weathered granite using the slake durability test", *Geotechnique* 38, No.4, pp.635-640.

(접수일자 2003. 2. 26, 심사완료일 2003. 4. 13)