풍화 잔적토의 지반 공학적 특성

Residual Soil In Korea

(육상 불포화 지반의 연구 진작을 바라면서 화강토를 중심으로)

전남대학교 교수 박 병 기

1. 서문

건설공사는 대부분의 경우 육지에서 이루어진다. 따라서 그 대상은 육상토이고 이 육상토는 지하수위 위에서는 불포화토이고 특별한 지형조건을 제외하면 풍화 잔적토인 경우가 대부분이다. 우리는 이와 같은 풍화 잔적토를 절개하여 이용하거나 기초지반으로 삼는다. 그러나 흔하게 접하는 이와 같은 육상토에 대해서는 드물게 접하는 연약 점토지반에 비해 토질 공학적 성질을 잘 모르고 있으며 확실한 시공기준도 없고 조사방법도 체계화되어 있지 않고 과거의 경험과 상식적인 견해에 의존하고 있다고 보아도 될 것이다. 그 이유로서는 대개의 풍화 잔적토는 안전하다는 선입관과 함께 지지력도 크고 강도도 기대되며 투수성도 양호하고 점토처럼 교란 불교란의 영향이 적고 우수나 침투수만 없다면 경험적으로도 안정된 지반이라고 인식되어 왔기 때문이다. 따라서 상대적으로 연약점토에 비해 연구가 뒤떨어져 있으며 또한 불포화토이기 때문에 이론적 접근이 쉽지 않았다는 것도 크게 영향을 주고 있다. 그러나 차츰 건설공사가 대규모화되면서 종래의 관점이 문제가 있음이 지적되고 지반공학 내지는 토질 공학적 검증이 필요하게 되고 조사, 시험, 설계, 시공에 관한 새로운 인식과 연구가 절실하게 요청되고 있다. 그러나 풍화 잔적토는 통상의 퇴적토와는 달리 공학적 연구에 앞서 흙 이전의 모암의 특성과 함께 풍화의 진전에 따라 그 공학적 성질이 크게 달라진다는 점이 이 분야의 연구를 어렵게 하고 있다. 풍화 잔적토는 풍화의 진전에 따라 지표에서 지하로 공학적 성질이 크게 변해가고 있으며 암반에서 점성토까지의 극단적인 특성 변화가 깊이 방향으로 이루어지고 또한 동일 풍화대에서도 매우 불균질하다는 특징을 갖고 있다. 공학적 관찰의 시점도 통상의 퇴적토는 느슨한 상태에서 밀실한 상태로의 이행과정(압밀 또는 압축)이 중요시되는 반면 잔적토는 거꾸로 밀실한 재료에서 느슨한 재료로의 이행이 관점이 되고 이를 풍화작용으로 보며 여기에 구속압을 제거하면 팽창이나 풍화작용이 급속히 진행되어 물질의 융탈, 이동 등을 수반하는 열화(劣化)현상이 짧은 시간에 이루어진다. 따라서 대규모의 굴착이나 그 사면에서는 장기 안정문제(long term stability problem)를 일으키고 기초지반으로서는 지지력의 열화나 그 강도 평가에 문제점으로 남는다. 따라서 목표 기간 내에서의 강도 평가나 시험방법도 달라져야 한다.

또한 한마디로 풍화 잔적토라 하여도 그 종류가 많고 각각 특성이 다르며 따라서 응력 상태에서의 거동이 달라 이와 같은 특성의 차이를 잘 이해 해두지 않으면 안 된다. 한편 잔적토의 강도를 평가하는 조사 방법도 불교란 시료 채취의 어려움 때문에 사운딩에 의존하는 경우가 태반이지만 잔적토에 적용된 조사 방법은 SPT나 Swedish관입시험 등 극히 제한적이고 그 결과 또한 반드시 적절한 것이 아니다.

이와 같은 강도나 토질 공학적 성질에 지배적인 영향을 미치는 풍화도의 측정도 각인각색으로 정설이 없으며 최근에 P파의 측정이 공통된 지표로서 주목받고 있다. 또한 예외 없이 침수에 의해 잔적토는 붕괴된다는 것도 잘 알려져 있어 포화도에 따른 강도 변화도 중요한 강도 평가 요인이 된다.

우리 나라에서 이와 같은 풍화 잔적토는 필자가 사는 호남 지방에서 만도 화강암질계 또는 편마암계 풍화 잔적토인 이른바 화강토를 비롯하여 안산암계 풍화 잔적토, 응회암 풍화 잔적토, 또 많지는 않지만 유문암 풍화 잔적토, 이암 풍화 잔적토가 산재하고 있어 이는 한국 전역에서도 지질학적 특성으로 보아 비슷할 것으로 보인다. 화강토계는 사질에 가까운 것이 곳곳에서 볼 수 있다. 나머지는 석영질이 드문

점성토에 가깝다. 이들을 공사 대상으로 할 때 절취하게 되면 급속도로 열화 되어 당초 지반 조사시의 강도 평가와 크게 어긋나 설계변경을 하지 않을 수 없는 경우를 우리는 흔히 본다. 조사 당시의 강도 평가는 현재 우리 나라에서는 거의 SPT에 의존하고 있는데 구조물의 기초를 깊게 터파기 한 경우 구속압(상재하중) 제거에 의한 N값의 평가를 어떻게 해야 할 것인지 조사 당시의 N값에 의해 기초가 설계된 경우 곤혹스러운 경험이 한 두 번이 아닐 것이다.

외국에서는 이미 이와 같은 잔적토에 대한 정보 교환을 위해 연구나 발표회가 활발히 이루어지고 있으며 성공 사례와 실패 사례들에 대한 정보 교환이 이루어지고 있다. 또한 이런 흙을 특수토로 분류하여 별도의 연구회 등이 연구를 진행하고 있다. 우리 나라에서는 주로 이를 교란시켜 성토 구조물로 이용할 경우에 대해 (특히 화강토에 대해서) 단편적인 연구 결과나 시공 사례가 보고되고 있으며 잔적토 전반에 대한 공학적 연구의 접근이 거의 없는 실정이다. 연약지반 못지 않게 당면하는 이 흙에 대한 연구와 시공 사례, 그리고 시험 성과 등이 집적되고 정보가 교환되어 체계적인 연구가 진작되기를 바라는 마음에서 외국의 사례와 주로 필자가 다룬 한국의 화강토에 대해서 풍화도와 공학적 특성을 개관하고자 한다.

2. 풍화 잔적토의 정의와 종류

풍화 잔적토(Residual soil)는 암석이 지표 가까이 에서 풍화되어 토양화되면서 그 장소에 잔류하고 있는 흙을 말한다. 모암의 종류가 상이하여도 토양화 되어 있으면 모두 잔적토로 취급된다. 그러나 실제 공사 현장에서는 중기 등으로 굴착하면 토사로 변하는 연암에 가까운 암석이나 이들이 붕락하여 이루어진 붕적토도 잔적토의 관련토로서 함께 논의하는 경우가 많다. 한편 풍화 잔적토는 크게 나누면 암석의 1차적 풍화로 토양화된 것을 Saprolite라 하고 이것이 극단적으로 풍화되어 토양화된 2차적 풍화산물을 Laterite라고 하는데 이들은 주로 풍화 환경에 의해 생성되고 주로 후자는 열대지방에서 보는 홍토(紅土)를 가리킨다.

원래 Saprolite는 1895년 미국 지질학자 Becker에 의해 화강암 풍화 잔적토가 명백한 모암조직을 보이고 있을 때 사용되는 것이 근래에는 모든 잔적토에서 모암의 조직을 확연히 보인 채 토양화된 경우를 가리키는 용어로 쓰이고 있으며 따라서 화강암질계 암석의 Saprolite는 우리가 흔히 말하는 화강토 또는 화강풍화토를 가리키며 실트·점토가 포함되고 장석류가 거의 소실되어 2차 광물화된 갈색토로 정의되고 있다. 안산암의 Saprolite는 황토(사질이 없는 경우), 응회암의 Saprolite는 전남 지방에서는 개흙으로 불리고 있는데 모두 모암의 조직이 역력히 보이지만 손가락으로도 부실 수 있을 만큼 풍화가 완전히 진전되고 있는 흙이다. Laterite는 1807년 Buchanan에 의해 고온 다습한 풍화 환경에서 Kaoline계의 점토광물을 많이 포함하고 그 가운데서 철, 알미늄등의 산화물 특히 산화철에 의해 붉은 색으로 착색된 점성토이고 풍화의 최종산물로 지칭된다. 이 Laterite는 그 앞단계 잔적토를 Lateritic soil이라 부르고 이 단계에서는 화학적 풍화가 중심이 된 풍화의 최종단계를 지칭하고, 이후 오히려 물리적으로 경화 단결된 풍화 경반(Hardpan)을 Laterite라 부르고 구별하기도 한다.

우리 나라 풍화 잔적토는 필자가 경험한 전남 지방을 중심으로 보면 가장 대규모로 존재하는 화강암질계의 화강토, 다음으로 산지에서 흔히 보는 모래끼가 매우적은 붉은 색 또는 황갈색의 안산암 풍화 잔적토로서 경상도에서도 광범위하게 분포되고 있으며 흔히 큰 규모는 아니지만 반암(斑岩) 풍화토가 관입되어 있는 경우가 많다. 또한 전남 능주 ~ 해남 진도에 광범위하게 분포되고 있는 회백색의 점토화된 응회암 풍화 잔적토, 그리고 유문암(流紋岩) 풍화 잔적토는 전남 나주 다도 일대와 무등산 산록에 분포하고 원래는 회백색이 많지만 전남 지방에서는 핑크색을 띠고 점토화 되어 존재하며, 드물지만 전남 능주 일대에 니암(泥岩) 풍화 잔적토가 존재하며 전남 광양, 경남 하동 일대에는 이들이 고속도로 면에 사면으로서 노출되어 이들 특유의 팽창성과 함께 절리가 굴착 직후부터 발생하여 비탈면의 경사를 수정하지 않을 수 없는 경우도 있었다. 그 외에 현무암(玄武岩) 풍화 잔적토는 제주도 일대에 넓게 분포되고 회갈색 또는 회청색으로 지질학자에 의하면 경기도 연천, 동두천 일대에 분포하고 있다 한다. 경상도에는 사암 풍화 잔적토가 Shale(頁岩) 잔적토와 혼존하고 있다고 하나 전남 지방에는 거의 없다.

3. 외국에서의 연구동향

풍화 잔적토의 대표적 사례는 화강암질계의 풍화 잔적토 이른바 화강토이다. 화강토라는 용어가 적절한 것은 아니지만 관례에 따라 화강토라고 쓴다. 이 화강토의 연구나 조사보고는 19세기부터 미국 지질조사소에서 연구가 시작되고 이것이 계기가 되어 동양에서는 일본에서 이미 옛부터 마사토라고 불러온 전통과 시공기법의 특수성 때문(옛부터 침수에 의한 붕괴에 대처) 일본 지반공학회에서 특수토로 지정하여 연구가 시작되었고 화강토의 본격적인 토질 역학적 연구는 1950년대부터 시작되었다. 1960년대에는 홍콩에서 Lumb에 의해 풍화에 의한 지반 공학적 특성이 발표되고 이후 범위가 넓어지면서 모든 풍화 잔적토에 연구의 관심이 보여져 오늘에 이르고 있다. 초기에는 재료로서의 공학적 특성에 초점이 맞추어졌으나 차츰 잔적토 지대와 자연사면 붕괴의 관계가 밝혀지게 되고 이 원인을 규명하는데 풍화 잔적토의 물리적 역학적 성질에 관한 연구가 필요하게 되어 불교란 시료의 채취가 불가결하게 되므로 새로운 불교란 시료의 채취기법이 연구 된지는 극히 최근의 일이다. 따라서 풍화 잔적토에 대한 비교란 시료에 의한 공학적 연구 결과는 외국에서도 그리 흔하지 않다. 이 가운데서도 거의 전부가 화강토에 집중되고 있다. 우리 나라에서도 최근 과기원의 이삼례 교수 팀이 시료채취기 개발에 주력하고 있는데 매우 이 분야의 연구에 고무적이라고 하지 않을 수 없다. 풍화 잔적토에 관한 국제회의도 그 동안 화와이, 브라질, 홍콩(1982), 중국(1988) 등에서 개최되었고 일본에서는 지반 공학회가 주동이 되어 연구회가 설치되어 가장 많은 연구와 현장 사례가 집적되고 있다. 그들의 풍화 잔적토에 대한 연구 접근 방법을 개관해 보면 첫째로 자국 및 세계 각국의 문헌을 수집하여 문헌의 주내용, 목적, 토질, 지반개요를 분석 대분하고 문헌번호를 부여하여 정보 검색에 이용하도록 준비하였으며 문헌 총 편수는 500편에 이른다. 두 번째는 각종 시료채취법을 개발하여 현장실험에 의해 검토하고 있다. 풍화 잔적토의 불교란 시료채취는 특히 화강토의 경우 여러 가지로 개발되고 있으나 문제점이 많을 것으로 알려져 (이를 본격적으로 검토한 예가 없어) 직접 실험을 통해 채취시료의 품질평가나 적합성이 검증되고 있다. 세 번째는 잔적토의 공학적 특성을 해명하기 위한 접근으로서, ①지반의 분류와 판별 ②불교란 시료의 채취, 성형, 시험법 ③물리적·공학적 성질과 Parameter의 평가 연구 ④기초 및 사면 안정에의 응용 등으로 연구위원회를 구성하여 연구를 진행시키고 있다. 네 번째는 현장 조사에 의한 지반검토로서 잔적토는 그 모암 특성으로 보아 실제 파악이 매우 중요하다. 즉 이들 지반은 불균질, 불연속성이 크고 풍화에 좌우되며 평가 방법이 서로 다를 수 있으므로 상호 비교가 어렵다. 따라서 각종 암석의 풍화 잔적토 지역에서 직접 조사 평가하여 각 잔적토의 특성을 밝히고 합리적 취급방법을 모색하고 있다. 다섯 번째로는 나아가 유사한 연구나 시공 사례를 외국과 정보교환을 통하여 국제적 협력아래 보다 더 합리적 조사방법이나 취급, 시험법 등을 모색하고 있다.

4. 잔적토의 풍화 메커니즘

풍화 잔적토는 그 모암의 종류에 따라 풍화 생성물이 당연히 다르다. 모든 암석은 그 풍화 과정을 물리적·화학적·생물학적 풍화 과정으로 구분하는데 마그마에서 암석으로 생성된 과정에서 응결, 수축 과정에서 발생한 균열에 침투된 물의 동결, 심한 온도 차이에 의한 암석 내부에 발생하는 온도 경사, 암석에 포함된 결정체의 이방성 열팽창, 건습의 반복등 붕괴 촉진 현상이 일어나면 균열은 더욱 발전하여 이들 경계면 에서부터 화학적 풍화로 이어진다. 화강암이나 섬록화강암등 거정질 암석은 암반중에 발생한 무수한 이와 같은 절리면(균열)으로 분리되어 더욱 세립으로 분해되어 가면서 오랜 지질학적 시간에 걸쳐 암괴 → 사질토 →실트 →점토까지 연속적으로 풍화되어 깊은 심층풍화대로 존재하는 이른바 화강토가 생성된다. 당연히 동일화 심층풍화대에서도 대기에 노출된 쪽은 보다 더 풍화가 진전되어 이른바 Saprolite나 Laterite화된다. 변성암의 풍화 잔적토도 특히 편마암의 경우 화강토와 비슷한 과정을 거친다. 다만 암괴 상태보다는 바로 암반에서 사질토 →실트 →점토로 풍화가 진전되고 안산암 풍화 잔적토는 균열이 덜하지만 본래 석영질을 소량 포함하고 있으므로 암반에서 바로 실트 →점토로 풍화가 진행

된다. 이와 같은 잔적토는 토양학에서 이른바 A, B층에 해당된다. 화강토의 생성에 대해서는 다음과 같이 설명되고 있다.

지각내부의 마그마 특히 규산(SiO_2)을 풍부하게 포함한 마그마가 지각 속에서 서서히 냉각 고결되어 화강암이 생성되고 그후 이 화강암은 지각의 융기나 침식작용으로 최종적으로 지표에 노출된다. 따라서 지각 심부에서 받았던 거대한 응력으로부터 차츰 해방되면서 암석덩어리가 팽창되고 균열(절리)의 발생이 촉진된다. 이와 같이 응력의 제거에 의한 팽창작용 때문에 발생한 균열의 성장은 조립질 광물로 이루어진 화강암에서 전형적으로 나타난다. 이와 같이 균열이 발생하면 언급한 것처럼 암반에 침투된 물의 동결작용, 심한 기온차이에서 오는 암석내의 온도경사 각 결정체의 이방적 (*Anisotropic*) 열팽창, 건습의 반복등 붕괴촉진현상에 의하여 기계적인 파괴작용(풍화작용)을 받으며 특히 지표근방이 심하여 간극율이 차츰 커진다. 이와 같은 물리적 풍화작용과 더불어 CO_2 개스를 충분히 함유하고 있는 물은 균열이나 간극을 따라 침투하고 사장석이나 흑운모 같은 불안전한 광물이 산화·환원·탄산화 등의 화학반응에 의하여 규산의 + ion의 용탈·수화작용을 촉진한다. 이와 같은 화학적 풍화작용은 구성결정 입자간의 결합력을 약화시키고 약 10% 정도의 간극율(n)을 갖는 풍화 화강암이 생성된다. 그러나 이때의 화학적 풍화단계는 아직은 미약하고 화학성분의 용탈이나 점토화 작용은 그리 크지 않다. 다만 화학적 풍화가 구성입자간의 간극이나 절리를 따라 진행되므로 약간의 점토광물이나 산화철이 제거되고 암석은 전체로 어두운 갈색을 띠는 것이 보통이다. 따라서 이 단계는 아직도 물리적 풍화가 탁월한 단계이다. 이와 같은 상태에서 다음과 같은 지형적·지질학적 조건이 갖추어지면 암석은 매우 큰 화학적 풍화작용을 받는다. (1) 화강암의 구성광물 중 석영이나 정장석 보다는 사장석, 흑운모, 각섬석 등을 더 많이 포함하는 암석 (2) 단층 파쇄대와 같이 물의 공급, 침투가 쉽고, (3) 지형이 평탄하며 침식작용이 미약하고 특히 새 퇴적물에 덮여 장기의 풍화가 가능한 것 등이다. 특히, (3)은 *Leneuf, Aubert, Iisima*의 연구에서 밝힌 것처럼 화강암 풍화대의 깊이나 풍화정도는 암석이 놓인 물리적·화학적 조건보다는 풍화를 받는 시간에 따라 정해진다고 한다. *Kinomiya*의 추정에 의하면 지표에서 약 2m 깊이에 있는 신선한 화강암이 화강토 상태로 풍화되는데는 600만년 이상이 걸린다고 한다.

한편, 이와 같은 심층풍화대의 풍화정도가 거시적으로 위쪽과 심부쪽에 큰 특성차이가 없다는 관점에서(위쪽에서의 간극율의 증가나 다소의 화학적 풍화의 진전은 노출되어 풍화가 촉진된 것) 즉 전반적으로 깊은 곳까지 염류 용탈이나 2차 광물의 생성이 있음을 볼 때 별도의 메카니즘에 의해 풍화작용이 이루어진 것이며 이를 "화강암 풍화작용"이라고 부르고 주로 결정입자 또는 결정체간의 온도 경사에 의한 이방성 팽창·수축·열수(熱水)작용 등이 풍화의 주원인이라고 보는 견해도 있다.

화강암이 오랜 시간의 용탈·분해작용을 받으면 입자간의 이완·분리가 촉진되고 세립화 되어 최종적으로 점토화가 촉진된다. 최종적으로 간극율은 n=20~60%에 이르고 점토질 화강토로 변한다. 이와 같은 과정에서 1차·2차 광물의 변화는 다음과 같이 요약된다. (1) 석영과 정장석은 풍화에 대한 저항력이 크고 완전히 토양화 되어도 잔류하고 있으며, (2) 사장석과 흑운모의 대부분은 토양화되고 최종적으로 소멸되며, (3) 사장석, 흑운모의 소멸에 따라 2차 광물이 생성되는데 이는 주로 *Illite, Vermeaculite, Gibbsite, Kaolinite,* 가수흑운모(백운모) 등 이다.

5. 화강토의 풍화도 구분

5.1 우리 나라 화강토의 물리적 변화

많은 풍화 잔적토 가운데서 그 분포가 가장 큰 것은 화강토이고 다음은 안산암 잔적토 그리고 응회암 잔적토일 것으로 지질학자들은 보고 있다. 화강토를 빼고는 두 잔적토는 거의 점성토에 가까운 잔적토이다. 화강토만이 매우 복잡하게 사질토에서 점성토에 이르기까지의 광범위한 풍화 과정을 보이고 있으나 대부분이 사질토에 속하고 있다. 따라서 화강토의 풍화도를 조사하는 것은 그것이 가장 크게 분포하

고 있다는 것 외에도 기타 풍화 잔적토의 풍화도 연구에 도움이 되므로 집중적으로 화강토에 대한 연구가 많다.

화강토뿐만 아니라 모든 풍화 잔적토에도 적용되지만 풍화의 정도를 구분(분류)하는 방법은 절취단면의 관찰부터 시작하여 탄성파 속도의 측정, 화학적 성질의 변화, RQD, 각종 Sounding 등등 여러 가지 방법을 생각할 수 있다. 그러나 모암의 종류가 다양하고 지역적으로 풍화환경이 달라 풍화도를 통일적으로 나타내는 지표는 없다. 특히 화강토의 경우는 불교란 시료의 채취가 어려운 점, 지반의 불균질성, 모암의 구성 성분의 차이 등 때문에 종합적 고려에 의한 정리가 어렵고 따라서 통일적인 구분이 거의 불가능하다. 다만 동종의 잔적토 심층 풍화대에 대해서는 공학적 관점에서 추정은 가능하다.

그 한 예를 Nishida. et al(1984)의 연구에서 보자. 그림-1은 동류의 연속 화강토 풍화대 단면의 토질, 물성을 알아보기 위하여 각 재료의 질적 변화를 X-선 회절강도, 강열감량 $I_g.Loss$, 및 구조 상태를 나타내는 자연 함수비 w_n, 비표면적 S_s, $0.1\mu m$ 이하의 간극비 $\overline{e}$, 인장강도 σ_t를 전 간극비에 대해서 (깊이 대신 간극비의 변화로 비교) 나타낸 것이다.

S_s, $I_g.Loss$, w_n는 매우 좋은 대응을 보이고 있으며 어떤 경우나 대략 $e=0.3$정도에서 증가하여 $e=1.2$정도에서 변화가 급격하다. 사장석의 X선 강도는 e의 증가와 더불어 감소되고 $e\fallingdotseq 1.2$ 부근에서 소멸된다. $0.1\mu m$이하의 $\overline{e}$는 $e=0.8$에서 증가하여 $e=1.0$ 이상에서 급증하고 e의 증가는 S_s와 좋은 대응을 보인다. $\overline{e}$의 증가는 입자의 세립화에 의해 바로 비표면적의 증가로 나타난 것이다. σ_t는 $e\fallingdotseq 1.0$에서 최소값을 갖는다. 이상의 결과로부터 풍화가 진행되면 공극은 증대해가고 e가 작은 범위에서는 주로 물리적 풍화가 우세하여 결정 입자간의 분리에 의한 공극이 발달하고 질적 변화가 시작됨을 의미한다. 풍화가 더 진행되면 공극은 증가되면서 간극이 결정내부까지 확대되고 이 단계에서 화학적 풍화가 진행되며 점토화가 시작된다.(이때의 간극을 micro pores라고 한다) 이 단계에서 결정 입자계면이 가장 많이 분리되므로 σ_t는 최소가 된다. 풍화가 더욱 진전되면 점토화 광물이 물과 2차 결합하여 2차적 인장강도가 발현되고 풍화가 가장 크게된 $e=1.5$정도가 되면 오히려 흙 구조로서는 불안정해져 압축되기 쉽다. 이것을 모식적으로 나타낸 것이 그림-2이다. 이 제안은 균등히 위에서 아래로 풍화가 진행된 균질한 화강토에 대한 것이지만 풍화의 진행은 이와 같은 경과를 거쳐 공학적 성질이 변하므로 잔적토의 풍화에 대한 개념이나 정보의 정리, 분류의 기초에 대한 사고의 바탕이 될 것으로 본다.

5.2 화강토의 풍화 지표

화강토의 풍화도의 구분은 지질학, 암반공학, 토양학, 토질공학의 입장에서 많은 방법이 제안되고 있는데 주로 색상, 탄성파 속도, Sounding, 기본적 성질(물성), 광물, 화학적 성질의 변화, 변형계수, 시공성 등 폭넓은 항목에 걸쳐 제안되고 있다. 그러나 모암의 종류나 지역성, 풍화환경의 차이, 불균질, 불연속성등으로 각각 차이가 있으나 상호 비교가 가능한 것을 표로 만든 것이 표-1(Nishida 1990)이다. 공학적 이용성의 관점에서는 이와 같은 풍화 정도를 나타내는 지표는 풍화의 전과정을 표현할 수 있고 공학적 목적에 맞고 비교적 간단해야 하는데 이와 같은 목적에 부합되는 지표는 현재까지는 제안되지 못하고 있는 실정이다.

표-1. Correlation of classification methods of weathering profile (Nishida 1990)

<table>
<tr><th colspan="11">Japan</th><th colspan="2">Foreign Countries</th></tr>
<tr><th>Tanaka</th><th>Kimiya</th><th>Kakitani</th><th>Matsuura Mukushiro</th><th>Oshima</th><th>Nosaki</th><th>Tanaka Okimura</th><th>Ito Kujime</th><th>Sueoka</th><th colspan="2">Nishida Aoyama</th><th>Deer Putton</th><th>Hong Kong</th></tr>
<tr><td rowspan="4">D
(Residual soil)</td><td>Zone VII
0.2~0.3</td><td>Surficial soil R
0.3</td><td>Surficial soil
0.3</td><td rowspan="3">D_I
<1.2</td><td rowspan="2">M_3
N=2~20</td><td>I</td><td rowspan="2">M_I</td><td>VI</td><td>VI</td><td rowspan="2">U</td><td rowspan="2">I-A</td><td rowspan="2">VI</td></tr>
<tr><td>II</td><td rowspan="2">V</td><td>III</td></tr>
<tr><td>Zone VI
0.5~0.8</td><td>Chemical weathering
C_I</td><td rowspan="3">I Zone

0.7</td><td rowspan="2">M_2

N=20~50</td><td>III</td><td rowspan="2">M_{II}</td><td rowspan="2">M</td><td rowspan="2">I-B</td><td rowspan="2">V</td></tr>
<tr><td>Zone V</td><td>C_{II}
0.5</td><td>IV</td><td>IV</td><td>II</td></tr>
<tr><td>Zone IV
1.0~1.2</td><td>C_{III}
1.5</td><td>D_{II}
<1.5</td><td rowspan="3">M_1

N>50</td><td rowspan="3">V</td><td rowspan="2">M_I</td><td>L</td><td rowspan="2">I-C</td><td rowspan="2">IV</td></tr>
<tr><td>D
C_I 1.5</td><td rowspan="2">Zone III</td><td rowspan="2">Physical weathering

P_I
2.0

P_2
3.0</td><td rowspan="2">II Zone
1.5</td><td>D_{III}</td><td rowspan="2">III</td><td rowspan="3">I</td><td rowspan="3">Weath-ered rock</td></tr>
<tr><td>C_{II}
1.5~2.5</td><td rowspan="2">C_I
2.3~3.3</td><td rowspan="2">II</td><td rowspan="2">II-A</td><td rowspan="2">III</td></tr>
<tr><td>C_{III}
2.5~4.0</td><td rowspan="2">Zone II
2.5~4.0</td><td rowspan="2">III Zone
2.0</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">II-B</td><td rowspan="2">II</td></tr>
<tr><td>A, B
4.0</td><td>Zone I
5.0~5.5</td><td>Non weathering
F
4.0</td><td>Fresh rock

4.5</td><td>I</td><td>III</td><td>I</td></tr>
</table>

(Numbers denote elastic wave velosity (V_p): N:N value

표-1의 상세는 문헌에 미루고 잔적토는 암석에서 최종적으로 점토로 변해가는 풍화 작용이라고 하는 과정에서의 질적 변화 생성물이다. 따라서 궁극적으로는 이와 같은 질적 변화(물리적 · 화학적)와 공학적 목적(강도, 압축성, 투수성)과의 관계를 살필 수 있으면 잔적토의 지반 공학적 특성과 풍화도와의 관련이 해명된다. 표-1은 이와 같은 목표로 제안된 것들인데 질적 변화의 지표로서는 화학적 변화를 제외하면 간극비(간극율), 자연 함수비의 변화, 강열감량, 밀도, 비중들을 들고 있다. 한편 Sounding으로서는 N값, N_{sw}(서전식 관입시험), 탄성파 속도(P-wave) 등이 대표적으로 쓰이고 있다. 이는 공학적 성질과 결부하려는 노력이지만 탄성파 속도는 최근에 공학적 성질보다는 풍화도의 구분에 중요한 역할을 담당하고 있어 앞으로의 연구가 주목되고 있다. 언급한 질적 변화와 공학적 목적에 대한 주요한 상호간의 관계에 대해 Nishida(1990)의 연구를 다음 그림-3에서 10까지 나타낸다.

이 그림도 e를 풍화의 지표로 보고 여러 물리량 즉 습윤밀도 ρ_t, 자연 함수비 w_n, 강열감량 $I_g.Loss$, 인장강도 σ_t, 압축지수 C_c, 일축압축강도 q_u, c, ϕ, k등과 비교하고 있다. 이는 평탄지와 같이 침식의 영향을 받지 않은 화강암계의 모든 암이 풍화과정에서 암질에 관계없이 암석→사질토→최종적으로 점토화되는 화강토에는 똑같은 경향으로 적용된다고 보고하고 있다. 이들 관계를 전 풍화과정에 대해서 요약하면 다음과 같다. ①풍화에 따른 습윤밀도 ρ_t의 변화 폭은 약 $1.3\sim2.2gr/cm^2$정도이고 (그림-3), 간극비 e는 0.3~1.5까지 변한다. 하한값이 대략 $e\fallingdotseq0.3$인데 이 이하의 풍화도 에서는 기계적 토공이 불가능한 한계이고 상한값은 $e\fallingdotseq1.5$로서 이 이상의 풍화도 에서는 재 압축된다고 본다. 통상의 화강토 지대에서는 침식 작용 등으로 $e\fallingdotseq1.2$정도이고 거친 결정을 갖는 화강토에서는 $e\fallingdotseq0.8$의 값도 관측된다. ②자연 함수비 w_n는 대략 측정결과의 중간 값인데 전체로서 비중이 크면 큰 값을 갖는 경향이 있다.(그림-4) ③강열감량 $I_g.Loss$는 $e=1.0$ 부근에서 급증하는 경향이 있고 그 이후에도 약 10%까지 증가하는 경향을 보인다.(그림-5) ④물리적 성질은 아니지만 인장강도 σ_t는 풍화에 따른 결정계면의 분리를 의미하고 있어 $e=0.7\sim1.0$ 부근에서 최소가 되다가 소멸되는데 e가 더 커지면

점토화에 의한 점성으로 인장 강도는 다시 증가되고 있다.(그림-6) 일축압축강도도 같은 경향이며(그림-8), ⑤변형, 강도 특성은 화강토 압축시험시의 침하량의 절반 이상이 즉시 침하이고 1차 압축종료시간은 1~2시간 정도, 압축지수 C_c는 그림-7에서처럼 직선 관계가 있고 전단 강도시험 결과에서는 직접 또는 삼축시험 결과(CD와 CU Test)인데 대략의 경향은 $\phi = 30 \sim 55^\circ$, $c \fallingdotseq 0 \sim 1.0$분포이고 $e \fallingdotseq 1.0$이상이 되면 ϕ가 감소되고 c가 증가된다. 투수계수 k도 $e \fallingdotseq 0.7 \sim 1.0$부근에서 최대이고 $e > 1$의 풍화도에서는 감소되는 경향이다.

이상에서 논의한 것이 풍화도 구분을 짓는 중요한 지표가 된다면 이는 불교란 시료에 의한 고도의 시험기법에 의해야 되며 실용적인 불교란 시료의 채취가 선행되어야 한다. 그러나 현재까지는 불교란 시료의 채취법은 개발 중에 있어 따라서 이와 같은 방법은 실용적이라고 할 수 없다.

필자는 강열감량과 표-1에서 Sueoka의 분류법에 주목하고 있다. Sueoka(1990)의 방법은 화강토의 광물 및 2차 점토광물의 화학 분석을 통해 풍화에 따른 변량을 화학적 풍화지표 CWI라고 하여 6단계로 풍화대를 분류하고 있다.

이와 같은 화학적 분석은 지반공학의 입장에서는 비실용적이지만 이 방법과 강열감량과는 매우 좋은 대응관계가 있어 최종적으로는 강열감량을 이용할 것을 목표로 한국화강토에 대해 CWI에 의한 시험과 $I_g.Loss$를 비교한 바 있다.

Sueoka는 전세계적으로 분포하고 있는 화강토는 그 풍화 환경에 따라 동종의 모암일지라도 풍화 양식이나 풍화 정도가 달라지므로 궁극적으로는 화학적인 조암광물의 변화로서 구분할 수밖에 없다는 관점에서 풍화에 예민한 광물의 화학적 분석을 통해 화학적 풍화지표 CWI(Chemical Weathering Index)를 표-2와 같이 제안하였다.

언급한 바와 같이 동종의 화강암일지라도 기후구에 따라 남극 대륙에서는 물리적 풍화에 의한 암석의 풍화가 이루어지고 온대에서는 우리가 보는 화강토와 같이 되고 열대에서는 Lateritic Soil이 되는데 이들 시료의 화학분석 결과를 검토 해보면 어는 경우나 풍화의 제 1단계에서 먼저 K_2O, CaO, Na_2O, MgO, MnO, FeO의 알카리 또는 알카리 토류금속이 용탈되고 제 2단계에서 SiO_2가 서서히 용탈되고 제 3단계에서는 A_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2가 (R_2O_3로 표현) 집적된다. 동시에 강열감량($H_2O(\pm)$)이 급증된다. 그런데 이들은 알카리 및 알카리 토류금속과 SiO_2 그리고 $R_2O_3 + H_2O(\pm)$의 3성분 좌표로서 생성 년대가 다른 화강암의 성분을 조사하면 mole단위 중량으로서 거의 동일한 $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TIO_2 + H_2O(\pm)$ 양을 갖고 있다. 따라서 이를 기준으로 CWI를 다음과 같이 제안하였다.

$$CWI = \left(\frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{all\ Chemical\ components} \right) mole \times 100(\%)$$

이것에 관한 상세는 문헌에 미루고 이 관계를 우리 나라 화강토에 적용한 것이 표-3이다. 그리고 여러 가지 토질 공학적 시험을 실시한 결과를 CWI와 관련시켜 나타낸 것이 표-4이다. 이 CWI법에서는 풍화 과정을 6단계로 구분하고 있는데 우리 나라의 화강토는 현재까지 대부분 CWI>20의 강풍화에서 거의 완전 풍화 잔적토로 보이며 화학적 풍화 단계가 계속되고 있는 것으로 보인다.

표-2(a). CWI와 화강토의 분류와 공학적 특징과의 관계

CWI (%)	Classification★	Extend of weathering	Classification of weathered granite	Cohesion and porosity
13–15	I	Fresh rock	Fresh rock	Increase
15–20	II	Slightly weathered	Weathered granite	Cohesion
	III	Moderately weathered		
	IV	Highly weathered	Granular disintegration sand	
20–40	V	Completely weathered	Masado soil Saprolite	Porosity
40–60	VI	Residual soil	Lateritic soil	
60–90	VII	Weathered hard pan (as cemented)	Laterite or bauxite	

★ Dearman, et al (1978)

표-2(b). CWI를 이용한 화강풍화토의 정의 (Sueoka 1990)

type of residual soil	Definition of term
Granular disintegration sand (화강토)	Sandy residual soil derived from granite having smaller than 30% CWI
Masado (화강토)	Sandy and silty residual soil derived from granite, having smaller than 40%
Saprolitic soil (화강토)	Residual soil which exhibits clear inherited structure features and lead to easy identification of the parcent rock, in case of granite origin, having more than 20% CWI
Lateritic soil (적색토)	It belongs to horizons A or B of well drained profiles developed under humid tropical climates, its clay fraction is constituted essentially of minerals of the kaolinite group and of iron or aluminum hydrated oxides. it is a soil in a physical sense and has more than 40% CWI
Laterite	It belong to horizons A or B of well drained profiles developed under tropical (sometime temperate) climates, it is constituted essentially of minerals of sesquioxide of iron and aluminum. It is cemented or pisolithic and having more than 60% CWI

표-2(c). CWI와 기후조건이 다른 지방과 풍화 잔적토의 형태에 대한 관계 (Sueoka 1990)

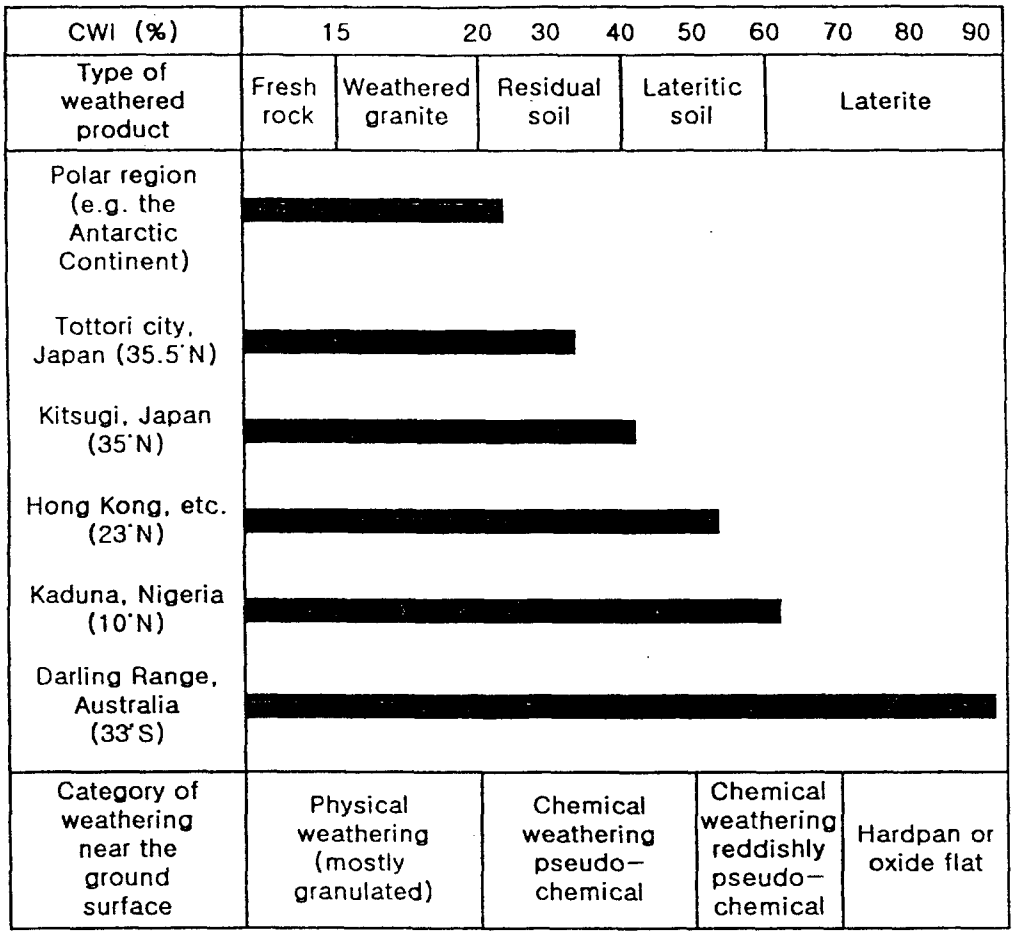
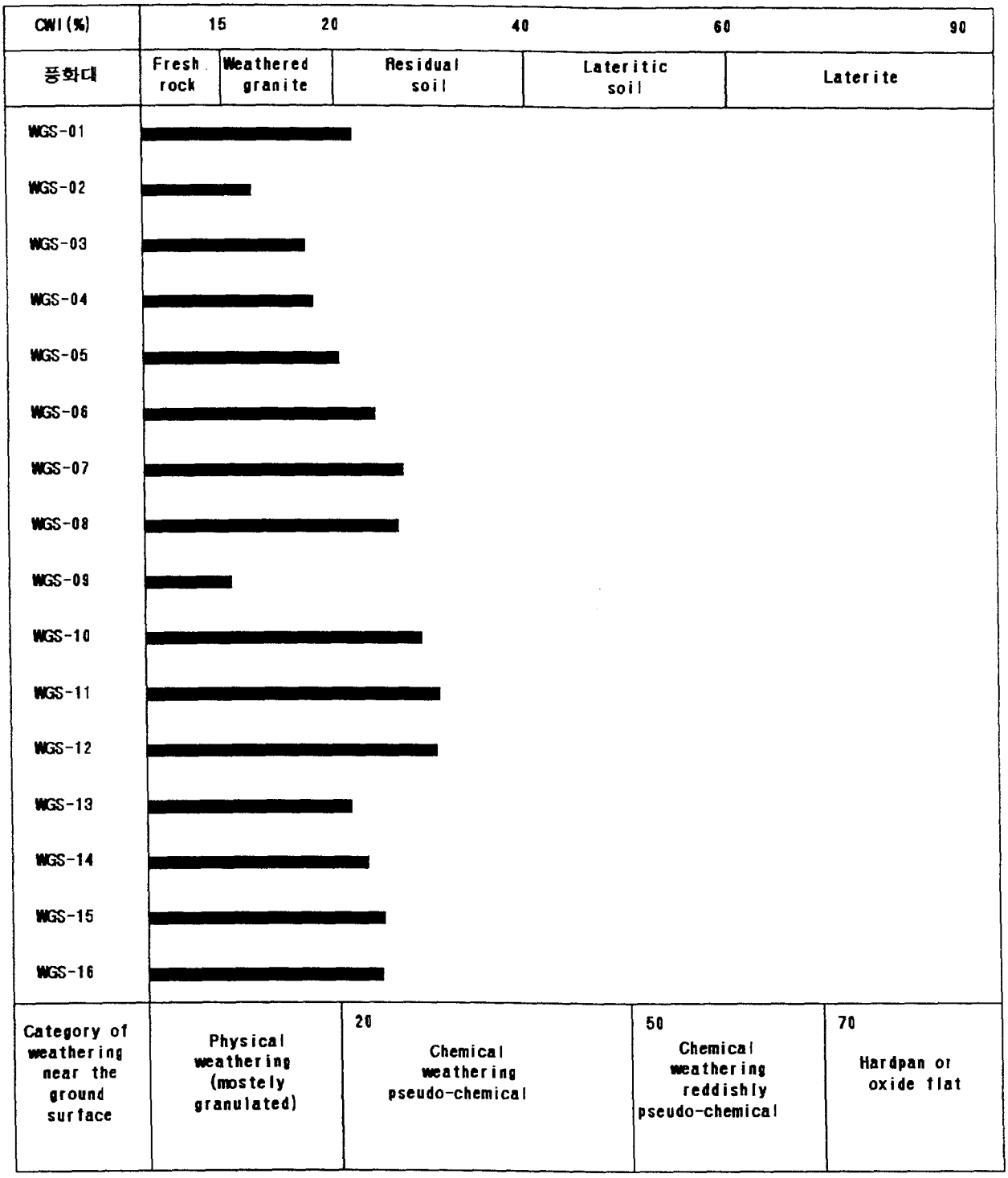


표-3. 지역별 화강토의 화학 성분 분석 결과 (1997)

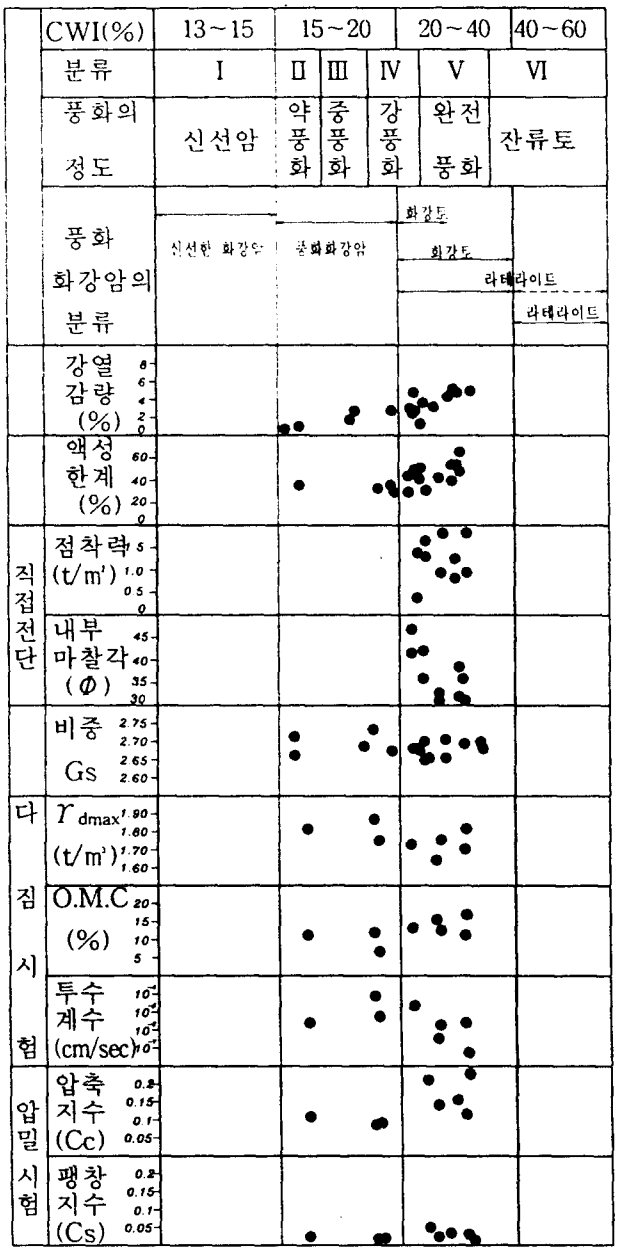
구 분	지 역	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	SiO_2	I_{gloss}	CWI
WGS-01	진 부 령	15.96	3.83	0.92	1.63	3.17	3.65	0.51	0.16	0.05	67.22	2.90	21.58
WGS-02	진 주	17.04	2.02	0.30	1.15	2.95	4.14	0.21	0.06	0.05	70.73	1.35	16.53
WGS-03	원 주	16.45	5.17	1.60	3.70	3.00	3.17	0.74	0.22	0.08	64.40	1.47	18.37
WGS-04	시 흥	15.70	3.48	0.49	0.63	2.70	4.60	0.25	0.07	0.06	69.86	2.15	18.88
WGS-05	풍 산	15.94	3.59	0.52	2.08	2.85	2.93	0.55	0.15	0.03	68.94	2.42	20.03
WGS-06	군 산	16.31	4.46	0.45	0.21	0.54	5.39	0.52	0.09	0.05	68.61	3.37	23.73
WGS-07	원 광 대	18.85	2.73	0.44	0.24	0.63	4.42	0.39	0.04	0.04	67.86	4.36	27.16
WGS-08	보성-육교	17.42	8.72	2.07	0.93	0.97	2.44	0.96	0.14	0.09	62.91	3.35	26.73
WGS-09	광주-첨단	16.64	2.04	0.32	0.51	2.58	4.86	0.18	0.05	0.06	71.66	1.10	15.48
WGS-10	풍암-평지	19.07	5.17	1.20	1.49	1.40	2.95	0.71	0.09	0.09	63.58	4.25	28.37
WGS-11	보성-득량	19.47	5.15	1.09	0.21	0.69	4.11	0.53	0.09	0.07	63.69	4.90	30.40
WGS-12	풍암-1단	19.63	5.33	1.59	1.77	1.17	2.98	0.61	0.07	0.08	61.98	4.79	30.16
WGS-13	풍암-2단	17.31	4.55	1.52	2.90	2.44	2.82	0.57	0.16	0.08	65.36	2.29	21.00
WGS-14	풍암-3단	19.95	6.20	1.99	2.63	2.19	2.86	0.74	0.10	0.11	61.34	1.89	22.70
WGS-15	옥천-중	18.50	6.85	1.79	2.09	1.97	2.23	0.80	0.15	0.07	63.01	2.54	23.98
WGS-16	옥천-하C	13.76	5.16	1.35	2.23	2.07	1.49	0.47	0.14	0.04	69.29	4.00	23.61



화학적 풍화지수(CWI)와 풍화도의 분류소(16개소)

표-4는 16개소 우리 나라 화강토의 여러 시험 결과를 CWI와 함께 나타낸 것이다.

표-4. CWI와 한국 화강토의 제 성질



필자는 이 Sueoka의 제안이 매우 합리적이라고 보고 있는데 그러나 이와 같은 화학적 분석 방법을 지반공학에서 쉽게 접근할 수 있는 실용적 방법이 아니다. 따라서 필자는 이 관계를 16개소에서 분석하고 여러 가지 간단하게 풍화 지표가 될만한 요소와 관련 시켜보고자 하였다. 그 결과는 그림-11, 12, 13과 같다. 그림-11은 16개소 시료의 평균적 강열감량(Li)과 그림-12는 역시 평균 SiO_2량 그림-13은 불교란 시료의 평균 간극율(n)과 Li와의 관계이며 그림-14는 광주 풍암지구 심층 풍화대의 3단계 절토 구간에서 깊이 별로 CWI를 조사한 것이다. 강열감량과 SiO_2량과는 CWI와 매우 좋은 대응관계가 있으

며 지역성, 암석종류에 큰 영향이 없는 것으로 보인다. 따라서 이 두 요인 중 강열감량은 풍화의 지표로서 CWI를 대신할 수 있지 않을까 검토 중에 있다. SiO_2는 실제로 조암광물의 성격에 좌우될 것이므로 좀더 Data의 집적과 판단이 필요하다. Li와 e나 또는 n(간극율)의 관계를 살펴본 것이 그림-13이다. 이는 비교란 시료라야 하는 문제점이 있으나 그 대응관계를 살핀 것인데 그림-11처럼 명료하지는 않지만 대응성이 있다고 보고 검토중이다. 그림-14는 동일 풍화대에서 깊이별로 CWI를 조사한 것인데 깊을수록 미풍화의 CWI가 얻어지고 있으며 각 깊이에서의 불교란 시료의 역학적 시험도 시행하였는데 다음 장에서 논의한다. 동일 풍화대라 하지만 막상 시료를 채취하려고하면 장석류, 유색광물의 분포가 극소면적에서 차이가 있음이 육안으로도 판단되어 화강토의 불균질성을 실감나게 한다. 이상의 시험 조사결과를 회귀 분석하여 CWI와 관개 진 것이 표-5이다. 이 결과는 현재까지의 조사 결과를 종합한 것으로 아직은 이와 같은 SiO_2나 Li, n, 또는 비표면적 증가비($\Delta S/S$)의 대응 값들이 어떤 풍화지표가 될 것이라는 확신은 없다. 다만 강열감량은 매우 대응성이 좋고 시험법도 극히 단순하므로 이 방법을 풍화지표로서 고려하고 있다. 지금까지 알려진 Li와 풍화도 관계는 미풍화는 $Li<2\%$, 중풍화는 $Li=2\sim4\%$, $Li>4\%$는 강풍화로 보고되고 있다. 강열감량은 잔적토의 풍화가 진행되면 결정수를 많이 포함하는 점토광물(2차광물)이 생성되는데 이 결정수량을 측정하여 풍화지표로 삼는 방법이다. 비교란 시료에서는 비표면적의 증가와도 밀접한 관계가 있음이 밝혀지고 있으며 3%이상에서는 수분이 응축할만한 간극이 발달한다고 하며 이를 풍화도의 지표로 이용하려는 것이다. 다만 유기질을 포함하거나 모암이 다른 경우에는 차이가 있다는 것이 정설이다. 측정은 $5gr$의 시료를 100℃~1000℃의 oven에서 1시간 가열하여 그 전후의 중량 감소량으로부터 계산하는 간단한 방법이므로 실용성이 높다.

그림-15(a),(b)는 광주 풍암 심층 풍화 잔적토의 깊입별 물성값과 N값과 강열감량을 정리한 것이다. 풍화가 깊어질수록 덜 진전되고 있음을 각 측정치가 보여주고 있다.

6. 국내 비교란 화강토의 공학적 성질

6.1 화강토의 일반적 시험 결과 및 CWI(화학적 풍화지표)

표-3에 보인바와 같이 16개소의 화강토에 대해 교란 또는 비교란 시료를 채취하여 토질 공학적 실내시험을 실시하고 있다. 물리적 성질을 표-6, 표-7에 나타낸다. 비교란 시료는 소정의 깊이까지 굴착된 위치에서 직경 $30cm$의 아크릴 원판에 미리 낸 못구멍에 큰 못($\phi5\times17cm$)을 원둘레에 박고 꽃삽으로 파낸 후 꺼내어 즉시 함수비의 변화를 막기 위해 시료 주위를 랩으로 여러 차례 감고 또 하나의 원판을 대고 보드로 조인 후 실내로 반입하는 방법을 썼다. 시료는 모두 지표에서 3~13m이내의 절취면 상단의 깊이에서 채취한 것이다.

표-6은 입경분석 결과이며 시험자의 개인차를 없애고 상호 비교가 되도록 조립토는 KS에 규정된 데로 5분씩 ro-tap shaker에서 분석하고 200번체 이하는 침강시험에 의하지 않고 자동 입도 분석기(Malvern)를 사용하였다. 비표면적은 풍화에 의해 화강토가 세립화 되어 가는 과정에서 표면적이 증가하므로 입경분포곡선상의 어는 기준 통과량의 입경으로 비교하는 방법이다. 통상 세립이 많은 경우는 D_{10}과 D_{50}이 사용되는데 각각 A, B로 구별하였다.

이 비표면적은 동일한 직경의 구에 대해서 단위체적당 총 표면적과 기준입경의 체적과의 비(cm^2/cm^3)로 나타낸 것으로 Spangler(1957) Fukumoto(1995)의 방법을 따른 것이다.

유동지수는 Fall cone 방법에 의한 액성한계를 말하며 통상의 방법으로는 N.P이다.

표-6. 반입시료의 입도분석(원시료)

시료번호	비중	최대입경 (mm)	D60 (mm)	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	0.074체 통과량(%)	균등계수 (Cu)	곡률계수 (Cc)	강열감량 (%)	비표면적 (㎠/㎤) A	비표면적 (㎠/㎤) B	X선 회절시험	유동지수 (wf(%))	비고
WGS-1	2.68	5	1.10	0.16	0.48	0.80	4	7	1.3	2.90	375	75		33.95	진부령
WGS-2	2.64	6	1.20	0.14	0.38	0.84	2	9	0.9	1.35	428	71.42		38.83	진주
WGS-3	2.74	4	1.00	0.15	0.41	0.77	4	7	1.1	1.47	400	81.1		34.82	원주
WGS-4	2.68	3	1.40	0.032	0.46	0.96	4	44	4.7	2.15	1,875	62.5	○	36.45	서울
WGS-5	2.67	6	1.60	0.06	0.50	1.13	4	27	2.6	2.42	1,000	53.1		35.8	풍산
WGS-6	2.69	7	0.39	0.0048	0.14	0.27	12	81	10.5	3.37	12,500	222		33.77	군산
WGS-7	2.66	3	0.70	0.026	0.14	0.42	-	27	1.1	4.36	2,307	142.8	○	61.62	익산
WGS-8	2.71	6	1.00	0.006	0.28	0.80	-	167	3.3	4.90	10,000	75		50.08	보성
	2.72	5	1.80	0.014	0.70	1.50	6	129	19.4	3.35	4,286	40		39.04	보성
WGS-9	2.61	10	0.65	0.09	0.17	0.40	8	7	0.5	1.10	667	150		40.4	광주월산
WGS-10	2.69	5	0.50	0.02	0.10	0.70	16	25	1.0	2.51	3,000	85.7	○	52.84	광주풍암
WGS-11	2.68	4.8	0.62	0.026	0.19	0.72	8	24	2.2	4.76	2,308	83.3		50.08	보성
WGS-12	2.69	4.8	0.78	0.022	0.25	0.57	4	35	1.7	4.79	2,727	105.2		51.98	광주풍암
WGS-13	2.69	6.0	0.83	0.022	0.24	0.56	5	38	3.1	2.29	2,727	109.1		42.93	광주풍암
WGS-14	2.68	5	0.88	0.022	0.22	0.60	3	40	0.8	1.89	2,727	100		46.87	광주풍암
WGS-15	2.66	5.5	0.78	0.030	0.31	0.65	10	26	4.1	3.85	2,000	92.3		45.27	옥천B
WGS-16	2.66	4.8	0.80	0.037	0.37	0.70	14	16	4.6	4.0	1,621	85.7		44.17	옥천C

※ 비표면적 A : 입경 D_{10}기준, B : 입경 D_{50}기준

표-7은 교란시료를 표준 다짐시험을 시행하여 각 단계 함수비별로 압축시험을 시행하였다. 이는 불포화 다짐시료가 침수를 받아 포화상태에 이르기까지의 압축지수(C_c)나 팽창지수(C_s) 등 압축특성을 조사하기 위한 것인데 "다짐 포화"란 각 함수비별로 다짐하고 거기서 압밀 시료를 취하여 포화시킨 후 압축시험(압밀시험)을 실시한 것이며 "다짐 자연"은 포화시키지 않고 불포화 상태로 압축시험을 실시한 것을 의미한다. (표-7(a)) 표-7(b)는 같은 내용이지만 다짐 시험 후는 입자의 파쇄가 일어나고 있으므로 시험전후의 200번체 통과량의 차이를 알아보기 위해 다짐후의 200번체 통과량을 기록해 둔 것이다. 표 하반부 "풍암"이하는 불교란 시료(UD로 표기)로서 "포화상태", "자연상태"는 위와 같은 의미이고 "UD 수직", "UD 수평"은 공시체의 채취를 "수평"은 지표면과 수평히 채취한 것을 의미하고 "수직"은 지표면에서 깊이 방향으로 90° 회전하는 방향으로 시료를 채취한 것을 의미하는데 풍화 잔적토의 압축이나 전단강도에 있어서의 "이방성 특성"(Aniostropically character)을 검토하기 위한 것이다. 아직은 연구가 진행 중이므로 결론을 내릴 수는 없으나 다짐토의 경우는 거의 이방성의 차이는 무시할 만 한 것으로 보인다. 이 표에서 3m, 8m, 13m는 동일 풍화대 계단 절개면 에서 -3m, -8m, -13m 깊이에서 딴 시료를 의미하며 2차분이란 -13m부근의 시료의 조성이 채취할 때부터 변화가 커서 재 채취한 시료를 의미한다. 이들 시험 결과는 아직 검토 중에 있다.

표-7(a) 각종 시험별 압축시험 후 입도분석 결과(1)

	시험 상태	함수비 (%)	200체 통과량(%)	CWI (%)	강열 감량(%)	γ_d (KN/m³)	e_0	Cc	Cs
진주 (WGS-2)	다짐 포화	3.56		16.53	2.42	16.53	0.597	0.101	0.010
		7.01				17.70	0.492	0.103	0.014
		10.87				18.22	0.449	0.077	0.015
		16.44				17.65	0.496	0.087	0.002
		19.09				16.72	0.579	0.069	0.010
	다짐 자연	3.56				16.53	0.597	0.057	0.597
		7.01				17.70	0.492	0.050	0.492
		10.87				18.22	0.449	0.039	0.449
		16.44				17.65	0.496	0.062	0.496
		19.09				16.72	0.579	0.053	0.579
원주 (WGS-3)	다짐 포화	4.79	9~10	18.37	1.47	17.49	0.567	0.080	0.012
		6.53				18.00	0.522	0.098	0.021
		10.64				18.60	0.473	0.095	0.014
		12.33				18.62	0.472	0.068	0.018
		16.38				18.03	0.520	0.082	0.012
	다짐 자연	4.79				17.49	0.567	0.056	0.006
		6.53				18.00	0.522	0.062	0.013
		10.64				18.60	0.473	0.088	0.009
		12.33				18.62	0.472	0.049	0.01
		16.38				18.03	0.520	0.058	0.011
시흥 (WGS-4)	다짐 포화	6.17	17	18.88	2.15	14.80	0.810	0.090	0.010
		7.00	13			17.57	0.675	0.095	0.017
		7.95	19			15.91	0.525	0.068	0.016
		11.03	19			15.66	0.684	0.075	0.022
		13.00	14			15.32	0.729	0.090	0.018
	다짐 자연	6.17	19			14.80	0.810	0.028	0.086
		7.00	12			17.57	0.675	0.051	0.011
		7.95	16			15.91	0.525	0.042	0.012
		11.03	14			15.66	0.684	0.038	0.014
		13.00	13			15.32	0.729	0.043	0.011
군산 (WGS-6)	다짐 포화	4.84		23.73	3.37	17.07	0.576	0.138	0.0232
		8.80				17.15	0.569	0.111	0.0149
		12.83				17.64	0.525	0.078	0.0033
		16.15				17.57	0.531	0.101	0.0216
		21.61				16.47	0.633	0.106	0.0209
	다짐 자연	4.84				17.07	0.576	0.073	0.0081
		8.80				17.15	0.569	0.058	0.0075
		12.83				17.64	0.525	0.042	0.0408
		16.15				17.57	0.531	0.051	0.0124
		21.61				16.47	0.633	0.066	0.0060
익산 (WGS-7)	다짐 포화	4.70	32	27.16	4.36	14.30	0.860	0.154	0.0300
		7.51	32			16.40	0.619	0.145	0.0356
		9.42	30			14.40	0.529	0.086	0.0405
		12.62	34			18.00	0.472	0.075	0.0256
		14.23	33			17.07	0.558	0.086	0.0080

표-7(b) 각종 시험별 압축시험 후 입도분석 결과(2)

	시험 상태	함수비 &구분(%)	200체 통과량(%)	CWI (%)	강열 감량(%)	γ_d (KN/m³)	e_0	Cc	Cs
익산 (WGS-7)	다짐 자연	4.70	23			14.30	0.860	0.206	0.038
		7.51	28			16.40	0.619	0.080	0.020
		9.42	32			17.40	0.529	0.088	0.040
		12.62	30			18.00	0.472	0.049	0.024
		14.23	29			17.07	0.558	0.065	0.012
풍암 (WGS-10)	다짐 포화상태	7.27	34	28.37	4.25	16.20	0.660	0.119	0.027
		10.72	33			16.29	0.651	0.171	0.033
		12.73	34			16.28	0.652	0.173	0.035
		15.89	30			16.83	0.598	0.134	0.029
		18.54	31			16.96	0.586	0.124	0.029
		21.24	36			16.90	0.592	0.145	0.037
		24.96				15.42	0.744	0.186	0.036
		27.90	29			14.86	0.810	0.196	0.030
	다짐 자연상태	7.27	32			16.20	0.660	0.088	0.014
		10.72	32			16.29	0.651	0.095	0.015
		12.73	36			16.28	0.652	0.096	0.011
		15.89	34			16.83	0.598	0.079	0.012
		18.54	30			16.96	0.586	0.086	0.019
		21.24				16.90	0.592	0.082	0.013
		24.96	31			15.42	0.744	0.440	0.015
		27.90	27			14.86	0.810	0.156	0.018
풍암 (WGS-10) UD : 비교란 시료	UD수평 포화상태	3m	34	30.16	4.79	11.45	1.339	0.426	0.084
		8m	16	21.00	2.29	14.18	0.876	0.231	0.055
		13m	22	22.70	1.89	14.80	0.797	0.176	0.048
		2차분	41	28.37	4.25	14.18	0.876	0.208	0.051
	UD수직 포화상태	3m	25	30.16	4.79	12.88	1.080	0.256	0.042
		8m	19	21.00	2.29	15.23	0.746	0.154	0.028
		13m		22.70	1.89	15.41	0.726	0.141	0.024
		2차분	25	28.37	4.25	14.11	0.907	0.182	0.027
	UD수평 자연상태	3m	29	30.16	4.79	11.45	1.339	0.354	0.035
		8m	11	21.00	2.29	15.23	0.876	0.187	0.017
		13m	19	22.70	1.89	14.80	0.726	0.128	0.017
		2차분	34	28.37	4.25	14.18	0.876	0.160	0.025
	UD수직 자연상태	3m	23	30.16	4.79	12.88	1.081	0.241	0.025
		8m	14	21.00	2.29	15.18	0.754	0.104	0.006
		13m	21	22.70	1.89	15.41	0.797	0.117	0.016
		2차분	24	28.37	4.25	14.11	0.906	0.130	0.017
익산 (WGS-7)	UD수평 포화상태	3m	25	27.16	4.36	12.88	1.066	0.174	0.037
	UD수직 자연상태	3m	26			12.82	1.075	0.233	0.031
옥천	UD 포화상태	수평		23.61	4.00	13.22	1.035	0.205	0.049
		수직				13.37	1.041	0.289	0.052
	UD 자연상태	수평				13.19	1.039	0.152	0.029
		수직				13.37	1.011	0.137	0.028
횡성	UD 포화상태	수평			2.75	15.13	0.763	0.156	0.029
		수직				15.49	0.717	0.177	0.026
	UD 자연상태	수평				15.18	0.765	0.131	0.019
		수직				15.55	0.717	0.167	0.015

6.2 압축특성

화강토의 압축성을 파악하기 위하여 불교란토와 교란토(다짐토)에 대해 표준압축(압밀)시험을 실시하였다. 시료는 불포화 및 포화시켜 비교하였는데 그림-16(a)는 광주 풍암 화강토를 그림에 보인 첨가 함수비로 표준다짐을 실시하여 압축시료를 만들어 압축시험을 실시(점선)하고 다른 또 하나의 시료는 압밀링에 시료를 설치하고 24시간 침수시켜 포화상태에서 압축시험을 실시(실선)하였다. 그림-16(b)는 이 가운데 몇 개를 따로 나타낸 것이다. 한편 같은 화강토를 불교란 상태에서 압축시험을 실시한 것이 그림-17이다. 이 불교란 시료는 동시에 같은 위치에서 풍화도의 차이(깊이가 -3, -8, -13m이고 강열감량이 다르다)에 따른 압축성도 알아보기 위해 함께 도시하였다.(교란시료는 -3m 깊이에서의 시료이다) $e-\log P$곡선은 교란시료에서는 명확한 압밀 항복 하중이 나타나지 않고 즉시 침하가 탁월한 것 같다. 거의 하중재하 후 20분 이내에 침하가 멈추고 이 현상은 포화와 불포화 시료에서 초기부분에서 거의 차이가 없고 약 60kPa이후에 포화토가 약간 침하가 커진다. 이 한계가 압밀항복하중에 해당되는 듯 하지만 퇴적토의 압밀선행하중의 개념과는 일치하지 않으며 이 한계가 압축에 의한 입자파쇄의 시점이 아닌가 추측된다. 그림-16(b)는 다짐 함수비의 증가와 더불어 조금씩이나마 포화토의 경우 침하가 커지고 입자파쇄도 쉽게 일어나는 경향을 보인 듯 하다. 한편 그림-17의 불교란 시료의 경우는 재료의 차이가 있기는 하지만 비교적 압밀항복점은 명확한 편이지만 풍화도가 낮으면(깊으면) 덜 명확해지고 역시 즉시 침하의 형태로 이어진다. 그리고 곡선형태는 γ_d의 크기에도 의존하는 것 같다.

이 불교란 시료의 압축지수와 초기 간극비와의 관계를 그림-18에 나타낸다. 비교적 직선관계가 있음이 인정된다. 또한 풍화지표로서 Li와의 관계를 C_c 및 C_s(팽창곡선 경사)에 대해 나타낸 것이 그림-19이다. 이 그림에서 Horizontal, Vertical은 시료의 이방성을 알아보기 위하여 공시체의 채취를 지표에서 수평방향(통상의 방법)과 수직방향으로 채취하여 시험한 것이다. 역시 포화(Sat), 불포화(Unsat)의 두 종류의 시험을 실시한 것으로서 그림-17의 -3m($Li=4.79\%$)의 시료는 이 그림에서 ③,④에 해당된다. 대략 Li가 증가하면 C_c는 커져가는데 수직방향의 시료(①,②)는 수평방향 시료(③,④)에 비해 크게 일어나는 경향을 볼 수 있어 풍화가 진행될수록 이방성의 영향이 있는 것을 짐작할 수 있다. 그러나 대체적으로 C_s는 큰 변화가 없으며 이방성 영향도 적은 것으로 보인다.

다짐토에 있어서도 압축항복점이 불명확하므로 그림-20에 보인 것처럼 γ_d를 고정하고 일련의 다짐시험을 실시하여 각 단계별로 압축시험을 포화, 불포화상태에서 시험한 것이다. 그리고 Li가 다른 시료에 대해서 똑같이 시행하였다. 그림-20은 $Li=4.25$의 경우인데 곡선형태는 γ_d가 약 $16kN/m^3$인데도 비교적 선명하게 나타나고 있으며 $e-\log P$곡선을 살펴보면 초기 침하곡선부와 정규압축부의 곡선과는 간극비 변화량으로 보아 차이가 있으므로 이를 "탄성영역과 소성영역"으로 구분한다면 이들의 한계값을 설정할 수 있다. 그림-21내에 나타낸 바와 같이 초기곡선부(탄성영역)의 접선과 정규압축부의 연장선의 교차점을 p_{y1}이라 하며 탄성영역의 한계로 보고 정규압축부 직선연장선의 시점을 p_{y2}라고 하면 이는 소성영역의 시점이라고 볼 수 있다. 이들 값의 변화는 풍화도와 관계가 있을 것으로 판단하여 그림-21과 같이 나타낸다. 이 그림에 의하면 탄성변형 영역 또는 과압밀 영역에 해당되는 p_{y1}은 풍화에 관계없이 거의 일정한 경향이며 이는 그림-19의 C_s선도 같은 의미로 해석된다. 한편 C_c의 변화와 관계되는 p_{y2}는 그림에서처럼 풍화도에 의존하며 p_{y2}가 감소되고 있어 압축특성은 소성성분의 변화와 풍화도에 관계가 깊다는 것을 보여 준다. 그리고 다진 흙의 경우는 이방성문제는 그리 큰 영향은 없는 것으로 보인다.

결론적으로 화강토는 압축시 배수속도로 보아서는 사질토이고 침하의 지속성으로 보아서는 점성토와 같은 거동을 보이고 있다. 다만, $e-\log p$곡선에서 정규 압축부분이 직선이라기 보다는 곡선형을 나타내는데, 이는 압축에 의한 입자파쇄의 영향이라고 볼 수밖에 없다. 이 관계는 입자 파쇄의 연구 결과에서 입자 비표면적의 증가 등에서 짐작 할 수 있다. 압축과정에서 화강토의 토립자는 초기 간극비가 느

슨한 경우는 처음부터 파쇄가 진행되고 이로 인해 안정된 입자 배열로 이행하여 평형상태에 이른다. 한편, 초기 간극비가 작고 (γ_d= 15 kN/m^3이상, ϵ<0.80) 촘촘한 경우는 같은 압축력에서 초기 파쇄는 상대적으로 더 작지만 오히려 탄성변형율의 에너지로서 축적되었다가 높은 압축 압력에서는 이것이 발휘되어 오히려 급격한 파쇄가 크게 진행된 것으로 판단된다.

6.3 국내 화강토의 전단시험에서 나타난 특이점

화강토의 전단특성은 풍화도에 크게 의존하고 특유한 Dilatancy거동과 관련되는 Stress-Strain관계가 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이 토질은 생성론적 관점에서는 화강토라고 하는 분류에 들어가지만 풍화도에 따라 화강토의 역학적 거동이 크게 달라지므로 거동자체만으로는 하나의 범주에서 논의 할 수 없으므로 특수토로 분류되고 있다.

풍화정도에 따라 암석으로서의 특성을 아직도 보유하는 화강토도 있고, 또는 모래와 같은 거동, 더 나아가 점성토의 거동을 보이는 다양성 때문에 특수토로 규정하고 Case by Case로 처리 할 수밖에 없다. 그러나 기본적으로는 각 풍화도 단계에서의 거동은 현재까지의 토질역학에서 밝혀진 여러 가지 역학적 거동과 다르거나 모순되지 않는다. 한편 화강토의 전단 정수(c, φ)는 토압, 지지력, 사면안정 문제를 다룰 때 다른 경우와 똑같이 통상 변형의 정도를 무시하고 Peak강도를 채택하거나 3축압축시험등에서는 특별히 Strain이 15%정도의 값을 택하도록 하거나 직접전단시험에서는 변위 8mm에 대응하는 전단응력의 값을 택하도록 하기도 한다. 그러나 화강토와 같이 거정질 결정체의 풍화토는 어떤 강도를 발휘하기 위해서는 그에 대응되는 변형의 진행이 필요하고 그렇게 되면 강도정수는 전단과정에서 일정 하지 않고 변형의 진행에 따라 변화한다. 실제의 경우를 보아도 지반이나 사면의 내부에 있어서 변형이 한결같지 않고 내부 각 점의 전단 강도는 변형의 함수로서 표현된다. 따라서 실제지반이나 사면에서는 변형량의 분포를 추정하고 그에 대응하는 강도정수를 결정하는 것이 옳다.

본 장에서는 현행시험법에 의한 전단강도를 평가하고 시험조건을 달리한 경우 예컨대 구속압, 흙의 상태(포화와 불포화, 불교란과 교란) 그리고 풍화도의 이들에 대한 영향 등을 고려하여 강도 정수가 어떻게 발휘되는가를 검토한다.

6.3.1 현행직접전단시험에 의한 전단정수의 평가

화강토에 대해서 교란 및 불교란 시료에 대해 삼축압축시험을 시행하는 것은 쉽지 않으며 특히, 불교란 시료는 채취와 성형이 어렵고 성형시 실패하는 경우가 많다. 가장 손쉬운 방법은 시료가 작고 실패율이 적은 직접전단시험이다. 그러나 직접전단시험은 시험결과를 평가하는데 특히, 다음과 같은 문제점이 있다.

① 현행 직접전단시험은 Coulomb의 파괴선을 얻기 위해 단순 반복적으로 시험하기 때문에 통상 수직하중을 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm^2의 단계로 재하여 파괴선의 직선성을 이용 c 및 φ를 정한다. 그러나 큰 하중을 받는 화강토 기초지지력의 경우는 달리 하더라도 사면안정해석의 경우는 상재하중이 불과 1m이내의 두께에 의한 하중상태이므로 수직하중의 저압부에서의 c값의 변동에는 문제가 제기되고 있다. 또한 이와 같은 직선파괴선의 절편이 c라고 하는 물리적 의미가 매우 희박하다.

② 현행 직접전단시험에서 얻은 강도정수가 과연 어떻게 발현되고 있는가에 대해 불분명하다는 점이다. 이 두 문제에 대해 통상의 직접전단시험을 통해 검토한다. 그림 6-22(a)는 광주 풍암 불교란 화강토에 대해 최소 하중 σ=6.7 kPa(0.07 kg/cm^2)부터 표준하중시험까지 8단계로 나누어 시험한 결과를 토대로 점착력 c의 변화를 조사한 것이다. 표준하중의 4단계를 재하하여 직선으로 연장하는 경우에 비해 σ= 40kPa(0.4kg/cm^2)이하에서는 c값이 이들과 직선이 아닌 곡선형으로 정해지는 것을 알 수 있다. 그리고 풍화도가 다른(깊이가 다른) 동일 풍화대에서의 화강토를 시험한 것인데 c값이 그림에 기입된 것처럼 달라진다. $\sigma \geq 32kPa$보다 큰 구속압에서는 통상시험법의 파괴선인 직선으로 정리하고 풍화도(깊이)

별로 이들 직선으로부터 연장하여 얻어진 c값과 φ값을 우측에 기입한다. 한편 정확히 $\sigma \leq 26kPa$이하의 구속압으로 전단하여 τ축으로 접근하면 c값은 저하되고 좌측에 표시한 것처럼 c = 20 ~ 12kPa사이로 변하고 있다. 이 부분을 직선으로 보고 연장하여 얻어진 φ값도 기입하였다. 이 때는 c값이 급격하게 저하되므로 φ값은 크게 나타난다. $26 < \sigma < 32\ kPa$범위는 직선에서 곡선으로 변위과정으로 보인다. 또한, φ값도 어느 값을 택하느냐에 따라 달라진다. 현행의 직접전단시험 결과는 저압부를 고려하지 않는 한 c에 대해서 과대 평가될 가능성이 있다. 한편, 이 저구속압에 의한 φ값은 과대한 결과를 나타낸다. 결과적으로 φ는 통상방법으로 c는 저구속압에 의해 결정하는 것이 옳다. 이는 본래 화강토의 파괴선이 곡선포락선임을 의미한다. 그림-22(b)는 직접전단시험의 전단응력과 수평변위 관계에서 수평변위가 재하단계별로 같은 점을 $\tau - \sigma$면에 도시한 것이다. 깊이가 -13m에 대해서만 나타냈는데 어느 변위에서 c, φ값이 가장 크게 동원되는가를 살피기 위한 것이다. 그림-22(b)에서 -13m에서는 φ의 최대치는 4mm의 변위에서, c의 최대치는 2mm의 변위에서 나타나며 각각 최대값을 발휘하는 변위의 값이 다르다.(-3m의 경우 생략)

한편, 그림-22(c)에서는 표준하중의 직접전단시험에 의한 c, φ값을 비교하였다. 그림에서 -3m의 c는 맨 윗선 c=35kPa, φ는 맨 아랫선 $\tan\varphi = 0.68$로 평가되고 -13m의 경우는 c=30kPa, $\tan\varphi = 1.17$($\varphi = 49°$)로 평가되고 있다. c는 -3m, -13m의 경우 모두 위험측으로 평가되는 반면 φ는 모두 안전측으로 평가되고 있다. 이런 현상은 다른 경우에도 모두 같다. 따라서 현행의 평가방법은 적어도 c값의 결정에 있어서는 사실상 위험측의 평가를 하고 있다고 볼 수 있다. 그렇다고 φ값이 충분히 안전한 것은 아니고 동일 위치에서도 시료에 따라 얼마든지 c, φ값이 달라져 한 두 개의 시험결과만으로 판단하는 것은 문제가 있음을 보여준다. 결론적으로 간편하고 실용성이 크기 때문에 이용되는 직접전단시험은 다음과 같은 이유로 시험방법 및 평가방법을 바꾸어야한다.

그림-23(a)에 나타낸바와 같이 직접전단시험을 시행할 경우 대략 구속압을 $\sigma = 40kPa$이내에서 등간격으로 $\sigma_c = 10,\ 20,\ 30\ kPa$정도 세분하여 전단하고 (Zone Ⅰ), $\sigma_c > 40\ kPa$에서는 통상의 전단시험법을 이용한다(Zone Ⅱ).

만일, 번거로울 때는 $\sigma_c = 10$ 또는 $20kPa$에서 1점만 시험하여도 과대평가는 훨씬 줄어든다. 한편, 고압부에서는 ($\sigma_c \geq 500kPa$) 입자파쇄가 이루어져 내부마찰각 φ는 감소된다는 것이 입증되고 있으므로 고압에서는 별도의 고려가 필요하다. 이 때는 시험을 통해 φ를 정하되 c는 Zone Ⅰ에서 얻은 결과를 쓰는 것이 안전측이다. 화강토는 통상의 직접전단시험에서 얻는 결과를 가지고 파괴선을 직선으로 연장하면 c가 과대 평가된다는 것을 시사하고 이를 연장하면 φ는 표준재하때 보다 커진다. 따라서 그림-23(b)와 같은 곡선형 파괴선이 예상되므로 실용적으로는 c와 φ를 가려서 결정해야 한다. 한편 포화도가 높은 풍화가 덜 진행된 화강토(WGS-17 강원 횡성)는 포화도를 80~100%까지 변화시켜 시험한 결과는 c와 φ의 변화가 표준시험 결과와 비교해 거의 차이가 없는 경우도 있어 주목된다. 다만 이 경우도 표준재하에 의한 c, φ값은 변위별로 따져보면 거의 여유가 없어 포화시 전단강도를 $\frac{2}{3}$로 낮추어 보는 현 관행시험법이 설득력이 있다.

6.3.2 화강토의 삼축시험 결과

그림-24는 몇 개 지역 불교란 시료의 $\overline{CU} - test$ 결과이다. 심층 풍화대이고 대부분 택지조성을 위해 계단식으로 굴착 노출시킨 현장에서 채취한 것인데 거시적으로 동일 풍화암의 풍화대라고 볼 수 있으나 시료를 채취하려다 보면 위치마다 조암광물의 존재에 차이가 있고 결코 작은 시료로서 성형하여 시험하는데 균질하다고 보기는 어렵다.(γ_d, e_o에 차이가 있다. 따라서 시험 결과가 매끄러운 관계를 얻기 어렵다.) 그림-24(a),(b),(c)는 광주 풍암 WGS-10, 11, 12이고 그림-24(d)는 충남 옥천 WGS-16, 그림-24(e)는 전북 익산 WGS-7 등등 이다. 이 그림들을 통해서 공통된 것은 강도의 발현은 구속압에 의존

하지만 높은 구속압($\sigma_3 = 294kPa$ 이상)에서는 $\varepsilon_a = 8 \sim 12\%$ 의 범위에서 Peak를 갖는 변형율 경화-연화거동을 보이는 반면 구속압이 낮은 경우($\sigma_3 < 98kPa$)는 ε_a이 작은 쪽에서 Peak값이 나오고 변형율 경화-일정거동을 보인다. 이와 같은 경향은 강열감량이 큰 경우 즉 풍화가 큰 경우($Li > 4\%$)에서 나타나며 풍화가 덜 진전된($Li < 1.89\%$) 그림(c-1)에서는 다른 경우보다 불명료하다. 한편 그림(a-3), (e-3)의 경우와 같이 구속압이 큰 경우의 유효응력경로는 전형적인 정규압밀점토와 같이 간극수압이 크게 발달하여 만곡되어 가는데 모든 경우 구속압이 $98kPa$ 이하에서는 과압밀토처럼 간극수압의 발생이 미미하여 직립 또는 역전되어 간다. 다만 -10m의 깊이의 미풍화 화강토는 그림(c-3), (d-3)에서처럼 큰 구속압에서도 과압밀토의 응력 경로를 보인다. 다만 그림(f-3)는 5m깊이에서 채취한 화강토인데도 불구하고 그림(c-3), (d-3)와 유사한 거동을 보인데 이러한 현상은 풍화정도와 관계없으며 γ_d 나아가 e와 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다. 예컨대 그림(c), (d), (f)의 시료는 그림에 나타난 바와 같이 각각 Li=1.89, 4.0, 2.7%로서 불규칙하지만 γ_d=15.6, 15.3, 15.4 kN/m^3으로서 거의 같은 값이다. 한편, 이들 응력경로 그림에서 K_f선은 그림에서 공시체에 파괴가 이루어지고 더 이상 간극수압의 변화가 없는 점에서 p, q를 찾아 연결한 선이다. 이 K_f선은 나중에 한계상태선과 비교될 것이다. 대략 응력경로의 Peak 변환점에 근접하고 있는데 그 경사를 M이라고 하였다. 여기서 유효응력 경로가 Peak강도에 이르러 아래쪽으로 급격히 좌우방향으로 하강하는 현상이 보이는데 단순하게는 구속압이 작은 경우 평균주응력 p는 시험 중에 감소하지 않고 증가하는 경향을 보이지만 구속압이 크면 전단초기에서부터 p가 서서히 감소되다가 그 이후에 증가해서 K_f에 접하여(그림 (c-3), (d-3)) 증가하다가 K_f에 이르러 급격히 아래로 굽는다. 한편, (a-3), (b-3), (e-3)는 구속압이 크면 p가 감소하다가 K_f선에 이르러 Peak를 이루고 왼쪽으로 급격히 굽는다. q가 급격히 떨어지는 것은 파괴이후의 거동이지만 흥미로운 것은 그 방향이 깊은 곳에서 채취한 화강토(-10m이상)와 그 이외 화강토에서도 저압부에서는 모두 우회전하고 있는 점이다. 이처럼 과압밀토와 같은 경향을 보이는 응력경로는 모두가 우회전 급강하하고(구속압이 작아도) 정규압밀점토와 같은 거동을 하는 경로는 좌회전 급강하를 나타낸다. p가 감소하다가 증가하는 변화거동은 *Dilatancy* 거동을 반영하는 것이므로 그림 (c-3), (d-3)의 응력 경로는 *Dilatancy* 현상이 활발히 이루어지고 있음을 보여주며 γ_d가 큰 것($\gamma_d \fallingdotseq 15kN/m^3$)과 작은 것($\gamma_d \fallingdotseq 13\ kN/m^3$)의 차이가 마치 과압밀토와 정규압밀토와 같이 미묘하게 작용하는 것이 아닌가 추정된다.

다음에 배수전단시험 결과의 한 예를 그림-25에 나타낸다. 시료는 강원도 횡성 WGS-17의 불교란 시료로서 축차응력-체적변화의 관계를 보인다. 시료는 $Li = 2.7\%$, $\gamma_d = 15.3kN/m^3$ 의 화강토이다. 시험기의 기능상 $\varepsilon_a = 16\%$이상 수행하지 못해 아쉽지만 체적변화율은 σ_3가 작을수록 수축에서 팽창하는 다일러턴시의 변화를 보이는데 이는 전단시 구속압력이 선행하중보다 작은 경우에 그 압축과정에서 점성토의 과압밀특성과 유사한 거동을 반영하는 것으로 판단된다. 그런데 언급한 바와 같이 점토나 퇴적토가 아니기 때문에 선행압밀하중이라고 정의할 수 없으며 다만 압축에 의해 항복하는 위치가 있으며 이를 탄성 변형한계와 소성 변형한계의 개념으로 논의한 바 있다. 이 한계는 결국 화강토의 조암성분의 풍화에 의해 형성된 화강토 골격의 외압에 대한 저항으로 보이며 곧 γ_d나 e에 관계되고 압축에 의해 1차적으로 즉각 변형을 일으키고 이 한계를 넘으면 소성 항복점(소성변형)에 이르는데 이 한계가 선행하중과 같은 의미가 아닌가 생각된다. 또한, σ_3=49kPa ($0.5kg/cm^2$)에서는 $\varepsilon_a = 10\%$정도에서 완전팽창 영역으로 진입하는 듯하며 σ_3가 크면 수축만이 크게 진행된다. 이 현상도 점성토에서는 ε_a가 매우 미소한데 비해 10%란 큰 값에 의해 반전된 것도 같은 의미이다. 본 시료도 동일 위치이지만 그 광물조성에는 약간의 차이가 있다. 따라서 σ_3=98kPa의 시료는 다른 시료보다 강도가 작게 발현되고 있으나 체적변형율은 정상적인 것으로 보이며 이 점은 화강토에 있어서 간극비의 구성이 매우 복잡한 *Mechanism*을 갖고 있음을 보여준다. 그림-26은 축차응력과 평균주응력의 관계에서 구속압에 따른 유효응력경로를 나타낸 것인데 응력경로는 1/3의 기울기로 거동을 보인다. 이는 광물조성의 차이(즉 간극

비의 차이)와 시험에서 오는 오차를 감안한다면 이들 거동은 점성토의 배수거동과 매우 유사하여 본질적으로 현행의 시험방법을 이용하는 것이 유력하다고 볼 수 있다.

화강토에 있어서의 Dilatancy 내지 체적변화 거동은 큰 구속압에서는 큰 변위가 발휘되는 동안에는 전단에 동원되는 부위에서는 입자파쇄 등에 의한 침하가 계속되면서 파괴에 이르지만 구속압이 작은 경우는 어느 한계에서 침하가 정지되고 입자의 재배열이 이루어져 전단면에서 체적이 팽창으로 전환된다는 것을 의미한다. 이와 같은 관계를 상세히 조사하기 위하여 그림-27과 같은 관계에서 살펴본다.

그림-27은 그림-25의 결과를 응력비($\eta = q/p$)와 체적변형율 증분비 ($dv/d\varepsilon$)의 관계로 나타낸 것이다. 전단변형율은 $d\varepsilon = 2/3(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) = \varepsilon_a - 1/3(\varepsilon_v)$로 보고 정리한 것인데 그림에서와 같이 불교란 화강토는 거의 직선화가 가능하다고 판단되며, 이는 함수비, 풍화도, 구속압에 관계없이 대략 $dv/d\varepsilon = \alpha\ (M - \eta)$로 근사화 시킬 수 있다고 볼 수 있으며 외국(일본)의 경우와 비슷한 경향이 있음을 알 수 있다. 여기서 M은 $dv/d\varepsilon = 0$ 즉, 전단과정에서 체적변화율이 수축에서 팽창으로 반전되는 응력비이며 α는 이 직선관계의 경사도이다. 그림에서 수축에서 팽창으로 이동하는 것은 전단시 구속압력이 선행하중(즉 탄성변형에 해당되는 압력)보다 적은 경우에 일어나며 입자가 재배열되어 팽창으로 옮기면 $dv/d\varepsilon = 0$의 경계를 넘어간다. 이와 같은 현상은 압축과정에서 과압밀특성을 반영하는 것과 비슷하다. 이 과정에서 화강토 입자는 *Dilatancy*에 크게 관여하고 있으며 동시에 입자파쇄도 진행될 것이다. 이때 함수비의 변화도 중요한 역할을 할 것이므로 이 관계를 살펴본다.

그림-28은 *CD*시험 과정에서 등방압축을 $\sigma_3 = 49kPa$, $98kPa$, $196kPa$, $294kPa$까지 단계별로 시행하여 배수량을 측정하고, 배수전단을 시행한 후 간극비 또는 함수비를 계산하여 평균주응력(p')에 대해 정리하면 직선으로 된다. 전단과정에서 평균주응력의 증가와 함수비 감소상태를 계산하여 그린 것을 검은선(●)으로 표시하였는데, 강도가 *Peak*에 이르고 이 점에서 직선이 반전되고 있다. 등방압밀과 같은 *Mechanism*으로 전단 배수가 이루어진다면 그 연장선에 전단과정이 있고 경사가 거의 같으리라 예측했는데 연장선에서 빗나가는 경우는 그 차이가 *Dilatancy*의 크기를 나타내는 것으로 판단되며 특히, Miura에 의하면 화강토와 같은 거정질 입자는 등방압축이나 전단과정에서 나타나는 입자파쇄 때문에 다른 양상을 보인다고 보고하고 있다. 이와 같은 실험적 사실에 대하여 일본 학자간에는 정상적인 D-test의 결과라면 전단과정은 등방압축의 연장선상에 있어야 하며 Dilatancy는 그 끝부분의 만곡부에서 평균주응력이 일정하게 되는 부위를 Dilatancy 거동으로 보고 있다. 그러나 이와 같은 주장에 대해 좀 더 검토해 볼 필요가 있다. 첫째는 등방압축에 의한 체적의 감소(함수비의 감소)와 전단에 의한 체적감소의 *Mechanism*에 차이가 있으며 후자는 전단의 진행과 더불어 입자파쇄를 국부적으로 집중시키면서 어느 파괴면이 형성되어 가는 과정이고 그 파괴면에는 주응력(여기서는 $\sigma_1 = \sigma_3$)에 의한 연직응력과 전단응력이 저항하게 되어 파괴에 이르는데 초기는 전단에 의한 체적의 감소로 일관하다가 어느 한계간극비에서 팽창으로 변환되는 Dilatancy 현상이 발생한다. 특히 큰 구속압에서는 팽창으로 전환되기는 거의 어렵고 입자파쇄의 영향으로 체적감소 내지 일정 유지가 큰 변형율까지도 지속될 것이 예상된다. 따라서 등방압축의 연장선상에 전단과정도 있어야 한다는 주장의 근거가 되고 있는데 언급한 바와 같이 전단과정이라는 특수한 응력상태 ($\sigma_1 > \sigma_3$)의 체적변형이 진행되며 따라서 그 형태가 연장선상에 오는 것이 옳다는 증거는 되지 않는다. 실제 많은 시험을 통해서 함수비와 평균주응력에 대해 Plot한 결과는 오히려 그림 5.28과 같은 경우가 더 많다. 또한 D-test에서 평균주응력 일정으로 함수비가 증가(체적팽창)되고 있으므로 이는 곳 순수한 Dilatancy의 영향으로 보고 있는데 이점에 관해서는 좀 더 연구가 필요하며 보다 더 큰 구속압에서는 이와 같은 변환점이 발생되지 않고 있다는 시험 결과를 주목하고 있다.

그림-29는 Weald clay의 비슷한 시험 결과를 참고 삼아 보인다.

6.4 잔적토의 기초지반

우리는 집을 지을 때 생땅위에 짓는 것을 으뜸으로 생각한다. 즉 돋은 땅보다는 풍화토층을 어느 정도 거두어 내고 절취된 땅에 기초를 둔다. 잔적토는 지표에서부터 깊어갈수록 지지력이 증가된다는 것을 알기 때문이다. 현재도 육상토에서 큰 구조물을 지을 때 깊게 굴착하여 기초를 둔다. 또는 도로를 건설할 때 야산을 절개하여 사면을 만들고 도로를 낸다. 모두 절취하여 생땅에 시공하는 경우이다. 지반공학적으로 모두 하중을 제거하여 노출시킨 응력상태로서 하중제거 상태이고 지반은 팽창상태에 놓이게 되며 대기에 노출되어 풍화가 급속히 진전되어 공학적으로 문제가 되는 짧은 시간내에 지반의 약화가 시작된다. 이와 같이 절취에 의해 구속압의 제거되면 강도의 변화가 일어나고 지지력의 감소가 예상된다. 일본에서 화강토 지반에 세워진 건물의 피해조사결과에 의하면 부등침하에 의한 피해가 많은데 동일 장소에서도 위치에 따라 차이가 있고 Creep변형에 의한 침하가 월등하고 이 같은 부등침하의 원인으로서 ①평면적 강도 변동의 실태파악 미흡 ②절토이므로 지내력을 과대 평가하게 되어 압축성의 검토를 소홀히 한 점 ③부등침하 대책의 하나인 구조물 강성확보가 미흡한 점등을 큰 원인으로 들고 있다. 우리도 육상토의 기초설계시 유의 할 만한 항목이 아닐 수 없다.

①,②와 관련하여 통상 N값에 의한 지지력 계산에 우리는 의존하고 있는데 이는 과대 평가의 유려가 있어 그 대책으로 절취후 서전식관입시험 N_{sw}를 권장하고 있으며 이것과 평판재하시험(PBT) 및 변형계수 E와의 상관성도 연구되고 있다.(Matsuura et al 1991)

N값의 의미는 원위치에 있어서의 유효상재구속압 아래에서의 비배수 전단강도를 측정한다고 보고 있으므로 당연히 상재압의 변화에 의해 N값은 변화된다. 그 한 예를 그림-30에서 볼 수 있다.

굴착전과 약 12m 굴착후의 강도변화를 보인 것으로 상재하중이 큰 영향을 미치고 있음을 보여 준다. 한편 화강암 및 화강토에 대한 탄성파 속도에 차이가 있음은 오래 전부터 잘 알려진 사실이다. 신선한 화강암의 V_P 속도가 $4km/s$이상인데 비해 풍화도에 따라 $2\sim3km/s$, 완전 풍화되면 $0.3\sim0.5km/s$로 줄어든다. 그림-31은 그 한 예이다.

그림-30에서 표층은 V_P가 $0.3km/s$인데 강풍화 된 층에서 $0.7\sim1.4km/s$ 풍화암에선 $2.7\sim3.5km/s$이었던 지반을 음형 친 부분을 절취하고 측정한 V_P는 $0.4\sim1.5km/s$를 감속되고 있으며 그림-31은 두 위치(a, b선)에서의 $\log V_P$는 절취전후 모두 깊이와 직선관계가 있음을 보여주고 있다. 또한 V_P의 분포는 동일단면에서 깊이 방향으로 비슷한 분포를 보이며 다만 절취에 의한 표층부가 급격히 저하된다. 이와 같은 V_P의 변화 N값과의 상관 관계는 Haga, Matsuura(1991)등에 의해 다음과 같이 분류 제안되고 있다.

표-8. 풍화정도에 따른 공학적 성질(Matsuura)

풍화정도	개 요	N, N_{sw}	변형계수 E (kg/cm^2)	Creep계수 ϕ_c	V_P (km/s)	γ_t (t/m^3)	w_n (%)	0.075μ 이하 (%)	허용지내력 (t/m^2)
표 층	완전풍화. 점토화. 결정형태 볼 수 없음. 삽질가능 화강토	$N<20$ $N_{sw}<200$	80이하	1.5이상	0.3~	2.0이하	20이상	15이상	10이하
제Ⅰ풍화대 (풍화토)	모암조직 존재하나 일부 점토화. 완전히 풍화된 모암으로 화강토의 한계. 갈색 또는 모암색깔. 곡갱이질 가능	$20<N<100$ 보통 $N>30$ $200<N_{sw}<1000$	80 ~400	1.0 ~1.5	~0.7~	2.0 ~2.2	10 ~20	10 ~15	10 ~30
제Ⅱ풍화대 (상부 풍화대)	결정간 미세균열. 두들기만해도분쇄. 인력굴착 불능. 립퍼 굴착	$N>100$ $N_{sw}>1000$	400 ~2000	0.5 ~1.0	~1.5~	2.2 ~2.4	5 ~10	~5~	30 ~50
제Ⅲ풍화대 (하부 풍화대)	균열이 많으나 신선암에 가깝고 결정결합 강함. 발파에 의함.	N, N_{sw} 측정불능	2000 ~4000	극히 미량	~2.0~	2.4 ~2.6	5이하	-	50 ~100
암 반	완전한 화강암질 암석. 발파	N, N_{sw} 측정불능	4000 이상	무	4.5	2.6이상	-	-	100이상

(주) Creep계수 ϕ_c, 크게 풍화된 잔적토의 Creep침하는 총 침하의 약 $\frac{1}{2}$ 이상이며 장기간(7~8년)에 일어난다고 한다.

이 표에서 표층, 제Ⅰ풍화대, 제Ⅱ풍화대까지가 대략 화강토에 속하지만 제Ⅰ풍화대까지는 흙 상태 제Ⅱ풍화대는 점성은 거의 없고 굴착에 의해 토양화 되는 상태를 의미한다. 그들은 화강토에 대한 수많은 PBT시험결과에서 화강토는 모래에 비해 점착성이 있으므로 모래지반의 PBT에 비해 소성유동이 작기 때문 작은 재하판($b=5cm$)을 간편하게 무수히 시행하여 $b=30cm$와 대비하고 또한 압밀시험 결과와도 대비시켜 화강토 지반의 침하량을 측정하여 실제의 침하량으로 환산하는 방법 등을 제안하여 허용지내력의 산정을 시도하고 있다.

실제 기초 재하판에 의한 단기 침하량 S_o와 장기 침하량(약10년) S에 대해

$$S_o(cm)=\frac{q-\gamma D_f}{1.36\overline{N}-3}\left(\frac{2B}{B+0.3}\right)^2(cm) \text{ 및 } S=S_o(1+\phi_c)(cm)\text{이고,}$$

q : 재하중(t/m^2), D_f, B : 근입장과 기초폭(m), $\overline{N}=\frac{1}{10}N_{sw}$,

$1.36N-3$의 항은 지경 $30cm$재하판의 지반계수($t/m^2/cm$)로서 이때 N값은 N_{sw}와는 $\overline{N}=\frac{1}{10}N_{sw}$로서 $\overline{N}$, N_{sw}는 재하면에서 재하폭(B)만큼의 깊이에서의 평균값이다.

또 $E=I_s\frac{1-\nu^2}{S}PB\ (kg_f/cm^2)$, I_s: 형상계수(정방형 0.88, 원형 0.79), ν : 0.3으로 고정,

P: 하중(kg_f/cm^2)

일본의 화강토 지반에서는 특히 건축물의 경우 부등침하에 의한 피해가 많은 편이라고 한다. 점성토가 많을수록 그리고 같은 조성 부지 내에서도 지반의 불균질성 때문에 면밀하고도 세심한 조사에 의해

피해를 줄일 수 있다고 하는데 우리 나라에서도 강도를 너무 과신하는 경향이 있는 것으로 안다. 통상 깊게 굴착한 화강토 지반에는 단독 직접기초를 두는 경우가 많은데 굴착 후의 강도 저하나 침수(화강토는 대부분 대수 대이다)에 의한 열화, 그리고 Creep침하가 그 원인으로 판단된다. 따라서 세심한 지반조사를 위해 간편하고 시간이 걸리지 않는 소형 재하시험법은 유효한 방법이며 장치의 개발이 필요하다. 이 재하시험법은 한 장소에서 1시간이내에 종료된다고 한다.(단계별 재하시간 15분 이내, 추는 서전관입시험 추를 이용, 이 결과와 $b=30cm$ 재하시험 결과와의 상관성은 생략)

6.5 절토사면

잔적토의 사면 안정문제에는 자연사면의 안정과 절토사면의 안정으로 나눌 수 있다. 자연사면의 안정문제는 자연사면이 오랜 시일에 걸쳐 형성된 지형, 지표면의 형태 토층의 구조와 더불어 구성재료로서의 흙 자체의 열화 현상(밀도 감소, 강도의 감소, 화학적 풍화, 용탈)과 강우 조건 등이 갖추어지면 붕괴된다. 이와 같은 작용이 오랜 시간을 통해 반복되어와 있기 때문 언제나 최소의 안전율 상태에 놓여 있다고 볼 수 있다. 이와 같은 자연사면의 안정문제는 그 동안 많은 연구가 이루어지고 특히 산지 재해나 토석류의 연구 등에서 괄목할 만한 진전이 있었다. 특히 붕괴 형태에 대한 연구 집적과 강우량과의 관계, 인공위성을 이용한 Remote Sencing 에 의한 위험개소의 예측도 가능할 수준에 이르고 있다.

본 장에서는 이와 같은 자연사면문제는 제외하고 절개시 절토사면에 한해서 논의한다.

절토사면은 굴착할 때나 사면이 완성한 직후에는 안정되어 있어도 시일이 경과함에 따라 풍화가 진행되어 불안정화 되어 간다. 특히 화강토 지반뿐만 아니라 안산암, 니암, 응회암, 등등 육상에서 흔히 보는 풍화 잔적토도 풍화 작용에 대한 내구성이 약하여 수일 내지 수개월에 길어도 1~2년이면 약화되어 사면 유지에 문제가 발생한다. 그러나 붕괴가 일어나지 않는 안전 경사도나 풍화를 억제하는 적절한 보호공, 풍화가 어느 정도 진행되면 붕괴를 일으키는가는 아직까지 미해결의 과제로 남아 있다. 여기서는 위와 같은 문제에 접근하기 위하여 일본 도로공단에서 70년대 이후 조사 연구되어 온 절토사면 실태조사 결과를 한번 살펴본다.

먼저 1. 절토사면의 적정경사도 기준을 정하기 위하여 주로 니암, 응회암, 화강암 또는 그 풍화 잔적토를 중심으로 사면을 조사 정량적 지표로 암질등급을 매기고 현장의 안정상황에서 등급별 한계경사도를 검토하고 2. 적절한 사면 보호공의 적용을 위해 각종 보호공이 있는 사면을 조사하여 풍화정도의 조사, 그리고 풍화 억제효과를 검토하고 3. 풍화의 진행도로부터 붕괴를 예측하기 위하여 V_P 탐사에 의해 풍화의 진행도를 풍화 시간별로 추적 그 풍화량에서 붕괴 위험성을 추정하는 방법을 검토한 것이다. 먼저 1의 절토에 의한 붕괴의 주원인으로는 ①굴착에 의해 응력이 개방되고 흡수팽창 ②절토에 의해 노출된 지반은 곧 풍화 작용이 시작되어 강도가 급속히 저하 특히, 건조·습윤의 반복, 동결융해의 반복, 지하수나 침투수에 의해 일부 성분의 용탈등은 풍화 작용을 크게 촉진한다. 조사 결과는 "팽창성암 절토사면 실태 조사보고"로서 발표되었는데 그 조사 방법 및 적정경사도에 대한 결과는 다음과 같다. 먼저 노출사면에서 다음과 같은 관찰과 경도시험 (Yamanaka's Hardness Test)에서 표-9와 같은 평가 기준을 작성한다.

표-9(a)는 정성적 판단에 의존하게 되므로 Hardness를 첨가 한 것이다.

암질 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ의 구분은 비교란 시료를 채취한 경우는 표-9(b)에 의해 실내 시험결과에서 구분하거나 이것이 불가능할 경우는 시추공내 시험 값으로 판단 또는 V_P속도에 의존할 수밖에 없다. 표-9(c)는 질적 변화를 α값에 의해 정의하는데 사면 표층이 어느 정도 연화되어 있는가를 판단하기 위해 햄머로 타진하여 떨어져 나가는 두께를 표층연화대라 하고 그 두께를 $a(cm)$ 절취후의 경과 월수를 T라 하여 연화 속도 α는 $\alpha=a/\log T$로 계산한다. 그러나 이 경우는 사면이 노출되어야만 계산이 가능하므로 사면이 노출되지 않는 경우를 위해 시추시료에서 얻어진 시료로부터 A, B의 α값 대신 표-9(c)에서처럼 액성한계, 그리고 흡수량 증가율의 상관성을 조사하여 A, B를 구분할 수 있도록 한 것이다. 결과적으로 그림-32에서와 같은 암질 구분에 의해 일본국도의 사면을 조사하여 붕괴사면과 안전사면의 한계

를 정하고 적정경사도의 판단 자료로 제공하고 있다. 다만 이 그림에서 ⅠB나 ⅡB와 같은 강한 암반 사면에서도 안전 영역 안에서 붕괴된 경우(●표)가 있는데 이 경우는 지층이나 암반의 경사방향이 사면 쪽으로 향하고 있는 경우(流盤)는 지층면이 미끄럼대처럼 작용하여 큰 붕괴가 일어난 경우이므로 그 경사각에 주의를 요한다. 그림-33은 사면 경사와 V_P와의 관계에서 얻어진 경사도의 안전·불안전영역을 나타내는 또하나의 참고 자료이다.

표-9(a). 경도에 의한 암질 구분

암질구분	관 찰	햄머에 의한 타진	토양 경도 (Yamanaka's Hardness)
Ⅰ	신선하고 단단, 암석의 조직구조는 완전하게 인정됨	타진시 맑은 음색이거나 둔탁한 소리가 난다. 햄머끝이 암석에 꽂히는 일이 없고 강한 타격으로 쪼개지거나 균열을 따라 갈라진다. 평평한 소암편일지라도 손으로 쪼갤 수 없다. 햄머로 괴상시료의 채취는 가능하다.	30이상
Ⅱ	고결도가 낮은 암석. 풍화에 의해 약화된 암석으로 미세한 조직은 소실되고 있는 상태	타진시 매우 둔탁한 소리를 내며 햄머가 꽂히고 쉽게 쪼개지며 균열이나 절리에 상관없이 쪼개진다. 쉽게 부서지므로 큰 덩어리의 시료 채취는 곤란	24~30
Ⅲ	고결도가 상실된 퇴적토 또는 강풍화나 크게 변질되어 암석상태가 아닌 토사로 취급되는 상태	타진시 무너지는 것처럼 탈락되거나 햄머가 박힌다. 암편은 손으로 비비면 흙으로 변하고 햄머로서는 불교란 시료 채취 불가	24이하

표-9(b). 암질구분의 판별 기준

	탄성파 조사	시추공내 시험		실내 시험		
	V_P (km/s)	N값	E값 (kg/cm^2)	초음파 속도 (km/s)	γ_t (t/m^3)	e
Ⅰ	1.6이상	28이상	600이상	2.1이상	2.1이상	0.5이하
Ⅱ	1.6이하	28이하	280이하	1.0이하	1.45이하	1.4이상
Ⅲ	(1.0~0.3)	-	-	-	-	-

표-9(c). 2차적 변화에 의한 암질 구분

	설 명	표층연화대 발달속도 α	액성한계	흡수량 증가율 (%/회)
A	절토후에 방치하면 반드시 사면의 강도저하가 일어나는 경우	$\alpha > 12$	60%이상	10(%/회) 이상
B	절토후에 방치하여도 사면의 강도저하가 거의 일어나지 않는다.	$\alpha < 9$	40%미만	5 미만

$\alpha = 9 \sim 12$이면 AB로 표기

다음은 사면 보호공과 풍화의 진전상황에 관한 "구조물에 의한 사면 보호공의 효과 판정조사"결과를 살펴보자. 사면 보호공에는 밀폐형과 개방형 보호공으로 구별되는데 전자는 Shotcrete나 블록 보호공등이고 후자는 격자틀이나 무처리 또는 식생만으로 사면을 보호한 것으로 표면수의 침투를 막거나 허용하는 경우와 같다. 그림-34(a)와 (b)는 사면에 수직 방향으로 시추하여 공내에서 물리탐사(V_P파속도, γ 선 밀도조사)를 실시하여 정리 한 것이다. 절토전에는 현재사면의 풍화부도 미풍화부와 같은 V_P나 밀도를 가졌을 것으로 보이며 이 양자를 비교하여 보호공 유무의 풍화도 진전상태를 V_P와 풍화대의 두께에 대해 정리한 것이다.

우리 나라에는 제 3기층이 없지만 다음과 같은 점으로 참고가 될 것이다. 즉 그림-34(a)는 암괴는 매우 단단하지만 균열이나 절리가 많은 암층이고 (b)는 암석으로서의 고결도는 낮지만 균열이 많지 않은 암층이라고 본다면 (가) 절취 후 2년과 8년 경과 한 것을 보면 후자는 좌측 위에 있고 (풍화가 진전) (나) 밀폐형보다 개방형이 좌측 위에 위치한다. 밀폐형이 분포하는 우측아래와 개방형의 좌측 위의 영역을 원점과 연결한 직선으로 구분하였다. 또한 그림-34(b)에서는 2년과 8년 경과 사면을 원점과 연결하였는데 이 원점을 연결한 직선은 그 경사도가 풍화대의 두께 d를 V_P가 풍화대를 통과할 때의 전파속도 V_P로 나눈 값이므로 이는 탄성파가 풍화대를 통과하는데 소요되는 시간, 즉 주시(走時) $t=\frac{d}{V_P}$ 를 나타내기 때문이다. 이 t로부터 중고생대의 지반에서는 밀폐형은 $t=2.6\times10^{-3}$sec 를 넘지 않지만 그림-34(b)의 지반에서는 2년에서도 전기 값을 초과하므로 단단한 암질일수록 밀폐형 보호공이 유효하다는 것을 의미하고 개방형의 사면 보호공은 지질에 상관없이 t가 증가하고 있어 풍화가 크게 진행되는 것을 알 수 없다.

마지막으로 풍화의 진행과 더불어 붕괴를 예측하는 문제에 대해 "절토사면 추적조사" 가운데 측정중이나 측정 후에 붕괴되거나 붕괴 조짐의 변형이 발생 한 것을 중심으로 조사한 결과를 살펴본다.

그림-35는 사면경사도와 앞의 t와의 관계이다. ○표는 안전사면 ●표는 측정중, 측정 후에 붕괴된 것이고 ▲표는 작은 균열이나 소규모의 사면표토 탈락이 있어 붕괴조짐이 있는 것을 의미한다. 겉보기에 혼란스럽지만 자세히 검토해보면 ●표가 우측에 ○표가 좌측에 몰려있다. V_P측정결과에서 우측에 들면 일단 주의가 필요하다. 이와 같은 풍화의 진행이 사면 완성후의 시간 경과와는 어떤 관계가 있는가를 검토한 것이 그림-36이다. 추적조사에선 130개의 사면을 선정하여 3, 6, 10년의 시간을 두고 매회 같은 위치 같은 조건에서 탄성파 조사를 실시하여 그 결과를 지질별로 정리하고 각 풍화대 주시의 평균값에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 보인 것처럼 풍화는 절토후 1년안에 급속히 진행되지만 그 경향은 화강암계나 제 3기층(우리 나라에서는 없음 대신 균열은 적으나 경암이 아닌 암석)에서 현저하고 대략 3년 이후에서 차차 둔화되어 간다. 이와 같은 풍화의 시간적 변화를 측정 해두면 그림-35에 나타낸 경계선에 어느 때 도달할지를 개략적으로 추정할 수 있다고 보고 연구가 진행 중에 있는 것으로 안다.

< 참고 문헌>

1. Nishida, K. et al (1990): "Residual Soil in Japan", J.G.S. pp.5~6
2. Sueoka, T. (1990): "Residual Soil in Japan", J.G.S. pp.55~60
3. Spangler, M.G. (1951): "Soil Engineering" Int'al Textbook co. pp.95
4. Fukumotor, T. (1995): "Infuence of Particles Breakag on the Stability of Embankment Slope" Journ. J.G.S. Vol.35, No.3 pp.139~142
5. Matsuura, M. et al (1991): "마사토 지반의 압축성에 관한 연구 (제1보 소형재하판에 의한 재하시험)" 일본 건축학회 논문보고집 No.318 pp.71~77
6. Takao, A. et al (1988): "화강암 지대의 장대사면의 설계, 시공 및 유지 관리" 풍화 잔적토에 관한 Symposium 논문집 J.G.S. pp.229~234
7. 기타 참고서적 : "풍화 화강토와 마사토의 공학적 성질과 그 응용" J.G.S. 토질기초공학 Library No.16 (1979)
"풍화토의 특성" 박춘식 번역 엔지니어즈 발간(1996)

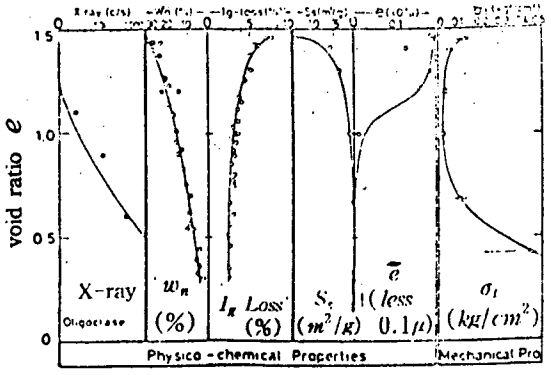


Fig.1 Physical and mechanical properties fresh rock fully weathered

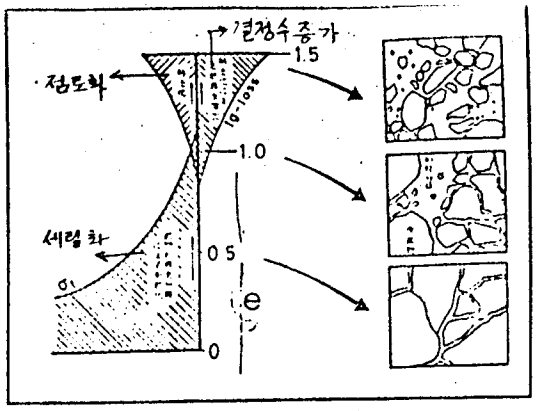


Fig.2 Schematic diagram in the process inditu weathering

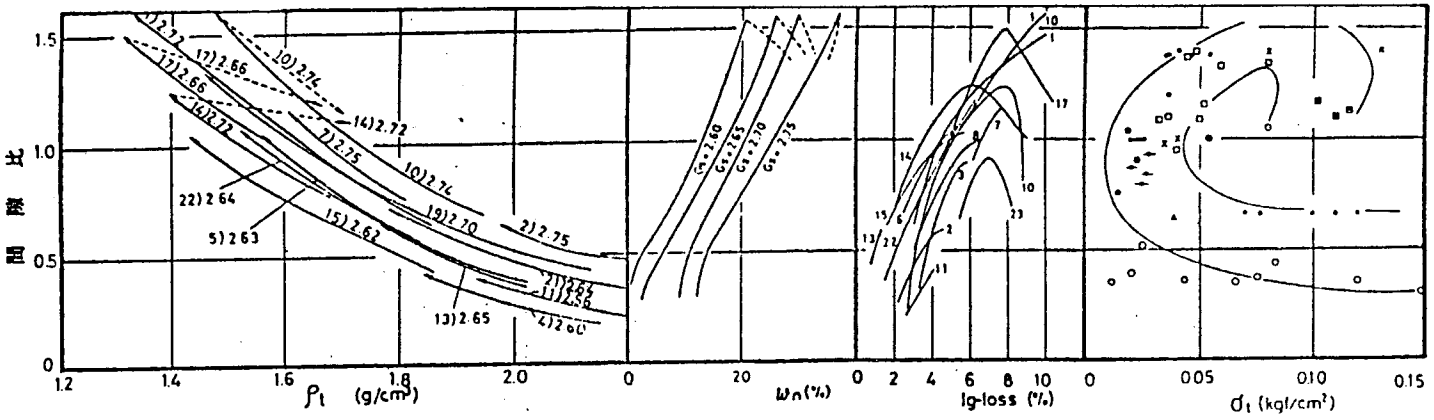


Fig.3 $e-\rho_t$ (그림 가운데 숫자는 시료번호) G_s)

Fig.4 $e-w_n$

Fig.5 $e-I_g$ Loss

Fig.6 e σ_t

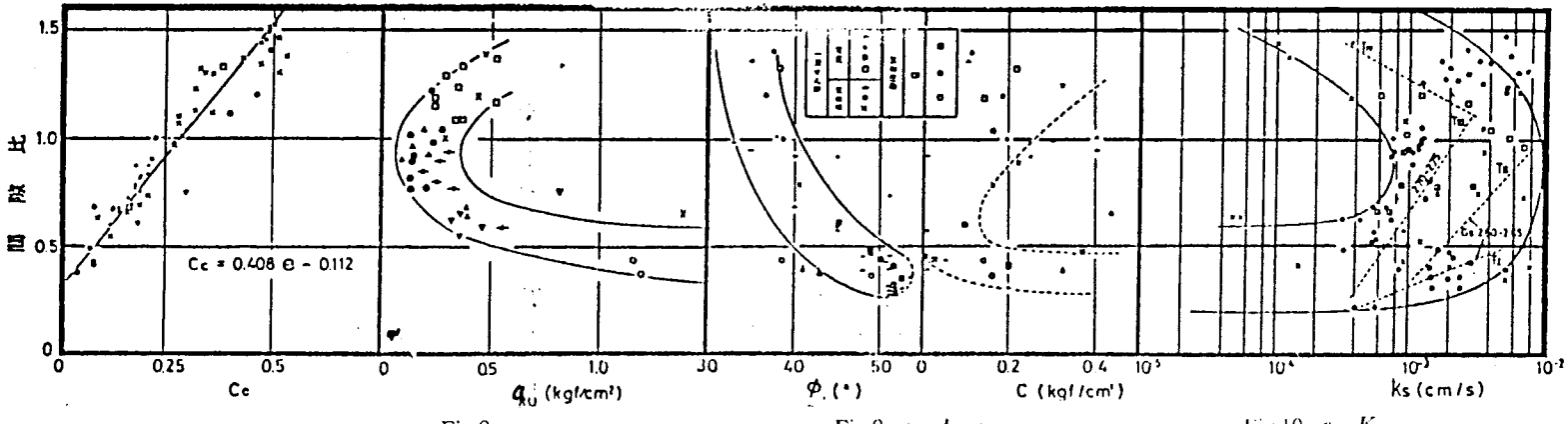


Fig.7 $e-C_c$

Fig.8 $e-q_u$

Fig.9 e ϕ, c

Fig.10 e K_s

(after Aoyama & Nishida (1988))

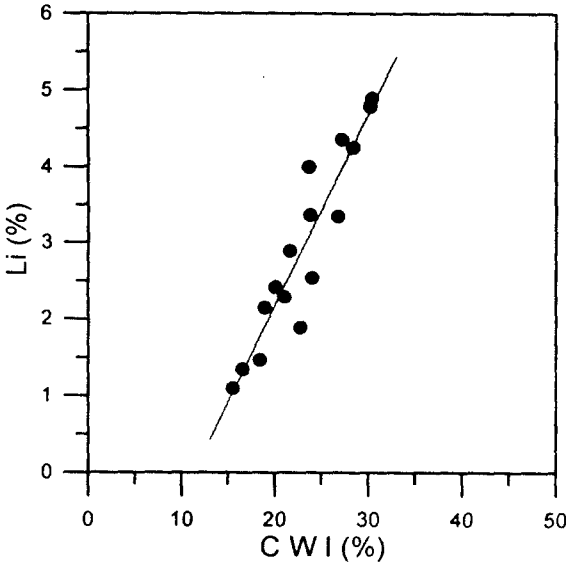


Fig.11 *Li*와 *CWI*의 관계(16개소)

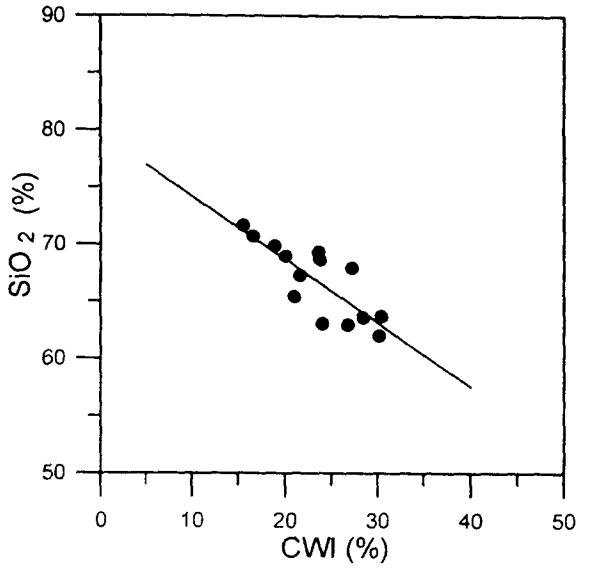


Fig.12 SiO_2와 *CWI*의 관계(16개소)

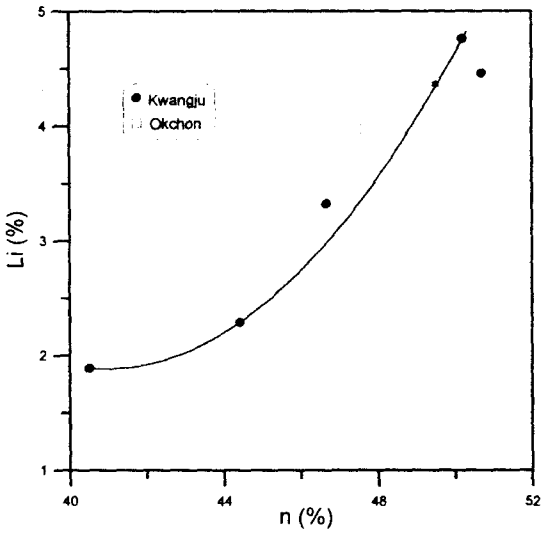


Fig.13 *Li*와 *n*의 관계(불교란 화강토)

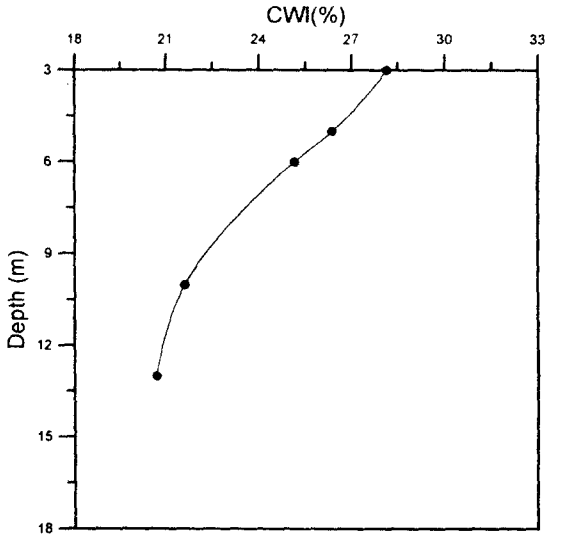


Fig.14 광주 불교란 화강토의 깊이에 따른 *CWI*의 관계

CWI (%)	*Fresh rock*	*Weathered granite*	*Residual soil*	*Lateritic soil*	*Laterite*
	15	20	30 40	60	90
SiO_2 (%)	75	68	62.5 60		
Li (%)		2.2	4.2		
n (%)		43.6	48.3		
$\Delta S/S$ (%)		75	50		

표-5. *CWI*와 시험값과의 관계

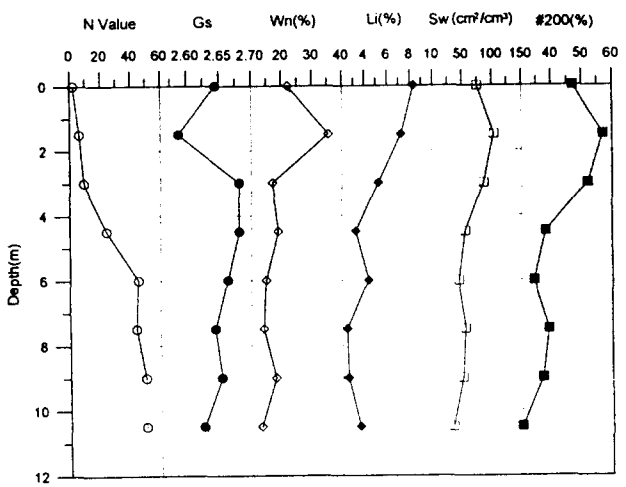


Fig.15(a) 광주 풍암의 깊이별 지표의 변화

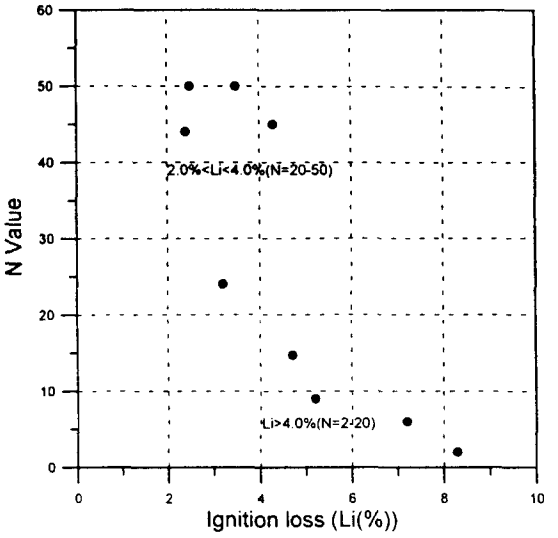
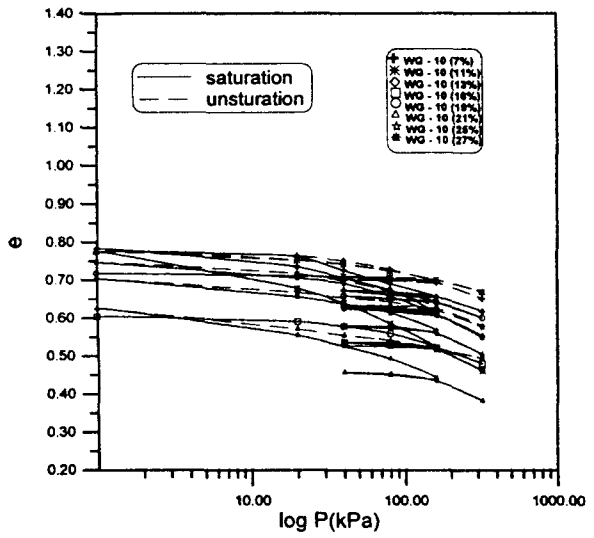


Fig.15(b) 표준관입시험값과 강열감량(광주 풍암)



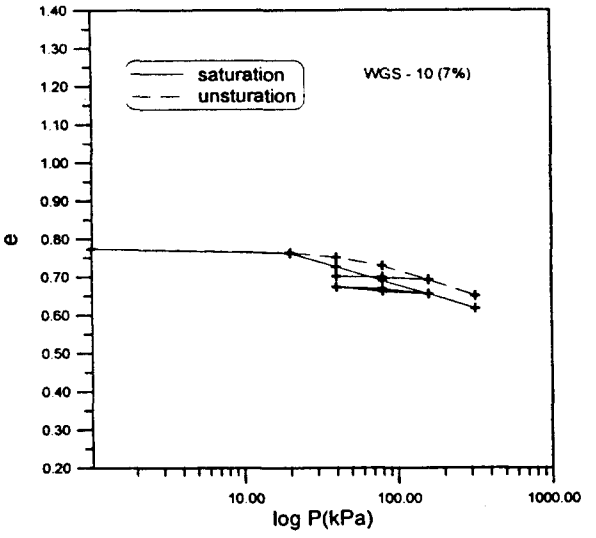
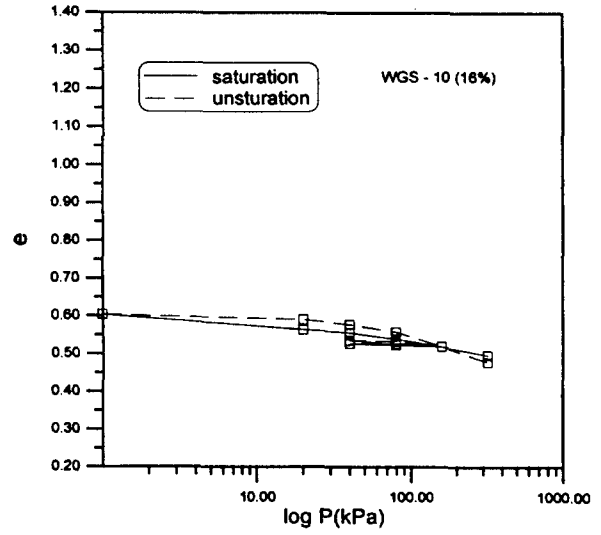


Fig.16(a) 포화 및 불포화 다짐 화강토의 $e-\log P$ 곡선



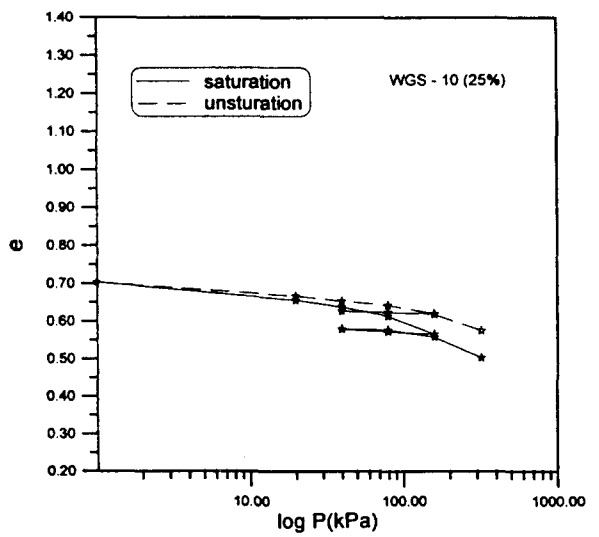


Fig.16(b) 함수비에 따른 다짐 화강토의 $e-\log P$ 곡선

(w=7%, 16%, 25%)

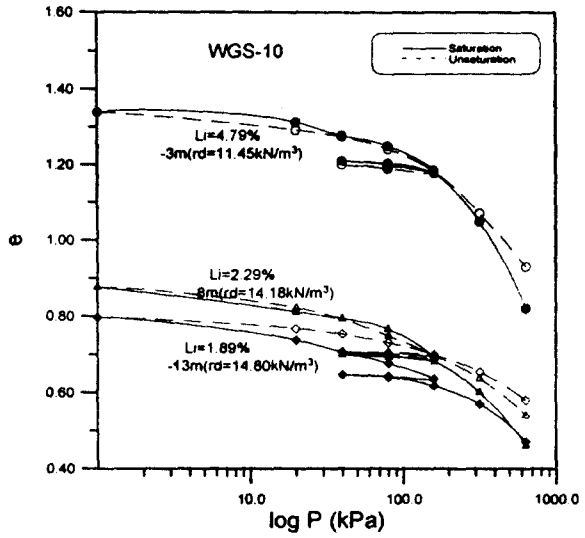


Fig.17 불교란 화강토의 $e-\log P$ 곡선

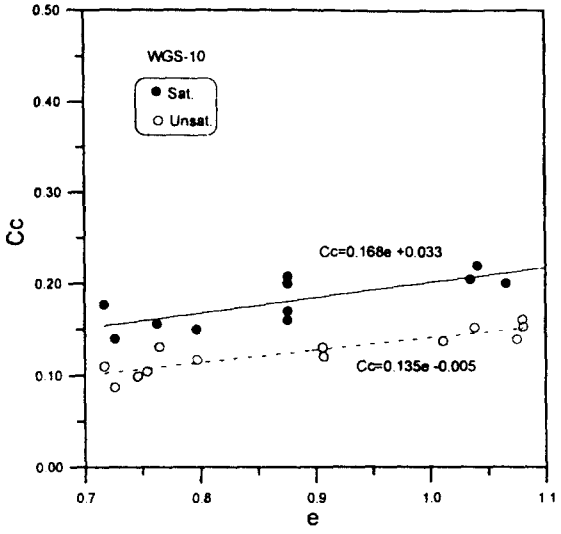


Fig.18 불교란 화강토의 압축지수(C_c)와 e의 관계

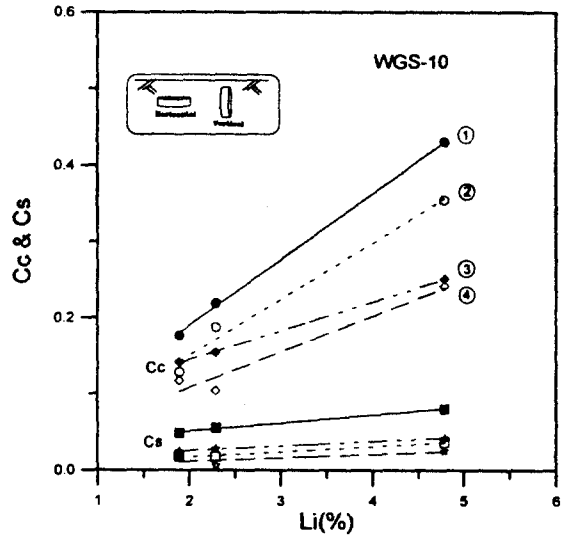


Fig.19 압축지수(C_c) 및 팽창지수(C_s)와 강열감량(Li)의 관계

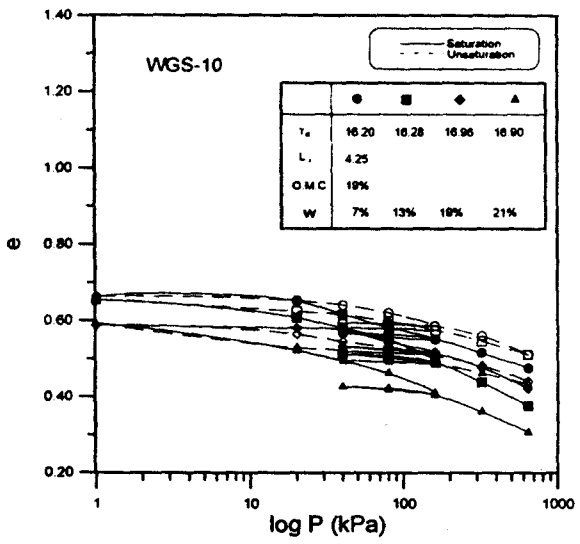


Fig.20 다짐 화강토의 $e-\log P$ 곡선

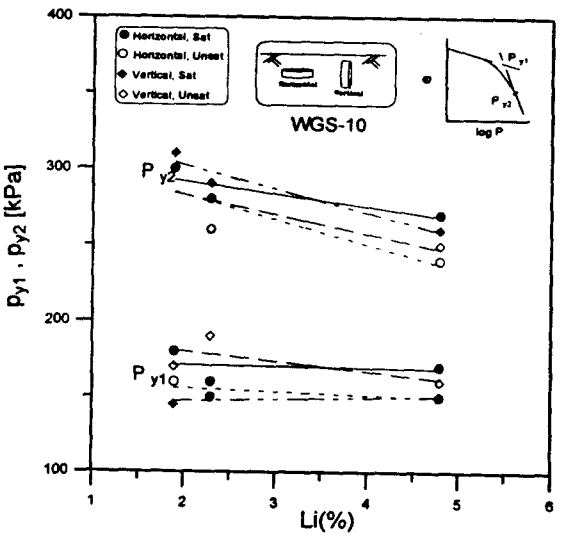


Fig.21 P_{y1}, P_{y2}와 풍화도의 관계

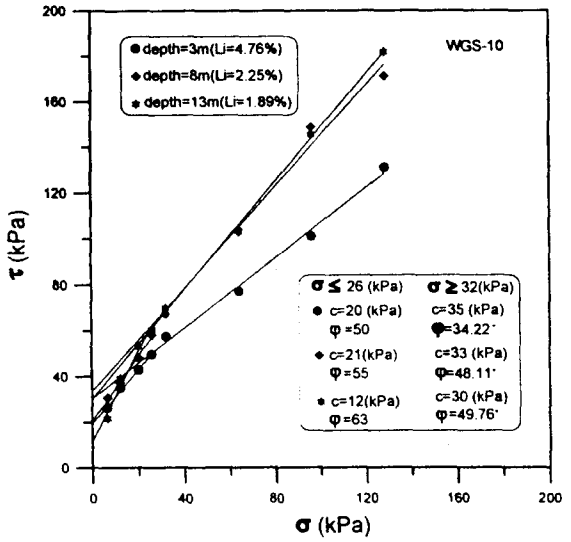


Fig.22(a) 깊이에 따른 전단응력과 수직응력의 관계

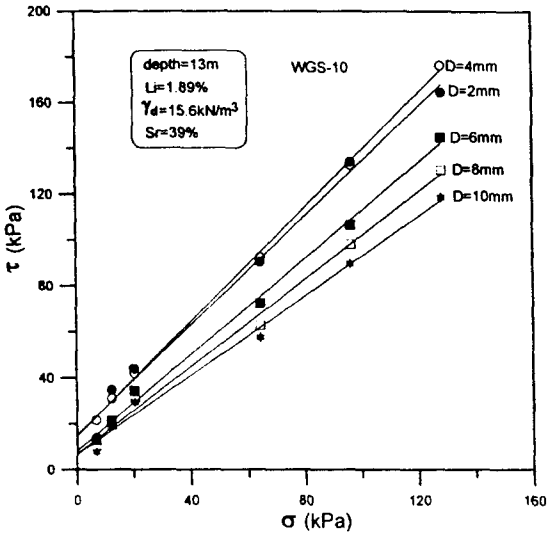


Fig.22(b) 등변위에 대한 전단 상수의 변화(-13m)

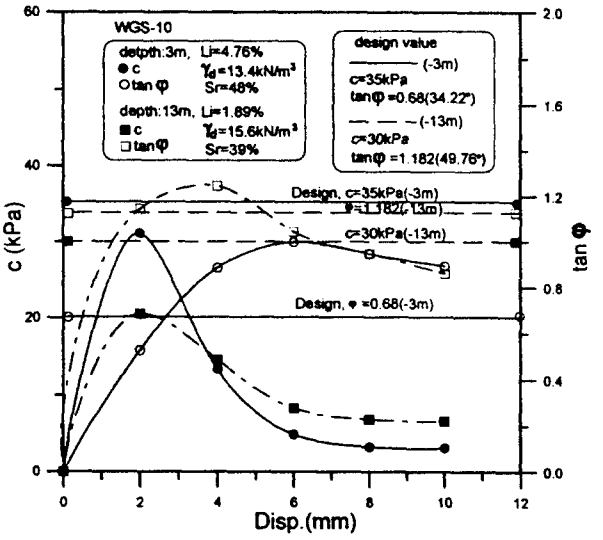


Fig.22(c) 등변위에 대한 전단 상수의 비교

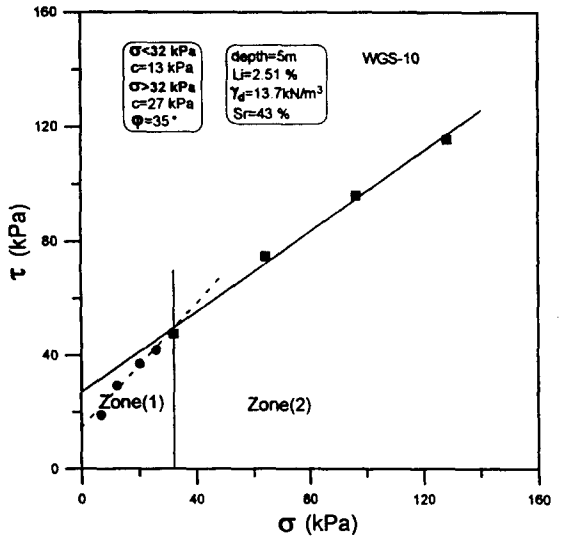


Fig.23(a) 불교란 화강토의 전단강도와 수직응력의 관계

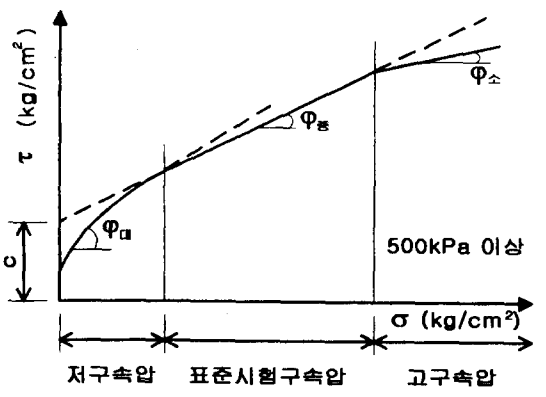
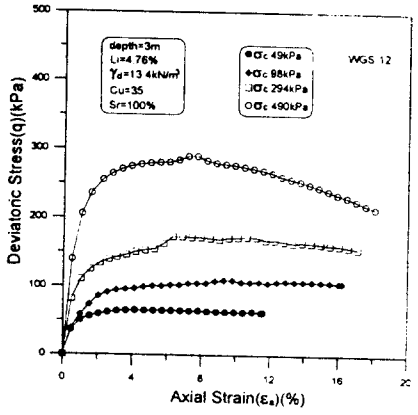
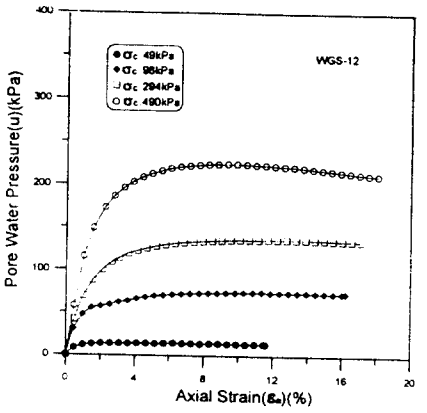


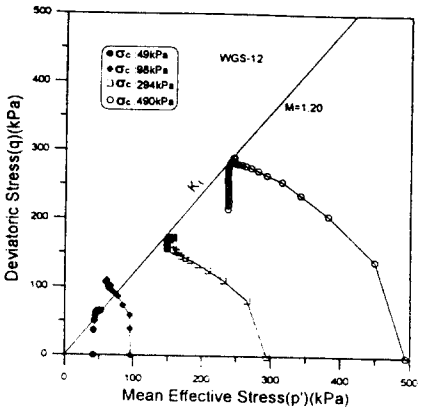
Fig.23(b) 직접전단시험의 결과 (by Miura)



(a-1)

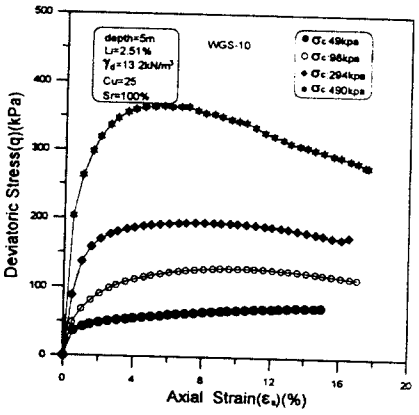


(a-2)

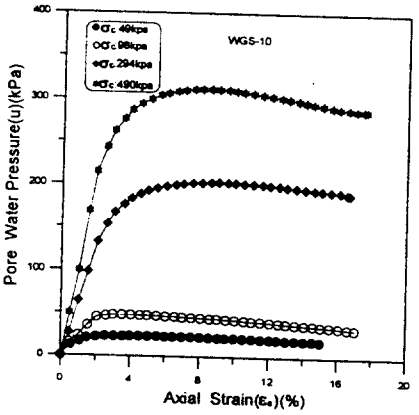


(a-3)

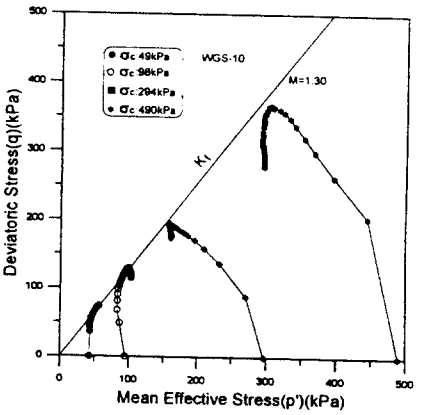
광주 풍암 (-3m)



(b-1)

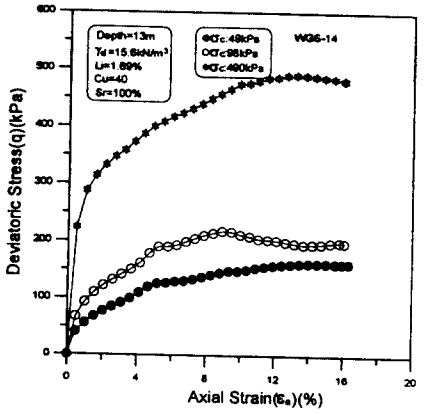


(b-2)

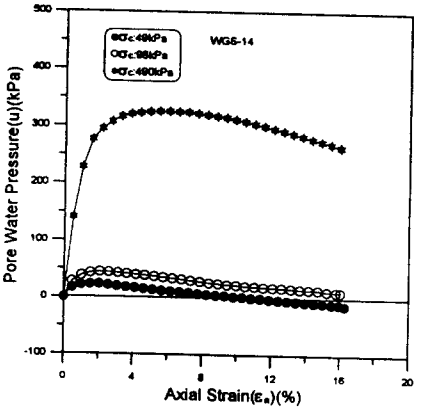


(b-3)

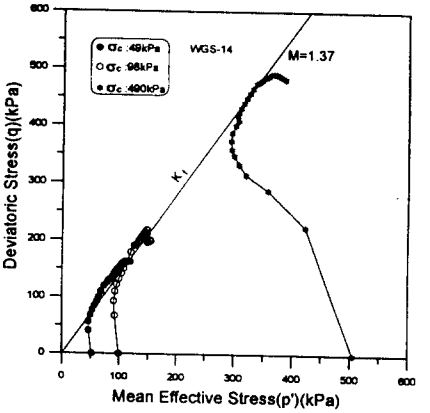
광주 풍암 (-5m)



(c-1)

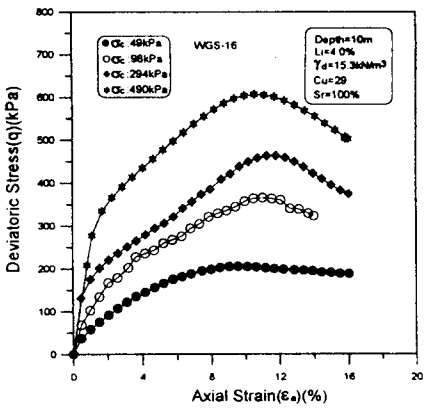


(c-2)

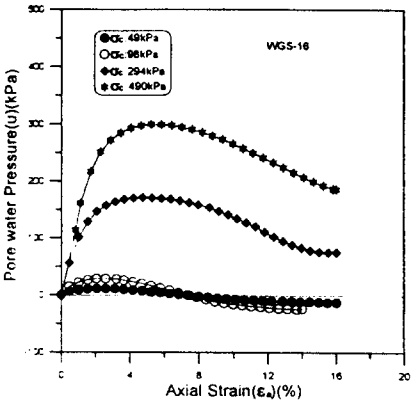


(c-3)

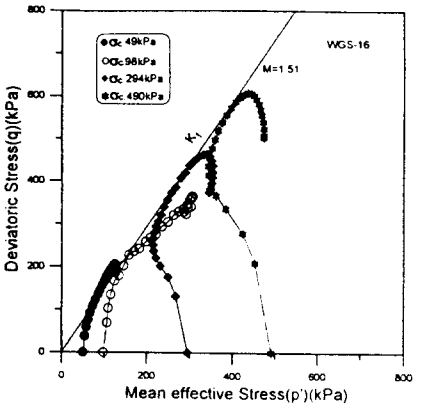
광주 풍암 (-13m)



(d-1)

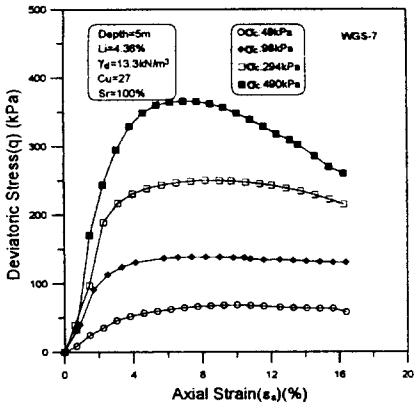


(d-2)

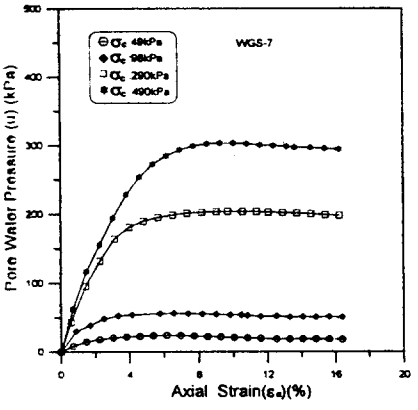


(d-3)

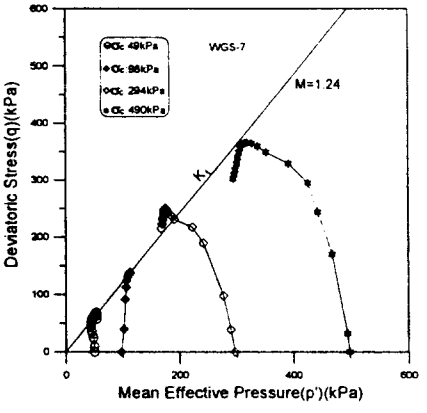
충남 옥천 (-10m)



(e-1)

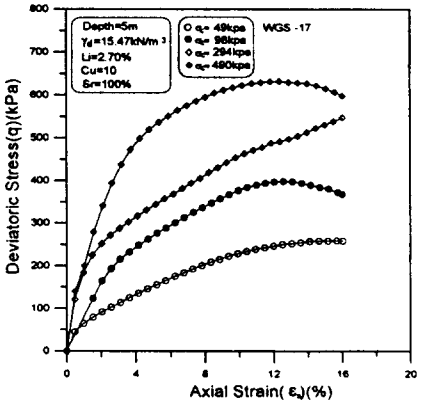


(e-2)

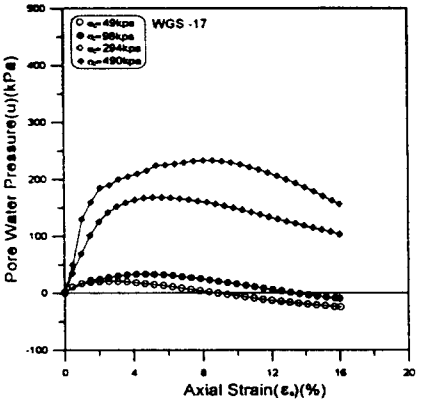


(e-3)

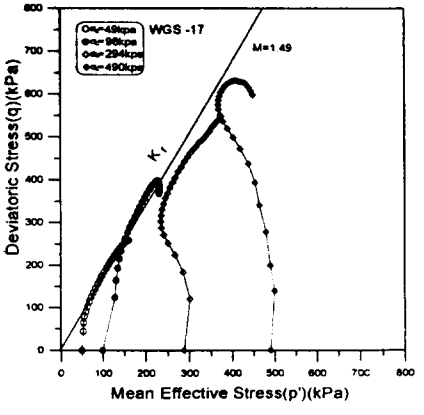
전북 익산 (-5m)



(f-1)



(f-2)



(f-3)

강원 횡성 (-10m)

Fig.24 불교란 화강토의 축차응력, 간극수압, 유효응력 경로의 관계

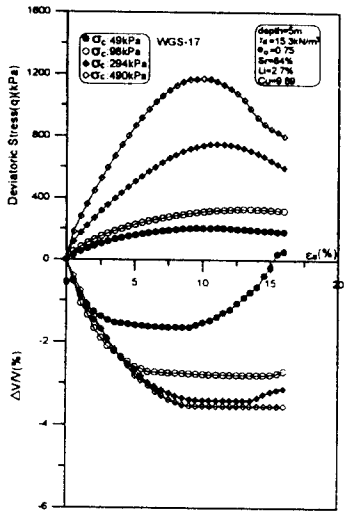


Fig.25 불교란 화강토의 축차응력과 체적변형율 및 축변형율의 관계

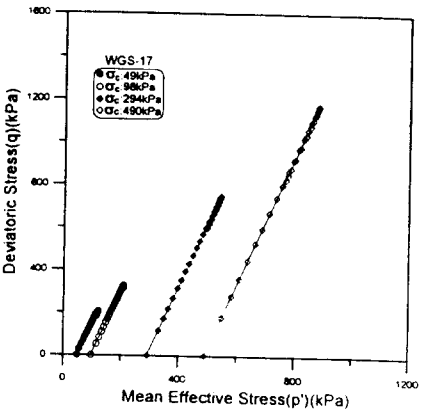


Fig.26 축차응력과 평균 주응력의 관계

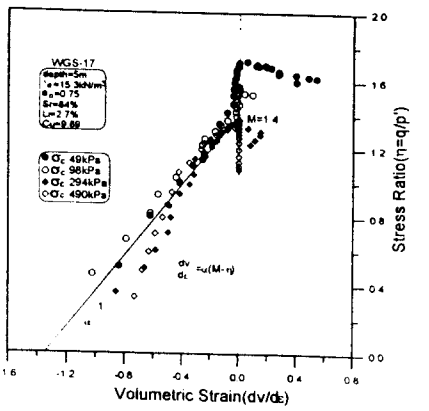


Fig.27 응력비와 체적변형율 증분비의 관계곡선

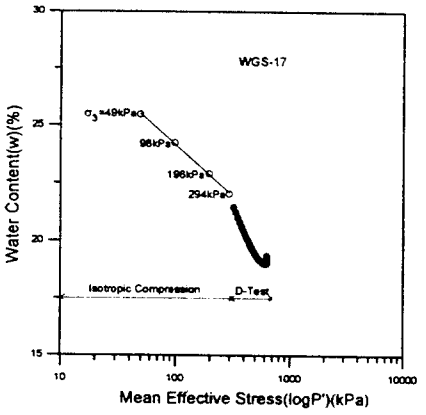


Fig.28 함수비 변화에 따른 평균 유효응력의 관계

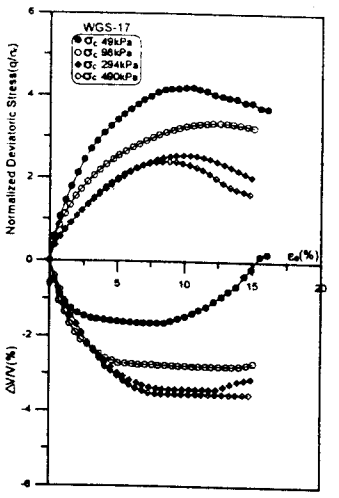


Fig.29 전단변형율에 대하여 규준화한 축차응력과 체적변형율의 관계

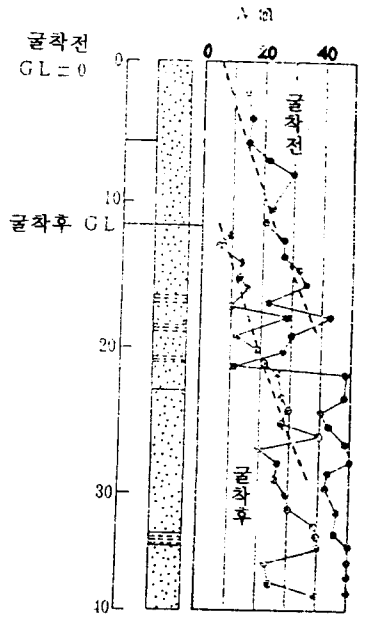


Fig.30 굴착전후의 N값의 변화

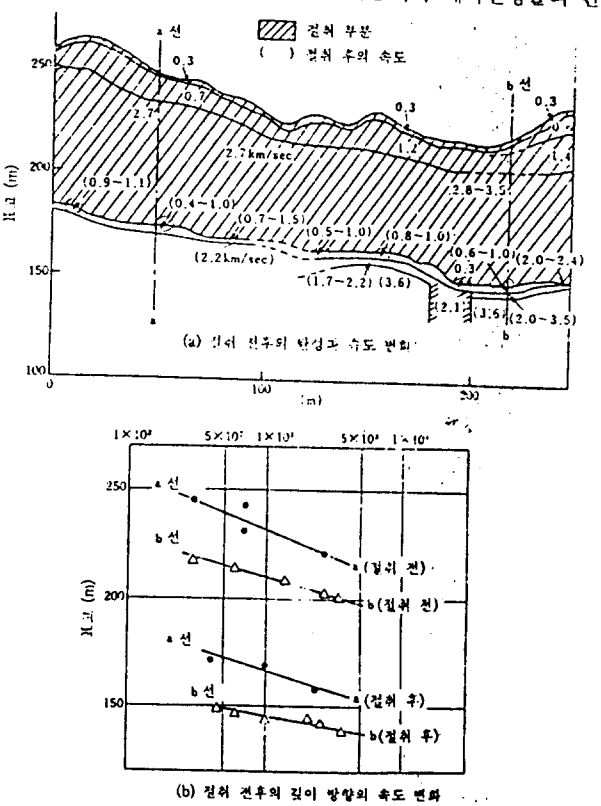


Fig.31 굴착에 의한 탄성파속도의 변화(中井에 의함)

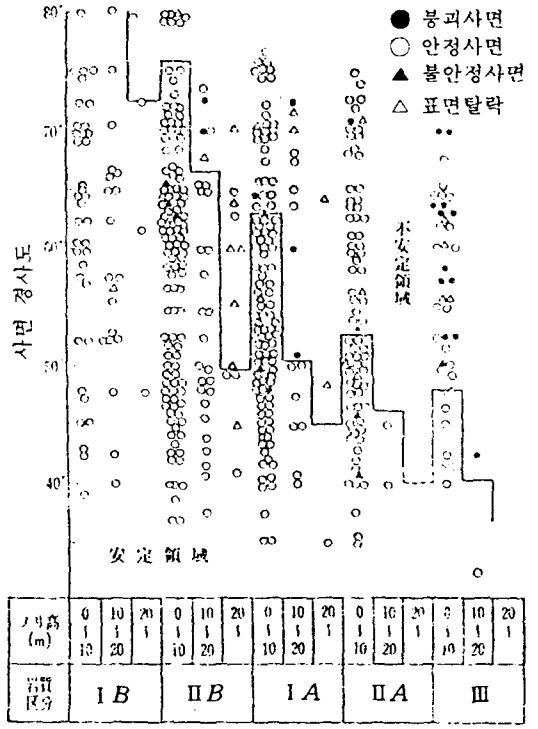


Fig.32 화강암계 기설사면과 암질 구분 및 한계 경사도

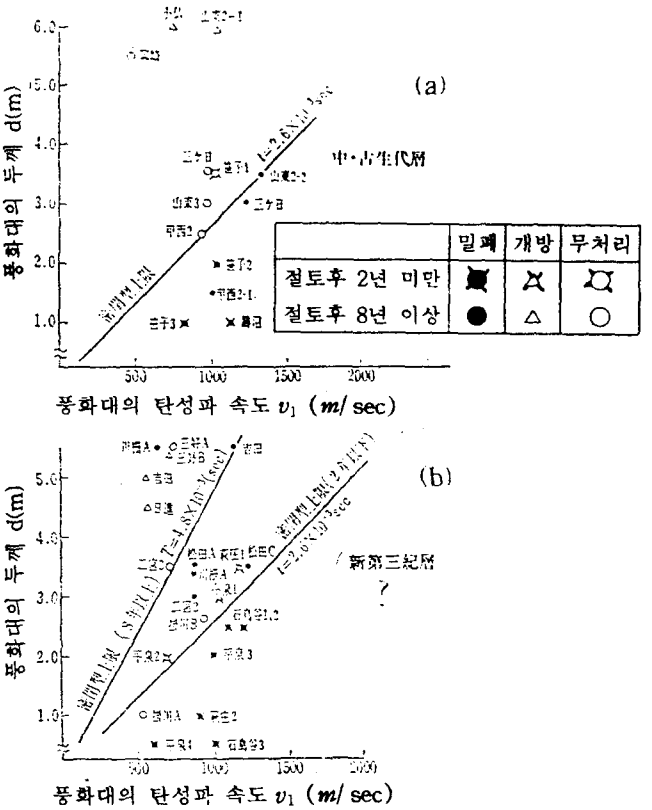


Fig.34 지질별 풍화대의 탄성파 속도와 두께
풍화진행 한계에서 본 보호공 효과 비교

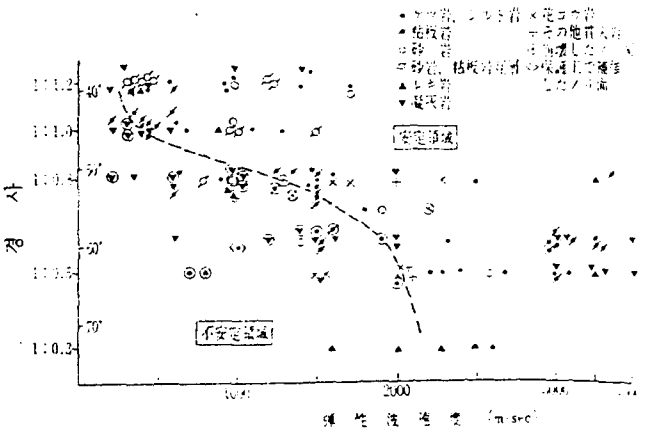


Fig.33 탄성파 속도와 사면 경사도의 관계

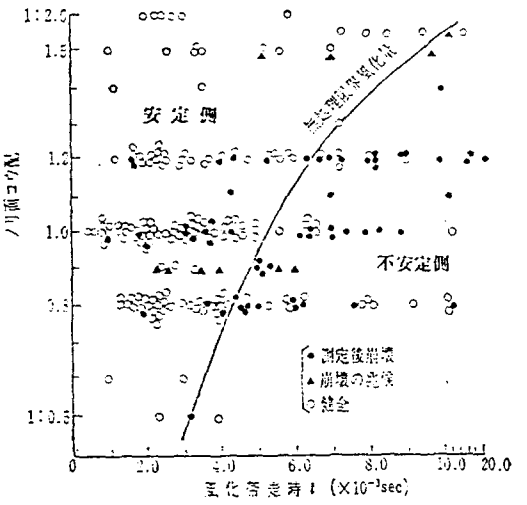


Fig.35 풍화량(주시)과 사면 경사도에 대한 안정성

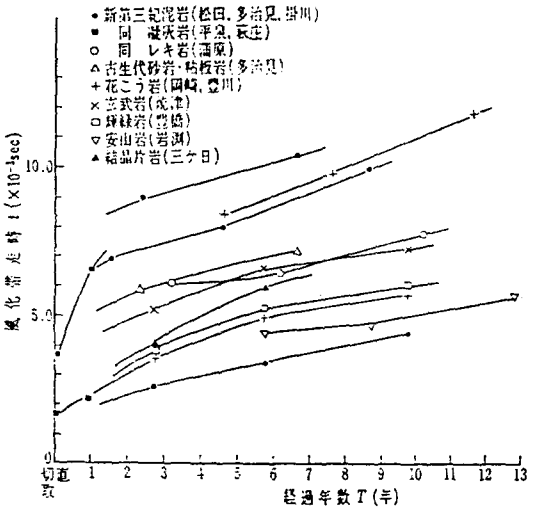


Fig.36 암석별로 본 풍화량(주시)의 시간 변화