

IV. 기타 원위치시험, 시추공 스캐너 조사 및 결과의 이용

1. 흙에 대한 기타 원위치 시험

별도 시료 채취 없이 흙의 물리적, 역학적 성질을 현장에서 바로 파악할 수 있는 원위치 시험 중 이미 소개된 방법 외의 기타 시험 방법들은 다음 표 1과

표 1. 흙에서의 기타 원위치 시험

구 분	시험명	규 격		
		KS	ASTM	기 타
육안조사 물리정수 파악	시험굴 조사	-	-	-
	시추공 굴착(보링) 조사 (오거 보링/회전식 보링/ 세척식 보링/충격식 보링)	F23191-91 (오거보링)	D1452-80 (오거보링)	DIN 4021 (오거보링)
강도 조사	현장밀도시험 (모래치환법/고무막법/ 석고 및 액체 치환법/RI 방법)	F23111-91 (모래치환법)	D1886-90	AASHTO T191- 86b
	동적콘 관입시험	-	-	DIN 4094
강도-변형 특성 조사	스웨덴식 사운딩 시험	-	-	JIS A1221-1995
	현장 노상토지력비 (CBR)시험	F2320-95	D4429-93	AASHTO 1980-866 JIS A1222-1995
기타	시추공 내 전단시험	-	-	-
	평판재하시험	F2310-95	D1194-94 (기초) D1196-93 (도로)	AASHTO T221, T232 DIN 18134 JIS A1215
	현장투수시험, 양수시험	-	-	-

*1 정희원, 수원대학교 토목공학과 전임강사

*2 강원대학교 자원공학과 부교수

*3 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

같이 정리할 수 있다.

1.1 시험굴(test pit) 조사

현장에서 지반을 직접 굴착하여 지표 부근 지층의 구성과 경계 등 지반 상태를 직접 확인하는 방법으로, 일반적으로 인력이나 장비를 이용하여 4~5m 깊이까지 굴착한다. 지표 부근 지반의 상태를 확실하게 파악할 수 있으며, 교란시료는 물론 블록 샘플링에 의해 고품질의 불교란 시료를 채취할 수 있다. 그러나, 굴착 중 지반이 교란되어 지층 경계가 불분명해질 수 있으며, 지하수위면 아래 굴착시에는 별도의 지하수 배제 방법을 강구해야 한다. 또한 시험굴 내 직접 조사시에는 굴착면 붕괴로 안전사고가 발생할 수 있어 주의가 필요하다. 굴착 단면의 깊이와 폭이 크거나 비원형 단면이고, 지반이 불균질한 경우, 또한 점토 함유율이 낮을수록 안전사고의 위험이 커진다.

TEST PIT		TEST No. 1					
size	profile	depth (m)	sample	description	MC (%)	Td	remarks
		0.00 - 0.20		표토층 : 상토 : 모래 섞인 점토 (CL.)			
		0.2 - 1.4		산란토층 : 심도 : 모래 및 실트 섞인 모래 (SW-SM)	5.5	1.740	
		1.4 - 2.0		심도 1.4m에서 풍화암 층현으로 굴착 중		1.548	
				() 안은 축퇴시킨 상태의 밀도임.			

그림 1. 시험굴 조사 결과 정리 예

강좌

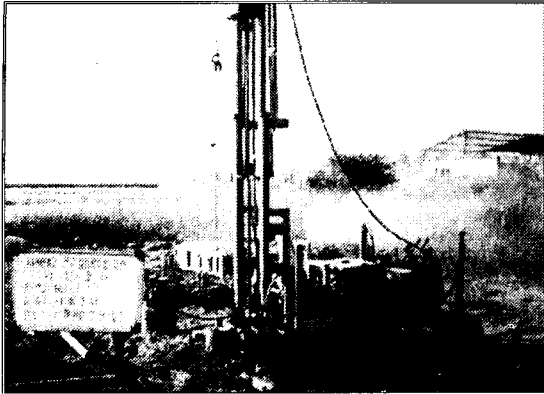


그림 2. 시추공 보링 조사 장면

1.2 시추공 보링 조사

지표에서 구멍(시추공)을 뚫어 하부의 지층 상태를 조사하는 방법으로서, 지반의 기본 지층 구성과 지하수위 등을 파악하며, 필요한 경우 흙 시료를 채취할 수 있다. 동력 장비와 케이싱을 사용하여 매우 깊은 심도까지 굴착할 수 있다. 굴착된 시추공 내에서 표준관입시험, 현장배인시험 등을 수행하기도 한다. 근래 들어 장비의 발달로 다양한 형태의 시추공 조사가 이루어지고 있는데, 일반적으로, 오거 보링(auger boring), 충격식 보링(percussion boring), 세척식 보링(wash boring), 회전식 보링(rotary boring) 등으로 구분된다.

오거 보링에 의한 토질조사의 경우, 필요한 깊이까지 흙 속에서 수동식, 또는 자동식 오거를 회전시켜 삽입하여 보링한 다음 오거를 빼내어 시료를 채취한다. 오거는 헬리컬 오거, 개방형 오거, 포스트홀 오거, 스팅거 오거, 디스크 오거, 버킷오거 등이 있다. 그러나, 오거 보링은 제한된 깊이까지만 조사가 가능하며, 점성토 혹은 오거로 인하여 완전히 파괴되어 함수비가 달라지기도 한다.

1.3 동적 콘 관입시험(dynamic cone penetration test)

롯데 끝에 원추형 콘(보통 직경 50mm 사용)을 붙이고 표준관입시험시와 마찬가지로 63.5kg의 해머

를 75cm 높이에서 자유낙하시켜 낙하에너지로 콘이 일정 깊이 관입하는 데 필요한 타격횟수(Nd)를 연속적으로 실측하며, 깊이별로 상대적인 연경도, 밀도, 다짐 정도와 토층의 구성물질 등을 파악하는 시험이다. 세계 각지에서 나름대로의 특성에 적합하도록 개발되었고, 시험방법 및 시험장치에 대한 표준규격이 정해져 있지 않기 때문에 매우 다양한 형태의 시험 방법이 존재한다. 일반적으로, 심도 증가와 함께 롯데의 주변 마찰이 커지는 문제가 발생하며, 시험 가능 심도가 표준관입심도보다 작다. 또한 관입시 마찰 저항이 큰 굳은 점토, 모래, 자갈층에는 부적합하다. 그러나, 별도의 시추공을 형성하지 않아도 되

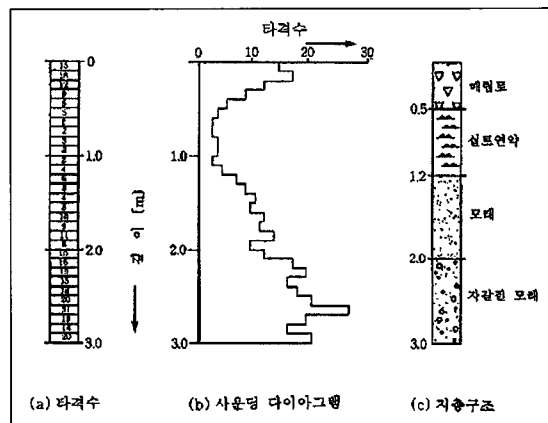


그림 3. 동적 콘 관입시험 결과 예

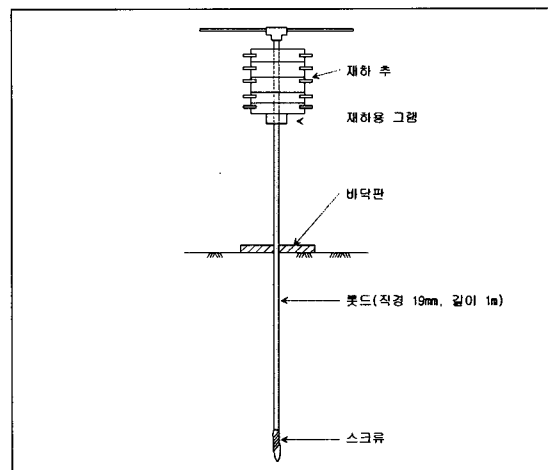


그림 4. 스웨덴식 사운딩

기 때문에 표준관입시험에 비해서 매우 경제적이다. 자동으로 연속적인 시험을 하는 자동 램 사운드(automatic ram sound)도 동적 콘 관입시험의 일종이다.

Douglas(1983)에 의하면 느슨한 모래의 경우 Nd 값은 N값과 거의 같으며, 조밀한 모래나 자갈질 지층에서는 룯드의 마찰로 인해 N값에 비하여 30~50% 가량 큰 것으로 알려져 있다. Aggarwal(1982)은 마찰 저항을 줄이기 위하여 콘의 직경을 룯드 직경보다 크게 하고 표준관입시험시와 같이 시추공 굴착 후 시험을 실시하여 N값과 Nd 값 사이의 관계를 제시하기도 하였다.

1.4 스웨덴식 사운딩(Swedish weight sounding)

원위치에서의 흙의 연경도, 다짐 정도 등을 판정하기 위해서 행하는 정적사운딩으로서, 무게 100kg(5, 15, 25, 50, 75, 100kg 순서로 단계 재하)까지의 추 재하에 의한 침하측정을 행한 후 100kg을 재하한 채 회전관입하는 것이다.

관입회전은 반회전(180°)을 1회로, 관입량 L(cm)에 대한 반회전수 Nd를 측정하여 관입량 1m 당의 반회전수 Nsw로 환산한다. 이 시험은 예비조사 및 본조사시 보링조사의 보간 조사로 유용하며, 모래 성분이 많은 지반에서는 깊어질수록 룯드의 주면마찰이 커지고 정밀도는 저하한다. 지표 부근 지반의 연경도 파악에 적절하다.

1.5 평판 재하 시험 방법(plate bearing test)

지반 위에 원형, 또는 정사각형의 강철판(재하판)을 놓고 단계 재하를 통해 얻은 하중-침하 관계에서 해당 지반의 지반반력계수와 극한지지력을 구하는 시험으로, 도로와 기초에 대한 방법이 있다. 도로에 대한 시험의 경우, 노상, 노반 등의 지지력 계수를 구할 수 있다.

도로에 대한 평판재하시험시에는 기초 깊이 2m 정도에서 시험하고 재하판의 두께는 22mm 이상으

로 하여 1, 4, 8, 15, 30, 45 분, ... 간격으로 침하를 측정하여 15분간 0.01mm이하의 침하가 생기거나 항복점이 나타날 때까지 진행하여 다음 단계의 하중을 가한다. 재하판의 규격은 30×30×2.5cm, 45×45×2.5cm, 75×75×2.5cm로 구분하며, 잭과 다이얼 게이지, 침하량 측정장치, 재하대, 하중 등이 필요하다.

시험 결과로 얻은 하중(p)-침하(s)관계를 통해 지반반력계수를 다음과 같이 산정할 수 있다. 지반반력계수는 재하판의 규격에 따라 달라진다.

$$k = \frac{p}{s} = \frac{p}{A \cdot s} \text{ [kN/m}^3 \text{]}$$

한편, 기초의 허용지지력은 항복하중의 1/2, 극한하중의 1/3 중 작은 값으로 한다. 실제기초의 폭(B)과 재하판의 폭(b) 간의 비를 이용해서 평판재하시험에서 구한 침하량 Sb를 보정하여 실제 기초의 침하량을 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\text{모래 } S_B = S_b \cdot \left(\frac{2B}{B+b} \right)^2$$

$$\text{점토 } S_B = S_b \cdot \left(\frac{B}{b} \right)^2$$

변형계수 E는 다음과 같이 산정된다.

구조물 기초지반

$$E = (1 - \nu) b \cdot I_p \cdot k \text{ [kg/cm}^2 \text{]}$$

ν : 지반의 포아송비(보통 흙에서 0.33)

I_p : 재하판의 형상계수(원형판=0.79, 정사각형=0.8)

$$\text{도로 } E = 1.5 \times k \frac{b}{2} \text{ [kg/cm}^2 \text{]} \\ (\nu=0.5인 경우에 적용)$$

시험 결과 분석시에는 해당 지점 지반의 지층 구성과 지하수위 변동 상황을 파악하여야 하며, 기초의 크기 효과(scale effect)를 고려해야 한다.

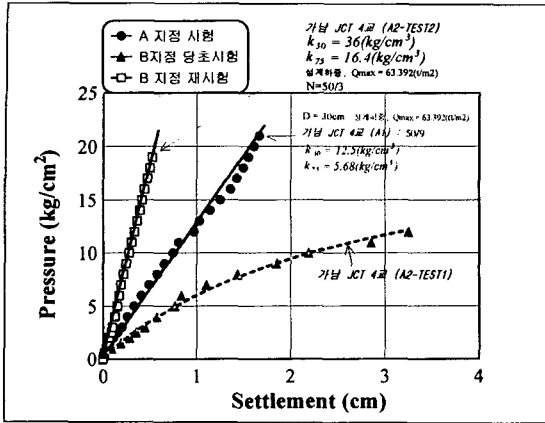


그림 5. 평판재하시험 결과

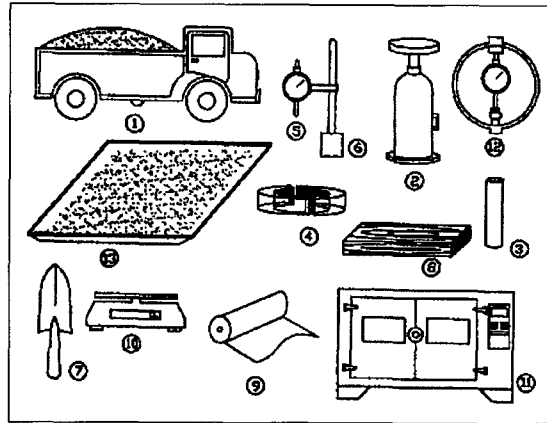


그림 7. 현장 CBR 시험에 필요한 장치

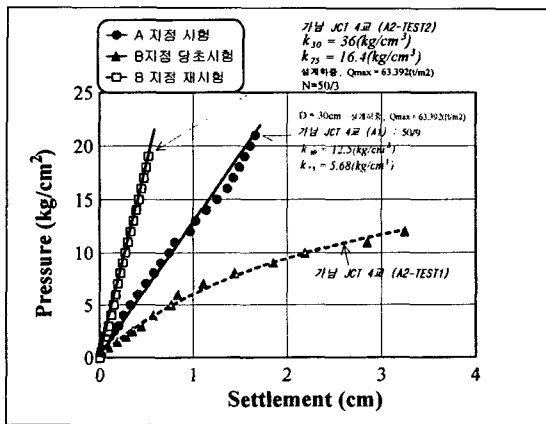


그림 6. 기초에 대한 평판재하시험 결과

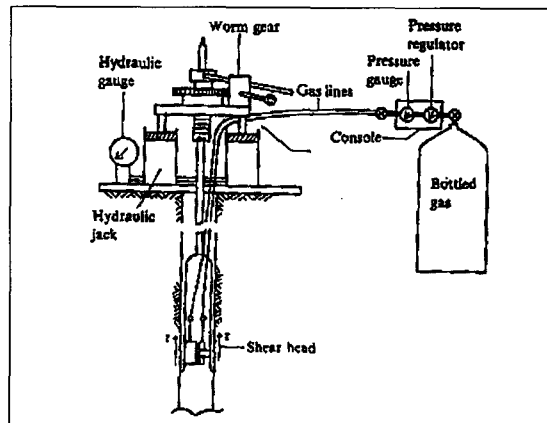


그림 8. 시추공 전단시험 개요

1.6 노상토 지지력비(CBR) 시험

포장층의 본바닥이나 포장재료의 지지력을 측정하여 표준재료 지지력과의 비를 구해서 포장 설계 등에 이용한다. 현장 CBR 시험은 다짐 시료에 대한 지지력을 파악하는 실내 CBR 시험과 달리 자연 노상토의 지지력비를 구하는 시험이다. CBR 값은 주로 입도, 함수비, 단위중량 등에 영향을 받으며, 실내시험의 경우 몰드 규격이 제한되어 현장값과 일치하지 않을 수 있다. 시험을 위해서는 하중(5tf 이상의 물체, 통상 트럭 이용), 재하용 잭, 관입 피스톤, 재하판, 변위계, 지지대, 저울, 삽 등이 필요하다.

시험 결과로부터 관입량-하중 곡선 및 CBR을 계

산하는 과정은 실내시험의 경우와 동일하다. 현장 CBR 시험을 통해 다음과 같은 사항을 얻을 수 있다.

- 포장 두께, 재료 구성 결정을 위한 노상의 설계 CBR 산정
- 노상, 노체, 성토부의 다짐관리
- 성토에 사용되는 중장비의 주행성 판정

1.7 시추공 전단시험(BST, borehole shear test)

Shear head를 직경 76mm의 시추공 내에 삽입하여 원하는 위치에서 전단시험을 하는 것으로, 먼저 튼니 모양의 실린더를 상부에 연결되어 있는 파이프

를 통해 일정압을 가하게 되며, 이 실린더를 계속 팽창시켜 전단시키는 시험이다. 이 때, 측정된 팽창압(σ_n)과 변위를 도시하여 전단강도를 산정할 수 있으며, 간극수압도 측정할 수 있다. BST는 모든 세립토에 적용할 수 있으며, 자갈이 함유된 지반에도 가능하다. 만족할만한 결과를 얻기 위해서는 시추공 품질이 가장 중요하다.

2. 시추공 스캐너에 의한 절리 방향성 조사 및 거칠기의 산정

2.1 서론

암반의 역학적 거동은 암반을 구성하고 있는 암석의 물리적 역학적 성질에도 영향을 받으나 공학적인 관점에서 볼 때 암반 내에 존재하고 있는 절리의 특성에 크게 좌우된다고 할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 절리의 역학적 특성에 대한 정량적 평가가 최근 매우 중요한 문제로 대두하고 있다. 절리가 발달되어 있는 암반의 구조적, 역학적 특성을 파악하기 위해 현재까지 수행되어오고 있는 지질조사에는 지표지질조사, 시추 코어에 의한 검층 및 물리탐사 등과 각종 실험실 및 현장시험 등이 포함된다. 특히 심부 지질 상태를 정확하게 파악하기 위해서는 상기 방법 가운데 암석 코어에 대한 검층이 현재까지 가장 신뢰성이 있고 직접적인 조사 방법이라고 할 수 있을 것이다. 그러나 시추공 굴착이나 코어 회수 과정에서 절리의 발달 방향이나 상태, 절리면 내의 충전물 등이 손실되거나 왜곡되는 현상이 불가피하게 일어나고 있으며, 이는 중요한 지질 정보가 유실되는 것을 의미한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시추 코어가 아닌 시추공벽 영상을 대상으로 지질 구조를 파악하고자 하는 연구가 시작되었으며 이는 1990년대 들어 시추공벽 영상 획득 장비와 컴퓨터를 이용한 영상분석 장비의 발달에 의해 구체화되어 가고 있다.

시추공벽 영상 획득 장비는 공내의 상태나 왜곡 정도를 정성적으로 확인하는 정도의 기본적인 성능을 지니고 있는 시추공 카메라에서부터 최근 시추공벽

영상을 정량적으로 좌표화할 수 있는 정도의 고해상 시추공 스캐너로 발전하고 있다. 현재 국내에서는 시추공 카메라가 국산화되어 사용되고 있으며, 스캐너의 경우 텔레뷰어(borehole televiewer)와 BIPS(Borehole Image Processing System)와 같은 종류가 도입되어 적용되고 있다.

현재까지 국내외에서 시추공 스캐너를 이용한 연구 결과는 BIPS 장비에 의해 획득된 시추공벽 영상을 대상으로 한 절리 특성 연구^{1),4)} 등이 있으며, 텔레뷰어에 의해 획득된 영상에 대한 연구는 장비의 국내 적용 초기에 그 활용성에 대해 발표된 결과³⁾와 절리 특성에 대한 연구²⁾ 등 아직 초기 단계에 있다고 할 수 있다.

여기에서는 시추공 스캐너의 특성을 소개하고 이를 이용하여 획득된 시추공벽 영상으로부터 암반내 절리 구조 특성을 파악하기 위해 최근 이루어진 연구 결과들을 소개하고자 한다. 절리구조의 특성에는 발달된 절리군의 방향성 및 거칠기에 대한 해석과 이로부터 Barton-Bandis 모델에 의한 절리강성의 추정 그리고 이러한 자료들을 종합한 암반 수치해석 모델링용 절리구조도의 작성(mapping)이 포함된다.

2.2 시추공 스캐너

시추공 영상자료의 획득을 위해서는 지금까지 여러 가지 장비들이 개발되어 활용되고 있다.

특히 1990년대에 개발된 시추공 스캐너인 텔레뷰어와 BIPS는 시추공벽의 상태를 정량적인 위치 좌표하에서 영상으로 포착함으로써 절리구조를 해석하는데 매우 유용한 것으로 판단되고 있다.

이 두 장비의 특징은, BIPS의 경우 카메라의 광학적 특성을 이용하여 공벽의 실영상을 포착하는 반면, 텔레뷰어는 초음파가 공벽의 암층에 반사되어 오는 세기를 측정하여 공벽의 상태를 영상화한다. 표 2는 텔레뷰어와 BIPS의 특성을 비교한 것이다.

텔레뷰어³⁾는 탄성파를 쏘아 되돌아오는 시추공벽의 반사계수를 측정하여 공벽의 상태를 파악한다. 사용되는 탄성파는 초음파로서 보통 1.4Mhz의 대역

표 2. Borehole televiewer와 BIPS의 특성 비교

	Televiewer	BIPS
Source	Acoustic	Optic
Acquisition	Time-distance data converted to image	Direct optic natural image
Resolution -horizontal -vertical	144-288 pixels/360deg. (0.1)-1 pixel/mm	360-720 pixels/360deg. 1-10 pixels/mm
Scan velocity	1-10 m/hr	6-60 m/hr
Operation state	needs water as traveling media. Irrelevant water turbidity.	Water unrelated Relevant water turbidity
Scanning direction	Unavailable horizontal, upward hole	Available any direction
Image	Converted image from seismic reflection feature	Natural borehole wall image

이다. 텔레뷰어의 모니터 상에서는 반사계수의 범위 구간에 따라 미리 설정된 색상 단계에 의해 시추공 벽면의 상태를 영상으로 나타낸다. 텔레뷰어의 구성은 탄성파를 시추공 벽면에 발사하는 probe, probe를 시추공을 따라 하강시키는 윈치, 획득된 자료를 영상으로 전환시키고 출력, 저장하는 중앙처리부의 세부분으로 구성되어 있다.

BIPS는 시추공 내에서 영상을 포착하는 카메라가 탑재된 scanning probe 부분과 probe와 광케이블로 연결되어 전송된 영상을 수치화하여 기록하는 영상기록장치 그리고 영상해석용 S/W로 구성되어 있다. 그림 9는 BIPS에서 카메라가 탑재된 scanning probe의 사진이다.

공벽 영상의 해상도는 수직방향의 경우 probe의 주행속도에 따라 변화하는데 최대주행속도인 60m/hr

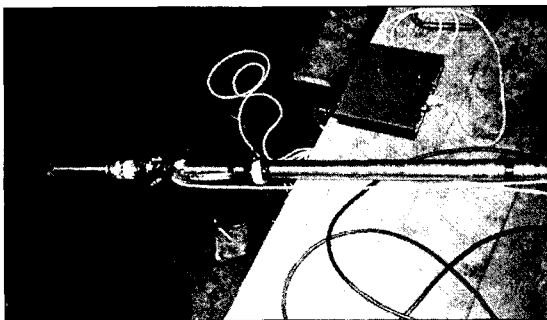


그림 9. BIPS에 사용되는 scanning probe.

의 경우에는 1 pixel/mm이며 이는 주행속도를 늦출 경우 10 pixel/mm 까지 높일 수 있다. 수평방향의 경우에 있어서의 해상도는 1 pixel/degree 이다. 본 연구에서 사용된 KAS03공의 공벽 영상은 최대주행속도하에서 획득되었으므로 공벽영상을 평면상에 펼칠 경우, 가로(수평) 2.3 pixel/mm, 세로(수직) 1 pixel/mm 의 해상도를 갖는다.

BIPS에 의해 획득 저장된 영상으로부터 내장 S/W에 의해 암중, 절리의 형태, 절리면의 풍화정도 등에 대한 데이터베이스의 구성이 가능하고 절리의 발달 방향, 간격, 이격 등에 대한 분석이 가능하며, 이러한 자료들을 통계적으로 처리하여 절리군 분석, 로즈(rose) 다이어그램 분석, RQD 분석 등이 이루어질 수 있다. 그림 10은 컴퓨터 모니터 상에서 BIPS 내장 S/W를 이용하여 절리의 방향을 분석하는 예를 보여주고 있다.

2.3 시추공벽 영상의 분석

개괄적인 절리의 방향성이나 분포 등의 정보는 시추공스캐너와 함께 개발된 내장 S/W로써도 얻을 수 있으나 이로부터 절리의 거칠기 산정과 같은 보다 구체적이고 높은 수준의 자료를 추출하기 위해서는 시추공벽에 나타나 있는 절리의 궤적을 컴퓨터 모니터 상에서 인식하고 이를 좌표로 변환하여 측정해 내는 과정이 필요하다. 이를 위해서는 포착된 원영상을 변조할 필요가 있다. 영상의 변조기법에는 여러 가

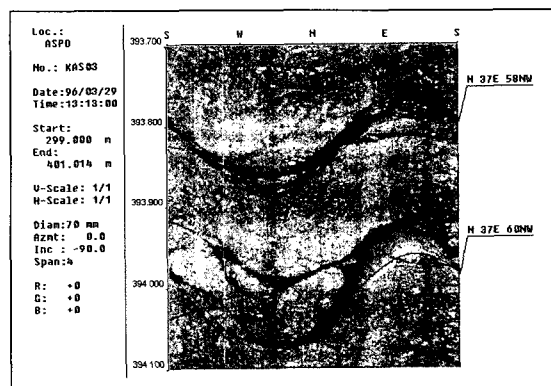


그림 10. BIPS 내장 software에 의한 절리분석 예.

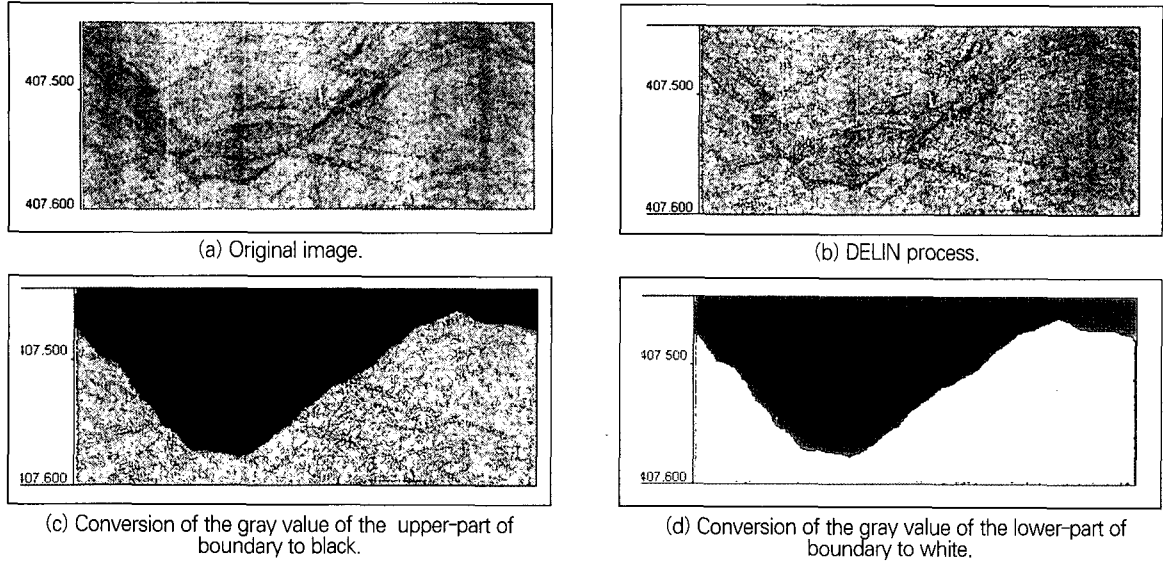


그림 11. Image processing 과정.

지의 알고리즘이 개발되어 있으며, 이러한 기능들을 내장한 영상분석기(image analyzer)가 상용화되어 있다. 시추공스캐너를 이용한 연구들^{1),2),14)}에서 개발된 영상분석 모듈을 소개하면 그림 11과 같다.

그림 11(a)의 원영상은 먼저 영상 내에 분포하는 음영농도의 차를 세분 차등화하여 절리의 경계를 뚜렷이 하는 Delineation과정을 거쳐 (b)와 같이 변조된 후, 수동으로 디지털타이저를 이용하여 절리의 궤적을 트레이싱(tracing) 하게된다. 이후 (c) 및 (d)와 같이 절리궤적의 상부와 하부의 음영농도를 각각 흑색과 백색으로 변조시킴으로써 절리궤적을 극단적인 음영의 차이에 의해 부각시킬 수 있다.

절리 궤적을 구성하고 있는 화소들의 좌표는 인접한 화소간의 음영의 차를 이용하여 음영농도의 변화가 있는 화소의 위치를 측정함으로써 구할 수 있다.

2.4 절리 거칠기(JRC)의 산정

절리의 거칠기는 먼저 각 절리의 경사방향 및 경사각에 근거한 평면에 대해 영상분석을 통하여 구한 절리궤적의 차이를 의미한다. 그러나 거칠기는 수평면 상에서 요철의 정도를 나타내는 것이므로 경사진 절

리면에 대해서는 몇 단계의 기하학적인 보정과정을 거칠 필요가 있는데 그림 12 ~ 15는 이러한 과정¹⁾을 보이고 있다.

Tse and Cruden⁵⁾은 거칠기 궤적의 일차도함수의 표준편차(이 경우 root mean square와 동일함), Z₂와 JRC 간에는 아래식과 같은 관계가 성립한다는 연구결과를 발표하였다. 이 연구에서는 Barton과 Choubey⁶⁾가 제안한 JRC 산정 기준용 10개의 절리거칠기 표본을 일정 미소간격, Δx에 따라 수치적으로 읽어 거칠기 자료를 만든 후 JRC와의 상관관계를 구하였다.

$$JRC \approx 32.2 + 32.47 \log_{10} Z_2$$

$$\text{여기서, } Z_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^M (y_i + 1 - y)^2}{M (\Delta x)^2}}$$

M: 자료의 수, y_i: i번째 거칠기 궤적 자료의 크기.

위식을 이용한 JRC의 산정은 이후 여러 연구자^{15),16),18)}들에 의해 검증되었는데, 이들 연구자들에 의한 결과에 의하면 수치화된 자료에 의한 JRC의 산

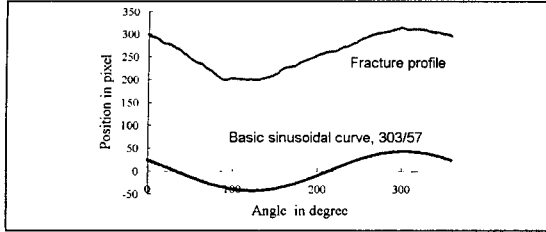


그림 12. 영상처리에 의해 얻어진 fracture profile 및 이의 기본이 되는 sinusoidal curve.

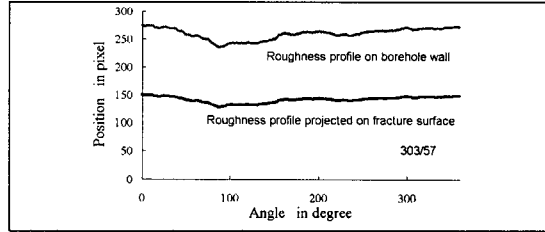


그림 13. 시추공에서의 roughness profile과 이를 fracture 표면에 수직으로 투영한 모양

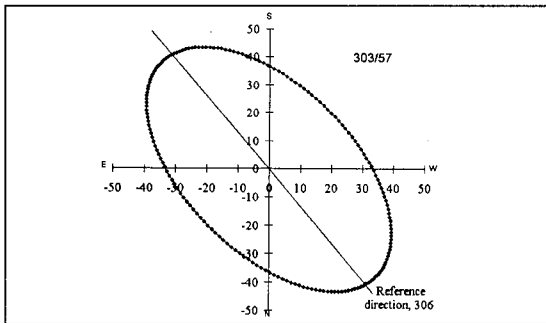


그림 14. Roughness profile이 맞춰질 타원형 궤적

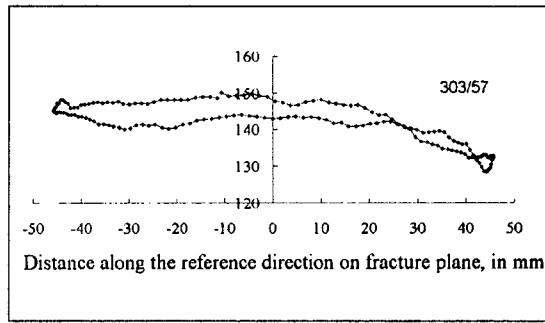


그림 15. 특정 방향으로 투영된 roughness profile

정에는 디지털라이징 간격 Δx 가 영향을 미치는 것으로 나타났다. 아래식은 이들 연구자들에 의하여 수정된 것이다.

$$JRC \approx AZ_2 - B$$

여기서,

$\Delta x(\text{mm})$	A	B
0.25	60.32	4.51
0.5	61.79	3.47
1.0	64.22	2.31

그림 16은 이러한 과정을 거쳐 산정된 JRC를 예시한 것이다.

2.5 절리 거칠기를 이용한 절리 강성의 추정

절리면에 대해 수직응력이나 전단응력이 작용할 경우 그에 상응하는 수직변위나 전단변위가 발생하며 이때 변형성은 절리표면의 초기 거칠기 상태, 절리면간의 엇물림 정도, 절리면을 구성하는 암석의

강도나 변형성, 절리 내 충전물이 있을 경우 충전물의 두께와 역학적 특성 등에 의해 결정될 수 있다. 따라서 절리 거동에 관한 Barton-Bandis모델¹⁰⁾을 기초로 하여 시추공 스캐너로부터 얻어진 영상에서 구한 절리의 JRC와, 절리면의 상태와 관련된 몇 가지 사항을 측정 또는 가정함으로써 절리의 변형성을 나타내는 수직강성(normal stiffness)과 전단강성(shear stiffness)을 유도^{1),2)}할 수 있다.

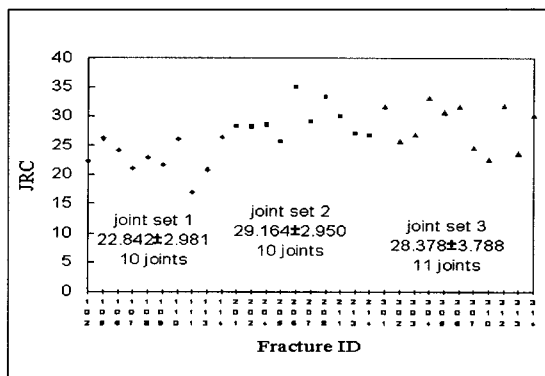


그림 16. Round-off 오류를 제거하여 얻어진 JRC값.

표 3은 이와 같은 과정으로부터 얻어진 수직 및 전단 강성의 예를 보여주고 있다.

표 3. 시추공 스캐너 영상으로부터 산정된 JRC, 수직 및 전단강성.

JRC	e_i (mm)	ΔV_{max} (mm)	$k_{n, tan}$ (MPa · mm ⁻¹)
5.440	0.163	0.126	16.095
τ_i (MPa)	k_i (MPa · mm ⁻¹)	$k_{s, tan}$ (MPa · mm ⁻¹)	
1.966	3.808	6.454	

2.6 절리구조도

이상에서 기술한 바와 같이 시추공벽 영상에 대한 분석을 통하여 절리군에 대한 방향성 분석, 거칠기 산정 및 강성의 추정과정을 간단히 제시하였다. 이러한 결과들을 종합하여 절리 암반 모델링에 필요한 절리 구조도를 작성할 수 있다. 절리구조도는 터널 굴착에서와 같이 특정 방향에 대한 절리의 발달 구조를 구체화하여 암반 모델링에서 보다 정확한 요소망을 구성하고 절리군의 역학적 특성을 파악할 수 있도록 하는데 이용될 수 있다.

그림.17은 시추공벽 영상으로부터 획득된 46개 절

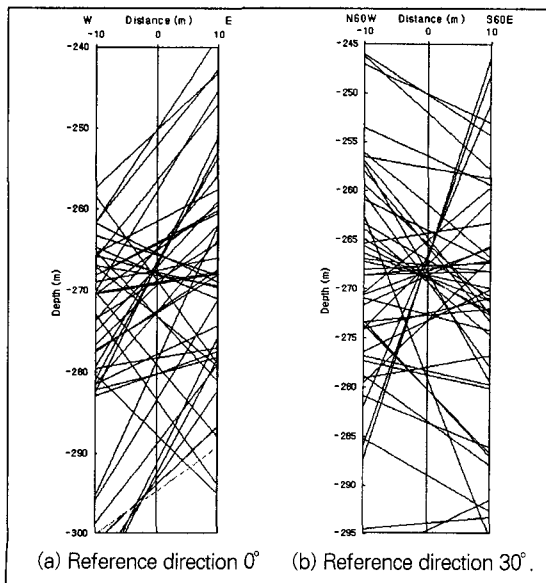


그림 17. 전체적인 joint map

리의 경사 방향 및 경사각을 자료로 하여 작성된 절리구조도로써, (a)는 기준면의 법선의 방위각이 0° (기준면의 방향은 동서방향)인 경우이며, (b)는 기준면의 법선의 방위각이 30°인 경우의 예를 도시한 것이다.

그림 17에 도시된 절리들에 대해 절리 군집성 분석을 실시하여 나타난 절리군의 특성과 강성의 추정 해석에 적용된 암반의 주요 물성을 요약하면 표 4와 같다.

표 4. 절리군 자료의 요약

Joint Set	Orientation (degree)	JRC	σ_c (MPa)
1	203/69	5.4±1.4	140
σ_d (MPa)	ϕ_b (degree)	K_n (MPa · mm ⁻¹)	K_s (MPa · mm ⁻¹)
112	35	63.441	1.263

절리의 크기나 모양에 대한 부분은 현재까지 확인하는데 기술적으로 많은 어려움이 있어 절리구조도에서는 단순히 시추공벽상에 나타난 자료를 선형적으로 연장하여 표현하였으나 이는 이후 인접된 여러 시추공에 대한 영상분석이나 물리탐사방법을 이용한 고해상 균열탐사 등의 방법에 의해 지속적인 연구가 이루어져야할 것으로 사료된다.

3. 암반 Modeling 및 입력정수의 산정

지반공학적 문제의 해결방안으로서 수치해석법 적용의 타당성에 대한 논의는 이미 70년대 초반부터 거론되어 왔으나, 최근 들어 컴퓨터의 눈부신 발달과 점차 복잡해져 가는 지반 구조물의 해석에 대한 거의 유일한 해석도구로 자리잡아가고 있는 실정이다.

그러나 지반공학적인 제 문제를 수치해석적인 방법으로 해결하기 위하여는 해당 문제에 대한 적합한 수치해석 방법의 적용과 대상지반 및 구조물의 정확하되 가능한 단순화된 modeling이 필수적이다.

이를 위하여 지반 및 기타 구조물을 이루는 재료의 변형 · 파괴를 나타내는 물성자료가 정확하게 산정되

강좌

어야 하며, 현장 지질조건을 가장 적합하게 나타낼 수 있는 model의 선택이 필수적이다. 암반에 대한 제 실내시험 및 원위치 시험방법은 신회순과 신중호⁴⁾에 의해 발표된 바 있다.

많은 현장자료로부터 지반을 modeling하는 단계에서 가장 우선적으로 고려되어야 할 사항은 지반공학적 제 조사결과를 토대로 현지 지반 및 부차적인 구조물을 등방 탄성체, 이방 탄성체, 등방 탄소성체, 이방 탄소성체 등으로 구분하고, 절리의 발달 상태와 구조물의 상대적 크기에 따라 연속체 편재절리 model을 사용할 것인가 아니면 개별절리를 일일이 고려하는 개별요소 model을 사용할 것인가를 결정하는 것이다.

3.1 Model 선정 Criteria

암반은 post failure 영역에서 변형연화(strain softening)현상을 보이는 취성물질이다. 따라서 암반은 거의 모든 경우에 있어서 탄소성체로 간주되어야 한다.

보통암의 강도는 50MPa 이상으로 파괴가 시작되기 이전까지 넓은 탄성영역을 가지며 보통 등방의 탄소성 물질로 가정하여도 무방하지만, 암석의 성인에 따라 강한 이방성을 나타내는 경우도 많다.

화강암이나 사암과 같이 겉보기에는 결(rift)이 보이지 않는 암석에 있어서도 외력의 방향에 따라 변형 및 파괴거동이 달라지는 경우가 있으며, 이 경우 이방성을 띄고 있는지의 여부는 별도의 시험을 수행치 않

고는 간과되기 쉽다. 그러나 층상구조를 가진 지층 및 편리, 층리가 발달한 암층에 대해서는 불연속면 혹은 잠재연약면의 방향과 이에 수직인 방향으로 외력에 대한 반응이 다를 것이라고 쉽게 추정할 수 있다.

지반을 모델링 함에 있어서 첫 번째 단계는 암반을 연속체로 보느냐 아니면 수많은 절리의 교차에 의해 분리된 블록의 집합체로 보느냐 하는 것이다. 지반내 구조물(공동)과 불연속면의 발달상태에 따라 그림 18과 같은 4개의 개념적인 모델을 고려해 볼 수 있다.

그림 18(a)의 경우 구조물 주위의 암반은 완전한 연속체이며, 따라서 공동 주변에서의 응력장(stress field)과 변위장(displacement field)은 연속일 것이다. 따라서 지반은 연속체로 모델링 될 수 있다.

그림 18(b)의 경우 암반은 매우 미세한 2개의 불연속면으로 분할되어 있다. 분할된 각 블록 내부에서의 응력장 및 변위장은 연속일 것이므로 각 블록은 연속체로 모델링 될 수 있으며, 불연속면에 대해서는 미끄러짐과 벌어짐이 허용되어야 할 것이다.

그림 18(c)의 경우 암반은 2조 이상의 절리군에 의하여 규칙적으로 나누어진 블록들의 집합체로 구성되어 있다. 이 경우 암반거동의 주된 모드는 각 블록을 구성하는 물질의 변형 보다는 불연속면에서의 미끄러짐과 벌어짐, 그리고 블록들의 강체운동, 즉 이동과 회전이 될 것이다. 따라서 이러한 지반조건에 대해서는 개별요소모델을 적용하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

마지막으로 그림 18(d)의 경우 암반은 3조 이상의

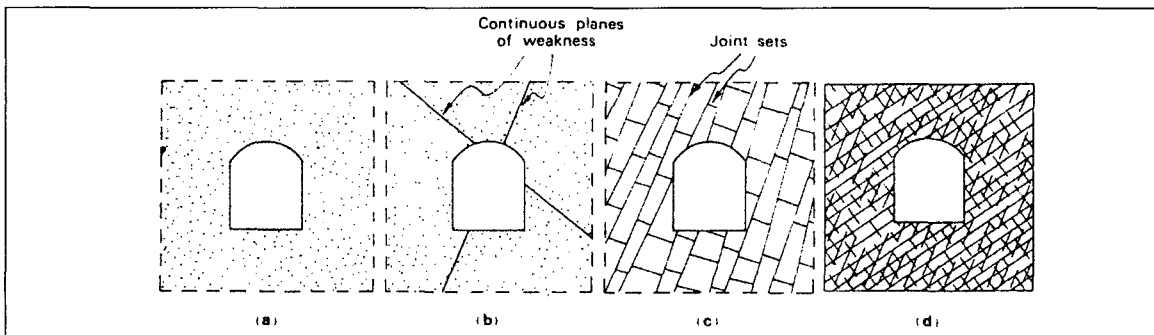


그림 18. 지반내 구조물 및 지반조건에 따른 개념적 모델³⁾

절리군에 의하여 매우 잘게 분할되어있다. 상기 (c)의 경우와 구별되는 점은 불연속면의 평균간격과 공동의 크기와의 상대적인 비인데, 본 그림의 경우 공동의 한 변에 절리 한조당 5개 이상이 걸리고 있어 개별 절리를 일일이 모델링 하기에는 블록의 수가 과도하다. 이 경우 암반은 위연속체(pseudo-continuum)로 가정할 수 있으며, 이에 적합한 모델링 기법은 불연속면의 성질을 포함한 연속체 모델을 이용하는 것이다. 방향성이 우세할 경우에는 편재절리 모델의 사용이 적합하며, 방향성이 없을 경우 등방탄소성 모델이 유용할 것이다.

3.2 지반모델에 따른 입력상수의 결정

3.2.1 연속체 모델(Continuum Model)

연속체 모델을 사용하여 지반을 모델링 하고자 할 때 필요한 입력자료는 다음과 같다.

- 지질학적 지층경계 및 공학적 층 경계를 포함한 해석대상 지반의 단면도
- 각 층의 변형성에 관련된 입력상수 : E, ν or G, K
- 각 층의 강도에 관련된 입력상수 : c, ϕ , To, q_i

(1) 변형성 상수의 결정

- ① 공내재하 시험 결과가 있으면 이를 사용한다.
- ② 암반에 대한 암반평가 자료가 있으면 이를 사용하여 현지반의 변형계수를 산정한다.

RMR 분류시 : $E_M = 2RMR - 100$

Q 분류시 : $E_M = 18 \cdot \ln Q - 12$

- ③ 현지암반에 대한 시험자료가 없으면 절리가 발달하지 않은 암반에 한하여 실험실 시험결과 얻어진 영률을 그대로 사용한다. 포와송비는 실험실 시험결과를 그대로 사용한다.

(2) 강도정수의 결정

- ① 현지암반에 대한 평가 자료가 있으면 암종 및 암반상태를 고려하여 다음의 식으로

Hoek-Brown 파괴이론의 파라미터 m과 s를 구한다.

- i) 불교란 암반에 대해서는

$$m = m_i e^{(RMR-100)/28}$$

$$s = e^{(RMR-100)/9}$$

- ii) 교란된 암반에 대해서는

$$m = m_i e^{(RMR-100)/14}$$

$$s = e^{(RMR-100)/6}$$

여기서 m_i 는 무결암에 대한 파괴조건 상수로서 다음의 표 5에 나타낸 바와 같다.

표 5. 여러 가지 무결암에 대한 파괴조건 상수 m_i

암종	m_i	암종	m_i
각섬암(Amphibolite)	31.2	편마암(Gneiss)	29.2
안산암(Andesite)	18.9	화강암(Granite)	32.7
경석고(Anhydrite)	13.2	석고암(Gypstone)	15.5
현무암(Basalt)	17.0	석회암(Limestone)	8.4
반려암(Gabbro)	25.8	대리암(Marble)	9.3
규질암(Chert)	19.3	노라이트(Norite)	21.7
점토암(Claystone)	3.4	규암(Quartzite)	23.7
역암(Conglomerate)	20	유문암(Rhyolite)	20.0
조립현무암(Dolerite)	15.2	사암(Sandstone)	9.6
백운암(Dolomite)	10.1	점판암(Slate)	11.4

- ② 계산된 m 및 s 값으로부터 현지암반의 일축압축강도(q_m) 및 일축인장강도(T_o)를 다음 식에 의거 산정한다.

$$q_m = q_i \cdot s^{1/2}$$

$$T_o = 0.5 \cdot \sigma_c [(m+4s)^{1/2} - m]$$

- ③ 삼축압축 시험 결과, 파괴포락선이 직선일 경우에는 이의 기울기로부터

$$\phi = \tan^{-1}(\text{기울기})$$

로 내부 마찰각을 구하고, 파괴 포락선이 포물선일 경우, 가장 기울기가 작은 부분을 선택하여 같은 방법으로 내부마찰각 ϕ 를 구한다.

- ④ q_m , T_0 및 φ 가 결정되면, 마지막으로 암반의 점착강도 c_m 은

$$c_m = 0.5 \cdot q_m \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2)$$
 로 결정할 수 있다.
- ⑤ 현지암반 분류자료가 없을 경우에는 암석강도에서의 크기효과 및 불연속면의 존재를 고려하여 실험실 강도의 1/5~1/10을 현장강도로 결정하고, 2)와 3)의 방법으로 내부마찰각과 암반의 점착강도를 산정한다.
- ⑥ 점재하 강도시험에 의거하여 산정한 일축압축강도는 실험실 시험에 의한 압축강도와 동일한 방법으로 처리한다.

3.2.2 등가 연속체 모델(Pseudo-Continuum Model)

절리가 매우 발달한 암반의 경우에는 절리의 발달 상태에 따라 특정방향으로 우세한 절리가 있는 경우에는 편재 절리 모델(ubiquitous joint model)로, 우세한 절리가 없는 경우에는 등방 탄소성체로 가정할 수 있다.

이 경우, 필요한 입력자료는 다음과 같다.

- 지질학적 지층경계 및 공학적 층 경계를 포함한 해석대상 지반의 단면도
- 각 층의 변형성에 관련된 입력상수 : E, ν or G, K
- 각 층의 강도에 관련된 입력상수 : c, φ, T_0, q_i
- 편재 절리의 강도에 관련된 입력상수 : c_j, φ_j, T_j (편재절리모델에 한함)

이중 암반 자체에 대한 강도 및 변형성 자료의 산정 방법은 연속체 모델의 경우와 동일하며, 편재 절리모델에 대한 입력상수는 다음의 방법으로 산정할 수 있다.

- ① 절리 시험편에 대한 직접전단시험 결과가 있을 경우, 이를 직접 사용하되, 특별한 경우를 제외하고는 마찰각만을 사용하고, $c_j = T_j = 0$ 으로 한다.

- ② 절리 내부에 mud seam이나 녹니석(chlorite) 피막이 있는 경우, 그리고 이암류의 절리를 제외하고는, 마찰각을 20° 이하로 산정하지 않는다.
- ③ 절리의 마찰각이 60° 이상으로 측정된 경우에는, 안전율을 고려하여 60° 로 결정한다.

3.2.3 불연속면을 고려한 연속체 모델 (Continuum Model with Discontinuities)

암반내 절리의 빈도가 낮고, 매우 우세한 불연속면이 해석대상 지반에 포함 되어있을 경우에는 암반은 연속체 모델, 우세 불연속면은 미끄러짐과 벌어짐이 가능한 불연속체 모델을 사용하는 것이 바람직하다.

- 이 경우, 필요한 입력자료는 다음과 같다.
- 지질학적 지층경계 및 공학적 층 경계를 포함한 해석대상 지반의 단면도
- 각 층의 변형성에 관련된 입력상수 : E, ν or G, K
- 우세 불연속면의 변형성에 관련된 입력상수 : K_s, K_n
- 각 층의 강도에 관련된 입력상수 : c, φ, T_0, q_i
- 우세 불연속면의 강도에 관련된 입력상수 : φ_j

이중 암반 자체에 대한 강도 및 변형성 자료의 산정 방법은 연속체 모델의 경우와 동일하며, 우세 불연속면에 대한 입력상수는 다음의 방법으로 산정할 수 있다.

- ① 우세 불연속면에 대한 직접전단시험 결과가 있을 경우, 마찰각 φ_j 값을 직접 사용한다.
- ② 불연속면 내부가 mud seam이나 채설물로 충전되어 있는 경우, 이들에 대한 전단시험결과를 사용한다.
- ③ 직접전단 시험결과에 변형성 측정자료가 있으면, 이를 그대로 사용한다.
- ④ 변형성 자료가 없을 경우, 충전물이 있는 경우에는 $K_s = K_n = 106 \text{ Pa/m}$, 충전물이 없는 경우에는 모암의 변형성을 고려하여 $K_s = K_n = 10^8 \sim 10^{10} \text{ Pa/m}$, 범위에서 적절히 선

택하여 사용한다.

강성이 클 경우에는 불연속면의 탄성변형이 작고 불연속면에서의 파괴가 일어나기 쉬우며, 강성이 작을 경우에는 불연속면의 탄성변형은 크나 불연속면을 따른 파괴가 억제되는 효과가 있다.

3.2.4 불연속체 모델(Discrete Model or Distinct Element Model)

해석 대상 범위, 혹은 구조물의 크기에 비하여 비교적 절리의 간격이 큰 경우, 예를 들면 구조물의 최대 span이 평균 절리간격의 5배 이내인 경우에는 개별 절리의 거동을 일일이 모델링하는 개별요소법을 적용하는 것이 바람직하다. 이 경우 암석 자체의 변형 및 파괴는 관심의 대상이 아니고, 절리에 의해 분할된 암석 블록의 움직임, 즉 미끄러짐 및 회전 등이 주된 관심사가 된다.

이 경우, 필요한 입력자료는 다음과 같다.

- 절리의 발달상태를 포함한 해석대상 지반의 단면도
- 각 층의 변형성에 관련된 입력상수 : E, ν or G, K (강체블록 사용시 불필요)
- 각 층의 강도에 관련된 입력상수 : c, ϕ, T_0, q_1 (강체블록 사용시 불필요)
- 우세 불연속면의 변형성에 관련된 입력상수 : K_s, K_n
- 우세 불연속면의 강도에 관련된 입력상수 : c_j, ϕ_j, T_j, JRC

본 모델 사용시 대부분의 경우에는 암석은 강체(rigid body)로 가정하게되나, 암석의 변형을 무시할 수 없는 경우에는 각 블록을 다시 유한개의 요소로 분할하여 블록의 변형 및 파괴거동을 해석할 수도 있다. 암반 자체에 대한 강도 및 변형성 자료의 산정 방법은 연속체 모델의 경우와 동일하며, 우세 불연속면에 대한 입력상수는 다음의 방법으로 산정할 수 있다.

- ① 절리 시험편에 대한 직접전단시험 결과가 있을 경우, 이를 직접 사용하되, 특별한 경우를 제외하고는 마찰각만을 사용하고, $c_j = T_j = 0$

으로 한다.

- ② 절리 내부에 mud seam이나 녹니석(chlorite) 피막이 있는 경우, 그리고 이암류의 절리를 제외하고는, 마찰각을 20° 이하로 산정하지 않는다.
- ③ 절리의 마찰각이 60° 이상으로 측정된 경우에는, 안전율을 고려하여 60° 로 결정한다.
- ④ 변형성 자료가 없을 경우, 충전물이 있는 경우에는 $K_s = K_n = 106 \text{ Pa/m}$, 충전물이 없는 경우에는 모암의 변형성을 고려하여 $K_s = K_n = 10^8 \sim 10^{10} \text{ Pa/m}$, 범위에서 적절히 선택하여 사용한다. K_s 및 K_n 값의 선택에 따른 효과는 전기한 바와 같다.
- 이를 요약하여 표 6에 정리하였다.

참고문헌

1. 김재동, (1997), 핵폐기물 처분장 주위 암반내 절리의 거칠기와 강성에 관한 연구, 한 국자원공학회지, Vol. 34, p. 453 - 462.
2. 김재동, 김종훈, (1998), 시추공벽 영상을 이용한 암반 내 절리구조 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제8권 4호, pp.342-350
3. 김중열, Schepers, R., (1995), 고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능, 대한지질공학회지, 제5권, 제3호, p. 277 - 288.
4. 신희순, 신중호 (1998), 토목기술자를 위한 암반공학 (V-I), 한국지반공학회지 14권 6호, pp 169~190.
5. 이상덕(1997), 토질시험, 새론
6. 임종석 외(1996), 지반공학용어사전, 엔지니어즈
7. 한국도로공사(1998), 토질 및 지질 조사 요령 - 기술교재 제 96호
8. 한국도로공사(1991~1998), 서해안고속도로 건설공사 토질조사보고서
9. Aggarwal, V.S.(1982), "Two decades of dynamic cone penetration testing in India", prod. of the 2nd european symposium on penetration test-

강좌

표 6. 지반모델에 따른 입력상수의 결정

지반모델	모델상수	1순위	2순위	비고	입력자료	
연속체 모델	변형성	E_m	$E_m = D_m$ (현장 공내재하시험)	$E_m = 2RMR - 100$ $E_m = 10 \frac{RMR - 10}{40}$ $E_m = 18 \ln Q - 12$	if $RMR > 50$ if $RMR < 50$	RMR, Q, D_m
		ν_m	$\nu_m = \nu$			ν
		G_m	$\frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$			
	강도	K_m	$\frac{E_m}{3(1 + 2\nu_m)}$			
		q_m	$q_m = q \cdot s^{1/2}$		$s = e^{(RMR - 100)/6}$: 불교란 암반 $s = e^{(RMR - 100)/6}$: 교란된 암반 $m = m \cdot e^{(RMR - 100)/28}$: 불교란 암반 $m = m \cdot e^{(RMR - 100)/14}$: 교란된 암반 ϕ : 기울기 가장 작은 부분	q m ϕ
		T_0	$T_0 = 0.5q [(m^2 + 4s)^{1/2} - m]$			
		ϕ_m	$\phi_m = \arctan$ (기울기) (파괴 포락선 직선일 경우) $\phi_m = \phi_i$ (파괴 포락선 포물선일 경우)			
	C_m	$C_m = 0.5q_m \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})$				
등가 연속체 모델	편재절리 강도	C_{jm}	$C_{jm} = C_{ji}$ (직접전단시험)	$C_{jm} = 0$		
		T_{jm}	$T_{jm} = 0$			
		ϕ_{jm}	$\phi_{jm} = \phi_{ji}$ (직접전단시험)		$\phi_{jm} = 60^\circ$ ($\phi_{jm} > 60^\circ$) $\phi_{jm} < 20^\circ$ (mud seam, 녹니석피막, 이암류, 절리, 단층면)	ϕ_{ji}
암반의 변형성과 강도는 연속체 모델과 동일						
불연속면 고려한 연속체 모델	우세불연속면의 변형성	K_{sm} K_{nm}	$K_{sm} = K_{si}$ $K_{nm} = K_{sn}$	$K_{sm} = K_{nm} = 10^6 \text{ Palm}$ (충전물 있는 경우) $K_{sm} = K_{nm} = 10^8 \sim 10^{10} \text{ Palm}$ (충전물 없는 경우)		K_{si}, K_{sn}
	우세불연속면의 강도	ϕ_{jm}	$\phi_{jm} = \phi_{ji}$			ϕ_{ji}
암반자체의 강도와 변형성은 intact rock과 동일						
불연속체 모델	불연속면의 변형성	K_{sm} K_{nm}	$K_{sm} = K_{si}$ $K_{nm} = K_{sn}$	$K_{sm} = K_{nm} = 10^6 \text{ Palm}$ (충전물 있는 경우) $K_{sm} = K_{nm} = 10^8 \sim 10^{10} \text{ Palm}$ (충전물 없는 경우)		K_{si}, K_{sn}
		C_{jm}	$C_{jm} = C_{ji}$ (직접전단시험)	$C_{jm} = 0$		C_{ji}
	불연속면의 강도	T_{jm}	$T_{jm} = 0$			
		ϕ_{jm}	$C_{jm} = C_{ji}$ (직접전단시험)		$\phi_{jm} = 60^\circ$ ($\phi_{jm} : \phi_{jm} < 20^\circ$) (mud seam, 녹니석피막, 이암류, 절리)	ϕ_{ji}
암반자체의 강도와 변형성은 intact rock과 동일 또는 강체로 간주						

- ing, Amsterdam, pp.215-222
10. Bandis, S. C., A. C. Lumsden and N. R. Barton, (1983), Fundamentals of rock joint deformation, Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 20, p. 249 - 268.
 11. Barton, N. and V. Choubey, (1977), The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, vol. 10. p. 1 - 54.
 12. Douglass, D.J.(1983), "The standard penetration test", proc. of an extension course on insitu testing for geotechnical investigation, Sydney, pp.21-31
 13. E.T.Brown, Allen & Unwin,(1987), "Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics"
 14. Jaedong Kim, O. Stephasson, (1997), Evaluation of JRC from image processing of borehole wall, Environmental and safety concerns in underground construction, Proceedings of the 1st asian rock mechanics symposium, Vol. 2, p. 631 - 634.
 15. McWilliams, P. C., J. C. Kerkering and S. M. Miller, (1990), Fractal characterization of rock fracture roughness for estimating shear strength, Proc. of Int.Conf.on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, Balkema, p331-336.
 16. Roberds, W. J., M. Iwano and H. H. Einstein, (1990), Probabilistic mapping of rock joint surfaces, Proc. of Int.Symp.on Rock Joint, Loen, Balkema, p681-691.
 17. Tse, R. and D. M. Cruden, (1979), Estimating joint roughness coefficients, Int.J.of Rock Mech. & Mining Sciences, vol.16, p303-307.
 18. Yu, X. and B. Vayssade, (1990), Joint profiles and their roughness parameters, Proc. of Int.Symp.on Rock Joint, Loen, Balkema, p781-785.

한국지반공학회 논문집 정기구독 신청 안내

회원 여러분의 인위를 기원합니다.

1999년 1월부터 우리학회의 간행물이 학회지와 논문집으로 분리 발간됩니다. 학회지는 매월 무가로 회원들께 배포되며, 논문집은 유가로 1년에 20,000원의 구독료를 납부하고 받아 보실 수 있습니다. 필요하신 회원은 다음 사항을 참고하셔서 논문집 구독 신청을 하시기 바랍니다.

다 음

- 구 독 료 : 1년 6회, 20,000원
- 신청기한 : 수시(단, 신청시점이 구독료 납부 회계시점임)
- 입 금 처 : 한국주택은행 (예금주: 한국지반공학회)

534637-01-002333

* 입금 후 반드시 학회 사무국(02-3474-4428, 7865)으로 연락하여 확인하시기 바랍니다.