

터널기술의 최근 연구동향

터널기술위원회

1. 머리말

근년에 와서 터널이 건설 프로젝트의 주요 분야로서 국가 건설인프라의 중심축으로 떠오르는 분야임을 감안할 때 그 중요성은 건설분야 뿐만 아니라 국가기초사업 및 사회간접시설 등 전반에 걸쳐 있다.

국내 터널기술은 재래식 굴착에서 근접시공, 도심지 연약지반통과, 대단면 굴착 등으로 이어져 그 한계에 도전하고 있다. 또한 세계적 추세인 기계화 시공에 대해서도 진일보하고 있다. 최근의 전파, 기계, 정보통신 기술의 발달은 터널 현장에서 기계화 시공의 비율이 높아지도록 견인하고 있으며 삶의 질향상과 더불어 일반적인 터널의 기능에 첨가하여 쾌적한 터널을 요구하는 실정이다.

이러한 관점에서 본 고에서는 최신의 연구동향을 위주로 하였다. 이러한 접근방법으로 터널조사분야, conventional 터널, TBM 터널, 그리고 터널의 안전을 평가 등에 대해서 최신 연구동향을 살펴보고 향후 방향에 대해서 살펴보고자 한다.

박남서(대덕공영)

2. 터널조사분야

2.1 터널지반조사

터널 설계시 시행되는 지반조사는 그 동안 적용되지 않았던 수많은 시험들이 최근 턴키, 대안입찰 등 설계 경쟁방식의 입찰제도가 활성화되면서 채용되고 있다. 이는 터널 설계기법의 발전을 가져왔으

나, 또 다른 면으로는 백화점식의 시험결과 나열과 성과품의 미관에 치중하여 조사 및 시험의 본질에 대한 이해가 부족한 것이 현 실정이다. 보다 현명한 시험종류의 선택과 심도있는 결과분석으로 설계·시공기술을 한 단계 발전시키는 것이 중요하다고 생각된다. 많은 현장조사 및 시험중 최근에 널리 시도되고 있는 조사 및 시험위주로 소개한다.

2.1.1 위성영상분석

최근 위성산업의 비약적인 발전으로 GIS, GPS, RS 등 위성자료가 각 분야에서 널리 이용되고 있으며, 지반공학분야에도 위성영상자료 분석이 활발히 진행되고 있다.

위성영상분석은 인공위성으로부터 얻어진 주파수 대역별 image로부터 지표나 수역에 대한 정보를 분석하는 방법으로서 위성 sensor에 감지된 정보를 전산처리에 의한 강조, 확대, 축소 등의 기법을 이용하여 육안분석, 음영기복도 및 3D영상분석을 실시하여 선구조 및 지질 이상대를 파악한다. 또한, 분석시 경사의 변화에 따른 지형의 변화가 생략되는 단점을 보완하는 기법으로 국립지리원 1/5,000 수치지도(DEM)를 이용하여 지형의 주향/경사를 반영한 지질구조를 분석한다.

2.1.2 항공사진 분석

항공사진은 항공기에 광학카메라를 장착한 후 지표면에 대해 수직으로 촬영하며, 촬영된 수직사진은 단일 사진으로도 용도에 적합하게 이용 가능하지만 지반조사 목적으로는 입체쌍(Stereo pair) 사진을 이용한다. 이는 비행 방향선을 따라 약 60%

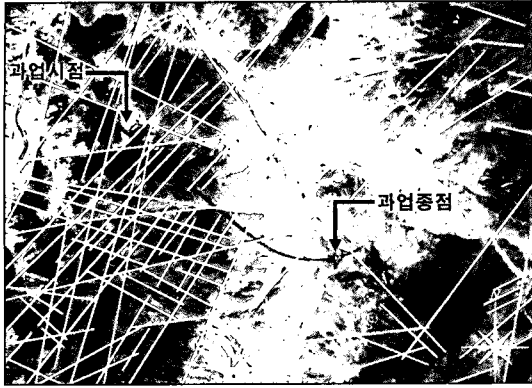


그림 1. 인공위성 영상분석도



그림 2. DEM(음영기복도)

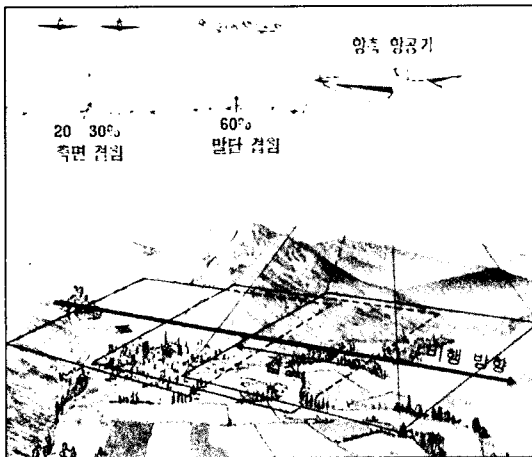


그림 3. 항공사진측량 모식도

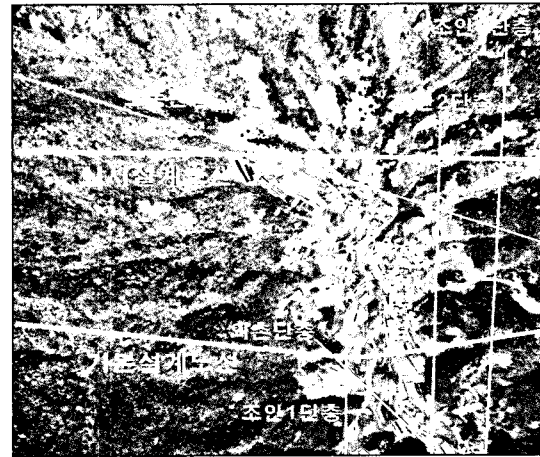


그림 4. 항공사진 분석 예

정도 중복(overlap)되도록 촬영되며 각 비행 방향 선 역시 20% 내외로 중복(sidelap)되도록 촬영하고 이 중복된 부분에 대한 영상의 입체쌍을 입체경(Stereoscope)을 이용하여 분석한다.

사진 지질의 해석에는 일반판독, 암질판독, 구조 분석 등이 수행되며 암질판독의 요소로는 수계, 색조, 연속성, 식물형태와 분포, 풍화저항도, 지형, 조직, 색상 등이 있으며 이로써 수계영향의 평가, 건층(keybed)의 추정, 방향성 분석 등의 작업을 수행할 수 있다.

암질판독은 퇴적암의 경우 사암은 풍화에 대한 저항도가 여타 암석에 비해 높은 편이며 주로 괴상

으로 나타난다. 또한 세일지역에 발달하는 수계는 보통 세립 수지상 수계이며, 낮은 풍화저항도 때문에 저지대를 형성한다. 한편 관입암류 중 심성 기원의 결정암은 거의 비슷한 지형을 형성하며 단지 일부 색조로만 구분이 가능한데 수계는 방사상 수계를 보이며 수계밀도는 낮은 편이고 식물 번식은 드문 편이다. 변성암류 중 편마암은 화강암과 지형 발달이 비슷하며 특히 준편마암인 경우 산릉 등이 평행배열 양상을 보임이 특징적이다.

2.1.3 지구물리탐사

터널 지반조사시 과거에는 개략적인 지층과악을

표 1. 지반특성 파악을 위한 탐사방법

구 분	목 적	취득결과	활 용
전기비저항탐사	지층 및 비저항 이상대 파악	비저항치	지층분류, 지질구조 및 단층/파쇄대 규명
전자탐사	전기비저항탐사가 효율성이 저하되는 고심도구간의 지층 및 이상대 파악	비저항치	고심도구간의 지질구조 추정
탄성파 굴절법탐사	지층 및 암반선 파악	탄성파속도	암반선 구분, 지질구조대 추정
탄성파 반사법탐사	지질 이상대(단층, 공동 등) 정밀 파악	탄성파속도	단층대, 공동 등 지질 연약대 규명
표면파탐사(SASW/MASW)	지반의 동적 특성 파악	주파수 성분별 표면파속도	지층별 동적 지반정수 산정

목적으로 탄성파탐사, 전기비저항탐사 등이 주로 시행되었으나, 최근에는 보다 고가이고 정밀한 자료를 획득할 수 있는 각종 탐사방법이 터키 프로젝트를 위주로 실시되고 있다.

(1) 지표물리탐사

다음 표 1은 각종 탐사방법에 대해 간략히 기술한 것이다.

(2) 시추공 물리탐사

보다 정밀한 지반 특성 자료를 취득하기 위해 전반적인 자료를 얻을 수 있는 지표면 물리탐사뿐 아니라 일정구역 내에서 지반특성치를 정밀하게 얻을 수 있는 시추공 물리탐사가 다수 시행되고 있으며, 그 종류 및 내용은 다음과 같다.

1) 하향식 탄성파탐사(Downhole Test)

지표에서 발생시킨 탄성파를 시추공 내에서 3성분 지오폰으로 측정하는 탐사법으로써 시추공 주변 지반의 심도에 따른 P파 및 S파 속도를 산출하여 파쇄대를 파악하고, 실내시험에서 구한 밀도값과의 관계로 동적 지반특성치(ν , Gd, Ed, Kd)를 산출한다.

2) Suspension PS검층

단일 시추공을 대상으로 발신원과 수신기가 일체화된 탐봉(Probe)을 공내에 삽입하여 상향시켜 가면서 공내에서 발진과 수진을 실시하는 공내 검층법으로써, 종래의 Downhole법으로는 불가능한 하상탐사가 가능하고 두께가 얇게 분포하는 지층의 해석이 가능하며 정밀도가 높은 탐사법이다. Downhole Test와 마찬가지로 P파 및 S파의 속도를 얻는다.

3) 시추공간 탄성파탐사

두 개의 시추공을 이용하여 한쪽 시추공에 발신원, 다른 쪽 시추공에 수신기를 설치하여 탄성파를

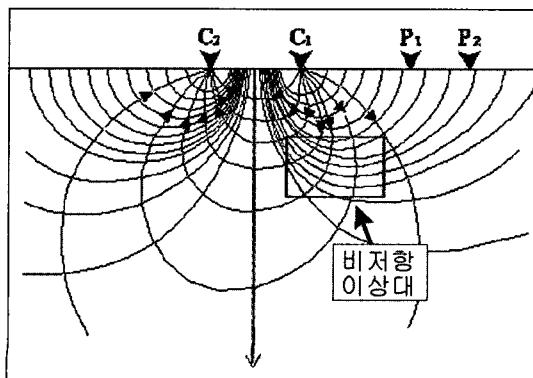


그림 5. 전기비저항탐사의 등전위선 분포

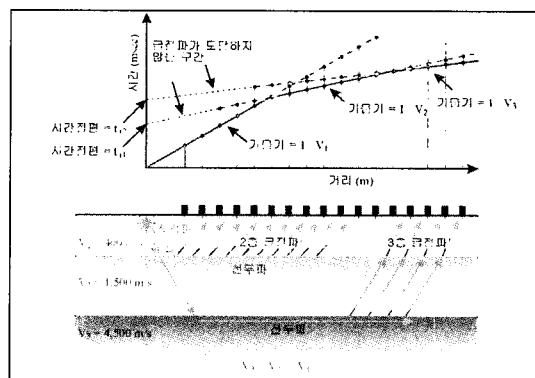


그림 6. 탄성파탐사의 주시곡선 설명을 위한 모식도

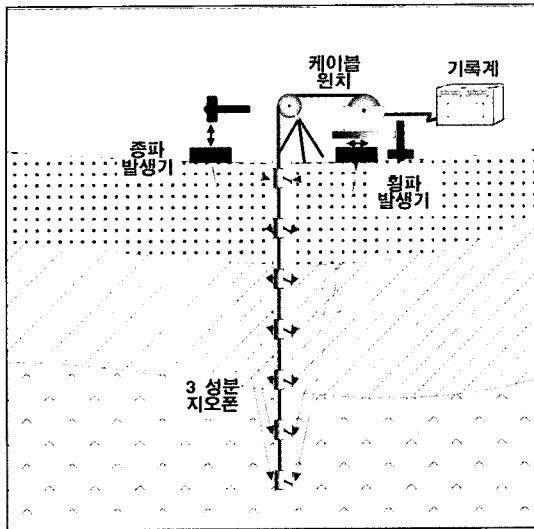


그림 7. 하향식 탄성파탐사 모식도

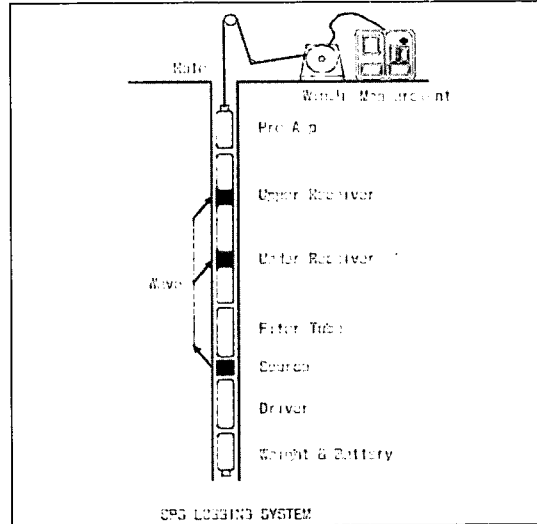


그림 8. Suspension PS 검층 모식도

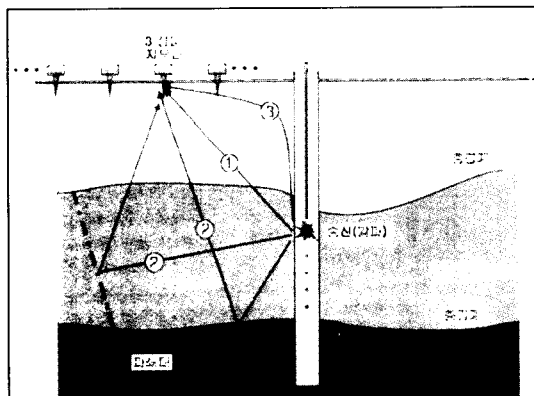


그림 9. 수직 탄성파탐사 모식도

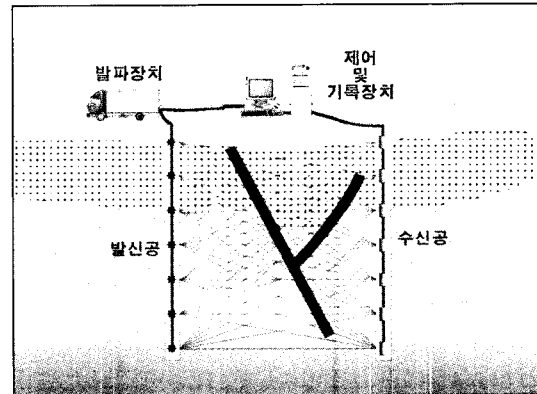


그림 10. 탄성파 토모그래피탐사 모식도

측정함으로써 P파 및 S파의 속도를 시추공을 따라 연속적으로 측정하는 탐사방법이다. 탐사결과를 Downhole Test와 같은 P파, S파 속도이나, 두 개 공 사이의 보다 정밀한 결과를 획득할 수 있는 것이 장점이다.

최근에는 탐사의 분해능(Resolution)단계 때문에 두 개의 시추공 사이에서 가장 정밀한 지질정보를 얻을 수 있는 방법으로 의학계에서 많이 이용되는 CT(Computer Tomography)의 원리를 적용한 탄성파 토모그래피탐사의 적용이 일반적이다.

4) 수직 탄성파탐사(VSP)

시추공 내에서 다이내마이트를 이용하여 발생시킨 탄성파가 지층경계 또는 파쇄대 면에서 반사되어 지표에 도달되는 것을 3성분 지오폰으로 수신하여 파쇄대의 경계면을 분석하는 탐사방법으로써 탄성파 반사법탐사의 일종이며, 지표지질조사, 지표물리탐사, 시추조사 등에서 추정되는 단층파쇄대의 보다 정확한 위치와 방향성을 추정하는데 이용된다.

5) 초음파 주사검층(Televiewer)

시추공영상촬영(BIPS)과는 달리 음파를 사용하

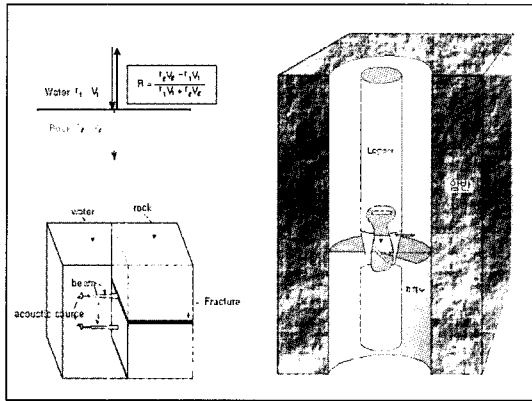


그림 11. 초음파 주사검층 모식도

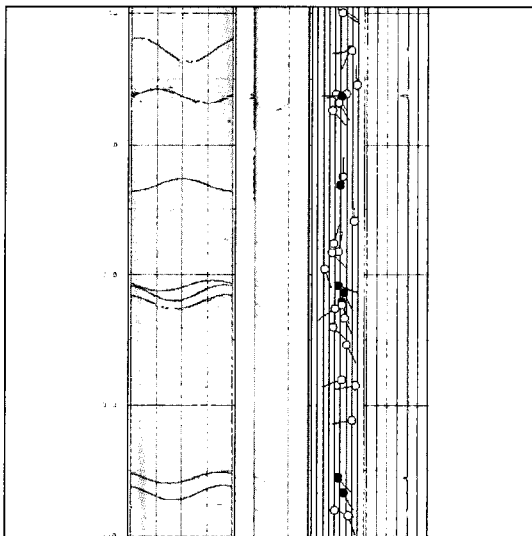


그림 12. 초음파 주사검층 결과 예

여 불연속면의 발생 빈도 및 방향성을 분석하며, 최대 수평주응력의 방향성 추정, 암반강도 산정 등 부가적 기능이 있다.

시추공 중심축 상에서 일정시간 간격으로 선회하는 초음파 발생장치로부터 일정시간 간격으로 검층기 내부에서 아래로 음파(주파수 약 1.4MHz)를 주사하면 검층기 축과 45°를 이루며 회전하도록 되어 있는 반사경을 통해 시추공 벽에 음파를 주사하여 반사경을 통해 검층기내로 반사된 음파를 측정하면서, 심도별로 상기의 작업을 반복 실시한다.

시추공 벽에 노출된 불연속면은 Sine Curve 형태로 나타나며, 지자기 정보를 이용하여 측정데이터를 N-E-S-W-N 방향 순으로 정렬하고, N방향을 기준으로 Sine Curve를 분석하여 불연속면의 경사방향 (Dip Direction)과 경사각(Dip Angle)을 산정한다.

초음파 빔이 절리 위에 입사된다면 반사되는 에너지는 신선한 암반에 비해 큰 변화를 보인다.

(3) 현장시험

터널구간의 현장 지반특성을 파악하는데 가장 효과적인 방법은 현장 원위치시험이다.

현장 원위치시험은 시험의 난이도, 소요경비의 문제 등으로 제한적으로 이용되고 있는 실정이나 최근에는 그 활용빈도가 높아지고 있는 추세이다.

여기서는 지반의 수리학적 특성, 변형특성, 전단 특성 등에 관한 시험법에 대해 간략히 기술한다.

1) 수압시험

현장투수시험의 일종으로 시추공 내에 Packer를 설치하고 수압을 가하면서 주입량을 측정하여 암반의 투수성을 파악하는 시험으로써 투수계수와 Lugeon치가 산출된다. P-Q곡선에 의한 평가자료는 Grouting 효과를 추정할 수 있으므로 터널보강 Grouting 설계시 보조자료로 이용이 가능하다.

2) 지하수 유량·유속시험

시추공 내 측정지점에서 30초간 가열된 Heat Pulse가 자연적인 지하수의 유동에 따라서 이동되는 것을 4방향의 sensor에서 감지하여 지하수의 유동속도와 방향을 측정하는 시험으로써 시험결과는 터널의 침투류해석과 배수계획시 보조자료로 이용된다.

3) 공내재하시험

터널 안정성 해석시 지반변형의 가장 중요한 요소인 변형계수를 측정하기 위한 시험으로써 공 내에 고무튜브 또는 강제 재하판을 장착한 Probe를 삽입하여 공벽에 하중을 가하면서 지반의 변형량을 측정하는 방법으로 시험한다.

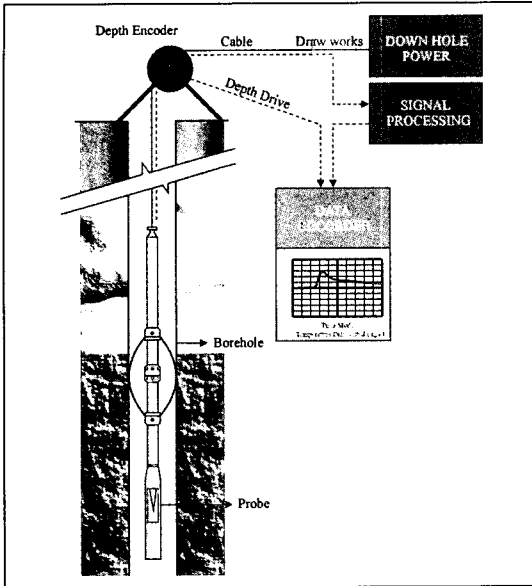


그림 13. 지하수 유동시험 모식도

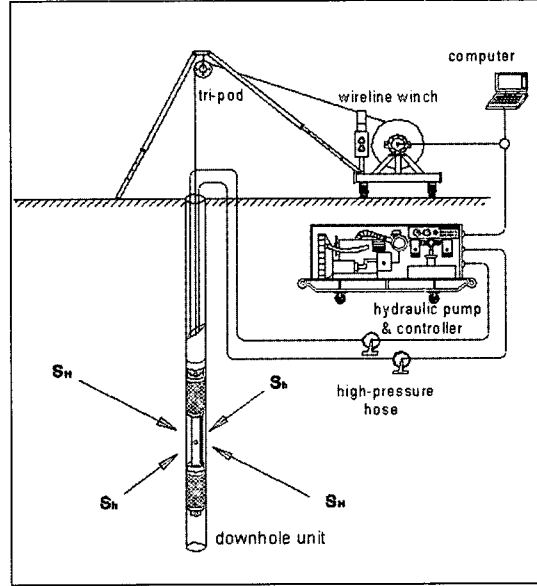


그림 16. 수압파쇄시험 모식도

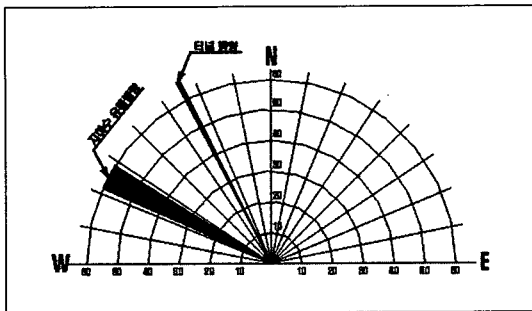


그림 14. 지하수 유동시험 결과 예

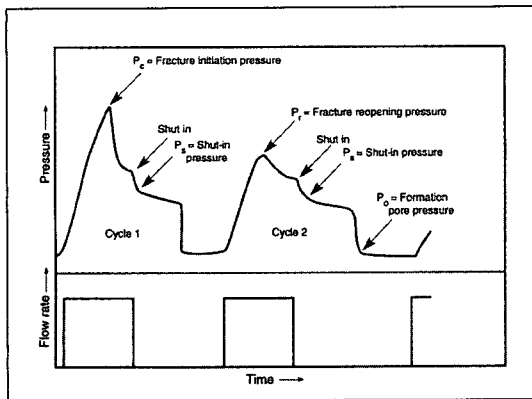


그림 15. 전형적인 압력/유량-시간 이력곡선

시험방법은 등분포 재하법과 등변위 재하법으로 구분할 수 있으며, 국내에서 사용되는 시험기는 Elastmeter, Pressuremeter, Goodman Jack 등 3~4종이 있다.

4) 수압파쇄시험

지반은 터널을 굴착하기 이전에도 지반의 자중 또는 과거 발생했던 지각변동의 영향으로 응력이 발생되고 있으며 이 응력을 초기지압 또는 초기응력이라 한다. 터널의 역학적 안정성을 검토할 때 재료로서의 암반의 역학적 성질과 함께 초기지압이 가장 중요한 항목이 되며, 설계단계에서 현장에서 가장 흔히 적용되는 것이 수압파쇄시험이다.

시험방법은 지압을 측정하고자 하는 위치에 Packer를 설치하고 시추공에 수압을 작용시켜 공벽에 인장파괴가 발생할 때까지 압력을 상승시키며, 인장파괴가 발생하면 인장균열을 Open상태로 유지하기에 필요한 수압을 측정한다.

수압파쇄시험은 응력해방법(Over-coring), 응력재현법(Flat-Jack법) 등에 비해 시험이 용이하고 경제적인 것이 장점이다.

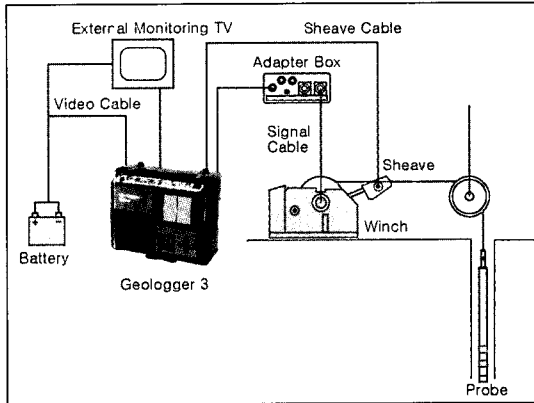


그림 17. 시추공 영상 촬영 모식도

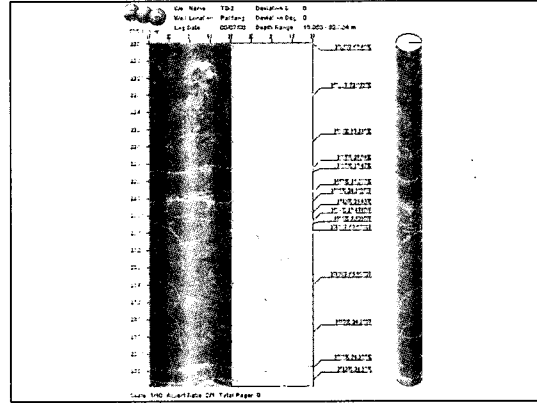


그림 18. 공내영상촬영 결과 예

5) 시추공 영상촬영

시추공 영상촬영은 광학적 촬영방법으로써 광원과 Camera에 부착된 Probe를 시추공 내에 삽입하여 촬영하며, Core Mirror를 이용하여 공벽을 360° 촬영한다.

자체 내에 자기센서가 내장되어 촬영중 북쪽을 기준으로 촬영되며, 심도기록장치에 의해 촬영심도가 기록된다. 촬영된 자료는 Digital로 전환되어 Disk에 저장되어 실내에서 분석을 실시한다.

(4) 실내 암석시험

암석시험은 현장 암반의 물리적·역학적 특성과

안정성해석(응력-변형해석, 내진해석)의 설계정수를 결정하기 위하여 수행하며, 시험방법은 한국산업규격(KSF), 미국표준시험법(ASTM), 국제암반역학회(ISRM) 등의 시험규정에 의한다.

암석시험의 종류는 다음 표에 정리하였고, 최근 적용되고 있는 몇가지 시험에 대해서만 간략히 기술한다.

1) 절리면 전단시험

암석과는 달리 암반의 강도는 불연속면에 의해 지배되며, 암반의 파괴는 불연속면을 따라 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 현장 암반의 불연속면

표 2. 실내 암석시험의 종류

시험명칭	시험 결과치	시험결과치의 이용
비중시험	비중	비중, 흡수율, 함수비, 포화도, 간극비
흡수율시험	흡수율	암석의 투수성
탄성파속도시험	탄성파속도	동적탄성계수 추정, 균열계수 산정
일축압축시험	압축강도, 변형계수, 포아송비	암반분류, 안정성해석 입력치
삼축압축시험	암석 강도정수(c, ϕ)	안정성해석 입력정수
점하중강도시험	점하중지수	암석의 강도 판단
인장시험	인장강도	안정성해석
절리면 전단시험	절리면 강도정수(c, ϕ)	불연속체해석 입력자료
AE & DRA시험	AE값, 변형률	현지 암반의 초기지압 추정
공진주시험	공진주파수, 탄성파속도	동적 지반정수, 감쇠비 추정
Creep Test	Creep계수, 변형률	구조물의 장기 안정성
경도시험/마모시험	경도지수, 마모경도	기계화 굴착여부 판단
재료원시험		골재사용여부 및 본선암 유용성 여부 판단

에 대한 강도정수를 보다 정밀하게 파악하는 것이 터널 설계 및 안정성 분석에 필수적인 요소이며, 이의 방법으로 절리면 전단시험을 수행한다.

시험은 전단면의 암석 연약면과 일치하도록 시료 방향을 선택하고 하중을 가하여 변위를 측정하며, 응력-변형 관계곡선에서 접착력, 내부마찰각, 전단강성 및 팽창각 등을 산정한다.

2) AE & DRA 시험

현지 암반의 응력상태와 측압계수를 산정하기 위한 실내시험으로 현장시험이 규모가 크고 고가인데 비해 비교적 저렴한 비용으로 수행할 수 있는 장점이 있으나, 가정 조건이 전제되므로 현장시험(수압파쇄시험 등) 결과와 비교·분석하여야 한다.

• AE시험(Acoustic Emission)

AE는 재료가 응력을 받았을 때 초음파를 발생하는 현상을 말한다. Kaiser effect에 의하면 재료에 작용하는 응력을 점차 증가해가면 그 응력이 재료가 과거에 받았던 응력치를 넘을 때까지는 AE가 크게 발생치 않고 그 이상에서는 AE의 발생이 급증하므로 이 때의 응력치를 초기하중을 추정한다.

• DRA시험(Deformation Rate Analysis)

암석 내 응력분포의 비균일성은 현지 응력상태 하에서 가장 최소화되고 응력 비균일성의 증가에 따라 비탄성변형율과 그 변형을 속도는 증가한다는 가정 하에 현지 응력을 추정하는 방법으로써 주기

하중시험을 통해 얻은 축방향 변형율의 차와 응력과의 관계를 나타내는 graph에서 변곡점의 응력을 현지 응력으로 추정한다.

3) 공진주시험

터널 구조물의 동적안정해석에 필요한 동적 지반 물성치를 구하기 위한 시험으로써 시험장치는 가진장치, 가속도계, 신호조정기, 주파수분석기 등이며, 하중 주파수 영역에 합당한 장비들을 사용한다.

암석시편을 공기중에 양단자유조건이 되도록 하고 구속압을 재하하지 않은 상태에서 압축과 및 전단파 유발시의 시간영역(Time Domain) 반응곡선을 획득, FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 실시하여 주파수영역 반응곡선으로 공진주파수를 측정하고 공진주파수로부터 탄성계수, 전단탄성계수, 감쇠비 등을 산정한다.

4) Creep Test

암석은 완전탄성체가 아니므로 일정 응력 하에서도 시간의 경과에 따라 변형이 증가하는 Creep현상이 나타나며, 장기적인 안정성 평가시에는 암반의 Creep특성이 중요한 요소이다.

Creep변형은 하중 크기에 의존하지만 Creep변형속도의 시간적 변화에 따라 1차, 2차 및 3차 Creep으로 구분되고 암반공학적으로 취급하는 변형으로는 1차 Creep이 중심이며, 2, 3차 Creep은 파괴에 이르는 변형으로 간주된다.

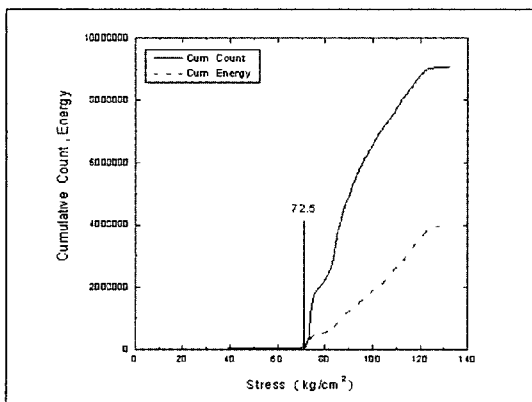


그림 19. AE 수직 시험결과($\sigma_c = 72.5$)

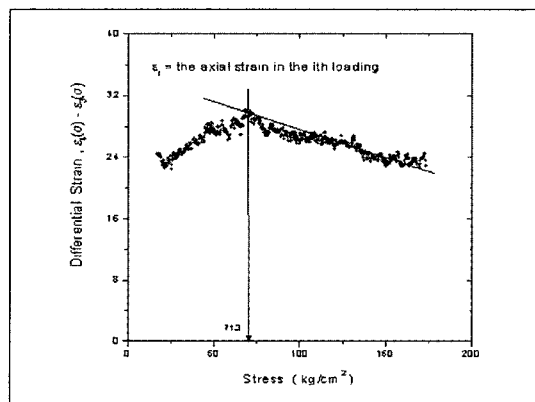


그림 20. DRA 수직 시험결과($\sigma_c = 71.3$)

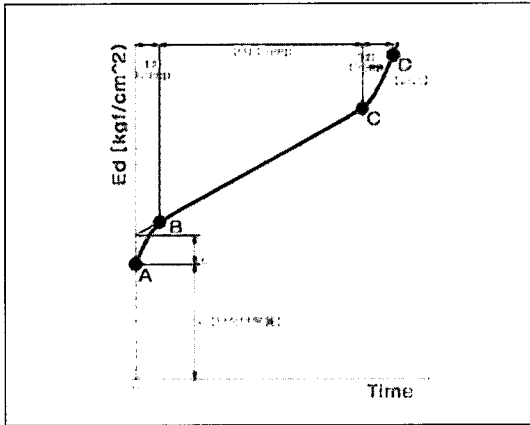


그림 21. Creep곡선 그림

암반에 발생하는 Creep변형량은 짧은 시간에서는 적은 양만이 발생하므로 단기간의 측정으로는 오차가 발생하기 쉬우며, 단기간의 Creep거동으로 장기간 Creep변형을 정확하게 예상하는 것은 매우 어렵다.

이강석(태영), 서지원(대덕공영)

2.2 다분적 지시크리깅에 의한 미시추구간의 암반분류

2.2.1 개요

근래에 다분적 지시크리깅(multiple indicator kriging)기법이 터널 설계시 미시추구간의 암반등급 산정을 위해 사용된 바 있어 본 고에서 간략히 소개한다.

터널의 경우 시추공 자료가 부족하며, 특히 산악 터널의 경우 시추가 무한 구간이 발생하고, 각종 물리탐사 자료는 시추공 자료와 함께 정량적으로 활용하기 힘든 것이 현실이다. 다분적 지시크리깅은 시추공 자료는 물론 각종 물리탐사결과(정성적자료)를 입력치로 활용하여 미지구간의 암반등급을 정량화 할 수 있고, 오차에 대응하는 비용(손실함수)을 사용하여 최적지반조사 계획 수립에 적용될 수 있다. 추정과정에서 다분적 지시크리깅은 사후

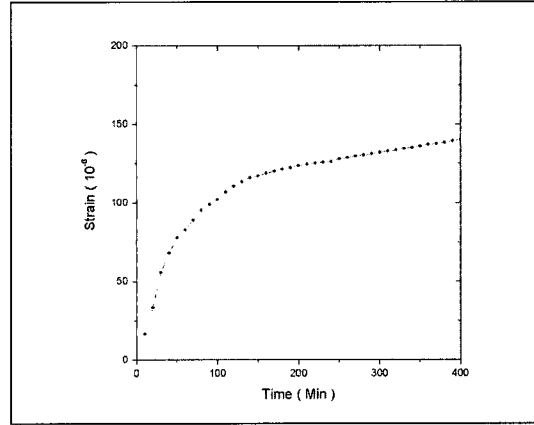


그림 22. Creep시험결과(Strain-Time Curve of Creep Test)

누적확률분포의 형태로 결과를 표현하므로 암반등급 추정의 신뢰도를 얻을 수 있다. 따라서 시추공 이외의 구간에 대한 암반등급을 정성적 자료와 정량적 자료를 모두 이용할 수 있는 다분적 지시크리깅 기법을 사용하여 지구통계학적(geostatistics)으로 추정할 수 있다.

다분적 지시크리깅 기법을 이용하여 터널의 암반을 분류하는 방법이 유(1995, 1998)에 의해 제안된 바 있다.

2.2.2 다분적 지시크리깅

(1) 다분적 지시크리깅의 정의

크리깅은 공간적으로 상호 상관관계를 갖는 변수(A spatially correlation variable)에 대한 여러 추정기법 중 하나로서, 일반적으로 공간상 위치와 해당 변수의 관계를 결정하는 이론분포함수(variogram)를 통해 미지점의 해당 값을 추정하는 기법으로써 선형불편추정법(Best Linear Unbiased Estimation)이다.

지시크리깅(Indicator Kriging)은 Journel(1982)에 의해 정성적 자료를 활용하기 위해 제안된 크리깅 기법의 일종으로, 공간상의 임의의 점 x 에서 미지값 $Z(x)$ 를 x 와 위치가 다른 주변 n 개의 기지값, $Z(x_i)$, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 으로부터 추정하되, $Z(x)$

가 주어진 경계값 보다 작거나 같을 확률에 따라 $Z(x)$ 의 확률을 구하는 방법이다.

한 점 x 와 한 경계값에 대하여 지시데이터(indicator data)는 식(1)과 같이 표현된다.

$$i(z; x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } z(x_i) \leq z \\ 0, & \text{if } z(x_i) > z \end{cases} \quad (1)$$

다분적 지시크리깅은 해당 값의 불확실성에 대한 기본확률분포(underlying probability distribution)를 가정하지 않는 비모수적(non-parametric) 방법으로 점 x 에서 미지값 $Z(x)$ 를 x 와 위치가 다른 주변의 개의 지시값 $Z(x_i)$, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 으로부터 구하는 과정에서 미지값 $Z(x)$ 가 한 개의 주어진 경계값 z 보다 작거나 같을 확률에 따라 n 개의 데이터가 그 경계값 보다 작거나 같을 비율로 정하는 방법이다.

(2) 정성적 자료의 활용

지반공학에서 다루는 자료는 신뢰도(degree of uncertainty)에 따라 정량적 자료(hard data)와 정성적 자료(soft data)로 나누어 질 수 있다. 시추조사결과 및 각종 시험값 등은 정량적인 자료에 속하고, 비저항탐사 결과 및 전문가의 추정값은 정성적인 자료에 속한다고 할 수 있다. 터널의 경우 정량적 자료가 부족하며, 이러한 자료부족 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 정성적 자료의 활용이 요구된다.

(3) 미지점의 누적밀도 함수

다분적 지시크리깅에 의해 임의 지점에 대한 값을 추정하게 되면, 사후 누적확률밀도분포함수(posterior cumulative density function)를 얻을 수 있는데, 이는 각 경계에 대한 지시자가 누적밀도함수의 형태로 입력되기 때문이다.

기지데이터 n 개로부터 구하는 미지데이터의 누적밀도함수의 필요조건은 $\text{Prob}[Z(x)|n\text{개의 지시데이터}] \approx z(x_i) \leq z$ 를 만족하는 데이터의 비율이

다. 한점 x_i 와 한 경계값 z 에 대하여 지시데이터(indicator data)를 식 (1)과 같이 정의하면, 미지데이터의 누적밀도함수는,

$$\text{Prob}[Z(x)|n\text{개의 지시 데이터}] \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i(z; x_j)$$

이 되고, 비균등 경중 평균값을 적용하면, 누적밀도함수는 최종적으로 식(2)와 같이 된다.

$$F[z; x|n\text{기지데이터}] = \text{prob}[Z(x) \leq z|n\text{개의 지시 데이터}] \approx \sum_{j=1}^n w(x_j) i(z; x_j) \quad (2)$$

미지점의 각 경계에서 보통크리깅(ordinary kriging)을 이용한 누적확률밀도함수는 식(3)의 해를 구함으로써 얻어진다:

$$F(z_k) = i^T(z_k)w(z_k), \quad k=1, 2, 3, 4$$

$$\text{Minimize}_{w(z_k)} \sigma_E^2 = \sigma_v^2(z_k) + w^T(z_k)A(z_k)w(z_k) - 2b^T(z_k)w(z_k) \quad (3)$$

- 여기서, z_k : k 번째 경계의 지시값,
- $F(z_k)$: 각 경계 k 에서 추정된 보통 지시 크리깅의 누적확률밀도 함수,
- $i(z_k)$: 각 경계 k 에서 추정된 지시값,
- $w(z_k)$: 각 경계 k 에서 추정된 보통 지시 크리깅의 가중치벡터,
- $\sigma_E^2(z_k)$: 각 경계 k 에서 표본을 사용하여 구한 미지점의 추정 분산값,
- $\sigma_v^2(z_k)$: 각 경계 k 에서 미지점을 포함한 대상공간의 산재 분산값,
- $A(z_k)$: 각 경계 k 에서 각 표본들 간의 공분산 매트릭스,
- $b(z_k)$: 각 경계 k 에서 표본과 미지점간의 공분산 벡터이다.

그림 23은 정량적 자료와 정성적 자료를 누적확률밀도 분포함수를 사용하여 나타낸 예이다.

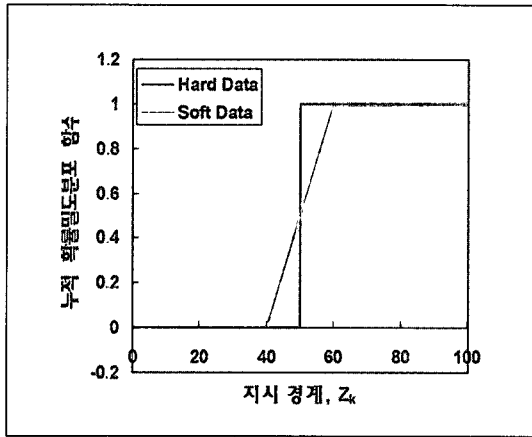


그림 23. 미지점의 누적밀도함수

2.2.3 미시추구간의 암반등급 산정 예

미시추구간의 암반등급을 산정하기 위해 사용된 흐름도(flow chart)는 그림 24와 같다.

수집된 정량적 자료와 정성적 자료의 위치도는 그림 25와 같고, 이때 얻어진 자료를 정리하면 각각 표 3과 4와 같다. 이때 정량적 자료는 시추공 자료로부터 얻어진 것이며, 정성적 자료는 전기비저항 탐사 및 탄성과 토모그래피 탐사로부터 추정된 값이다.

다음의 그림 26은 다분적 지시크리깅에 의해 추정된 터널구간의 암반등급을 보여준다.

그림 27은 시추공 자료만을 사용한 암반분류와

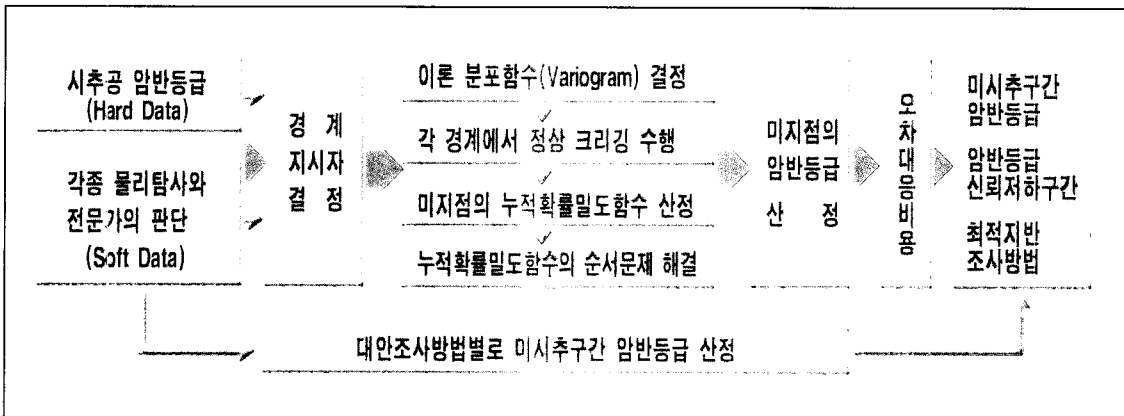


그림 24. 사용된 흐름도(flow chart)

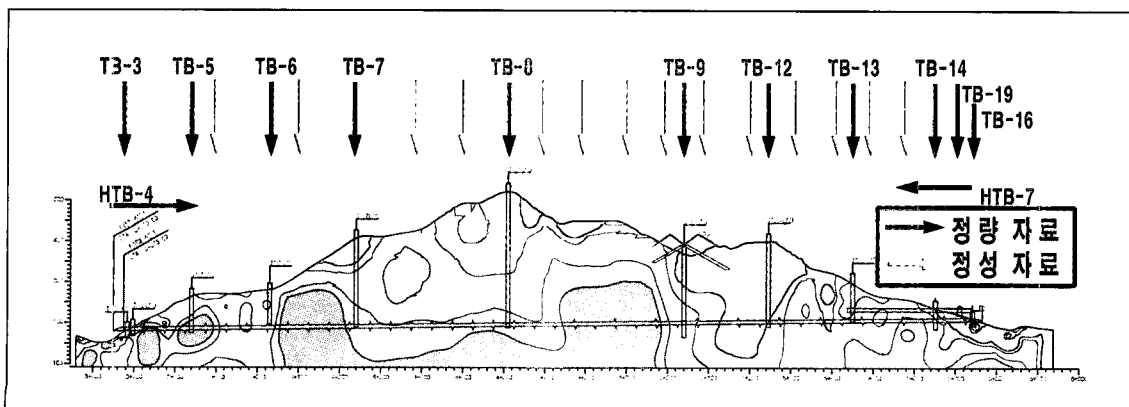


그림 25. 자료 획득 위치도

정성적 자료도 고려한 다분적 지시크리깅에 의한 암반분류를 비교한 것이다. 이 때 시추공 자료만을 이용한 암반분류는 시추공과 시추공 사이의 중앙점까지 일정한 암반등급이 유지되는 것으로 간주하였다. 그림 27에서 알 수 있듯이 다분적 지시크리깅에 의한 암반분류가 보다 복잡한데, 원으로 강조(highlight)된 구간에서는 두 분류의 결과에 다소 차이가 발생하는데 이는 정성적 자료를 사용한 결

과에 기인한다.

유공호(수원대)

3. Conventional 턱널

3.1 개요

표 3. 정량적 자료

번호	위치	시추공번	RMR	시추공 암반분류 평가
1	3+684	TB-3	76.583	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
2	3+840	TB-5	88.476	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
3	4+000	TB-6	52.25	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
4	4+240	TB-7	89.952	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
5	4+610	TB-8	86.808	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
6	5+040	TB-9	53.28	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
7	5+245	TB-12	73.1	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
8	5+450	TB-13	72.6	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
9	5+651	TB-14	70.333	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
10	5+717	TB-19	40.286	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
11	5+741	TB-16	23.111	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
12	3+700	HTB-4	78.33	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균
13	3+75	HTB-4	82.7	터널통과구간 상부 1D, 하부 0.5D 영역의 RMR 평균

표 4. 정성적 자료

No.	Station	설계 등급	추정값	전기 비저항		범위	탄성파 토모그래피		범위
				평균	표준편차		평균	표준편차	
1	3+900	2B	60~80	75.956	4.298	67.5~84.4	85.7350	0.0465	85.6~85.8
2	4+100	2A	80~90	87.302	0.000	87.3~87.3	70.1741	0.1386	69.9~70.4
3	4+400	1A	90~100	81.104	0.247	80.6~81.6	92.3724	0.1774	92.0~92.7
4	4+500	1B	80~90	84.080	1.178	81.8~86.4	85.9741	0.4357	85.1~86.8
5	4+700	5	10~30	78.152	0.380	77.4~78.9	77.4410	0.4870	76.5~78.4
6	4+800	1B	80~90	87.302	0.000	87.3~87.3	86.8240	0.4696	85.9~87.7
7	4+900	2B	70~80	87.302	0.000	87.3~87.3	80.0419	0.7040	78.7~81.4
8	5+000	5	10~30	77.922	4.333	69.4~86.4	73.0424	0.7133	71.6~74.4
9	5+100	2B	50~70	35.200	1.663	31.9~38.5	58.7989	0.0796	58.6~59.0
10	5+200	5	20~30	22.449	0.617	21.2~23.7	66.4893	0.0527	66.4~66.6
11	5+300	2B	50~60	50.609	2.960	44.8~56.4	54.2782	0.9628	52.4~56.2
12	5+400	2B	70~80	44.705	1.647	41.5~47.9	75.1163	0.1312	74.9~75.4
13	5+500	3	40~60	47.953	1.564	44.9~51.0	68.5423	1.6783	65.3~71.8
14	5+600	2B	80~90	84.210	1.003	82.2~86.2	38.6617	0.4737	37.7~39.6

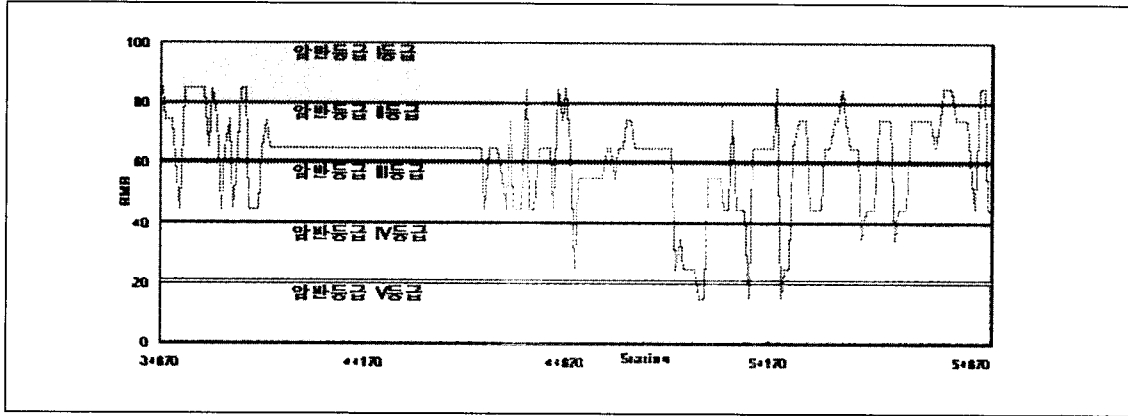


그림 26. 추정된 터널구간의 암반등급

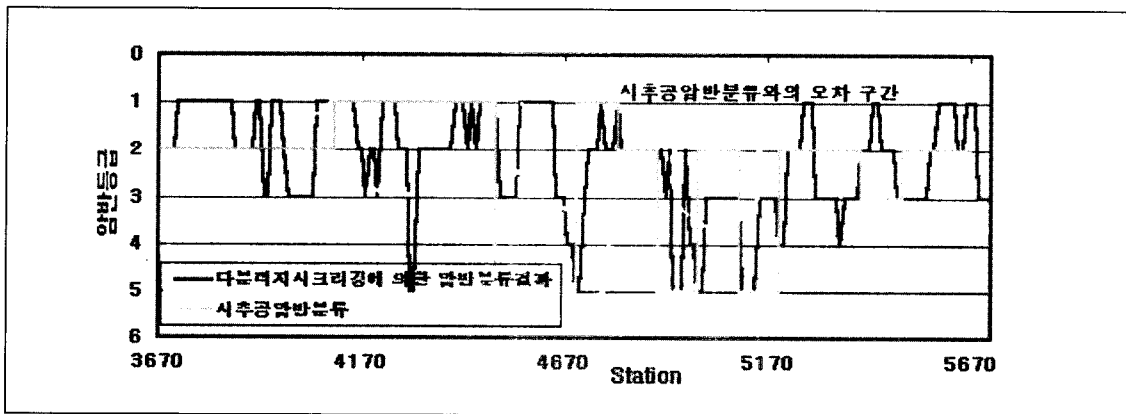


그림 27. 암반분류 결과 비교

공학의 기술이란 한 곳에 정체되어 있는 것이 아니라, 끊임없이 발전되어, 어제의 신기술이 오늘날에는 재래식 기술로 인식되고 있다. 1980년대 초 서울지하철 건설에 도입되어 국내의 터널 설계에 혁신적인 기여를 했던 NATM도 당시에는 새로운 터널설계 기법으로 인식되었으나, 현재는 많은 수정과 도전을 받고 있는 실정이다.

최근 국제 터널협회(ITA)에서는 예전부터 여러 가지 이름으로 사용해 오던 모든 굴착터널 공법명(NATM, NMT, SSM, SLM)을 통일하여 Conventional Tunneling Method로 부르기로 하였으며, TBM(Tunnel Boring Machine)공법과

대응되는 개념으로 사용키로 하였다. 따라서 각국은 Conventional Tunneling Method에 대한 통일된 기술을 만들기 위한 설계 및 시공 표준화작업이 진행 중에 있다.

굴착터널공법이 국내에 소개된 초기에는 공법이론에 대한 연구가 많았으며, 이어서 수치해석, 현장계측, 발파기술, 지반보강, 지반분류기법 등에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 최근의 터널기술은 공사비를 줄이고 공기를 단축함으로써 경제적인 구조물을 축조할 수 있는 방향으로 전환되고 있는 추세이다. 그 일환으로, 고강도 슛크리트에 대한 연구, 3차원 현장계측 또는 탄성파에 의한 막장전방 예측기

법 연구, 그리고 연약지반의 차수 및 보강에 필요한 주입재의 연구 등이 진행중에 있다. 터널 막장 전방의 예측기법이나 주입재의 연구 성과는 이미 많은 발표가 있었으므로, 여기서는 고강도 슛크리트와 관련된 분야에 대해서만 중점적으로 살펴보기로 한다.

스�크리트는 터널굴착후 즉시 지반에 밀착되도록 시공할 수 있고, 지반조건 및 굴착단면의 규모나 형상에 상관없이 쉽게 사용할 수 있으며, 굴착초기에 무지보 단면을 가장 효과적으로 지지해 줄 수 있기 때문에, 터널 굴착시 가장 많이 이용되는 지보재이다. 이제까지 국내를 포함하여 세계 모든 나라에서 슛크리트는 터널 굴착직후 막장의 안정을 확보하기 위한 1차 가설지보재로써 이용해왔다. 이러한 1차 가설라이닝이 충분히 안정되나면 장기적인 크리프하중에 대한 고려, 구조물의 사용연한동안의 내구성 확보, 그리고 방수 등의 목적으로 2차적으로 영구적인 현장타설 콘크리트 라이닝을 설치하게 된다. 이러한 터널구조를 이중셀 구조라고 한다.

그러나, 1994년부터, 슛크리트의 기술은 안정된 침가재의 개발, 내구성이 강하고 강도가 높은 습식 슛크리트의 개발로 획기적인 전환을 맞이하게 되었다. 영국에서는 1966년부터 중요 터널 공사에 강섬유 보강스�크리트 라이닝이 영구 라이닝으로 사용되기 시작하였다. 이와 같이 한걸음의 슛크리트 라이닝을 영구 구조물로 이용하는 것을 단일 셀구조라 한다.

고강도 슛크리트만으로 영구적인 라이닝을 축조하는 Single Pass Tunnel Lining Method (SPTL)는 가설 슛크리트 라이닝을 영구 라이닝으로 전환시켰다는데 큰 의미가 있는 것이다. 이렇게 되기 위해서는 슛크리트 라이닝이 공사중 뿐만 아니라 내구연한 동안 충분한 내구성을 갖는 구조부재로써 기능을 만족시켜야 한다.

박광준(대정컨설턴트)

3.2 설계분야

3.2.1 안전율 평가

사면 설계는 안전율에 의해 평가되며, 사면의 안전율을 구하는 방법에는 한계평형법(Limit equilibrium method)을 이용한 해석법과 수치해석에 의한 방법이 있다. 한계평형법을 이용한 해석법에는 Bishop법, Spencer법, Morgenstern and Price법, Janbu의 엄밀해법 등이 널리 이용되는데, 이들 해석법들은 토사사면의 안전율을 구하기 위해 사용되는데, 임의의 활동면들을 가정하여 안전율을 계산한 후, 최소 안전율을 주는 활동면을 찾아냄으로써 안전율을 구한다. 유한요소법 등에 의한 사면 안정해석시 사면의 안전율을 효율적으로 구하는 수치해석적 방법에는 사면을 구성하는 지반의 실제 강도를 유지한 상태에서 사면의 자중(중력)을 점진적으로 증가시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 자중(중력)비로서 안전율을 구하는 자중증가법과 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구하는 강도감소법이 알려져 있다(김영민, 1999; 서영교, 2000). 이 방법들은 사면의 파괴활동면을 미리 가정하지 않고, 해석 결과로써 안전율과 파괴활동면이 동시에 구해지는 장점이 있다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 강도감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 혹은 응력 경로와 무관한 것으로 알려져 있다(Dawson 등, 1999).

자중증가법을 사질토에 적용하는 경우 자중의 증가로 전단응력 보다 수직 구속압이 더 빨리 증가하게 되어 사면이 파괴되지 않을 수 있는 반면, 강도감소법은 모든 토질에 적용될 수 있는 안정된 방법이다(서영교, 2000). 강도감소기법은 이미 1975년에 Zienkiewicz에 의해 제안되었고, 그 후에 Naylor(1982), Giam & Donald(1988), Matsui & San(1992), Ugai(1989), Kobayashi(1990), Ugai & Leshchinsky(1995), 김영민(1999) 등에

의하여 사용된 바 있다.

터널의 경우는 사면의 경우와는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하는데에는 한계가 있다. 또한 현재의 터널 설계방법도 정량적인 기준이 없이, 지반 상태에 합당한 미리 정해 놓은 표준 지보패턴을 적용하는 것이 고작이다. 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어 왔다.

수치해석에 의해 터널의 안전율을 구하는 방법이 위의 2명(2001)에 의해 제시되었으며, 턴키 터널 설계시 사용되기도 하였다. 앞으로 본고에서 소개된 터널의 안전율을 구하는 방법이 터널 설계와 안정성 평가에 정량적인 기준으로 사용될 수 있을 것으로 기대하며 소개한다.

3.2.2 수치해석에 의한 터널의 안전율 평가

(1) 터널의 국부 안전율

수치해석에 있어, 각 요소에서의 응력상태는 주 응력 σ_1 과 σ_2 에 의해 표현될 수 있다. 일반적으로 이 응력상태는 그림 28과 $\sigma - \tau$ 같이 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 (a)로 그려진다. 이 원이 파괴면 (failure envelope)에 접하게 될 때 파괴가 발생한다. 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ_2 는 그대로 유지하면서 원 (b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 또한, 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (c)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력원의 반지름을 증가시킴으로써 파괴에 도달할 수도 있다.

두 원의 반지름 비($F = \frac{R_2}{r}$ or $\frac{R_1}{r}$)는 주어진 응력 상태에서 일종의 강도/응력비(strength/stress ratio)에 해당하며, 종종 안전율(Factor of Safety)이라고도 불려진다.

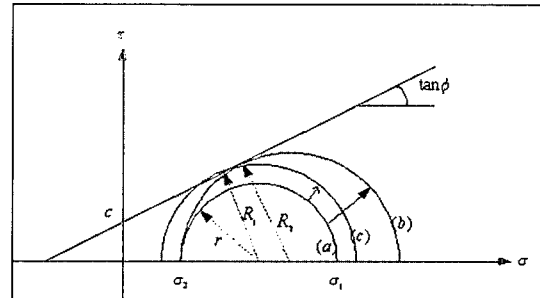


그림 28. 수치해석의 안전율 계산

이와 같은 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는 데에는 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴양상이나 보강이 필요한 부분을 찾아내는데 사용될 수 있다. 하지만, 터널의 전반적인 안정성을 나타내지는 못한다.

(2) 강도감소법

사면이나 둑, 제방 등에 있어서 안전율 F 는 '파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와의 비'라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율 F 는 Duncan(1996)이 지적했듯이 지반의 실제 전단 강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다.

유한요소법을 이용한 사면해석에서 안전율은 실제 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 이러한 강도감소기법은 현재 흔히 쓰이고 있는 절편법(method of slice)에 비하여 여러 가지 장점이 있다. 가장 큰 장점은 임계파괴면이 자동으로 찾아지기 때문에 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 원호, log spiral, 부분선형 등으로 가정할 필요가 없다는 점이다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상유동법칙(associated flow rule)이

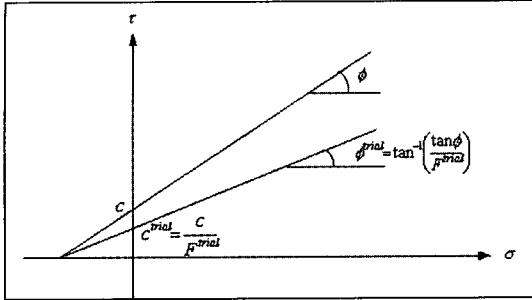


그림 29. 전단강도와 시험 전단강도와의 관계

적용될 경우, 강도감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 혹은 응력 경로와 무관하다(Dawson 등, 1999).

터널안정 해석에서 강도감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 시험 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여 터널의 안전율을 구한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (4)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{F^{trial}} \right) \quad (5)$$

이 때 파괴포락선과 시험 안전율에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 29에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 단지 기울기만 감소한 직선을 나타내게 된다. 한계평형 해석에서는 인장파괴를 고려하지 않으므로 인장강도는 변화시키지 않는다. 그러나 터널 해석 시에는 필요에 따라 동일한 방법으로 인장강도도 감소시킬 수 있다.

(3) 지보재의 파괴

수치해석에서 숏크리트는 빔(beam)요소로, 록볼트는 케이블(cable)요소로 취급되며, 해석 프로그램에 따라 탄성체나 탄소성체로 가정하게 된다.

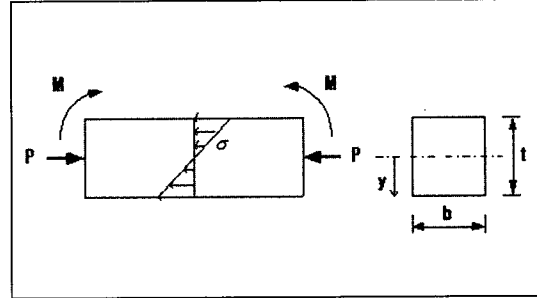


그림 30. 부재 내에 작용하는 응력

만약 숏크리트와 케이블이 탄성체로 가정된다면, 숏크리트나 케이블로 보강된 터널 해석 시 숏크리트는 파괴되지 않기 때문에 강도감소기법에 의해 구한 터널의 안전율은 실제 보다 과대 평가될 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 빔과 케이블 요소의 파괴를 해석에 고려해야 한다. 케이블 요소의 경우는 요소에 발생하는 축력(F_a)이 허용축력(F_{all})보다 크게 되면 파괴되는 것으로 간주하고, 빔 요소의 경우는 요소에 작용하는 휨응력을 계산하여 허용 휨응력과 비교하여 파괴를 판단하는 허용강도 설계법을 사용한다.

그림 30은 사각형 단면을 갖는 축력과 모멘트를 받는 구조부재 내부에 발생하는 응력 분포를 보여 준다. 이 때 각 지점에서의 응력은 다음 식에 의해 구해진다.

$$\sigma = \frac{A}{P} \pm \frac{M y}{I} \quad (6)$$

여기서, P 는 축력, b 는 폭, t 는 두께,

A 는 부재의 단면적($=b \times t$),

M 은 휨모멘트,

y 는 중립축으로부터 거리이고,

I 는 단면 2차 모멘트($=b \times t^3/12$)이다.

그림 30에서 알 수 있듯이, 최대압축응력(σ_c)과 최대인장응력(σ_t)은 $y=t/2$ 인 상부면과 하부면에서 발생한다. 허용휨압축응력(σ_{cy})과 허용휨인장응력

(σ_{ty})은 설계기준강도를 σ_{ck} 라 하면 다음 식으로 구해질 수 있다(건설교통부, 1999, pp.264-265).

$$\begin{aligned} \sigma_{cy} &= 0.4 \sigma_{ck} \\ \sigma_{ty} &= 0.42 \sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (7)$$

예를 들어, 설계기준강도를 210 kgf/cm²로 하면, 허용압축응력은 84 kgf/cm², 허용인장응력은 6 kgf/cm²가 된다. 따라서, 빔요소의 최대압축강도가 허용압축응력을 초과하던가 최대인장강도가 허용인장강도를 초과하게 되면 그 빔요소는 파괴된 것으로

판단할 수 있다.

(4) 안전율의 계산 routine

본 연구에서는 비교적 빨리 안전율을 구할 수 있는 증분탐색(incremental search)방법을 사용하였다. 이 방법은 먼저 안전율의 시작값(F^{start})과 증분값(F^{inc})을 정한다. 이때 시작값은 전산해석 결과가 평형상태에 도달하는, 즉 사면의 파괴가 발생치 않는 시험 안전율이 되며, 증분값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데, 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다. 예를 들면, 첫 단계에서 증

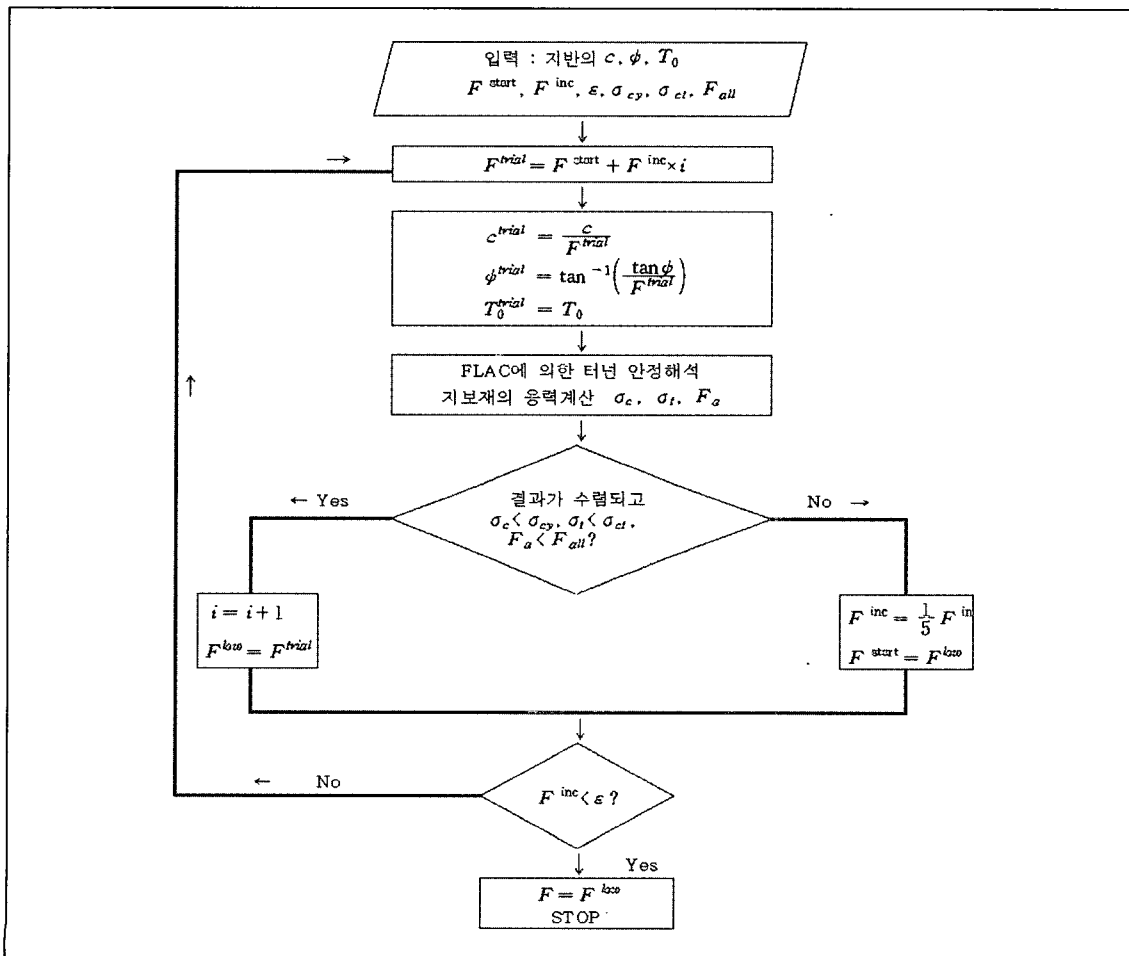


그림 31. 안전율 계산과정의 흐름도

분값을 1.0, 다음 단계에서 증분값을 1/5로 감소시킨 0.2, 또 다음 단계에서 1/10으로 감소시킨 0.02 등을 사용하여 단계별로 최종 안전율의 정확도를 증가시킬 수 있다. 각 단계에 있어서, 해석결과가 수렴하게 되면 사면의 파괴가 발생하지 않는 것이므로 시험 안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이 때 시험안전율은 F^{low} 로 저장된다. 반대로 해석결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율 보다 높은 값이므로 이 값은 바로 전 단계의 안전율인 F^{low} 로 대체되고, 여기서부터 다음 단계로 넘어가 감소된 증분값을 사용하여 안전율을 구하게 된다. 이 같은 과정을 안전율 증분이 충분히 작을 때까지 되풀이하여 최종 안전율을 구하게 된다.

췁크리트 지보재가 보강된 경우에는, 해석결과가 수렴하게 되더라도, 파괴가 된 범요소s가 있는지를 검색하여 범요소s가 파괴된 경우에는 터널이 불안정한 것으로 판단한다. 안전율을 계산하는 과정을 도식적으로 나타내면 그림 31과 같다.

(5) 적용예

그림 32와 같은 해석단면을 설정하여 해석을 실시하였다. 해석 터널은 반지름이 5m인 원형터널로 하였으며, 대상지반의 물성치는 그림 32에 표기된 값을 사용하였다. 초기 수평-수직 응력비는 1.0으로 하였고, 터널 주변부의 요소망 크기를 2.0m으

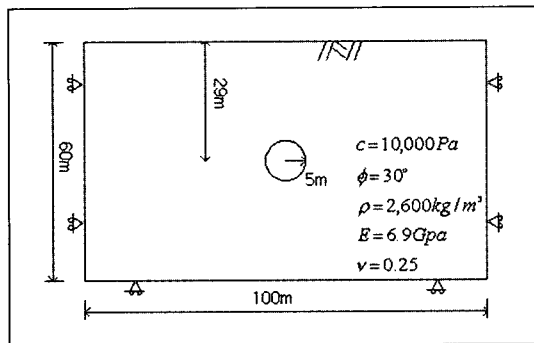


그림 32. 해석단면과 지반물성치

표 5. 췁크리트 물성치

탄성계수 (GPa)	두께 (cm)	허용압축응력 (kg/cm ²)	허용인장응력 (kg/cm ²)
5	20	84	6

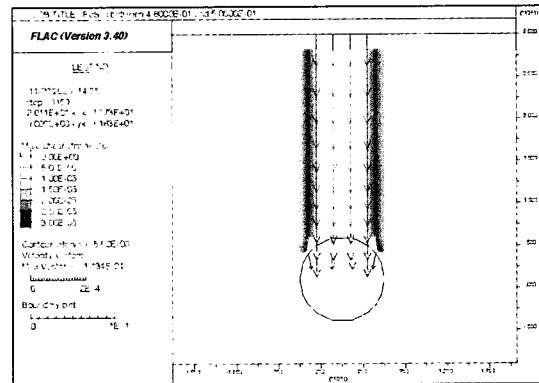


그림 33. 무보강시의 전단변형률 속도와 속도벡터 (요소크기 = 2m)

로 하였고, 계산속도를 향상시키기 위해 터널 중심으로부터 멀리 떨어질수록 요소망 간격이 넓어지도록 하였다.

한편, 터널이 20cm 두께의 췁크리트로 보강될 경우의 보강효과를 검증하였다. 이를 위해 원형 터널 주변을 모두 폐합하여 보강하는 전체보강과 인버트 부분만을 제외하고 보강하는 부분보강에 대해 해석을 수행하였다. 췁크리트는 수치해석시에 범요소로 취급되었으며, 사용된 입력 물성치는 표 5와 같다.

그림 33은 무보강시, 터널 주변부의 요소크기가 2.0m인 경우의 파괴 형상을 보여주며, 이 때 계산된 안전율은 0.49이다. 또한 부분보강시와 전체보강시의 안전율은 각각 0.61, 2.21로 평가되었다. 예상대로 보강정도가 증가할수록 보강효과가 커짐을 알 수 있었으며, 정량적으로 그 효과를 표현할 수 있었다.

수치해석에 의해 구한 터널의 안전율이 정확한지를 검증하기 위해 그림 33의 해석결과를 이용하여 한계평형방법에 의해 구한 안전율과 비교하였다. 이를 위해 그림 33의 파괴양상을 그림 34와 같이

이상화하였다. 이 때 파괴를 유발하는 힘(driving force)은 터널 상부 지반의 자중(W)이며, 다음과 같이 계산된다.

$$W = (1 \times 2r - \frac{1}{2} \pi r^2) \times \rho g = 6,395,121.7 \text{ N} \quad (8)$$

한편, 이 힘에 저항하는 힘은 파괴면에 작용하는 전단력(S)으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} S &= 2 \int \tau dl = 2(c + \int \sigma_n \tan \phi dl) \\ &\approx 2(c + \Sigma \sigma_n \tan \phi \Delta l) \quad (9) \\ &= 3,132,869.7 \text{ N} \end{aligned}$$

여기서, σ_n 은 터널 굴착 후 파괴면에 작용하는 수직응력으로써 수치해석 결과로부터 구한 각 요소에서의 σ_{xx} 이며, Δl 은 각 요소의 연직방향 길이이다. 또한 c 와 ϕ 는 각각 암반의 전단강도와 내부 마찰각으로 10,000 Pa과 30°이다.

따라서, 안전율은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\text{안전율} = \frac{\text{Resisting Force}}{\text{Driving Force}} = 0.49 \quad (10)$$

이 값은 수치해석에 의해 구한 0.49와 일치하는

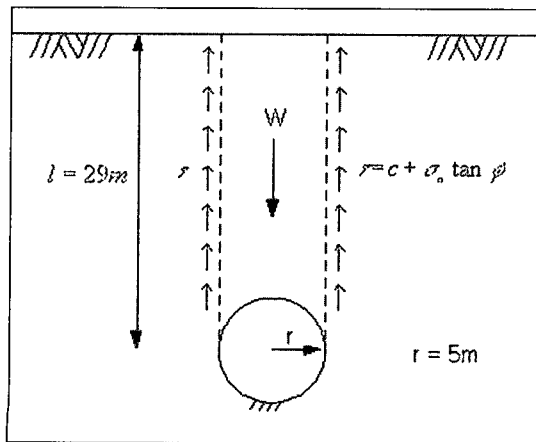


그림 34. 터널파괴에 대한 한계평형해석

값으로 파단면이 형성된 경우에는 한계평형해석이 가능하며 그 결과는 수치해석 결과와 동일함을 알 수 있다. 따라서, 수치해석에 의해 터널의 안전율을 구하는 기법이 유용하게 사용될 수 있다고 생각된다.

유광호(수원대)

3.3 시공분야 신기술·신공법

3.3.1 싱글 셸 터널

(1) 싱글 셸의 정의

종래의 터널구조는, 슛크리트 라이닝과 2차 콘크리트 라이닝 사이에 방수공을 겸한 간격재(2차 라이닝의 구속 및 균열 방지를 목적으로 한 완충재)가 시공되어, 양자간에 전단력이 전달되지 않는 이중구조(Double Shell 구조)가 일반적이다. 그러나, 간격재(방수막 및 부직포)를 시공하지 않고서 슛크리트 라이닝만으로도 2차 콘크리트 라이닝의 역할까지 수행할 수 있는 단일구조(Single Shell)의 터널을 생각할 수 있으며, 그 경우에는 지반과 라이닝 사이에 전단력이 전달되는 일체화된 합성구조로써 거동한다. 역학적으로는 전단력이 전달되는 일체구조가 합리적이며, 막장 후방에서 거푸집을 사용하여 별도 공정으로 시공되는 2차 복공이 간략화 또는 생략될 수 있다면, 공기와 공사비를 절감할 수 있는 시공의 합리화도 가능하다고 생각된다.

여기서 정의한 싱글 셸 터널은 주변지반과 일체로써 작용하고 주변지반의 지보기능을 유효하게 활용하며 터널 및 주변지반의 안정을 도모하는데 있어서는 종래의 NATM과 다를 것이 없다. 종래 NATM의 지보재료를 개선함으로써 2차 콘크리트 라이닝을 생략 또는 간략화하여, 종래의 NATM을 합리적으로 개선한 것이다.

(2) 싱글 셸의 도입 목적

종래의 NATM 터널구조는 1차의 슛크리트 라이닝과 2차의 콘크리트 라이닝의 복합구조이지만 1차라이닝과 2차라이닝 사이는 방수막 및 부직포등

의 간격재로 분리되며, 구조적으로는 2개의 원통형 Shell이고, 역학적으로는 Heavy Beam과 같은 거동을 하며 2중 구조의 Double Shell이라고 할 수 있다. 1차라이닝의 내구성을 확보하는 것으로 영구적인 구조물로의 평가가 가능하게 하고 또, 구조물로서 요구되는 안전율이 1차라이닝에서 확보되면, 종래의 2차라이닝은 생략할 가능성도 있다.

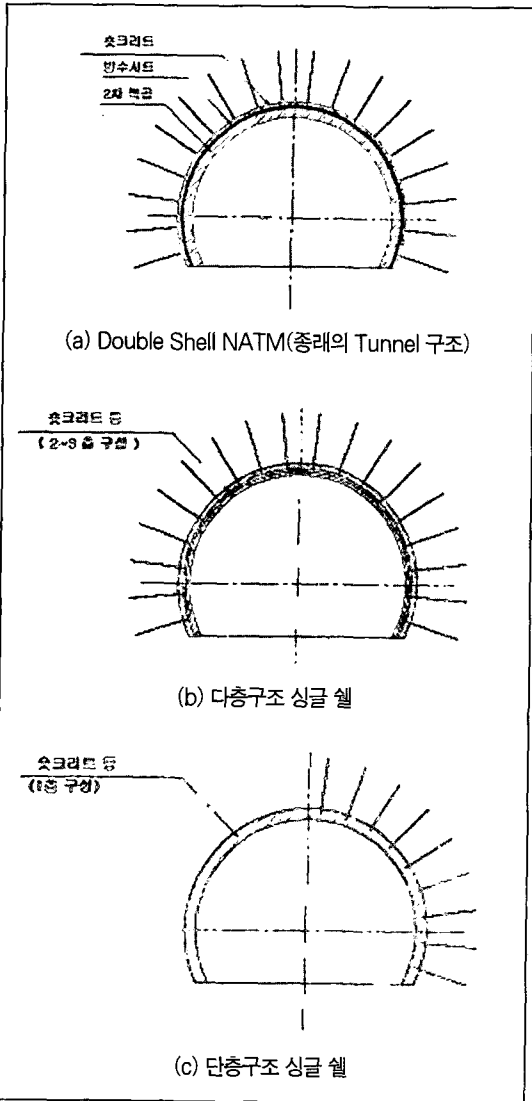


그림 35. Double Shell NATM과 싱글 셸 NATM

싱글 셸의 도입목적은 슛크리트와 록 볼트 등을 주요한 구성부재로 하는 종래의 지보구조를 개선하여 영구복공으로써, 지금까지의 2차라이닝을 간략화 또는 생략함으로써 터널구간 및 터널시공의 합리화를 도모한다고 하는 것이다.

스�크리트의 고강도화, 섬유에 의한 보강 등에 의해 고품질화를 도모하고, 휨 toughness나 동결 용해 저항성의 향상 또는 급결제의 첨가량을 최소한으로 억제하여 슛크리트의 장기 내구성을 확보하고 또한 슛크리트 각층의 층간부착력을 확보함으로써 각층을 일체 구조로 하는 것이다.

이렇게 함으로써 싱글 셸은 종래의 터널구조와 동등 이상의 기능성, 내구성을 확보하는 것이 가능하게 된다. 또 후방에서 거푸집을 사용하고, 굴착작업과는 다른 단계로 시공되는 2차 라이닝 콘크리트가 생략됨으로써, 공기와 공사비가 절감되고 시공성도 개선된다.

이와 같이 싱글 셸은 터널의 구조 및 시공성의 양면에서 공사비의 절감을 포함한 터널건설의 종합적인 합리화를 목표로 하는 것이다.

(3) 싱글 셸의 지보부재

1) 슛크리트

스�크리트는 고품질 강섬유보강 콘크리트로 한다. 슛크리트에 요구되는 품질로서는 고강도, 고인성, 고내구성, 저분진, 적은 리바운드 등이 있다. 이를 위해 철저한 품질관리하에 시공되는 고품질 강섬유보강 슛크리트의 채택을 기본으로 한다.

2) 록볼트

록볼트는 내부식성 bolt로 정착은 수지에 의한 전면정착방식으로 한다. 록볼트는 그 작용효과를 유효하게 발휘하기 위해서는 고품질화 즉 고내력, 지반의 변형에 높은 추종성, 고정착, 조기정착 등이 요구된다. 이를 위해 bolt는 내부식성 bolt, 정착은 수지에 의한 전면정착방식의 채택을 기본으로 한다.

3) 강지보공

강지보공은 보조공법적인 위치의 지보부재로 생

각하였다. 이를 위해 터널 건설의 합리화를 목표로 하는 싱글 셸의 주된 지보부재는 슛크리트 및 록볼트로 하고 강지보공은 지반의 상황에 따라서 지보의 휨강성이나 강도를 증가시키기 위한 보조공법적인 위치 정도로 생각하기로 한다.

(4) 용수대책

싱글 셸에서는, NATM에서 시공하는 방수시트를 생략하며, 기본적으로 용수상황에 대해 각 시공 단계에서 도수와 지수를 대책공으로 활용하는 방법을 고려하고 있다. 또 터널 공용후의 슛크리트 복공의 균열 발생을 최대한도로 억제하고, 복공면으로 누수가 없는 품질을 확보하는 것은, 2차복공을 시공하지 않는 Single Shell에서는 유지관리상 중요하다. 따라서, 용수처리에 관한 기본 방침의 요약 을 다음에 나타낸다.

1) 용수처리의 기본조건

Shotcrete 복공에 의한 Single Shell에서는, 용수 처리의 문제가 가장 중요한 점이며, 그 기본 조건은 아래와 같다.

- Shotcrete 복공에는 수압을 걸지 않는다.
- 아치부 Shotcrete 복공의 마무리면으로부터의 누수는 없도록 한다.
- 터널 공용시에 용수처리공이 마무리면에 노출 하지 않도록 한다.
- 내장은 벽면과 이격시킴으로써, 배수 경로를 내장판 배면에 확보한다.

2) 용수조건

지반으로부터의 용수량, 용수범위 등에 의해 용수처리 대책공의 분류를 제안하고 있으며, 그것을 기초로 대책공을 실시한다. 조건은 I, II의 2단계로 하고, 다음과 같이 정하고 있다.

- Rock I : 터널 연장 1km당 용수량이 50/min 이하 : 지보층에서의 수발공
- Rock II : 터널연장 1km당 용수량이 50/min 이상 : 지수층의 형상과 집수·배수

공의 실시, Rock Bolt 두부의 지수 처리

윤지선(인하대)

3.3.2 고성능 슛크리트

(1) 개요

최근 사용이 증가하고 있는 3차선 이상의 대단면 터널 시공에서는 지금보다 더 큰 편평한 단면에서 굴착되기 때문에 터널의 안정성이 떨어질 확률이 높아지는데, 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 조기에 지반을 안정화시킬 수 있는 초기강도 확보와 부착력 향상에 유리한 슛크리트의 개발이 요구된다. 또한, 대단면 터널공사의 경우 슛크리트 두께가 두꺼워지면 그 수량이 증가하여 터널 건설비용의 증가로 이어지기 때문에 슛크리트 강도를 증가시켜 타설 두께를 줄임으로써 공사비 절감을 유도할 필요가 있다. 특히, 단층 파쇄대, 연약대, 용수대 등 지반의 변형이 예상되는 부분에 대해서도 슛크리트의 부착력과 전단력으로 처짐을 억제시키고, 치밀한 내부조직과 향상된 부착성능을 통해 리바운드의 저감을 기대할 수 있는 고성능의 고강도 슛크리트의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

국내에서 적용되고 있는 NATM공법은 원지반의 지지능력을 최대로 활용하면서 지보재(스�크리트, 록볼트)로 터널의 안정성을 유지시키는 원리를 따르고 있는데, 터널내의 콘크리트 라이닝의 경우 지반의 특성에 관계없이 전 구간에 걸쳐 현장타설 콘크리트 라이닝으로 시공이 의무화되고 있다. 그러나, 현장타설 콘크리트 라이닝은 품질관리의 불확실성, 시공성 및 재료특성에 따른 균열 등 많은 문제점이 지적되고 있으며, 배수식 터널형식을 채용할 경우에는 콘크리트 라이닝을 구조체로 보지 않고, 누수방지나 조명시설물 설치 및 미관상 마감 기능을 주목적으로 하기 때문에 라이닝의 생략 또는 부분적 도입으로 경제적, 안전적 측면에서 라이닝에 대한 새로운 평가와 함께 기능성 라이닝의 적용이 국내에서도 필요할 것으로 판단된다. 국내의 지

반특성과 유사한 북유럽의 경우 최근 완공된 세계 최장의 도로터널인 Laerdal 터널(24.5km, Norway, 슛크리트 설계기준강도 400kgf/cm²) 등 Permanent Shotcrete Lining의 개념을 적용한 Single-Shell Lining 터널이나 PCL(Prefabricated Concrete Lining) 터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있으나, 이러한 새로운 개념의 터널 지보시스템 적용을 위해서는 고강도, 고내구성, 고인성, 낮은 리바운드와 저분진 등의 고성능의 슛크리트 개발이 우선적으로 선결되어야 한다. 따라서, 콘크리트 라이닝에 대한 인식 변화와 함께 1차 지보재인 슛크리트의 고품질 및 고성능화는 향후 터널 설계와 시공에 중요한 위치를 차지할 것으로 판단되며, 이러한 시대적 요구에 따라 터널의 건설 및 유지관리비용 절감 등 생애주기비용에 효과적인 고성능의 고강도 슛크리트의 개발이 절실히 요구되고 있다.

(2) 급결제(Accelerator)의 성능

스�크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 이 급결제는 슛크리트의 초기강도 뿐만 아니라 장기강도 발현과 내구성, 슛크리트 두께 등에 영향을 미치고 있어 배합에 사용되는 타 혼화제와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료적 요소이다. 그러나, 지금까지의 연구결과에 의하면 기존의 범용 급결제를 사용한 슛크리트의 장기강도는 급결제를 넣지 않은 base concrete와 비교했을 때 20~40%정도의 압축강도 저하와 급결제 첨가량이 증가할수록 강도 저하도 커진다는 것을 확인할 수 있었고, 조기 급결에 따른 장기강도의 저하와 다량의 리바운드로 설계에서 요구되는 기준강도를 만족하지 못하는 경우가 시공 현장에서 자주 발생되고 있는 실정이다.

따라서, 요구되는 초기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않으면서 작업자에 대한 피해나 주변 환경에 나쁜 영향을 미치지 않는 환경 친

화적인 급결제의 사용이 요구되고 있으며, 최근에는 약한 염기성(pH1~3)의 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시험시공이 선진외국에서 활발히 이루어지고 있다. 이 가운데 1990년대 중반 유럽에서 개발된 Alkali-free 액상급결제는 현재 몇 가지 종류의 제품이 생산되고 있으며, 그 성능에 있어서도 기존의 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 인정받고 있다. 따라서, 슛크리트 품질확보에 중요한 위치를 차지하고 있는 급결제를 변수로 모형시험을 실시하여 실리카흄 등의 고강도 발현을 위한 고가의 혼화제를 사용하지 않고서도 품질향상과 함께 시공성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 고강도 슛크리트 개발 가능성을 확인하는데 주목적을 두었으며, 실험 결과를 통해 향후 Single-Shell Tunnel Lining, PCL 등 Permanent Shotcrete Lining 적용을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

(3) 급결제 배합설계

모형시험 결과를 통해 알 수 있듯이 Alkali-free 액상급결제를 사용한 시편은 현재 국내 터널공사에 가장 많이 사용되고 있는 Waterglass 액상급결제를 사용한 시편보다 압축강도(28일 기준 : 63%향상), 휨강도(9% 향상), 등가휨강도(30% 향상) 등 전 시험에 걸쳐 우수한 강도를 발현하였다. 특히, 초기재령에서의 압축강도 변화를 살펴볼 때 급결제 종류에 관계없이 모든 시편에서 1일 압축강도 100kgf/cm²을 확보하였으나, Alkali-free 급결제 슛크리트의 경우에는 재령 1일과 3일 사이에 Waterglass 슛크리트의 2배가 넘는 42%의 강도 증진을 보여 초기강도 및 조기강성 확보로 지반의 이완을 예방하고, 연약 지대나 용수부분의 지보에 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 또한, 재령 28일 압축강도가 시방 규정의 2.3배인 418kgf/cm²을 보여 실 터널 시공시 시공환경이나 암반으로부터의 용수, 지반과의 부착 등의 원인에 의해 발생할 것으

표 6. 숯크리트 배합설계

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kgf/m ³)					accelerator (C×%)	superplasticizer (C×%)
					W	C	S	G	Steel Fiber		
13	13	41	65	4.0	198	480	1035	593	40	7.0 (A) 10.0 (W)	1.0

표 7. 강도시험결과

재령	Alkali-free(kgf/cm ²)			Waterglass(kgf/cm ²)		
	압축강도	휨강도	등가휨강도 (휨인성계수)	압축강도	휨강도	등가휨강도 (휨인성계수)
1일	149	37	-	125	30	-
3일	256	52	-	156	43	-
7일	306	-	-	212	-	-
28일	418	73	43 (85%)	257	67	33 (76%)

로 예상되는 강도 loss를 고려하더라도 외국에서 규정(1.5)하는 고강도 숯크리트의 품질기준(예 : 일본 360kgf/cm²)에 만족할 수 있을 것으로 사료된다.
박해균(삼성물산 건설부문)

참고문헌

(2. 터널조사분야의 개발동향)

(2.2 다분적 지시크리깅에 의한 미시추구간의 암반 분류)

1. 유광호 (1995), "다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구 - I. 이론", 한국지반공학회, 제 11 권, 제 2 호, pp.71-77
2. 유광호 (1998), "다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구 II. 응용", 한국지반공학회, 제 14 권, 제 1 호, pp.29-35
3. Journel, A. G. (1982), "The indicator Approach to estimation of spatial distributions", 17th. AP-COM Symposium, pp.793-806

(3. Conventional 터널)

(3.2 설계분야 개발 동향)

4. 건설교통부 (1999) 콘크리트 구조 설계기준, 한국콘크리트학회, 276p

5. 김영민 (1999) "유한요소법에 의한 사면붕괴 거동해석에 미치는 영향분석", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제5호, pp.19-28
6. 서영교 (2000) "유한요소법과 연속체역학을 이용한 사면안정해석", 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp.134-142
7. 유광호, 박연준, 강용 (2001) "절리암반 터널의 안전을 평가를 위한 수치 해석적연구", 한국암반공학회, 제 11 권, 제 3 호, pp.279-288
8. Bishop, A. W. (1955) "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp.7-17
9. Duncan, J. M. (1996) "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. Vol. 122, No. 3, pp.577-596
10. Dawson, E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999) "Slope stability analysis by strength reduction", Geotechnique, Vol. 49, No. 6. pp.835-840
11. Giam, S. K. & Donald, I. B. (1988) "Determination of critical slip surfaces for slopes via stress-strain calculations", Proc. Fifth Australia-New

- Zealand Conference on Geomech., Sydney, Australia, pp.461-464
12. Itasca Consulting Group, Inc. (1999) FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.4., Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA
 13. Kobayashi, M. (1990) A study on application of finite element method to stability and settlement analysis in geotechnical engineering. Technical Note of PHRIMT, Japan, No. 1 (in Japanese)
 14. Matsui, T. & San, K. C. (1992) "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", Soils and Found. Vol. 32, No. 1, pp.59-70
 15. Naylor, D. J. (1982) "Finite elements and slope stability", Numer. Meth. in Geomech., Proc. NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, pp.229-244
 16. Ugai, K. (1989) "A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM", Soils and Foundations Vol. 29, No. 2, pp.190-195 (in Japanese)
 17. Ugai, K. & Leshchinsky, D. (1995) "Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results", Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp.1-7
 18. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. & Lewis, R. W. (1975) "Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics", Geotechnique Vol. 25 No. 4, pp.671-689
(3.3 시공분야 신기술·신공법 개발 동향)
(3.3.1 싱글 셀 터널)
 19. 土木学会, トンネル標準示方書 山岳工法編 同解説, pp91, 1996.7
 20. 日本道路公団, 設計要領第三集 トンネル, pp111~114, 1997. 10
 21. 土木学会, 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針, pp72, 1983.3
 22. Geo-Front 研究会, シングルシェル適用に関する検討報告書, pp84, 1997.11
 23. 日本鉄道建設公団, 併進工法設計施工指針(案) 都市トンネル編, pp70, pp68~69, 1992. 4
 24. 三谷他, 繊維補講 吹付コンクリートの仕様と設計手法に関する検討, 日本道路公団試験所 研究報告書 Vol.35, pp56-63, 1998. 11
 25. 土木学会, コンクリート標準示方書 設計編, pp23~24, 1996.3
 26. 日本トンネル技術協会, トンネル覆工に関する調査研究報告書(日本道路公団委託), pp16, 1999
 27. 設計要領 第三集 トンネル本体工の一部改定について, 日本道路公団, 1999年 5月 通知
 28. 第二東名名神高速道路トンネル暫定設計指針(案), 日本道路公団, 1999. 7
 29. 維補 吹付けコンクリート仕様と設計方法に亮関する検討, 日本道路公団試験研究報告, 1998. 5
 30. 龜裂性巖盤における吹付けコンクリートの設計: 決定論的Approachに向けて, S. V. L. Barrett and D. R. McCreath : Tunnelling & Underground Space Technology Vol. 10. No. 1. 1995. 1.
 31. トンネルの吹付けコンクリート, 日本トンネル協会, 1996. 2
 32. 第二東名名神高速道路名神高速道路トンネル暫定設計指針(案), 日本道路公団, p51, 1999. 7
 33. 池田謙太郎, 關島謙藏, 西本 敬: 新しいFRPロックボルトの開発とその特性, 土木学会 第43回年次 学術講演会 概要集(昭和63年10月), VI-65 pp158-159
 34. 山本信辛, 平井正雄, 中田雅夫, 山地芥志: 組紐状FRPロックボルトの特性について, 土木学会 第44回年次学術講演会概要集(平成元年 10月), VI-49 pp146-147
 35. 吉塚 守, 三谷活二, 城間博通: 高耐力ロックボルトの引抜特性に関する研究, トンネル工学研究論文報告集 第八巻 1988年 11月, 187-192pp
 36. 吹付けコンクリート 適用に関する 検討報告書, ジェ

- オフロンテ研究会, 1997. 11. 28
37. 吹付けコンクリート 分科会セミナー報告書, ジェオフロンテ研究会, 1997. 11. 28
38. シングル シェル 覆工(モノコック構造), ジェオフロンテ研究会, 1999. 4. 1
39. トンネル標準示方書 (山岳工法編)同解説, 土木学会, 平成 8年 7月
40. 第二東名名神高速道路 トンネル設計指針(案) : 日本道路公園, 1999年
- (3.3.2 고성능 슛크리트의 개발)
41. EFNARC (1996), European Specification for Sprayed Concrete
42. ITA(국제터널협회) Working group 12. Shotcrete Use "Lists of Permanent shotcrete lining"
43. 건설교통부(1999), 콘크리트표준시방서
44. 건설교통부(1999), 터널표준시방서
45. (社)日本トンネル技術協會(1996), トンネルの吹付けコンクリート
46. ACI (1995), Specification for Shotcrete Reported by ACI Committee 506
47. 박해균, 이명섭, 김재권, 정명근(2002), "고품질 슛크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용", 한국터널공학회 논문집, Vol 4, NO 1, pp.45~55
48. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제(2002), "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발" 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol 14,NO 1,건설업체 기술발표회 pp.1023~1030
49. Private Communication with Professor Koichi ONO(Univ. of Kyoto, 국제터널협회(ITA) Working Group 12. Shotcrete Use, Vice animateur)

제 2회 ATC-7 대심도 델타퇴적토에 관한 심포지움 안내

ISSMGE ATC-7(아시아지역 기술위원회)에서는 해안지역을 중심으로 분포하는 대심도 연약퇴적층과 준설매립지반의 조사, 압밀특성 및 개량공법에 관한 내용으로 국내의 전문가를 초청하여 심포지움을 개최하고자 하오니 많은 참석 바랍니다.

1. 일 시 : 2002년 9월 13일(금요일) 09:00-18:00
2. 장 소 : 동서대학교 문화센터 콘서트홀(부산광역시 사상구 주례2동)
3. 회 비 : 일반 40,000원, 학생 20,000원(점심제공)
4. 연락처 : 정성교 교수(동아대), 이광열 교수(동서대)
전화: (051)320-1817, 1819, e-mail: civklee@dongseo.ac.kr
Home: <http://www.geo21.org>

(다음 페이지에 계속)