

수압 터널의 해석 및 적용 사례

장 승 진*1
이 성 숙*2
김 주 범*3

요 지

본 기술 자료에서는 수압 터널에서 침투 수압을 고려한 터널 주위 암반의 응력 상태에 대한 수치 해석 방법, 해석 결과의 이용에 대하여 실제 수압 터널의 예를 들어 소개한다. 수압 터널의 안전성은 터널 주위 암반의 안전성에 의해 좌우되며 암반의 안전성은 Mohr-Coulomb의 파괴론을 사용하여 암반의 응력에 대한 안전율을 산정하여 판단한다. 산정된 암반의 안전율과 실제 수압 터널의 거동을 비교하여 수치 해석의 적정성을 판단하며 수압 터널의 보강 방법을 제안한다.

1. 개요

콘크리트 라이닝 터널에서의 라이닝의 변형은 콘크리트 타설후 양생 과정시 온도 변화와 건조 수축에 의해 발생한다. 터널의 콘크리트 라이닝과 주위 암반이 밀착되어 있는 경우 콘크리트의 온도 변화 및 건조 수축에 의한 변형이 주위 암반의 변형과 상이하여 균열이 발생하고 라이닝이 암반과 분리되어 있는 경우 온도 변화 및 건조 수축에 의하여 발생하는 인장 응력이 콘크리트의 인장 응력을 초과하여 균열을 초래한다.(G. Seeber, 1985) 따라서 수압 터널에서 라이닝의 균열 발생은 필연적이며 라이닝 균열을 통하여 주위 암반내 침투수가 형성

된다. 암반내 침투수를 고려하여 암반의 응력을 산정하는 경우 침투수는 암반에 작용하는 일종의 힘으로 간주되며 이 힘은 침투수 자체의 힘(body force) 또는 침투 수압으로 표시된다. 암반내 한 점에서의 방사(radial) 방향과 원주(circumferential) 방향의 침투 수압의 크기는 다음 식에 의해 산정한다.(G. Fernandez and T.A.Alvarez Jr., 1994)

$$B_r = \frac{\partial P_w}{\partial r} = \Delta P_w \frac{4h_0}{r^2} \frac{(\cos\theta - \frac{2h_0}{r})}{\xi_{r\theta} \ln \xi_{\theta r}} \quad (1a)$$

$$B_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial P_w}{\partial \theta} = \Delta P_w \frac{4h_0 \sin\theta}{r \ln \xi_{\theta r}}$$

*1 정희원, (주)제이엘건설연구소 소장

*2 (주)제이엘건설연구소 선임연구원

*3 정희원, (사)한국건설안전기술협회 고문

$$\left(\frac{1}{r \xi_{a0}} - \frac{\ln \xi_{r0}}{a \xi_{a0} \ln \xi_{a0}} \right) \quad (1b)$$

$$\xi_{r0} = 1 + \frac{4h_0}{r} \left(\frac{h_0}{r} - \cos\theta \right) \quad (2a)$$

$$\xi_{a0} = 1 + \frac{4h_0}{a} \left(\frac{h_0}{a} - \cos\theta \right) \quad (2b)$$

여기서,

- a : 터널 내부 반지름
- B_r : 방사(radial) 방향의 침투 수압 [FL³]
- B_θ : 원주 방향의 침투 수압 [FL³]
- h₀ : 외부 정수두
- P_i : 터널 내부 수압
- P₀ : 외부 정수압
- P_w : 과잉 간극 수압
- r : 터널 중심에서 임의의 점까지의 반경
- ΔP_w : P_i - P₀, 임의의 점에서의 과잉 간극 수압
- θ : 터널 천정에서 임의의 점까지 시계 방향 각도

수압 터널에서 침투 수압과 주위 암반의 관계는 그림 1에서 보는 바와 같이 역학과 수리학이 결합된 복잡한 문제이다.(A.J.Schleiss, 1986) 즉, 암반내 침투수가 형성되면 침투 수압에 의해 암반의 변형을 야기시키며 암반의 변형은 암반 투수 계수의 증가를 초래하고 이는 침투수 및 침투 수압의 증가 및 이로 인한 암반의 변형 증가로 연결되는 악순환이 반복되는 과정을 거친다. 만일 터널 주위 암반의 강도가 위에서 언급한 악순환의 진행을 저지할 수 있을 만큼 충분히 강하지 않은 경우 악순환은 최종적으로 터널 라이닝 또는 터널 자체의 파괴를 초래할 수 있으며 암반의 강도가 강하여 악순환의 진행을 중단 또는 상당히 장기적으로 지연시킬 수 있으면 터널 라이닝의 균열 발생과 상관없이 터널은 안전하다고 할 수 있다. 암반의 강도는 점착력 및 내부마찰각의 전단강도로 표시할 수 있으며 이밖에 암반 상부 상재하중도 암반의 강도에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 수압 터널의 안전성을 수치 해석을

통해 결정하고 수치 해석 결과와 터널의 실제 거동을 비교하여 수치 해석의 적정성을 판단한다. 아울러 산정된 안전율을 토대로 수압 터널의 보강 방법을 제시하고자 한다.

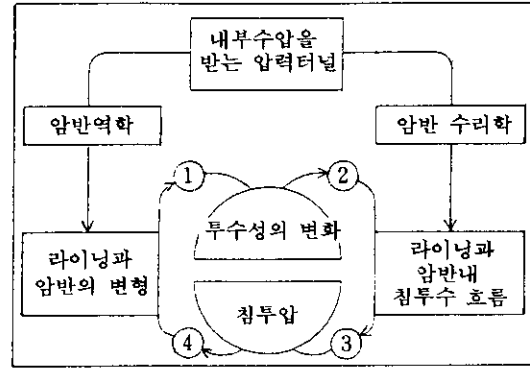


그림 1. 침투 수압과 주위 암반의 관계

II. 연구 대상 터널의 현황

연구 대상 터널은 1994년 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법을 사용하여 시공한 수압 터널이며 터널의 직경 2.8m, 콘크리트 라이닝의 두께 25cm로 시공되어 있다. 본 터널의 출구부 및 입구부에는 강관이 삽입되어 있으며 강관의 직경은 2.8m, 입구부의 강관 길이는 30.0m, 출구부의 강관의 길이는 24.0m로 시공되어 있으며 터널 내부에 작용하는 설계 최대 수압은 12.0kg/cm²이다. 터널 통수후 출구부에서 과다 누수가 발생하여 단수후 터널 내부를 조사하였다. 터널 내부에는 최대 폭 3.5mm의 균열이 발견되었으며 이는 콘크리트 라이닝의 온도 변화 및 건조 수축에 의한 균열보다는 터널 주위 암반의 변형에 의한 균열이며 위에서 언급한 침투 수압과 암반 변형의 악순환이 진행 중인 것으로 판단되었다.

III. 연구 대상 터널의 지반 조건

연구 대상 터널 출구부에서의 지질 조사 결

과 그림 2에서 보는 바와 같이 터널 주위 암반은 주로 혈암(shale)과 사암(sandstone)으로 구성되어 있으며 수치 해석을 위한 암반의 물성치는 표1과 같다. 수치 해석시 적용 단면은 터

널 출구부에서 25.0m(단면 A-A) 및 60.0m(단면 B-B)로 하며 해당 단면의 지하 수위는 터널 천정부에서 각각 3.6m, 7.3m 위에 위치한다.

표 1. 암반의 물성치(지질조사결과를 적용)

| 구 분 | 단위중량 $\gamma(t/m^3)$ | 접착력 $C(t/m^2)$ | 내부마찰각 $\phi(^{\circ})$ | 탄성계수 $E(t/m^2)$ |
|-------------------------|----------------------|------------------|------------------------|-----------------|
| 단면 A-A (터널출구부-25.0m) | 2.3 | 16.5 (165kpa) | 21 | 5×10^5 |
| 단면 B-B (터널출구부-60.0m) | 2.3 | 30.0 (300kpa) | 30 | 6×10^6 |

IV. 수압 터널의 수치 해석

1. 침투 수압의 산정 및 적용

암반내 침투수는 암반내 균열 또는 불연속면을 따라 형성되고 이면에 수직으로 침투 수압이 작용하므로 2차원 단면상에 임의로 작성된 유한 차분망에서 가장 실제와 가깝게 침투수압을 고려하는 방법은 그림 3.1 및 그림 3.2의 유한 차분망의 각 절점에 침투 수압의 방향 및 크기를 적용하는 것이다. 단면 A-A와 단면 B-B에 작용하는 침투 수압은 내부 수압과 외부 수압을 고려하여 각 절점의 방사(radial) 방향과 원주(circumferential) 방향에 대하여 식 (1a), (1b)를 사용하여 산정하며 산정된 단면별 침투 수압은 그림 4.1 및 그림 4.2와 같다. 단면 A-A 및 단면 B-B의 최대 침투 수압은 터널 천정부에서 발생하며 각각 $1.318 \times 10^4 N$ (13.44t)과 $9.03 \times 10^4 N$ (9.20t)로 산정된다.

2. 침투 수압 적용시 암반의 변형

수치 해석은 유한 차분법을 이용한 컴퓨터 프로그램 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 사용한다. 해석 결과 소성 변형의 발생 여부는 그림 5.1 및 그림 5.2에서 보는 바와 같이 단면 A-A의 경우 터널 천정부 상단부와 터널 스프링라인부의 양측에서 항복

영역이 발생하며 터널 하부에서는 과거에 항복 영역이었으나 현재는 탄성 영역으로 회복된 것으로 나타난다. 단면 A-A에서 터널 상단부의 소성 변형 또는 회복 불가능한 변형이 터널 라이닝의 균열과 과다 누수의 원인이 된 것으로 판단되며 사진 1은 단면 A-A에서 콘크리트 라이닝의 균열을 보여준다. 단면 B-B의 경우는 터널 주위의 대부분은 과거에 항복 영역이었으나 현재는 탄성 영역으로 회복된 상태이고 일부 인장 영역이 존재하고 있으나 비교적 안정된 상태에 있는 것으로 추정된다.

3. 암반 안전율의 산정 및 터널의 거동

암반의 침투 수압에 의한 안전성은 Mohr-Coulomb 파괴론을 적용하여 평가하며 각각의 단면에 대한 Mohr-Coulomb 파괴론에 따른 안전율을 산정하면 그림 6.1 및 그림 6.2와 같다. 암반의 안전율은 응력의 차이가 큰 요소에 대하여 최대 주응력(σ_1) 및 최소 주응력(σ_3)으로 이루는 Mohr의 응력원과 암반의 접착력과 내부마찰각으로 이루는 파괴 포락선을 그려 Mohr 응력원의 중심에서 파괴 포락선과 수직으로 이루어지는 거리와 Mohr 응력원의 반지름의 비로 산정한다. 단면 A-A 및 단면 B-B의 안전율은 그림 6.1과 6.2에서 보는 바와 같이 각각 0.98, 1.88로 나타난다. 터널 단수후 콘크리트 라이닝을 조사한 결과 단면 A-A에서는

콘크리트 라이닝의 파괴가 발생되어 있었고 단면 B-B에서는 약간의 균열이 발생한 상태였다. 수치 해석 결과와 현장 상태가 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다. 수압 터널에서 라이닝의 균열 발생은 필연적이라고 할 수 있으며 암반 변형에 의해 발생한 균열 외에는 터널에 큰 영향을 주지 않는다. 암반 변형에 의해 발생하는 콘크리트 라이닝의 균열은 그림 7에서 보는 바와 같이 균열 폭이 크거나 균열 양면의 층이 존재하는 균열로 일반적인 온도 변화 또는 건조 수축에 의한 균열과는 구분된다.

V. 보강 방법의 추천

본 연구 대상 터널에서는 수치 해석에 의해 산정된 안전율을 토대로 암반 압밀 그라우팅과 강관 삽입을 하는 보강방법을 추천한다. 보강 적용구간은 수치 해석에 의해 단면별로 산정된 안전율을 이용하여 그림 8과 같이 그래프로 작성하여 결정한다. 안전율 1.3 이하 구간은 강관 삽입 및 암반 압밀 그라우팅의 시공을 추천하고 안전율 1.3에서 2.0 구간에는 암반 압밀 그라우팅의 시공을 추천한다. 안전율 2.0 이상인 구간은 보강이 필요하지 않은 것으로 판단한다. 안전율에 따른 보강 방법은 현장 상태를 고려한 결정이며 향후 이 부분에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 수압 터널의 과다 누수 또는 콘크리트 라이닝 파괴는 그 원인

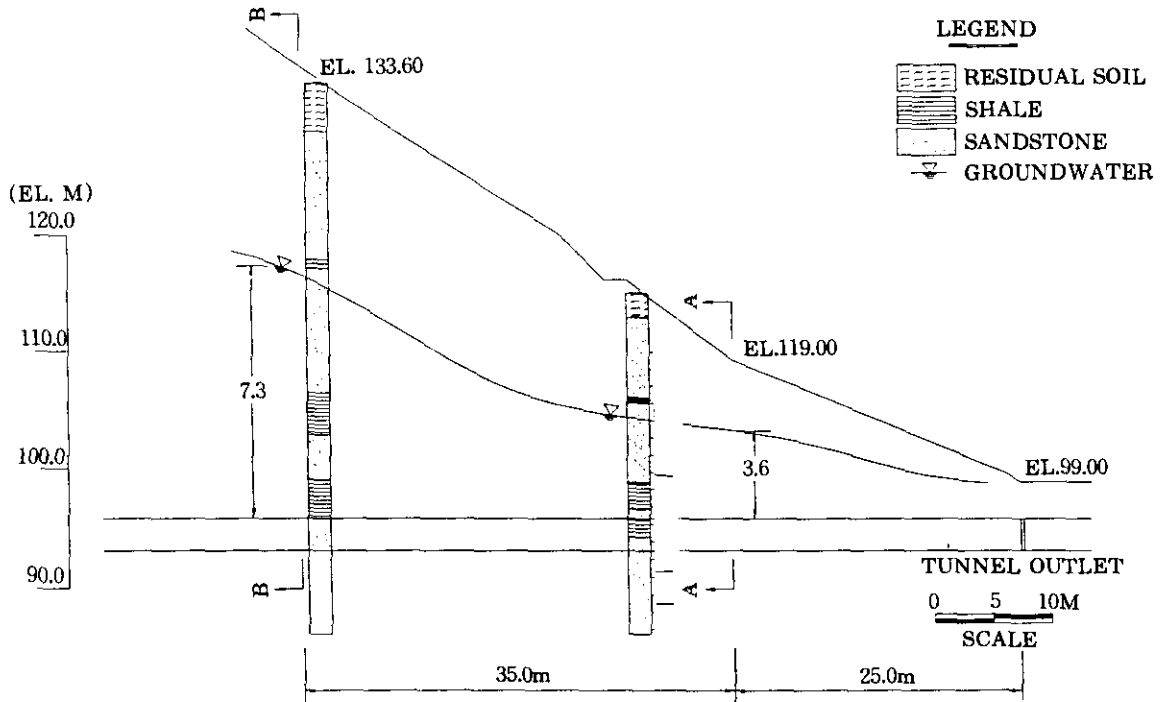


그림 2. 연구 대상 종단면

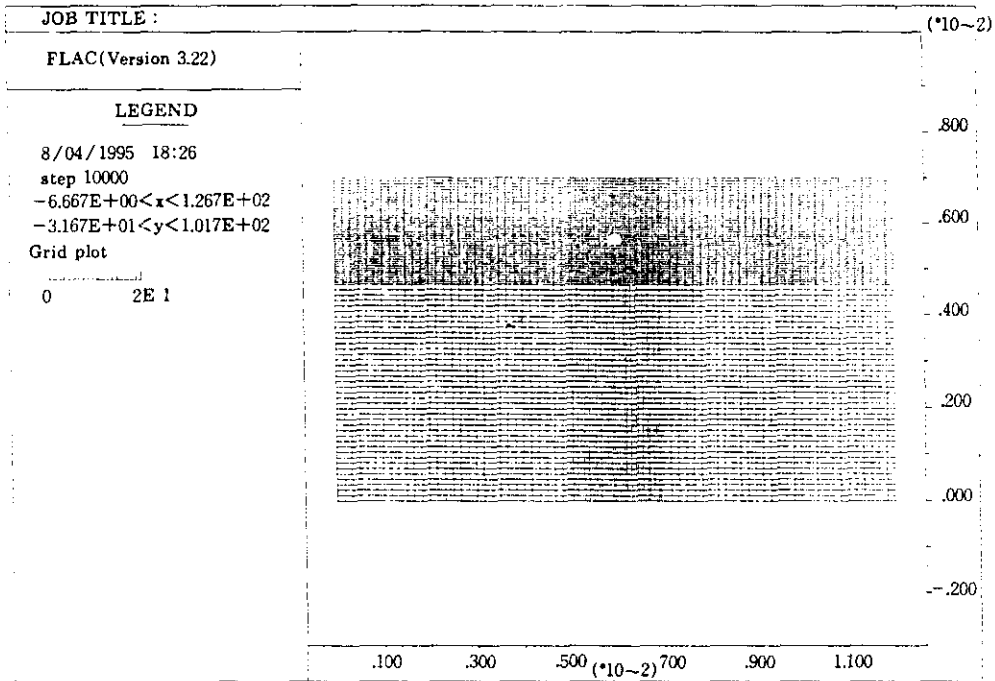


그림 3.1 유한 차분망(단면 A-A)

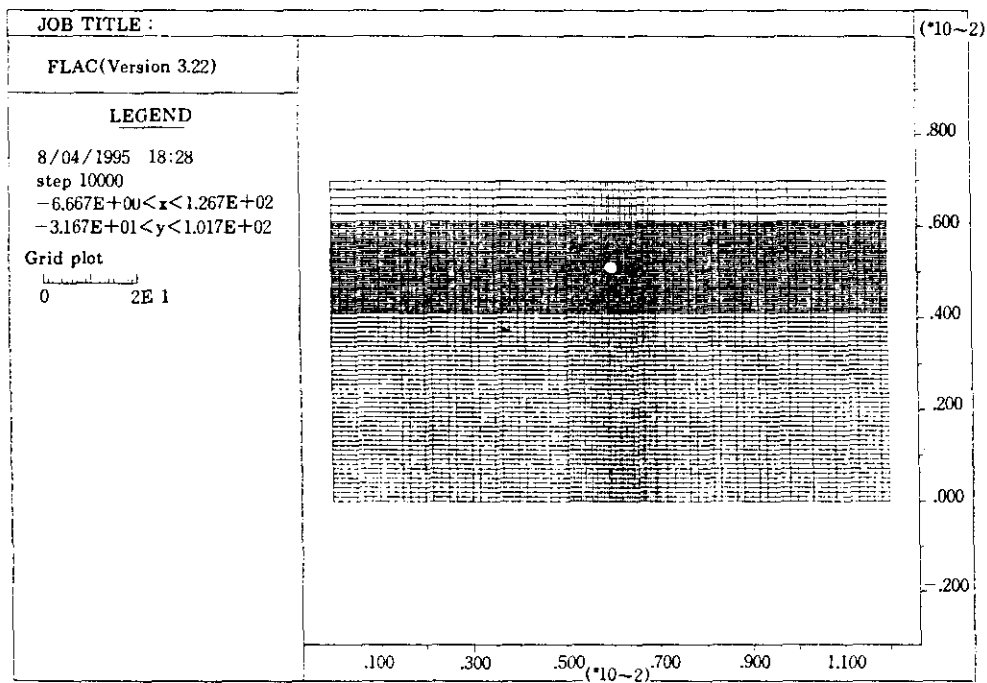


그림 3.2 유한 차분망(단면 B-B)

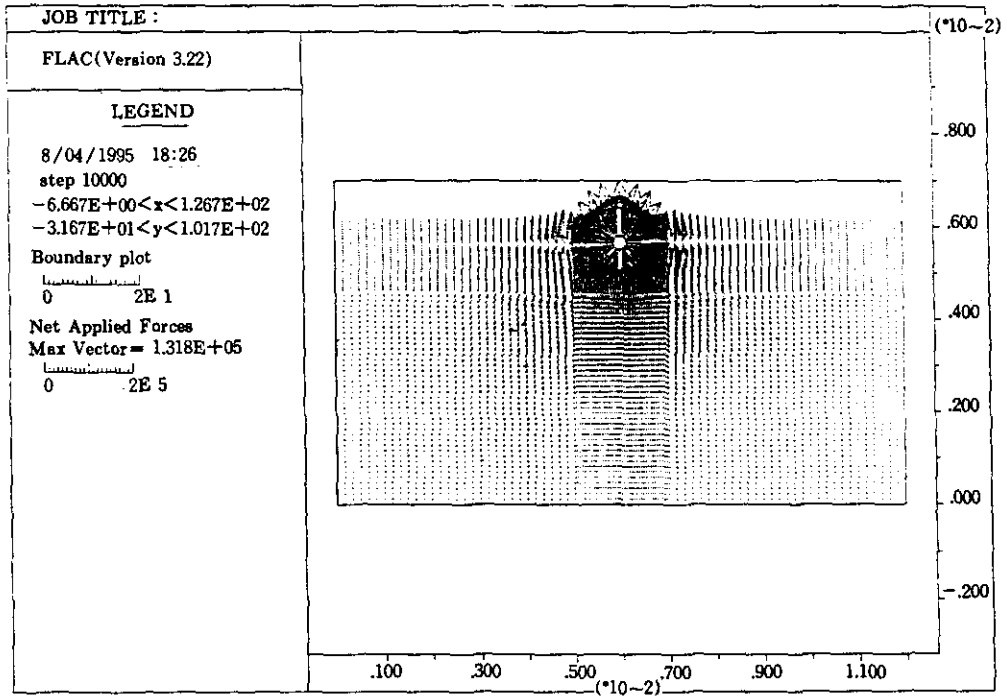


그림 4.1 침투 수압의 적용(단면 A-A)

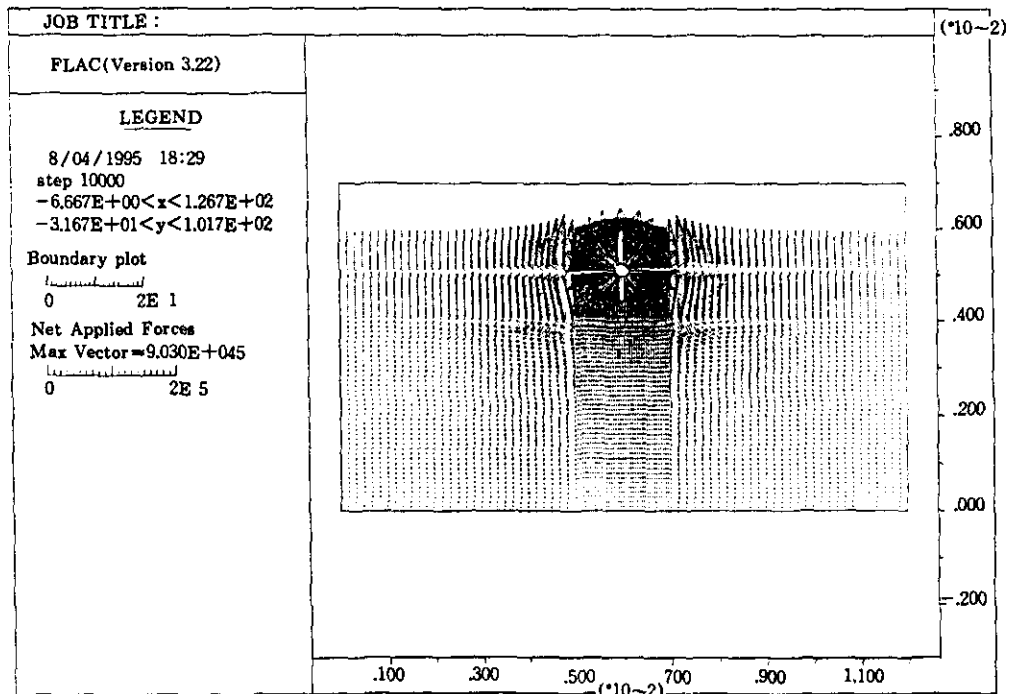


그림 4.2 침투 수압의 적용(단면 B-B)

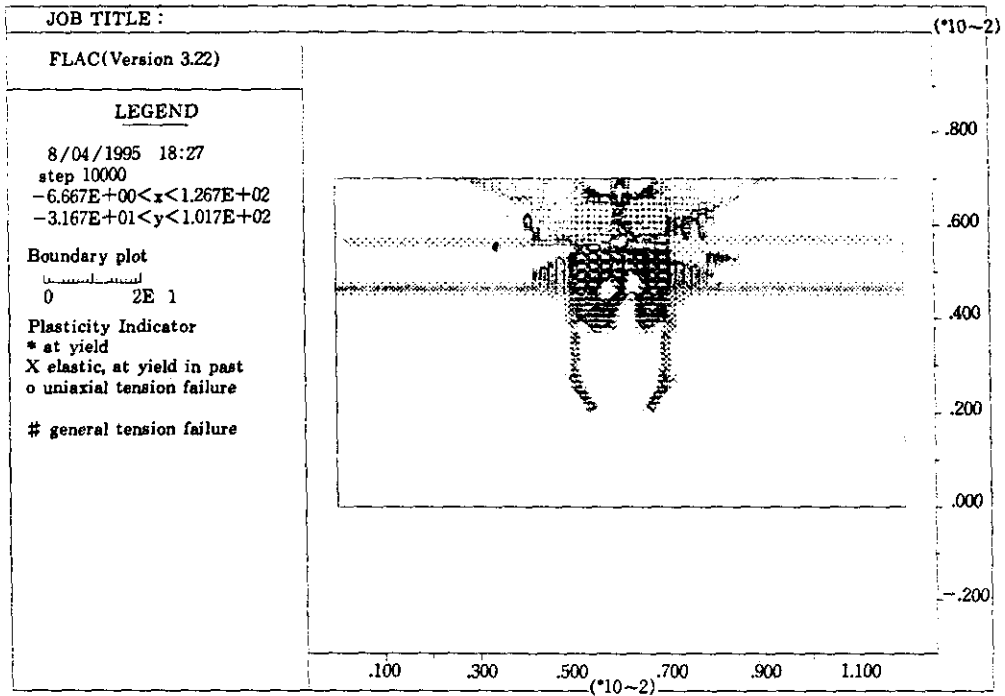


그림 5.1 침투수압 적용시 압반 변형 상태(단면A-A)

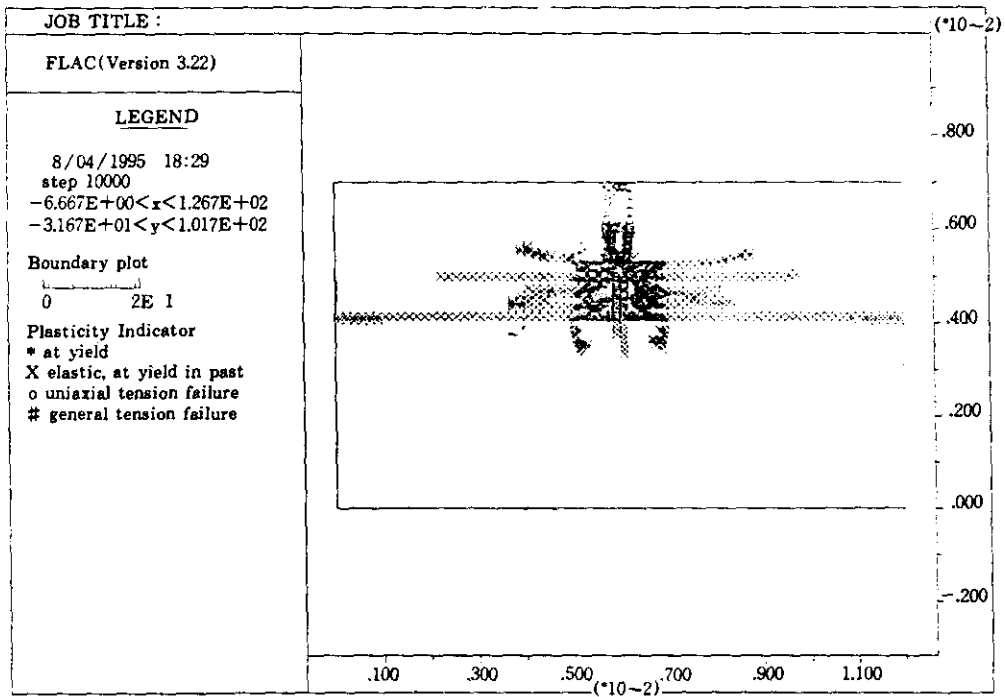


그림 5.2 침투수압 적용시 압반 변형 상태(단면B-B)



사진 1. 연구 대상 터널의 콘크리트 라이닝 균열 상태

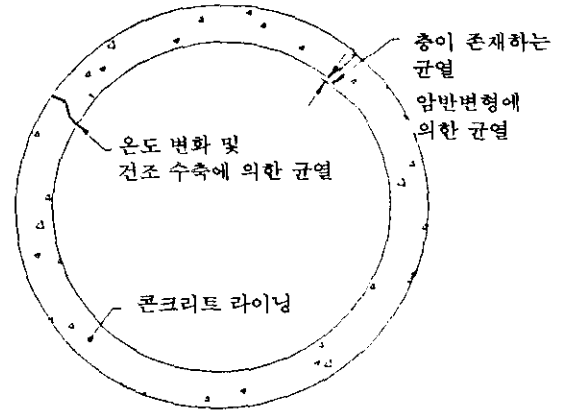


그림 7. 콘크리트 라이닝의 균열 형태

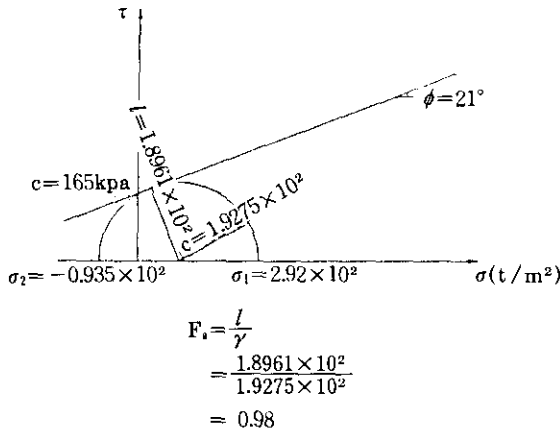


그림 6.1 안전율의 산정(단면 A-A)

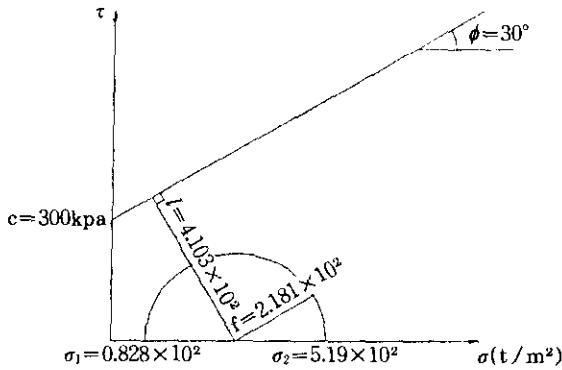


그림 6.2 안전율의 산정(단면 B-B)

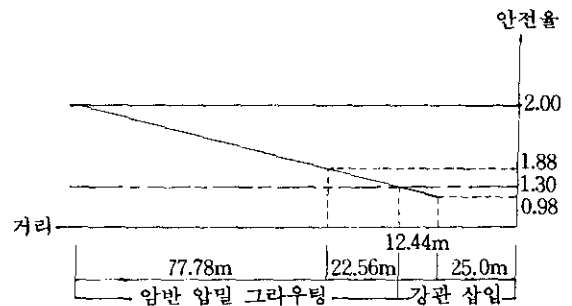
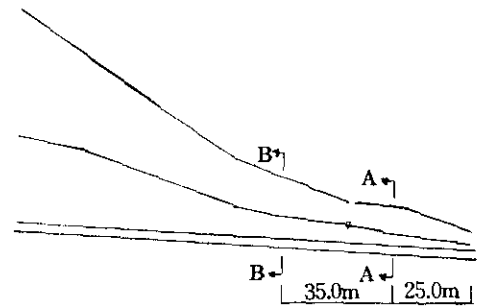


그림 8. 보강 방법 및 보강 구간

이 암반의 과다 변형으로 야기된 것으로 보아야 한다. 일반적으로 터널내 강관을 삽입하여 암반내 침투수가 형성되지 않도록 침투수 자체를 차단하는 방법과 침투 수압에 대한 암반의

저항 능력을 증가시키기 위한 암반 압밀 시멘트 액 그라우팅 방법등이 가장 많이 사용되고 있다.

VI. 결론

침투 수압을 고려한 수압 터널의 안전성은 터널 주위 암반의 안전성에 의하여 결정되며 암반의 안전성은 Mohr-Coulomb 파괴론을 사용하여 암반의 응력에 대한 안전율을 산정하여 판단한다. 수치 해석에 의한 안전율의 산정 과정은 다음과 같다.

- ① 터널을 포함한 유한 요소(차분)망을 작성
- ② 내부 수압과 외부 수압을 고려한 각 절점에 대한 침투 수압을 산정하여 적용
- ③ 침투 수압을 적용한 후 응력이 평형 상태에 도달하였을 때 암반 요소의 주응력을 산정
- ④ 산정된 주응력의 최대 주응력과 최소 주응력으로 이루어진 Mohr 응력원의 중심에서 Mohr-Coulomb 파괴 포락선과 수직으로 이루는 거리와 Mohr 응력원의 반

경과의 비로 암반의 안전율 산정

- ⑤ 산정된 안전율을 이용하여 수압 터널의 보강 방법 및 보강 구간의 제시
안전율에 따른 보강 방법 및 보강 구간은 다음과 같이 추천한다.
 - 안전율 1.3 미만구간 : 강관삽입+암반 압밀그라우팅
 - 안전율 1.3 이상 2.0 미만구간 : 암반 압밀 그라우팅
 - 안전율 2.0 이상구간 : 보강 불필요

참고자료

1. G. Seeber, "Power conduits for high-head plants" June. 1985, Water Power & Dam Construction
2. G.Fernandez and T.A.Alvarez Jr., "Seepage-induced effective stress and water pressure around pressure tunnels." Jan. 1994, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, ASCE
3. A. J. Schleiss, "Design of pervious pressure tunnels." May. 1986, Water Power & Dam Construction.