

제 3장 시설물의 안전성 평가

3.1 개 요

3.2 해석 조건 및 방법

3.3 해석 결과 및 분석

3.4 구조해석 결론

3.5 안전성 평가

제 3장 시설물의 안전성 평가

3.1 개요

3.1.1 검토 개요

- 본 과업의 구조안전성 검토는 청도2터널(부산)에 대한 지반거동해석과 지보재에 대한 안전성 검토를 실시하였다.
- 구조물의 안전성 평가는 그 기능과 역할을 유지할 수 있는 구조적 및 사용상의 안전성에 대한 확보여부를 평가하는 것이므로 설계도서 검토 및 시공방법과 사용재료에 대한 검토, 부재별 상태평가 결과 및 각종 계측·측정·조사·시험 등을 통한 충분한 기초자료를 확보하여 이를 바탕으로 수치해석에 의해 안전성 여부를 판단하여야 한다.
- 터널해석은 지반을 연속체 요소로 가정하고 숏크리트와 및 Rock Bolt 같은 지보재 설치를 포함한 다단계 터널굴착 시공을 실제와 유사하게 Simulation하여 터널에 발생하는 변위와 터널의 지보재에 작용하는 응력, 전단력 및 모멘트를 수치해석 프로그램으로 해석하여 굴착 후 안전성 파악하고자 한다.
- 터널의 굴착 및 지보 형태에 따른 지반의 역학적 거동과 안전성을 평가하기 위하여 국내에서 많이 사용되는 범용 프로그램인 FLAC을 사용하여 해석을 수행하였으며, 해석에 이용된 입력정수들은 기존 설계 자료인 『부산~대구간 고속도로(대구~대동간)건설공사 터널 보고서(제4공구:남천~송읍)』, 『부산~대구간 고속도로(대구~대동간)건설공사 토질조사보고서(제4공구:남천~송읍)』 자료들을 근거로 암반의 공학적 분류방법을 통하여 자료를 분류하였고, 실제의 굴착 단계를 고려하여 터널 거동분석을 수행하였다.

【표 3.1.1】 안전성 평가항목

항 목	평 가 내 용
터널지반해석	◦연속체 역학에 근거한 유한요소해석 ◦지반물성은 기 진단자료 및 각종문헌 참조 ◦주변지반 및 터널구조물의 안전성 검토 - 터널주변지반의 응력분포 - 지보재의 응력검토(숏크리트, 락볼트)

3.1.2 검토위치 선정

터널의 안전성 검토를 위한 해석단면은 외관조사 및 내구성 조사결과에 의한 터널 부재별 상태평가를 분석하고, 지반탐사 및 각종 설계 자료의 분석결과를 고려하여 위치를 선정하여야 한다.

가. 기초자료 검토

- 병렬터널로서 NATM 공법으로 시공되었으며, 개착식 구간을 제외한 본선터널의 표준지 보형식은 T-1~6로 시공되었음.
- 굴진방법은 상·하반 반단면 굴착공법이며 터널은 대부분 연·경암반 이상의 암반에 위치해 있음.
- 지층구성은 토사-풍화암-연암-경암층의 순서이며, 지반정수 및 지층단면 등은 토질조사 보고서와 설계도서를 준용하여 적용함.
- 기초자료 검토결과 최대 측압계수($K_0=2.5$)를 고려하여 적용함.

나. 해석위치 결정

- 시추조사 및 실내시험 결과를 바탕으로 지형이나 지질이 불리하다고 판단되는 지점
- 토피가 낮고 갭문 설치로 인하여 구조적으로 지반의 이완이 극대화 되는 지점
- 최대 편토압이 예상되거나 지상에 중요 구조물이 위치하는 경우

3.2 해석조건 및 방법

3.2.1 일반사항

- 구조형상 및 단면치수는 설계도면과 현장 실측자료를 통한 현재 상태를 고려하여 결정한다.
- 안전성평가를 위한 적용설계방법은 주지보재인 슛크리트와 록볼트는 허용응력설계법의 규정에 따라 검토한다.

3.2.2 적용된 수치해석 프로그램

가. FLAC

1) 개 요

본 터널의 안정성 평가를 위한 수치해석에서는 2차원 평면 변형을 조건을 사용하였다. 본

과업에 사용한 프로그램은 현재 범용적으로 사용되고 있는 터널해석 프로그램(FLAC- 2D)으로서 유한차분법을 이용하여 각 절점의 구성 방정식이 평형상태에 도달할 때까지 반복계산을 수행하여 최종해를 구하게 된다. 그리고, 응력-변위관계는 탄소성 모델을, 소성영역의 판정은 모어-쿨롬(Mohr-Coulomb)의 파괴 기준(Failure Criteria)을 적용하였으며 그 이유는 다음과 같다.

- 해석 프로그램은 국내외에서 사용된 실적이 있어 그 객관성이 입증되었거나 공인기관에 의하여 터널 거동해석에 적합하다고 인정된 프로그램
- 굴착단계에 따른 지반, 지보재의 변형 및 응력의 변화를 계산하여 터널설계에 반영할 수 있는 프로그램
- 지반의 소성거동을 해석할 수 있는 탄소성 또는 점탄소성 프로그램

2) 이론적 배경

FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)은 연속체를 지배하는 방정식으로 평형방정식, Darcy 방정식, Fourier 방정식, Newton의 운동방정식 등을 사용하며, 평형방정식 또는 Newton의 운동방정식을 중심으로 Darcy 방정식 또는 Fourier 방정식과 연계(Coupling)하여 여러가지 초기치 또는 경계치 문제를 풀 수 있다. FLAC은 초기치나 경계치가 주어진 미분방정식을 푸는 가장 오래된 방법인 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하여 연속체 내부 임의의 점에서 다음과 같은 지배방정식의 해를 구할 수 있다.

- 정역학 문제 : 변위, 응력, 부재력
- 침투 문제 : 간극 수압
- 열전도 문제 : 온도
- 동역학 문제 : 가속도, 속도

유한차분법에서 경계치 문제를 계산하는 방법에는 다음과 같이 반복법과 이완법의 두 가지가 있으며, FLAC에서는 이완법중 동역학적 이완법(Dynamic Relaxation Method)을 사용한다.

▣ 반복법

경계에 위치한 절점을 제외한 모든 절점에 적당한 초기치를 가정하여 경계부근부터 평균값을 반복적으로 구하여 모든 영역에서 이러한 조건이 만족될 때까지 반복계산하는 방법.

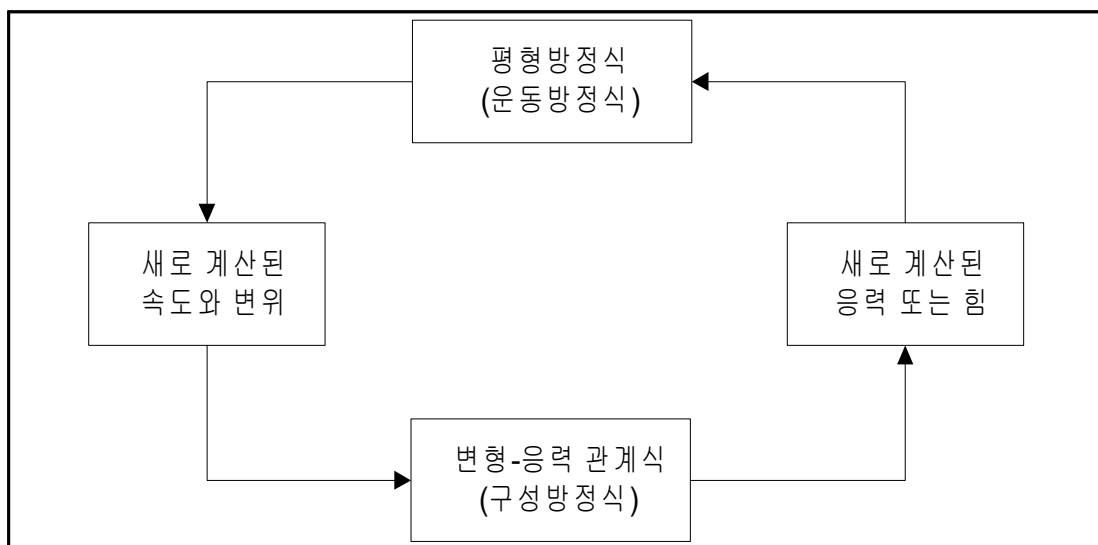
▣ 이완법

2차원 연속체 공간을 유한차분망으로 분할하여 물체 내부의 모든 절점에서 외력과 내력간의 차이인 불평형력을 줄여 나가는 방법.

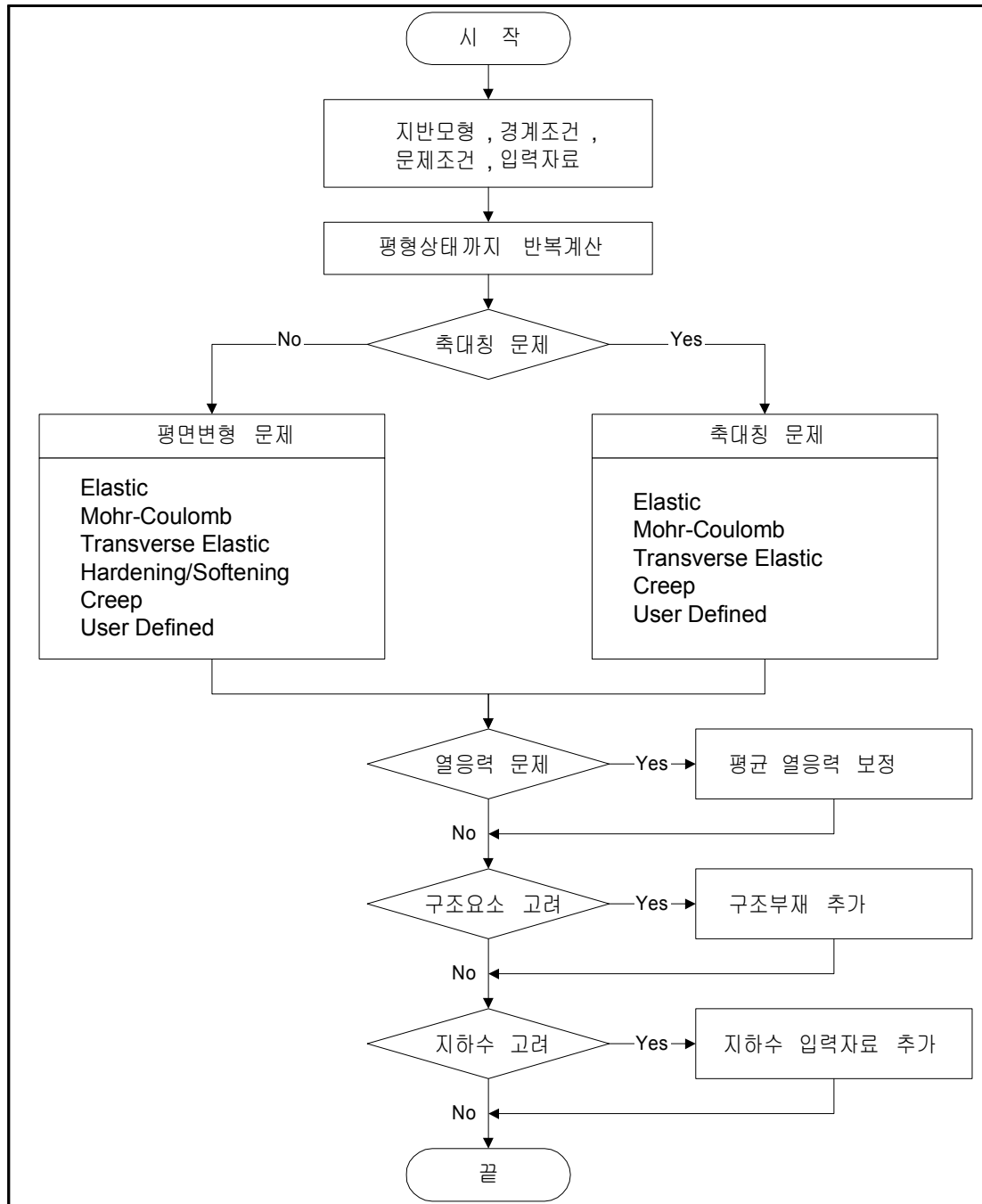
FLAC은 유한개의 요소에 대한 방정식의 해를 구하는 방식이 FEM(Finite Element Method)과는 다른 FDM방식으로서, 이는 요소의 각 절점에 구성된 아주 적게 세분된 시간 단위별로 이전 시간 단위에서 구한 값을 초기값으로 하여 미지방정식의 해를 구하는 방법이며, 평형상태에 대한 기준(Criteria)에 도달할 때까지 반복계산을 수행하여 최종해를 구하는 것이며 계산방법은 다음과 같다.

- 각 절점에서 운동방정식에 대한 해가 구해지며 이때 절점에서 구해진 힘들은 평형상태가 아니다.
- 평형상태가 아닌 힘들이 절점에서 이상화된 요소(Element)의 개체(Mass)를 가속시킨다. 이 개체의 가속에 대한 적분이 이루어지면 절점의 시간 단위에 대한 변위비율(속도)이 구해지고 여기에서 요소의 변형량(Strain)이 정해진다.
- 사용 Model의 응력-변형 구성식에 따라 응력의 증분량이 구해지며, 일단 응력의 증분이 구해지면 Mesh의 각 절점에 해당되는 불균형력(Out-of-balance Force)이 정해진다.

위와 같은 계산이 시간 단위마다 반복되어지며 FLAC Code에서는 시간 단위가 증가됨에 따라 불균형력이 0에 근접하도록 하는 Numerical Damping 개념을 도입하였다. 본 프로그램에서 사용된 ‘양해법(Explicit Method)’의 해석 과정을 흐름도로 나타내면 다음 그림 과 같다.



【유한차분법의 계산 과정】



【FLAC의 세부 계산과정】

3) 구성 모델

FLAC-2D는 유한차분 프로그램(FDM)으로서 토사, 암반, 기타 연속체에 축조된 구조물의 거동 등 지반구조물 해석용 프로그램으로 내장된 별도의 언어(FISH)를 이용하여 사용자가 정의한 구성모델의 적용이 가능하며, FLAC-2D에 정의된 구성모델은 다음 표와 같다. 본 해석에서는 FLAC-2D의 구성모델 중 암반의 항복거동을 비교적 잘 표현할 수 있는 것으로 알려진 Mohr-Coulomb Plasticity Model을 선정하여 해석에 적용하였다.

【FLAC 구성 모델】

구성 모델	대표적 재료	적용 예
Null	-	공동, 굴착, 장래에 요소가 추가될 공간
Elastic	균일 등방성 연속체 : 선형 응력/변형률 거동	제조된 재료(강철) 안전물의 계산
Transversely Isotropic Elastic	이방탄성을 보이는 층상재료(목재)	강도 이하에서 성형한 층상재료
Mohr-Coulomb Plasticity	느슨하거나 고결된 입상재료(토사, 암, 콘크리트)	토질 및 암반역학 (사면안정, 지하굴착)
Ubiquitous Joint	강도 이방성을 보이는 층상재료	조밀하게 발달한 층리지반의 굴착
Strain-hardening/softening	재료의 비선형 경화/연화를 보이는 입상재료	소성경화 및 잔류강도의 연구(점진 파괴)
Double Yield	압력에 의해 영구 체적 압축을 받 는 입상 재료	사력댐의 침하검토

4) 지보재의 모델링

터널에서 사용되는 지보재의 대표적인 두가지 형태는 슛크리트와 록볼트이다. 슛크리트는 Beam요소로 모델링하며, 각 절점에서 자유도 3(2방향 변위와 회전)인 2차원 요소로 휨저항이 중요한 구조요소로 사용된다. Element는 본 프로그램의 Continuous Portion에서와 같이 기본적인 Lumped Mass Formulation으로 사용되며 동적 운동방정식의 지배를 받는다. 록볼트는 Cable 요소로 모델링을 하는데 암반에서의 특정 위치에 정착하거나 부착한 1방향 축요소가므로 암반의 변형으로 Cable 길이에 따라 힘이 발생되며 Pre-tension의 도입도 가능하다. 평형상태의 해는 운동방정식의 Damping을 통하여 얻어지는데 구조요소(Structural Element)에는 다음과 같은 두가지 제한이 따른다.

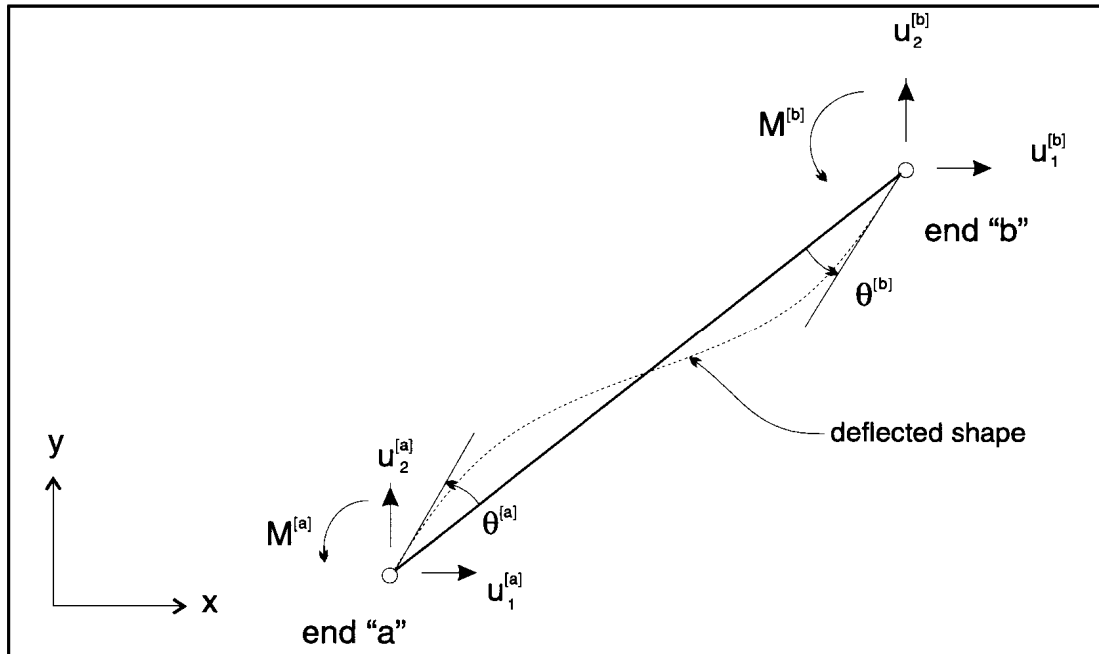
- 중력이 작용할 때 구조물의 자중은 고려하지 않는다(자중에 상응하는 외력이 작용).
- 구조물은 어떠한 파괴의 한계 없이 탄성적으로 거동한다.

【터널해석시 FLAC-2D에서의 사용요소】

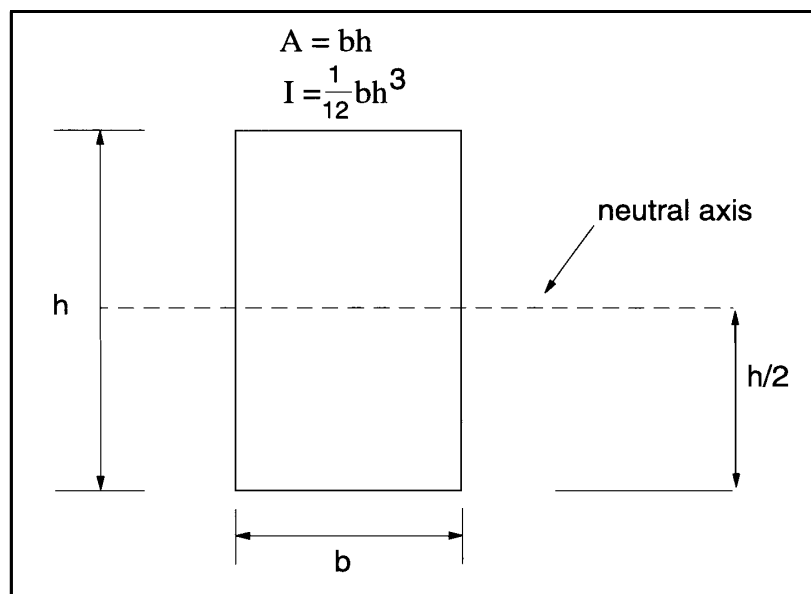
구 분	지 반	슛크리트	록 볼 트
사 용 요 소	평면변형을 요소	Beam 요소	Cable 요소

▣ Beam Element Formulation(쑈크리트)

본 프로그램에서 Beam Element는 각 Node 끝에서 자유도가 3인(두개의 변위와 하나의 모멘트) 직사각형 단면을 가진 기본적인 2차원 요소로 전형적인 Beam Element의 재질과 기하학적인 특성에 의하여 정의되며, 어떠한 파괴의 한계도 없이 선형탄성재료로서 거동한다고 가정한다. Beam Element는 단면적(A), 단면 2차모멘트(I)를 가지며, Endpoint a, b와 길이 L에 의하여 정의된다.



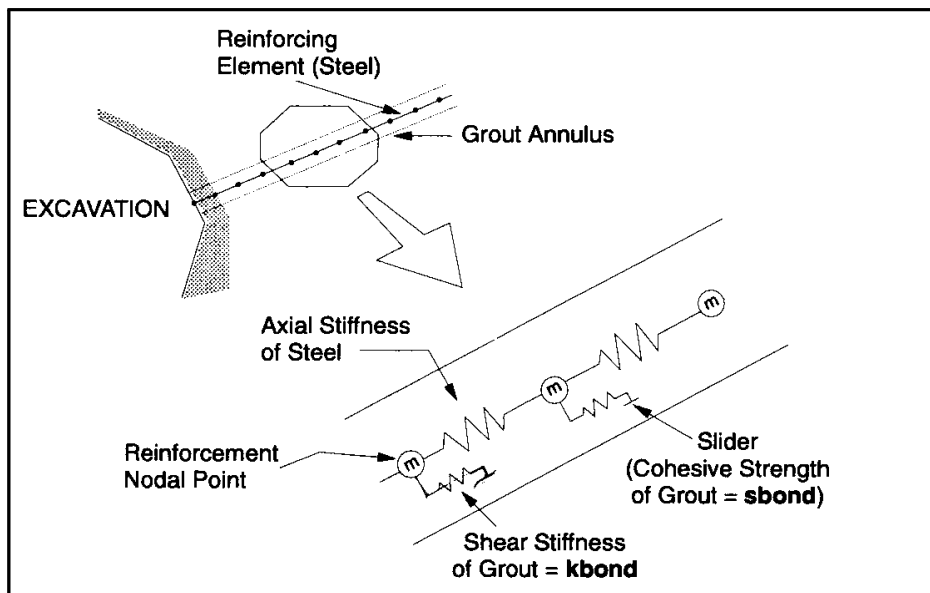
【보 요소】



【사각형 보 단면】

▣ Cable Element Formulation(록볼트)

일반적으로 보강재의 축방향 거동은 전적으로 Reinforcing Element에 지배된다고 가정할 수 있다. Reinforcing Element는 보통 Steel Bar나 록볼트가 될 수 있다. Reinforcing Element는 가늘기 때문에 Bending Resistance에 거의 영향을 주지 않으며(특히 록볼트의 경우), 일축인장(Uniaxial Tension - 압축은 허용하지 않음)에 지배를 받는 1차원 부재(Member)로 다루어진다. 1차원 구성 Model은 Reinforcing Element의 축방향 거동을 나타내기에는 충분하다. 수식으로 표현하면 축방향 Stiffness는 보강재의 단면적(A), Young's Modulus(E)로 나타낼 수 있다.



【Cable 요소】

3.2.3 해석조건

- 해석모델은 지반의 경우 평면변형을 조건하에서 Mohr-Coulomb 탄소성모델을 적용하였다.
- 경계조건으로는 해석영역의 좌·우측은 Roller로 하여 X축의 변위는 고정하고 Y축 변위는 허용하였으며, 하부는 Hinge로 하여 X축, Y축의 변위를 고정하고 회전은 허용하였다.
- 해석영역은 축방향으로는 터널 폭의 4.0배 이상 하부는 4.0배 이상, 상부는 지표면까지를 해석영역으로 정하였다.
- 해석모델은 지반의 경우 평면변형을 조건하에서 비선형탄성 해석법인 Hyperbolic 모델 (Mohr-Coulomb 모델)을 사용하였다.
- 기초자료 검토결과 최대 축압계수(KO=2.5)를 고려하여 해석단면별 축압계수 0.5, 1.0, 2.0, 2.5를 적용하여 CASE별로 해석하였다.

3.2.4 지반정수 결정

수치해석에 적용하는 지반 물성치는 정교한 해석방법과 관련지어볼 때 매우 중요하다. 해석에 적용하기 위한 지반 물성치를 얻기 위해서 어떠한 방법을 사용하더라도, 이러한 방법은 주어진 목적에 합당해야 사용될 수 있다.

이러한 측면에서 터널에 미치는 영향검토를 위해 필요한 지반 물성치는 설계도서를 비롯한 공사 중이나 공사완료후의 지반조사결과와 각종문헌 및 여러 학자들이 제안한 상관관계식을 토대로 역학적 성질을 비교분석하여 토층조건에 맞게 가장 합리적으로 산정하였다.

가. 문헌자료 검토

지반공학과 관련한 사항을 검토하기 위해 일반적으로 적용되는 지반 물성치는 강도특성, 압축특성, 중량-체적에 관련된 데이터로서 각 항목에 대해서 다음과 같은 지반 물성치를 산정한다.

1) 강도특성 (Strength Parameters)

- 탄성계수(E), 포아송비(ν), 내부마찰각(ϕ), 점착력(c)

2) 중량, 체적에 관련된 데이터 (Gravimetric-Volumetric Data)

- 단위중량(γ), 간극비(e)

① 지반의 탄성계수 및 포아송비

【표 3.2.1】 지반의 종류에 따른 탄성계수

지반의 종류		탄성계수 (kgf/cm ²)
PEAT		1 ~ 15
점 토	보 드 립 다	5 ~ 40
	보 통	40 ~ 80
사 층	느 슨 하 다	80 ~ 150
	견 고 하 다	100 ~ 200
	단 단 하 다	500 ~ 800
자 갈	밀실한 사력	1000 ~ 2000

※ 도해토목건축 가설구조물의 해설 (명문사 P232)

【표 3.2.2】 지반의 종류에 따른 탄성계수 및 포아송비

지반의 종류	탄성계수 (tf/m ²)	포아송비	지반의 종류	탄성계수 (tf/m ²)	포아송비
느슨한 모래	1000 ~ 2400	0.20 ~ 0.40	모래 및 자갈	6900 ~ 17200	0.15 ~ 0.35
중간정도 촘촘한 모래	1700 ~ 2800	0.25 ~ 0.40	연약한 점토	200 ~ 500	-
촘촘한 모래	3500 ~ 5500	0.30 ~ 0.45	중간 점토	500 ~ 1000	0.20 ~ 0.50
실트질 모래	1000 ~ 1700	0.20 ~ 0.40	전고한 모래	1000 ~ 2400	-

※ 구조물 기초설계기준 (한국지반공학회)

② 지반의 탄성계수(Es)와 N치의 관계

【표 3.2.3】 지반의 탄성계수와 N치와의 관계

구 분		산 정 식
Bowels (kgf/cm ²)	정규압밀된 모래 포화된 모래 과압밀된 모래 자갈질 모래와 자갈 점토질 모래 실트질 모래	Es = 5.1(N+15) Es = 2.55(N+5) Es = 183.6+7.56N Es = 12.24(N+6) Es = 3.264(N+15) Es = 3.06(N+6)
Schltze, Menzenbach(1996) (kgf/cm ²)	세사(지하수상) 세사(지하수하) 모래 자갈섞인 모래 모래 자갈 실트질 모래	Es = 52+3.3N Es = 71+4.9N Es = 39+4.5N Es = 43+11.8N Es = 38+10.5N Es = 23+5.3N
Schmertmann(1970) (kgf/cm ²)	실트질 모래 중간 모래 거친 모래 자갈질 모래 모래 자갈	Es = 4N Es = 7N Es = 10N Es = (12~18)N Es = 38+10.5N
Meigh & Nixon(1961) (kgf/cm ²)	실트질 모래 가는 실트질 모래 중간 모래 자갈질 모래 자갈	Es = 5N Es = 8N Es = 10N Es = (16~34)N Es = (24~32)N

③ 통일분류법에 의한 방법(도로설계요령, 한국도로공사)

【표 3.2.4】 통일분류법으로 분류한 지반상태에 따른 일반적인 토질정수

종 류		재료의 상태		단위중량 (tonf/m ³)	내부 마찰각(ϕ)	점착력 (tonf/m ²)	분류기호 (통일분류법)
흙 쌓 기	자갈 및 자갈섞인 모래	다 진 것		2.0	40	0	GW, GP
	모 래	다진것	입도가 좋은것	2.0	35	0	SW, SP
			입도가 나쁜것	1.9	30	0	
	사 질 토	다 진 것		1.8	25	3이하	SW, SC
	점 성 토	다 진 것		1.8	15	5이하	ML, CL MH, CH
자 연 지 반	자 갈	밀실한 것, 입도가 좋은것		2.0	40	0	GW, GP
		밀실하지 않은것, 입도가 나쁜것		1.8	35	0	
	자갈섞인 모래	밀실한 것		2.1	40	0	GW, GP
		밀실하지 않은것		1.9	35	0	
	모 래	밀실한 것, 입도가 좋은것		2.0	35	0	SW, SC
		밀실하지 않은것, 입도가 나쁜것		1.8	30	0	
	사 질 토	밀실한 것		1.9	30	3 이하	SM, SC
		밀실하지 않은것		1.7	25	0	
	점 성 토	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감, N=8~15)		1.8	25	5 이하	ML, CL
		약간 무른것(손가락으로 중간 정도의 힘으로 들어감, N=4~8)		1.7	20	3 이하	
		무른것(손가락으로 약하게 눌러 조금 들어감, N=2~4)		1.7	20	1.5 이하	
	점토 및 실트	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감, N=8~15)		1.7	20	5 이하	CH, MH, ML
		약간 무른것(손가락으로 중간 정도의 힘으로 들어감, N=4~8)		1.6	15	3 이하	
		무른것(손가락으로 약하게 눌러 조금 들어감, N=2~4)		1.4	10	1.5 이하	

④ 지반의 강도정수와 N치의 관계

【표 3.6】에서 Meyerhof의 값은 모래의 입도가 균일한 경우(Uniform graded)는 작은 쪽의 값을 택하고, 입도의 분포가 좋은 경우(Well-graded)는 큰 쪽의 값을 택하는 것이 좋다.

【표 3.2.5】N치, 상대밀도 및 내부마찰각의 관계

N 치	상 대 밀 도 (Df)		내 부 마 찰 각 (ϕ)	
			Peck	Meyerhof
0 ~ 4	매우느슨	0.0 ~ 0.2	28.5 이하	30 이하
4 ~ 10	느슨	0.2 ~ 0.4	28.5 ~ 30	30 ~ 35
10 ~ 30	중간	0.4 ~ 0.6	30 ~ 36	35 ~ 40
30 ~ 50	조밀	0.6 ~ 0.8	36 ~ 41	40 ~ 45
50 이상	매우조밀	0.8 ~ 1.0	41 이상	45 이상

【표 3.7】은 Dunham(1954) 및 Ohsaki가 제안한 N치를 이용한 내부마찰각 추정식이다.

【표 3.2.6】N치를 이용한 내부마찰각(ϕ)의 추정식

구 분	내부마찰각 추정식	비 고
Dunham(1954)	$\phi = \sqrt{12N} + 15$	입자가 둥글고 입도분포가 균일한 모래
	$\phi = \sqrt{12N} + 20$	입자가 둥글고 입도분포가 좋은 모래 입자가 모나고 입도분포가 균일한 모래
	$\phi = \sqrt{12N} + 25$	입자가 모나고 입도분포가 좋은 모래
Ohsaki 제안	$\phi = \sqrt{20N} + 15$	-

나. 적용 지반정수

【표 3.2.7】청도2터널(부산) 적용 지반정수

토 층 \ 물성치	단위중량 (γ_t , kN/m ³)	탄성계수 (E, MPa)	프와송비 (ν)	점착력 (c, kPa)	내부마찰각 (ϕ , °)
토사	19.0	20	0.35	10	25
풍화암	21.0	200	0.30	20	30
연 암	23.0	2,000	0.25	50	35
경 암	26.0	6,800	0.25	250	35
측압계수(K ₀)	K=0.5, 1.0, 2.0				

주) 대구-포항간 고속도로 건설공사 실시설계 터널해석보고서, 1996.12 참조

다. 적용 지반정수

본 터널의 검토단면의 지층구성은 상부로부터 풍화토-풍화암-연암-경암 순으로 구성되어 있으며, 안전성 검토를 위한 지반정수 설계당시 참고문헌 및 시추조사등을 통하여 합리적인 지반정수를 산정한 것으로 판단하여 설계에 적용된 지반 정수를 적용하였으며, 측압계수는 현장계측결과를 종합하여 $K_0=2.5$ 에 대해서도 검토하였다.

3.2.5 지보재 재료특성

【표 3.2.8】 지보재 재료특성

구 분	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MPa)	압축강도 (MPa)	비 고
쏿크리트	24.0	5,000~15,000	10.0~21.0	-
록볼트	78.5	210,000	-	-

3.2.6 검토하중

터널해석의 결과를 실제 현장문제에 적용하기 위해서는 굴착과 지보설치 등과 같은 시공 과정이 반영되어야 하며, 터널굴착 과정은 주변지반의 3차원적인 응력-변형 거동을 보인다. 또한 종방향 Arching 효과가 변화하는 경향을 반영하기 위해서 2차원 해석의 각 해석단계를 3차원 터널 축상의 각 위치와 대응시켜 해석단계별로 굴착에 의해 발생하는 불균형 굴착응력을 분배하여 작용시켜야 한다. 따라서 본 해석에서는 터널에 발생한 변위가 응력수준에 비례한다는 가정 하에 하중분배율을 이용하여 단계별 굴착하중을 적용하여 해석을 수행하였다.

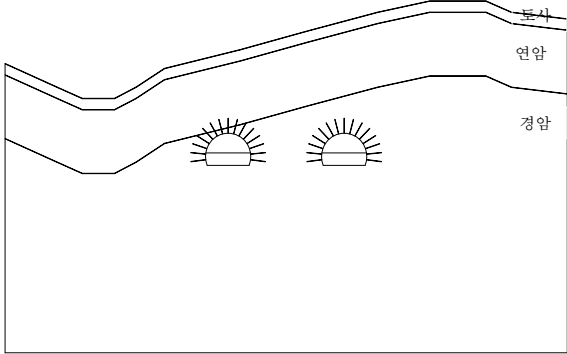
【표 3.2.9】 하중분배율

구 분	굴착단계	Soft Shotcrete+R/B	Hard Shotcrete+R/B	비 고
하중분배율(%)	40	30	30	상하 반단면굴착

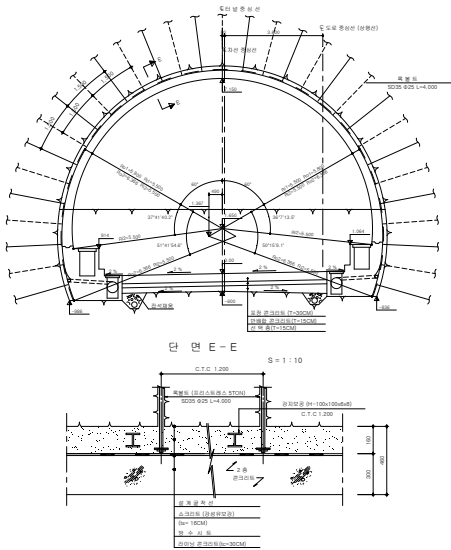
3.3 해석결과 및 분석

3.3.1 청도2터널 2차원 연속체 해석결과 (부산기점 68.960k)

가. 해석단면의 지반구성 및 특징

해석단면	선정사유
	본 구간은 부산기점 68.960k(13span)에 위치하고 있으며, 터널의 지보형식은 Type-5이다. 터널은 경암과 연암경계부근에 존재한다.

나. 해석단면 표준지보도

							
굴착 방법	굴진장 (m)	록볼트 간격		록볼트 길이(m)	쉴크리트 두께(mm)	강지보공(m)	라이닝 (mm)
		중	횡				
전단면 굴착	1.2	1.2	1.5	4.0	160	1.2	300

다. 해석개요

- 적용 프로그램 : FLAC 2D
- 해석 모델 : Mohr - Coulomb Model
- 적용 축압계수 : 0.5, 1.0, 2.0, 2.5

라. 해석 적용 물성치

1) 지반

토 층 \ 물성치	단위중량 (γ_t , kN/m ³)	탄성계수 (E, MPa)	프와송비 (ν)	점착력 (c, kPa)	내부마찰각 (ϕ , °)
토사	19.0	20	0.35	10	25
풍화암	21.0	200	0.30	20	30
연 암	23.0	2,000	0.25	50	35
경 암	26.0	6,800	0.25	250	35
축압계수(Ko)	K=0.5, 1.0, 2.0, 2.5				

주) 대구-포항간 고속도로 건설공사 실시설계 터널해석보고서, 1996.12 참조

2) 지보재

구분	단위중량(kN/m ³)	탄성계수(kN/m ²)	압축강도(kN/m ²)
연성숏크리트	23.5	5,000,000	10,000
강성숏크리트	23.5	15,000,000	21,000
록 볼 트	78.5	21,000,000	-

마. 해석절차 및 하중분담율

구 분	시공 단계	하중 분담율		
		굴 착	Soft 숏크리트+R/B	Hard 숏크리트
부산방향 상반 굴착	7	40 %		
	8		70 %	
	9			100%
부산방향 하반 굴착	10	40 %		
	11		70 %	
	12			100%

바. 해석결과 분석

1) KO=0.5

① 변위

해석단계	천단	좌측벽	우측벽
1	-0.014	0.011	0.0005
2	-0.023	-0.019	0.002
3	-0.032	0.034	0.007
4	-0.036	0.018	-0.009
5	-0.036	0.017	-0.009
6	-0.036	0.017	-0.009
7	-1.556	-0.068	0.226
8	-1.556	-0.068	0.226
9	-1.556	-0.068	0.226
10	-1.692	0.187	-0.207
11	-1.692	0.187	-0.207
12	-1.692	0.187	-0.207
최대값	1.692	0.187	0.226

② 지보재 응력

구분	지보재 응력
-shotcrete 압축응력(MPa)	1.82
-bolt 축력(kN)	9.077
지보재 허용내력	- S/C 압축응력 : $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck} = 8.400 \text{ MPa}$ - R/B 허용축력 : $\phi 25, SD35, \text{단면적}=5.07\text{cm}^2$ (영구구조물로 간주) $f_{sa} = 0.5f_y = 88.7\text{kN}$

③ 해석결과

해석 결과	- 최대 천단변위는 1.692mm로 나타남. - 최대 수평변위는 0.226mm로 나타남. -crete 응력 검토결과 최대휨응력은 1.82MPa로 허용응력(8.400MPa)이내로 나타남. -bolt 축력 검토결과 최대축력은 9.077kN로 허용응력(88.7kN)이내로 나타남.
----------	--

2) KO=1.0

① 변위

해석단계	천단	좌측벽	우측벽
1	-0.013	-0.006	-0.01
2	-0.022	-0.01	-0.017
3	-0.031	-0.016	-0.025
4	-0.042	-0.097	-0.084
5	-0.042	-0.097	-0.084
6	-0.042	-0.097	-0.084
7	-1.427	-0.048	0.059
8	-1.427	-0.048	0.059
9	-1.427	-0.048	0.059
10	-1.527	0.414	-0.609
11	-1.527	0.414	-0.609
12	-1.527	0.414	-0.609
최대값	1.527	0.414	0.609

② 지보재 응력

구분	지보재 응력
-shotcrete 압축응력(MPa)	1.58
rockbolt 축력(kN)	8.997
지보재 허용내력	- S/C 압축응력 : $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck} = 8.400 \text{ MPa}$ - R/B 허용축력 : $\phi 25, SD35, \text{단면적}=5.07\text{cm}^2$ (영구구조물로 간주) $f_{sa} = 0.5f_y = 88.7\text{kN}$

③ 해석결과

해석 결과	- 최대 천단변위는 1.527mm로 나타남. - 최대 수평변위는 0.609mm로 나타남. -shotcrete 응력 검토결과 최대휨응력은 1.58MPa로 허용응력(8.400MPa)이내로 나타남. - rockbolt 축력 검토결과 최대축력은 8.997kN로 허용응력(88.7kN)이내로 나타남.
----------	---

3) KO=2.0

① 변위

해석단계	천단	좌측벽	우측벽
1	-0.128	-0.042	-0.035
2	-0.023	-0.075	-0.062
3	-0.038	-0.135	-0.108
4	-0.074	-0.42	-0.302
5	-0.074	-0.42	-0.302
6	-0.074	-0.42	-0.302
7	-1.3	-0.113	-0.419
8	-1.3	-0.113	-0.419
9	-1.3	-0.113	-0.419
10	-1.287	0.848	-1.53
11	-1.287	0.848	-1.53
12	-1.287	0.848	-1.53
최대값	1.3	0.848	1.53

② 지보재 응력

구분	부산방향
-shotcrete 압축응력(MPa)	5.35
rockbolt 축력(kN)	14.289
지보재 허용내력	- S/C 압축응력 : $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck} = 8.400 \text{ MPa}$ - R/B 허용축력 : $\phi 25, SD35$, 단면적=5.07cm² (영구구조물로 간주) $f_{sa} = 0.5f_y = 88.7\text{kN}$

③ 해석결과

해석 결과	- 최대 천단변위는 1.3mm로 나타남. - 최대 수평변위는 1.53mm로 나타남. -shotcrete 응력 검토결과 최대휨응력은 5.35MPa로 허용응력(8.400MPa)이내로 나타남. -rockbolt 축력 검토결과 최대축력은 14.289kN로 허용응력(88.7kN)이내로 나타남.
----------	--

4) KO=2.5

① 변위

해석단계	천단	좌측벽	우측벽
1	-0.014	-0.06	-0.048
2	-0.025	-0.11	-0.086
3	-0.047	-0.25	-0.186
4	-0.102	-0.663	-0.466
5	-0.104	-0.665	-0.467
6	-0.104	-0.665	-0.467
7	-1.286	-0.182	-0.773
8	-1.286	-0.182	-0.773
9	-1.286	-0.182	-0.773
10	-1.233	1.105	-2.134
11	-1.233	1.105	-2.134
12	-1.233	1.105	-2.134
최대값	1.286	1.105	2.134

② 지보재 응력

구분	부산방향
shotcrete 압축응력(MPa)	7.86
rockbolt 축력(kN)	23.009
지보재 허용내력	- S/C 압축응력 : $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck} = 8.400 \text{ MPa}$ - R/B 허용축력 : $\phi 25, SD35$, 단면적=5.07cm² (영구구조물로 간주) $f_{sa} = 0.5f_y = 88.7\text{kN}$

③ 해석결과

해석 결과	- 최대 천단변위는 1.286mm로 나타남. - 최대 수평변위는 2.134mm로 나타남. - shotcrete 응력 검토결과 최대휨응력은 7.86MPa로 허용응력(8.400MPa)이내로 나타남. - rockbolt 축력 검토결과 최대축력은 23.009kN로 허용응력(88.7kN)이내로 나타남.
----------	---

구 분	K=0.5	K=1.0
수직방향 변위도		
수평방향 변위도		
최소주응력		
최대주응력		
전단변형률		
모멘트도		

구 분	K=2.0	K=2.5
수평방향 변위도		
수직방향 변위도		
최소주응력		
최대주응력		
전단변형률		
모멘트도		

3.3.2 청도2터널 라이닝 해석결과 (부산기점 68.960k)

터널의 안전성 평가와 검토를 위한 재료특성과 적용하는 하중으로는 굴착하중 및 라이닝 자중 등으로 내용은 다음과 같다. 또한 라이닝 해석에서는 원설계에서의 라이닝 두께와 현장 조사결과에 의한 라이닝 두께를 이용하여 안정성 검토를 실시하였다.

가. 재료특성

구 분	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MPa)	압축강도 (MPa)	포아송비 (ν)	비 고
콘크리트 라이닝	24.0	2.46E4	24.0	0.2	무근

※ 라이닝의 비파괴강도 조사결과 설계기준강도를 상회하는 것으로 측정됨.

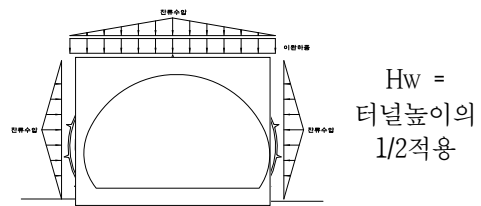
나. 라이닝 자중

콘크리트 라이닝 자중은 프로그램 내에서 자동으로 산정되어 적용된다.

다. 잔류수압

배수형 터널의 경우 콘크리트 라이닝 배면에 배수층을 설치하므로 원칙적으로 수압을 고려하지 않아도 되지만 부직포나 배수층의 장기적인 배수기능 저하가 우려될 경우에는 잔류수압을 고려한다.

잔류수압의 작용형태는 【그림 3.1】과 같이 침투류 해석에 의해 산정된 경험적인 형태를 적용하였으며, 수압의 크기는 최대수두(Hw)를 터널높이의 1/2로 적용하였다.

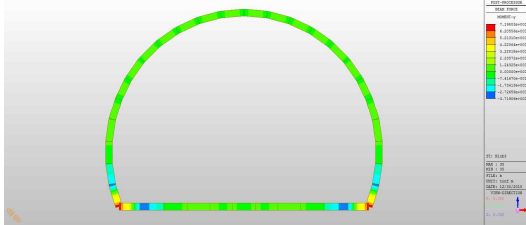
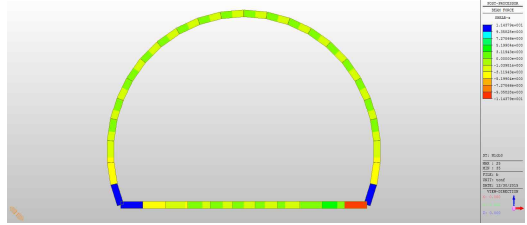
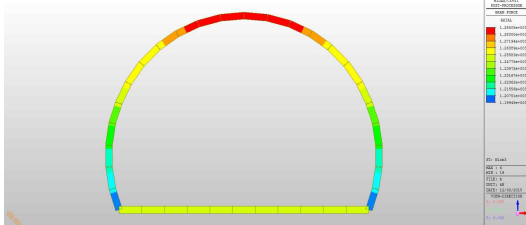
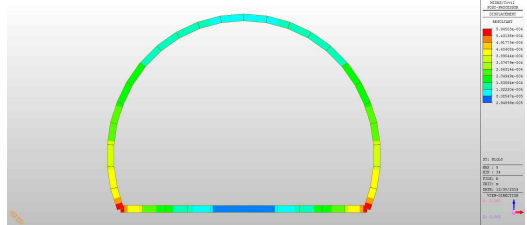


【그림 3.3.1】 잔류수압 작용형태

라. 이완하중

라이닝에 작용하는 이완하중은 터널 시공 후 장시간이 경과하게 되면 1차 지보재의 지보기능이 저하하게 되고 그에 따른 지반압력이 콘크리트 라이닝에 전이된다는 이론에 근거하고 있다. 이러한 이완하중의 크기는 이완영역 가정에 의한 계산법과 수치해석에 의한 계산법으로 분류할 수 있다. 본 검토에서는 라이닝과 주변지반을 연속체 요소로 모델링하여 FDM 해석에서 주지보재(shotcrete, Rock Bolt)의 기능이 상실되는 조건을 적용하였다.

마. 라이닝 해석 결과(원설계)-라이닝 두께 30cm

구 분	해 석 결 과																																										
자중 + 수압 + 이완하중	모멘트도		전단력도																																								
																																											
	축력도		변위도																																								
																																											
단 면 검 토	<table><tr><th colspan="2">구 분</th><th>천단부</th><th>아치부</th><th>벽체 상부</th><th>벽체 하부</th></tr><tr><td rowspan="5">자중 + 수압 + 이완 하중</td><td>압축응력(MPa)</td><td>2.85</td><td>2.95</td><td>2.81</td><td>7.41</td></tr><tr><td>전단응력(MPa)</td><td>0.003</td><td>0.003</td><td>0.005</td><td>0.24</td></tr><tr><td>허용압축응력(MPa)</td><td colspan="4">9.6</td></tr><tr><td>허용전단응력(MPa)</td><td colspan="4">1.22</td></tr><tr><td>평가</td><td>O.K</td><td>O.K</td><td>O.K</td><td>O.K</td></tr><tr><td colspan="2">검토결과</td><td colspan="4">°설계단면의 라이닝의 응력검토결과와 자중과 수압 및 이완하중이 작용한다고 가정할 경우에도 안전한 것으로 해석되었음.</td></tr></table>					구 분		천단부	아치부	벽체 상부	벽체 하부	자중 + 수압 + 이완 하중	압축응력(MPa)	2.85	2.95	2.81	7.41	전단응력(MPa)	0.003	0.003	0.005	0.24	허용압축응력(MPa)	9.6				허용전단응력(MPa)	1.22				평가	O.K	O.K	O.K	O.K	검토결과		°설계단면의 라이닝의 응력검토결과와 자중과 수압 및 이완하중이 작용한다고 가정할 경우에도 안전한 것으로 해석되었음.			
	구 분		천단부	아치부	벽체 상부	벽체 하부																																					
	자중 + 수압 + 이완 하중	압축응력(MPa)	2.85	2.95	2.81	7.41																																					
		전단응력(MPa)	0.003	0.003	0.005	0.24																																					
		허용압축응력(MPa)	9.6																																								
		허용전단응력(MPa)	1.22																																								
		평가	O.K	O.K	O.K	O.K																																					
검토결과		°설계단면의 라이닝의 응력검토결과와 자중과 수압 및 이완하중이 작용한다고 가정할 경우에도 안전한 것으로 해석되었음.																																									
해 석 결 과	°콘크리트 라이닝의 응력검토결과와 허용응력 범위 이내에 있는 것으로 해석되었으며, 최대 발생위치는 벽체하부인 것으로 나타남.																																										

주) $f_{ck} = 24.0 \text{ Mpa}$, 부재두께 300mm

바. 라이닝 해석 결과(안전진단결과)-라이닝 두께 27cm

구 분	해 석 결 과					
자중 + 수압 + 이완하중	모멘트도		전단력도			
	축력도		변위도			
단 면 검 토	구 분		천단부	아치부	벽체 상부	벽체 하부
	자중 + 수압 + 이완 하중	압축응력(MPa)	2.914	2.899	2.807	7.238
		전단응력(MPa)	0.003	0.003	0.002	0.205
		허용압축응력(MPa)	9.6			
		허용전단응력(MPa)	1.22			
		평가	O.K	O.K	O.K	O.K
	검토결과		◦설계단면의 라이닝의 응력검토결과와 자중과 수압 및 이완 하중이 작용하다고 가정할 경우에도 안전한 것으로 해석되었음.			
해 석 결 과	◦콘크리트 라이닝의 응력검토결과와 허용응력 범위 이내에 있는 것으로 해석되었으며, 천단부 압축응력은 원설계보다 크게 발생되었으나 측벽부 등은 원설계보다 작게 발생하는 것으로 평가되어 최대 응력은 원설계보다 작게 발생됨. 최대 발생위치는 벽체하부인 것으로 나타남.					

주) $f_{ck} = 24.0 \text{ Mpa}$, 부재두께 300mm

3.4 구조해석 결론

•터널 구조검토결과 슛크리트, Rock Bolt와 같은 지보재의 응력은 모든 경우에 있어 허용응력 이내이므로 안전한 것으로 평가되었으며. 터널주변 지반도 전반적으로 안정화되어 있는 양호한 상태인 것으로 평가되었다.

•라이닝 단면검토시 허용압축응력과 전단응력을 적용하여 구조검토를 실시하였으며 그 결과 라이닝 구조검토결과 모두 안전한 것으로 평가되었다.

3.5 안전성 평가

3.5.1 개요

터널의 안전성 평가는 육안검사 및 비파괴 현장시험에 의한 터널 부재별 상태평가를 분석하고 이론적 계산과 해석적 검증을 통하여 터널에 대한 안전성을 평가한다.

터널 구조물의 안전성 평가절차를 그림으로 도시하면 다음 <그림 3.2>와 같고 평가등급기준은 다음 <표 3.11>과 같다.



【그림 3.5.1】 안전성 평가등급 산정절차

【표 3.5.1】 안전성 평가등급기준

안전성평가 등급	안전성 평가기준	비 고
A	안전율(SF)이 1.0 이상이고 주부재에 손상이 없는 경우	
B	안전율(SF)이 1.0 이상이고 주부재에 손상(단면손실)이 있는 경우	
C	안전율(SF)이 1.0 미만~0.9이상	
D	안전율(SF)이 0.9 미만~0.75이상	
E	안전율(SF)이 0.75 미만	

3.5.2 안전성 평가결과

【표 3.5.2】 안전성 평가결과

구 분			변위(응력) 또는 안전율	안전성 여부 또는 평가등급	비 고
NATM 구간	터널주변지반 변위		◦ 최대수직변위 : 1.86mm ◦ 최대수평변위 : 2.134mm	안 전	
	지 보 재	쏿크리트	◦ 압축응력 7.86 MPa < 8.4 MPa	a	
		록볼트	◦ 23kN < 89 kN	a	
		라이닝	◦ 압축응력 7.41 MPa < 9.6 MPa ◦ 전단응력 0.24 MPa < 1.22 MPa	a	원설계
			◦ 압축응력 7.238 MPa < 9.6 MPa ◦ 전단응력 0.205 MPa < 1.22 MPa	a	라이닝두께 탐사결과
안전성 평가결과			◦ 최저 안전성 평가등급 = A 등급 ◦ 정성적 평가결과 = 안 전		