

현장암반 모델을 적용한 터널의 역해석

Application of Back Analysis for Tunnel Design by Modified In Situ Rock Model



김학문*1



이봉열*2



황의석*3



김태훈*4

Abstract

The purpose of this research work is to propose an analytical method of tunnel design based on reasonable site data. Therefore the proposed design method consists of monitoring data and Modified In Situ Rock Model. Also the Rock Mass Rating for very poor quality rock is very difficult to estimate, the balances between the ratings may no longer gives a reliable basis for the rock mass strength. But in reality Rock Mass Rating is only the property which can be obtained from face mapping records of the exposed tunnel face during construction stage. Evaluation of rock parameters for the actual design prior to tunnel construction should be corrected during tunnelling process in particularly complex ground conditions.

This study intends to investigate application of in-situ rock model to soft rock tunnelling (weathered rock) by face mapping results and site measurement data that are obtained at the costruction site of Seoul Subway Tunnel. For the preparation of more reliable ground parameters, the Rock Mass Rating values for the weathered rocks were modified and readjusted in accordance with the measurement data. The modified input parameters obtained by the proposed method are used for the prediction of the tunnel behavior at subsequent construction stages.

The results of this study revealed that more reasonable feed back tunnel analysis can be possible as suggested. Ample measurement data would be able to confirm the new proposed technique in this research work.

Keywords : Hoek-Brown model, RMR, GSI, Back analysis, Tunnel monitoring

*1 단국대학교 토목학과 교수

*2 시지 E&C(주) 부설기술연구소 소장

*3 단국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*4 (주)삼보기술단 지반공학부 사원

요 지

본 연구에서는 합리적이고 공학적인 터널 해석 방법을 제시하기 위해, 시공 중 막장에서 관찰된 신뢰성 높은 암석 및 암반 평점분류 방식과 실내시험을 근거로 하는 일반화된 Hoek-Brown의 현장 암반 모델을 현재 시공이 완료된 지하철 터널 공사 현장의 계측자료와 비교 분석하였다. 그 결과로서 실무적인 측면에서의 터널해석을 위한 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 국내 적용성을 제시하고 적용으로 인한 지반 입력물성치에 대한 타당성을 Trueman과 Trunk의 경험적인 추정식으로 검증하고자 한다. 그러나 불량한 암반의 RMR 값은 정확도가 떨어지기 때문에 일반화된 Hoek-Brown의 현장 암반모델의 적용성에 문제가 있으나, 시공 중 계측자료로 보완함으로써 위험도가 높은 불량암반의 적용성을 평가하였다. 본 연구를 통해서 암석의 경험적인 파괴규준인 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델을 적용하여 변형과 강도에 관한 암반 입력물성치를 결정하는 과정에서 GSI하한치 = RMR-5를 사용함으로써 현장에서 안정해석의 정확도를 높일 수 있음을 알 수 있다. 단, 여기서는 편마암의 $m_i=33$, 풍화암의 최저치 $\alpha_i=100 \text{ t/m}^2$ 이고 GSI는 RMR Chart의 해당연도와 상관없이 동일하다는 조건에서 이루어졌다.

주요어 : Hoek-Brown 모델, RMR, GSI, 역해석, 터널계측

1. 서론

고도의 산업화에 따른 도시 인구 집중과 급증하는 차량 증가의 대책마련으로 1980, 1990년대를 거치면서 지하공간 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 그로 인해 경제적이고 합리적인 터널의 설계 및 시공 기술에 관한 많은 연구도 병행되고 있다.

지금까지의 시공전 터널설계는 지반조사 결과에 의하여 모든 설계의 입력자료가 작성되므로 지질학적 복합성을 감안할 때 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 그러므로 NATM이 적용되는 현장에서 시공중 막장의 암반상태를 파악한후 보다 현실적인 입력자료를 사용하여 설계하고, 계측자료를 이용하여 그 결과를 역해석하며 안정성과 경제성을 만족시킬 수 있는 설계기법으로 발전시키는데 본 연구의 목적이 있다.

시공중 터널의 안정해석은 토질의 일반화된 파괴 규준인 Mohr-Coulomb 재료모델과 시공 중 막장에서 관찰된 암석 및 암반 종류, 불연속면의 형태, 실험자료 및 암반의 등급을 평가하는 RMR 값을 근거로 하는 Hoek-Brown의 경험적 재료상수 m , s 값을 이용하여 터널의 설계 및 터널 안정해석을 수행하였다.

불량한 암반에 대해서는 RMR 측정의 정확도가 떨어지지만, 현실적으로 국내의 터널 시공 중 막장에서 유일하게 얻을 수 있는 값이며, 사고의 위험이 비교적 큰 NATM 터널 현장에서 현장계측자료를 이용한 보완기법을 소개함으로써 보다 현실적이고 합리적으로 적용 가능하도록 시도하였다. 또한 본 연구에서는 NATM 터널 공법으로 시공된 9개(2개 공구)의 막장에서 측정된 RMR 값과 터널 거동을 측정한 현장계측자료를 이용하여 터널 역해석 기법을 수행하였다.

2. 기존 문헌

터널설계에 있어서 암반의 변형과 강도에 관한 물성치의 결정은 가장 중요한 사항이다. 이런 문제의 접근에 있어서 암반의 경험적 파괴규준인 Hoek-Brown의 현장 암반모델이 주로 적용되며, 더욱 이 암반모델은 Kaiser & Bawden(1995), Hoek & Brown(1997)에 의해 지질강도정수(geological strength index)와 더불어 발전되었다.

2.1 Hoek-Brown의 기준

절리가 있는 암반에서 일반적인 Hoek-Brown의 파괴 기준은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right) \quad (1)$$

여기서 σ'_1, σ'_3 는 파괴에서의 최대, 최소 유효응력(kg/cm²), m_b 는 암반에 대한 Hoek-Brown의 m 상수, s, a 는 암반 특성에 의존하는 상수, σ_{ci} 는 암석 공시체의 일축 압축강도(kg/cm²)를 나타낸다.

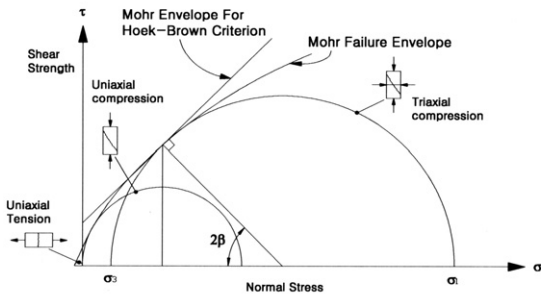


그림 1. Hoek-Brown 기준의 도해적 표현

수직응력과 전단응력에 관계 있는 Mohr의 포락선은 Hoek-Brown에 의해 제안된 그림 1과 같이 정의되었다 (1980).

2.2 지질학적 강도정수 (Geological Strength Index)

절리가 있는 암반의 강도는 신성암 조각들과 상이한 응력조건에서 자유로이 회전하거나 미끄러짐에 의한 물성치에 의존하며, 암석과 암반의 강도는 불연속면, 절리, 층

리 등의 복합적인 영향으로 강도는 저하된다. 이런 상태에서의 암석과 암반의 강도에 대하여 Kaiser & Bawden (1995), Hoek(1995), Hoek & Brown(1997)은 지질학적 강도 정수(geological strength index)로 나타내었으며 식 (2)에 의해서 암반강도 특성을 계산하였다.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28} \right) \quad (2)$$

$GSI > 25$ 의 양질의 암반에서는 기존의 Hoek-Brown의 기준이 식(3), (4)와 같이 적용되며,

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9} \right) \quad (3)$$

$$a = 0.5 \quad (4)$$

$GSI < 25$ 의 매우 불량한 암반에는 수정된 Hoek-Brown의 기준이 식(5), (6)과 같이 적용된다.

$$s = 0 \quad (5)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (6)$$

그리고 $GSI = 25$ 일 때는 어떤 식을 사용하여도 무방하며, 매우 불량한 암반의 RMR(Rock Mass Rating) 값은 측정하기가 매우 어려우므로 GSI 값 추정에는 사용할 수가 없다.

그리고 Bieniawski(1989)의 RMR 분류법에서 GSI 는 식 (7)과 같이 나타내어진다.

$$GSI = RMR_{ss'} - 5 \quad (7)$$

또한 실용적 측면에서 GSI 는 이미 손상된 막장과 관련되므로 상향조정되어야 한다.

3. 해석조건 및 방법

3.1 평가대상 터널의 현장조건 및 해석조건

대상 터널 5-18공구는 지하수면 아래로 상당한 심도에 위치하였으며 본 지하철 터널 구간의 지질은 선캠브리아기의 편마암류와 이를 부정합으로 덮고 있는 충적층으로 구성되어 있다. 주로 호상흑운모 편마암으로 구성되어 있는 편마암류는 여러 차례의 교란으로 엽리구조의 변화가 심하며 더욱이 수많은 불연속면인 단층(fault)과 단층파쇄대(fault zone), 절리(joint), 습곡(fold), 엽리(foliation)를 형성하고 이들의 영향으로 인하여 본 공사

구간에서의 암반상태는 매우 불규칙하게 교란되어져 있다.

대상터널 5-18공구의 기존의 지반입력물성치 및 막장 평균 물성치는 표 1, 2와 같다.

대상터널 2-11공구의 지질은 서울, 경기 일원에 널리 발달하는 경기기저 변성암 복합체의 편마암으로 우리나라 지층생성 시기 중 고기인 선캠브리아기에 해당된다. 조사 결과 기반암층은 균열 및 절리가 매우 심하여 암편상의 코어로 채취되었으며 풍화 정도는 심하게 풍화된 상태이다. 대상터널 2-11공구의 설계시 기존의 지반 입력 물성치는 표 3과 같다.

또한 본 평가대상인 터널 5-18공구 및 2-11공구의 표

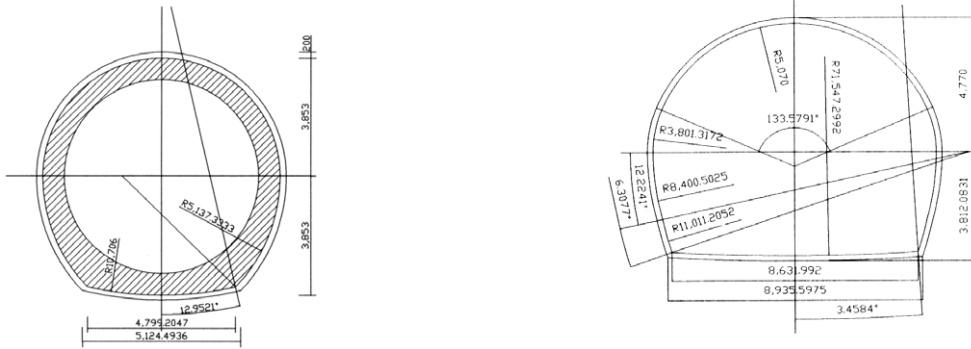


그림 2. 5-18공구 및 2-11공구의 대표 터널 표준 단면도

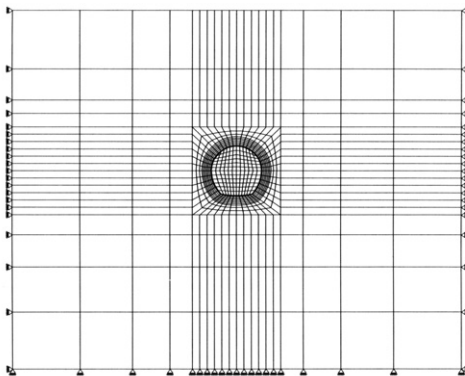


그림 3. 5-18공구 터널의 유한요소망 및 경계조건

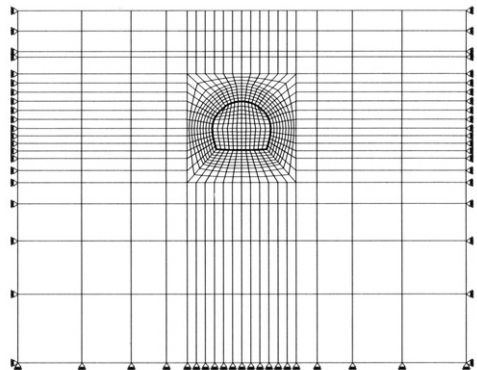


그림 4. 2-11공구 터널의 유한요소망 및 경계조건

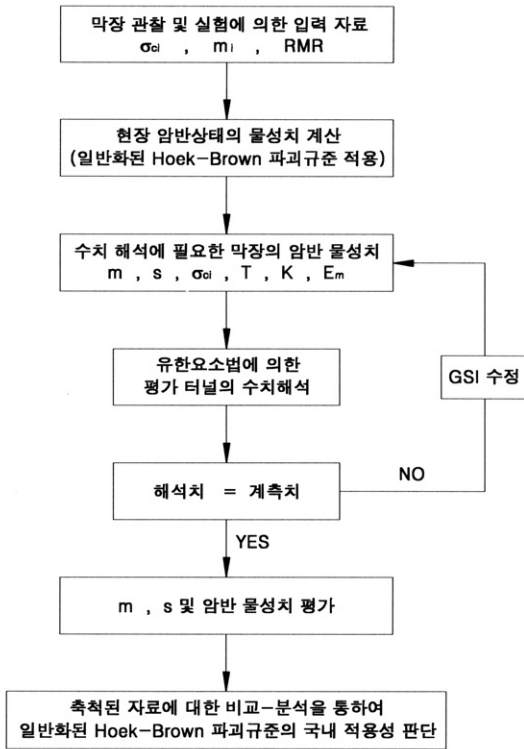


그림 5. 터널해석에 적용되는 암반물성치 평가 및 수치해석 과정

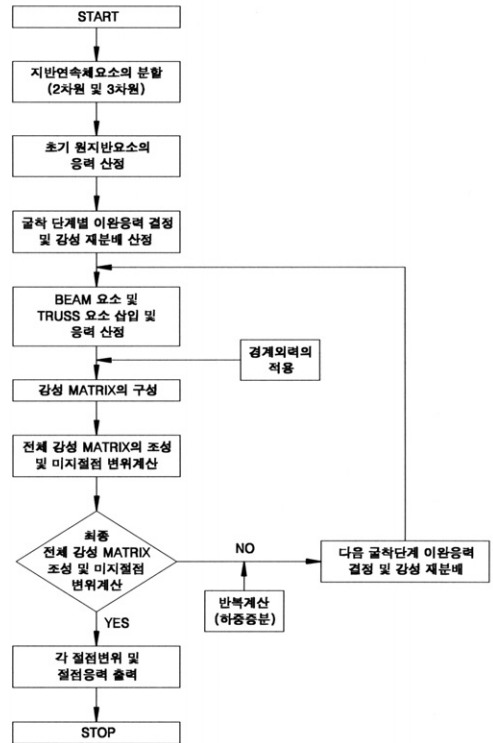


그림 6. 해석 프로그램의 개략 흐름도

표 1. 대상터널 5-18공구 설계시 해석에 사용된 기존의 지반 입력물성치

구 분	총적토	풍화암	연암
축압계수	-	0.5	0.5
탄성계수	t/m ²	2,500	10,000
포아슨비	-	0.35	0.40
내부마찰각	deg	35	40
점착력	t/m ²	3	15
단위중량	t/m ³	2.0	2.2

표 3. 대상터널 2-11공구 설계시 해석에 사용된 기존의 지반 입력물성치

구 분	총적토	풍화토	풍화암	연암
축압계수	-	0.5	0.5	0.5
탄성계수	t/m ²	2,000	4,000	30,000
포아슨비	-	0.35	0.33	0.30
내부마찰각	deg	35	35	40
점착력	t/m ²	-	-	10
단위중량	t/m ²	1.7	1.9	2.2

표 2. 대상터널 5-18공구의 막장 평균물성치

구 분	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (deg)	단위중량 (t/m ³)	변형계수 (t/m ²)	일축압축강도 (t/m ²)
범 위	1.9-3.5	29-35	1.984-2.039	4581-4885	3.8-7.1
평균치	2.6	32	2.014	4737	5.1

준단면도는 각각 그림 2와 같고 유한요소 해석에 사용된 유한요소망과 경계조건은 그림 3 및 4와 같다.

3.2 현장 암반상태를 고려한 지반물성치 평가방법

본 연구에서 적용한 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 해석 과정은 그림 5의 개략적인 흐름도에 나타내었다.

표 4는 대상터널 5-18공구의 RMR 값을 결정하기 위한 막장관찰일지이다.

5-18공구의 막장 암반구성 상태는 전 막장에 걸쳐 완전 풍화암으로 구성되어 있으며 좌측 바닥부위에서는 부분적으로 점토화된 부분이 남아 있고 우측 및 상단 부분은 완전 풍화되어 있으며, 또한 그라우팅의 효과로 지하수의 유입은 거의 차단되어있다.

표 5는 대상터널 2-11공구의 RMR 값을 결정하기 위한 막장관찰일지이다.

3.3 해석 프로그램의 개요

본 연구에 사용된 비선형 유한요소 프로그램은 실제 국내 터널해석에 범용으로 사용되는 프로그램으로 4~8절점 요소의 2차원 평면변형, 평면응력 그리고 축대칭이 가능하며 유한 요소의 종류는 지반을 모델링하는 연속체요소, shotcrete, steel-rib 그리고 lining을 모델링하는 빔요소와 그리고 rockbolt를 모델링하는 트러스 요소로 나누어진다. 해석에 사용된 프로그램의 개략적 흐름도는 그림 6과 같다.

표 4. 대상터널 5-18공구의 막장관찰일지

분류항목		평 점								
1	암석 강도	극경암		경암		연암		연암- 풍화암	풍화암	
	평점	15		12		7		4	2	
2	R.Q.D.(%)	90-100		75-90		50-75		25-50		
	평점	20		17		13		8		
3	불연속면의 간격	>3m		1-3m		0.3-1m		50- 300mm		
	평점	30		25		20		15	10	
4	불연속면의 상태	신선 절리면 암반 경암		약간 풍화 절리면 암반 경암		보통 풍화 절리면 암반 연암		심한 풍화		
	평점	25		20		12		6		
5	지하수조건	건조상태		습기 인지정도		습윤(10-25 l /min)		(25-125 l /min)		
	평점	10		8		7		4		
6	불연 속면	경사 방향	경사방향과 굴착방향이 동일방향		경사방향과 굴착방향이 서로 반대방향		주향방향과 굴착방향		주향방향이 굴착방향에 사교하는 방향	
		경사각	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	0~20°	
		평 점	0	-2	-5	-10	-12	-5	-12	
7	암반 평가	총평점	100~81		80~61		60~41		40~21	
		암 급	매우양호		양호		보통		불량	Σ 25
								<20		
								매우불량		

표 5. 대상터널 2-11공구의 막장관찰일지

분류항목		평 점								
1	암석 강도	극경암		경암		연암		연암- 풍화암	풍화암	
	평점	15		12		7		4	2	
2	R.Q.D.(%)	90-100		75-90		50-75		25-50	<25	
	평점	20		17		13		8	3	
3	불연속면의 간격	>3m		1-3m		0.3-1m		50- 300mm	<50mm	
	평점	30		25		20		10	6	
4	불연속면의 상태	신선 절리면 암반 경암		약간 풍화 절리면 암반 경암		보통 풍화 절리면 암반 연암		심한 풍화	완전 풍화	
	평점	25		20		12		6	0	
5	지하수조건	건조상태		습기 인지정도		습윤(10-25 l/min)		(25-125 l/min)	(>125 l/ min)	
	평점	10		9	8		7	4	0	
6	불연 속면	경사 방향	경사방향과 굴착방향이 동일방향		경사방향과 굴착방향이 서로 반대방향		주향방향과 굴착방향		주향방향이 굴착방향에 사교하는 방향	
		경사각	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	0~20°	
		평 점	0	-2	-5	-10	-12	-5	-12	
7	암반 평가	총평점	100~81		80~61		60~41		40~21	<20
		암 급	매우양호		양호		보통		불량	매우불량

표 6. 터널해석시 입력물성치의 범위(풍화암에 터널이 위치한 8개 현장)

계산과정		편마암 지대의 풍화암에 터널이 위치한 경우							
8개 현장	수계 산	Pre- Input	m_i		$\sigma_{ci}(t/m^2)$		RMR		GSI _{수정}
			33(편마암)		100		15-31		12-31
	FEM 해석	Pre- Output	m	s	$\sigma_{cm}(t/m^2)$	c(t/m ²)	ϕ (deg)	$E_m(t/m^2)$	
			1.42426-3.01515	0.0-0.00059	7.8-16.68	2.24-4.19	30.1-36.6	11,220-33,497	
	보고서 Input	Input	m	s	$\sigma_{ci}(t/m^2)$	T(t/m ²)	K	E(t/m ²)	
1.42426-3.01515			0.0-0.00059	100	0.224-0.42	0.173-0.668	11,220-33,497		
비교	Trueman(1988) and Trunk(1989)	c_m			ϕ_m (deg)				
		45.55-117.79			35		10,000 and 30,000		
		$c_m = 0.25 \exp(0.05 \times RMR)$, $\phi_m = (0.5 \times RMR + 8.3) \pm 7.2$							

* 천단침하의 예측치와 해석치를 일치시키는 GSI를 사용

표 7. 대상터널 5-18 공구의 천단침하비(해석치/계측치)=1에 대한 해석결과시 암반 입력물성치

5-18 공구	현장1	현장2	현장3	현장4
상재하중 (t/m ²)	15.48	15.48	15.48	12.13
mi	편마암 = 33			
터널위치	연암	풍화암	풍화암	풍화암
reading RMR	25	19	23	19
계측치=해석치 조건의 GSI	33	22	25	31
σ_{ci} (t/m ²)	500	100	100	100
천단침하 계측치(mm)	6	20	24	11
해석 2	천단침하의 해석치와 계측치를 일치시키는 조건의 GSI			
m	3.01515	2.03561	2.26582	2.80730
s	0.00059	0.0	0.0	0.00047
c(t/m ²)	21.55	9.28	10.14	12.58
ϕ (deg)	37.2	34.0	35.0	36.6
E(t/m ²)	84,040	34,559	41,073	58,018
천단침하 해석치(mm)	6	20	24	11
물성치 비교	국내 터널설계에서의 적용범위			
c(t/m ²)	40 - 100	10 - 50		
ϕ (deg)	40 - 45	35 - 40		
E(t/m ²)	80,000 - 500,000	4,000 - 100,000		

4. 터널해석시 암반 입력물성치에 대한 평가 및 적용

4.1 터널 해석에 사용되는 입력물성치의 비교분석

표 6은 연암에 위치한 5-18공구의 1개현장을 제외한 풍화암에 터널이 위치한 2개공구 8개현장의 일반화된 Hoek-Brown 현장암반 모델 적용시 FEM 해석에 사용되는 암반의 입력물성치의 범위를 나타낸다.

표 7, 8은 5-18공구 및 2-11공구의 GSI=RMR인 조건의 입력물성치와 천단침하의 계측치와 해석치를 일치시키는 GSI=RMR±X인 조건의 입력물성치를 나타내고 있다.

Trueman(1988)은 RMR을 기초로 하여 암반의 점착력과 내부마찰각을 추정하는 경험식을 발표하였으며 각각

식 (8) 그리고 (9)와 같고, Trunk(1989)는 Trueman이 발표한 내부마찰각 추정식을 개선하여 발표하였으며 식 (10)과 같다.

$$c_{rm}(t/m^2) = 25\exp(0.05 \times RMR) \quad (8)$$

$$\phi_{rm}(deg) = 0.5 \times RMR + 5 \quad (9)$$

$$\phi_{rm}(deg) = (0.5 \times RMR + 8.3) \pm 7.2; \text{ by Trunk} \quad (10)$$

수정된 GSI를 사용한 풍화암 현장에 적용된 점착력과 Trueman의 경험식의 비교는 그림 7과 같다.

본 연구를 통하여 제시되는 수정된 GSI에 따른 점착력 c 값을 Trueman의 경험식과 같은 형식으로 나타내면 식

표 8. 대상터널 2-11 공구의 천단침하비 (해석치/계측치)=1에 대한 해석결과시 암반 입력물성치

2-11 공구	현장 5	현장 6	현장 7	현장 8	현장 9
상재하중(t/m ²)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
m _i	편마암 = 33				
터널위치	풍화암	풍화암	풍화암	풍화암	풍화암
reading RMR	17	15	15	26	31
계측치=해석치조건인 GSI	30	12	14	17	30
σ _{ci} (t/m ²)	100	100	100	100	100
천단침하 계측치(mm)	32	68	57	46	25
해석 2	천단침하의 해석치와 계측치를 일치시키는 조건의 GSI				
m	2.70881	1.42426	1.52971	1.70271	2.80730
s	0.00042	0.0	0.0	0.0	0.00047
c(t/m ²)	4.14	2.24	2.40	2.65	4.14
φ (deg)	36.3	30.1	30.9	32.1	36.3
E _m (t/m ²)	31,623	11,220	12,589	14,962	31,623
천단침하 해석치(mm)	32	68	57	46	25
물성치 비교	국내 터널설계에서의 풍화암 적용범위				
c(t/m ²)	10 - 50				
φ (deg)	35 - 40				
E(t/m ²)	4,000 - 100,000				

(11)과 같다.

$$c(t/m^2) = 0.828 \exp(0.0676 \times GSI_{수정}) \quad (11)$$

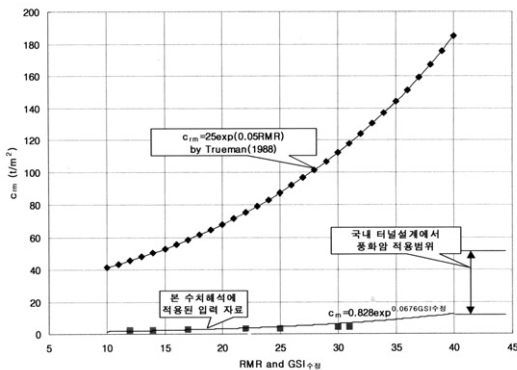


그림 7. 수정된 GSI를 사용한 8개 풍화암 현장에 적용된 점착력 c와 Trueman의 경험식과의 비교

단, 여기서 편마암의 $m_i = 33$, 풍화암의 $\sigma_{ci} = 100 \text{ t/m}^2$. 그림 8은 수정된 GSI를 사용한 풍화암현장에 적용된 내부마찰각과 Trunk의 경험식과 비교한 그림이다.

Trunk의 경험식에서는 GSI=12~31 조건에서 내부마찰각 ϕ 값의 범위는 10~30°이고 국내 터널설계에서 풍화암 적용범위는 35~40°이다. 그리고 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 적용에서 사용되는 적용범위는 30~40°으로 국내 터널설계에서 사용되는 풍화암의 내부마찰각은 현장 암반모델의 적용에서 사용되는 적용범위의 하한치 그리고 상한치보다 각각 약 110%, 100%로 하한치와 상한치 모두 약간의 차이가 나타남을 알 수 있다. 또한 Trunk의 경험식 적용에서 사용되는 풍화암의 내부마찰각은 현장 암반모델의 적용에서 사용되는 적용범위 하한치 그리고 상한치보다 각각 약 20%, 90%로 차

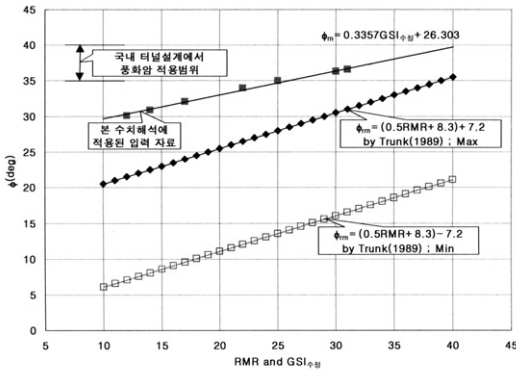


그림 8. 수정된 GSI를 사용한 8개 풍화암 현장에 적용된 내부마찰각 ϕ 와 Trunk의 경험식과의 비교

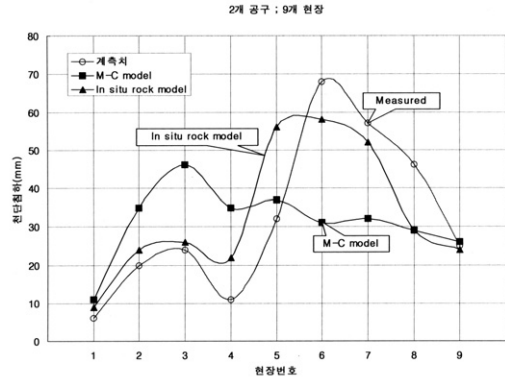


그림 9. 해석모델의 선택에 따른 9개 현장의 천단침하 비교

이가 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 제시되는 수정된 GSI에 따른 내부마찰각 ϕ 값을 Trunk의 경험식과 같은 형식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\phi \text{ (deg)} = 0.3357GSI_{수정} + 26.303 \quad (12)$$

단, 여기서 편마암의 $m_i = 33$, 풍화암의 $\sigma_{cr} = 100 \text{ t/m}^2$.

4.2 천단침하에 대한 비교분석

기존의 설계 입력자료를 이용한 Mohr-Coulomb 모델과 그리고 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 적용에서 천단침하를 예측치와 비교 분석하였으며 그림 9에서는 해석모델에 따른 9개 현장의 천단침하를 나타내었다.

결과적으로는 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델 적용에서의 천단침하는 Mohr-Coulomb 모델 적용에서의 천단침하보다 좀더 현장 예측결과에 접근하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 하한치의 식 (15)를 적용하면 천단침하는 그림 12와 같고 현장 8을 제외한 나머지 8개 현장에서 안정적인 해석을 가능하게 한다.

본 연구의 5-18 공구 4개 현장에서 하한치 식 (15)의 적용에 의한 내공변위는 그림 13과 같고, 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델 적용에서의 내공변위는 예측된 내공변위의 55~220%의 변화를 보이며 그리고 Mohr-Coulomb 모델 적용에서는 45~180%의 변화를 보인다. 또한 내공변위는 1개 현장을 제외하고는 모두 불안정 해석되나, 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델 적용에서의 내공변위가 좀더 현장 예측결과에 접근하고 있음을 알 수 있다.

표 9. 9개 현장의 RMR 값과 수정된 GSI

공 구	5-18 공구				2-11 공구				
	터널위치	연암				풍화암			
현장	현장 1	현장 2	현장 3	현장 4	현장 5	현장 6	현장 7	현장 8	현장 9
reading RMR	25	19	23	19	17	15	15	26	31
수정된 GSI	33	22	25	31	30	12	14	17	30

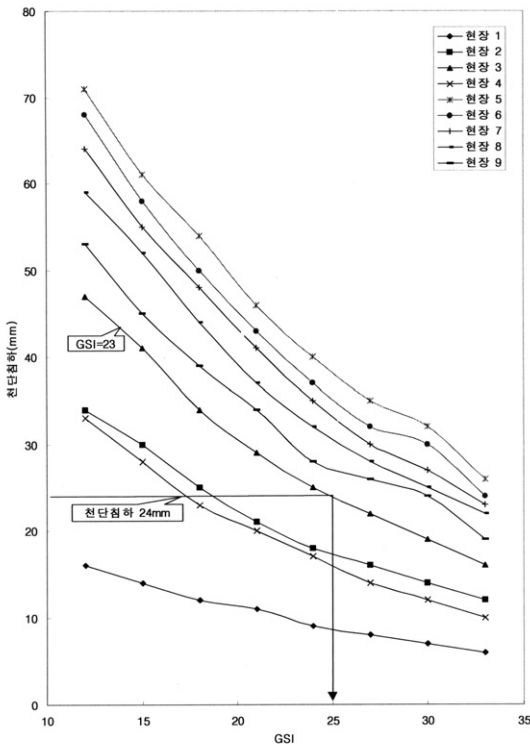


그림 10. 해석에서 천단변위의 해석치와 계측치를 일치시키는 GSI

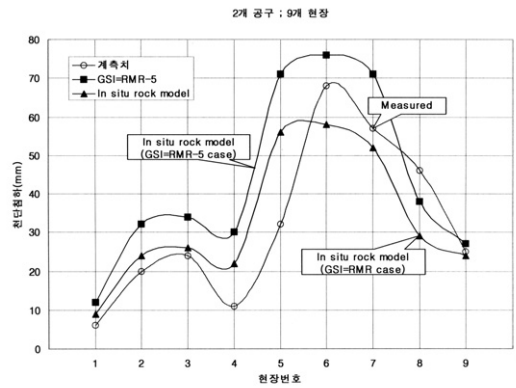


그림 12. 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 해석시 천단침하 (GSI_{하한치}=RMR-5를 사용)

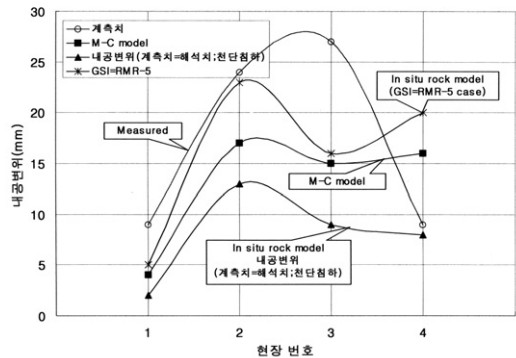


그림 13. 5-18 공구 4개 현장의 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 해석시 내공변위 (GSI_{하한치}=RMR-5를 사용)

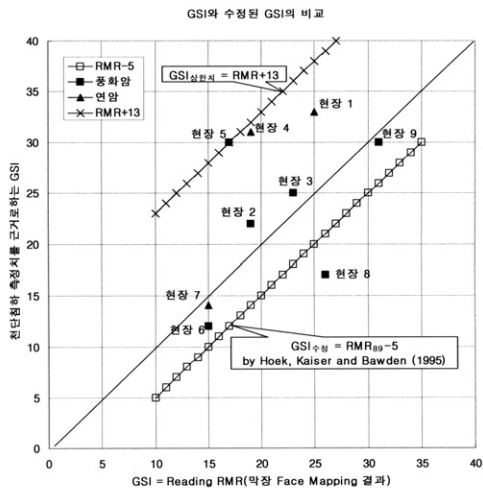


그림 11. 천단침하 계측을 근거로 하는 상한치와 하한치의 GSI 범위 (단, $m_1 = 33$, 풍화암의 $\sigma_{ci} = 100 \text{ t/m}^2$, 연암의 $\sigma_{ci} = 500 \text{ t/m}^2$)

5. 결론

본 연구의 현장 자료는 터널막장의 암반평가에서 RMR 값이 불량한 암반에 속하며 이런 경우 RMR 값의 정확도가 떨어져 일반화된 Hoek-Brown의 현장 암반모델의 적용성에 문제는 있으나, 국내의 터널 시공 중 막장에서 유일하게 얻을 수 있는 것이 RMR 값이므로 현실적으로 정확도가 떨어지지만 RMR 값을 사용할 수밖에 없다. 그리고 국내의 터널 해석시 수치해석에 적용되는 지

반 물성치의 입력자료는 시추공에서 얻어지는 암석자료를 기준으로 결정되나 막장으로부터 직접적으로 나오는 암반 입력 물성치가 필요하다. 앞으로 보다 많은 자료에 의하여 정확성에 대한 평가가 이루어지겠지만, 시공중에 얻어지는 계측자료와 막장암반상태를 입력하여 여러 차례의 입력자료 수정해석을 실시함으로써 보다 현실적이고 안정된 역해석 기법을 소개 할 수 있었다고 사료된다.

- 1) 기존의 설계 입력자료를 이용한 Mohr-Coulomb 모델과 그리고 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 적용에서 천단침하 및 내공변위를 계측치와 비교 분석한 결과, 현장 암반모델에서의 해석치가 계측결과에 좀 더 접근하고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 국내 9개 터널 현장의 일반화된 Hoek-Brown 현장 암반모델의 적용에서 지질 강도정수에 대한 하한치는 $GSI_{\text{하한치}} = RMR - 5$ 로 나타났으며, 이 값은 Hoek-Brown이 제시한 지질 강도정수의 수정치와 일치한다. 그러므로 이 값을 사용하여 역해석을 수행함으로써 NATM 터널의 안정성을 예측하고 확인할 수 있었다. 그러나 보다 많은 자료를 분석함으로써 차후의 정확도를 높일 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

1. 이봉열, 김광진, 김학문, "Hoek-Brown 암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가", 한국지반공학회 창립 10주년 기념 및 가을학술발표회 논문집, 1994, pp. 235-244.
2. 김형탁, 김학문, "3차원 터널해석에 의한 강관다단그라우팅의 보강효과" 단국대학교 석사학위논문, 1995.
3. 김상환, "근접터널의 해석과 설계에 대한 고찰", 한국지반공학회 불학술발표회 논문집, 1997, pp. 125-132.
4. 임한욱, 김치환, "NATM 시공에 의한 터널 굴착시 선행변위 추정에 관한 연구", 한국암반공학회지, 제8권, 1998, pp. 87-95.
5. 김교원, "토목기술자를 위한 암반공학(IV)", 한국지반공학회지, 제14권 제4호, 1998, pp. 222-237.
6. 서울특별시 지하철건설본부, "지하철 5호선 2-11공구 건설공사, 지반조사 보고서, 동원토질, 1995.
7. 서울특별시 지하철건설본부, "지하철 5호선 5-18공구 건설공사" 감리 보고서, 대우엔지니어링, 1996.
8. 최종 성과 발표회 논문집 지하공간개발, "암반분류시스템과 터널 보강법", 현대건설 기술연구소, 1995, pp. 207-230.
9. Bieniawski 교수 초청강연회 자료집, "터널 및 핵폐기물 처분장의 최신설계와 안전관리", 한국암반공학회, 1995, pp. 8-105.
10. 서울 지질특성에 따른 "터널의 설계-시공현황 및 개선방안", 지하철건설본부, 1992.
11. 유충식, "터널 수치해석의 올바른 적용을 위한 Work Shop", 한국지반공학회 터널분과위원회, 1996.
12. Hoek, E. and Brown, E. T., "Underground Excavation in Rock", 1980, pp. 131-149.
13. Hoek, E. and Brown, E. T., "Empirical Strength Criterion for Rock Masses", Geotechnical Engineering Division, Vol. 106, No.9, 1980, pp. 1013-1035.
14. Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F., "Support of Underground Excavations in Hard Rock", A.A.BALKEMA, 1995, pp. 84-98.
15. Hoek, E., "Rock Engineering", Evert Hoek Consulting Engineer Inc, 1998, pp. 161-221.
16. Bieniawski, Z. T., "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A.BALKEMA, 1984, pp. 97-136.
17. SMAP-S2 User Manual, Comtec Research, 1992.
18. Bell, F. G., "Engineering in Rock Masses", Butterworth Heinemann, 1992.
19. Lauro, C. A. and Assis, A. P., "Analysis of ground-support for underground excavations in rock", Tunnels and Metropolises Volume 1, A.A.BALKEMA, 1998, pp. 321-327.