

미고결 퇴적암 터널에서의 암반분류 및 보강에 관한 연구

김낙룡* · 정상섭** · 고준영***

Kim, Nakryoong*, Jeong, Sangseom**, Ko, Junyoung***

A Study on the Rock Mass Classifications and Reinforcement in Unconsolidated Sedimentary Rock Tunnel

ABSTRACT

A number of highway projects are in progress in Korea to accommodate increasing transportation demands. As the highway route becomes more complex, some projects include tunneling through unconsolidated sedimentary rock. Since an unconsolidated sedimentary rock mainly consists of rock and ground mass, the behavior and characteristics in unconsolidated sedimentary rock tunnel are quite different from typical rock tunnel. However, construction case histories and rock classifications method on unconsolidated sedimentary rock tunnel had not been developed or studied domestically. Consequently the case studies and rock classification system for unconsolidated sedimentary rock are required to better understand its behavior for tunneling. In this study, rock mass classification method is proposed to identify unconsolidated sedimentary rock based on point load and slake durability tests. Based on this, the proposed method of unconsolidated sedimentary rock can be applied well through comparisons with the results of convergence measurement.

Keywords : Unconsolidated sedimentary rock, Rock mass classifications, Point load test, Slake durability test, Reinforcement type

초 록

본 연구에서는 미고결 퇴적암을 통과하는 국내 최초 터널현장을 대상으로 시공현장의 시추코어를 이용하여 정량적인 슬레이크 내구성 시험과 점하중 강도시험을 통하여 미고결 퇴적암에 대한 정량적인 평가 방법을 제시하고 고결 정도에 따른 적절한 굴착 및 보강방법 등을 제안하고자 한다. 슬레이크 내구성 지수의 경우 3-cycle에서 변화량이 수렴되어 내구성을 구분하는 기준으로 Id_3 값을 사용함이 합리적인 것으로 분석되었으며, 미고결 퇴적암의 Id_3 평균값은 71.80, 점하중 시험결과 평균 일축압축강도 값은 10.8 MPa로 측정되었다. 실험 결과를 분석하여 일축압축강도, 고결상태, 막장확인, 습윤상태, 슬레이크 내구성 지수(Id_3)를 포함하고 있는 미고결 퇴적암 터널 시공 시 적용 가능한 암반분류 기준을 제안하였다. 또한, 미고결 퇴적암 터널에 적합한 3가지 유형의 지보패턴을 제시하였고, 이는 시공 중인 터널의 내공변위 계측자료를 분석하여 적정성을 검토하였다.

검색어 : 미고결 퇴적암, 암반분류, 점하중 강도 시험, 슬레이크 내구성 시험, 지보패턴

1. 서론

국가 교통망 확충을 위한 다양한 노선의 도로가 건설되면서, 과거에는 설계 시 지반조건이 불량한 터널구간을 회피하여 도로의 노선을 결정하였으나, 최근에 국내에서도 미고결 퇴적암 등의 특수지반을 통과하는 터널의 설계 및 시공 사례가 발생하고 있다.

* 정회원 · 한국도로공사 충청본부 팀장 (knr89@ex.co.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 정교수 (Corresponding Author · Yonsei university professor · soj9081@yonsei.ac.kr)

*** 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (jyko1225@yonsei.ac.kr)

Received September 28 2012, Revised October 22 2012, Accepted February 13 2013

안전하고 경제적인 터널을 설계하고 시공하기 위하여 대상암반의 강도와 절리 등의 공학적 특성을 고려하여 암반을 분류하고, 이에 따라 굴착 및 지보패턴을 결정하여야 한다. 일반적인 암반구간에 건설되는 터널의 경우에는 표준화된 암반분류 기법과 많은 시공사례가 있으나, 미고결 퇴적암 터널의 경우에는 암반분류에 대한 국내 기준이 없어 국외의 기준을 참고하여 사용하고 있으며, 이 또한 정성적인 평가에 의존하고 있는 실정이다.

미고결 퇴적암의 경우 각력과 기질로 구성되어 있어 터널굴착 시 낮은 지반강도에 비해 변위가 크게 발생하고, 용출수로 인한 미고결 기질의 강도저하 및 유실 발생 가능성이 높게 나타난다. 이처럼 미고결 퇴적암은 일반적인 암반 또는 토사 터널과는 상이한 성질을 보이므로 적절한 보강대책이 필요하다.

현재 국내에서는 명확한 기준이 없어 적용 사례 또한 극히 드문 실정이다. 정의진 등(2004)은 미고결 역암층이 분포하는 지역에 대한 조사 및 탐사기법을 이용하여 지반등급 선정과 터널 설계의 적용성에 대해 연구를 수행하였으나, 시공 시에는 미고결 역암층 하부로 노선을 변경하여 실제 시공은 이루어지지 않았다. 김성욱과 이규환(2010)은 동해안을 따라 삼척(북평), 영해, 포항, 울산 지역에 신생대 제3기 동안 형성된 미고결 퇴적암이 분포한다고 하였다. 이 지역의 퇴적암은 미고결 상태를 보이며 공학적으로는 지반의 거동이 풍화암과 상이하므로 암반분류와 지반정수 산정 시 고결된 암반과는 다른 적용기준이 필요하다고 제안하였다.

따라서, 본 연구에서는 미고결 퇴적암을 통과하는 국내 최초 터널현장을 대상으로 점하중 강도 시험과 슬레이크 내구성 시험을 통하여 미고결 퇴적암에 대한 정량적인 평가 방법을 제시하고 고결 정도에 따른 적절한 굴착 및 지보패턴 등을 제안하고자 한다.

이율러, 시공 중 내공변위 측정결과 분석을 통하여 제안된 암반분류 기준 및 지보패턴의 적정성을 검증하고자 한다.

2. 미고결 퇴적암의 특성

2.1 미고결 퇴적암 터널에서의 암반분류

국내의 신생대 지층은 대부분 동해안을 따라 분지 퇴적암 또는 단구 퇴적암으로 분포하거나 제주도 또는 전국 등의 현무암 등 화산암으로 소규모 분포하고 있다. 또한, 제3기층은 포항~경주 일원의 양남분지와 포항분지 등에 주로 분포하며, 석영 안산암질 화산암, 응회암 및 응회질 이암, 사암, 역암 등이 이에 해당한다. 본 연구지역인 북평1터널의 경우 제3기층의 역암층에 해당하며 이는 전반적으로 미고결 또는 반고결 상태의 퇴적암과 강한 암석이 혼재되어 있다. 또한, 연약한 층적층 내에 단단한 거력이 존재하는 등 지층 자체의 불균질성 뿐 아니라, 단단한 암층 아래 미고결 층적층이 존재하는 등 수직적 불균질성이 나타날 수 있어 시공과정에서 많은 어려움이 발생한다.

국내의 미고결 퇴적암 터널 설계사례로 미고결 퇴적암층인 송전층을 통과하는 경북 경주지역 국도 터널구간 사례가 있으며 암반분류와 지보패턴 결정을 설계단계에서 실시한 예는 있으나, 실제 시공 시 미고결 퇴적암을 피하여 시공이 실시되었다. Table 1은 경북 경주지역 송전층을 통과하는 국도 터널 설계 시 적용한 미고결 퇴적암의 암반분류 기준으로서, 지층상태, 강도특성, 수리특성 등을 고려하여 네 가지 등급으로 분류하였다(정의진 등, 2004).

본 연구대상 터널인 북평1터널은 미고결 퇴적암의 경우 일반적인 암반의 성질과 상이하므로 기존 암반의 RMR에 의한 암반분류

Table 1. Rock mass classification (Gyeongju case)

암반분류	암반등급	역암 I		역암 II		비고	
		I a	I b	II a	II b		
지층 상태	지층구분	U4~U3		U2~U1		야외조사	
	역함량	60% 이상		60% 미만		야외 및 시추조사	
강도 특성	기질고결도 (qu)	일축압축강도 30~50 MPa 국부적으로 10MPa 이상 불량구간 존재		일축압축강도 5~10 MPa 국부적으로 35~40 MPa 이상 양호한 구간 존재			
	탄성파속도 (m/sec)	2,600 이상	2,100~2,600		2,100 미만	일본 도로 기준 참조	
	침수붕괴시험	85% 이상 잔류	50% 이상 잔류		급격히 붕괴	72시간 기준	
수리 특성	투수계수 (m/s)	1.0×10 ⁻⁵ 이하				1.0×10 ⁻⁵ 이상	
	함수상태	지하수 흔적 거의 없음	지하수 흔적 거의 없음	지하수 흔적	지하수 흔적	시추코어 관찰	

Table 2. Rock mass classification (Bukpyeong 1-tunnel case)

대분류	소분류	코 어 관 찰	일축압축강도 (MPa)	전기비저항 ($\Omega \cdot m$)	탄성파속도 (m/sec)	침수붕괴 (72hr)
D I	D I _a	· 황갈색, 변질흔적 없음 · 각력과 기질 치밀	30~50 (국부적으로 10)	392이상	2,600이상	85%잔류
	D I _b	· 황갈색, 변질흔적 없음 · 흔적에 약함			2,100~2,600	50%잔류
D II	D II _a	· 적갈색, 젖은 상태 · 각력과 기질 치밀	5~10	286이하	2,100이하	급격히 붕괴
	D II _b	· 적갈색, 젖은 상태 · 각력과 기질의 부분분리				

Table 3. Rock mass classification of unconsolidated sedimentary rock (International cases)

사례	지질 및 지반특성	암반분류	비고
칠레 00터널	각력을 포함하는 절리발달이 미약한 화산암류	대형 삼축시험을 통한 직접 암반분류 수행	-
대만 고속철도	제3기 미고결 사암, 이암 및 역암 분포	유로코드에 의한 막장 매핑을 통한 암반분류	시공중 지보패턴의 요연한 적용으로 지반 불안정성 대비
일본 명석해협 대교	제3기 미고결 사암 및 이암	강도특성 및 지층의 분포특성에 따른 암반분류	-
일본 아오모리 터널	절리 발달이 미약한 제3기 화산암류 및 역암층 분포	강도특성 및 원지반 강도비등을 활용한 암반분류	수치해석을 통한 구간별 지보패턴 결정
일본 00터널	제4기의 미고결 역암층 및 사암층 분포지역	강도특성, 탄성과 탐사, 지반 구성 물질 분류를 통한 암반분류	수치해석을 통한 구간별 지보패턴 설정

Table 4. Criteria of rock mass classification in Japan railway tunnel

지반의 종류 지반등급	경암		중경암	연암	토사	
	A·B 암종	C 암종	D 암종	E 암종	F·G 암종	
					점성토	사질토
V _N	$V_p \geq 5.2$	$V_p \geq 5.0$	$V_p \geq 4.2$	-	-	-
IV _N	$5.2 > V_p \geq 4.6$	$5.0 > V_p \geq 4.4$	$4.2 > V_p \geq 3.4$	-	-	-
III _N	$4.6 > V_p \geq 3.8$	$4.4 > V_p \geq 3.6$	$3.4 > V_p \geq 2.6$	$2.6 > V_p \geq 1.5$ 또는 $\frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 6$	-	-
II _N	$3.8 > V_p \geq 3.2$	$3.6 > V_p \geq 3.0$	$2.6 > V_p \geq 2.0$ 또는 $\frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 4$	$2.6 > V_p \geq 1.5$ 또는 $6 > \frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 4$	-	-
I _N	$3.2 > V_p \geq 2.5$	$3.0 > V_p \geq 2.5$	$2.6 > V_p \geq 2.0$ 또는 $4 > \frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 2$ 혹은 $2.6 > V_p \geq 2.0$ 또는 $\frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 2$	$2.6 > V_p \geq 1.5$ 또는 $4 > \frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 2$	$\frac{\sigma_c}{\gamma H} \geq 2$	-
I _L	$2.5 > V_p$	$2.5 > V_p$	$1.5 > V_p$ 또는 $2 > \frac{\sigma_c}{\gamma H}$	$1.5 > V_p$ 또는 $2 > \frac{\sigma_c}{\gamma H}$	$2 > \frac{\sigma_c}{\gamma H}$	-

여기서, I_L 보다 불량한 지반으로 생각되는 경우 특L로 한다.

V_p =탄성파속도(km/s), $\frac{\sigma_c}{\gamma H}$ =지반강도비, σ_c =일축압축강도(tf/m²), γ =단위중량(tf/m³), H=토포피(m)

방법과는 다른 지반분류가 필요하다. 그러나 국내에는 미고결 퇴적암 구간의 터널 설계에 관한 세부 기준 및 시공사례가 없는 실정이므로, 일본 도로공단(1985) 설계요령 제3집 “지반분류 기준” 적용 예를 참조하였고, 코어 관찰, 전기비저항, 탄성파속도, 일축압축강도를 통해 함수상태 및 고결상태를 살펴보고 Table 2와 같이 암반을 네 가지 등급으로 분류하였다(한국도로공사, 2009).

국외의 경우 국내에 비해 미고결 퇴적암 암반분류 사례가 다양하며 대표적 사례는 다음 Table 3과 같다(정의진 등, 2004).

특히, 일본의 경우 제3기층과 제4기층이 많은 지역에 분포하고 있어 시공사례가 다양하게 나타났다. 일본 철도터널에서의 암반분류는 Table 4와 같고 지반 탄성파속도 V_p 와 지반강도비를 중요한 인자로 구분하고 있다. 지반 등급은 일반적으로 I~V 등급으로 구분하며 미고결지반의 경우 I₁과 특L 등급에 해당한다(일본철도협회, 1993).

이처럼, 미고결 퇴적암 터널 암반분류는 일반적인 암반 또는 토사터널과는 다른 기준을 적용시켜야 하나, 국내의 경우 미고결 퇴적암이 소규모 지역에 국한되어 발달하여, 미고결 퇴적암 터널

설계 및 시공 사례가 매우 부족하다. 또한, 국내에는 적용 가능한 기준이 없어 국외 기준을 참고하여 사용하나, 이 또한 정성적인 평가에 의존하고 있어 실제 터널시공 시 적용하기에는 한계가 있는 실정이다.

2.2 미고결 퇴적암에서의 터널설계

국내 도로터널 설계 시 대부분 해석적 방법보다는 경험적 방법인 표준지보 패턴을 적용하고 있다. 본 연구대상인 북평1터널 원설계 시 일반구간에서도 기존 적용사례를 분석하여 암질의 종류와 지보공의 역할 및 발파진동의 영향 등을 종합한 표준지보패턴을 적용하였다. 한편, 미고결 퇴적암의 경우 지반강도가 낮고 토피가 높아 과도한 상재하중 작용이 발생하고 이로 인한 터널의 변형 및 융기가 발생할 수 있다. 또한, 용출수 발생 시 미고결 기질의 강도저하로 인한 막장불안정이 예상되어 터널 원설계 시 미고결 퇴적암 지보패턴을 Table 5와 같이 제시하였다(한국도로공사, 2009).

일본의 경우 미고결 퇴적암은 이중 퇴적연암으로 구분되며 이러한 특수지반에 대한 표준지보패턴은 Table 6과 같다(일본철도협회, 1993).

Table 5. Support patterns of unconsolidated sedimentary used in the design of Bukpyeong 1-tunnel

형식	P-6-1	P-6-2	P-6-3	P-6-4
굴진장	상:1.0 m/1.0 m 하:1.0 m/1.0 m	상:1.0 m/1.0 m 하:1.0 m/1.0 m	상:0.8 m/0.8 m 하:0.8 m/0.8 m	상:0.8 m/0.8 m 하:0.8 m/0.8 m
굴착방법	링컷굴착, 가인버트	링컷굴착, 가인버트	링컷굴착, 가인버트	링컷굴착, 가인버트
숫크리트	20 cm(강섬유)	25 cm(강섬유)	30 cm(강섬유)	30 cm(강섬유)
강지보공	H-100×100×6×8	H-125×125×6.5×9	H-125×125×6.5×9	H-150×150×7×10
내부라이닝	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm
보조공법	직천공다단그라우팅	직천공다단그라우팅	직천공다단그라우팅	직천공다단그라우팅
	Elephant Foot, Foot Pile (c.t.c 1.0 m, L=5.0 m)	Elephant Foot, Foot Pile (c.t.c 1.0 m, L=5.0 m)	Elephant Foot, Foot Pile (c.t.c 0.8 m, L=5.0 m)	Elephant Foot, Foot Pile (c.t.c 0.8 m, L=5.0 m)
탄성파속도 (km/s)	1.5~3.1	1.5~3.1	1.0~2.5	1.0~2.5
지반강도비	2~4	2~4	1~2	1~2

Table 6. Support patterns of unconsolidated sedimentary rocks in Japan railway tunnel

구분	I _N		I _L (미고결지반)	
	단선	복선	단선	복선
굴진장	1.0 m	1.0 m	0.8~1.0 m	0.8~1.0 m
숫크리트 두께	10 cm (최소)	15 cm (최소)	15 cm (최소)	20 cm (최소)
강지보공	H-100×100×6×8	H-125×125×6.5×9	H-100×100×6×8	H-125×125×6.5×9
내부 라이닝	30 cm	30 cm	30 cm이상	30 cm이상

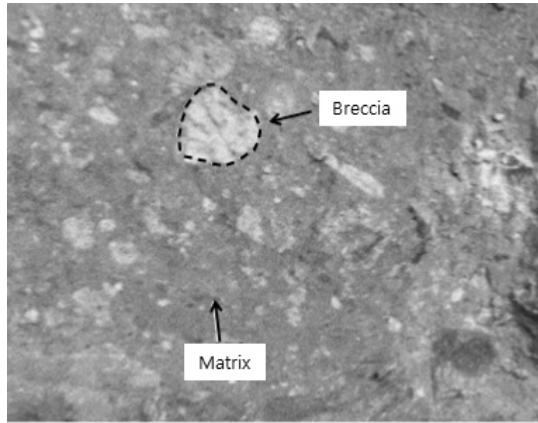


Fig. 1. Matrix and breccia of unconsolidated sedimentary rocks

이러한 표준지보패턴으로 보강량이 부족한 경우 특L지반으로 분류하여 별도의 보강대책을 세우고 있다. 국내의 경우 미고결 퇴적암을 4가지 이상으로 분류하였으나 일본의 경우 L을 기본으로 하고 이보다 약한 지반일 경우 특L로 보강하는 2등급으로 구분하는 것이 특징이다. 미고결 퇴적암의 등급 구분 시 암반의 성상이나 역학적 특성 구분에 관별이 어려움이 많다. 따라서 2등급으로 구분하는 일본에 비해 4가지 이상으로 세분화된 국내 지보패턴을 간소화하여 시공단계에 적용이 용이한 현실적인 지보패턴이 필요하다.

3. 미고결 퇴적암의 암반분류 및 지보패턴 제안

3.1 연구대상 지역 특성

본 연구대상 터널인 북평1터널은 지형침식유회과정상 만장년기 또는 노년기에 해당하여 잔구상의 구릉성산지가 불규칙하게 분포하고 있다. 본 현장의 경우 석회암 구간과 미고결 퇴적암 구간으로 구성되어 있으며 미고결 퇴적암은 Fig. 1과 같이 각력과 공극을 채우고 있는 기질(Matrix) 성분으로 구성되어 있다. 기질의 공학적 거동은 주로 구성성분, 강도, 변형특성 등에 의해 좌우되며 습윤, 건조의 반복으로 인하여 슬레이킹 현상, 팽창, 급속한 강도열화 현상이 나타나므로 굴착공사에 주의해야 한다.

3.2 미고결 퇴적암의 특성분석

3.2.1 TCR 및 RQD 결과분석

본 연구대상구간 미고결 퇴적암의 특성을 알아보기 위하여 터널 전 구간에 걸쳐 선진시추를 시행하였으며 샘플을 이용하여 미고결 퇴적암의 특성을 비교 분석하였다. 시추조사 분석 결과, Table 7과 같이 미고결 퇴적암의 경우 TCR과 RQD 값은 각각 65%, 3.5%의 평균값을 나타내며, 석회암층의 경우에는 각각 83%와

Table 7. Results of TCR and RQD

Sample No.	TCR (%)	RQD (%)	Rock
1	13	0	Unconsolidated sedimentary rock
2	58	22	
3	28	0	
4	90	0	
5	80	0	
6	65	0	
7	90	13	
8	71	0	
9	70	0	
10	86	0	
Average	65	3.5	
11	90	13	Limestone
12	100	27	
13	100	28	
14	63	25	
15	56	13	
16	54	0	
17	100	8	
18	96	13	
19	90	13	
20	66	0	
21	100	16	
Average	83	14	

14%의 결과를 나타내었다. 미고결 퇴적암의 경우 기질이 가지고 있는 특성에 의하여 절리가 상대적으로 덜 발달하여 TCR 값은 65%로 어느 정도 고결도를 가지고 있는 암반으로 나타나고 있으나, RQD 값은 3.5%로 매우 불량(very poor)한 암질을 나타내고 있다. 따라서 암반의 절리가 발달한 일반암반의 경우 RQD가 분류요소로 의미가 있으나, 절리의 발달이 미약한 미고결 퇴적암의 경우 RQD를 암반분류의 항목으로 사용하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.

3.2.2 점하중 시험 결과분석

본 연구에서 미고결 퇴적암의 경우 시료의 성형이 어려우므로 비정형시료에서 일축압축강도의 추정이 가능한 점하중 시험을 통하여 강도 특성을 파악하였고 RMR 및 ISRM의 일축압축강도 분류기준을 참고하여 고결도를 판단하였다. 사용된 점하중 강도 시험기(제조사: 제일정밀, 모델명: JI-4381)는 유압 수동식으로 최대 용량은 100kN이다. 점하중 강도 시험은 선단을 뾰족하게 한 가압부를 사용해서 Fig. 2와 같이 상하가 서로 접하는 점재하를 하고, 파괴 하중 P를 구하여 암석의 압축강도 등의 특성을 산정하는

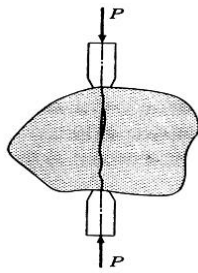


Fig. 2. Point load test

Table 8. Results of the point load test

Sample No.	Point load strength (MPa)	Rock
1	11.1	Unconsolidated sedimentary rock
2	7.6	
3	14.4	
4	14.8	
5	14.7	
6	15.7	
7	10.5	
8	8.3	
9	5.6	
10	9.3	
11	18.3	
12	4.57	
13	5.07	
14	10.3	
15	12.4	
Average	10.8	
16	19.5	Limestone
17	19.8	
18	13.8	
19	17.3	
20	29	
21	36	
22	22	
23	23	
Average	22.6	

시험이다. 시험에 사용된 시추코어의 사이즈는 NX크기의 코어이다.

점하중 강도 시험은 미고결 퇴적암 15개 케이스와 석회암층 8개 케이스를 실시하여 총 23개 케이스 시험을 수행하였다. 점하중 강도 시험 결과 미고결 퇴적암은 10.8MPa, 석회암은 22.6MPa 정도 값을 보였다. 당초 미고결 퇴적암의 기질 강도가 작을 것으로 예상하였으나 실제 시공 시 확인한 결과 고결도가 5MPa 이상으로 ISRM 기준에서 연암수준의 값을 나타냈다. 한편 석회암의 경우 암중 경계부에 있어 일반적인 강도보다 낮은 값을 보이고 있으나 미고결 퇴적암보다는 높은 강도를 나타냈다. 다음 Table 8은 점하중 강도 시험 결과를 나타낸다.

3.2.3 슬레이크 내구성 시험 결과분석

본 연구에서는 미고결 퇴적암과 석회암 층에 대하여 슬레이크 내구성 시험을 실시하여 슬레이크 내구성 지수를 구하였다. 슬레이크 내구성 시험의 경우 선진시추를 통해 얻은 시료를 이용하여 암관정 지점의 물성을 측정하고, 암반공학회 표준암석시험법 중 ‘암석의 슬레이크 내구성 지수 결정 표준시험법’에 따라 시험을 실시하였다. 이 시험법은 건습을 통한 물에 대한 암석의 풍화 특성을 결정하는 시험으로 40-90 g의 등근 형태인 시료 약 10개를 슬레이크 내구성 시험기에서 10분간 200회전 시킨 것을 1 cycle로 간주하고 각 cycle이 끝난 후의 남은 암석과 원래의 암석의 중량비를 슬레이크 내구성 지수(slaking durability index)로 결정한다. 전체 37지점에 대한 슬레이크 내구성 시험이 실시되었으며 이 중 22지점은 미고결 퇴적암, 15지점은 석회암층에 해당한다. 슬레이크 내구성 시험은 총 4 cycle에 걸쳐 실시되었으며 시험 형태 모습은 Fig. 3과 같다.

슬레이크 내구성 시험결과, 미고결 퇴적암에서의 단계별 슬레이크 내구성 지수의 평균값은 $Id_1 \sim Id_4$ 값이 각각 88.46, 78.24, 71.80, 67.93을 나타냈고, 석회암층의 경우 평균값은 각각 92.06, 87.16, 84.16, 81.86을 나타냈다. 이러한 결과를 볼 때 미고결 퇴적암의 슬레이킹에 대한 내구성이 석회암층보다 떨어짐을 확인할 수 있었다. Fig. 4와 같이 1-cycle에서 4-cycle로 진행할수록 슬레이크

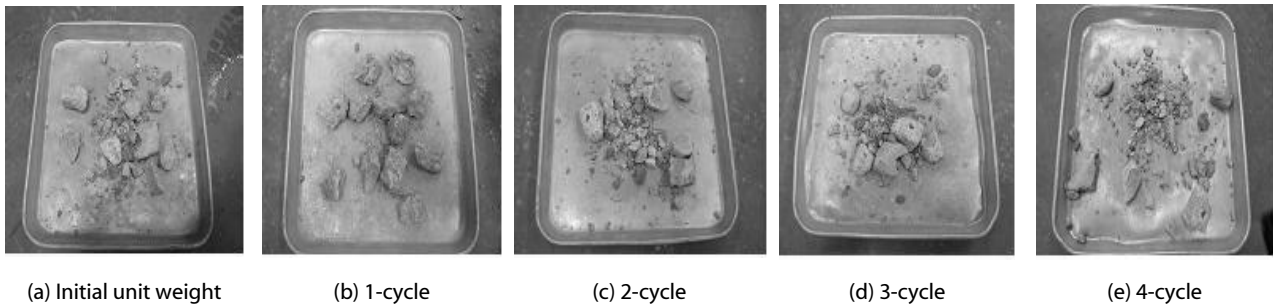


Fig. 3. The effect of the number of cycles on slaking durability test

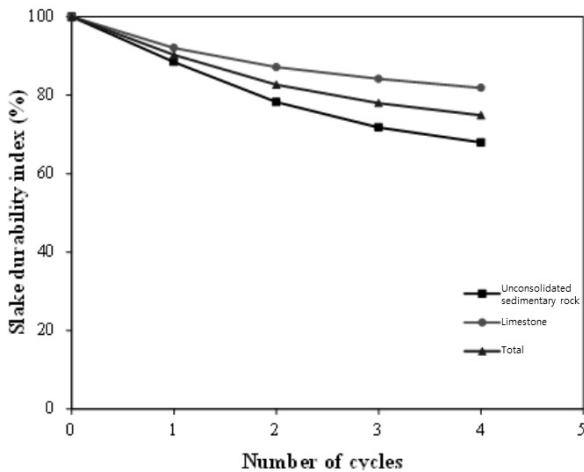


Fig. 4. Range of slake-durability index

내구성 지수의 변화량은 작아짐을 확인하였으며, 특히 2-cycle에서 3-cycle로 진행되면서 값이 수렴하는 것으로 나타났다. 기존 연구 결과 슬레이크 내구성 지수는 2-cycle이 지난 후의 Id_2 를 슬레이크 내구성 지수로 사용하는 것이 일반적이지만, 본 실험결과로 볼 때 Id_3 의 값이 수렴되는 시작점으로 나타나므로 이 값을 기준으로 하여 내구성 압과 비내구성 압으로 구분하는 것이 합리적이라고 판단된다.

3.3 미고결 퇴적암 터널의 임반분류기준 제안

일반 터널구간에서 사용되고 있는 RMR 분류나 Q system의 경우 점수 배점에 있어 불연속면에 대한 항목이 전체 배점 중 70% 이상을 차지하고 있어 각력과 기질로 구성되어 있는 미고결 퇴적암에 적용하는데 한계점이 있다. 또한, 본 연구대상 터널의 TCR과 RQD값을 분석한 결과 미고결 퇴적암의 경우 TCR 값은

65%로서 어느 정도 고결도를 가지고 있으나, RQD값은 3.5%로서 매우 불량한 암질을 나타내는 것으로 분석되었다. 이처럼 절리의 발달이 미약한 미고결 퇴적암의 임반분류에서는 RQD값을 적용할 수 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 실제 시공 시 터널막장 및 시추코어로 정량적인 시험이 가능한 점하중 강도시험에 의한 일축압축강도와 슬레이크 내구성 시험을 통한 내구성지수를 미고결 퇴적암의 정량적인 임반분류에 가장 중요한 적용요소로 선정하였다. 또한, 시공 시에 막장면에서 확인 가능한 항목들을 분류기준으로 선정하였으며, 용수의 경우 RMR 분류기준을 참조하였다. 이와 같은 시험법과 확인 가능한 항목 기준으로 미고결 퇴적암의 고결도 등에 따라 미고결 P1~P3과 같이 3가지 등급으로 분류하였다. 기질의 일축압축강도는 비정형시료에 대한 점하중 강도 시험을 실시하여 일축압축강도를 추정하였으며, RMR 및 ISRM의 일축압축강도 분류기준을 참고하였다. 일반적으로 1MPa 이하인 경우 대단히 연약한 암(풍화토)에 해당하고 1~5MPa인 경우 매우 연약한 암(풍화암), 5 MPa 이상인 경우 연암에 해당하므로, 기질 기준 1 MPa과 5 MPa을 중심으로 미고결 퇴적암 암반을 분류하였다. 또한, 시공 시에 막장면에서 확인 가능한 항목들을 분류기준으로 제안하였으며, 용수에 의한 습윤상태에 대한 판단은 RMR의 분류기준을 참조하여 완전건조 또는 습기가 있음, 젖어 있음, 물방울이 떨어짐으로 구분하였다. 슬레이크 내구성 지수의 경우 본 연구에서 얻은 슬레이크 내구성 시험결과는 기존 연구결과와는 달리 3-cycle 슬레이크 내구성 지수(Id_3)가 수렴의 시작점으로 나타났다. 이 결과와 Taylor(1988)의 연구결과를 참고하여, 기질의 3-cycle 슬레이크 내구성 지수(Id_3) 60%를 고결도의 판단기준으로 결정하였다. 따라서 본 연구에서 상기 시험을 종합적으로 검토하여 미고결 퇴적암 터널에서 현장 시공시 적용이 용이한 정량적 임반분류 기준을 Table 9와 같이 제안하였다.

Table 9. Proposed rock mass classification criteria for unconsolidated sedimentary rocks

항목	미고결 P-1	미고결 P-2	미고결 P-3
	고결도가 양호한 미고결 퇴적암	고결도가 보통인 미고결 퇴적암	고결도가 낮은 미고결 퇴적암
일축압축강도 (기질 기준, MPa)	5 이상	1 ~ 5	1 이하
고결 상태	역과기질 치밀	역과기질 치밀	역과기질 분리
막장 확인	주머니 칼에 쉽게 벗겨지지 않으며 지질 해머의 타격에 얇은 흠집이 생김	지질해머의 타격으로 부서지고 주머니칼에 벗겨짐	손톱으로 눌러짐
습윤상태	완전건조 또는 습기가 있음	젖어 있음	물방울이 떨어짐
슬레이크 내구성 지수 (기질 기준, Id_3)	60 이상	60 이하	60 이하

3.4 미고결 퇴적암 터널의 지보패턴 결정

국내 터널설계 사례를 살펴보면 경주지역 송전층 암반분류 및 북평1터널 원설계 시 미고결 퇴적암에 대하여 4가지 이상으로 암반분류 및 지보패턴을 사용하도록 되어 있는데, 이는 실제 터널 시공 시 유사한 물성의 미고결 퇴적암의 암질 판정과 적절한 보강을 하는데 많은 어려움이 예상된다. 따라서 본 연구에서는 제안한 미고결 퇴적암의 정량적인 암반분류기준에 따라 지보패턴을 터널의 안정성 및 시공성을 검토하여 3등급의 미고결 퇴적암에 대한 적절한 지보패턴을 결정하였다.

미고결 퇴적층 구간을 하나의 지반 물성으로 산정한 후, 터널 안정성 해석 결과를 참조하여 P-6-1 ~ P-6-4의 4가지 지보패턴으로 분류하였으나, 선진시추 조사결과 미고결 퇴적암의 암반특성이 양호한 내구성의 특성을 보이는 것으로 조사되었다. 따라서 터널의 원설계 시 지보패턴의 안정성 및 시공성을 검토하기 위하여 2차원 유한요소 해석을 수행하였다. 터널 해석은 2차원 범용 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS/GTS를 이용하였고 터널 굴착에 따른 지반의 응력 영향권 전 영역을 해석 영역으로 설정하기 위하여 측면 경계의 4D 및 하부 경계 6H를 해석영역으로 설정하고, 상부를 지표면으로 설정하였다. 적용 모델은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 모델을 사용하여 안정성 해석을 실시하였다. 해석 단계별 하중분담율과 지반물성은 Table 10, 11과 같다.

수치해석 결과 양호한 미고결 퇴적층 지반이 출현할 경우, 원설계 시 지보패턴을 적용한 해석을 실시한 결과 천단변위는 약 40%, 슛크리트 휨 압축응력은 10~35%가 감소됨을 확인할 수 있었다.

이러한 전산해석 결과를 고려해 미고결 퇴적암의 지반 물성이 원설계 당시보다 좋은 경우에는 지반 변위 및 지보재의 허용 응력 등에 여유가 있으므로 시공성과 경제성 등을 고려하여 Table 12 및 Fig. 5와 같이 변경하여 제안하였다.

미고결 퇴적암의 일축압축강도가 5MPa를 상회하고 슬레이킹 지수(I_d)가 60%이상이며 비교적 양호한 암반이 출현할 경우, 기존의 설계된 미고결 퇴적암의 지보패턴과는 달리 일반구간에 추가보강을 실시하는 미고결 P-1 표준지보패턴으로 제시하였다. 여기서, 일반구간에 적용된 록볼트 등을 미고결 퇴적암에 적용하게 될 경우 록볼트의 인발력이 설계기준에 도달하지 못해 보강효과가 떨어지게 되므로 전단면에 걸쳐 일반강판다단을 보조공법으로 적용하였다. 원설계시 제시된 4가지 표준지보패턴인 P-6-1~P-6-4는 실제 터널 시공 시 유사한 물성의 미고결 퇴적암에 대한 암질 판정으로 다양한 지보패턴을 결정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이라 판단된다. 따라서, 고결도가 보통인 미고결 퇴적암에 대해서 당초 원설계시 제시되었던 표준지보패턴인 P-6-1과 P-6-2를 단순화하여 미고결 P-2 표준지보패턴으로 결정하였고, 고결도가 약한 미고결 퇴적암에 대하여는 당초 표준지보패턴인 P-6-3과 P-6-4를 단순화하여 미고결 P-3 표준지보패턴으로 제시하였다.

제안된 지보패턴에 대한 적정성을 검증하기 위하여 원설계 지보패턴과 변경된 지보패턴을 적용하여 수치해석을 실시하였다. 해석 결과는 Table 13 및 Fig. 6과 같다.

원설계 지보패턴을 적용할 경우, 미고결 퇴적층의 지반 물성이 상향되었을 때 터널의 변위는 원설계 미고결 퇴적층 물성을 적용한

Table 10. Load distribution ratio in numerical analysis

STEP	Construction sequence	Load distribution ratio (%)
0	Initial ground condition	-
1	Umbrella Arch Method	-
2	Excavation of upper half-section	40
3	Soft shotcrete + Rock bolt	30
4	Hard shotcrete	30
5	Excavation of lower half-section	40
6	Soft shotcrete + Rock bolt	30
7	Hard shotcrete	30

Table 11. Soil properties in numerical analysis

Category	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio
Unconsolidated sedimentary layer	20	0.2	33	1000	0.3
Unconsolidated sedimentary layer(good)	20	0.3	33	2000	0.3

Table 12. Proposed standard support patterns for unconsolidated sedimentary rocks

형식	미고결 P-1	미고결 P-2	미고결 P-3
굴진장	상:1.2 m/1.2 m 하:1.2 m/1.2 m	상:1.0 m/1.0 m 하:1.0 m/1.0 m	상:0.8 m/0.8 m 하:0.8 m/0.8 m
굴착방법	반단면	링컷굴착, 가인버트	링컷굴착, 가인버트
숫크리트	20 cm(강섬유)	20 cm(강섬유)	30 cm(강섬유)
록볼트	-	-	-
강지보공	LG-70×20×30	H-100×100×6×8	H-125×125×6.5×9
내부라이닝	30 cm	40 cm	40 cm
인버트	-	하부인버트	하부인버트
보조공법	일반강관다단그라우팅	대구경 직천공 강관다단그라우팅	대구경 직천공 강관다단그라우팅
	-	Elephant Foot, Foot Pile (c.t.c 1.0 m, L=5.0 m)	Elephant Foot, Foot Pile (c.t.c 0.8 m, L=5.0 m)
기질의 압축강도 (MPa)	5 이상	1~5	1 이하
슬레이크 내구성 지수(Id ₃)	60 이상	60 이하	60 이하

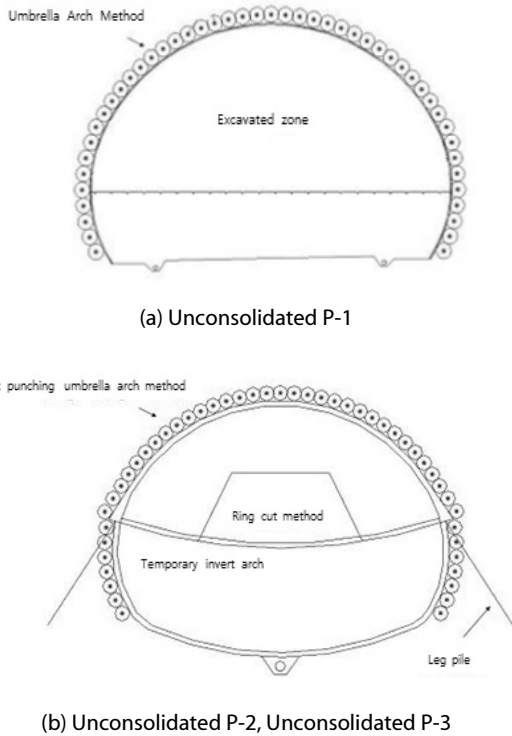


Fig. 5. Proposed standard support patterns for unconsolidated sedimentary rocks

경우에 비해 천단변위의 경우 약 40% 정도, 숫크리트 휨압축응력은 약 30% 정도 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 미고결 퇴적층의 지반 물성이 상향되고 지보패턴을 변경하였을 경우는 P-6-4 지보패

Table 13. Results of numerical analysis with proposed support patterns

		Case 1	Case 2	Case 3
지반조건		미고결 퇴적층	양호한 미고결 퇴적층	
적용 지보 패턴		미고결 P-3 지보패턴	미고결 P-3지보패턴	미고결 P-1 패턴
최대 변위(mm)	천단	13.4	7.9	8.8
	측벽	5.2	3.4	4.4
최대 숫크리트 휨응력 (MPa)		7.45	5.2	6.8

턴을 적용한 경우보다 변위 및 숫크리트 휨응력이 다소 증가하지만, 터널의 안정성에는 큰 영향이 없는 수준으로 해석되었다. 따라서 양호한 미고결 퇴적층의 경우 변경된 지보 패턴으로도 충분히 터널은 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 미고결 퇴적암 터널에서의 변형 거동

4.1 터널 내공변위 관리기준

터널 계측의 목적은 터널 굴착에 따른 주변지반 및 지보재의 역학적 거동 특성을 파악하여 당초 설계 및 시공의 타당성을 검토하는 데 있다. 본 연구에서는 계측을 통하여 미고결 퇴적암에 적용된 지보패턴의 적정성을 검증하고 장기적인 변형거동을 파악하였다. 시공 중의 압반평가와 계측에 의한 평가는 상호 검토해야 하며 굴착에 따른 압반거동에 미치는 영향을 고려하여 종합적으로 설계,

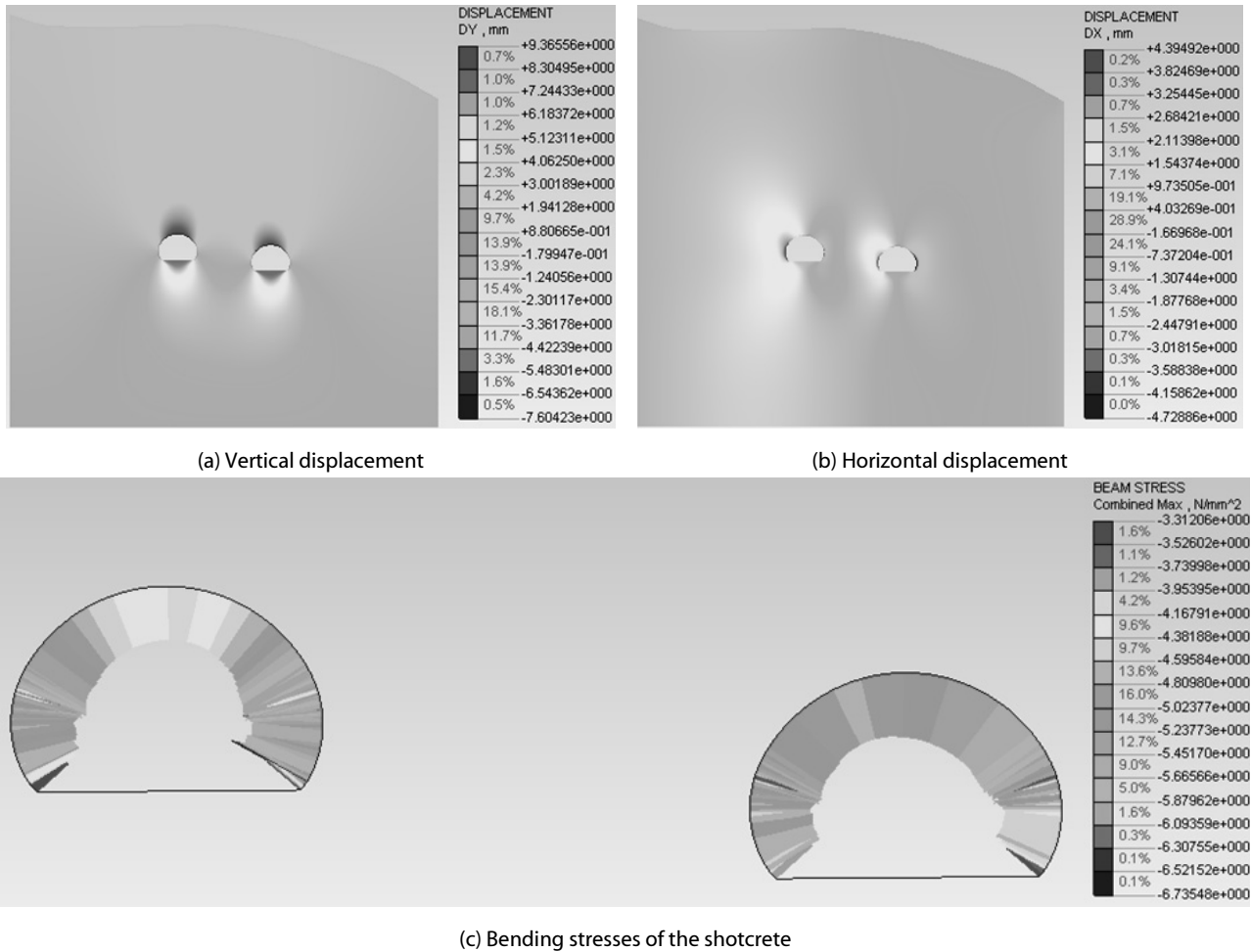


Fig. 6. Results of numerical analysis with proposed support patterns

Table 14. Maintenance standards for convergence

관리기준	주의 레벨 I		주의 레벨 II
	내공변위	변위속도	내공변위
경암지반	2~3 cm	5mm/day가 3일간 계속	3~5 cm
애추(Talus)	2~3 cm	5mm/day가 3일간 계속	5~7 cm
토사 지반	사질토	5mm/day가 3일간 계속	3~5 cm
	점성토	1cm/day가 3일간 계속	5~7 cm
팽창성지반	10 cm	3cm/day가 3일간 계속	20~30 cm
대응책	· 계측결과 현장의 상황을 종합적으로 판단하고 대책을 결정한다. · 계측 횟수를 증가시키고 시공시 주의		· 시공법의 변경 · 보조공법의 추가 · 지보부재의 추가

시공조건을 판단하여야 한다. 관리기준은 지반의 거동상태, 인접구조물의 안전한계와 암반의 역학적 조건에 의하여 결정되므로 정량화된 기준을 정확히 제시하기 어렵다. 이 때문에 이론해석

및 수치해석, 혹은 유사 조건하의 시공실적을 참고하여 관리기준을 정하고 있다. 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 터널 내공변위 관리기준은 Table 14와 같다(국토해양부, 2010).

Table 15. Measured convergence for unconsolidated sedimentary rocks and limestones

구분	평균 최대변위량 (mm)	평균 변위진행속도 (mm/day)	평균 수렴일수 (day)
미고결 퇴적암	8.15	0.068	119
석회암층	2.37	0.048	49

4.2 내공변위 계측을 통한 지보패턴 적정성 검토

굴착이 완료되고 내공변위 수렴이 이루어진 북평1터널 전 구간 에 걸쳐 미고결 퇴적암 구간 52개 지점, 석회암층 구간 21개 지점 에 서의 계측결과 분석을 통해 지보패턴의 적정성을 검증하였다. 당초 원설계시 미고결 퇴적암의 경우 P-6-1에서 P-6-4까지 다양한 지보 패턴이 필요할 것으로 예상되었으나, 실제 사공 시 본 연구를 통해 제안된 암반분류를 실시한 결과 미고결 P-1의 고결도가 양호한 암반이 전 구간에 걸쳐 분포하였다. 본 연구에서 제시한 미고결 퇴적암의 암반분류 및 제안된 지보패턴에 따라 사공이 실시되었으며, 이 후 전 구간에 대한 내공변위 계측을 통해 그 적정성을 확인하였다. 또한, 미고결 퇴적암과 석회암층의 내공변위양상을 비교분석하였다. 다음 Table 15와 같이 미고결 퇴적암과 석회암층 의 평균 변위진행속도는 각각 0.068 mm/day, 0.048 mm/day로 나타나 미고결 퇴적암이 석회암층에 비하여 변위진행속도가 약 40% 빠른 것으로 측정되었고 이는 모두 내공변위 관리기준치를 만족하였다.

수렴기간은 변위가 더 이상 증가하지 않는 것을 기준으로 하며 본 연구에서는 약 1주일 단위 측정 시 변위 발생이 없는 시점으로 하였다. 미고결 퇴적암과 석회암층 수렴기간은 각각 119일, 49일로 미고결 퇴적암의 수렴기간이 두 배 이상 소요되는 것으로 확인되었 다. 평균 최대 변위량 또한 미고결 퇴적암이 8.15 mm, 석회암층이 2.37 mm로 미고결 퇴적암의 변위량이 더 크게 측정되었다.

따라서, 미고결 퇴적암은 일반적인 암반의 내공변위 양상과 비교하였을 때 변위속도에는 큰 차이가 없으나 장기간에 걸쳐 변위가 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만, 본 연구지역 미고결 퇴적암의 변위양상은 변위속도 및 내공변위 기준을 모두 만족하고 있어 제안된 지보패턴의 지보량은 적절한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 미고결 퇴적암에서의 정량적인 암반분류 기준을 제시하고 적절한 지보패턴을 결정한 후 실제 사공시 계측결과를 확인함으로써 국내 미고결 퇴적암에서의 암반분류 및 보강의 적정 성을 검증하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 미고결 퇴적암의 사공 중 암반분류에 대하여 국내의 사례 분석

결과 미고결 퇴적암의 고결도를 확인할 수 있는 정량적인 시험 방법으로 점하중 강도 시험과 슬레이크 내구성 시험 값을 중요 요소로 도출하였다.

- (2) 실내시험을 시험을 실시한 결과, 슬레이크 내구성 지수의 경우 3-cycle에서 변화량이 수렴되어 내구성을 구분하는 기준으로 Id₃ 값을 사용하였으며, 미고결 퇴적암과 석회암의 Id₃ 평균값은 각각 71.80, 84.61로 나타나 미고결 퇴적암의 내구성이 석회암 층보다 약한 것으로 나타났다. 점하중 시험의 경우 미고결 퇴적암의 평균 일축압축강도 값은 10.8 MPa, 석회암이 평균 일축압축강도 값은 22.6 MPa로 측정되었다.
- (3) 실내 시험결과를 분석한 결과 기질의 3-cycle 슬레이크 내구성 지수 Id₃가 60%일 때를 내구성암과 비내구성암의 판단기준으 로 결정하였고, 점하중 강도값의 평가기준은 ISRM의 압축강도 분류기준을 참조하여 결정하였다. 이를 바탕으로 일축압축강 도, 고결상태, 막장확인, 습윤상태, 슬레이크 내구성 지수를 분류요소로 포함하고 있는 미고결 퇴적암 터널의 사공 시 적용 이 용이한 암반분류 기준을 제안하였다.
- (4) 국내의 경우 미고결 퇴적암 터널에 대하여 4가지 이상의 지보패 턴을 사용하고 있으나, 이는 너무 세분화되어 있어 사공시 지보패턴 결정에 어려움이 있다. 따라서 제안된 미고결 퇴적암 암반분류 기준을 바탕으로 기존 4가지 패턴을 2가지 지보패턴 으 로 단순화하고 양호한 미고결 퇴적암에 대한 추가적인 1가지 패턴을 제시하여 실제 미고결 퇴적암 터널 시공현장에서 보다 현실적인 적용이 가능한 지보패턴을 제안하였다.
- (5) 제안된 지보패턴의 적정성 검토를 위하여 내공변위를 측정하였 고, 그 결과 미고결 퇴적암은 일반적인 암반의 내공변위 양상과 비교하였을 때 변위속도에는 큰 차이가 없으나 장기간에 걸쳐 변위가 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만, 본 연구지역 미고결 퇴적암의 변위양상은 변위속도 및 내공변위 기준을 모두 만족하고 있어 제안된 지보패턴의 지보량은 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2011-0030842).

References

- International Society for Rock Mechanics (1981). *Rock Characterization Testing & Monitoring*, Pergamon Press Ltd, pp. 30-33.
- Japan Highway Public Corporation (1985). *日本道路工團NATM暫定指針 設計要領 第三集*, Japan Highway Public Corporation (in Japanese).
- Jeong, Y. J., Lee, Y. H., Yoon, Y. S., Kim, T. G., Na, Y. S., Choi, S. S. and Seo, Y. S. (2004). "Geological Characteristics of Conglomerate Layer of the Cenozoic Era in Gyeonju-Gampo area," *Conference Proceedings of the Korean Society of Engineering Geology 2004*, pp. 67-73 (in Korean).
- Kim, S. W. and Lee, K. H. (2005). "Rock Classification and Aggregate Evaluation of Tertiary Unconsolidated Deposits," *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 3, p.27-40 (in Korean).
- Korea Expressway Corporation (2009). *Samcheok-Donghae Construction Document*, Korea Expressway Corporation.
- Korea Society for Rock Mechanics (2007). *Standard Test Method for Determination of the Slake-durability Index of Rock*, Korea Society for Rock Mechanics, pp. 245-247 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). *Highway Design Manual(I)*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- The Japanese Railway Society (1993). *道路トンネル觀察計測指針*, The Japanese Railway Society (in Japanese).