

절취사면의 암질평가사례

Case Study of Rock Mass Classifications in Slopes

신희순¹⁾, Hee-Soon Shin, 한공창¹⁾, Kong-Chang Han, 선우 춘¹⁾, Choon Sunwoo, 송원경²⁾, Won-Kyong Song, 신중호²⁾, Joong-Ho Synn, 박 찬²⁾, Chan Park

¹⁾ 한국자원연구소 책임연구원, Principal Research Scientist, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

²⁾ 한국자원연구소 선임연구원, Senior Research Scientist, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

SYNOPSIS : Rippability refers to the ease of excavation by construction equipment. Since it is related to rock quality in terms of hardness and fracture density, which may be measured by seismic refraction surveys, correlations have been made between rippability and seismic P wave velocities. The 1-channel signal enhancement seismograph(Bison, Model 1570C) was used to measure travel time of the seismic wave through the ground, from the source to the receiver. The seismic velocity measurement was conducted with 153 lines at 5 rock slopes of Chungbuk Youngdong area. Schmidt rebound hardness test were conducted with 161 points on rock masses and the point load test also on 284 rock samples. The uniaxial compressive strength and seismic wave velocity of 60 rock specimens were measured in laboratory. These data were used to evaluate the rock quality of 5 rock slopes.

Keywords : rippability, seismic velocity, uniaxial compressive strength, point load strength test, Schmidt rebound hardness test

1. 서론

사면의 절취시공을 할 경우 절취방법결정과 절취비용을 산출하기 위하여 절취난이도를 토층, 리핑암, 발파암으로 구별하고 있다. 절취의 난이도는 암석의 강도 뿐만아니라 불연속면의 발달 빈도에 따라 결정된다. 현장 암반의 탄성파전파속도는 암석의 강도와 관련되는 암석의 자체속도 뿐만아니라 불연속면의 빈도를 포함하고 있으므로 현장 암반을 대상으로 하는 탄성파전파속도 측정은 굴착난이도 경계를 규명하는 데 효과적인 방법이다. 암반의 경우에는 암석의 구성물질, 강도, 균열상태 등에 따라 전파속도가 변하며 이와같은 특성으로 인하여 탄성파의 전파속도는 토공작업시 리퍼의 작업능력을 판단하는 기준이 되고 있다.

본 연구에서는 충북 영동의 ○○공사지역에서 5개 절개면에 대한 암반등급분류를 하기 위하여 153개 측선을 통하여 현지암반의 탄성파전파속도를 측정하였고 161개지점 암반에 대하여 슈미트햄머에 의한 타격시험, 60개지점의 284개 암석시료에 대한 점하중강도시험을 수행하였고 또한 20개 지점에서 대표적인 암석시료를 채취하여 실험실내에서 이들 60개 시험편들에 대한 일축압축강도 및 탄성파 전파속도를 측정하였다. 이들자료들을 상호 비교분석하였다.

2. 조사지역의 지질개요

지질은 중생대 백악기의 만계리역암층, 규동리층, 화산암류, 반상화강암과 석영 반암층, 제4기의 충적층으로 구성되어 있다. 만계리역암층은 화강암질 편마암을 주정합으로 피복하여 조사지역 일대에서 단층으로 접촉되어 규동리층의 세일에 부정합으로 피복되어 있으며 주요 구성암석은 적색의 사질역암으로 대체로 30~40°의 층리경사를 보여주고 있다. 규동리층은 만계리역암을 정합으로 피복하여 주로 암회색 내지 흑색 세일로서 주요 구성광물은 석영, 장석류, 흑운모, 백운모 등이 세편상으로 구성되어 있다. 화산암류는 화강암과 석영반암내에 포획체로 분포되어 있으며 반암류와 반상응회암으로서 세립질의 장석반정, 석영반정, 각력 등으로 구성되어 있다. 석영반암은 중생대 백악기의 모든 암체들을 관입하였으며 주요 구성광물은 사장석, 흑운모각섬석 등으로 유동구조를 보이며 석영과 장석의 경계에서 미문상 석리를 이루기도 하며, 규장암과 비슷한 면모를 보여주는 것이 특징적이다. 제4기의 충적층은 자갈, 모래, 점토 등으로 구성되어 있으며 상기의 기반암들을 부정합으로 피복하고 있다.

3. 토사, 리핑암, 발파암의 분류기준

3.1 균열정도와 탄성파전파속도

암반 굴착의 경우 가장 일반적인 분류방법은 인력에 의한 굴착을 제외하고는 기계굴착과 발파에 의한 굴착으로 구분하고 대상지반을 경암, 중경암, 연암 그리고 토사로 구분하여 굴착방법과 대응시키는 것이 일반적이다. 이와같이 굴착작업을 대상으로 하는 암반분류에 있어서는 여러평가 요소들 중에서 대표적인 것이 암반의 탄성파속도이다. 탄성파는 일반적으로 고결도가 높은 암석 등에서는 전달 속도가 빠르지만 균열이 많은 진행된 암은 그 속도가 늦기 때문에 탄성파속도가 같더라도 암질이 다르게 되는 경우가 있어 탄성파속도와 암중, 암질을 종합하여 검토할 필요가 있다. Ikeda(1969)는 암석의 균열정도를 알기 위한 균열계수를 다음과 같이 제안하였다. 균열계수는 현장의 탄성파속도와 동일 현장에서 측정한 균열 없는 암석시험편의 탄성파전파속도를 측정하여 다음식으로 구한다.

$$C_r = 1 - \left[\frac{V_2}{V_1} \right]^2 \quad (1)$$

여기서, V_1 : 균열이 없는 암석시험편의 탄성파전파속도

V_2 : 원지반의 탄성파속도

균열이 작으면 $V_1 \approx V_2$ 로 되어 C_r 은 0에 가깝고 반대로 균열이 많으면 V_2 가 V_1 에 비하여 작게되어 C_r 은 1에 가깝다.

3.2 굴착의 난이도 결정

굴착시공을 할 경우 굴착방법과 비용등을 결정하기 위하여 굴착난이도를 토층(Digging soil), 리핑암, 발파암 등으로 구분하는 데 그림 3.1은 현장에서 간편하고 실용적으로 사용될 수 있는 분류기준의 하나이다. 이 분류기준은 굴착대상 암반내의 절리간격과 현장에서 간단히 측정할 수 있는 Schmidt hammer에 의한 일축압축강도 또는 점하중시험기(Point load tester)에 의한 점하중 강도를 이용한 분류방법이다. 절리간격과 강도의 관계에 따라 암반을 인력에 의한 굴착(Digg)이 가능 암반, 기계굴착(Rip)이 가능한 암반, 발파에 의해 붕괴(Blast to loosen)되는 암반, 발파에 의해 균열(Blast to fracture)이 발생하는 암반의 크게 4가지로 분류하고 있다. 이방법은 현장에서 간편하고 비교적 합리적으로 암반분류를 할 수 있는 데 좀더 세분화한 분류가 필요할 때는 탄성파전파속도를 고려한 분류기준을 추가로 사용하면 된다. 국내 암반등급 기준과 굴착공법(토목포셈)¹⁾에 따르면 자연상태의 탄성파속도가 1,800m/sec 이하의

암반은 리핑이 가능하고 1,800m/sec 이상인 암반에서는 발파작업을 시공할 수 있다고 규정하고 있다.

4. 현지암반시험

4.1 현지암반의 탄성파전파속도 측정

4.1.1 측정구간

충북 영동의 ○○공사지역에 있어서 A, B, C 지역의 절개면에 대한 현지암반의 탄성파속도 측정 및 암질평가를 통한 암반등급분류를 하기 위하여 153개측선에서 탄성파의 전파속도를 측정하였다(그림 4.1 참조). 조사는 공사중인 각 구역에 대하여 거리별 탄성파 도달시간을 측정하였다. 그림 4.2는 조사대상 암반사면(A1)의 전경 및 측정위치를 보여주고 있다.

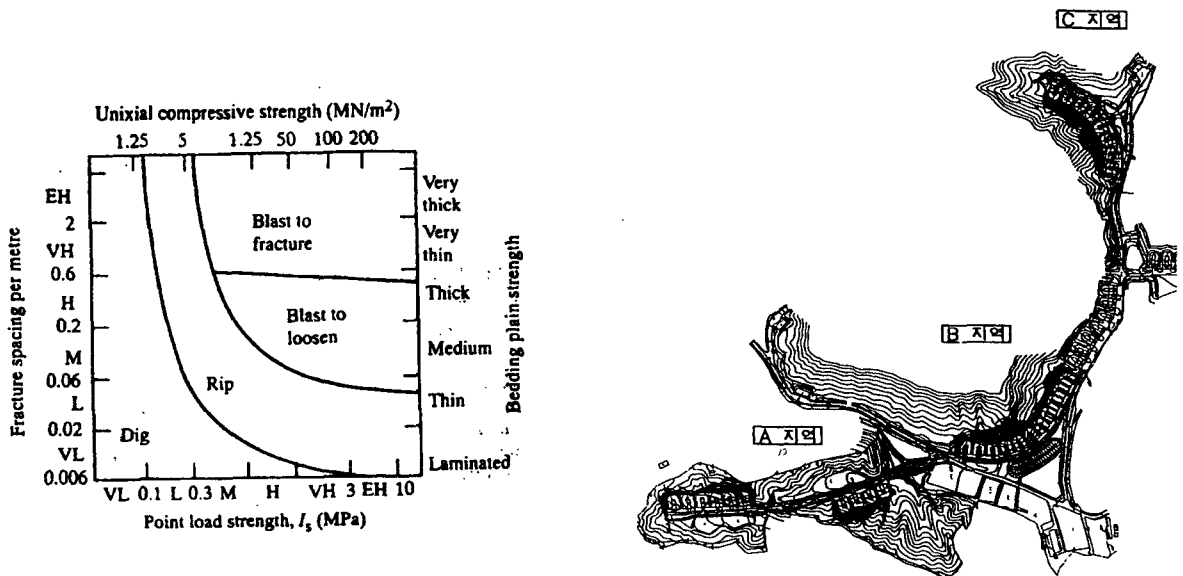


그림 3.1 토공작업의 난이도결정(Franklin and Broch, 1972)

그림 4.1 조사대상일부지역위치도

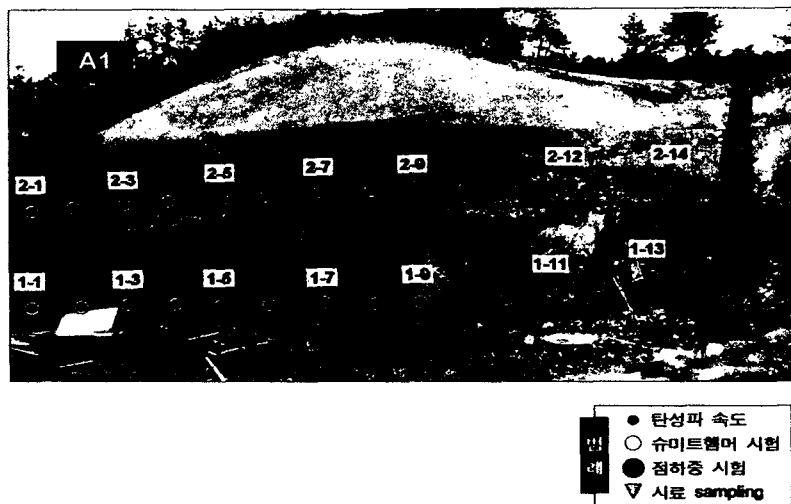


그림 4.2 조사대상 암반사면(A1)의 전경 및 측정위치

4.1.2 측정장치 및 방법

현지 암반에서 구하고자 하는 탄성파의 속도 측정에는 미국 Bison사 제품인 1-channel signal Enhancement Seismograph(Model 1570C)를 사용하였다. 이 장비는 무게가 7.2 kg 으로 경량으로 소형이어서 현장용으로 적합하였다. 무게 4.5 kg인 망치의 충격에 의해 발생한 탄성파는 암반을 통해 측정기의 감지기(Geophone)에 도달하고 도착 즉시 감지기에 연결된 전선을 따라 측정기의 수신기에 도착한다(그림 4.3, 그림 4.4). 현지 암반의 탄성파 전파속도(V_p)는 망치의 타격점과 감지기 사이의 거리(D)를 탄성파가 암반을 통하여 감지기에 도달하는 시간(T)으로 나눈 값($V_p = \frac{D}{T}$)이 된다. 탄성파의 발생원에서 감지기 까지의 거리는 암반의 상태 즉 절리의 간격, 지표수, 풍화정도 등의 상태에 따라 다르게 결정되지만 이와 아울러 파형이 잡음(Noise)의 영향으로 흐트러지지 않을 정도의 거리를 고려하여 약 1.4m~8.3m의 거리를 두고 탄성파 전파속도를 측정하였다.

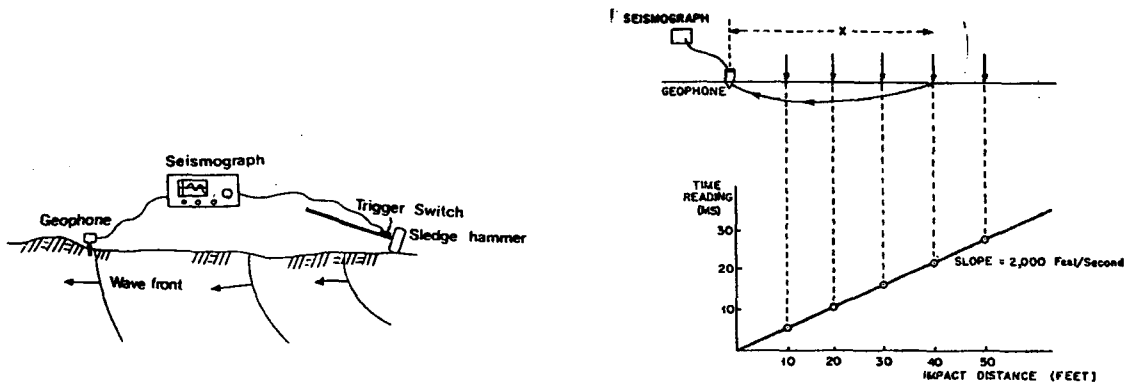


그림 4.3 탄성파의 발생과 수신방법을그린 개략도 그림 4.4 균일한 암반에서의 탄성파전파 속도 측정에

4.1.3 측정결과 및 분석

측정거리별 탄성파 도달시간의 측정결과로부터 탄성파전파속도를 계산하였다. 탄성파가 같은 매질 내를 전파해 나가는 경우, 거리에 따른 탄성파의 도달시간은 이론적으로 선형적인 관계를 가지게 된다. 하지만, 현지암반은 균질하지 않고 또한 절리가 산재해 있기 때문에 대부분의 경우 거리별 탄성파 도달시간의 측정결과가 완전히 선형적으로 나타나지는 않는다. 따라서 다수의 측정자료의 산술평균치를 사용하거나 또는 이들 특정자료의 선형회귀분석을 통하여 최적의 선형관계식을 구하고 이로부터 속도를 산출해 내는 것이 바람직하다. 다음 표 4.1은 A, B, C 구역에서의 탄성파속도측정자료들을 종합한 결과이다.

4.2 Schmidt Hammer 에 의한 현지암반강도측정

Schmidt hammer 에 의한 반발강도 측정점은 암반에 층리, 절리, 편리 등의 결함이 없는 곳을 선정하였으며 측정은 결과의 대표치를 나타낼 수 있도록 한 측정점에서 10회 반복 측정하였다. Schmidt hammer 에 의한 반발강도측정 결과는 표 4.2에서와 같다.

조사대상 지역의 암반은 사면절취작업시 자유면 없이 수행된 계속된 발파작업으로 인하여 주변암반이 적지않게 손상을 받았기 때문에 현지암반 탄성파속도값보다 1~2 등급 낮게 나타났다. 탄성파속도는 암반내부 깊숙히 통과하므로 암반표면 가까이의 암질에 영향을 덜 받는다. 또한 반발강도로부터 일축 압축강도로 환산하는 과정에서의 불확실성 또한 암질등급하락의 원인중의 하나로 판단된다.

표 4.1 현지암반 탄성파속도측정결과 (표준품셈기준)

측정위치		구 분	측선수	측선별거리범위(m)	현지 암반의 탄성파속도(m/sec)	등 급
A구역	A1구역	1단	10	2.0~12.0	856± 118	풍화암
		2단	9	7.4~12.4	880± 120	풍화암
	A2구역	1단	5	2.0~10.3	3,470±1,064	경 암
		A3구역	1단(1)	9	2.0~10.0	1,273± 439
	" (2)		6	2.0~ 6.0	3,957± 565	경 암
	" (3)		6	2.0~ 6.0	4,891± 310	극경암
	" (4)		5	2.0~10.0	1,240± 409	연 암
	" (5)		5	3.0~13.0	1,233± 288	연 암
	" (6)		7	2.0~10.0	1,419± 264	연 암
	4단(1)		6	2.0~ 6.0	2,192± 525	보통암
	" (2)		7	2.0~ 7.5	1,617± 618	연 암
	" (3)	7	2.0~10.0	1,206± 200	연 암	
	A4구역	A4	8	1.0~ 5.0	2,965±1,473	경 암
A5구역	A5	4	2.0~ 5.0	3,674±1,316	경 암	
B구역	1단(1)	7	2.0~ 8.0	2,244± 901	보통암	
	" (2)	4	2.0~ 4.0	1,166± 225	연 암	
	" (3)	5	2.0~ 6.0	3,040± 723	경 암	
	4단	12	2.0~18.0	2,168± 346	보통암	
	7단	11	1.5~14.0	2,034± 877	보통암	
C구역	C1	7	2.0~ 5.0	2,068± 523	보통암	
	C2	13	2.0~18.0	2,199± 603	보통암	

표 4.2 Schmidt hammer 에 의한 현지암반 강도측정결과

측정위치		구 분	측정 위치수	슈미트햄머에 의한 반발강도	환산된 일축압축강도 (kg/cm ²)	등 급
A1구역	1단		13	22±11	330	풍화암
	2단		14	17± 7	270	풍화암
A2구역	1단		4	42±10	900	연 암
A3구역	1단(1)		8	11± 2	160	풍화암
	" (2)		3	41± 4	810	연 암
	" (3)		3	51± 3	1,500	경 암
	" (4)		4	27±11	420	풍화암
	" (5)		3	43± 2	960	연 암
	" (6)		4	41±12	810	연 암
	4단(1)		3	48± 2	1,270	보통암
	" (2)		3	45± 6	1,100	보통암
" (3)		2	12± 2	170	풍화암	
A4구역	A4		10	41±15	800	연 암
A5구역	A5		5	28± 7	400	풍화암
B 구역	1단 (1)		7	31± 4	460	풍화암
	" (2)		2	22± 4	270	풍화암
	" (3)		3	36± 9	710	연 암
	4 단		7	34±12	660	풍화암
	7단		4	42± 7	890	연 암
C1 구역	C1		4	52± 5	1,500	경 암
C2 구역	C2		7	51± 8	1,450	경 암
합 계			113			

4.3 점하중강도시험에 의한 암석강도측정

점하중강도시험에 의한 암판정결과는 표4.3에서 보는 바와 같이 A1구역 1단, 2단과 A3구역의 1단 일부의 암석이 건교부 표준품셈기준에 따라 풍화암으로 판정되는 것 외에 다른 구역의 암석은 전부 연암으로 판정되었다. 조사대상 지역의 암석시료를 대상으로 측정된 점하중강도시험결과는 현지암반 탄성파속

도값보다 다소 작게 나타났다. 현지암반이 사면절취작업시 발파작업으로 인한 암반내부손상과 암반으로부터 분리되어 사면주변에 놓여있는 곳에서 채취한 암석시료가 발파진동으로 인하여 내부에 많이 발생된 미세균열로 인하여 점하중강도가 다소 약하게 나온 것으로 판단된다.

표 4.3 Point load test 에 의한 현지암반 강도측정결과

측정위치	구 분	측정위치수 (시료수)	점하중강도 $I_{S(50)}$ (kg/cm^2)	환산된 일축압축강도 (kg/cm^2)	등 급
A1구역	1단	2(12)	11.1±0.6	268±13	풍화암
	2단	5(15)	6.5±3.7	155±89	풍화암
A2구역	1단	4(12)	29.5±1.8	708±44	연 암
A3구역	1단(1)	4(20)	5.6±3.3	134±80	풍화암
	" (2)	2(10)	30.6±11.2	733±267	연 암
	" (3)	2(10)	31.5±12.2	756±294	연 암
	" (4)	1(5)	29.8	716	연 암
	" (5)	1(5)	30.1	722	연 암
	" (6)	2(10)	26.6±2.5	638±59	풍화암
	3단	4(20)	13.1±10.2	314±244	풍화암
	4단	2(10)	33.5±9.2	803±220	연 암
A4구역	A4	2(10)	30.2±3.5	724±9	연 암
A5구역	A5	2(10)	29.5±0.2	707±3	연 암
B 구역	1단 (1)	5(25)	30.8±4.3	739±104	연 암
	" (2)	4(20)	30.5±3.8	733±90	연 암
	4 단	3(15)	29.2±22.0	702±527	연 암
	7단	1(5)	30	720	연 암
C1 구역	C1	1(5)	18.0	714	연 암
C2 구역	C2	2(10)	56.3±20.7	1,351±500	경 암
합 계		49(229)			

5. 실내 암석 시험

현장 암반의 탄성파전파속도 측정 위치에서 채취한 대표적인 암석의 물리·역학적 특성을 파악하고자 탄성파전파속도(종파), 일축압축강도시험을 실시하였다. 시험법은 국제암반역학회의 표준시험규정을 준수하였다. 표 5.1은 실내시험결과로부터 표준품셈기준으로 암질판정한 결과이다.

표 5.1 암석시험편에 대한 암질판정결과

채취위치	구 분	암 종	실험실 시험편 물성시험			
			탄성파전파속도 (m/sec)	등 급	일축압축강도 (kg/cm^2)	등 급
A1구역	1단(1-9~1-10사이)	화강편마암	3,400	연 암	220	풍화암
A2구역	1단(4~5사이)	화강암	4,620	보통암	1,080	보통암
A3구역	1단(1-30~1-31사이)	규장암(산성암맥)	5,190	경 암	2,540	극경암
	1단 (1-40)	화강암	3,920	보통암	660	풍화암
A4구역	측점번호 6	장석반암(산성암맥)	4,830	경 암	1,410	경 암
A5구역	측점번호 5~6	화강암	3,610	연 암	320	풍화암
B구역	1단(1-8~1-9사이)	석영장석질편암	5,850	극경암	1,290	보통암
	4단(측점번호2)	흑운모각섬석편암	5,370	경 암	620	풍화암
	7단(측점번호 7-4)	규 암	4,930	"	1,710	극경암
C1구역	측점번호 4	규장암(산성암맥)	4,650	보통암	1,890	"
C2구역	측점번호 10	"	4,960	경 암	2,280	"

6. 종합분석

현장암반 및 암석시험편의 시험결과를 종합 분석한 결과 다음 표 6.1과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 측정된 각종 물성자료들을 참고로 다음과 같은 분석을 행하였다. 절취난이도는 현재 국내에서는 암석강도에만 근거하여 결정하고 있는 데 암석강도뿐만 아니라 불연속면의 빈도도 고려해야 할 것이다. 조사대상 암반의 균열계수는 다음 표 6.2에서와 같이 0.44~0.94의 범위를 보이고 있다. 조사대상지역의 균열계수를 일축압축강도와 탄성파전파속도와와의 각각의 관계를 도시하면 다음 그림 6.1과 그림 6.2에서와 같다. 그림 6.1에서 A1구역 1단의 암반은 연암영역에 속하고 기타 구역의 암반은 모두 경암영역에 속함을 보여주고 있다. 한편 균열계수와 탄성파속도를 기준으로 하는 그림 6.2에서는 A1구역 1단과 A3구역 1단(4)의 암반이 연암에 속하며 기타 구역의 암반은 경암영역등급으로 분류됨을 보여주고 있다.

표 6.1 암반등급판정결과

측정위치	구 분	현지 암반의 탄성파속도측정		실험실 시험편 물성시험				전체등급
		탄성파속도 (m/sec)	등 급	탄성파속도 (m/sec)	등 급	일축압축강도 (kg/cm ²)	등 급	
A1구역	1단	856±118	풍화암	3,400	연 암	220	풍화암	풍화암
	2단	880±120	풍화암					
A2구역	1단	3,470±1,064	경 암	4,620	보통암	1,080	보통암	경 암
A3구역	1단(1)	1,273±439	연 암	5,190	경 암	2,540	극경암	연 암
	" (2)	3,957±565	경 암					
	" (3)	4,891±310	극경암					
	" (4)	1,240±409	연 암					
	" (5)	1,233±288	연 암					
	" (6)	1,419±264	연 암					
	4단(1)	2,192±525	보통암					
	" (2)	1,617±618	연 암					
" (3)	1,206±200	연 암						
A4구역	A4	2,965±1,473	경 암	4,830	경 암	1,410	경 암	경 암
A5구역	A5	3,674±1,316	경 암	3,610	연 암	320	풍화암	연 암
B구역	1단(1)	2,244±901	보통암	5,850	극경암	1,290	보통암	보통암
	" (2)	1,166±225	연 암					
	" (3)	3,040±723	경 암					
	4단	2,168±346	보통암					
	7단	2,034±877	보통암					
C1구역	C1	2,068±523	보통암	4,650	보통암	1,890	극경암	보통암
C2구역	C2	2,199±603	보통암	4,960	경 암	2,280	극경암	보통암

표 6.2 암반의 균열계수

측정위치	구 분	현지 암반의 탄성파속도 V_2 (m/sec)	실험실 시험편의 탄성파속도 V_1 (m/sec)	균열계수 $C_r = 1 - \left[\frac{V_2}{V_1} \right]^2$
		A1구역	1단	856
A2구역	1단	3,470	4,620	0.44
A3구역	1단(4)	1,240	5,190	0.94
	" (6)	1,419	3,920	0.87
A4구역	A4	2,965	4,830	0.62
A5구역	A5(6)	2,041	3,610	0.68
B구역	1단(1)	2,244	5,850	0.85
	4단	2,168	5,370	0.84
	7단	2,034	4,930	0.83
C1구역	C1	2,068	4,650	0.80
C2구역	C2	2,199	4,960	0.80

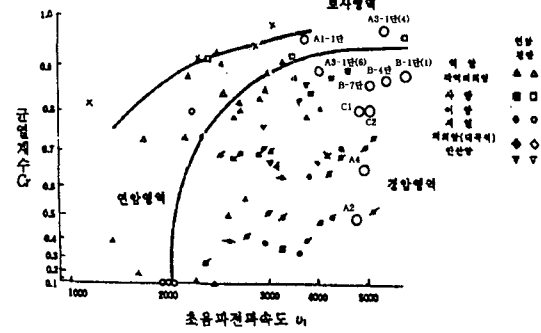
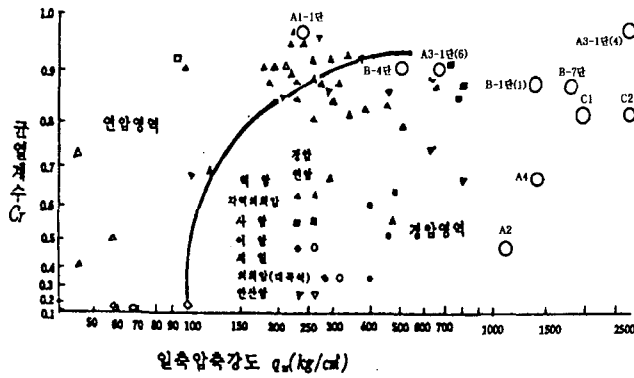


그림 6.1 조사대상 암반의 균열계수와 암석시험편의 일축압축강도와의 관계에 의한 리핑, 발파암의 구분

그림 6.2 조사대상 암반의 균열계수와 암석시험편의 탄성파전파속도와와의 관계에 의한 토사, 리핑, 발파암의 구분

7. 결론

현지암반 및 암석에 대한 시험결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 국내의 건설교통부 표준품셈기준에 따르면 현장암반의 탄성파전파속도가 856~3,674m/sec 로 풍화암~경암에 속하였다. 시험편 암석의 탄성파속도는 3,400~5,850 m/sec 로 연암~극경암이었으며 일축압축강도는 220~2,540 kg/cm²로 풍화암~극경암에 해당하였다. 점하중강도시험결과는 155~1,351 kg/cm²로 풍화암~경암이었으며 슈미트햄머에의한 반발강도는 170~1,500 kg/cm² 로 풍화암~경암에 해당하는 등 구역에 따라 커다란 차이를 보이고 있다.
- 2) 조사대상지역의 암석시료를 대상으로 측정된 점하중강도시험과 슈미트햄머타격시험값이 실험실내 암석의 일축압축강도값보다 작은 것은 현지암반 절취작업시 자유면없이 수행된 발파작업으로 암반내부에 계속적인 손상을 받아 암석내부에 발생된 미세균열로 인한 것으로 판단된다.
- 3) 조사대상 암반의 균열계수는 0.44~0.94의 범위를 보여 A1구역 1단의 암반은 연암영역에 속하고 기타 구역의 암반은 모두 경암영역에 속하였다. 균열계수와 탄성파속도를 기준으로 하면 A1구역 1단과 A3구역 1단(4)의 암반이 연암에 속하며 기타 구역의 암반은 경암영역등급으로 분류됨을 보여주고 있다. 균열계수와 일축압축강도의 관계에서 A1구역 1단의 암반은 연암영역에 속하고 기타 구역의 암반은 모두 경암영역에 속하였다.
- 4) 암반의 절취시공난이도 평가시 단순히 암석의 강도만을 근거로 하는 데 암석의 강도는 전체적으로 크게 변할 수 있기 때문에 강도뿐만 아니라 암반내에 발달되어 있는 불연속면의 빈도를 함께 고려하여야 한다. 이점에 있어서 불연속면의 영향을 포함하고 있는 현지암반의 탄성파전파속도 측정에 의한 굴착난이도 판정이 바람직하다.

참고문헌

1. 신희순(1998), "터널의 기본계획, 조사 및 시험", 대한토목학회 토목기술강좌집, pp.71-129.
2. 한국도로공사(1992), "도로공사설계요령", 제2권 토공 및 배수, pp.44-51.
3. Bell, F.G.(1992), *Engineering in Rock Masses*, Butterworth Heinemann Pub., p.415-421.
4. Hunt, R.E.(1984), *Geotechnical Engineering Investigation Manual*, McGraw-Hill Book Co., pp.139