

우리나라의 지반특성

신 희 순 (한국자원연구소, 책임연구원)

1. 서 언

도로, 터널 등 토목 및 암반구조물을 안정하고 경제적으로 설계하고 시공하기 위해서는 굴착대상인 지반의 공학적 특성 및 대상지역의 지압상태를 명확히 파악하여야 한다. 나라마다 지층의 생성원인이나 생성시기, 물리·역학적특성이 각각 다르기 때문에 그 나라에서 개발된 지반분류방법이나 굴착방법 등 기술이나 장비를 국내에 적용할 때는 그 기술이 개발된 토대가 된 그 나라의 지반특성을 파악하고 이해하는 것이 필요하다. 본 고에서는 우리나라의 지반특성을 비롯하여 터널기술이 발달된 일본, 노르웨이 등 주요나라들의 지반특성을 간략히 소개하고자 한다.

2. 한국의 지반특성

2.1 지질

한반도가 위치한 곳은 지체구조적 측면에서 볼 때 유라시아판(Eurasian plate)의 동쪽 연변부에 해당하며, 소위 北·中·韓 탁상지(North China-Korean platform)에 속한다(이병주, 1998). 지질은 반이상이 화강암, 화강편마암 및 화강암질 편마암으로 편마암복합체를 이루고 있는데, 이는 新生代 전의 암석에 관입된 화강암과 이

로부터 변성된 화강편마암 및 중생대 白堊紀 전의 암석이 화강암화 작용으로 변성되어 이루어진 화강암질 편마암이 각 지각변동시기와 백악기 이후에 일어난 용기작용과 삭박(剝削)작용으로 지표에 나타나게 되는데 기인한다. 그러므로 퇴적암류와 편암 등의 변성암은 편마암 위에 분산되어 분포하고 있다.

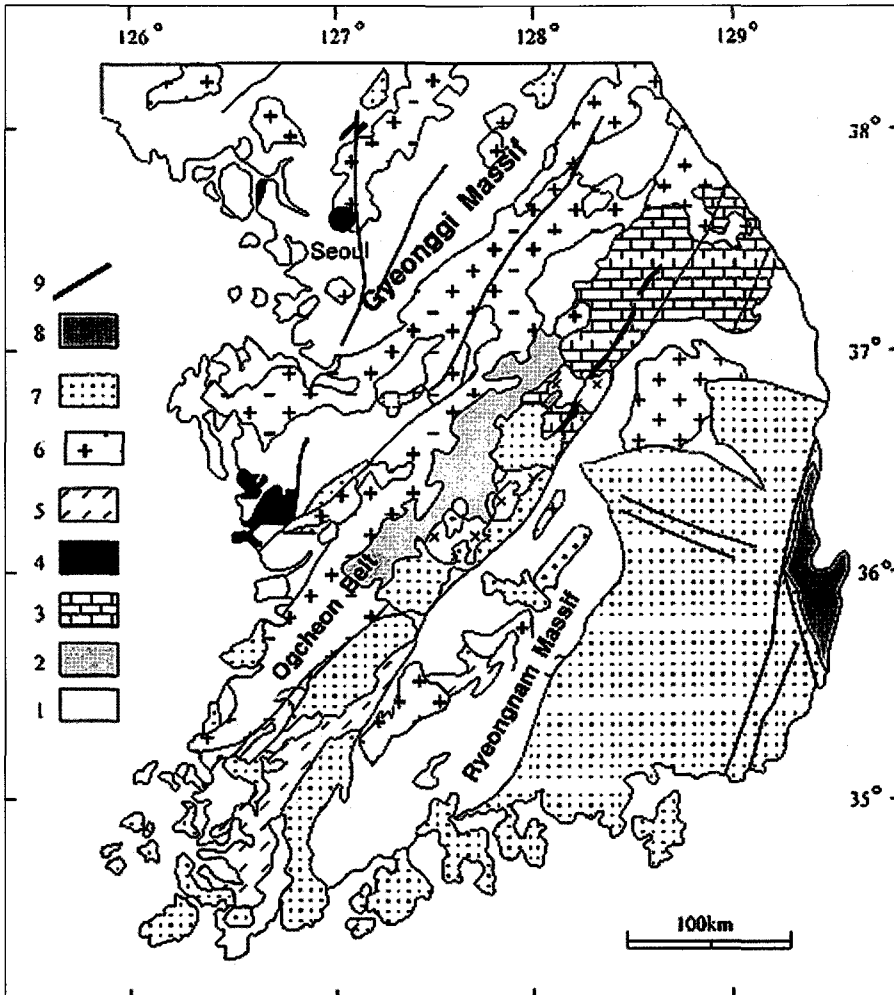
토목구조물의 주요 기반암인 화강암은 전국적으로 분포하고 있으며 주로 주라기의 대보화강암(전 국토 면적의 약 14.4%)과 백악기에서 고제삼기에 이르는 불국사화강암(전 국토 면적의 약 7.6%)으로 구성되어 있다. 화강편마암은 우리나라 면적의 약 1/3을 차지하며 한반도 동남부를 제외하고 전국각지에 분포하고 있다. 비교적 뚜렷한 片麻구조를 보이며 흑운모, 장석, 석영등이 평행한 호층을 이루며 剝離 또는 眼球구조를 보여준다. 그림 2.1.1은 남한의 개략 지질도를 나타내고 있다. 가장 규모가 크고 대표적인 선구조는 부산의 낙동강 하구둑에서 영해의 병곡 해수욕장을 통과하는 육상에서만 전장 약 170km에 달하는 양산단층이다. 표 2.1.1는 한국지질계통표를 보여준다.

남한에서 암석의 시대별 및 지역별 분포를 요약하면 다음과 같다.

- 선캠브리아기의 것으로 생각되는 변성퇴적암이 북부에 분포되어 있다.

- 고생대의 지층이 중동부에 크게 분포되어 있다.
- 비교적 큰 중생대의 지층이 동남부에 분포되어 있다.
- 제3기층의 소편들이 동해안을 따라 여러곳에 있고 서해안에서는 약간 발견된다.
- 화강암의 저반이 북북동 - 남남서 방향으로 분

- 포하며 그 면적과 저반의 규모가 크다.
- 제4기의 화산암은 중앙부, 동남해안, 제주도, 울릉도 등지에 발달되어 있다.
- 지층의 특징으로는 해성층(海成層)이 적고 육성층(陸成層)이 많다.



1 : 선캄브리아시대 편마암 및 편암류, 2 : 옥천층군, 3 : 고생대 퇴적층 (조선누층군 및 평안누층군), 4 : 대동층군, 5 : 엽리상화강암, 6 : 대보화강암, 7 : 백악기 퇴적암 및 화산암(경상누층군), 8 : 제삼기 퇴적암 및 화산암, 9 : 단층.

그림 2.1.1 남한의 개략 지질도¹⁾

표 2.1.1 한국지질계통표¹⁾

신생대	제4기	충적층 신양리층(제주도)			
	신제3기	서귀포층			
		연일층군			
장기층군					
		양북층군			
	고제3기			불국사화강암 관입	
중생대	백악기	경상누층군	유천층군		
			하양층군		
		신동층군			
จู라기			대보화강암 관입		
	대동층군 (남포층군, 반송층군)				
트라이아스기			송림화강암 관입		
고생대	페름기	평안누층군	동고층	목천층군?	
			고한층		
			도시곡층		
			함백산층		
			장성층		
	석탄기		금천층		
			만항층		
	데본기				
	사일루리아기				
	오도비스기	조선누층군	두위봉층		영흥층
직운산층					
막골층					
두무골층			문곡층		
동점층					
화질층				와곡층	
풍촌층				마차리층	
캄브리아기		묘봉층	삼방산층		
		장산층			
원생대	후기				
		상원계			
	중기	연천계			
	전기	서산층군			
시생대			경기편마암 복합체	선캄브리아기 화강암 관입	
			지리산편마암 복합체		
			소백산편마암 복합체		
			마천령편마암 복합체		
			낭림육괴		
		관모육괴			

그림 2.1.2와 그림 2.1.3은 영동선철도인 통리역과 나한정역 사이의 16.2km의 국내 최대 장대터널이 건설될 도계지역부근의 지층구조와 주상도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 본 지역은 습곡, 단층 등 많은 지각변동의 영향을 받아 지층이 심하게 교란되어 있는 국내에서도 대표적인 지

역이다. 그림 2.1.3에서와 같이 폭이 0.3~10m인 석탄층이 세일, 사암과 호층을 이루며 하부에는 석회암층이 있으며 폐경도가 산재되어 있는 지역이다. 따라서 극히 불량한 지반조건과 지하수유출로 터널굴착공사 중에 적지 않은 어려움을 겪게 될 것으로 예상된다.

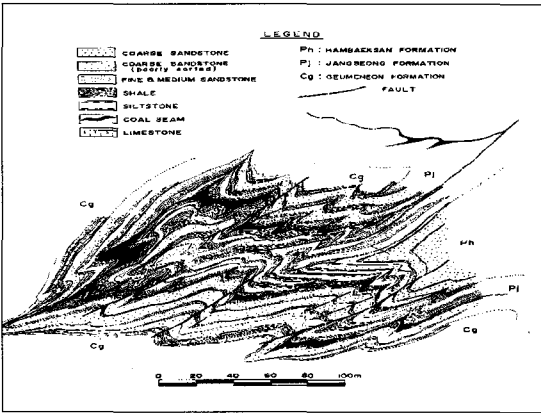


그림 2.1.2 도계지역 상덕광업소의 지층구조

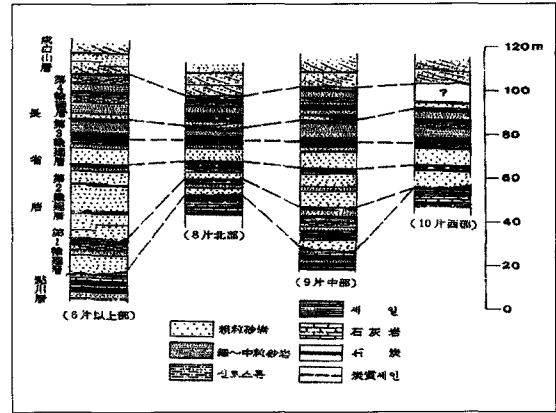


그림 2.1.3 도계지역 장성층의 주상도

2.2 암석물성

표 2.2.1 주요암석의 물리·역학적 특성(신희순, 1997)

암종	위치	밀도 (gr/cm ³)	공극률 (%)	탄성파속도(m/s)		일축압축 강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (10 ⁹ kg/cm ²)	포아송비
				P-wave	S-wave				
사암	24 (494)	2.67 ±0.08	2.86 ±2.33	4,680 ±610	2,540 ±480	1,240 ±550	145 ±55	8.4 ±3.6	0.22 ±0.09
회강암	60 (2,123)	2.61 ±0.05	1.45 ±1.34	3,870 ±820	2,350 ±500	1,220 ±530	85 ±40	3.20 ±1.70	0.23 ±0.08
편마암	2 (117)	2.63 ~2.77	5.3 ~7.1	3,490 ~5,510	-	660 ~1,550	100 ~180	3.9 ~8.4	0.15 ~0.33
세일	22 (354)	2.73 ±0.10	2.62 ±1.85	4,820 ±680	2,620 ±360	660 ±360	105 ±25	4.5 ±2.5	0.14 ±0.13
석회암	8 (150)	2.73 ±0.1	0.88 ±0.3	5,030 ±870	2,710 ±510	1,030 ±480	70 ±20	5.55 ±0.95	0.24 ±0.03
석탄	3 (175)	1.66 ±0.07	-	1,040 ±260	590 ±160	8.9 ±7.7	2.2 ±1.4	0.0097 ±0.0083	0.3 ±0.1

주: () 암석시험편의 수

국내의 주요암석의 물리·역학적 특성은 다음 표 2.2.1에서 보는 바와 같다. 국내 퇴적암의 압축강도와 탄성계수는 일반적으로 알려져있는 퇴적암의 수치보다 비교적 높은 값을 보이고 있다. 인장강도에 대한 일축압축강도의 비는 취성도(脆性度: Brittleness index)라하여 암석의 파괴거동과 변형특성을 나타내는 인자이다. 사암의 대표적인 취성도는 10~12, 세일의 경우 4~8로 사암이 세일보다 더 취성적임을 알 수 있다. 화강암은 8~16, 편마암은 4~10의 범위를 보인다. 일반적으로 화성암이 변성암보다 취성도가 컸다. 같은 암종이라도 조암광물 중 석영함유량이 높고 밀도가 증가할수록 일축압축강도는 증가하며 평균입자크기가 커지면 강도는 감소하는 경향이 있다.

암석의 경우 구성광물입자의 크기, 맞물림 정도, 입자사이의 마찰이 내부마찰각에 영향을 미치며 구성광물 사이의 결합정도, 미세균열이 존재가 전단강도에 영향을 미친다. 일반적으로 전단강도가 클수록 내부마찰각도 커지는 경향을 나타낸다. 표 2.2.2는 국내 주요암석에 대한 전단강도와 내부마찰각의 경향을 보여준다.

암반을 공학적으로 분류하는 데는 여러 가지 역학적인 성질들을 기준으로 할 수 있으나 Deere & Miller(1966)의 분류법에서는 일축압축강도와 탄성계수를 분류기준으로 하고 있다. 이 분류법에는 암석의 여러 역학적 성질 중 압축강도와 탄성계수를 분류의 기준으로 선택하고 있다.(표 2.2.3참조)

국내 대표적인 화성암, 변성암, 퇴적암을 대상으로 자료처리한 결과는 다음 그림 2.2.1~그림 2.2.2에서와 같다.

국내에서 가장 흔히 접할 수 있는 화강암은 신선한 경우 CM, BM으로 분류되고 풍화를 받으면 DM으로 분류된다. 편마암의 경우는 신선한 경우 CH가 주류를 이루고 있고 그 분포가 BH 및 DH 까지 미치고 있다. 이는 편마암이 강도에 비해 그 탄성계수가 높음을 표시하는 것이며 응력에 대한 변형이 적음을 의미하는 것이다. 사암은 BM이 주류를 이루고 있으나 CM 및 High modulus ratio에 속하는 CH 그룹이 많이 보인다. 연질에 속하는 세일은 CM, CH가 주류를 이루나 DH 및 BM도 많이 분포하고 있다.

표 2.2.2 국내암석의 전단강도 및 내부마찰각(이희근, 1983)

암 종	전단강도(kg/cm ²)	내부마찰각(°)
Granite	135~250	51~65
Tuff	40~150	35~45
Sandstone	150~400	38~54
Shale	100~250	18~29
Limestone	150~340	35~50

표 2.2.3 암석의 공학적 분류 기준

① 강도

등급	분 류	일축압축강도(MPa)
A	Very high strength(극경암)	225 이상
B	High strength(경암)	112.5 - 225
C	Medium strength(보통암)	56 - 112.5
D	Low strength(연암)	28 - 56
E	Very low strength(극연암)	28 이하

② 탄성계수비

등급	분 류	탄성계수비(E/rc)
H	High modulus ratio(높은비)	500 이상
M	Average(Medium) modulus ratio(중간비)	200 - 500
L	Low modulus ratio(낮은비)	200 이하

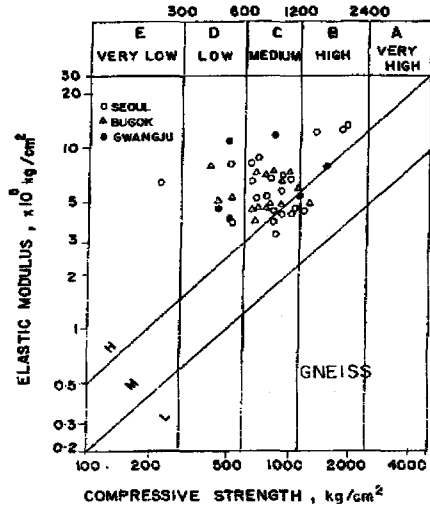
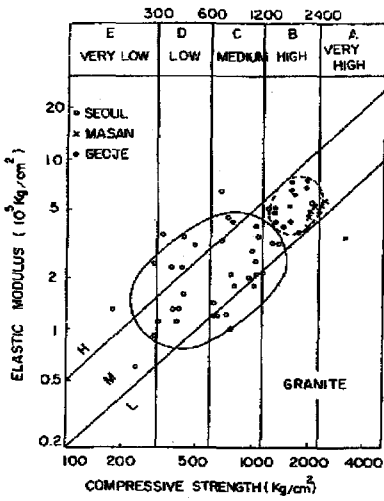


그림 2.2.1 화강암과 편마암의 탄성계수비

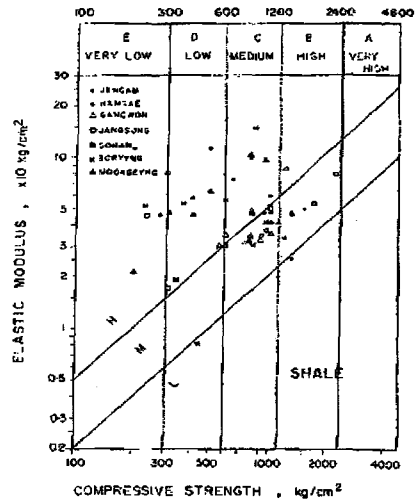
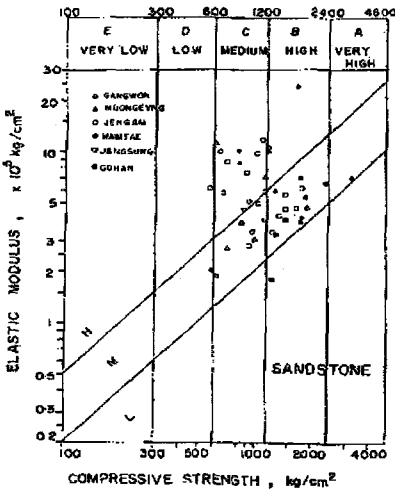


그림 2.2.2 사암과 셰일의 탄성계수비

2.3 초기응력

현지암반은 중력에 의한 지반의 자체하중 뿐만 아니라 과거의 지각운동, 지표의 퇴적이나 침식 등의 작용을 받아 왔다. 이로 인한 지형학적 또는 지질구조적 영향을 받는 조건에서 초기지압은 지역적 특성 및 심도에 따라 크기와 작용방향이 다르게

나타난다.

국내에서 1980년대초 이래로 지금까지 강원도, 경상북도 등 광산지역과 지하양수발전소, 지하유류비축기지 등에서 응력해방법(Overcoring method, Leeman method), 수압파쇄법

(Hydrofracturing method)에 의한 초기지압을 측정하여 오고 있으며, 1994년부터는 수압파쇄법에 의하여 국내 도로 및 지하철 터널지반을 대상으로 초기지압을 측정하여 오고 있다. 초기지압의 측정결과와 분석을 통하여 국내의 심도에 따른 수직응력(σ_v)과 평균수평응력(σ_{Have})의 관계는 분산은 다소 크지만 다음과 같은 관계식으로 대략 나타낼 수 있다.

$$\sigma_v = 0.027H \text{ (MPa} = 10\text{kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{Have} = 1.297 + 0.024H \text{ (MPa)}$$

여기서 H : 심도(<900m)

상기 식으로부터 측압계수(K_0)는 대략 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$K_0 = 0.889 + \frac{48.04}{H}$$

수압파쇄시험에 의한 초기지압측정사례를 표 2.3.1에 정리하였다. 측정치는 각 지역의 대표값이

아니다. 그림 2.3.1은 지난 2년간 한국자원연구소가 수행하였던 국내 각 지역에서의 수압파쇄시험에 의한 초기응력 측정값을 심도별로 표시한 그림이다. 국내 암반의 경우 대개 심도 100m를 기준으로 해서 그 상부일 경우에는 수평압이 수직압에 비해 큰 것으로 나타나고 있으나, 그 하부일 경우에는 수평압과 수직압이 거의 같은 수준으로 수렴하고 있는 양상이 됨을 알 수 있다.

그림 2.3.2는 평균수평응력 대 수직응력의 비인 측압계수(K_0)와 심도와의 관계를 나타낸 것이다. 접선으로된 경계는 Brown과 Hoek이 전세계의 지압측정자료를 종합한 지압분포양상의 하한 및 상한 경계를 나타낸 것인데 국내의 측압계수는 전세계의 평균측압계수보다 낮은 쪽에 속하는 것으로 나타났다. 그림 2.3.3에서는 이들 측정치의 평균값에 대하여 각 지역별 최대수평응력의 상대적 크기 및 작용 방향을 나타낸 것이다. 국내 전 지역에 걸쳐 최대수평응력의 작용방향은 동서방향이 우세한 것으로 나타나고 있다. 터널의 안정성은 지반조건에 크게 좌우되지만 측압계수가 대부분 1이상인 점을 감안한다면 국내 터널의 폭은 현재보다 더 넓힌다하더라도 안정성에는 커다란 문제점이 없을 것으로 판단된다.

표 2.3.1 수압파쇄법에 의한 국내 초기지압측정결과²⁾

지역	위치/측점 (개소)	측정심도 (m)	수직응력 (MPa)	수평응력 (MPa)	수평응력/수직응력 (K_0)
서울특별시	1/3	29.0~38.5	0.78~1.04	1.10~2.33	1.28~2.59
대전광역시	2/10	15.9~73.0	0.42~1.96	0.54~5.14	0.68~3.60
대구광역시	8/24	14.5~39.5	0.39~1.05	0.58~0.98	0.68~1.76
경남	1/2	10.0~18.0	0.27~0.48	0.29~0.64	0.89~1.52
경북	2/6	11.0~64.0	0.30~1.71	0.62~2.32	0.33~3.52
전남	2/10	39.5~93.5	1.06~2.51	1.71~5.33	0.95~3.58
전북	1/2	11.0~14.5	0.30~0.39	~0.85	1.80~2.46
충남	1/5	25.5~48.0	0.68~1.29	1.69~2.42	1.56~3.37
충북	3/9	13.0~177.9	0.35~4.77	0.61~9.94	1.46~2.18
경기	3/10	19.2~136.0	0.52~3.67	0.88~4.26	0.96~4.85
강원	2/8	17.0~138.5	0.45~3.71	0.72~3.79	0.53~1.72

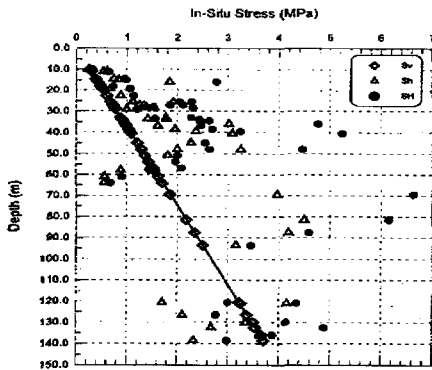


그림 2.3.1 수압파쇄시험에 의해 측정된 국내 각 지역의 심도별 초기응력분포양상³⁾

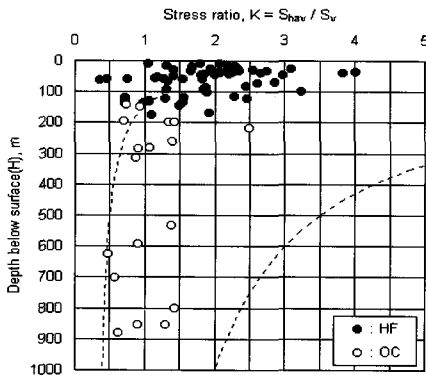


그림 2.3.2 국내의 심도에 따른 축압계수 양상⁴⁾



그림 2.3.3 한반도에 작용하는 최대수평응력의 방향 분포³⁾

3. 일본의 지반특성

3.1 지질

일본열도를 구성하는 기반암은 지질시대가 새로 우며 습곡 및 단층운동에 의하여 심부까지 파쇄되어 있고 화산활동에 의한 마그마의 관입과 변성작용 또는 화산분출물등으로 피복되어 있으며 여기에 풍화작용을 받았기 때문에 지질분포는 매우 복잡하다. 일본열도에는 각종 지층 및 암석이 복잡하게 분포하고 있으며 크게 지질구조선으로 나누어진다. 다음 표 3.1.1은 일본의 지형 및 지질구성분류표이다.

표 3.1.1 지형 및 이를 구성하는 지질

지형구분	지형 및 구성하는 지질
산지	심성암류, 중·고생대층, 중생대층, 제3기층 및 古期화산류
화산지대	신기화산암류, 화산 砂礫, 화산회층
그릉지	신제3기, 제4기홍적층, 풍화된 고기암류
대지, 그릉지	일반적으로 제4기홍적층
저지	제4기홍적층

일본에 분포하는 암석 중 반 이상이 신제3기 이후에 생성된 암석이다. 화산암이나 퇴적암은 많은 것이 신제3기 이후에 생성되었지만 심성암이나 변성암의 경우는 대부분 신제3기 이전에 생성된 것이다. 그림 3.1.1은 일본에 분포하는 암석의 비율을 표시한 그림이다.

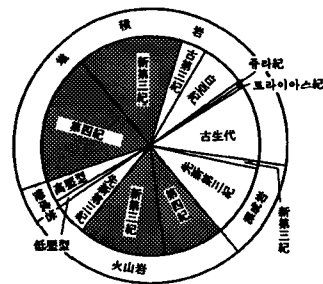


그림 3.1.1 일본에 분포하는 암종시대별 비율⁵⁾

일본에서는 화강암류의 분포범위가 대단히 넓으며 많은 토목 및 암반구조물의 기반암이 되고 있다. 일본의 도시부의 지질은 대부분 충적층 및 홍적층 등의 미고결 지층으로 구성되어 있다. 도시부에서 NATM으로 시공할 경우 피복이 얇고 지하수가 있으므로 미고결지반에 대한 NATM공법을 개발하여야 한다. 미고결지반에 터널을 시공할 경우 가장 큰 문제가 되는 것이 용수의 처리로 터널전체의 용수가 100 l/분 이상인 경우가 있다. 따라서 흙피복이 얇은 미고결지반의 NATM은 대부분 지하수의 배제, 막장붕괴 방지, 지표침하 방지 등을 위한 보조공법이 시공되고 있다. 일본 도시주변은 평야지에 형성되어 있으며 이러한 평야는 해수준의 변화에 의하여 변화하였고 동시에 육지로부터의 토사공급에 의해 형성되어 왔다. 따라서 지층의 퇴적시대는 대부분이 신생대 제3기, 제4기 홍적세 및 충적세로 미고결지층으로 형성되어 있다.

특히 동경주변의 지반에 있어서 홍적세 지층은 상층충층, 동경충층, 하층충층으로 주로 다져진 모

래, 모래자갈층과 고결토로 구성되어 있다. 하층충층은 동경충층과 동일 시대의 퇴적층으로 모래, 모래자갈층으로 되어있다. 층 두께는 두꺼운 곳에서는 400m에 달하며 일축압축강도는 10 kg/cm²이하로 미고결층으로 거의가 사층으로 구성되며 균등계수가 6%이하로 매우 작고 함수하면 유사현상이 발생하기 쉽다. 성전신간선 터널이 이같은 지반을 통과한다. 상층충층은 두께가 2,000m에 달하는 것이 있으며 사암, 이암의 호층으로 형성되어 있다.

3.2 암석물성

일본에서는 화강암류의 분포가 매우 넓으며 많은 토목·암반구조물의 기초암반이다. 신선한 경우 일축압축강도가 1,000~2,500kg/cm²이고 유효공극율 2%이하이며 절리분포가 뜸하며 밀착하고 있는 경우에는 피상의 견고한 암반으로된다. 그러나 암석이 풍화를 받기쉬워 지표로부터 30~40m의 심도까지 모래상태로 있는 경우가 많다. 현

표 3.2.1 주요암석의 물리적 특성⁶⁾

암 종	밀도 (gr/cm ³)	P파 전파속도 (m/sec)
화강암	2.633±91(187)	4,059±666(21)
섬록암	2.731±135(49)	4,505±478(10)
현무암	2.629±245(219)	4,177±793(85)
안산암	2.494±220(844)	3,861±855(86)
편마암	2.675±(4)	3,680(2)
응회암	2.137±376(357)	2,855±1,218(21)
편 암	2.803±144(29)	4,334±1,147(19)
역 암	2.464±248(19)	3,341±664(7)
사 암	2.422±326(300)	2,796±922(93)
실트암	2.267±394(81)	1,832±740(6)
이 암	2.156±435(76)	1,892±712(11)
세 일	2.467±307(107)	2,874±1,012(17)
점판암	2.669±95(46)	3,503±1,214(6)
석회암	2.578±237(17)	1,930(1)

주: () 암석시험편수

표 3.2.2 주요암석의 역학적 특성⁷⁾

암종	일축압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (10 ⁶ kg/cm ²)	전단강도 (10 ⁶ kg/cm ²)	내부마찰각(°)
화강암(3)	1,070~2,180	-	1.3~3.5	38~330	45~52
섬록암(4)	160~2,300	27~119 (3)	1.1~5.1	44~180	27~44
유문암(5)	97~2,280	-	0.13~0.8	25~320	29~50
현무암(2)	1,370~1,400	-	1.2~1.6	-	39~41
안산암(8)	134~1,560	25~73 (5)	0.3~1.9	18~195	29~41
대리석(4)	760~2,260	-	1.1~2.4	160~170	27~39
응회암(20)	6.8~2,490	2.3~12.4 (20)	0.05~5.4	2.2~367	10~48
사암(40)	4~2,850	9.8~54.8 (16)	0.09~5.7	0.45~480	14~51
실트암(5)	7.9~69	1.4~4.7(8)	0.07~0.79	2.0~17	18~36
이암(15)	1.15~450	2.7~18.9(18)	0.27~0.83	4~70	7~40
셰일(14)	504~3,853	13~199 (2)	0.9~2.9	95~1,000	24~42

주: () 암석시험채취지역수 [] 암석시험편수

무암, 안산암 등 화산암류는 신선한 경우에는 강도가 크지만 화산지대에 많이 분포하기 때문에 풍화 변질되어 취약화 된 경우가 많다. 고생대~고제3기층의 퇴적암류는 암편은 경질이지만 틈이 많은 것이 특징이다. 신제3기 퇴적암류는 일본에서 분포지역이 매우 넓다. 생성시대가 새롭기 때문에 토사의 압밀영역에서 Cementation 영역에 이르는 중간과정에 있어 연암에 속하는 것이 많다. 표 3.2.1과 표 3.2.2는 일본의 주요암석의 물리·역학적 특성을 나타내고 있다.

3.3 초기지압

일본에서도 많은 곳에서 초기지압이 측정되었는데 그림 3.3.1은 초기응력값을 심도별로 표시한 그림이다. 그림 3.3.2는 측정된 예들을 총괄적으로 정리한 것으로 횡축에는 수직응력이 종축에는 수평방향의 최대 최소응력(σ_{H1} , σ_{H2})와 평균치(σ_H)가 도시되어 있다. 그림에서 천부에서는 수평방향의 응력이 수직응력보다 크며 심도가 매우 깊어지면 일정한 값에 접근함을 알 수가 있다. 그림

3.3.3에서는 일본의 최대수평응력의 작용방향을 나타낸 것이다. 일본의 심도에 따른 수직응력(σ_v) 및 평균수평응력(σ_{Have})의 관계는 0~1,200m까지 범위에서 다음과 같은 관계식으로 대략 나타낼 수 있다고 보고된 바 있다(Sugawara and Obara, 1993).

$$\sigma_v = 0.027H \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{Have} = 2.5 + 0.013H \text{ (MPa)}$$

이 관계식으로부터 한국의 경우와 비교하면 심도 110m까지는 일본이 한국보다 수평응력이 크며 그 심부에서 부터는 작음을 나타내고 있다. 상기 식으로부터 측압계수(K_0)는 대략 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$K_0 = 0.482 + \frac{92.59}{H}$$

여기서 H : 심도 (m)

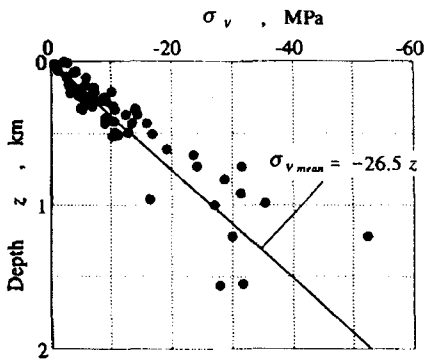


그림 3.3.1 심도에 따른 수직응력의 변화

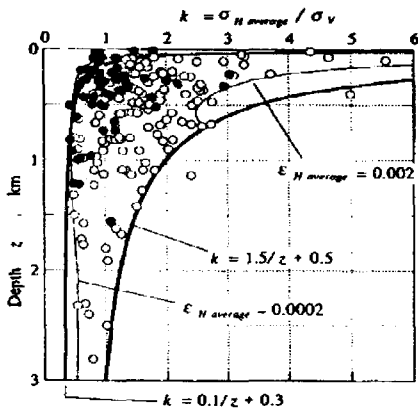


그림 3.3.2 심도에 따른 K 값의 변화

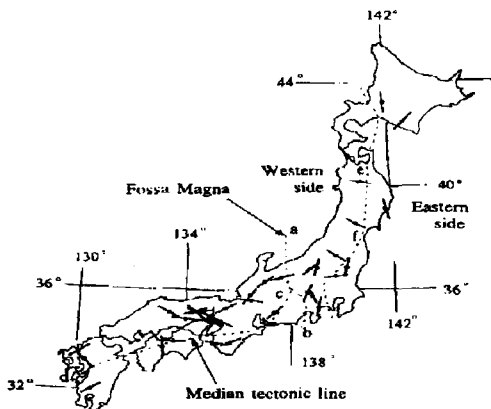


그림 3.3.3 일본에 작용하는 최대수평응력의 방향분포

4. 노르웨이의 지반특성

4.1 지질

먼저 유럽전체의 지질을 살펴보면 다음과 같다. 유럽은 지체구조적 측면에서 유라시아판 (Eurasian plate)의 서쪽 연변부에 위치하고 있다. 반면 우리나라를 포함한 동아시아는 이 유라시아판의 동쪽 연변부에 위치한다. 유럽은 지형적으로 스칸디나비아 반도를 포함한 북유럽과 영국, 프랑스, 독일 등을 포함하는 중부유럽과 스페인이 위치한 이베리아 반도 및 이태리가 남유럽에 해당한다. 유럽대륙을 구성하고 있는 지질분포는 북유럽 즉 노르웨이, 스웨덴 등의 국가가 위치한 지역에서는 선캠브리아의 Baltic shield(발틱순상지) (일명 Fennosarmatian shield)가 분포하며 이 순상지는 오랜 지질시대를 거치면서 몇 차례의 변형작용을 겪어 습곡, 단층들이 발달한다. 이 순상지를 구성하고 있는 암석은 편마암류 및 편암류들이다. 북유럽을 포함 중부유럽에는 고생대의 Caledonian orogeny를 겪은 변성퇴적암 및 화성암이 분포하고, 또한 중생대의 Hercynian orogeny를 겪은 비변성퇴적암 및 화성암이 분포한다.

유럽의 조산운동의 대표를 이루는 Alpine orogeny는 중생대 말에서 제3기 초에 걸쳐 프랑스 남부와 이태리 북부에 거의 동서방향으로 알프스 산맥을 형성하였다. 이 조산운동은 유라시아판과 아프리카판의 충돌에 의하여 형성된 것이다. 이 조산운동과 비슷한 시기에 이베리아 반도도 시계 바늘 반대방향으로 회전하면서 유럽대륙과 충돌하면서 피레네 산맥을 형성하였으며 이 주산운동을 피레네 조산운동이라고 부르기도 한다. 유럽에서 신제3기 이후의 퇴적분지는 도처에 분포하며 저지대 평지나 작은 구릉을 이룬다. 제4기의 미고결층은 강이나 호수주변에 분포한다.

유럽에는 앞에서 언급한 바와 같이 고생대에서 제3기까지의 퇴적암이 유럽 전역에 분포하며, 특히 이들 퇴적암은 바다에서 퇴적된 해성퇴적암으

로 석회암을 많이 함유한다. 지질시대가 오래된 고생대의 석회암은 오랜 지각변형을 겪으며 습곡 및 단층작용을 받아 지층이 매우 교란되어 있으며 지하에 석회동굴도 자주 발달하여 곳에 따라 유명관광지로 개방하기도 한다. 이탈리아에서는 석회암이 변성작용을 받아 대리석화된 곳이 많아 세계적으로 유명한 건축자재로 쓰이기도 한다.

노르웨이는 원래의미는 "northern way"를 뜻하는 나라로 면적이 324,000km²에 달하며 약 50%가 기반암이 노출되어 있다. 2.8%가 경작지이고 5%가 호수, 20%가 산림으로 되어 있다. 노르웨이는 스웨덴, 핀란드와 함께 세계에서 크고 오래된 대륙 shields 중의 하나인 Baltic shield의 한 부분으로 되어있다. 주요암석은 중기 및 후기 Precambrian에 생성되었으며 Baltic shield는 서쪽에는 Caledonian mountain range 그리고 동쪽으로는 후에 생성된 퇴적암으로 둘러싸여 있다.

4.2 암석물성

Norwegian Institute of Technology (현 NGI)에서는 지난 25년간 2,000여 암석시험편의 역학적 시험을 실시하였다. 그림 4.2.1에서는 영율에 대한 일축압축강도를 도시한 그림인데 일정한 경향성은 보이지 않는다⁸⁾. 어떤 암석들은 일축압축강도가 증가하면 영율이 증가하고 있다. 편마암의 경우는 일축압축강도(σ_c)와 영율(E)은 다음의 관계식으로 잘 표현될 수 있다.

$$E = 20 + \frac{1}{7} \sigma_c \text{ (GPa)}$$

어떤 다른 암석들 역시 유사한 경향을 보이고 있으나 일반적인 경향으로 볼 수는 없다.

점하중강도(I_s)와 일축압축강도(σ_c)는 다음에 표시한 선 사이에 있기는 하지만 양호한 일관성을 보이지 않는다(그림 4.2.2).

$$I_s = \frac{1}{20} \sigma_c \quad \text{과} \quad I_s = \frac{1}{3} \sigma_c$$

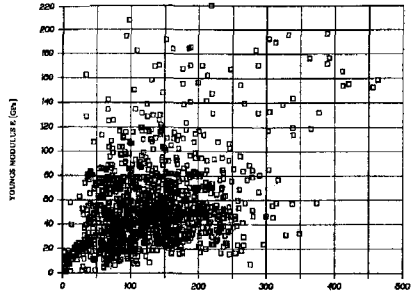


그림 4.2.1 암석의 탄성계수와 일축압축강도의 관계⁸⁾

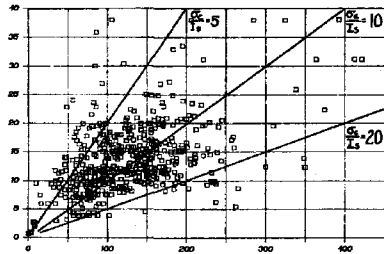
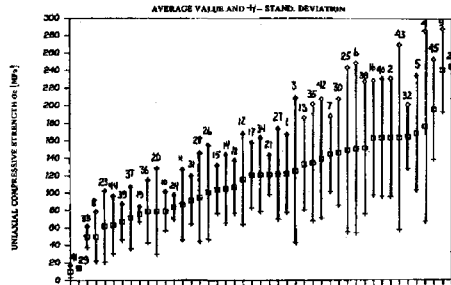


그림 4.2.2 인장강도와 일축압축강도와의 관계

암석이 강하면 강할수록 그리고 균질할수록 일축 압축강도와 점하중강도사이의 비는 더욱 커지는 경향이 있다. 모든 종류의 편마암의 탄성계수는 일반적으로 작고 자철광 및 유화광석은 높은 경향을 보이고 있다. 거의 대부분의 노르웨이 암석들은 전형적인 경암이다. 일축압축강도는 대부분 50MPa가 넘고 470MPa에 달하는 극경암까지 보고된 바 있다.



5. 현무암, 7.섬록암, 13.편마암, 14.편마암질 화강암, 16.화강암, 17.화강암질 편마암, 18.화강암질 섬록암, 23.석회암, 24.역암, 28.이암, 34.사암, 37.흑색셰일, 42.자철광, 43.유화광석

그림 4.2.2 여러 암석들의 일축압축강도

4.3 초기응력

Norwegian Institute of Technology 에서는 지난 20여년간 현지암반내 초기지압을 측정하여 왔다. 10~15개 지역별로 초기지압의 일정한 경향을 보였다. 노르웨이와 Fenoscandian shield(노르웨이, 스웨덴, 핀란드)의 다른 지역의 초기지압 측정결과는 지질 및 지형에 따라 커다란 차이를 보였다. 그림 4.3.1은 측정된 초기지압을 도시한 것이다. 대부분 수평응력이 수직응력보다 크며 측정된 최소주응력은 현지지하수압보다 통상적으로 컸다. 북부 노르웨이의 선캠브리안 암반내 초기지압은 높은 수평 Tectonic stresses가 지배적이다. 주응력은 대략 E-W 방향이며 중간주응력은 N-S 방향이었다. 수평주응력은 적어도 800~1,000m 심도까지는 산정한 수직응력($\rho gh = \text{암석비중} \times \text{중력가속도} \times \text{심도}$) 보다 컸다.

결론적으로

- 측정된 수직응력은 Overburden stress와 근사하다.
- 최소주응력은 현장지하수압보다 크다.
- 수평주응력은 수직응력보다 크다.
- 국부적으로 응력의 방향을 지배하는 패턴이 존재하였다.

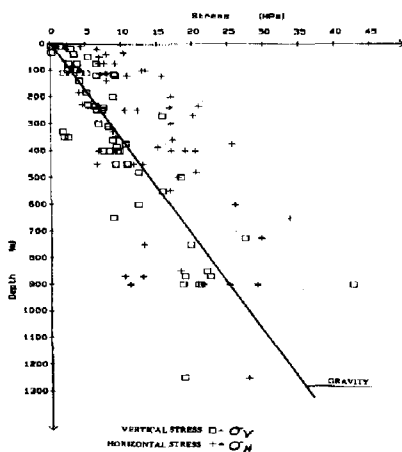
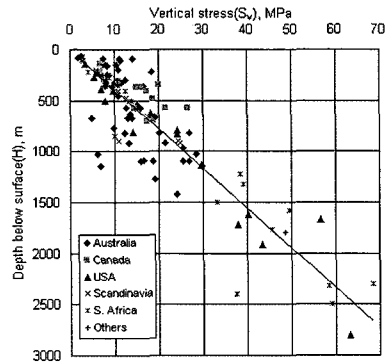


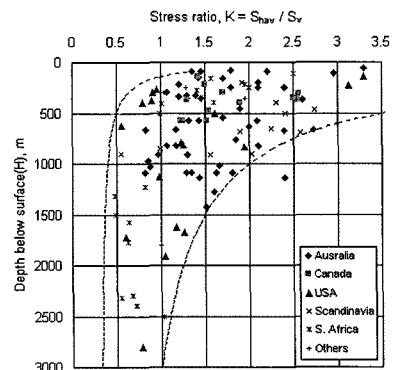
그림 4.3.1 노르웨이의 최대 수평응력 및 수직응력

이와 같이 수평응력이 수직응력보다 큰 초기지압 조건으로 인하여 1994년 동계올림픽을 위해 노르웨이의 요빅시에서는 대규모 지하 아이스하키경기장을 건설할 수 있었다. 지하공동의 피복두께는 23.5~36.5m로 암중은 선캠브리안 편마암이었으며 Q값이 평균 10정도의 양호한 암반이었고 암괴의 일축압축강도는 100MPa였다. 공동 천단부가 위치한 지점에서 측정된 초기응력이 약 4.5MPa로 매우 높아 축압계수 (K_0)가 3.0 이상이고 주응력방향이 N-S 방향이었다. ϕ 20~25mm \times 길이6~12m의 전단면그라우트 록볼트만으로 폭 61m \times 높이 24m \times 길이 91m의 세계최대 지하공동을 유지할 수 있었다.

Hoek과 Brown은 노르웨이를 포함한 스칸디나비아 반도를 비롯하여 세계적으로 측정된 초기지압자료를 수집하여 그 양상을 분석하였다(그림 4.3.2 참조).



(a) 수직응력



(b) 축압계수(K_0)

그림 4.3.2 세계적으로 측정된 초기지압의 분포양상 (Brown & Hoek, 1978)

$$\sigma_v = 0.027 H \text{ (MPa)}$$

$$\frac{100}{H} + 0.3 < K_0 < \frac{1500}{H} + 0.5$$

전체적인 경향을 보면, 수직응력은 암반의 단위 중량과 심도의 곱으로 주어지므로 큰 무리가 없는 것으로 나타나고 있지만, 수평응력은 특히 천부에서 변화가 심하여 수직응력에 대한 수평응력의 비가 심부에서는 1에 가까워지나(정수압 상태에 접근) 천부에서는 최대 3 이상의 값도 보이고 있다. 그림 4.3.3은 서유럽의 최대수평주응력의 방향을 나타내고 있다.

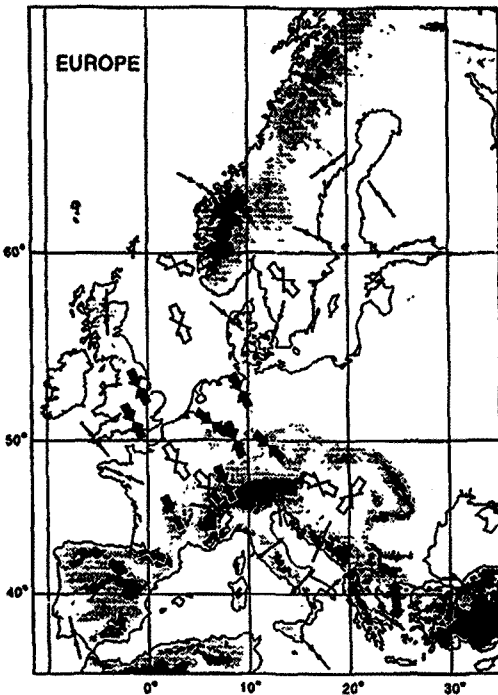


그림 4.3.3 서유럽에 작용하는 최대수평주응력의 방향분포

5. 결 언

한반도를 비롯하여 일본 그리고 노르웨이의 지반특성을 간단히 살펴보았다. 외국에서 개발된 터널굴착방법, 장비, 기술 등을 국내에 도입하여 적용할 때는 그 기술들이 개발된 모태가 된 그 나라의 지반특성의 파악과 이해를 바탕으로 검토하여야 할 것이다. 본 고에 기술된 국내의 암석물성자료들은 한국자원연구소에서 지난 20년간 실험실 시험을 통하여 구한 것들이 대부분으로 앞으로 추가적인 자료의 수집과 시험을 통하여 수정, 보완되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이병주(1988), "한국의 지질", 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, 한국암반공학회 기술강좌, pp.19~20.
2. 신희순(1997), "국내암석의 물리·역학적 특성", 고속전철 터널기술개발, pp.365~388.
3. 최성웅(1997), "현지암반초기지압이 분포특성 및 암반터널설계에의 적용", 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.7, pp.323~333.
4. 신중호(1988), "현장암반시험", 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, 한국암반공학회 기술강좌, pp.520.
5. 윤지선역(원저 菊地宏吉)(1992), "토목지질공학", 구미서관, pp.58.
6. Murata Y. 외(1991), "일본의 암석물성치", 지질조사소보고 제276호.
7. 일본광업회암석시험데이터작성·이용연구위원회(1986), "암석시험데이터의 작성 및 이용현황", 일본광업회지, Vol.102, No.1182, pp.507~551.
8. Norwegian Soil and Rock Engineering Association(1988), "Norwegian Tunnelling Today", Publication No.5, pp.41~46.