

일본의 이암/셰일의 특징

Characteristics of Mudstone and Shale in Japan

윤지선¹⁾

1) 인하대학교 환경토목공학부 토목공학전공, 교수

일본의 이암/셰일의 특성

Characteristics of Mudstone and Shale in Japan

윤지선¹⁾

인하대학교 환경토목공학부 토목공학전공 교수

1. 연암의 특징

물성, 특히 역학적 성상으로 일본에서 연암이라고 일컬어지고 있는 암석·암반은 그 성인으로 분류하면

- (1) 퇴적 연암
- (2) 풍화 연암
- (3) 화산 연암

등으로 크게 분류되며 각각 분포, 성상을 다르게 한다. 이외에 파쇄대나 약층 등이 있지만, 이들은 일반적으로 국소적인 것이며, 연암이라고 하면 (1)~(3)을 뜻하는 경우가 많다. 또한, 이와 같은 명칭은 반드시 정착된 것은 아니다. 대상 분야에 따라 그 명칭도 약간 다르게 되어 있으며 목적에 따라 더욱더 세분화된 명칭도 사용되고 있지만, 아직 그 단계도 아니기 때문에 감히 용어의 통일은 하고 있지 않다. 단, 이하에 언급하는 내용의 대부분은 도표를 포함해서 Okamoto et al.(1981)을 참고로 정리하고 있다.

퇴적 연암은 일본에 있어서는 주로 신제3기의 이암 등의 쇄설암류나 응회암 등의 화산 쇄설암류로 성층 구조가 현저하다. 흙이 암으로 되는 도중 단계의 암이다. 풍화 연암은 화강암의 풍화암에 대표되는 경암의 풍화 부분이다. 어느쪽이라고 하면 괴상의 연암이며, 암이 흙으로 되는 도중 단계의 암이다. 화산 연암은 저고결의 용결 응회암으로 대표되는 제4기의 화산쇄설물이나 용암의 급냉 파쇄부 등이다. 많은 경우는 물성의 변화가 현저한 불균질한 연암이다. 화산의 분화에 의해 짧은 시간에 형성된 암이다.

일본에서의 연암의 분포는 넓고 전 지역에 달하지만, 특히 퇴적 연암은 소위 green tuff 지역을 중심으로 동북 일본에 많다. 풍화 연암은 Chuugoku지반의 화강암 지역을 중심으로 서남 일본에 많다. 화산 연암은 제4기의 화산 지역에 보이며, 북해도, 동북, 관동의 일부와 구주에 많다.

연암의 성질을 한 마디로 하면 재료 물성면에서는 일축압축강도가 $100\sim 200\text{kgf/cm}^2$ 이하이며 수kgf/cm^2 정도 이상, 암반으로서는 그 물성이 틈 등의 불연속면보다는 구성 재

료(암석) 자체의 물성에 좌우되는 암이다. 그리고 역학적으로 흙과 마찬가지로 간극 수압의 거동이 중요한 역할을 하고 또한 소성이나 creep이 경암에 비교해서 중요한 문제로 되는 경우가 발생한다. 또한 구성 재료의 물성은 함수 상태에 따라 다르며, 굴착에 따른 응력의 해방이나 건습의 반복 등에 따라 급속히 열화한다. 따라서, 연암의 물성을 취급할 경우에는 강도, 변형성 등의 물성 외에 함수 상태 및 열화 난이도를 고려하여 총괄적으로 파악하는 것이 중요하다.

퇴적 연암의 지질공학적 특징은 흙이나 암(경암)과 비교하면 표-1.1과 같이 된다.

표-1.1 고결에 따른 지반·암반의 지질 요소의 변화

비교 사항	흙	연 암	경 암
지질시대와 암상	충적세~홍적세의 사니퇴적물	홍적세 후기~신제3기 퇴적암	고제삼기·중생대·고생대의 퇴적암(및 화성암·변성암)
지질의 연속성	수평성층구조, 천해~육수성퇴적물이 많고 암상 변화가 심하지만, 비교적 수평방향에 연속. 빙기에 생긴 매물 지형면이 불연속면을 형성. 현재의 상재 하중과 공학적 성질이 대응함.	성층 구조(일반적으로 경사층), 해성퇴적물로 지층 잘 연속하는 것이 많다. 일반적으로 지층이 습곡하고 있기에 공학적 성질은 현재의 상재 하중이 아니라 매물 이력에 지배됨	성층을 이루지만 공학적 성질은 성층 상태보다 단층·틈 등의 지반의 열화 요소에 지배됨
불연속면의 성질	층리면	이방성을 나타내지만 연질로 될에 따라 약하게 됨. 층리면은 암질의 다른 지층의 경계이며, 세 호층. 급경사의 경우에 불균일성이 문제로 됨	강도 및 변형특성에 이방성, 불균일성이 발생하고 틈에 준해서 취급할 수 있는 경우가 많다.
	단층(파쇄대)	층위학적으로 하위층이 문제로 되지만 파쇄 규모는 작다. 엇갈림에 의한 암상 변화 쪽이 강도, 변형성에 미치는 영향 크다.	조사의 중점은 위치, 파쇄에 의한 열화, 점도화, 투수성의 증가 등에 놓인다.
	틈	틈은 없고 주로 암질(토질)에 지배됨	일반적으로 틈은 적다. 약간 존재하더라도 그렇게 영향 없고, 암질 그 자체의 성질이 강하게 나타남.
풍화·변질의 영향	강도를 좌우하는 열화는 거의 없음	산사태 또는 온천 변질에 의한 열화 외에는 그렇게 현저하지 않지만, 열화를 동반함. 굴착후에 급속히 풍화가 진행	현저한 열화를 동반함

이와 같은 흙이 암으로 되는 고결 과정을 물성의 변화로서 생각해본다. 암 자체의 성질에 대해서는 일축압축강도 q_u 와 간극을 n 또는 간극비 e 에 대해서, 그 모양을 제시하면 그림-1.1, 1.2와 같이 된다.

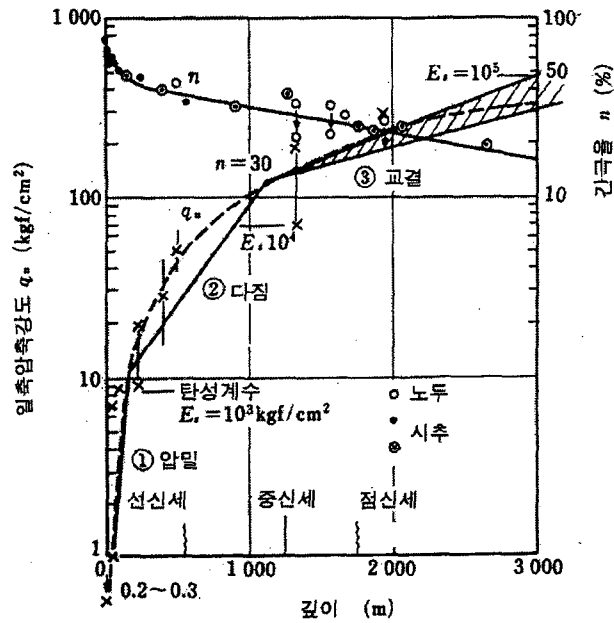


그림-1.1 퇴적물의 매물에 따른 물성의 변화

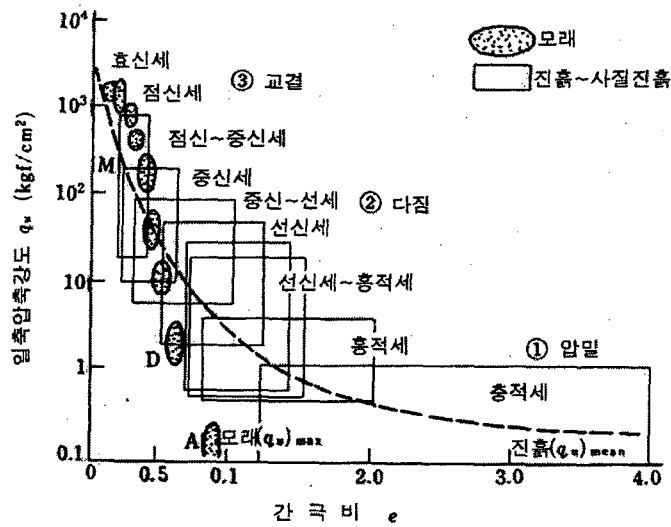


그림-1.2 암화(岩化)에 따른 일본의 신생대 퇴적물의 물리적 성질의 변화

연암이라고 일컬어지는 영역은 그림중의 ②에 해당한다. ①의 영역에서는 간극의 감소에 따라 강도는 증가하지만, 입자 골격이 약하고 강도는 작다. 하중이 증가한 경우는 상당한 부분을 우성 간극압이 지지하는 소위 압밀 과정에 해당된다. 이것에 대해서 ②의 영역은 입자 골격이 하중을 지지하는 단계이며, 입자가 다짐됨에 따라 강도는 급격히 증가하고, 얼마 지나지 않아 입자 사이가 완전히 밀착한다. 이암에서는 간극을 30% 정도까지

같은 경향이 계속된다. 이 모양을 체적압축률로 표시하면 보다 현저히 나타난다.

③의 영역은 그 후의 입자의 변형, SiO_2 나 CaCO_2 성분의 침착, 입자의 재결정작용 등에 따라 입자가 밀착, 교결되는 과정으로 생각된다. 그리고 교결의 정도, 교결물의 종류 등에 따라 강도에 흠어짐이 생긴다. 이 사이, 암반으로서는 그림-1.3에 보이는 바와 같이 고결이 진행됨에 따라 틈이 많아지고 그의 물성에 미치는 영향이 크게 된다. ③의 영역에서는 암 자체의 물성과 암반으로서의 물성이 이러한 이유로 차이가 생기는 모양을 알 수 있다.

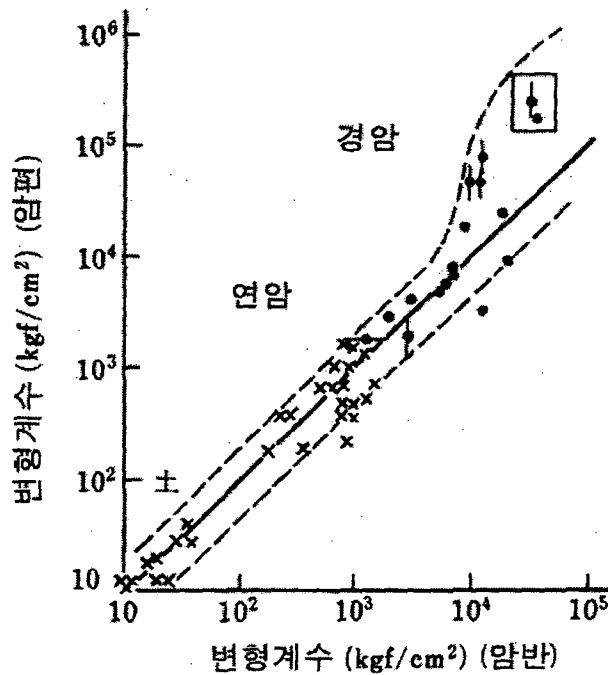


그림-1.3 암석편과 암반의 변형계수의 상관(암석편은 삼축압축시험, 암반의 변형계수는 흠~연암에서는 주로 공내변형시험)

또한, 불포화 암에 대한 물의 영향에 관해서는 그림-1.4에 탄성파속도와 압축강도의 예를 제시한다. 횡축의 물포화도에 따라 물성이 상당히 변화하고 있다. 건조 과정에 있어서는 흠의 경우도 이들 값의 증가가 마찬가지로 보이지만, 습윤 과정에서의 P파속도의 증가는 입자 골격의 영향이며 이것은 약한 흠에서는 보이지 않은 성질이다. 암에서는 함수량의 변화에 대한 물성의 변화는 어느 과정에서도 작다.

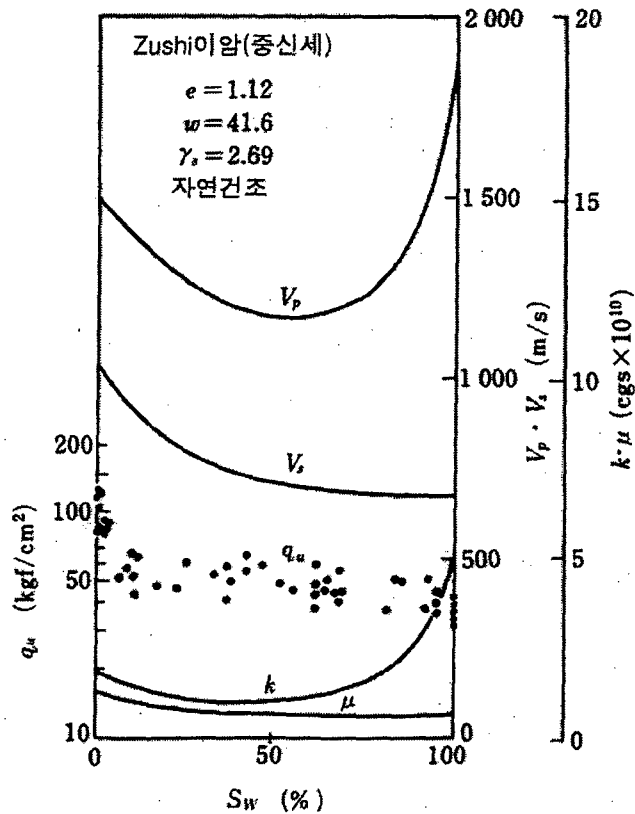


그림-1.4 이질 연암의 물포화도의 변화에 따른 물성 변화의 일례

연암의 물성을 총괄적으로 판단하기 위해서는 또 하나의 요소인 열화 난이도가 중요한 역할을 한다. 가장 현저한 영향을 미치는 것은 팽윤·slaking 현상에 따르는 것이다. 팽윤이란 흡수에 의해 체적이 증가하는 현상이며, 그것을 억제하고자 하면 암체중에 팽윤압이 생긴다. slaking은 흡수에 따라 입자 사이의 결합이 파괴되어 암석의 강도가 저하하고, 현저한 경우에는 입자가 따로따로 흩어지고 토양화하는 현상이다. 이암의 경우는 양자는 표리 관계에 있지만, 사질암에서 고결의 정도가 낮은 경우에는 팽윤성은 없지만 slaking이 현저한 것이 많다.

풍화 연암은 그림-1.5에 모식적으로 제시하는 바와 같이 지표 부근에 있으며 지표에 가까울수록 풍화가 진행하고 암반의 세편화, 점토화가 현저하다. 일본의 화강암류에서는 30~50m의 풍화대가 있는 경우가 많다. 이것은 심층 풍화라고 일컬어지고 있다. 그림으로부터 댐, 교량의 기초나 절취 사면에서는 지표 부근의 풍화와 이완된 암반의 물성 평가가 중요하며, 지하발전소, 지하저장공동 등에 적용함에 있어서는 신선한 암반중의 불연속면의 평가가 중요하다. 터널은 양자의 중간에 위치한다. 그림-1.6은 화강암의 풍화대를 확대한 모식도이다. 풍화 연암이라고 일컬어지는 범위는 이 그림의 $C_M \sim D$ 의 일부를 말한다.

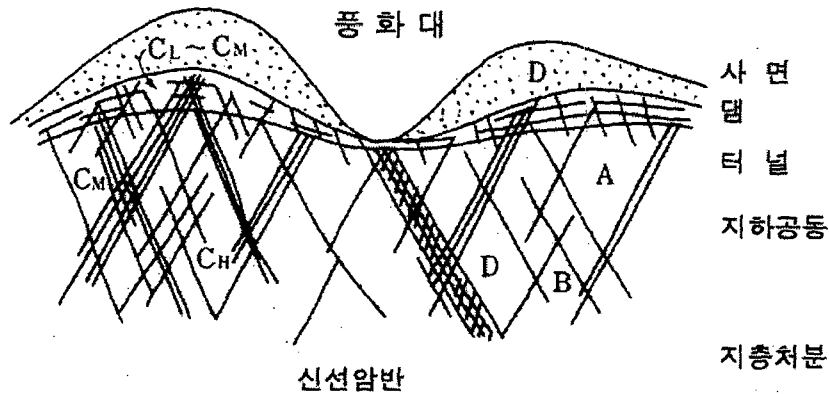


그림-1.5 암반의 모식도

암반의 풍화 정도는 육안으로 판단한다든지 탄성파전파속도로 표시된다(그림-1.6). 암 자체의 열화 정도는 물리적으로는 간극율의 증가나 강열감량(ignition loss) 등으로 정량적으로 표시된다. 또한, 점토화의 정도는 점토 광물의 분석이나 화학 분석 결과를 지수화하는 등으로 표시된다.

분류기호	경벽·노두	암편 정도	풍화 정도	절리면 상태	절리 간격	코어	평가	Vp(km/s)
D		손가락으로 찌부러짐	토양화 여기저기에 암편	밀착 점토화 흙 명명하지 않음	5cm이하-파쇄 코어상-자갈상			0.5
C _L		해머 타격으로 딱음, 쉽게 깨짐	내부까지 풍화 조암광물 점토화	흙 명명하지만 점토화 밀착	5~15cm 많은 자갈-암편상		점토화	
C _M		딱음 깨지기 쉬움	전체 갈색화 조암광물의 변질 현저	개구틈 많고 점토를 킴	5~30cm 많은 암편-단주상		부수성	2.0~3.0
C _H		약간 딱음 깨지기 어려움	전체로 약간 갈색 조암광물 약간변질	밀착-약간 개구 점토를 얇게 킴	15~30cm 많은 단주상			
B		금속음 깨지기 어려움	흙을 따라 갈색화 광물변질 없음	밀착-약간 개구 점토 까지 않음	30~50cm 많은 단주-봉상		강도	
A		금속음 깨지기 어려움	신선	밀착, 점토 까지 않음	50cm 이상 코어 봉상			4.0~5.0

불량 ← 양

그림-1.6 모식적인 암반분류-절리 간격은 단층·절리의 형성과 밀접한 관계가 있으며 풍화작용에 관계된 다른 요인하고는 반드시 대응하지 않기 때문에 어느 쪽이든 나쁜 요인을 포함하는 군으로 분류한다. 단, 투수성은 점토화가 진행함에 따라 화살표 방향으로 변화한다. 탄성파속도(V_p)는 대략의 목표치이다.

풍화에 따른 물성의 변화는 이들 풍화의 지표를 사용해서 표현된다. 그림-1.7은 시추 코어의 흙의 지표 RQD와 공내변형계수 E_b와의 관계를 plot한 것이다. RQD에서는 암 자체의 열화 정도는 표현할 수 없기 때문에 그림에서는 일축압축강도 q_u를 parameter로 해서 표시하고 있다. q_u가 100~200kgf/cm² 이하의 연암 영역에서는 풍화에 의한 것으로 생각되는 변형계수의 감소 경향을 읽을 수 있다.

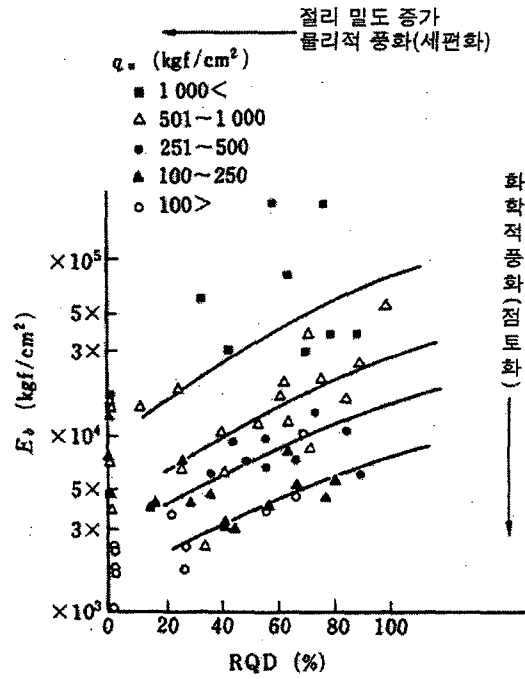


그림-1.7 RQD와 공내변형계수(E_b). q_u 는 일축압축강도

그림-1.8은 풍화 지표에 간극율을 이용한 예이다. parameter의 암반등급과 같이 생각하면 이 화강암에서는 암편의 간극율이 암반의 변형계수와 매우 좋은 상관관계를 나타내고 있다.

그림-1.9는 마찬가지로 전단강도와의 관계를 제시한 것이다.

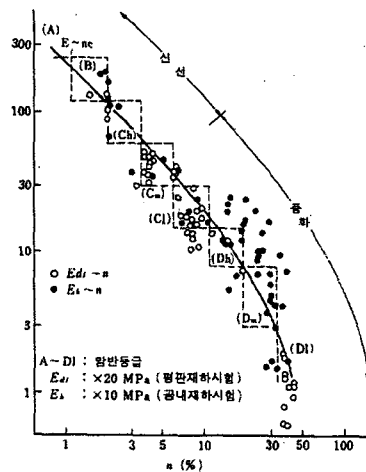


그림-1.8 암편의 간극율(n)과 변형계수(E (E_{dl} : jack 시험, E_b :공내시험))

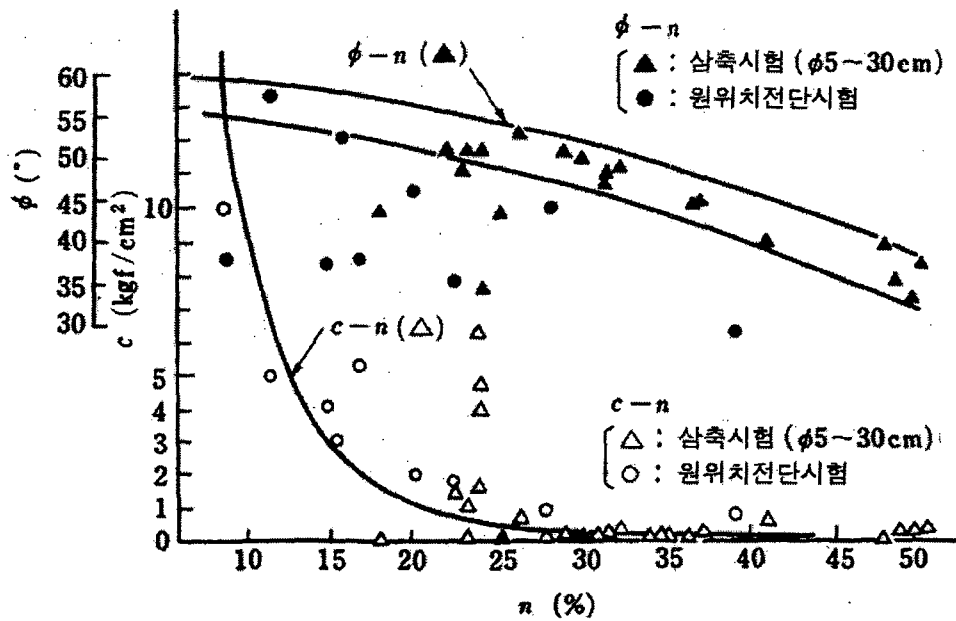


그림-1.9 암편의 간극율(n)과 전단정수(C, ϕ), 실내삼축압축시험 및 원위치전단 시험과의 비교

화산 연암은 제4기의 화산활동에 따른 용암의 급냉 파쇄부, 화산쇄설암, 특히 저고결의 용결응회암 및 그들의 호층 등이다. 화산 연암의 암반으로서의 특징은 물성이 불균질하고, 극단한 고투수층이나 연약층이 자주 존재한다. 특히 용결응회암에서는 수직 방향의 물성의 변화가 현저하다. 또한, 열수변질작용에 의해 점토화하고, 강도가 저하하며, 높은 팽윤성을 나타내는 경우가 있다.

화산 연암의 물성은 통일해서 취급하는 것이 어렵기 때문에 전형적인 지질 모델을 제시하고 각각의 역학적 성질과 투수성에 관해서 정성적으로 특징을 제시하면 그림-1.10과 같이 된다. 이것은 dam site를 염두에 두고 모델화한 것이지만, 다른 목적에 대해서도 범용된다.

이상, 연암의 일반적인 특징을 개설했지만, 연암으로서 어떤 특성이 문제로 되는가는 대상 구조물에 따라 다르게 되는 점에 주의할 필요가 있다.

	용암 (자파쇄 용암을 동반할 경우가 많다)	용암 화쇄암 호층	용회각력암	용결 용회암		구하상사력층
				고용결	저용결~shirasu	
모식단면도						
	용암 자파쇄상 용암	용암 화쇄암	용회각력암	고용결 용회암 저용결~shirasu 미고결 퇴적층	저용결~shirasu 미고결 퇴적암 기반암	loam 층 용암 미고결 퇴적암 기반암
성상	<p>용암은 판상 절리, 주상 절리가 발달하고 투수성이 높다. 자파쇄 용암에서는 불규칙한 틈이 발달하고 투수성도 높다. 양자 모두 시대가 새로운 것일수록 투수성이 높다. 이중 용암의 절곡부의 투수성이 높은 경우가 있음</p>	<p>용암과 비교해서 화쇄암 쪽이 투수성이 낮은 경우가 많지만, 풍화나 파쇄의 영향에 의해 높은 경우가 있다. 변질을 받은 경우는 투수성이 급변할 경우가 있음</p>	<p>일반적으로 투수성은 낮다.</p>	<p>용암에 유사한 성상을 나타내지만, 주상 절리가 잘 발달하고 투수 결로 는 용암보다 먼 곳에 발달 경우가 있다. 하위에는 미고결의 사력층을 동반할 경우가 많다. 화하고 있는 경우도 있음</p>	<p>다공질이고 연결이 잘되며, 결보기 보다 투수성이 높은 경우가 있으며, piping의 우려가 있다. 하부에는 투수성이 높은 미고결 사력층을 동반할 경우가 많다.</p>	<p>기반암의 풍화, 미고결의 사력층, 신기 용암의 틈 등 투수성이 높은 경우가 많다.</p>
	강도	<p>용암 자체의 강도는 높다. 자파쇄 용암은 강도가 작은 경우가 많다. 변질을 받으면 강도가 극단하게 작게 됨</p>	<p>화산암의 강도는 일반적으로 작은 경우가 많다. 경계부는 변질하고 강도가 작고 약층을 형성하고 있는 경우가 있음</p>	<p>제4기의 것은 이류 퇴적물에 가깝고 강도가 매우 작다.</p>	<p>용암에 유사한 성상을 나타냄. 미고결 퇴적층의 강도는 작다.</p>	<p>연결이며 매우 강도가 낮다.</p>

그림-1.10 화산암지역의 지질구조모델과 그 성상

2. 연암 터널의 문제점

국토의 70%를 차지하는 산지로 구성되어있는 일본의 지질은 기반을 이루는 고생층이나 화강암류, 이들을 덮는 신제3기 이후의 지층, 신제삼3에서 현세에 활동한 화산의 분출물이 대부분을 차지하고 있다. 이들 중, 신제3기 이후의 지층의 대부분, 화산 분출물 중 Shirasu, 용결응회암 등의 유하 퇴적물, 화강암류가 풍화해서 형성된 Masa 등이 연암이라고 일컬어지는 것이다.

이들의 연암은 평야 주변의 구릉이나 비고가 작은 산지, 화산의 산기슭, 개석된 완만한 화강암류로 이루어진 산지의 표층부에 많이 분포한다. 또한, 동북 일본에서는 green tuff라고 총칭되어 제3기 중신세의 해저 화산 활동이 활발한 시대 이후에 퇴적하고 그 후의 조산운동으로 현저하게 습곡된 지층으로서 비고가 큰 산지를 형성해서 분포하고 있다.

종래는 철도와 도로도 비고가 작은 완만한 산지는 절취해서 통과하고, 비고가 큰 산지도 가능한 한 계곡에 따르는 등 될수록 터널을 적게하는 노선 선정을 기본으로 해왔지만, 신간선이나 고속 도로 등 고속 주행을 목적으로 하는 노선에서는 노선 연장을 짧게, 곡선이나 경사를 완만하게 설정하기 때문에 지형에 대한 배려가 되지 않고 또한, 최근, 터널의 공사비가 다른 구조물의 공사비에 비교해서 상대적으로 저하하고 있기 때문에 터널이 증가하고 연암 터널이 증가하는 경향을 보인다.

연암 터널은 경암 터널에 비교해서 기계 굴착의 용이성이나 과잉 굴착의 경감 등, 장점도 있는 반면에 지형, 지질 조건에 따라서는 연암의 특성에 기인해서 이하의 1)~3)에 언급하는 바와 같이 공사에 중대한 영향을 미치는 경우가 많고 문제도 있다.

1) 굴착 지반의 밀어냄과 대토압, 소위 팽압의 작용

연암, 특히 green tuff 지역 등, 암석 중에 다량의 점토 광물을 포함하는 암석에서는 큰 피복 두께의 터널의 경우에 갱도 굴착 후의 갱도 주변의 응력 재배분에 의해 터널 주위의 지반에 파괴가 발생하고, 또한, 지중의 물의 침투에 의한 열화나 팽윤작용도 더해져서 내공에의 지반의 밀어냄에 의한 단면의 축소가 발생하고 이것을 방지하기 위해 실시하는 지보공이나 복공에 강대한 토압이 작용해서 경우에 따라서는 파괴에 이르는 경우도 있다.

또한 여기까지 이르지 않아도 피복 두께가 큰 경우, 연암 지반에서는 축압의 작용이나 반팽이 발생하는 경우가 많다.

2) 용수에 따른 자립성의 저하와 지반의 붕괴

파쇄대 등 개구된 분리면이 발달하고 있는 지반이나 고결도가 작은 투수성의 지반에서는 고수압이나 지하수의 용출에 따라 굴착면의 자립성 저하나 지반의 붕괴와 유출을 초래하는 경우가 많다.

이와 같은 지하수의 용출에 따른 문제는 반드시 큰 피복 두께의 구간이 아니라 피복

두께가 작은 지반의 경우는 지표면의 큰 침하나 함몰을 유발할 경우도 있다.

3) 사면 재해와 편압의 발생

green tuff 지역, 화산 지역의 온천이나 열수에 의한 변질 지대, masa토나 shirasu지반 등에서는 산사태나 붕괴의 위험성이 있다. 특히 산사태 기원지나 사면 재해의 상습지에서는 피복 두께가 작은 구간이나 갭구에서 그들과의 관계가 문제로 된다. 즉, 공사중에 편압의 작용이나 사면 재해의 유발, 지진, 다량의 강우, 융설수의 침투에 따른 재해의 발생이나 지반 이동에 따른 편압의 작용 등의 위험성이다.

연암 지반은 위에서 언급한 문제가 나타나지 않은 경우에는 TBM이나 자유단면 굴착기에 의한 기계 굴착에 적합하고 폭파공법에 의존할 수 밖에 없는 경암에 비교해서 공사소음, 진동을 발생하지 않고 과잉 굴착이나 과파쇄가 적어 진행도 향상할 수 있는 가능성이 있으며 시공 조건으로서는 양호라고 할 수 있다. 그러나, 이질암의 경우는 그의 slaking 하기 쉬운 성상으로부터 저반의 용수에 의한 열화에 따른 분니(噴泥)나 지내력의 저하에 의해 얇은 상반에 변상을 발생한다든지 지반 열화 진행에 의한 장기에 달하는 토압의 증가에 의해 토압을 그렇게 고려하지 않은 설계의 터널에서는 변상을 발생하는 경우도 있다.

또한 용수가 많고 물처리를 잘 못한 경우는 trafficability의 저하가 발생한다.

표-2.1은 터널의 설계, 시공 요령과 지형 지질 조건의 관계를 제시한 것이지만, 여기서 개설한 바와 같이 연암 터널에 있어서는 연암 특유의 문제가 많이 존재하기 때문에 터널의 계획으로부터 보수에 이를 때까지의 각 단계에 있어서 여러 가지 배려를 필요로 한다.

다음의 1)~3)은 연암 터널의 건설의 각 단계에서 유의해야 할 사항이다.

1) 노선 선정의 단계

팽창성 토압과 산사태는 동일 지역에서 발생할 경우가 많지만, 팽창성의 발생이나 지하수의 용수에 따른 문제가 염려되는 지반을 회피하도록 노력하고 이들을 회피 못한 경우는 될수록 터널의 피복 두께를 작게하도록 배려하는 것이 바람직하다.

그러나 산사태 지대의 경우는 산사태면보다 터널이 상당히 하부를 통과하도록 선정할 필요가 있다.

2) 설계·시공 계획의 단계

연암 특유의 지반 물성이나 역학 특성을 고려해서 충분한 조사 시험을 실시하고 토압이나 지반의 안정성, 앞으로의 열화를 상정해서 적절한 단면 형상, 지보공, 복공의 설계나 시공법, 시공 기계, 보조 공법의 계획을 세울 필요가 있다.

산악 터널에서는 NATM이 표준공법으로 되어 있지만, NATM에서는 지반이 원래 가지고 있는 지반 자체의 지지능력을 활용하고자 하는 목적을 달성하기 위해서 종래 이상으로 지반의 제반 특성을 정확하게 파악할 필요성이 있다.

표-2.1 터널의 설계, 시공 요소와 지형, 지질 요소와의 관계

지형, 지질 요소		* 피복 두께	* 사면의 안정성	광역의 지질상태	성질상 상태	풍화대, 파쇄대	* 지반의 강도	* 암석강도	* 신기 퇴적물의	*1) 지반의 안정성	*2) 지하수 상태	* 투수성	수 질	지 열	유해가스	광물자원	온도, 지하수	
설계, 시공 요소	노선 선정	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	굴착공법, 복공법 segment 포함 rail 방식인가 tire방식인가 위치, 구조 사면제해, 눈제해의 방지
	공구구분, 공정 계획	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	시공법	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	천공	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	폭파	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	기계 굴착	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	shield 기계	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	지보공·복공	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	뒤채움	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
	갱내 운반	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
배수설비·배수구	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		△	○	○	○		
화기 설비	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○		
갱문공	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○		
사면 대책	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○		
보조 공법	암기공법	○		○			△	△	○	○	○	○			○	○	△	
	배수공법	○		○					○	○	○	○			○	○	△	
	주입공법	○		○					○	○	○	○			○	○	△	
	동결공법	○		○					○	○	○	○	△	△	○	○	△	
주변 대책	지표 침하	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					○	
	구조물보호	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					○	
	갈수대책 공사소음·진동·수질 오락	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			△		○	

○:관련이 깊은 것, △:관련이 있는 것, *연암 터널에 특히 관련되는 문제
1):팽윤, 유동화, 함수강도저하 등, 2):지하수 부존 상태, 수압, 계절 변동 등

3) 시공 단계

터널의 경우는 착공전에 지반의 실체 파악이나 실제의 거동의 상정이 곤란하기 때문에 NATM에 의하지 않은 경우도 특히, 피복 두께가 작은 지반에서는 지표, 지중, 터널내의 관찰, 계측을 충분히 실시하고, 현 상황을 정확하게 파악하여 실시 설계나 시공에 활용해 갈 필요가 있다. 또한, 그 이외의 터널에서도 터널내의 관찰과 그의 실시 공사에의 feed back을 소홀히 해서는 안된다.