

지보재의 설계와 시공 : 록볼트 및 케이블볼트



김택곤
SK건설



이석원
건국대학교



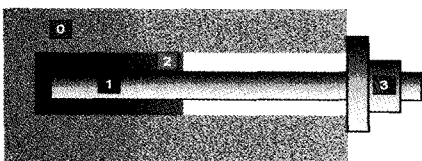
장수호
한국건설기술연구원

I. 들어가며

록볼트나 케이블볼트, 앵커 등의 지보 부재는 주로 다음의 4가지 성분으로 구성된다.

각 성분은 2가지 이상의 하중 상호전이 현상과 관련되어 지보의 효과를 나타내게 된다. 일반적으로 암반은 지보 부재로 생각하지 않을 수 있으나, 지보시스템에 큰 영향을 주게 되므로 하나의 성분으로 고려될 수 있다. 록볼트나 케이블볼트 내에서 이러한 성분들이 역학적으로나 마찰적으로 상호 작용하게 되면서, 전면 연속적으로나 국부적으로 거동하게 된다. Windsor(1997)에 의하면 이를 고려하여 3가지로 지보시스템을 나눌 수 있다.

- Continuously Mechanically Coupled (CMC) Systems



- 0 : 암반
- 1 : 재료요소
- 2 : 내부 정착재
- 3 : 외부 정착재

- Continuously Frictionally Coupled (CMC) Systems
- Discretely Mechanically or Frictionally Coupled (DMFC) Systems

표 1은 이를 바탕으로 록볼트, 케이블볼트, 앵커를 분류한 것이다. 록볼트는 종류에 따라 CMC, CFC, DMFC 형태로 존재하는 반면, 케이블볼트는 모두 CMC 시스템에 해당한다. 본 원고에서는 이 중 록볼트와 케이블볼트의 설계와 시공방안에 대해 고찰하기로 하며, 관련 내용은 2008년 9월의 터널공학 대토론회에 발표되었던 내용을 기반으로 한다.

II. 록볼트

1. 록볼트 일반사항

록볼트는 슛크리트와 마찬가지로 지반과 일체화되어야 그 효과를 충분히 발휘할 수 있다. 따라서 지반 거동에 대

표 1. 록볼트, 케이블볼트, 앵커

Reinforcement Device	CMC	CFC	DMFC	Rock Bolts	Cable Bolts	Ground Anchors
Deformed bar	•		•	•		
Hollow deformed bar	•		•	•		
Ribbed bar	•		•	•		
Rolled Thread bar	•		•	•		
Tubular Bolt	•		•	•		
Yielding bolt	•			•		
Square twisted bolt	•			•		
Self drilling bolt	•			•		
Cone Bolt	•			•		
Split Set		•		•		
Swellex bolt		•		•		
GD Rock Nail		•		•		
Plain bar			•	•		•
Pigtail or Wriggle bolt			•	•		
Fibreglass bolt			•	•		
Slot and wedge bolt			•	•		
Expansion shell bolt			•	•		
Pre-stressing wire	•		•		•	•
Pre-stressing bar	•		•		•	•
Pre-stressing strand	•		•		•	•
Polymer strand	•		•		•	•
Birdcaged strand	•				•	
Bulbed Strand	•				•	
Ferruled Strand	•				•	

한 작용효과를 고려하여 설계할 필요가 있다. 록볼트의 작용효과로는 이완 압력을 원지반에 고정시키는 매달음 효과, 절리면의 전단력 전달을 가능하게 하는 합성보 효과, 직간접 프리스트레스에 의한 터널 내 3축 응력상태로 일정구간 압축효과를 만들어주는 내압효과, 시스템 록볼트에 의한 아치효과, 항복이후의 잔류강도를 증가시켜주는 지반보강효과 등이 있다. 이러한 효과를 최적으로 발현시키기 위해서는 현장상황에 맞게 록볼트의 길이, 간격, 방향 등을 결정해주어야 한다. 그림 1은 캐나다의 한 대학원에서 록볼트 실내시험 결과로서, 록볼트로 인한 압축영역과 압편의 자체 내부마찰력 등의 발현 등에 의한 상기 효과에 의해 보강될 수 있음을 보여주고 있다.(그림 1(a)) 그림 1(b)는 록볼트 선상의 하중분포를 보여주고 있다. 그림과 같이 록볼트의 어느 중립축을 기준으로 축하

중은 감소하며, 두부쪽은 pick-up length, 선단 쪽은 anchor length에 전단력이 상호 작용하고 있다. 일반적으로 anchor length가 길수록 볼트의 효과는 높아지는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 록볼트 설계 시에는 다음 사항들을 고려해야 한다.

- 록볼트 자체의 항복하중과 정착방법을 면밀히 검토하고, 또한 시공성 및 시공시간 단축 등을 고려하여 시공시간(cycle time)도 충분히 검토하여야 한다.
- 슛크리트, 강지보재 등 기타 지보재와 병용하는 경우에는 각각의 지보 효과를 고려하여 종합적인 지보 기능을 평가한 후 록볼트를 설계할 필요가 있다.
- 록볼트의 작용 효과를 장기적으로 기대하는 경우에는 록볼트가 부식되지 않도록 충분한 검토가 필요하다

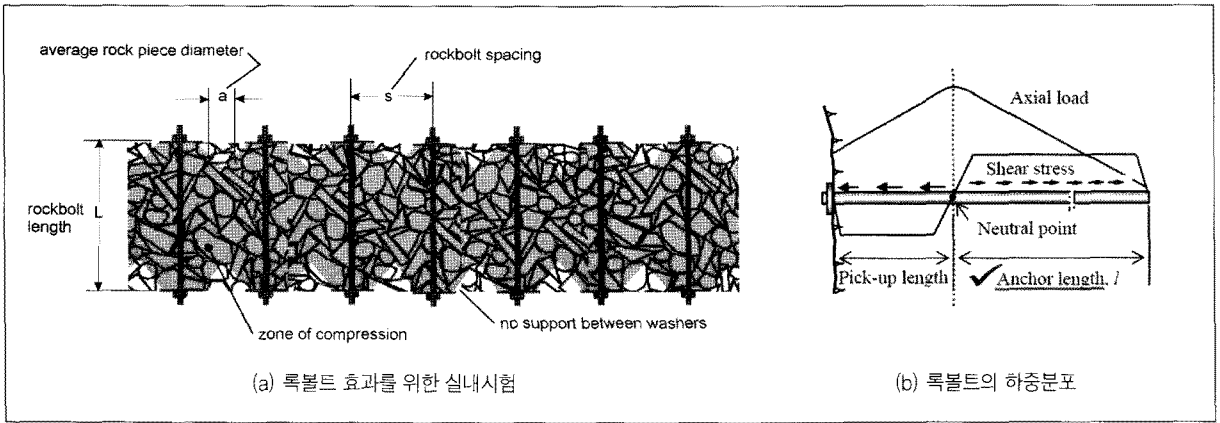


그림 1. 록볼트 효과를 위한 실내시험

며, 특히 강산성 지반(온천, 산성 용수 등이 존재하는 지반) 및 해수의 영향을 받는 지역에서는 내부식성 재료를 사용하는 등의 대책을 강구하여야 한다. 특히 이와 같은 록볼트의 장기 내구성 확보는 록볼트를 영구 지보재로 활용하는 싱글셀 터널에서 매우 중요하다.

- 록볼트의 재질, 지압판, 정착형식 및 정착재료의 선정 등에 있어서는 그 시공성과 성능을 검토하여야 한다. 예를 들어 매달음 효과를 강조할 경우 소요 인발 내력에 대한 철저한 검토가 필요하며, 암반이 파쇄되어 있거나 지하수 유출로 인해 정착이 곤란할 경우 재질이나 부착에 대한 적절한 선정이 필요하다. 또한 내공변위가 크게 발생하는 경우에는 선단정착형 또는 혼합형의 록볼트 형식으로 프리스트레스를 도입할 수 있다. 이 경우 도입된 프리스트레스가 지속적으로 유지될 수 있는 지반조건이어야 하며 프리스트레스에 의한 록볼트의 응력이 항복강도의 80% 이내로 하는 것이 바람직하다.

2. 록볼트의 재질 및 형상

록볼트의 재질은 그림 2와 같이 소요의 강도 이상을 가

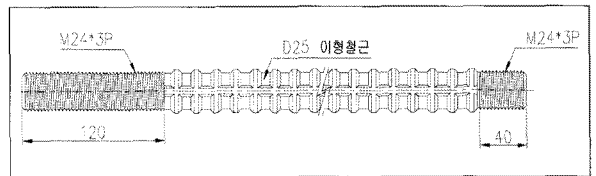


그림 2. 이형강봉 록볼트의 일반도 (단위: mm)

지는 이형봉강으로 제작되는 것을 원칙으로 하나, 강관, 팽창성 강관 또는 이와 동일한 강도와 기능을 가지는 섬유보강 플라스틱(FRP) 등 기타 소재도 사용할 수 있다. 이때 재질 및 강도는 한국산업규격(KS)에 적합한 것이어야 하며, 충분한 인장강도와 필요에 따라서는 연성을 가질 수 있어야 한다.

일반터널에 사용되는 강재는 SD 350 이상으로서 KS E 3132와 KS D 3504에 제정되어 있는 바와 같이 인장강도와 연신율이 큰 것이어야 한다. 참고로 석유류 비축기지 및 대형 지하공간에서는 SD 400 이상을 원칙적으로 사용하고 있다. 록볼트로 사용되는 이형봉강의 주요 기계적 성질을 요약하면 표 2와 같다.

록볼트 직경은 1본의 록볼트가 지탱하는 암괴의 중량 또는 지반에 필요한 전단보강력에 의해 결정할 수 있으나, 일반적으로 볼 때 D22~D29 정도가 무난할 것으로 보이며, 일반 도로터널의 경우 D25의 규격이 대부분 사용되

표 2. 록볼트로 사용되는 이형강봉의 기계적 성질(KS D 3504)

재질기호	기계적 성질			
	항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율(%) (시험편 2호 기준)	굴절각도(°)
SD 350	350 이상	490 이상	18 이상	180
SD 400	400 이상	560 이상	16 이상	180

표 3. 록볼트로 사용되는 이형강봉의 무게, 치수 및 마디의 허용한도(KS D 3504)

호칭명	단위 무게 (kg/m)	공칭 지름 (mm)	공칭 단면적 (cm ²)	공칭 둘레 (cm)	마디의 평균 간격 최대치 (mm)	마디높이		마디를 합계의 최대치 (mm)	마디의 축선과의 각도
						최소치 (mm)	최대치 (mm)		
D22	3.04	22.2	3.871	7.0	15.5	1.1	2.2	17.5	45° 이상
D25	3.98	25.4	5.067	8.0	17.8	1.3	2.6	20.0	
D29	5.04	28.6	6.424	9.0	20.0	1.4	2.8	22.5	

고 있다. 하나 지반의 변형이 클 것으로 예상되는 경우에는 록볼트의 내하력을 향상시킬 필요가 있으므로, 단면적이 크고 인장강도가 큰 재료(SD350 이상, D25 이상)를 사용하며, 사용 개수를 늘리는 방안을 검토하여야 한다. 록볼트로 사용되는 이형강봉의 직경에 따른 주요 사양은 표 3과 같다.

한편, 막장의 안정성을 확보하기 위한 막장 볼트나 확폭 예정 구간에 있어서 굴착중 안정성을 위해 사용되는 볼트 등은 시공성을 고려하여 고강도 섬유보강 플라스틱이나 유리보강 플라스틱(GRP, Glass Reinforced Plastic) 등을 재료로 한 볼트를 사용하는 경우도 있다. 또한 영구 지보재로 적용되는 록볼트의 인발내력과 내부식성 향상을 위해서도 FRP와 GRP가 적용될 수 있다. FRP와 GRP는 신장력이 크고 내구성이 매우 뛰어난 반면, 현형의 록볼트 재질과 비교할 때 가격이 비싼 편이다.

지압판은 록볼트와 슛크리트를 일체화시키는 중요한 부재이므로 예상되는 응력에 대하여 충분한 면적, 두께 및 강도를 가져야 한다. 일반적으로 평판을 사용할 경우 지압판 면적은 150×150mm 정도의 규격이 적당하며, 두께는 6mm를 표준으로 하되 팽창성 지반의 경우는 9mm 이상을 사용하여야 한다. 그러나 지반의 변형이 큰 경우

에는 록볼트가 파단되는 정도의 축력이 발생하는 경우도 있으므로 이 경우에는 지압판의 두께와 강도에 대하여 별도의 검토가 필요하다.

특별히 전면 접촉형 록볼트의 경우 지압판의 설치가 필요 없을 경우도 있으므로 정밀한 검토 후에 감독관과 협의하여 필요 유무를 정할 수도 있다. 대표적인 사례로 지하 유류비축기지에서 긴급 보강이 필요하지 않고 과다용수가 없는 구간에 사용되고 있는 Slack볼트를 들 수 있다. Slack볼트는 암질이 양호한 구간에 적용되고, 충전재의 충분한 양생시간 확보가 가능하며, 지압판을 적용하지 않고 볼트에 인장을 가하지 않는 록볼트이다.

그림 3은 지압판 유무에 따른 록볼트 내 하중분포를 나타내고 있다. 지압판이 있는 경우가 없는 경우보다 최대 축하중은 크며, 전단응력 크기는 차이가 없으나 anchor length가 더 길기 때문에 보강효과가 더 좋은 것으로 판단된다. 비축기지의 경우에는 상부 갤러리 구간에 전면접촉된 Slack볼트가 하부 벤치들의 추가 굴착에 의한 암반의 지속적인 변형으로 인장력이 발생하므로 지압판이 없어도 이러한 anchor length가 점점 더 길어지는 효과를 볼 수 있다.

지압판의 형상은 평판형(flat plate) 이외에도 구형강

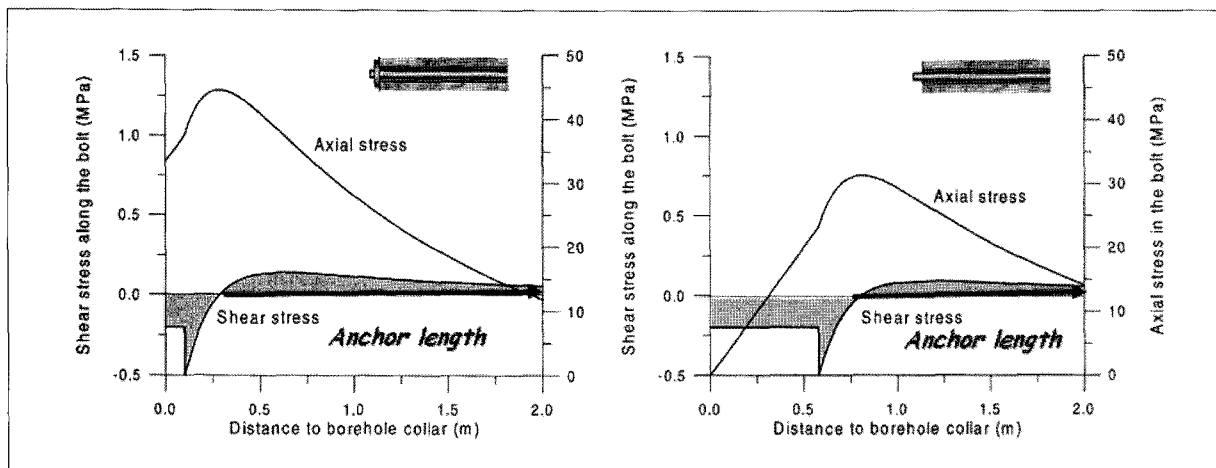


그림 3. 지압판이 유무에 따른 록볼트 내 응력분포

판(domed plate), 삼각형강판(triangular bell plate) 등이 있다. 한편, 축력이 크거나 굴착면과 수직으로 록볼트의 설치가 어려운 경우에는 구형강판을 고려해야 한다.

3. 록볼트의 정착방법

록볼트는 많은 종류가 있으나 현재 널리 사용되고 있는 종류를 그 정착 방법에 의해 분류하면 선단 정착형, 전면 접착형, 혼합형으로 대별된다. 이러한 정착방법은 사용목적, 지반조건, 시공성 등을 고려하여 선정하여야 한다. 종래에는 경암 지반에서는 선단 정착방식, 연암 지반에서는 전면 접착방식의 록볼트가 주로 사용되어 왔으나 최근에는 경암 지반에서도 전면 접착방식이 채택되고 있다.

(1) 선단 정착방식

선단 정착방식은 록볼트의 선단을 원지반에 정착시킨 후 터널 벽면과 볼트의 선단에 축력을 작용시켜 지반에 압축 영역을 형성시킴으로서 지반의 안정성을 향상시킴과 동시에 암괴를 봉합하는 것을 목적으로 사용되고 있다. 이 방식은 선단의 정착이 충분하지 않으면 효과가 발휘되지 않기 때문에 비교적 견고한 지반에서 사용되는 경

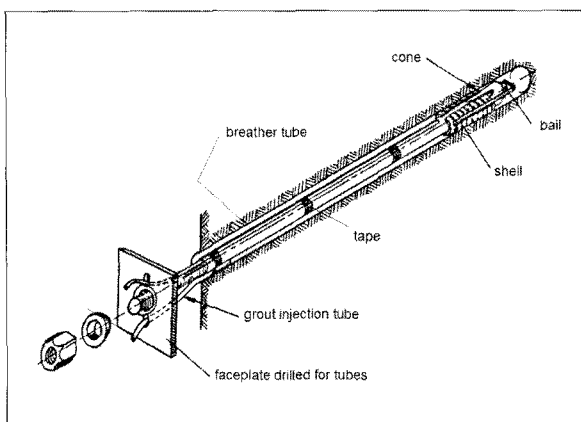


그림 4. 선단 정착형(확장형) 록볼트의 예

우가 많다. 선단 정착형 중에 대표적인 확장형의 예를 그림 4에 나타내었다.

(2) 전면 정착방식

전면 정착형은 정착재나 기계적인 마찰에 의해 볼트 전장이 지반과 접착되기 때문에 적용되는 지반의 범위가 넓다. 전면 정착형은 시멘트 모르타르, 수지(레진) 등과 같은 정착재를 활용하는 방법과 강관팽창형과 같은 마찰식으로 크게 구분할 수 있다. 그림 5는 전면 정착형 중 정착

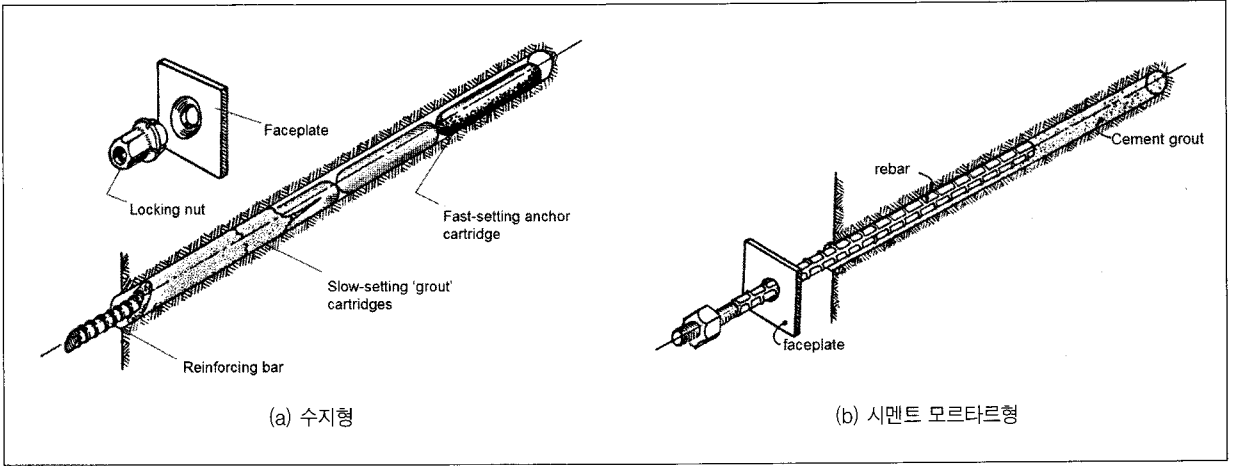


그림 5. 전면 정착형(레진형) 록볼트의 예

재식 록볼트의 예이다. 정착재식의 경우에는 시멘트 모르타르형과 수지형을 1개소에 혼합 사용하기보다는 1개소에 단일 공법으로 적용하는 것이 바람직하다.

일부 외국의 문헌에 따르면 전면 정착형 록볼트를 도웰(dowel)로 정의하여 일반적인 록볼트와 구분하고 있다. 즉, 록볼트에는 반드시 인장력을 가하는 반면, 도웰은 시공 시에 인장력을 가하지 않는 대신 지반의 변형에 따라 인장력이 발휘되는 것으로 정의하고 있다. 앞서 언급한 유류비축기지에 사용되는 Slackbolt도 도웰의 일종으로 생각할 수 있다. 하지만 국내에서는 록볼트와 도웰을 구분하지 않고 모두 록볼트의 범주에 포함되는 것으로 고려하고 있다.

정착재료로 사용되는 시멘트 모르타르는 흘러내림을 방지할 수 있는 배합비를 사용하여 시공하여야 하며, 특히 천정부에 설치되는 록볼트의 경우에는 록볼트 전면부에 흘러내림을 방지할 수 있는 방안을 마련해야 한다. 이러한 록볼트의 정착재료는 제1종 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것을 원칙으로 하며, 사용하는 모래는 최대 직경이 2 mm이하의 입도가 양호한 모래를 사용해야 한다. 시멘트 모르타르 정착재는 연암이나 토사지반에서도 충분히 충전될 수 있기 때문에, 가장 일반적으로 광범위하게 사

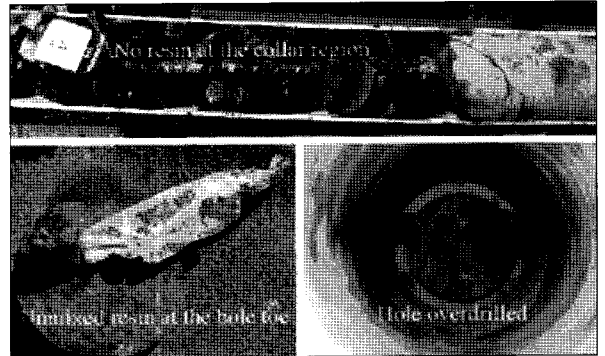


그림 6. 레진이 잘 정착되지 않은 예^[9]

용되는 정착재이다.

수지(레진)형 정착재는 회전식 오거(auger)에 의해 록볼트가 공 내로 삽입·회전될 때 플라스틱 캡슐이 깨지면서 캡슐 안의 수지와 경화제가 화학반응을 일으켜 경화되는 방식이다. 수지로는 에폭시, 우레탄, 폴리우레탄, 폴리에스터 등이 사용된다. 수지형 정착재는 시공성이 양호하고 조기에 정착력이 발휘된다는 장점을 가지고 있다. 그러나 천공경에 적합하지 않은 캡슐을 사용하거나, 제품에 따라 회전하는 오거 RPM을 잘 맞추지 않을 경우에는 충전량 부족 등에 의해 소정의 정착력이 얻어지지 않는 경우가 있으며, 특히 그림 6과 같이 록볼트 두부 근처에

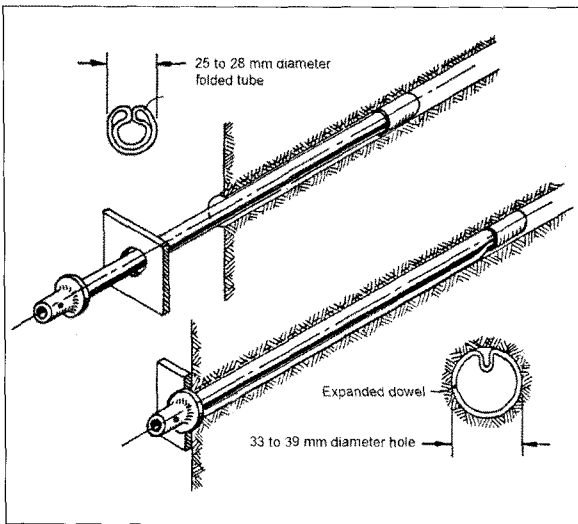


그림 7. Swellex 록볼트의 예

이러한 현상이 많이 발생할 수 있으므로 주의해야 한다.

길이가 긴 록볼트, 자천공형 록볼트, 케이블볼트 등에서는 시멘트 모르타르의 유동성이 낮으면 주입이 어렵기 때문에 유동성이 높은 시멘트 밀크가 사용된다. 첨가제 등을 사용하여 조강성이나 팽창성을 부여하는 경우도 있다. 지반이 연약하여 록볼트 천공의 자립이 어려운 경우에는 자천공(自穿孔)형 록볼트를 사용할 수 있으며, 긴급한 록볼트 기능 도입이 요구되는 경우에는 마찰력을 즉시 발휘시킬 수 있는 구조의 록볼트를 사용하여야 한다. 지하수 용출이 많은 구간, 파쇄대 또는 불리한 지반조건, 팽창성 지반 등에서는 시공 직후부터 록볼트의 지보능력을 즉시 발휘할 수 있는 강관팽창형 록볼트(예: Swellex 록볼트, 그림 7 참조)가 활용될 수 있다. 강관팽창형 록볼트에서는 팽창 전에 접힌 상태의 강관 내에 고압수 등을 주입하여 강관을 팽창시키게 된다. 이로 인해 시공 직후부터 볼트가 공 벽면에 밀착되고 마찰력에 의해 지보력이 발휘된다.

(3) 혼합형

혼합형은 선단 정착방식과 전면 접착방식의 장점을 살

릴 수 있으며, 록볼트에 프리스트레스를 도입하는 경우에 유리하다. 터널의 토파가 작은 경우 록볼트에 프리스트레스를 도입하여 지반에 강제적으로 압축 영역을 형성시킴으로서 지반의 안정성을 향상시킬 수 있으나, 이 경우에는 록볼트의 선단을 확실하게 지반에 정착시켜야 하며, 선단의 정착에는 기계식 혹은 모르타르 급결제를 이용하여 조기에 정착시키는 방법 등이 사용되고 있다. 노르웨이 NMT터널 등에서 연구 지보재로 사용되고 있는 CT-bolt도 혼합형으로 분류될 수 있다.

4. 록볼트의 성능평가

록볼트의 정착력이 충분한지 여부를 알기 위해서는 인발 시험을 통하여 그 내력을 판단해야 한다. 인발 내력은 통상 지반과 정착재료 사이에 발생하는 마찰력에 의해 얻어지기 때문에 지반 조건, 정착 형식, 정착재료, 볼트 길이, 공경 등에 따라 달라진다.

국제암반공학회(International Society for Rock Mechanics)의 추천시험법(1974)에 의하면 록볼트 성능평가 관련하여 Pull test, Torque test, Load cell test를 추천하고 있다. 이 중 Pull test 관련하여서 잠시 언급하면, 분당 0.5~1.0톤 하중으로 변위 40mm 정도까지 하중-변위곡선 그래프로부터 구할 것을 추천하고 있다. 이때의 변위는 탄성, 항복, 극한변위까지 모두 포함한 것이다. ASTM (2008)의 pull test의 경우에는 12.5mm에 이르는 최고 강도를 계산하며, 이 때의 변위는 볼트의 탄성변형량과 볼트 헤드의 이동량의 합이 포함된 것이다(그림 8).

록볼트의 인발 시험 결과는 그림 9(a)와 같이 표시된다. 일반적으로 그림 중 C영역은 볼트의 정착 효과가 기대되지 않는 영역으로 간주하며, 인발 내력은 D점으로 본다. 예를 들어 암반상태가 불량할 경우는 이와 같은 형상을 쉽게 접할 수 있으나, 그렇지 않고 암질이 좋아 하중-변위 곡선이 탄성거동을 보이는 직선 형태의 경우 D점을 찾기란 쉽지 않다. 따라서 이러한 경우에는 일부 논문

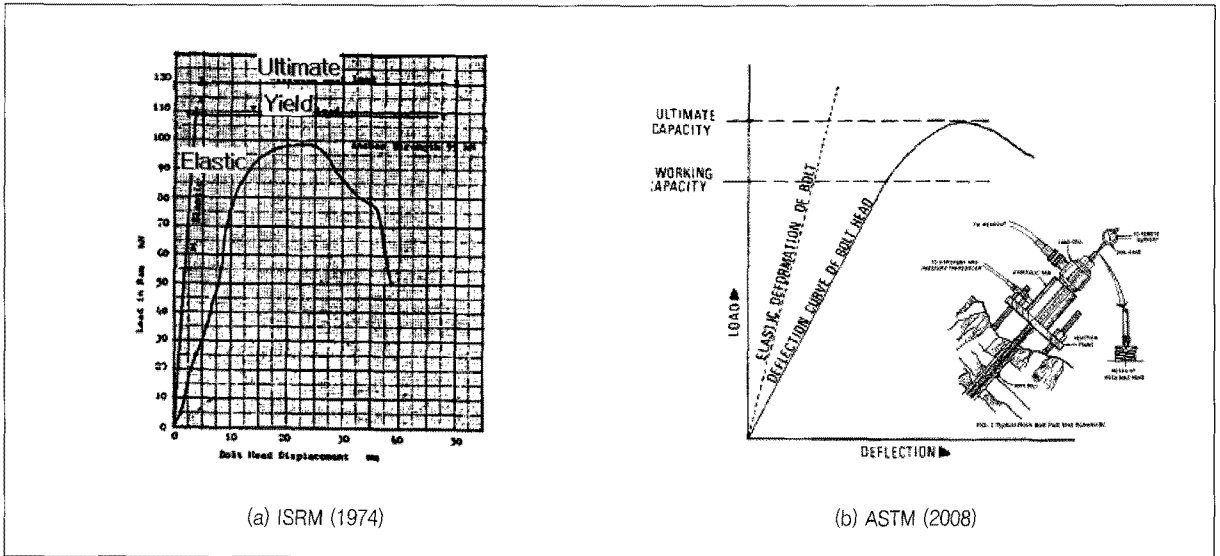


그림 8. 록볼트 성능평가 시험법의 예

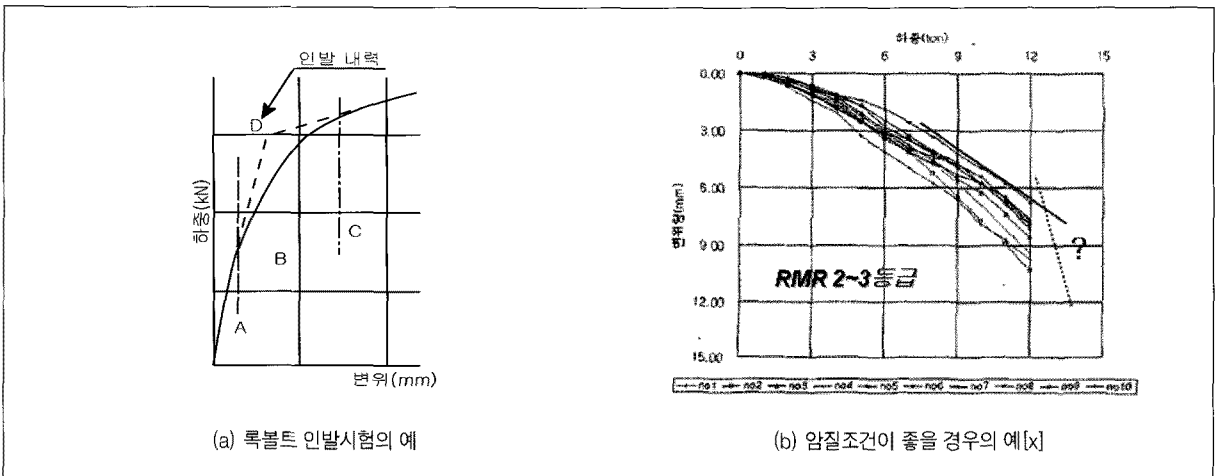


그림 9. 록볼트의 인발 시험

서는 ASTM의 제시한 강봉의 변위량 12.5mm 기준 이내에 항복 및 극한 하중의 80% 수준이 도달할 경우 성능을 만족시키는 것으로 제시하고 있기도 하다. 물론 소요의 인발내력을 시험결과를 통하여 얻었다 할지라도 D점에 이르는 변위량이 록볼트의 길이에 비하여 과도한 경우에는 현장조건에 따른 충분한 검토가 필요하다.

5. 록볼트의 배치 및 길이

5.1 록볼트의 배치

록볼트의 배치는 사용 목적에 따라 다르며, 지반 조건, 강도, 절리 간격 및 길이, 용출수의 유무, 지반의 초기 응력, 터널 단면의 크기 및 형상, 굴착 공법 등에 따라 결정

된다. 록볼트는 원칙적으로 터널 굴착에 의하여 영향을 받는 영역을 보강할 수 있도록 배치하는 것이 바람직하다.

록볼트의 배치에는 랜덤 볼팅(random bolting)과 시스템 볼팅(system bolting) 방법이 있다. 랜덤 볼팅은 지반이 불량한 부분을 국부적으로 록볼트로 보강하는 개념이며, 시스템 볼팅은 터널 단면에 미리 정해진 형식의 록볼트를 배치하여 지반을 지보하는 개념이다. 어떤 경우에도 지반 조건이 크게 변화하는 경우에는 신속하게 록볼트 배치를 변경하여야 한다.

시스템 볼트와 같이 록볼트를 일정한 간격으로 배치할 필요가 있는 경우에는 터널단면의 방사선 방향으로 굴착면에 직각으로 설치하는 것을 원칙으로 한다. 또한 절리가 발달하였으나 암질이 양호한 불연속면을 관통하는 경우에는 절리면을 고려한 방향으로 록볼트를 설치하여야 하며, 인접한 록볼트 간에는 상호작용이 발휘되도록 록볼트를 배치하여야 한다. 단, 록볼트를 조기에 시공할 필요가 있는 경우에는 터널진행 방향으로 경사진 경사록볼트의 배치 형식을 적용할 수 있다. 터널 상부에 강관보강공법이 적용된 구간에서 록볼트에 의한 보강효과를 얻을 수 없거나 매우 저감되는 경우에는 지반조건을 면밀히 검토한 후에 록볼트를 생략할 수 있다.

5.2 록볼트의 길이

록볼트의 길이는 원칙적으로 굴착에 의한 영향 범위를 보강할 수 있도록 결정하는 것이 바람직하다. 록볼트의 길이는 지반 조건, 주요 작용 효과, 굴착 단면의 크기, 이원영역의 발달 깊이 등에 따라 조정되 일반적으로 시공성을 고려하여 록볼트 설치 간격의 2배 정도를 표준으로 하고, 1회 굴진장 및 암반의 절리상태에 따라 조정하여야 하며 지반 자체의 지보능력을 원활히 발휘할 수 있는 간격으로 배치하여야 한다.

록볼트의 길이는 기대하는 작용 효과에 따라 다르다. 록볼트의 작용 효과 중 봉합 작용 및 보형성 작용을 기대하는 경우에는 이원 영역 이상의 길이를 가진 록볼트를

사용하여야 한다. 내압 작용, 아치 형성 작용 및 지반 보강 작용을 기대하는 경우에는 록볼트 및 지반이 일체로서 작용하는 구조체를 형성하기 때문에 이원 영역 외까지 록볼트 길이를 확보하는 것이 반드시 필요하지는 않으나 터널 주변 지반 변형을 억제하고 작용하는 지반압을 록볼트의 인장력에 의해 지지하고자 할 경우에는 필요한 정착력을 확보하기 위한 길이를 사용하여야 한다.

록볼트 길이와 배치 간격은 Arch Theory 설계식, 광탄성 실험식 및 터널 굴착계수(ESR)를 이용한 경험식 등이 있으나, 본 편람에서는 가장 보편적으로 알려져 있는 Rabcewicz의 경험적, 실험적 산정식을 소개하고자 한다. 산정방법은 다음과 같다.

(1) 록볼트의 길이(L)

Rabcewicz의 경험식:

$$L \geq \frac{W}{3} \sim \frac{W}{5} \text{ 또는 } L \geq t \quad (1)$$

여기에서, W : 터널 단면폭(m)

t : 굴진면과 지보 구간과의 거리(m)

Barton 외(1980)의 경험식:

$$\text{천정부 } L = 2 + 0.15 B / \text{ESR} \quad (2)$$

$$\text{측벽부 } L = 2 + 0.15 H / \text{ESR} \quad (3)$$

여기에서, B : 터널폭(m)

H : 터널높이 (m)

ESR : 굴착지보비

노르웨이 IFF에 의한 식:

$$L = 1.40 + 0.184 B \quad (4)$$

여기에서, B : 터널폭(m)

미공병단에 의한 식:

$$L = 2 S \quad (5)$$

$$L = 3 C \quad (6)$$

또는

SL상부의 공동폭이 6m이하일 때

$$L > 0.5 B \quad (7)$$

SL상부의 공동폭이 18m이하일 때

$$L > 0.25 B \quad (8)$$

여기에서, B : 터널폭(m)

S : 볼트간격(m)

C : 불안정한 압괴의 길이(m)

(2) 록볼트의 간격(P)

Rabcewicz의 경험식:

$$P \leq 0.5 \times L \quad (9)$$

또는

$$P \leq 3 \times D \quad (10)$$

여기에서, L : 록볼트 길이(m)

D : 블록 압괴의 평균 치수

Choquet-Charette(1988)의 경험식:

$$D = -0.227 \ln Q + 0.839 \quad (11)$$

$$D = -0.0214 RMR + 1.68 \quad (12)$$

$$P = \frac{1}{D^2} \quad (13)$$

여기에서, P : 록볼트 간격(m)

D : 록볼트 분포 밀도

Barton 외(1980)의 경험식:

$$P = \frac{1}{(10F)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

여기에서, P : 록볼트 간격(m)

F : 지보압(MPa)

6. 고성능 및 고내력 록볼트

싱글셀 터널에서는 모든 외력을 1차 지보, 즉 주지보재가 전부 지지하면서 영구 지보재로 적용되기 때문에 장기 내구성이 확보되는 고내력·고내구성 록볼트의 사용이 필수적이다.

고성능 록볼트 관련하여 일본 지오프린트연구회(1999)에서는 싱글셀 터널용의 요구 기능에 대해, 지반 변형이 발생할 때 충분한 신장성과 파단되지 않는 내력을 가져야 하며, 조기에 지반의 정착력을 확보하고, 부식에 강하여 장기적으로 재질의 열화가 없어야 한다고 정의하고 있다. 이러한 록볼트 재질로서 유리섬유 소재의 고내력 GRP 록볼트를 기본으로 하고 있다. 노르웨이에서는 록볼트의 부식을 방지하고 고내력을 발현할 수 있는 CT-bolt가 싱글셀 터널을 중심으로 적용되고 있고, 국내에도 이미 소개된 바 있다(그림 10 참조). CT-bolt는 혼합형으로 볼트 삽입 후 두부를 회전시키면 썰기 벌림에 의해 선단정착으로 조기 정착력을 확보하고, 폴리에틸렌 튜브관 내부로 그라우트재를 주입하면, 외부관을 통해 내부 공기가 배출되면서 밀실한 충전물을 할 수 있다. 이 폴리에틸렌 튜브관은 록볼트 자체의 부식을 방지함과 동시에 시공 시 간격재로서의 역할도 함께 한다. 볼트는 고강도의 이형철근으로서 볼트의 부식 방지를 위해 아연도금, 에폭시 도료와 같은 처리를 하며, 직경 20mm인 CT-bolt의 극한 인장력과 극한 전단력은 각각 33톤과 31톤으로 나타난다.

고내력 록볼트는 싱글셀 터널뿐만 아니라 대단면 터널에서 시공성과 경제성을 향상시키기 위한 목적으로도 활

표 4. 표준 볼트패턴과 고내력 록볼트를 사용하는 변경패턴의 비교 사례

(일본 제2동명 동신고속도로, 지반등급: C)

지보패턴	볼트 재질	내력	횡단면상 간격	종단면상 간격	볼트 길이
표준패턴	표준	18ton	1.2m	1.5m	6m
변경패턴	고내력	30ton	2.0m	1.5m	6m

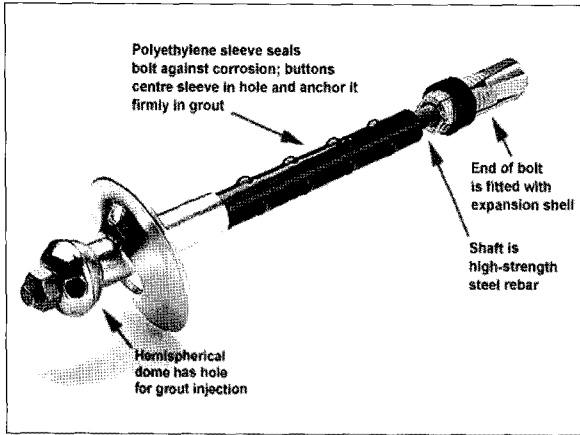


그림 10. CT 볼트

용될 수 있다. 일례로 대단면 터널인 일본의 제2동명·동신고속도로 터널 시공 시에 종래의 록볼트를 사용하는 표준지보패턴과 고내력의 록볼트를 사용하는 변경 지보패턴을 비교하였다. 여기서 종래 록볼트의 인발내력은 12~18톤에 불과하나, 고내력 록볼트의 인발내력은 30~40톤에 해당한다. 그 결과, 표 4와 같이 고내력의 록볼트를 적용함으로써 록볼트의 설치 간격을 줄일 수 있게 되어, 사이클 타임을 변경전대비 35% 향상 시킬수 있었다.

7. 향후 전망

그동안 터널 지지보재 중 록볼트의 지보성능은 슛크리트에 비해 작게 평가되어 왔다. 이는 분담하중으로 환산하면 록볼트가 슛크리트에 비해 작기 때문이다. 하지만 분명한 것은 두 가지 지보재가 혼합 적용되었을 때 터널 및 지하공간의 지보능력이 최대화된다. 특히나 슛크리트는 노출된 터널 벽면에 대응하는 지보재로서 보이는 외부

에 치중한다면, 록볼트는 외부는 물론, 보이지 않는 내부까지 지보재의 역할을 담당하게 된다. 따라서 보이지 않는다고 록볼트 설계나 시공을 소홀히 했다간, 추후 암반 블록 탈락과 같은 큰 사고가 발생할 수 있다. 또한 아직까지 적용된 바는 없지만 언젠가는 국내에도 싱글셸이 일부 도입될 수 있을 것으로 예상된다. 이렇게 되면 슛크리트와 더불어 록볼트의 최종 성능이 매우 중요해진다. 이를 위해서는 생산되는 볼트 자체의 재질도 중요하지만, 주입재의 특성 역시 무시할 수 없으며, 국내에서도 고성능 록볼트의 주입재 관련 연구가 진행된 바 있다. 따라서, 향후 경제적이면서 성능이 우수한 록볼트 관련 성분들의 보급으로 국내터널 기술 발전에 기여할 것으로 기대한다.

III. 케이블볼트

1. 케이블볼트 일반 사항

일반적으로 지하 대공간 구조물을 건설하는 경우에는 안정성과 시공성을 고려하여 록볼트와 더불어 장공의 케이블볼트를 사용한다. 국외의 경우에는 최근에 록볼트의 대체로 케이블볼트를 사용하는 경우도 있다. 일반적인 케이블볼트라 함은 몇 가닥의 강선(steel wire)을 꼬아서 스트랜드(strand)를 만든 강연선(steel strand)을 그림 11의 (a)와 같이 시멘트 그라우트 된 보어홀(borehole) 속에 강연선을 삽입한 보강재로서 길이는 4m~40m까지 시공이 가능하다. 케이블볼트는 지하 대공간 구조물이나 사면 등에서 측벽(wall), 천정(roof) 등의 보강(reinforcement)이나 지지(support)를 위하여 그림 11의 (b)와 같이 일정

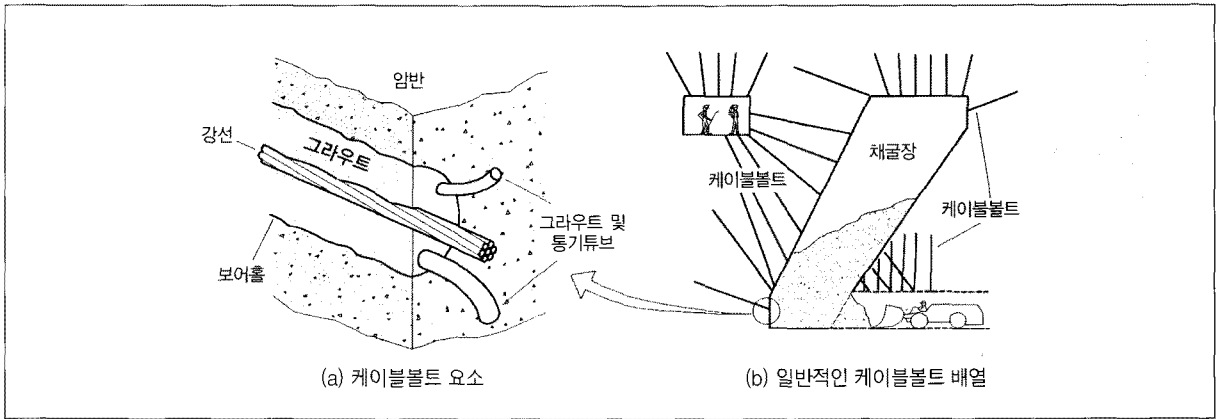


그림 11. 케이블볼트 일반

한 간격으로 설치되는 것이 일반적이다. 가장 보편적으로 사용되는 것은 7가닥 강선을 엮은 7강연선(seven-wire steel strand)을 사용한다.

이러한 케이블볼트는 지하 대공간에서 매우 다양하게 사용되어지고 있는데 그 주요한 이유는 다음과 같다.

- 케이블볼트는 록볼트와 비교하여 쉽게 구부릴 수 있으므로 협소한 공간에서도 장공의 케이블볼트를 설치할 수 있다.
- 강선을 꼬는 형태 등에 따라 여러 종류의 케이블볼트가 개발되어 다양한 성능으로 케이블볼트를 적용할 수 있다.
- 보어홀의 크기가 충분하면, 여러 개의 케이블 스트랜드를 한 홀에 넣을 수 있어 요구되는 다양한 인장 강도를 얻을 수 있다.
- 케이블볼트는 굴착면의 구속을 위해 지압판(plate), 스트랩(strap), 철망(mesh) 등과 용도에 맞게 조합하여 사용할 수 있다.

2. 케이블볼트의 사용 목적

이형철근 록볼트와 철망, 슛크리트와 같은 지보재는 일반적으로 작은 경간(span) 터널에 사용되어 왔다. 그러나

터널 교차부나 지하 대공간과 같은 큰 경간에서는 강도 및 길이의 증가가 가능한 장점으로 인해 케이블볼트를 사용한다. 경간이 크다는 것은 보다 큰 암반의 낙반 가능성이 있다는 것을 의미하므로 지지력이 큰 케이블볼트와 록볼트의 조합에 의해 효과적으로 지지할 수 있다. 또한 케이블볼트는 절리와 같은 약한 면을 따른 분리를 방지하기 위해 암반 깊숙이 설치되어 큰 체적의 암반을 보강할 수 있으며, 암반의 연속체 특성을 유지함으로써 암반이 고유 강도를 발휘할 수 있도록 하고 전체적인 안정성을 향상시킬 수 있다. 한편 굴착면에서 암반 블록을 지지함으로써 암반이 이완되고 약해지는 것을 방지할 수 있다. 즉, 케이블볼트는 일반적으로 그림 12에 나타난 바와 같이 지하 대공간 구조물의 지지, 보강, 또는 굴착면으로부터 암석의 낙반 저지 등과 같은 목적으로 사용된다.

케이블볼트는 보강과 암괴를 매다는 기능의 조합으로 암반을 지지한다. 보강기능으로서 케이블볼트는 암반 내 약면의 불리와 미끄러짐을 방지하고, 보통거친 절리나 균열면이 분리되지 않는다면, 이러한 불연속면의 영향은 최소화 될 수 있다. 연속적인 암반은 거의 항상 불연속암반보다 강하다. 따라서 케이블볼트는 불연속암반의 고유 강도를 발휘하도록 한다. 그러나 케이블볼트는 연속암반의 전반적인 강도를 증가시키거나 높은 응력을 받는 암반에

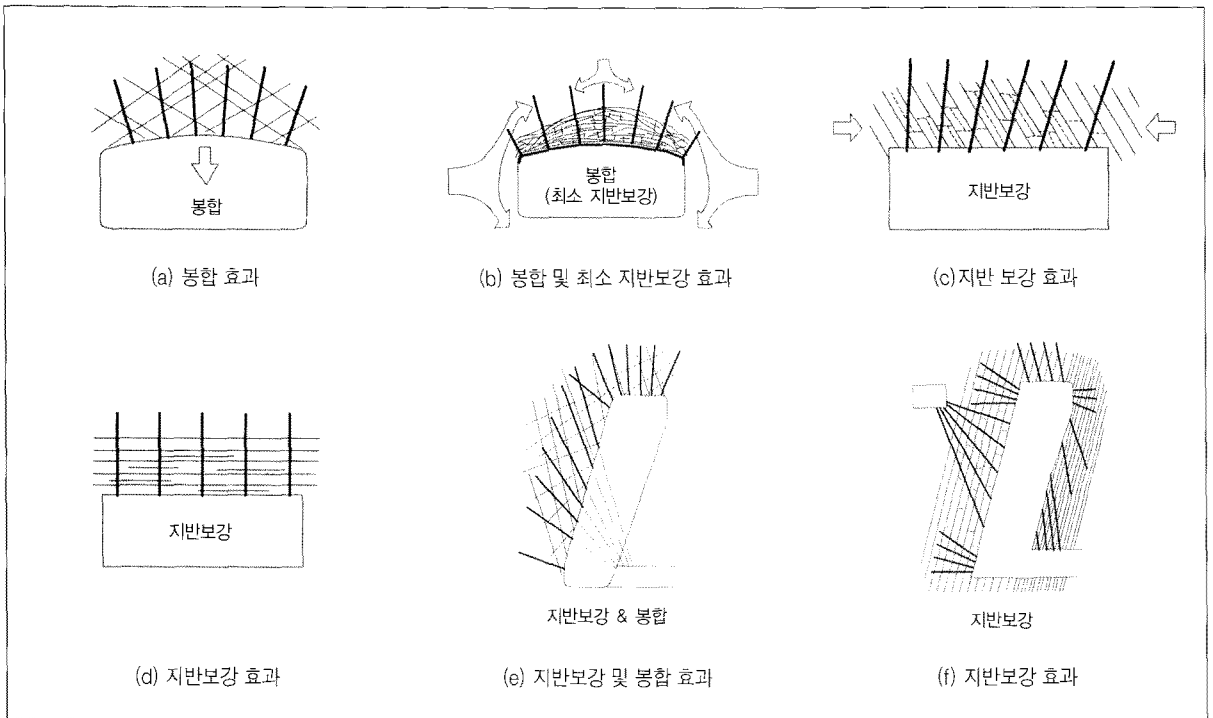


그림 12. 케이블볼트의 사용 목적

균열이 발생하는 것을 막지는 못한다.

암반의 고유강도가 발생응력에 저항할 만큼 충분하지 않거나, 불연속면이 불리하게 작용하여 암괴의 자유낙하나 탈락에 이르게 되는 경우라면 케이블볼트는 암괴의 탈락을 방지하는 효과적인 지보재가 될 수 있다. 불량한 암반에서 철망, 슛크리트와 같은 표면 덮개와 병용되지 않는다면 케이블볼트는 비효과적인 지보재이다. 균열이 발달한 경우 케이블볼트는 균열압반을 지지할 수 없는 문제점이 있다.

3. 케이블볼트의 종류 및 그라우트

현재 외국에서 사용하고 있는 케이블볼트의 종류(Windsor, 1992)를 그림 13에 나타내었다. 강선을 꼬는 형태 등에 따라 여러 종류의 케이블볼트가 다양하게 개발되었으며,

종류에 따라 그라우트의 재질도 달리하여야 한다.

가장 일반적으로 사용되어지는 케이블볼트는 일반 스트랜드(plain strand)이며, 일반 스트랜드의 지보능력을 보완하기 위하여 그림 13에서 보인 바와 같이 최근 20년 동안 다양한 종류의 케이블볼트가 개발되었다.

케이블볼트의 적용에 있어서 또 다른 중요한 요소는 그라우트 재질이며 현재까지 실제 현장에서 사용되는 그라우트의 물:시멘트 비는 대략 0.3에서 0.6 혹은 0.7까지 이르는 것으로 파악되었다. Goris(1990) 및 Reichert et al.(1992)에 의하여 일반 스트랜드를 사용하여 직접인장 시험을 한 결과, 최적의 케이블볼트 지보능력을 발휘하기 위해서는 물:시멘트 비가 약 0.3에서 0.4사이를 유지하여야 한다고 보고되었다. 일반적으로 물:시멘트 비가 적으면 부착강도가 증가하겠으나 이는 현장에서 그라우트 시공에 큰 문제점을 노출하게 된다.

	종단면	절단면
단일강선		
간격재를 설치한 이중		
새장형 강선		
전구형 강선		
쇠테를 삽입한 강선		
너트를 삽입한 강선		
액폭시로 코팅하거나 캡슐로 싸인 강선		
버튼을 설치한 강선		

그림 13. 케이블볼트의 종류

4. 케이블볼트의 재료 기준

4.1 스트랜드 (Strand)

케이블볼트는 토목 구조물에서 prestressing 콘크리트에 사용되는 7가닥의 강선을 꼬아서 만든 7강연선을 기본으로 사용한다. 본 고에서는 이중에서 케이블볼트 연구가 활발히 이루어진 북미와 호주에서 사용하는 ASTM A 416-80과 AS 1311-1987을 기준으로 서술하였다.

- ASTM A 416-80 Steel strand, uncoated seven wire for pre-stressed concrete (North America)
- Australian Standards AS 1311-1987 (Australia)
- KSD 7002 PC강선 및 PC강연선
- JIS G 3536 PC강선 및 PC강연선
- BS 5896 High tensile steel wire and strand for the prestressing of concrete

위에서 제시한 기준들은 콘크리트에 사용하는 용도로 제시되었으나, 케이블볼트에 적용하기에도 무리가 없다. 또한 강철의 품질 역시 여러 종류가 있을 수 있는데, 케이블볼트에 사용되는 등급은 주로 표 5과 같다. 케이블볼트에 사용되는 스트랜드의 규격은 다음 표 6과 같다. 본고는 특별한 제시가 없는 한 모든 기준을 공칭경(nominal strand diameter)이 15.2mm인 것을 기준으로 하여 작성하였다. 또한, 케이블볼트에 사용되는 7강연선의 규격 별 특성치는 다음 표 7과 같다.

4.2 지압판

일반적으로 케이블볼트는 굴착된 숏크리트면과 접촉하

표 5. 7강연선에 사용하는 강철 품질의 외국 기준

ASTM A 416-80	AS 1311-1987
250	일반(Regular standard)
270 ¹⁾	특 등급(Super grade ¹⁾ , EHT(Extra-High Tensile grade)

※ 1. 주 케이블볼트에 주로 사용되는 등급

표 6. 스트랜드 규격(270 - Super/EHT 등급 스트랜드)

규격	스트랜드 공칭경		
	12.7mm	15.2mm ¹	18mm
단면적(mm ²)	99-100	140-143	199
스트랜드 피치(pitch)	155-200	185-240	220-285
단위중량(kN/cm)	0.775-0.785	1.102-1.125	1.560

※ 1. 본 고에서 제시되는 모든 기준을 적용하는 공칭경

표 7. 7강연선의 규격 별 특성치

특성치	일반 ¹ /250 등급	특 등급 강연선 ²			EHT ³ /270 등급
	스트랜드 공칭경(mm)				
	15.2	12.7	15.2	18.0	15.2
최소 절단하중 (breaking load, kN)	230/240	184	250	338	261/261
항복하중(yield load, kN) (@ 1% total strain)	196/204	156	212	287	222/222
최소 신율 (elongation, %)	3.5% (strain) : 파괴강도(breaking load)에서				
탄성계수 (elastic modulus, GPa)	195-200 : 비례한도(proportional limit) 이하에서				
정규 탄성 강성 (normalized elastic stiffness, MN)	26-27	19-20	27-28	39-40	27-28
최대 Relaxation (@ 1,000시간 80% 절단하중)	낮은 완화 스트랜드(low relaxation strand) : 3.5% 일반 완화 스트랜드(normal relaxation strand) : 12%				

※ 1 : Regular Strand, 2 : Super Grade Steel Strand, 3 : Extra-High Tensile Grade

표 8. 지압판의 크기 및 두께(Douglas and Arthur, 1983)

케이블볼트에 작용되는 하중(kN)	지압판의 크기(길이 또는 직경, mm)	두께(mm)
80	125~150	7
150	150~200	10
300	200~250	12

도록 록볼트와 같이 지압판을 사용한다. 때로는 철망이나 스트랩을 보조 도구로 병행하여 사용한다. 지압판은 케이블볼트와 슛크리트를 일체화시키는 중요한 부재이므로 예상되는 응력에 대하여 충분한 면적과 두께, 강도를 가져야 한다. 그러나, 슛크리트가 지압판에 대체적 혹은 부

가적인 역할을 담당하는 것도 생각할 수 있으므로 그 선택에 있어서 이를 고려하여 하는 것이 필요한 경우도 있다. 케이블볼트에 작용되는 하중에 따른 지압판의 크기 및 두께를 표 8에 나타내었다.

5. 케이블볼트의 설계

5.1 설계 일반

암반 지보설계에 있어서 굴착에 의해 응력과 중력의 평형이 이완된 암반의 보강이 필요하다. 이완된 암반은 새로운 평형상태에 도달하기 위해 변형해야 한다. 따라서 지보재는 암반의 과도한 변형을 방지하면서 이러한 평형에 도달하도록 하는 것을 목적으로 한다. 이때 필요한 지보재의 특성은 강성, 강도, 변형 구속력 등이다. 케이블볼트와 관련된 전체적인 설계요소들을 정리하면 그림 14와 같다.

5.2 설계 방법

암반은 불연속면으로 인하여 매우 복잡한 구조적 형태를 지닌다. 대상 지반조건이 매우 복잡한 경우 해석적 방법을 이용하기가 곤란하다. 따라서 이러한 경우 대안으로

암석의 특성과 불연속면의 특성을 합하여 암반의 특성을 나타내고자 암반분류법에 의한 설계방법을 사용한다. 그 대표적인 예가 RQD(Rock Quality Designation, Deere et al., 1967), RMR(Bieniawski, 1976, 1989, 1993), Q-system(Barton et al., 1974; Barton, 1988; Grimstad and Barton, 1993)이다. Laubscher과 Taylor(1976) 그리고 Laubscher(1993)은 광산에 적용하고자 RMR을 수정하여 사용하였다. 또한 Mathews et al.(1981) 그리고 Potvin(1988)은 Q-system을 확장하여 역시 광산에 적용하였다. 본 고에서는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 RMR과 Q-system을 사용하여 케이블볼트를 설계하는 방법과 미 공병단에서 사용한 방법에 대하여 소개하고자 한다. 또한 케이블볼트의 적용한계를 서술하고자 한다.

일반적으로 케이블볼트의 설치간격은 록볼트와 마찬가지로 요구되는 지보능력에 따라 결정된다. 케이블볼트는 록볼트에 비하여 설치길이가 길기 때문에 록볼트보다 다



그림 14. 케이블볼트 설계 요소

소 넓은 간격으로 설치되는 것이 일반적이다. 이런 연유로 케이블볼트 사이의 작은 압괴의 낙반이 가능하며, 이를 위해 록볼트와 병행하여 설치하는 것이 좋다.

케이블볼트의 길이는 일반 록볼트 길이 산정방법에 따라 결정할 수 있다. 그러나 케이블볼트는 정착길이가 길고 설치과정에서 단부에 0.5m~1.0m의 간극이 발생하므로 록볼트 길이 산정방법에 의해 결정된 길이에 최소 2m를 추가하여야 한다.

5.2.1 RMR방법을 사용한 케이블볼트 설계

RMR방법을 사용하여 케이블볼트를 설계하는 방법 중 Unal(1983)에 의하여 제시된 기본 개념이 그림 15에 표시되어 있다. 이 그림을 이용하면 케이블볼트의 길이와 간격을 산정할 수 있다. 이 그림에서 케이블볼트 간격(밀도)은 암반의 단위중량을 26kN/m^3 , 강선의 용량이 한 개의 스트랜드 설치 시 20톤, 2개설치 시 40톤으로 가정하여 산정하였다. Stimpson(1989)은 현장 지반응력상태와 굴착 높이:스팬의 비율의 영향을 추가하여 더욱 개정하였다.

5.2.2 Q-system을 사용한 케이블볼트 설계

Q-system을 사용하여 케이블볼트를 설계하는 방법 중에서 Grimstad 등(1993)에 의하여 터널, 수직구, cavern 등에 제시된 기본 개념이 그림 16에 표시되어 있다. 그림 16의 오른쪽 축에 제시한 케이블길이는 ESR=1.0인 경우에 한한다. ESR이 이것보다 큰 경우는 케이블 길이가 실제 span을 고려하여 증가되어야 한다. Barton 등(1974)은 지보압(support pressure), p(MPa)에 대한 관계를 다음 식(15) 및 (16)와 같이 제안하였다. 이 지보압은 케이블볼트의 용량 및 배열을 결정하는 요소가 된다.

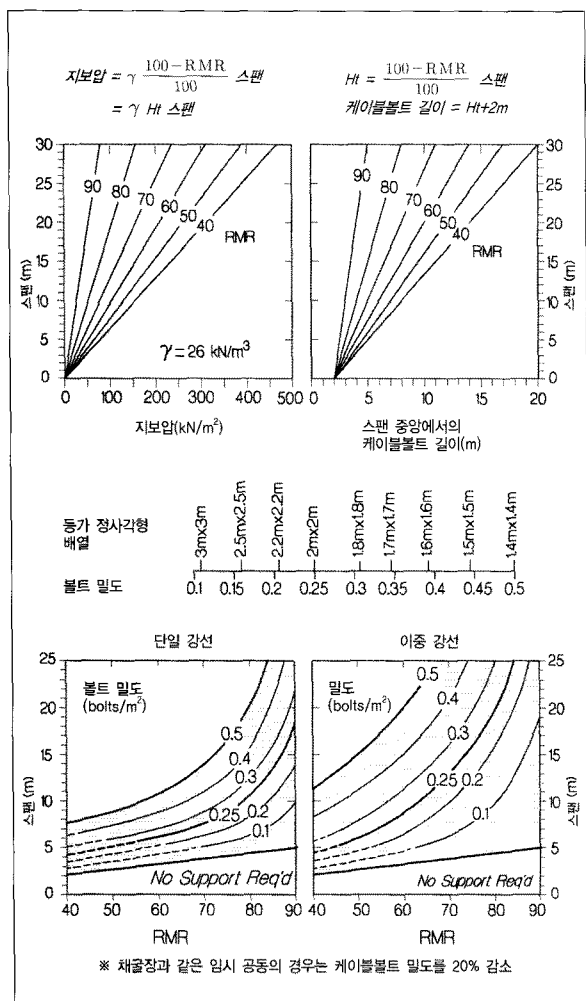


그림 15. RMR을 이용한 케이블볼트 설계 예(Unal, 1983)

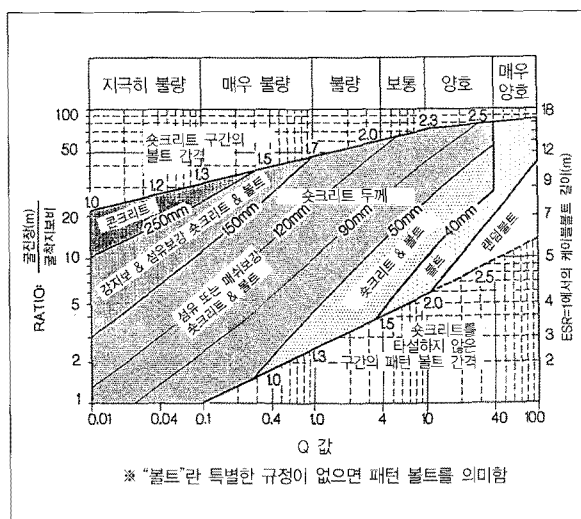


그림 16. Q-system을 이용한 케이블볼트 설계(Grimstad et al., 1993)

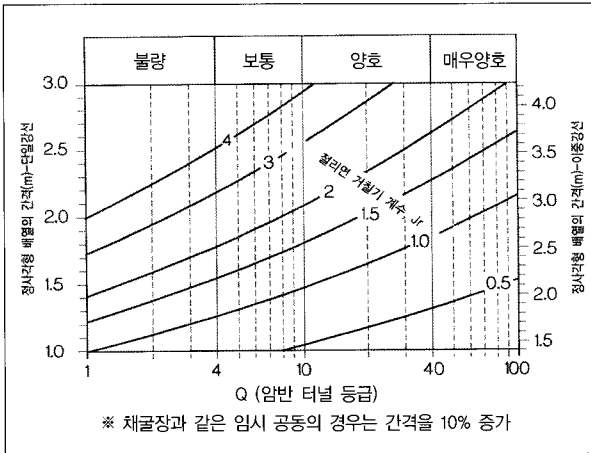


그림 17. 광산에 있어서 Q값에 따른 케이블볼트 간격

$$2\text{방향 이상의 절리군}(J_n > 6); p = \frac{2Q^{-\frac{1}{3}}}{J_r} \quad (15)$$

$$0-2 \text{ 방향의 절리군}(J_n < 6); p = \frac{2(Q^{-\frac{1}{3}})\sqrt{J_n}}{3J_r} \quad (16)$$

강선의 초기 항복하중을 200 kN/스트랜드로 가정하고, $J_n > 6$ 인 경우에 대하여 광산에 적용하는 Q에 대한 케이블볼트의 간격을 그림 17에 나타내었다. 그러나 이 차트는 굴착 스패ンは 고려하지 않은 관계이다.

5.2.3 미공병단에서 사용한 케이블볼트 설계

미공병단에서 제시한 록볼트 및 케이블볼트에 대한 설계도표를 그림 18에 제시하였다. 이를 이용하여 볼트 간격, 길이 및 지지압력 등을 결정할 수 있다.

5.2.4 케이블볼트의 사용 한계

케이블볼트는 중간정도의 응력수준의 절리가 발달한 암반에서 중규모 또는 대규모 공동에 이상적으로 적용될 수 있다. 그림 19는 RMR 및 Q에 기초하여 케이블볼트의 적용성이 양호한 범위를 나타내고 있다.

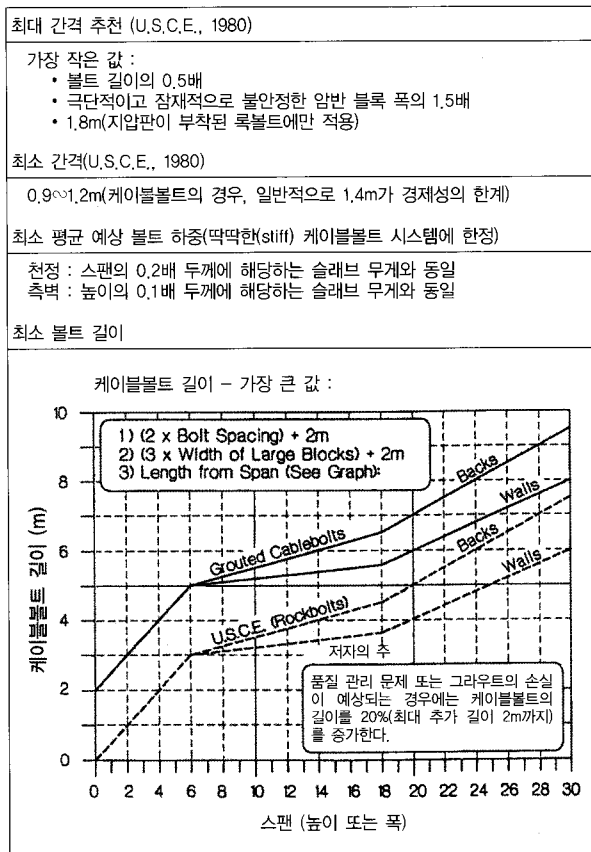


그림 18. 미공병단에서 사용한 케이블볼트 설계(U.S.C.E., 1980)

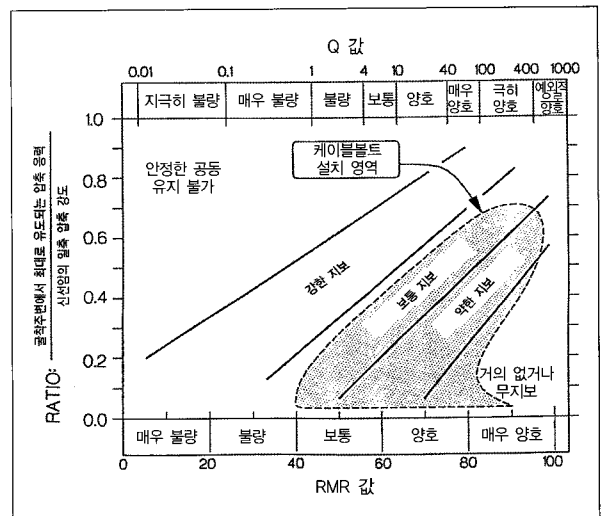




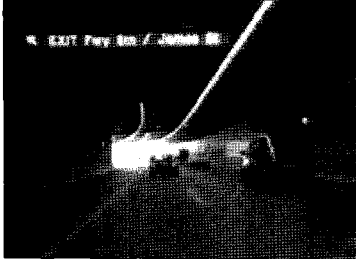

그림 19. 케이블볼트의 적용한계(Hoek, 1981)

6. 향후 국내 적용성

현재 국내에서는 관습적인 록볼트의 설계에 따라 케이블볼트의 사용이 극히 제한적인 것이 사실이다. 그러나

표 9에서 보이는 바와 같이 해외에서는 많은 부분에 케이블볼트를 적용하고 있으며, 경제성 및 시공성을 고려해서 이형철근을 사용한 록볼트 대신 케이블볼트로 록볼트의 기능을 대신하는 경우도 있다. 따라서 국내에서 터널 및

표 9. 해외 케이블볼트 적용 사례

시공 사례 사진	건설 정보
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Project 명 : The Lane cove Tunnel and Falcon Street ○ 발주처 : RTA - 호주 도로교통부 ○ 시공사 : John Holland construction company ○ 위치 : 시드니, 호주 ○ 적용제품 : Bulb Cable Bolt
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Project 명 : TransGrid MetroGrid Cable Tunnel ○ 설계사 : Snowy Mountains Engineering ○ 시공사 : Walter construction ○ 총연장 : 3.5km ○ 적용제품 : Bulb Cable Bolt
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Project 명 : Northbridge Tunnel ○ 설계사 : Helpern Glick Maunsell & Taywood Eng. ○ 시공사 : Boulderstone Clough ○ 위치 : 퍼스, 호주 ○ 적용제품 : Bulb cable bolt
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Project 명 : South East Transit Busway Project ○ 요약 <ul style="list-style-type: none"> - 차량용 터널 - 총연장 : 410m - Vulture Street(중심가) 건물지하로 관통하는 터널 ○ 적용제품 : Bulb Cable Bolt

지하공간 건설 시에 요구되는 지보 능력에 따라 앞에서 제시한 다양한 종류의 케이블볼트를 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이렇게 되기 위해서는 케이블볼트의 정확한 이해와 적용 범위를 우선적으로 파악할 필요가 있으며, 이를 위하여 본 기사를 제출하였다.

참고문헌

• 록볼트

1. ASTM, 2008, Standard test method for rock bolt anchor pull tes, D4435-08 DSI Ground Support Catalogue ver 3
2. Hagan, P.C., 2006, Observations on the differences in load transfer of a fully encapsulated rockbolt, Univ. of New South Wales Mining Research Center
3. Hoek, E, 2007, Practical Rock Engineering, Chapt 14 Rockbolts and Cables, 257-275
4. Hyett, A.J. et al, 1996, Load distribution along fully grouted bolts, with emphasis on cable bolt reinforcement, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 20, 517-544
5. ISRM, 1974, Suggested Method for Determining the Strength of a Rock Bolt Anchor (Pull Test)
6. Kilic, A. et al, 2003, Effect of bar shape on the pull-out capacity of fully-grouted rockbolts, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 18, 1-6
7. Li, C., Hakansson, U., 1999, Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks, Rock support and Reinforcement Practice in Mining
8. Li, C., Stillborg, B., 1999, Analytical models for rock bolts, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. Vol 36, p 1013-1029
9. Villaseca, E. et al, 2008, Quantifying the performance of resin anchored rock bolts in the Australian underground hard rock mining industry, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. Vol 45, p 94-102
10. Windsor, C.R., 1997, Rock reinforcement system, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. Vol 34, No.6, p 919-951
11. 장석재 et al 2006, 철도터널공사용 록볼트 인발시험의 문제점과 개선방안에 관한 연구, 한국철도학회논문집, 제9권, 제1호, 89-94
12. OO 비축기지 공사시방서, SK건설

• 케이블볼트

1. Barton, N. (1988), Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system, Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM, 984, (ed. Kirkaldie), American Society for Testing and Materials, pp. 59-88
2. Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mech., May, pp. 189-236
3. Bieniawski, Z.T. (1976), Rock mass classifications in rock engineering, Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, November, pp. 97-106
4. Bieniawski, Z.T. (1989), Engineering rock mass classifications, New York; Wiley
5. Bieniawski, Z.T. (1993), Classification of rock masses for engineering; The RMR system and future trends, Comprehensive Rock Engineering, (ed. Hudson), Oxford; Pergamon, 3, pp. 553-573
6. Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. (1967), Design of surface and near surface construction in rock, Failure and Breakage in Rock, (ed. Fairhurst), New York; AIME, pp. 237-302
7. Douglas, T.H. and Arthur, L.J. (1983), A guide to the use of rock reinforcement in underground excavations, CIRIA Report No. 101, London, pp. 74
8. Goris, J.M. (1990), Laboratory evaluation of cable bolt supports, 92nd Canadian Institute of Mining Annual General Meeting, Ottawa, Ontario, Canada, Paper #163
9. Grimstad, E., and Barton, N. (1993), Updating the Q-system for NMT, Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete, Fagernes, (eds. Kompen, Opsahl, and Berg), Oslo; Norwegian Concrete Association
10. Grimstad, E., Barton, N., and Loset, F. (1993), NMT tunnel support design, World Tunnelling, September, pp. 270.
11. Laubscher, D.H. (1993), Planning mass mining operations, Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects, (ed. Hudson), Oxford, Pergamon Press, 2, pp. 547-583
12. Laubscher, D.H., and Taylor, H.W. (1976), The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations, Exploration for rock engineering, Cape Town; A.A. Balkema, (ed. Bieniawski), 1, pp. 119-128
13. Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D.C., and Stewart, S.B.V. (1981), Prediction of stable excavations for mining at depth below 1000 metres in hard rock, CANMET Report DSS Serial No. OSQ80-00081, DSS File No. 17SQ, 23440-

- 0-9020, Ottawa; Dept. Energy, Mines and Resources, pp. 30
14. Potvin, Y. (1988), Empirical open stope design in Canada, Ph.D. thesis, Dept. Mining and Mineral Processing, University of British Columbia, pp. 343
 15. Reichert, R.D., Bawden, W.F. and Hyett, A.J. (1992), Evaluation of design bodn strength for fully grouted cable bolts, CIM Bulletin, 85, pp. 110-118
 16. Stimpson, B. (1989), A simplified conceptual model for estimating roof bolting requirements, Int. J. Min. Geology Eng., 7, pp. 147-162
 17. Unal, E. (1983), Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs, Ph.D. thesis, Pennsylvania State University, pp. 355
 18. Windsor, C.R. (1992), Invited lecture: Cable bolting for underground and surface excavations, Rock Support, (eds. P.K. Kaiser and D. McCreath), Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 349-376