



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2011년 2월
석사학위논문

인발시험을 통한
Spiral bolt의 지보특성

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 장 원

인발시험을 통한
Spiral bolt의 지보특성

Supporting Characteristics of
a Spiral Bolt through Pull-Out Test.

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 장 원

인발시험을 통한
Spiral bolt의 지보특성

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 장 원

김장원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고진석



위 원 조선대학교 교수 박천영



위 원 조선대학교 교수 강추원



2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서론	1
2. 이론적 배경	4
2.1 지보재의 역할과 지반의 거동 특성	4
2.2 굴착과 지반거동 특성	5
2.3 Rock bolt의 재질 및 형상	6
2.3.1 지압관	7
2.4 Rock bolt 설계	9
2.4.1 이론식에 의한 설계	9
2.4.2 Rock bolt 설계시 고려사항	11
2.4.3 Rock bolt 지보패턴	13
2.5 Rock bolt 작용효과	16
2.6 Rock bolt 종류	18
2.6.1 Mechanically anchored rock bolt	18
2.6.2 Grouted rock bolt	20
2.6.3 Friction anchored rock bolt	22
2.6.4 Spiral bolt	24
3. Spiral bolt & Rock bolt	25
3.1 Spiral bolt의 역학적 특성	25
3.2 Spiral bolt의 재료 특성	29
3.3 Rock bolt의 역학적 특성	30

3.4 Rock bolt의 재료 특성	31
4. 터널 내 인발시험	32
4.1 시험방법	32
4.2 시험결과	37
4.2.1 4시간 양생	37
4.2.2 8시간 양생	40
4.2.3 12시간 양생	43
4.2.4 16시간 양생	46
5. 수치해석	51
5.1 해석개요	51
5.2 해석조건	52
5.3 해석결과	54
6. 고찰	57
7. 결론	58
참고문헌	60

List of Tables

Table 2.1 Mechanical properties of steel bar	8
Table 2.2 Geotechnical data	12
Table 2.3 Excavation and support base on RMR classification	14
Table 3.1 Mechanical properties of flat steel bar used for spiral bolt	29
Table 3.2 Strength of flat steel bar for spiral bolt	29
Table 3.3 Mechanical properties of bars used for rock bolts	31
Table 3.4 Strength of bar for rock bolt	31
Table 3.5 Rock bolt and boreholes diameter	31
Table 4.1 Boreholes where the pull-out tests for spiral bolts and rock bolts in ○ ○ tunnel	33
Table 4.2 Comparison of mechanical properties for spiral bolts and rock bolts	33
Table 4.3 Physical properties of resin	34
Table 4.4 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 4 hours	39
Table 4.5 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 8 hours	42
Table 4.6 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 12 hours	45
Table 4.7 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 16 hours	48
Table 4.8 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts for difference curing times	50
Table 5.1 Input parameter of numerical analysis	52
Table 5.2 Physical properties of application ground	52
Table 5.3 Results of numerical analysis	54

List of Figures

Figure 2.1 The load–deformation curves for the rock mass and support system	4
Figure 2.2 Examples of bearing plate	8
Figure 2.3 Estimated support categories base on Q–system	15
Figure 2.4 Suspension effect	17
Figure 2.5 Keying effect	17
Figure 2.6 Arch effect	17
Figure 2.7 Friction effect	17
Figure 2.8 Expansion shell bolt anchor	18
Figure 2.9 Expansion shell bolt	19
Figure 2.10 Slot and wedge bolt structure	19
Figure 2.11 Resin grouted bolt	20
Figure 2.12 Cement grouted bolt	21
Figure 2.13 Perfo type bolt	21
Figure 2.14 Split set	22
Figure 2.15 Swellex bolt	23
Figure 2.16 Spiral bolt	24
Figure 3.1 View of spiral bolt	26
Figure 3.2 Shape of spiral bolt and cross–section	26
Figure 3.3 Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground	27
Figure 3.4 Shear failure zone occurred in artificial stratified model of gypsum–cement	27
Figure 3.5 Failure images scanned by X–ray CT scanner	28
Figure 3.6 View of rock bolt	30
Figure 4.1 Equipments for pull–out test	35
Figure 4.2 Installation process of rock and spiral bolts in a borehole	36
Figure 4.3 Relationship between pull–out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 4 hours	37

Figure 4.4 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 4 hours	38
Figure 4.5 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 8 hours	40
Figure 4.6 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 8 hours	41
Figure 4.7 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 12 hours	43
Figure 4.8 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 12 hours	44
Figure 4.9 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 16 hours	46
Figure 4.10 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 16 hours	47
Figure 4.11 Relationship between maximum pull-out load and time of spiral bolts and rock bolts	49
Figure 5.1 Plane of analysis section	51
Figure 5.2 Mesh of numerical analysis	51
Figure 5.3 Order of numerical analysis	53
Figure 5.4 Results of spiral bolts numerical analysis	55
Figure 5.5 Results of rock bolts numerical analysis	56

Abstract

Supporting Characteristics of a Spiral Bolt through Pull-Out Test.

By Kim, Jang Won

Adv. Prof. : Kang, Choo Won, Ph.D,

Dept. of Energy & Resources Engineering,

Graduate School of Chosun University

There is support system which keeps unstable massive slopes or rock structures balanced ; like anchor bolt, rock bolt and spiral bolt which is newly developed as a new type of support system. For this study, field pull-out test shows the characteristics of rock bolt that is most widely used and of spiral bolt that is newly developed. And the stability of tunnels are also examined by MIDAS/GTS, numerical analysis program.

The pull-out test in tunnels calls for 4m lengths of rock bolt and spiral bolt, SD350 and SD500W of materials each and 45mm of borehole in diameter. By using displacement transducer, pressure transducer, hydraulic cylinder, hydraulic hand pump and data logger, they are tested three times each on 4 hours, 8 hours, 12 hours, 16 hours after charging the resin to study the characteristics of them as the charging time passes.

The results are as follows:

The test shows that the cross-sectional area of rock bolt is 1.37 times and the percentage of elongation of it is 1.22 times than those of spiral bolt on the mechanical properties. And the yield strength and the tensile strength of spiral bolt are 1.25 times and 1.06 times each than those of rock bolt.

According to the results of this pull-out test in process of time, the longer the time is, the bigger maximum pull-out load of spiral bolt and rock bolt are. But in rock bolt, there is 7~9 tons of difference of maximum pull-out load in

the re-pull-out test in process of time, on the other hand, there makes almost no difference in spiral bolt.

As for this re-pull-out test result, being tested for three times to study the changes of maximum pull-out load, spiral bolt is almost fixed irrespective of the number of times being tested, because there is no failure between spiral bolt and filler, even when support system reaches maximum pull-out load. On the other hand, the more the number of times of rock bolt pull-out test increases, the less pull-out load decreases, because there is the partial failure between rock bolt and filler when support system reaches maximum pull-out load.

This study shows the stability of tunnel is secured by a numerical analysis. And the maximum axial forces of spiral bolt and rock bolt are 1.56kN and 2.51kN each at the emergency parking zone, 3.28kN and 4.8kN each at the adit zone. When applying a spiral bolt, the axial force of bolt declined by 21.07%(adit zone)~37.85%(emergency parking zone) and it shows that supporting effect of spiral bolt is more advanced than rock bolt.

1. 서론

암반사면이나 터널 등 암반구조물을 역학적으로 안정되도록 굴착하더라도 시간이 경과하면 지반응력 상태 변화에 따라 암반의 강도가 저하되고, 암반구조물이 파괴된다. 또한, 오랜 시간동안 안정된 상태에 있던 자연사면에서 낙석이 발생하거나 사면이 파괴되는 예도 종종 있다. 이와 같은 현상에서 보듯이 암반의 강도는 시간이 경과함에 따라 약화되므로 대규모 사면이나 암반 구조물을 장기간 안정되게 유지하기 위해서는 불안정한 지반을 붕괴 또는 이완현상이 없는 새로운 평형상태로 유지시키기 위한 지보재로서 현재 일반적으로 사용하고 있는 그라운드 앵커(ground anchor), 케이블 볼트(cable bolt) 및 록 볼트(rock bolt)가 있다.

그라운드 앵커는 post tensioning 기법의 일종으로 1930년대부터 도입되어 구조물의 안전성 및 경제성의 필요에 따라 현재에는 거의 모든 공사에 적용하고 있으며, 적용 범위는 옹벽, DRT DECK, COFFEDAM, 물탱크, 콘크리트 댐, 고층건물의 기초, 현수교, 아치교, 등대, TOWER, 개착식탄광, 수직구, 터널, 지하공동 등 많은 곳에 적용되고 있다. 그라운드 앵커의 종류에는 강봉앵커, 강연선앵커, 제거식앵커가 있으며, 주로 토사와 같은 연약지반에 사용된다. 이러한 지보재를 이용한 그라운드 앵커공법은 대상지반에 천공한 시추공에 그라우트를 주입하여 정착부에 설치된 강제 케이블을 이용하여 인장력을 가함으로서 정착부와 지반사이의 반력인 압축력을 발생시켜 지반의 전단강도를 증가시킴으로서 지반의 안정화를 유도할 수 있다(김낙경, 2000, 2001; 김래현 외, 2002).

일반적으로 케이블 볼트는 몇 가닥의 강선(steel wire)을 꼬아서 가닥(strand)으로 만든 강연선(steel strand)을 시멘트 그라우트된 천공홀 속에 삽입한 보강재를 의미한다. 케이블 볼트는 4~40m까지의 길이로 시공이 가능하다. 케이블 볼트는 지하대공간 구조물이나 사면 등에서 측벽, 천정 등의 보강이나 지지를 위하여 일정한 간격으로 설치되는 것이 일반적이고, 가장 보편적으로 사용되는 것은 7가닥 강선을 엮은 7 강연선(seven-wire steel strand)이다. 터널교차부나 지하 대공간과 같이 경간이 큰 경우에는 강도 및 길이의 증가가 가능하고, 절리와 같은 연약면을 따라 발생하는 분리를 방지하기 위해 암반 깊숙이 설치되어 큰 체적의 암반을 보강할 수 있으며, 암반의 연속체 특성을 유지함으로써 암반이 고유강도를 발휘할 수 있도록 하고 전체적인 안정성을 향상시키며, 한편으로는 굴착면에서 암반블록을 지지함

으로서 암반이 이완되고 약해지는 것을 방지할 수 있다.

또 다른 형태의 지보재인 록 볼트는 지하공동 굴착 시 암반의 과도한 이완을 초기에 방지할 수 있는 가장 중요한 터널 지보재 중의 하나로서, 록 볼트의 정착방식과 시공방법에 따라 크게 선단정착식, 전면접착식, 병용식으로 구분되며, 록 볼트의 형상에 따라 앵커 또는 그라우트로 고정하는 프리텐션을 주지 않는 강제 다우엘, 프리텐션을 주는 기계식 정착형 볼트, 그라우트를 실시하여 프리텐션을 주는 록 볼트로 분류된다. 또한 1977년에 스웨덴 Atlas copco에서 개발한 마찰형 앵커 록 볼트(Swellex bolt)는 유럽지역의 광산은 물론 토목 현장에서 많이 사용되어지고 있으며, 1980년대 국내에 도입되어 적용성과 관련된 Rock bolt 지보 기술 광산 적용 시험연구(대한광업진흥공사, 1986)가 이루어 졌다.

Swellex bolt는 전면 접착식 마찰형 볼트이며, 철관 형태의 볼트를 고압펌프로 공내에서 팽창시켜 즉시 지보재로 사용할 수 있는 장점과 재료자체가 연성이 커서 큰 변형이 와도 미끄러짐만 생기고 파괴되지 않아 지지력이 지속되어, 구조물의 안전율이 높아지는 장점이 있다. 공당 설치시간을 3분 이내로 터널이 길고 단면이 클 수록 전체 공정에서 절감되는 효과가 지대하다. 이와 같이 그라운드 앵커, 록 볼트, 케이블 볼트 및 Swellex bolt 등 지보재 특성 및 효과와 지보재들의 지보 메커니즘에 관한 연구는 국내외적으로 활발히 수행되어지고 있다.

국내의 경우 지보재와 관련된 지보 메커니즘에 관한 연구는 김호영과 이희근(1991)은 전면접착형 록 볼트의 응력분포를 알아보기 위한 이론식을 구하고 록 볼트의 지보거동을 고려한 수치해석법을 개발하였으며, 정해성과 문현구(1999)는 록 볼트의 역학적 거동의 파악을 위하여 지반조건, 록 볼트의 설치조건, 설치길이 등을 변화시켜 가며 수치해석을 수행하여 암질이 불량할수록 록 볼트의 보강 효과가 높게 나타나는 연구 결과를 얻었다. 임경필 외(1999)는 불연속면이 지보재의 전단 응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 절리면을 갖고 있는 모형 암반을 이용하여 인발시험을 수행하고 변형률을 측정하여 전단응력을 계산하였다. 측정에 의해 계산된 전단응력과 이론식을 비교하여 측정값과 이론식이 많은 차이를 나타냄을 보였다. 김낙경(2001)은 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 대한 연구를 수행하였으며, 김래현 외(2002)는 그라운드 앵커의 크리프 및 단기거동 특성을 살펴보기 위하여 화강풍화도를 대상으로 인장형 및 압축형 그라운드 앵커를 설계, 시공하고 인발시험, 크리프시험, 하중전이시험을 실시하여 형태별 그라운드 앵커의 거동 특성을 분석하였다. 박병수 외(2006)는 앵커의 정착길이, 천공경, 지보재의 직경 등을

변화시켜 인발시험과 수치해석을 수행하여 비교하였고, 정착길이나 지보재의 직경에 따라 한계하중이 증가하고 수치해석과 비례하는 결과를 얻었다. 유성원 외(2006)는 부착식 앵커의 인발·전단특성을 알아보기 위하여 부착길이, 앵커직경 등의 조건으로 인발·전단시험을 수행하여 길이가 길어지고, 직경이 커질수록 부착력이 증가한다는 결과를 제시하였다.

국외의 경우 Farmer(1975)는 전면 접착형 록 볼트의 응력분포에 대한 이론식을 구하고 전단응력은 굴착 벽면에서 최대이고 볼트 거리를 따라 지수함수적으로 감소한다고 제시하였으며, Yazici & Kaiser(1992)는 케이블 볼트와 그라우트 경계면 사이에서 부착강도 발달을 설명하기 위해 Bond strength model을 제시하고 실내 인발시험을 통한 그라우트의 거동을 설명하였다. 그리고 그라우트 된 케이블 볼트는 연암보다 경암에서 부착강도가 더 증가된다는 연구 결과가 있었으며, Hyett et al(1992)은 그라우트 된 케이블 볼트의 부착력에 영향을 미치는 주요 요인을 알아보기 위하여 시멘트와 물의 배합비나 정착길이, 암반상태 등을 달리하여 실내, 실외 시험을 수행하였다.

새로운 형태의 Spiral bolt란 연성인 평철(SS400)에 양단면을 고정시킨 후 축회전시켜 만든 나선형 형태의 지보재로서(Hirata et al, 2003, 2005), 주로 외국의 경우 연약지반의 보강이나 각종 시설물의 독립기초용으로 사용되고 있다. 이와 관련한 연구로서 Hirata et al(2003)은 스파이럴 구조체의 그라운드 앵커 적용에 관한 기초적 검토(Hirata et al, 2003, 2005)와 Haraguchi et al(2006)은 스파이럴 구조체의 Ground anchor 적용에 관한 성능 시험과 스파이럴 구조체의 Ground anchor 적용시험, Haraguchi et al(2006)은 지반 보강 공법에의 Spiral bar의 적용성에 관한 검토, Hirata et al(2003, 2005)은 Spiral anchor에 의한 시추공 내의 팽창압의 분포와 인발시험에 의한 Spiral bolt와 지반과의 상호작용에 의한 Spiral bolt의 축방향 저항력 산정에 대한 연구 등의 다양한 연구가 수행되어졌으나, 터널 굴착시 지반 보강을 위한 록 볼트의 대체 지보재로서 연구가 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 가장 널리 이용되고 있는 지보재인 록 볼트와 새롭게 개발되고 있는 스파이럴 볼트를 대상으로 터널 내 현장 인발시험을 수행하여 다음과 같은 지보재의 특성을 분석하고자 한다. 첫째, 스파이럴 볼트와 록 볼트의 역학적 특성 차이점을 비교하고, 둘째, 스파이럴 볼트와 록 볼트의 재 인발시험에 따른 지보재로서의 효과를 비교하고자 한다. 마지막으로, 스파이럴 볼트와 록 볼트를 모델링하여 각 시공단계별 안정성 검토를 수행하여 터널안정검토를 하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 지보재의 역할과 지반의 거동 특성

터널을 굴착하면 굴착이전에 작용하던 초기응력이 재분배되어 굴착면 주변의 응력은 새로운 응력 분포 상태에 이르게 된다. 즉, 굴착면 주변 지반은 터널굴착으로 인하여 원래의 3축 응력상태에서 새로운 2축 응력상태가 되며, 이로 인해 소멸되는 지중응력 때문에 굴착면의 접선응력은 크게 증가하고 굴착면의 변위가 굴착공동 내측으로 발생하게 된다. 이때 증가된 접선응력이 지반강도보다 작으면 터널주변 지반은 작은 변위와 함께 조기에 안정되나, 발생하는 접선응력이 지반의 초기 강도보다 크면 큰 변위가 발생되고 지보재로 지반을 지지하지 않으면 터널은 결국 붕괴하게 된다. 특히 설계 지반 특성과 같이 지층구성이 다양하고 불연속면이 임의적으로 존재하는 경우에는 터널 거동 양상도 매우 복잡하게 된다. 설계개념에서의 지보재의 역할과 지반의 거동특성은 Figure 2.1과 같다.

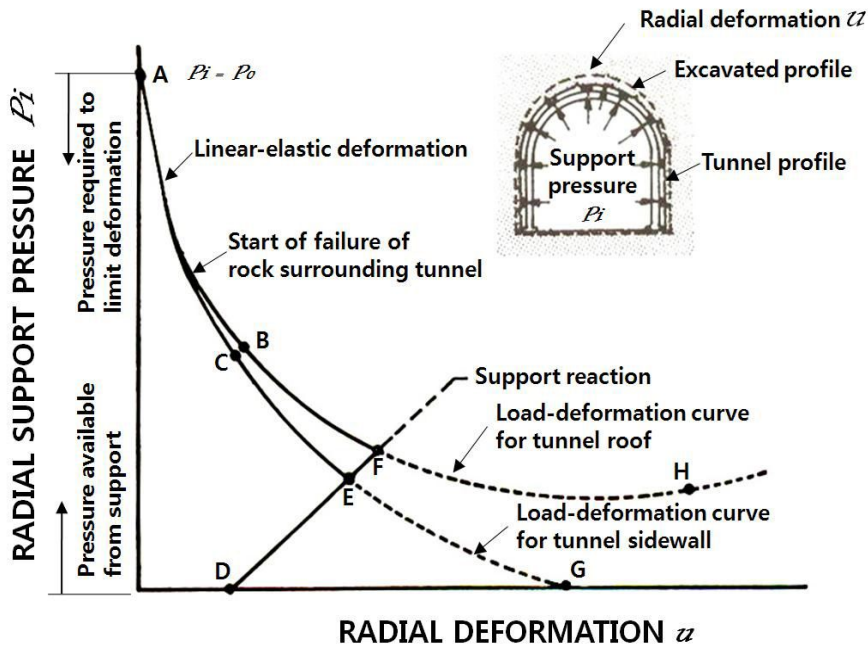


Figure 2.1 The load-deformation curves for the rock mass and support system (Hoek and Brown, 1980).

암반과 지보에 대한 하중-변형 곡선에서 터널 굴착으로 인한 지반의 변형은 항복점을 지나 완전 소성거동을 하게 되며 일정 변위로 수렴할 수도 있고 그렇지 않고 과다 변위가 발생할 수도 있으므로 적절한 시기에 지보 설치가 중요하다. 점 D에서처럼 터널의 변형이 생기지 않을 때 지보는 하중을 부담하지 않는다. 그러다가 터널의 측벽과 아치부 등에 곡선 CEG, BFH와 같은 반경방향의 변화가 일어나게 되면 강제 지보에 발생하는 내부 지보압 P_i 는 곡선 DEF처럼 반경방향 변형과 함께 증가한다. 만약 지보를 삽입 하지 않았다면 곡선 EG나 FH처럼 변형이 증가하게 될 것이다. 측벽의 경우 점 G에서 변형이 멈춰 안정 되겠지만 아치의 경우 변형을 제어하는데 필요한 지보압력이 약화 되었다가 다시 증가하여 아치는 붕괴할 것이다.

암반과 지보에 대한 하중-변형 곡선은 터널 측벽과 아치의 변형곡선과 점 E 및 점 F에서 교차한다. 이런 점에서 측벽과 아치의 변형을 더 진행시키지 않게 하기 위한 지보압력과 지보에서 발생한 지보반력이 정확하게 평형을 이루어 터널과 지보가 평형상태를 이룬다. 이를 통해 지보설계에는 암반과 지보의 상호작용을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다(Hoek and Brown, 1980).

2.2 굴착과 지반거동 특성

터널에서의 지보재는 터널 시공시는 물론 터널의 수명기간동안 터널 주변의 응력이나 변위 상태 등과 상호 연합하여 일체로 거동하여 터널의 안정성을 영구적으로 보장해 주도록 설계하여야 한다. 즉, 지보재는 터널의 굴착으로 인하여 발생하는 새로운 응력상태에 대하여 터널 주변지반과 일체가 되어, 안정된 상태로 도달하도록 설계되어야 한다. 특히, 터널 주변지반의 거동이 지표 및 지층의 주변구조물에 영향을 미칠 위험이 있는 경우에는 터널 굴착의 영향이 최소화할 수 있는 지보재의 규격과 시공순서를 결정하며, 터널 내부에서의 작업효율성, 안정성을 고려하여 각종 지보재를 설계하여야 한다. 일반적으로 터널 지보재는 강지보재, 록 볼트, 슛크리트, 철망 등으로 구성되어 있는 주지보재와 굴착의 용이성 및 안정성 증진을 목적으로 주지보재에 추가하여 시공하는 파이프루프, 포폴링, 막장면 록 볼트 등의 보조 지보재로 구분하여 설계하여야 한다.

터널은 지보재에 의하여 안정성을 유지하기 때문에 일단 유지된 평형상태가 다

시 상실되지 않는 한 요구되는 공간의 확보를 위해서 추가의 지보재를 필요로 하지 않는다. 터널 시공시 이루어진 지보재와 지반이 상호 연합하여 유지된 평형상태가 다시 상실하게 되는 다음의 세 가지 경우를 들 수 있다. 즉, 지반의 장기적 강도가 저하되는 경우, 지보재의 장기적 강도가 저하되는 경우, 그리고 터널 주변에 하중조건의 변화가 발생한 경우이다. 이들 경우에는 지반하중이 콘크리트 라이닝에 적용될 수 있으므로 설계단계에서 이 점을 대비해 두어야 한다.

지보재의 설계는 복잡하게 변화하는 지반특성을 터널 굴착 전에 파악하기 곤란하기 때문에 지반분류에 의해 설정된 지반의 등급에 따라 슛크리트, 록 볼트, 강지보재 등 지보 부재를 적절히 선정하고 표준이 되는 지보패턴을 설정하여 굴착 중 계측 결과에 따라 필요한 경우 지보 패턴을 변경할 수 있도록 현장 조건에 맞는 지보 패턴을 설정해 놓아야 한다.

지보 부재는 각각이 보유하고 있는 지보 기능을 충분히 고려하여 선정하여야 하며, 지보 구조의 선택에 있어서는 예상되는 지반에 대해 시공법이나 시공 설비의 대폭적인 변경을 수반하지 않고 일관성 있는 시공이 되도록 해야 한다.

2.3 Rock bolt의 재질 및 형상

록 볼트의 재질은 원지반 조건 및 사용목적에 따라 필요한 강도 및 인장 특성을 가진 것을 사용하여야 한다. 록 볼트는 일반적으로 인장재로 사용되기 때문에 인장강도가 큰 것을 사용하는 것이 바람직하다. 또한 지반의 급격한 붕괴를 방지하기 위해서는 연성(ductility)이 큰 인장 특성을 갖는 재료를 사용하여야 한다.

원형 봉강은 이형 봉강에 비하여 인발 저항력이 훨씬 작기 때문에 록 볼트 재료로는 통상 이형 봉강이 사용되고 있으며, 국산 이형 봉강 중 강도 및 인장 특성을 고려할 때 KS E 3132에 규정되어 있는 SD350, SD400 정도가 적합하다.

이와 같이 록 볼트는 소요의 강도 이상을 가지는 이형 봉강으로 제작하는 것을 원칙으로 하나 강관, 팽창성 강관 또는 이와 동일한 강도와 기능을 가지는 섬유보강 플라스틱(FRP) 등 기타 소재의 록 볼트도 사용할 수 있으며, 재질 및 강도는 한국산업규격(KS)에 적합한 것이어야 한다.

록 볼트 직경은 1본의 록 볼트가 지탱하는 암괴의 중량 또는 지반에 필요한 전단보강력에 의해 결정할 수 있으나, 일반적으로 볼 때 D22~D29 정도가 무난할 것

으로 보이며, 그동안 국내에서는 거의 대부분 D25 규격의 것이 사용되어 왔고, 이 규격을 표준으로 한다.

록 볼트 재료 선정시 일반적인 기준은 없으나 사용 목적과 그간의 실적에 비추어 그 사용 지침을 개략적으로 제시하면 아래와 같다.

- 암괴의 봉합 등 록 볼트에 큰 축력이 작용하지 않을 것으로 예상되는 경우 SD300, SD350 정도의 재질을 사용하며, 직경은 D22~D25 정도가 적합하다.

- 내압 효과 및 아치 형성 등을 목적으로 하고 지반의 변형이 그다지 크지 않을 경우 SD350, D25 정도의 것을 사용한다.

- 지반의 변형이 클 것으로 예상되는 경우에는 록 볼트에 큰 축력이 발생되어 록 볼트의 내하력을 향상시킬 필요가 없으므로, 단면적이 크고 인장강도가 큰 재료(SD350 이상, D25 이상)를 사용하며, 사용 개수를 늘리는 방안을 검토하여야 한다.

한편, 막장의 안정성을 확보하기 위한 막장 볼트나 확폭 예정 구간에 있어서 굴착 중 안정성을 위해 사용되는 볼트 등은 시공성을 고려하여 고강도 FRP나 유리 섬유(glass fiber) 등을 재료로 한 록 볼트를 사용하는 경우도 있다.

한국산업규격(KS)에 제정되어 있는 봉강의 기계적 성질은 Table 2.1과 같다.

2.3.1 지압판

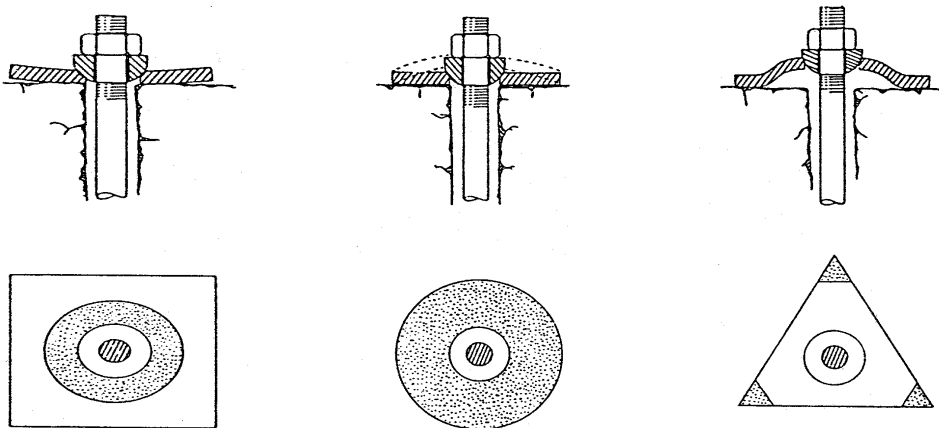
지압판은 록 볼트와 슛크리트를 일체화 시키는 부재이므로 예상되는 응력에 대하여 충분한 면적과 두께, 강도를 가져야 한다. 그러나 슛크리트가 지압판에 대체적 혹은 부가적인 역할을 담당하는 것도 생각할 수 있으므로 그 선택에 있어서 이를 고려하여 하는 것이 필요한 경우도 있다.

일반적으로 평판을 사용할 경우 지압판 면적은 150 × 150mm 정도의 규격이 적당하며, 두께는 6mm 정도가 적당하나, 팽창성 지반의 경우는 9mm 정도의 두께로 하는 것이 좋다. 그러나 지반의 변형이 큰 경우에는 록 볼트가 파단되는 정도의 축력이 발생하는 경우도 있으므로 이 경우에는 지압판의 두께와 강도에 대하여 별도의 검토가 필요하다. 특별히 전면 접착형 록 볼트의 경우 지압판의 설치가 필요 없을 경우도 있으므로 정밀한 검토 후에 감독관과 협의하여 필요 유무를 정할 수도 있다. 일반적으로 사용되어지고 있는 지압판의 예를 Figure 2.2에 나타내었다. 한편, 축력이 크거나 굴착면과 수직으로 록 볼트의 설치가 어려운 경우에는 구형강판

을 고려해야한다.

Table 2.1 Mechanical properties of steel bar

Division	Material symbols	Mechanical properties		
		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage of elongation (%)
Steel round bars	SR240	240 or more	380 or more	20 or more
	SR300	300 or more	440 or more	18 or more
Steel deformed bars	SD300	300 or more	440 or more	16 or more
	SD350	350 or more	490 or more	18 or more
	SD400	400 or more	560 or more	16 or more
	SD500	500 or more	620 or more	12 or more
	SD400W	400 or more	560 or more	16 or more
	SD500W	500 or more	620 or more	12 or more



(a) Flat plate

(b) Domed plate

(c) Triangular bell plate

Figure 2.2 Examples of bearing plate.

2.4 Rock bolt 설계

록 볼트의 길이는 지반의 상태, 터널단면, 인발내력 등을 고려하여 결정하는데, 일반적으로 터널 직경의 1/3~2/3 정도로 하고, 지반이 불량할 때는 보다 긴 록 볼트를 사용한다.

2.4.1 이론식에 의한 설계

Bieniawski가 제안한 암반평점(RMR)분류에 의해 갱도주변에서 암반 사하중의 크기와 이완대의 높이는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$P_r = \frac{100-R}{100} \cdot rB = r \cdot H_t \quad (2.1)$$

여기서, P_r : 갱도주변에서 암반 사하중(t/m^2)

r : 암석의 단위체적당 중량(t/m^3)

B : 갱도의 폭(m)

H_t : 이완대의 높이(m)

Q-System 분류에 의한 갱도주변에서 암반 사하중의 크기와 이완대의 높이는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

1) 절리군 수가 3개 이상인 경우

$$P_r = (1.406) \cdot (J_r)^{-1} \cdot Q^{-1/3} = r \cdot H_t \quad (2.2)$$

2) 절리군의 수가 3개 미만인 경우

$$P_r = (0.469) \cdot (J_n)^{1/2} \cdot (J_r)^{-1} \cdot Q^{-1/3} = r \cdot H_t \quad (2.3)$$

아치이론에 의한 록 볼트의 설계식은 다음과 같이 유도할 수 있으며, 압축대의 유효 두께 T 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = L - S \quad (2.4)$$

여기서, L : 볼트의 길이, S : 볼트의 설치간격

갱도주변에서 단위면적당 걸리는 사하중을 P_r 이라 하면

$$\Delta T_A = P_r \cdot B \quad (2.5)$$

라고 놓을 수 있고, 단위길이당 요구되는 지보력 ΔT_A 를 알 수 있다. 록 볼트의 인발강도를 T_b 라 하고, 볼트 1개가 지지할 수 있는 면적을 A 라 하면, 록 볼트의 설치간격 S 는 다음과 같다.

$$A = S^2 = T_b / P_r$$

$$\therefore S = \sqrt{T_b / P_r} \quad (2.6)$$

식(2.4), 식(2.6)을 조합함으로써 록 볼트의 길이(L)을 구할 수 있다.

$$L = \frac{\Delta T_A \cdot A}{\tan^2(45^\circ + \phi/2) \cdot T_b} + S \quad (2.7)$$

즉, 갱도주변 암반의 사하중과 볼트의 인장강도, 갱도의 폭과 내부마찰각을 알면 그 갱도에 필요한 록 볼트의 길이와 설치간격을 구할 수 있다.

2.4.2 Rock bolt 설계시 고려사항

록 볼트는 오래전부터 사용해 온 지보 부재로서, 그 초기 단계에서는 경암 지반을 대상으로 한 선단 정착 방식이 대부분이었다. 그 후 전면 접착형의 록 볼트가 개발되고 경암 지반뿐만이 아니라 연약 지반의 영역에서도 뛰어난 지보 효과가 있다는 것이 차차 경험적으로 분명해져 현재는 광범위한 지반 조건하에서 터널의 지보재로 사용되고 있다. 록 볼트는 주변 지반의 지보 기능을 유리하게 활용하기 위한 중요한 지보재이므로 지반과 일체화되어 그 효과를 충분히 발휘할 수 있도록 지반 거동에 대한 작용 효과를 고려하여 설계하여야 한다. 이에 따른 지보재를 설계하는데 필요한 요소는 Table 2.2와 같으며, 설계시 고려사항은 다음과 같다.

첫째, 록 볼트 설계시에는 록 볼트 자체의 항복하중과 정착방법을 면밀히 검토하고, 또한 시공성 및 시공기간 단축 등을 고려하여 cycle time에 대한 것도 검토하여야 한다.

둘째, 슛크리트, 강지보재 등 기타 지보재와 병용하는 경우에는 각각의 지보 효과를 고려하여 종합적인 지보 기능을 평가한 후 록 볼트를 설계할 필요가 있다.

셋째, 록 볼트의 작용효과를 장기적으로 기대하는 경우에는 부식되지 않는 것으로 해야 하므로 충분한 검토가 필요하며, 특히 강산성지반 및 해수의 영향을 받는 지역에서는 내부식성 재료 등을 사용하는 등의 대책을 강구하여야 한다.

넷째, 록 볼트의 작용효과 중 특히 봉합작용이 강조되어 인장력이 발생하는 경우는 발생 축력을 검토하여 볼트의 재질 및 형상을 결정하여야 하며 소요의 인발 내력에 대해서 검토하여야 한다.

다섯째, 록 볼트의 재질, 지압판, 정착형식 및 정착재료의 선정 등에 있어서는 그 시공성을 검토하여야 한다.

여섯째, 굴착으로 인한 응력개방에 따라 내공변위가 크게 발생하는 경우에는 선단정착형 또는 혼합형의 록 볼트 형식으로 프리스트레스를 도입할 수 있다. 프리스트레스를 도입하는 경우에는 도입된 프리스트레스가 지속적으로 유지될 수 있는 지반조건이어야 하며 프리스트레싱에 의한 록 볼트의 응력이 항복강도의 80% 이내로 하는 것이 바람직하다.

Table 2.2 Geotechnical data

Geotechnical data	Source
Preliminary information	<ul style="list-style-type: none"> • Published and unpublished geological maps, reports, memoirs etc. • Records, logs of excavations, boreholes etc. in close proximity to proposed project • Published and unpublished reports on projects in similar ground
Geological description	<ul style="list-style-type: none"> • Surface mapping, core logging etc.
Rock material strength and deformation characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratory testing(uniaxial and triaxial)
Rock mass index properties	<ul style="list-style-type: none"> • Assessment of rock quality(e.g. rock quality designation(RQD)) • Point load testing etc.
Discontinuity Data: description orientation spacing continuity	<ul style="list-style-type: none"> • Surface mapping • Structural logging of drillholes • Core orientation • Mapping of surface outcrops and completed excavations
Discontinuity shear strength characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • In-situ shear testing • Shear box tests
Rock mass deformation modulus	<ul style="list-style-type: none"> • Geophysical methods • Drillhole modulus gauges • Plate bearing tests • Monitored excavations
In situ stress measurement	<ul style="list-style-type: none"> • Drillhole stress meters • Deformation gauges • Strain cells
Unit weight	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratory testing
Groundwater conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Piezometric measurements • Packer tests • Visual inspection of excavation
Seismic data	<ul style="list-style-type: none"> • Published seismic records • Vibrograph measurements

2.4.3 Rock bolt 지보패턴

지보재는 기본적으로 터널 주변의 원지반이 보유하고 있는 지보 기능을 최대한 활용할 수 있도록 선정되어야 한다. 따라서 지보재의 선정에 있어서는 터널용도, 지반상태, 토피, 지형, 용수상태, 안정성, 경제성, 시공성 등 제반의 설계조건을 종합적으로 고려하여 합리적인 지보재가 될 수 있도록 하여야 한다.

(1) 표준 지보패턴의 선정

① 여러 시공 실적에 근거하여 작성한 표준 지보패턴을 참고로 하는 방법

여러 시공 실적에 근거하여 작성한 표준 지보패턴을 참고하여 지보패턴을 선정하는 것은 간편하면서도 유효한 방법이 될 수 있다. 그러나 이 방법에 의해 지보패턴을 선정하는 경우에는 기존 시공 실적 및 경험 등을 바탕으로 한 고도의 기술적 판단이 요구 된다.

② 인접한 현장의 설계 및 시공사례 혹은 지반 조건이 유사한 경우의 설계 예를 참고로 하는 방법

기존의 설계사례 중 지반조건 및 단면형상 등의 조건이 유사하다고 판단되는 경우에는 그 설계사례를 참고로 하여 지보패턴을 선정할 수 있다. 이 경우 이미 시공된 터널의 지반조건, 시공법 등의 설계조건 및 계측결과 등의 정보를 가능하면 많이 수집하여 이를 정밀 분석한 후, 기존 지보패턴에 검토된 내용을 반영시킨 적절한 지보패턴을 새로이 선정하여야 할 필요가 있다.

③ 해석에 의해 지보패턴을 선정하는 방법

편압이나 통상의 변위량을 초과할 것으로 예상되는 특수한 지반조건이나, 굴착 단면이 특수한 형태를 가진 경우 등과 같이 유사 설계사례가 거의 없어 기존의 설계사례만을 참고로 하여 지보패턴을 선정하기가 곤란한 경우 해석적 방법에 의해 지보패턴을 선정한다.

(2) 표준지보패턴 선정사례

① RMR 분류방법

RMR 분류에 의한 굴착 및 지보재에 대한 내용은 Table 2.3과 같다.

Table 2.3 Excavation and support base on RMR classification

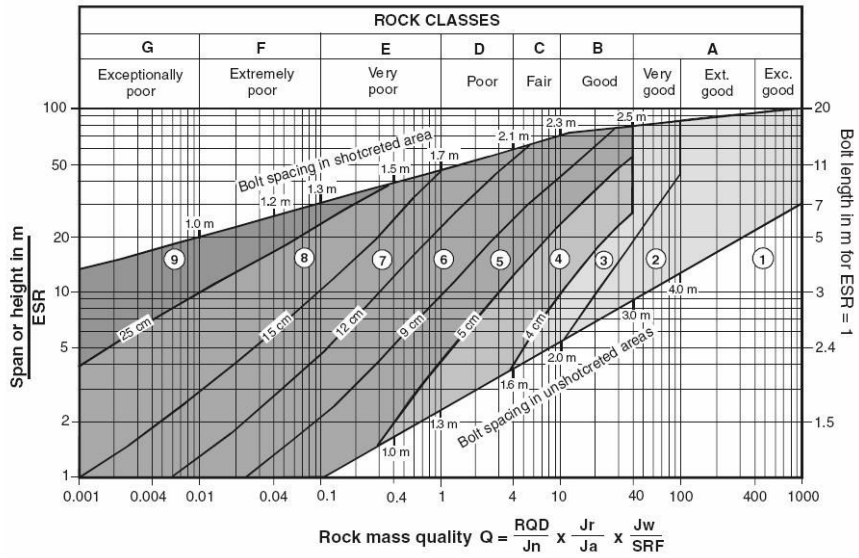
Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I Very good rock RMR: 81~100	Full face, 3m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II Good rock RMR: 61~80	Full face, 1~1.5m advance. complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3m long, spaced 2.5m with occasional wire mesh.	50mm in crown where required.	None.
III Fair rock RMR: 41~60	Top heading and bench 1.5~3m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10m from face.	Systematic bolts 4m long, spaced 1.5~2m in crown and walls with wire mesh in crown.	50~100mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV Poor rock RMR: 21~40	Top heading and bench 1.0~1.5m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10m from face.	Systematic bolts 4~5m long, spaced 1~1.5m in crown and walls with wire mesh.	100~150mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5m where required.
V Very poor rock RMR: ≤ 20	Multiple drifts 0.5~1.5m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5~6m long, spaced 1-1.5m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150~200mm in crown, 150 mm in sides, and 50mm on face.	Medium to heavy ribs spaced. 75m with steel lagging and forepoling if required Close invert.

② Q-system(Barton, 1974)

Q값은 0.001~1,000 범위로서 매우 불량부터 매우 양호까지 9등급으로 분류하여 터널 폭(B)과 Q값에 따른 지보방법을 제시하였다. Q값에 의한 지보방법은 터널의 유효크기(De)에 따라서 결정되며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$De = \frac{B(\text{터널굴진장, 직경 또는 높이})}{ESR(\text{Excavation Support Ratio : 굴착지보비})} \quad (2.8)$$

여기에서 굴착지보비(ESR)는 시행착오에 의해서 계산되는 것인데 터널의 사용 목적에 따른 안정성에 관계되는 수치로서 안전율(Fs)의 역수 개념이다. 따라서 산정된 터널의 유효크기(De)와 Q값을 이용하여 터널 지보재 산정은 Figure 2.3을 사용하여 이루어진다. 단, Q-시스템에서 제안한 방법을 사용하여 섬유보강이 없는 일반 슛크리트의 두께를 정하고자 할 경우에는 섬유보강 유무에 따른 슛크리트의 특성을 감안하여 그 두께를 결정하여야 한다.



REINFORCEMENT CATEGORIES:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Unsupported 2) Spot bolting 3) Systematic bolting 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm) 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm | <ul style="list-style-type: none"> 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm 8) Fibre reinforced shotcrete, > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting 9) Cast concrete lining |
|---|---|

Figure 2.3 Estimated support categories base on Q-system.

2.5 Rock bolt 작용효과

터널 혹은 지하공동에서 지보재를 사용함으로써 다음의 네 가지 효과를 기대할 수 있다. 첫째, 매달림 효과(Suspension effect)는 가장 단순한 효과로서 발과 등으로 인해 느슨해진 암괴를 자체 지지력을 가진 상부의 천반에 지지하게 함으로서 낙하를 방지하는 효과이다(Figure 2.4). 균열, 절리가 발달된 원지반에 숏크리트와 동시에 시공하면 비교적 작은 틈에 대해서도 효과적이다. 둘째, 엇물림 효과(Keying effect)는 취약면을 따라 일어나는 변위를 줄여 취약면에 의해 형성된 암괴를 고정시킴으로서 천반부를 안정시키는 효과이다(Figure 2.5). 셋째, 아치 효과(Arch effect)는 시스템 록 볼트에 의한 내압 효과 때문에 일체화해서 내하능력이 높아진 터널 주변 암반이 내공측에 일정하게 변위가 발생하는 것에 의해 ground arch를 형성하는 것이다(Figure 2.6). 넷째, 마찰 효과(Friction effect)는 록 볼트의 인장력에 해당하는 힘으로써 자체 지지력이 없는 층상 천반의 얇은 층들이 볼트의 설치에 의해 함께 묶여지면 층리면에 마찰력이 유발되어 볼트가 설치되어 있지 않을 때 천반이 분리, 함몰되면서 층리면을 따라 일어나는 암괴의 수평, 수직운동을 억제하거나 감소시켜 지지력을 발휘해 주변암반의 강도 또는 내하능력의 저하를 방지하는 작용을 한다(Figure 2.7). 이러한 마찰효과는 지보재의 인장력과 지보재가 관통하는 층수에 비례하고 지보재의 설치간격과 천반폭의 크기에 반비례한다(Peng, 1978).

불연속면의 상태가 지반거동을 지배하는 경암에서는 록 볼트가 개개의 암반을 지지하고 있어 암반의 일체성을 높이는 효과가 있고, 연암의 경우 록 볼트를 설치하여 굴착면 주변의 암반이 소성화하는 단계에서 내공변위를 구속하면 암반을 삼축응력상태로 유지하고 내하능력을 높이는 작용을 한다.

즉, 경암 이상의 경우에는 암석 자체의 강도가 크기 때문에 응력으로 인한 문제는 크지 않으나, 불연속면이 발달한 암반에서는 붕락 등의 불안정 문제가 발생할 수 있다. 이러한 경우 록 볼트는 암괴의 붕락을 억제하고 암반을 일체화시키는 봉합작용 및 지반보강작용 등의 효과를 발휘한다. 한편, 강도가 작은 연암 이하의 지반에서는 굴착에 의해 주변지반의 응력이 암석강도를 초과하여 넓은 영역까지 소성화되어 비교적 큰 변형이 발생하게 되므로 록 볼트로 보강하여 지반의 변형을 억제하고 소성영역의 확대를 억제함으로써 지반의 안정성을 증진시킬 필요가 있다.

이러한 경우에 록 볼트는 매달림 효과, 엇물림 효과, 아치 효과, 마찰 효과를 발휘한다.

굴착에 의한 지반응력이 암반강도를 초과하면 터널 굴착면 주변 암반은 소성화 하지만 록 볼트는 슛크리트 등의 다른 지보재와 함께 암반을 삼축응력 상태로 유지하고 소성영역의 내하력 감소를 방지하여 굴착지반을 안정시키며, 록 볼트에 긴장력을 가해주면 암반을 삼축응력상태로 만들기 쉽다.

강재, 목재 또는 슛크리트로 지보한 경우에 지보재의 취약부는 파괴 또는 항복되고 이에 따라 지지력이 감소되어 변형이 발생된다. 반면에 록 볼트는 슛크리트에 비해 변형억제 능력은 작지만, 변형이 매우 커져도 강성저하가 적고 전체가 같은 모양을 유지하면서 변형하기 때문에, 록 볼트로 보강된 원지반 지지력은 변형이 진행되더라도 내하력이 부분적으로 저하되는 일이 거의 없다. 따라서 매우 큰 토압을 받더라도 터널의 형상을 유지한 채 안쪽으로 밀려 나오게 되므로 취성과파괴 혹은 급진적인 파괴는 발생하지 않게 된다.

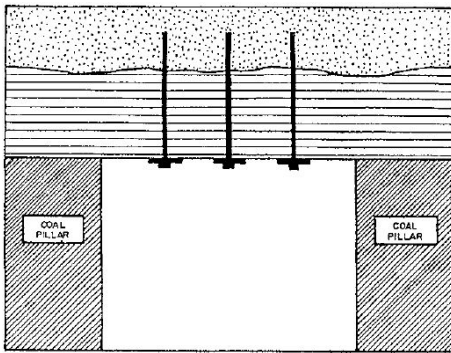


Figure 2.4 Suspension effect.

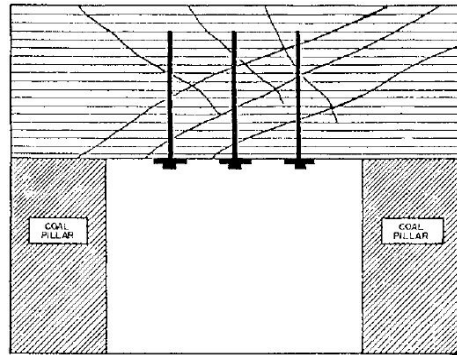


Figure 2.5 Keying effect.

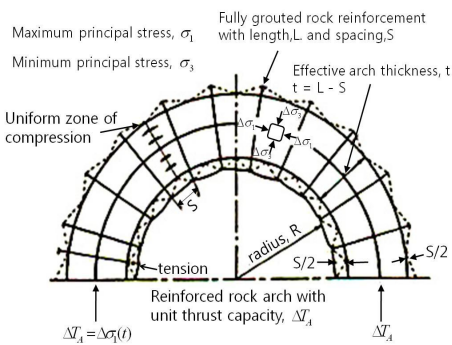


Figure 2.6 Arch effect.

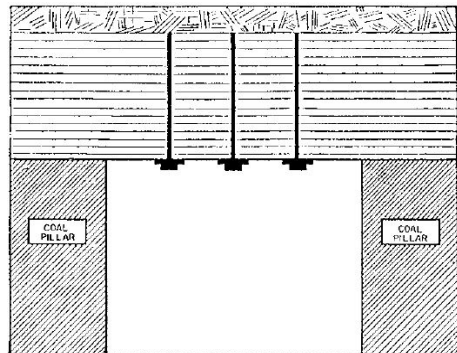


Figure 2.7 Friction effect.

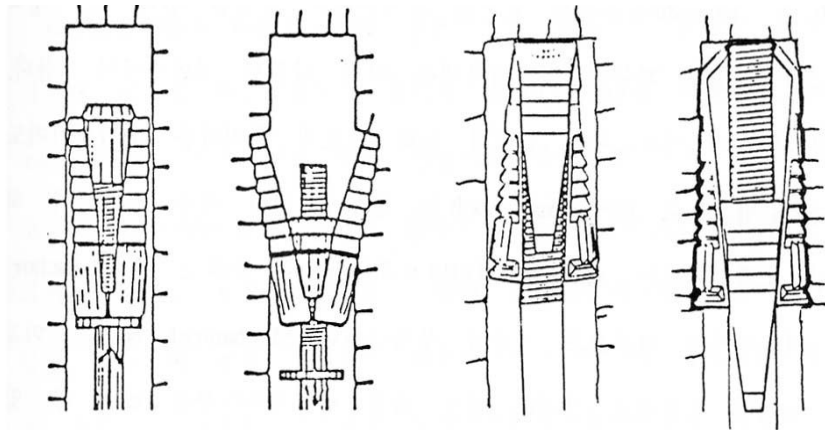
2.6 Rock bolt 종류

2.6.1 Mechanically anchored rock bolt

Mechanically anchored rock bolt 중에서는 Expansion shell anchored bolt가 가장 보편적으로 사용되는데 여기에는 standard형과 bail형의 두 가지 종류가 있다. Expansion shell anchored bolt는 볼트가 회전하면서 공내로 들어감에 따라 볼트에 부착된 썸이 원추형의 expansion shell 안으로 당겨진다.

이 때 걸리는 힘에 의해 shell이 팽창하면서 공벽 안으로 밀착되어 암반을 움켜잡아주는 작용을 하게 되는데 이러한 방법으로 암반을 지지해 주게 된다. 볼트를 설치할 경우 먼저 볼트 직경에 알맞은 천공을 하여야 한다. 그 다음 볼트를 공 안으로 밀어 넣어 bearing plate가 암반에 완전히 밀착되도록 한 뒤 너트를 죄어 미리 조절된 토크(torque)에 도달하도록 한다.

Expansion shell anchored bolt의 설치효과는 무엇보다도 shell이 얼마나 암반에 밀착되어 암반을 잡아주는데 달려있다. 이 밀착력은 공경의 크기, 암반의 종류 및 상태 등에 따라 좌우된다. 이 bolt는 10~20m 내에서 발생한 발파진동의 영향을 받아 그 장력을 잃게 되는데 이 경우에는 다시 너트를 조여주어야 한다.



① Standard type

② Bail type

Figure 2.8 Expansion shell bolt anchor.

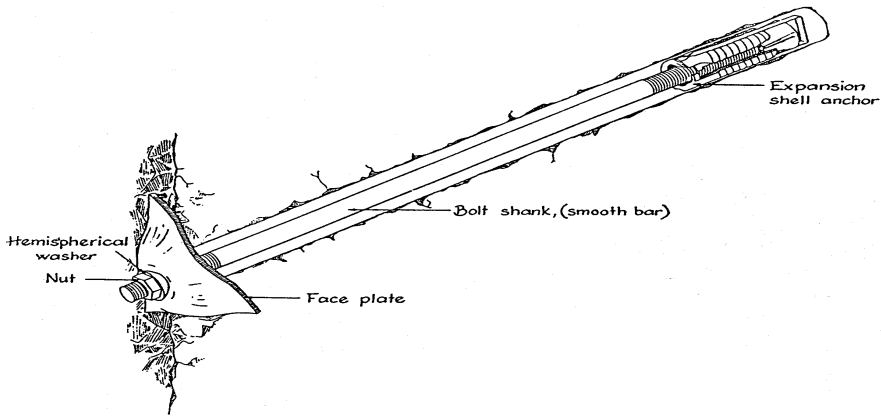


Figure 2.9 Expansion shell bolt.

한편, 볼트의 지지효과를 높이기 위해 볼트와 공 사이를 충전시키기도 한다. 일반적으로 Mechanical bolt는 경암에 많이 적용되어 사용된다. 하지만 초경암에서는 shell의 암반밀착이 용이하지 못하고 앵커(anchor)가 미끄러지기 쉬우므로 사용이 부적당하다. Mechanical bolt는 비교적 가격이 저렴하고 설치직후에 지지역할을 해 낼 수 있으며, 충전을 하면 거의 영구적으로 사용할 수 있다는 장점이 있으나 사용 범위가 경암에 제한되어 있고 올바른 설치에 대한 신뢰도가 낮으므로 설치정도를 점검해야 하는 불편이 있으며 발파진동이나 높은 지압으로 인해 공 주변의 암석이 떨어져나가 그 지지력을 잃게 될 수 있다는 단점도 있다.

Slot and wedge bolt는 Expansion shell bolt와 기능 및 장단점이 거의 유사하고 설치 시 볼트선단을 타격함으로 해서 공저부에 삽입되어 있는 wedge가 볼트 끝에 있는 slot으로 삽입되어 벌어진 볼트의 측면과 공벽이 밀착되게 하여 마찰력을 일으키게 한다.

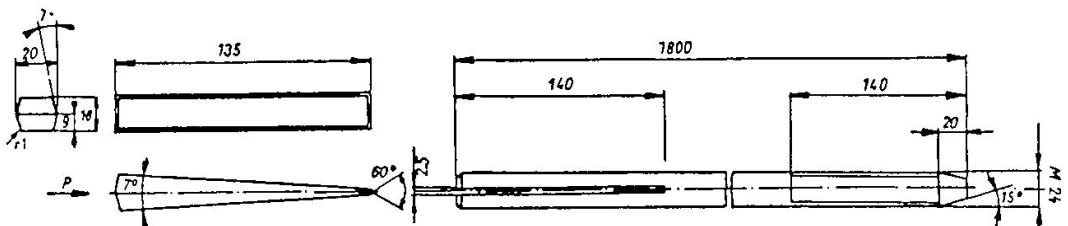


Figure 2.10 Slot and wedge bolt structure.

2.6.2 Grouted rock bolt

Grouted rock bolt는 공과 볼트사이를 충전시켜 암반을 지지하게 되는데 이 때 충전 재료는 시멘트나 레진(resin)을 이용한다. Grouted rock bolt의 설치과정은 매우 간단하다. 충전물은 보통 펌프로 주입하거나 cartridge를 사용하여 공속으로 넣는다. 펌프로 충전물을 주입시킬 때에는 보통 충전 튜브를 공의 밑바닥까지 밀어 넣은 다음 튜브만을 회수하여 공을 충전물로 밀착시켜야만 튜브회수시 기포의 발생을 방지할 수 있다. 수직공에서는 시멘트 충전물이 흘러내릴 위험이 있는데 이를 막기 위해 물과 시멘트의 배합비율이 0.3에서 0.35정도 되게 한다. 시멘트 충전물에도 속결 레진의 경우처럼 급결제를 넣어 충전물이 굳는 속도를 빠르게 할 수 있다. 그리고 만약 시멘트 모르타르를 충전물로 사용하려면 미리 혼합된 모르타르를 사용하는 것이 바람직하다. 이 bolt에서는 Mechanical bolt와는 달리 공경의 크기가 최종 충전 효과에 별로 영향을 미치지 않는다.

Grouted rock bolt를 빠르고 간편하게 설치하려면 cartridge를 사용하는 것이 좋다. 특히 시멘트 cartridge는 공에 넣기 전에 몇 분정도 물에 담가 물이 cartridge 속으로 스며들게 한 뒤 사용한다. 시멘트 cartridge와는 달리 레진 cartridge에서는 반드시 충전물을 혼합시킬 필요성이 있다. 보통은 bolt를 cartridge안으로 회전시켜 넣으면서 충전물을 혼합시킨다. cartridge를 사용하는 경우에는 공경이 적당해야 충전물을 잘 섞어 넣을 수 있다.

Grouted rock bolt 중 완전충전 rebar bolt와 강철제 thread bar bolt가 가장 많이 사용된다. 완전충전 rebar bolt는 설치 이후부터 지지력을 발휘할 수 있다는 장

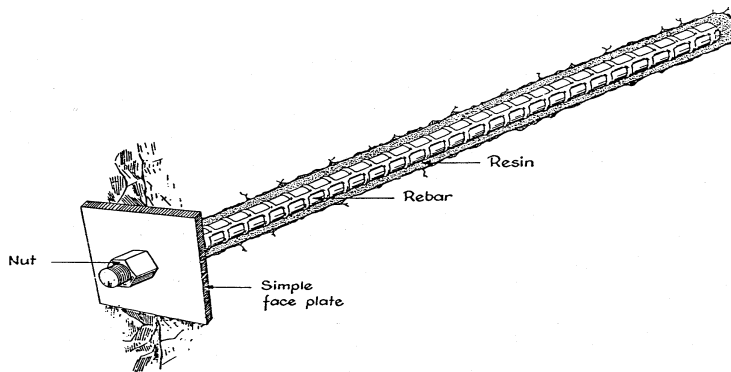


Figure 2.11 Resin grouted bolt.

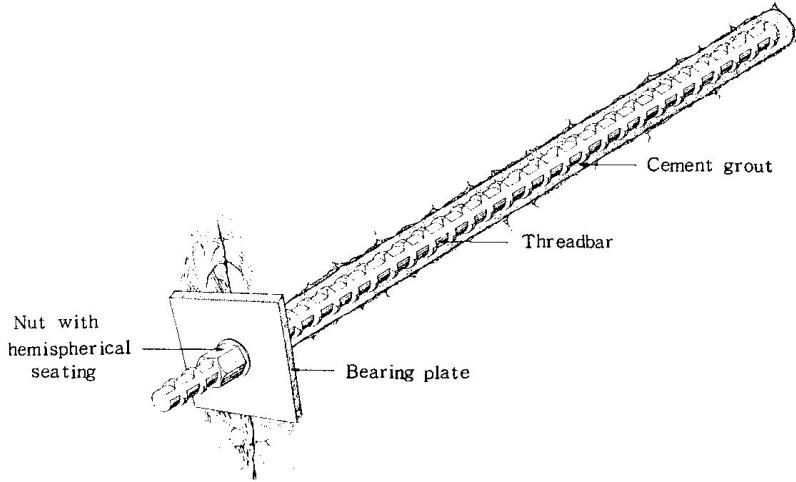


Figure 2.12 Cement grouted bolt.

점이 있으나 취급이 난이하고 cartridge의 낭비가 심하며 지지수명이 한계가 있다는 단점이 있다. 강철제 thread bar bolt는 설치만 잘되면 강하고 지속적이 지지력을 가지며 주위의 불리한 환경에 대한 영향을 가장 적게 받아 영구보존 지지의 목적으로 토목공사에 많이 사용되나 가격이 비싸고 시멘트 충전시 볼트가 제대로 지지력을 발휘하려면 며칠의 경화기간이 필요한 단점이 있다.

이외에도 Grouted bolt에는 Perfo bolt가 있다. 이것은 작은 구멍들이 뚫린 파이프를 축 방향으로 양단하여 속에 시멘트 모르타르를 채운 후 반원통의 2개의 파이프를 묶어 원통형으로 한 뒤 공 내에 삽입하고 파이프 속으로 볼트를 삽입하여 파이프속의 시멘트 모르타르가 밀려나와 공 내를 그라우팅 되게 하여 설치한다.

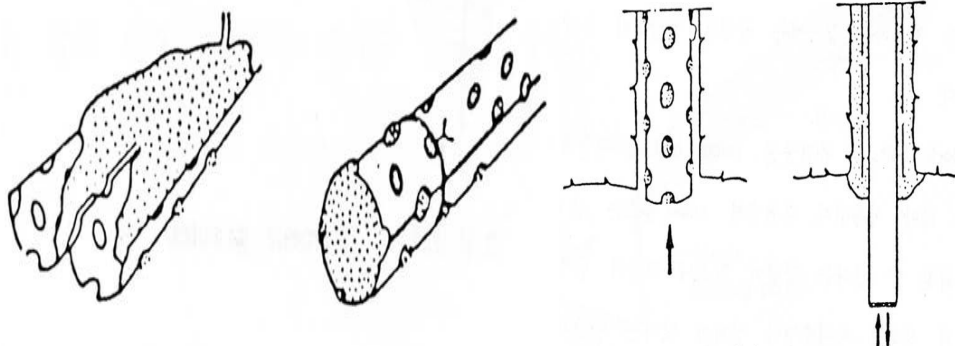


Figure 2.13 Perfo type bolt.

2.6.3 Friction anchored rock bolt

Friction anchored rock bolt는 가장 최근에 개발된 볼트이다. 여기에는 Split set와 Swellex의 두 가지 형태가 있다. 이들 볼트의 설치 방법은 전혀 다르다. Split set bolt의 경우, 먼저 볼트보다 약간 작은 크기의 공경을 가진 공속에 stopper나 jackleg drill을 이용하여 볼트를 밀어 넣는다. 이 때 부적당한 공경에 대해서는 설치실패의 주요 원인이 된다. 또한 이 공경은 설치 후 볼트 지지력에도 중요한 영향을 미친다. 즉 공경이 너무 작으면 볼트설치가 난이하고 반대로 공경이 bolt 직경에 비해 너무 크면 지지력이 감소된다. 이 볼트는 Untensioned bolt이나 설치 후 즉각 지지력을 발휘할 수 있다. Split set rock bolt는 다양한 암반에 대해 사용이 가능하나 매우 부드럽거나 균열이 많은 암질 상태에는 부적당하다.

Swellex rock bolt는 매우 간단하게 설치할 수 있다. 이 볼트 설치시는 별다른 장비가 필요하지 않다. 일반적으로 Swellex rock bolt를 설치할 때는 먼저 볼트를 공간에 넣은 다음 높은 수압펌프를 이용하여 볼트를 팽창시킨다. 볼트가 공벽에 밀착할 때까지 팽창시키므로 비록 벽면이 울퉁불퉁할지라도 충분한 마찰저항이 생기게 된다. 그러나 볼트가 팽창되면서 약간의 길이수축을 야기시킨다. 이 bolt 설치시는 Split set의 경우와는 달리 공경의 크기가 별로 영향을 미치지 않는다. 그리고 설치직후부터 암반을 지지할 수 있다. 또 pump의 압력은 자동적으로 조절되므로 설치자의 특별한 기술을 요하지는 않는다.

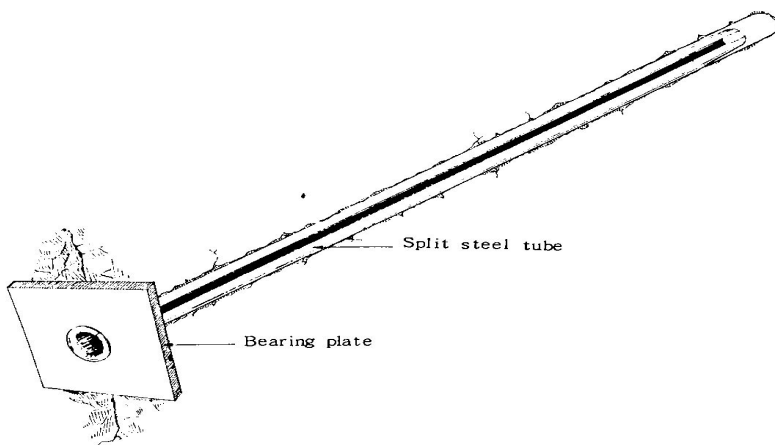


Figure 2.14 Split set.

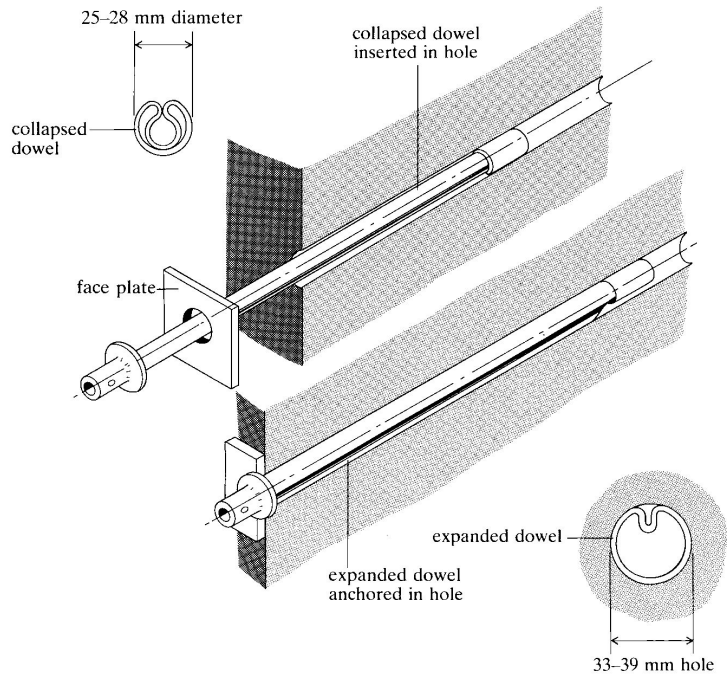


Figure 2.15 Swellex bolt.

Friction anchored rock bolt는 젖은 암반 상태에서도 설치와 사용이 가능하다. 그러나 영구적인 지지에 대해서는 볼트의 마모문제가 제기된다. 이 두 bolt의 차이점은 지지방법과 위에서 언급한 바와 같이 설치방법에서 나타난다. 좀 더 정확하게 말한다면 split set 볼트만이 완전한 Friction anchored rock bolt라 할 수 있으며 이를 Split set friction rock stabilizer라 한다.

Split set bolt는 볼트와 암반사이의 마찰력에 의해 암반을 지지하게 되는데 만약 하중이 볼트의 지보능력보다 커질 경우 볼트는 미끄러지게 된다.

Swellex bolt는 암반과 볼트가 잘 밀착되어 이때의 마찰력이 암반을 지지하여 볼트가 미끄러지는 현상을 방지한다. Swellex bolt는 팽창압력을 변화시키면서 다양한 암반상태에 사용 가능하다. 이 두 형태의 Friction anchored rock bolt는 광산과 토목에서의 터널 작업에 널리 사용된다.

이 bolt는 설치가 간편하고 설치 직후부터 지지력을 발휘하여 jackleg이나 jumbo boom 이외에는 별다른 설치장비가 필요치 않고 wiremesh 사용이 편리하다는 장점이 있으나 가격이 비싸고 공경문제 때문에 긴 볼트의 설치가 어렵고 볼트 마모에 대한 대책이 없으면 장기간의 지보에는 부적당하다는 단점이 있다.

2.6.4 Spiral bolt

Spiral bolt란 최근에 개발된 새로운 형태의 지보재로서, 관상의 강재에 양 단면을 고정시킨 후 축 회전 시켜 만든 나선형 형태의 지보재이다. Spiral bolt는 외국의 경우 주로 연약지반 보강이나 각종 시설물의 독립기초 대응으로 사용되어지고 있다. 이와 같은 새로운 형태의 Spiral bolt와 비교를 위하여 지하굴착공사 및 광산에서 광범위하게 사용되고 있는 록 볼트와 Swellex bolt의 특징을 살펴보면 록 볼트의 경우는 굴착 단면의 형상에 제한을 받지 않고, 설치가 용이하며 타 공법에 비하여 저비용이고 전체 공정이 기계화 시공이 가능하나, 지속적인 지반거동이나 충격하중에 의한 강도 저하의 단점이 있다.

또한, Swellex bolt는 설치가 간편하고, 설치 직후부터 지지력을 발휘함에 따라 팽창압력을 변화시키면서 다양한 암반상태에 적용 가능한 장점이 있으나, 가격이 고가이고 공경 문제 때문에 긴 볼트의 설치가 어렵고, 볼트 마모에 따른 장기간 지보에는 부적당하다. 따라서 Spiral bolt가 록 볼트의 대체 지보재로서 연구 개발 될 경우, 다양한 암반상태에서의 적용 용이성과 지보재의 경량화로 취급 및 시공성이 편리하며, 마찰력과 부착력을 증대시킬 수 있는 구조로 지보 안정성, 지보 회복력, 지보 유지력 측면에서 록 볼트에 비하여 기대효과가 탁월할 것으로 판단된다.

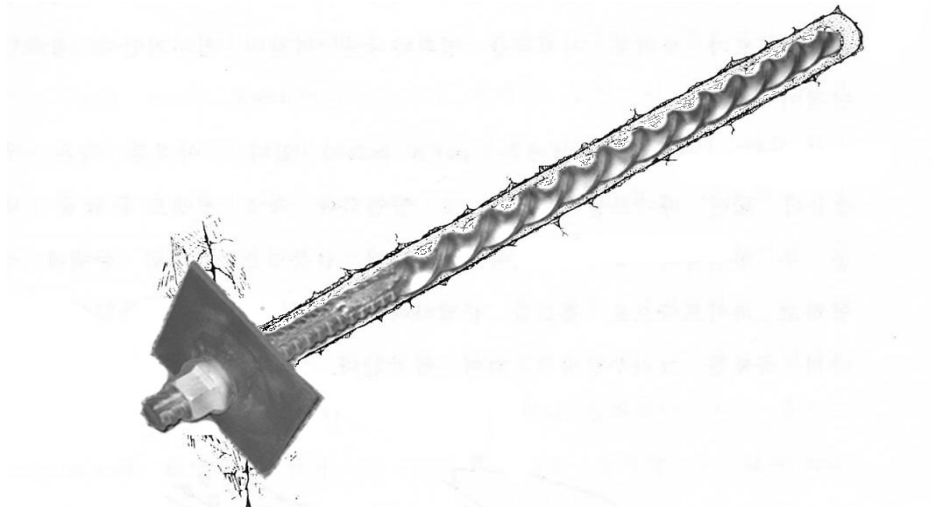


Figure 2.16 Spiral bolt.

3. Spiral bolt & Rock bolt

3.1 Spiral bolt의 역학적 특성

Spiral bolt는 최근에 개발된 새로운 형태의 지보재로서 일정두께의 긴 판상의 강재를 양단면을 고정시킨 후 축 회전 시켜 만든 나선형 형태의 지보재(Figure 3.1)이다. 금속재료인 연강이나 고강도 강재를 사용하여 쉽게 가공할 수 있고 길이(ℓ), 폭(d), 두께(t) 등에 따라 여러 크기로 가공할 수 있다. Spiral bolt는 단면적의 차이가 부착력이나 마찰력에는 크게 영향을 미치지 않는 반면 축 방향 저항력에 미치는 영향은 상대적으로 큰 것이 특징이다. 또한, Spiral bolt는 록 볼트보다 부착력과 마찰력이 커서 지반거동이나 지속적인 피로충격하중에도 지보안정성, 지보회복력, 지보유지력 측면에서 탁월하여 적용성이 우수하고, 경량이며 취급 및 시공성이 용이하므로 터널에서 록 볼트 대체재로 개발하여 사용할 경우 기대효과가 크다. 또한, Spiral bolt는 가공 특성상 강재의 축 방향에 압축력이 작용하므로 축 중심 부근의 두께가 두꺼워지는 반면, 축 중심에서 가장 멀리 떨어진 양쪽 가장자리 부분에서는 인장력의 작용으로 인하여 두께가 얇아지는 경향이 있다(Hirata et al., 2003, 2005). 그러므로 동일한 단면 내에 함께 작용하는 압축력과 인장력을 완화시키기 위하여 축 방향에 일정한 인장력을 가하면서 비틀림 가공을 수행해야 한다. Figure 3.2는 Spiral bolt의 일부분과 이를 확대시켜 나타낸 것이며, 지보재 설치시 효과적으로 작용하는 Spiral bolt의 이론적 이상각 형성을 위하여 평철에 비틀림을 가하였을 때 축 방향과 양쪽 가장자리 부분의 각은 약 45° 의 관계를 이룬다. 또한, Spiral bolt는 단면적의 차이가 부착력이나 마찰력에 영향을 크게 미치지 않지만 회전할 때 발생하는 축 방향 저항력에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것이 특징이다. 연약지반의 경우 천공작업을 하지 않고 Spiral bolt를 직접 회전시키면서 지반 내에 바로 설치할 수 있기 때문에 지반을 교란시키지 않고 지반과 일체화 시킬 수 있다. 암반과 같은 견고한 지반의 경우 천공작업을 한 후에 Spiral bolt를 그라우트와 함께 설치하는데, 고화된 그라우트가 주위 지반과 어느 정도 비슷한 강도를 갖는다면 연약지반에서 설치하였을 경우와 같은 결과를 기대할 수 있다.

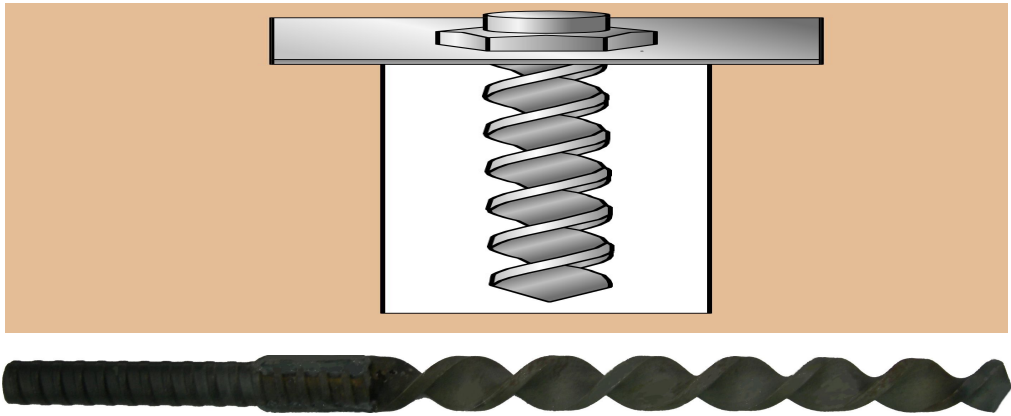


Figure 3.1 View of spiral bolt.

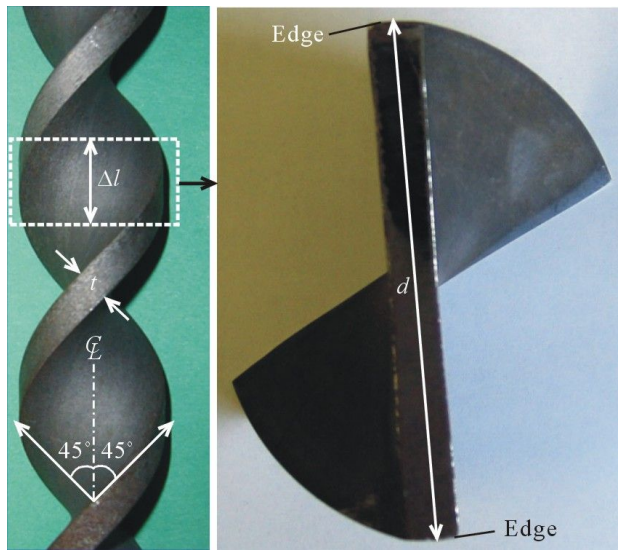


Figure 3.2 Shape of spiral bolt and cross-section.

Figure 3.3은 Spiral bolt에 축력이 작용했을 때 Spiral bolt와 지반 사이에 형성되는 전단파괴 과정을 나타낸 것이다. Spiral bolt에 축력이 가해지면 Spiral bolt 양쪽 가장자리와 지반의 경계부에 전단파괴대가 발생되며, 축 하중이 계속 가해지면 동시에 전단파괴대도 함께 성장하다가 마지막 단계에서는 Spiral bolt와 지반의 경계부 사이에 원형의 전단파괴 영역이 형성된다. 이런 현상을 실제로 살펴보기 위하여 Figure 3.4는 시멘트와 석고를 층상으로 하는 모형지반을 제작한 후 여기에 Spiral bolt를 설치한 다음 5mm 정도의 인발시험을 실시하였다(강성승 외, 2005).

시험결과는 Figure 3.3에서 나타낸 것과 같은 전단파괴가 발생했음을 잘 보여준다. Spiral bolt 주위에 완전한 전단파괴 영역이 형성되면 축 방향 저항력은 잔류 응력 상태가 되므로, Spiral bolt의 크기와 지반의 전단강도를 알면 축 방향 저항력을 계산할 수 있다.

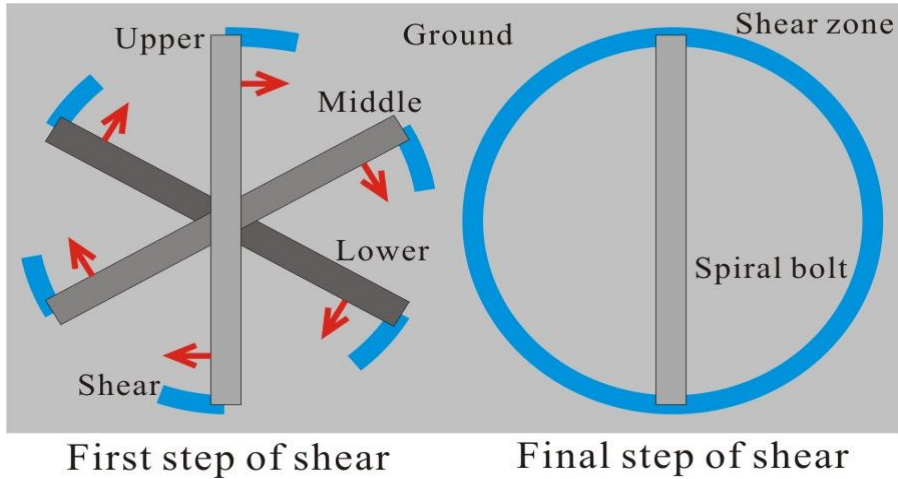


Figure 3.3 Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground.

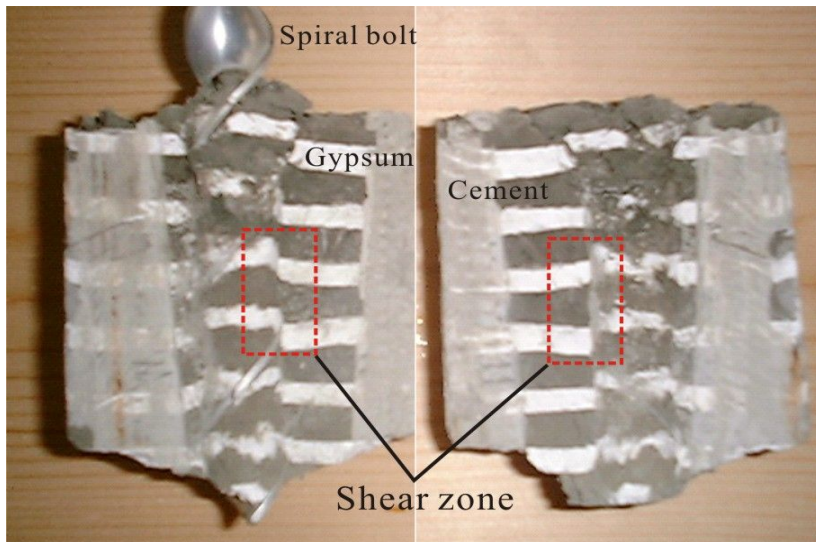


Figure 3.4 Shear failure zone occurred in artificial stratified model of gypsum-cement.

Spiral bolt란 못과 나사가 유사한 직경과 동일한 봉압을 갖고 있을 경우 나사가 못에 비해 더 높은 인발력을 갖는 것과 같다. 못의 인발력은 접촉면의 마찰력으로 구성되는 반면, 나사의 경우 마찰력은 변형에 따라 급격히 증가되기 때문에 접촉면에서의 미끄러짐보다는 매질의 전단파괴에 지배된다. 이러한 효과를 확인하기 위하여 인발하중에 의한 파괴 형상을 관찰하기 위한 인발시험에서 파괴된 시료의 컴퓨터 단층 영상을 촬영하였다(Ito et al., 2001; Kang et al, 2005). 록 볼트의 경우 파괴는 록 볼트와 충전재의 접촉면에서 발생함을 확인할 수 있다(Figure 3.5(a)). 반면에 Spiral bolt의 경우는 파괴된 후에도 스파이럴 형상과 충전재가 맞물려있음을 볼 수 있다(Figure 3.5(b)). 이를 통해 록 볼트와 Spiral bolt의 인발내력을 결정하는 파괴 형태가 다르다는 것으로 확인할 수 있으며, 앞서 언급한 파괴 형태 중 가장 취약한 형태인 강제와 충전재의 접촉면의 파괴를 보다 덜 취약한 파괴 형태로 전이시킴으로서 Spiral bolt의 경우 최종 인발내력을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

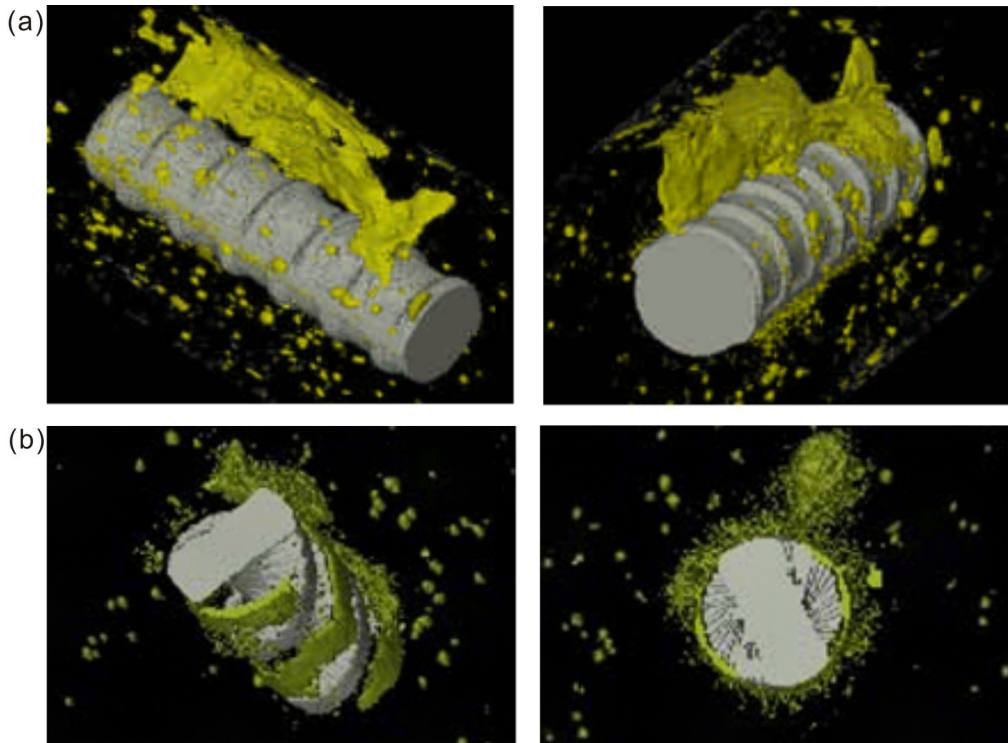


Figure 3.5 Failure images scanned by X-ray CT scanner; (a) Rock bolt, (b) Spiral bolt (Ito et al., 2001; Kang et al, 2005).

3.2 Spiral bolt의 재료 특성

본 연구를 위한 터널 내 인발시험에 사용된 Spiral bolt 재료의 역학적 특성은 Table 3.1과 Table 3.2와 같다. 특히 Spiral bolt의 시험 재료 선정에 있어서 록 볼트와의 유사조건을 충족하기 위하여 단면적 및 강도의 저하, 볼트와 천공경과의 비를 고려하였고, SD500W으로 제작된 Spiral bolt는 SD500W의 평철이 국내에서 생산되지 않은 관계로 이형봉강 SD500W를 평철로 가공하여 사용하였다.

Table 3.1 Mechanical properties of flat steel bar used for spiral bolt

Bolt type	Material symbols	Mechanical properties		
		Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Percentage of elongation(%)
Flat steel bar	SD500W	500 or more	620 or more	12 or more

Table 3.2 Strength of flat steel bar for spiral bolt

Bolt type	Material symbols	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Width(mm) ×thickness(mm)	Cross section area (mm ²)	Reference (Test applied)
Flat steel bar	SD500W	500	620	27×13.5	369	In-situ pull-out test (Tunnel)

3.3 Rock bolt의 역학적 특성

록 볼트의 형상은 대표적으로 Figure 3.6과 같으며, 지반 중에 고정점을 가지는 지보재로서 암반 중에 철재로 만들어진 로드, 튜브, 케이블로 충분한 깊이에 삽입하고 적당한 방법으로 끝에 고정하거나 전체길이를 따라 부착하게 하는 것이었다. 록 볼트는 굴착단면의 형상에 제한을 받지 않고, 설치가 용이하여 타 공법에 비하여 저비용이며 전체 공정이 기계화 시공이 가능하므로 토목현장의 지하굴착공사에 광범위하게 사용되고 있다. 또한 터널현장에서 발파 및 기계굴착시 발생하는 주변 원지반의 소성영역 확대를 억제하고 원지반의 안정성을 증가시키며 굴착부분이 일시적으로 개방됨에 따른 취약점을 보완하여 2차 변형 발생을 억제하는 주 지보재 역할을 한다.

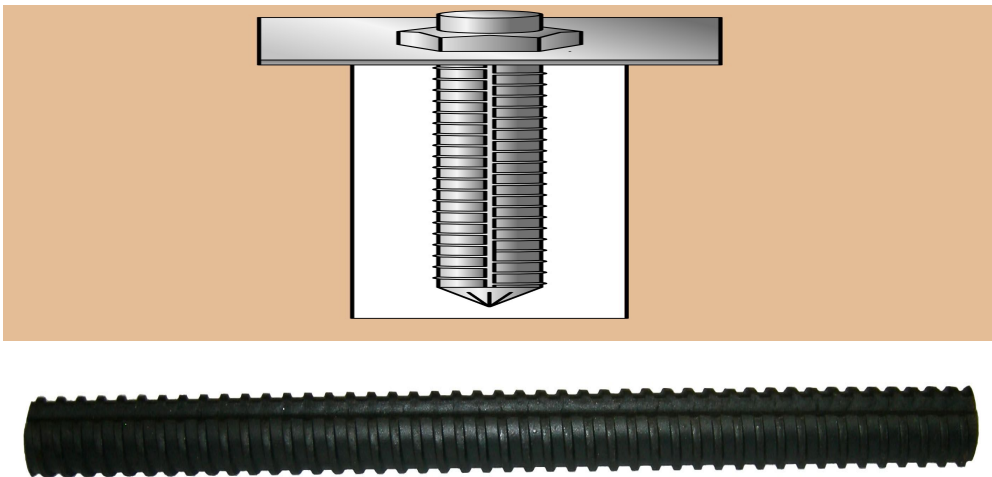


Figure 3.6 View of rock bolt.

3.4 Rock bolt의 재료 특성

록 볼트의 재료로서는 일반적으로 이형봉강, 트위스트(twist)봉강, 전나사봉강 등이 사용되지만 그라스 파이버(glass fiber)나 강관 등을 사용하는 경우도 있다. 록 볼트의 주재료로 사용되는 봉강은 록 볼트의 인장재로 사용되므로 인장강도가 큰 것이어야 하며, 원지반의 급격한 붕락을 방지하기 위하여 신장성이 커야한다. 국내 KS에 제정된 KS D 3504의 SD350에 대한 록 볼트 재질의 역학적 특성은 Table 3.3과 같으며, 전면 접착식 록 볼트용 봉강의 내력은 Table 3.4와 같고, 록 볼트와 천공경 비는 Table 3.5와 같다.

Table 3.3 Mechanical properties of bars used for rock bolts

Bolt type	Material symbols	Mechanical properties		
		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage of elongation(%)
Steel deformed bars	SD 350	350 or more	490 or more	18 or more

Table 3.4 Strength of bar for rock bolt

Bolt type	Material symbols	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Bolt diameter (mm)	Nominal diameter (mm)	Thread part				Material part		
						Diameter (mm)	Cross section area (mm ²)	Yield load (kN)	Max tensile load (kN)	Cross section area (mm ²)	Yield load (kN)	Max tensile load (kN)
Steel deformed bars	SD 350	350 or more	490 more	D25	25.4	M24	353	109.47	156.64	506.7	157.53	225.17
				D29	28.6	M27	459	142.4	204.7	624.4	199.36	285.69

Table 3.5 Rock bolt and borehole diameter

Rock bolt		Borehole diameter(ϕ)
Point-anchored bolt	Wedge type	$\phi \leq$ slit enlargement diameter(max)
	Expansion type	$\phi \leq$ shell enlargement diameter(max)
	Normal resin(capsule) type	$\phi =$ bolt diameter + (4~8mm)
Full-length-grouted bolt	Normal resin(capsule) type	$\phi =$ bolt diameter + (4~8mm)
	Foaming resin(capsule) type	$\phi =$ bolt diameter + (10~15mm)
	Cement system(capsule) type	$\phi =$ capsule diameter + (6mm)
	Cement mortar(charge) type	$\phi =$ bolt diameter + (10~15mm)
	Perfo type	$\phi =$ bolt diameter + (10~20mm)
	Cement milk(injection) type	$\phi =$ bolt diameter + (10~15mm)
		단, $\phi \leq$ packer effectiveness diameter

4. 터널 내 인발시험

4.1 시험방법

Spiral bolt와 록 볼트의 resin 충전에 따른 지보특성을 파악하기 위하여 목포-광양간 고속도로 ○○터널 3TYPE 구간(측벽부)에서 각 지보재 별로 resin 충전 후 4, 8, 12, 16시간이 지난 후 각 시험공당 3회의 인발시험을 수행하였다(Table 4.1).

지보재와 암반사이의 최대인발하중 단계에 따른 지반거동 상태파악과 매회 발파시 충격하중에 따른 피로하중이 지보재에 영향을 미칠 수 있는 환경조건을 유사하게 설정하기 위해 각각의 동일 시험공에 대하여 인발시험으로부터 3분경과 후 재인발시험을 수행하였다. 터널 내 인발시험에서 인발하중의 재하속도는 9.8kN/min (1tf/min)으로 하였으며, 그라우트 재료는 급결형 resin 1개, 선단형 resin 2개, 충전형 resin 2개를 각 시험공에 사용하였다. 터널에서의 3TYPE 인발내력 현장기준은 인발하중이 15tf, 변위가 5mm이내이다.

터널 내 인발시험을 위한 각 지보재의 길이는 4m, 시추공의 직경은 45mm이다. 본 시험에서 사용한 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 재료의 역학적 성질을 비교하면 Table 4.2와 같고, resin의 특성은 Table 4.3에 나타내었다. 측정기기는 변위변환기(DTH-50D M150, KYOWA), 압력변환기(DGS-500KAM1, KYOWA)를 사용하여 측정하였으며, 하중은 Hydraulic cylinder (RCH-302)에 Hydraulic hand pump (P-80)를 가하여 하중을 증가시켰다. 모든 데이터는 데이터로거(UCAM-60B-AC M14, KYOWA)를 이용하여 획득하였다(Figure 4.1). Figure 4.2는 Spiral bolt와 록 볼트의 터널 내 인발시험 과정을 나타낸다.

Table 4.1 Boreholes where the pull-out tests for spiral bolts and rock bolts in ○○ tunnel

Pullout test	4 Hours	8 Hours	12 Hours	16 Hours	Site
Spiral bolt (SD500W)	●	●	●	●	Left side -wall
	●	●	●	●	
	No.1	No.3	No.5	No.7	
Rock bolt (SD350)	●	●	●	●	Right side -wall
	●	●	●	●	
	No.2	No.4	No.6	No.8	

※ ●:Spiral bolt & Rock bolt for Pull-out tests

인발시험은 Spiral bolt와 록 볼트의 resin 양생시간에 따른 지보 특성을 파악하기 위하여 각 공당 3회 실시함.

Table. 4.2 Comparison of mechanical properties for spiral bolts and rock bolts

Division	Spiral bolt		Rock bolt	
	Standard	Result	Standard	Result
Quality	SD350	SD500W	SD350	SD350
Area (mm ²)	506.7	369	506.7	506.7
Yield strength (N/mm ²)	350	548	350	406
Tensile strength (N/mm ²)	490	682	490	643
Yield load (N)	177,345	202,212	177,345	205,720
Max. Tensile load (N)	248,283	251,658	248,283	325,808
Percentage of Elongation (%)	≥18	18	≥18	22

Table 4.3 Physical properties of resin

Description		Fast hard	Intercept	Compliment
Color		Black	Red	Green
Gauge	ø32	ø32×650mm		
Weight	ø32	500g(±10g)		
Expansion ratio		More than 2 times	More than 2 times	More than 15 times
Required time for expansion		Within 30sec	Within 60sec	Within 360sec
Time for settlement		Within 1hour	Within 1hour	Within 6hour
Pull-out strength		More than 200kN	More than 150kN	More than 100kN



(a) Data logger for 20-channels



(b) Hydraulic hand pump



(c) Displacement transducer



(d) Pressure transducer



(e) Hydraulic cylinder

Figure 4.1 Equipments for pull-out test.



Figure 4.2 Installation process of rock and spiral bolts in a borehole;
(a) Borehole, (b) Injection of resin, (c) Insertion of rock and spiral bolts,
(d) Completion of installation

4.2 시험결과

4.2.1 4시간 양생

Figure 4.3은 resin의 양생시간이 4시간 경과된 후 Spiral bolt에 대한 3회 인발 시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

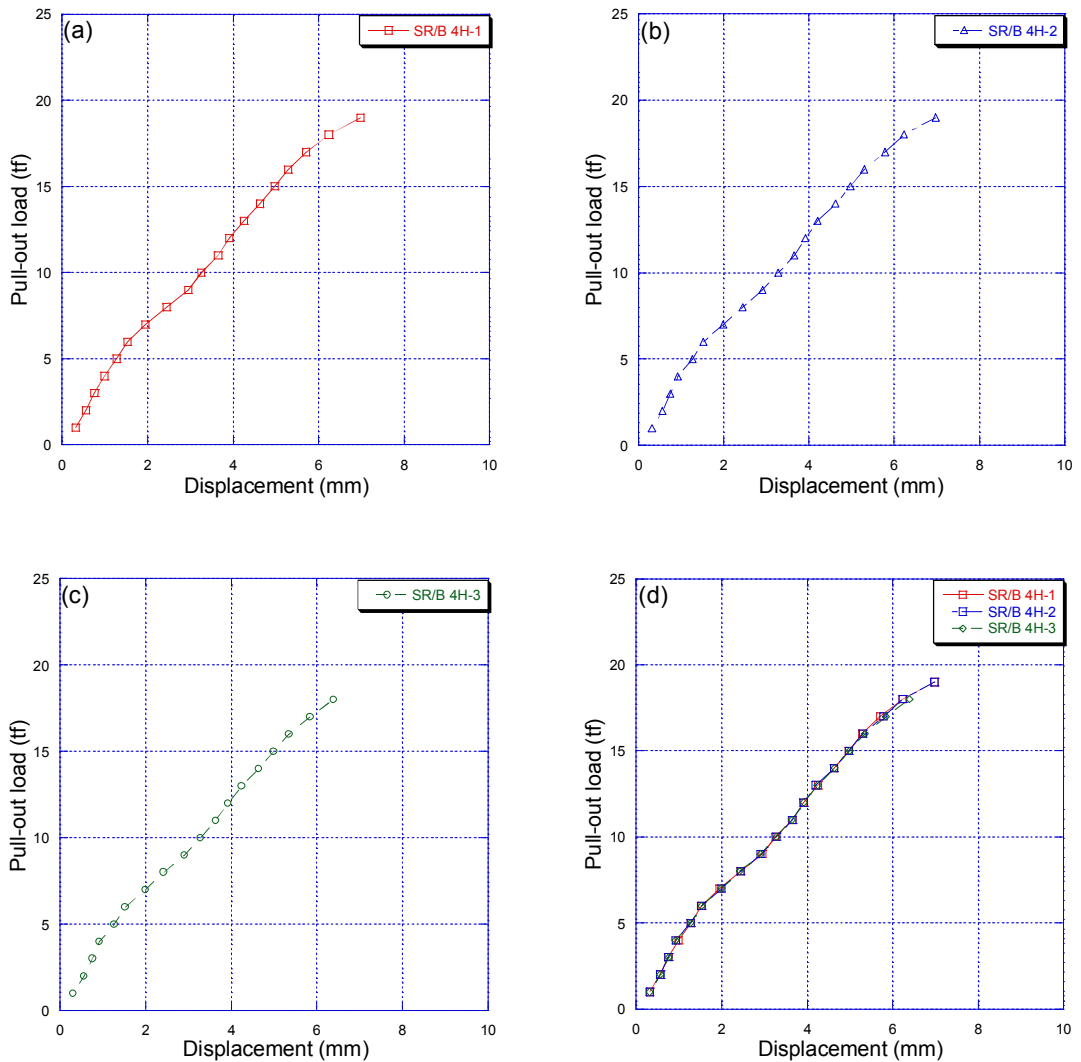


Figure 4.3 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 4 hours.

Figure 4.4는 resin의 양생시간이 4시간 경과된 후 록 볼트에 대한 3회 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

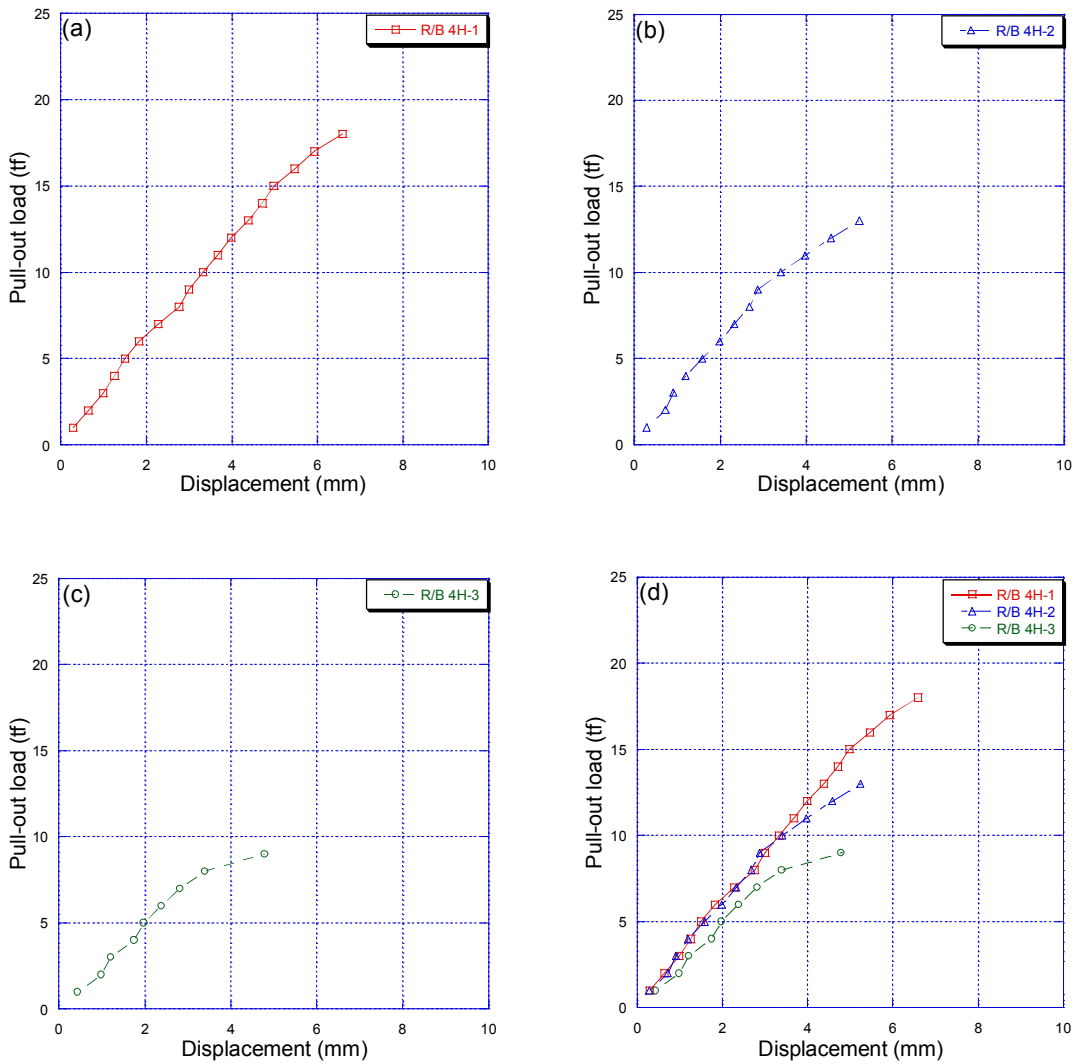


Figure 4.4 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 4 hours.

Figure 4.3과 Figure 4.4의 결과를 종합한 resin의 양생시간이 4시간 경과된 후 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과를 나타낸다. Spiral bolt와 록 볼트의 인발시험 결과 모두 현장인발강도 기준 (15tf)과 변위기준(5mm)에 적합하였으나, 재인발시험에 따른 Spiral bolt의 경우 최대인발하중이 1회 19tf, 2회 19tf, 3회 18tf으로 거의 유사한 반면에 록 볼트의 경우 1회 18tf, 2회 13tf, 3회 9tf으로 최대 9tf의 차이를 보인다(Table 4.4).

Table 4.4 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 4 hours

Spiral bolt				
SR/B - 4H - No.1		1st	2nd	3rd
Field pull-out standard	Strength (tf)	15	15	15
	Displacement (mm)	4.967	4.974	4.996
Maximum pull-out	Strength (tf)	19	19	18
	Displacement (mm)	6.983	6.973	6.389

Rock bolt				
R/B - 4H - No.2		1st	2nd	3rd
Field pull-out standard	Strength (tf)	15	-	-
	Displacement (mm)	4.981	-	-
Maximum pull-out	Strength (tf)	18	13	9
	Displacement (mm)	6.587	5.236	4.787

4.2.2 8시간 양생

Figure 4.5는 resin의 양생시간이 8시간 경과된 후 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 3회 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

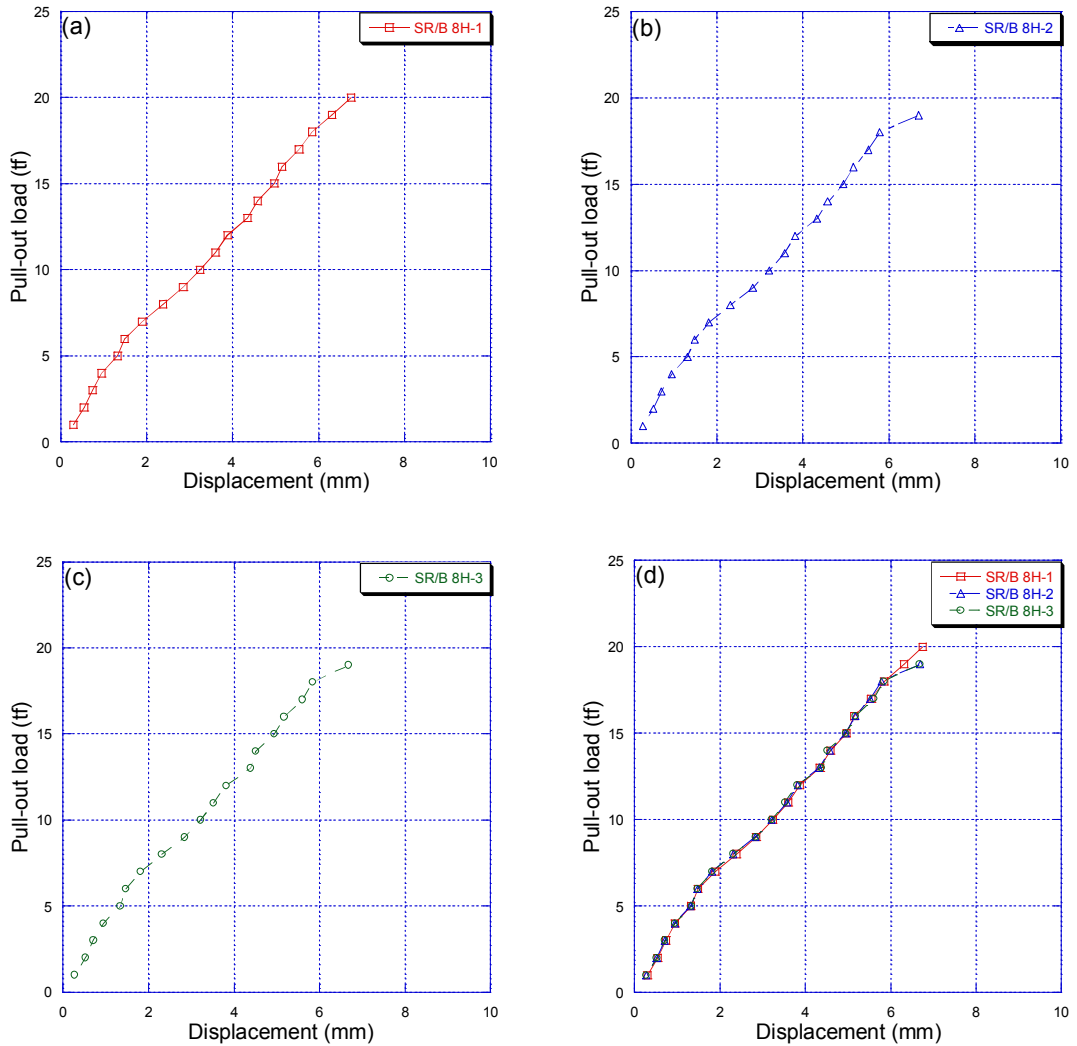


Figure 4.5 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 8 hours.

Figure 4.6은 resin의 양생시간이 8시간 경과된 후 록 볼트에 대한 3회 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

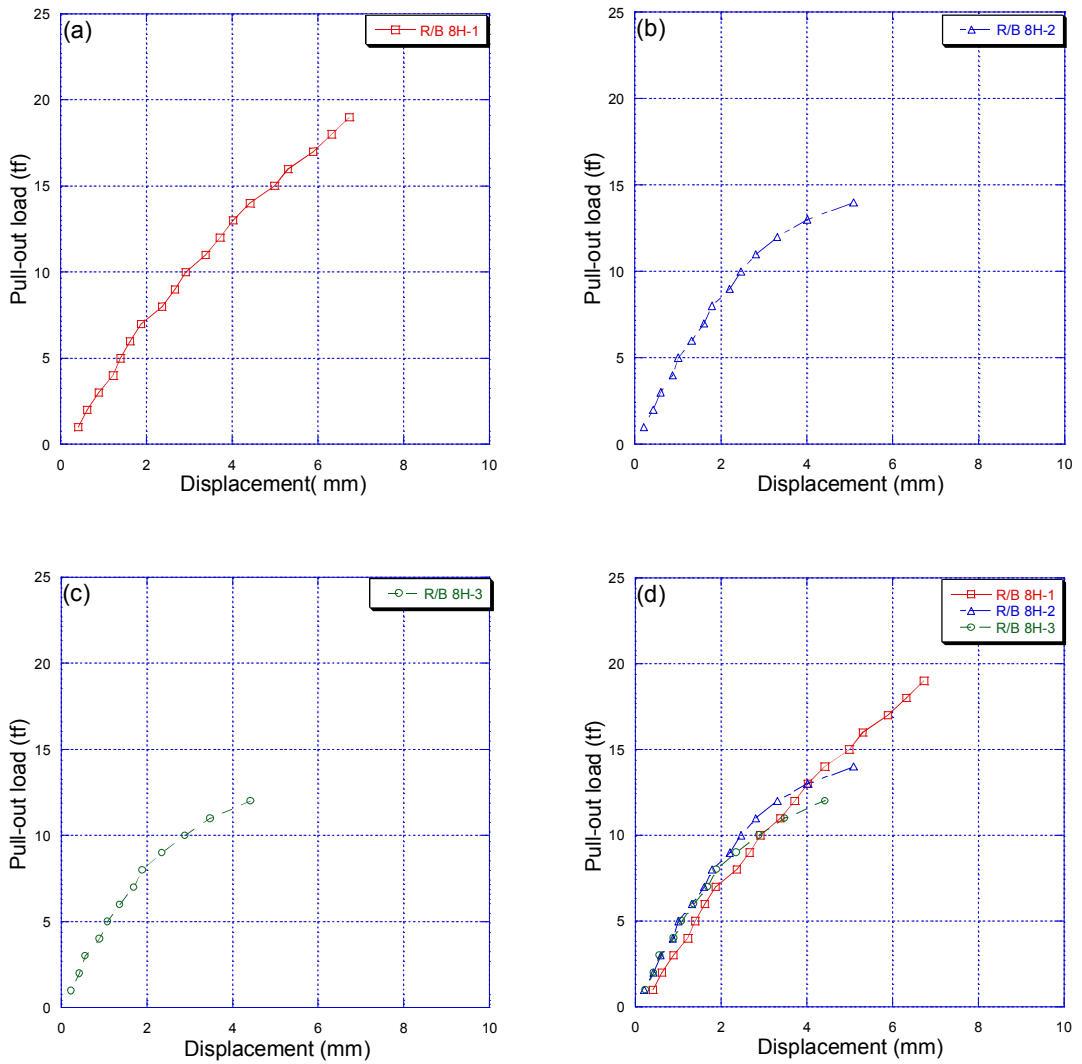


Figure 4.6 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 8 hours.

Figure 4.5와 Figure 4.6의 결과를 종합한 resin의 양생시간이 8시간 경과된 후 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과를 나타낸다. Spiral bolt와 록 볼트의 인발시험 결과 모두 현장인발강도 기준 (15tf)과 변위기준(5mm)에 적합하였으나, 재인발시험에 따른 Spiral bolt의 경우 최대인발하중이 1회 20tf, 2회 20tf, 3회 19tf으로 거의 유사한 반면에 록 볼트의 경우 1회 19tf, 2회 14tf, 3회 12tf으로 최대 7tf의 차이를 보인다(Table 4.5).

Table 4.5 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 8 hours

Spiral bolt				
SR/B - 8H - No.3		1st	2nd	3rd
Field pull-out standard	Strength (tf)	15	15	15
	Displacement (mm)	4.967	4.948	4.944
Maximum pull-out	Strength (tf)	20	19	19
	Displacement (mm)	6.754	6.698	6.684

Rock bolt				
R/B - 8H - No.4		1st	2nd	3rd
Field pull-out standard	Strength (tf)	15	-	-
	Displacement (mm)	4.986	-	-
Maximum pull-out	Strength (tf)	19	14	12
	Displacement (mm)	6.732	5.092	4.424

4.2.3 12시간 양생

Figure 4.7은 resin의 양생시간이 12시간 경과된 후 Spiral bolt에 대한 3회 인발 시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

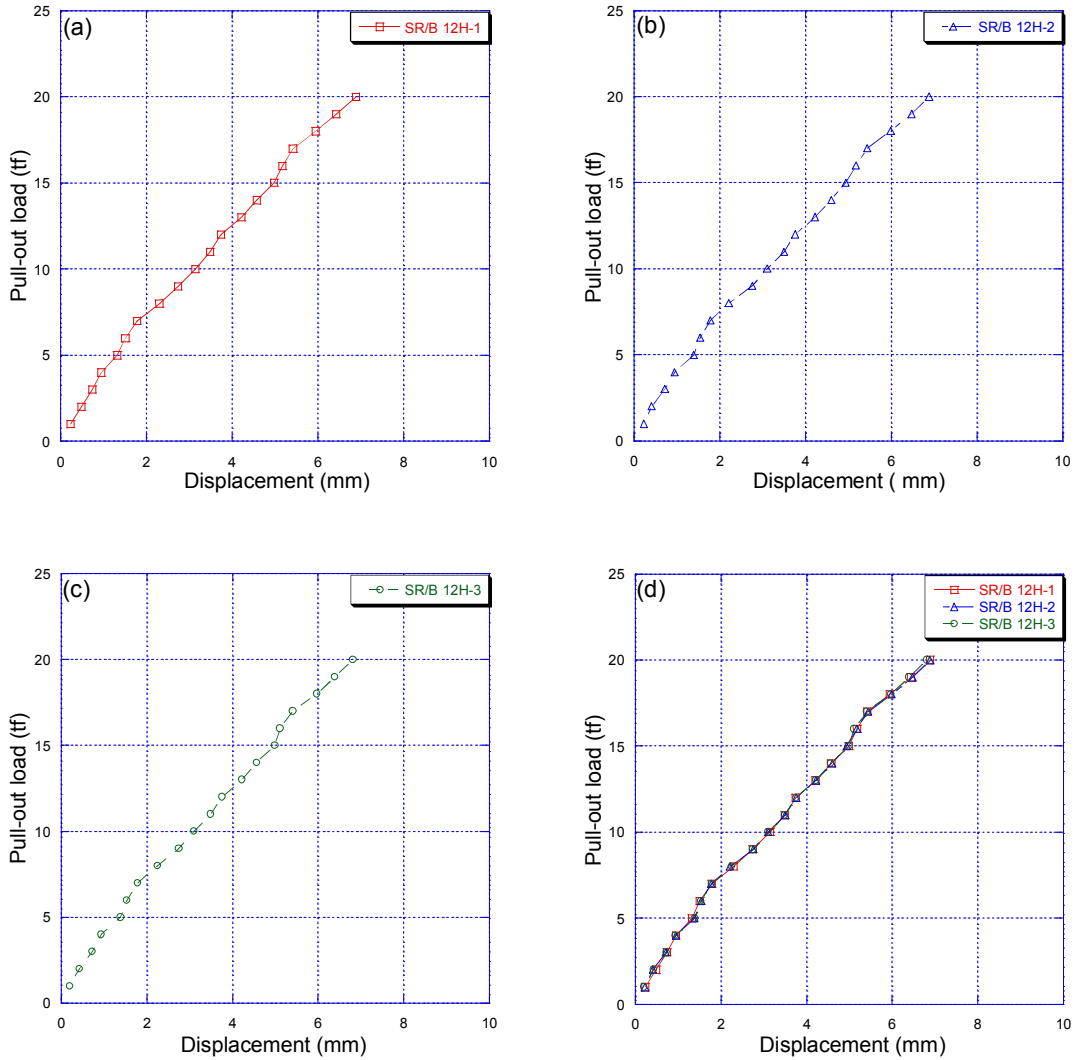


Figure 4.7 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 12 hours.

Figure 4.8은 resin의 양생시간이 12시간 경과된 후 록 볼트에 대한 3회 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

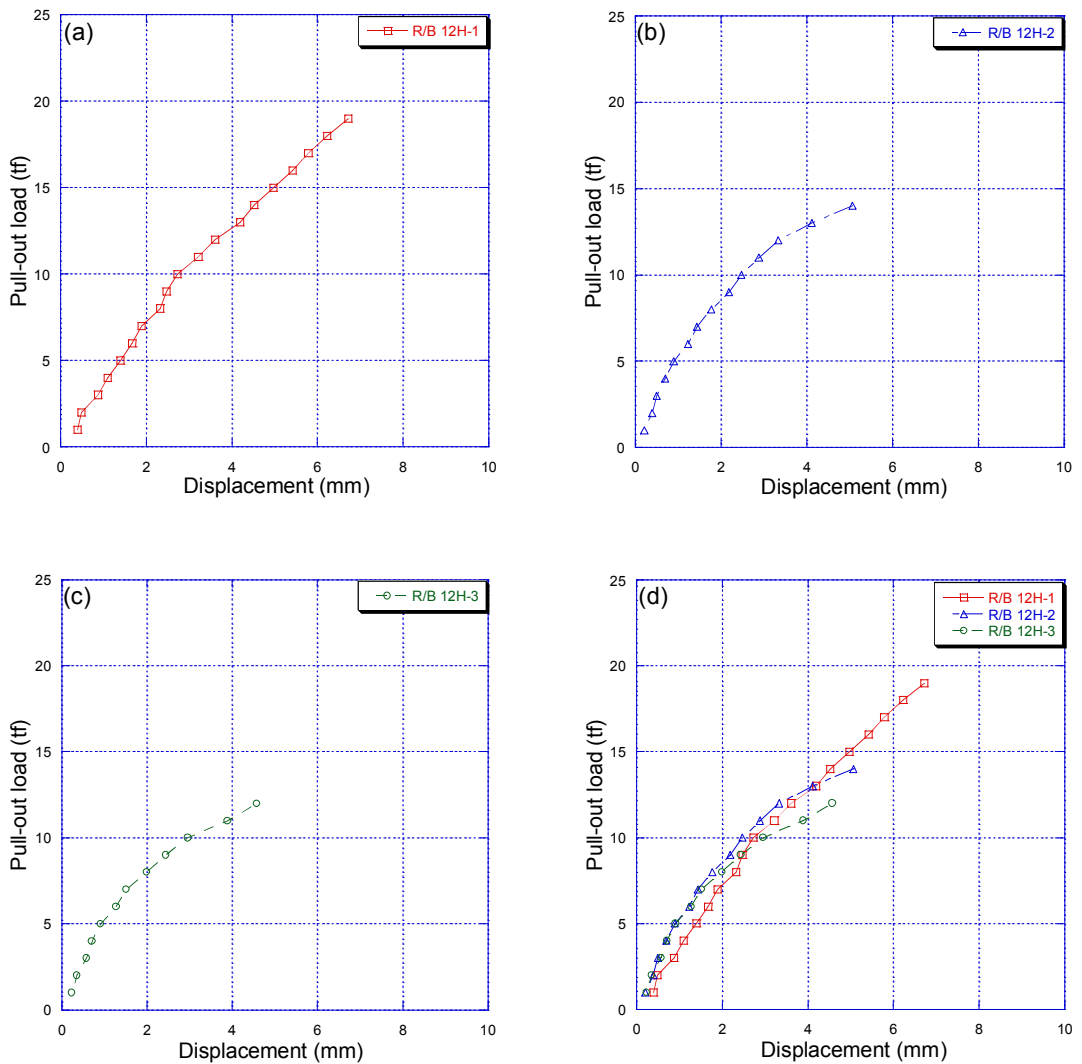


Figure 4.8 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 12 hours.

Figure 4.7과 Figure 4.8의 결과를 종합한 resin의 양생시간이 12시간 경과된 후 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과를 나타낸다. Spiral bolt와 록 볼트의 인발시험 결과 모두 현장인발강도 기준 (15tf)과 변위기준(5mm)에 적합하였으나, 재인발시험에 따른 Spiral bolt의 경우 최대인발하중이 1회 20tf, 2회 20tf, 3회 20tf으로 거의 유사한 반면에 록 볼트의 경우 1회 19tf, 2회 14tf, 3회 12tf으로 최대 7tf의 차이를 보인다(Table 4.6).

Table 4.6 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 12 hours

Spiral bolt				
SR/B - 12H - No.5		1st	2nd	3rd
Field pull-out standard	Strength (tf)	15	15	15
	Displacement (mm)	4.981	4.941	4.997
Maximum pull-out	Strength (tf)	20	20	20
	Displacement (mm)	6.887	6.879	6.814

Rock bolt				
R/B - 12H - No.6		1st	2nd	3rd
Field pull-out standard	Strength (tf)	15	-	-
	Displacement (mm)	4.971	-	-
Maximum pull-out	Strength (tf)	19	14	12
	Displacement (mm)	6.725	5.066	4.575

4.2.4 16시간 양생

Figure 4.9는 resin의 양생시간이 16시간 경과된 후 Spiral bolt에 대한 3회 인발 시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

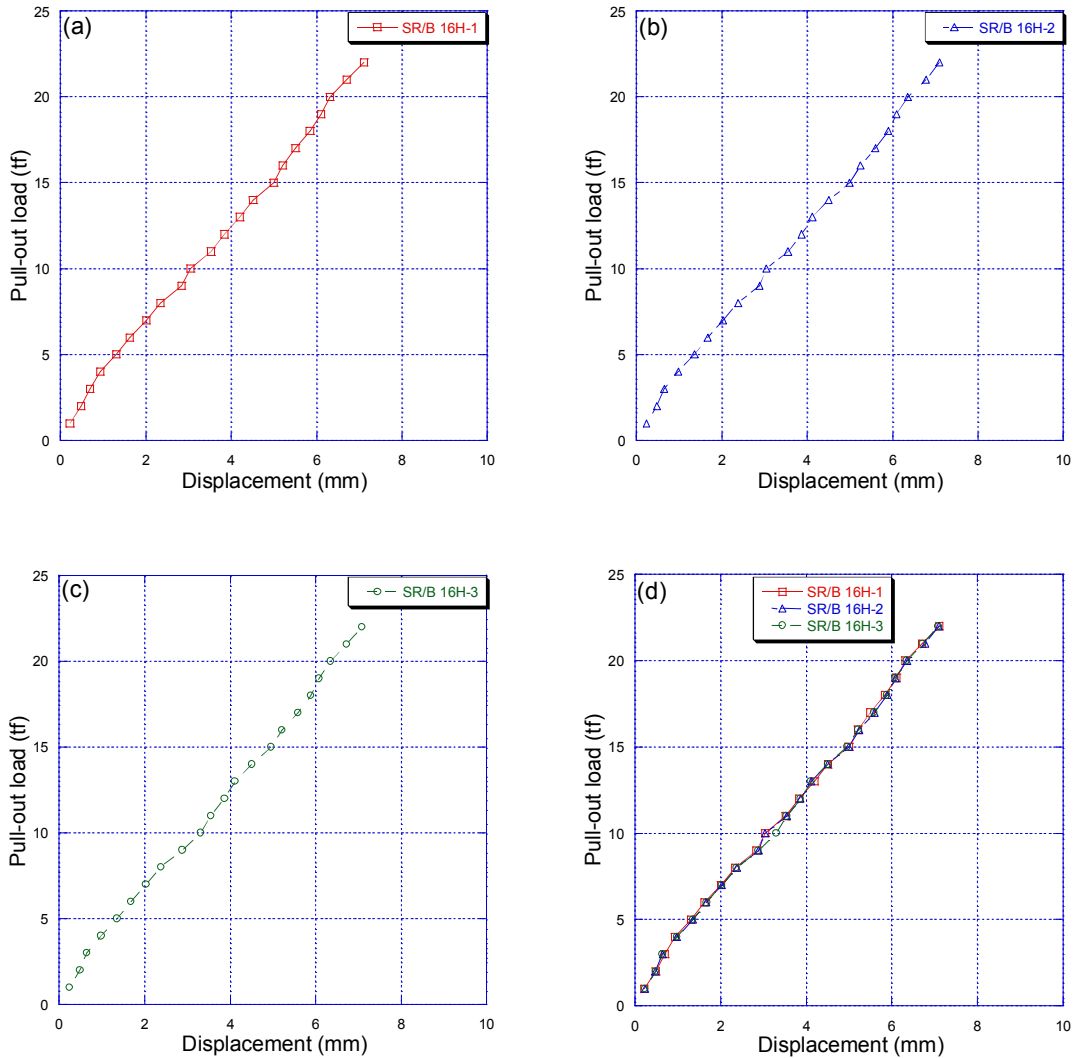


Figure 4.9 Relationship between pull-out load and displacement of spiral bolts with resin curing time of 16 hours.

Figure 4.10은 resin의 양생시간이 16시간 경과된 후 록 볼트에 대한 3회 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과이다.

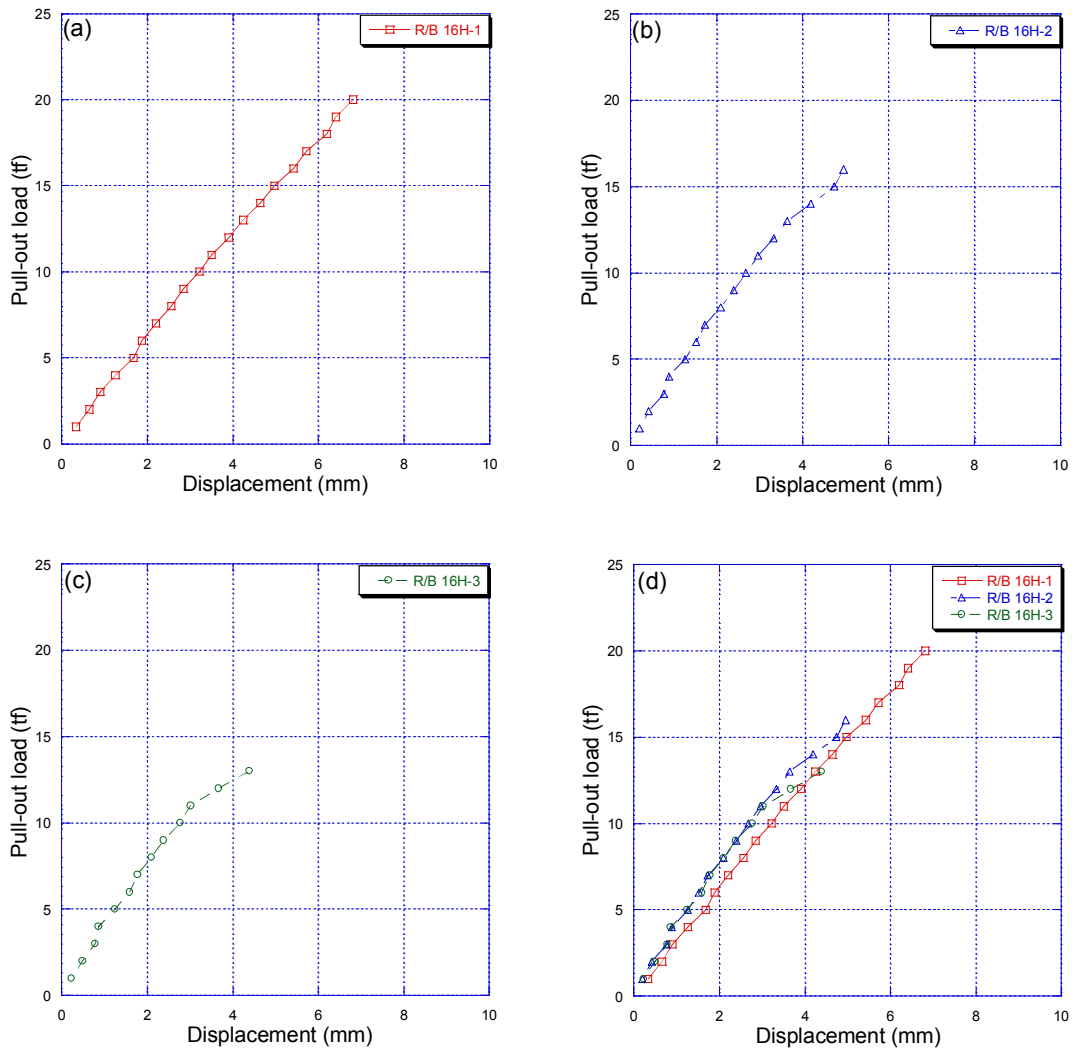


Figure 4.10 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts with resin curing time of 16 hours.

Figure 4.9와 Figure 4.10의 결과를 종합한 resin의 양생시간이 16시간 경과된 후 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 인발시험을 수행하여 획득한 인발하중-변위에 대한 결과를 나타낸다. Spiral bolt와 록 볼트의 인발시험 결과 모두 현장인발강도 기준(15tf)과 변위기준(5mm)에 적합하였으나, 재인발시험에 따른 Spiral bolt의 경우 최대인발하중이 1회 22tf, 2회 22tf, 3회 22tf으로 거의 유사한 반면에 록 볼트의 경우 1회 20tf, 2회 16tf, 3회 13tf으로 최대 7tf의 차이를 보인다(Table 4.7).

Table 4.7 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts with resin curing of 16 hours

Spiral Bolt				
SR/B - 16H - No.7		1st	2nd	3rd
Field Pull-out Standard	Strength (tf)	15	15	15
	Displacement (mm)	4.994	4.996	4.954
Maximum Pull-out	Strength (tf)	22	22	22
	Displacement (mm)	7.114	7.098	7.088

Rock Bolt				
R/B - 16H - No.8		1st	2nd	3rd
Field Pull-out Standard	Strength (tf)	15	15	-
	Displacement (mm)	4.975	4.735	-
Maximum Pull-out	Strength (tf)	20	16	13
	Displacement (mm)	6.814	4.956	4.391

이상의 터널 내 인발시험에서 resin의 양생시간에 따라 Spiral bolt와 록 볼트에 대해 3회씩 실시한 결과를 요약하면 Figure 4.11, Table 4.8과 같다. resin의 양생시간에 따른 재인발시험 결과에 있어서 최대인발하중은 두 지보재 모두에서 resin의 양생시간이 길어질수록 증가하는 경향을 보였다. 하지만 록 볼트의 경우 resin의 양생시간에 따른 최대인발하중의 차이는 4시간인 경우가 가장 크게 나타났으며 그 이상인 8시간, 12시간, 16시간인 경우의 최대인발하중의 차이는 거의 비슷한 경향을 보였다. 단계별로 최대인발하중의 변화 양상을 살펴보기 위해 실시한 각 지보재에 대한 3회의 재인발시험의 결과를 보면 Spiral bolt의 경우는 인발시험 횟수에 관계없이 거의 일정함을 보였는데, 이것은 지보재가 최대인발하중에 도달할지라도 지보재와 충전재 사이에 파괴가 거의 일어나지 않으므로 일정한 최대인발하중을 보이는 것으로 판단된다. 반면에 록 볼트의 경우 인발시험의 횟수가 증가할수록 최대인발하중은 점점 감소하였는데, 이것은 지보재가 최대인발하중에 도달할 때 지보재와 충전재 사이에 일부분 파괴가 발생함으로 인해서 나타나는 현상으로 판단된다.

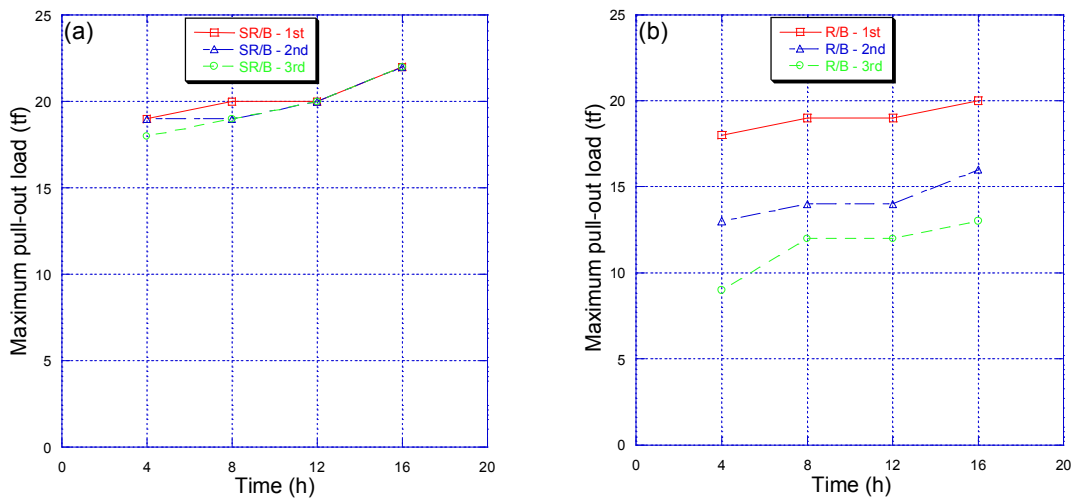


Figure 4.11 Relationship between maximum pull-out load and time of spiral bolts and rock bolts.

Table 4.8 Results of pull-out test of spiral bolts and rock bolts for different curing times

Pull-out test		Curing time		4H	8H	12H	16H
		Number		No.1	No.3	No.5	No.7
Spiral bolt	Result	1st	Strength (tf)	19	20	20	22
			Displacement (mm)	6.983	6.754	6.887	7.114
		2nd	Strength (tf)	19	19	20	22
			Displacement (mm)	6.973	6.698	6.879	7.098
		3rd	Strength (tf)	18	19	20	22
			Displacement (mm)	6.389	6.684	6.814	7.088
Rock bolt	Result	Number		No.2	No.4	No.6	No.8
		1st	Strength (tf)	18	19	19	20
			Displacement (mm)	6.587	6.732	6.725	6.814
		2nd	Strength (tf)	13	14	14	16
			Displacement (mm)	5.236	5.092	5.066	4.956
		3rd	Strength (tf)	9	12	12	13
			Displacement (mm)	4.787	4.424	4.575	4.391

5. 수치해석

5.1 해석개요

본 연구에서는 기존 록 볼트 대비 Spiral bolt가 지반의 이완영역이 커질수록 그 효과가 더욱 발휘되는 특성을 고려하여 비상주차대와 횡갱으로 이루어지는 단면을 선정하여 3차원 수치해석을 수행하였다(Figure 5.1, 5.2). 이로부터 비상주차대와 횡갱의 접속부의 시공순서와 보강공법을 실제와 동일하게 모델링하여 터널안정검토를 수행하였다.

본 연구에서 적용된 프로그램은 지반 및 터널해석 전용 프로그램인 MIDAS/GTS (Geotechnical & Tunnel analysis System)를 사용하였다.

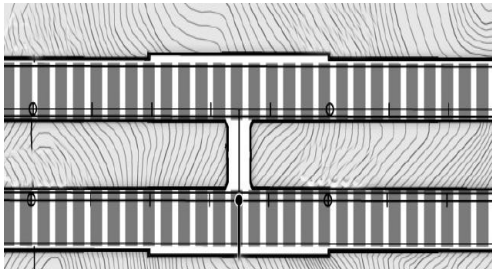


Figure 5.1 Plane of analysis section.

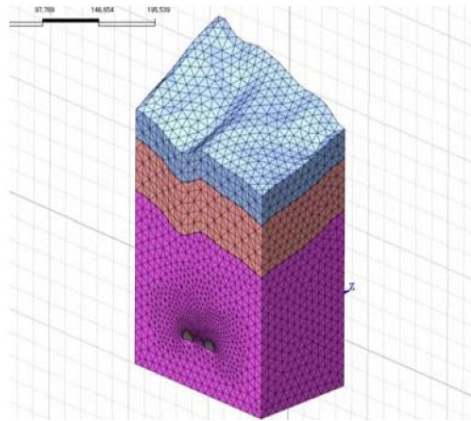


Figure 5.2 Mesh of numerical analysis.

5.2 해석조건

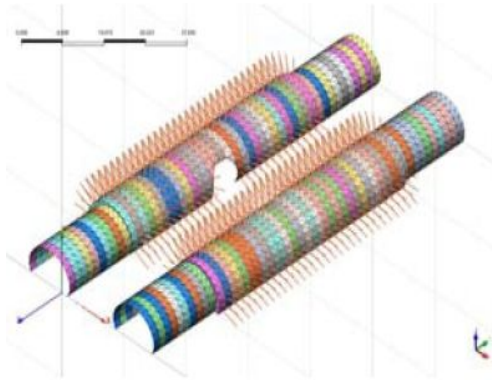
본 해석에서는 Mohr-coulomb 탄소성 모델을 적용하여 정해석을 수행하였고, 해석영역은 터널 좌·우측경계와 하부경계는 4D, 상부는 지표면까지 모델링하였다. 해석방법은 실제지형을 모델링하여 터널 계획심도에서의 초기응력상태와 지형에 따른 초기응력상태를 모사하고 시공단계별 안정성 검토를 수행하였다. Table 5.1은 비상주차대와 횡갱에서의 해석 조건 및 지보 패턴을 나타내었고, Table 5.2는 해석에 적용된 지반 물성값을 나타내고 있으며, Figure 5.3에서는 비상주차대와 횡갱의 시공순서에 따른 해석순서를 나타내고 있다.

Table 5.1 Input parameter of numerical analysis

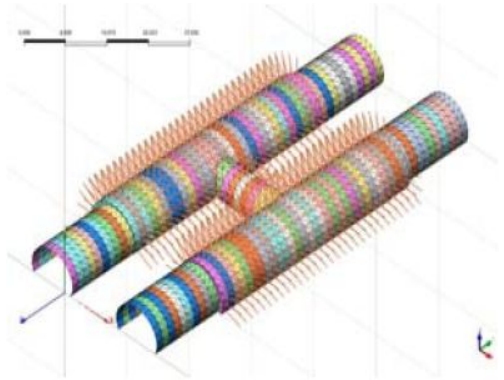
Division	Support pattern	Excavation method	Advance (m)	Shotcrete thickness (mm)	SR/B & R/B		Reinforcement methods
					Length (m)	Interval (vertical/horizontal, m)	
Emergency parking zone	E-1	Bench cut	2.0/2.0	120	5.0	2.0/1.5	SR/B & R/B
Adit	V-1	Bench cut	2.0	80	3.0	2.2/1.5	SR/B & R/B

Table 5.2 Physical properties of application ground

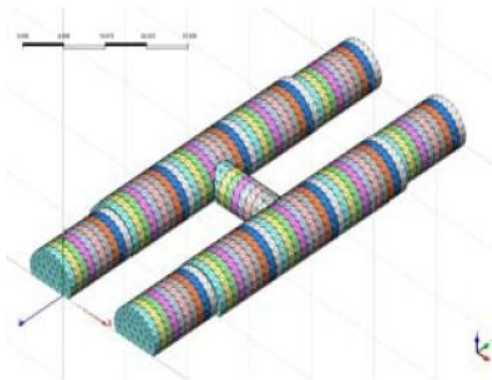
Division		Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)	Deformation modulus (GPa)	Poisson's ratio
Granite	I	27.0	3.00	47.0	20	0.20
	II	27.0	2.50	43.0	16	0.22
	III	25.0	1.00	40.0	8	0.25
	IV	23.0	0.30	35.0	2.5	0.27
	V	22.0	0.05	33.0	0.5	0.30



(a) Completion of emergency parking zone excavation



(b) Completion adit excavation



(c) Modelling of total process

Figure 5.3 Order of numerical analysis.

5.3 해석결과

비상주차대와 횡갱으로 이루어지는 단면에서 Spiral bolt와 록 볼트를 적용하여 3차원 수치해석을 수행한 결과 터널 안정성은 전체적으로 확보되는 것으로 나타났다.

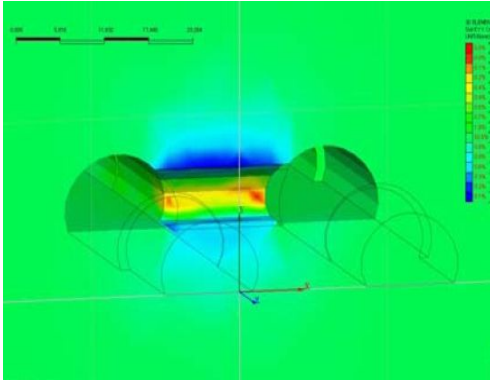
비상주차대 구간에서 Spiral bolt가 적용된 해석결과는 천단변위가 45.65mm, 내공변위는 22.61mm, 최대 슛크리트 휨 압축응력은 4.88MPa, 볼트 축력은 1.56kN이고, 록 볼트가 적용된 해석결과는 천단변위가 42.26mm, 내공변위는 23.74mm, 최대 슛크리트 휨 압축응력은 4.95MPa, 볼트 축력은 2.51kN으로 해석되었다.

횡갱 구간에서 Spiral bolt가 적용된 해석결과는 천단변위가 3.13mm, 내공변위는 7.88mm, 최대 슛크리트 휨 압축응력은 1.86MPa, 볼트 축력은 3.82kN이고, 록 볼트가 적용된 해석결과는 천단변위가 3.47mm, 내공변위는 6.10mm, 최대 슛크리트 휨 압축응력은 1.61MPa, 볼트 축력은 4.84kN으로 해석되었다.

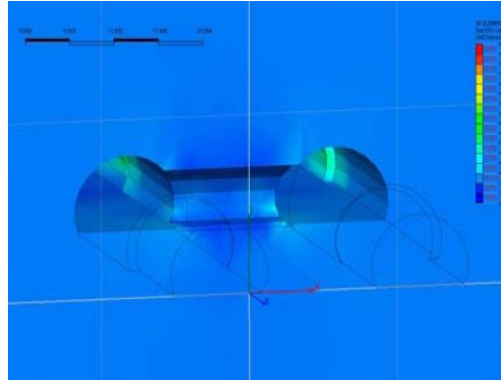
이상의 결과를 종합해 보면 Spiral bolt의 축력의 경우 록 볼트 축력에 비해 횡갱 구간은 21.07%, 비상주차대 구간은 37.85% 정도 감소하는 것으로 나타나 기존 록 볼트에 비해 높은 효율을 갖는 것으로 해석되었다(Table 5.3~5.5).

Table 5.3 Results of numerical analysis

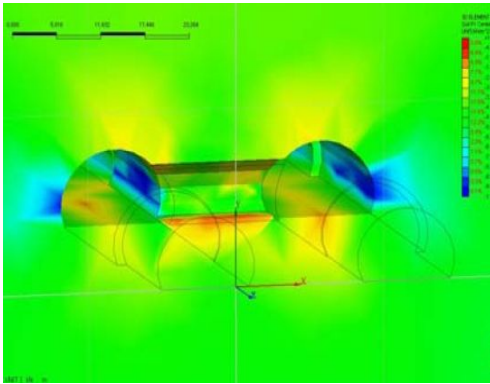
Division		Crown deformation (mm)	Cavity deformation (mm)	Shotcrete bending compressive stress (MPa)		Bolt axial force (kN)		Check
				Max. stress	Limit	Max. axial force	Limit	
Emergency parking zone	SR/B	45.65	22.61	4.88	8.40	1.56	88.67	O.K
	R/B	46.26	23.74	4.95	8.40	2.51	88.67	O.K
Adit	SR/B	3.13	7.88	1.86	8.40	3.82	88.67	O.K
	R/B	3.47	6.10	1.61	8.40	4.84	88.67	O.K



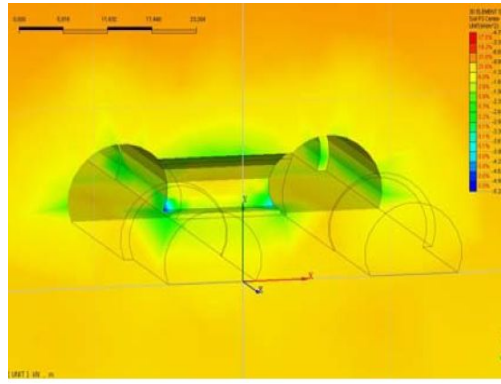
(a) Vertical displacement



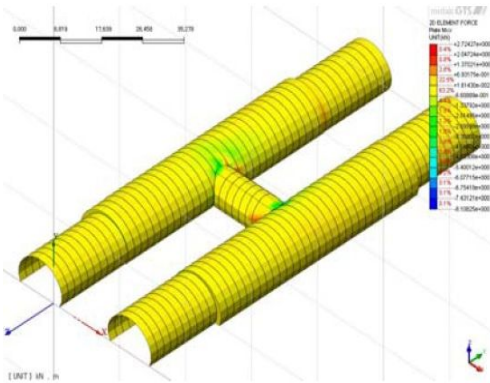
(b) Horizontal displacement



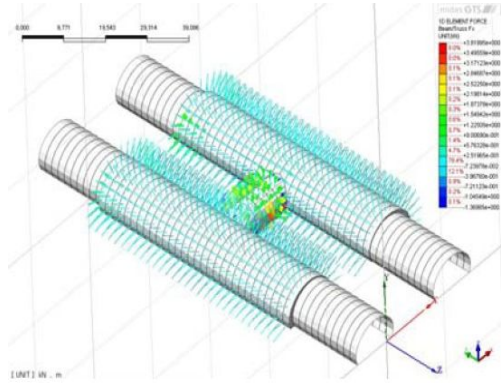
(c) Maximum principal stress



(d) Minimum principal stress

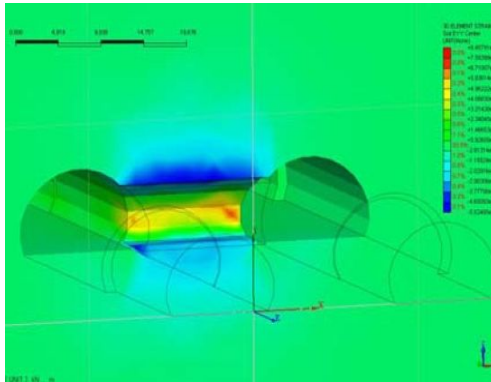


(e) Support stress

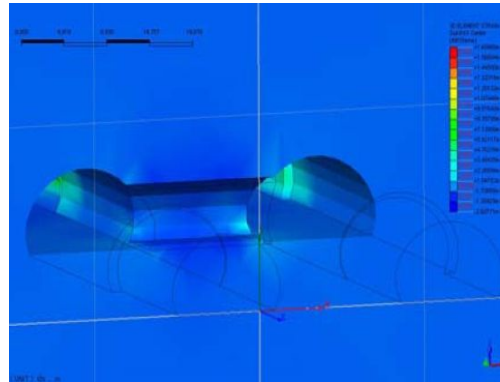


(f) Support capacity

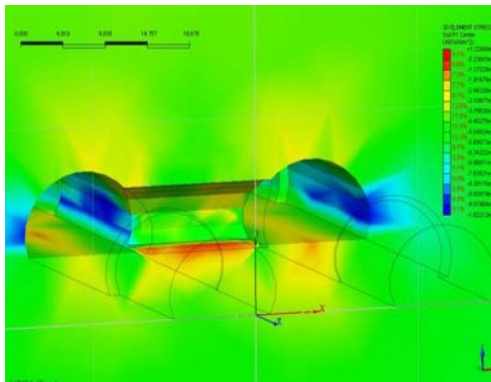
Figure 5.4 Results of spiral bolts numerical analysis.



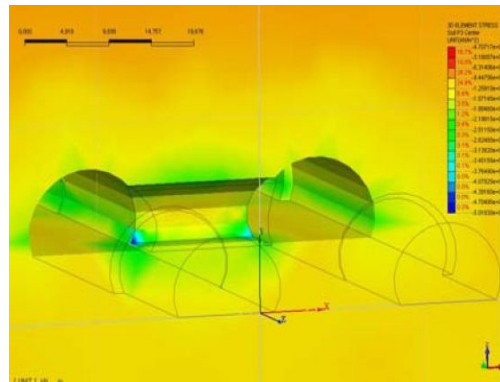
(a) Vertical displacement



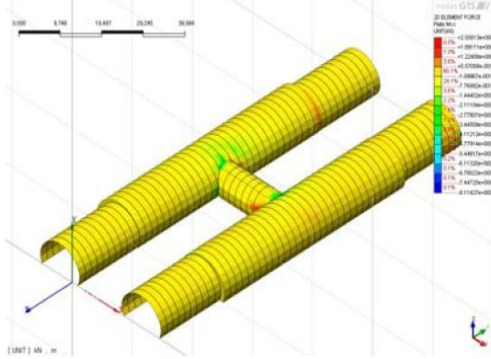
(b) Horizontal displacement



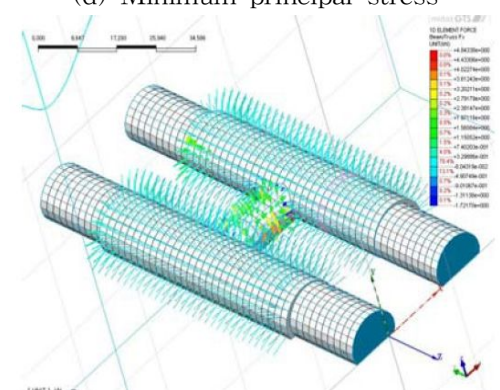
(c) Maximum principal stress



(d) Minimum principal stress



(e) Support stress



(f) Support capacity

Figure 5.5 Results of rock bolts numerical analysis.

6. 고찰

록 볼트의 정착형식은 선단정착형, 전면접착형, 혼합형으로 구분한다. 첫째, 선단정착형 록 볼트는 록 볼트의 선단을 지반에 정착한 후 pre-stress를 도입하여 내압으로 굴착면 주변 지반의 지보능력을 향상시키도록 하여야 한다. 둘째, 전면접착형 록 볼트는 resin 또는 시멘트 모르타르 등을 사용하여 록 볼트 전장을 지반에 정착시키는 형식으로서 굴착면 주변지반의 지보능력을 향상시키도록 하여야 한다. 셋째, 혼합형 록 볼트는 록 볼트 선단을 지반에 정착시키고 프리스트레스를 도입한 후 록 볼트 전장과 지반과의 공극을 정착재료로 충전하는 형식으로서 선단정착형식과 전면접착형식의 기능을 모두 발휘할 수 있도록 하여야 한다.

록 볼트의 충전재는 유동성 및 접착성이 우수하고, 조강성을 가지며, 장기 안정성이 있어야 하며, 소정의 깊이까지 삽입 및 소정의 정착력을 얻도록 정착하여야 하며, 전면접착형 록 볼트는 천공공과 록 볼트 사이의 공극에 충전재가 완전히 채워져 록 볼트가 충분한 정착력을 발휘할 수 있도록 하여야 한다.

인발시험을 위한 충전재로서 resin을 사용할 경우는 다음과 같은 규정을 따라야 한다. 첫째, resin은 폴리에스테르계 및 동등 이상의 재질이어야 하며 캡슐형태로 제공되어야 한다. 둘째, 제조업자가 표시한 보관기간이 경과한 resin을 사용하여서는 안된다. 셋째, 용수, 염수, 산, 약 알칼리성에 대하여 영향을 받지 않아야 하며 보관시 영상 50℃ 이상 및 영하 30℃ 이하의 조건이 발생되지 않도록 하여야 하며 색이 변질된 것을 사용하여서는 안된다. 넷째, resin은 인발에 대한 저항도가 규정된 록 볼트의 강도보가 1.2배 이상 이어야 하며 조기에 접착력을 발휘하여야 한다. 다섯째, resin에 대한 현장 품질관리의 인발시험으로서 소정의 설계 인발력 이상이 됨을 확인하여야 한다. 단 토사 및 완전 풍화된 암반구간에는 resin을 사용하지 않도록 하여야 한다. 또는, 시멘트 모르타르를 충전재로 사용할 경우 다음의 규정을 따라야 한다. 첫째, 시멘트는 보통 포트랜드 시멘트를 사용한다. 조기에 접착능력을 발휘하여야 할 경우에는 급결제 등을 혼합하거나 조강 시멘트를 사용하여야 한다. 둘째, 사용하는 모래는 최대 직경이 2mm이하인 입도가 양호한 모래를 사용하여야 한다. 셋째, 시멘트와 모래의 배합은 1:1로 한다. 넷째, 물과 시멘트의 비는 40~50%이며 플로우값은 200~220정도를 기준으로 한다. 단, 지하수 및 지반조건에 따라 물의 양을 가감하여 시공중 시멘트 모르타르의 유동성을 유지하여야 한다.

7. 결론

본 연구에서는 Spiral bolt와 록 볼트의 지보특성을 연구하기 위하여 resin의 양생시간에 따른 재인발시험을 통한 터널 내 인발시험을 수행한 결과와 수치해석을 통하여 터널 안정성 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Spiral bolt와 록 볼트의 역학적 성질에서 단면적의 크기는 록 볼트가 Spiral bolt보다 1.37배, 연신율은 1.22배 높게 나타났으며, 항복강도와 인장강도는 Spiral bolt가 록 볼트보다 1.35배, 1.06배 높게 나타났다.

2. resin의 양생시간에 따른 최대인발하중의 결과 Spiral bolt와 록 볼트 모두 양생시간이 길어짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 하지만 록 볼트의 경우 resin의 양생시간에 따른 재인발시험에서의 최대인발하중은 7~9ton의 차이를 보였지만 Spiral bolt의 경우 최대인발하중은 거의 유사하게 나타났다.

3. 최대인발하중의 변화 양상을 살펴보기 위해 수행한 Spiral bolt와 록 볼트에 대한 3회 재인발시험의 결과를 보면 Spiral bolt의 경우는 인발시험 횟수에 관계없이 거의 일정함을 보였는데, 이것은 지보재가 최대인발하중에 도달할지라도 Spiral bolt와 충전재 사이에 파괴가 거의 일어나지 않으므로 일정한 최대인발하중을 보이는 것으로 판단된다. 반면에 록 볼트의 경우 인발시험의 횟수가 증가할수록 인발하중은 점점 감소하였는데, 이것은 지보재가 최대인발하중에 도달할 때 록 볼트와 충전재 사이에 일부분 파괴가 발생함으로 인해서 나타나는 현상으로 판단된다.

4. 수치해석을 통한 터널안정성은 전체적으로 확보되는 것으로 나타났으며, Spiral bolt와 록 볼트의 최대 축력은 비상주차대 구간에서 각각 1.56kN, 2.51kN으로 나타났고, 횡갱 구간에서 각각 3.82kN, 4.84kN으로 나타났다. Spiral bolt가 적용된 경우, 볼트 축력은 21.07%(횡갱구간) ~ 37.85%(비상주차대구간) 정도 감소하는 것으로 나타나 기존 록 볼트 대비 높은 효율을 갖는 것으로 산정되었다.

터널 내 현장 인발시험을 수행한 결과 resin의 양생시간이 증가함에 따라 최대 인발하중은 Spiral bolt와 록 볼트 모두 증가하는 반면에, 재인발시험에 따른 최대 인발하중은 Spiral bolt는 유사한 반면에 록 볼트는 감소하는 결과를 보였으며, 수치해석 결과 Spiral bolt와 록 볼트 모두 터널안정성은 전체적으로 확보되는 것으로 나타났으나 Spiral bolt가 기존 록 볼트 대비 높은 효율을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 각 지보재와 충전재의 경계부에서 부분적인 파괴의 발생여부에 기인하는 것으로 판단되며, 지속적인 하중이 발생할 경우 Spiral bolt가 지보력 측면에서 더 우수한 적용결과를 보일것으로 판단된다. 현장 적용성 측면에서는 입증하였으나 본 연구 실험 과정에서 인발시험을 위한 Spiral bolt의 이형 철근의 나사산 부분을 보강시킨다면 록 볼트에 비해 더 우수한 결과를 보일것으로 판단되고 터널 지보재 이외의 다양한 분야로 활용될 것으로 기대되며, 이에 따른 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 강성승, 히라타 아츠오, 오바라 유조 (2005) 새로운 지보재로 개발된 스파이럴 바의 축방향 저항력 선정법, 대한토목학회, 25, pp : 387-394.
- 강성승, 오바라 유조, 박영석 (2006) 인장시험에 의한 스파이럴볼트의 파괴거동, 2006 대한토목학회 정기학술대회, pp.195-198.
- 김낙경 (2000) 점토지반에 설치된 앵커의 하중전이에 관한 연구, 한국지반공학회지, 한국지반공학회, Vol. 16, pp. 145-155.
- 김낙경 (2001) 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구, 한국지반공학회지, 한국지반공학회, Vol. 17, pp. 59-68.
- 김래현, 이기환, 이우진, 김대규, 김낙경 (2002) 현장시험에 의한 그라운드 앵커 시스템의 크리프 및 단기거동 특성 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol. 22, pp. 585-594..
- 김호영, 이희근 (1991) 전면접착형 록 볼트의 지보거동 : 이론적 경계요소해석에 대한 적용, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 1, pp. 168-180.
- 대한광업진흥공사 (1986) Rock bolt 지보 기술 광산 적용 시험연구, pp. 4-21, 113-131.
- 박병수, 정길수, 전상현, 유남재 (2006) 풍화암에 근입된 그라운드 앵커의 인발거동 연구, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 산업기술연구, Vol. 26, pp. 109-117.
- 유성원, 정상화, 광기석, 이주형 (2006) 부착식 앵커의 인발 특성에 관한 실험적 연구, 대한 토목학회 논문집, Vol. 26, pp. 555-563.
- 임경필, 조남준, 황성일 (1999) 정적 인발하중을 받는 암반 앵커의 거동 ; 텐던-그라운드 경계면의 전단응력 분포, 대한지반공학회논문집, 대한지반공학회, Vol.15, pp. 143-154
- 정해성, 문현구 (1999) 전면접착형 록 볼트의 보강효과에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 , Vol. 9, pp. 194-203.
- Farmer, W. (1975) Stress distribution along a resin grouted rock anchor, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12. pp. 347-351.
- Haraguchi, N., Kokaji, S., Hirata, K., Kang, S. S., Hirata, A., (2006) Application of spiral bar as ground support, Proceedings of the 23rd West Japan

- Symposium on Rock Engineering, December 4-5, 2004, Yamaguchi University, Japan, pp. 91-98.
- Hirata, A., Kokaji, S., Fujita, M., Goto, T. (2003) Dilation stress on borehole induced by a spiral anchor, Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Stress, Rotterdam, pp. 499-505.
- Hirata, A., Kokaji, S., Kang, S. S., Goto, G. (2005) Study on the estimation of the axial resistance of spiral bar based on interaction with ground, Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, MMIJ, Vol. 121, pp. 370-377.
- Hyett, A. J., Bawden, W. F., Reichert, R. D. (1992) The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 29, pp. 503-524.
- Ito, F., Nakahara, F., Kawano, R., Kang, S. S., Obara, Y. (2001) Visualization of failure in a pull-out test of cable bolts using X-ray CT, Construction and Building Materials, Vol. 15, pp. 201-217, 263-270.
- Kaiser, P. K., Yazici, S., Nosé, J. (1992) Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 29, pp. 293-306.
- Peng, S.S. (1978) Coal Mine Ground Control, John Wiley & Sons.
- Yazici, S., Kaiser, P. K. (1992) Bond strength grouted cable bolts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 29, pp. 279-292.

저작물 이용 허용서

학과	에너지 자원공학과	학번	20097075	과정	석사
성명	한글 : 김 장 원 한문 : 金 壯 元 영문 : Kim Jang Won				
주소	광주광역시 남구 봉선 2동 포스코더샵아파트 107동 1401호				
연락처	E-MAIL : dodori7@hanmail.net				
논문제목	한글 : 인발시험을 통한 Spiral bolt의 지보특성 영어 : Supporting Characteristics of a Spiral Bolt through Pull-Out Test.				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2011년 2월

저작자 : 김 장 원 (인)

조선대학교 총장 귀하