

2010년 8월
박사학위논문

Spiral bolt의
지보효과에 관한 연구

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

조 영 동

Spiral bolt의 지보효과에 관한 연구

A study on the supporting effect of a spiral bolt as a
support system

2010년 8월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

조 영 동

Spiral bolt의 지보효과에 관한 연구

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2010년 4월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

조 영 동

조영동의 박사학위논문을 인준함.

위원장 한국지질자원연구원 류 창 하



위 원 원엔비기술사사무소 원 연 호



위 원 군산대학교 교수 이 연 규



위 원 조선대학교 교수 고 진 석



위 원 조선대학교 교수 강 추 원



2010년 6월

조선대학교 대학원

목 차

| | |
|---|----|
| List of Tables | iv |
| List of Figures | vi |
| Abstract | xi |
| 1. 서론 | 1 |
| 2. 이론적 배경 | 5 |
| 2.1 Rock bolt 지보법의 원리 | 5 |
| 2.2 Rock bolt의 효과 | 6 |
| 2.3 Rock bolt의 종류 | 9 |
| 2.3.1 Mechanically Anchored Rock bolts | 9 |
| 2.3.2 Grouted Rock bolts | 11 |
| 2.3.3 Friction Anchored Rock bolts | 13 |
| 2.3.4 Spiral bolt | 15 |
| 2.4 Rock bolt 지보의 설계 | 16 |
| 2.4.1 이론식에 의한 설계 | 16 |
| 2.4.2 경험식에 의한 설계 | 18 |
| 3. Rock bolt의 특성 | 21 |
| 3.1 Rock bolt의 역학적 특성 | 21 |
| 3.2 Rock bolt의 재료 특성 | 22 |
| 4. Spiral bolt의 특성 | 23 |
| 4.1 Spiral bolt의 역학적 특성 | 23 |
| 4.1.1 Spiral bolt의 인발 및 압입시험에 의한 저항력 계산 | 27 |
| 4.1.2 Spiral bolt 재료의 특성 | 30 |

| | |
|---|----|
| 5. 실내인발시험 | 32 |
| 5.1 시험방법 | 32 |
| 5.2 Cement-Mortar 압축강도시험 | 35 |
| 5.3 구속압, 내부압, 전단응력 평가 | 37 |
| 5.4 실내인발시험 결과분석 | 41 |
| 5.4.1 인발하중-변위 관계 | 41 |
| 5.4.2 구속압-변위-인발하중 관계 | 43 |
| 5.4.3 구속압 분포 | 46 |
| 5.4.4 내부압-전단응력 관계 | 52 |
| 5.5 Resin 충전 Rock bolt와 Spiral bolt의 실내인발시험 | 55 |
| 5.5.1 시험개요 | 55 |
| 5.5.2 시험방법 | 56 |
| 5.5.3 실내인발시험 결과분석 | 56 |
| 6. 원위치 인발시험 | 59 |
| 6.1 암사면 원위치 인발시험 | 59 |
| 6.1.1 시험개요 | 59 |
| 6.1.2 시험방법 | 61 |
| 6.1.3 원위치 인발시험 결과분석 | 64 |
| 6.2 터널 내 원위치 인발시험 | 66 |
| 6.2.1 시험개요 | 66 |
| 6.2.2 시험방법 | 68 |
| 6.2.3 터널 내 원위치 인발시험 결과분석 | 71 |
| 6.2.4 터널 내 원위치 인발시험 결과에 의한 기대효과 및 경제성 분석 | 79 |
| 7. FLAC3D 수치해석 | 80 |
| 7.1 개요 및 실내시험 결과 | 80 |
| 7.1.1 개요 | 80 |
| 7.1.2 실내시험결과 | 80 |
| 7.2 Interface model | 82 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 7.2.1 이론적 배경 | 82 |
| 7.2.2 수치해석적 접근 | 83 |
| 7.3 적용 수치model 및 특성치 | 84 |
| 7.4 구속압에 따른 특성 비교 | 85 |
| 7.5 수치해석 결과 | 92 |
| | |
| 8. 고찰 | 109 |
| 8.1 터널에서의 Spiral bolt 적용성 | 109 |
| 8.2 Spiral bolt 적용시 기대효과 | 110 |
| | |
| 9. 결론 | 113 |
| | |
| 참고문헌 | 116 |

List of Tables

| | |
|---|----|
| Table 2.1 Excavation support ratio (ESR) | 20 |
| Table 3.1 Mechanical properties of bars used for rock bolts | 22 |
| Table 3.2 Strength of bar for rock bolt | 22 |
| Table 3.3 Rock bolt and borehole diameter | 22 |
| Table 4.1 Mechanical properties of flat steel bar used for spiral bolt | 30 |
| Table 4.2 Strength of flat steel bar for spiral bolt | 30 |
| Table 4.3 Dimension of domestic flat bar (SS 400) | 31 |
| Table 5.1 Mechanical properties of a thin-walled hollow cylindrical specimen. ϕ_{in} : inner diameter, t : thickness, E_r : Young's modulus, ν_r : Poisson's ratio | 32 |
| Table 5.2 Mixing ratio of cement-mortar | 35 |
| Table 5.3 Mechanical properties of grouting material with curing time. S_t : Uniaxial compressive strength, E_g : Young's modulus, ν_g : Poisson's ratio | 36 |
| Table 5.4 Results of displacement, pull-out load, external pressure, internal pressure, and shear stress. u_{max} : maximum displacement, L_{max} : maximum pull-out load, p_{ex-max} : maximum external pressure, p_{in-max} : maximum internal pressure, τ_{max} : maximum shear stress | 41 |
| Table 5.5 Physical properties of sample | 55 |
| Table 5.6 Physical properties of resin | 55 |
| Table 6.1 Location of boreholes for rock bolts and spiral bolts | 59 |
| Table 6.2 Comparison of mechanical properties of rock bolts and spiral bolts .. | 67 |
| Table 6.3 The number of resin capsules used for filling a borehole | 68 |
| Table 6.4 Boreholes for pull-out tests of rock bolts and spiral bolts in $\bigcirc\bigcirc$ tunnel | 68 |
| Table 6.5 Results from pull-out tests of rock bolts (RB-4H-1, RB-4H-2) and spiral bolts (SB-4H-1, SB-4H-2) after 4 hours of resin curing time | 72 |
| Table 6.6 Results from pull-out tests of rock bolts (RB-8H-1, RB-8H-2) and | |

| | |
|--|-----|
| spiral bolts (SB-8H-1, SB-8H-2) after 4 hours of resin curing time | 74 |
| Table 6.7 Results of pull-out test of rock bolts (RB-12H-1, RB-12H-2) and spiral bolts (SB-12H-1, SB-12H-2) after 12 hours of resin curing time | 76 |
| Table 6.8 Results from pull-out tests of rock bolt (RB-24H-1) and spiral bolt (SB-24H-1) after 24 hours of resin curing time | 77 |
| Table 6.9 Results from pull-out tests of rock bolts and spiral bolts for different curing times | 78 |
| Table 7.1 Material properties of input parameters for numerical model | 85 |
| Table 7.2 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 0.0$ (no confinement) | 87 |
| Table 7.3 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 88 |
| Table 7.4 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 89 |
| Table 7.5 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 90 |
| Table 7.6 Summary of results of numerical analysis | 91 |
| Table 8.1 Comparison of mechanical properties of rock bolts and spiral bolts | 109 |
| Table 8.2 Comparison of mechanical properties of spiral bolts before and after upgrade | 110 |

List of Figures

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 Relationship between radial load radial deformation on an excavated tunnel in rock mass(Deere et al, 1970) | 5 |
| Figure 2.2 Suspension effect (Peng, 1978) | 7 |
| Figure 2.3 Keying effect (Peng, 1978) | 7 |
| Figure 2.4 Arch effect (Peng, 1978) | 8 |
| Figure 2.5 Friction effect (Peng, 1978) | 8 |
| Figure 2.6 Expansion shell bolt anchor | 9 |
| Figure 2.7 Expansion shell bolt | 10 |
| Figure 2.8 Slot and wedge bolt structure | 10 |
| Figure 2.9 Resin grouted bolt | 11 |
| Figure 2.10 Cement grouted bolt | 12 |
| Figure 2.11 Perfo type bolt | 12 |
| Figure 2.12 Split set | 13 |
| Figure 2.13 Swellex bolt | 14 |
| Figure 2.14 Spiral bolt | 15 |
| Figure 3.1 View of rock bolt | 21 |
| Figure 4.1 View of spiral bolt | 24 |
| Figure 4.2 Shape of spiral bolt and cross-section | 24 |
| Figure 4.3 Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground | 25 |
| Figure 4.4 Shear failure zone occurred in artificial stratified model of gypsum-cement | 25 |
| Figure 4.5 Failure images scanned by X-ray CT scanner: (a) rock bolt (b) spiral bolt (Ito et al., 2001; Kang et al., 2005) | 26 |
| Figure 4.6 Force distribution on surface of spiral bolt under axial load | 28 |
| Figure 4.7 Force change according to surface angle of spiral bolt (aa': lateral direction, bb': longitudinal direction) | 29 |
| Figure 5.1 Accessories for laboratory pull-out test | 32 |

| | |
|---|----|
| Figure 5.2 Schematic sketch of rock and spiral bolts | 33 |
| Figure 5.3 Layout for laboratory pull-out test: (a) rock bolt, (b) spiral bolt, and (c) strain rosette gauges on the surface | 34 |
| Figure 5.4 Universal testing machine for pull-out test, data logger and digital indicator for measuring strain and displacement | 34 |
| Figure 5.5 Curing of cylindrical specimens for uniaxial compression test | 36 |
| Figure 5.6 Views (a) before and (b) after uniaxial compression test | 36 |
| Figure 5.7 Pull-out load versus axial and lateral strains | 37 |
| Figure 5.8 Schematic diagram of pull-out test and theory of a thin-walled hollow cylinder | 38 |
| Figure 5.9 Pull-out load versus displacement | 42 |
| Figure 5.10 External pressure versus displacement and pressure versus pull-out load | 44 |
| Figure 5.11 External pressure versus displacement and distribution of external pressure according to z position | 48 |
| Figure 5.12 Shear stress versus internal pressure for spiral bolt after (a) 7 days and (b) 28 days | 53 |
| Figure 5.13 Test equipments | 56 |
| Figure 5.14 Results from laboratory pull-out tests of rock and spiral bolts for effects of resin characteristics | 58 |
| Figure 6.1 Granite quarry for in-situ pull-out tests in Guam, Hwasun-gun | 60 |
| Figure 6.2 Boreholes for installing rock bolts and spiral bolts | 60 |
| Figure 6.3 Process for in-situ pull-out test: (a) Boreholes for pull-out test, (b) injection of cement-mortar, (c) installation of test equipment, (d) in-situ pull-out test | 62 |
| Figure 6.4 Relationship between pull-out load and displacement: (a) for 3 m long bolts after 1 day and 2 days of curing time, and (b) for 5 m long spiral bolt with 25 mm and 32 mm in width after 2 days of curing time | 65 |
| Figure 6.5 Installation of rock bolts and spiral bolts for pullout tests in a tunnel | 67 |

| | |
|---|----|
| Figure 6.6 Installation process of rock and spiral bolts in a borehole: (a) Injection of resin, (b) insertion of supports, (c) completion of installation, (d) pull-out test and data acquisition | 69 |
| Figure 6.7 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts (RB-4H-1, RB-4H-2) and spiral bolts (SB-4H-1, SB-4H-2) with 4 hours of resin curing time | 71 |
| Figure 6.8 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts (RB-8H-1, RB-8H-2) and spiral bolts (SB-8H-1, SB-8H-2) with 8 hours of resin curing time | 73 |
| Figure 6.9 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts (RB-12H-1, RB-12H-2) and spiral bolts (SB-12H-1, SB-12H-2) with 12 hours of resin curing time | 75 |
| Figure 6.10 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolt (RB-24H-1) and spiral bolt (SB-24H-1) with 24 hours of resin curing time | 77 |
| Figure 7.1 Laboratory pull-out test | 81 |
| Figure 7.2 Result from pull-out tests: (a) rock bolt, and (b) spiral bolt | 81 |
| Figure 7.3 Schematic diagram for axial behavior of unit anchor element | 82 |
| Figure 7.4 Assumption of interface model between anchor and ground | 83 |
| Figure 7.5 Assumed behavior of (a) bolt and (b) grout model (FLAC3D model) | 84 |
| Figure 7.6 3D FDM model and input data for numerical analysis | 84 |
| Figure 7.7 Results of numerical analysis depending on confining pressure | 91 |
| Figure 7.8 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 92 |
| Figure 7.9 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 93 |
| Figure 7.10 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 93 |
| Figure 7.11 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figure 7.12 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 94 |
| Figure 7.13 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 95 |
| Figure 7.14 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 95 |
| Figure 7.15 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement) | 96 |
| Figure 7.16 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 96 |
| Figure 7.17 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c=0.5$ MPa | 97 |
| Figure 7.18 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 97 |
| Figure 7.19 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 98 |
| Figure 7.20 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 98 |
| Figure 7.21 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c= 0.5$ MPa | 99 |
| Figure 7.22 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 99 |
| Figure 7.23 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa | 100 |
| Figure 7.24 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 100 |
| Figure 7.25 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 101 |
| Figure 7.26 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 101 |
| Figure 7.27 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c =$ | |

| | |
|---|-----|
| 1.0 MPa | 102 |
| Figure 7.28 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 102 |
| Figure 7.29 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 103 |
| Figure 7.30 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 103 |
| Figure 7.31 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa | 104 |
| Figure 7.32 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 104 |
| Figure 7.33 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 105 |
| Figure 7.34 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 105 |
| Figure 7.35 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 106 |
| Figure 7.36 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 106 |
| Figure 7.37 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 107 |
| Figure 7.38 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 107 |
| Figure 7.39 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa | 108 |
| Figure 7.40 Example of influence of stress change on predicted pull out load by Diederichs et al. (1993), where rock deformation is causing rock relaxation | 108 |
| Figure 8.1 Application of spiral bolts in foreign countries (www.gt-spiral.com) | 111 |

Abstract

A study on the supporting effect of a spiral bolt as a support system

By Cho, Young Dong

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

Dept. of Energy & Resources Engineering,

Graduate School of Chosun University

This study aims to evaluate the supporting effect of a spiral bolt that is superior to a rock bolt in terms of constructability, stability, environmental and economic aspects as a support system.

This study thus analyzed the mechanical properties of a rock bolt which is widely used as a support and a spiral bolt. In addition, laboratory pull-out tests were conducted for the evaluation of properties of the supports such as displacement, pull-out load, confining pressure etc. Moreover, the differences between a rock bolt and a spiral bolt were drawn by comparing the two results of laboratory pull-out tests and in-situ pull-out tests. Then, the differences of the supporting effect of the two supports were analysed by comparing the results of the two pull-out tests with a numerical analysis using FLAC3D.

The results of this study are summarized as follows;

- 1) In the mechanical properties of a rock bolt and a spiral bolt, the size of the cross-sectional area of a rock bolt was about 1.3 times larger than that of a spiral bolt. The rate of extension of a spiral bolt was about 1.2 times higher than that of a rock bolt, whereas the yield load and the pull-out load of a rock bolt were about similar and 1.2 times higher than those of a spiral bolt.
- 2) In the laboratory pull-out test of a rock bolt and a spiral bolt on a curing period, displacements of two supports were almost same or reduced at 7th and

28th day. It is considered that the force of adhesion between a support and a grout increases due to the fact that compressive strength increases according to a curing period. In the same pull-out load, the confining pressure of a spiral bolt was larger than a rock bolt. It implies that a spiral bolt is more stable than a rock bolt for securing the stability of a ground or rock mass when a support is installed on a ground or rock mass under the same condition. The maximum internal pressure and the maximum shear stress were higher at 7th day than 28th day and those of a spiral bolt were higher than a rock bolt. Therefore, it is suggested that the supporting effect of a support depends on a curing period and a form of the support. Furthermore, under the same condition of a ground or rock mass, a spiral bolt makes higher pull-out load and confining pressure than a rock bolt. In addition, considering the constructability and economic aspects as well as stability of a ground or rock mass before and after installing a support, it seems that a spiral bolt is more effective than a rock bolt.

3) In a in-situ pull-out test with a cement-mortar to a rock bolt and a spiral bolt, the pull-out load of a rock bolt was suddenly decreased and the displacement of a rock bolt was increased dramatically at the same time above the yield point. It is regarded that this is because the collapse would be occurred in an instant at the boundary between a rock bolt and a cement-mortar. On the other hand, the displacement of a spiral bolt tended to be increased above the yield point with the pull-out load. It is considered that this is because the collapse would be gradually occurred at the boundary between a spiral bolt and a cement-mortar. In the results of the pull-out load on curing period of resin, as the curing period of resin was longer, the pull-out loads of both supports were increased. The maximum pull-out loads of two supports were found in four hours, whereas the differences of others [in 8, 12, 24 hours] were almost same. In the three times of the re-pull-out test for checking variations of the maximum pull-out loads of two supports at each step, it was found that as the test repeated, the pull-out load of a rock bolt was decreased. It is thought that this is because the collapse would be occurred

partly when the support reached the maximum pull-out load. However, the value of the pull-out load was not changed regardless of the number of tests in a spiral bolt. It is considered that this is because the collapse between the support and the filler would be rarely occurred although the support reached the maximum pull-out load.

4) The results of the numerical analysis of the relationship between the load and the displacement of a rock bolt and a spiral bolt according to a confining pressure in a tunnel are as below.

There were positive relationship between the confining pressure and the shear yield strength. In both supports, as the confining pressure was increased, the shear yield strength was increased. Particularly, when the confining pressure was increased, the shear yield strength of a spiral bolt was higher than that of a rock bolt in a low displacement. Furthermore, the shear yield strength of a spiral bolt was about 4 to 25 percent higher than that of a rock bolt depending on a condition of confining pressure. In the low confining pressure, there was a big difference of the shear yield strength between a rock bolt and a spiral bolt, whereas there was a little difference of the shear yield strength between both supports in the high confining pressure. It implies that as a confining pressure is lower, the effectiveness of a spiral bolt is higher than a rock bolt. As a confining pressure was lower, the axial shear behavior of a spiral bolt was over maximum 25 percent higher than that of a rock bolt in its efficiency. It is considered that a condition of confining pressure can be a criterion of an application of a support.

In conclusion, considering the fact that a fully-grouted form of a sub-support in a tunnel is finally collapsed by reducing the shearing strength at the boundary between a support and a grout according as the confining pressure is decreased by relaxation of rocks that is due to excavating a tunnel, it is reasonable to assume that the supporting effect of a spiral bolt is superior to that of a rock bolt.

1. 서론

사회간접시설 확충으로 도로 개발에 의한 사면조성과 터널 굴착 및 구조물 터파기와 에너지 저장시설을 위한 대규모 지하공간 등의 개발에 있어 지반응력 상태 변화에 따른 문제점으로는 사면조성 및 터널 굴착시, 연약대를 따라 파괴되거나 손상대 내에서 붕괴가 발생하게 되고, 거대한 지하공간에서의 파괴 등이 야기된다. 이러한 불안정한 지반을 안정화시키기 위한 대표적인 방법에는 그라운드 앵커(ground anchor)나 케이블 볼트(cable bolt) 및 록 볼트(rock bolt)와 같은 지보재가 이용되어져 왔다.

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 가함으로써 정착부와 지반사이에 반력인 압축력을 발생시켜 지반의 전단강도를 증가시킴으로서 지반의 안정화를 유도할 수 있다(김낙경, 2000, 2001; 김래현 외, 2002).

최근에 도입된 케이블 볼트는 시멘트 그라우트 된 천공hole에 강연선을 삽입한 보강재로서 길이는 4m~40m까지 시공이 가능하며, 프리스트레스를 가하지 않은 전면접착형이 광산에서 주로 사용되어지고 있다. 원래의 케이블 볼트는 지중에 천공된 공에 강선을 삽입하고 그라우트로 고정시킨 형태이며, 이들 지보재는 주로 터널을 굴착한 후 시멘트 그라우트의 마찰력이나 부착력을 이용하여 지반과 지보재를 고정시킴으로서 지반의 안정성을 확보하는데 주요한 목적이 있다(Hudson, 1989; Indraratna and Kaiser, 1990; Bawden et al., 1992; Kaiser et al., 1992; Yazici and Kaiser, 1992; Hyett et al., 1992, 1995; Tannant, 1995; Oreste and Peila, 1996; Jeng and Huang, 1999; Ito et al., 2001).

또 다른 형태의 지보재인 록 볼트는 지하공동 굴착 시 암반의 과도한 이완을 초기에 방지할 수 있는 가장 중요한 터널 지보재 중의 하나로서, 록 볼트의 정착방식

과 시공방법에 따라 크게 선단정착식(썰기형, 확장형, 선단접착형), 전면접착식(충전형, 주입형), 병용식(선단정착 grout형)으로 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 관련하여 Rock bolt 지보 기술 광산 적용 시험연구(대한광업진흥공사(1986))가 이루어 졌다.

Swellex bolt는 시멘트나 레진 볼트처럼 충전물을 이용하여 암반과 볼트를 접착시키는 지보재와 달리 마찰효과를 이용하여 암반을 지지하며, 시공성이 빠르고 지보효력이 즉시 발휘되는 장점이 있으나, 다른 지보재보다 가격이 고가이고 암질에 따라 천공경을 달리 하여야하는 단점이 있다. 이와 같이 그라운드 앵커나 록 볼트 및 케이블 볼트, 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 화강풍화토를 대상으로 인장형 및 압축형 그라운드 앵커를 설계, 시공하고 인발시험, 크리프시험, 하중전이시험을 실시하여 형태별 그라운드 앵커의 거동 특성을 분석하였다. 박병수 외(2006)은 앵커의 정착길이, 천공경, 지보재의 직경 등을 변화시켜 인발시험과 수치해석을 수행하여 비교하였고, 정착길이나 지보재의 직경에 따라 한계하중이 증가하고 수치해석과 비례하는 결과를 얻었다. 유성원 외(2006)은 부착식 앵커의 인발·전단특성을 알아보기 위하여 부착길이, 앵커직경 등

의 조건으로 인발·전단시험을 수행하여 길이가 길어지고, 직경이 커질수록 부착력이 증가한다는 결과를 제시하였다.

국외의 경우 Farmer(1975)는 전면 접촉형 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.

이와 같이, 국내외에서 지보재와 관련한 지보 메커니즘에 관한 연구는 다양하게 수행되어져 왔으며, 최근에 연약지반 보강, 각종 시설물의 기초, 농업 분야의 비닐 하우스 기초, 옹벽 기초 등에 효과적으로 사용할 수 있는 새로운 형태의 Spiral bolt가 연구·개발되어졌다.

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)는 스파이럴 구조체의 그라운드 앵커에의 적용에 관한 기초적 검토, Hirata et al(2003, 2005)과 Haraguchi et al(2006)은 스파이럴 구조체의 Ground anchor에의 적용에 관한 성능 시험과 스파이럴 구조체의 Ground anchor에의 적용시험, 강성승 외(2010)는 Spiral bar를 이용한 옹벽 기초의 거동 계측, 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 시공성, 효율성, 경제성, 안정성, 환경성 측면에서 록 볼트보다 지보재 특성이 우수한 Spiral bolt의 적용 확대 활성화 방안으로 Spiral bolt의 지보효과에 관한 연구를 수행하고자 한다. 본 연구를 수행 하기위한 목적은 첫째, 록 볼트와 Spiral bolt의 지보재 특성을 비교, 둘째, 록 볼트와 Spiral bolt의 역학적 특성 비교

셋째, 실내인발시험 및 원위치 인발시험을 통한 지보재 특성 비교, 넷째 터널 내 현장 적용시험에 따른 지보재 효과 비교, 다섯째 FLAC3D 수치해석을 통한 지보효과 비교, 여섯째, Spiral bolt의 현장 적용 가능성에 중점을 두고 본 연구를 수행하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 Rock bolt 지보법의 원리

지하에 공동을 굴착하여 지보를 설치했을 경우 공동의 거동은 지보설치기간과 방법 뿐 아니라 지보와 암반의 하중-변형특성에도 의존한다. 지보와 암반사이의 상호작용은 Figure 2.1에 주어진 ground reaction 곡선으로 설명할 수 있다.

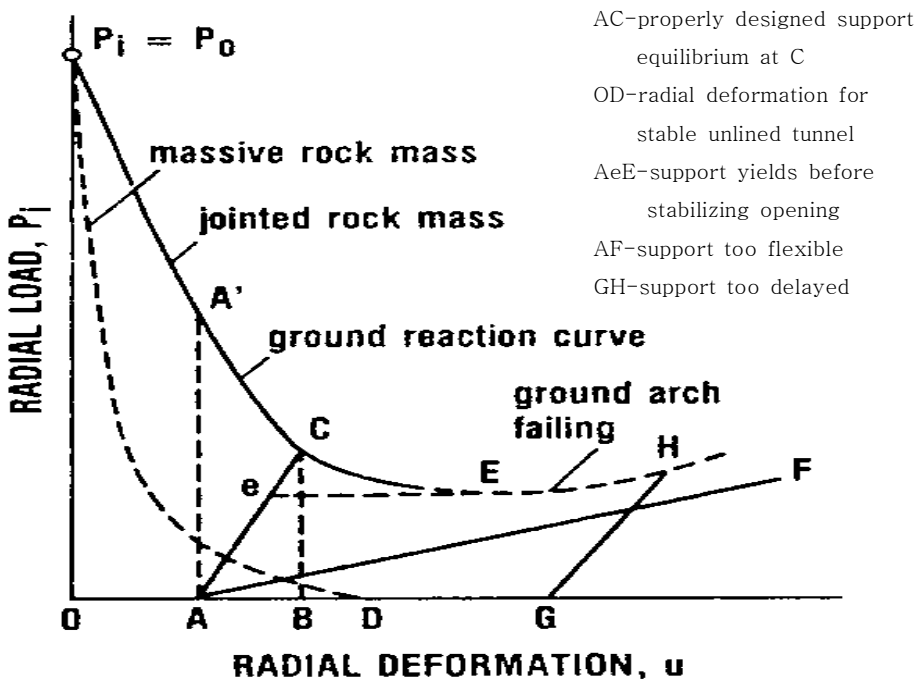


Figure 2.1 Relationship between radial load radial deformation on an excavated tunnel in rock mass(Deere et al, 1970).

공동이 굴착되면 주변 암반에는 공동내부의 방향으로 변위가 일어난다. ground reaction 곡선은 갱도의 벽이나 천정에 더 이상의 변위를 제한하기 위해 가해지는 하중을 보여준다. 선OA는 지보가 설치되기 전에 발생한 변위를 나타낸다. 설치된 지보가 완전 비압축성이라면 지보에 걸리는 하중은 선AA'에 의해 표현된다. 여기

에서 지보가 갱도벽과 함께 변형을 일으키면 점C에서 평형이 이루어져 갱도벽에서의 반경방향변위는 선OB, 지보변형은 선AB 그리고 지보에 걸리는 하중은 선BC가 된다. 점C에서의 평형은 지보형태의 선택과 그 설치기간이 적절해야만 이루어질 수 있다. Figure 2.1에서 선AeE는 공동이 안정되기 전에 파괴된 지보의 거동을 나타낸다. 선AF는 지보의 가변성이 너무 큰 것이고 선GH는 설치기간이 너무 지연되어 비효과적인 경우를 나타내고 있다. 결국 지보는 빠르게 설치될수록 효과적이다. 그리고 설치된 후 어느정도 변형이 일어날 수 있는 능동적 지보일수록 암반자체의 지지력을 최대한 이용할 수 있다. 즉 Rock bolt는 갱도가 굴착된 후 가능한 빠르게 설치될 수 있는 지보로서 설치 후 갱도주변의 암반과 함께 어느 정도 변형이 일어남으로써 암반 자체의 지지력을 최대한 이용할 수 있는 능동적 지보법이다.

2.2 Rock bolt의 효과

터널 혹은 지하공동에서 지보재를 사용함으로써 다음의 네 가지 효과를 기대할 수 있다. 첫 번째로 매달림 효과(Suspension effect)는 가장 단순한 효과로서 발과 등으로 인해 느슨해진 암피를 자체 지지력을 가진 상부의 천반에 지지하게 함으로써 낙하를 방지하는 효과이다(Figure 2.2). 균열, 절리가 발달된 원지반에 슛크리트와 동시에 시공하면 비교적 작은 틈에 대해서도 효과적이다. 두 번째로 엇물림 효과(Keying effect)는 취약면을 따라 일어나는 변위를 줄여 취약면에 의해 형성된 암피를 고정시킴으로써 천반부를 안정시키는 효과이다(Figure 2.3). 세 번째로 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 2.4). 마지막으로 마찰효과(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 암피의 수평, 수직운동을 억제하거나 감소시켜 지지력을 발휘해 주변암반의 강도 또는 내하능력의 저하를 방지하는 작용을 한다(Figure 2.5). 이러한 마찰효과는 지보재의 인장력과 지보재가 관통하는 층수에 비례하고 지보재의 설치간격과 천반 폭의 크기에 반비례한다(Peng, 1978).

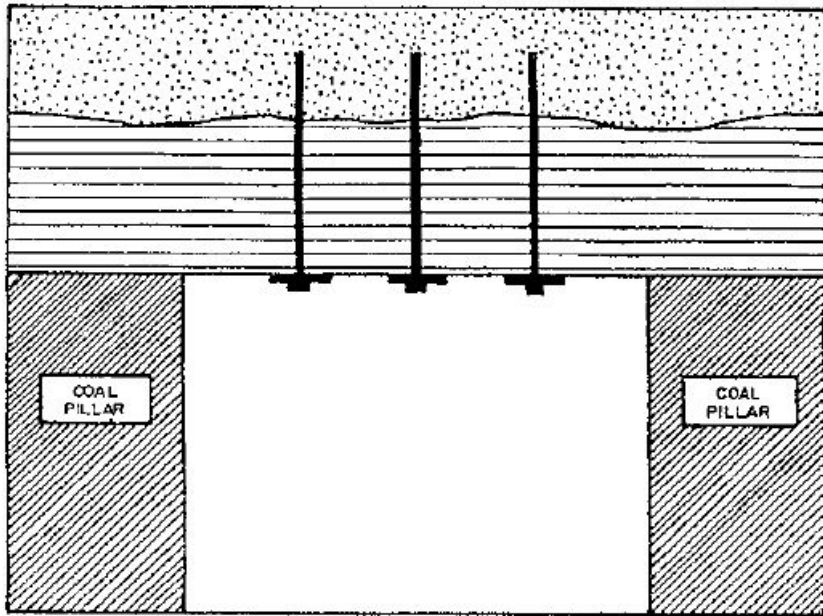


Figure 2.2 Suspension effect (Peng, 1978).

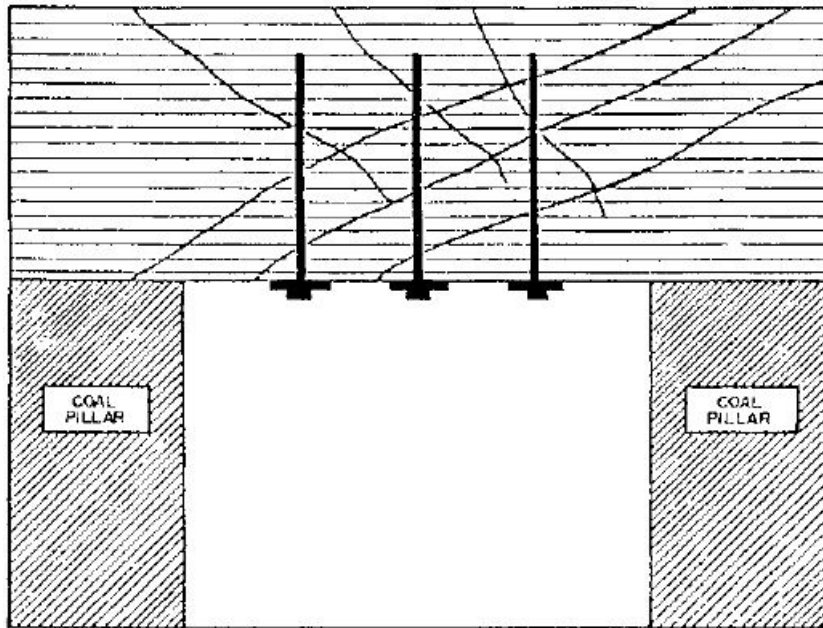


Figure 2.3 Keying effect (Peng, 1978).

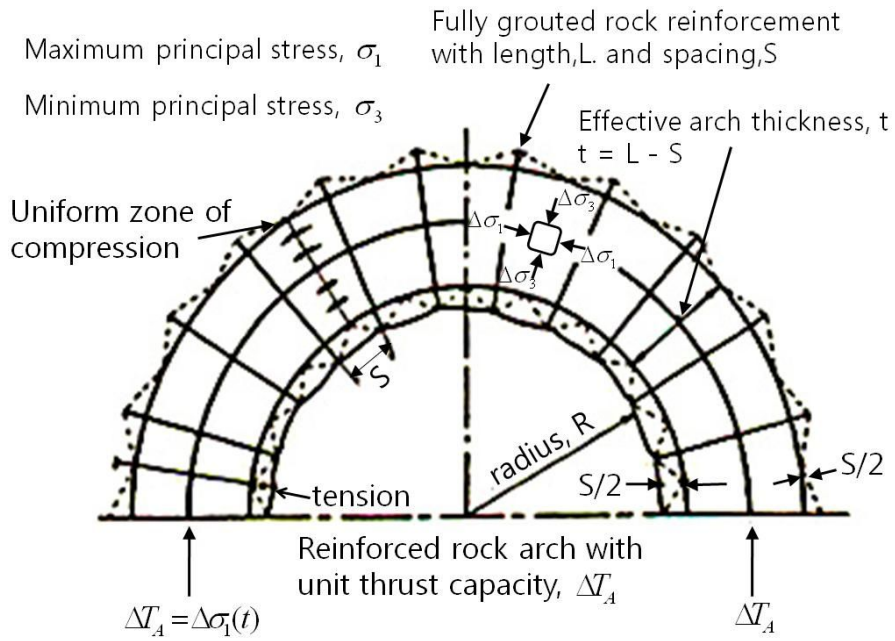


Figure 2.4 Arch effect (Peng, 1978).

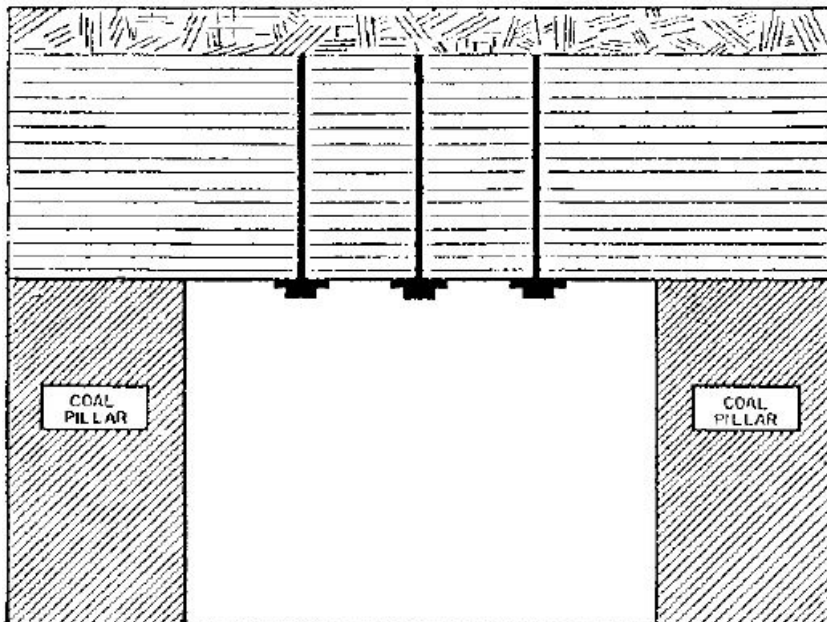


Figure 2.5 Friction effect (Peng, 1978).

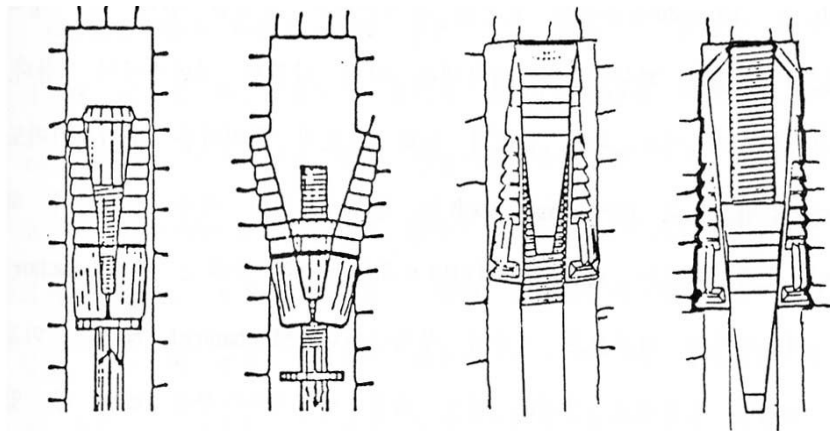
2.3 Rock bolt의 종류

2.3.1 Mechanically Anchored Rock bolts

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 방법(system)으로 암반을 지지해 주게 된다. 이 볼트 설치 시에는 먼저 볼트 직경에 알맞은 천공을 하여야 한다. 그 다음 볼트를 공 안으로 밀어 넣어 bearing plate 가 암반에 완전히 밀착되도록 한 뒤 너트를 죄어 미리 조절된 토크(torque)에 도달하도록 한다.

Expansion shell anchored bolt 설치효과는 무엇보다도 shell이 얼마나 암반에 밀착되어 암반을 잡아주는 데에 달려있다. 이 밀착력은 공경의 크기, 암반의 종류 및



① Standard type

② Bail type

Figure 2.6 Expansion shell bolt anchor.

상태 등에 따라 좌우된다. 이 bolt 는 10~20 m 내에서 발생한 발파진동의 영향을 받아 그 장력을 잃게 되는데 이 경우에는 다시 너트를 조여주어야 한다.

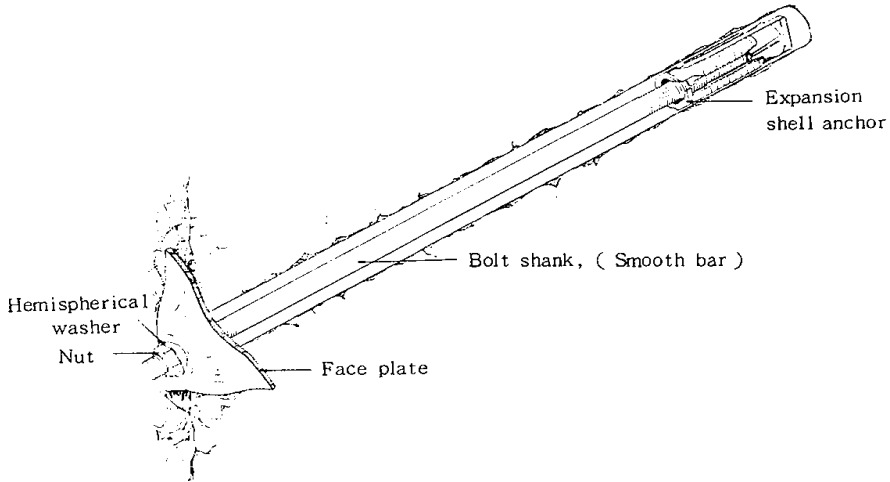


Figure 2.7 Expansion shell bolt.

한편, 볼트의 지지효과를 높이기 위해 볼트와 공 사이를 충전시키기도 한다. 일반적으로 Mechanical bolt는 경암에 많이 적용 사용된다. 하지만 초경암에서는 shell 의 암반밀착이 용이치 못하고 앵커(anchor)가 미끄러지기 쉬우므로 사용이 부적당하다. Mechanical bolt는 비교적 가격이 저렴하고 설치한 바로 다음부터 지지 역할을 해낼 수 있으며, 충전을 하면 거의 영구적으로 사용할 수 있다는 장점이 있으나 사용범위가 경암에 제한되어 있고 올바른 설치에 대한 신뢰도가 낮으므로 설치정도를 점검해야 하는 불편이 있으며 발파진동이나 높은 지압으로 인해 공 주위의 암석이 떨어져나가 그 지지력을 잃게 될 수 있다는 단점도 있다.

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

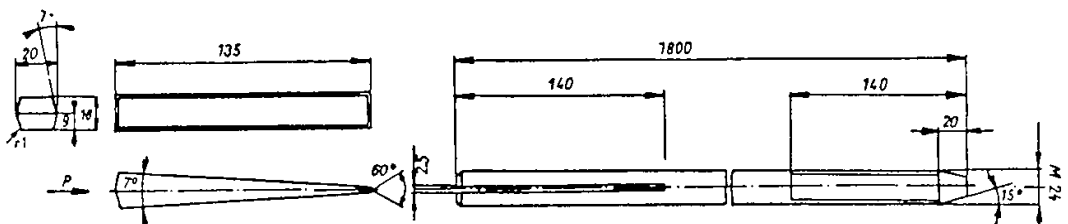


Figure 2.8 Slot and wedge bolt structure.

2.3.2 Grouted Rock bolts

Grouted Rock bolts는 공과 볼트사이를 충전 시켜 암반을 지지하게 되는데 이때 충전 재료는 시멘트나 레진(resin)을 이용한다. Grouted Rock bolts의 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 튜브회수 시 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 bolts를 빠르고 간편하게 설치하려면 cartridge를 사용 하는게 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 bolts 중 완전충전 rebar bolt와 강철제 thread bar bolt가 가장 많이 사용된다. 완전충전 rebar bolt는 설치 이후부터 지지력을 발휘할 수 있다는

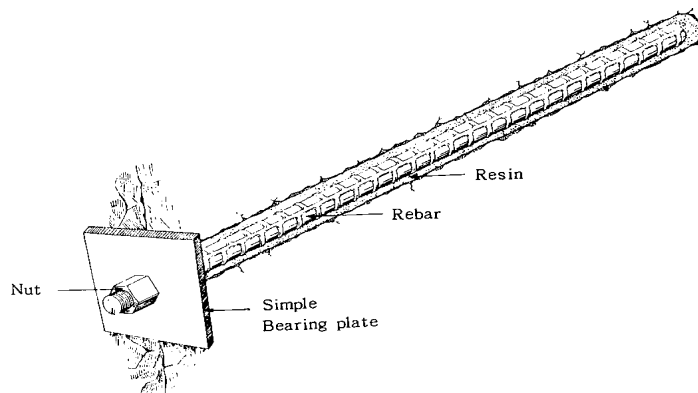


Figure 2.9 Resin grouted bolt.

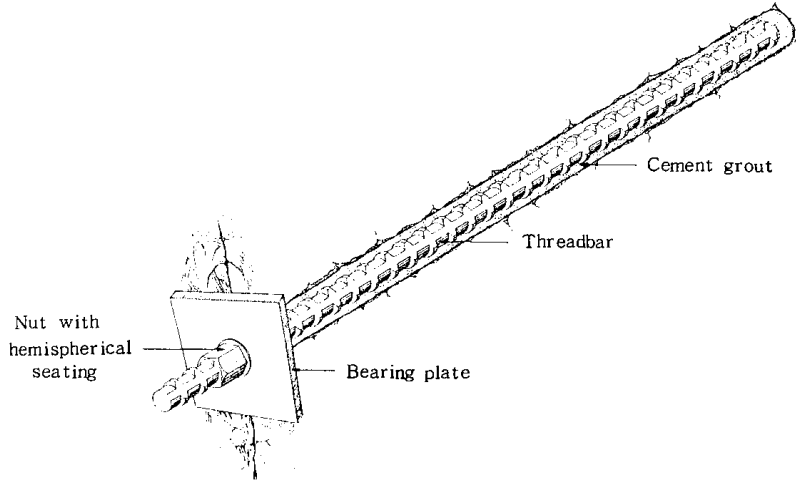


Figure 2.10 Cement grouted bolt.

장점이 있으나 취급이 난이하고 cartridge의 낭비가 심하며 지지수명이 한계가 있다는 단점이 있다. 강철제 thread bar bolt는 설치만 잘되면 강하고 지속적으로 지지력을 가지며 주위의 불리한 환경에 대한 영향을 가장 적게 받아 영구보존 지지의 목적으로 토목공사에 많이 사용되나 가격이 비싸고 시멘트 충전 시 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.

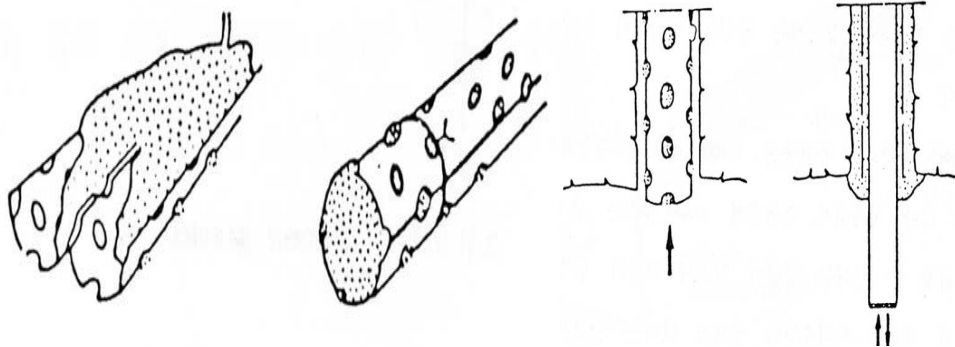


Figure 2.11 Perfo type bolt.

2.3.3 Friction Anchored Rock bolts

Friction Anchored Rock bolts는 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 stoper 나 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 볼트 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.

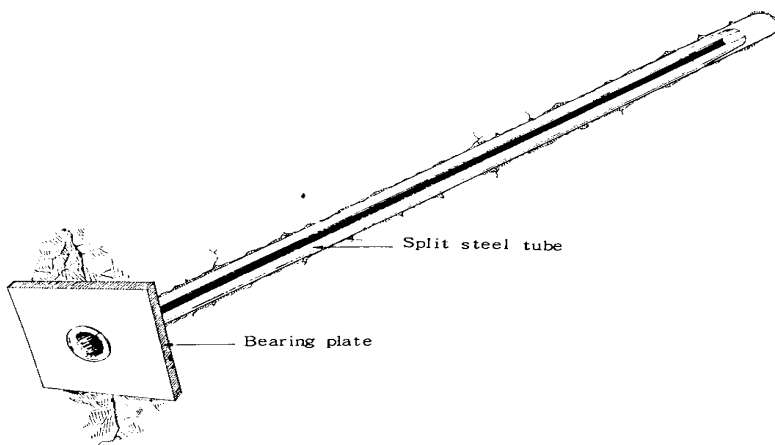


Figure 2.12 Split set.

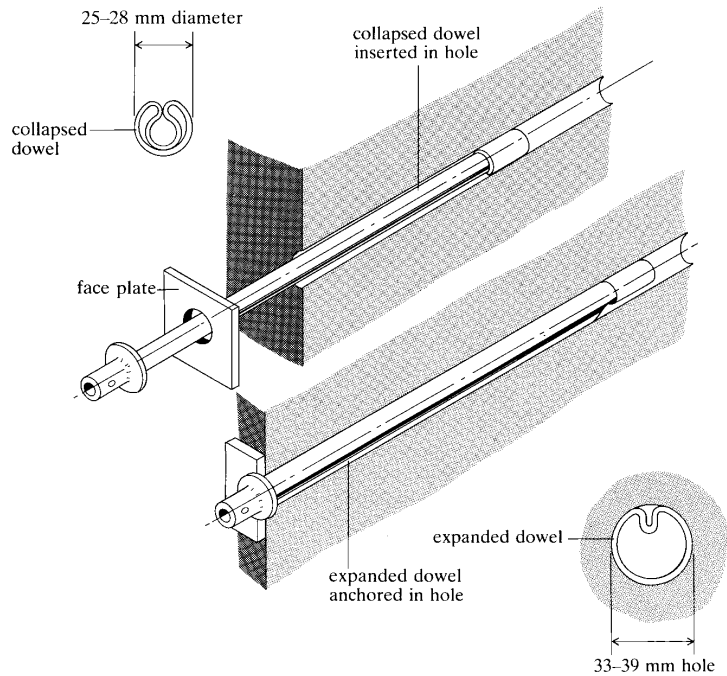


Figure 2.13 Swellex bolt.

Friction Anchored Rock bolt는 젓은 암반 상태에서도 설치와 사용이 가능하다. 그러나 영구적인 지지에 대해서는 볼트의 마모문제가 제기된다. 이 두 볼트의 차이 점은 지지방법과 위에서 말한 바와 같이 설치방법에서 나타난다. 좀 더 정확하게 말한다면 split set 볼트만이 완전한 Friction Anchored Rock bolt라 할 수 있으며 이를 “Split set Friction Rock Stabilizer” 라 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 볼트는 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.

2.3.4 Spiral bolt

Spiral bolt란 최근에 개발된 새로운 형태의 지보재로서, 판상의 강재에 양 단면을 고정시킨 후 축 회전시켜 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.

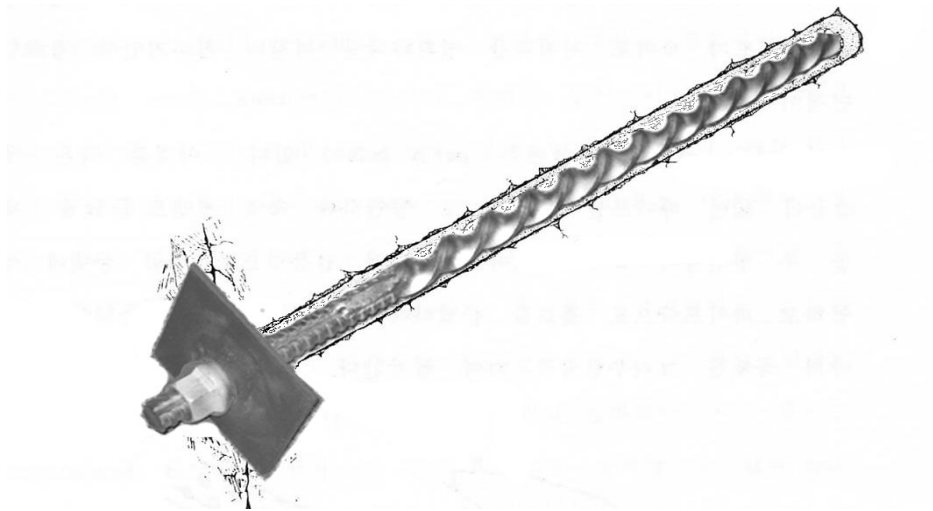


Figure 2.14 Spiral bolt.

2.4 Rock bolt 지보의 설계

Rock bolt지보의 설계는 먼저 지하굴착공동주위의 암반에 대해 초기응력의 작용으로 인한 재분포응력의 형태, 크기, 방향 및 그의 영향 등을 예측하여야 가능하다.

실제로 암반 내에 작용하는 응력의 변화는 공동의 형태, 암반의 상태, 초기응력의 작용상태 등의 여러 가지 요소에 영향을 받는다. 또한 암반을 보강하였을 때 그 효과나 효과의 지속기간을 고려하여야 한다. 지보설계에 영향을 미치는 요소로는 전체적인 응력상태, 암반의 상태, 지하수의 상태, 예상되는 파괴의 형태, 필요한 지보력 및 기간, 소요비용, 기술적 경험 등을 들 수 있으며, 일반적으로 암석의 각종 물성자료는 현장에서 채취한 암석을 실험실에서 시험하여 구하고 있으나 현지암반의 경우 부존상태 및 기타 여러 요인들로 인하여 균일한 값을 구하기 힘들다. 지보설계 시 기본이 되는 RMR 분류 및 Q-system 분류방법은 이러한 지하의 현지암반상태를 여러 가지 기준 되는 요소로 구분, 조사하여 적정한 정량적인 값으로 나타내고 이를 지보의 필요성판정 및 설계 등을 위한 자료로 사용할 수 있도록 암반을 공학적으로 분류해 놓은 방법들이다.

Bieniawski(1973)가 제안한 The Geomechanics Classification 또는 RMR (Rock Mass Rating) 분류법과 Barton, Lien과 Lunde(1974)의 Q-system 분류법은 현재 세계적으로 널리 사용되는 방법들이나 Squeezing, 수분에 의한 팽창, 유동변형 등을 일으키는 연약암반에는 Q-system 분류법이 다소 정확한 것으로 알려져 있다.

2.4.1 이론식에 의한 설계

Bieniawski가 제안한 암반평점(RMR)분류치에 의해 갱도주변 암반의 사하중의 크기와 이완대의 높이는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$P_r = \frac{100 - R}{100} \cdot rB = r \cdot H_t \quad (2.2)$$

여기서, P_r : 갱도주변 암반의 사하중(t/m^2)

r : 암석의 단위체적당 중량(t/m^3)

B : 갱도의 폭(m)

H_t : 이완대의 높이(m)

Q-System 분류값에 의한 갱도주변 암반의 사하중의 크기와 이완대의 높이는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

1) 절리군 수가 3개 이상인 경우

$$P_r = (1.406) \cdot (J_r)^{-1} \cdot Q^{-1/3} = r \cdot H_t \quad (2.3)$$

2) 절리군의 수가 3개 미만인 경우

$$P_r = (0.469) \cdot (J_n)^{1/2} \cdot (J_r)^{-1} \cdot Q^{-1/3} = r \cdot H_t \quad (2.4)$$

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

$$T = L - S \quad (2.5)$$

여기서, L : 볼트의 길이, S : 볼트의 설치간격

갱도주변에서 단위면적당 걸리는 사하중을 P_r 이라 하면

$$\Delta T_A = P_r \cdot B \quad (2.6)$$

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.

$$A = S^2 = T_b / P_r \quad (2.7)$$

$$\therefore S + \sqrt{T_b/P_r}$$

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

$$L = \frac{\Delta T_A \cdot A}{\tan^2(45^\circ + \phi/2) \cdot T_b} + S \quad (2.8)$$

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

2.4.2 경험식에 의한 설계

Rock bolt의 설치간격을 압축권의 형성을 위해 길이의 반정도로 하였을 경우

1) 관탄성 실험과 현장적용을 통해 얻어진 록 볼트의 길이 L은 다음과 같다.

① 무인장 볼트의 경우

$$L_n = 1.40 + (0.184) \cdot (B) \quad (2.9)$$

② 인장 볼트의 경우

$$L_n = 1.60 + \sqrt{1.0 + (0.012) \cdot (B)^2} \quad (2.10)$$

천정부로부터 측벽부로 접근할수록 필요한 볼트의 길이는 감소하나 볼트시공 편의상 일정한 길이로 할 수 있다.

2) 갱도 굴착지보계수에 의한 설계

갱도의 사용용도와 안정성에 따라 나타내는 갱도굴착지보계수(excavation support ratio)를 변수로 하여 현장경험에 의해 얻어진 록 볼트 길이 L은 갱도 폭 (B)과 갱도높이 (H)로부터 다음과 같다.

① 천정부의 경우

$$L_c = \frac{2.0 + (0.15)B}{ESR} \quad (2.11)$$

② 인장 볼트의 경우

$$L_c = \frac{2.0 + (0.15)H}{ESR} \quad (2.12)$$

여기서, ESR은 굴착지보계수로서 Barton(1974) 등은 Table 2.1과 같이 제시하였으며, 갱도의 유효 크기(D_e)를 다음과 같은 관계로 나타내고 있다.

$$D_e = B/ESR \quad (2.13)$$

록 볼트의 설치간격(중, 횡단 방향) S 는 참고로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S = (0.5 \text{ } 0.7) \cdot L \quad (2.14)$$

Table 2.1 Excavation support ratio (ESR)

| Excavation category | ESR |
|--|---------|
| - Temporary mine opening | 3~5 |
| - Vertical shafts : Circular section | 2.5 |
| Rectangle/square section | 2.0 |
| - Permanent mine openings, water tunnels for hydropower, pilot tunnels, drifts, and headings for large excavations | 1.6~2.0 |
| - Storage rooms, water treatment plants, minor highway and railroad tunnels, surge chambers, access tunnels | 1.2~1.3 |
| - Power stations, major highway or railroad tunnels, civil defense chambers, portals, intersections | 0.9~1.1 |
| - Underground nuclear power stations, railroad stations, factories | 0.5~0.8 |

3. Rock bolt의 특성

3.1 Rock bolt의 역학적 특성

터널 및 지반 보강에 이용되는 지보재 중 록 볼트의 대체 지보재로서 스파이럴 볼트의 역학적 특성 및 지보효과 연구를 위한 록 볼트의 역학적 특성 및 재료의 특성과 관련하여 록 볼트의 형상은 대표적으로 Figure 3.1과 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 기계굴착 시 발생하는 주변 원지반의 소성영역 확대를 억제하고 원지반의 안정성을 증가시키며 굴착부분이 일시적으로 개방됨에 따른 취약점을 보완하여 2차 변형 발생을 억제하는 주 지보재 역할을 한다.

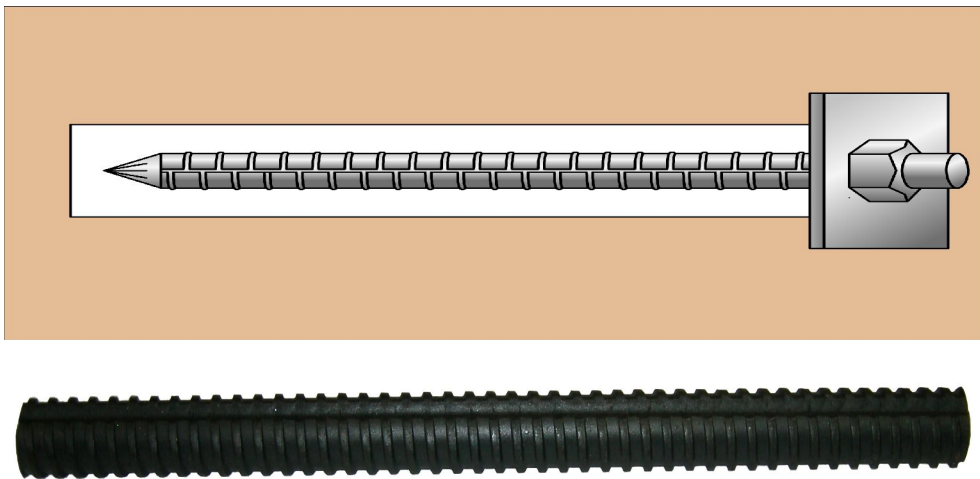


Figure 3.1 View of rock bolt.

3.2 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 SD30, SD35에 대한 록 볼트 재질의 역학적 특성은 Table 3.1과 같으며, 전면 접촉식 록 볼트용 봉강의 내력은 Table 3.2와 같고, 록 볼트와 천공경 비는 Table 3.3과 같다.

Table 3.1 Mechanical properties of bars used for rock bolts

| Description | Material Symbols | Mechanical properties | | |
|---------------------|------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|
| | | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Percentage of elongation(%) |
| Steel Round Bars | SD 30 | 300 or more | 490 or more | 16 or more |
| Steel Deformed Bars | SD 30 | 300 or more | 490 or more | 14 or more |
| | SD 35 | 350 or more | 500 or more | 18 or more |

Table 3.2 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 | | | Unit weight (kg/m) | |
|---------------------|------------------|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------|
| | | | | | | 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 30 | 300 or more | 400 or more | D25 | 25.4 | M24 | 353 | 94.34 | 153.97 | 506.7 | 135.28 | 220.72 | 3.98 |
| | | | | D29 | 28.6 | M27 | 459 | 122.82 | 200.25 | 624.4 | 166.43 | 272.34 | 5.04 |
| | SD 35 | 350 or more | 500 or more | D25 | 25.4 | M24 | 353 | 109.47 | 156.64 | 506.7 | 157.53 | 225.17 | 3.98 |
| | | | | D29 | 28.6 | M27 | 459 | 142.4 | 204.7 | 624.4 | 199.36 | 285.69 | 5.04 |

Table 3.3 Rock bolt and borehole diameter

| | Rock bolt | Bore hole Diameter(ϕ) |
|--------------------------|---|---|
| Point-anchored bolts | wedge type expansion type normal resin(capsule) type | $\phi \leq$ slit enlargement diameter(max) $\phi \leq$ shell enlargement diameter(max) $\phi =$ bolt diameter + (4~8mm) |
| Full-length-grouted bolt | normal resin(capsule) type Foaming resin(capsule) type cement system(capsule) type cement mortar(charge) type perfo type cement milk(injection) type | $\phi =$ bolt diameter + (4~8mm) $\phi =$ bolt diameter + (10~15mm) $\phi =$ capsule diameter + (6mm) $\phi =$ bolt diameter + (10~15mm) $\phi =$ bolt diameter + (10~20mm) $\phi =$ bolt diameter + (10~15mm) 단, $\phi \leq$ packer effectiveness diameter |

4. Spiral bolt의 특성

4.1 Spiral bolt의 역학적 특성

Spiral bolt는 최근에 개발된 새로운 형태의 지보재로서 일정두께의 긴 판상의 강재를 양단면을 고정시킨 후 축회전 시켜 만든 나선형 형태의 지보재(Figure 4.1)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 않지만 축방향 저항력에 미치는 영향은 상대적으로 큰 것이 특징이다. 또한, Spiral bolt는 Rock bolt 보다 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 4.2은 Spiral bolt의 일부분과 이를 확대시켜 나타낸 것이며, 지보재 설치시 효과적으로 작용하는 Spiral의 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.

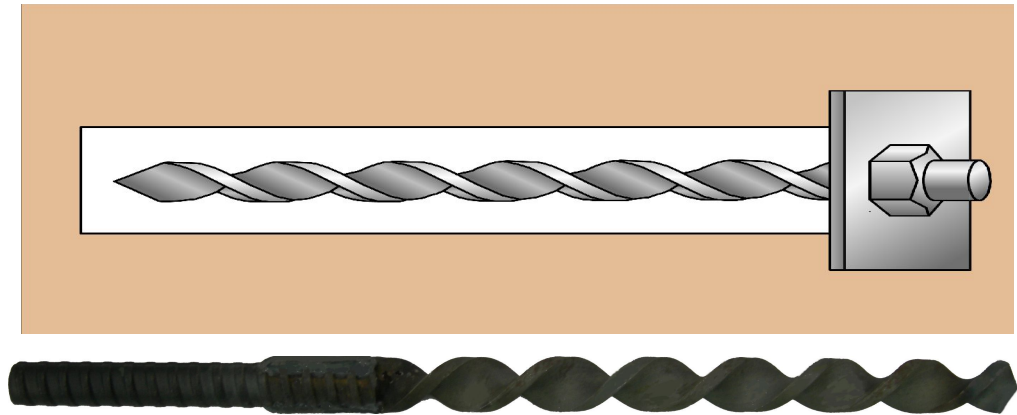


Figure 4.1 View of spiral bolt.

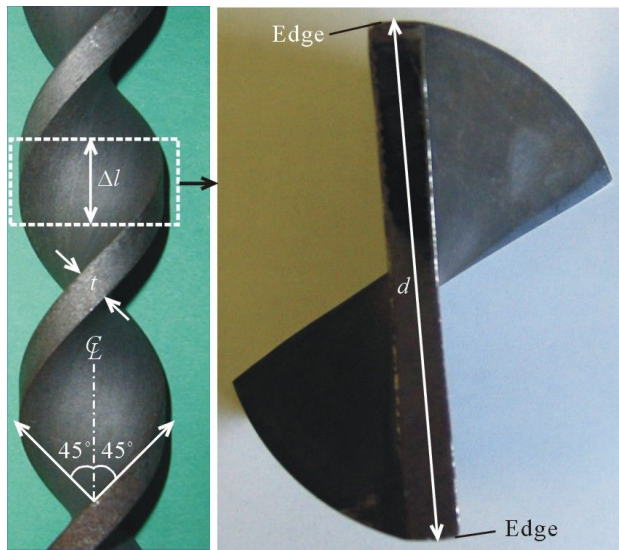


Figure 4.2 Shape of spiral bolt and cross-section.

Figure 4.3는 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 4.4는 시멘트와 석고를 충상으로 하는 모형지반을 제작한 후 여기에 Spiral bolt를 설치한 다음 5mm 정도의 인발시험을 실시하였다(강성승 외, 2005).

시험결과는 Figure 4.3에서 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.

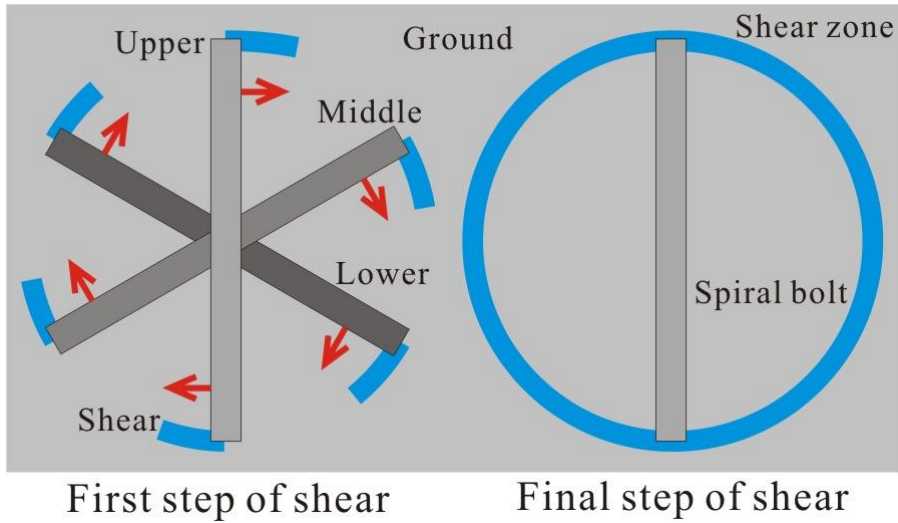


Figure 4.3 Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground.

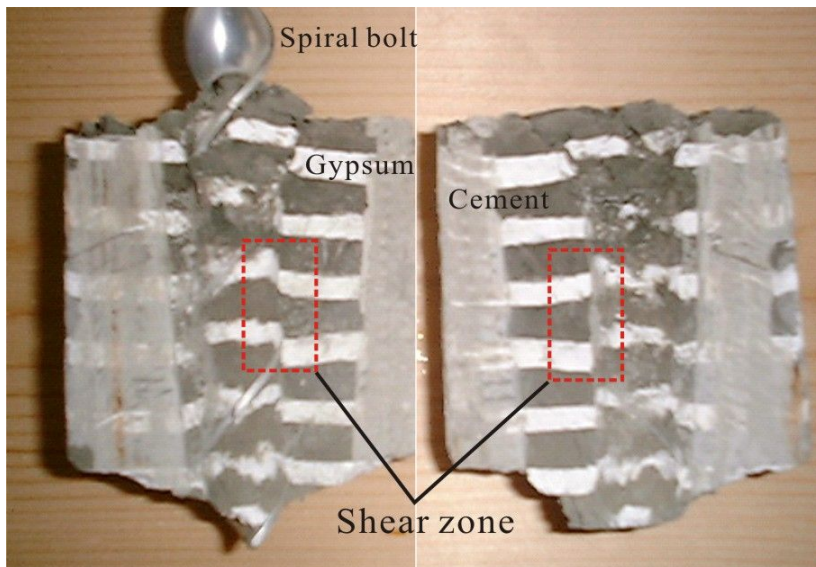


Figure 4.4 Shear failure zone occurred in artificial stratified model of gypsum-cement.

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 4.5(a)). 반면에 Spiral bolt의 경우는 파괴된 후에도 스파이럴 형상과 충전재가 맞물려있음을 볼 수 있다(Figure 4.5(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 향상 시킬 수 있음을 보여준다.

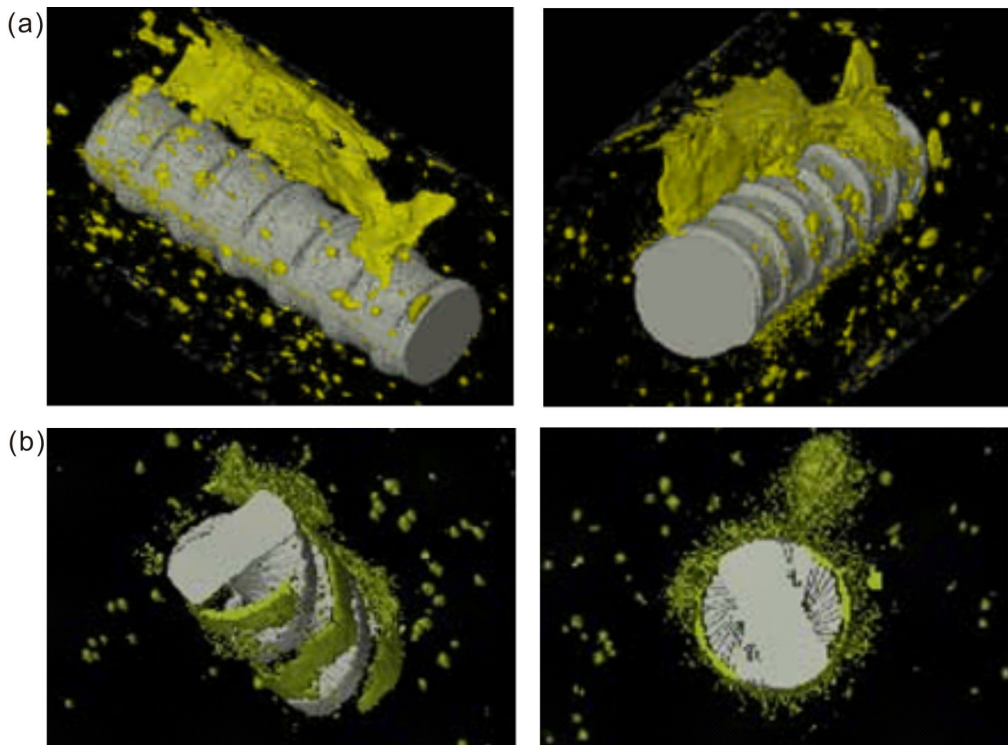


Figure 4.5 Failure images scanned by X-ray CT scanner: (a) rock bolt (b) spiral bolt (Ito et al., 2001; Kang et al, 2005).

4.1.1 Spiral bolt의 인발 및 압입시험에 의한 저항력 계산

Spiral bolt의 표면에 Spiral bolt의 미소 길이 Δl 인 임의 지점에서의 비틀림 각도 q 가 0° 인 축 중심으로부터 멀어질수록 비틀림 정도가 커지다가 q 가 45° 인 Spiral bolt 양쪽 가장자리에서 최대값을 보인다. Spiral bolt가 지표면에 대해 수직으로 설치되었을 경우, 축 방향 저항력 P 는 Spiral bolt 주변 지반에 발생하는 전단강도 τ_m 과 스파이럴 볼트 표면과 지반사이에 발생하는 마찰저항력으로 식 (4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \int_0^L \{(\pi d - 2\sqrt{2t})\tau_m + 2\sqrt{2t} \tan \phi_s \sigma_n\} dz \quad (4.1)$$

여기서, d :Spiral bolt의 폭, t :Spiral bolt의 길이, t :Spiral bolt의 두께, ϕ_s :Spiral bolt 표면과 지반과의 마찰각, σ_n :전단면에 작용하는 수직응력을 각각 나타낸다. τ_m 을 구하기 위한 여러 가지 방법들이 많은 연구자들에 의하여 제안 되었지만 (Terzaghi, 1966; Cundall, 1988), 본 연구에서는 Mohr-Coulomb식을 이용하였다 (Goodman, 1989; Hudson & Harrison, 1997). 즉, 지반의 전단강도 τ_m 은 지반의 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 의 관계로부터 식 (4.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_m = c + \sigma_n \tan \phi \quad (4.2)$$

여기에서, τ_m 은 수직응력 σ_n 의 크기에 따라 변하고 σ_n 은 지반의 구속압 σ_{n0} 와 스파이럴 볼트의 형상에 기인하는 응력 σ_{SP} 의 합으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_n = \sigma_{n0} + \sigma_{SP} \quad (4.3)$$

지반에 설치되어 있는 Spiral bolt의 미소길이가 Δl 인 임의의 지점에서 비틀림 각도 q 에 따른 힘의 관계를 나타내면 Figure 4.6과 같다. Spiral bolt에 축력이 작용할 때 Spiral bolt 표면에서 반력 ΔQ 가 발생하는데, 이것은 Spiral bolt 표면의 법

선방향 n 으로부터 축력이 작용하는 방향으로 ϕ_s 만큼 회전한 방향으로 작용한다. ϕ_s 는 지반에 따라 다르지만 대체적으로 $0^\circ \leq \phi_s \leq 45^\circ$ 범위에 속한다. ΔR 은 ΔQ 의 수평방향 성분으로써 Spiral bolt의 축 방향에 대해 직교하는 방향으로 작용하며, ΔP 은 ΔQ 의 수직방향 성분을 나타낸다. Spiral bolt 표면에 작용하는 ΔP 의 총합계를 P_0 라 할 때, σ_{SP} 를 고려하지 않을 경우 P_0 는 식 (4.1)~(4.3)으로부터 식 (4.4)를 유도할 수 있다.

$$P_0 = \int_0^L \{(\pi d - 2\sqrt{2t})(c + \sigma_{n0} \tan \phi) + 2\sqrt{2t} \tan \phi_s \sigma_{n0}\} dl \quad (4.4)$$

P_0 는 지반의 전단강도 파라미터와 Spiral bolt의 기하학적 조건 등을 알면 쉽게 구할 수 있다. σ_{n0} 은 g :지반의 단위체적중량, l :Spiral bolt의 길이, n :포아송비 등을 알면 식 (4.5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_{n0} = \frac{\left(\frac{\nu}{1-\nu} \int_0^L \gamma z dz \right)}{L} \quad (4.5)$$

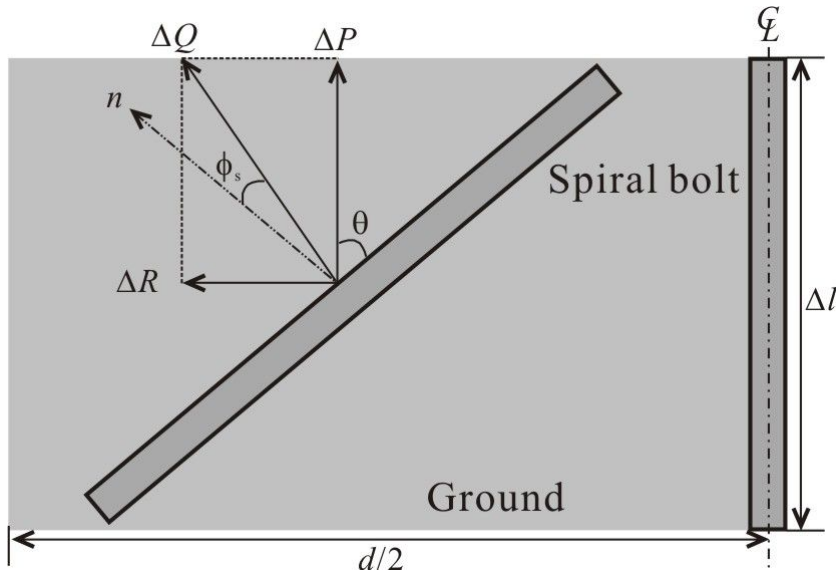


Figure 4.6 Force distribution on surface of spiral bolt under axial load.

지반을 탄성체라 가정하면, σ_{n0} 는 지반의 자체하중에 의해 발생하는 응력으로서 스파이럴 볼트 길이에 대한 평균수평응력과 같다. 지반에 상재하중이 작용하고 있는 경우는 Boussinesq해(Terzaghi, 1966)로부터 구한 응력을 식(4.5)에 대입하여 지반에 작용하는 구속압을 계산할 수 있다.

Spiral bolt가 지반을 압축함으로써 발생하는 저항력은 전단영역에 대한 수직응력 σ_{sp} 가 작용함으로써 전단강도가 증가하기 때문이다. Spiral bolt의 표면은 축 방향 중심으로부터 멀어질수록 비틀림 정도가 심해지며, 축 방향 중심에서 $d/2$ 떨어진 양쪽 가장자리는 $q = 45^\circ$ 가 된다. 스파이럴 볼트에 축력이 작용하면 Spiral bolt 양쪽 가장자리 이외의 표면에는 반력이 발생한다. 반력의 방향과 크기는 Spiral bolt 축 중심으로부터 양쪽 가장자리 사이의 거리에 따라 변한다. Figure 4.7은 Spiral bolt에 축력 P 가 작용할 때 미소길이 Δl 에 대한 $q = 0^\circ \sim 45^\circ$ 까지의 응력분포를 보여준다. 여기서, 축 방향과 평행하게 작용하는 ΔP 는 $\Delta P = Pdz \tan\theta$ 이며, 축 방향과 수직하게 작용하는 성분 ΔR 은 $\Delta R = Pdz \tan\theta \tan\pi/2 - (\theta + \phi_s)$ 로 계산된다. 결국 ΔR 과 Pdz 를 축 방향에 대해 적분한 값이 R 과 P_0 가 되므로, $q = 0^\circ \sim 45^\circ$ 까지의 R 성분 합력은 Boussinesq해(Terzaghi, 1966)로부터 구한 식 (4.6)과 같이 쓸 수 있다.

$$R = P_0 \int_0^{45} \tan\theta \tan \left\{ \frac{\pi}{2} - (\theta + \phi_s) \right\} d\theta \quad (4.6)$$

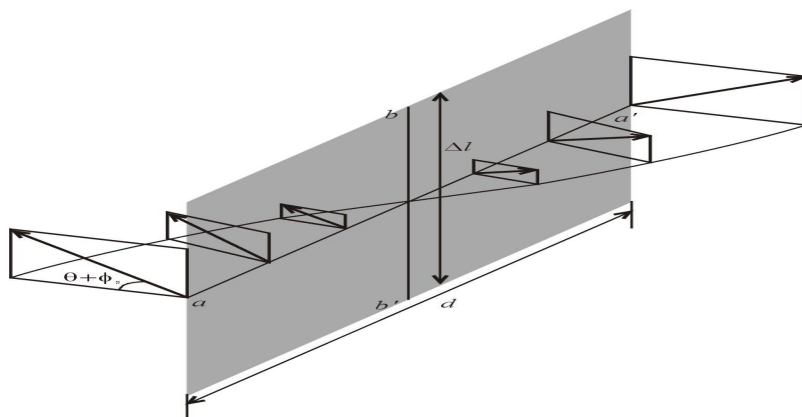


Figure 4.7 Force change according to surface angle of spiral bolt
(aa': lateral direction, bb': longitudinal direction).

Spiral bolt의 표면과 지반의 마찰각 ϕ_S 는 지반을 구성하고 있는 재료에 따라 다르며 일반적으로 내부마찰각과 같다. ϕ_S 가 클수록 R 은 작게 되며, $\phi_S = \phi$ 의 관계를 보이면 R 은 비교적 작은 값을 갖는다. 즉, $\phi_S = 10^\circ$ 일 때 $R = 0.449P_0$, $\phi_S = 20^\circ$ 일 때 $R = 0.304P_0$, $\phi_S = 30^\circ$ 일 때 $R = 0.205P_0$ 의 관계를 보인다. σ_{SP} 를 고려하지 않은 축력이 작용할 경우 지반의 전단강도에 의한 축 방향 저항력 P_0 의 20%나 그 이상의 축력이 Spiral bolt 축 방향과 수직인 방향으로 작용할 때 Spiral bolt가 지반을 압축시키는 것으로 판단된다.

4.1.2. Spiral bolt 재료의 특성

본 연구를 위한 실내 및 원위치 인발 시험에 사용된 Spiral bolt 재료의 역학적 특성은 Table 4.1, Table 4.2, Table 4.3과 같다. 특히 Spiral bolt의 시험 재료 선정에 있어서 록 볼트와의 유사조건을 충족하기 위하여 단면적 및 강도의 저하, 볼트와 천공경과의 비를 고려하였고, Spiral bolt 제작을 위한 SS400의 평철은 국내에서 생산되고 있는 KS D3503 평철의 규격을 사용하였으며, SD350으로 제작된 Spiral bolt는 SD350의 평철이 국내에서 생산되지 않은 관계로 이형봉강 SD350을 평철로 가공하여 사용하였다.

Table 4.1 Mechanical properties of flat steel bar used for spiral bolt

| Type | Material Symbols | Mechanical properties | | |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | Yield strength(MPa) | Tensile strength(MPa) | Percentage of elongation(%) |
| Flat steel bar | SS400 | 245 or less | 400 or more | 17 or more |
| | SD350 | 350 or more | 500 or more | 18 or more |

Table 4.2 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) | Unit weight (kg/m) | Reference (Test applied) |
|----------------|------------------|----------------------|------------------------|---|--------------------------------------|--------------------|--|
| Flat steel bar | SS400 | 245 or less | 400 or more | 32×9 | 288 | 2.26 | Laboratory pull-out test (cement-mortar) |
| | | | | 25×9 | 225 | 1.77 | Laboratory pull-out test (resin) |
| | | | | 25×6 32×9 | 150 288 | 1.18 2.26 | In-situ pull-out test (Slope) |
| | SD350 | 350 | 500 | 25×9 ($\phi 10\text{mm} \times 2$) | 382 | 1.77 | In-situ pull-out test (Tunnel) |

Table 4.3 Dimension of domestic flat bar (SS 400)

| Dimension | Unit weight | Dimension | Unit weight | Dimension | Unit weight |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| width×thickness | kg/m | width×thickness | kg/m | width×thickness | kg/m |
| 13×4 | 0.408 | 38×4.5 | 1.34 | 75×6 | 3.54 |
| 13×5 | 0.51 | 38×6 | 1.79 | 75×9 | 5.3 |
| 16×3 | 0.377 | 38×9 | 2.68 | 75×12 | 7.07 |
| 16×4.5 | 0.565 | 38×12 | 3.58 | 75×16 | 9.42 |
| 16×5 | 0.628 | 50×3 | 1.18 | 75×19 | 11.2 |
| 19×3 | 0.447 | 50×4 | 1.57 | 75×22 | 13 |
| 19×4.5 | 0.671 | 50×4.5 | 1.77 | 90×6 | 4.24 |
| 19×6 | 0.896 | 50×5 | 1.96 | 90×9 | 6.36 |
| 25×3 | 0.589 | 50×6 | 2.36 | 90×12 | 8.48 |
| 25×4.5 | 0.883 | 50×9 | 3.53 | 90×16 | 11.3 |
| 25×6 | 1.18 | 50×12 | 4.71 | 90×19 | 13.4 |
| 25×9 | 1.77 | 50×16 | 6.28 | 90×25 | 17.7 |
| 25×12 | 2.36 | 50×19 | 7.46 | 100×6 | 4.71 |
| 32×3 | 0.754 | 60×6 | 2.83 | 100×9 | 7.07 |
| 32×4.5 | 1.13 | 65×6 | 3.06 | 100×12 | 9.42 |
| 32×6 | 1.51 | 65×9 | 4.59 | 100×16 | 12.6 |
| 32×9 | 2.26 | 65×12 | 6.12 | 100×19 | 14.9 |
| 32×12 | 3.01 | 65×16 | 8.16 | 100×22 | 17.3 |
| 38×3 | 0.895 | 65×19 | 9.69 | 100×25 | 19.6 |

5. 실내인발시험

록 볼트와 Spiral bolt의 지보특성 및 효과 비교를 위하여 실내 인발시험에 필요한 재료시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 충전재는 시멘트-모르타르와 레진을 사용하였고, 두 지보재의 인발하중-변위, 구속압-변위-인발하중, 구속압 분포, 내부압-전단응력 관계와 충전재에 따른 인발하중-변위 관계를 규명하고자 실내인발시험을 수행하였다.

5.1 시험방법

실내 인발시험을 수행하기 위한 공시체는 Figure 5.1과 Figure 5.2와 같이 인공 암반으로서 연강 원통관을 사용하여 제작하였다. 연강 원통관의 크기는 외경 76.3 mm, 내경 69.1 mm, 길이 450 mm, 영률(E)은 206 GPa 그리고 포아송비(ν)는 0.3이다. 연강 원통관의 물리적 성질은 Table 5.1과 같다. 록 볼트와 Spiral bolt의 길이는 550 mm로 제작하였다.

Table 5.1 Mechanical properties of a thin-walled hollow cylindrical specimen.
 ϕ_{in} : inner diameter, t : thickness, E_r : Young's modulus, ν_r : Poisson's ratio

| Thin-walled hollow cylindrical specimen | | | |
|---|----------|-------------|---------|
| ϕ_{in} (mm) | t (mm) | E_r (GPa) | ν_r |
| 69.1 | 3.6 | 206 | 0.30 |

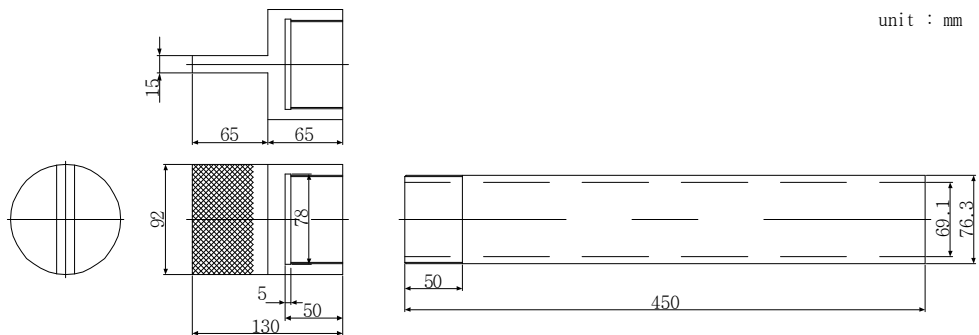


Figure 5.1 Accessories for laboratory pull-out test.

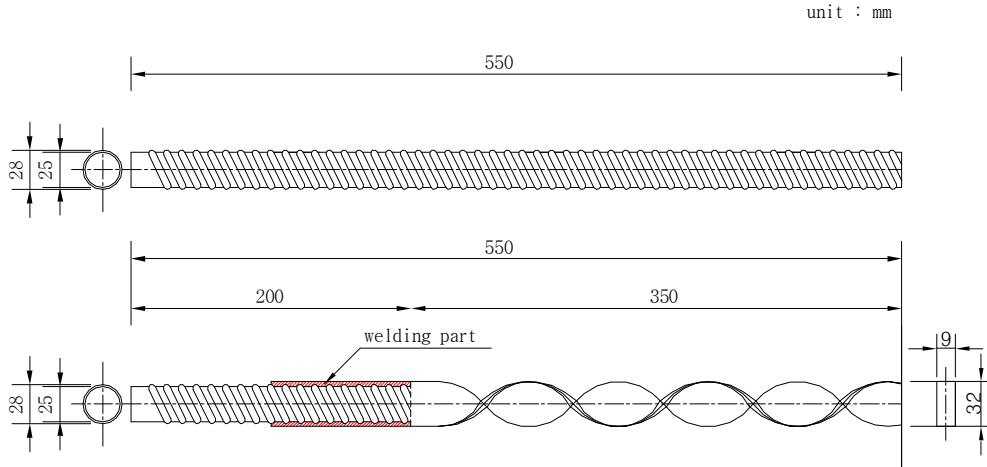


Figure 5.2 Schematic sketch of rock and spiral bolts.

인공암반과 지보재 사이의 그라우트는 시멘트-모르타르를 사용하였다. 공시체 제작은 록 볼트 혹은 Spiral bolt를 연강 원통관의 중앙에 위치시킨 후 시멘트-모르타르를 주입 후 고정시켰다. 공시체 하부에는 만능재료 시험기의 지그에 고정시키기 위해 특별히 제작한 굴곡형 기구를 연결하였다. 그리고 인발시험으로 인하여 연강 원통관에 발생하는 응력을 평가하기 위하여 그 표면에 4개의 로제트 게이지 (rosette gauge)를 100, 190, 280, 370 mm 위치마다 부착하였다(Figure 5.3).

실내인발시험에 사용되는 시험기는 Figure 5.4과 같다. 시험 과정은 우선 공시체의 축을 시험기의 축과 일직선상에 오도록 일치 시킨 후, 0.5kN정도의 초기하중을 가하여 공시체가 움직이지 않도록 고정시킨다. 이 때 공시체는 시험기의 위아래에 있는 고정용 지그를 이용하여 고정시켰다. 고정된 공시체를 0.5kN/sec의 하중속도로 인장하중을 가하면서 시험을 실시한다. 재하 장치는 영점 조정과 하중 속도의 조절이 가능한 만능 재료시험기(Model No. KPUT-100)를 사용하였다. 또한 로제트 게이지로부터 얻은 데이터는 디지털 변형률 측정기(Model No. DC3100)를 이용하여 측정 하였으며, 변위는 디지털 변위계(Model No. 543-464B)를 이용하여 측정하였다.

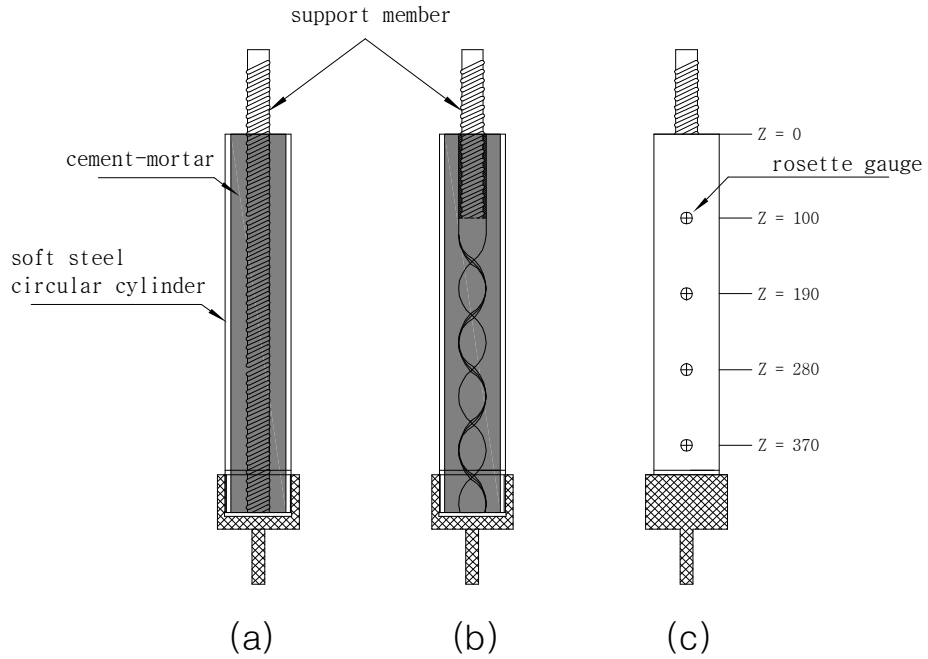


Figure 5.3 Layout for laboratory pull-out test: (a) rock bolt, (b) spiral bolt, and (c) strain rosette gauges on the surface.

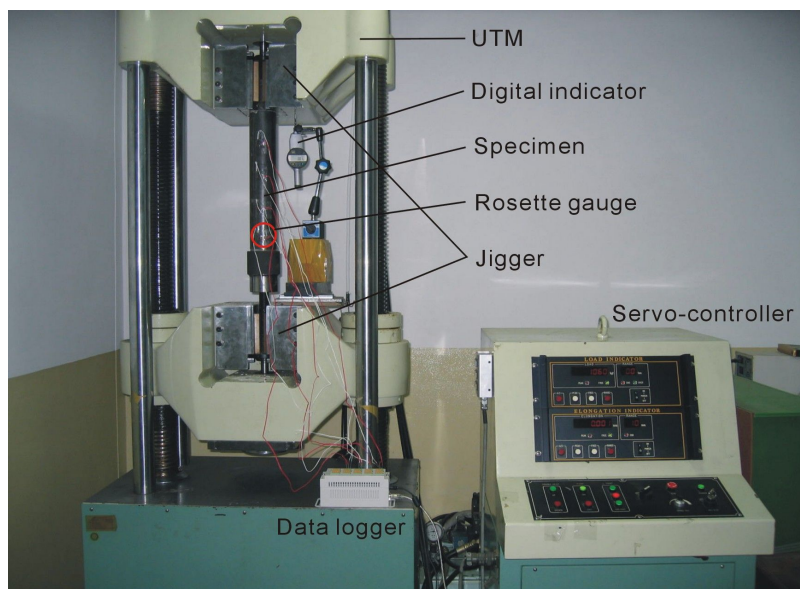


Figure 5.4 Universal testing machine for pull-out test, data logger and digital indicator for measuring strain and displacement.

5.2 Cement-Mortar 압축강도시험

지보재의 특성비교를 위한 인발시험을 수행하기 전에 1차 시험으로 그라우트 재료로 사용된 시멘트-모르타르의 일축압축강도 시험을 하여 그라우트 재료의 강도와 탄성계수, 포아송비 등을 구하였다. 시험편 제작에 사용된 시멘트-모르타르는 국내 R사에서 제작한 건식 모르타르를 사용하였고, 재료로 인한 미세한 차이를 없애기 위해 단일 제조업체의 모르타르만을 사용하였다. 재료의 특성은 Table 5.2와 같다.

Table 5.2 Mixing ratio of cement-mortar

| Type | Standard | Component ratio |
|----------|----------------------|-----------------|
| cement | portland cement | 59.5% |
| sand | 0.3 m/m max | 39.5% |
| compound | fluid compound, etc. | 1.0% |

물과 시멘트-모르타르의 혼합비는 0.288:1이며, 그라우트의 양생기간은 실내 및 현장에서 인발시험을 실시할 때 일반적으로 사용하는 7일과 28일의 두 가지 경우로 설정하였다(Figure 5.5). 재하장치로 사용한 장비는 100 ton용량의 유압식 만능재료시험기(Model No. KPUT-100)를 사용하였고, 재하속도는 ASTM C39-86(1986) 규정에 맞게 1.3 mm/min의 속도로 재하 하였다.

그라우트의 역학적 성질은 인발시험용 공시체와 같은 시기에 제작한 원주형 시험편을 이용하여 일축압축시험을 각각 5회 실시하여 그 평균값을 택하였다. 그라우트에 있어서 일축압축강도, 영률 및 포아송비는 양생기간 7일의 경우 24.76 MPa, 28.18 GPa, 0.27이며, 28일의 경우 36.97 MPa, 42.27 GPa, 0.25로 나타났다. 그라우트의 역학적 성질은 Table 5.3과 같다.

Table 5.3 Mechanical properties of grouting material with curing time. S_t : Uniaxial compressive strength, E_g : Young's modulus, ν_g : Poisson's ratio

| Grout(W:C-M=0.288:1) | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|---------|
| Curing | S_t (MPa) | E_g (GPa) | ν_g |
| 7 days | 24.76 | 28.18 | 0.27 |
| 28 days | 36.97 | 42.27 | 0.25 |



Figure 5.5 Curing of cylindrical specimens for uniaxial compression test.

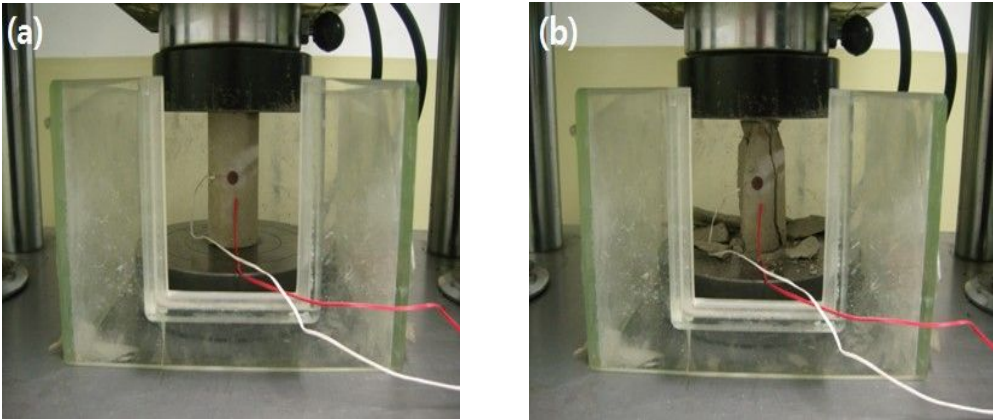


Figure 5.6 Views (a) before and (b) after uniaxial compression test.

5.3 구속압, 내부압, 전단응력 평가

실내인발시험을 수행할 때 연강 원통관의 표면에 로제트 게이지를 부착하여 측정한 결과에 의해 공시체에 발생하는 구속압, 내부압 및 전단응력 등을 계산하여 얻었다. 연강 원통관의 표면에 부착한 로제트 게이지로부터 얻어진 인발하중과 변형률의 변화를 한 예로 나타내면 Figure 5.7과 같다. 인발하중이 작용할 때 하중이 낮을 때는 선형적이며 탄성적인 거동을 보이지만 하중이 증가하면서 비선형적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 거동을 보이는 이유는 연강 원통관의 소성화에 기인하지 않고 지보재가 인발됨으로서 지보재와 그라우트 사이에 부착파괴가 발생하여 공시체 내부에서 팽창압이 발생하여 나타난 현상으로 판단할 수 있다(강성승 외, 2006).

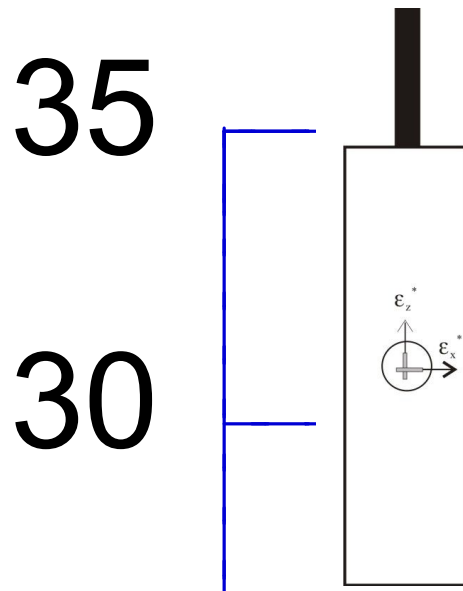


Figure 5.7 Pull-out load versus axial and lateral strains.

선형영역에서는 전단변형률은 거의 0이 되므로 x 와 y 방향의 변형률이 주변형률이 되는 반면, 비선형영역에서는 공시체 내부로 변화가 일어나지 않은 경우 Figure 5.7의 실선으로 나타난 부분의 거동, 즉 실선에서 떨어진 변형률은 연강 원통관 내

부의 변화에 의한 것으로 가정할 수 있다. 이 가정으로부터 x 와 y 방향에서 측정된 변형률로부터 탄성거동과 비탄성거동을 보이는 변형률의 차를 각각 ϵ_x^* , ϵ_z^* 라 하면 x 방향의 진변형률(true strain) ϵ_x 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon_x = \epsilon_x^* + \nu\epsilon_z^* \quad (5.1)$$

구속압은 연강 원통관의 내압으로 얇은 원통관이론(황봉갑, 2002)을 이용하여 구하였다. 구속압은 다음 식(4.2)에 의해 구할 수 있다.

$$P_{ex} = E\frac{t}{r}(\epsilon_x^* + \nu\epsilon_z^*) + E\frac{t}{r}\epsilon_x = \frac{t}{r}\sigma_x \quad (5.2)$$

여기서, P_{ex} 는 구속압, t 는 원통관의 두께, r 은 원통관 내부 반경, E 는 원통관의 영률, ν 는 원통관의 포아송비 그리고 σ_x 는 x 방향의 응력이다. Figure 5.8은 인발시험을 수행할 때 발생하는 구속압과 내부압을 도시한 것이다.

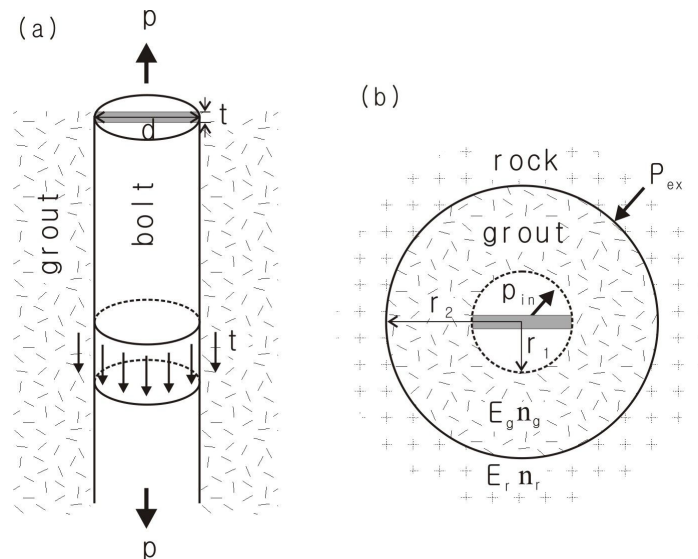


Figure 5.8 Schematic diagram of pull-out test and theory of a thin-walled hollow cylinder.

내부압은 인발시험에서 원통관 내 지보재와 그라우트 사이에 전단응력의 발생으로 인해 원통관 내 팽창이 발생함으로써 생기는 압력으로 내부압과 구속압은 다음 식 (5.3)과 같은 관계를 갖는다(Yazici and Kaiser, 1992).

$$P_{in} = \beta P_{ex} \quad (5.3)$$

여기서, β 는 다음과 같다. Figure 5.8의 오른쪽에서 그림에서 볼트와 그라우트 경계면의 변위(u_g)와 암석과 그라우트 경계면의 변위(u_r)는 식 (5.4)와 식 (5.5)에 의해 구할 수 있다(Jaeger and Cook, 1977; Popov, 1978).

$$u_g = \frac{(1+\nu_g)(1-2\nu_g)}{E_g} \frac{P_{in}r_1^2 - P_{ex}r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r_2 + \frac{(1+\nu_g)}{E_g} \frac{(P_{in} - P_{ex})r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r_2} \quad (5.4)$$

$$u_r = \frac{P_{ex}r_2}{E_r} (1 + \nu_r) \quad (5.5)$$

그라우트와 암석 경계면의 변위는 동등함이 필요하므로 다음식이 성립한다.

$$\begin{aligned} & \frac{P_{ex}r_2}{E_r} (1 + \nu_r) \\ &= \frac{(1+\nu_g)(1-2\nu_g)}{E_g} \frac{P_{in}r_1^2 - P_{ex}r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r_2 + \frac{(1+\nu_g)}{E_g} \frac{(P_{in} - P_{ex})r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r_2} \end{aligned} \quad (5.6)$$

P_{in} 을 P_{ex} 에 대해 정리하게 되면,

$$\therefore P_{in} = \frac{\frac{1+\nu_r}{E_r} + \frac{1+\nu_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1-2\nu_g)r_2^2 + r_1^2]}{\frac{1+\nu_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1-2\nu_g)r_1^2 + r_1^2]} P_{ex} \quad (5.7)$$

따라서, P_{in} 은 P_{ex} 항에 의해 식 (5.8)처럼 표현될 수 있다.

$$\beta = \frac{\frac{1+v_r}{E_r} + \frac{1+v_g}{E_g(r_2^2-r_1^2)} [(1-2v_g)r_2^2 + r_1^2]}{\frac{1+v_g}{E_g(r_2^2-r_1^2)} [(1-2v)r_1^2 + r_1^2]} \quad (5.8)$$

여기서 E_r, ν_r 은 암반의 영률과 포아송비, E_g, ν_g 는 그라우트의 영률과 포아송비, u_r, ν_g 는 볼트-그라우트 경계면에서의 변위와 그라우트-암석사이의 변위이다. 본 연구에서는 연강 원통관을 인공암반이라 가정하였으므로 암반의 영률과 포아송비 대신에 연강 원통관의 영률과 포아송비를 이용하였다.

연강 원통관의 표면에 부착한 로제트 게이지로부터 변형률을 측정하여 볼트와 그라우트 경계면의 전단응력을 다음 식 (5.9)와 같이 계산하였다.

$$\tau = \frac{P}{\pi dl} \quad (5.9)$$

여기서, τ 는 전단응력, P 는 인발하중, d 는 볼트의 직경, l 은 정착길이 이다. 이 론식에 의한 전단응력은 식 (5.10)로 표현할 수 있다(Farmer, 1975).

$$\tau_{th} = \frac{1}{2} r \alpha \sigma \exp(-\alpha x) \quad (5.10)$$

여기서, τ_{th} 는 이론식에 의한 전단응력, r 은 볼트의 반경, σ 는 볼트 선단에 가해진 인발력, x 는 정착길이, α 는 축력 및 전단응력에 대한 상수로 식 (5.11)과 식 (5.12)에 의해 구할 수 있다.

그라우트 직경이 얇은 경우($R-r > r$)

$$\alpha^2 = \frac{K}{r(R-r)} \quad (5.11)$$

그라우트 직경이 두꺼운 경우($R-r < r$)

$$\alpha^2 = \frac{K}{r^2 \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (5.12)$$

여기서, R 은 천공경의 반경, r 은 볼트의 반경, K 는 그라우트의 탄성계수(E_g)와 볼트의 탄성계수(E_b)의 비이다.

5.4 실내인발시험 결과분석

5.4.1 인발하중-변위 관계

양생시간 7일과 28일에 대한 록 볼트와 Spiral bolt의 인발시험 결과를 Table 5.4에 정리하였으며, 인발하중-변위 곡선은 Figure 5.9에 나타내었다. 양생기간 7일의 경우 시험을 시작한 후 두 지보재 모두 완만한 경향을 보이다가 록 볼트는 인발하중이 변위가 12.5 mm지점인 198 kN까지 급격하게 증가하다 그 이후로 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 인발하중-변위 곡선에서 알 수 있듯이 록 볼트의 최대 변위는 18.3 mm이고 최대인발하중은 226.4 kN이다. Spiral bolt는 9.8 mm지점인 208 kN까지 급격히 증가하다 그 이후로는 록 볼트와 비슷하게 완만한 증가 형태를 보였다. Spiral bolt의 최대변위는 20.9 mm이고 최대인발하중은 285.6 kN이다. 양생기간 28일의 경우 록 볼트의 최대변위는 14.0 mm이고 최대인발하중은 240.1 kN, Spiral bolt의 최대변위는 19.1 mm이고 최대인발하중은 287.1 kN로 나타났다.

Table 5.4 Results of displacement, pull-out load, external pressure, internal pressure, and shear stress. u_{\max} : maximum displacement, L_{\max} : maximum pull-out load, $p_{ex-\max}$: maximum external pressure, $p_{in-\max}$: maximum internal pressure, τ_{\max} : maximum shear stress

| | Rock bolt | | Spiral bolt | |
|---------------------|-----------|---------|-------------|---------|
| | 7 days | 28 days | 7 days | 28 days |
| u_{\max} (mm) | 18.3 | 14.0 | 20.9 | 19.1 |
| L_{\max} (kN) | 226.4 | 240.1 | 285.6 | 287.1 |
| $p_{ex-\max}$ (MPa) | 3.1 | 5.5 | 7.5 | 10.3 |
| $p_{in-\max}$ (MPa) | 11.5 | 22.9 | 28.1 | 43.0 |
| τ_{\max} (MPa) | 9.6 | 10.2 | 12.1 | 12.2 |

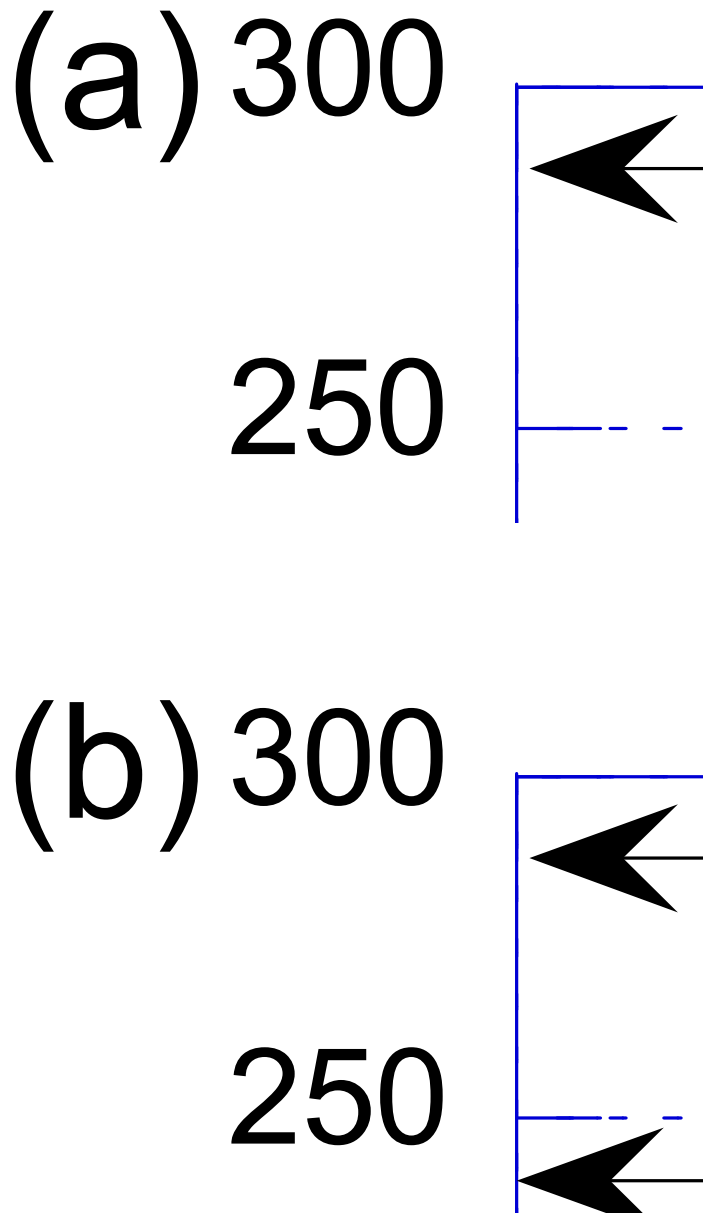


Figure 5.9 Pull-out load versus displacement.

5.4.2 구속압-변위-인발하중 관계

양생시간 7일과 28일에 대한 록 볼트와 Spiral bolt의 구속압-변위-인발하중 곡선을 Figure 5.10에 나타내었다. 즉, 구속압-변위 관계는 Figures 5.10(a)와 (b)에, 구속압-인발하중 관계는 Figures 5.10(c)와 (d)에서 각각 보여준다. 양생기간 7일의 경우 록 볼트는 최대변위 18.3 mm/최대인발하중 226.4 kN인 위치에서 3.1 MPa의 구속압을 보인 반면, Spiral bolt는 최대변위 20.9 mm/최대인발하중 285.6 kN인 위치에서 7.5 MPa의 구속압을 보였다. 양생기간 28일의 경우 록 볼트는 최대변위 14.0 mm/최대인발하중 240.1 kN인 위치에서 5.5 MPa의 구속압을 보인 반면, 스파이럴 볼트는 최대변위 19.1 mm/최대인발하중 287.1 kN인 위치에서 10.3 MPa의 구속압을 보였다(Table 5.4). 즉, Spiral bolt가 록 볼트보다 약 1.9배(28일)~2.4배(7일) 정도 큰 구속압이 작용한 것으로 나타났다. 지보재 구속압은 양생기간의 증가할수록 증가하는 비례관계에 있음을 알 수 있다.

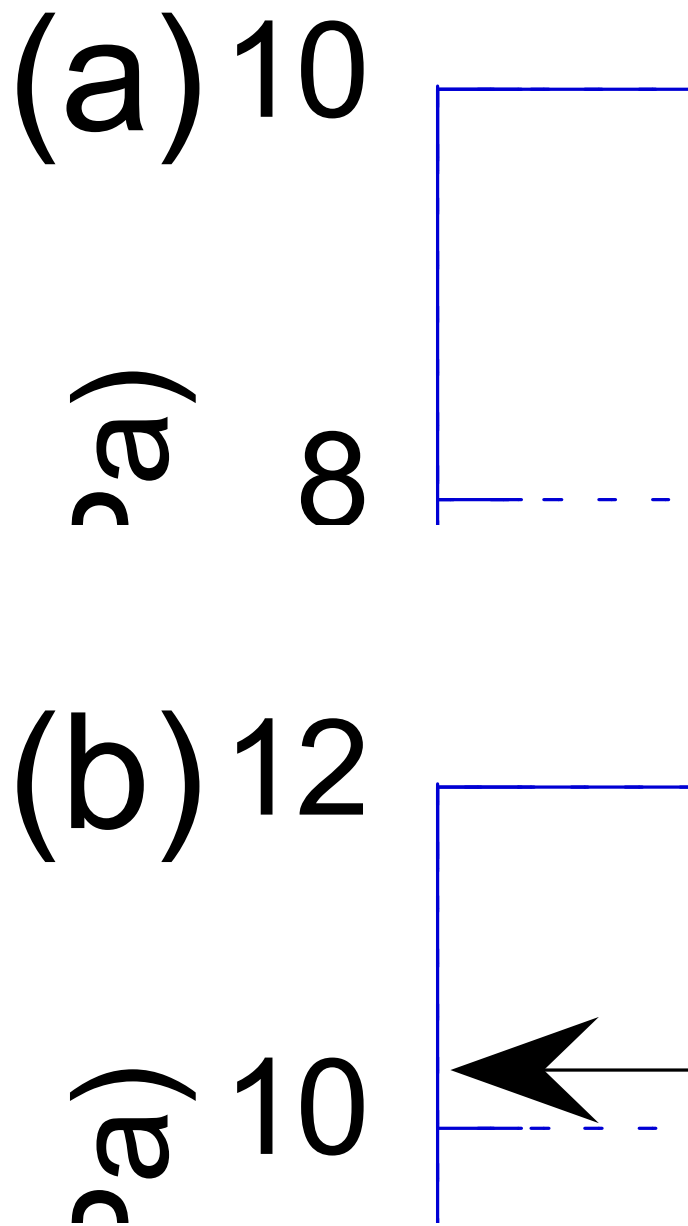


Figure 5.10 External pressure versus displacement and pressure versus pull-out load.

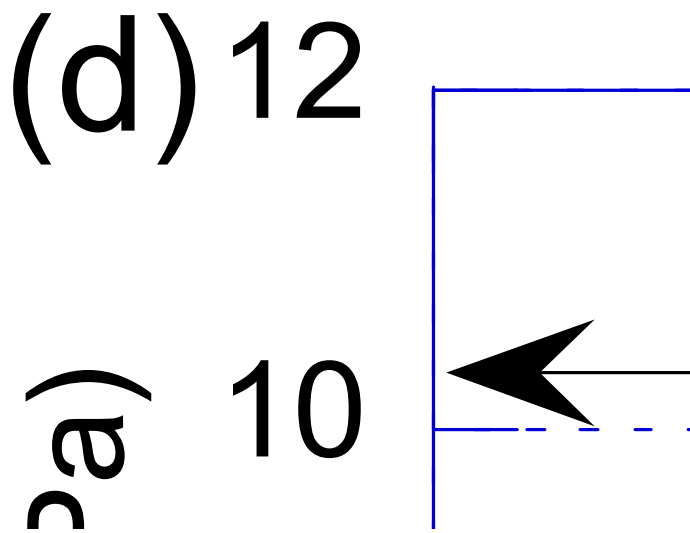
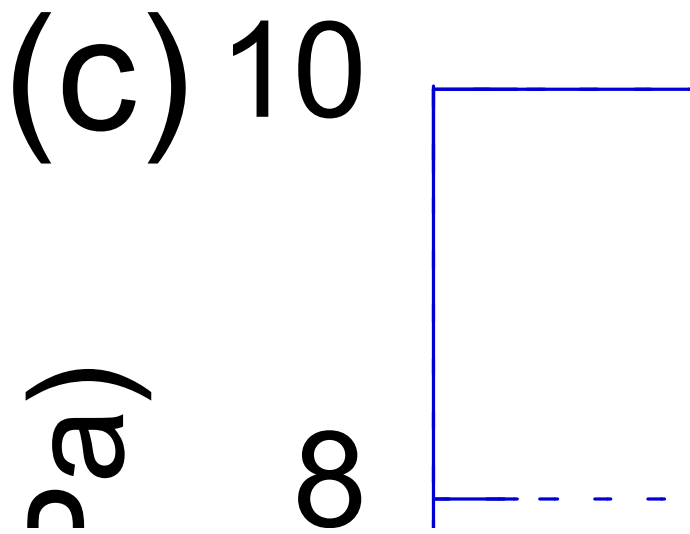


Figure 5.10 Continued.

5.4.3 구속압 분포

인발시험에 의한 연강 원통관에 부착된 로제트게이지 위치(Figure 5.5 (c), $z=100$ mm, 190mm, 280mm, 370mm)에 따른 지보재의 구속압과 변위 변화, 그리고 구속압의 분포 변화를 양생기간 7일과 28일에 대하여 살펴보았다. RB-25(7 days)는 변위가 약 8mm가 발생하기 이전까지는 각 z 지점간의 구속압은 차이가 거의 없었으나 8mm 이상의 변위가 발생하기 시작하였을 때부터 각각의 z 지점의 구속압은 차이가 나타나기 시작하며 $z=100\text{mm} > z=190\text{mm} > z=280\text{mm} > z=370\text{mm}$ 의 순으로 구속압이 높았다(Figure 5.11(a), Figure 5.11(b)에서 이와 같은 사실을 명확하게 보여준다. SB-25(7 days)는 Figure 5.11(c)와 같이 변위는 구속압과 함께 증가하며 변위가 약 6 mm 발생하였을 때 각 z 지점의 구속압은 차이가 나타나기 시작한다. Figure 5.11(d)를 통해 변위량에 따른 구속압의 분포를 살펴보면 Figure 5.11(c)와 마찬가지로 z 의 거리가 늘어날수록 구속압이 감소하여 $z=370$ mm일 때 최소의 구속압을 발휘하는 것으로 나타났다.

RB-25(28 days)는 변위가 증가할수록 구속압 역시 증가함을 보이며(Figure 5.11(e)), 구속압의 크기는 $z=100\text{mm} > z=190\text{mm} > z=370\text{mm} > z=280\text{mm}$ 순으로 나타났다. 특히 변위가 약 2 mm정도 발생하였을 때 각 z 지점의 구속압의 차이는 커짐을 알 수 있다. Figure 5.11(f) 역시 같은 결과를 나타낸다. SB-25(28 days)에 대한 결과 값은 Figure 5.11(g)와 같다. 즉, SB-25(28 days)는 약 3mm의 변위가 발생할 시점부터 각 z 지점의 구속압은 $z=100\text{mm} > z=190\text{mm} > z=280\text{mm} > z=370\text{mm}$ 순으로 차이가 나타나기 시작한다(Figure 5.11(h))

이와 같이 각 위치에 따른 구속압의 분포는 지보재-그라우트-암반 사이에 작용하고 있는 지보 능력 상태를 파악하는데 있어서 매우 중요하다. 즉, 지보재-그라우트의 상호작용이 충분하게 발휘될지라도 지보재-그라우트의 작용이 암반에 약하게 작용한다면 충분한 지보능력을 발휘하지 못한 채 지보재-그라우트가 암반으로부터 분리되는 경우가 발생하게 된다. 따라서 지보재-그라우트-암반 사이에는 적절한 구속압이 작용되어야 지보효과를 높일 수 있다. 또한, 인발하중에 의한 지보재-그라우트 경계면에서의 파괴 형태는 지보 능력을 평가하는데 있어서 매우 중요하다. 왜냐하면, 지보재-그라우트 경계면의 파괴는 동시에 전체적으로 일어나지 않고 점진적으로 일어나며, 파괴가 일어나는 위치도 다르기 때문에 경계면 파괴와 관련 있는

각 위치에 따른 구속압의 평가는 반드시 이루어져야 한다. 즉, 인발하중이 단계적으로 작용할 때 지보재-그라우트 경계면의 어떤 위치에서부터 파괴가 일어나는지를 살펴보아야 한다. 최근에는 이러한 파괴 형태를 X-ray CT 촬영으로 시각화하는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Ito et al., 2001; 강성승 외, 2005) 한편, 구속압의 분포는 지보재를 감싸고 있는 그라우트의 강도, 탄성률, 포아송비 등과 같은 물리적 성질뿐만 아니라 시추공 내 밀실도의 중요성을 간접적으로 제시해 준다. 즉, 지보재-그라우트-암반에 있어서 지보재와 암반을 밀착시켜주는 그라우트의 물리적 성질이 합리적이어야 함을 의미한다.

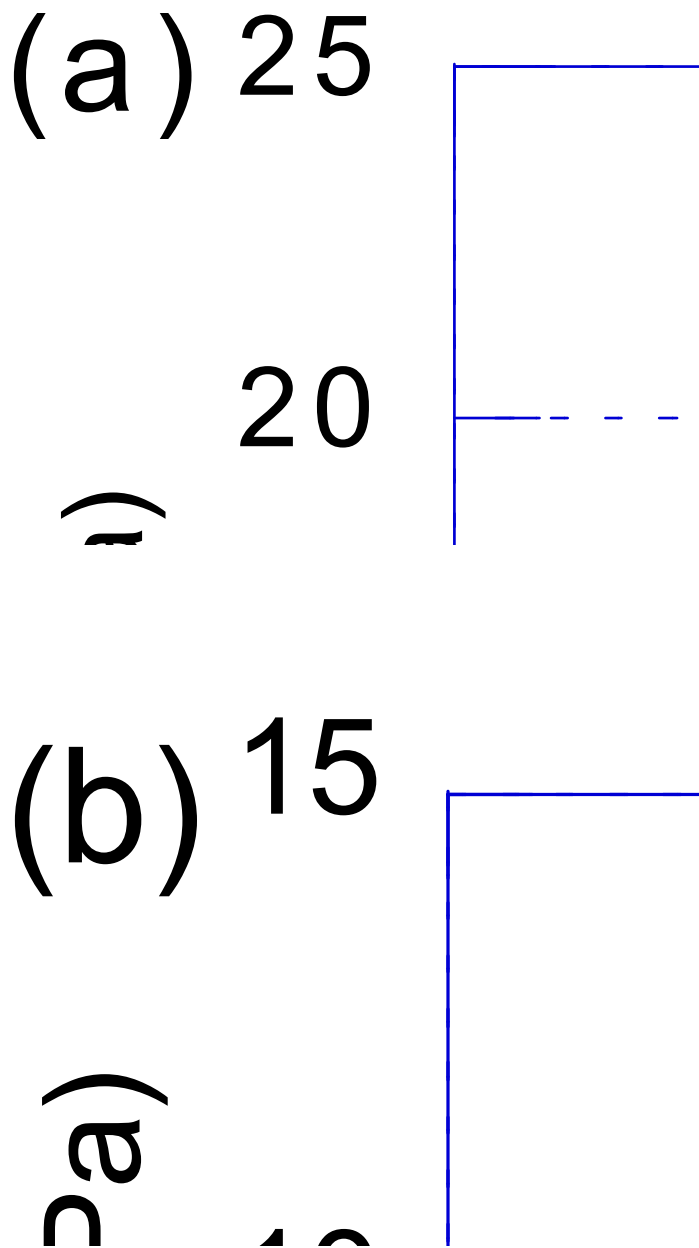


Figure 5.11 External pressure versus displacement and distribution of external pressure according to z position.

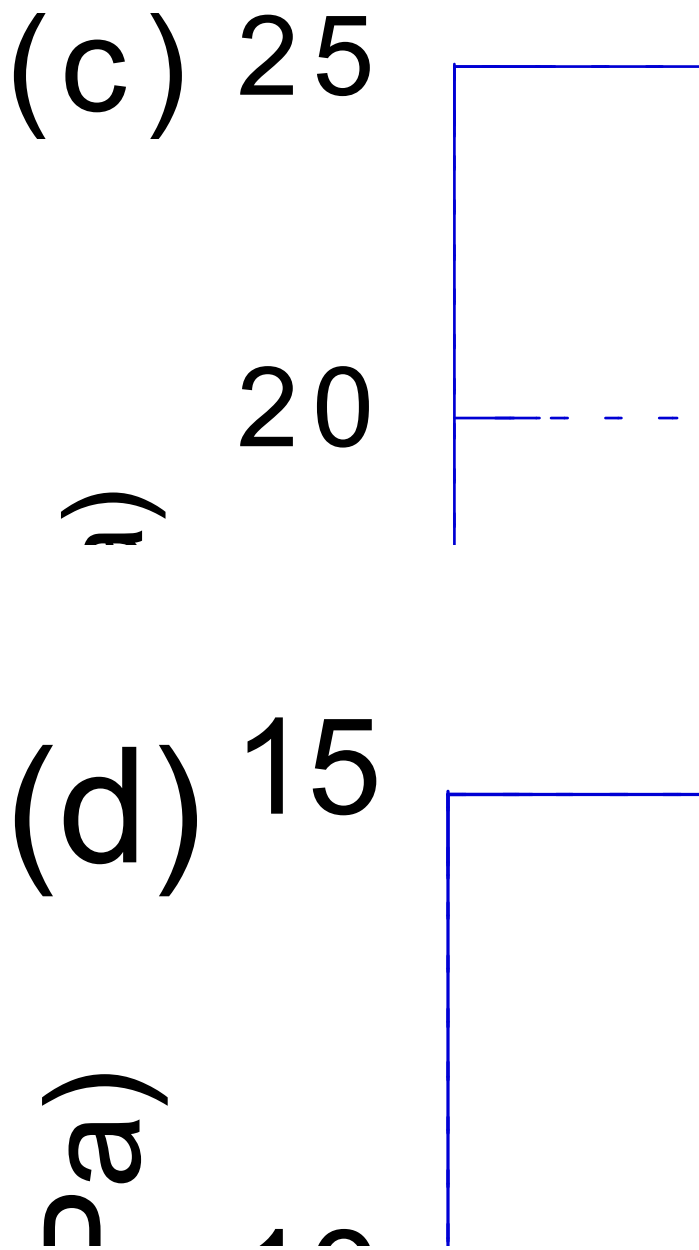


Figure 5.11 Continued.

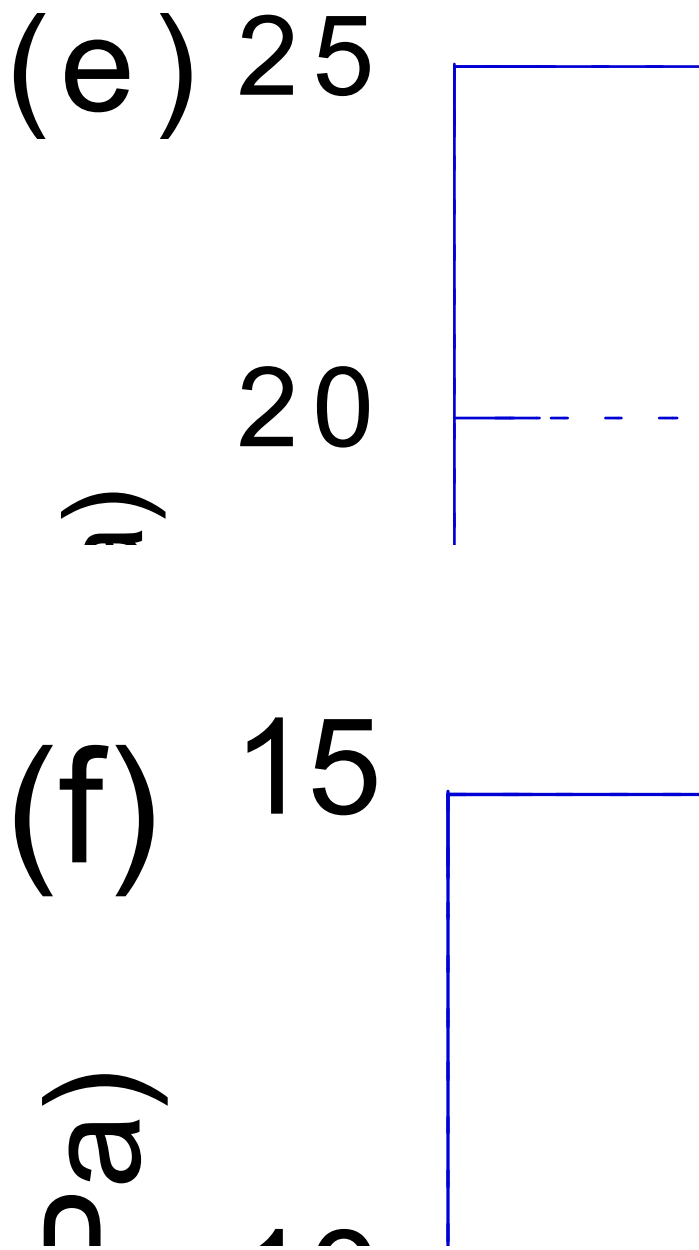


Figure 5.11 Continued.

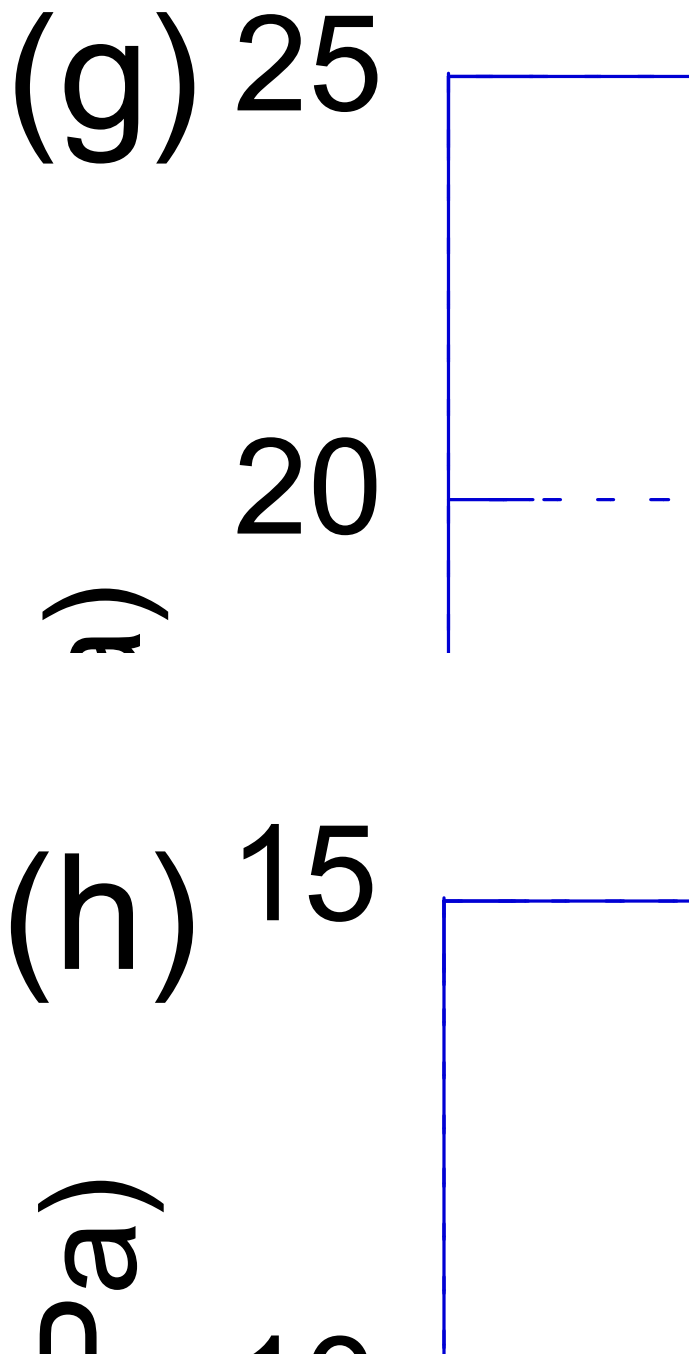


Figure 5.11 Continued.

5.4.4 내부압-전단응력 관계

양생시간 7일과 28일에 대한 록 볼트와 Spiral bolt의 내부압-전단응력 곡선을 Figure 5.12에 나타내었다. 지보재와 그라우트 경계면에 작용하는 전단응력은 지보재의 표면적으로 최대인발하중을 나눈 것으로 나타낼 수 있으며, 즉, 전단응력은 $\tau = \frac{P}{\pi dl}$ 식(5.9)로 구할 수 있다. P 는 최대인발하중, d 는 지보재의 직경(폭), l 은 지보재의 길이를 각각 나타낸다. 양생기간 7일의 경우(Figure 5.12(a)) 록 볼트는 최대내부압이 11.5 MPa인 지점에서 최대전단응력 9.6 MPa, Spiral bolt는 최대내부압이 28.1 MPa인 지점에서 최대전단응력 12.1 MPa를 보였다. 양생기간 28일의 경우(Figure 5.12(b)) 록 볼트는 최대내부압이 22.9 MPa인 지점에서 최대전단응력 10.2 MPa, Spiral bolt는 최대내부압이 43.0 MPa인 지점에서 최대전단응력 12.2 MPa를 보였다(Table 5.4). 내부압-전단응력 곡선에서 알 수 있듯이 내부압은 양생기간의 증가와 함께 증가하는 경향을 보인 반면, 전단응력의 경우 뚜렷한 특징을 보이지 않는다. 지보재와 그라우트 사이의 내부압은 Spiral bolt가 록 볼트보다 더 크게 작용한 것으로 나타났다.

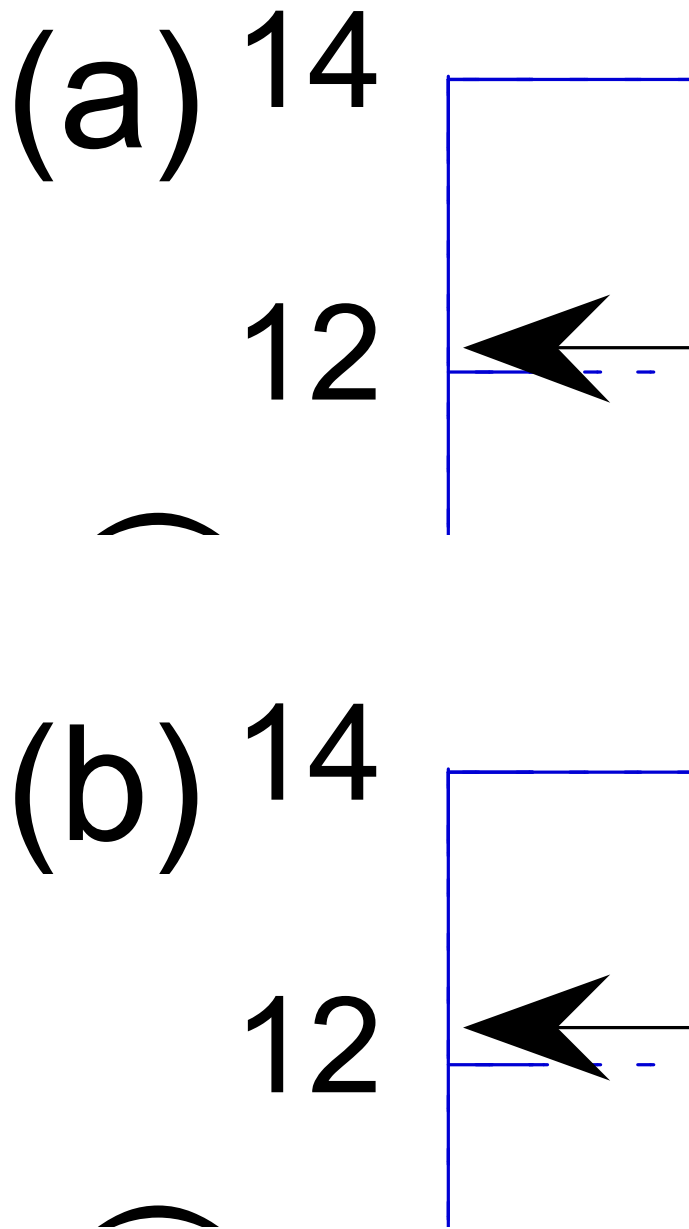


Figure 5.12 Shear stress versus internal pressure for spiral bolt after (a) 7 days and (b) 28 days.

이상의 결과를 정리하면 다음과 같다. 인발하중-변위 관계에서 양생기간 7일에 대한 록 볼트의 최대변위는 18.3 mm, 최대인발하중은 226.4 kN, Spiral bolt의 최대변위는 20.9 mm, 최대인발하중은 285.6 kN인 반면, 양생기간 28일의 경우 록 볼트의 최대변위는 14.0 mm, 최대인발하중은 240.1 kN, Spiral bolt의 최대변위는 19.1 mm이고 최대인발하중은 287.1 kN로 나타났다. 즉, 양생기간이 길 경우 두 지보재의 변위는 거의 동일하거나 감소하는 경향을 보였는데, 그 원인은 양생기간에 따라 그라우트의 압축강도가 증가하므로 지보재와 그라우트 사이의 부착력이 증가하기 때문으로 판단된다.

구속압-변위-인발하중 관계에서 양생기간 7일의 경우 록 볼트는 최대변위 18.3 mm/최대인발하중 226.4 kN인 위치에서 구속압 3.1 MPa. Spiral bolt는 최대변위 20.9 mm/최대인발하중 285.6 kN인 위치에서 7.5 MPa의 구속압을 보인 반면, 양생기간 28일의 경우 록 볼트는 최대변위 14.0 mm/최대인발하중 240.1 kN에서 구속압 5.5 MPa, Spiral bolt는 최대변위 19.1 mm/최대인발하중 287.1 kN에서 10.3 MPa의 구속압을 보였다. 즉, 동일한 인발하중단계에서 Spiral bolt의 구속압이 록 볼트보다 크게 나타나는데, 이러한 사실은 같은 조건하에 있는 지반이나 암반에 지보재를 설치할 경우 Spiral bolt가 록 볼트보다 지반이나 암반의 안정성을 확보하는데 더 효과적임을 의미한다.

내부압-전단응력 관계에서 양생기간 7일의 경우 록 볼트는 최대내부압이 11.5 MPa에서 최대전단응력 9.6 MPa, Spiral bolt는 최대내부압이 28.1 MPa에서 최대전단응력 12.1 MPa를 보인 반면, 양생기간 28일의 경우 록 볼트는 최대내부압이 22.9 MPa에서 최대전단응력 10.2 MPa, Spiral bolt는 최대내부압이 43.0 MPa에서 최대전단응력 12.2 MPa를 보였다.

따라서, 지보재의 지보특성은 그라우트 재료의 양생기간과 지보재의 형상에 따라서 다르게 나타남을 알 수 있다. 또한 같은 조건하에 있는 지반이나 암반에 지보재를 설치할 경우 새로운 형태의 지보재인 Spiral bolt가 기존의 지보재인 록 볼트보다 인발하중과 구속압을 더 크게 발휘하는 것으로 판단된다.

5.5 Resin 충전 Rock bolt와 Spiral bolt의 실내인발시험

5.5.1 시험개요

록 볼트와 Spiral bolt의 레진 충전에 따른 지보재의 특성을 파악하기 위하여 실내인발시험을 수행하였으며, 실내인발시험을 위한 시료의 물리적 특성은 Table 5.5 와 같고, 레진의 특성은 Table 5.6에 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 획득하였으며, 실내인발시험은 Figure 5.13과 같다.

Table 5.5 Physical properties of sample

| Description | Steel Pipe | | Spiral bolt | | | | Rock bolt | | Filler |
|-------------|---------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------------------------|---------------|-------------|--------|
| | Diameter (cm) | Length (cm) | Width (cm) | Thickness (cm) | Length (cm) | Reinforcing rod diameter (cm) | Diameter (cm) | Length (cm) | |
| Gauge | 4.5 | 300 | 2.5 | 0.9 | 330 | 1 | 2.5 | 330 | Resin |

Table 5.6 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 |



Figure 5.13 Test equipments.

5.5.2 시험방법

레진충전에 따른 실내 인발시험은 천공 길이가 3m인 관계로 급결형 1개, 선단형 1개, 충전형 1개를 각각 사용하였으며, 인발시험은 시공 후 24시간 경과한 뒤에 수행하였다. 인발하중 시험은 레진충전의 경우 2회씩 실시하였다. 1회의 최대인발하중을 작용시켜 시험을 완료한 다음 10분 후에 2회, 3회의 인발시험을 수행하였다. 이것은 지보재와 암반사이의 최대인발하중 단계에 따른 지보거동 상태를 파악하기 위한 목적으로써 동일한 시험편에 대하여 동일 조건으로 3회의 인발시험이 필요하기 때문이다.

5.5.3 실내인발시험 결과분석

레진충전에 따른 Spiral bolt 및 록 볼트의 실내인발시험 결과를 나타내면 Figure 5.14와 같다. 록 볼트의 경우 1회 인발시험(RB1-1)을 실시했을 때 변위 20mm에서 최대인발하중 17.5tf를 보이다가 2회 인발시험(RB1-2)에서는 변위 37mm에서 최대인발하중 17tf를 보였다. 스파이럴 볼트의 경우 약간의 차이는 보이

나 1, 2회 횃수에 관계없이 변위 18mm에서 최대인발하중 20tf를 보였다. 이상의 결과만을 고려해 볼 때, 레진의 경우 록 볼트보다 Spiral bolt의 최대인발하중이 약 2.5tf 정도 더 높은 것으로 나타났다.

또한 레진을 사용한 경우에 있어서 록 볼트의 변위분포는 인발 횃수에 따라 차이를 보이지만 Spiral bolt의 변위분포는 인발 횃수에 관계없이 안정적임을 알 수 있다. 또한 최대인발하중에 있어서도 Spiral bolt가 록 볼트보다 높게 나타났다. 즉, 암반에 대한 지보재의 지보 안정성, 지보 회복력, 그리고 지보 유지력 측면에서도 Spiral bolt가 록 볼트보다 유리하게 작용함을 나타낸다. 따라서, 암반에서의 지보재에 대한 지보효과를 보다 정확하고 높은 신뢰도를 얻기 위해서는 실내뿐만 아니라 현장에서도 1회가 아닌 최소 2~3회의 인발시험을 실시하여 그 결과로서 지보성능을 평가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

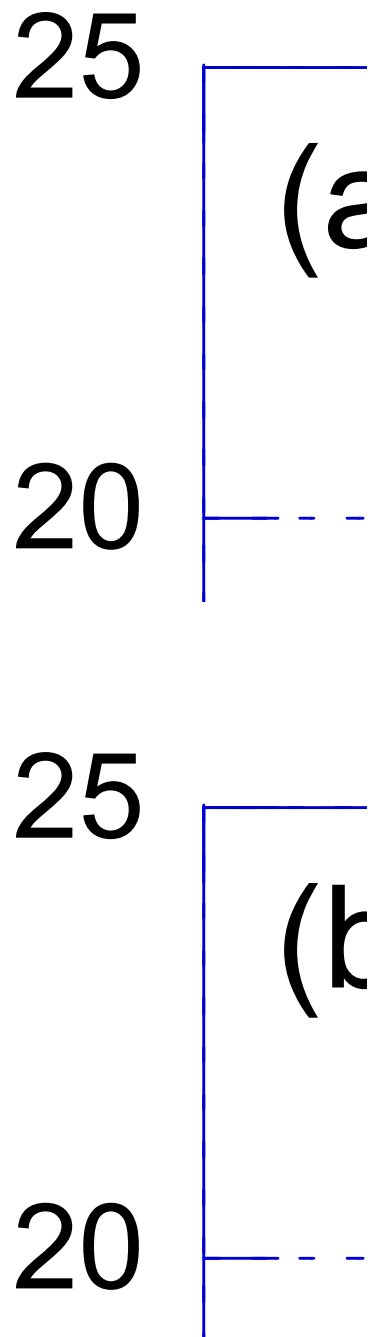


Figure 5.14 Results from laboratory pull-out tests of rock and spiral bolts for effects of resin characteristics.

6. 원위치 인발시험

6.1 암사면 원위치 인발시험

암사면에서의 원위치 인발시험은 실내시험과 수치해석 결과를 토대로 충전제 시멘트 모르타르를 사용하여 양생 시간과 인발 하중 단계에 따른 록 볼트와 Spiral bolt의 지보재 특성 및 거동을 파악하고자 원위치 인발 시험을 수행하였다.

6.1.1 시험개요

록 볼트와 Spiral bolt의 시멘트-모르타르 충전에 따른 지보재의 특성을 파악하기 위하여 전남 화순군 구암리(N35°04'03.5"/E127°02'57.8")에 위치한 화강암 채석장(Figure 6.1)에서 원위치 인발시험을 실시하였다. 원위치 인발시험을 수행하기 위하여 총 29개의 시추공을 천공하였다(Table 6.1, Figure 6.2). 시추공의 크기와 볼트의 길이는 현재 터널에서 지반보강을 하기 위해 일반적으로 사용되고 있는 기준을 적용하였다.

Table 6.1 Location of boreholes for rock bolts and spiral bolts

| 구분 | Spiral bolt | | Rock bolt |
|----|---------------|------------|------------|
| | 25mm | 32mm | |
| 3m | SB-11 ,21, 31 | SB-1, 2, 3 | RB-1, 2, 3 |
| 4m | SB-41 ,51, 61 | SB-4, 5, 6 | RB-4, 5, 6 |
| 5m | SB-71 ,81, 91 | SB-7, 8, 9 | RB-7, 8, 9 |

원위치 인발시험 장소의 암사면에 천공된 시험 시추공의 상태는 천공장 3m, 5m 위치는 시험 구간 경계부의 절리형성 부분을 제외하고 대체적으로 양호하였지만, 천공장 4m 위치는 화약발파로 인하여 내부에 균열이 심하게 발생하였음을 천공시 알수있었다. 특히, 4m의 시험구간에서는 발파로 인하여 내부 균열이 심하게 발생되어 시험 시공시 볼트의 삽입이 어려웠고, 신뢰성 제고를 위하여 동일 조건하에서 원위치 인발시험을 수행하고자 4m 시험구간은 원위치 인발시험에서 제외하였다.

또한, 시추공의 길이가 3m인 곳의 SB-1과 RB-3, 시추공의 길이가 5m인 곳의 SB-81 등은 균열과 가까운 곳에 위치하므로 인발시험 대상에서 제외시켰다.



Figure 6.1 Granite quarry for in-situ pull-out tests in Guam, Hwasun-gun.

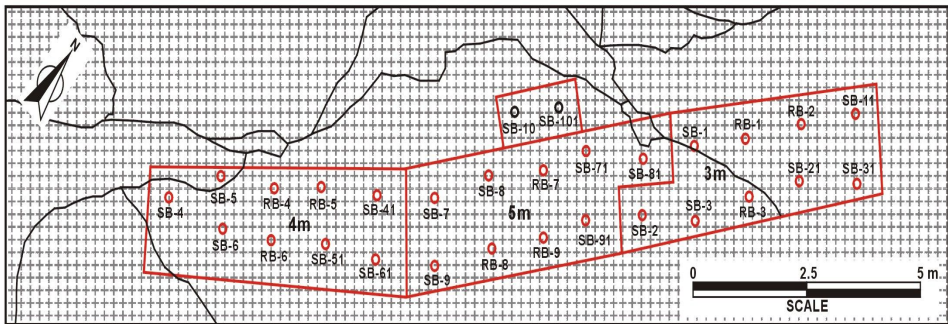
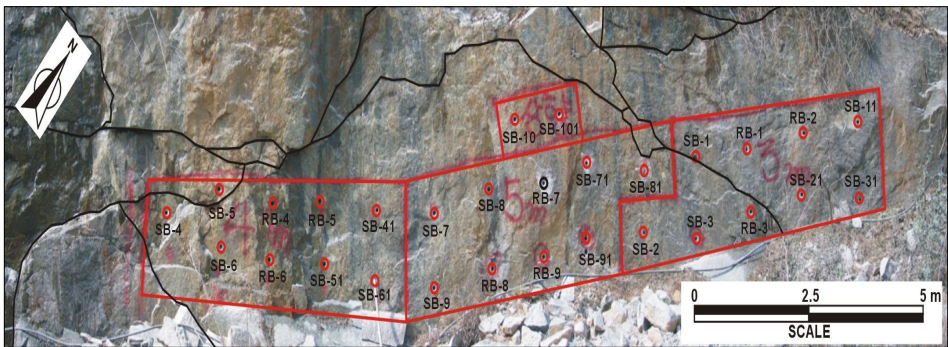


Figure 6.2 Boreholes for installing rock bolts and spiral bolts.

6.1.2 시험방법

록 볼트와 Spiral bolt의 시멘트-모르타르 충전재 사용에 의한 양생시간에 따른 인발재하중시 두 지보재의 거동 특성을 파악하고자 화강암으로 구성된 채석장에서 원위치 인발시험은 Figure 6.3의 과정으로 실시하였으며, 각 하중 단계에서 발생한 변위량을 측정하였다. 화강암 채석장에서 각 지보재에 대한 원위치 인발시험은 다음과 같은 순서로 진행되었다. 첫째, 원위치 인발시험을 수행하기에 적절한 구간을 선정 후, 직경이 45mm인 시험 시추공을 시험 조건에 맞게 일정한 간격으로 천공하였다(Figure 6.3(a)). 둘째, 시험 시추공 내에 시멘트-모르타르를 주입하였다(Figure 6.3(b)). 이때, 물과 시멘트-모르타르의 비는 0.6으로 하였다. 셋째, 시멘트-모르타르를 주입한 후, 길이가 3.5m, 4.5m, 5.5m인 록 볼트와 Spiral bolt를 시험 시추공 내에 삽입하였다(Figure 6.3(c)). 이때, 시멘트-모르타르가 시험 시추공 선단까지 충전될 수 있도록 주의 있게 삽입하였다. 넷째, 지보재가 삽입된 시간으로부터 24시간이 경과한 후에 고정용 받침판과 볼트를 이용하여 지보재를 고정시켰다(Figure 6.3(d)). 다섯째, 원위치 인발시험을 실시하기 위해 인발시험기를 설치하였다(Figure 6.3(e)). 마지막으로 원위치 인발시험을 실시하여 각 하중에 따른 변위량을 측정하였다(Figure 6.3(f)). 하중은 ENERPAC사의 RCH-302 HYDRAULIC CYLINDER를 이용하여 선하중을 가한 후 본하중을 측정하였으며, 변위는 MITUTOYO사의 정확도가 0.01mm이며 최대 변위가 12.5mm인 DIGITAL INDICATOR를 이용하여 측정하였다.



Figure 6.3 Process for in-situ pull-out test: (a) Boreholes for pull-out test, (b) injection of cement-mortar, (c) installation of test equipment, (d) in-situ pull-out test.



Figure 6.3 Continued.

6.1.3 원위치 인발시험 결과분석

Figure 6.4(a)는 시멘트-모르타르의 양생기간 1일(24시간)과 2일(48시간)이 경과된 후의 두 경우에 록 볼트와 Spiral bolt에 대한 재인발시험을 실시하여 얻은 인발하중-변위에 관한 결과를 보여준다. 록 볼트의 직경은 25mm, Spiral bolt의 폭은 25mm, 두께는 6mm이며 볼트의 길이는 양쪽 모두 3m이다. 그림에서 알 수 있듯이 록 볼트의 경우 양생기간이 2일 보다는 1일 후의 인발하중이 높게 나타났으며, 변위 또한 작게 나타났다. 이것은 1일 후에 실시한 재인발시험에서 록 볼트와 시멘트-모르타르 경계에 이미 큰 파괴가 일어나 양생이 더 진행된다 할지라도 충분한 인장력을 발휘하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 반면, Spiral bolt의 경우 양생기간이 1일 후 보다는 2일 후에 실시한 재인발시험의 경우 인발하중이 크게 나타났으며, 1일 후의 인발하중-변위 양상이 2일 후와 매우 잘 일치한다. 이러한 사실은 1일 후에 실시한 인발시험 때 Spiral bolt와 시멘트-모르타르 경계에 파괴가 거의 일어나지 않아 양생이 진행될수록 Spiral bolt의 인발하중은 더 증가함을 의미한다.

Figure 6.4(b)는 양생기간이 2일 경과한 후의 Spiral bolt의 폭과 두께에 따른 지보재의 거동 특성 파악을 위한 인발시험 결과로서 인발하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 인발하중 초기 20kN까지는 변위가 거의 발생하지 않다가 그 이후부터는 직선의 탄성거동을 보이면서 증가함을 알 수 있다. 하지만, Spiral bolt의 폭과 두께가 32mm와 9mm인 경우가 25mm와 6mm의 경우보다 더 큰 인발하중을 나타내어 Spiral bolt의 폭과 두께가 인발하중-변위 관계에 중요한 요소로 작용하는 것으로 판단된다.

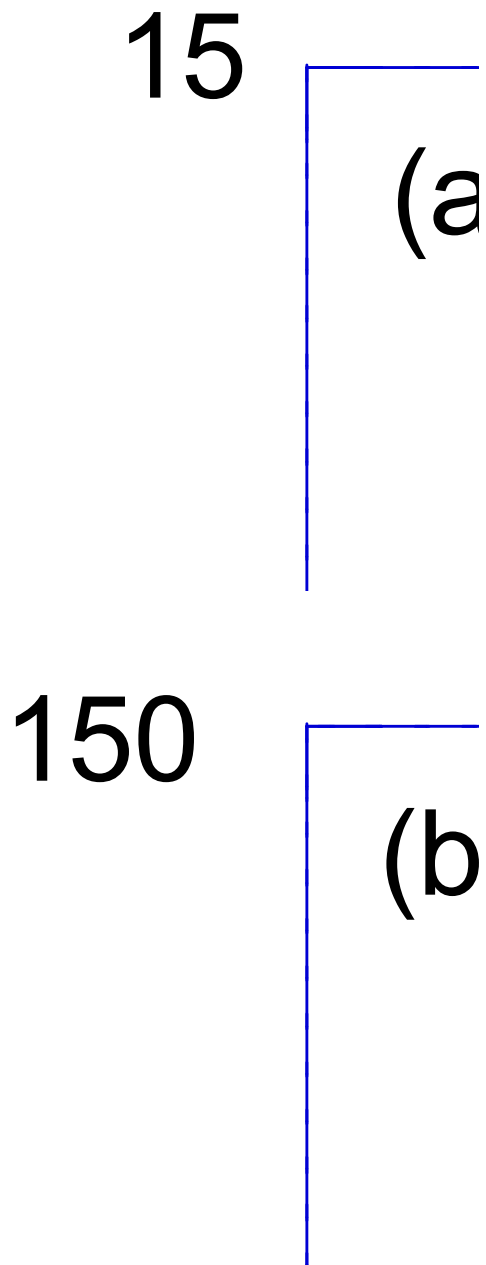


Figure 6.4 Relationship between pull-out load and displacement: (a) for 3 m long bolts after 1 day and 2 days of curing time, and (b) for 5 m long spiral bolt with 25 mm and 32 mm in width after 2 days of curing time.

6.2 터널 내 원위치 인발시험

Spiral bolt 현장 적용을 위한 터널 내 원위치 인발시험은 록 볼트와 Spiral bolt의 지보 특성 및 효과 비교를 위한 실내 및 원위치 인발시험과 수치해석에서 도출된 결과를 토대로 터널 내에 적용 가능한 Spiral bolt를 제작하였고, 한국도로공사 목포-광양간 고속도로 제8공구에서 시험시공하여 시공성, 효율성, 경제성, 안전성, 환경성 등을 검토하였다. 시험적용한 록 볼트 및 Spiral bolt의 재료의 역학적 특성 비교에 있어서 단면적의 크기는 록 볼트가 Spiral bolt보다 약 1.3배 정도 높게 나타났고, 연신율은 Spiral bolt가 록 볼트보다 1.2배 높은 반면 항복하중은 거의 동일하게 나타났으며, 인발하중은 록 볼트가 Spiral bolt보다 1.2배 높게 나타났다.

6.2.1 시험개요

록 볼트와 Spiral bolt의 레진충전에 따른 지보재의 지보효과 및 특성을 평가하기 위하여 목포-광양간 고속도로 제8공구 중 터널 내(Figure 6.5)에서 원위치 인발시험을 실시하였다. 원위치 인발시험은 SD35 재질의 길이가 4m인 지보재를 사용하였으며, 시추공의 직경은 45mm이다. 본 시험에서 사용된 록 볼트와 Spiral bolt에 대한 재료의 역학적 성질을 비교하면 Table 6.2과 같다. Table 6.2에서 알 수 있는 바와 같이 항복강도와 인장강도는 Spiral bolt가 록 볼트보다 높은 반면 항복하중과 인장하중은 단면적의 차이로 인해 록 볼트가 Spiral bolt보다 높게 나타났다. 또한 본 터널 현장의 경우 시공성을 높이기 위하여 전 구간에 있어서 지보재의 충전재로는 레진이 사용되었으며, 사용량은 록 볼트의 단면적이 스파이럴 볼트 단면적보다 크므로 Spiral bolt로 시공할 경우 충전재 중 팽창제를 한 개 더 추가 시공하였다(Table 6.3).



Figure 6.5 Installation of rock bolts and spiral bolts for pullout tests in a tunnel.

Table 6.2 Comparison of mechanical properties of rock bolts and spiral bolts

| | Rock bolt | | Spiral bolt | |
|---------------------------------------|-----------|---------|-------------|---------|
| | Standard | Result | Standard | Result |
| Quality | SD350 | SD350 | SD350 | SD350 |
| Area (mm ²) | 506.7 | 506.7 | 382 | 382 |
| Yield strength (N/mm ²) | 350 | 406 | 350 | 541 |
| Tensile strength (N/mm ²) | 500 | 643 | 500 | 699.5 |
| Yield load (N) | 177,345 | 205,720 | 133,700 | 206,662 |
| Max Tensile load (N) | 253,350 | 325,808 | 191,000 | 267,209 |
| Elongation (%) | ≥18 | 22 | ≥18 | 28 |

Table 6.3 The number of resin capsules used for filling a borehole

| Rock bolt | | | Spiral bolt | | |
|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|
| Fast Hard | Intercept | Compliment | Fast Hard | Intercept | Compliment |
| 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 |

6.2.2 시험방법

록 볼트와 Spiral bolt의 레진 충전재에 대한 터널 내의 원위치 인발시험은 레진을 충전한 후 4시간, 8시간, 12시간, 그리고 24시간 등 시간대별로 측정이 이루어졌다(Table 6.4). 또한 양생시간이 24시간을 제외한 각 시간대별로 각 지보재당 2개의 시추공에서 수행되었다. 인발시험은 각 지보재에 대해 3회의 재인발시험이 실시되었다. 재인발시험은 지보재-충전재-암반사이에 있어 단계에 따른 지보재의 최대 인발하중의 변화 양상을 파악하여 지보재의 지보효과를 살펴보기 위하여 인발시험이 실시된 후 2분이 경과한 다음 다시 이루어졌다. 원위치 인발시험에 의한 변위와 인발하중은 변위변환기(DTH-50D M150, KYOWA)와 압력변환기(DGS-500KAMI, KYOWA)를 사용하여 측정되었다. 측정된 데이터는 데이터로거(UCAM-60B-AC M14, KYOWA)를 이용하여 획득하였다. Figure 6.6은 터널 내 록 볼트와 Spiral bolt의 원위치 인발시험 과정을 보여준다.

Table 6.4 Boreholes for pull-out tests of rock bolts and spiral bolts in ○○ tunnel

| PullOut Test | 4 Hours | | | 8 Hours | | | 12 Hours | | | 24 Hours | | | site |
|--------------------|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|----------|-------|-------|-------|
| | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 | No.7 | No.8 | No.9 | No.10 | No.11 | No.12 | |
| Rock bolt (SD35) | ● | ● | x | ● | ● | x | ● | ● | x | ● | x | x | Left |
| Spiral bolt (SD35) | ● | ● | x | ● | ● | x | ● | ● | x | ● | x | x | Right |

※ ● : 인장시험 시료, x : 인장시험 제외 시료
 원위치 인발시험은 두 지보재의 양생시간에 따른 지보의 특성을 파악하기 위하여 각 3공씩 시험시공 하였으며, 시험시공한 위치가 발파예정 굴착면과 근접되어 발파시 파쇄석에 의한 부적절한 공을 제외한 나머지 공에 대하여 원위치 인발시험을 수행하였음.



Figure 6.6 Installation process of rock and spiral bolts in a borehole: (a) Injection of resin, (b) insertion of supports, (c) completion of installation, (d) pull-out test and data acquisition.



Figure 6.6 Continued.

6.2.3 터널 내 원위치 인발시험 결과분석

Figure 6.7은 레진의 양생기간이 4시간 경과된 후 록 볼트(RB-4H-1, RB-4H-2)와 Spiral bolt(SB-4H-1, SB-4H-2)에 대한 인발시험을 실시하여 얻은 인발하중-변위에 관한 결과를 보여주며, Table 6.5은 그 결과를 정리한 것이다.

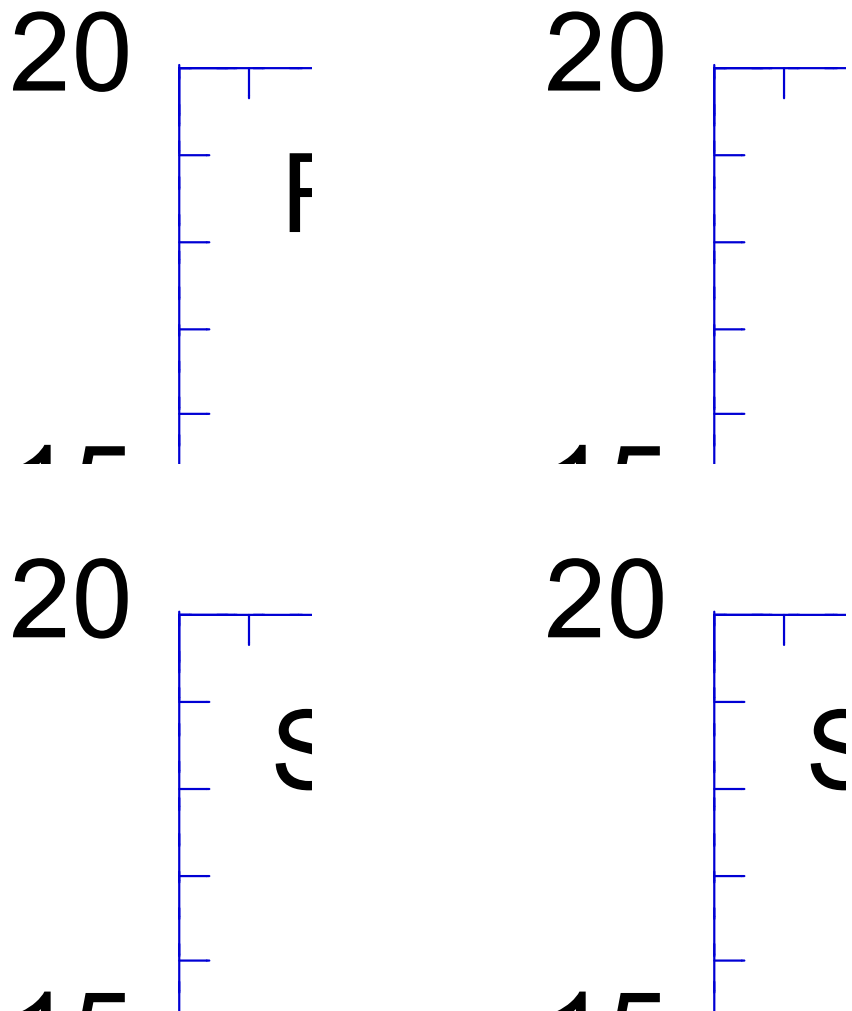


Figure 6.7 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts (RB-4H-1, RB-4H-2) and spiral bolts (SB-4H-1, SB-4H-2) with 4 hours of resin curing time.

Table 6.5 Results from pull-out tests of rock bolts (RB-4H-1, RB-4H-2) and spiral bolts (SB-4H-1, SB-4H-2) after 4 hours of resin curing time

| Rock bolt | | | | |
|------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| RB-4H-1 (NO. 1) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.625 | 2.1 | 1.743 |
| | strength (tf) | 13.768 | 11.359 | 9.638 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.213 | 2.57 | 2.133 |
| | strength (tf) | 14.048 | 11.590 | 9.834 |
| RB-4H-2 (NO. 2) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.73 | 2.268 | 1.764 |
| | strength (tf) | 13.424 | 10.842 | 9.293 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.341 | 2.776 | 2.159 |
| | strength (tf) | 13.697 | 11.063 | 9.482 |
| Spiral bolt | | | | |
| SB-4H-1 (NO. 13) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 3.046 | 2.894 | 2.981 |
| | strength (tf) | 13.122 | 12.798 | 13.284 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.708 | 3.524 | 3.629 |
| | strength (tf) | 13.316 | 12.988 | 13.481 |
| SB-4H-2 (NO. 14) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.916 | 3.002 | 2.938 |
| | strength (tf) | 13.446 | 14.094 | 13.770 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.551 | 3.656 | 3.577 |
| | strength (tf) | 13.645 | 14.303 | 13.974 |

Figure 6.8은 레진의 양생기간이 8시간 경과된 후 록 볼트(RB-8H-1, RB-8H-2)와 Spiral bolt(SB-8H-1, SB-8H-2)에 대한 인발시험을 실시하여 얻은 인발하중-변위에 관한 결과를 보여주며, Table 6.7은 그 결과를 정리한 것이다.

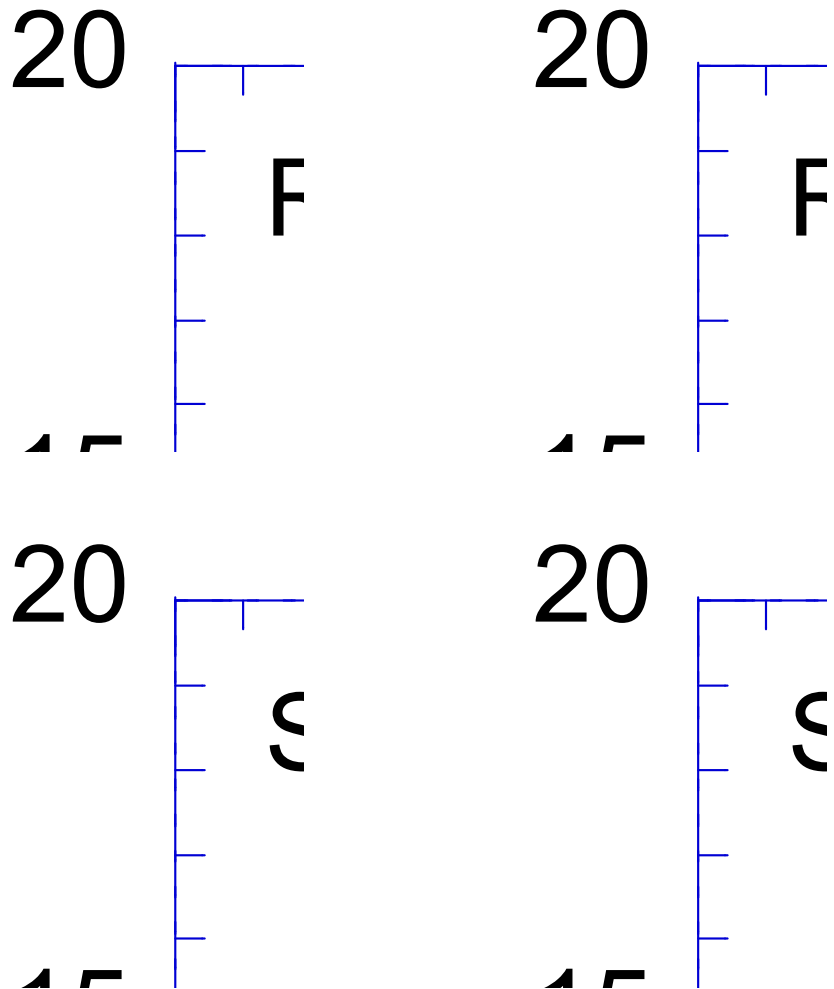


Figure 6.8 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts (RB-8H-1, RB-8H-2) and spiral bolts (SB-8H-1, SB-8H-2) with 8 hours of resin curing time.

Table 6.6 Results from pull-out tests of rock bolts (RB-8H-1, RB-8H-2) and spiral bolts (SB-8H-1, SB-8H-2) after 4 hours of resin curing time

| Rock bolt | | | | |
|------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| RB-8H-1 (NO. 4) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.793 | 2.142 | 1.785 |
| | strength (tf) | 17.726 | 16.005 | 14.629 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.418 | 2.621 | 2.185 |
| | strength (tf) | 18.087 | 16.331 | 14.926 |
| RB-8H-2 (NO. 5) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.919 | 2.079 | 1.827 |
| | strength (tf) | 18.071 | 15.833 | 14.284 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.572 | 2.544 | 2.236 |
| | strength (tf) | 18.438 | 16.155 | 14.575 |
| Spiral bolt | | | | |
| SB-8H-1 (NO. 16) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.851 | 2.894 | 2.959 |
| | strength (tf) | 16.686 | 17.172 | 17.496 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.472 | 3.524 | 3.603 |
| | strength (tf) | 16.933 | 17.426 | 17.755 |
| SB-8H-2 (NO. 17) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.808 | 2.873 | 2.830 |
| | strength (tf) | 16.524 | 16.848 | 17.334 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.419 | 3.498 | 3.445 |
| | strength (tf) | 16.769 | 17.098 | 17.591 |

Figure 6.9는 레진의 양생기간이 12시간 경과된 후 록 볼트(RB-12H-1, RB-12H-2)와 Spiral bolt(SB-12H-1, SB-12H-2)에 대한 인발시험을 실시하여 얻은 인발하중-변위에 관한 결과를 보여주며, Table 6.7은 그 결과를 정리한 것이다.

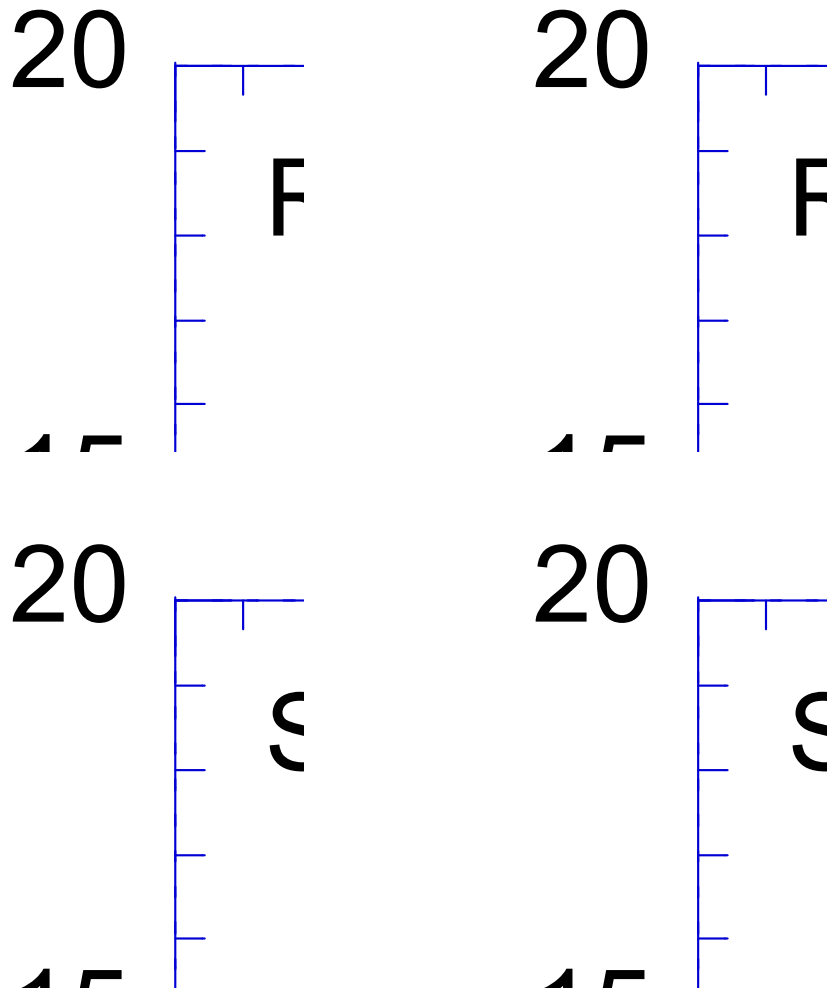


Figure 6.9 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolts (RB-12H-1, RB-12H-2) and spiral bolts (SB-12H-1, SB-12H-2) with 12 hours of resin curing time.

Table 6.7 Results of pull-out test of rock bolts (RB-12H-1, RB-12H-2) and spiral bolts (SB-12H-1, SB-12H-2) after 12 hours of resin curing time

| Rock bolt | | | | |
|-------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| RB-12H-1 (NO. 7) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.751 | 1.995 | 1.932 |
| | strength (tf) | 18.587 | 16.522 | 14.629 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.367 | 2.441 | 2.364 |
| | strength (tf) | 18.965 | 16.858 | 14.926 |
| RB-12H-2 (NO. 8) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.835 | 2.121 | 1.974 |
| | strength (tf) | 18.931 | 16.694 | 14.801 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.470 | 2.596 | 2.416 |
| | strength (tf) | 19.316 | 17.033 | 15.102 |
| Spiral bolt | | | | |
| SB-12H-1 (NO. 19) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 3.110 | 3.024 | 3.067 |
| | strength (tf) | 17.982 | 17.658 | 18.144 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.787 | 3.682 | 3.735 |
| | strength (tf) | 18.248 | 17.920 | 18.413 |
| SB-12H-2 (NO. 20) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 3.132 | 3.089 | 3.154 |
| | strength (tf) | 17.820 | 18.306 | 18.468 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.814 | 3.761 | 3.840 |
| | strength (tf) | 18.084 | 18.577 | 18.742 |

Figure 6.10은 레진의 양생기간이 24시간 경과된 후 록 볼트(RB-24H-1)와 Spiral bolt(SB-24H-1)에 대한 인발시험을 실시하여 얻은 인발하중-변위에 관한 결과를 보여주며, Table 6.8는 그 결과를 정리한 것이다.

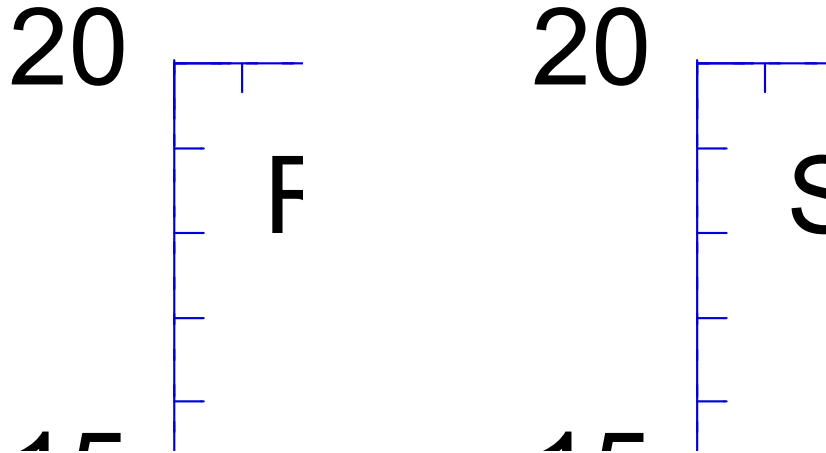


Figure 6.10 Relationship between pull-out load and displacement of rock bolt (RB-24H-1) and spiral bolt (SB-24H-1) with 24 hours of resin curing time.

Table 6.8 Results from pull-out tests of rock bolt (RB-24H-1) and spiral bolt (SB-24H-1) after 24 hours of resin curing time

| Rock bolt | | | | |
|-------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| RB-24H-1 (NO. 10) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 2.877 | 1.911 | 1.743 |
| | strength (tf) | 19.103 | 17.21 | 15.317 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.521 | 2.339 | 2.133 |
| | strength (tf) | 19.492 | 17.56 | 15.628 |
| Spiral bolt | | | | |
| SB-24H-1 (NO. 22) | | 1st | 2nd | 3rd |
| Yield | displacement (mm) | 3.054 | 3.035 | 3.009 |
| | strength (tf) | 18.630 | 18.419 | 18.322 |
| Maximum pull-out | displacement (mm) | 3.719 | 3.695 | 3.664 |
| | strength (tf) | 18.906 | 18.692 | 18.594 |

이상의 터널 내 현장에서 레진의 양생기간에 따라 각 인발시험 대상 지보재에 대해 3회씩 실시한 원위치 인발시험의 결과를 요약하면 Table 6.9과 같다. 레진의 양생기간에 따른 인발하중의 결과에 있어 인발하중은 두 지보재 모두에서 레진의 양생기간이 길어질수록 증가하는 경향을 보였다. 하지만 레진의 양생기간에 따른 인발하중의 차이는 4시간인 경우가 가장 크게 나타났으며 그 이상인 8시간, 12시간, 24시간인 경우의 인발하중은 거의 비슷한 경향을 보였다. 단계별로 최대인발하중의 변화 양상을 살펴보기 위해 실시한 각 지보재에 대한 3회의 재인발시험의 결과를 보면, 록 볼트의 경우 인발시험이 1회, 2회, 3회로 증가할수록 인발하중은 점점 감소하였는데, 이것은 지보재가 최대인발하중에 도달할 때 지보재-충전재 사이에 일부분 파괴가 발생함으로 인해서 나타나는 현상으로 판단된다. 반면 Spiral bolt는 인발시험 횟수에 관계없이 거의 일정함을 보였는데, 이것은 지보재가 최대인발하중에 도달할지라도 지보재-충전재 사이에 파괴가 거의 일어나지 않으므로 일정한 최대인발하중을 보이는 것으로 판단된다.

Table 6.9 Results from pull-out tests of rock bolts and spiral bolts for different curing times

| Pull-out test | | 4H | 4H | 8H | 8H | 12H | 12H | 24H | |
|---------------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rock bolt | Number | NO.1 | NO.2 | NO.4 | NO.5 | NO.7 | NO.8 | NO.10 | |
| | Result | 1st (tf) | 13.768 | 13.424 | 17.726 | 18.071 | 18.587 | 18.931 | 19.103 |
| | | 2nd (tf) | 11.359 | 10.842 | 16.005 | 15.833 | 16.522 | 16.694 | 17.210 |
| | | 3rd (tf) | 9.638 | 9.293 | 14.629 | 14.575 | 14.629 | 14.801 | 15.317 |
| Spiral bolt | Number | NO.13 | NO.14 | NO.16 | NO.17 | NO.19 | NO.20 | NO.22 | |
| | Result | 1st (tf) | 13.122 | 13.446 | 16.686 | 16.524 | 17.982 | 17.820 | 18.630 |
| | | 2nd (tf) | 12.798 | 14.094 | 17.172 | 16.848 | 17.658 | 18.306 | 18.419 |
| | | 3rd (tf) | 13.284 | 13.770 | 17.496 | 17.334 | 18.144 | 18.468 | 18.322 |

6.2.4 터널 내 원위치 인발시험 결과에 의한 기대효과 및 경제성 분석

록 볼트와 Spiral bolt의 지보 특성 및 효과를 비교하기 위한 터널내 원위치 인발시험 결과에 따른 기대효과는 다음과 같다.

적용성 측면에서는 기존설계에 적용중인 록 볼트와 비교 할 때 Spiral bolt는 시공 및 장기정착에 효과적으로 적용될 수 있는 지보재로 평가되었으며, 록 볼트보다 단면적 저하에 따라 최대인발하중은 다소 적게 나타났다. 시공성 및 안전성 측면에서는 bolt의 형상이 Spiral 형태이므로 천공 내 약간의 이물질 및 암편이 존재하여 천공hole이 불량한 경우에도 시공성이 우수하였으며, Spiral 형상의 bolt가 시계방향으로 회전하면서 충전재를 밀어 올려 공 내 균일 충전은 물론 선단부에 밀실한 충전이 용이하였다. 또한, 볼트 무게가 4M 기준 1개당 3Kg(록 볼트:15.29Kg/4M, Spiral bolt:12.29Kg/4M)정도 경량이므로 운반 및 취급이 용이하나, 록 볼트보다 단면적 감소로 인한 레진 충전재의 경우 록 볼트 길이 4M에 공당 1EA가 추가로 소요되었다.

환경성 측면에서는 록 볼트 4m 길이 10,000개를 Spiral bolt로 대체할 경우 약 38ton의 원자재 사용을 절감할 수 있으며, 연약지반의 경우 지반 교란 없이 자체 회전력만으로 설치가 가능하다.

경제성 측면에서는 록 볼트의 대체 지보재로 사용할 경우 추가된 충전재 양을 고려하더라도 약 6.5%의 원가절감 기대 효과가 있다. 그러나 현장 적용시험 결과 현 Spiral bolt를 록 볼트 대체재로서 사용하는데 있어 별다른 문제점은 없으나, 향후 적용성 확대방안 차원에서 개선사항으로는 록 볼트에 비하여 단면적 저하에 따른 Spiral bolt 재료의 강도보강과 암반고정용 볼트 너트 체결부의 용접부가 향후 개선사항으로 나타났다.

7. FLAC3D 수치해석

7.1 개요 및 실내시험 결과

7.1.1 개요

본 수치모델은 Spiral bolt와 록 볼트를 비교하여 Spiral bolt가 갖고 있는 거동상의 특징을 분석하고자 수행된 인발시험결과를 근거로 기존에 연구되어온 인터페이스 모델(interface model)의 적용성을 검토하여 수치모델을 수립하여 스파이럴 볼트의 단면특정상 발생하는 인터페이스의 거동을 구속압의 변화에 따라 검토하는데 목적이 있다.

특히, 앵커나 볼트 등 지반 내에서 인터페이스를 형성하며 외력에 의한 지반과의 상호거동을 통해 지보특성을 발휘하는 부재의 경우, 상당히 오랜 기간 동안 많은 연구가 이루어졌으나 다양한 실제조건과 인터페이스의 거동특성으로 인해 불확실성을 내포하고 있는 상태이다. 다만, 이러한 불확실성은 현장이나 실내에서 수행되는 인발시험(pull-out test)을 통해 인터페이스의 거동특성을 파악함에 따라 공학적으로 이해될 수 있는 범위로 축소시킬 수 있으며, 이와 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다.(Indraratna and Kaiser, 1990; Yazici and Kaiser, 1992; Kaiser et al., 1992; Hyett et al., 1992, 1995; Tannant et al., 1995; Oreste and Peila, 1996; Jeng and Huang, 1999. Li and Stillborg, 1999; Chen et al., 2009)

이러한 연구배경을 바탕으로, 본 연구에서는 스파이럴 볼트와 록 볼트의 인발시험을 통해 수치모델의 입력특성을 산정하고, 구속압 조건에 대한 parametric 연구를 통해 지보재의 거동특성을 규명하고자 한다.

7.1.2 실내시험결과

실내 인발시험은 Spiral bolt와 기존의 록 볼트를 대상으로 Figure 7.1에서와 같이 수행되었으며, 수치해석모델에서의 중요한 인터페이스 특성으로 입력물성이 되는 값들을 Figure 7.2에서와 같이 하중-변위곡선을 작성하여 획득하였다.

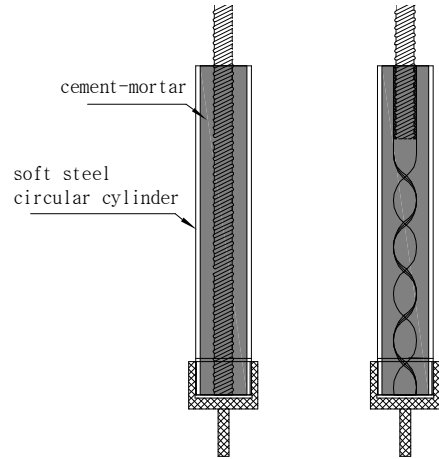


Figure 7.1 Laboratory pull-out test.

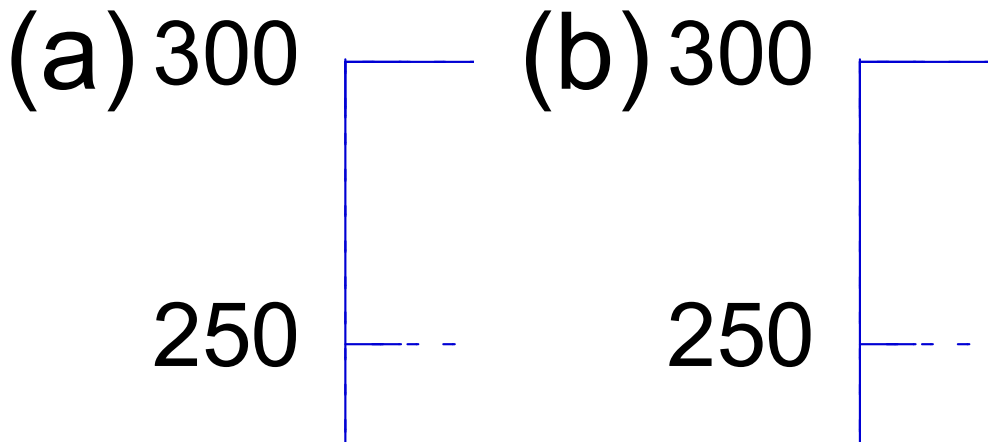


Figure 7.2 Result from pull-out tests: (a) rock bolt, and (b) spiral bolt.

7.2 Interface model

7.2.1 이론적 배경

전면접착형의 볼트에서의 하중전이 메커니즘은 볼트와 그라우트간의 상대변위에 의존한다. 일반적으로 앵커의 축 방향 거동연구(Liang, 1997)로부터 전면접착형의 볼트에 대한 거동연구가 그 흐름을 이어왔으며, 실제에 있어서는 앵커 혹은 볼트와 주변 지반간의 변위발생은 상당히 복잡한 양상을 보이는 것으로 알려져 있다. 앵커의 축 방향 거동에 있어 주변 지반과의 상호작용은 일반적으로 터널 등의 구조물에 있어 절리면에 따르는 전단거동이 주요한 경우를 제외하고는 굴착에 따른 하중 제거로 인한 축 방향 인장거동이 우세하다. 이러한 효과 앵커(볼트)의 상호 인터페이스의 거동은 식 7.1과 같이 정의 될 수 있다.

$$\frac{d^2\sigma_A(x)}{dx^2} - K_0\sigma_A(x) = -K_0E\frac{dU_s(x)}{dx}, \quad K_0 = \frac{\pi DK_s}{EA} \quad (7.1)$$

여기서 x 는 Figure 6.3에서 기준면과의 거리, σ_A 는 앵커에 유도된 응력, E 는 앵커부재의 영률, U_s 는 인터페이스에서의 절대변위, D 는 앵커부재의 직경, K_s 는 앵커와 지반간의 접촉면 강성, A 는 앵커의 단면적을 각각 의미한다.

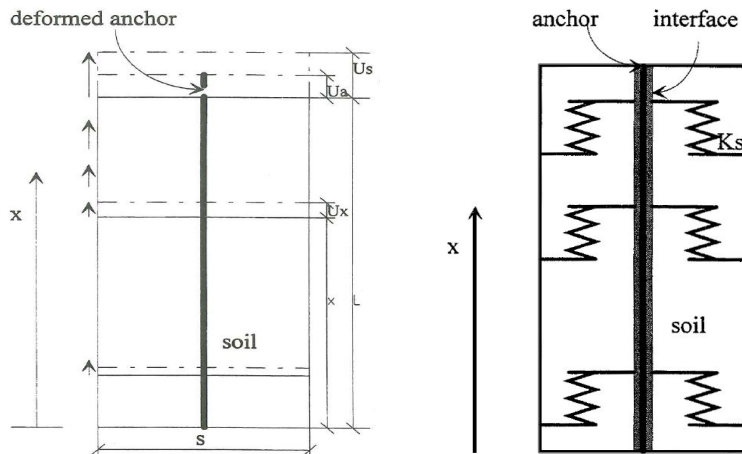


Figure 7.3 Schematic diagram for axial behavior of unit anchor element.

식 7.1의 정밀 해를 찾기 위해서 인터페이스의 선형거동에 대한 가정이 필요하며, 이는 Figure 7.4에서와 같이 인터페이스에 작용하는 법선응력, 즉, 실제에 있어서는 구속응력에 의존하는 선형탄성 완전소성거동으로의 가정이 필요하다.

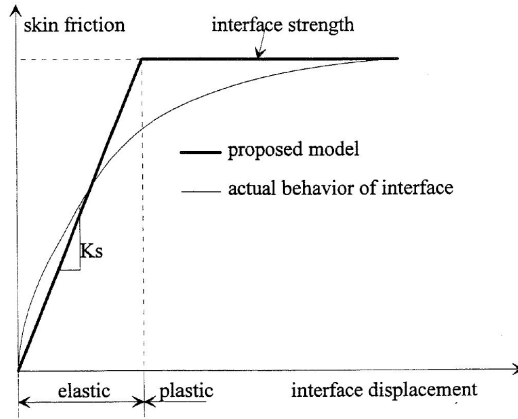


Figure 7.4 Assumption of interface model between anchor and ground.

7.2.2 수치해석적 접근

앞 절에서 언급한 대로, 일반적인 터널굴착에서의 볼트 부재의 주된 거동은 변위가 발생함에 따른 축 방향 거동이며, 본 수치검토에서는 Figure 7.5에서와 같이 선형탄성 완전소성의 인터페이스 거동을 가정하였으며 이는 7.1절에서 구현된 바와 같은 실내시험의 결과를 이용하여 수치해석시 입력자료를 구성할 수 있다. Figure 7.5에서 F_t 는 인장강도, F_c 는 압축강도, F_s 는 전단력, u_s 는 상대변위, k_g 는 그라우트체의 강성, L 은 볼트의 길이를 나타낸다.

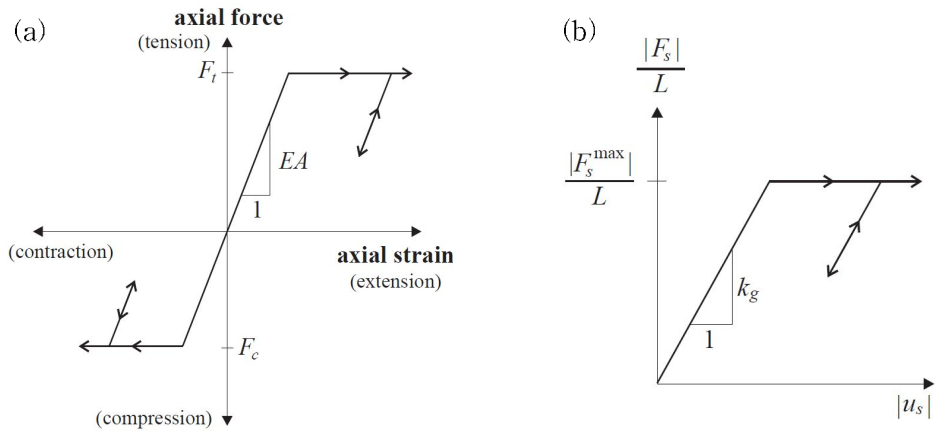
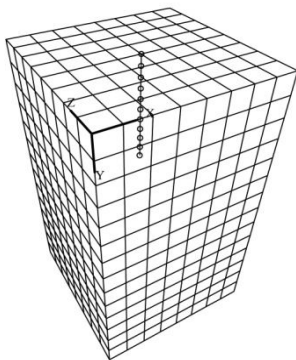


Figure 7.5 Assumed behavior of (a) bolt and (b) grout model (FLAC3D model).

7.3 적용 수치model 및 특성치

실내시험결과에 따른 수치모델의 축방향 인장조건은 Figure 7.6과 같은 3차원 FDM (Finite Difference Method) 모델을 통해 구현되었다. 모델에 사용된 시험재료는 Table 7.1과 같은 특성을 갖는 Spiral bolt와 록 볼트를 대상으로 구속응력을 변화시켜 인발거동을 비교하였다. 록 볼트와 Spiral bolt의 길이는 0.5m, 인발하중 속도는 분당 0.6mm로 하였다. 구속압은 0.0, 0.5, 1.0, 2.0MPa의 네 단계로 나누어 해석을 실시하였다. 충전재로서 그라우트의 영률은 7.5GPa, 포아송비는 0.1, 점착력 3.0MPa, 마찰각은 50°이며, 록 볼트와 Spiral bolt의 영률과 포아송비는 210GPa과 0.3으로 산정하였다.



- Spiral bolt : 25.0mm(t=14mm) nominal diameter
- Rock bolt : 25.0mm nominal diameter
- 0.5M specimen length
- pull-out velocity : 0.6mm/min
- confining pressure :
0.0(no confinement)
0.5MPa, 1.0MPa, 2.0MPa
- model has 896 zones and 1215 grid-points,
10 structural-elements and 11 nodes

Figure 7.6 3D FDM model and input data for numerical analysis.

Table 7.1 Material properties of input parameters for numerical model

| | E (MPa) | ν | C (MPa) | Friction Angle (deg.) | $\gamma(10^3kg/m^3)$ | Bulk modulus (MPa) | Shear modulus (MPa) |
|-------------|------------|-------|------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| Grout | 7500 | 0.1 | 3.0 | 50 | 2.2 | 3130 | 3410 |
| Rock bolt | 2.1E5 | 0.3 | | | | | |
| Spiral bolt | 2.1E5 | 0.3 | | | | | |

| | Tensile Strength (MPa) | Grout Shear Modulus, K(MPa) | Grout Yield Strength (MPa) | Grout Friction Angle (deg.) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Rock bolt | 643 | 19 | 2.93 | 30 |
| Spiral bolt | 699.5 | 21 | 3.67 | 30 |

일반적으로 구속응력이 증가함에 따라 볼트와 그라우트 인터페이스에서의 부착 강도는 증가하며 이러한 경향성은 7.4절에서 검토되었다. 수치모델에서 가정한 선형탄성 완전소성의 인터페이스 거동은 실제 터널구조물에서 보수적 설계측면으로 보아 합리적이라 할 수 있다. 즉, 터널 굴착 후 선형탄성 구간 내에서 지보특성을 고려하며, 소성에서는 지보역할을 상실토록 하여 굴착에 따른 암반 이완 및 아칭특성을 최대한 이용할 수 있는 설계측면에서의 접근이 가능하다는 점에서 매우 합리적인 가정으로 그동안 이루어진 많은 연구에서도 유사한 방법으로 접근되어 왔다.

7.4 구속압에 따른 특성 비교

실내시험결과를 바탕으로 록 볼트와 Spiral bolt의 구속압에 따른 하중-변위 관계를 검토하였다. 각 구속압에 따른 수치해석결과는 Table 7.2 ~ Table 7.5와 같다. 구속압이 작용하지 않은 경우 Spiral bolt의 전단강도는 록 볼트보다 약 125% 크게 나타났으며 구속압이 2.0MPa 작용한 경우 Spiral bolt가 록 볼트의 약 104% 우세함을 보였다. 전체적으로 구속압이 증가함에 따라 Spiral bolt의 경우가 록 볼트에 비해 적은 변위에서 더 높은 항복강도를 산출하는 경향을 보였으며, 이를 Table 7.6과 같이 정리하였다. 록 볼트에 비해 Spiral bolt가 구속응력조건에 따라

약 4%~25%정도 전단강도가 개선되는 것을 알 수 있으며, 이는 구속응력이 작을수록, 즉, 터널측면에서 보면, 입출구부에 가까워 토피가 낮을수록 Spiral bolt의 효용성이 크게 나타났다. 극단적으로 구속압이 없는 경우, 즉, 전토피 하중을 모두 터널에서 부담하여야 하는 저토피 구간에서는 약 25%이상의 개선효과를 예상할 수 있다.

Table 7.2 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 0.0$
(no confinement)

| | | |
|--------------------|--|---|
| <p>Spiral bolt</p> | <p>FLAC3D 3.00 Step 5000 19:33:22 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle — 7.686e+002 <-> 2.860e+005</p> <hr/> <p>Vs. Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> | <p>Job Title: Simulation of Pull-out Test for Grouted SPIRAL bolt(without external confinement)</p> |
| <p>Rock bolt</p> | <p>FLAC3D 3.00 Step 5000 19:51:13 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle — 6.954e+002 <-> 2.300e+005</p> <hr/> <p>Vs. Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> | <p>Job Title: Simulation of Pull-out Test for Grouted ROCK bolt(without external confinement)</p> |

Table 7.3 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 0.5 \text{ MPa}$

| | | |
|-------------|---|---|
| Spiral bolt | <p>FLAC3D 3.00</p> <p>Step 5710 19:35:51 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle 7.422e+002 <-> 2.964e+005</p> <p>Vs. Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> | <p>Job Title: Simulation of Pull-out Test for Grouted SPIRAL bolt(with confining pressure=0.5</p> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> |
| | Rock bolt | <p>FLAC3D 3.00</p> <p>Step 5710 19:56:17 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle 6.695e+002 <-> 2.512e+005</p> <p>Vs. Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> |

Table 7.4 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa

| | | |
|-------------|---|---|
| Spiral bolt | <p>FLAC3D 3.00</p> <p>Step 5710 19:37:26 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History</p> <p>Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle _____ 7.210e+002 <-> 3.076e+005</p> <p>Vs.</p> <p>Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> | <p>Job Title: Simulation of Pull-out Test for Grouted SPIRAL bolt(with confining pressure=1.0M</p> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> |
| | Rock bolt | <p>FLAC3D 3.00</p> <p>Step 5710 19:58:50 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History</p> <p>Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle _____ 6.483e+002 <-> 2.737e+005</p> <p>Vs.</p> <p>Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> |

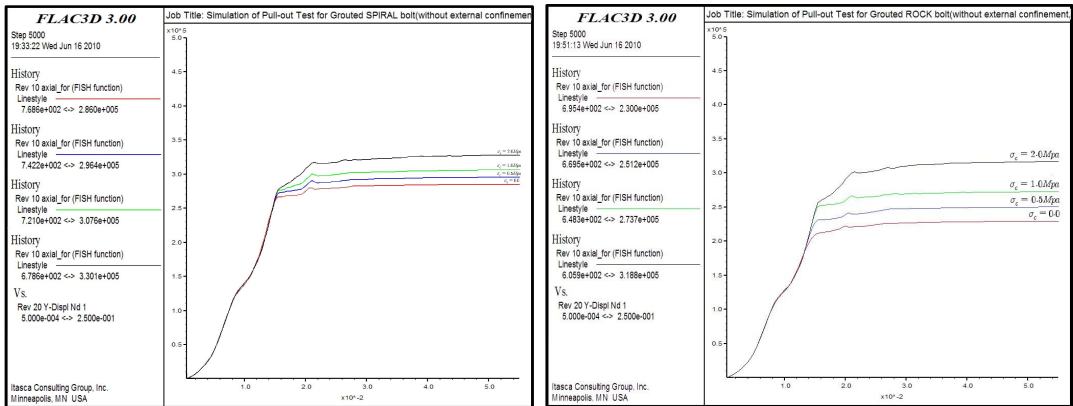
Table 7.5 Results of numerical analysis when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa

| | | |
|-------------|---|---|
| Spiral bolt | <p>FLAC3D 3.00</p> <p>Step 5710 19:39:49 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History</p> <p>Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle 6.786e+002 <-> 3.301e+005</p> <p>Vs.</p> <p>Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> | <p>Job Title: Simulation of Pull-out Test for Grouted SPIRAL bolt(with confining pressure=2.0</p> |
| | Rock bolt | <p>FLAC3D 3.00</p> <p>Step 5710 20:00:23 Wed Jun 16 2010</p> <hr/> <p>History</p> <p>Rev 10 axial_for (FISH function) Linestyle 6.059e+002 <-> 3.188e+005</p> <p>Vs.</p> <p>Rev 20 Y-Displ Nd 1 5.000e-004 <-> 2.500e-001</p> <hr/> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN USA</p> |

Table 7.6 Summary of results of numerical analysis

| Confining pressure | Spiral bolt shear strength(MPa) | Rock bolt shear strength(MPa) |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| $\sigma_c = 0.0$ (no confinement) | 3.67 (125%) | 2.93 |
| $\sigma_c = 0.5MPa$ | 3.79 (121%) | 3.12 |
| $\sigma_c = 1.0MPa$ | 3.95 (113%) | 3.49 |
| $\sigma_c = 2.0MPa$ | 4.23 (104%) | 4.06 |

※ (%)의 값은 록 볼트 대비 증감정도를 나타냄.



Ⓐ Spiral bolt

Ⓑ Rock bolt

Figure 7.7 Results of numerical analysis depending on confining pressure.

7.5 수치해석 결과

해석모델의 최종단계에서 그라우트 인터페이스에서의 slippage 발생양상, 주응력 분포, 최대 전단 변형을 및 변위 분포는 Figure 7.8 ~ Figure 7.39에 각각 나타냈다. 유한차분해석의 특성에 따라 단계별로 해석한 결과를 확인해보면, 선형탄성구간을 넘어선 변위에서 점차적으로 slippage가 표면에서 시작하여 심부까지 전이되는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 인발시험에 대한 구속압에 따른 지보재와 그라우트 인터페이스간의 거동모사가 적절하게 이루어졌음을 알 수 있다.

해석모델은 인발시험의 거동을 구속압에 따라 적절하게 모사하고 있음을 알 수 있으며 특히, Table 7.2 ~ Table 7.6에서와 같이 스파이럴 볼트는 구속압이 적을 수록 록 볼트에 비해 축방향 전단거동에서 최대 20%이상 효과가 있는 것으로 산정되어 구속압조건을 고려하여 적용성을 판단할 수 있음을 알 수 있다. 전면접착형 볼트의 특성상 축방향 하중에 따른 볼트의 주된 거동은 볼트요소와 그라우트체에서의 변위이며, 이는 단위주면마찰저항의 특성상 인터페이스면에 작용하는 수직력에 비례하므로, 결국 구속압의 정도에 따라 스파이럴 볼트의 적용성을 판단할 수 있음을 의미한다.

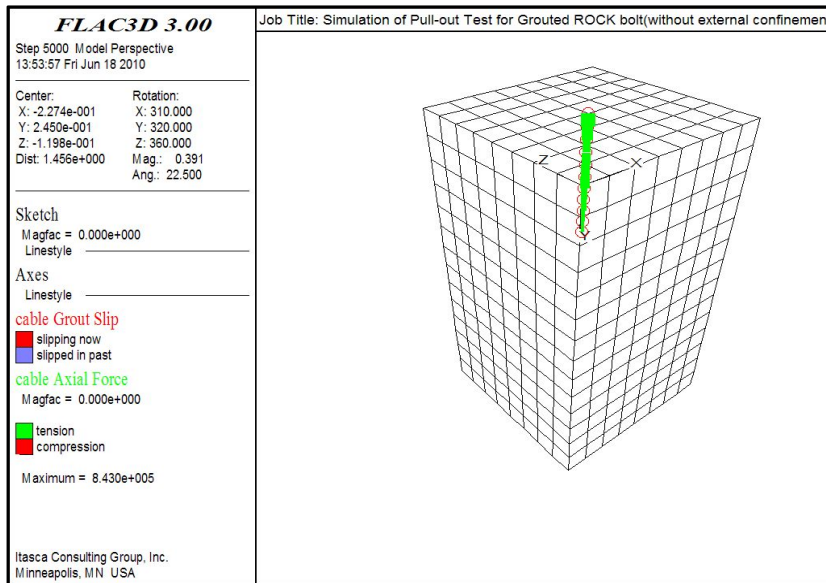


Figure 7.8 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

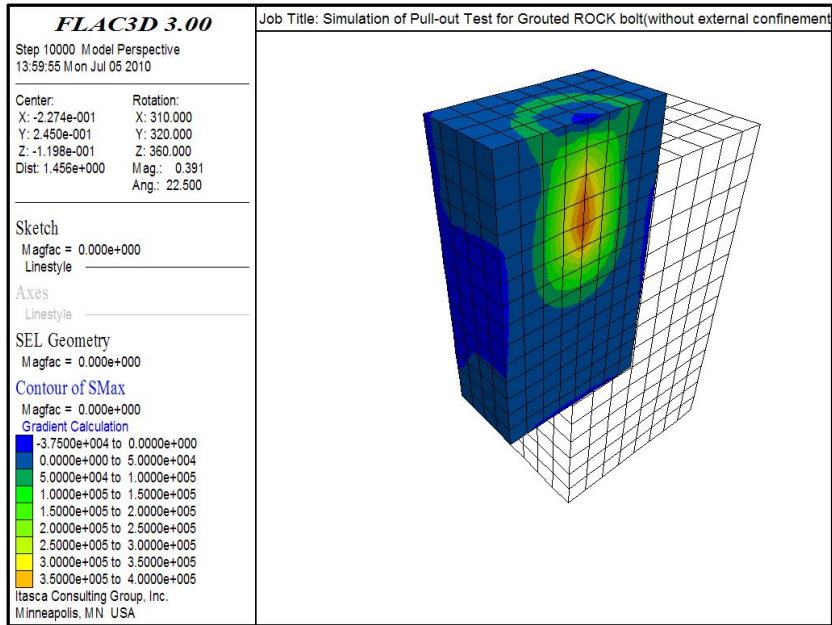


Figure 7.9 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

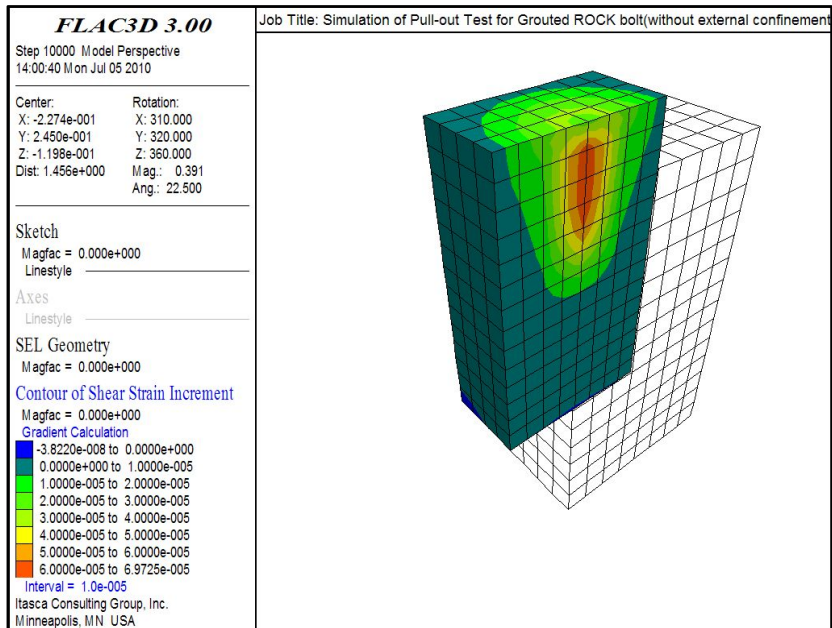


Figure 7.10 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

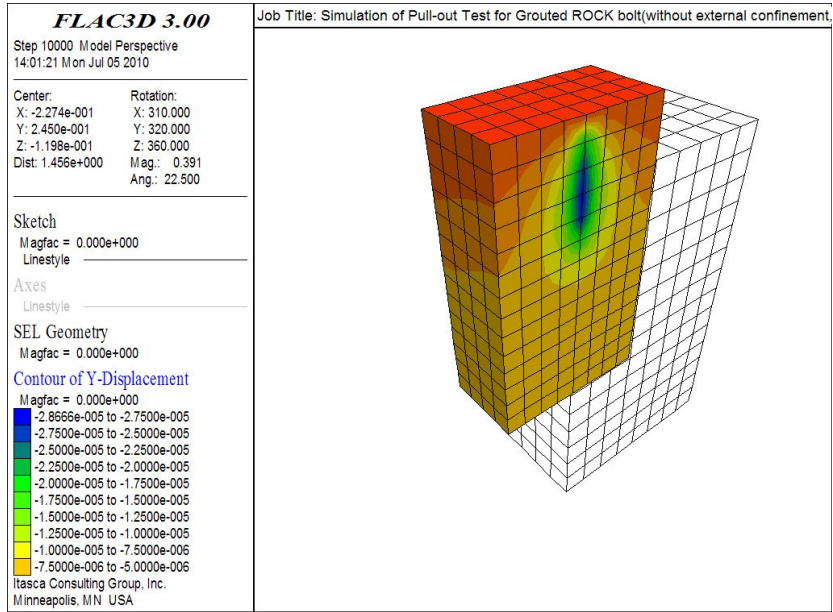


Figure 7.11 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

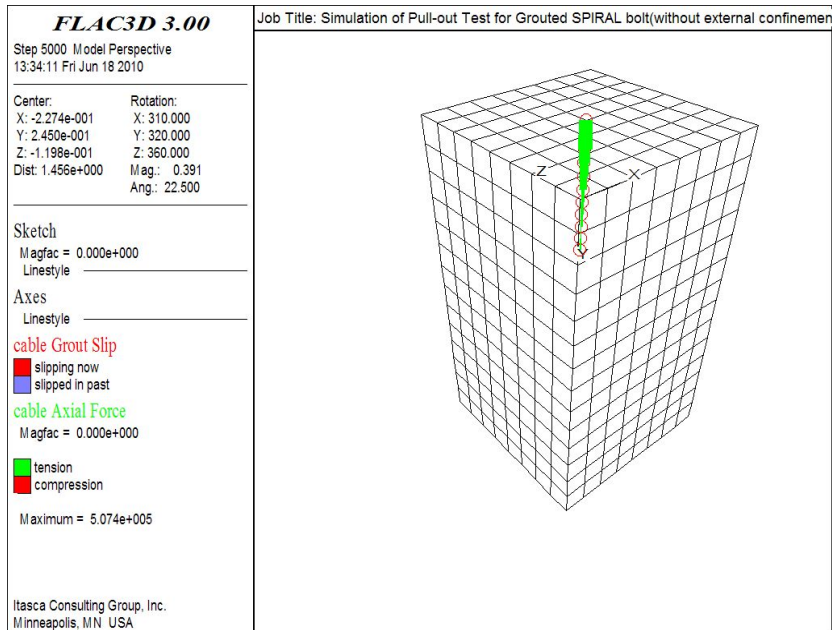


Figure 7.12 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

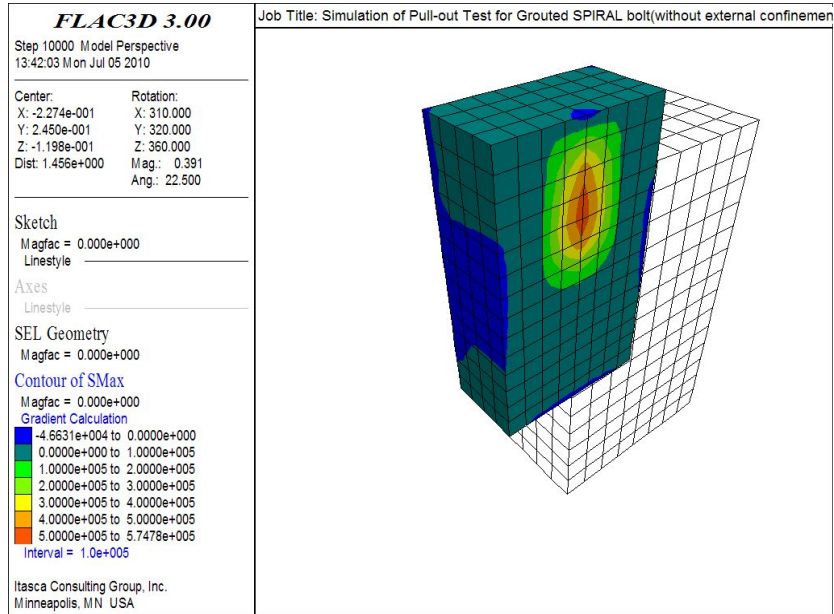


Figure 7.13 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

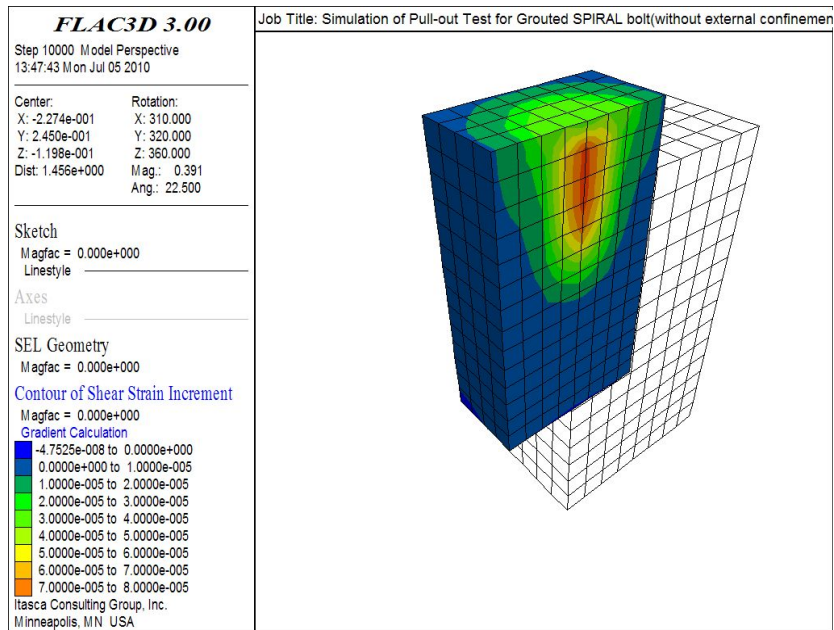


Figure 7.14 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

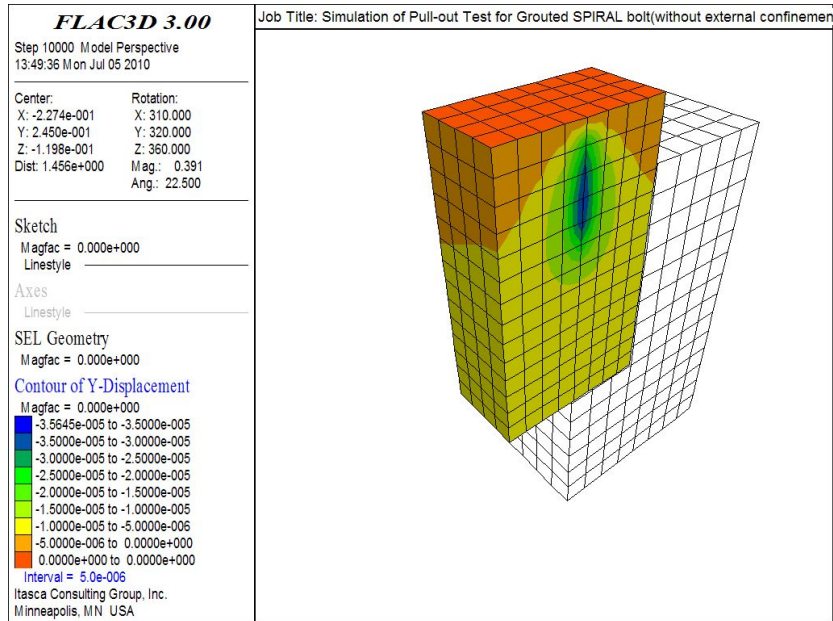


Figure 7.15 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0$ (no confinement).

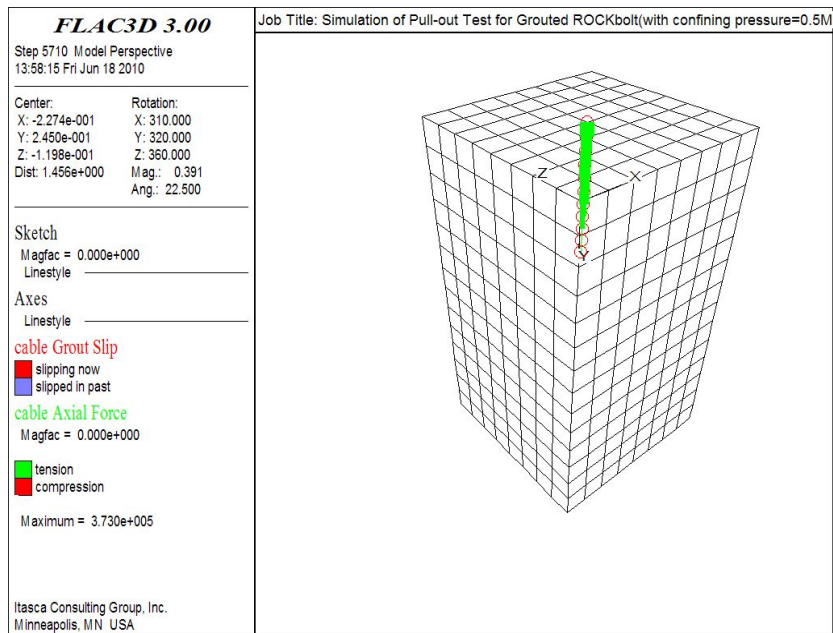


Figure 7.16 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa.

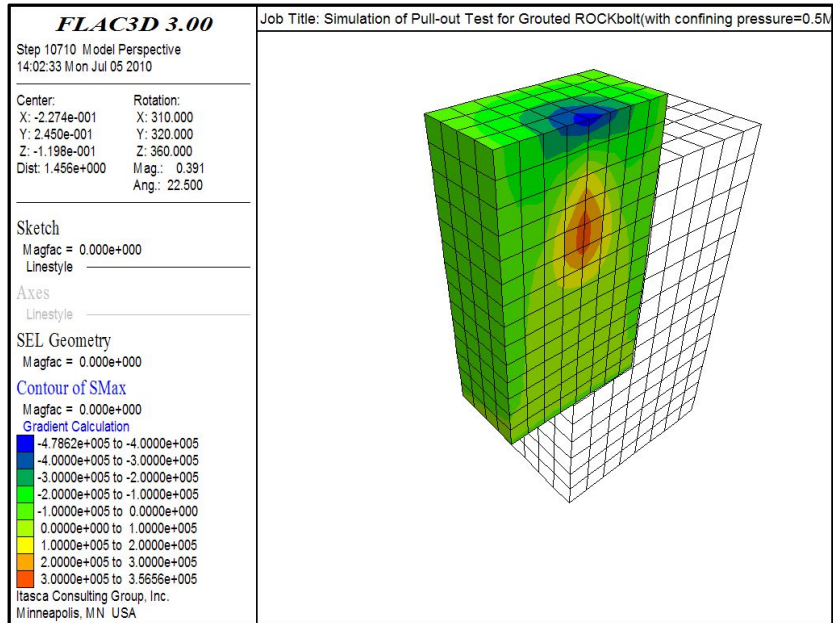


Figure 7.17 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$.

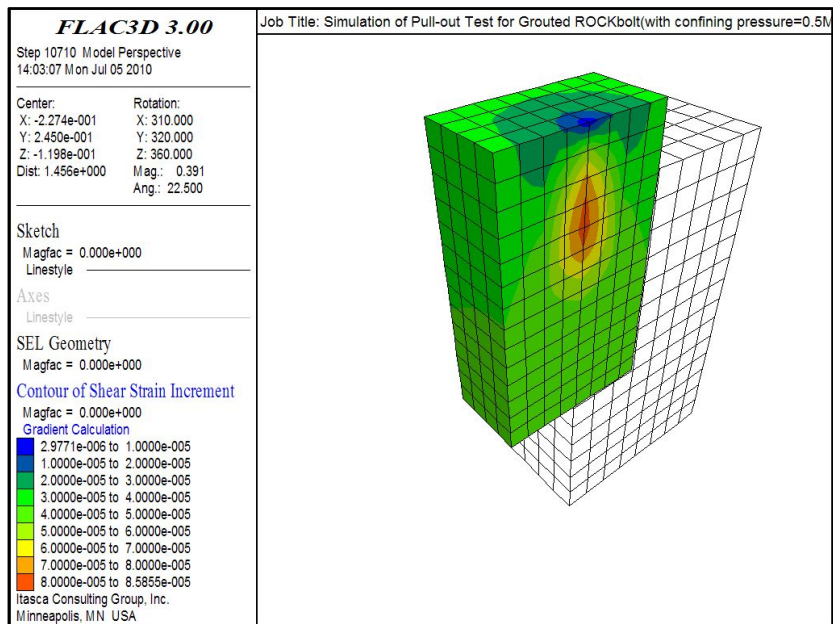


Figure 7.18 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5 \text{ MPa}$.

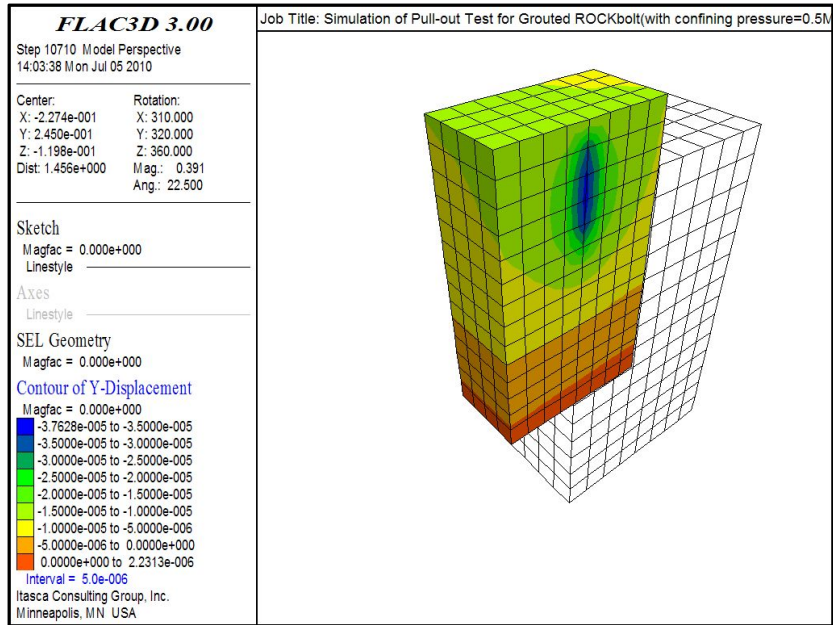


Figure 7.19 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa.

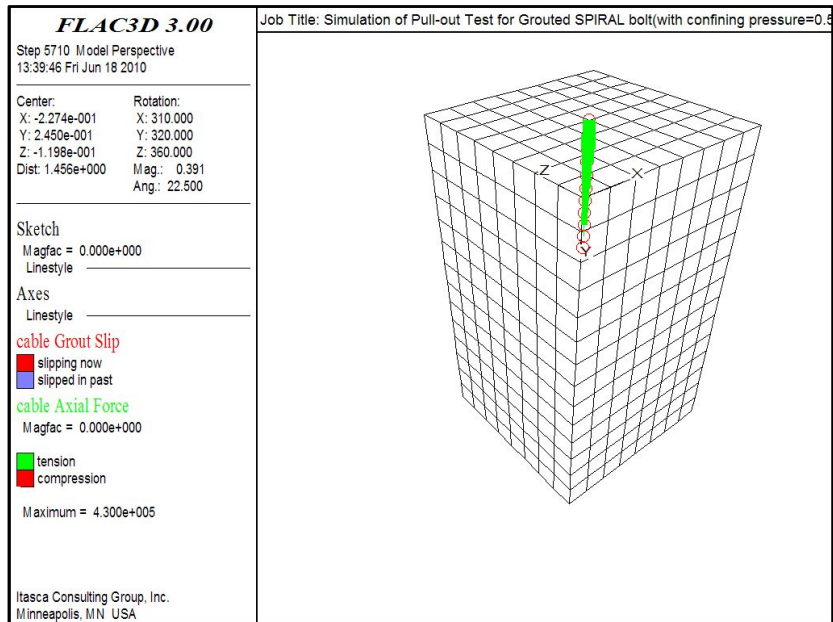


Figure 7.20 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa.

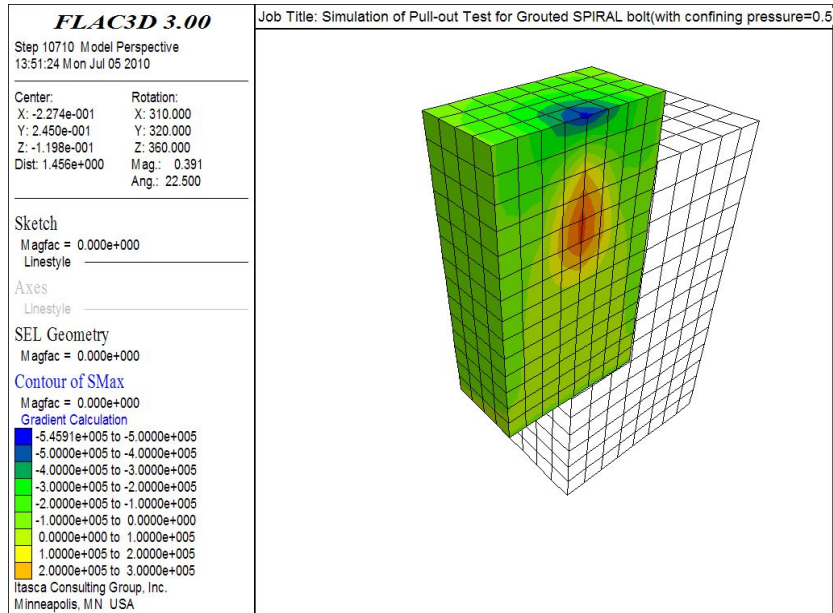


Figure 7.21 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa.

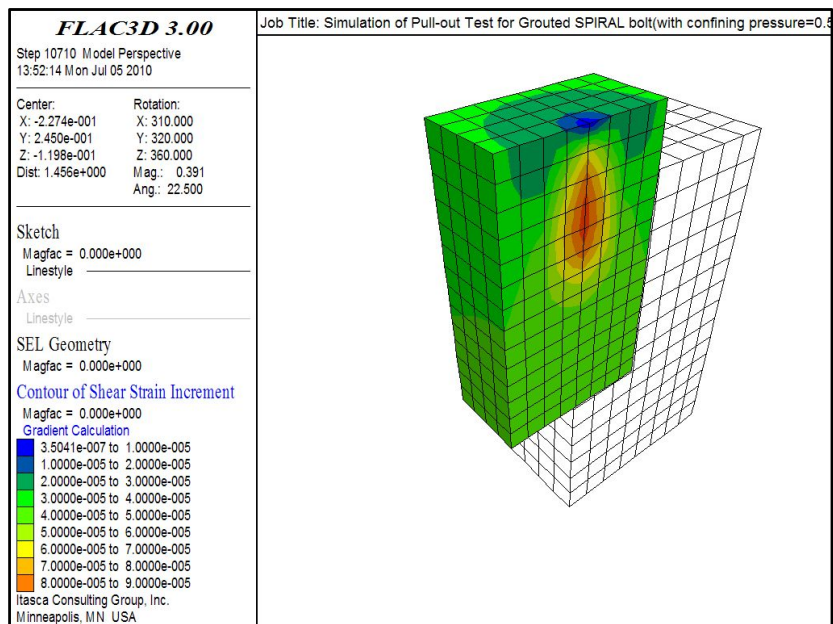


Figure 7.22 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa.

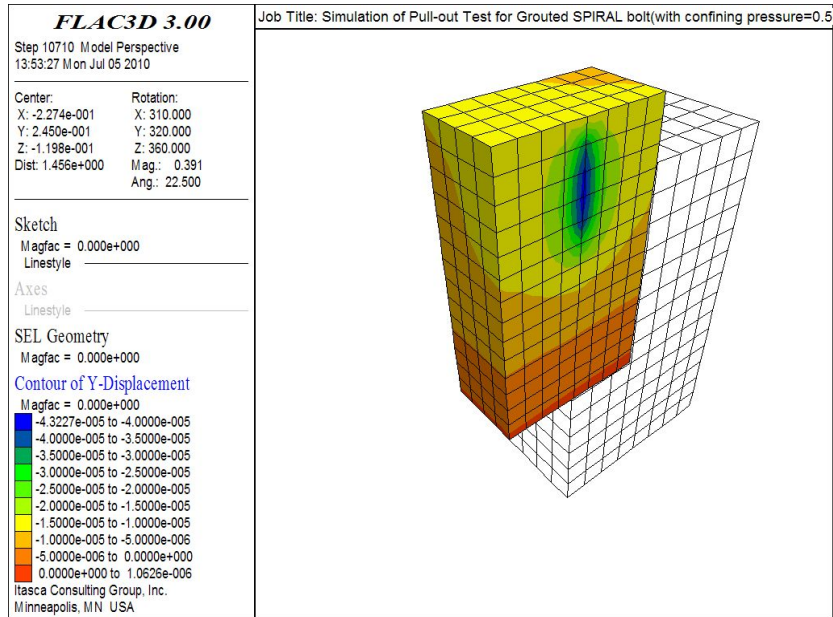


Figure 7.23 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 0.5$ MPa.

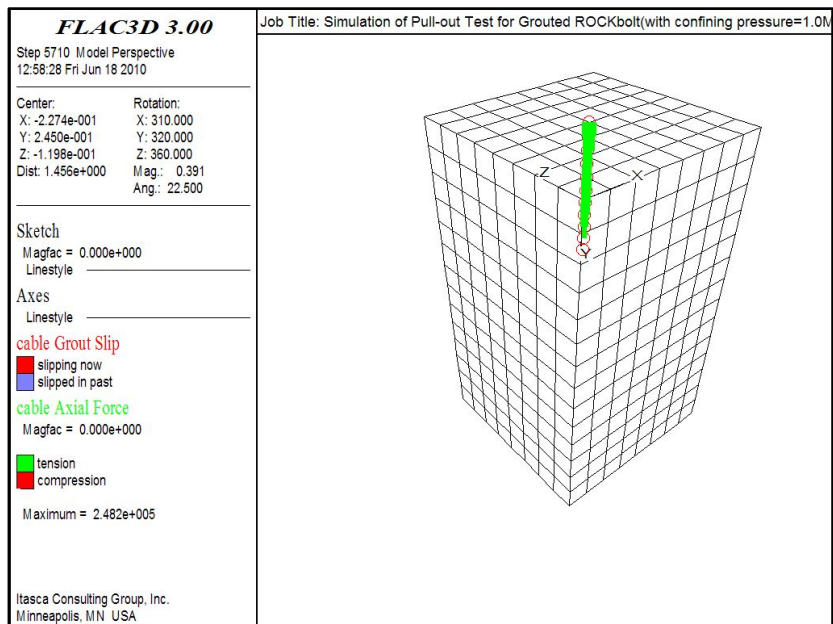


Figure 7.24 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

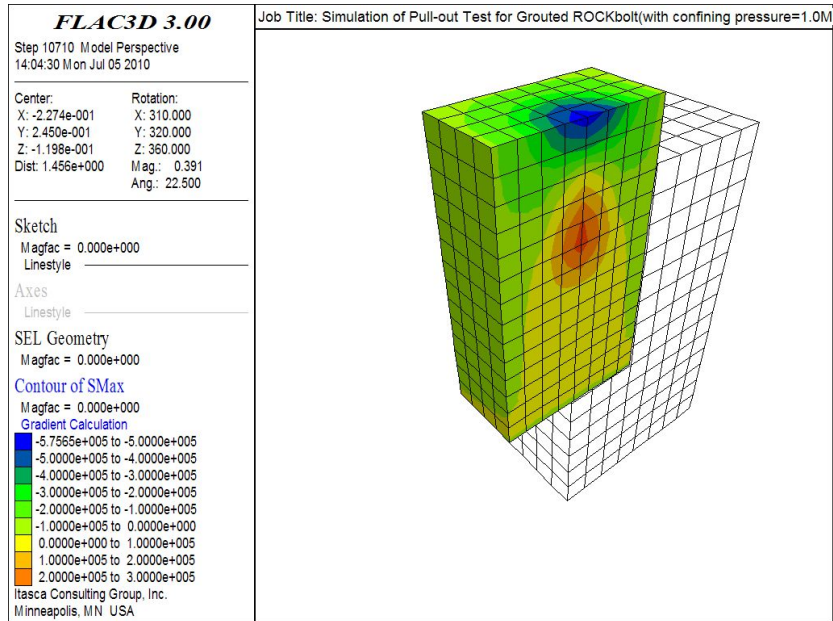


Figure 7.25 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

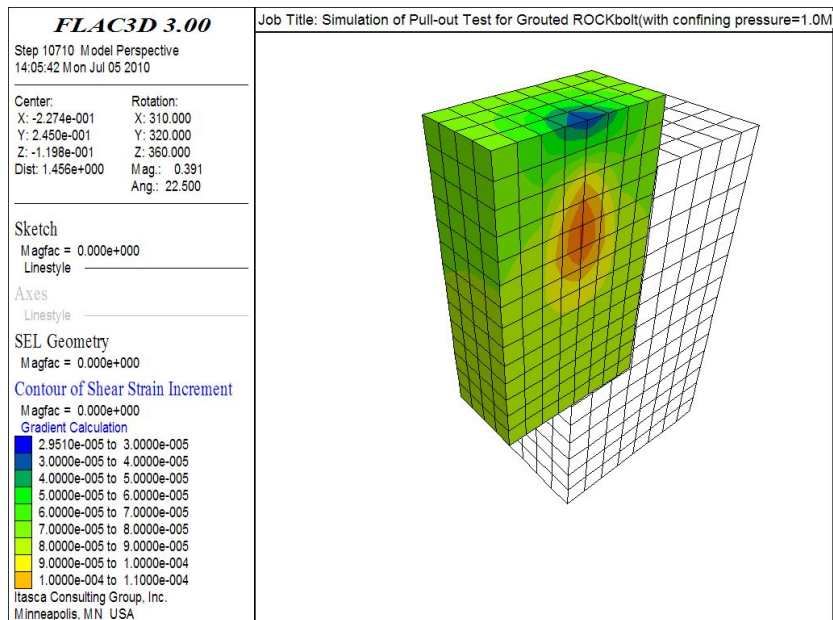


Figure 7.26 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

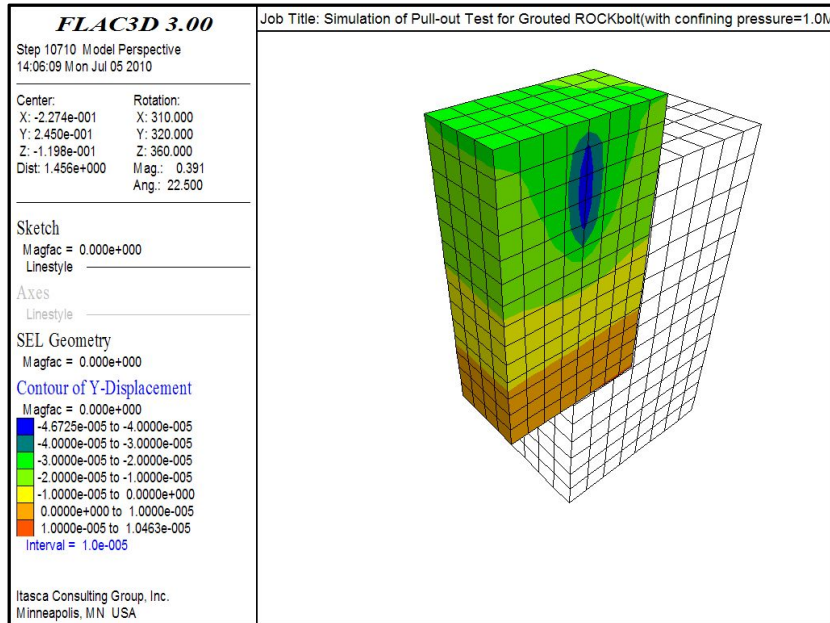


Figure 7.27 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

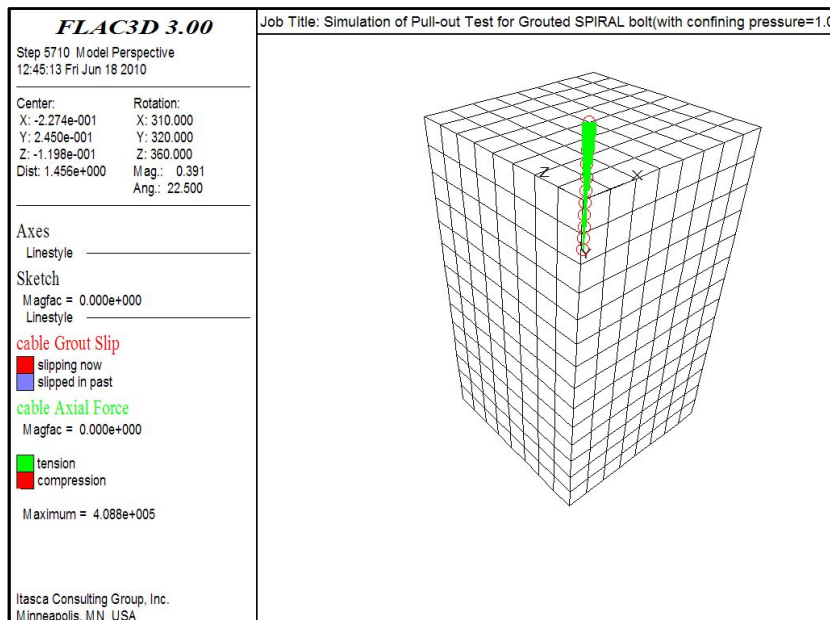


Figure 7.28 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

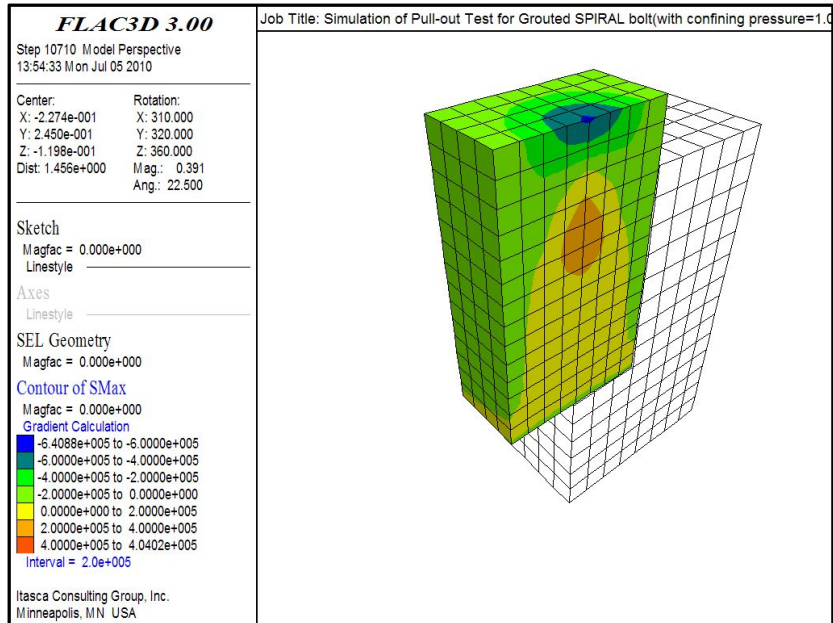


Figure 7.29 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

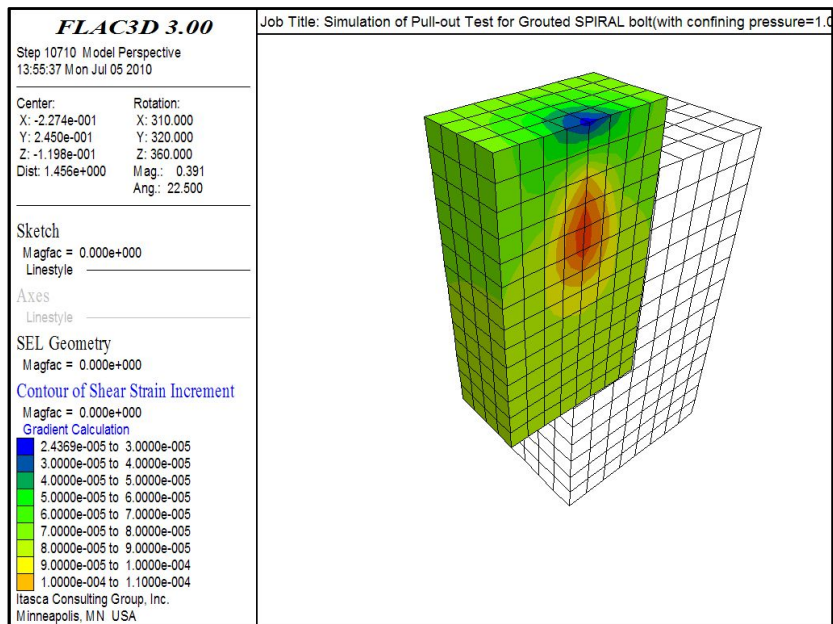


Figure 7.30 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

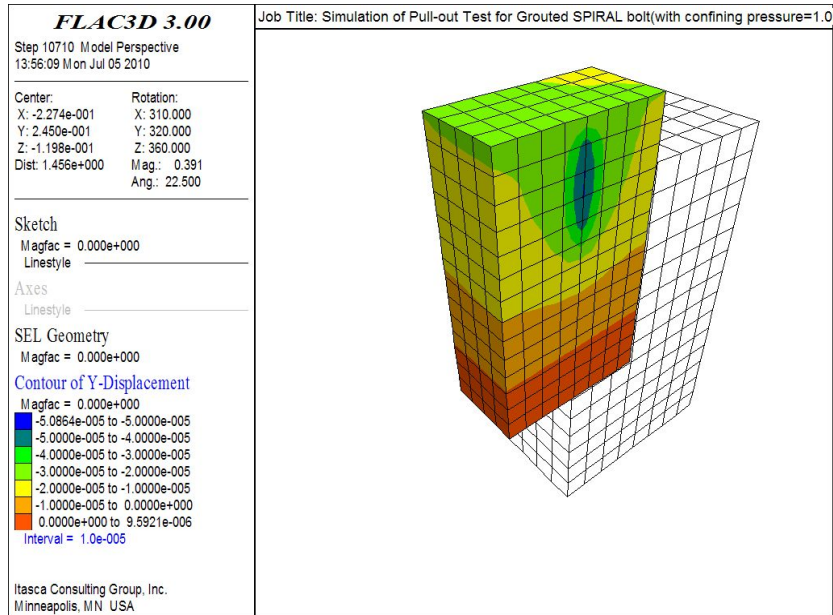


Figure 7.31 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 1.0$ MPa.

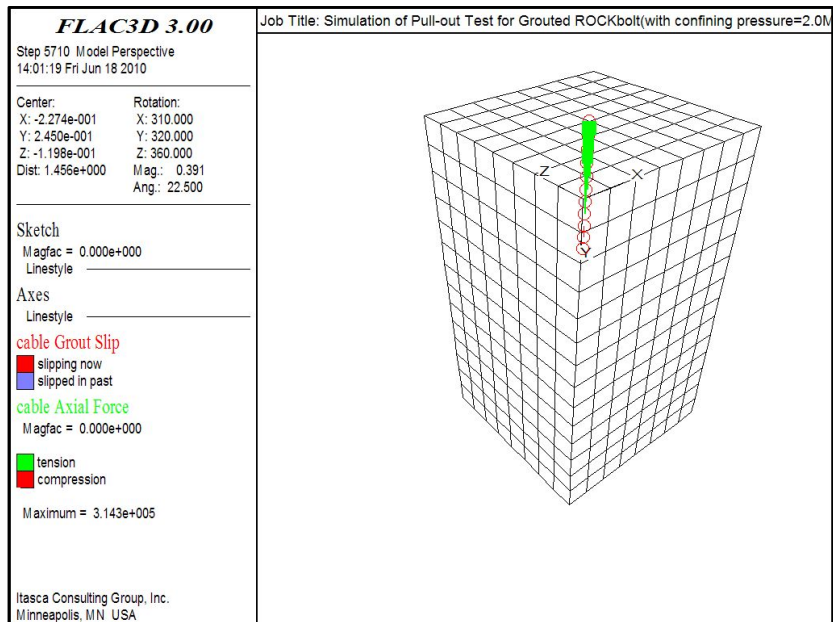


Figure 7.32 Grout slippage and axial force for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

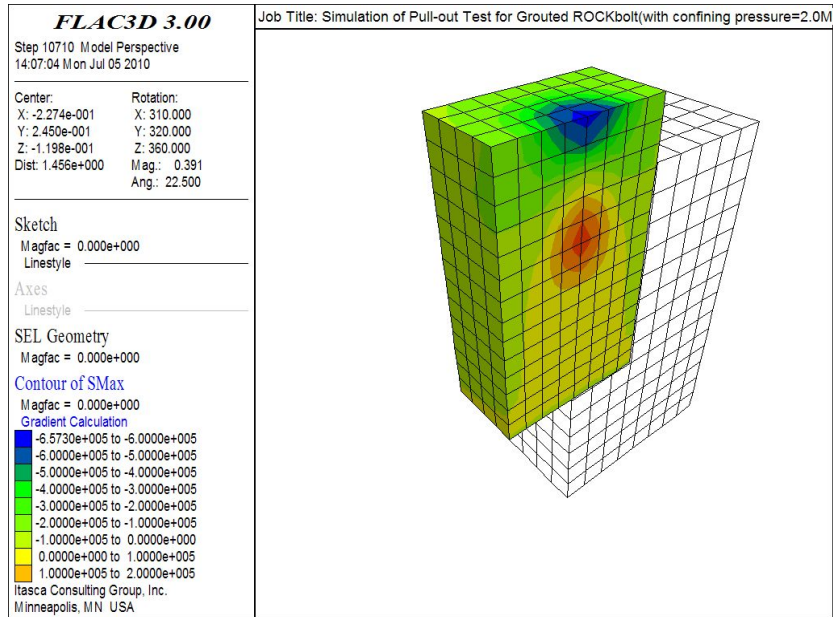


Figure 7.33 Contour of maximum principal stress for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

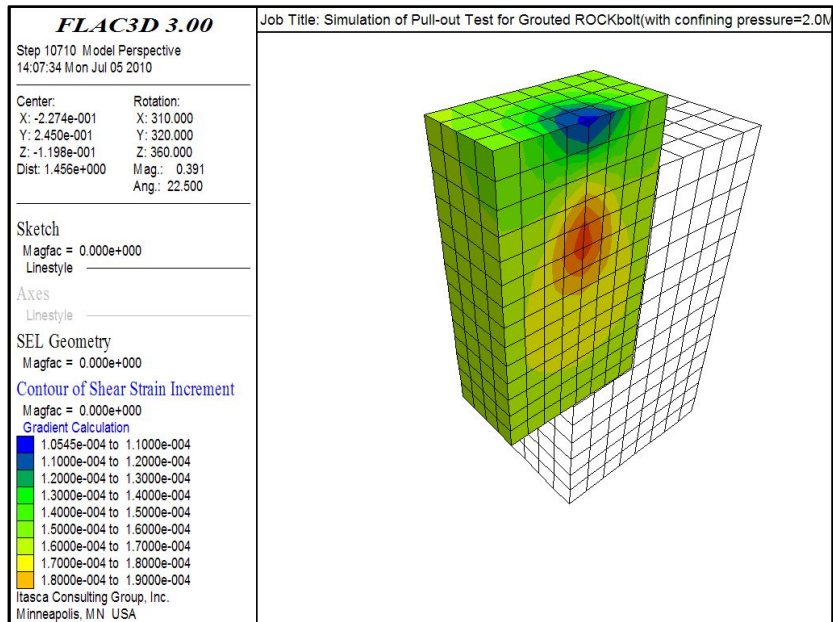


Figure 7.34 Contour of maximum shear strain increment for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

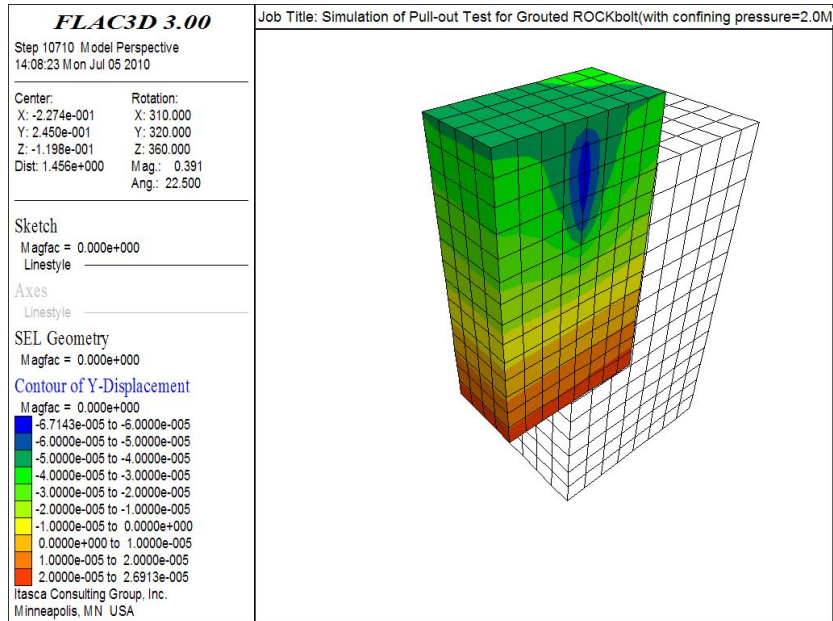


Figure 7.35 Contour of displacement for rock bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

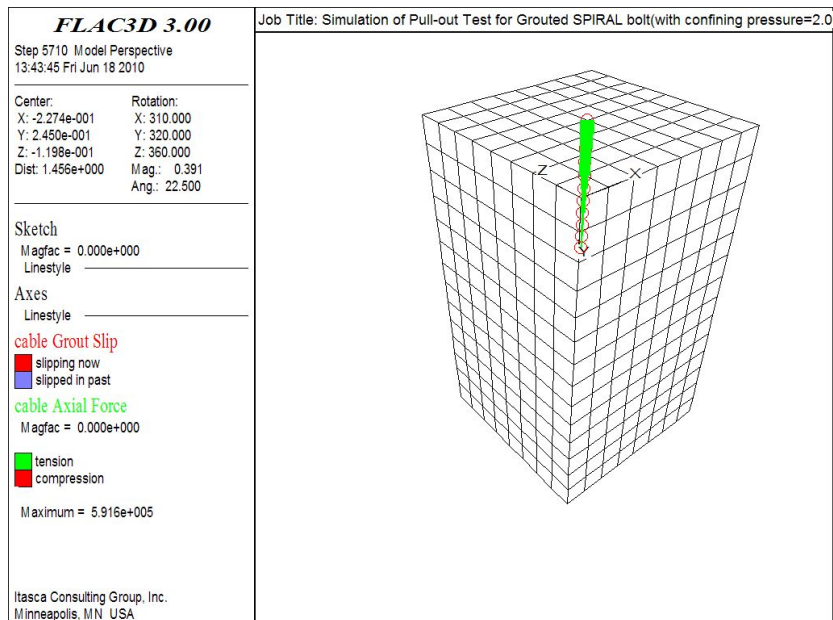


Figure 7.36 Grout slippage and axial force for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

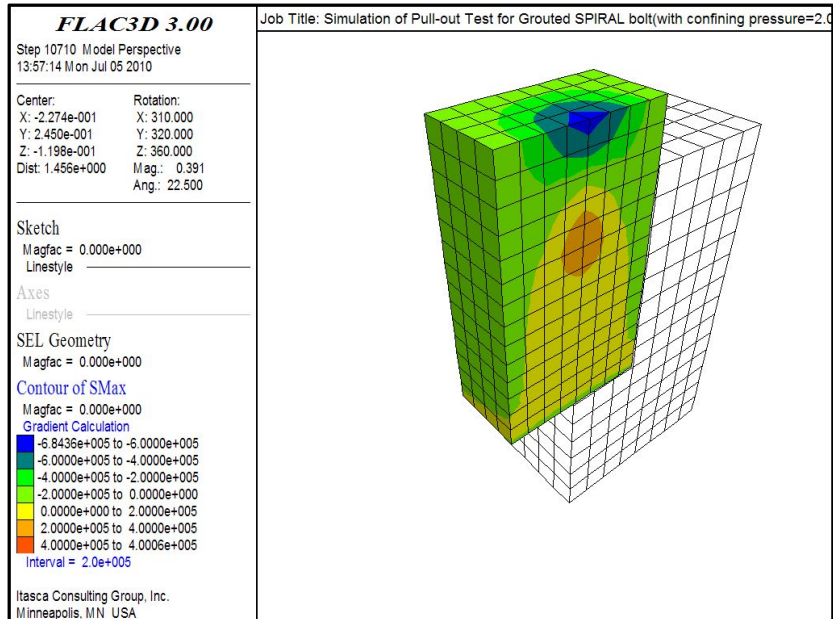


Figure 7.37 Contour of maximum principal stress for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

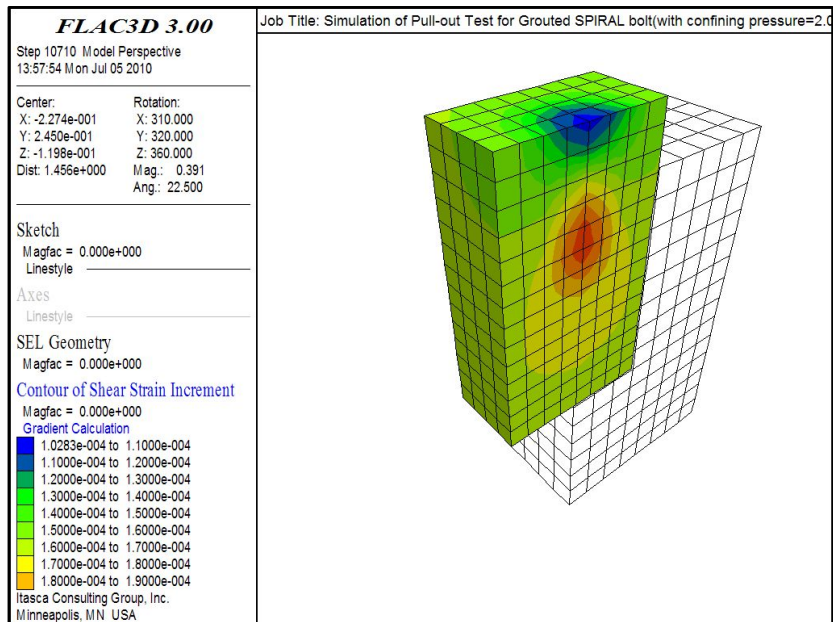


Figure 7.38 Contour of maximum shear strain increment for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

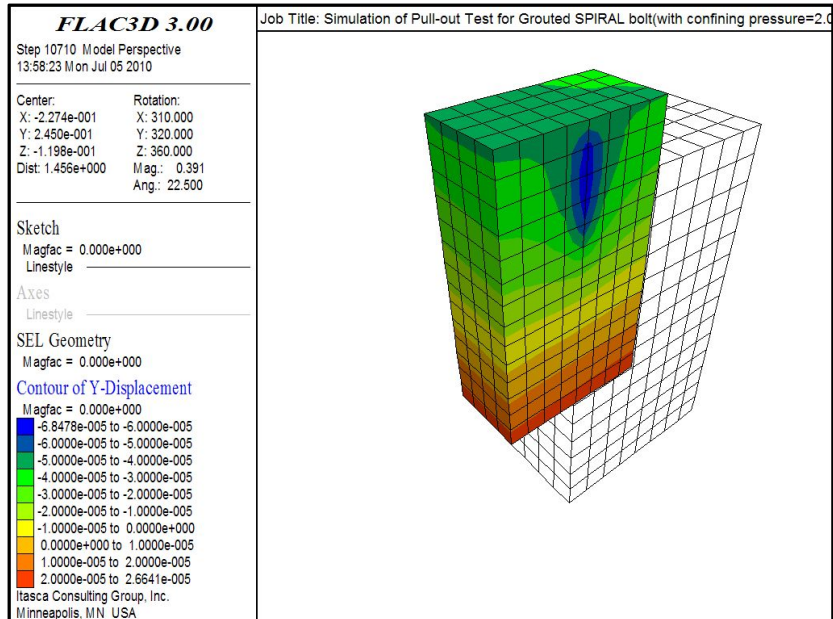


Figure 7.39 Contour of displacement for spiral bolt when confining pressure, $\sigma_c = 2.0$ MPa.

Diederichs 등 (1993)이 구속압에 따라 축 방향 slip을 고려한 시험결과를 보고하였다(Figure 7.40). Figure 7.40과 같이 전면접착형 볼트형식의 지보부재는 터널 굴착에 따른 암반의 이완으로 구속압이 저하됨에 따라 볼트와 그라우트의 인터페이스에서 전단강도가 감소하며 결국 파괴에 이를 수 있음을 알 수 있다. 이러한 사실을 고려해 볼 때, Spiral bolt는 록 볼트에 비해 그 적용성이 우수한 것으로 판단된다.

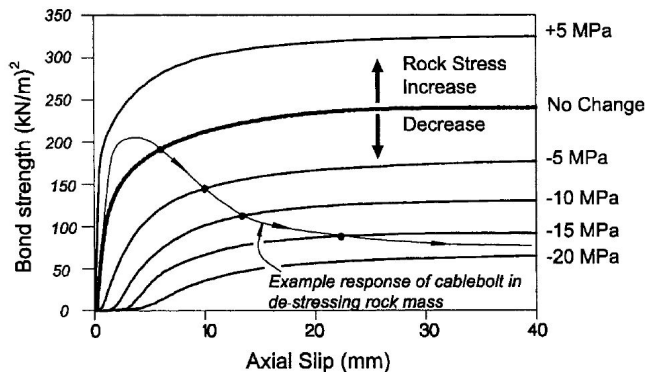


Figure 7.40 Example of influence of stress change on predicted pull out load by Diederichs et al. (1993), where rock deformation is causing rock relaxation.

8. 고찰

8.1 터널에서의 Spiral bolt 적용성

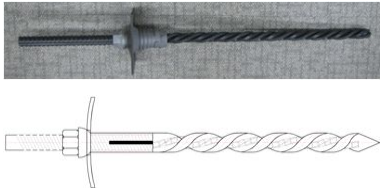
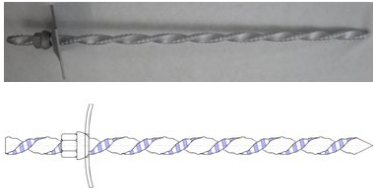
본 연구에서는 터널에서의 Spiral bolt의 지보특성 및 지보효과를 규명하기 위하여 록 볼트와의 실내인발시험, 원위치 인발시험 및 수치해석을 통하여 비교하였으며, 시공성·경제성·효율성·안전성·환경성 측면에서 록 볼트 대체체로서 활용가능성을 한국도로공사 목포-광양간 고속도로 제8공구에서 입증하였으며, 현장적용 가능한 Spiral bolt의 역학적 특성은 Table 8.1과 같다.

Table 8.1 Comparison of mechanical properties of rock bolts and spiral bolts

| | Rock bolt | | Spiral bolt | |
|---------------------------------------|-----------|---------|-------------|---------|
| | Standard | Result | Standard | Result |
| Quality | SD350 | SD350 | SD350 | SD350 |
| Area (mm ²) | 506.7 | 506.7 | 382 | 382 |
| Yield strength (N/mm ²) | 350 | 406 | 350 | 541 |
| Tensile strength (N/mm ²) | 500 | 643 | 500 | 699.5 |
| Yield load (N) | 177,345 | 205,720 | 133,700 | 206,662 |
| Max Tensile load (N) | 253,350 | 325,808 | 191,000 | 267,209 |
| Elongation (%) | ≥18 | 22 | ≥18 | 28 |

그러나 적용성 확대에 따른 문제점 및 개선 사항으로 첫째, 단면적 저하에 따른 재료의 강도개선과 둘째, 암반고정용 볼트·너트 체결을 위한 용접부의 개선이 필요할 것으로 나타났다. 따라서 상기와 같은 문제점 해결을 위하여 Table 8.2와 같이 개선하였으며, 향후 터널에서의 록 볼트의 대체체로서 기대 효과가 대단히 클 것으로 전망된다.

Table 8.2 Comparison of mechanical properties of spiral bolts before and after upgrade

| | Improvement ago | After improvement |
|---------------------------------------|---|--|
| Spiral rock bolt |  |  |
| Gauge | H25×9t×Ø10mm×2EA | H27×13.5t(|
| Quality | SD350 | SD500 |
| Area (mm ²) | 382 | 365 |
| Yield strength (N/mm ²) | 541 | 500 ≤ |
| Tensile strength (N/mm ²) | 699.5 | 620 ≤ |
| Yield load (N) | 206,662 | 182,500 |
| Max.Tensile load (N) | 267,209 | 226,300 |
| Elongation (%) | ≥18 | ≥18 |

8.2 Spiral bolt 적용시 기대효과

본 연구에서의 수행은 록 볼트의 대체제로서의 적용성을 확인하였으며, 연구 결과에 비추어 볼 때 향후 터널내의 지보재 뿐만 아니라 연약지반 보강, 영구가시설 및 토목기초에 활용, 건축 장식용, 농업 비닐하우스 및 각종 하우스 기초, 기타 시설물의 독립기초대용 등 광범위하게 활용될 것으로 전망되며, 국외 적용사례를 살펴보면 Figure 8.1과 같다.



Figure 8.1 Application of spiral bolts in foreign countries (www.gt-spiral.com).

국외의 경우 연성재질인 SS400의 평철만으로 연구개발 되어 소형 시설물 및 기타 연약지반에 국한되어 활용되어지고 있으며, 재질의 강도 및 볼트 너트 체결을 위한 스파이럴 용접의 문제점에 따른 한계성 때문에 활용범위가 한정되어 있다. 그러나, 본 연구 결과로서 Spiral bolt의 문제점을 개선하였으며 그 적용성 확대 범위와 수요시장은 대단히 클 것으로 판단되며, Spiral bolt의 기대 효과는 다음과 같이 다섯 가지 측면으로 요약할 수 있다.

첫째, 적용성 측면에서 록 볼트와 비교할 때 Spiral bolt는 철근의 단면적을 줄이고 강도를 보강하여 지보효과를 극대화시킴으로서 원자재 사용량을 감소시켜 적용

성이 우수하며 친환경적이고, 지반거동이나 지속적인 피로충격하중에도 지보안정성, 지보 회복력, 지보 유지력 측면에서 월등히 우수하며 다양한 목적으로 사용 가능하므로 적용성이 탁월하다

둘째, 시공성 측면에서 Spiral bolt의 형상이 나선형이므로 천공 내 이물질이나 암편이 존재하여 천공 내 상태가 불량할지라도 시공하기가 쉽다. 또한 회전하면서 시공하기 때문에 충전재를 밀어 올려 공내 충전재를 밀실하게 충전하는 것이 용이하다. 또한, 토목기초에 적용 시 사질토, 연약지반, 전석층 등에서 용이하게 시공할 수 있다.

셋째, 안전성 측면에서 록 볼트에 비해 무게가 가벼우므로 운반 및 취급이 용이하므로 작업자가 안전하게 시공할 수 있다.

넷째, 환경성 측면에서 Spiral bolt가 록 볼트보다 철강 원자재의 사용량이 적을 뿐 아니라 연약지반의 경우 천공작업 없이 자체회전력만으로 설치가 가능하므로 지반을 교란시키지 않아 친환경적이라 할 수 있다.

다섯째, 경제성 측면에서 록 볼트와 Spiral bolt의 가격 비교 시 스파이럴 볼트의 단면적 감소에 따른 레진 추가(1EA/공) 소요량을 고려하더라도 록 볼트 가격 35,760원/4m 대비 스파이럴 볼트 가격 34,148원/4m으로서 원재료 절감에 따른 원가절감이 약 6.5% 절감되는 기대효과가 있다.

9. 결론

본 연구는 Spiral bolt의 지보효과에 관한 연구로서, 록 볼트와 Spiral bolt의 지보재 특성을 비교하기 위하여 실내시험 및 원위치 인발시험을 수행하였고 수치해석을 통하여 이를 비교 검토하였으며, 연구 결과를 토대로 터널에서 적용 가능한 Spiral bolt의 적정 재원을 도출하여 현장 적용시험을 수행하였다. 따라서, 연구 수행 결과를 종합하여 정리하면 다음과 같다.

첫째, 록 볼트와 Spiral bolt의 역학적 특성에서 단면적의 크기는 록 볼트가 Spiral bolt보다 약 1.3배 높게 나타났다. 연신율은 Spiral bolt가 록 볼트보다 1.2배 높은 반면 항복하중은 거의 동일하게 나타났으며, 인발하중은 록 볼트가 Spiral bolt보다 1.2배 높게 나타났다.

둘째, 록 볼트와 Spiral bolt의 양생기간에 따른 실내인발시험에서 인발하중-변위의 경우, 양생기간이 7일과 28일에서 두 지보재의 변위는 거의 동일하거나 감소하는 경향을 보였는데, 이것은 양생기간에 따라 그라우트의 압축강도가 증가하여 지보재와 그라우트 사이의 부착력이 증가하기 때문으로 판단된다. 구속압-변위-인발하중의 경우, 동일한 인발하중단계에서 Spiral bolt의 구속압이 록 볼트보다 크게 나타나는데, 이러한 결과는 동일 조건하에 있는 지반이나 암반에 지보재를 설치할 경우 Spiral bolt가 록 볼트보다 지반이나 암반의 안정성을 확보하는데 더 효과적임을 나타낸다. 내부압-전단응력의 경우, 양생기간 7일인 경우보다 28일인 경우가 최대내부압과 최대전단응력이 록 볼트보다 Spiral bolt가 더 크게 나타남을 보였다. 이와 같이 지보재의 지보특성은 그라우트 재료의 양생기간과 지보재의 형상에 따라서 다르게 나타날 수 있으며, 동일 조건하에 있는 지반이나 암반에서 Spiral bolt가 록 볼트보다 지보재로서 인발하중과 구속압을 더 크게 발휘할 것으로 판단된다.

셋째, 록 볼트와 Spiral bolt의 시멘트-모르타르 충전재에 대한 암사면 원위치 인발시험에서 록 볼트는 항복점 이상에서는 인발하중이 급격히 감소함과 함께 변위가 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이것은 록 볼트와 시멘트-모르타르

경계부에 순간적으로 파괴가 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 반면, Spiral bolt는 항복점 이상에서도 인발하중과 함께 변위가 일정하게 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 Spiral bolt와 시멘트-모르타르 경계부에 점차적인 파괴가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 터널에서 레진 충전재의 양생기간에 따른 록 볼트와 Spiral bolt의 원위치 인발시험 결과에 있어서 인발하중은 두 지보재의 경우 레진의 양생기간이 길어질수록 증가하는 경향을 보였다. 레진의 양생기간에 따른 인발하중의 차이는 4시간인 경우가 가장 크게 나타났으며, 그 이상인 8시간, 12시간, 24시간인 경우의 인발하중은 거의 비슷한 경향으로 나타났다. 최대 인발하중 단계에 따른 변화 양상을 살펴보기 위하여 실시한 각 지보재에 대한 3회의 재인발시험의 결과를 보면, 록 볼트의 경우 인발시험이 1회, 2회, 3회로 증가할수록 인발하중은 점점 감소하였는데, 이와 같은 결과는 지보재가 최대인발하중에 도달할 때 지보재-충전재 사이에 부분적으로 파괴가 발생함으로써 인해서 나타나는 현상으로 판단된다. 반면 Spiral bolt는 인발시험 횟수에 관계없이 거의 일정함을 보였는데, 이것은 지속적인 하중이 발생할 때 Spiral bolt가 지보재로서 훨씬 유리하게 작용된 것으로 판단된다.

넷째, 실내인발시험의 결과를 바탕으로 수치해석을 이용하여 터널에서의 구속압에 따른 록 볼트와 Spiral bolt의 하중-변위관계를 살펴보았다. 구속압에 따른 항복전단강도의 관계는 두 지보재 모두에서 구속압의 증가와 함께 항복전단강도도 증가하는 비례관계를 보였다. 특히 구속압이 증가함에 따라 Spiral bolt의 경우가 록 볼트보다 적은 변위에서 더 높은 항복전단강도를 보였으며, 구속압 조건에 따라 Spiral bolt가 록 볼트보다 약 4% ~ 25% 정도 높은 항복전단강도를 나타냈다. 낮은 구속압 조건일 때 두 지보재의 항복전단강도 차이는 크게 나타났으며, 구속압이 높을 때 이들 사이의 차이는 작게 나타났다. 이것은 구속압이 작을수록 Spiral bolt의 효용성이 록 볼트보다 크게 나타남을 의미한다. 또한, Spiral bolt는 구속압이 작을수록 록 볼트에 비해 축 방향 전단거동에서 최대 25% 이상 높은 효과를 보였으며, 이것은 구속압 조건을 고려하여 지보재의 적용성을 판단할 수 있음을 의미한다. 따라서 터널의 경우 전면접착형 볼트형식의 지보부재는 터널 굴착에 따른 암반의 이완으로 구속압이 저하됨에 따라 지보재와 그라우트 사이 경계면에서의 전단강도가 감소함으로써 결국 파괴에 이른다는 사실을 감안 할 때, Spiral bolt의 지보효과가 록 볼트보다 우수한 것으로 판단된다.

다섯째, 본 연구수행 결과 록 볼트의 대체제로서 그 적용성을 입증하였으며, 연구 결과에 비추어 볼 때 향후 Spiral bolt 활용 시 기대 효과로서 적용성 측면에서는 철근의 단면적을 줄여 원자재 사용량을 감소 시켰으며, 강도를 보강하여 지보재 효과를 극대화시켰고, 지반거동이나 지속적인 피로충격하중에도 지보안정성, 지보 회복력, 지보유지력 측면에서 지보효과가 탁월하여 다양한 용도로 적용성이 우수하며, 시공성, 안전성 측면에서는 경량이면서 나선형으로 취급이 편리하고 불량의 암반에서도 안전하게 설치가 용이하다. 환경성 측면에서는 록 볼트 4m 길이 10,000개를 Spiral bolt로 대체할 경우 약 38ton의 원자재 사용을 절감할 수 있으며, 연약지반의 경우 지반 교란 없이 자체 회전력만으로 설치가 가능하다. 경제성 측면에서는 록 볼트의 대체 지보재로 사용할 경우 약 6.5%의 원가절감 기대 효과가 있다.

따라서, 스파이럴 볼트는 터널내의 지보재 뿐만 아니라 연약지반 보강, 영구가시 설 및 토목기초 활용, 농업용 비닐하우스 기초 및 각종 하우스 기초, 기타 시설물의 독립기초대용 등 광범위하게 활용될 것으로 전망되며, 특히, 터널 굴착시 지속적인 발파 충격하중에 대한 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보효과 규명의 구체적인 연구와 대체지보재로서의 재질, 강도, 규격에 대한 표준화, 공사 시방서등의 정립이 필요할 것으로 판단되며, 향후 스파이럴 볼트의 적용성 확대와 관련한 다양한 연구 개발이 이루어지길 기대한다.

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.
- 강성승, 히라타 아츠오, 정승희, 이우람, 제동광, 김대현 (2010) 스파이럴 볼트 변형률계를 이용한 연약지반기초 및 암반사면 거동 예측, 터널과 지하공간, 제20권, 2호, pp. 105-111
- 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.
- 황봉갑 (2002) 대학과정 재료역학, 일진사, pp. 77-79.

- ASTM, C39-86 (1986), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, vol. 6(4), pp. 189-239.
- Bawden, W. P., Hyett, A. J., Lausch, P. (1992) An experimental procedure for the in situ testing of cable bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 29, pp. 525-533.
- Bieniawski, Z.T. (1973) Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, pp. 335-344.
- Bieniawski, Z.T. (1989) *Engineering rock mass classifications*. New York ; Wiley.
- Chen, S. -H., Fu, C. -H., Shahrour, I. (2009) Finite element analysis of jointed rock masses reinforced by fully-grouted bolts and shotcrete lining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46, pp. 19-30.
- Cundall, P., Board, M. (1988) A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, *Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp. 2101-2108.
- Deere, D.U., Peak, R.B., Parker, H, Monsees, J.E., Schmidt, B(1970) Design of tunnel support systems, *Highway Research Record*, No. 339, pp. 26-33.
- Diederichs, M.S., Pieterse, E., Nose, J., Kaiser, P.K. (1993) A model for evaluating cablebolt bond strength: an update. *Eurock '93*. AA Balkema, Rotterdam, pp. 83-90.
- 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.
- Goodman, R.E. (1989) *Introduction to rock mechanics*, Wiley, Chapter 3, pp. 55-95.
- 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.
- Hudson J. A. (1989) Rock mechanics principles in engineering practice, CIRIA, London, pp. 40-47.
- Hudson J.A., Harrison, J.P. (1997) Engineering rock mechanics -An introduction to the principles, Pergamon, Chapter 6, pp. 106-111.
- 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.
- Hyett, A. J., Bawden, W. F., Macsporrán, G. R., Moosavi, M. (1995) A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified hoek cell, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 32, pp. 11-36.
- Indraratna, B., Kaiser, P. K. (1990) Design for grouted rock bolts based on the convergence control method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 27, pp. 269-281.
- 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.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. (1977) Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd Edition, Chapman & Hall, London.
- Jeng, F.-S., Huang, T.-H.(1999) The holding mechanism of under-reamed rock bolts in soft rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, pp. 761-775.

- 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.
- Li, C., Stillborg, B. (1999) Analytical models for rock bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, pp. 1013-1029.
- Liang, R. Y. (1997) Invited a short course "Soil nailing, ground anchoring and anchored excavation", Dongguk University, Seoul, Korea, November.
- Oreste, P. P., Peila, D.(1996) Radial passive Rock bolting in tunneling design with a new convergence-confinement model, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 33, pp. 443-454.
- Peng, S.S. (1978) *Coal Mine Ground Control*, John Wiley & Sons.
- Popov, E. P. (1978) *Mechanics of Material*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Tannant, D. D., Brummer, R. K., Yi, X. (1995) Rock bolt behavior under dynamic loading: Field tests and modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 32, pp. 537-550.
- Terzaghi, K. (1966) *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons, NewYork, pp. 373-384.
- WWW.GT-SPIRAL.COM
- 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.

감사의 글

인생의 삶에서 지금까지 저는 앞만 보고 달려왔습니다. 얻는 것 보다는 잃는 것도 많았다는 생각이 들지만 돌이켜 생각해보면 제게 있어 학위과정의 길은 제 인생 전체에서 큰 발전과 발돋움의 기회였고 학문의 길보다는 어쩌면 인격 수양의 과정에 더 가깝지 않았나 싶습니다.

이제 비로소 과정을 마치고 글로서 감사의 마음을 남기려 하니 주마등처럼 스치는 생각 속에서 배풀지 못하고 받기만 한 삶을 반성하게 됩니다.

저를 도와주신 분들이 이렇게 많음에도 불구하고 일일이 찾아뵙고 감사드리지 못한 점 우선 용서를 구합니다.

참으로 부족한 저를 학문의 길로 불러들여 오늘의 제가 있게 해주신 평생의 스승인 지도교수 강추원 교수님의 은혜에 고개 숙여 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 가운데 초라한 논문을 맡아서 열과 성의로 심사해 주신 한국지질자원 연구소 류창하 박사님, 세심한 검토와 격려로 심사해주신 이연규 교수님, 많은 조언과 사랑으로 이끌어주신 원연호 박사님, 본교의 고진석 교수님께 감사를 드립니다.

학위과정 중 용기와 배려와 따뜻한 격려로 가르침을 주신 본교의 박영석 교수님, 한오형 교수님, 박천영 교수님, 바쁘신 와중에도 실무지도를 아낌없이 배려해주신 강성승 교수님 은혜에 깊이 감사드립니다.

그리고 본 논문을 위하여 열과 성의를 다해준 암석역학 실험실 김장원을 비롯한 여러 후배님들 역시 저에게 큰 도움을 주었습니다.

논문이 완성 되어가는 과정에서 따뜻한 격려와 큰 도움을 주신 기경철 박사님, 대림산업의 강기돈 과장님, 우리 회사의 김태현 이사, 박준호 차장, 김진호 상무를 비롯한 임. 직원 여러분들에게도 감사를 드립니다.

특히 본 논문과 관련하여 연구개발에 불철주야 열심히 최선을 다해 준 영원한 친구 (주)신화의 정천식 사장과 프로텍 이용범사장님 그리고 임직원에게도 감사를 드리며 인생의 삶에 있어 힘든 역경이 있을 때마다 위로와 격려와 큰 도움을 주신 제 인생의 등불이 되어주신 (주)명장ENG 심동수 사장님께 고개 숙여 감사드립니다. 항상 제 마음에 영원한 스승이신 임한욱 교수님과 동종업

계의 지인들에게도 감사를 드립니다.

그리고 어려운 상황에도 믿음과 의리로 희망을 갖도록 밀어준 (주)화순테마랜드 조영우 형님과 이지욱님 그리고 회사 가족들에게 감사드리며 마지막으로 조상님과 평생 사랑과 희생으로 후원해 주신 어머니를 비롯한 형제, 자매 그리고 장모님과 처형, 동서 조카들에게 뭐라 감사의 말을 해야 할지 모르겠습니다.

끝으로 사업과 학업에 전념 하면서 집을 비운 시간이 많았고 아빠다운 가족애를 나누지 못했던 저에게 묵묵히 내조에 헌신을 다해준 아내 미선이와 언제나 사랑스럽고 나의 보배인 아들 연식이와 딸 혜정이에게 앞날에 아버지라는 이름으로 등불이 되길 간절한 마음으로 기원합니다.

저작물 이용 허용서

| | | | | | |
|------|--|----|----------|----|----|
| 학과 | 에너지 자원공학과 | 학번 | 20027502 | 과정 | 박사 |
| 성명 | 한글 : 조 영 동 한문 : 曹 永 東 영문 : Cho, Young Dong | | | | |
| 주소 | 경기도 수원시 정자2동 844-4 두견마을 벽산3차 354동 302호 | | | | |
| 연락처 | E-MAIL : moojin@empal.com | | | | |
| 논문제목 | 한글 : Spiral bolt의 지보효과에 관한 연구 영어 : A study on the supporting effect of a spiral bolt as a support system | | | | |

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()

2010 년 8월 일

저작자 : 조 영 동 (인)

조선대학교 총장 귀하