



### 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)



2016년 8월

석사학위논문

다목적 지보재인 친환경 스파이럴  
볼트의 지보특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

노정두

# 다목적 지보재인 친환경 스파이럴 볼트의 지보특성에 관한 연구

Support characteristics of Eco-Spiral Bolt (ESB) as  
multipurpose support member

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

노정두

다목적 지보재인 친환경 스파이럴  
볼트의 지보특성에 관한 연구

지도교수 강 성 승

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

노 정 두

# 노정두의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고 진석 (인)

위원 조선대학교 교수 최태진 (인)

위원 조선대학교 교수 강성승 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

# -목 차-

목차 .....	i
List of tables .....	iii
List of figures .....	iv
Abstract .....	ix
1. 서론 .....	1
2. 연구방법 .....	4
2.1 실내 시험 .....	4
2.2 실내 시험결과 .....	10
3. 수치해석 .....	12
3.1 지반 및 재료의 물성 .....	15
3.2 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각에 따른 지반거동 수치해석 .....	16
3.3 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비에 따른 지반거동 수치해석 .....	19
3.4 단일층/다층 지반구조에 따른 지반거동 수치해석 .....	21
4. 연구 결과 .....	22
4.1 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각과 지반거동 관계 .....	22
4.1.1 비틀림 각 $0^\circ$ 에코-스파이럴 볼트 인발시험 .....	22
4.1.2 비틀림 각 $15^\circ$ 에코-스파이럴 볼트 인발시험 .....	28
4.1.3 비틀림 각 $30^\circ$ 에코-스파이럴 볼트 인발시험 .....	34
4.1.4 비틀림 각 $45^\circ$ 에코-스파이럴 볼트 인발시험 .....	40
4.1.5 비틀림 각 $60^\circ$ 에코-스파이럴 볼트 인발시험 .....	46
4.2 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비에 따른 지반거동 관계 .....	52
4.2.1 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비 1.5 인발시험 .....	52
4.2.2 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비 2.0 인발시험 .....	58
4.2.3 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비 3.0 인발시험 .....	64
4.3 단일층/다층 지반구조에 따른 지반거동 관계 .....	70
5. 고찰 .....	76

6. 결론 .....	80
참고문헌 .....	82

## List of tables

Table 2-1. Dimension of the Eco-Spiral Bolt. ....	4
Table 2-2. Mixing ratio of cement, sand, water and dimension of specimen. ....	5
Table 2-3. Mechanical properties of Eco-Spiral Bolt by uniaxial compression test. .....	10
Table 2-4. Mechanical properties of specimen by Brazilian, uniaxial compression, and triaxial compression test. ....	11
Table 3-1. Input data for FLAC 3D numerical analysis. ....	15
Table 3-2. Properties of Eco-Spiral Bolt according to the twisted angle. ....	17
Table 3-3. Dimensions of ground and grout for numerical analysis on a ratio of borehole diameter and Eco-Spiral Bolt width ( $D_{BH}/W_{ESB}$ ). ....	19
Table 3-4. Dimensions of ground for numerical analysis on the multi-layer structure. ....	21
Table 4-1. Results of numerical analysis along the twisted angles of Eco-Spiral Bolt by pull-out test. ....	23
Table 4-2. Results of numerical analysis on $D_{BH}/W_{ESB}$ by pull-out test(twisted angle of Eco-Spiral Bolt: 45°, width: 10 cm, length: 100 cm, thickness: 1 cm). ....	53
Table 4-3. Result of numerical analysis along the multi-layer structure by pull-out test. ....	71

## List of figures

Figure 2-1. View of (a) steel sheet bar and (b) Eco-Spiral Bolt by twisting force.	4
Figure 2-2. Specimens for physical and mechanical tests.	5
Figure 2-3. Process of density measurement, (a) desiccator and vacuum oil pump for saturation, (b) measurement of immersed and saturated weights and (c) drying oven for measurement of dry weight.	6
Figure 2-4. Apparatus of the uniaxial compression test in laboratory.	7
Figure 2-5. A setup for the triaxial compression test in laboratory.	8
Figure 2-6. A view of the Brazilian test for indirect tensile strength in laboratory.	9
Figure 2-7. Result of compression test on Eco-Spiral Bolt uniaxial.	10
Figure 2-8. Mohr-Coulomb envelope of specimen.	11
Figure 3-1. The sort of numerical analysis.	12
Figure 3-2. Geometry numerical model.	14
Figure 3-3. Calculation of loading speed.	14
Figure 3-4. Schematic diagram of X-Y section and for the twisted angles of Eco-Spiral Bolt.	17
Figure 3-5. Numerical model along the twisted angle; (a) twisted angle = 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°.	18
Figure 3-6. X-Y section for numerical analysis on (a) a ratio of borehole diameter ( $D_{BH}$ ) and Eco-Spiral Bolt width ( $W_{ESB}$ ) and numerical model of (b) $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ , (c) $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ , (d) $D_{BH}/W_{ESB} = 3.0$ .	20
Figure 3-7. Numerical model for the multi-layer structure.	21
Figure 4-1. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°.	24
Figure 4-2. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°.	24
Figure 4-3. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in	

case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°. ....	25
Figure 4-4. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°. ....	26
Figure 4-5. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°. ....	27
Figure 4-6. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°. ....	30
Figure 4-7. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°. ....	30
Figure 4-8. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°. ....	31
Figure 4-9. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°. ....	32
Figure 4-10. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°. ....	33
Figure 4-11. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°. ....	36
Figure 4-12. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°. ....	36
Figure 4-13. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°. ....	37
Figure 4-14. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°. ....	38
Figure 4-15. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°. ....	39

Figure 4-16. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.	42
Figure 4-17. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.	42
Figure 4-18. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.	43
Figure 4-19. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.	44
Figure 4-20. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.	45
Figure 4-21. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.	48
Figure 4-22. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.	48
Figure 4-23. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.	49
Figure 4-24. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.	50
Figure 4-25. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.	51
Figure 4-26. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ .	54
Figure 4-27. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ .	54
Figure 4-28. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ .	55

Figure 4-29. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 1.5. ....	56
Figure 4-30. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 1.5. ....	57
Figure 4-31. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 2.0. ....	60
Figure 4-32. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 2.0. ....	60
Figure 4-33. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 2.0. ....	61
Figure 4-34. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 2.0. ....	62
Figure 4-35. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 2.0. ....	63
Figure 4-36. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 3.0. ....	66
Figure 4-37. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 3.0. ....	66
Figure 4-38. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 3.0. ....	67
Figure 4-39. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 3.0. ....	68
Figure 4-40. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with $D_{BH}/W_{ESB}$ 3.0. ....	69

Figure 4-41. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure. ....	72
Figure 4-42. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure. ....	72
Figure 4-43. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure. ....	73
Figure 4-44. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure. ....	74
Figure 4-45. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure. ....	75
Figure 5-1. Result of (a) pull-out load and (b) maximum shear stress with the twisted angles. ....	77
Figure 5-2. Result of (a) pull-out load and (b) maximum shear stress with $D_{BH}/W_{ESB}$ . ....	77
Figure 5-3. Result of (a) pull-out load and (b) maximum shear stress with multi-layer structure. ....	78

# Abstract

## Support characteristics of Eco-Spiral Bolt (ESB) as multipurpose support member

By Jeongdu Noh

Adv. Prof. : Seong-Seung Kang, Ph.D,

Dept. of Energy and Resources Engineering  
Graduate School of Chosun University

This study is to defined the characteristics of Eco-Spiral Bolt (ESB) as multipurpose support member which was developed for improvement of ground strength among various geotechnical problems. For this purpose, we analysed the difference of ground behavior along the twisted angle of Eco-Spiral Bolt, a ratio of borehole diameter and Eco-Spiral Bolt width, and ground structure of single layer and multi-layer using FLAC 3D based on Finite Difference Method (FDM).

By the results of ground behavior along the twisted angles of Eco-Spiral Bolt,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , the pull-out load at 8 mm with the maximum displacement was  $0^\circ=63.9$  kN,  $15^\circ=21.9$  kN,  $30^\circ=62.9$  kN,  $45^\circ=76.4$  kN,  $60^\circ=135.3$  kN, respectively. The maximum shear stress between Eco-Spiral Bolt and grout of the X-Y section at a depth of 70 cm was  $0^\circ=564.36$  kPa,  $15^\circ=135.26$  kPa,  $30^\circ=511.49$  kPa,  $45^\circ=434.62$  kPa,  $60^\circ= 411.69$  kPa, and  $0^\circ=13.42$  kPa,  $15^\circ=150.35$  kPa,  $30^\circ=511.63$  kPa,  $45^\circ=441.79$  kPa,  $60^\circ=425.77$  kPa in the X-Z section. In conclusion, it is considered that the optimal twisted angles of Eco-Spiral Bolt is most suitable between  $30^\circ$  and  $45^\circ$ .

By the results of ground behavior along a ratio of borehole diameter and Eco-Spiral Bolt width ( $D_{BH}/W_{ESB}$ ), 1.5, 2.0, 3.0, the pull-out load at the 8 mm with the maximum displacement was  $1.5=187.57$  kN,  $2.0=425.85$  kN,  $3.0=741.02$  kN, respectively. The maximum shear stress between Eco-Spiral Bolt and grout of the X-Y section at a depth of 70 cm was  $1.5=1052.38$  kPa,  $2.0=2652.35$  kPa,

3.0=4589.42 kPa, and 1.5=953.67 kPa, 2.0=3016.76 kPa, 3.0=6667.32 kPa in the X-Z section. In conclusion, it is considered that the maximum shear stress on the boundary between Eco-Spiral Bolt and grout increased with increasing a ratio of borehole diameter and Eco-Spiral Bolt width, and the optimal ratio of borehole diameter and Eco-Spiral Bolt width was 1.5.

By the results of ground behavior along ground structure of single layer and multi-layer, the pull-out load at the 8 mm with the maximum displacement was 79.94 kN. The maximum shear stress between Eco-Spiral Bolt and grout of the X-Y and X-Z sections at a depth of 70 cm was 441.40 kPa and 452.02 kPa, respectively. In conclusion, it is considered that the support effect of Eco-Spiral Bolt was greater in multi-layer than single layer.

## 1. 서론

국토의 70% 이상이 산지로 덮여있는 국내의 경우 국토를 효율적으로 이용하고 관리하는 것이 중요한 과제이다. 현재 국토의 효율적 이용을 극대화하기 위해 쓰레기 매립지의 편의시설 조성, 도로 비탈면의 태양광 발전소 설치, 얕은 연안지역 대규모 매립 조성 등의 사례가 증가하고 있고, 과거의 무분별한 개발로 인한 도심지의 싱크홀, 광산개발지역의 지반침하, 대규모 개착사면, 예기치 못한 강수로 인한 산사태, 구조물의 침하 등과 같은 지반재해 현상이 사회적으로 큰 논쟁점이 되고 있다. 이러한 연약지반을 이용하기 위해서는 연약지반이 충분한 지반강도를 가질 수 있도록 하여야 하며, 이를 위해서 다양한 지반공학적 방법들이 개발되어 사용되고 있다(Yoshikuni and Nakanodo, 1974; Han and Ye, 2001; 천병식과 권형석, 1999; 천병식 외, 2001; Kim et al., 2014).

지반문제를 해결하기 위한 방법들은 다짐공법, 연직배수 공법, 말뚝공법, 약액 주입공법, 심충혼합처리공법, 지보 공법 등으로 적용 대상과 재료들의 성질에 의해서 다양하게 나뉘어 사용된다. 다짐공법은 인위적으로 지반에 에너지를 가하여 공극을 감소시켜 지반의 밀도와 전단강도를 증가시키는 공법이며 기본적인 메커니즘은 압밀현상과 같을 수 있으나 압밀은 지반내의 공극수를 감소시켜 지반의 밀도를 증가시키는 공법이다(최항길, 2007; 천병식 외, 2010; 천병식, 2011). 연직배수 공법은 연약한 지반내에 인공적으로 연직드레인을 다수 설치하여 배수거리를 단축시키고 압밀을 촉진하는 방법으로 모래를 투수재료로 사용하는 샌드드레인, 특수 가공된 재료나 복합재를 이용한 말뚝공법으로 대표되어 진다(최항길, 2007; 천병식 외, 2010; 천병식, 2011). 약액주입공법은 흙의 간극에 주입재를 침투시켜 간극수를 주입재로 치환한 상태이거나 고화하여 입자를 결합해 흙의 점착력을 높이고 불투수를 목적으로 하는 공법이다(최항길, 2007; 천병식 외, 2010; 천병식, 2011). 심충혼합 처리공법은 고화재나 경화재를 이용하여 연약토 간극수의 수화반응, 점토광물과의 이온교환작용, 포줄란 반응을 주체로한 화학반응, 시멘트 등의 치환에 의한 반응으로 나타나진다(최항길, 2007; 천병식 외, 2010; 천병식, 2011). 각 공법들이 연약지반, 사면, 해안가 등 지반을 대상으로 사용되지만 경제성, 시공성, 오염 등의 측면에서 다양한 문제를 수반하고 있다.

이상의 지반개량 공법들은 주변지반을 교란시키거나 환경오염을 일으킬 수 있

고 소음, 진동, 악취, 비산 등으로 인하여 인근 주민들의 민원발생 원인이 되기도 한다. 하지만 에코-스파이럴 볼트(Eco-Spiral Bolt, ESB)는 연약지반의 경우에는 지반 내 천공을 하지 않고 자체적인 회전만으로도 지반과 일체화 시킬 수 있어 앞서 발생되는 문제점을 최소화시킬 수 있다. 대표적인 지반 지보공법으로는 록볼트와 케이블볼트가 있다. 이들은 암반천공 후 내부정착재료인 시멘트 그라우트의 마찰력이나 부착력을 이용하여 지반과 일체화 시켜 안정성을 확보하는 공법으로써 주로 토목이나 광산분야에서 사용된다(Farmer, 1975; Kaiser et al., 1992; Yazici & Kaiser, 1992; Hyett et al., 1992, 1995, 1996; Benmokrane et al., 1996; Li & Stillborg, 1999; Cao et al., 2013; He et al., 2015). 이들 공법은 개발된 지 40년 이상 된 지반보강공법으로 1980년대부터 현재에 이르기까지 국내외적으로 실내 및 현장 인발시험에 의한 지보메커니즘, 지반에서의 지보재 거동, 지보력에 영향을 미치는 요소, 지반요소와 재료요소 경계면 사이의 응력분포 등 다양한 연구가 수행되었으며, 그 결과들에 의해 지보공법으로서의 메커니즘이 어느 정도 확립된 상태에 있다(Farmer, 1975; Kaiser et al., 1992; Yazici & Kaiser, 1992; Hyett et al., 1992, 1995, 1996; Benmokrane et al., 1996; Li & Stillborg, 1999; Cao et al., 2013; He et al., 2015).

지보공법을 역학적인 방법으로 분류를 하면 다음과 같이 CMC(Continuously Mechanically Coupled) Systems, CFC(Continuously Frictionally Coupled) Systems, DMFC(Discretely Mechanically or Frictionally Coupled) Systems로 나눌 수 있다. CMC Systems는 시멘트그라우트 또는 레진을 이용하여 재료요소와 함께 암반에 일체화시키는 것을 말하며 CFC Systems는 스웰렉스(Swellex) 볼트가 해당되는 시스템이며 DMFC Systems는 D볼트, 확장형 Shell 등 콘 형태를 나타내는 볼트에 해당된다(Windsor, 1997; Cao et al., 2013; He et al., 2015). 에코-스파이럴 볼트는 기존의 록볼트나 케이블볼트와는 다르게 연약지반이나 단단한 암반 모두 사용할 수 있다. 암반의 경우 천공후 그라우트 주입재와 함께 사용하며 연약지반에서는 자체 회전으로 지반내에 정착시킬 수 있어 지반교란을 최소화시키는 장점 때문에 최근 태양광 발전시설 구조물의 기초, 하우스의 기초, 도로구조물의 기초 등으로 다양하게 사용되고 있다. 연약지반에서의 에코-스파이럴 볼트 장점은 굴착작업이 불필요하고, 진동이 적으며 지반 내 설치 시간이 짧으며, 잔토 발생이 없고, 재료의 재활용이 가능하다는 것이다. 시공방법 또한 인력, 중장비로 시공이 가능하여 장소에 제한을 받지 않으며 다른 공법과 비교하여 상대적으로 공사비를

절약할 수 있는 것이 특징이다(강성승 외, 2005, 2010; 조영동 외, 2009, 2010; 김장원 외, 2011; 정승희, 2011). 그러나 에코-스파이럴 볼트는 2000년 초에 개발 되었음에도 불구하고 에코-스파이럴 볼트의 축방향 저항력 산정에 대한 연구(강성승 외, 2005), 인장시험에 의한 에코-스파이럴 볼트의 파괴거동에 관한 연구(김동조, 2009; 김장원 외, 2011), 연약지반 및 사면에서의 거동(강성승 외, 2010) 등 아직까지 기초적 연구에 머물러 있는 상태이다.

따라서 본 연구의 목적은 이상에서 제기되고 있는 지반공학적 문제를 해결하기 위해 개발된 다목적 친환경 지보재인 에코-스파이럴 볼트의 지보특성을 수치해석적 방법으로 규명하는데 있다. 이를 위하여, 첫째, 수치해석 도구인 유한차분법에 기초한 FLAC 3D를 이용하였다. 둘째, 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각에 따라 나타나는 지반거동의 차이점을 분석하였다. 셋째, 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트의 폭 비에 따른 지반거동의 차이점을 분석하였다. 넷째, 단일층과 다층 지반구조에서 에코-스파이럴 볼트의 지보특성의 차이점을 분석하였다. 다섯째, 이를 결과를 종합하여 에코-스파이럴 볼트가 갖는 지보재로서의 지보특성을 검토하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실내시험

수치해석에 이용될 탄성재료로서 에코-스파이럴 볼트의 물성은 체적탄성률과 강성률, 밀도이고, 탄소성재료로서 그라우트, 사질토, 풍화토 지반의 물성은 체적탄성률, 강성률, 밀도, 내부마찰각, 접착력, 인장강도이다. 이들 물성 값을 얻기 위해 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 재료에 대해 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀인장시험, 밀도 시험을 각각 실시하였다. Figure 2-1는 에코-스파이럴 볼트의 모식도로서, 강판(steel bar)의 양끝단면을 축회전 시켜 만든 나선형 형태의 지보재이다 (강성승 외, 2005, 2010). 실내시험에 사용된 에코-스파이럴 볼트는 폭 75 mm, 두께 9 mm, 길이 540 mm이고, 재질은 SD350이다(Table 2-1).

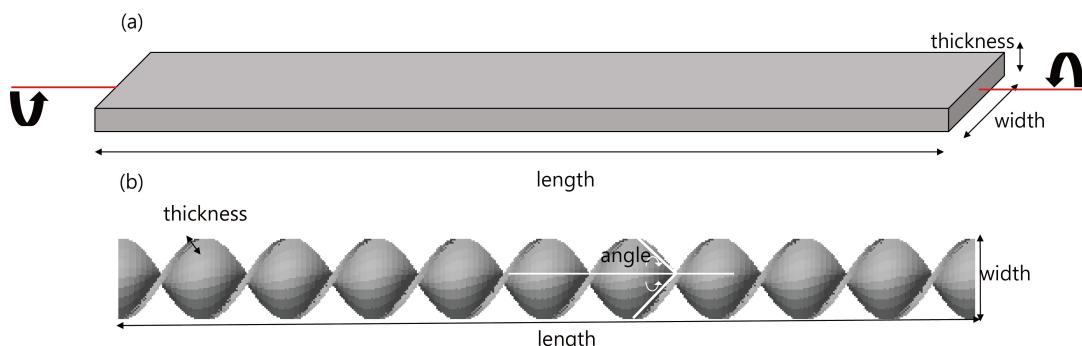


Figure 2-1. View of (a) steel sheet bar and (b) Eco-Spiral Bolt by twisting force.

Table 2-1. Dimension of the Eco-Spiral Bolt.

Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Material symbol
9	75	540	SD350

그라우트 주입재는 지보재의 부착력에 영향을 미치는 주요한 요인으로서 시멘트 배합비는 정착 길이, 암반의 상태 등에 따라 달라지며, 암반의 경우 물과 시멘트의 비가 0.4 이하에서 지보능력을 최적화할 수 있다(Hyett et al., 1992, 1995). 본 연구는 연약지반에서 인발시험에 의한 지반과 에코-스파이럴 블트 사이의 지반거동을 살펴보는 것이므로 흐름도가 높은 모르타르 공시체를 사용하였으며 배합비는 Table 2-2와 같다. 그라우트 공시체는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(KS L5201)와 표준사, 물을 일정한 배합비(시멘트:모래:물=1:2:1)로 하여 지름 50 mm, 높이 100 mm인 공시체를 제작하였다(Figure 2-2). 양생기간은 28일로 하였다.

Table 2-2. Mixing ratio of cement, sand, water and dimension of specimen.

Cement	Water	Sand	Diameter (mm)	Height (mm)	curing days
1 (750 g)	1 (750 g)	2 (1500 g)	50	100	28

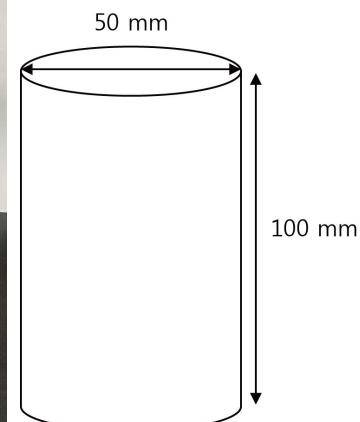


Figure 2-2. Specimens for physical and mechanical tests.

모르타르 공시체의 밀도 측정은 다음의 과정을 따른다(Figure 2-3). 먼저 데시케이터와 ULVAC KIKO. Inc. 의 모델번호 GLD-051 진공오일펌프를 이용하여 12시간 이상 800 Pa(6 torr)이하의 진공상태에서 수침하여 포화시킨다. 다음으로 포화된 시험편은 모델번호 JH-600 수중무게 측정 장치에 있는 바구니에 넣고, 0.001 g 까지 측정이 가능한 Precisa Gravimetrics AG의 모델번호 Precisa Balances 320XT 시리즈 전자저울을 이용하여 시험편의 수중무게( $M_{sub}$ )을 측정한다. 그리고 시험편을 수조에 꺼내어 젖은 천으로 표면을 닦아내고 시험편의 표면건조 포화상태의 무게( $M_{sat}$ )를 측정한다. 마지막으로 건조기를 이용하여 24시간 이상 105°C에서  $\pm 3$ 정도의 온도를 유지한 이후에 시험편의 건조무게( $M_{dry}$ )를 측정한다. 마지막으로 앞서 측정된 수중무게, 포화무게, 건조무게를 각각 이용하여 식 (2.1)으로부터 밀도를 구한다(ISRM, 1981; 한국암반공학회, 2010).

$$\text{밀도 } (\rho_i) = (1 - n) \times G_S \times ns \times \rho_w \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (2.1)$$

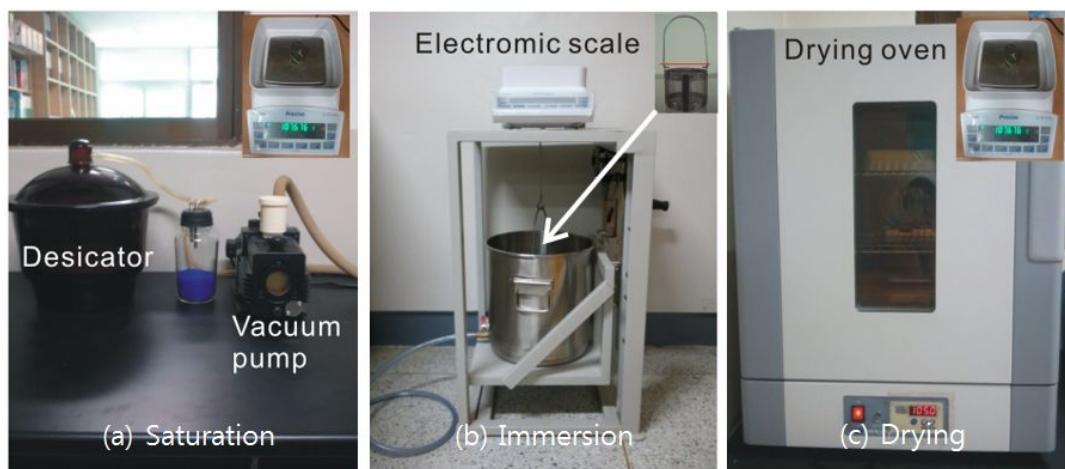


Figure 2-3. Process of density measurement; (a) desiccator and vacuum oil pump for saturation, (b) measurement of immersed and saturated weights and (c) drying oven for measurement of dry weight.

ESB와 그라우트 공시체의 물성변화 특성을 알아보기 위해 일축압축시험을 하였다(Figure 2-4). 이때 사용된 만능재료시험기는 DEAKYOUNG TECH & TESTER MTG. Co. Ltd.의 모델 번호 DTU-900HC 시리즈를 사용하였다. 시험 시 시험편 축하중의 편심을 방지하기 위해 spherical platen을 이용하였다. 측정 시 변형률과 축하중 값들은 일본 KYOWA사의 모델 번호 UCAM-65B-AC M14의 데이터로서를 통하여 저장되며, 모든 자료는 컴퓨터를 사용하여 처리된다. 이들 일축압축시험으로부터 일축압축강도, 탄성계수인 영률(Young's modulus, E), 그리고 포아송비(Poisson's ratio,  $\nu$ )를 각각 구할 수 있다(ISRM, 1981; 한국암반공학회, 2010).

모르타르 공시체의 접착력과 내부마찰각을 구하기 위해 삼축압축강도 시험을 실시하였다. 시험편은 삼축압축셀(triaxial cell)인 후크셀(Hoek's cell)을 사용하여 시험을 실시하였다. 후크셀 내 시험편을 넣고 구속압을 달리하면서 총 3개의 시험편에 대해 삼축압축시험을 실시하였다(Figure 2-5). 삼축압축강도는 일축압축강도와는 다르게 고정된 값이 아니고 구속압의 크기에 따라 달라진다. 삼축압축강도는 각 구속압에서 측정된 축방향 파괴하중을 시험편의 단면적으로 나누어 구한다. 본 시험에서는 구속압의 크기를 1, 2, 3 MPa로 설정하였다(ISRM, 1981; 한국암반공학회, 2010).

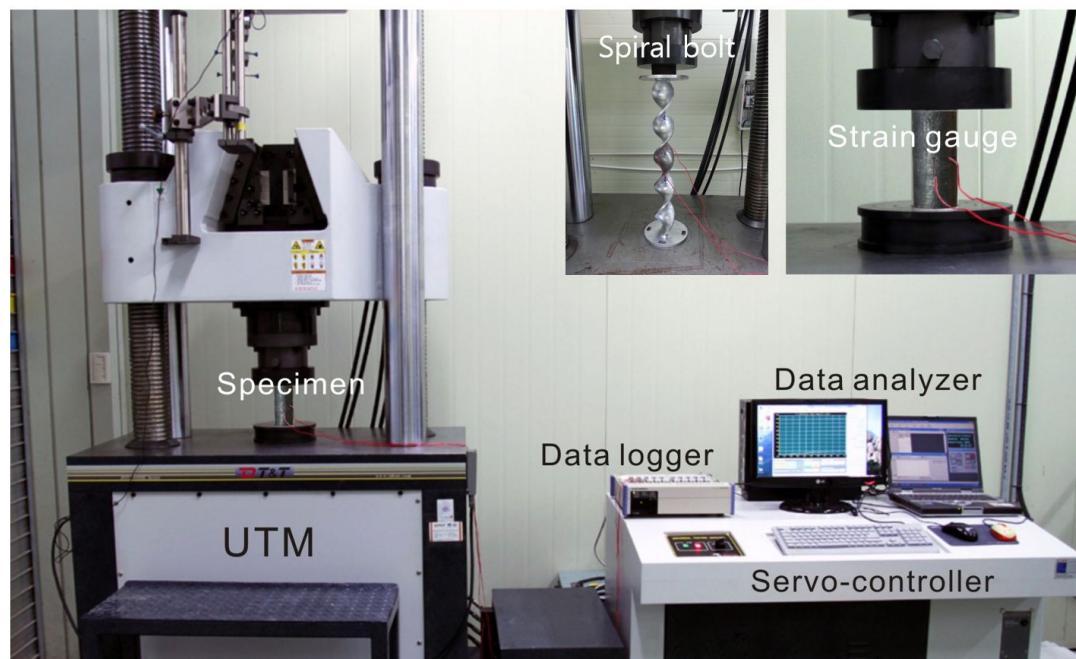


Figure 2-4. Apparatus of the uniaxial compression test in laboratory.

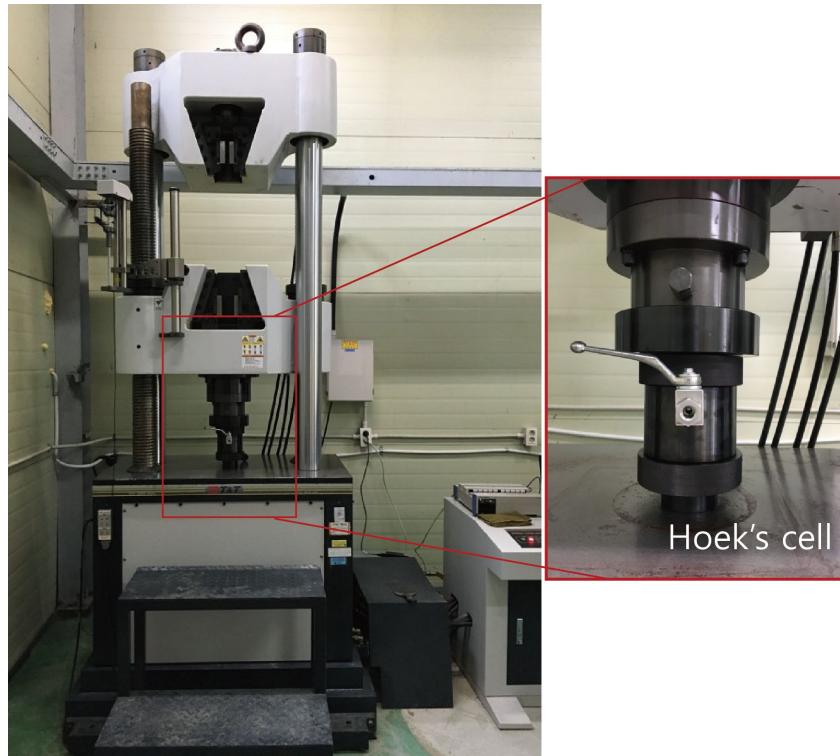


Figure 2-5. A setup for the triaxial compression test in laboratory.

구속압은 시험편에 구속효과를 발휘하여 다음과 같이 시험편의 변형거동에 영향을 미친다. 첫째, 구속압이 증가함에 따라 강도가 증가한다. 둘째, 구속압이 증가함에 따라 연성거동을 보인다. 셋째, 구속압이 증가함에 따라 최대강도 부분이 확장된다. 넷째, 구속압이 증가함에 따라 최대강도에서 잔류강도까지의 응력감소가 저감되고, 아주 높은 구속압에서는 응력감소가 사라진다. 시험을 통해 각 구속압에 따라 얻어진 삼축압축강도를 이용해서 모어 응력원(Mohr circle)을 작성하였으며 모어 응력원과 파괴포락선을 통해 점착력과 내부마찰각을 구하였다. 파괴포락선의 기울기가 내부마찰각이 되며 파괴포락선이  $\tau$ 축과 교차하는 점이 점착력이 된다.

Mohr-Coulomb의 그래프에서 점착력과 마찰각을 구하기 위해 압밀인장강도시험을 실시하였다. 이 시험은 등방균질한 탄성체라고 가정하고 원판상의 시험편 상하에 집중하중을 가할 때 시험편에 압축응력과 전단응력이 분포하게 된다. 시험편 중심에서는 인장응력의 3배 크기로 압축응력이 작용하지만 인장강도는 압축강도의 1/10 ~ 1/20배 이므로 먼저 파괴된다. 압밀인장강도시험은 파괴가 하중측상에 한

정된다. 그러나 재하점 부근에서 무한대의 압축응력이 작용하기 때문에 국소적으로 압축파괴가 먼저 일어나 파단을 선도한다고 할 수 있다. 일축인장강도와 압열인장 강도는 직선적으로 비례관계에 있으므로 압열인장강도를 인장강도로 간주할 수 있다. 시험은 ACE ONE사(모델번호 ACE-PLT-100E)에서 개발한 장비를 활용하여 실시하였으며, Load cell type으로 최대하중용량은 10 tf이며, 진동펌프 압력제어 방식으로 하중제어가 가능하다(Figure 2-6).

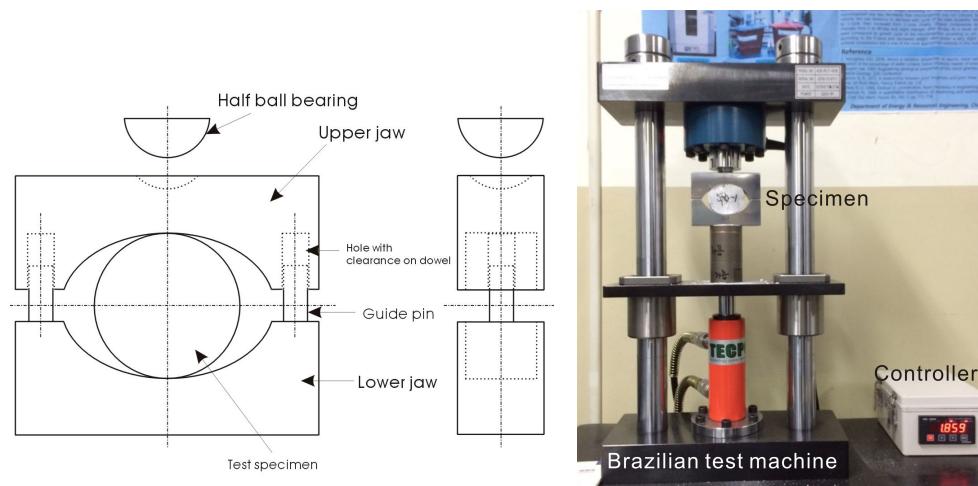


Figure 2-6. A view of the Brazilian test for indirect tensile strength in laboratory.

## 2.2 실내 시험 결과

수치해석의 입력자료를 얻기 위해 SD350 재질에 해당하는 에코-스파이럴 볼트와 양생기간 28일에 해당하는 모르타르 공시체에 대한 밀도, 일축압축시험, 삼축압축시험 등의 실내시험을 실시하였다. 에코-스파이럴 볼트의 일축압축시험 결과를 나타내면 Figure 2-7과 같으며, 이로부터 구한 물성 값은 Table 2-3에 정리하였다. 결과에 의하면 에코-스파이럴 볼트의 일축압축강도는 122 MPa, 영률 64 GPa, 포아송비는 0.28로 나타났다. 또한 모르타르 공시체의 경우 밀도는 1694.8 kg/m<sup>3</sup>, 일축압축강도는 7 MPa, 영률 4.4 GPa, 포아송비 0.2, 점착력 1.1 MPa, 내부마찰각 45.8°로 나타났다(Figure 2-8, Table 2-4).

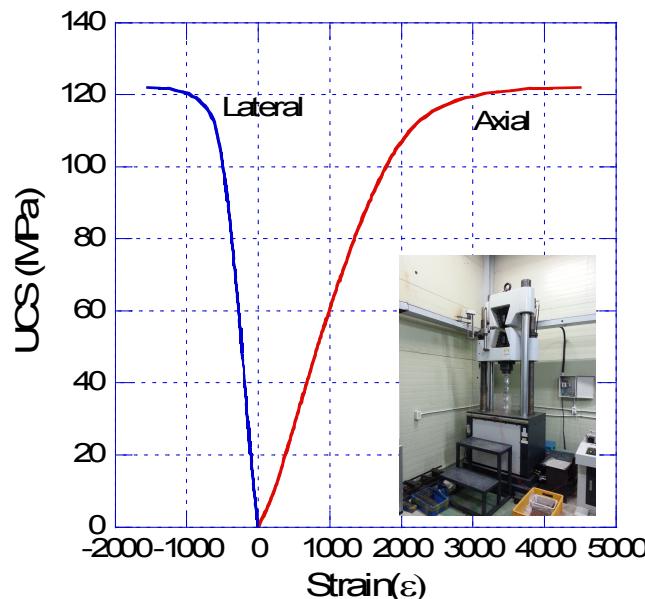


Figure 2-7. Result of compression test on Eco-Spiral Bolt uniaxial.

Table 2-3. Mechanical properties of Eco-Spiral Bolt by uniaxial compression test.

Uniaxial compression strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )
122	64	0.28

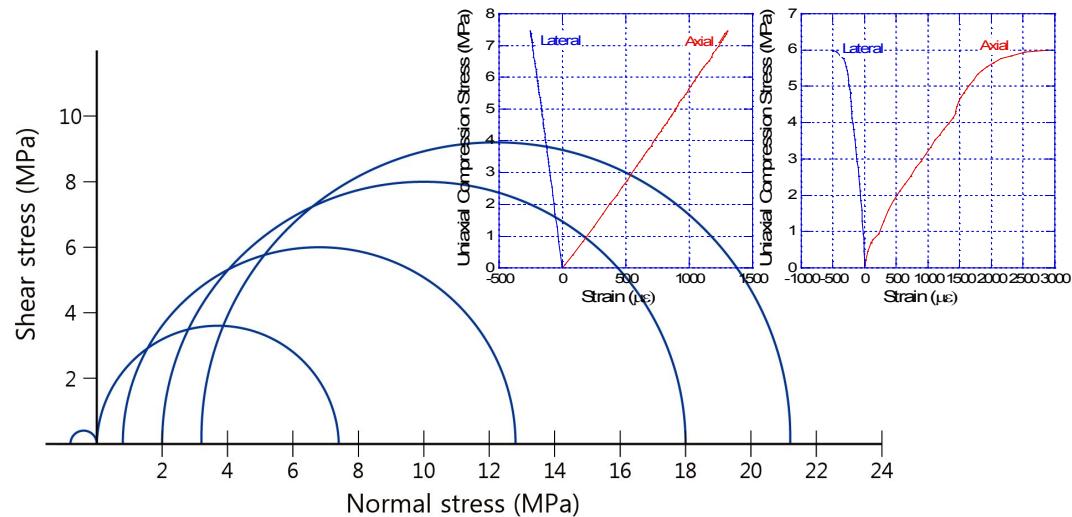


Figure 2-8. Mohr-Coulomb envelope of specimen.

Table 2-4. Mechanical properties of specimen by Brazilian, uniaxial compression, and triaxial compression test.

	BCS (MPa)	UCS (MPa)	TCS (MPa)		
$\sigma_1$	0.44	7.0	13.0	18.3	21.6
$\sigma_3$	0.0	0.0	1.0	2.0	3.0
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	
1694.8	1.1	45.8	4.4	0.20	

### 3. 수치해석

암반터널을 굴착하거나, 대규모 암반사면 등 안정성에 대한 지반공학적인 문제에 직면할 경우 대상 암반의 물리적 및 역학적 성질에 근거하여 지반의 거동을 예측할 필요성이 있으며, 그 수단으로 수치해석적 방법이 널리 이용되고 있다. 수치해석은 일반적으로 연속체 모델과 불연속체 모델로 분류할 수 있으며 연속체 모델에는 크게 FEM(Finite element method), FDM(Finite difference method), BEM(Boundary element method)으로 나눌 수 있고, 불연속체 모델은 DEM(District element method)이 대표적이다(Figure 3-1). FEM은 요소를 기하학적으로 분할하여 미소변형을 전제로 평형방정식의 해를 구하고, FDM은 요소를 분할하여 해석하고 time step별 파괴모드를 파악하며 비선형거동을 쉽게 한다. BEM은 굴착경계만으로 해석영역을 생성가능하고 편미분 방정식이 적분으로 해석되어 진다. DEM은 요소를 개별블록으로 생성하여 각각의 블록들의 거동을 분석한다(권현호와 남광수, 2013, 한국암반공학회, 2005).

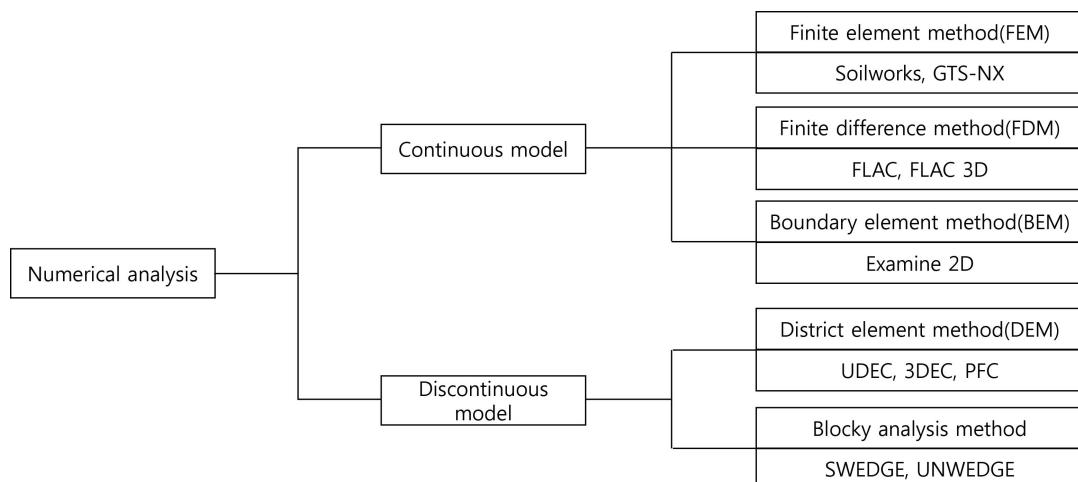


Figure 3-1. The sort of numerical analysis.

본 연구에서는 Itasca사에서 개발된 FDM 기반의 3차원 지반 해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D 4.0 version을 사용하여 수치해석을 수행하였다. FLAC 3D는 토양과 암석 등을 다루는 지반과 광산분야에 적용될 수 있는 해석프로그램이지만 열역학, 동역학, 유체역학뿐만 아니라 터널라이닝, 록볼트와 같은 지보재시공, 탄·소성유동을 겪는 과정을 시뮬레이션 하기 위해 사용되기도 한다. FLAC 3D에는 Null model, 3가지의 탄성모델과 9가지의 소성모델로 총 13개의 이론식 모델이 내장되어 있다. 프로그램 내의 계산은 Lagrangian 계산기법과 explicit 기법 등을 사용하고, FISH라는 내장언어를 사용하여 사용자가 원하는 구성모델을 생성하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 프로그램 내의 입력 데이터는 내장모델에 따라 달라지는데, 일반적으로 탄성모델은 밀도, 체적탄성률, 강성률 또는 영률, 포아송비 등의 물성값들이 필요하다. 반면 탄소성 모델의 Mohr-Coulomb은 밀도, 체적탄성률, 강성률 또는 영률, 포아송비, 마찰각, 팽창각, 점착력, 인장강도 등의 자료가 필요하다(한국암반공학회, 2005; Itasca, 2009).

본 장에서는 다목적 지보재인 친환경 에코-스파이럴 볼트의 지보특성을 살펴보기 위해 에코-스파이럴 볼트 비틀립 각에 따른 지반거동, 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트 폭의 비에 따른 지반거동, 그리고 단일층/다층 지반구조에 따른 에코-스파이럴 볼트 지보특성 등에 대해 검토하였다. FLAC 3D 수치해석을 위한 지반모델의 형상은 Figure 3-2과 같다. 지름 2 m, 길이 2 m의 지반의 중심에 시추공을 형성하고, 그 안에 그라우트를 주입한 후 에코-스파이럴 볼트를 설치하였다. 변위는 x, y, z 3 방향 모두 구속하였다. 이때 수위는 고려하지 않았으며, 인발하중은 속도 저감계수를 통해 하중을 비선형적으로 적용하였다(Figure 3-3). 해석 단계(step) 수는 총 10,000 번으로 1,000개 씩 10개로 나누어 지반의 깊이와 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 검토하였다. 수치해석에 사용된 에코-스파이럴 볼트의 크기는 길이 100 cm, 너비 10 cm, 두께 1 cm이며, 비틀립 각은  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 를 형성하여 비틀립 각에 따른 지반변형을 검토하였다. 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트 폭의 비는 비틀립 각  $45^\circ$ 의 모델을 1.0 기준으로 하여 1.5, 2.0, 3.0에 대해 분석하였고, 지반구조에 따른 지반변위는 사질토 50 cm, 풍화토 150 cm의 지반에 대해 각각 분석하였다.

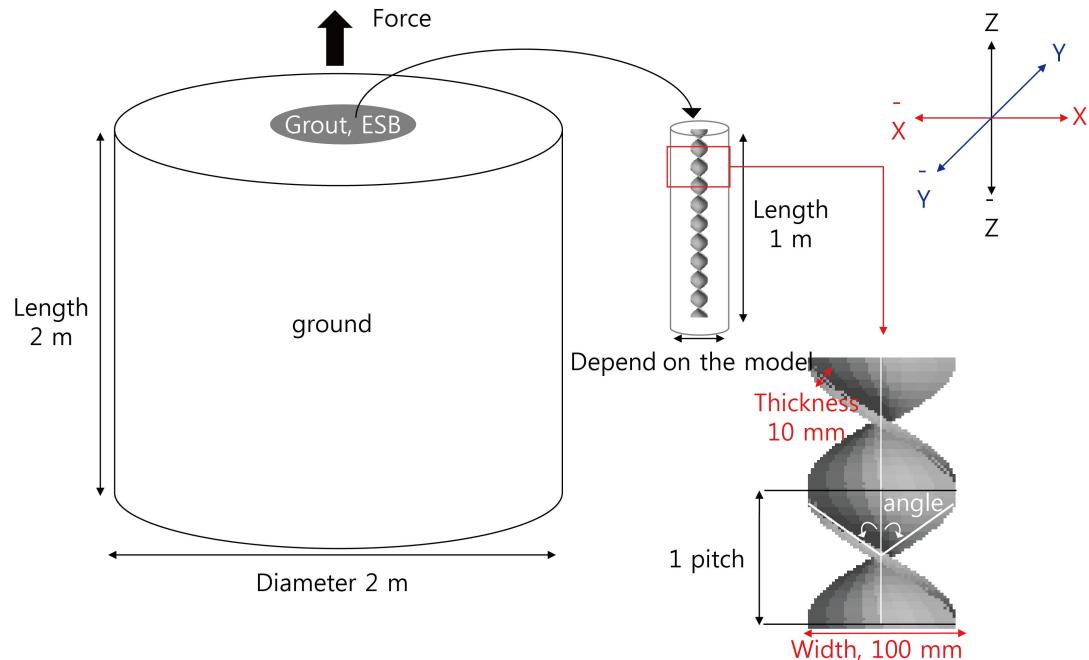


Figure 3-2. Geometry numerical model.

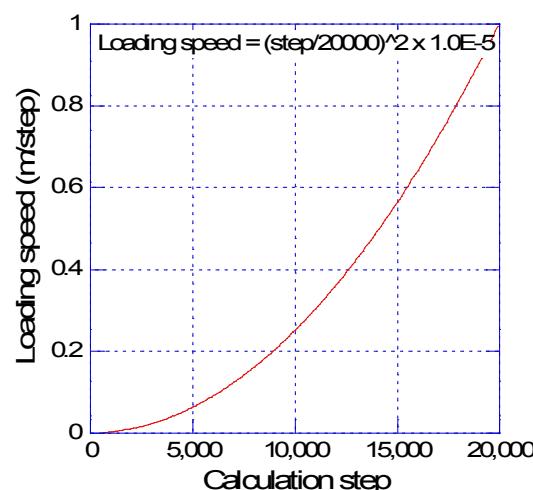


Figure 3-3. Calculation of loading speed.

### 3.1 지반 및 재료의 물성

연약지반에서 에코-스파이럴 볼트의 여러 조건에 따른 지반거동을 살펴보기 위해 FLAC 3D 수치해석에 사용된 입력자료는 Table 3-1과 같다. 프로그램 내에서 에코-스파이럴 볼트는 탄성체, 그라우트와 사질토, 풍화토 지반은 탄소성체로 가정하여 해석하였다. 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 입력자료는 실내시험 결과로부터 얻었으며, 사질토와 풍화토 지반은 국내의 평균 자료를 이용하였다.

Table 3-1. Input data for FLAC 3D numerical analysis.

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Tensile strength (MPa)
ESB	7850	64	0.28	-	-	-
Grout	1694.8	4.4	0.2	1.1	45.8	0.4
Sandy soil	1631	0.008	0.3	0	28	0
Weathered soil	1835	0.027	0.3	7	30	0

### 3.2 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각에 따른 지반거동 수치해석

에코-스파이럴 볼트는 길이, 폭, 두께에 따라 다양한 크기로 제작할 수 있으며, 제작기술과 비용, 사용용도에 따라 그 크기가 결정된다. 에코-스파이럴 볼트는 평판의 양단면을 고정시킨 후 인장력을 가하면서 축회전 시켜 만드는 나선형 형태의 지보재이다(강성승 외, 2005, 2010). 따라서 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각은 지반의 거동 특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 지금까지 에코-스파이럴 볼트 물리적 특성에 대한 기초적인 연구는 비교적 잘 진행된 반면, 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각에 따른 지반특성 연구는 거의 이뤄지지 않은 상태이다. 이러한 점을 고려하여 본 장에서는 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각에 따른 지반거동 상태를 수치해석적으로 분석하였다. 수치해석에 사용된 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각은  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  등 5가지 경우로 선정하였다(Figure 3-4). 각 지보재의 형상을 살펴보면 Table 3-2와 같다. 에코-스파이럴 볼트의 전체 길이는 100 cm, 너비 10 cm, 두께 1cm로 비틀림 각이  $0^\circ$ 인 평판의 형태와 같다. 비틀림 각이  $15^\circ$ 인 에코-스파이럴 볼트는 3개의 피치가 형성되며, 각 피치당 길이는 37 cm이다. 비틀림 각이  $30^\circ$ 인 경우는 총 6개의 피치로 각 피치당 길이는 17 cm,  $45^\circ$ 의 경우 총 10개의 피치로 각 피치당 길이는 10 cm, 그리고  $60^\circ$ 의 경우는 총 17 피치로 각 피치당 길이는 6 cm이다. 그라우트 지반의 크기는 에코-스파이럴 볼트의 폭과 같은 10 cm이다(Figure 3-5). 수치해석은 총 10,000 step으로 하였고 1,000 step 단위로 10단계로 나누어 지반의 변위와 전단응력 분포를 분석하였다.

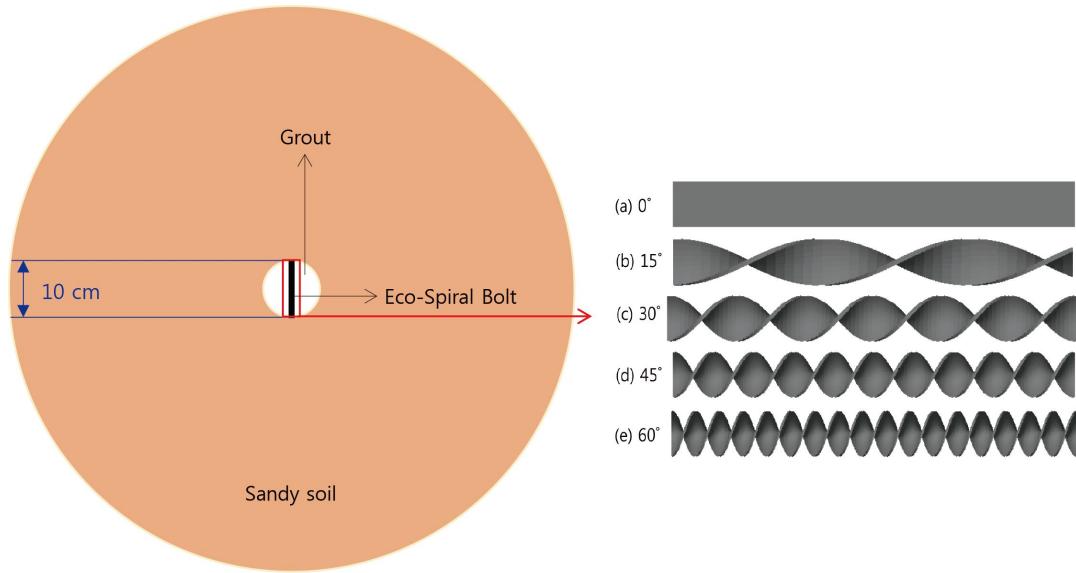


Figure 3-4. Schematic diagram of X-Y section and for the twisted angles of Eco-Spiral Bolt.

Table 3-2. Properties of Eco-Spiral Bolt according to the twisted angle.

twisted angle (°)	0	15	30	45	60
Number of pitch	1	3	6	10	17
Pitchs length (cm)	100	37	17	10	6
ESB width (cm)	10	10	10	10	10
ESB length (cm)	100	100	102	100	102
ESB thickness (cm)	1	1	1	1	1
Grout diameter (cm)	10	10	10	10	10
Grout depth (cm)	100	100	100	100	100
Sandy soil diameter (cm)	200	200	200	200	200
Sandy soil depth (cm)	200	200	200	200	200

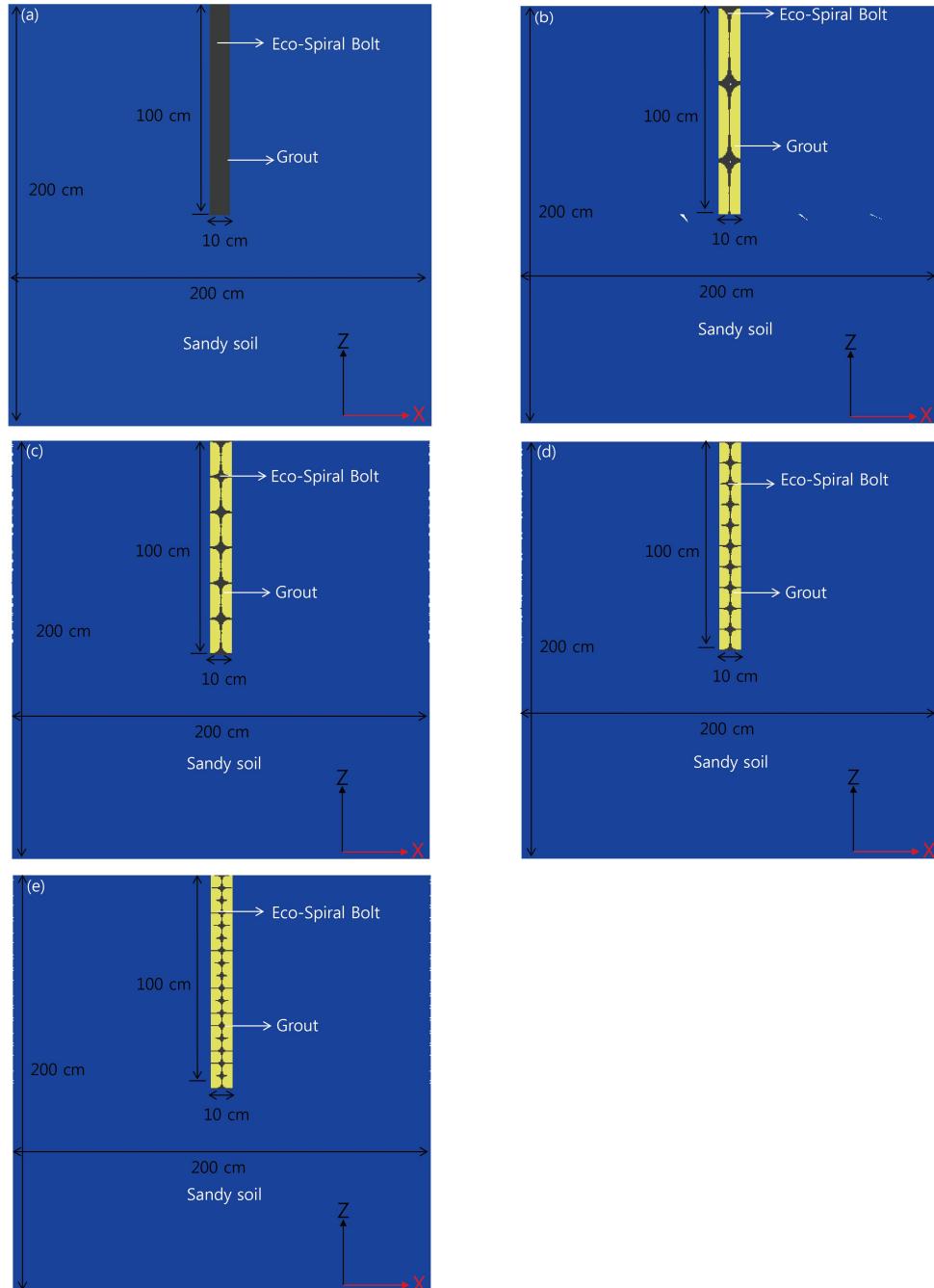


Figure 3-5. Numerical model along the twisted angle; (a) twisted angle =  $0^\circ$ , (b)  $15^\circ$ , (c)  $30^\circ$ , (d)  $45^\circ$ , (e)  $60^\circ$ .

### 3.3 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비에 따른 지반 거동 수치해석

케이블 볼트의 부착강도는 시멘트의 성질, 물과 시멘트의 비율, 정착길이, 그라우트 지반 주변에 작용하는 구속압 등의 요인에 의해 크게 달라질 수 있다(Hyett et al., 1992). 따라서 본 절에서는 이러한 점을 고려하여 그라우트 지반의 크기에 따른 지반의 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 비틀림 각 45° 에코-스파이럴 볼트를 대상으로 시추공 직경/에코-스파이럴 볼트 폭 비( $D_{BH}/W_{ESB}$ )를 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 등 4가지 경우에 대해 모델화하여 이들 사이의 관계를 분석하고 그 영향을 평가 하였다. 해석을 위한 모델 지반과 그라우트의 크기는 Table 3-3과 같다. Figure 3-6은 이들을 모식도로 나타낸 것이며,  $D_{BH}/W_{ESB}$ 에 따른 수치해석 모델을 보여준다. 수치해석은 총 10,000 step으로 하였고, 1,000 step 단위로 10 단계로 나누어 지반의 변위와 전단응력 분포를 분석하였다.

Table 3-3. Dimensions of ground and grout for numerical analysis on a ratio of borehole diameter and Eco-Spiral Bolt width ( $D_{BH}/W_{ESB}$ ).

ESB twisted angle(°)	ESB width(cm)	ESB length(cm)	ESB thickness (cm)
45	10	100	1
Sandy soil			
Diameter (cm)	200	15	20
Length (cm)	200	100	100

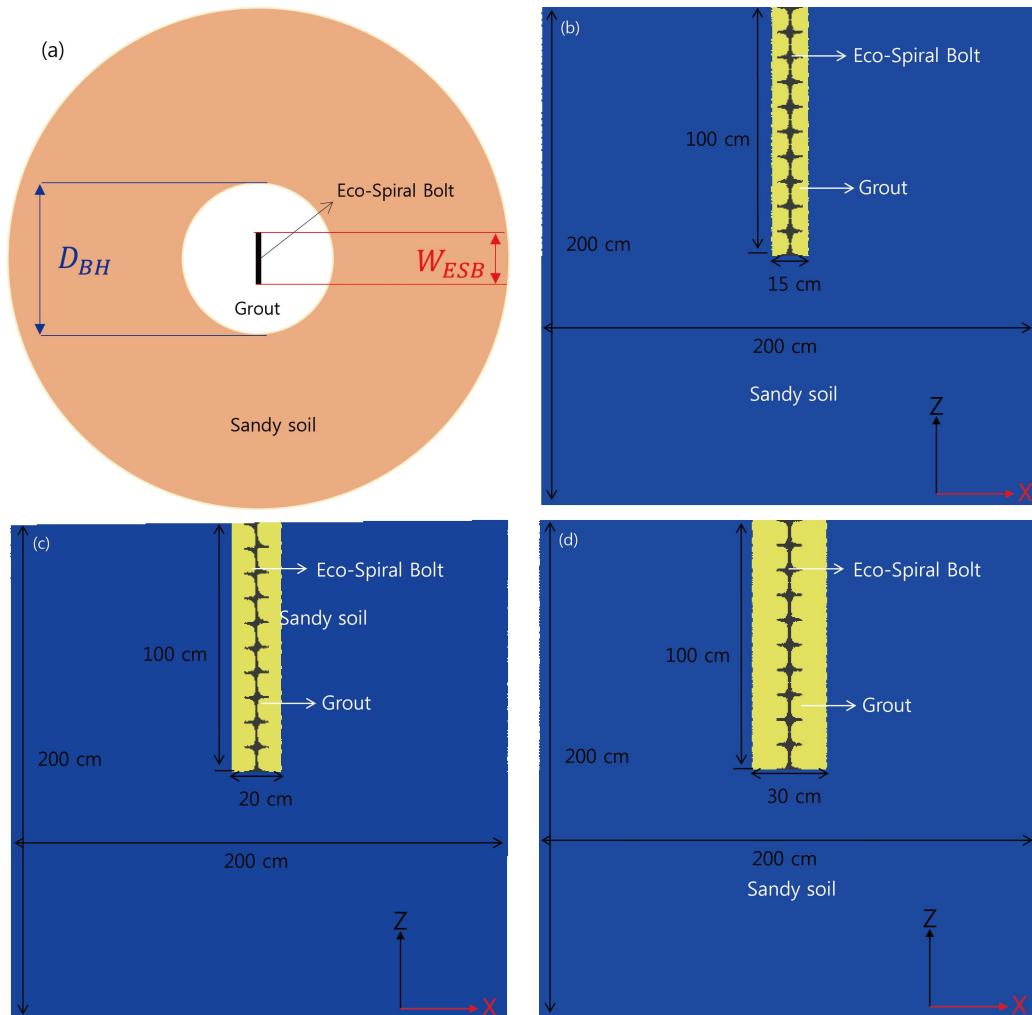


Figure 3-6. X-Y section for numerical analysis on (a) a ratio of borehole diameter ( $D_{BH}$ ) and Eco-Spiral Bolt width ( $W_{ESB}$ ) and numerical model of (b)  $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ , (c)  $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ , (d)  $D_{BH}/W_{ESB} = 3.0$ .

### 3.4 단일층/다층 지반구조에 따른 지반거동 수치해석

단일층/다층 지반구조에 따른 에코-스파이럴 볼트에 의한 지반거동 특성을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 모델은 Figure 3-7와 같다. 지표면에서 심도 50 cm 부근까지는 사질토층이 존재하고, 사질토층 밑에는 150 cm 두께의 풍화토층이 존재한다(Table 3-4). 이 지반 내에 길이 100 cm, 폭 10 cm, 두께 1 cm, 인 비틀림 각  $45^\circ$ 의 에코-스파이럴 볼트를 설치한 후 그라우팅 작업하여 고정시켰다. 인발하중은 속도 저감계수를 통하여 에코-스파이럴 볼트의 전체 영역에 가하였다. 하중에 따른 지반변위와 인발하중에 의한 에코-스파이럴볼트의 지반 영향을 평가하였다.

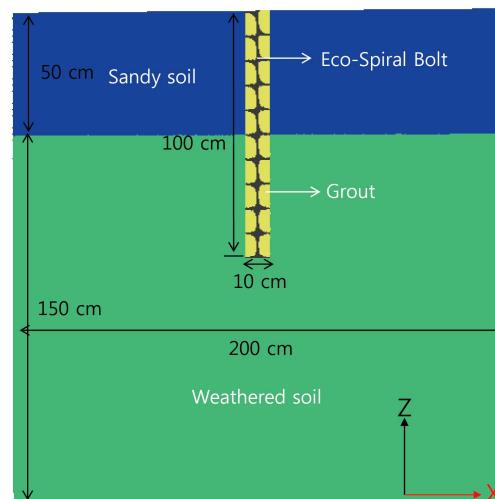


Figure 3-7. Numerical model for the multi-layer structure.

Table 3-4. Dimensions of ground for numerical analysis on the multi-layer structure.

ESB twisted angle ( $^\circ$ )	ESB width (cm)	ESB length (cm)	ESB thickness (cm)
45	10	100	1
Sandy soil		Weathered soil	
Diameter (cm)	200	200	
Length (cm)	50	150	

## 4. 연구 결과

### 4.1 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각과 지반거동 관계

#### 4.1.1 비틀림 각 0° 에코-스파이럴 볼트 인발시험

비틀림 각 0°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4-1과 같다. 비틀림 각 0°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 64.43 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.18 mm로 나타났다(Figure 4-1). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 13.43 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 564.36 kPa로 나타났다(Table 4-1). Figure 4-2는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 50 cm거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-3의 결과를 종합해 볼 때 변위 발생량이 일정해지는 거리 80 cm안에서 에코-스파이럴 볼트의 지보의 영향력이 발생되는 것으로 사료된다.

인발하중에 의한 비틀림 각 0°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대전단응력 분포를 Figure 4-4에 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 낮게 나타나기 때문에 지반의 변위가 미미하게 나타났다.

Figure 4-5는 인발하중에 의한 비틀림 각 0°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서 각 단계별

X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력 분포를 나타낸 것이다. 그럼에서 알 수 있듯이 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 중앙에서 전단응력이 미미하게 관찰되며, 인발하중이 점차적으로 증가하면서 에코-스파이럴 볼트 중앙에 전단응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다. 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보였다. 이러한 사실은 인발하중이 증가함에 따라 전단파괴 영역도 점차적으로 확대되어 최후에는 그라우트 지반 전체로 전단파괴 영역이 형성될 것으로 판단된다.

Table 4-1. Results of numerical analysis along the twisted angles of Eco-Spiral Bolt by pull-out test.

Twisted angle (°)	Maximum pull-out load (kPa)	Maximum displacement (mm)	Maximum shear stress of axial direction (kPa)	Maximum shear stress at 70 cm (kPa)
0	64.43	8.18	13.42	564.36
15	22.12	8.16	150.35	135.26
30	63.43	8.27	511.63	511.49
45	76.44	8.10	441.79	434.62
60	136.62	8.24	425.77	411.69

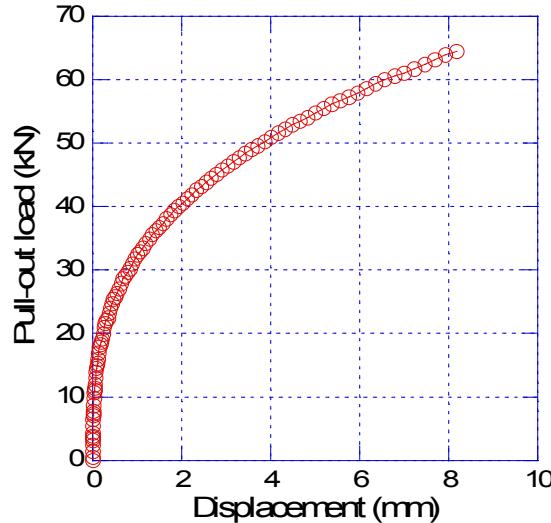


Figure 4-1. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°.

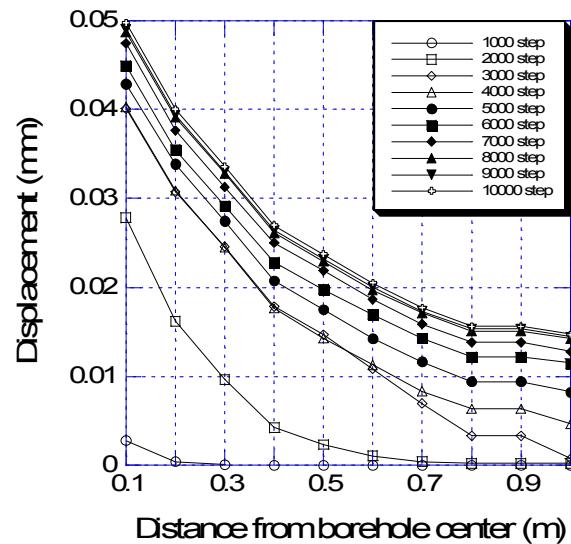


Figure 4-2. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°.

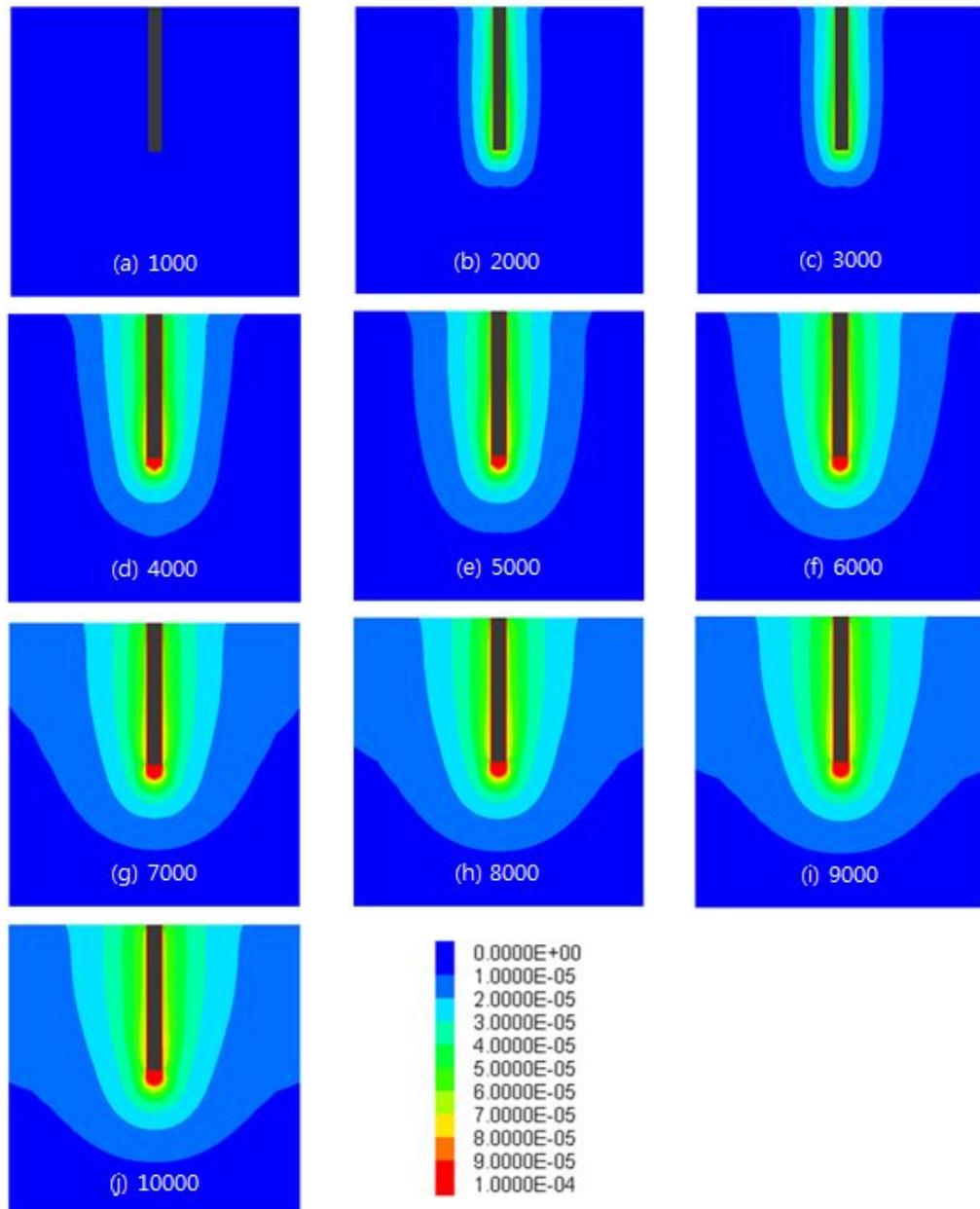


Figure 4-3. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°.

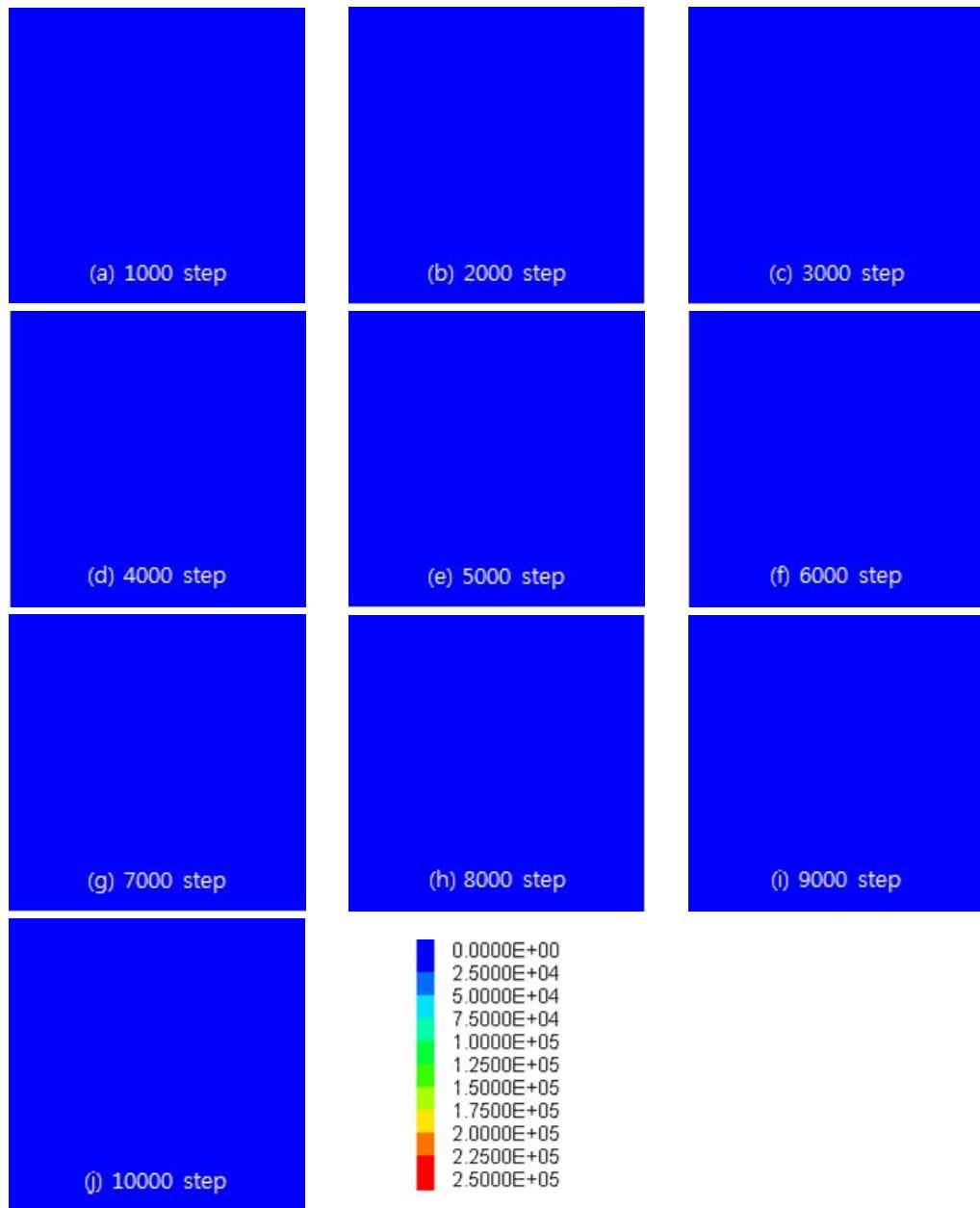


Figure 4-4. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 0°.

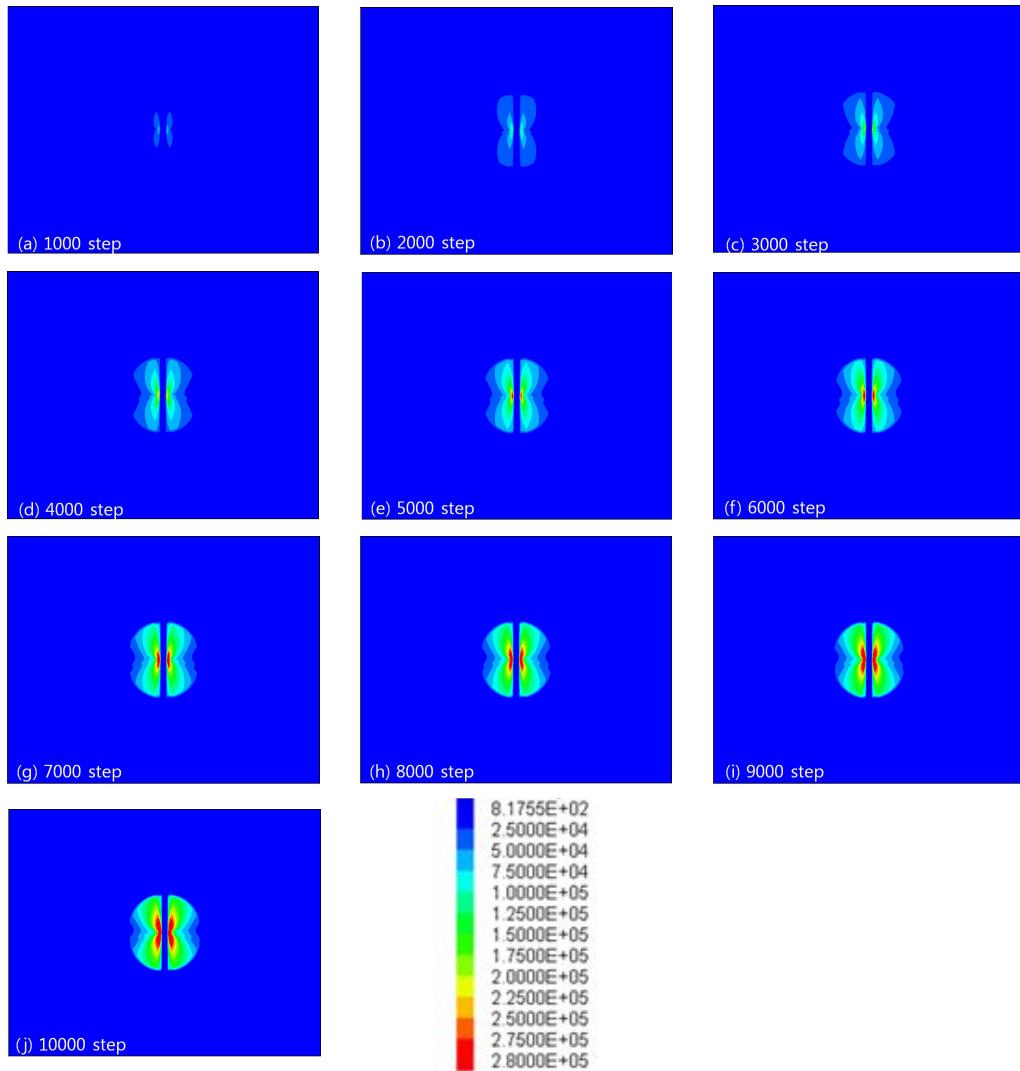


Figure 4-5. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section with each step along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle  $0^\circ$ .

#### 4.1.2 비틀림 각 15° 에코-스파이럴 볼트 인발시험

비틀림 각 15°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4-1과 같다. 비틀림 각 15°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 22.12 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.16 mm로 나타났다(Figure 4-6). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 150.35 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 135.26 kPa로 나타났다(Table 4-1). Figure 4-7는 총 수치 해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 50 cm 거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-8에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-8의 결과를 종합해 볼 때 변위 발생량이 일정해지는 거리 60 cm안에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 발생되는 것으로 사료된다.

인발하중에 의한 비틀림 각 15°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대전단응력 분포를 Figure 4-9에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 비틀림 각 0°와 다르게 에코-스파이럴 볼트 전체영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타났고, 인발하중이 증가할수록 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 주변을 따라 나타났다. Figure 4-10는 인발하중에 의한 비틀림 각 15°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에

대해서 각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력 분포를 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 중앙에서 전단응력이 미미하게 관찰되며, 인발하중이 점차적으로 증가하면서 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 경계면에 전단응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다. 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보이며, 사질토와 그라우트 경계면에서 시계방향으로 회전하며 전단응력이 발생하는 양상을 보였다. 이러한 점을 고려해 볼 때 인발하중이 증가함에 따라 전단파괴 영역이 점차적으로 확대되어 결국 그라우트 지반 전체로 형성될 것으로 판단된다.

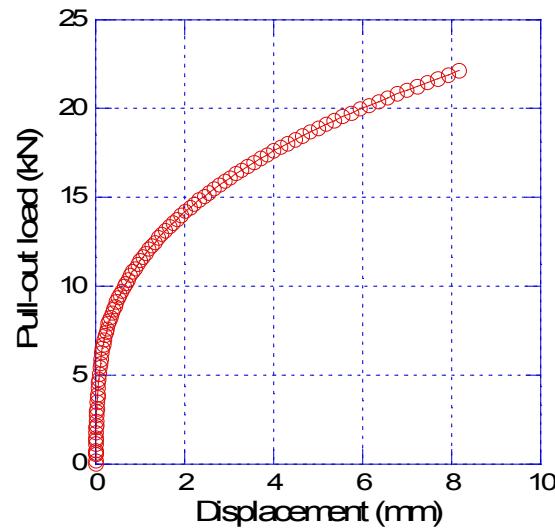


Figure 4-6. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°.

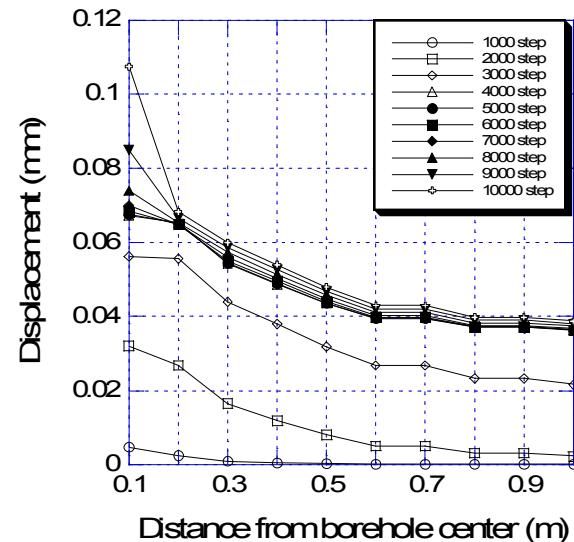


Figure 4-7. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°.

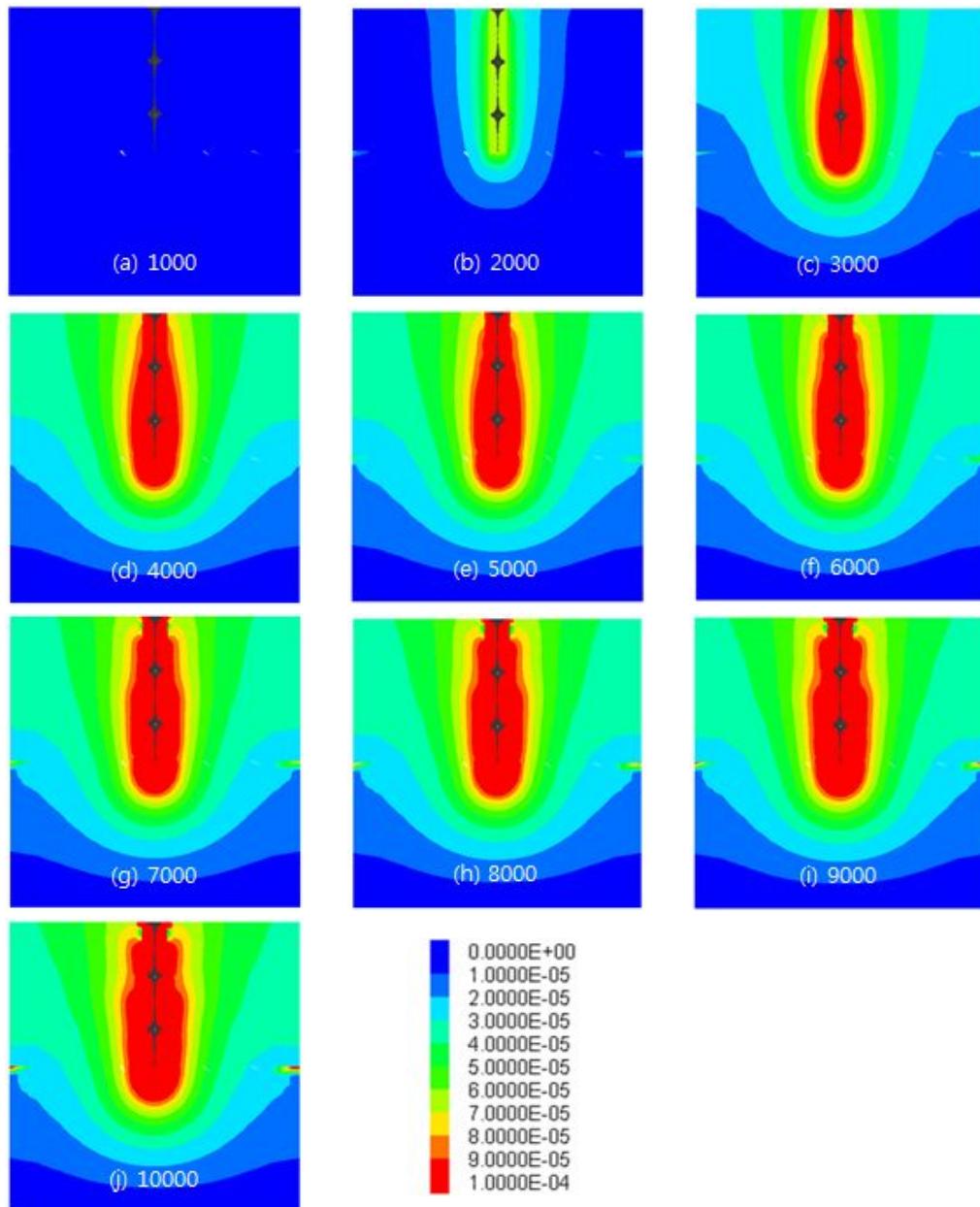


Figure 4-8. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°.

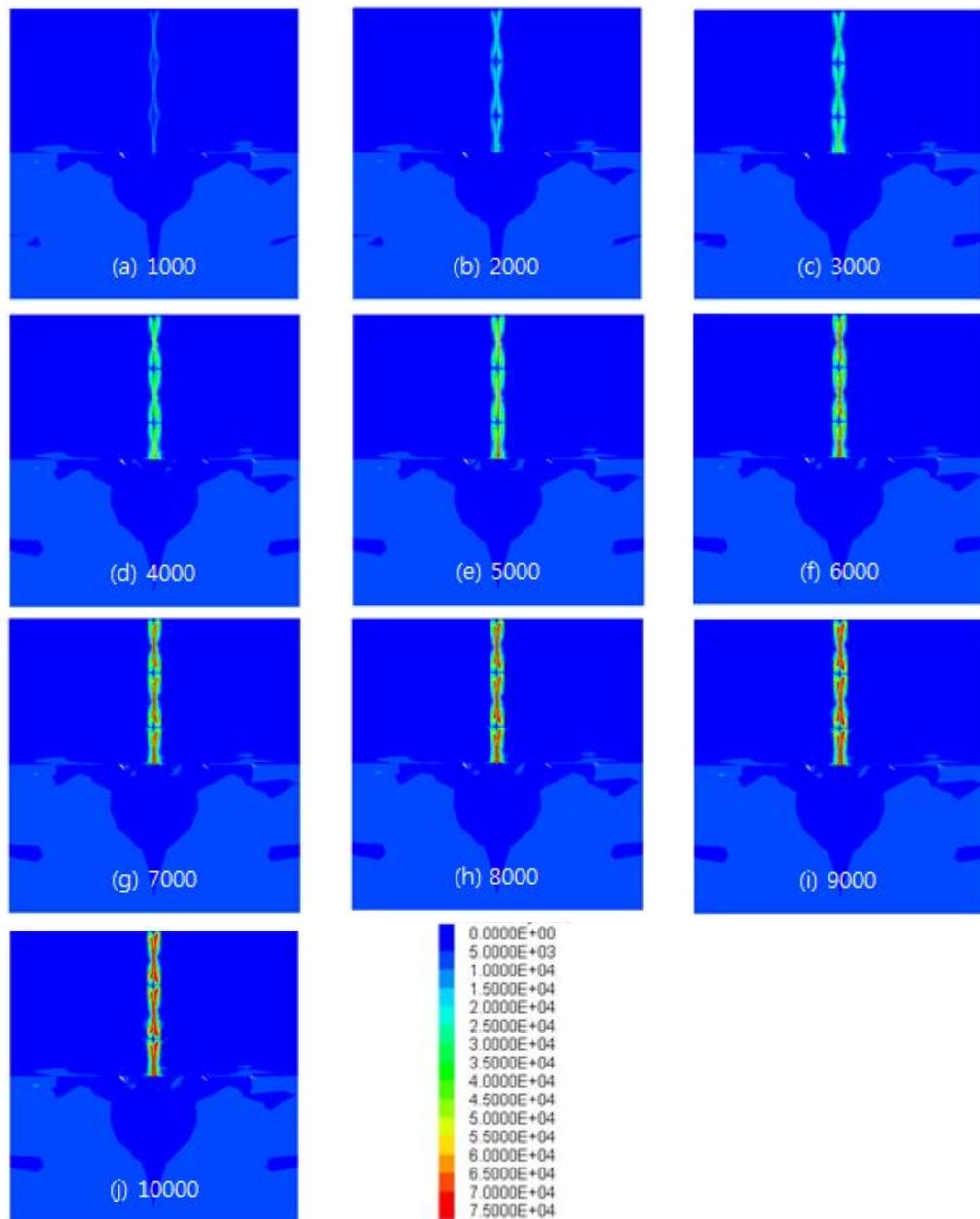


Figure 4-9. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°.

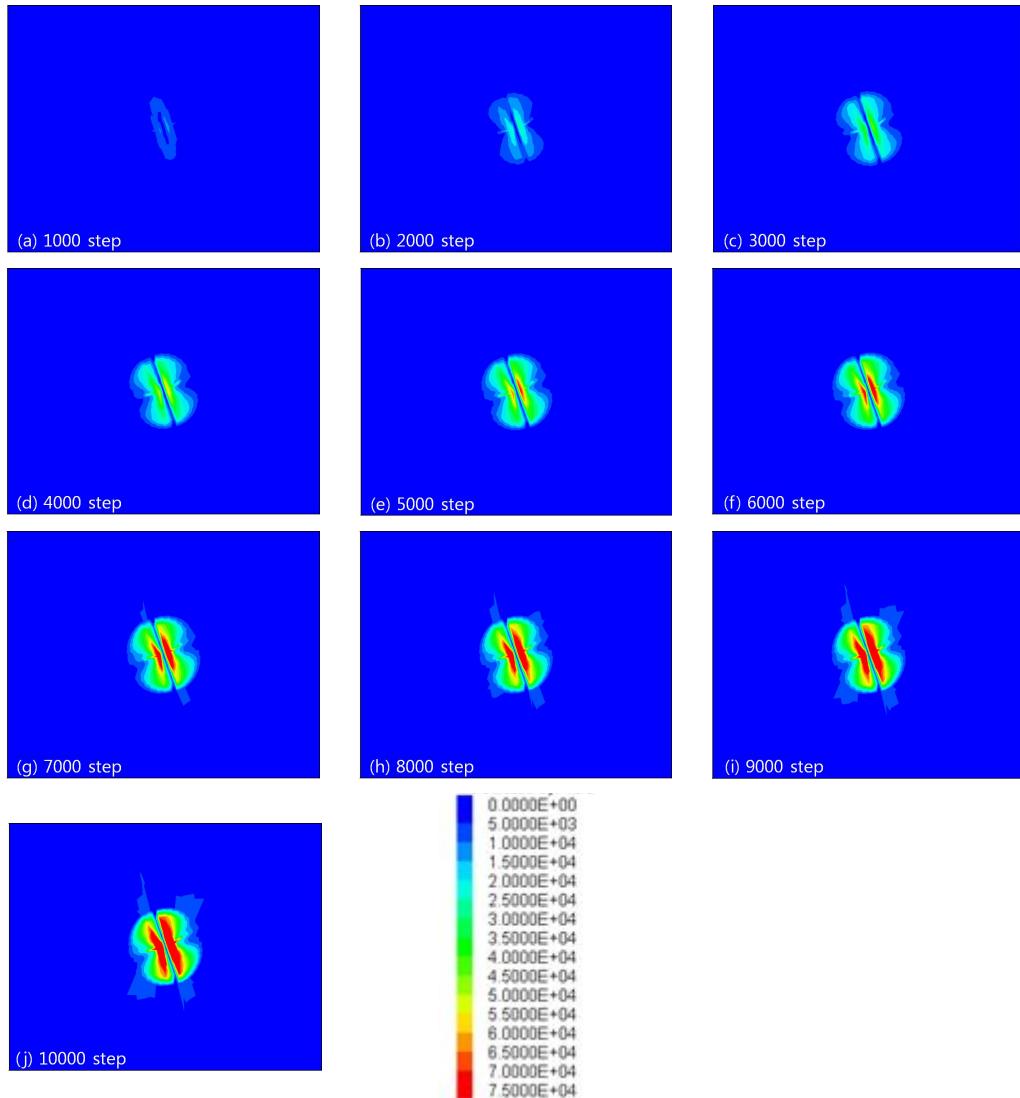


Figure 4-10. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 15°.

### 4.1.3 비틀림 각 30° 에코-스파이럴 볼트 인발시험

비틀림 각 30°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4-1과 같다. 비틀림 각 30°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 63.43 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.27 mm로 나타났다(Figure 4-11). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 511.63 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 511.49 kPa로 나타났다(Table 4-1). Figure 4-12는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 30 cm 거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-13에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-13의 결과를 종합해 볼 때 변위 발생량이 일정해지는 거리 70 cm안에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 발생되는 것으로 사료된다.

인발하중에 의한 비틀림 각 30°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대 전단응력 분포를 Figure 4-14에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 전체 영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타났고, 인발하중이 증가할수록 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 주변을 따라 나타났다. Figure 4-15는 인발하중에 의한 비틀림 각 30°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서

각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력을 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 중앙에서 전단응력이 미미하게 관찰되며, 인발하중이 점차적으로 증가하면서 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 경계면에 전단응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다. 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보이며, 이러한 점을 고려해 볼 때 인발하중이 증가함에 따라 전단파괴 영역이 점차적으로 확대되어 결국 그라우트 지반 전체로 형성될 것으로 판단된다.

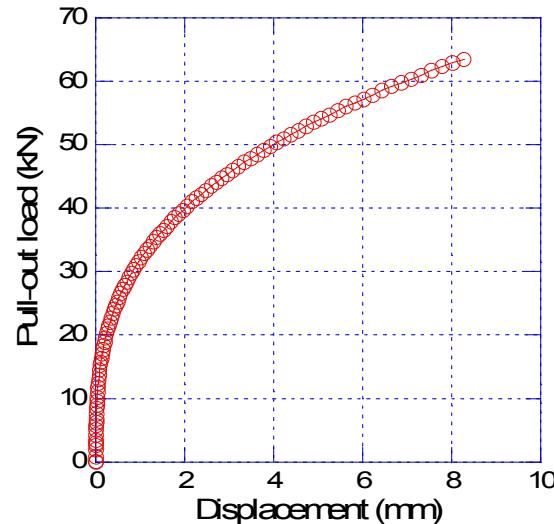


Figure 4-11. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°.

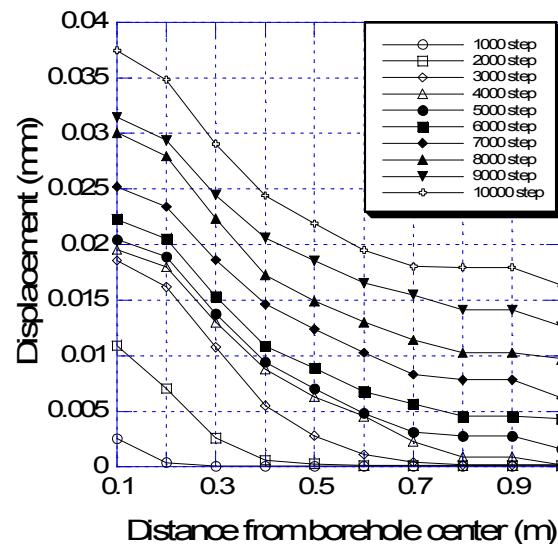


Figure 4-12. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°.

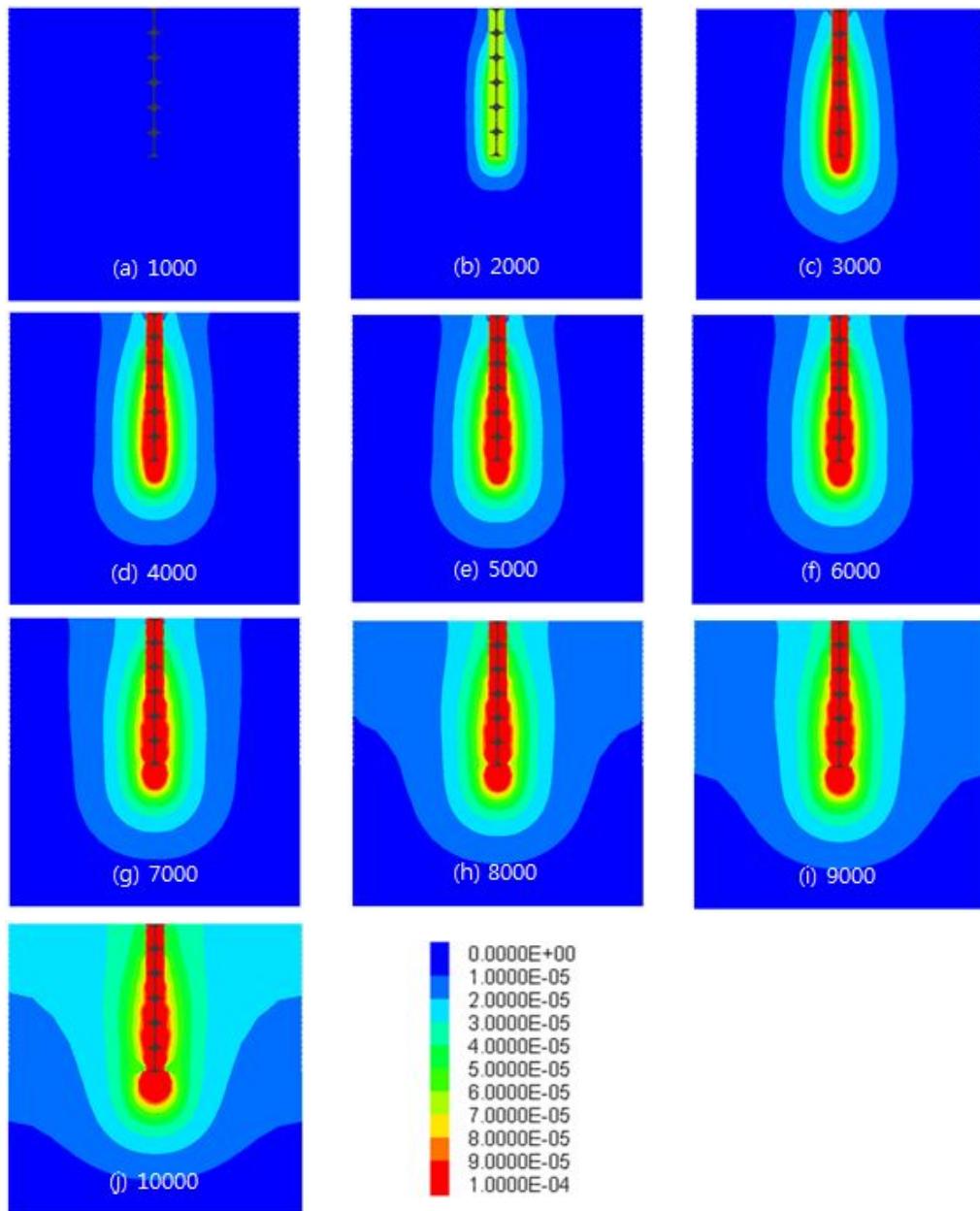


Figure 4-13. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°.

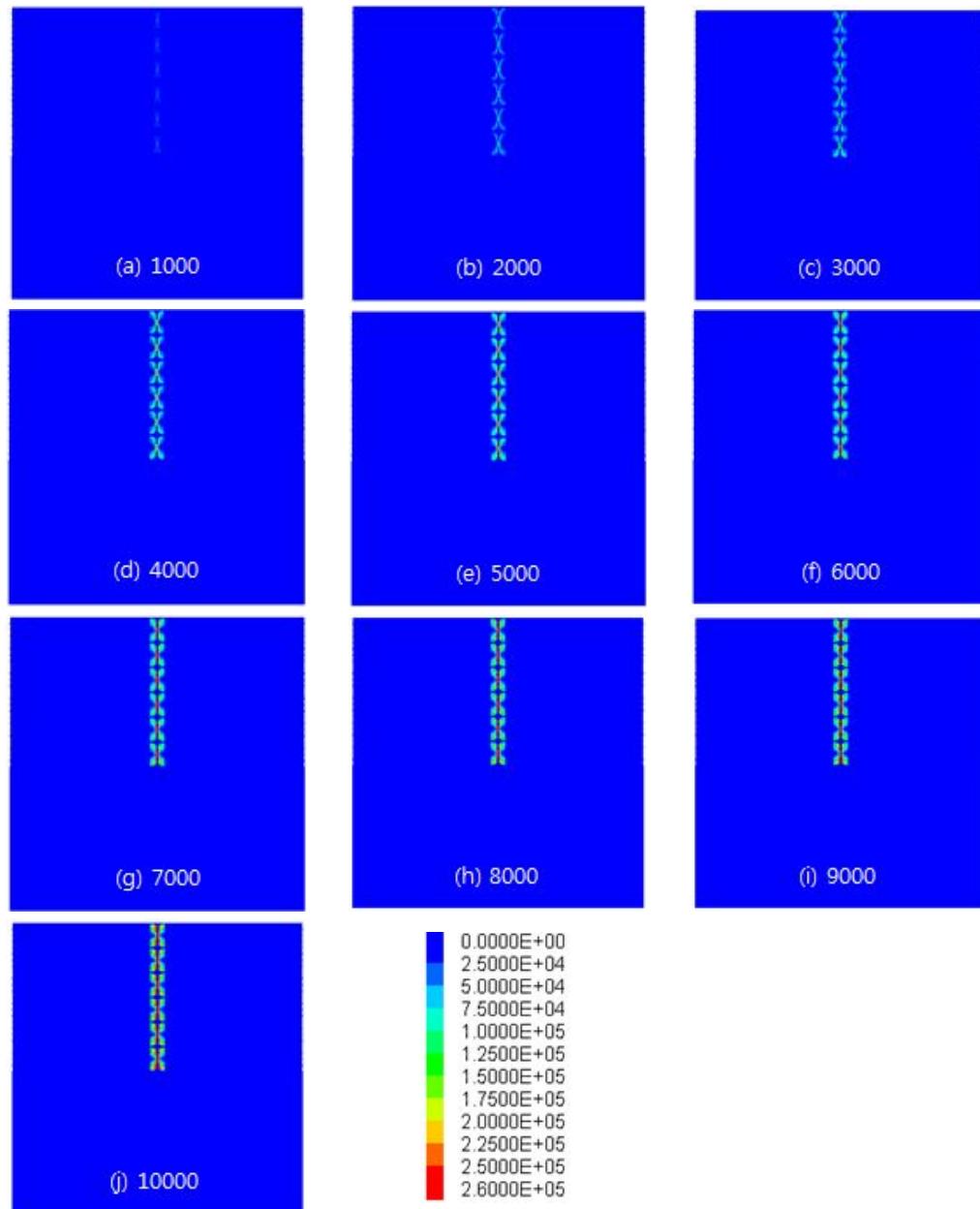


Figure 4-14. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°.

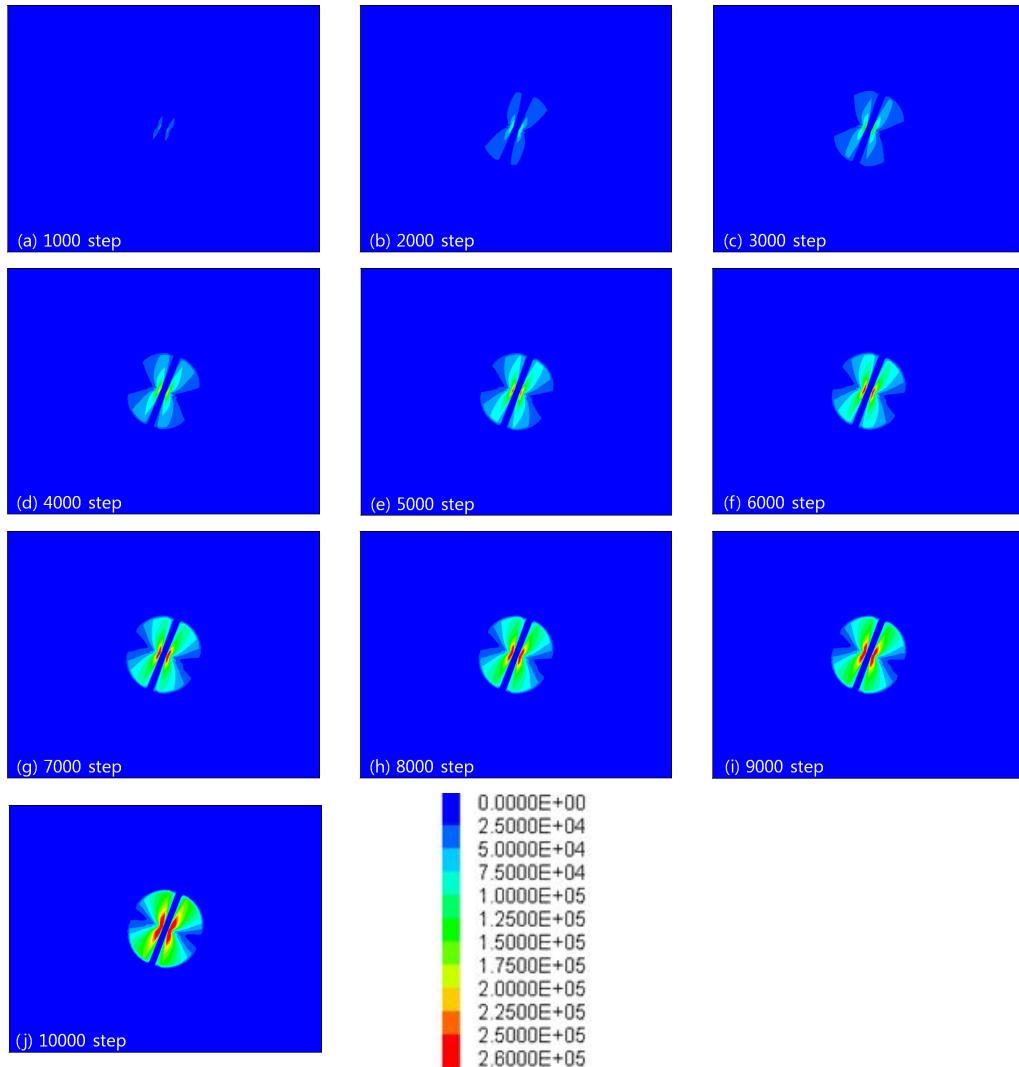


Figure 4-15. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 30°.

#### 4.1.4 비틀림 각 45° 에코-스파이럴 볼트 인발시험

비틀림 각 45°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4-1과 같다. 비틀림 각 45°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 76.44 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.10 mm로 나타났다(Figure 4-16). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 441.79 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 434.62 kPa로 나타났다(Table 4-1). Figure 4-17는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 20 cm 거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-18에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-18의 결과를 종합해 볼 때 변위 발생량이 일정해지는 거리 60 cm안에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 발생되는 것으로 사료된다.

인발하중에 의한 비틀림 각 45°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대 전단응력 분포를 Figure 4-19에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 전체 영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타났고, 인발하중이 증가할수록 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 주변을 따라 나타났다. Figure 4-20는 인발하중에 의한 비틀림 각 45°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서

각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력 분포를 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 중앙에서 전단응력이 미미하게 관찰되며, 인발하중이 점차적으로 증가하면서 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 경계면에 전단응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다. 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보이며, 이러한 점을 고려해 볼 때 인발하중이 증가함에 따라 전단파괴 영역이 점차적으로 확대되어 결국 그라우트 지반 전체로 형성될 것으로 판단된다.

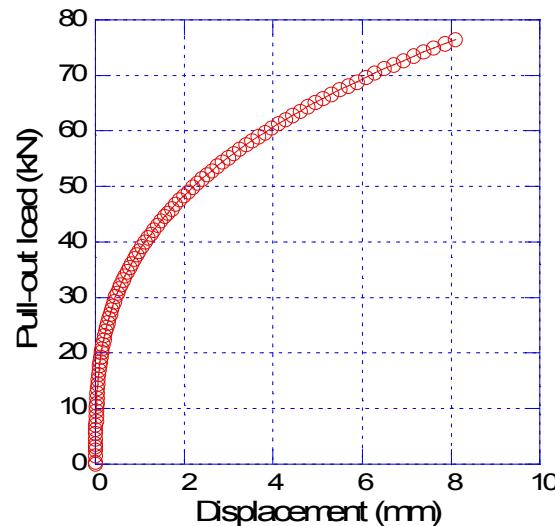


Figure 4-16. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.

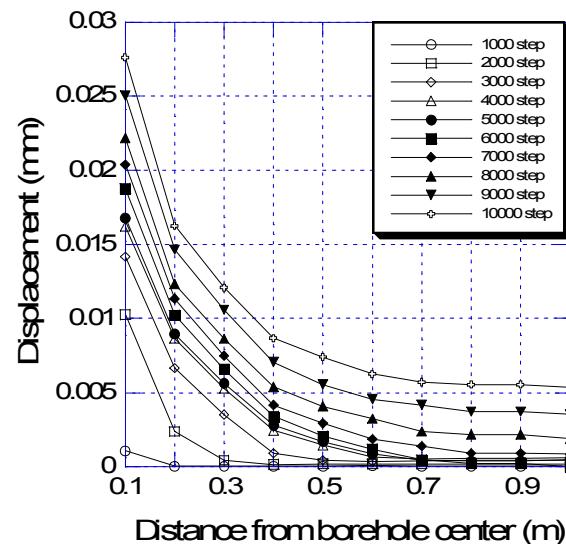


Figure 4-17. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.

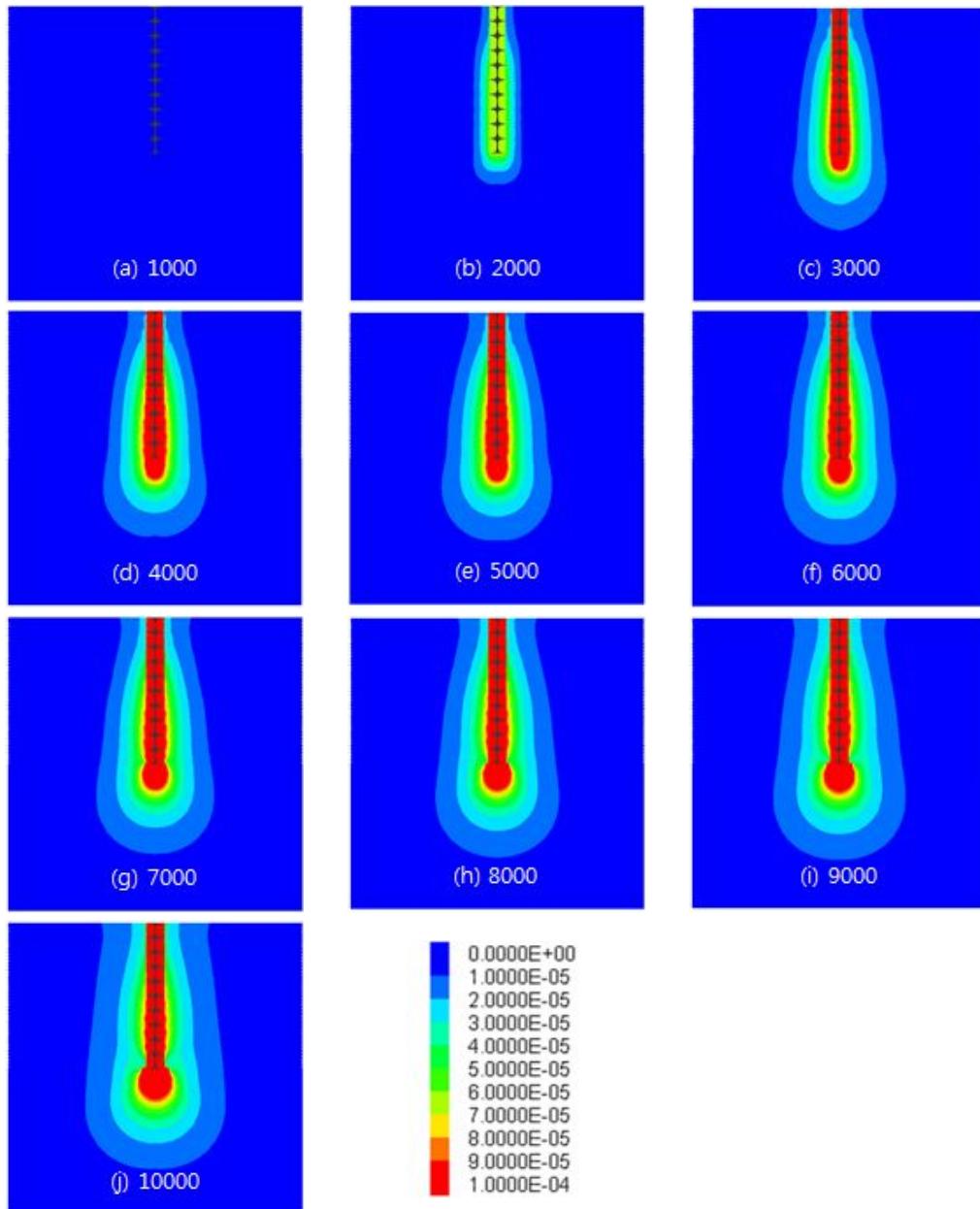


Figure 4-18. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.

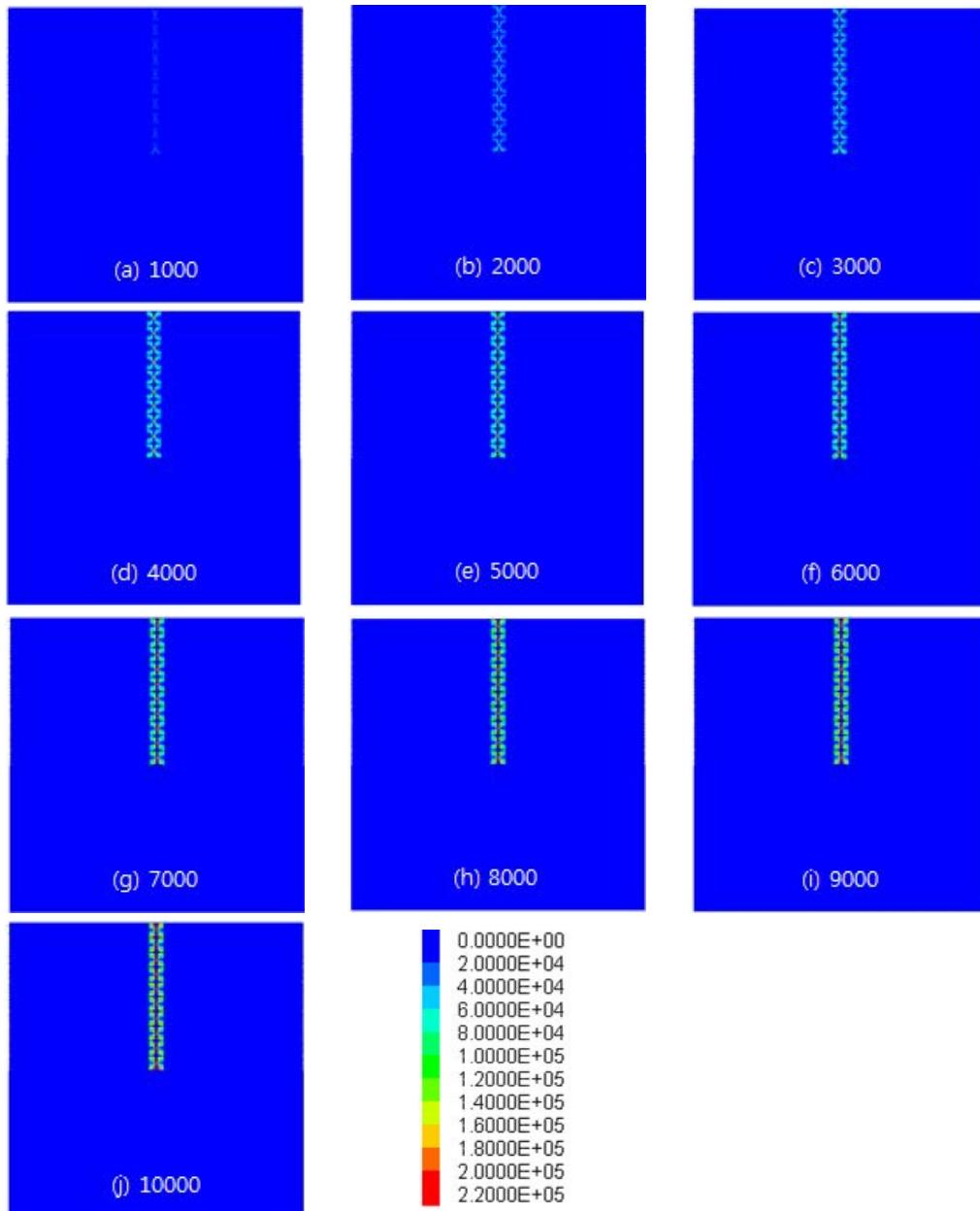


Figure 4-19. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle  $45^\circ$ .

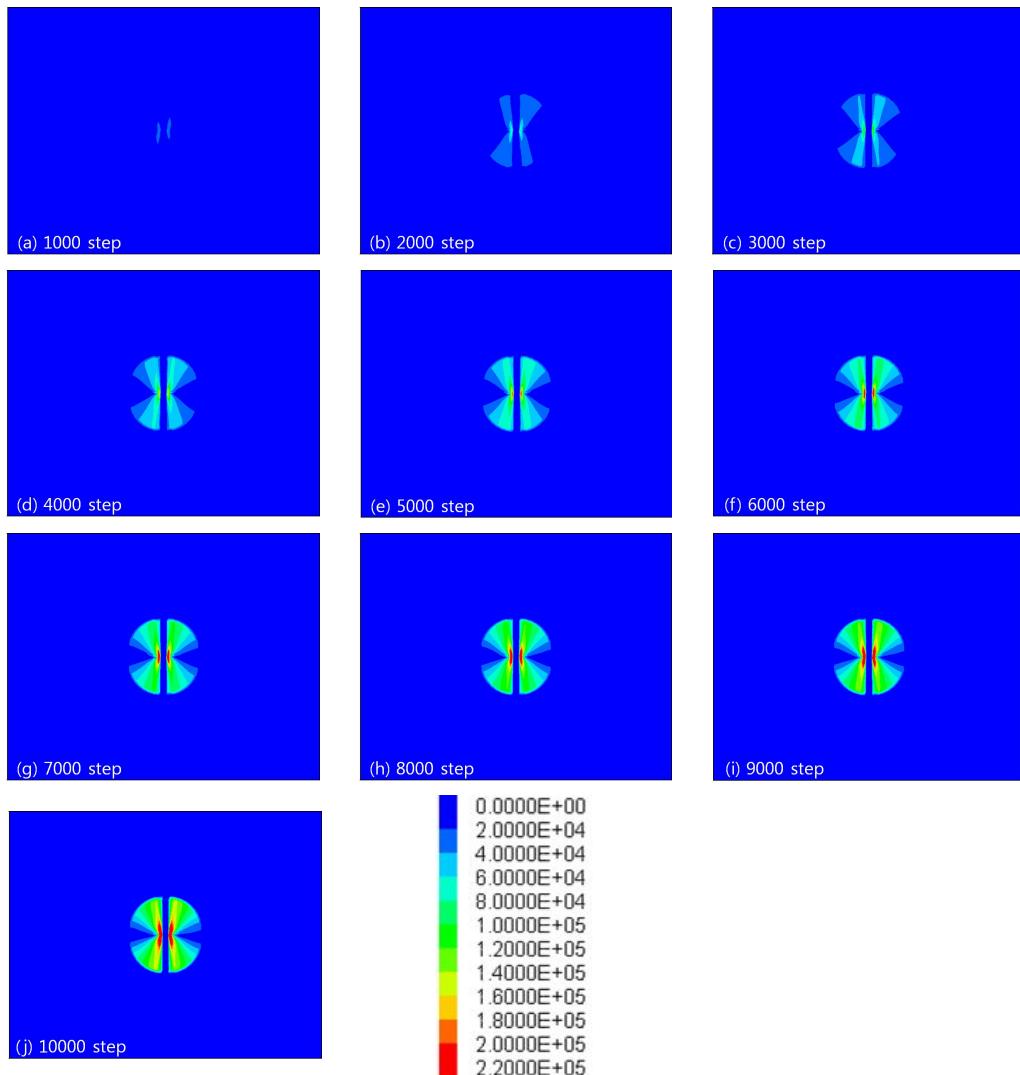


Figure 4-20. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 45°.

#### 4.1.5 비틀림 각 60° 에코-스파이럴 볼트 인발시험

비틀림 각 60°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4-1과 같다. 비틀림 각 60°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 136.62 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.24 mm로 나타났다(Figure 4-21). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 425.77 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 411.69 kPa로 나타났다(Table 4-1). Figure 4-22는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~2000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-23에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-23의 결과를 종합해 볼 때 변위 발생량이 일정해지는 거리 50 cm안에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 발생되는 것으로 사료된다.

인발하중에 의한 비틀림 각 60°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대 전단응력 분포를 Figure 4-24에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력 전단응력은 에코-스파이럴 볼트 전체 영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타났고, 인발하중이 증가할수록 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 주변을 따라 나타났다. Figure 4-25는 인발하중에 의한 비틀림 각 60°인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서 각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응

력 분포를 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 중앙에서 전단응력이 미미하게 관찰되며, 인발하중이 점차적으로 증가하면서 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 경계면에 전단응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다. 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보이며, 이러한 점을 고려해 볼 때 인발하중이 증가함에 따라 전단파괴 영역이 점차적으로 확대되어 결국 그라우트 지반 전체로 형성될 것으로 판단된다.

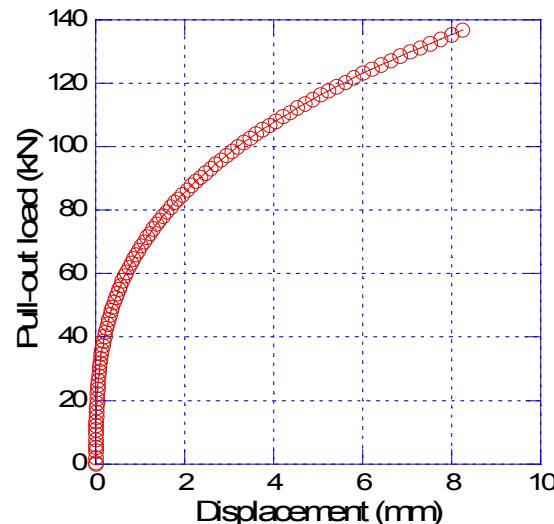


Figure 4-21. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.

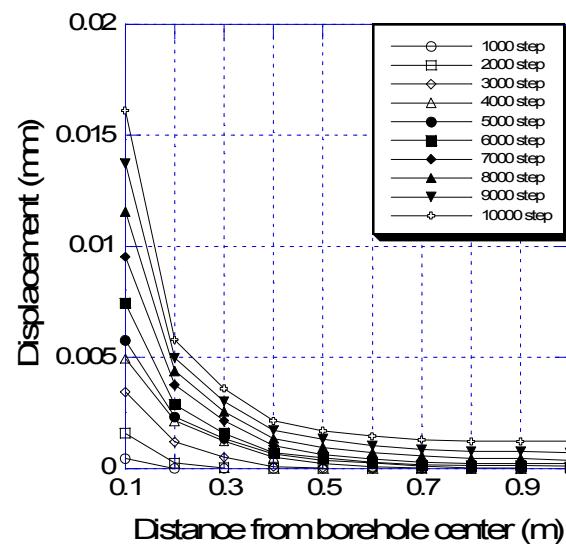


Figure 4-22 Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.

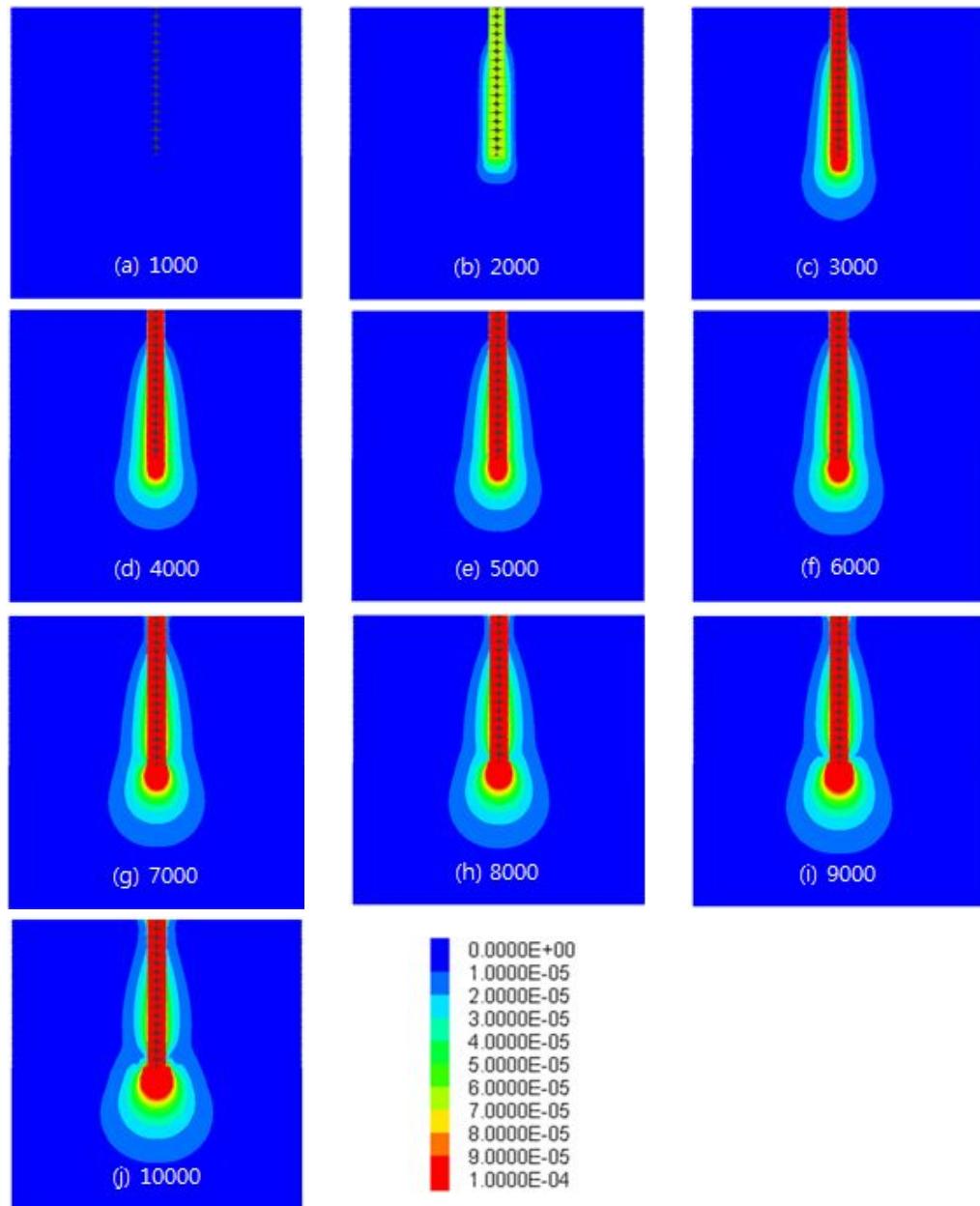


Figure 4-23. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.

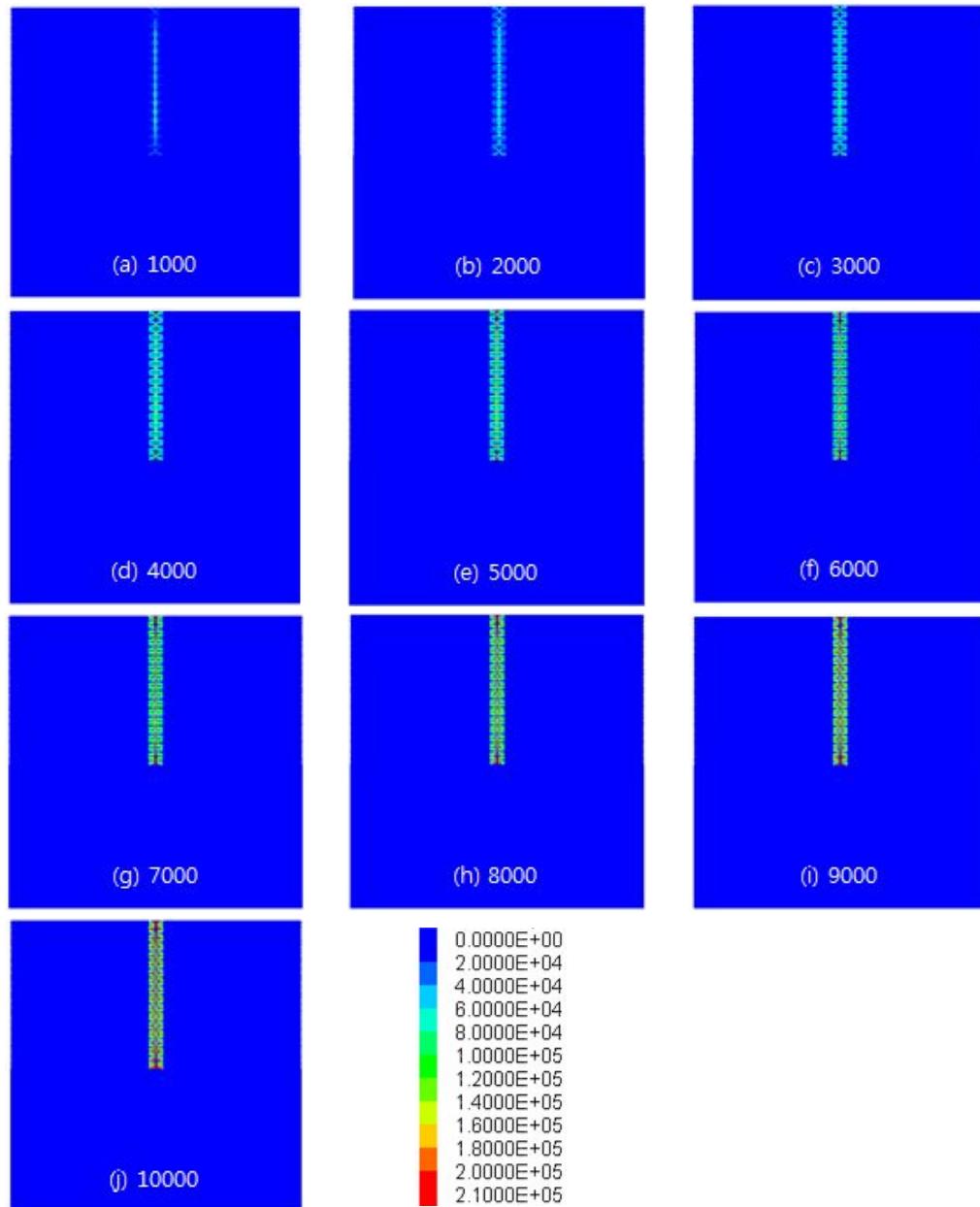


Figure 4-24. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.

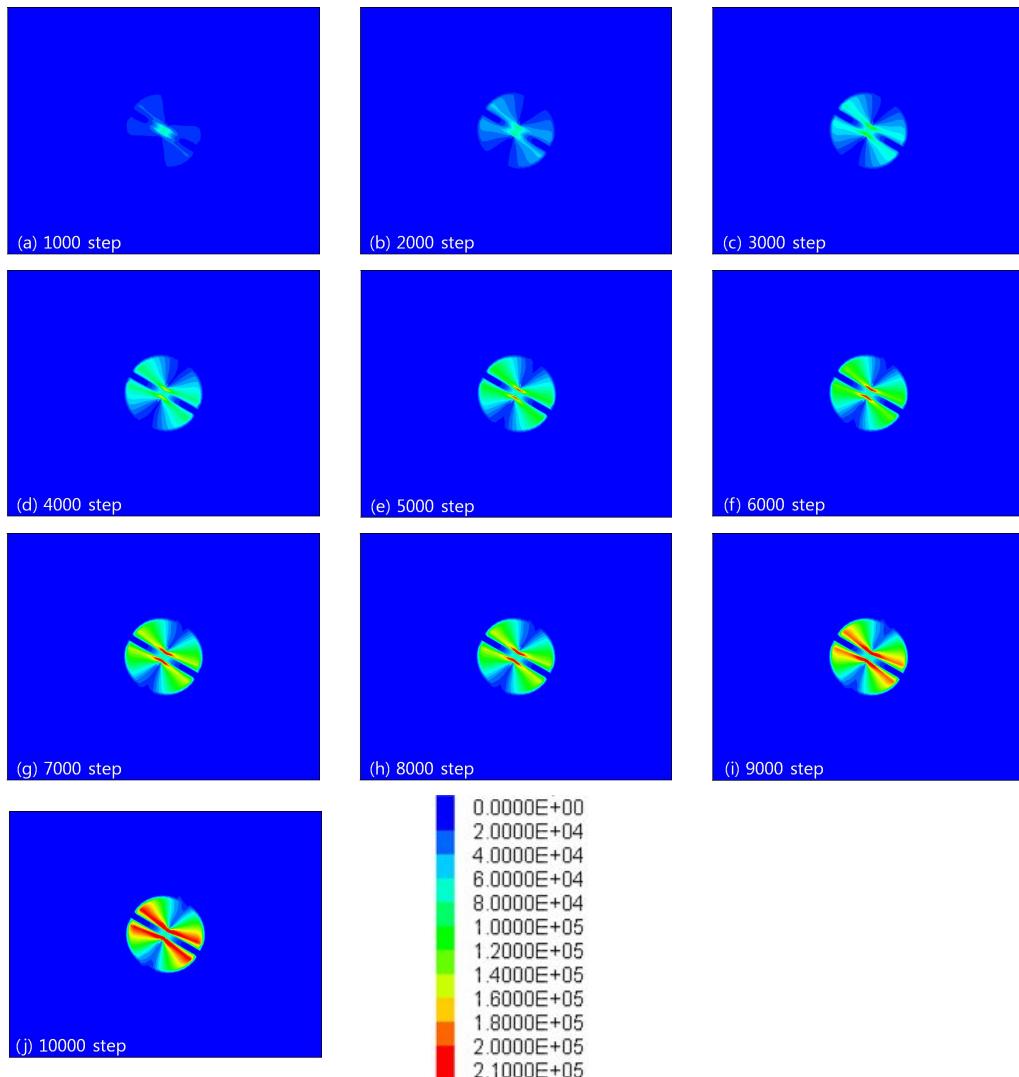


Figure 4-25. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with the twisted angle 60°.

## 4.2 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비에 따른 지반 거동 관계

### 4.2.1 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비 1.5 인발시험

시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비에 따른 지반거동 관계를 살펴보기 위하여 비틀림 각  $45^\circ$  에코-스파이럴 볼트에 대한 4가지 경우의 수치해석을 실시하였다. Table 4-2에  $D_{BH}/W_{ESB}=1.5$ 인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 결과를 정리하였다. 시추공 크기 비 1.5인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 185.57 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.17 mm로 나타났다(Figure 4-26). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단용력은 953.67 kPa이고, 지반 내 변위와 전단용력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단용력은 1052.38 kPa로 나타났다(Table 4-2). Figure 4-27는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 20 cm거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-28에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-28의 결과를 종합해 볼 때 변위 발생량이 일정해지는 거리 50 cm안에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 강하게 발생되는 것으로 사료된다.

$D_{BH}/W_{ESB}$  1.5인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대 전단응력 분포를 Figure 4-29에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 인발하중 초기 에코-스파이럴 볼트 전체 영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타나고, 인발하중이 증가할수록 그라우트 지반영역으로 확대되어 나타난다. 수치해석 8001 step~10000 step에서는 에코-스파이럴 볼트 양 끝 면에 최대전단응력이 집중되어 나타났다. 그 원인으로는 시추공의 크기가 커져 그라우트지반과 에코-스파이럴 볼트 경계부분의 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

Figure 4-30은  $D_{BH}/W_{ESB}$  1.5인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서 각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 양 끝면에 집중되어 나타났다. 인발하중이 증가할수록 그라우트 영역으로 확대되어 나타났고, 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보였다. 특히 에코-스파이럴 볼트 끝 단면을 시계방향으로 전단응력이 집중되어 나타났다. 이는 시추공의 크기가 커져 그라우트 지반과 에코-스파이럴 볼트 경계부분의 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

Table 4-2. Results of numerical analysis on  $D_{BH}/W_{ESB}$  by pull-out test (twisted angle of Eco-Spiral Bolt: 45°, width: 10 cm, length: 100 cm, thickness: 1 cm).

$D_{BH}/W_{ESB}$	Maximum pull-out load (kPa)	Maximum displacement (mm)	Maximum shear stress of axial direction (kPa)	Maximum shear stress at 0.7 m (kPa)
1.0	76.44	8.10	441.79	434.62
1.5	185.57	8.17	953.67	1052.38
2.0	430.29	8.32	3016.76	2652.35
3.0	743.69	8.25	6667.32	4589.42

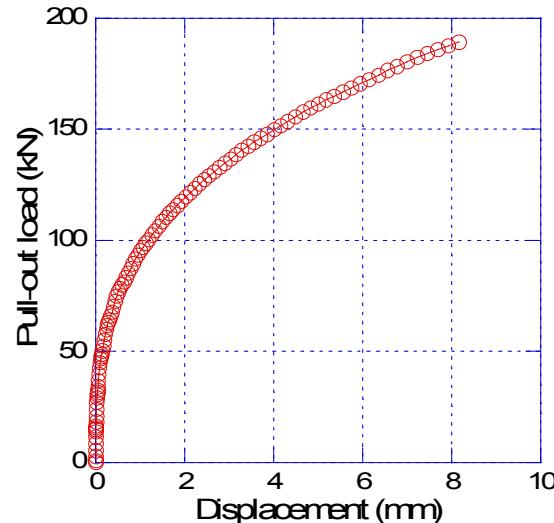


Figure 4-26. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  1.5.

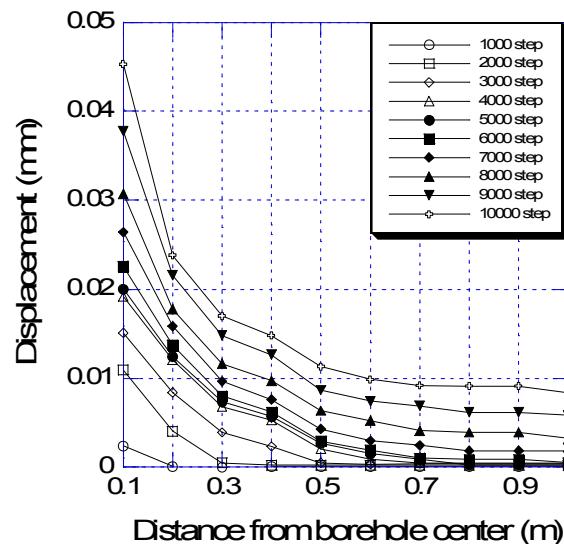


Figure 4-27. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  1.5.

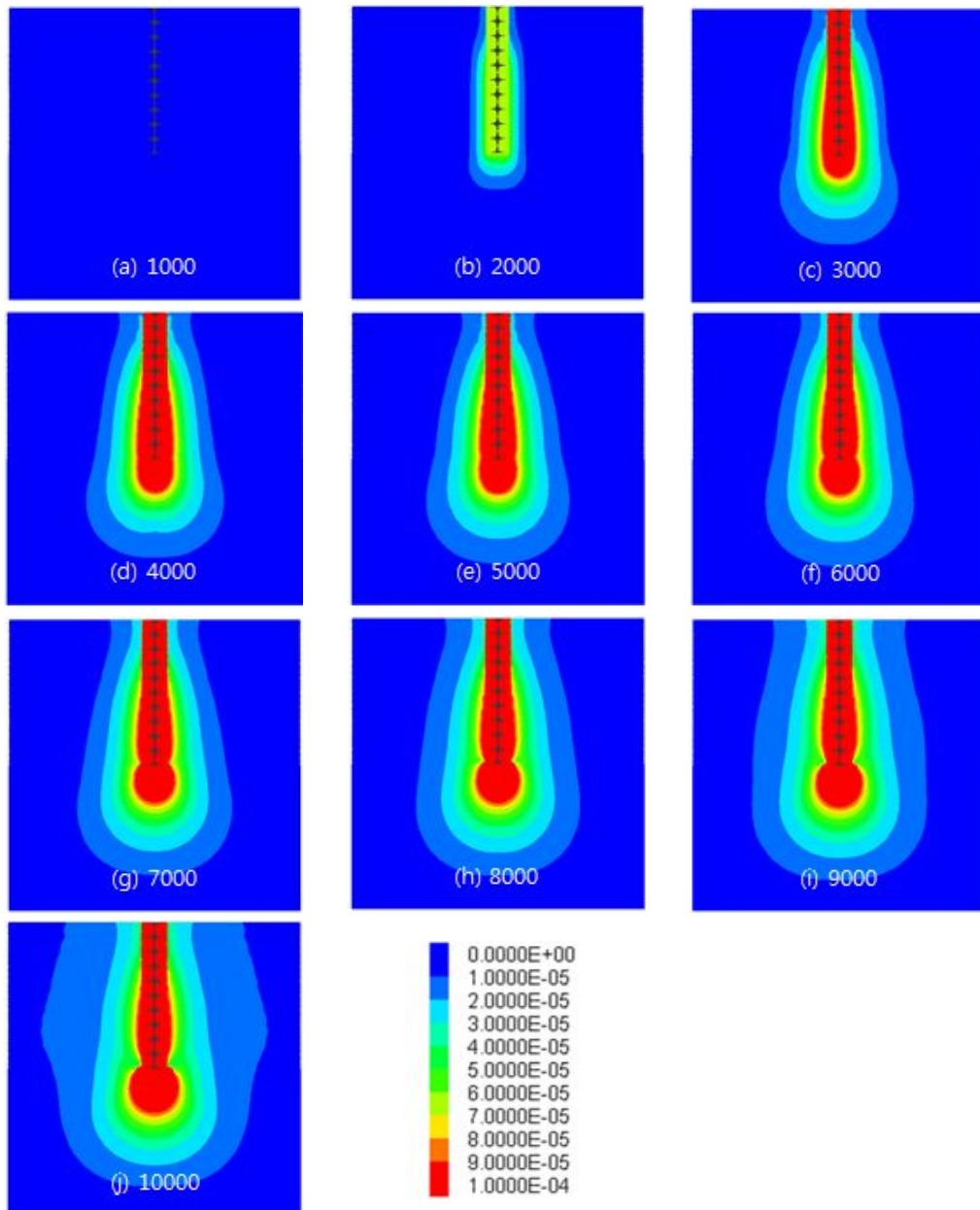


Figure 4-28. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ .

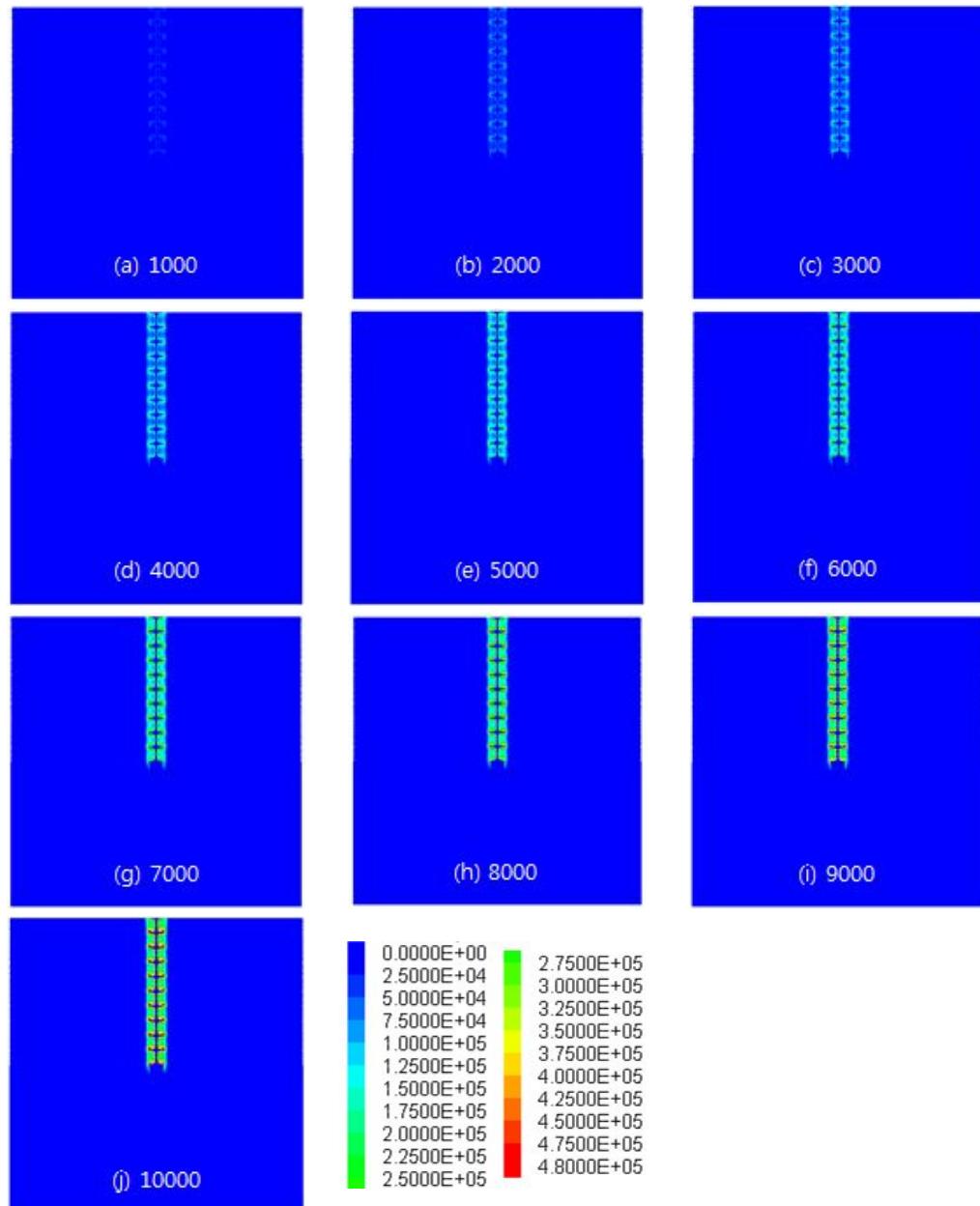


Figure 4-29. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ .

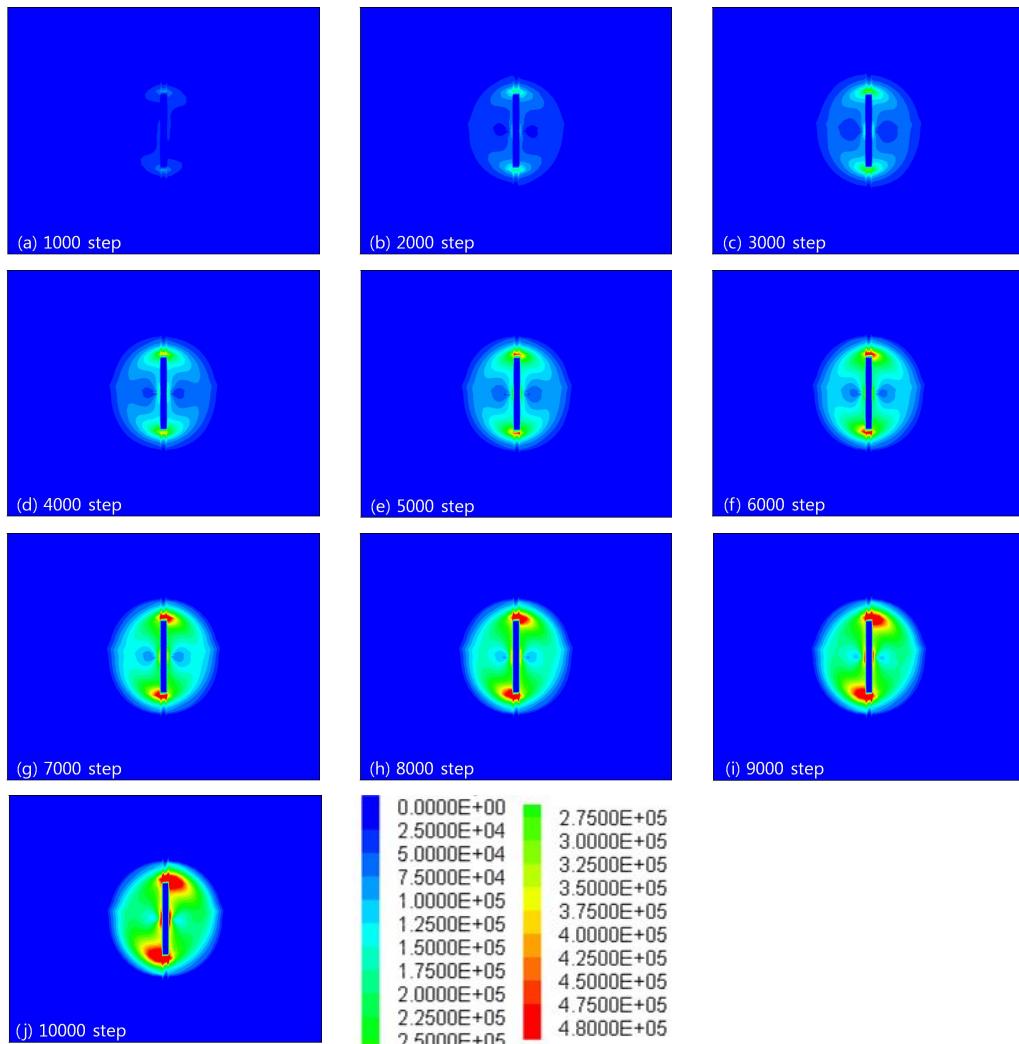


Figure 4-30. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 1.5$ .

## 4.2.2 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비 2.0 인발시험

Table 4-2에  $D_{BH}/W_{ESB}$  2.0인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 결과를 정리하였다. 시추공 크기 비 2.0인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 430.29 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.32 mm로 나타났다(Figure 4-31). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 3016.76 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 2652.35 kPa로 나타났다(Table 4-2). Figure 4-32는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 30 cm거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-33에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-33의 결과를 종합해 볼 때 지반 전체에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 발생되는 것으로 사료되어지고 특히 변위 발생량이 일정해지는 거리 20 cm안에서 영향력이 강하게 작용하는 것으로 판단된다.

$D_{BH}/W_{ESB}$  2.0인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대 전단응력 분포를 Figure 4-34에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 인발하중 초기 에코-스파이럴 볼트 전체 영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타나고, 인발하중이 증가할수록 그라우트 지반영역으로 확대되어 나타난다. 수치해석 8001 step~10000 step에서는 에코-스파이럴 볼트 양 끝 면에 최대전단응력이 집중되어 나타났다. 그 원인으로는 시추공의 크기가 커져 그라우트지반과

에코-스파이럴 볼트 경계부분의 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

Figure 4-35는  $D_{BH}/W_{ESB}$  2.0인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서 각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력을 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 양 끝면에 집중되어 나타났다. 인발하중이 증가할수록 그라우트 영역으로 확대되어 나타났고, 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보였다. 특히 에코-스파이럴 볼트 끝 단면을 시계방향으로 전단응력이 집중되어 나타났다. 이는 시추공의 크기가 커져 그라우트 지반과 에코-스파이럴 볼트 경계부분의 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

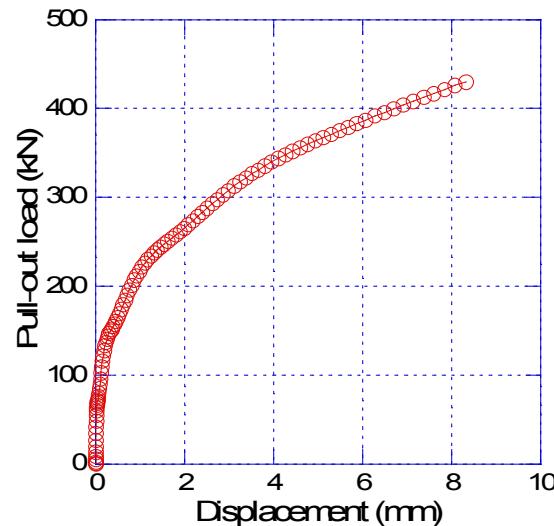


Figure 4-31. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ .

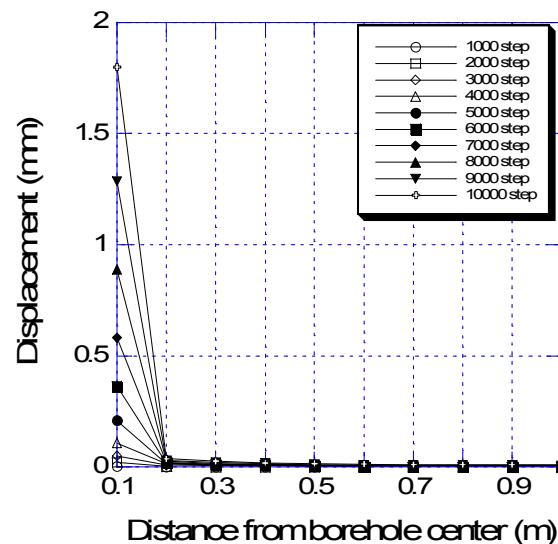


Figure 4-32. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ .

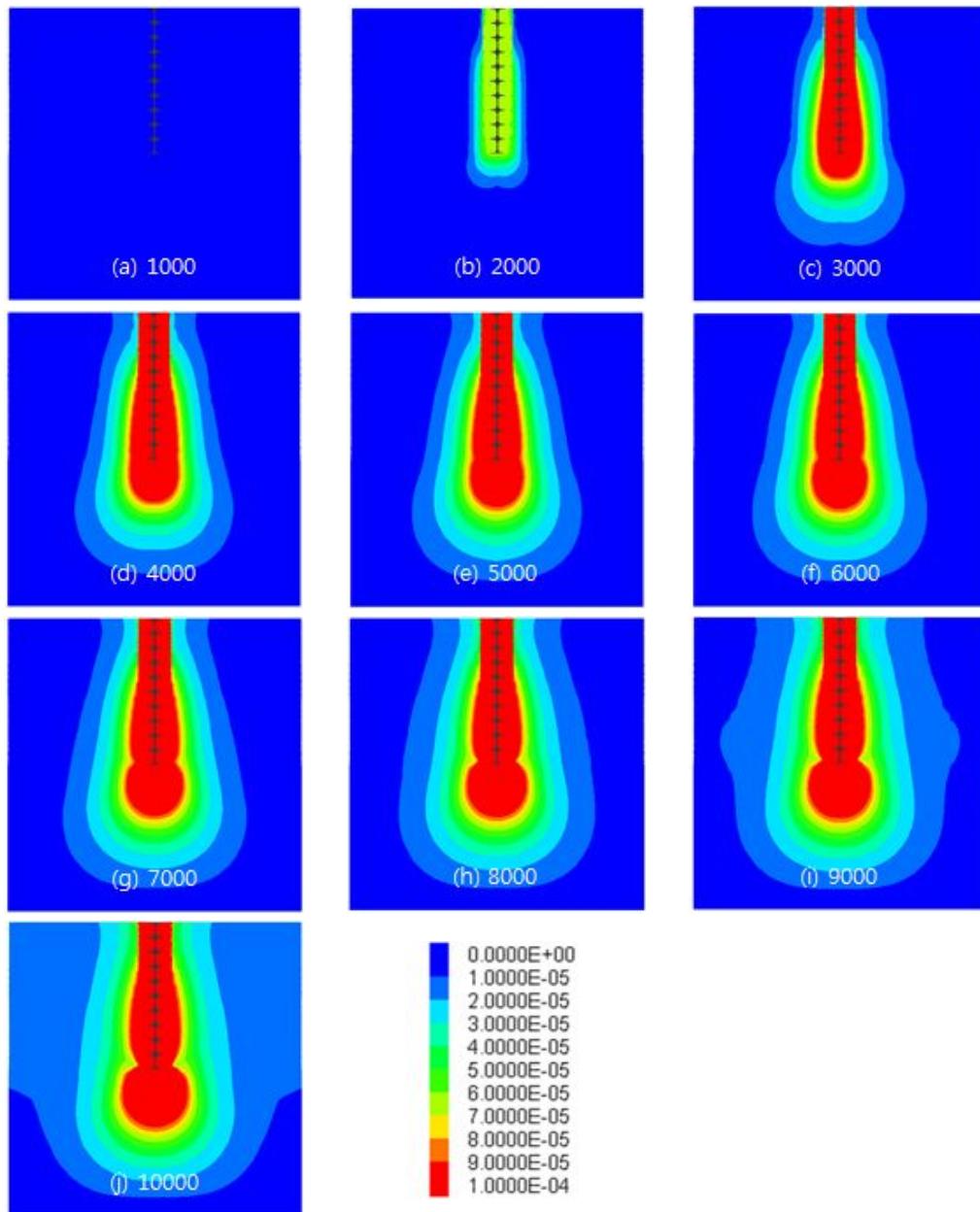


Figure 4-33. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ .

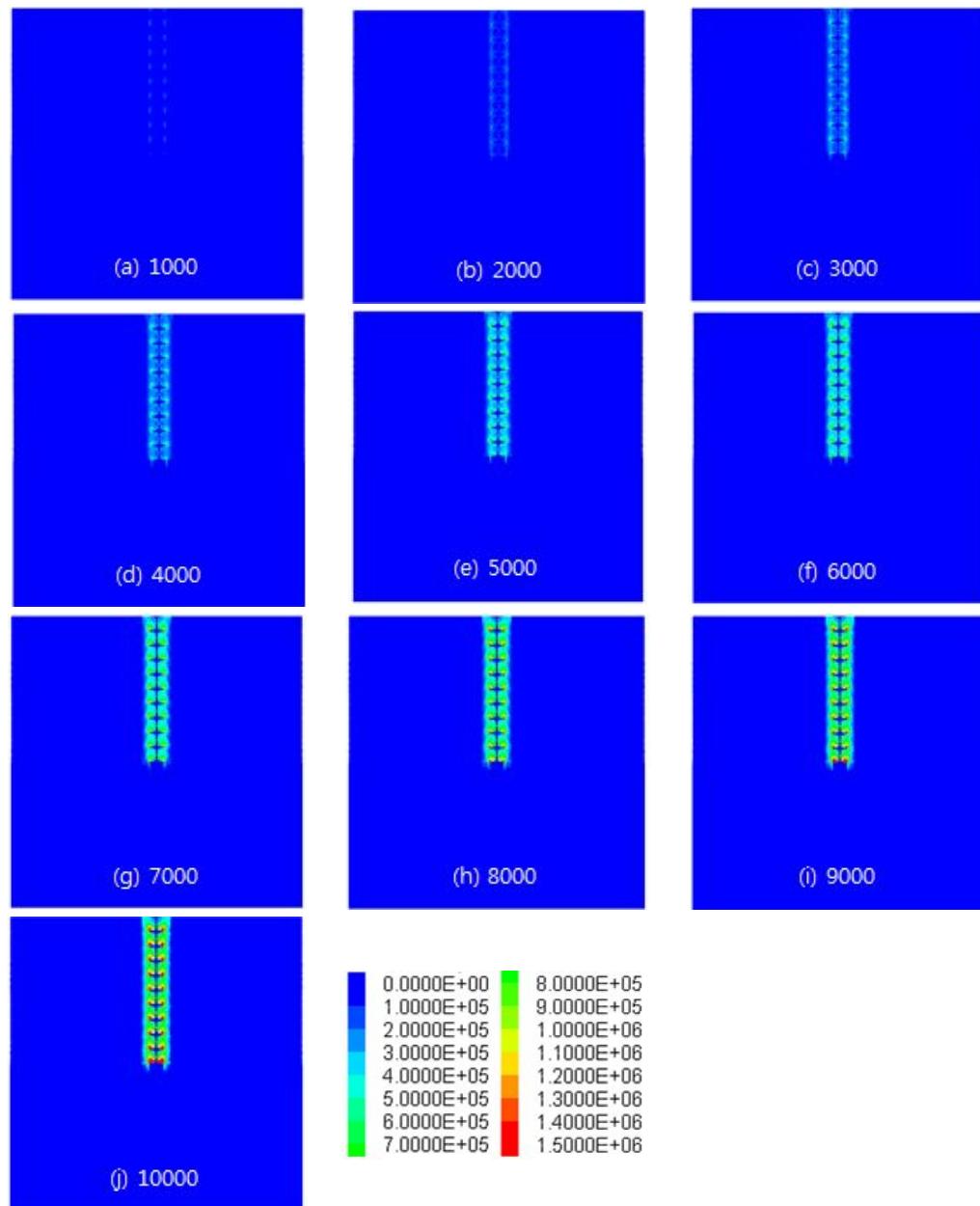


Figure 4-34. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ .

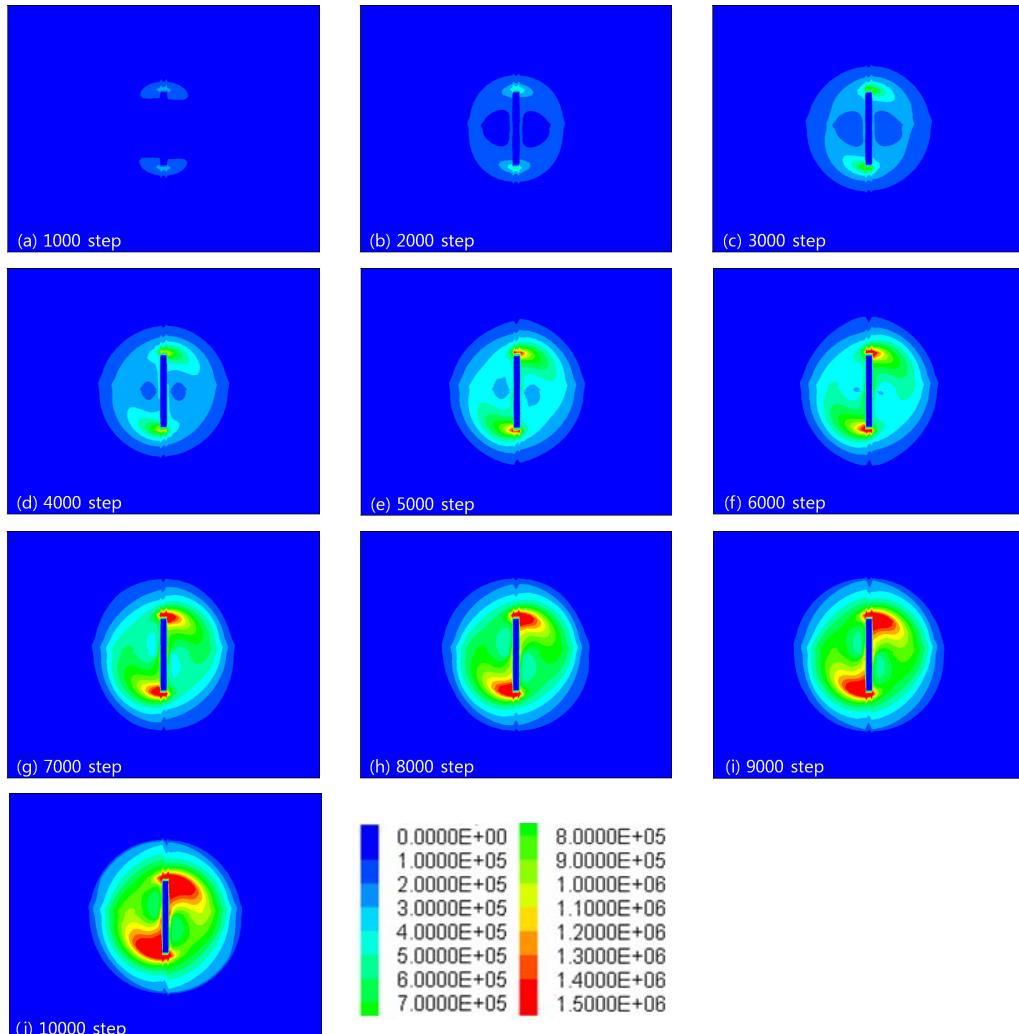


Figure 4-35. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB} = 2.0$ .

### 4.2.3 시추공 크기/에코-스파이럴 볼트 폭 비 3.0 인발시험

Table 4-2에  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석을 결과를 정리하였다. 시추공 크기 비 3.0인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 수치해석 결과, 인발하중은 743.69 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위는 8.25 mm로 나타났다(Figure 4-36). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 6667.32 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 4589.42 kPa로 나타났다(Table 4-2). Figure 4-37는 총 수치해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~1000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 1001~2000 step의 경우 시추공 중심으로부터 30 cm거리 까지 변위 변화가 심하게 발생하다가 그 이후인 구간에서는 거의 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위 발생량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 4-38에서 나타나듯 인발하중에 따른 지반의 변위는 하중이 증가할수록 변위가 지반전체에 영향을 미치며, 지반상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 에코-스파이럴 볼트의 형상과 지반의 물성, 지반하부가 에코-스파이럴 볼트 끝 부분과 지반이 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 이상의 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화 결과와 Figure 4-38의 결과를 종합해 볼 때 지반 전체에서 에코-스파이럴 볼트의 지보 영향력이 발생되는 것으로 사료되어지고 특히 변위 발생량이 일정해지는 거리 50 cm안에서 영향력이 강하게 작용하는 것으로 판단된다.

$D_{BH}/W_{ESB}$  3.0인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대 전단응력 분포를 Figure 4-39에 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 인발하중 초기 에코-스파이럴 볼트 전체 영역에 걸쳐 동일하게 발현되어 나타나고, 인발하중이 증가할수록 그라우트 지반영역으로 확대되어 나타난다. 수치해석 8001 step~10000 step에서는 에코-스파이럴 볼트 양 끝 면에 최대전단응력이 집중되어 나타났다. 그 원인으로는 시추공의 크기가 커져 그라우트지반과

에코-스파이럴 볼트 경계부분의 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

Figure 4-40은  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0인 지반의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서 각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력을 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 양 끝면에 집중되어 나타났다. 인발하중이 증가할수록 시계방향으로 그라우트 영역으로 확대되어 나타났고, 인발하중이 최종 단계에 도달했을 때 최대전단응력은 에코-스파이럴 볼트 중심에 태극 문양을 나타냈다. 이는 시추공의 크기가 커져 그라우트지반과 에코-스파이럴 볼트 경계부분의 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료되어지고, 그라우트 지반 물성과 비슷한 풍화암 또는 그 이상의 물리적, 역학적 성질을 갖는 암반에서 비슷한 양상을 나타낼 것으로 판단된다.

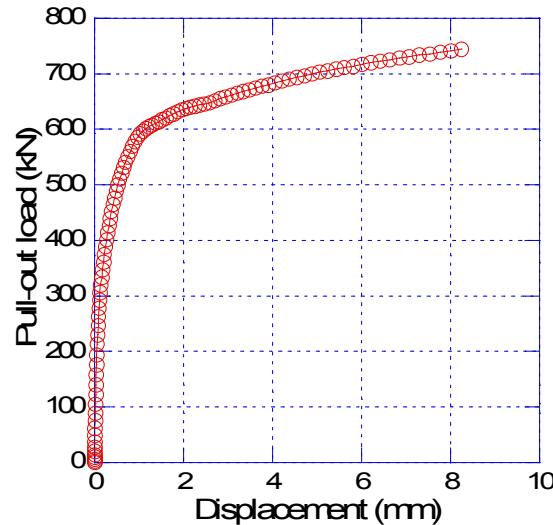


Figure 4-36. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0.

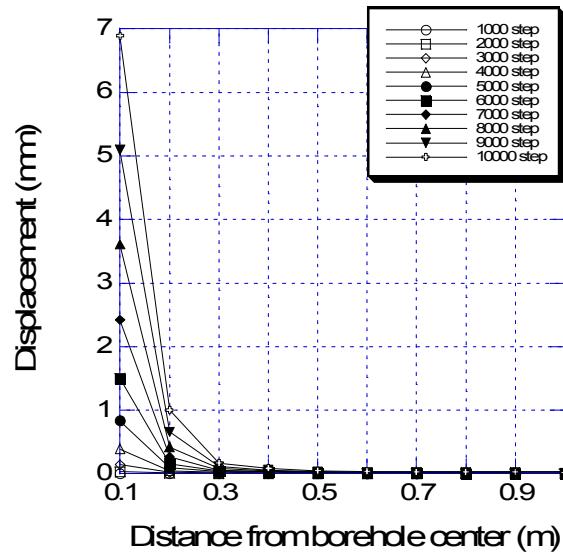


Figure 4-37. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0.

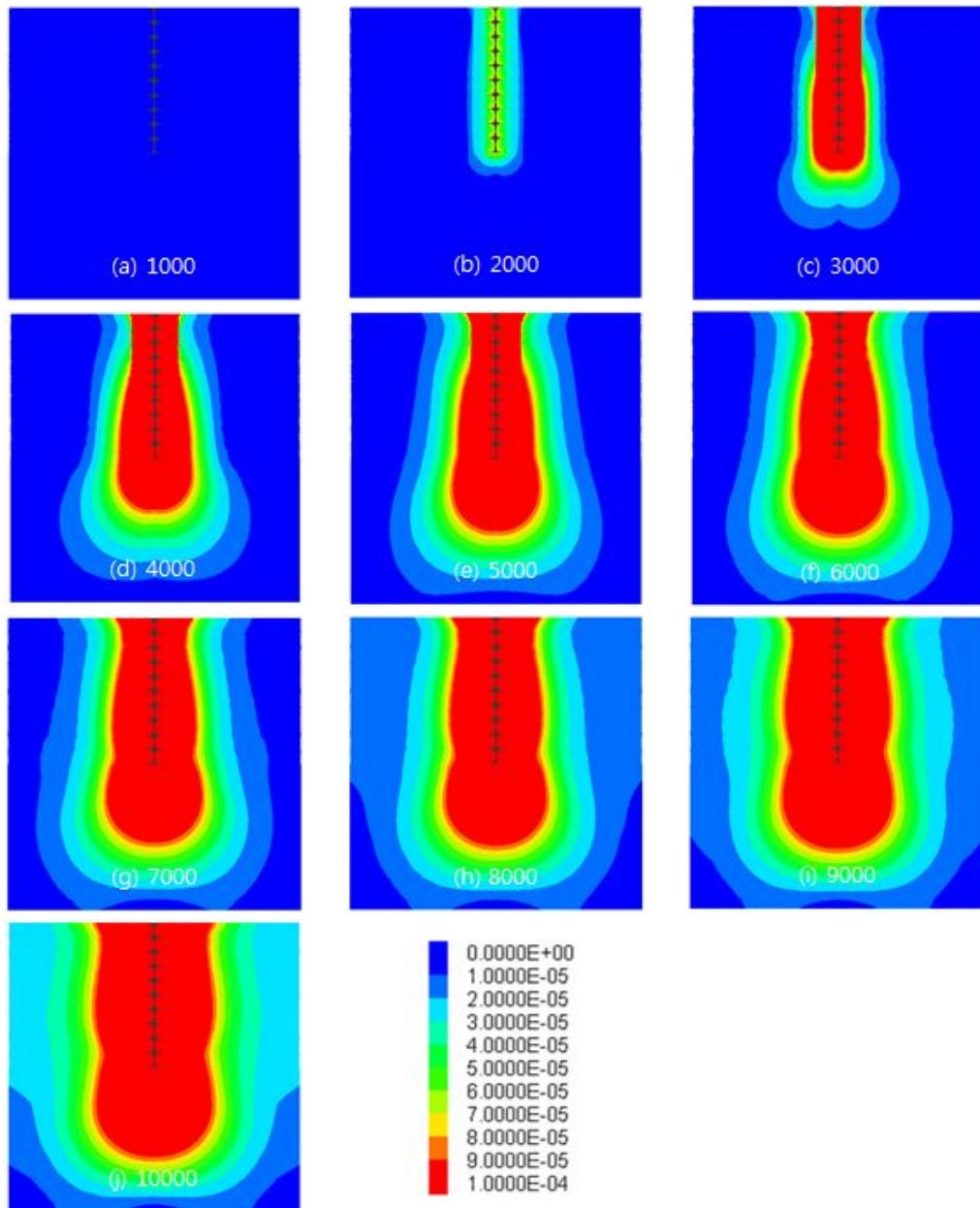


Figure 4-38. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0.

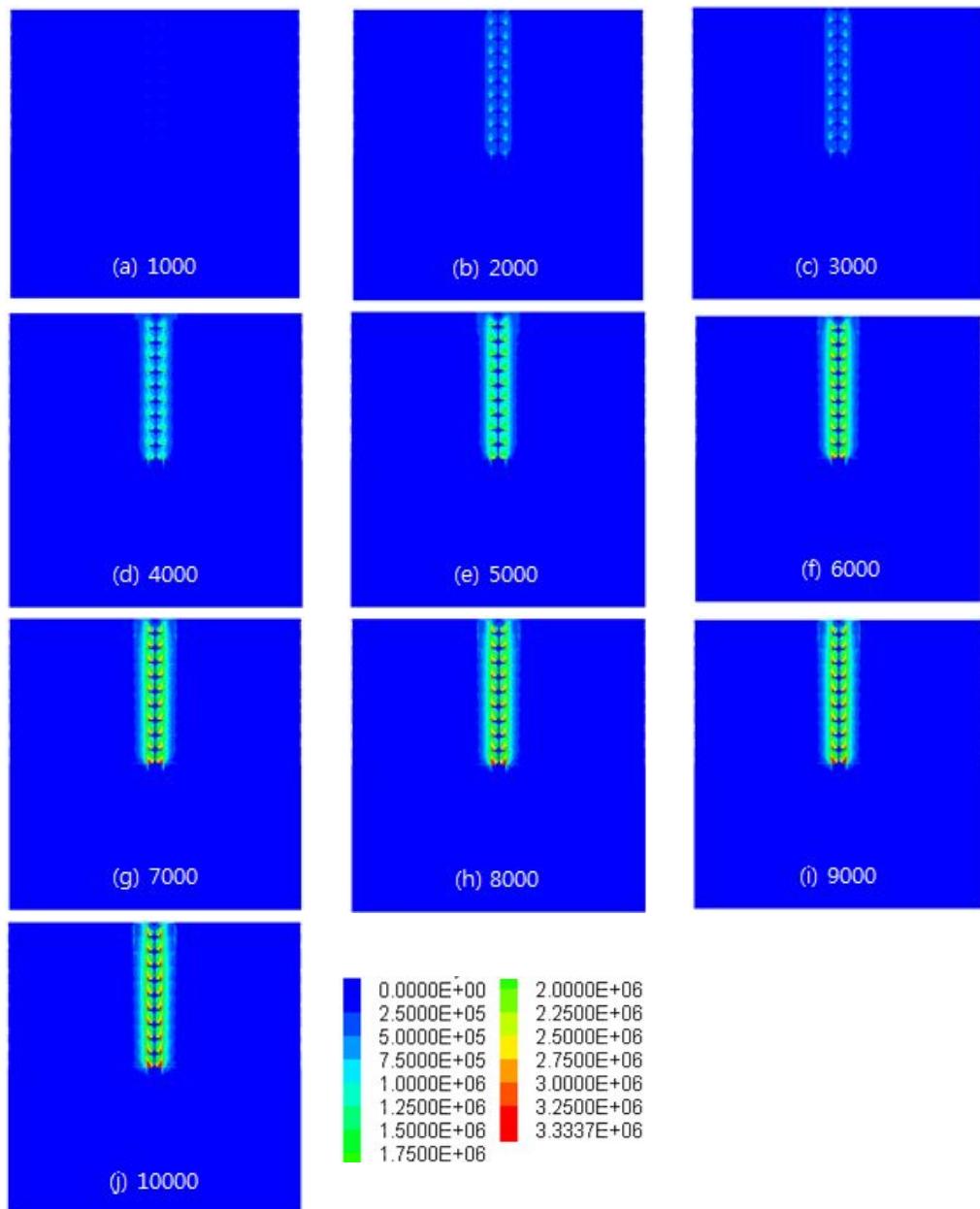


Figure 4-39. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0.

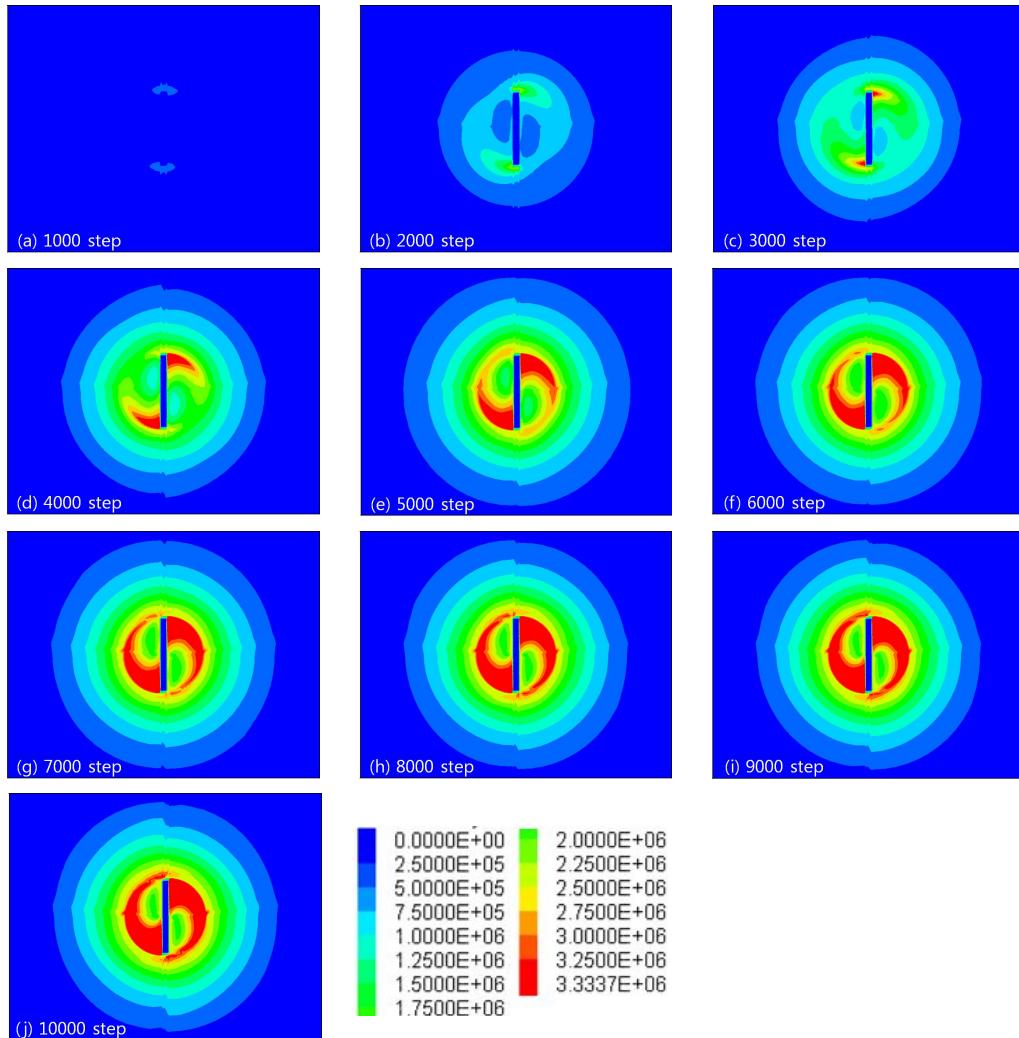


Figure 4-40. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt with  $D_{BH}/W_{ESB}$  3.0.

### 4.3 단일층/다층 지반구조에 따른 지반거동 관계

에코-스파이럴 볼트의 인발시험에 의한 단일층/다층 지반구조의 지반거동을 살펴보기 위해 수치해석을 실시하였다. Table 4-3은 다층 지반구조에 대한 인발시험 수치해석 결과를 나타낸다. 인발하중은 80.69 kN일 때 에코-스파이럴 볼트의 총 변위가 8.33 mm로 나타났다(Figure 4-41). 이때 발생한 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 452.02 kPa이고, 지반 내 변위와 전단응력이 가장 크게 일어난 심도인 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 441.4 kPa로 나타났다(Table 4-3). Figure 4-42는 총 수치 해석 10,000 step을 1,000 step씩 10개 단계로 나누어서 각 단계별 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~2000 step의 경우에는 시추공 근처에서 변위가 약간 발생하였고, 그 외의 구간에서는 변위가 일정한 상태를 보였다. 2001~10000 step에서는 시추공 근처에서 변위 발생량이 크고, 시추공 중심으로부터 멀어질수록 변위량은 점점 감소하는 경향을 나타냈다. 인발하중에 따른 지반의 변위는 인발하중 초기에는 사질토와 풍화토층 경계면이 나타나지 않지만 하중이 증가할수록 층의 경계면이 뚜렷하게 나타났다(Figure 4-43). 지반의 전체 변위는 사질토 지반보다는 풍화토 지반에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 지반의 물성에 의해 풍화토 지반과 에코-스파이럴 볼트가 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 인발시험에 의한 에코-스파이럴 볼트 지보 영향 범위는 변위 발생량이 일정해지는 거리 60 cm내에서 나타나는 것으로 판단된다. 다층 지반구조의 에코-스파이럴 볼트에 대한 각 단계별 최대전단응력 분포를 나타내면 Figure 4-44와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 지반 상부보다는 하부에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 지반 하부의 풍화토 지반과 에코-스파이럴 볼트가 접촉하고 있는 경계부분으로 인발저항이 가장 크게 작용하기 때문으로 사료된다.

Figure 4-45는 다층 지반구조의 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험 시 변위와 전단응력이 가장 크게 발생한 70 cm 지점에 대해서 각 단계별 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력 분포를 나타낸 것이다. 인발하중 초기에는 에코-스파이럴 볼트 중앙에서 전단응력이 미미하게 관찰되며, 인발하중이

점차적으로 증가하면서 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 경계면에 전단응력이 집중되어 나타남을 알 수 있다. 인발하중이 최종단계에 도달했을 때 최대전단응력이 에코-스파이럴 볼트 폭과 같은 크기로 확대되는 양상을 보이며, 풍화토와 그라우트 경계면에서 시계 방향으로 회전하며 전단응력이 발생하는 양상을 나타냈다. 이러한 사실은 인발하중이 증가함에 따라 전단파괴영역도 점차적으로 확대되어 최후에는 그라우트 지반전체로 전단파괴 영역이 형성될 것으로 판단된다.

Table 4-3. Result of numerical analysis along the multi-layer structure by pull-out test.

Maximum pull-out load (kPa)	Maximum displacement (mm)	Maximum shear stress of axial direction (kPa)	Maximum shear stress at 0.7 m (kPa)
80.69	8.33	452.02	441.4

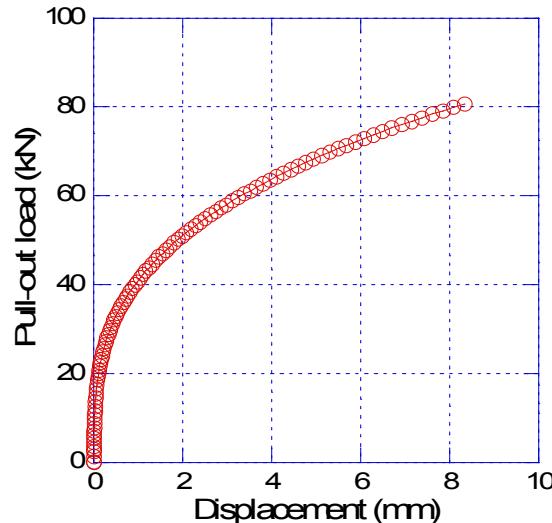


Figure 4-41. Relationship between pull-out load and displacement in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure.

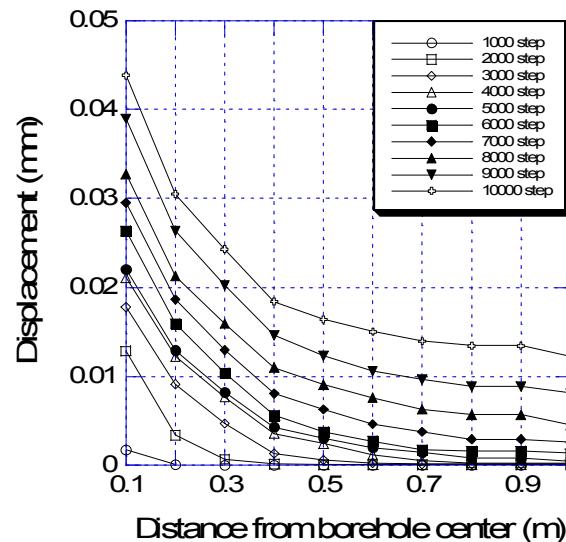


Figure 4-42. Relationship between displacement and distance from borehole center in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure.

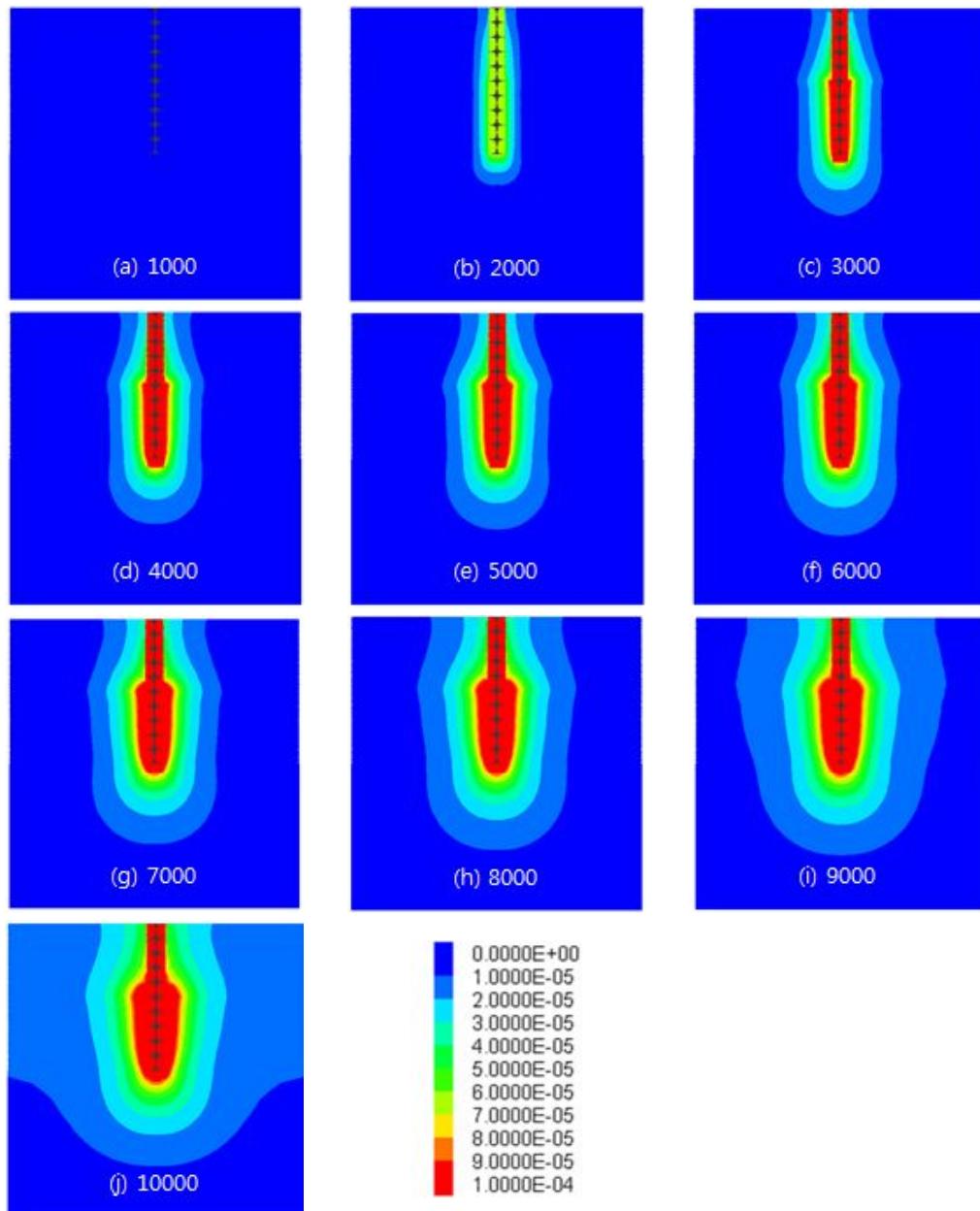


Figure 4-43. Results of numerical analysis on displacement along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure.

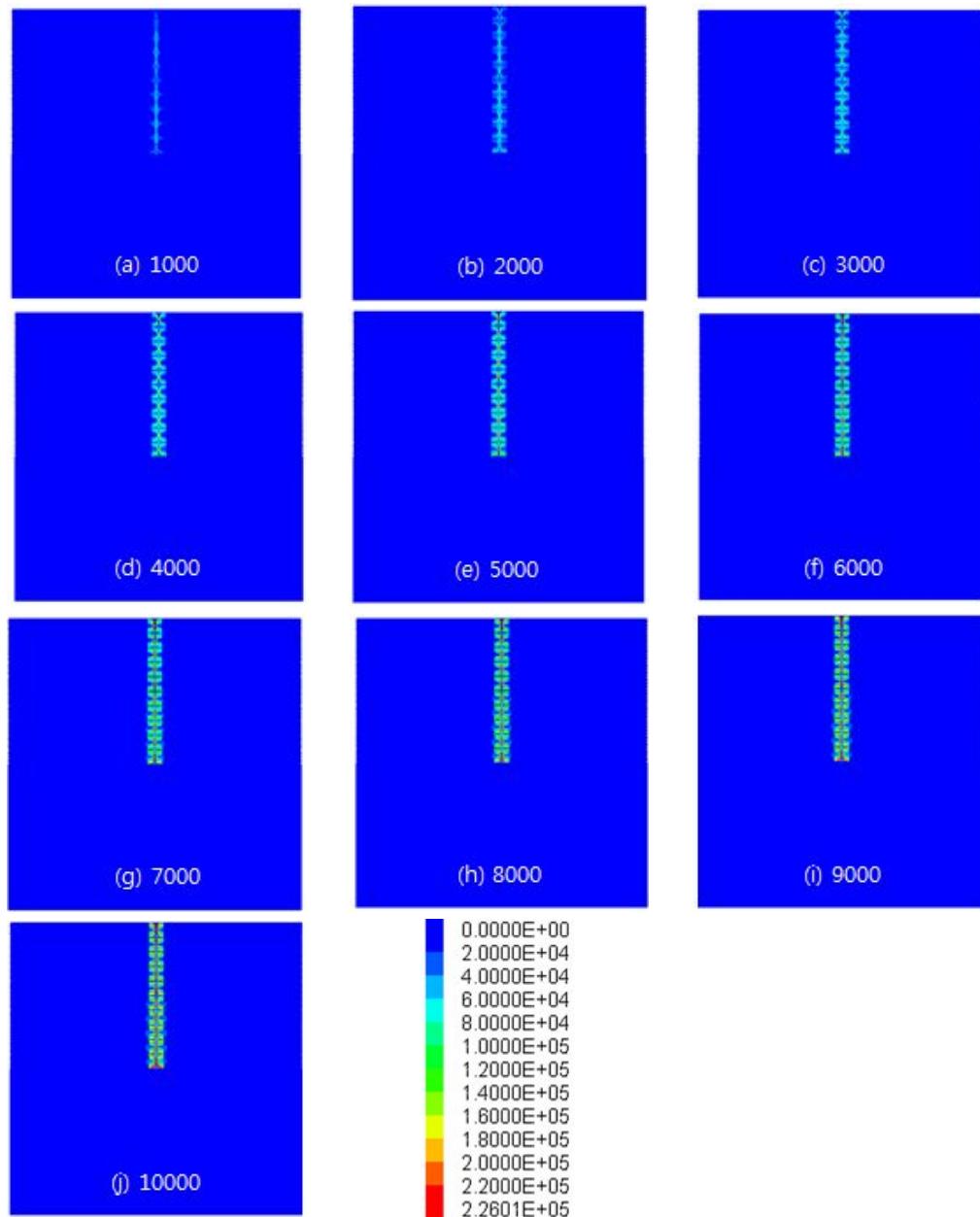


Figure 4-44. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Z section along pull-out load in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure.

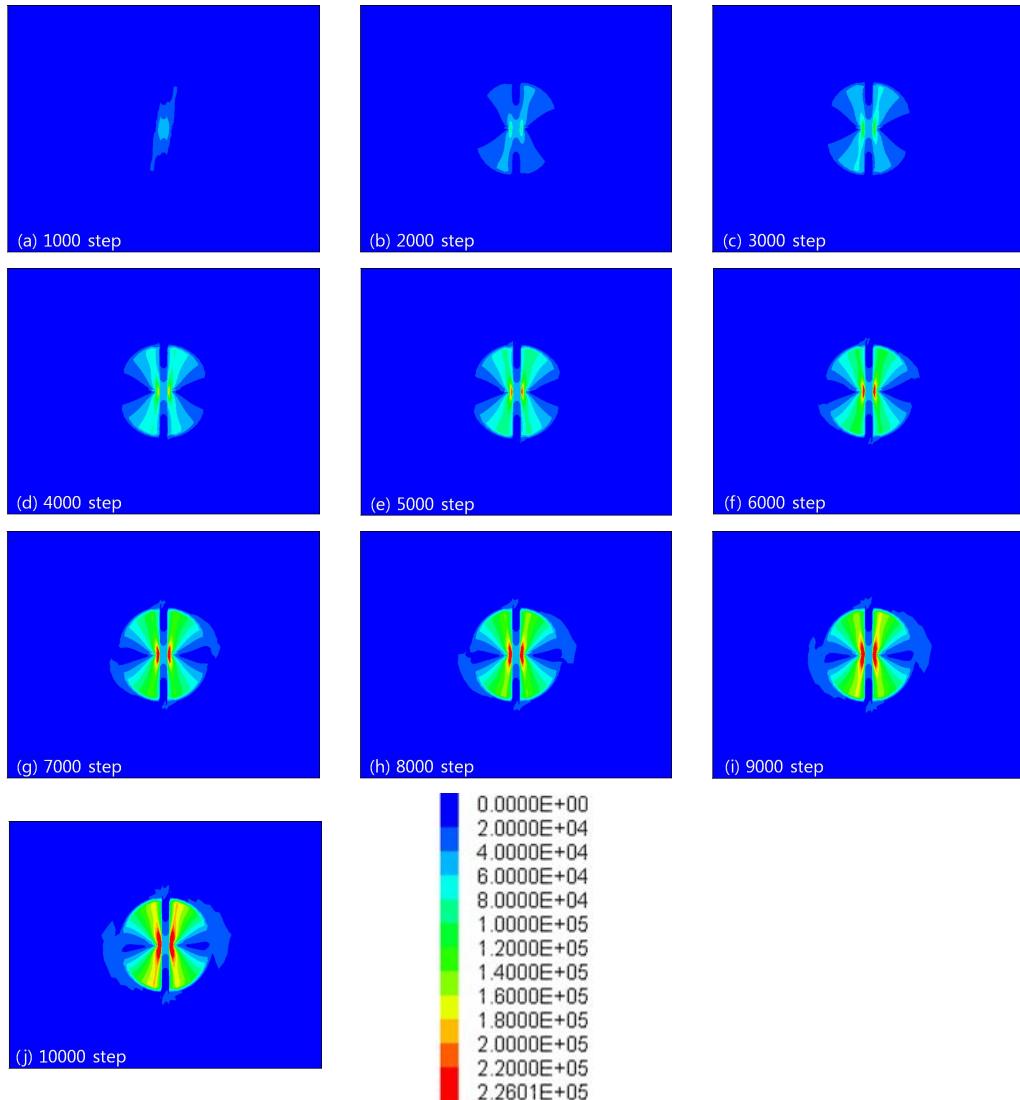


Figure 4-45. Results of numerical analysis on maximum shear stress of X-Y section along pull-out load at a depth of 70 cm in case of Eco-Spiral Bolt in multi-layer structure.

## 5. 고찰

본 연구의 목적은 지반공학적 문제를 해결하기 위한 다목적 친환경 지보재를 개발하고 그 특성을 수치해석적 방법으로 규명하는 것이다. 사용된 수치해석 도구는 Itasca사의 FLAC 3D이며, 이를 이용하여 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각에 따른 지반거동의 차이점, 시추공과 에코-스파이럴 볼트 폭 비에 따른 지반거동, 그리고 단일층/다층 지반구조에 따른 지반거동을 각각 검토하였다.

에코-스파이럴 볼트 비틀림 각에 따른 인발하중과 최대전단응력의 변화 양상을 비교·분석하였다(Figure 5-1). Figure 5-1(a)는 비틀림 각이  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 인 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험에서 최대 변위가 발생한 지점인 8 mm에서의 인발하중 양상을 나타낸 것이다. 최대인발하중은  $0^\circ=63.9$  kN,  $15^\circ=21.9$  kN,  $30^\circ=62.9$  kN,  $45^\circ=76.4$  kN,  $60^\circ=135.3$  kN로 나타나,  $15^\circ$  일 때 가장 낮게 나타났고,  $60^\circ$  일 때 가장 높게 나타났다. 이에 반면,  $0^\circ$ 와  $30^\circ$ 는 거의 비슷한 인발하중을 나타냈으며,  $45^\circ$ 는 이들의 평균값과 유사하게 나타났다. 비틀림 각  $15^\circ$ 를 제외하고 비틀림 각이 커질수록 인발하중이 증가하는 양상이 나타났다. 이는 비틀림 각이 커질수록 지반에 대한 저항마찰력이 커지는 것을 의미한다. Figure 5-1(b)는 비틀림 각에 따른 지반 내 70 cm에서 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력과 X-Z 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력을 나타낸 것이다. 비틀림 각  $0^\circ$ 는 평판이기 때문에 축방향에 대한 저항력은 약하게 나타난 반면, 최대전단응력은 그라우트 지반과 에코-스파이럴 볼트 경계면의 마찰력이 의해 지반내 70 cm에서 크게 나타났다. 비틀림 각  $15^\circ\sim30^\circ$  사이에서의 축방향 및 지반내 70 cm에서의 최대전단응력은 증가하는 양상을 나타낸 반면, 비틀림 각  $30^\circ\sim60^\circ$  사이에서의 축방향 및 지반내 70 cm에서의 최대전단응력은 감소하는 경향을 나타냈다.

가장 일반적으로 사용되고 있는 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각  $45^\circ$ 에 대한 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트 폭 비( $D_{BH}/W_{ESB}$ )에 따른 인발하중과 최대전단응력의 변화 양상을 비교·분석하였다(Figure 5-2).  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 커질수록 최대인발하중-변위 관계에서 경사가 급해지는 결과를 나타냈고,  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 3.0일 때 인발하중-변위 곡선의 경사가 가장 크게 나타났다. Figure 5-2 (a)는 에코-스파이럴 볼

트에 대한 인발시험에서 최대 변위가 발생한 8 mm 지점에서의 인발하중과  $D_{BH}/W_{ESB}$ 의 관계를 나타낸다.  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 증가할수록 인발하중도 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

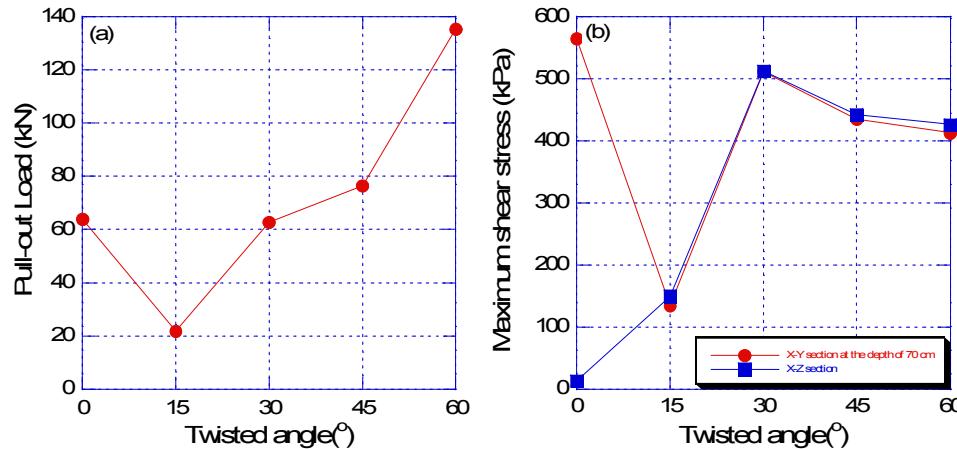


Figure 5-1. Result of (a) pull-out load and (b) maximum shear stress with the twisted angles.

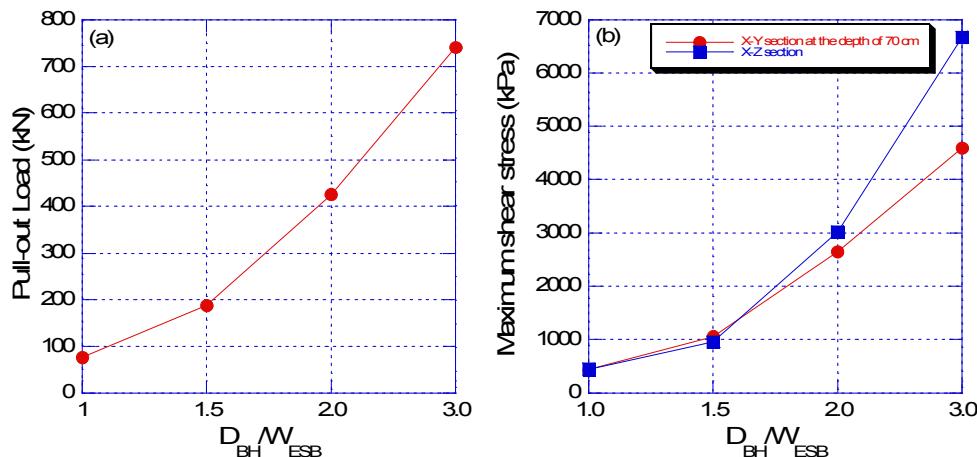


Figure 5-2. Result of (a) pull-out load and (b) maximum shear stress with  $D_{BH}/W_{ESB}$ .

Figure 5-2 (b)는  $D_{BH}/W_{ESB}$ 에 따른 지반 내 70 cm의 최대전단응력과 축방향의 최대전단응력을 나타낸다. 인발하중- $D_{BH}/W_{ESB}$  관계의 결과와 마찬가지로  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 증가할수록 두 개의 최대전단응력 모두 증가하는 양상을 나타냈다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력이 지반내 70 cm에서의 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력보다 크게 나타났다. 또한 시추공 중심으로부터 거리에 따른 변위는  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 2.0과 3.0일 때 가장 크게 나타났다.

단일층/다층 지반구조에 따른 지반거동은 사질토 단일층과 사질토, 풍화토의 다층지반구조에 대해 분석하였다(Figure 5-3). Figure 5-3 (a)은 에코-스파이럴 볼트에 대한 인발시험에서 최대 변위가 발생한 8 mm 지점에서의 단일층/다층 지반-인발하중 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 다층구조의 인발하중이 단일층 보다 약 3 kN 더 크게 나타났다. Figure 5-3 (b)은 지반 내 70 cm에서의 최대전단응력과 축방향의 최대전단응력을 비교·분석한 것을 나타낸다. X-Z 단면에서의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력이 지반 내 70 cm에서의 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력보다 더 크게 나타났다. 또한 최대 변위가 발생한 8 mm 지점에서의 단일층/다층 지반-인발하중 결과와 동일하게 다층 지반구조의 최대전단응력이 단일층 지반구조보다 더 크게 나타났다.

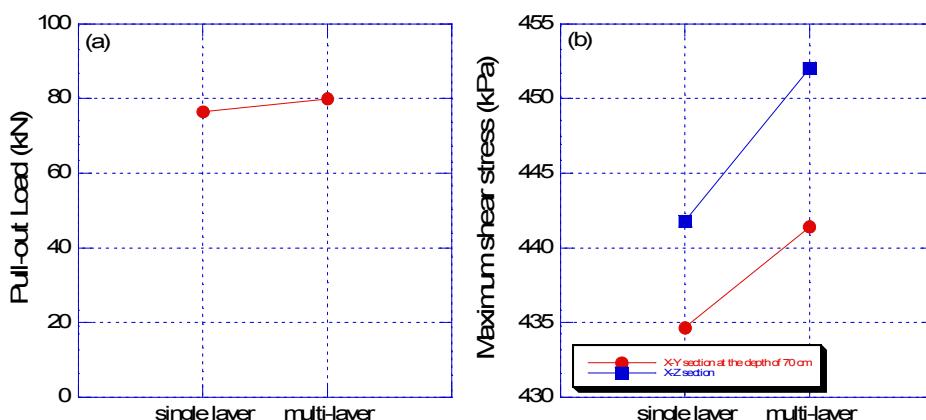


Figure 5-3. Result of (a) pull-out load and (b) maximum shear stress with multi-layer structure.

이상의 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각, 시추공 직경/에코스파이럴 볼트 폭 비, 단일층/다층 지반구조에 따른 인발시험에 의한 지반거동의 관계를 고려해 볼 때, 에코-스파이럴 볼트-그라우트-지반 간의 상호작용은 지반과 에코-스파이럴 볼트의 물리적 및 역학적 성질은 물론 에코-스파이럴 볼트의 형상, 지반의 구조, 그리고 에코-스파이럴 볼트-그라우트-지반 사이의 크기 비가 중요한 영향 인자로서 작용된다 할 수 있다. 따라서 에코-스파이럴 볼트가 지반의 지보재로서 역할을 하기 위해서는 이들 사이에 대한 관계가 충분히 고려되어야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구는 다양한 지반공학적 문제 중 지반강도를 증진시키기 위해 개발된 다목적 친환경 지보재인 에코-스파이럴 볼트의 지보특성을 수치해석적 방법으로 규명하는데 있다. 이를 위하여, 수치해석 도구인 유한차분법에 기초한 FLAC 3D를 이용하여 에코-스파이럴 볼트의 비틀림 각에 따른 지반거동, 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트의 폭 비에 따른 지반거동, 단일층과 다층 지반구조에 따른 지반거동의 차이점을 분석하였으며, 이들 결과를 종합하여 에코-스파이럴 볼트의 지보재로서의 지보특성을 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

에코-스파이럴 볼트 비틀림 각  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 에 따른 지반거동 결과에 의하면, 최대 변위 8 mm 지점에서 인발하중은 비틀림 각  $0^\circ=63.9$  kN,  $15^\circ=21.9$  kN,  $30^\circ=62.9$  kN,  $45^\circ=76.4$  kN,  $60^\circ=135.3$  kN로 각각 나타났다. 지반 내 70 cm에서의 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은  $0^\circ=564.36$  kPa,  $15^\circ=135.26$  kPa,  $30^\circ=511.49$  kPa,  $45^\circ=434.62$  kPa,  $60^\circ=411.69$  kPa, X-Z 단면에서는  $0^\circ=13.42$  kPa,  $15^\circ=150.35$  kPa,  $30^\circ=511.63$  kPa,  $45^\circ=441.79$  kPa,  $60^\circ=425.77$  kPa로 각각 나타났다. 에코-스파이럴볼트 비틀림 각에 따른 지반거동의 결과만을 고려할 때 에코-스파이럴 볼트 비틀림 각은  $30^\circ \sim 45^\circ$  사이가 가장 적당하다고 사료된다.

에코-스파이럴 볼트 비틀림 각  $45^\circ$ 에 대한 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트 폭 비( $D_{BH}/W_{ESB}$ ) 1.5, 2.0, 3.0에 따른 지반거동 결과에 의하면, 최대 변위 8 mm 지점에서 인발하중은  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 1.5=187.57 kN, 2.0=425.85 kN, 3.0=741.02 kN으로 각각 나타났다. 지반 내 70 cm에서의 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단응력은 1.5=1052.38 kPa, 2.0=2652.35 kPa, 3.0=4589.42 kPa, X-Z 단면에서는 1.5=953.67 kPa, 2.0=3016.76 kPa, 3.0=6667.32 kPa로 각각 나타났다. 결론적으로  $D_{BH}/W_{ESB}$ 가 증가할수록 인발하중과 에코-스파이럴 볼트와 그라우트 경계면에서의 최대전단응력도 증가하였으며, 최적의 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트 폭 비는 1.5로 판단된다. 이는 에코-스파이럴 볼트-그라우트-지반 사이의 물리적 및 역학적 성질 차이와  $D_{BH}/W_{ESB}$ 에 따른 구속압이 영향을 미치는 것으로 판단된다.

에코-스파이럴 볼트 비틀림 각  $45^\circ$ 에 대한 단일층/다층 지반구조에 따른 지반 거동 결과에 의하면, 최대 변위 8 mm 지점에서 다층 지반구조에서의 인발하중은 79.94 kN으로 나타났다. 지반 내 70 cm에서의 X-Y 단면의 에코-스파이럴 볼트와 그라우트의 최대전단용력은 441.40 kPa, X-Z 단면에서는 452.02 kPa로 나타났다. 결론적으로 에코-스파이럴 볼트의 지보효과는 단일층 지반구조에서 보다 다층구조에서 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

결론적으로 다목적 재보재로 개발된 친환경 에코-스파이럴 볼트의 최적 비틀림 각은  $30^\circ \sim 45^\circ$ 사이로 판단되며, 최적의 시추공 직경과 에코-스파이럴 볼트 폭비( $D_{BH}/W_{ESB}$ )는 시추공 중심으로부터 거리에 따른 지반 변위가 상대적으로 안정한 1.5로 판단된다. 또한 에코-스파이럴 볼트는 단일층보다는 다층 지반구조에서 더 큰 지보 특성을 나타낼 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 강성승, 히라타 아츠오, 오바라 유조, 2005, 새로운 지보재로 개발된 스파이럴바의 축방향 저항력 산정법, 대한토목학회논문집, 제25권, 제6호, 387-394.
- 강성승, 히라타 아츠오, 정승희, 이우람, 제동광, 김대현, 2010, 스파이럴 볼트 변형률계를 이용한 연약지반기초 및 암반사면 거동 계측, 터널과 지하공간, 제20권, 제2호, 105-111.
- 권현호, 남광수, 2013, 광해방지공학, 동화기술, 1-515.
- 김동조, 2009, 스파이럴 볼트와 록 볼트의 지보 메커니즘, 조선대학교 석사학위논문.
- 김장원, 강추원, 송하림, 2011, 인발시험을 통한 스파이럴 볼트의 지보특성, 대한화약발파공학회지, 제29권, 제1호, 10-16.
- 정승희, 2011, 스파이럴 볼트 변형률계를 이용한 지반구조물 거동 분석, 조선대학교 석사학위논문.
- 조영동, 송명규, 이청신, 강추원, 고진석, 강성승, 2009, 록 볼트 및 스파이럴 볼트의 지보특성, 터널과 지하공간, 제19권, 제3호, 181-189.
- 조영동, 강추원, 김재웅, 2010, Spiral bolt의 지보호과에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제20호, 제5호, 332-343.
- 천병식, 권형석, 1999, CGS에 의한 기초지반보강에 관한 연구, 철도저널, 제2권, 제4호, 58-68.
- 천병식, 여유현, 정영교, 2001, 저유동성 물탈주입에 의한 연약지반의 침하억제 효과, 한국지반공학회논문집, 제17권, 제6호, 53-67.
- 천병식, 장인규, 장인성, 고갑수, 고용일, 권형석, 김대영, 김병홍, 김승렬, 김원철, 김진춘, 남순성, 박두희, 박홍규, 가송명, 송치용, 신영완, 안상로, 안태봉, 여유현, 오민열, 유한규, 이승호, 이태윤, 임해식, 정현철, 조천환, 진명섭, 채휘영, 최춘식, 하광현, 황선근, 2010, 지반공학 이론과 실제, 구미서관, 1-1044.
- 천병식, 2011, 약액주입의 원리와 실제, 구미서관, 1-579.
- 최항길, 2007, 지반재해공학, 1-253.
- 한국암반공학회, 2005, 암반공학 수치해석, 165-209.
- 한국암반공학회, 2010, 암석표준시험법, 1-123.

- Benmokrane, B., Xu, H., Bellavance, E., 1996, Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts, Vol 33, No 5, 455–465.
- Cao C., Jan N., Ren T., Naj A., 2013, A study of rock bolting failure modes, International Journal of Mining Science and Technology, Vol 23, No 1, 79–88.
- Farmer, W., 1975, Stress distribution along a resin grouted rock anchor, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- Han, J. and Ye, S. I., 2001, Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundation, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 127, No 7, 597–603.
- He, L., An, X. M., Zhao, Z. Y., 2015, Fully grouted rock bolts: an analytical investigation, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol 48, No 3, 1181–1196.
- 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, No 5, 503–524.
- Hyett, A. J., Bawden, W. F., Macsporran, 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, No 1, 11–36.
- Hyett, A. J., Moosavi M., Bawden, W. F., 1996 Load distribution along fully grouted bolts, with emphasis on cable bolt reinforcement, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 20, No 7, 517–544.
- ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods, Editor E. T. Brown, The Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, 1–211.
- Itasca, 2009, FLAC 3D User's guide, Itasca Consulting Group Inc.,
- Kaiser, P. K., Yazaci, S., Nose, 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, No 3, 293–306.
- Kim, D. H., Park, K. H., Kim, D. W., 2014, Effects of ground conditions on microbial cementation in soils, Materials, Vol 7, 143–156.
- Li, C., Stillborg, B., 1999, Analytical models for rock bolts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 36, No 8, 1013–1029.
- Windsor, C. R., Rock reinforcement systems, 1997, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol 34, No 6, 919–951.
- Yazaci, S., Kaiser, P. K., 1992, Bond strength of grouted cable bolts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol 29, No 3, 279–292.
- Yoshikuni, H. and Nakanodo, H., 1974, Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, Soils and Foundation, Vol 15, No 1, 35–46.

## 감사의 글

대학원에 입학한지 어느덧 2년이 되었습니다. 그동안 저에게 많은 도움을 주신 분들께 짧은 글로나마 감사의 말씀을 드립니다.

먼저 지금까지 부족한 저를 이끌어주시고 인생에 있어 저의 멘토이신 강성승 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 부족한 저의 논문을 심사해주신 고진석 교수님과 최태진 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 또한 학부시절부터 지금까지 관심과 애정을 갖고 열정적으로 지도해주신 박영석 교수님, 강추원 교수님, 한오형 교수님, 박천영 교수님, 장일식 교수님, 박철현 교수님, 유돈상 교수님께도 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다. 그리고 전남대학교 양형식 교수님, 정소결 교수님께도 감사의 말씀 전해드리고 싶습니다.

그리고 에너지자원공학과를 다니며 맺었던 많은 인연들 우리 자원개발·암석역학 실험실 찬우형, 영호형, 태유형, 마루, 혜원이, 주호, 지현이, 건주, 민혜, 정원이와 많은 도움과 직언을 해준 강희형, 봉주형, 영경이형, 민규형, 준희형, 지완이형, 진영이형, 영진이형에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 뿐만 아니라 윤섭이, 현승이, 양수, 종혁이, 주환이, 동규, 현수, 대학이, 유미, 현정이, 명은지에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 제가 어떤 일이든 할 수 있다고 말해주고 할 수 있게 만들어주는 우리 아빠, 엄마, 누나, 동생에게 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

## 저작물 이용 허용서

학과	에너지자원공학과	학번	20147601	과정	석사
성명	한글 : 노 정 두 한문 : 盧 錚 斗 영문 : Jeongdu Noh				
주소	전라남도 목포시 용해동 동아아파트 8동 1305호				
연락처	E-MAIL : wjden1655@naver.com				
논문제목	한글 : 다목적 지보재인 친환경 스파이럴 볼트의 지보특성에 관한 연구 영어 : Support characteristics of Eco-Spiral Bolt (ESB) as multipurpose support member				

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

- 다 음 -

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

동의여부 : 동의(  ) 반대(  )

2016년 8월 일

저작자: 노 정 두 (인)

**조선대학교 총장 귀하**