

케이블을 이용한 사면안정 공법 적용성 평가

An Estimation on Application of Slope Stabilization Method Using PC Strand Cable

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 백승철²⁾, Seung-Cheol Baek, 유찬호³⁾, Chan-Ho Yoo, 장충길⁴⁾, Chung-Gil Jang, 민경남⁵⁾, Kyung-Nam Min

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hongik Univ.

²⁾ 안동대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Andong Univ.

³⁾ 케이이알 대표이사, President, KER Co., Ltd.

⁴⁾ 주영산업개발 사장, President, Jooyoung Industrial Development Co., Ltd.

⁵⁾ 세종이앤씨 대표이사, President, Sejong E&C Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this study, to evaluate the slope and tunnel stabilization method using pc cable with bulbed. To estimate the application of tunnel support using field tests and numerical analysis results. The reinforcement effects of slope stabilization method reinforced by PC cables were estimated compared with conventional soil nail system that reinforce the slope using rebar.

Key words : cable bolt, filed test, numerical analysis, slope stabilization, soil nail, tunnel support

1. 서론

산업화에 발맞추어 토목기술력의 향상으로 최근 사면안정화 공법은 락볼트 공법에서부터 어스앵커 공법에 이르기까지 다양한 기술들이 연구, 개발되어 적용되고 있다. 과거에는 안정성의 극대화가 기술의 주요 관점이었다면 근래에는 안정성뿐만 아니라 시공성, 경제성 측면에서도 적용성이 뛰어난 공법의 개발이 관점이라 할 수 있다. 특히, 과거에는 안정적인 재료의 수급이 가능하여 기존 재료를 대체할만한 새로운 재료의 개발 필요성을 느끼지 못했지만 근래에는 원자재 값의 상승으로 인해 공사비의 증가가 요구되고 있어 어느 때보다 원가절감이 요구되고 있는 실정이다.

사면보강용 재료는 강선과 이형철근을 이용하는 경우가 대부분이며, 쏘일네일 및 락볼트는 이형철근을 주로 보강재로 사용하고 있어 원자재 값의 상승에 더욱 민감할 수밖에 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 사면용 보강재로 사용하는 이형철근 대신에 앵커에서 널리 사용하고 있는 강선을 이용한 사면보강 공법을 제안하고자 한다.

강선을 이용하고 있는 보강공법은 이미 cable bolt라는 이름으로 널리 소개되어 왔지만, 국내에서의 사용실적은 극히 드문 실정이고, 국외에서도 광산 등과 같이 비교적 작은 단면의 지지를 위해 사용하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 외국에서 널리 사용되고 있는 케이블 볼트를 보다 구조적으로 안정하고 실용할 수 있도록 개발한 보강공법을 소개하고자 한다.

본 연구에서는 터널에서 사용되고 있는 락볼트 재료인 이형철근 대신에 PC강선을 이용하는 경우에 대하여 터널지보재로서의 적용성을 살펴보았으며, 표준지보패턴 1~5type의 경우에 대해서 이형철근 대신에 케이블을 이용하는 경우에 대하여 그 적용가능여부를 살펴보았다. 또한, 터널 지보재 외에도 쏘일

네일 보강공법으로서의 적용성을 알아보기 위하여 일반 쏘일네일을 사용하는 경우와 비교하여 사면보강 공법으로서의 적용성을 평가하였다.

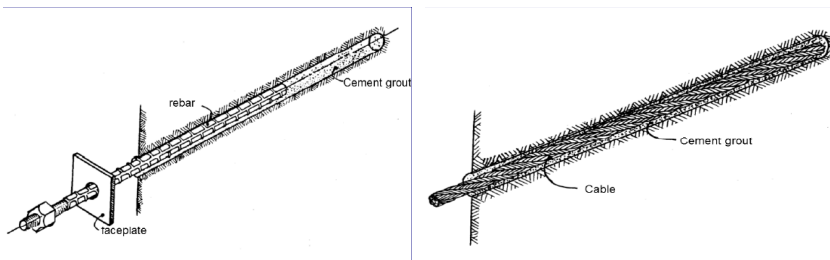
2. PC 케이블을 이용한 보강공법

2.1 개요

락볼트 및 쏘일네일 공법은 굴착 및 발파 등으로 인하여 연약해진 지반 또는 암반을 견고하고 안정된 지반에 고정시켜 지반의 보강 및 붕괴를 방지하는 공법으로 굴착 지반면의 안정을 위하여 삽입되는 볼트로서 지반을 일체화 시키는 목적으로 사용한다. PC 케이블을 이용한 보강공법 역시 동일한 목적을 가지고 있는 보강공법이라 할 수 있다.

2.2 공법의 특징

본 연구에서 소개한 케이블은 국외에서 사용되고 있는 공법을 더욱 효과적으로 개량한 공법으로 본 공법은 그림 1~그림 3에 나타난 바와 같이 보강재료로 케이블을 이용하는 것이 특징이다. 일반 공법과 동일하게 천공된 홀에 케이블을 설치, 그라우팅으로 홀을 채워 시공하게 된다. 보강재료인 케이블은 인발저항력의 극대화를 위해서 일정한 간격으로 bulb되어 있으며, 이러한 경우 인발하중이 작용시 보강재의 거동은 압축 거동과 전단거동을 받게 되어 저항하는 기구로 되어 있다. 인발하중이 작용하는 경우의 보강재의 거동은 그림 4에 나타내었다.



(a) 일반 락볼트 개요도 (b) PC 케이블 락볼트 개요도
그림 1. 공법 개요도



그림 2. 케이블 보강재 전경

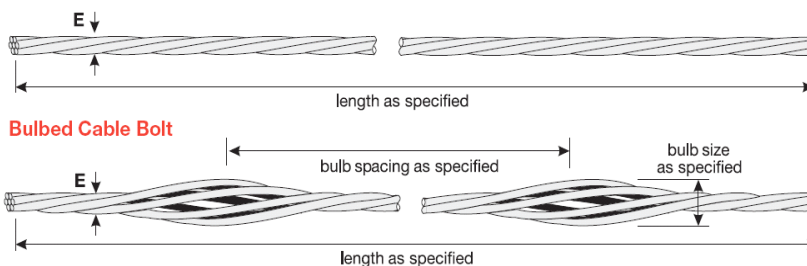


그림 3. 케이블의 구성

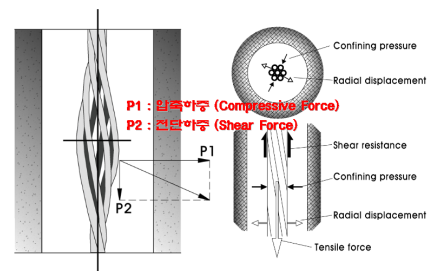


그림 4. 보강재 거동 원리

본 연구에서는 이와 같은 기본구성에 더욱 보강효과를 더욱 크게 하기 위하여 프리스트레스를 도입할 수 있는 방안을 고안하였다. 프리스트레스를 도입하는 경우에는 보강효과 뿐만 아니라 변위 억제에도 더욱 효과적으로 할 수 있을 것으로 예상되어, 본 연구에서는 보강재의 두부부분에 썰기형태의 정착체와 하중의 손실을 더욱 방지할 수 있는 정착체를 고안하였다. 본 연구에서 고안한 정착체의 모식도는 그림 5에 나타내었다.



그림 5 정착 단면도



그림 6 정착체 개요도

본 연구에서 소개한 케이블의 기계적, 물리적 성질을 알아보기 위하여 다양한 참고문헌을 분석하였으며, 일반적으로 사용하는 이형철근의 결과와 비교하여 표 1에 요약, 정리하여 나타내었다.

표 1. 과업구간 관정위치 및 제원

직경(mm)	재질	기계적 성질(MPa)			기계적 성질(kgf/cm ²)	
		항복강도	인장강도	연신율(%)	항복강도	인장강도
25이상	SD35이상	350이상	490이상	18이상	3,500이상	5,000이상

종류 및 직경 (mm) SWPC7B	KS규격	기계적 성질			
		항복강도 (kg)	인장강도 (kg)	연신율 (%)	Relaxation (%)
15.2	KS D 7002	22,600 이상	26,600 이상	3.5 이상	2.5 이하

구분	항복하중(ton/본)	인장하중(ton/본)
PS Strand Rock Bolt	22.6	26.6
Rock Bolt	17.7	25.3

표 1의 결과를 살펴보면, 본 연구에서 제안하고 있는 케이블의 항복하중은 22.6ton으로 25mm 이형철근을 이용하는 경우의 항복하중 17.7ton에 비해 약 27%의 항복하중이 큰 것으로 나타나 설계하중 자체는 25mm 이형철근에 비해 더욱 효과적인 것으로 분석되었다.

3. 현장인발시험

3.1 개요

본 연구에서는 제안한 케이블을 이용한 보강공법의 적용성을 평가하고자 임의의 터널 현장에서 인발시험을 수행하였다. 현장시험이 수행된 현장은 도로개설 터널현장으로 NATM이 적용되고 있는 병설터널 현장이다. 현장시험에서 천공은 45mm로 수행하였으며, 4m의 케이블을 이용하였다. 총 3개소에서 현장시험을 수행하였으며, 몰탈을 이용한 충전방법으로 2일간 양생한 이후에 현장시험을 수행하였다.

3.2 현장인발시험 전경

현장인발시험은 이형철근을 이용하는 보편적인 락볼트 방법과 동일하게 천공, 충전, 보강재 삽입, 양생의 순서로 시공한 이후에 수행하였으며, 인발하중이 작용하는 동안의 두부변위를 평가하는 것으로 하였다. 현장인발시험의 전경은 그림 7에 나타내었다.



(a) 충전 및 보강재 설치

(b) 인발시험장치 연결

(c) 인발시험

그림 7. 케이블 보강재 인발시험 전경

3.3 현장인발시험 결과

현장인발시험은 이형철근을 이용하는 보편적인 락볼트 방법과 동일하게 천공, 충전, 보강재 삽입, 양생의 순으로 수행하였으며, 총 3개소에서 22단계의 하중증가 단계에 따른 두부의 변위를 평가하는 방법으로 진행하였다. 단계별로 1ton의 하중씩 증가시켜 총 22ton의 하중이 작용하는 동안의 두부의 변위를 평가하였다. 현장인발시험결과는 표 2에 요약, 정리하여 나타내었다.

표 2. 현장인발시험 결과

인발력(ton)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
변위량(mm)	0.00	0.21	0.34	0.64	0.93	1.25	1.61	1.83	2.10	2.50
인발력(ton)	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22
변위량(mm)	2.80	3.10	3.50	4.10	4.32	4.51	4.73	5.33	6.06	6.99

표 2의 현장인발시험 결과를 살펴보면, 케이블은 22 ton의 하중이 작용하는 동안 두부의 변위가 6.99mm 정도로 평가되어 충분한 보강재로서의 능력을 발휘하는 것으로 평가되었다.

4. 수치해석

4.1 개요

본 연구에서는 제안한 케이블을 이용하여 사면 및 터널의 보강재로서의 적용가능성을 평가하고자 유한차분 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 사면보강공법에 보편적으로 적용되는 쏘일네일과 락볼트를 대상으로 수행하였으며, 이형철근 대신에 케이블을 적용하는 경우의 지반과 보강재의 거동을 중점적으로 평가하였다.

4.2 사면보강재 적용성 평가

수치해석은 임의의 사면을 대상으로 수행하였으며, 동일한 대표 단면에 일반 쏘일네일과 본 연구에서 제안하는 케이블을 이용하는 경우의 수평변위, 안전율 및 변위벡터 분포 등을 중점적으로 검토하였다. 케이블을 이용하는 경우에는 본 연구에서 제안한 바와 같이 프리스트레스 도입이 가능한 정착부를 이용하는 것으로 가정하여 프리스트레스를 도입함으로써 실제 케이블을 이용하는 경우의 거동을 최대한 모사하고자 하였다.

수치해석에 적용된 사면 및 무보강시의 안전율은 그림 8에 나타내었으며, 무보강시의 안전율이 1.28로 기준안전율인 1.5에 미치지 못하는 상태를 대상으로 하였다.

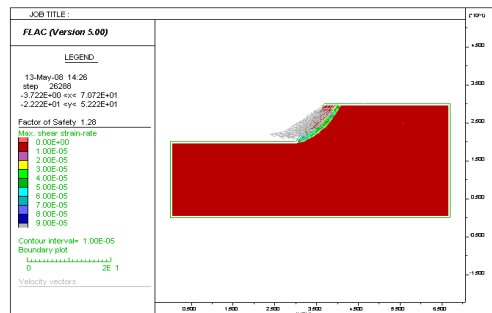


그림 8. 수치해석에 적용된 대표단면

일반 쏘일네일과 케이블을 이용하는 경우의 수치해석 결과는 각각 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 그림 9의 결과를 살펴보면, 일반 쏘일네일의 경우 보강시 15cm 정도의 수평변위가 발생하며, 안전율은 1.83 정도 증가하는 것으로 평가되어 사면의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다. 케이블을 이용하는 경우의 수치해석결과인 그림 10의 결과를 살펴보면, 케이블을 보강재로 사용하고, 각각의 보강재에 10ton의 프리스트레스를 적용하게 되면, 사면의 발생변위는 6cm 정도로 크게 감소하며, 안전율도 1.89로 증가하여 프리스트레스가 가능한 케이블을 보강하게 되면 변위억제효과뿐만 아니라 안전율의 증가도 가능한 것으로 평가되어 케이블을 이용한 사면보강공법은 어느 정도 가능성이 확인되었다.

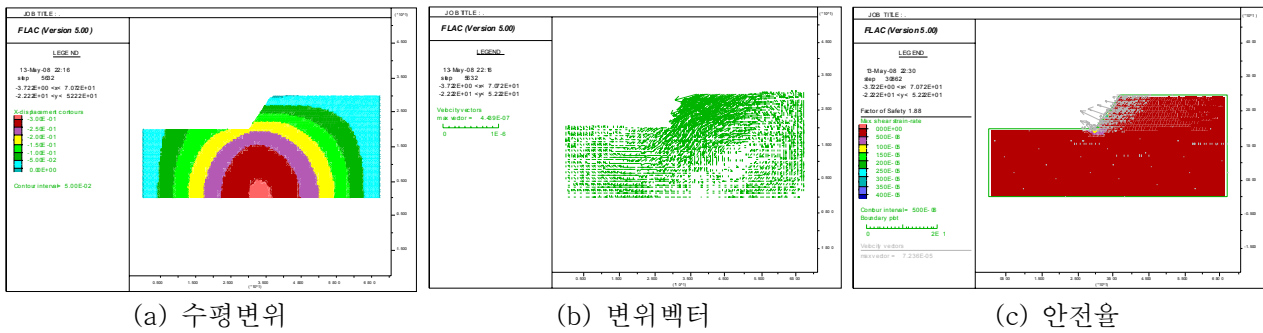


그림 9. 일반 쏘일네일 수치해석 결과

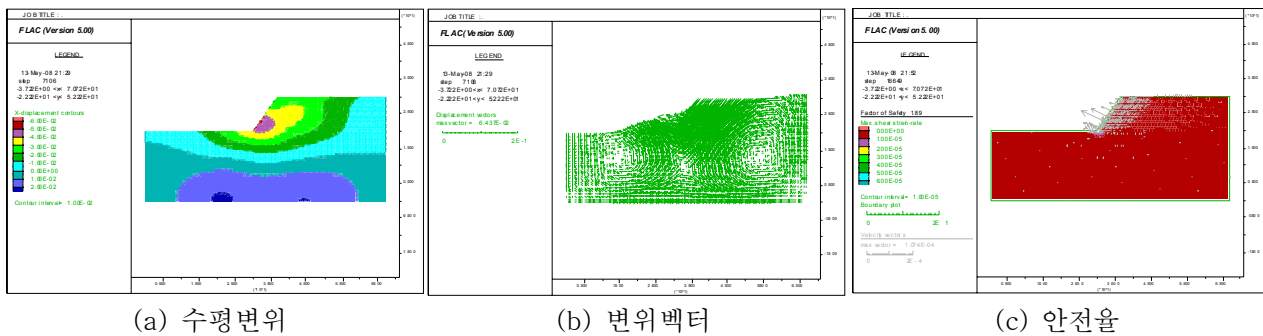


그림 10. 케이블 쏘일네일 수치해석 결과

4.3 터널지보재 적용성 평가

케이블의 락볼트 적용 가능여부를 평가하기 위하여 본 연구에서는 쏘일네일과 동일하게 터널지보재에 사용되는 락볼트에 케이블을 이용하는 경우에 대해 그 적용 가능여부를 수치해석기법을 이용하여 평가하였다. 사면과 동일하게 임의 터널단면을 이용하여 보강재인 이형철근 대신에 케이블을 이용하는 방법으로 적용 가능여부를 확인하였다.

해석단면은 일반적인 터널 지보패턴중 TYPE-3을 이용하였으며, 지보패턴간의 일률적인 조건에서 비교, 검토를 수행하기 위하여 토피고는 약 30m로 가정하고, 상재하중은 일정하게 적용하였다. 아울러 다양한 분석을 통한 적용성 평가를 위해 축압계수를 0.5, 1.0 및

해석에 적용된 지보패턴 3과 표준도면은 각각 표 3 및 그림 11에 나타내었으며, 해석에 이용된 격자요소망은 그림 12에 나타내었다.

표 3. Type-3의 지보패턴

구 분		TYPE-3
굴 착 방 법		전단면굴착
굴 진 장(m)		2.0
강섬유보강 슛크리트 두께(cm)		8.0
PS Strand Rock Bolt	길 이(m)	4.0
	횡간격(m)	1.5
	종간격(m)	2.0

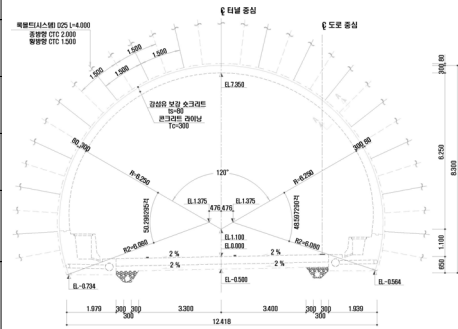


그림 11. 터널 해석단면

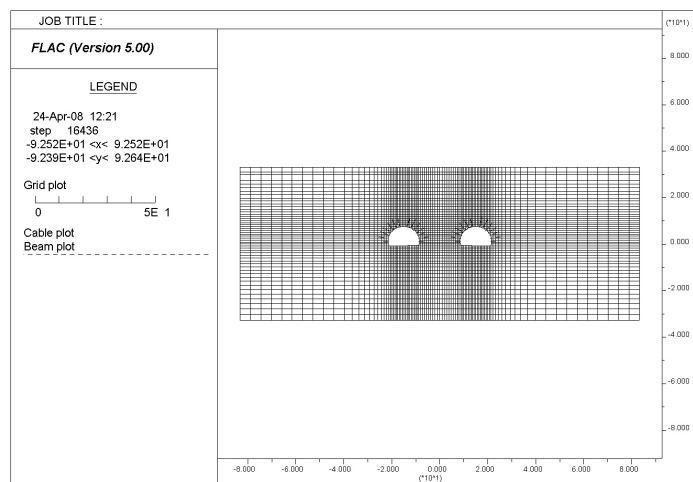
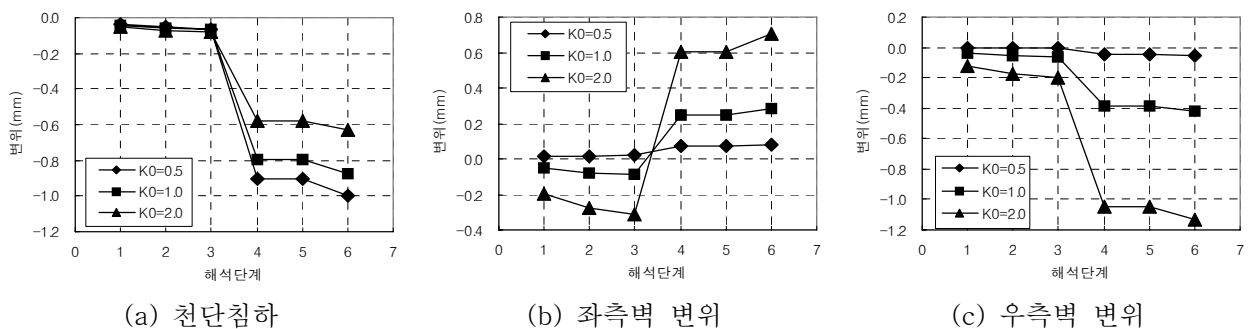


그림 12. 터널 해석에 이용된 격자요소망

수치해석을 통해 분석된 일반 락볼트 공법과 케이블을 이용한 락볼트 공법의 터널굴착단계에 따른 단계별 변위 및 보강재의 거동은 그림 13 ~ 그림 15에 나타내었다



(a) 천단침하

(b) 좌측벽 변위

(c) 우측벽 변위

그림 13. 케이블 볼트 수치해석결과

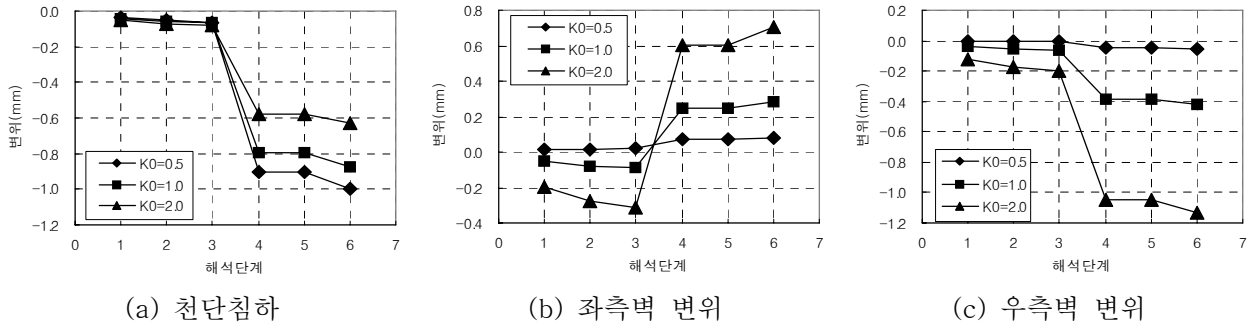


그림 14. 이형철근 락볼트 수치해석결과

수치해석결과 이형철근과 케이블을 이용하는 두 가지 조건에서 모두 최대 천단부 변위량은 0.997mm로 나타났다. 아울러 내공변위량은 Ko = 2.0일 때 하반에서 좌측 1.124mm(→), 우측 1.136mm(←)으로 나타났다. 케이블과 이형철근을 이용하는 경우 모두, 변위량은 극히 작은 것으로 평가되어 두 공법 모두 터널의 지보공법으로 적용이 가능한 것으로 평가되었다.

그림 15의 결과를 살펴보면, 케이블의 최대 인장 축력은 터널의 하단부 0.208 tonf, 일반 Rock Bolt의 최대 인장 축력은 최대 0.557 tonf으로 나타났다. 이는 터널에 사용되는 일반적인 록볼트의 허용 인발 축력 8.6 tonf 이내로 나타나 지보재의 안정성 역시 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

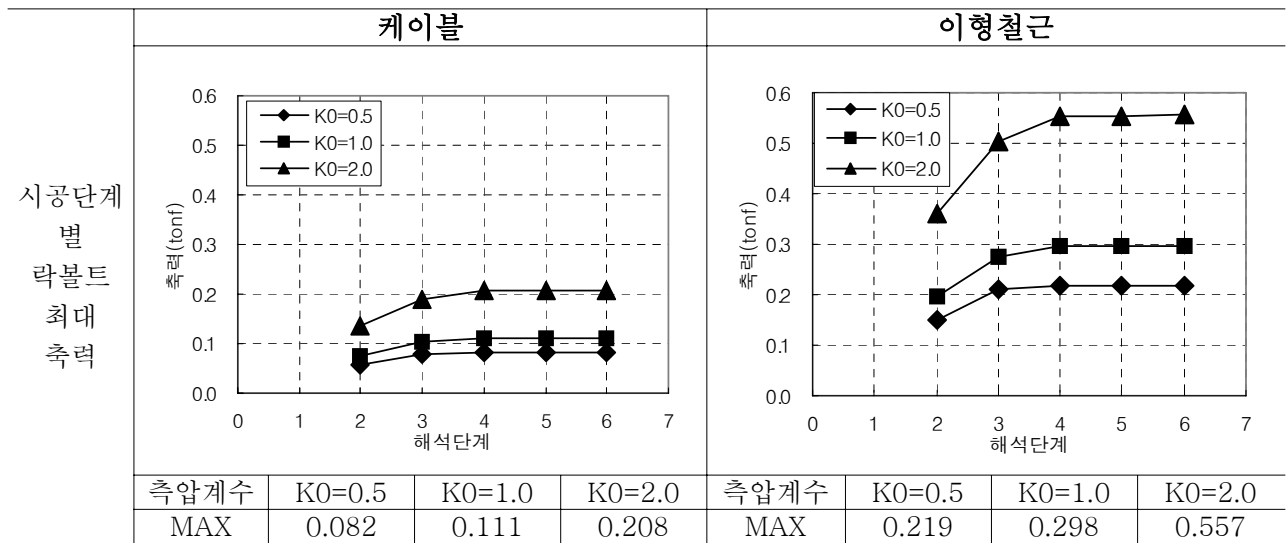


그림 15. 보강재의 축력변화 수치해석결과

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 외국에서 널리 사용되고 있는 케이블 볼트를 보다 구조적으로 안정하고 실용할 수 있도록 개발한 보강공법을 소개하고 터널지보재로서의 적용성과 쏘일네일로의 사용가능 여부를 평가하였으며 각각의 거동을 현장시험과 수치해석으로 검토하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 케이블의 항복하중은 22.6ton으로 25mm 이형철근을 이용하는 경우의 항복하중 17.7ton에 비해 약 27%의 항복하중이 큰 것으로 나타나 설계하중 자체는 25mm 이형철근에 비해 더욱 효과적인 것으로 분석되었으며, 현장인발시험 결과, 케이블은 22 ton의 인발하중이 작용하는 동안 두부의 변위가

6.99mm 정도로 평가되어 충분한 보강재로서의 능력을 발휘하는 것으로 평가되었다.

- (2) 일반 쏘일네일의 경우 보강시 15cm 정도의 수평변위가 발생하며, 안전율은 1.83정도 증가하는 것으로 평가되었으며, 케이블을 보강재로 사용하고, 각각의 보강재에 10ton의 프리스트레스를 적용하게 되면, 사면의 발생변위는 6cm 정도로 크게 감소하며, 안전율도 1.89로 증가하여 프리스트레스가 가능한 케이블을 보강하게 되면 변위억제효과뿐만 아니라 안전율의 증가도 가능한 것으로 평가되어 케이블을 이용한 사면보강공법은 어느 정도 가능성이 확인되었다.
- (3) 수치해석결과 이형철근과 케이블은 터널 굴착시 모두 최대 천단부 변위량이 0.997mm로 나타났다. 아울러 내공변위량은 $K_0 = 2.0$ 일 때 하반에서 좌측 1.124mm(→), 우측 1.136mm(←)으로 나타났다. 케이블과 이형철근을 이용하는 경우 모두, 변위량은 극히 작은 것으로 평가되어 두 공법 모두 터널의 지보공법으로 적용이 가능한 것으로 평가되었다.
- (4) 본 연구에서는 케이블의 실용성을 보다 높이고자 사면안정공법으로의 적용가능성을 현장시험, 수치해석 등을 통해 알아보았다. 그러나 본 연구에서 수행된 결과는 아직 제한적인 단계이며 재료의 특성 등 검토할 분야 역시 많아 추후 세분화된 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. David, B., 2004, *Coal mine roadway support system handbook*, RESEARCH REPORT 229a, Rock Mechanics Technology Ltd, Bretby Business Park, UK
2. Hutchinson, D.J. and Diederichs, M.S. 1996. *Cablebolting in underground mines*. Vancouver: Bitech
3. Hyett, A.J., Bawden, W.F. and Coulson, A.L. 1992. *Physical and mechanical properties of normal Portland cement pertaining to fully grouted cable bolts*. In Rock support in mining and underground construction, proc. int. symp. rock support, Sudbury, (eds. P.K. Kaiser and D.R. McCreath), 341-348. Rotterdam:Balkema.
4. Kaiser, P.K., Yazici, S. and Nosé, J. 1992. *Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables*. Int. J. Rock Mech.. Min. Sci. Geomech. Abstr. 29(3), 293-306.
5. Scott, J.J. 1976. *Friction rock stabilizers - a new rock reinforcement method*. In Monograph on rock mechanics applications in mining, (eds W.S. Brown, S.J. Green and W.A. Hustrulid), 242-249. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
6. Scott, J.J. 1983. *Friction rock stabilizer impact upon anchor design and ground control practices*. In *Rock bolting: theory and application in underground construction*, (ed. O. Stephansson), 407-418. Rotterdam: Balkema.
7. Stillborg, B. 1994. *Professional users handbook for rock bolting, 2nd edn. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications*. Windsor, C.R. 1992. *Cable bolting for underground and surface excavations*. In *Rock support in mining and underground construction, proc. int. symp. on rock support, Sudbury*, (eds P.K. Kaiser and D.R. McCreath), 349-376. Rotterdam: Balkema.
8. Yazici, S. and Kaiser, P.K. 1992. *Bond strength of grouted cable bolts*. Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29(3), 279-292.