

광섬유 센서와 지중경사계를 이용한 사면의 거동 분석

Analysis of Slope Behavior Using FBG Sensor and Inclinometer

장 기 태^{*1} Chang, Ki-Tae

한 희 수^{*2} Han, Heui-Soo

유 병 선^{*3} Yoo, Byung-Sun

Abstract

Several sensor systems are used to estimate the reinforcing effect of stabilizing pile in slopes, and to find a failure surface in slopes effectively. FBG(Fiber Bragg Grating) sensor, V/W(Vibrating Wire) sensor and inclinometer have shown a great potentiality to serve real time health monitoring of the reinforcing structures. Field tests and test results have shown great solutions for sensor systems of Smart Structures. The purpose of this research is to seek for the relationships among the slope movement and the reinforcing effect of stabilizing pile, and the strain distribution of stabilizing pile in a active zone by analyzing the data from the in-situ measurement so that the possible failure surface should be well defined based on the relationships. The field test results have shown that the data by FBG sensor are well coincided with those of V/W sensor and inclinometer, and the reinforcing effect of the stabilizing pile is good enough.

요 지

사면 내에 설치된 억지말뚝의 보강효과를 평가하고, 사면의 가상 파괴면을 예측하기 위하여 지속적인 계측관리를 통한 사면의 거동을 감지할 필요가 있다. 본 연구는 계측기를 통한 계측자료가 사면과 억지말뚝의 안정성 및 보강효과를 평가할 수 있는 자료로 활용될 수 있도록 하기 위한 것으로, 현장에 설치된 억지말뚝에 광섬유 센서(FBG 센서), V/W 및 경사계를 설치하여, 사면 내 억지말뚝의 거동분석을 하였다. 또한 각 계측기의 데이터를 비교 분석함으로써, 광섬유 센서와 같은 스마트 계측기술을 실제 토목 구조물에 활용할 수 있는 방안을 현장시험을 통해 검증하고자 한다. 이를 위해 각 계측기에서 구하여진, 연구 대상사면의 거동과 억지말뚝의 보강효과 및 변형률 분포의 상관관계를 비교분석하였다. 그 결과, FBG 센서와 V/W 센서 및 경사계의 계측결과가 잘 일치하며, 억지말뚝에 의한 사면의 보강효과가 충분함을 알 수 있었다.

Keywords : Failure surface, FBG sensor, Inclinometer, Slope stability, Strain distribution, Vibrating wire

1. 서 론

사면의 안정을 해석하고 이를 설계시공에 반영하기 위해서는 다양한 사면 불안정 요인들을 정량적·공학적으로 분석하여야 하며, 위험하다고 판단되는 사면에 대

해서는 적절한 대책을 강구함과 동시에 지속적인 계측관리를 통하여 사면의 거동을 감지할 필요가 있다.

본 연구는 무선 계측 모니터링 시스템과 광섬유 센서의 계측을 통하여, 계측자료가 사면과 억지말뚝의 안정성, 경제성을 평가할 수 있는 자료로 활용될 수 있

*1 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh Uni. of Tech., ktchang@kumoh.ac.kr)

*2 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh Uni. of Tech.)

*3 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh Uni. of Tech.)

도록 하기 위한 것으로, 경부고속도로 구미~동대구간 8차로 확장공사 제4공구 연화재사면, 신동재사면 내 역지말쪽에 광섬유센서를 적용하여 보았다.

또한 여기서 획득한 계측치를 비교 분석함으로써 역지말쪽의 거동해석 및 광섬유 센서와 같은 스마트 계측 기술을 실제 토목 구조물에 활용할 수 있는 방안을 실제 현장시험을 통해 검증함을 목적으로 하고 있다.

2. 계측시스템

기존의 계측 방법과는 달리 구조물의 상태를 사용 중에 실시간으로 감지하여 그 이상 유무에 따라 적절하게 대처할 수 있는 기능이 구조물 자체에 내장된 구조물을 일컬어 스마트 구조물(smart structure)이라한다. 스마트 구조물의 감지계로 사용되는 광섬유 센서는 유리의 주성분인 실리카(SiO₂)로 구성되어 있어 전자기파의 영향을 받지 않고, 작동 온도 범위가 매우 넓으며, 광섬유의 직경(250 μ m)이 매우 작고 유연하여 설계자가 원하는 크기의 센서를 쉽게 구성할 수 있으며 높은 해상도와 다량의 정보 수송 능력이 있는 등 많은 장점과 잠재적 가능성을 가지고 있다(그림 1). 현재 통신망이 점차 광섬유

로 대체되어 가는 상황이므로, 광섬유 센서를 실제 구조물에 적용 시 여러 다른 외부 구조물과의 연계 측면에서 통합된 안전진단과 관련된 사회기반구조물을 다른 센서에 비해 용이하게 구축할 수 있다.

본 연구의 계측에 사용된, 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating sensor, FBG sensor) 시스템은 변형율과 온도 등의 변화를 반사 파장의 변이 측정을 통해 간단히 측정할 수 있고, 통신망에 이용되던 파장분할 다중화(Wavelength-Division Multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 동시에 다점 측정 기술을 쉽게 구현할 수 있다. 또한, 변형의 절대량 측정이 가능하고, 출력신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광강도의 변화에 무관하여 시스템 구성이 용이하며, 출력신호가 변형에 대하여 선형적이며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도 특성이 우수하다는 장점이 있다.

그림 2는 광원과 광스펙트럼 분석기(OSA)를 이용하여 광섬유 한줄에 여러 파장대의 센서를 동시에 감지하는 FBG의 원리를 보여준다. 그림 3은 광섬유 계측시스템의 관리 및 data 해석을 위한 중앙 통제실이며, 그림 4는 광섬유 계측용 컴퓨터의 monitoring screen을 보여준다.

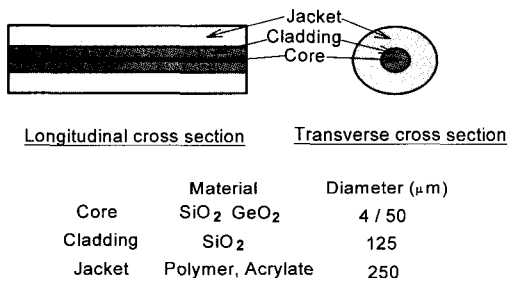


그림 1. 광섬유의 구조



그림 3. 광섬유 계측시스템의 중앙 통제실

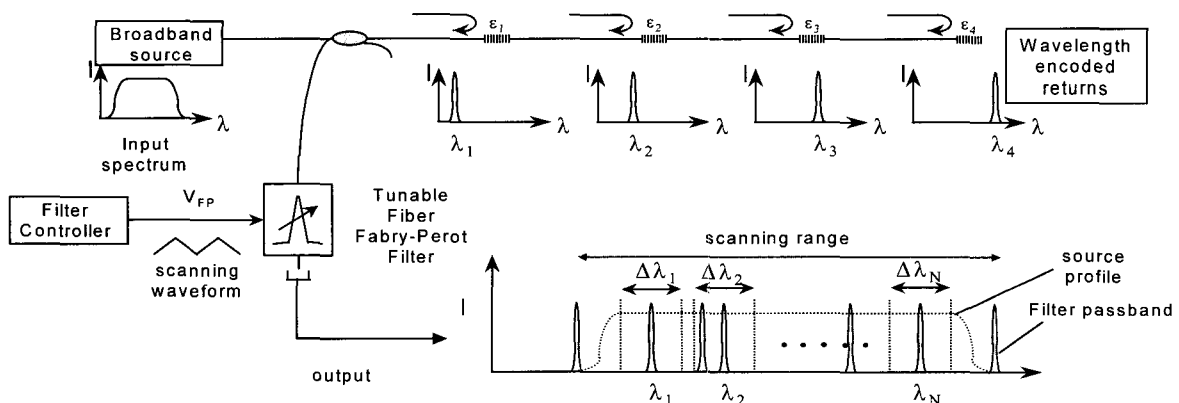


그림 2. 광섬유 센서의 Multiplexing

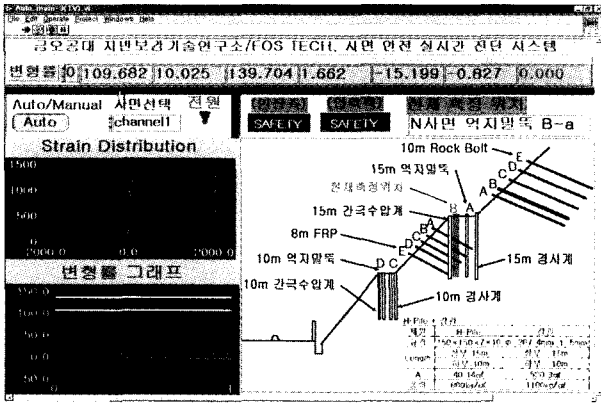


그림 4. 광섬유 계측용 컴퓨터 Monitoring Screen

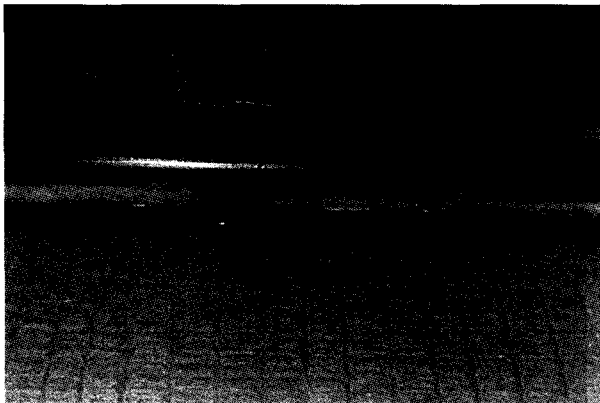


그림 5. 광섬유와 V/W가 설치된 역지말뚝

역지말뚝에 걸리는 응력의 증감량을 광섬유 센서와 비교하기 위하여, 본 연구에 사용된 V/W는 진동현식 (Model GK-4000) 타입으로 측정범위는 $\pm 1500\mu\epsilon$ 까지 측정 가능하고 측정 정밀도는 $0.1\mu\epsilon$ 이며, 사용온도 범위는 $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ 로서 stainless 재질로 되어 있다.

지반의 수평변위 및 위치와 방향에 대한 자료 수집을 통해 사면의 거동을 파악하기 위하여 경사계를 설치하였다. 대상사면에 설치된 진동현식 경사계는 센서 자체가 가진 고정밀성과 정확도 외에 수·방식 및 충격 흡수 구조로 설계되었고, 열팽창 계수를 보정하기 위하여 온도 저항 센서가 내장되어있다(장기태, 2001).

그림 5는 역지말뚝으로 사용될 H-Pile에 광섬유 센서와 V/W가 동시에 설치된 모습이다.

3. 현장개요

본 연구 대상사면은 이웃한 연화재 및 신동재 사면으로, 경부고속도로 서울기점 부산방향으로 약 280km 지점에 위치한 대절토 사면이다.



그림 6. 연화재 사면

연화재 사면은 암반의 풍화가 불규칙하게 발생되어 강우 시 파괴가 발생할 가능성이 있는 지층으로 판단된다. 또한, 사면 전반에 걸쳐 사암과 역암이 우세하게 발달되어 있으며, 부분적으로 이암과 셰일이 혼재하여 전체적으로 균열 및 절리가 발달되어 있고, 역암층내에서는 흑색 셰일이 분포하며 균열면에 점토 충전물이 내재되어 있다(그림 6).

신동재 사면은 소규모 단층대를 포함한 퇴적암층으로 사암과 역암 및 부분적으로 이암과 셰일이 분포하고 있으며, 약한 셰일층사이의 층경계를 따라 지하수가 비치고 있다. 지층을 경계로 지하수가 확산되면서 지하수 침투범위내에서 풍화가 심하게 나타나며 절리면을 따라서 gouge가 충전되어 부분적으로 불안정한 요소로 작용하고 있다.

4. 광섬유 센서의 설치

4.1 광섬유 센서의 부착

본 연구계측에서는 광섬유 센서를 각각의 역지말뚝에 부착 시 각기 다른 여러 가지 방법을 사용하였다. 역지말뚝에 광섬유를 부착하기 위하여 사용된 epoxy로는 모두 3종류가 있으며, 센서의 부착 방법 역시 센싱 부분 부착과 센싱 되지 않은 부분 부착 및 복합체를 사용하여 부착



그림 7. 광섬유 부착 과정

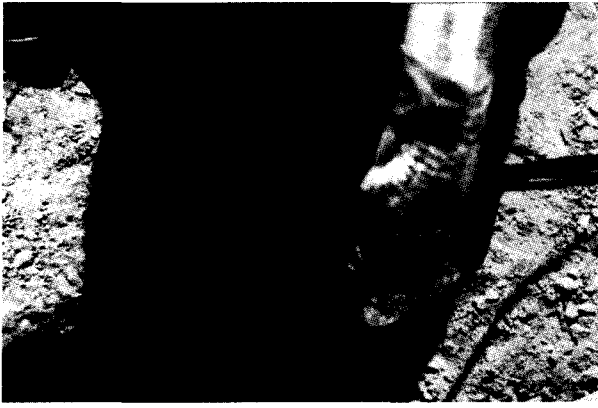


그림 8. 광섬유와 V/W 설치 후 몰타르 타설

하는 방법, 그리고 부재에 홈을 새기는 방법 등 다양하게 부착하였다. 광섬유 센서 및 V/W는 H-Pile의 내면에 설치하였고(그림 7), 계측기가 설치 완료된 H-Pile은 기 설치된 강관 내부에 삽입한 후 몰타르를 타설하였다(그림 8).

4.2 연화재 억지말뚝의 광섬유 센서

연화재 사면 1소단의 억지말뚝 C, D에는 V/W(진동식 변형률계)만 삽입을 했고, 2소단 억지말뚝 A, B에 V/W가 부착된 플랜지의 반대방향에 광섬유 센서를 설

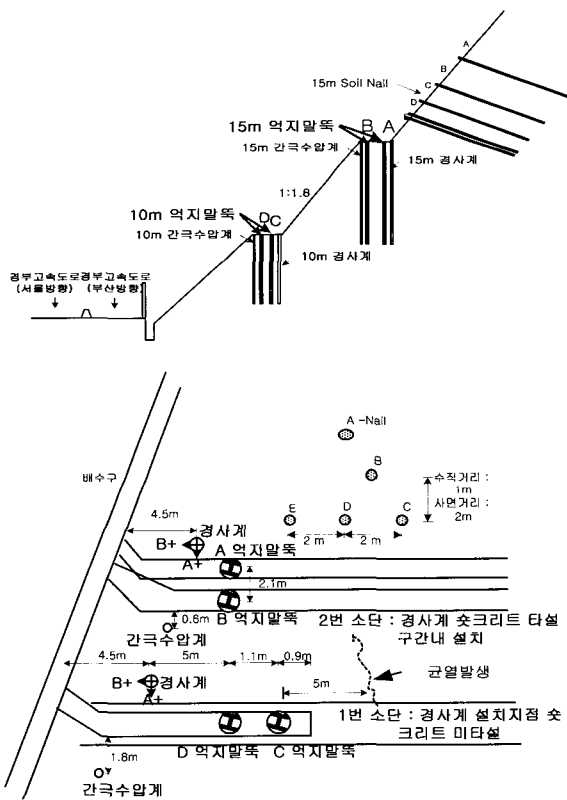


그림 9. 연화재사면 보강재 및 계측기 설치도

치하였다(강창국, 2000).

억지말뚝 A에는 그라인더로 2mm의 홈을 새긴후 Epoxy1으로 센싱 부분에 부착한 다음 광섬유의 절단을 방지하기 위해 실리콘으로 도포하였고, 억지말뚝 B는 플랜지 표면에 억지말뚝 A에서 사용된 똑같은 Epoxy1으로 센싱 부분에 부착한 다음 실리콘으로 도포하였다

그림 9에서 연화재 사면의 보강재 및 계측기의 정확한 설치 위치를 알 수 있으며, B사면내 네 개의 H-Pile에 광섬유센서 및 V/W를 설치하였다. 그중 A, B Pile은 길이가 15m이며, C, D pile은 10m이다. 각 센서는 2m의 등간격으로 배치하였다(그림 10~11).

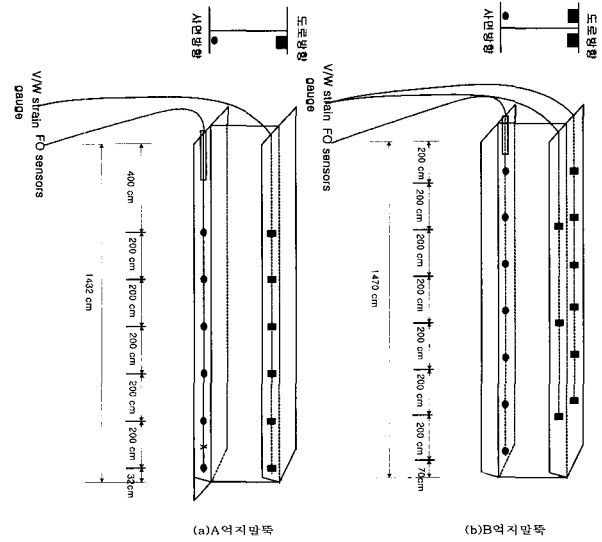


그림 10. 연화재사면 A, B 억지말뚝(15m)

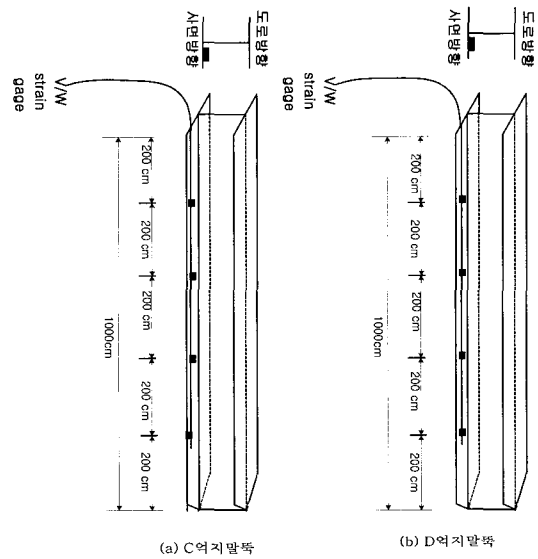


그림 11. 연화재 사면 C, D 억지말뚝(10m)

4.3 신동재 사면 억지말뚝의 광섬유 센서

신동재사면의 경우에도, 제 1소단에 C, D의 억지말뚝 C, D에는 V/W(진동식 변형률계)만을 각각 4개씩 부착하여 삽입을 하였으며, 2소단 억지말뚝 A, B에는 V/W가 부착된 플랜지의 반대방향에 광섬유센서를 각각 6개의 파장대로 나누어 설치하였고, B억지말뚝에 또 다른 광섬유센서 6개를 도로방향의 플랜지에 한 세트 더 설치를 하였다(그림 13~14).

A, B억지말뚝 모두 복합체속에 광섬유를 깔고 Epoxy2를 사용하여 부착하였고 광섬유의 보호를 위해 실리콘으로 도포하였다. B억지말뚝에 도로방향 플랜지 표면에 2mm의 홈을 파고 Epoxy3으로 센싱 주위에 부착한 다음 실리콘으로 도포하였다.

그림 12에서 신동재 사면의 보강재 및 계측기의 정확한 설치 위치를 알 수 있으며, 신동재 사면내 네 개의 H-Pile에 광섬유센서 및 V/W가 설치되었다. 그중 A, B pile은 길이가 15m이며, C, D pile은 10m이다. 각 센서는 2m의 등간격으로 배치되었다(그림 13~14).

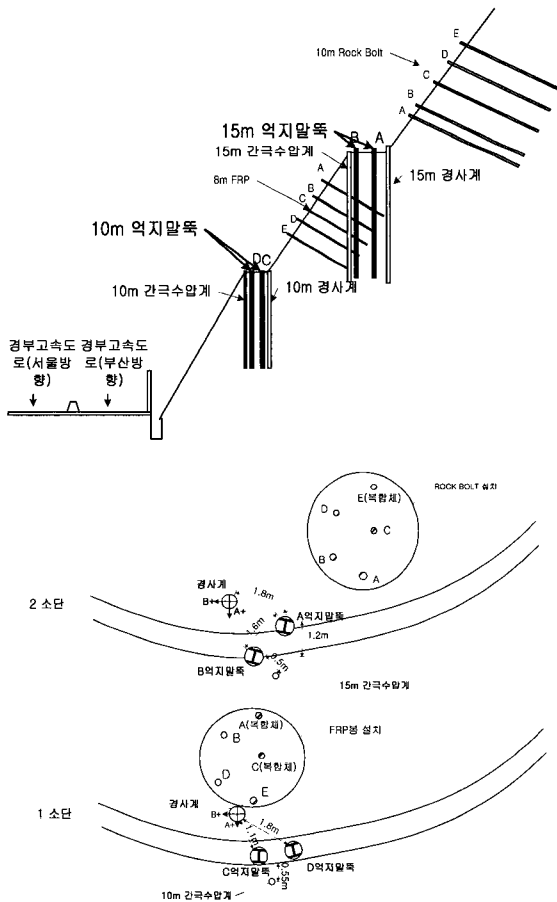


그림 12. 신동재 사면 보강재 및 계측기 설치도

5. 계측결과

5.1 V/W에 의한 광섬유 센서의 보정

그림 15는 연화재 사면에 설치된 억지말뚝 변형률의 계측결과를 보여주며, 동일한 억지말뚝의 10m 지점에 같이 설치된 V/W gauge와 FBG sensor의 온도 보정 전후의 계측결과이다.

그림 15(a)에서 보듯이, FBG sensor의 온도 계측결과와 V/W gauge의 온도 계측결과가 거의 일치하며, 또한, 그림 15(b)는 두 계측기의 변형률 계측결과가 거의 일치함을 보여준다. 이는 FBG sensor의 계측결과가 상당히 신뢰성이 있음을 증명한다.

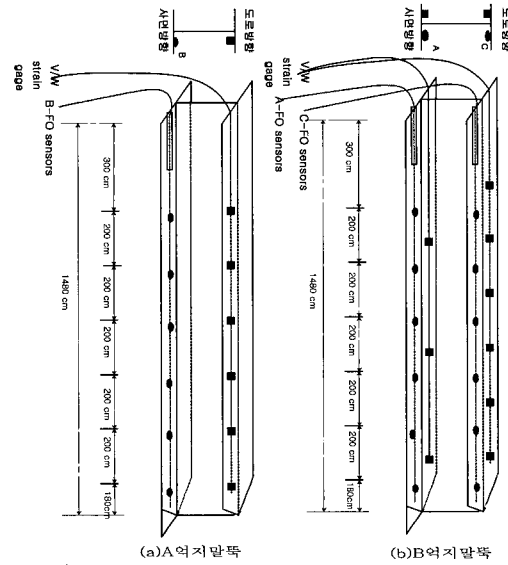


그림 13. 신동재사면 A, B억지말뚝(15m)

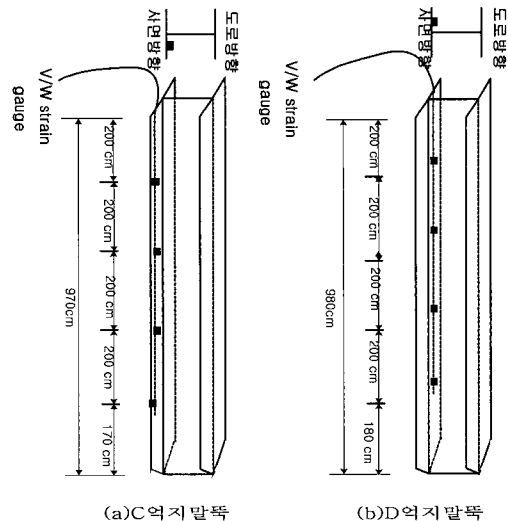
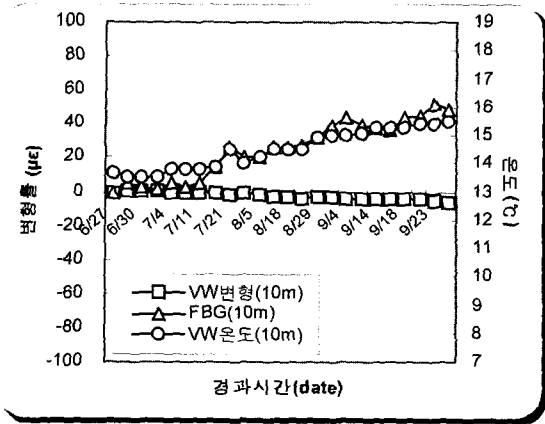
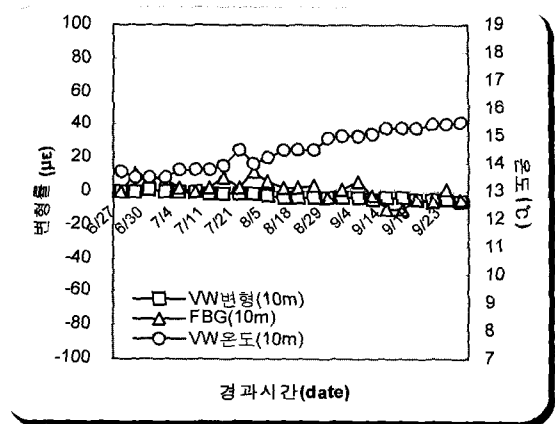


그림 14. 신동재사면 C, D억지말뚝(10m)



(a) 온도보정 전



(b) 온도보정 후

그림 15. V/W와 FBG의 비교(10m)

5.2 연화재사면

5.2.1 연화재사면 역지말뚝의 응력 계측결과

그림 16은 연화재사면 2소단 15m 역지말뚝에 발생된 응력을 나타낸 것이다. 그림 16의 가로축은 역지말뚝의 응력을, 세로축은 역지말뚝의 심도를 나타낸 것이다. 말뚝의 응력이 nail의 응력이나 경사계의 변위에 비해 작게 측정되는 것은 역지말뚝의 두부가 철근콘크리트 지중보로 연결되어 그 사이 지반의 변형이 억제되어 나타나는 결과인 것으로 생각된다. 응력분포를 보고 활동면을 추정해 보면 지반심도 8m 근처에서 발생되는 것으로 보인다.

전반적으로 6월 이전에 응력변화가 크다는 것을 알

수 있고 5월말 도로가 개통된 후부터는 점차 안정돼 가는 것을 볼 수 있다. 7월말, 8월말의 집중 호우때와 9월 태풍이 한차례 지나가면서 많은 강우량을 보였지만 강우량과 지하수위의 영향에 크게 민감하지 않았으며 소폭의 응력 증가만 나타나고 있다.

그림 17은 연화재사면 1소단 10m 역지말뚝 D에 발생된 응력을 측정한 결과를 나타낸 것으로 말뚝상부에서 점차적으로 응력 증가를 보이고 있다. 이것은 당시 강우로 인하여 말뚝으로부터 5m 전방의 법면 shotcrete에 균열이 크게 발생된 것으로 보아 이로 인한 토괴의 이동 때문인것으로 사료된다.

현재, 응력은 소폭 회복된 상태이며 여름철이 지나고 나서 더 이상의 응력증가가 없고 안정되고 있음을 알

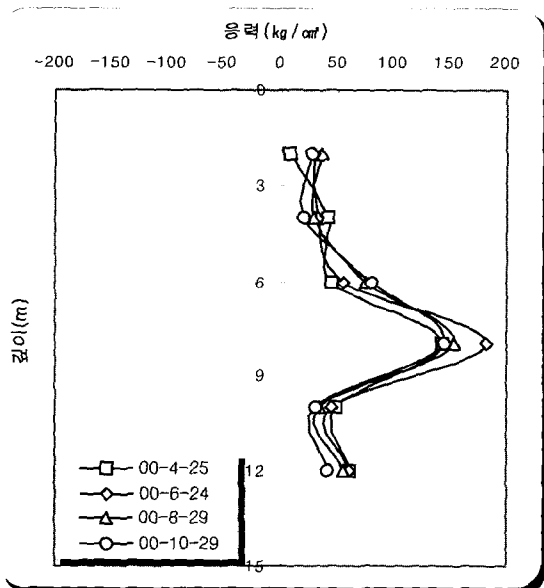


그림 16. 연화재 사면 2소단 B말뚝의 응력변화

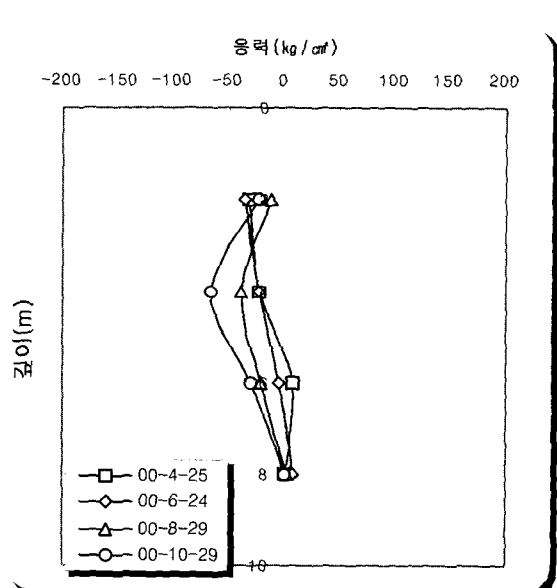


그림 17. 연화재 사면 1소단 D말뚝의 응력변화

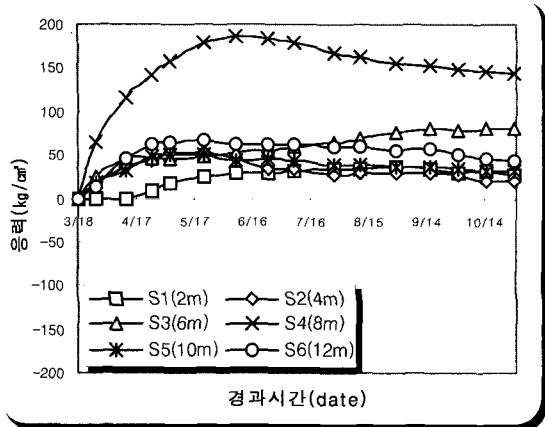


그림 18. 연화재 사면 2소단 B말뚝의 응력경시 변화

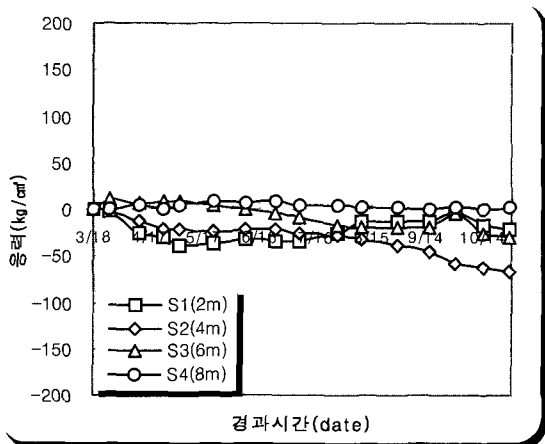


그림 19. 연화재사면 1소단 D말뚝의 응력경시 변화

수 있다.

그림 18~19는 시간경과에 따른 응력 분포를 나타내고 있다. 그림 18의 가로축은 억지말뚝을 설치하고 초기 치후의 경과시간을 나타낸 것이고 세로축에는 응력을 나타내고 있다.

5.2.2 연화재사면 경사계의 계측결과

지표면과 근접할수록 nail이나 rock bolt에 비해 응력이 크지 않다는 것은 억지말뚝이 파괴면 상부의 토사 이동에 의하여 측방토압을 받고 있고 억지말뚝이 이에 저항하고 있으며 억지말뚝 두부에 철근 콘크리트 지중보가 설치되어 있어 이부분에서는 지반변형이 어느 정도 억제되어 있기 때문인 것으로 생각된다.

본 연구에서는 대상사면에 접근이 어려운 점과 경제성 등 여러 가지 여건을 고려하여 자동 경사계 시스템을 사용하였다. 센서가 고가이고 경제성 등의 제약으로 인하여 설치수량이 적게 설치되었고, 센서 사이의 간격이

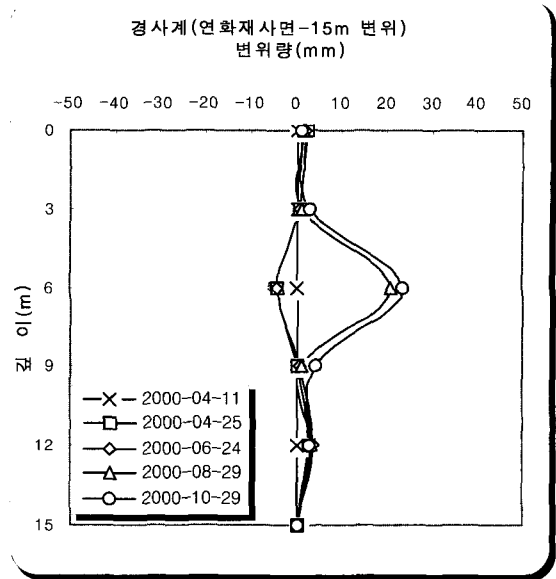


그림 20. 연화재사면 2소단 15m 경사계 수평변위

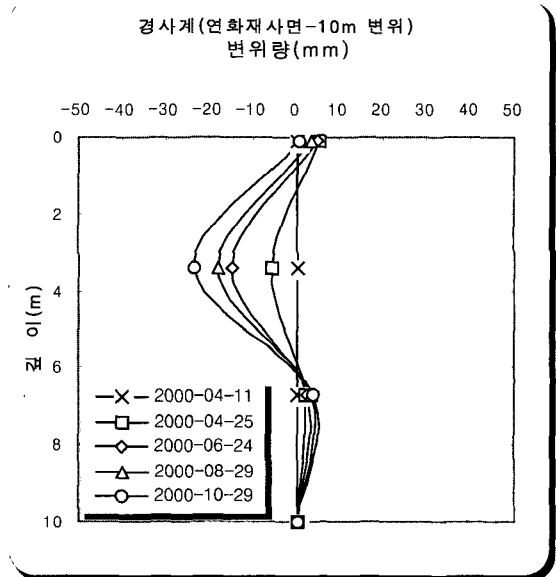


그림 21. 연화재사면 1소단 10m 경사계 수평변위

커서 센서지점의 변위는 정확히 측정되나 각 센서간 간격은 측정하는데 애로사항이 많았다.

수동 측정에 비해서 정확도 측면에서 조금 떨어지며, 하루에 10만대 이상 차량 통행이 많은 경부고속도로 사면인 점을 고려하면 수동 경사계 시스템을 구축하는 것이 더 좋은 신뢰성있는 데이터를 얻을 수 있지 않았나 사료되고, 차량 통행에 따른 진동에 의해서 측정오차가 어느 정도 생기는 경향을 보였다.

그림 20~21은 연화재사면 2소단 15m, 1소단 10m 경사계의 변위 분포를 나타낸 것이다. 가로축은 변위량, 세로축은 경사계의 깊이를 나타내었다. 2소단 15m 경사

계는 6m 근처에서, 1소단 10m 경사계는 3m 근처에서 급작스런 변위증가를 보이는데 이것은 7월말에 200mm 가 넘는 집중호우로 인한 토괴의 이동 때문인 것으로 사료된다.

현재는 변위의 증가가 더 이상 없으며 경사계 상부에서의 변위량이 작은 이유는 억지말뚝의 두부가 철근 콘크리트 지중보로 되어 있어 그 사이 지반의 변형이 억제되어 나타나는 결과라 할 수 있다. 연화재사면 2소단에 위치한 경사계는 B말뚝의 약 2m 상부에 위치한다(그림 9). 2소단의 B말뚝이 거동과 경사계의 거동을 비교하면, B말뚝은 8m 근처에서 최대응력점이 나타나며(그림 16), 약 2m 상부의 경사계는 지중 6m 근처에서 최대 변이를 보이고 있다(그림 20). 또한 1소단에 위치한 경사계는 D말뚝의 약 3m 상부에 위치한다(그림 9). 1소단의 D말뚝은 지중 약 4m에서 최대응력점이 나타나며(그림 17), 경사계는 약 3.5m에서 최대변이를 보이고 있다.

이 점들을 연결하면 깊은 파괴거동을 보이는 연화재 사면의 가상파괴면의 크기 및 거동을 추정할 수 있다. 또한 억지말뚝을 비롯한 사면보강재의 위치가 적절함을 알 수 있다.

5.3 신동재 사면

5.3.1 신동재사면 억지말뚝의 응력

그림 22~25은 신동재사면 억지말뚝의 응력 분포를 나타내고 있다. 신동재 사면은 연화재 사면에 비해서 암반의 풍화가 심하고 절리면이 더 발달되어 전단에 의한 파괴가 나타날 것으로 보여 진다. 2소단 A말뚝인 경우는 뚜렷하게 S자 형태의 응력분포를 보이고 있는 점으로 미루어 활동면이 절리면을 따라 8m 부분에서 일어난다고 추정할 수 있었다(그림 22). 심도 7m와 9m 부분의 센서는 9월 중순의 태풍에 의한 집중호우가 내리기까지는 응력이 점차적으로 소폭 증가현상을 보이다가 현재는 변화가 거의 없고 일정한 값에 수렴되어 가는 것으로 보아 이동토괴의 측방토압에 억지말뚝이 이에 저항하고 있으며 억지말뚝의 사면안정효과 상당히 있음을 보여주고 있다.

또한 2소단 B말뚝의 광섬유 센서와 V/W는 각각 반대의 각각 반대의 플랜지에 설치 됐음에도 불구하고 응력은 거의 같게 나타나고 있다. 이는 사면의 법면으로부터 도로방향으로의 토괴의 이동보다 전체적으로 절리방향

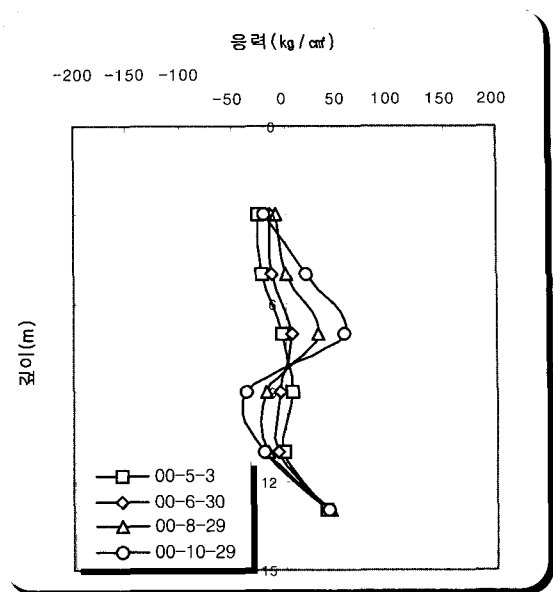


그림 22. 신동재사면 2소단 A말뚝의 응력변화

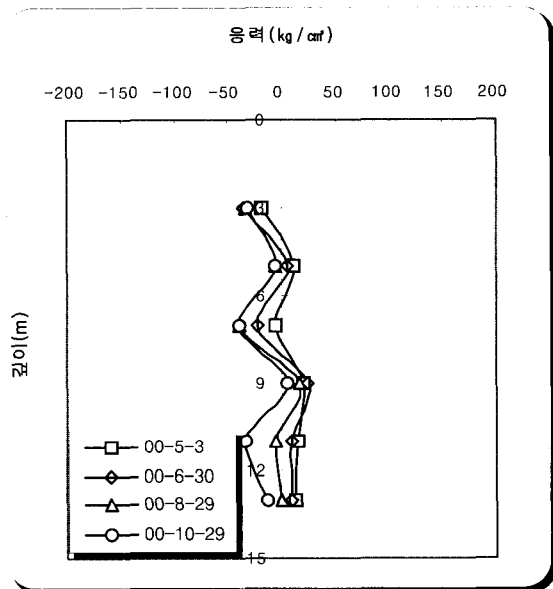


그림 23. 신동재사면 2소단 B말뚝의 응력변화

의 토괴의 이동이 우세해서 중립축의 방향이 H말뚝의 Web와 일치하게 되어 응력 값이 거의 같게 측정되는 것으로 보여 진다.

신동재 사면의 A, B 억지말뚝은 8월 말의 집중호우와 9월 중순의 태풍에 의한 집중호우 이후로는 응력의 변화가 없이 안정되고 있다. 8월말까지는 점차적으로 토괴가 이동하면서 억지말뚝의 응력과 경사계의 변위도 점차 증가하고 있으나 9월 이후로는 억지말뚝의 억지효과로 인하여 응력과 변위가 모두 일정한 값으로 수렴하며 안정되어 있다.

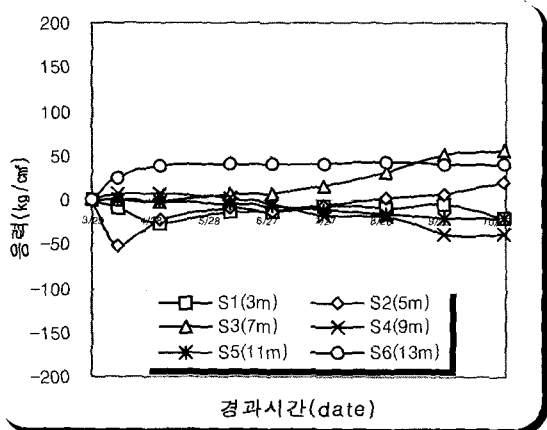


그림 24. 신동재사면 2소단 A말쪽의 응력경시 변화

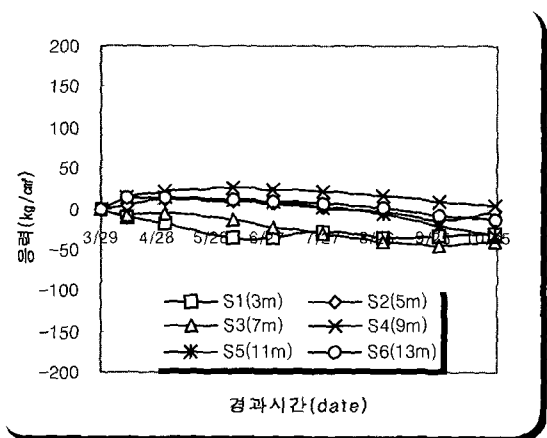


그림 25. 신동재사면 2소단 B말쪽의 응력경시 변화

5.3.2 신동재사면 경사계의 수평변위

그림 26~27는 신동재사면 경사계의 변위 분포를 나타내고 있다. 2소단 15m 경사계의 변위는 A, B말쪽처럼 크게 나타나고 있지는 않으나 심도 12m위치에서 계속 변위가 증가되는 것을 볼 수 있다.

이것은 경사계 케이싱 주위에 그라우팅의 불량으로 인해서 생긴 공동 때문인 것으로 보여진다. 실제로 그라우팅의 양을 많이 사용했는데도 케이싱 주위의 흙이 그라우팅의 양에 비해서 잘 채워지지 않았던 현상이다. 신동재 사면은 연화재사면 보다 풍화가 더 진행되어 내부적으로 공동이 많이 발견되고 있으며 시멘트밀크 주입 공법으로 보강을 많이 행하였다. 그 외의 경사계의 변형이 작은 이유는 경사계 배면에 억지말뚝이 복열로 설치되어 있어서 억지효과를 발휘하고 있고 억지말뚝의 두부도 철근콘크리트 지중보로 서로 연결되어 있기 때문에 변형이 억제된 것으로 보여진다.

1소단 10m경사계인 경우는 9월까지는 점차적으로

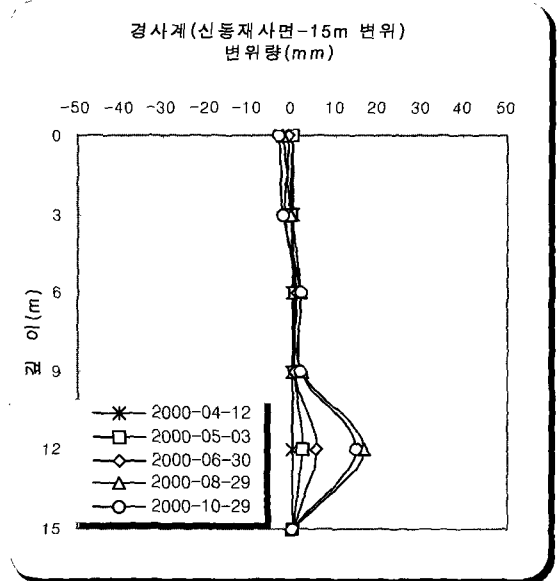


그림 26. 신동재사면 2소단 15m 경사계 수평변위

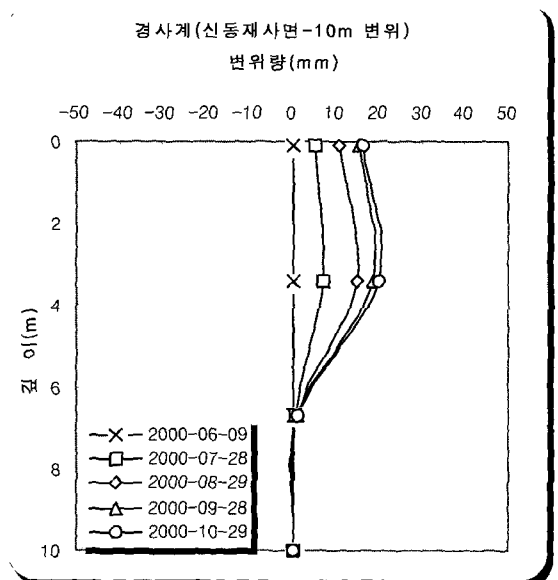


그림 27. 신동재사면 1소단 10m 경사계 수평변위

변위가 증가하다가 현재는 더 이상 변위의 증가가 없으며 일정하게 수렴하고 있다. 변위 분포로 봐서 활동면은 절리면을 따라 6m위치에서 발생하는 것으로 보여지며, 지표면의 변위가 심도 3m에서의 변위량보다 작은 이유도 억지말뚝의 두부가 철근 콘크리트 지중보로 연결되어 있기 때문이다.

연화재 사면의 경우와 같이, 신동재 사면의 광섬유 센서, V/W 및 경사계의 계측값을 연결하면 신동재사면의 가상파괴면의 크기 및 거동을 추정할 수 있다.

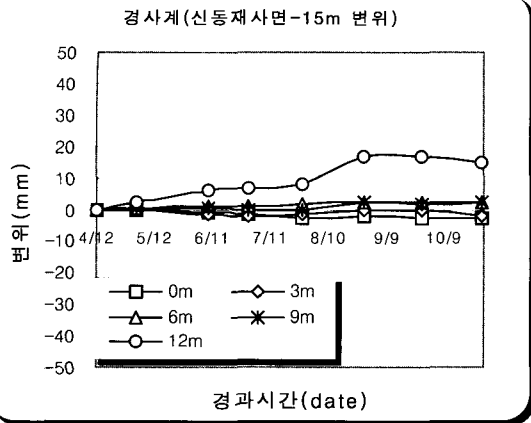


그림 28. 신동재사면 2소단 15m 경사계의 경시변화

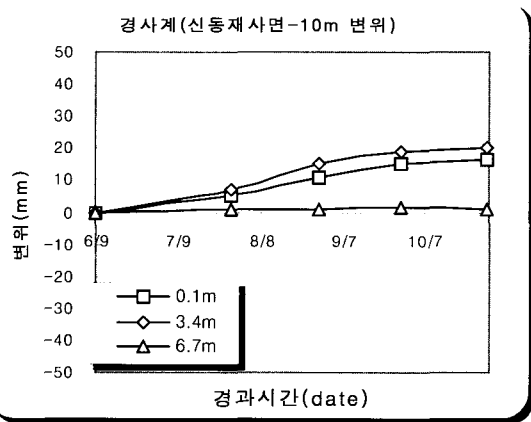


그림 29. 신동재사면 1소단 10m 경사계의 경시변화

6. 결론

경부고속도로 현장 사면의 억지말뚝에 설치된 광섬유 계측기, V/W 및 경사계를 통해 얻은 계측자료를 이

용해 사면과 억지말뚝의 안정성을 평가하고 동일 심도에 설치된 억지말뚝 설계의 타당성을 검토하였다. 또한 광섬유 센서와 V/W의 계측자료와 많은 시험을 통해서 광섬유 센서의 특성을 많이 확인할 수 있었다. 억지말뚝과 여러 공법으로 병행하여 보강된 대절개 사면에 대한 연구결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 장기적인 계측에 의한 연구 대상 사면 내 억지말뚝의 거동 및 보강 효과를 분석한 결과, 억지말뚝에 작용하는 응력의 분포는 절개사면 공사초기 즉 계측기가 설치된 시점부터 단 기간 증가하는 경향을 보인 후 계속 일정한 값을 유지하고 있다. 이것으로 사면 내에 복열로 설치된 말뚝들이 토압을 잘 받아주고 있다는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 억지말뚝에 설치된 광섬유 계측기, V/W 및 경사계를 이용하여 사면의 활동면을 추정 할 수 있었다.
- (3) 장기간에 걸친 연구 대상 사면 내 억지말뚝의 거동을 해석한 결과, 광섬유 계측기에 의한 계측 결과와 V/W 및 경사계의 계측결과가 거의 일치하였으며, 광섬유 계측시스템은 현장 적용성이 뛰어나며, 정밀한 계측결과를 필요로 하는 토목구조물에 매우 유용한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 장기태, 강창국, 홍성진, 정경선, 김성환, 박권제, 이원효, 김경태 (2001), 광섬유계측 센서를 활용한 사면거동 실시간 안전 진단 시스템, 한국지반공학회 사면안정기술위원회 학술발표회, pp.59-79.
2. 강창국(2000), 현장계측을 통한 억지말뚝 분석에 관한 연구, 석사학위논문, 금오공과대학교, pp.15-31.

(접수일자 2003. 11. 21, 심사완료일 2003. 12. 19)