

## 지표변위 감지 센서를 활용한 사면 안전감지 시스템

### Tension Wire Sensor of shallow failure detection for the real time slop stabilization

장기태<sup>1)</sup>, Ki-Tae Chang, 윤기재<sup>2)</sup>, Ki-Jae Yun, 정성윤<sup>3)</sup>, Sung-Yun Jung, 유병선<sup>4)</sup>, Byung-Sun Yoo,  
김경태<sup>4)</sup>, Kyung-Tae Kim, 이원효<sup>6)</sup>, Won-Hyo Lee

<sup>1)</sup> 금오공과 대학교 토목공학과 부 교수, Associate Professor, Kum-Oh National University(KNUT)

<sup>2)</sup> (주) G.M.G 과장, Section Chief, Geo-technical Monitoring Group Ltd.

<sup>3)</sup> (주) G.M.G 과장, Section Chief, Geo-technical Monitoring Group Ltd.

<sup>4)</sup> (주) G.M.G 과장, Section Chief, Geo-technical Monitoring Group Ltd.

<sup>5)</sup> (주) G.M.G 과장, Section Chief, Geo-technical Monitoring Group Ltd.

<sup>6)</sup> (주) 오름엔지니어링, Section Chief, Orum Engineering Ltd.

**개요(SYNOPSIS)** : Early detection of premonitory symptom of slope movement ensures tremendous saving of lives and repair costs from catastrophic disaster. Therefore, it is essential to constantly monitor the performance and integrity of both reinforced and un-reinforced cut slopes. We developed a novel monitoring system by using tension wire sensors. It's advantages are highly sensitivity, simple installation, large displacement measurement, durability of system, capability of remote sensing. Real-time measurement of slope surface movement is shown graphically and it gives a warning when the monitored value exceeds a given threshold level so that any sign of abnormal slope movement can be easily perceived.

**주요어(Key Words)** : 사면 붕괴예지, 실시간 모니터링 시스템, Tension Wire, 엔코더,

## 1. 개요

보강재인 Nailing 이나 Rockbolt, 억지말뚝 등을 적용한 사면 보강 구조물의 시공 중·후, 지속적인 안전 유지관리를 위해서는 정기적인 점검 및 안전진단 이외에도 구조응답 Monitoring을 통한 상시 안전 감시 및 진단이 요구되어 왔다. 이러한 시대적, 기술적 요구에 의하여 많은 토목 현장에서 계측센서를 적용, 보강 사면의 안정·자립화에 노력하고 있다. 그러나 일반적으로 사용되는 부착형 센서는 보강재와 함께 지중에 매설되어 보강재에 전달되는 지중응력의 측정을 통해 사면의 안정을 검토하는 것으로 사면 파괴의 전조 감지와 사면내의 국부적인 얇은 파괴의 감지가 불가능 하다. 이와같은 실상으로 사면붕괴의 전조인 인장균열 및 지표변위 감지를 목적으로 Tension Wire Sensor 시스템을 개발하여 기존의 센서와 함께 운용함으로써 사면활동의 원격 감시와 동시에 측정, 해석, 도화까지 자동적으로 처리하고 사

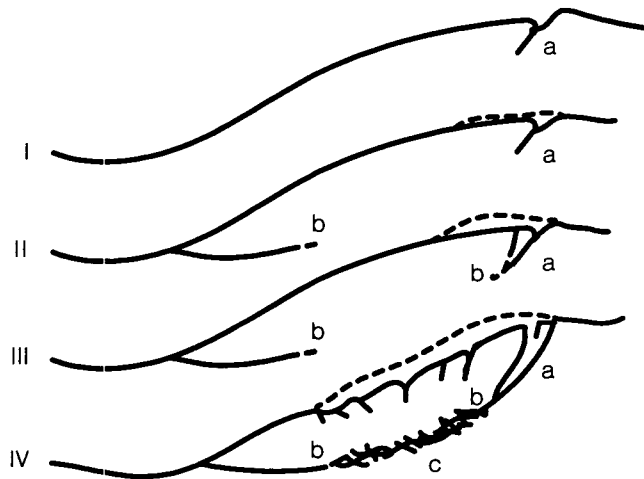
면붕괴의 발생조짐을 현장에서 조기에 예측함으로써 재해의 경감, 공사의 안전시공에 큰 효과를 기대할 수 있는 자동관측·감시 시스템이다.

## 2. Tension Wire Sensor 연구 배경

### 2.1 사면 파괴 메카니즘

산사태는 오랜 기간 이동이 없었던 사면이 강우, 융설, 지진, 인위적 행위 혹은 무엇인가 명확치않은 원인에 의해 사면이 아래쪽으로 이동하고 지표면에는 균열, 융기, 함몰 등의 변상이 생겨 활락하는 현상을 총칭한다. 또한 산사태는 지질, 지형, 지하수 등의 여러 조건이 합쳐져 발생하지만 그 과정을 보면, 돌발적인 붕괴는 매우 적고, 많은 경우에 있어 장기간에 걸친 사면의 변형 후 발생한다. 그림 1은 사면의 파괴 기구를 간략히 나타낸 것으로 I ~ IV의 과정으로 사면의 변형은 진행된다. 그림의 I 단계는 지중의 사면내에 붕괴대(creep zone)가 형성되어 국부적인 파괴가 생기고, 잔재 활동면에 따라 소성부가 형성 지표면에는 인장 균열이 발생한다. 더욱이 소성부 주변의 파괴가 점진적으로 진행됨에 따라 소성영역은 확대되고, 사면의 변형은 II ~ IV 단계로 진행된다.

사면의 중간부의 체적감소를 나타내는 파괴대에서는 점진적으로 활동면을 형성한다. 사면내의 활동면이 되는 연약면 즉 단층, 층리부, 구활동면 등이 존재할 경우에는 부차적 활동면을 지닌 파괴대(c)는 형성되지 않고 연약면을 따라 변형한다.



a:인장균열, b:활동면, c:전단면

그림 1. 사면 파괴 기구(Feda, 1973)

또한 활동면은 생성기구상 그림 2와 같이 수동역, 잠재역, 주동역의 3영역으로 구분되고, 수동역(선단 융기부), 주동역(활락 또는 단차부)의 양지역으로 볼때는 어느점을 중심으로 한 원의 일부가 되지 않는 경우가 있기 때문에 조사에 의해 확인하는 것이 중요하다.

그림은 활동면의 3영역으로 구분한 것이다.

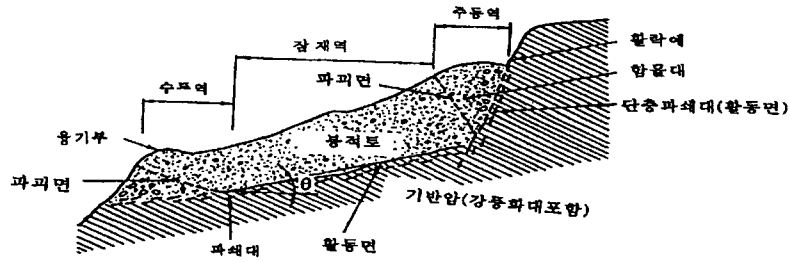


그림 2. 활동면의 3영역

## 2.2 네일링 및 억지말뚝의 파괴 메카니즘

적극적인 사면보강 공법중 안전율 증가공법으로 일반적으로 적용되는 공법은 억지말뚝, Soiling 공법등이다. 두공법은 설계 및 파괴이론이 상이하며 현재 사면계측에서 활용되는 부착형 진동현식 변형률 게이지로는 측정이 불가능 파괴형태를 가지고 있다.(표 1. 참조)

표 1. 보강재의 응력 측정 및 파괴기구

구분	파괴 Mechanism	부착형 센서 감지 유무	감지가 불가능한 이유
NAIL	주동영역 이완	감지불가	1. 얇은 파괴 2. 사면의 활동 깊이 추정 오인
	NAIL 인발파괴	감지	
	NAIL 전단파괴	감지	
억지말뚝	말뚝의 전단파괴	감지	
	밀 넣기 부족으로 인한 말뚝의 위치이동	감지불가	
경사계		지중 변위량과 방향	
수위계		지하수위 분포 상황	

### 2.2.1 네일링의 파괴 메카니즘

네일의 파괴는 크게 세가지로 분류된다.

- ① 주동영역 이완에 의한 파괴
- ② 네일의 인발파괴
- ③ 네일의 전단파괴

상기 파괴분류 중 주동영역 이완에 의한 파괴는 네일로 보강된 사면내에서 국부적이고 얇은 파괴로 현재 사용중인 변형률 센서로는 감지가 불가능한 파괴이다. 그것은 사면내에 국부적인 원호파괴나 얇은 파괴 발생시 네일의 위치 이동이 없어 파괴시 네일에 작용하는 마찰저항이 미소하기 때문이다. 따라서 실제 사면내에 파괴가 발생 하였음에도 불구하고 변형률 센서는 응력증가량이 상대적으로 작은 값을 표시 한다.(그림 3.)

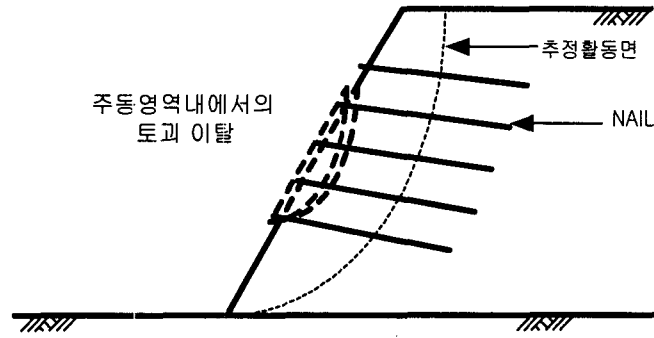


그림 3. 네일 보강 사면에서 국부적 원호파괴

네일의 인발파괴는 최초 설계시 nail의 길이 산정이 잘못되어 저항영역내의 네일이 사면파괴와 함께 뽑혀지는 파괴로 nail의 설계이론상 인발저항은 미소한 변위 영역 내에서도 네일과 흙의 상대적인 변위로 인하여 변형을 센서는 초기부터 감지 가능한 파괴이다. 하지만 파괴가 연속적이고 일시적일때는 사실상 감지가 불가능 하다.

다음은 네일의 전단파괴로 파괴영역과 저항영역의 경계부에서 네일이 전단되는 파괴이다. 네일의 저항은 인발 저항이 85~90%이며 전단저항은 큰변위가 수반되어야 일어나는 파괴로 파괴직전에 동원되는 저항으로 10~15% 정도를 차지하는 것으로 보고되고 있다.(R.A. Jewell)

Jewell의 실험 그래프에서 보강재의 설치 각도를 달리하고 단면의 크기를 달리하여 전단시험을 행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전단변위량이 미소하여도 보강재의 전단응력은 극한 상태가 되고 있으며, 설치각도에 따라 그 상관관계가 다름을 나타내고 있으며 보강재의 활동에 저항하는 주 요인이 축력 즉 인발저항임을 시사하고 있다.(그림 4, 5. 참조)

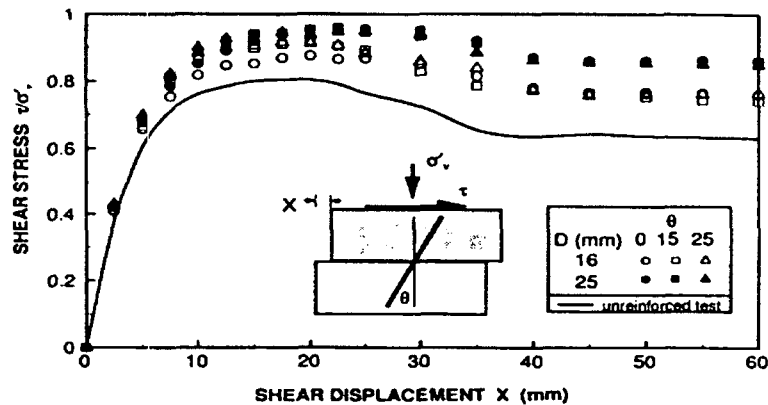


그림 4. 전단 변위와 전단응력 관계(R.A. Jewell)

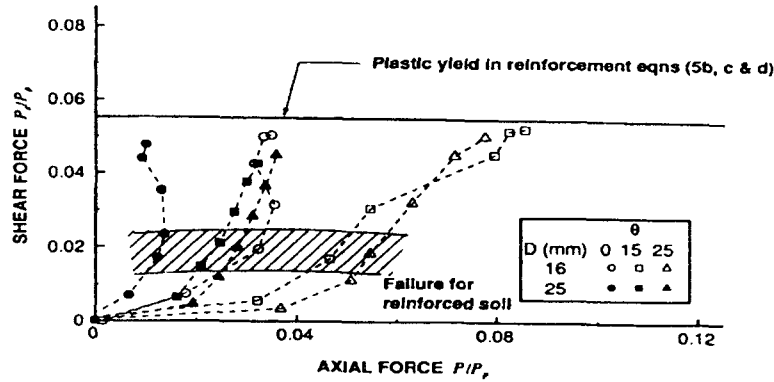


그림 5. 전단력과 축력의 관계

### 2.2.2 억지말뚝의 파괴 메카니즘

억지말뚝의 설계는 계획 안전율을 얻기 위하여 단위 넓이당 말뚝에 필요한 억지력을 구하여 말뚝 자체의 큰 강성을 이용하여 사면의 활동을 억제하는 공법으로 말뚝의 파괴는 두가지로 구분 할 수 있다.

- ① 말뚝 자체의 전단파괴
- ② 근입 깊이가 부족으로 인한 말뚝의 위치 이동

말뚝 자체의 전단 파괴는 설계시 수동 말뚝의 축방 토압이나 말뚝 간격을 고려한 축방 토압의 산정 오류로 인하여 활동력에 비하여 상대적으로 강성이 작은 말뚝을 사용 하거나, 예상 활동 토괴의 중량이 과다 할때 많이 발생한다. 또한 말뚝의 전단파괴가 발생 하였다라는 것은 사면이 붕괴 되었음을 의미한다. 근입 깊이가 부족으로 인한 말뚝의 위치이동은 사면의 예상 활동 깊이를 잘 못 산정하였을 때에 발생하는 것으로 말뚝과 실제 지중의 토괴 이동에 따른 상대적인 변위가 측정 데이터 값을 상대적으로 낮게 하여 현재 사용되어 지고 있는 부착형 변형률 센서로는 감지가 불가능하다.(그림 6.)

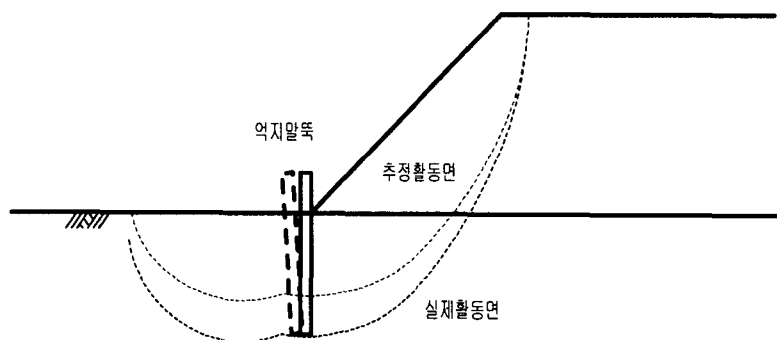


그림 6. 근입깊이가 부족으로 인한 말뚝의 이동

### 3. 센서 원리 및 설치

Tension Wire Sensor는 입력축에 주어진 물리적 변위량(기계적인 이동량, 회전량)을 전기적 Digital 신호로 변환하는 광센서인 엔코더와 Tension스프링, 온도보정을 위한 온도계를 내장하였다. 엔코더는 Robot Arm의 각도 조절, NC공작기계, OA기기 등 정밀제어용 기기에 필수적인 요소로 제어계의 회전위치나 속도가 Digital 신호로 나타나므로 Digital 회로에서의 Interface가 용이하다.

센서는 사면의 법면내에 얇은 파괴에 대비 깊이 2~3m의 천공 홀에 철재 말뚝을 근입하여 긴장력을 갖는 강선을 연결하여 센서를 설치한다.

지표 변위 발생시 사면 내의 보강재나 측정을 위한 철재 말뚝의 변위에 따라 센서부에 감겨진 긴장력

을 가진 와이어가 감기거나 혹은 풀리는 양을 엔코더에서 측정후 mm단위로 환산하여 나타내며, 시간의 경과에 따라 측정된 지표변위를 제어부에서 기억 할 수 있게 하였다. 측정 시스템은 강우나 응설시의 약조건 하에서도 분석자가 볼 수 있게 실시간 무선 데이터 전송 시스템을 구현 하였다.



사진 1. 지표변위 센서

#### 4. 시스템 구성 요소

시스템 구성 요소는 크게 세가지로 분류 하였다.

##### 4.1 센서 설치

자연 사면 혹은 보강 사면에서 사면 조사를 통하여 사면 활동범위를 예측하고 활동범위 밖에 홀(직경:100mm, 깊이:2~3m)을 천공하여 이동말뚝(Reference Pole)을 설치한 후 일정 길이(50cm)로 자른다.

Reference Pole에 Wire를 연결하고 법면을 따라 다음 이동말뚝에 설치된 센서에 연결한다. 이때 Wire는 일정 긴장력을 갖도록 센서에서 약 30cm가량 인발하여 연결한다.

소단과 법면의 경계 혹은 사면내의 단차로 인하여 Wire부가 굴곡되어지는 부분에서는 Roller를 두어 지표변위에 의한 Wire의 신축시 마찰을 최소화 한다.

설계에 맞도록 사면내에 Tension Wire 센서 설치 및 구성을 완료한다.(그림 7. 참조)

현장내의 자동화 시스템과 상황실을 연결하여 무선 데이터의 송·수신 상태를 확인 후 초기치를 0으로 세팅하여 시스템을 작동한다.



사진 2. 사면 붕괴예지 위한 지표변위 센서 구성완료

## 4.2 사면내 측정 시스템

현장에 설치된 VW/TW메인 제어기는 사진 3, 4에 잘 나타나 있다. 무선 데이터 저장 및 송·수신을 위한 마이크로프로세서 기판과 P8TN망에 접속하는 단말기가 내장된 VW/TW메인 제어기는 우기시 낙뢰로 인한 시스템 파손방지를 위한 피뢰침과 안정적인 전력 수급을 위해 솔라시스템과 함께 밧데리로 구성되어 있다. VW/TW 메인 제어기는 RS 485통신 케이블로 센서와 연결 되어져 있다.

사진 2와 같이 사면내 센서 설치를 완료 후 각 센서로부터 RS 485통신 케이블을 VW/TW 메인 제어기에 연결하여 센서의 오작동에 대한 테스트를 실시 한다.



사진 3. VW/TW 메인 제어기

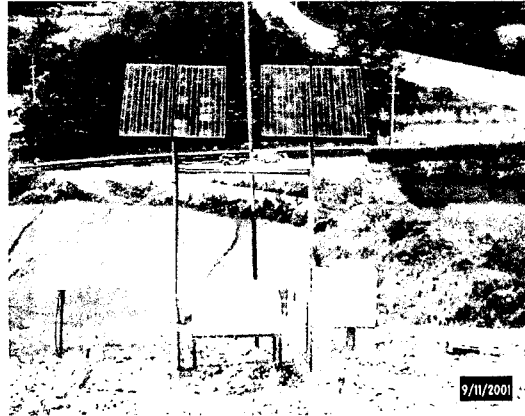


사진 4. 현장운동 상시 안전 감지 시스템

## 4.3 상황실 측정 시스템

상황실에서 현장으로 데이터 수신을 위한 메시지를 송신하면, 현장의 VW/TW메인 제어기에 저장된 측정 데이터를 현장 상황실로 전송한다. 전송되어진 데이터는 프로그램에 의하여 관리 주체자가 현장의 상황을 이해 할 수 있도록 측정위치 및 관리기준치 대비 안전 유무를 도화·해석하여 준다.(사진 5, 6 참조)

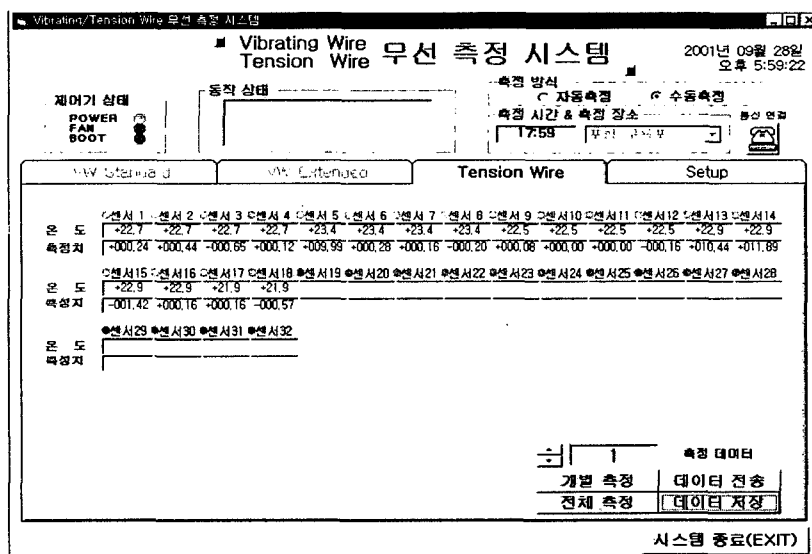


사진 5. 무선 측정 시스템

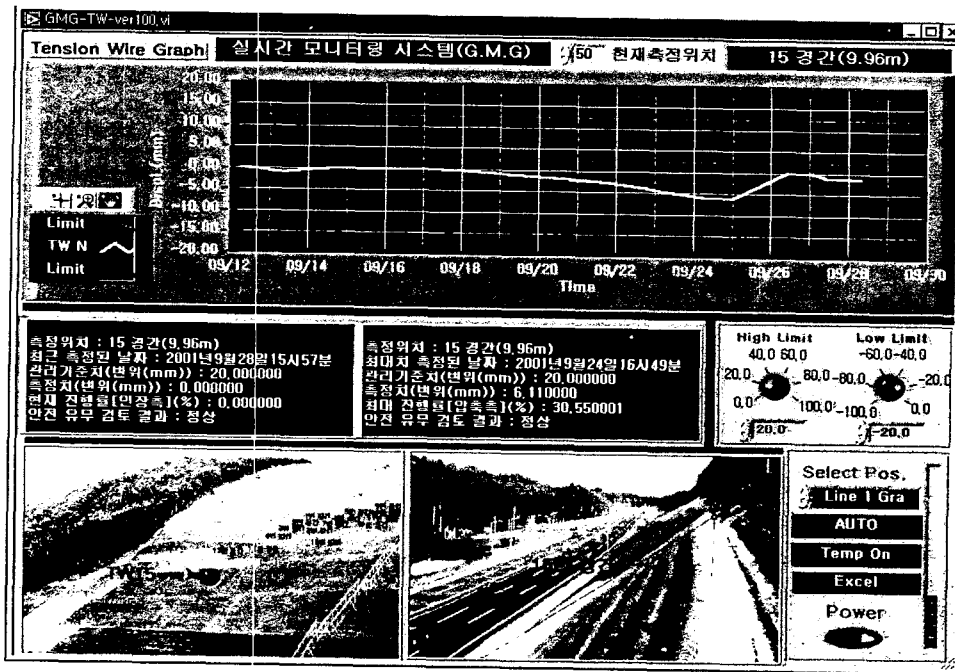


사진 7. VW/TW 실시간 모니터링 시스템

## 5. 현장 적용 사례

본 시스템은 포항-구룡포간 도로 4차선 확포장 공사 보강사면 계측에 운용되고 있으며, 계측 사면내 센서 배치는 그림 7과 같다.

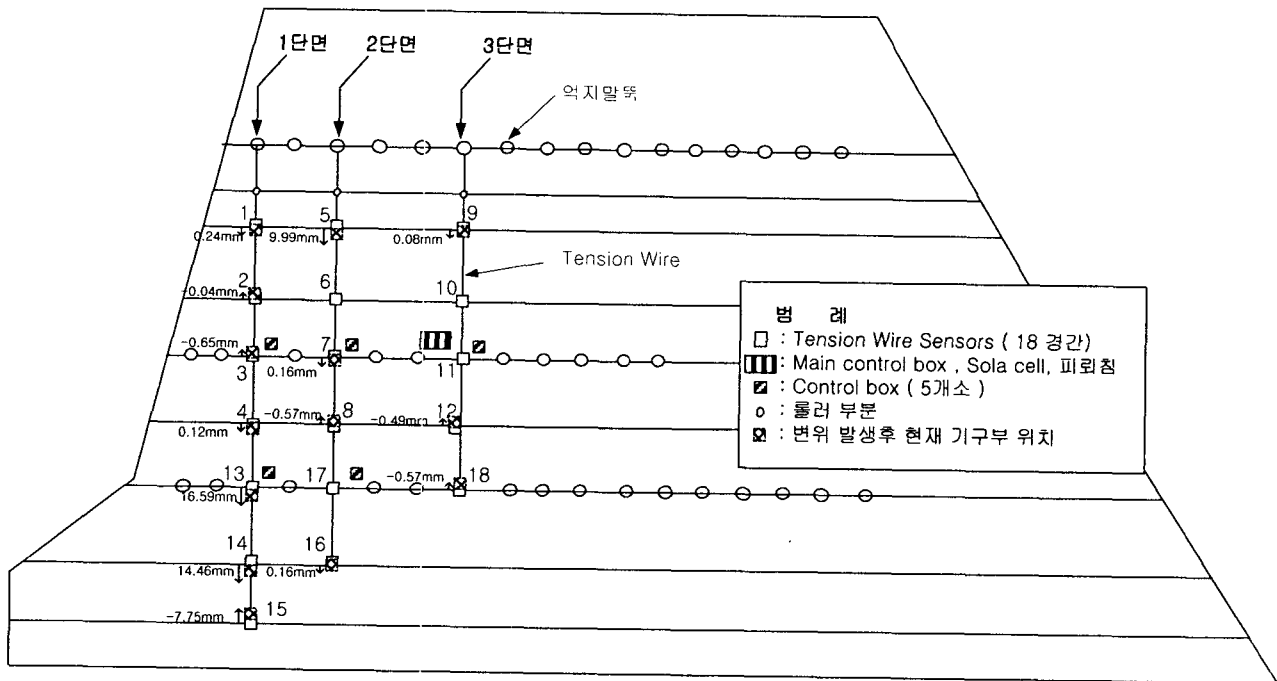


그림 7. 포항-구룡포간 도로 4차선 확포장 공사 보강공사 사면 평면도



## 6. 결론

국내 사면 붕괴의 주요 원인이 집중호우인 것을 감안할 때, 악천후 조건에서 사면 붕괴 예지는 기존의 계측 방법으로는 사실상 불가능하다. 본 안전 시스템은 이러한 악조건에서도 실제 구조물의 변형 상태를 실시간 관측이 가능함으로서 사면 붕괴에 대한 공학적인 사전 대비책을 마련 할 수 있을 것을 보여 준다.

- 1) 측정, 도화, 해석을 자동적으로 해결함으로서 상황에 적절한 조치를 신속히 수행 할 있다.
- 2) 무선 데이터 송·수신과 실시간 모니터링 시스템을 통해 여러 현장을 동시에 체계적, 효율적으로 관리 할 수 있는 중앙통제 방식의 상시 감지체제를 구축할 수 있을 것이다.
- 3) 데이터의 과학적 처리 및 정량화로 자연 재해로만 인식되어온 사면 붕괴에 대한 공학적인 사전 대비책을 마련할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 김상규(1991), "토질역학 이론과 응용", pp. 147-193
2. 김홍택, 강인규(1995), "Nailing System으로 보강된 억지벽체공법에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제10권 제4호, pp133-151
3. 김홍택, 강인규, 성안제, 방윤경(1995), "Nailed-Soil 굴착벽체의 발휘인장력 예측", 한국지반공학회지, 제11권 제2호, pp79-97
4. 한중근(1996), "억지말뚝으로 보강된 절개사면의 강우시 거동", 한국지반공학회지, 02 v.12, n.1, pp.35-46
5. 홍원표(1984), "수동말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회지, pp. 77-88
6. 홍원표(1990), "사면안정(Ⅲ)", 대한토목학회지, pp. 88-98
7. 한국지반공학회(1997), "지반공학시리즈 5 사면안정", 도서출판 구미서관, pp. 245-332
8. 최신 사면·토류 기술총괄편집위원회(1994), "최신 사면·토류공법 총기술", 도서출판 과학기술, pp. 368-413
9. Cartier, G. and Gigan, J.P(1983), "Experiments and obserbations on soil nailing structures", Proc.8th ECSMFEE, Helsinki, pp.473-476
10. Gallser, G.(1990),"In-situ technicques of reinforced soil", Proceedings of Internaitonal Reinforced Soil Conference, Glasgow, pp. 185-196
11. K.T. Chang & G.W.E.Milligan(1996), "Effect of the transition zone in a nailed wall model test" University of oxford, UK
12. Karl Terzaghi, Ralphh B. Peck, Gholamreza Mesri(1996), "Soil mechanics in engineering practice", pp. 137-141
13. R.A.Jewell, G.W.E.Milligan, "Deformation calculations for reinforced soil walls", Proc. 12th International Conf. of Soil Mech. and Found. Eng, Vol.2, pp. 1257-1258
14. R.A.Jewell(1990), "Review of theoretical models for soil nailing" Proceedings of the Int. Reinforced Soil, Clasgow, pp. 256-275
15. R.A.Jewell(1987), "Reinforced soil wall analysis and behaviour" OUEL Report, No. 1701/87.