

現場計測의 虛와 實 (제 1부 : 수평변위 측정)

Fact and Fiction in Field Instrumentation (Part I : Horizontal Displacement Measurement)

송정락 Song, Chung Rak

대우엔지니어링 지반공학부 과장, Manager of DAEWOO ENGINEERING Co.

SYNOPSIS :

Inclinometer is a very useful tool for the measurement of horizontal displacement. Either for excavation or filling work, it can provide very convincing data especially for the stability analysis. However, the inclinometer data can be influenced by many factors like a zero drift of sensor by shock, stability of power supply, spiral deviation of casings, deterioration of casings, techniques of casing coupling, techniques of backfilling and the accuracy of depth measurement.

This article deals with the influence of these factors on inclinometer measurement. Also, this article presents some preventive measures for these problems.

1. 개 요

오늘날 지반공학은 지반의 거동을 보다 정밀히 진단, 예측하는 장족의 발전을 하였으나 지반의 비 균질성 및 비 등방성등과 같이 근본적으로 어려운 특성으로 인하여 아직까지 상당한 정도의 설계 및 이론의 한계가 존재하고 있는 것이 현실이다. 이러한 문제들을 극복하기 위하여 복잡한 이론 및 수치해석 기법등도 개발되었으나 가장 바람직한 방법중의 하나가 현장계측을 실시하여 그 결과로부터 지반의 실제 거동을 파악하고 시공에 반영하는 것이다.

지반공학에서 사용하는 현장 계측기들은 침하판 및 변위 말뚝 등 단순한 기기로부터 시작하였으나 정밀기계 및 전기/전자 공업의 발달과 함께 그 정확성 및 내구성이 현저하게 발전하였다. 그러나 계측기 자체에 대한 이해 부족으로 그 성능을 충분히 발휘하지 못하는 경우도 발생하고 있다. 이러한 문제는 지반공학의 특성상 기계 및 전기/전자 부문에 대한 이해가 부족한 측면도 있으며 아직까지 국내 현장계측의 역사가 일천하여 현장계측 분야의 전문인력 및 전문업체의 부족에도 기인한다고 볼 수 있을 것이다. 또한 대부분의 계측기들이 구미에서 개발되어 그 명칭들이 지반공학자들에게 생소하여 혼란을 유발하는 경우도 있을 것이다. 현장계측에 대한 상기와 같은 이해부족은 현장계측의 시행 과정에서 오류를 유발시킬 수 있으며, 궁극적으로 정확한 지반거동 파악을 어렵게 하거나 잘못된 지반거동 해석으로 유도하는 원인이 될 수도 있다.

그러나 지반공학에서 실제로 사용하는 계측기들은 그 원리가 비교적 간단하여 고등학교 및 대학의 초급과정에서 다루는 물리/화학 정도면 이해가 가능한 것이 대부분이다. 본고는 상기와 같은 현장계측의 문제점들을 개선하기 위한 노력의 일부로서 현재 국내에서 많이 사용하고 있는 계측기들의 기본 원리 및 특성 그리고 범하기 쉬운 오류 및 이에 대한 대책등을 고찰하고자 한다.

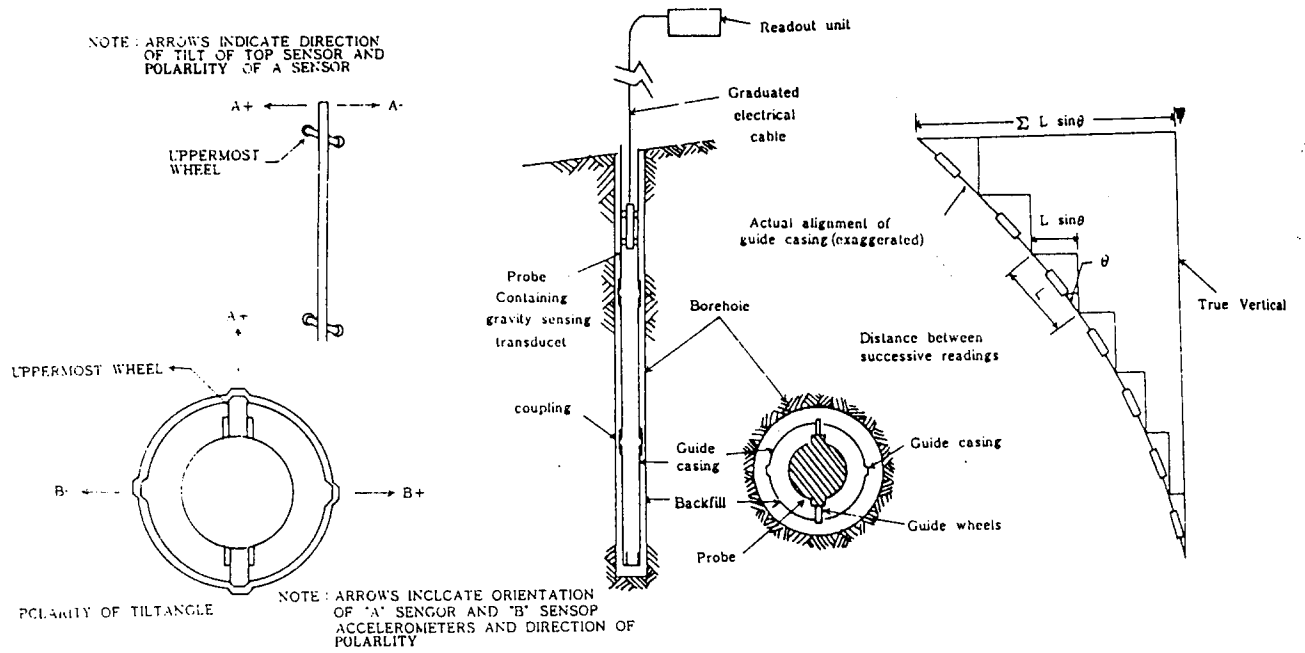
제 1편은 성토 및 굴착시의 안정성 판단을 위하여 많이 이용되는 수평변위 측정에 대하여 주로 살펴보고 있다. 수평변위 측정은 경사계, 변위 말뚝등 여러 가지 방법을 사용할 수 있으나 오늘날 대부분 경사계를 사용하고 있다. 따라서 제 1편은 경사계에 의한 수평변위 측점에 초점을 맞추었다.

2. 경사계의 원리

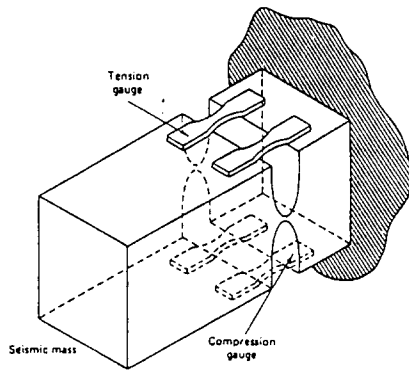
경사계는 <그림 1>과 같이 알루미늄, 플라스틱, ABS 수지등의 재질로된 Casing을 지중에 설치하여 지반의 수평변위가 Casing의 수평변위로 나타나게 하여 이를 측정하는 원리이다.

이때 Sensor가 측정하는 물리량은 <그림 1>과 같은 Casing의 기울어짐이다. Casing의 기울어짐이 측정되면 <그림 1>와 같이 $L \cdot \sin\theta$ 의 관계에 의하여 단위 길이당의 수평변위량을 산정한다. $L \cdot \sin\theta$ 의 관계에 의하여 산정된 수평변위량을 하부로부터 상부로 누적시키면 전체 깊이에 대한 수평변위의 프로파일을 알 수 있다. 초기의 경사계는 Indicator에서 기울어진 각도를 표시하고 기계상수 및 $L \cdot \sin\theta$ 의 관계에 의하여 수평변위를 계산할 수 있도록 하였으나, 근래에는 대부분이 그 과정을 Indicator 내부에서 Software 적으로 해결하여 수평변위 값이 mm단위 등으로 직접 출력되고 있다.

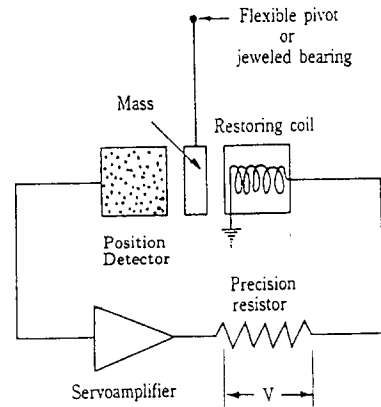
경사계에서 기울어진 각도를 감지하는 Sensor는 Accelerometer라 불리는 것으로 <그림 2>와 같이 Strain Gage 형식, Servo Accelerometer 형식 및 Electrolytic Level 형식 등이 있다.



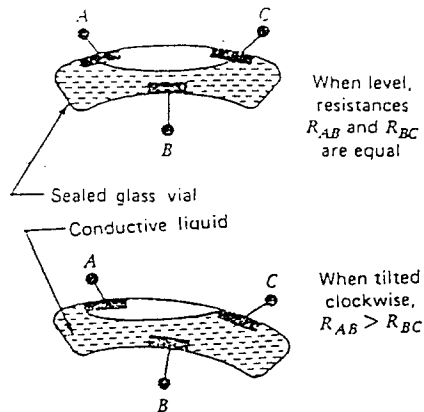
〈그림 1〉 경사계를 이용한 수평변위의 측정원리(홍인상사, 1994)²⁾



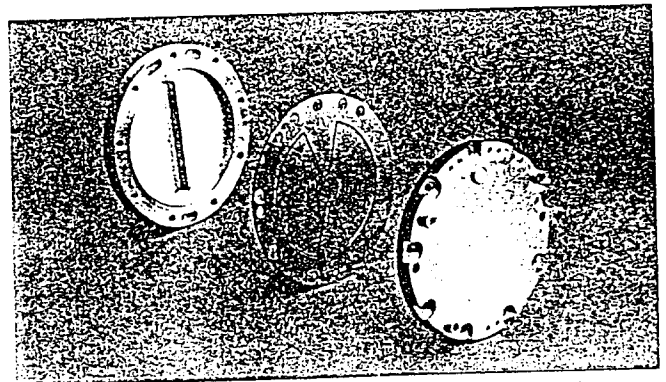
(a) Strain Gage 형식(Dowding, 1985)⁴⁾



b) Servo Accelerometer 형식(Duncliff, 1988)⁵⁾



(c) Electrolytic Level 형식(Duncliff, 1988)⁶⁾



(d) Electrolytic Capacitor 형식(신평상사, 1995)¹⁾

〈그림 2〉 경사계에 사용되는 Accelerometer의 종류

<그림 2-a>는 Strain Gage 형식의 Accelerometer를 나타내고 있다. 이러한 방식의 Accelerometer는 <그림 2-a>의 상태에서 상부의 Strain Gage에서는 인장, 하부의 Strain Gage에서는 압축을 나타낼 것이다. 한편 시계 반대 방향으로 90° 회전한 경우에는 2개의 Strain Gage 모두 압축력을 받을 것이며 시계방향으로 90° 회전한 경우에는 2개의 Strain Gage 모두 인장력을 받을 것이다. 따라서 2개의 Strain Gage 에 작용하는 응력의 방향 및 크기에 의하여 그 기울어진 정도를 알 수 있다는 원리를 이용한다.

<그림 2-a>는 Strain Gage로서 전기 저항식 또는 진동현식을 사용하여 그 가격이 저렴한 장점이 있으나 그 구조에서 알 수 있듯이 충격에 약한 단점이 있어 지금은 일반 경사계에는 거의 쓰이지 않고 충격을 받을 가능성이 거의 없는 현장설치형 경사계(IPI, In-Place Inclinometer)에 주로 쓰이고 있다.

<그림 2-b>는 Servo Accelerometer 형식을 나타내고 있다. 이러한 방식은 <그림 2-b>의 Mass가 Flexible Pivot을 중심으로 좌측 또는 우측으로 이동하게 되면 Position Detector는 Mass의 위치를 감지하게 되며, Servo Amplifier에서는 원래의 위치에 Mass를 가져올 수 있는 전류를 Restoring Coil에 공급하게 된다. 이때 Precision Resistor는 원래의 위치에 Mass를 가져오는데 필요한 전류의 방향 및 크기를 측정하여, 즉 Restoring Coil에 공급되는 전류의 방향 및 크기를 측정하여 기울어진 정도를 알 수 있다는 원리를 이용한다 (Duncliff, 1988)

이와 같은 System은 Mass를 강제로 원위치 시키는 기능이 있으므로 Mass와 Position Detector 및 Restoring Coil의 거리를 작게 하여 정밀도를 확보할 수 있으면서, Restoring Coil의 강·약을 조절하여 측정범위를 크게 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 근래의 경사계는 거의 대부분 <그림 2-b>와 같은 Servo Accelerometer를 사용하고 있다. (주 : Servo란 말은 어떤 Sensor 또는 모터등이 대상물의 동태를 감지하여 그 상태를 Feed back하여 거기에 적절하도록 다시 Sensor 또는 모터등을 제어한다는 뜻을 지니며, 그 예로는 Servo Accelerometer, Servo Motor, Servo Valve등이 있다. 이와 같은 Servo기기는 주로 자동제어 분야에 이용되고 있다.)

<그림 2-c>는 Electrolytic Level 형식의 경사계를 나타내고 있다. Electrolytic이란 “Electrolite(전해액)를 이용하는” 이란 뜻으로 전자수준계를 이용하는 형식이란 뜻이다. 그 원리는 <그림 2-c>에 나타난 바와 같이 전해액 속의 세지점에 전극을 설치하고 기포를 넣으면, 기포의 위치에 따라 두개의 저항치(R_{AB} 와 R_{BC})가 서로 달라지게 된다는 것을 이용한다. 이 방법은 액체 및 기포를 이용하므로 원리가 간단하여 충격에 강하다. 그러나 Sensor의 제작 및 정밀도에 문제가 있어 비교적 널리 적용되지 못하였으나, 근래 품질 개선이 이루어져 그 적용이 확대되고 있는 실정이다. 특히 Sensor의 가격이 Servo Accelerometer 보다 저렴하여 매립형 경사계에 많이 적용된다.

<그림 2-d>는 Electrolytic Capacitor 형식의 경사계를 나타내고 있다. 이 방식 또한 전해액을 이용하고 있으나 원리는 Electrolytic Level 방식과 조금 다르다 본 방식은 Capacitor 사이에 전해액을 넣고 Sensor의 Rotation이 발생할때 Capacitor 내부의 극판과 전해액이 접촉하는 면적이 달라지며 이로 인하여 Capacitor의 용량이 달라지는 것을 이용한다. 이 방법 또한 원리가 간단하여 가격이 저렴하며 충격에 강하다는 장점이 있다. 그러나 정밀도는 Servo Accelerometer에 비하여 떨어진다. 따라서 주로 매립형 경사계에 많이 사용된다.

3. 범하기 쉬운 오류 및 대책

경사계의 측정원리는 전술한 바와 같다. 이러한 측정원리는 매우 정밀하고 내구성 높은 측정자료를 제공하여 줄 수 있으나, 설치 및 기기 취급시의 부주의는 혼란만을 가중시키는 무의미한 결과를 제공할 수도 있다. 경사계 이용시 범하기 쉬운 오류들을 요약해 보면 다음과 같다.

-충격에 의한 Sensor의 Zero Drift

전술한 바와 같이 대부분의 경사계는 Servo Accelerometer를 주요 Sensor로 사용한다. Servo Accelerometer는 과거의 Strain Gauge 형식의 Accelerometer등에 비교하여 정밀도 뿐만아니라 내 충격 특성등이 현저하게 증가되었으나, 그 자체가 매우 정교한 부품이며 움직이는 부분이 있으므로 심한 충격등에 취약한 약점은 어쩔수 없다.

이러한 점을 감안 경사계 Sensor에는 측정시 Sensor가 Casing의 바닥에 닿을때의 충격을 완화하기 위한 고무 쿠션이 부착되어 있다. 따라서 측정시 Sensor를 Casing 바닥에 내릴때에는 Sensor가 바닥에 충격없이 내려질 수 있도록 주의 하여야 한다. 또한 현장 계측시 운반용 Casing을 사용하지 않고 Sensor를 자동차 트렁크 속에 넣어 운반하는 사례들도 있다. 이러한 일들은 Servo Accelerometer의 Mass와 Position Detector 및 Restoring Coil 등에 손상을 미칠 수 있다. 따라서 일반적으로 현장 계측기 중에서 가장 주의를 기울여야 할 정밀기기가 경사계 Sensor이다. 경사계 운반시에는 자동차에 앉아서 무릎위에 놓고 운반한다는 원칙을 준수하여야 한다.

현장의 규모가 비교적 작아 차량이동등이 필요치 않는 경우 경사계 Sensor를 Cable에 연결한 상태로 운반하는 경우가 있다. 이러한 경우는 Readout 과 Cable을 분리하지 말고 연결된 상태에서 Readout의 전원을 켜 상태로 이동하는 것이 좋다. Sensor에 전류가 공급되면 Mass를 항상 원위치로 유지하려고 하는 복원력이 있어 손상가능성이 줄어들기 때문이다.

경사계 Sensor 에 대한 충격예방에 최선을 다했음에도 불구하고 부득이하게 Sensor에 충격이 가해지는 경우가 있다. 이러한 경우 대부분 Sensor의 영점이 잘못되게 된다. 즉 수직상태에서의 Sensor 읽음치는 “0” 또는 거의 “0”이 되어야 하나, 허용범위 이상의 충격을 받게되면 “0”을 상당히 벗어난 일정한 값을 갖게된다. 이와 같은 증상은 Zero Drift 또는 Zero Shift 라 부르며 최대한 신속히 Sensor의 수리 및 Recalibration 을 하여야 하나, 국내 실정상 정밀한 수리 및 Calibration은 사실상 매우 곤란하다. 이러한 경우 현장에서 간이로 보정할 수 있는 방법은 Probe 를 한번 넣어 측정후 180o 돌려서 다시한번 측정하여 그 절대치의 평균을 취함으로써 어느정도 보정할 수 있다. Sensor의 Zero Drift 가 발생하였다면 상기 방법에 의하여 어느정도 상쇄될 수 있기 때문이다. 특히 초기치를 상기와 같이 이중으로 측정하여 기록을 보관하면 보다 신뢰도를 높일 수 있다.

- Sensor의 종류 선택

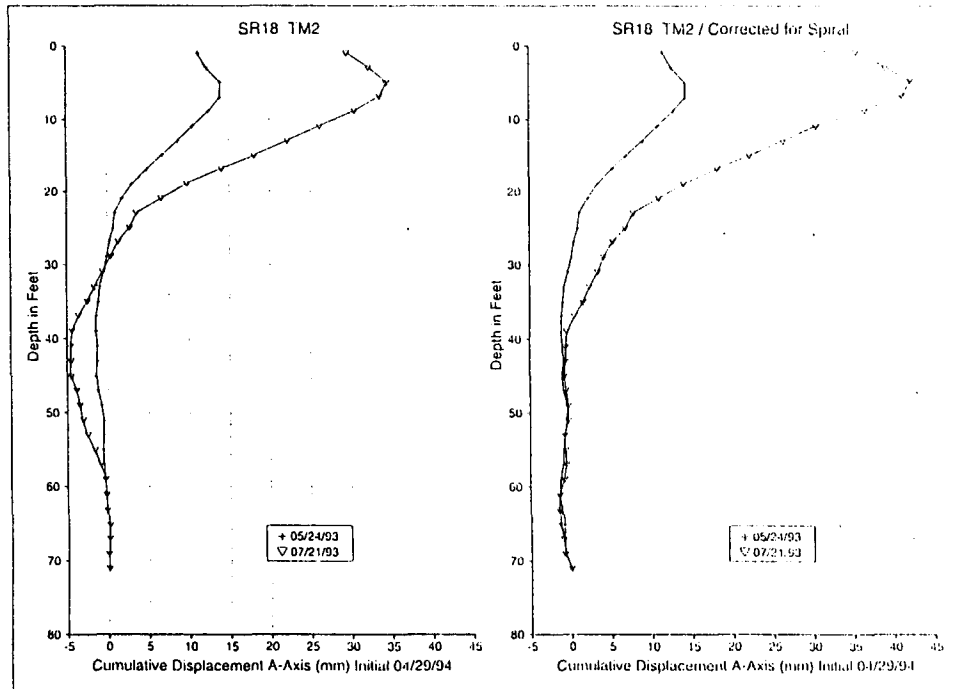
대부분의 경사계는 Sensor와 Indicator를 동일제작자 제품을 사용하도록 제작되고 있으나 기종에 따라서는 Readout에 Sensor선택 스위치를 장착하여 다른 회사 제품의 Sensor도 사용가능하도록 한 것이 있다. 이러한 제품은 사용시 주의를 기울이지 않으면 Sensor 선택 스위치와 실제 Sensor가 불일치 하는 경우가 있어 무의미한 계측결과를 가져오는 경우가 있다. 따라서 이런 종류의 Readout 사용시에는 실수에 의하여 Sensor선택 스위치가 다른 곳을 선택하지 않도록 하여야 한다. 특히 초기치 측정의 경우에는 더욱 철저히 확인하여야 한다.

- 전원의 안정성

<그림 2>에 나타난바와 같이 Servo Accelerometer 경사계에는 강제적으로 Mass의 원래위치를 유지시켜 주는 Restoring Coil이 있다. Restoring Coil은 외부에서 공급되는 전원에 의하여 작동된다. 따라서 전원이 충분치 않으면 Restoring Coil의 작동이 원활치 못하여 실제와 다른 값이 측정치로서 나타난다. 대부분의 경사계 Restoring Coil은 Indicator로부터 공급되는 전류를 이용하며 Indicator는 충전식 Battery를 이용한다. 이러한 Battery는 온도에 따라 그 성능이 상당히 좌우된다. 즉 겨울철에는 Battery의 능력이 떨어져 정확한 결과가 측정되지 못하는 경우가 있다. 특히 기종에 따라서는 충분히 충전 되어도 온도가 일정수준 이하로 내려가면 보조 Battery를 사용토록 한 것도 있다. 따라서 경사계 사용시에는 반드시 Battery 상태를 먼저 점검하여야 하며 전압이 충분치 않을 시에는 보조 Battery를 사용하거나 충전후에 사용하여야 한다.

- Casing 나선의 오차

경사계 Sensor는 Casing내에 잘 밀착되어야 오차가 줄어들므로, Sensor에는 스프링 달린 바퀴가 붙어 있고, 이 바퀴는 <그림 1>과 같은 Casing의 홈 (Groove)을 따라 움직인다. 따라서 경사계 Sensor로 측정되는 변위는 그 측정방향이 홈의 방향에 의하여 좌우된다. 그러나 Casing 제조시 홈이 직선으로 형성되지 못하고 약간 나선형으로 생산되는 경우가 있다. 특히 Aluminum Casing과 같이 압출방식에 의하여 Casing을 제작하는 경우 그 가능성이 더 커지게 된다. 이러한 경우 지표에서의 Casing 표정방향과 지중에서의 Casing 표정방향이 달라지게 되는 문제가 발생할 수 있다. Casing의 표정이 잘못되었을 경우 측정치와 표정방향 편차를 보정한 경우는 <그림 3> 처럼 차이가 발생한다. Casing의 홈이 심하지 않은 나선 모양으로 형성되었으며 그것이 규칙적인 경우에는 Casing 연결시 나선의 방향이 서로 반대가 되도록 연결하여 심한 표정 불일치를 방지할 수 있다.



Displacement graphs generated by DigiPro software. Spiral correction applied to graph on right.

<그림 3> 경사계 Casing의 표정편차와 보정(SINCO, 1989)⁶⁾

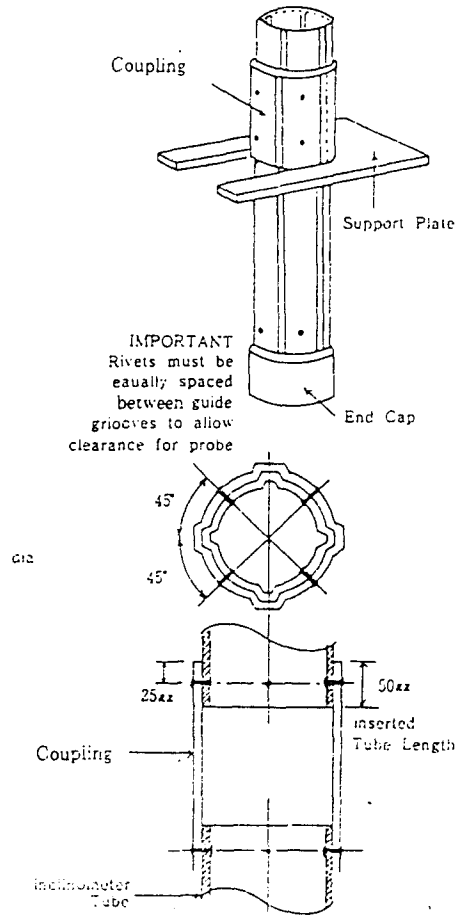
원칙적으로 경사계 Casing의 표정은 지표 및 지중이 동일하여야 하며, 이를 위하여 전체 심도에 표정방향의 양상을 확인하여야 한다. Casing의 표정방향을 확인하는 장비로는 미국의 Slope Indicator Co.의 Spiral Sensor등이 있다. Casing의 표정방향이 확인되면 <그림 1>과 같이 두 방향으로 측정되는 수평변위 값으로부터 임의의 방향으로의 수평변위 양상을 보정하여 구할 수 있다.

- Casing의 부식

경사계 Casing은 Aluminum, Plastic, ABS 수지등의 재질이 사용되고 있다. 또한 각 재질에 따라 비용, 제작법 및 특성이 조금씩 다르다. 특히 Aluminum의 경우 해수에 포함된 염분에 쉽게 부식되는 단점이 있다. 보고된 바로는 해안지역에 설치된 Aluminum Casing의 경우 약3개월에 Casing의 전체 두께가 완전히 침식된 경우도 있다. 또한 해안 매립지에 설치된 경사계 Casing의 상당수가 뚜렷한 이유없이 Sensor 삽입불능 현상이 발생한 현상들도 보고된 바 있으며 이런 경우 Casing의 끝에 흰색의 알루미늄 부식 분말이 관측된다. 이러한 Aluminum Casing의 부식현상에 대한 대책으로서 Aluminum Casing을 코팅한 제품들도 있으나 설치 및 운반시 코팅막이 손상될 수 있어 근원적인 대책은 되지 못하고 있다. 따라서 해수지역에 설치되는 경사계 Casing은 Aluminum 재질을 피하는 것이 좋다.

- 연결부 및 Sealing

경사계 Casing은 대개 3m 길이로 생산되며 목표 깊이까지 설치하기 위하여는 Casing을 이어 사용하여야 한다. Casing의 연결은 <그림 4>와 같이 연결용



〈그림 4〉 경사계의 연결 및 Sealing(홍인상사, 1994)²⁾

Coupling 및 Rivet 그리고 Sealing Compound 등으로 이루어진다.

이때 Sealing Compound는 경사계 Casing 외부의 이물질이 Casing 내부로 들어가지 못하도록 막아주는 역할을 한다. Sealing이 불완전한 경우 Casing 이 물질이 Casing의 끝에 붙거나 끼이게 되면 측정용 Sensor가 들어가지 않는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 Casing 연결시에는 Sealing에 주의를 하여야 한다. 일반적으로 Sealing 시에는 Sealing Compound 위에 고무로 된 Sealing Tape를 감아서 추가적인 조치를 취하는 경우가 많다.

Casing의 역학적 연결은 Rivetting에 의하여 이루어진다. 대개 4개의 Rivet을 4방향으로 설치한다. 이때 Rivetting 작업은 반드시 대각선 방향으로 작업하여(그림 4 참조) Coupling 내부에서 Casing이 편심을 가지지 않도록 한다. Casing이 편심을 가지고 연결될 경우 Sensor가 들어가지 않는 현상이 발생할 수 있다.

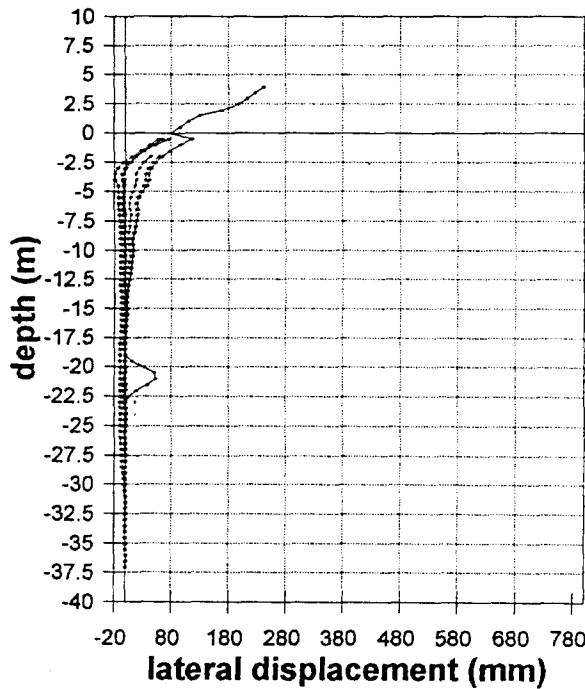
연결용 Rivet은 대부분 Aluminum이 사용되고 있다. Rivet용 Aluminum은 그 재질이 물려 보통 Rivetting Gun을 이용한 작업이 간편하다. 또한 해수속에서 오래 있을 경우 부식이 발생하여, 지반의 침하가 커져 Negative Skin Friction이 커질 경우 Rivet이 끊어지며 Casing의 침하를 유도한다. 따라서 경사계용 Rivet은 Aluminum 재료를 사용하는 것이 바람직하다.

특히 큰 침하가 예상되는 경우 Casing과 Casing 사이를 5~10cm 정도 이격하여 Coupling을 설치하면 Rivet이 끊어지면서 Casing이 지반을 따라 침하할 수 있어 Casing의 손상 및 Buckling을 방지할 수 있다. 외국의 경우에는 침하가 예상되는 지역의 경사계 Coupling은 기본적으로 Telescopic Coupling을 사용하여 Casing의 손상없이 침하를 소화할 수 있도록 하고 있다.

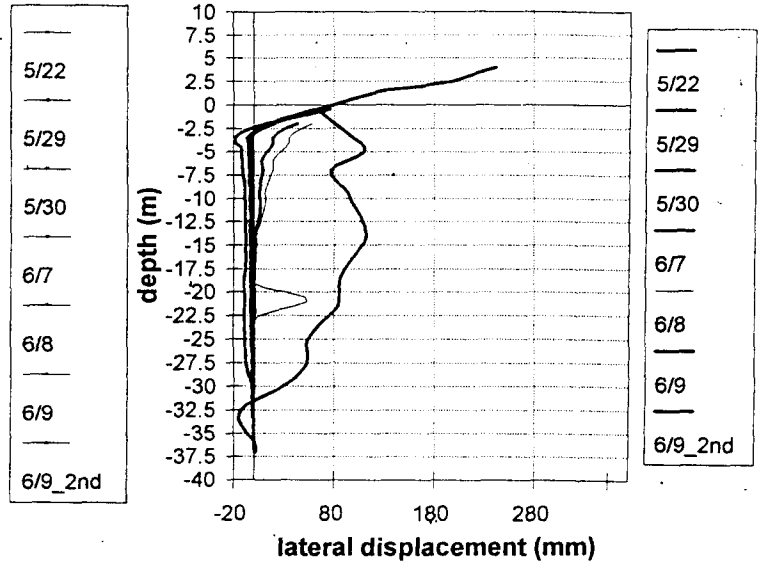
최근에는 경사계 Casing의 연결작업을 신뢰도 높고 간편하게 할 수 있는 〈그림 4〉와 같은 Quick Coupling이 공급되고 있어 경사계 설치작업의 효율을 높여주고 있다. 그러나 단계적인 성토를 하면서 경사계 Casing 을 단계별로 연장하면서 측정을 하여야 하는 경우 재래식 방법은 필요한 입의의 길이로 Casing을 연장할 수 있으나, Quick Coupling을 이용할 경우 Quick Coupling에 맞도록 특별히 끝단 처리가 된 Casing을 사용하여야 하므로 연결 길이의 제한이 생긴다는 단점도 있다.

- 되며우기

경사계 Casing 설치후 지반에 하중이 가해지지 않았음에도 불구하고, 측정치가 불규칙적으로 나타나(변위의 추세는 없음) 측정치의 신뢰도가 저하되는



<그림 5> 퇴메우기 불량으로 인한 Buckling



<그림 6> 경사계 기준점 Setting 오류 결과

경우가 있다. 이러한 경우는 경사계 Casing에 대한 퇴메움이 불안한 경우에 주로 발생한다. 즉 Casing이 지반과 밀착되지 못하고 접촉이 불안한 상태이므로 발생하는 현상이다. 또한 퇴메움이 충분치 않을 경우 지반침하에 의하여 <그림 5>와 같은 Casing의 Buckling이 생길 수 있다. 이러한 현상은 시간이 경과함에 따라 그 경향이 누그러지는 경우가 있으나 근원적인 방지를 위하여는 설치시에 Casing 주변의 퇴메움을 철저히 하여야 한다. 알려진 바에 의하면 퇴메움은 Tremie Tube를 이용하여 하부로부터 상부로 천천히 하여야 하며, 자루에 돌을 넣어 경사계 설치공에 내린후 자루에 Casing을 넣고 Tremie Tube로 그라우팅을 하면 효과가 좋다는 경우도 있다.

그러나 가장 중요한 것은 충전후 퇴메움 재료가 원지반과 유사한 강도 및 변형특성을 가져야 한다는 것이다. 일반적으로 많이 사용하는 Bentonite 용액의 경우 펌핑이 어려울 정도로 교반하여도 공내에서 Bentonite 입자가 가라 앉아 상부에는 물만 고이는 현상이 흔하다. 따라서 이러한 현상이 발생하지 않도록 적절한 퇴메움 재료를 선정하여야 한다. 이를 위하여는 <표 1>과 같이 일반적으로 추천되는 배합비를 참고하여 퇴메움 재료를 선정후 시험 배합동을 통하여 그 타당성 여부를 검증하여야 한다.

<표 1> 일반적인 경사계 Casing 용 퇴메움 재료의 배합비(AASHTO, 1978)

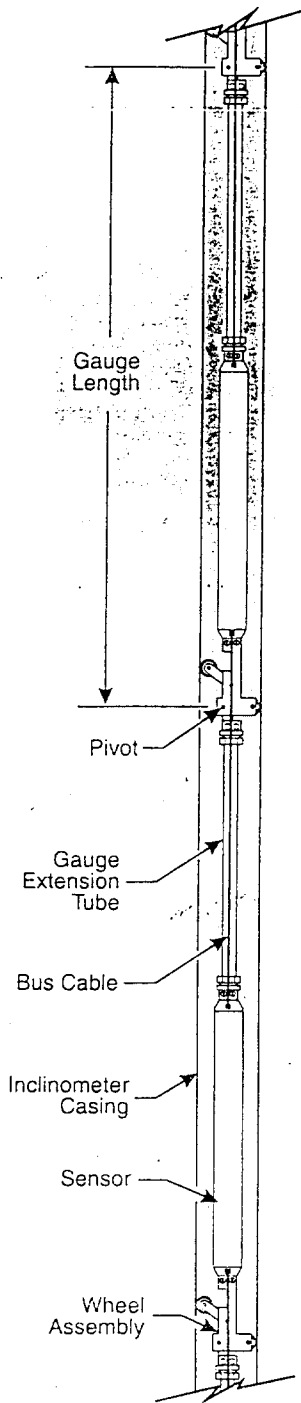
구분	배합비	비고
시멘트:벤토나이트	1 : 10	물은 Pumping 가능 최소량
lime : 벤토나이트	1.6 : 1	물은 Pumping 가능 최소량

퇴메움 재료의 특성으로서 잘못 알려진 경우도 있는데 그 경우중의 하나가 경사계 설치공에는 기본적으로 벤토나이트 그라우팅 또는 시멘트 벤토나이트 그라우팅을 하는 것으로 알려져 있으나, 모래 지반은 모래로, 자갈 지반은 자갈 비슷한 재료등으로 퇴메움 하는 것이 바람직 하다. 퇴메움 재료 선정의 규정은 없으며 대원칙은 원지반과 가장 유사한 재료를 사용하는 것이다.

- 자료 해석시 심도 Setting 오류

경사계 측정은 <그림 1>에 나타난 바와 같이 초기치와 나중치를 비교하여 그 차이를 계산하고 계산치를 하부로부터 상부로 누적하여 변위로 계산한다. 따라서 경사계 측정치는 항상 동일심도에서의 초기치와 비교 되어야 한다. 많은 경우 경사계 측정치는 이웃한 심도와 크게 차이가 나지 않는 경우가 있다. 따라서 개개의 값 비교는 비교 심도가 다소 틀려져도 큰 문제가 없는 것처럼 보인다. 그러나 경사계 값은 하부에서 부터 상부로 누적되는 것이므로, 개개값의 작은 차이도 누적되면 큰 차이를 초래하게 된다. 이러한 오류의 예는 <그림 6>과 같다. 이러한 오류는 비교적 숙련되지 않은 사용자들에게서 나타난다. 경사계 계측결과 어느날 갑자기 이해할 수 없는 변형이 발생 하였다면 충격에 의한 Sensor의 Zero Drift와 함께 기준점 Setting을 가장먼저 확인해 보아야 한다.

자료 해석시 심도 Setting 오류의 주된 이유는 경사계 Casing의 연결부가 불량할때 이를 통하여 시추용액, 그라우팅액 등이 침투하여 Casing의 바닥에



<그림 7> IPI 개념도⁶⁾

쌓여 Sensor가 도달하는 바닥의 심도가 달라지게 되어 발생하는 경우가 많다. 따라서 기준점 Setting 변화가 한번 발생하게 되면 발생빈도가 자주 높아지게 된다. 어떤 경사계 Cable에는 심도가 수치로 표시되어 있으므로 (SOIL INSTRUMENT) 이 경우는 측정시마다 설치시의 심도와 비교하여 동일 여부를 확인하여야 한다.

또한 Cable에 심도 표시가 안되어 있는 경우에는 기준점에서의 전회 측정치와 급회 측정치를 비교하여 동일 수치인지를 확인하는 것도 필요하다. 보다 숙련된 기술자의 경우 유성펜으로 Cable에 심도 표시를 하고, Casing에 최초 기준점 심도를 기록해 놓고 매 측정시마다 비교하는 방법을 사용하기도 한다.

4. 기타

4.1 IPI (In-Place Incliner)

IPI는 In-Place Incliner (매립형 경사계)란 뜻으로 Casing 내로 경사계 Sensor를 오르 내리지 않고 <그림 7>처럼 Sensor를 Casing내에 설치해 두는 형식이다.

이 방법은 Casing 내의 측정위치 마다에 경사계 Sensor를 설치해 두는 방식이므로 필요한 Sensor의 수가 많아지며 비용이 증가된다. 그러나 Casing이 손상되거나, 허용 곡률 변경 이상으로 휘어서 일반 경사계로서는 측정할 수 없는 경우에도 측정이 가능하며 자동 계측이 용이하다는 장점이 있다.

근래에는 IPI의 비용을 줄이기 위하여 저렴한 Sensor들이 개발되고 있으며, <그림 2>의 Strain Gage 형식, Electrolytic Level 방식 및 Electrolytic Capacitor 방식등이 이러한 목적으로 개발되어 일반화가 촉진되고 있다.

특히 대부분의 IPI는 기존의 경사계 Casing을 그대로 활용할 수 있어 기존의 경사계를 자동화 하거나, 신뢰도를 높이고자 할 때 손쉽게 적용할 수 있다. 그러나 경사계 Casing속에 여러개의 경사계 Sensor가 들어가면 Sensor에 연결된 Cable로 인하여 1개의 경사계 Tube에 설치할 수 있는 Sensor의 수량이 지장을 받게 된다. 근래 미국의 SINCO 사에서는 IDA System을 사용하여 여러개의 IPI Sensor를 1개의 Cable로 연결하고 각 Sensor마다 고유의 Address를 지정하여 설치 및 측정이 쉬운 System을 개발하여 공급하고 있어 IPI의 Sensor 수량제한 극복 및 보급에 서장을 던져주고 있다.

4.2 정밀도

경사계에서 정밀도라 함은 Resolution, Repeatability, Linearity, Sensitivity, Rotation Factor, System Accuracy 등을 모두 포함하는 말이다. 이러

한 용어는 대개의 사용자들에게 생소하며, 경사계에 숙련되지 않은 사용자들에게는 매우 당혹스런 용어이다. 이러한 용어의 간략한 의미는 다음과 같으며, 그중 System Accuracy 가 실질적으로 정밀도의 가장 대표적인 용어이다. 그러나 대부분 경사계의 정밀도는 지반공학에서 필요한 수준을 충분히 감당할 정도이므로 정밀도에 대하여는 신경쓸 필요가 없다.

Resolution : 수치로 표시되는 가장 작은 단위 ("에" 줄자의 최소 표시 눈금)

Repeatability : 동일한 각도에 대하여 반복측정할 때 발생하는 값의 차이
(전체 측정 범위에 대한 % 로 표시)

Linearity : 측정치와 실제값을 Best Fitting 하였을때, Best Fit Line과 측정치의 차이
(전체 측정범위에 대한 % 로 표시)

Sensitivity : 측정치와 실제값을 Besting Fitting 하였을때의 기울기

Rotation Factor : 수직으로 부터 얼마나 벗어나서 Accelerometer가 Probe에 붙어 있는가 하는각도
(전체 측정범위의 % 로 표시)

System Accuracy : 실제 현장에서 경사계 장비로 얻을 수 있는 Error의 범위

4.3 Uni-Axial & Bi-Axial

경사계 제작사에서 발생하는 안내책자를 살펴보면 Uni-Axial 이니 Bi-Axial 이니 하는 표현들이 있다. Uni-Axial 이라 함은 경사계 Probe 내에 Servo Accelerometer가 1 개 들어 있어 어느 한방향 (주로 바퀴 붙은 방향)의 기울어짐 만을 측정할 수 있는 경사계이다. 따라서 일반적으로 요구되는 바와 같이 서로 직각을 이루는 2 방향의 수평변위 측정을 위해서는 1 회 측정후 Probe를 90 도 회전하여 다시 측정하여야 하는 번거로움이 있다.

Bi-Axial이라 하면 경사계 Probe내에 Servo Accelerometer가 2 개 들어 있어 2 방향 (바퀴 방향 및 직각 방향)의 기울어짐을 동시에 측정할 수 있어 신속한 측정이 가능하다는 장점이 있다. 일반적으로 Uni-Axial 에 비하여 가격이 비싸다. 그러나 오늘날 대부분의 경사계는 Bi-Axial 방식을 취하고 있다.

5. 결론 및 제언

지금까지 경사계를 이용한 수평변위 측정에 관계된 제반 사항들을 살펴보았다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- 원 리
-경사계용 Sensor의 원리는 Strain Gage 형식, Servo Accelerometer 형식, Electric Level 형식, Electric Capacitor 형식등이 있으며, 정밀도가 뛰어난 Servo Accelerometer 형식이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 동시에 많은 수의 Sensor를 사용하는 IPI의 경우 가격이 저렴한 Strain Gage 방식 또는 Electrolytic 형식이 많이 쓰인다.
- 발생하기 쉬운 오류 및 대책
-충격에 의하여 Sensor의 Zero Drift가 발생할 수 있으며, 이 경우는 제작사의 recalibration이 가장 바람직하나 임시 대책으로서 Sensor를 0 도, 180 도 2 방향으로 측정하여 평균치를 사용하여 그 영향을 최소화 할 수 있다.
-Sensor 종류 선택시에는 반드시 Readout과 Sensor를 Matching 시켜 주어야 한다.
-전원은 충분한 전압을 유지하여야 한다.
-Casing 나선의 Error가 있는 경우에는 Spiral Sensor등으로 보정하여야 한다.
-Aluminum Casing 은 부식될 가능성이 있으므로 방식처리를 하거나, PVC Casing을 사용 하여야 한다.
-연결부는 나선이 잘 연결될 수 있도록 하여야 하며, 침하가 예상될 때는 침하를 감안한 여유 공간을 두어야 한다.
-되메우기는 Casing과 원지반 사이를 빈틈없이 채워야 하며, 이때 되메우기 재료의 강도 및 변형특성을 원지반의 강도 및 변형특성과 최대한 유사하여야 한다.
-측정자료 해석시에는 반드시 초기치와의 동일 심도 여부를 확인하여야 한다.
- IPI
-큰 변형이 예상되거나 빈도 높은 수평변위 측정이 필요한 경우에는 IPI (매립형 경사계)가 바람직하다.
- 정밀도
-일반적인 경사계 정밀도는 지반공학에서 요구하는 정밀도를 만족하나, 확인시에는 System Accuracy를 확인하여야 한다.
- Uni-Axial & Bi-Axial
-Bi-Axial 형식은 2 방향의 수평변위 측정을 동시에 할 수 있어 수평변위 측정이 보다 용이하다.

6. 참고문헌

1. 신풍상사 (1995), "Accustar Electronic Clinometer에 관한 기술자료"
2. 홍인상사 (1994), "계측관리", pp. 20, 50
3. AASHTO (1978), "Standard Method for Installing, Monitoring and Processing Data of the Traveling Type Slope Inclinator," American Association of State Highway and Transportation Officials, Des. T 254-78, pp.941-950
4. Dowding (1985), "Blast Vibration Monitoring and Control",
5. Dunicliff(1988), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, pp.106,108
6. SINCO (1989), "Slope Indicator's Brochure"