

삽입식 경사계에 의한 수평변위의 계측

류 기 송 · 김 현 태
(농어촌진흥공사 농공기술연구소)

1. 서 언

최근 건설공사가 대형화됨에 따라 공사의 안전성과 주변지반에 미치는 영향을 정확히 파악하여 경제적인 시공을 하려는 계측관리기 시대적으로 부응하여 강력히 요구되고 있으며, 우리 나라에서도 건설공사에서 계측관리가 많이 시행되고 있다. 따라서 본고에서는 시공중에 성토지반 및 흙막이벽 등의 수평변형을 측정, 검토하여 공사의 안전을 도모할 수 있는 삽입식 경사계의 측정 원리 및 자료 정리에 대하여 간단히 기술하고자 한다.

2. 계측개요

성토공, 흙막이공 등의 변위계측은 구조물

의 거동을 탐사하는데 매우 중요한 계측항목으로서 각종의 계측기를 사용하여 계측되고 있으며, 그 계측방법은 계측기 종류에 따라 변위식, 변형식, 경사계식으로 나누어진다.

가. 변위식

변위식은 지반의 측방변위를 직접 측정하는 것인데 지반활동측정에 이용되는 지표면 변위계가 이에 해당되며, 그림. 1과 같이 2점간의 상대변위를 변위계(자기기록 또는 전기식)로 측정하는 것이다.

나. 변형식

변형식은 보링공에 파이프 등을 매설하고 그림. 2와 같이 소요 심도마다 양쪽에 변형계를 2개씩 설치하여 파이프의 휨변형을 측정하고 이것을 2중 적분하여 수평변위를 구하는

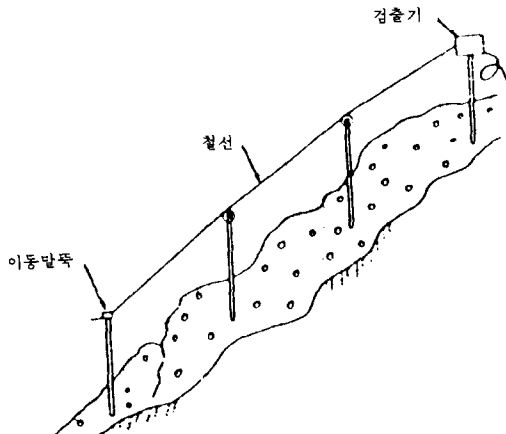


그림. 1. 지표면 변위계(신축계)

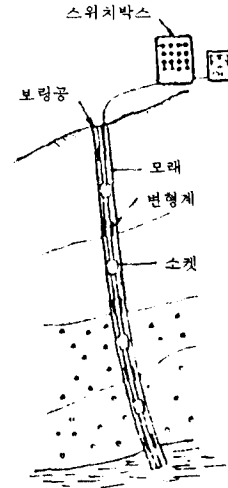


그림. 2. 파이프 변형계

방법인데 수평변위에 의한 파이프 등의 단면 형상 변형이나 적분에 의한 오차가 누적되므로 오차가 많으며, 파이프의 휨변형과 변위는 식(1)~(3)으로 구한다.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a - \epsilon_b}{2} \dots\dots\dots (1)$$

$$i = \frac{2}{d} \int \epsilon dx \dots\dots\dots (2)$$

$$y = - \int i dx \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서, ϵ : 파이프의 휨변형
- ϵ_a : 수평휨변형
- ϵ_b : ϵ_a : 반대측의 휨변형
- i : 휨변형을 1회 적분하여 구한 경사각(rad)
- d : 파이프의 지름(mm)
- y : 변위(mm)

파이프 변형계는 일반적으로 지반 활동지역에 사용되고 있으나 변위산출보다도 활동면 심도확인에 효과가 크다. 이러한 방법으로 흙막이벽이나 기초말뚝에 변형계이지를 설치하여 측정된 휨변형을 가지고 식(2), (3)에 의하여 측방변위를 구할 수 있으며, 지중연속벽의 심도마다 철근계를 2개씩 설치하고凸측과凹측의 2개 철근계의 측정치를 환산하여 변위를 구하는 경우도 있다.

다. 경사계식

보링공에 +자홈이 있는 알루미늄제 유도관을 매설하고 수평변위에 따라서 생기는 유도관의 경사각을 측정하여 변위를 구하는 방법인데 식(3)과 같이 변위는 경사각을 1회 적분하여 구할 수 있으므로 전술한 변형식보다 정밀도가 높으며, 경사계 종류에 따라서 2가지로 분류된다.

1) 고정식경사계

이것은 유도관의 소요 심도에 경사계를 매설하고 경사각을 측정하는 경사계로서 1개의 유도관에 설치되는 경사계가 보통 10개 정도이므로 관측간격이 드물기 때문에 정밀도는 삽입정보보다 낮으며, 또한 측정수 만큼 경사계가 필요하므로 경사계 설치비용이 많으나 자동계측이 가능하므로 경사계측에 소요되는 인건비를 많이 줄일 수 있다.

따라서 평상시에도 변위를 점검할 필요가 있을 경우 및 측정 정밀도를 높여야 할 경우에 효과적이다. 최근에는 컴퓨터로 신속히 변위량을 구하여 분포도를 작성하는 방법을 채용하는 경우가 많다.

2) 삽입식경사계

이것은 그림. 3과 같이 유도관에 휴대용 프로우브(probe)를 삽입하고 경사각을 측정하는 경사계로서 경사계의 삽입을 인력으로 해야하므로 인건비가 많이 소요되나 경사계 1대를 사용하여 여러 유도관에서 측정을 할 수 있으므로 프로우브 비용을 절감할 수 있고 연속적으로 측정할 수 있으므로 정밀도가 높다.

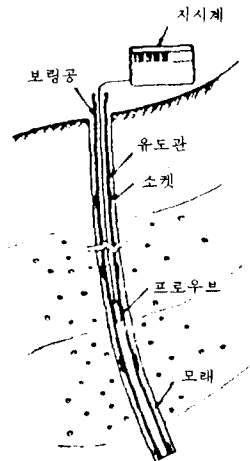


그림. 3. 삽입식 경사계

3. 삽입식 경사계에 의한 수평변위 계측

가. 계측기의 구성

삽입식 연직경사계는 매설부(유도관, 커플링, 상하보호마개)와 측정부(경사계 본체, 케이블, 지시계, 릴)로 구성되어 있다. 유도관은 그림. 4와 같이 +자홈이 있는 알미늄관으로서 지반 내의 보링공 및 흙막이벽 등에 설치되며, 계측 시는 매설된 유도관의 홈에 경사계를 삽입하고 각 심도마다 경사각을 측정하여 지반이나 기초의 측방변위를 구한다. 삽입식 연직경사계의 사양(예)은 표-1과 같다.

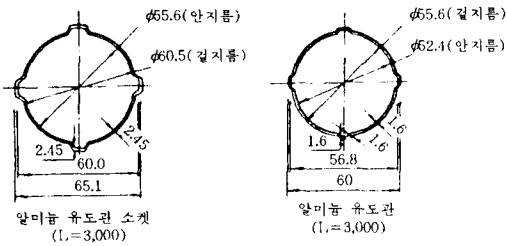


그림. 4. 알미늄 유도관의 단면 형상

나. 유도관의 매설

유도관 매설은 보링공에 매설하는 경우와 흙막이벽 등에 매설하는 경우가 있다.

1) 보링공

유도관을 커플링으로 연결하고 리벳팅하면서 조립하여 보링공에 삽입하며, 커플링 이음부에는 오니 등의 침입을 방지하기 위하여 테이프 등으로 지수를 하고 유도관과 보링공벽 사이에는 모래를 채우거나 벤토나이트 시멘트로 그라우팅을 한다. 이때 배합은 그라우트재의 단위중량과 변형계수가 주변 지반과 거의 같도록 한다.

2) 흙막이벽·기초말뚝

흙막이벽이나 기초말뚝 시공 중에 그림. 5

표-1. 삽입식 연직경사계의 사양(예)

1. 프로브(probe)
측정범위 : $\pm 53^\circ$
감도 : $\pm 0.02\text{mm}/500\text{mm}$
총길이 : 653mm
무게 : 1.8kgf
재질 : 스테인레스로서 완전방수
2. 지시계
전원 : 12V배터리 또는 110/220V AC 겸용
무게 : 3kgf
화면 : 액정표시판
3. 케이블
지름 : 10.7mm
길이 : 사용자 요구에 따라
무게 : 15kgf/100m
기타 : 네오프렌방수, 0.5m 마다 눈금표시
4. 유도관
재질 : 알루미늄
길이 : 3m
지름 : 알루미늄 겹지름(안지름) = 71mm (69mm), 86(84)
5. 커플링
재질 : 알루미늄
길이 : 30cm
6. 보호마개
재질 : 알루미늄
길이 : 5cm 또는 10cm
7. 설치공구
드릴, 리벳건, 클램프, 리벳, 테이프, 실리콘

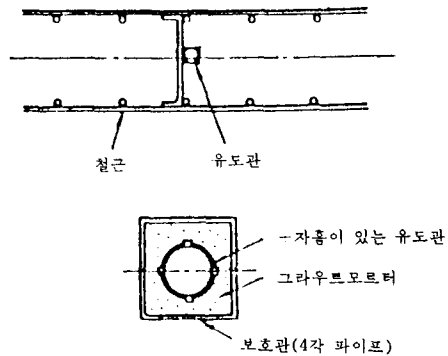


그림. 5. 지중연속벽의 유도관 설치예

와 같이 미리 보호관(강관 ϕ 약114mm 또는 4

각 파이프 약 100mm)을 매설하고 시공종료 후 그 안에 유도관을 매설한다. 이때 유의할 사항은 보호관을 설치해도 흠막이벽이나 기초 말뚝의 휨강성에 큰 변화가 없어야 하며, 특히 널말뚝과 같이 휨강성이 적은 구조물에 설치할 때는 보호관의 형상과 설치위치를 충분히 검토해야 한다.

다. 계측방법

삽입식 연직경사계의 계측은 다음 순서로 한다.

① 유도관의 보호마개를 열고 측정하고자 하는 방향의 흠에 맞추어 프로우브를 유도관의 최저부까지 삽입한다.

② 지시기를 케이블에 접속하고 스위치를 켜는다.

③ 지시치가 안정되면 50cm씩 표시된 케이블을 50cm간격으로 들어 올려서 각 심도의 지시치를 야장에 기록한다(자동식은 원거리 스위치를 누를 때마다 지시치가 휴대용 컴퓨터에 입력된다)

④ 상단까지 측정이 완료되면 프로우브를 180° 회전시켜 다시 유도관의 최저부까지 삽입하고 ③의 방법을 반복한다.

측정하려는 방향을 180°로 바꾸어 측정하여 2개의 지시치(정방향 및 역방향)를 구하는 것은 프로우브 고유의 오차(프로우브 물러축의 길이가 다르고 또한 영점설정 등에 의한 오차)를 제거하기 위한 것이다. 삽입식 경사계와 지시기를 이용하여 그림. 6과 같이 50cm 간격으로 측정하면 그 간격에 대한 유도관의 변위는 식(4)로 구한다.

$$\delta = 500 \sin \theta \approx 500 \theta (\approx 500 \tan \theta)$$

..... (4)

여기서,

δ : 유도관의 50cm사이의 변위(mm)

θ : 경사각(rad)

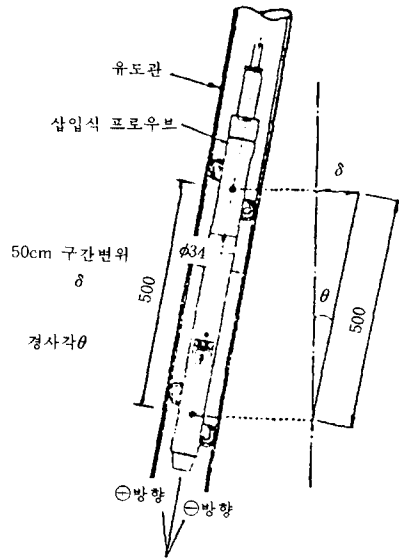


그림. 6. 경사각의 구간변위

θ 가 미소하면 $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ 로 되며, 실제 경사계의 감도는 단위출력당 4×10^{-5} (rad)로 되도록 조정되어 정방향 지시기의 지시치가 식(5)와 같이 되도록 제작되어 있다.

$$X^+ = \frac{\theta}{4 \times 10^{-5}} + \alpha$$

$$= 500 \times \theta \times 100 \times \frac{1}{2} + \alpha \dots \dots \dots (5)$$

여기서,

X^+ : 정방향 지시기의 지시치

θ : 경사각(rad)

α : 경사계 고유의 오차

식(4), (5)를 비교하면 식(5)의 500θ 가 식(4)과 같다는 것을 알 수 있으며, 여기서 α 를 고려하지 않으면 정방향의 $X_{(+)}$ 는 변위(δ)의 정수배($100 \times 1/2$ 배)가 된다. 같은 방법으로 역방향의 지시치 X^- 는 식(6)으로, 정방향과 역방향의 지시치 차는 식(7)으로 구한다.

$$X^- = \frac{-\theta}{4 \times 10^{-5}} + \alpha$$

$$= -500 \times \theta \times 100 \times \frac{1}{2} + \alpha \dots\dots\dots (6)$$

$$X^+ - X^- = 500 \times \theta \times 100 = \delta \times 100 \dots\dots (7)$$

고유오차(α)를 무시하면 식(7)은 실제 변위의 정수배(100)로 측정치가 얻어지며, 식(7)으로 구해지는 계측치의 최소자리는 0.01mm 단위로 된다. 따라서 식(7)은 식(8)으로 된다.

$$X^+ - X^- = \delta \dots\dots\dots (8)$$

여기서, δ : 유도관의 50cm사이의 변위 (0.01mm)

4. 자료정리

가. 성토공

식(7)으로 구한 변위(δ)는 유도관의 50cm 간격에 대한 구간변위이므로 유도관의 변위곡선을 구하려면 구간변위를 누적해야 한다. 유도관 최저부가 구조물시공의 영향범위 외에 있거나 상당히 단단한 지반에 설치하여 부동점이라 생각될 때는 최저부의 변위를 0으로 놓고 아래부터 δ 를 누적하면 좋다.

이때 누적변위의 최종치는 지표면변위와 같아야 하며, 이 값이 트랜시트의 관찰결과와 다르면 유도관을 포함한 경사계 측정정밀도 등의 원인에 의한 것이므로 오차 보정은 각 측정점이 같은 오차가 포함되어 있다고 보고 심도(하부에서부터 누적하기 때문에 하부로부터의 거리)에 따라 분배하는 경우가 많다.

이와 같이 구한 유도관의 변위(δ 의 누계변위)는 유도관 매설 시에 생기는 변형 및 보링공 연직성의 영향 등을 포함하는 유도관의 절대변위이므로 반드시 지반 및 기초의 측방변위를 정확히 나타낸다고 할 수 없다. 따라서 유도관 매설 후 1주 정도 경과한 후의 측정치

를 기준치로 하여 이로부터 변화량을 지반 또는 기초변위의 변화량으로 하면 좋다.

삽입식 경사계 측정자료의 계산을 계산기로 하는 경우는 표-2의 양식을 사용하면 알기 쉽게 정리할 수 있으며, 최근에는 컴퓨터보급에 따라 연산, 작성, 작도를 모두 자동적으로 처리하는 경우가 많다.

나. 흙막이벽

흙막이벽의 거동측정은 대부분의 경우 그림.7과 같이 경사계, 변위계, 토압계, 수위계 등이 사용되며, 경사계의 경우는 유도관 최저부의 변위가 0으로 볼 수 없으므로 측량 및 지표면변위계(신축계)등에 의하여 유도관 정상부의 변위량을 측정하고 그 값을 기준으로 위로부터 변위(δ)를 누적한다.

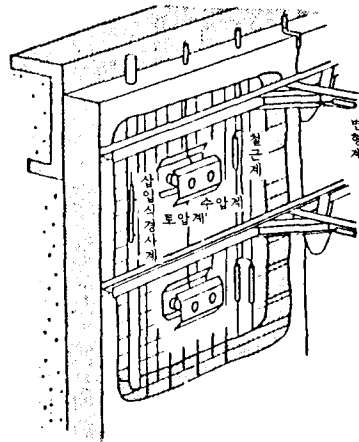


그림. 7. 흙막이벽의 각종계측기

1) 변형

흙막이벽의 변형은 일정간격으로 측정된 경사각에 측정구간길이를 곱하여 구한 구간변위를 흙막이벽 하단에서 누적하여 계산한다. 일반적으로 흙막이벽 하단은 양질지반에 근입되어 있어 이동이 없다고 가정하며, 이동 가능

표-2 삼입식 연직경사계의 측정결과표(예)

삼입식 연직경사계 측정 결과 표							
공사명 :	유도관 상단표고 : + (m)			최초 측정일시 : 199 :			
측정공번호 :	측정자 :			측정일시 : 199 :			
X 방 향							
정 부 에 서 의 심 도 (m)	A (0.01mm)	B (0.01mm)	C (0.01mm)	D (cm)	F (cm)	H (cm)	I (cm)
	정방향 지시치 X ⁺	역방향 지시치 X ⁻	(X ⁺ -X ⁻)	변위량 $\delta=C/1000$	현 재 누 계 변위량	총 전 누 계 변위량	변 위 변화량 (F-H)

(주)F : 최저부 고정점부터 측정치의 누계변위량

성이 있을 경우는 흠막이벽 상단 및 버팀대 위치에서의 변위를 다른 방법으로 측정하고 이를 기점으로 흠막이벽의 변형을 계산한다. 또한 흠막이벽의 변형과 굴착부 주변의 침하는 밀접한 관계가 있으므로 정지조건에 따라서 관리를 한다.

2) 응력

흠막이벽의 응력은 경사각을 미분한 곡률을 이용하여 이론적으로 계산하며, 곡률은 가장

간단한 1차식으로 구하면 식(9)과 같다.

$$\varphi(i+\ell/2) = \{(i+\ell)\theta - \theta(i)\} / \ell \dots\dots\dots (9)$$

여기서,

$\varphi(i+\ell/2)$: 심도 (i+ℓ/2)에서의 곡률(cm⁻¹)

$\theta(i+\ell), \theta(i)$: 심도 (i+ℓ) 및 i에서 측정된

경사각(rad)

ℓ : 측정구간길이(cm)

흠막이벽의 응력은 이 곡률로부터 그림. 8에 나타낸 부재의 변형분포를 고려하여 계산

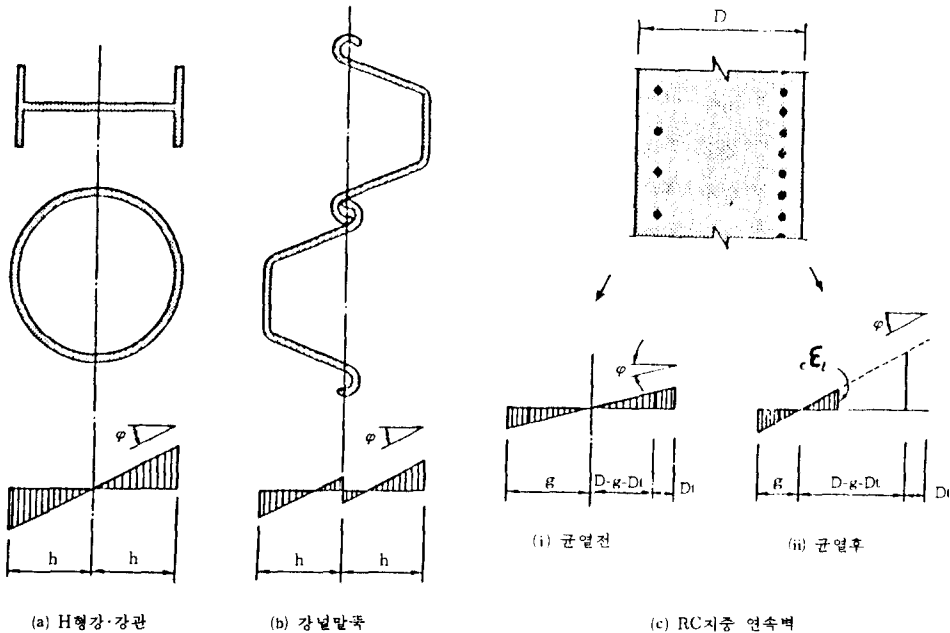


그림. 8. 흠막이벽 부재단면의 변형분포

하며, 흙막이벽에는 축력이 작용하지 않는 순
휨상태로 가정한다.

가) H형강, 강관의 경우

H형강 또는 강관(그림. 8 참조)을 흙막이
벽으로 사용할 경우의 압축 및 인장연응력은
식(10)으로 구한다.

$$N_c = N_t = \varphi \times h \times E_s \dots\dots\dots (10)$$

여기서,

- N_c : 압축응력(kgf/cm²)
- N_t : 인장응력(kgf/cm²)
- φ : 곡률(cm⁻¹)
- h : 중립축에서 강재연단까지의 거리(cm)
- E_s : 강재의 탄성계수(kgf/cm²)

나) 강널말뚝의 경우

강널말뚝(그림. 8 참조)을 흙막이벽으로
사용할 경우의 연응력은 이음부의 활동을 고
려하여 식(11)으로 구한다.

$$N_c = N_t = \alpha \times \varphi \times h \times E_s \dots\dots\dots (11)$$

여기서,

- N_c : 압축응력(kgf/cm²)
- N_t : 인장응력(kgf/cm²)
- α : 이음부에 따른 보정계수
(0.6~0.7 정도)
- φ : 곡률(cm⁻¹)
- h : 중립축에서 강재연단까지의 거리(cm)
- E_s : 강재의 탄성계수(kgf/cm²)

다) RC지중연속벽의 경우

RC지중연속벽(그림. 8 참조)을 흙막이벽
으로 사용할 경우의 응력은 철근량, 콘크리트
균열 등을 고려한 변형분포로부터 콘크리트의
압축 및 인장연응력을 식(12, 13)으로 구한
다.

$$N_{cc} = \varphi \times g \times E_c \dots\dots\dots (12)$$

$$N_{ts} = \varphi \times (D - g - D_t) \times E_s \dots\dots\dots (13)$$

여기서,

- N_{cc} : 콘크리트의 압축응력(kgf/cm²)
 - N_{ts} : 철근의 인장응력(kgf/cm²)
 - φ : 곡률(cm⁻¹)
 - g : 중립축에서 압축연까지의 거리(cm)
 - D : 흙막이벽의 두께
 - D_t : 인장철근의 철근덮개의 두께(cm)
 - E_c : 콘크리트의 탄성계수(kgf/cm²)
 - E_s : 강재의 탄성계수(kgf/cm²)
- 콘크리트의 인장연 변형이나 균열변형(ϵ_{ct})

을 초과할 때는 그림. 8(c)(i)에서 (i)의 상태
로 되어 중립축은 압축축쪽으로 이동한다.

3) 모멘트

흙막이벽의 모멘트는 전술한 곡률에 변형분
포를 고려한 흙막이벽의 강성(EI)을 곱하여
식(14)으로 구한다.

$$M = -EI \times \varphi \dots\dots\dots (14)$$

여기서,

- M : 흙막이벽의 모멘트(kgf·cm)
- E : 흙막이벽의 탄성계수(kgf/cm²)
- I : 흙막이벽의 단면2차 모멘트(cm⁴)
- φ : 곡률(cm⁻¹)

휨강성은 그림. 8의 변형분포를 고려하며,
강널말뚝의 휨강성은 완전히 맞물려진 값의
0.4~0.5배 정도로 되며, RC지중연속벽의 강
성은 균열발생후에 급격히 저하하여 곡률과
인장철근비에 따라 변화한다.

4) 지반의 전단력

흙막이벽의 경사각 측정치로부터 지반에 생
기는 전단력을 추정하여 지반의 히빙을 검토
한다. 지반에 생기는 전단응력은 식(15), 지
반이 가지고 있는 전단강도는 식(16)으로 구
한다.

$$\tau_s = G_s \times \varphi_w \dots\dots\dots (15)$$

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (16)$$

여기서,

τ_s : 지반에 생기는 전단응력(kgf/cm²)

G_s : 지반의 전단탄성정수(kgf/cm²)

ϕ_w : 전단변형각(흙막이벽의 경사각)
(rad)

τ : 지반의 전단강도(kgf/cm²)

c : 지반의 점착력(kgf/cm²)

σ : 지반의 유효상재하중(kgf/cm²)

ϕ : 지반의 내부마찰각(°)

τ_s 와 τ 를 비교하여 지반에 생기는 전단응력 비를 식(17)으로 구하여 지반의 상태를 추정한다.

$$R_{ts} = F_s \times \frac{\tau_s}{\tau} \dots\dots\dots (17)$$

여기서,

R_{ts} : 지반에 생기는 전단응력비

F_s : 안전율

τ_s : 지반에 생기는 전단응력(kgf/cm²)

τ : 지반의 전단강도(kgf/cm²)

일반적으로 안전율은 3으로 하며, $R_{ts} > 1$ 이면 주의를 해야 한다. $R_{ts} > 2$ 의 경우와 $R_{ts} > 1$ 이 3m이상 연속하여 발생할 경우는 대책을 세워야 한다. 히빙을 검토해야 할 지반의 전단강도는 전단변형각이 0.01~0.03rad(전단변형 1~3%)까지는 대략 직선으로 증가하며, 그 이후는 모래지반에서는 파괴, 점성토지반에서는 항복상태에 가깝다. 따라서 전단변형이 1%에 가까울 때는 지반에 생기는 전단력 비로부터 지반의 안정을 검토해야 한다.

5. 결 언

지금까지 지반 및 기초의 변위계측에 대하여 간단히 소개하였다. 삽입식 경사계의 최대 문제점은 측정에서 자료정리까지 많은 노력이 필요한 것인데 현재는 삽입식 경사계용 리코더가 개발되어 측정치가 내장메모리에 기록보존되므로 지시치의 읽음과 야장기록이 필요없고 사무실에서 컴퓨터에 접속하여 출력할 수 있게 되었으며, 변위계측의 중요성이 점점 높아지고 있으므로 시대 요청에 부응하여 더욱 간편한 계측기의 소형화, 노동력절약화, 신속화 등의 실현이 요망된다.

참 고 문 헌

1. 고용일, 남순성(1994) : “흙막이구조물(XI I-1)”, 한국지반공학회지, 10-4, pp.191~209.
2. 고용일, 남순성(1995) : “흙막이구조물(XI I-2)”, 한국지반공학회지, 11-1, pp.135~165.
3. (주)신풍계측산업 편(1994) “토목현장계측기기”, 동일사
4. (주)홍인 편(1994) “계측관리”
5. 矢部, 興一, 小澤 靖(1984) : “地盤および基礎の側力變位計測機器”, 基礎工, 12-5, pp.37~41.
6. 野尻 明美, 淺野 利三郎(1984) : “挿入式傾斜計による計測管理”, 基礎工, 12-5, pp. 105~109.