

토질공학에서의 계측관리

곽규식 / 특수기술개발부 대리

일반적으로 토질공학과 관련한 계측은 크게 두개의 영역으로 구분할 수 있다. 첫째는 설계과정에서 이루어지는 지반의 성질 및 주변현황을 파악하는 조사과정을 말한다. 둘째는 시공과정에서 지하수압을 포함한 토압, 지반의 변위 및 구조물의 응력 등을 측정하는 것을 말하는데, 토질공학에서는 이를 계측이라 한다.

토공작업의 대상이 되는 지반은 일반적으로 공학적 성질이 현저히 다른 여러개의 토층으로 구성되어 있으며, 각 토층 또한 불균질하다. 구조를 기초 지반의 경우 비선형적인 거동특성과 응력상태, 시간, 공간 및 환경 등에 따른 변화로 설계시 지반의 특성요소를 정확히 반영하는데 어려움이 따르게 된다.

계측이란 설계단계에서 예측한 지반거동의 불확실성으로 발생하는 문제점을 시공중에 발견하여, 설계 및 시공에 Feedback함으로써 예기치 못한 사고를 미연에 방지하고, 설계 및 시공방법을 적절히 수정하여 공사의 안전성과 경제성을 도모하기 위해 실시하는 것이다.

상기 내용과 관련하여 현장계측을 위한 전반적인 기초이론, 기본계측기의 특성, 관리기준 및 분석기법에 대해 3회에 걸쳐 기술하고자 한다.

현장계측 위한 이론

지반내 생기는 수평 및 연직응력은 흙자체의 무게, 지표면 위에 재하된 하중조건, 지하수위 유동상태 및 토류구조물의 형태에 따라 다르다.

따라서 현장계측시 측정변수들인 응력, 침하, 간극수압 및 변위 등에 대한 이론적 개념에 대해 기술하고자 한다.

현장계측 변수

1. 수직응력

지표면이 수평하고 흙의 성질이 수평방향으로 변화하지 않는다면 지반내의 임의 요소의 연직면과 수평면 상에는 전단응력이 발생하지 않는다.

흙의 단위중량이 전 깊이에 걸쳐 일정하다면 연직응력 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = Y \times Z \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

Y : 흙의 단위중량

Z : 임의 요소의 깊이

$\langle \text{식 1} \rangle$ 과 같이 연직응력은 흙의 단위중량에 비례함을 알 수 있다.

그러나 실제지반에서는 깊이에 따라 단위중량이 다르고 지하수위에 대한 영향을 고려해야 한다.

$\langle \text{그림 1 (b)} \rangle$ 와 같이

토층이 물속에 잠겨 있을 때 연직응력 α

$$\alpha = Z_1 \times Y_{1,\text{sat}} + Z_2 \times Y_{2,\text{sat}} + Y_w \times h_w \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

Y_{sat} : 포화 단위중량

Y_w : 물의 단위중량

이때 물에 의하여 전달되는 압력을 간극수압 U 라 하며 $U = (h_w + Z) \times Y_w \quad \langle \text{식 3} \rangle$

따라서 흙입자에 전달되는 압력은 연직응력에서 수압을 뺀값이므로

$$\alpha_v = \alpha - U = Z_1 \times Y_{1,\text{sat}} + Z_2 \times Y_{2,\text{sat}} + Y_w \times h_w - (h_w + Z) \times Y_w$$

$$= Z_1 \times Y_{1,\text{sub}} + Z_2 \times Y_{2,\text{sub}} \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

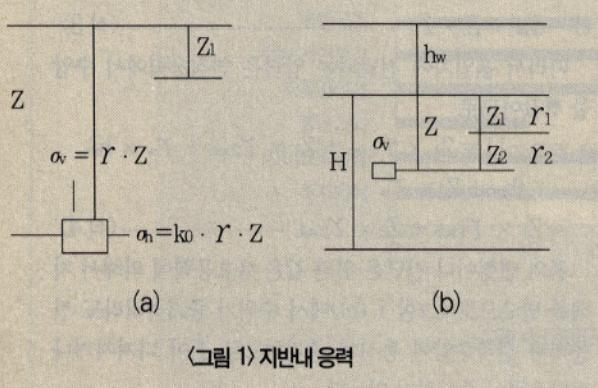
흙의 변형이나 전단은 위와 같은 유효응력에 의해서 지배를 받으므로 $\langle \text{그림 1 (b)} \rangle$ 에서 수위가 증가하더라도 전응력과 간극수압이 동시에 증가하므로 흙이 다져지거나 전단응력이 증가하지 않는다.

(표 1) 특정한 흙에 대한 탄성적 성질(Es)의 대표적인 값의 범위

Soil	Es	
	ksi	Kg/cm ²
점토		
대단히 연약한	0.05~0.4	3~30
연약한	0.2~0.6	20~40
중간의	0.6~1.2	45~90
단단한	1~3	70~200
모래질	4~6	300~425
표석점토(결정)	1.5~22	100~1600
황토	2~8	150~600
모래		
실트질	1~3	50~200
느슨한	1.5~3.5	100~250
조밀한	7~12	500~1000
모래 및 자갈		
느슨한	14~28	800~2000
조밀한	7~20	500~1400
이판암	20~2000	1400~14000
실트	0.3~3	20~200

(표 2) 포이슨 비(μ)의 대표적인 값의 범위

흙의 종류	μ
포화된 점토	0.4~0.5
불포화 점토	0.1~0.3
모래질 점토	0.2~0.3
실트	0.3~0.35
조밀한 모래	0.2~0.4
거친(간극비 = 0.4~0.7)	0.15
미립(간극비 = 0.4~0.7)	0.25
암	0.1~0.4(어느 정도 암반의 형태에 따라 다르다)
황토	0.1~0.3
얼음	0.36
콘크리트	0.15



(그림 1) 지반내 응력

2. 수평응력

물과 같은 유체에서는 한요소에 작용하는 연직응력과 수평응력이 동일하지만 자연지반내에서는 서로 다른 값을 보인다.

$$\alpha_v = K \times \alpha_v \quad \text{.....(식 5)}$$

K : 연직응력에 대한 수평응력비 (토압계수)

α_v : 수평응력

여기서 K 값은 수평방향으로 변위를 받느냐에 따라 차이가 있으며 수평방향으로 전혀 변위가 없을 때의 토압계수를 정지토압계수(K_0)라고 한다.

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \quad \text{.....(식 6)}$$

3. 간극수압

자연지반의 간극수압에 의한 유효응력 개념은 [\(그림 1\)](#)에서 언급하였다. 그러나 지표면에 하중을 가하면 간극수압이 변하여 지반의 유효응력에 절대적인 영향을 미치므로 하중조건에 따른 간극수압의 변화상태를 분석할 필요가 있다. 점토지반이 갑자기 하중을 받게되면 세립자속의 간극수의 흐름이 점착작용에 의하여 저지되면서 간극수압이 발생한다. 따라서 초기하중 재하시 유효응력은 변화가 없으나 시간이 경과함에 따라 점차 지반이 압밀되면서 유효응력이 증가하게 된다.

4. 지반의 침하

건설공사시 하중에 의한 침하량을 계산하는 방법은 지반은 균질하고 등방압밀상태이며 탄성체로 취급하기 때문에 현장 계측치와는 차이를 보이는 경우가 종종 발생한다. 침하는 일반적으로 즉시침하, 압밀침하, 2차압밀로 이루어지며, 점착력이 없는 흙에서는 약간의 Creep효과와 함께 즉시침하가 대부분을 차지한다.

점토층에서는 하중이 재하되는 경우 점토층의 투수계수가 작기때문에 물의 배수는 차체된다. 따라서 즉시침하량은 매우작아 일반적으로 무시하며 압밀침하가 지배적이다. 그러나 실제로는 비압축성 탄성체와 같은 성질을 가지고 있어 일정한 체적에서 침하가 발생한다.

사질토 지반에서 기초의 침하는 즉시침하뿐이며 점성

토 지반에서의 압밀침하와 같이 장기간 계속되는 침하는 없다. 이는 사질토의 투수계수가 크기 때문에 대부분의 침하는 기초하중이 재하되는 동안 발생하기 때문이다.

하중의 적용후에 즉시침하량은 탄성이론(Timoshenko와 Goodier)의 식으로 계산할 수 있다.

$$\Delta H = q \times B \times (1 - \mu^2) / Es \times Iw \quad \text{식 7}$$

ΔH : 침하량

q : Es 의 단위로 접지압력의 크기

B : ΔH 의 단위를 갖는 기초의 최소 측면 크기

Iw : 기초의 형태나 강성에 따른 영향계수

Es : 흙의 탄성적 성질(표 1) 참조

μ : 포아슨비

위 식은 불포화 점토, 모래나 실트층에 적용하는 것이 좋다. 기초지반의 성질과 종류에 따라 B 의 값이 결정되며 학자들에 따라 다소 차이가 있다.

μ (포아슨비)는 흙입자의 크기에 따라 영향을 받으며 연약한 점토에서는 보통 0.5를 사용한다. (표2) 참조

굴착공사시의 흙의 거동

1. 토압 이론

일반적으로 토압은 벽체의 변위에 따라 정지토압, 주동토압 및 수동토압으로 구분할 수 있다.

① 정지토압은 옹벽이 조금도 이동하지 않는 상태, 예를 들면 견고한 지중구조물의 측면에 작용하는 토압같은 것이다. 따라서 느슨하게 다져진 흙에서는 굳게 다져진 흙의 경우보다 작다.

$$K_0 = 1 - \sin \phi$$

② 주동토압은 옹벽을 전방으로 이동시킨 상태에서 흙이 옹벽배면에 작용하는 토압으로써, 흙이 팽창하여 옹벽 배면에 작용하는 토압을 말하며, 주동토압계수 K_a 는 1.0 보다 작다.

$$K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$$

③ 수동토압은 옹벽에 외력을 가하여 후방으로 옹벽을 밀어낼수 있는 경우, 옹벽배면의 흙이 압축되므로써 생기는 흙의 저항이며, 수동토압계수 K_p 는 항상 1.0보다 크다.

$$K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$$

Rankine의 토압이론

Rankine의 방법에서는 벽면과 뒤채움과의 마찰을 무시한다는 가정아래 토압을 계산하며, 토압의 방향은 지표면 경사와 일치한다. 실제에 있어서는 마찰이 존재하므로 벽체면 가까이에서는 수평면이나 연직면이 주응력면이 되지 않는다. 결국 옹벽벽면이 거친경우에 실제 주동토압은 Rankine에 의하여 계산된 토압보다 작게 나타난다.

Coulomb의 토압이론

Coulomb의 토압론은 옹벽배면의 흙이 옹벽배면을 따라 미끄러져 떨어지려고 할때의 평형조건에서 토압을 구한 것이다. 일반적으로 중요 토류 구조물의 토압 평가시 Coulomb의 토압론을 이용하며, 보통의 옹벽 계산시에는 벽면과 흙 사이에 마찰이 전혀 없다고 가정한 Rankine의 방법을 주로 사용한다.

굴착공사 설계용 토압이론

(가) Terzaghi의 토압 (1941)

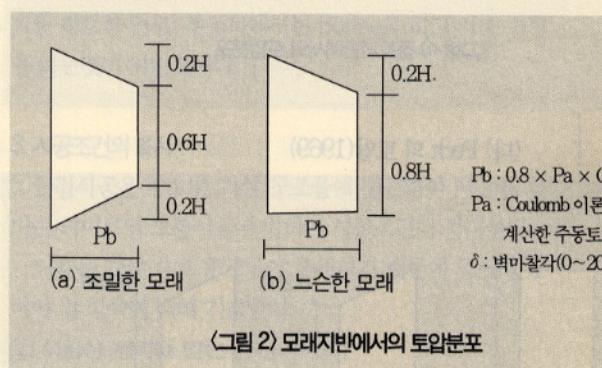


그림 2) 모래지반에서의 토압분포

(나) Terzaghi & Peck

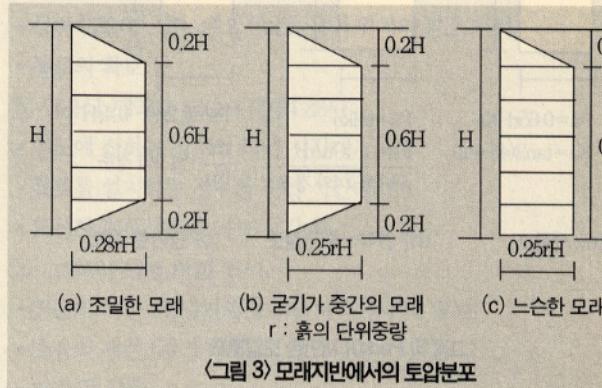
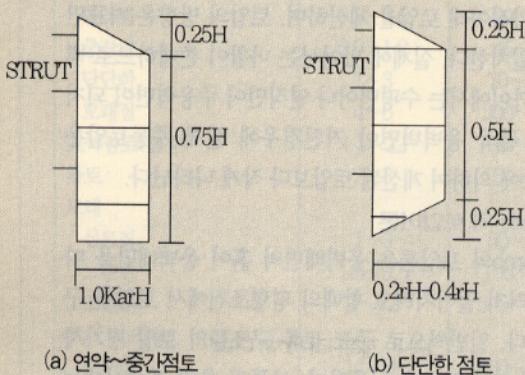


그림 3) 모래지반에서의 토압분포

2. 융기(Heaving)

Heaving이란 연약한 점토지반을 굴착할때 굴착면의 토괴중량이 굴착저면 이하의 지반 지지력보다 크게되면 지반내의 흙이 미끄러져 굴착저면이 부풀어 오르는 현상으로 대형사고와 연관되는 경우가 많기 때문에 굴착공사 시 특히 주의해야 할 문제이다.



$$Ka = 1 - m(2q_u/rH)$$

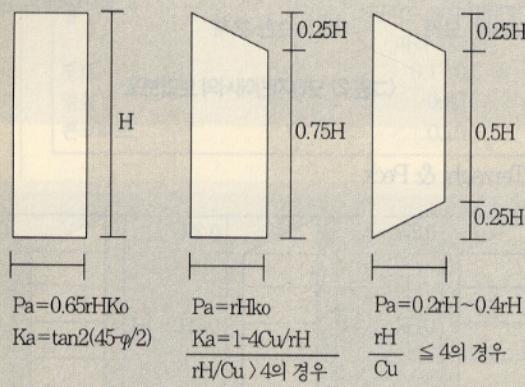
m : 보정계수

굴착깊이 13.4m 보다 얕은 경우 : 0.4

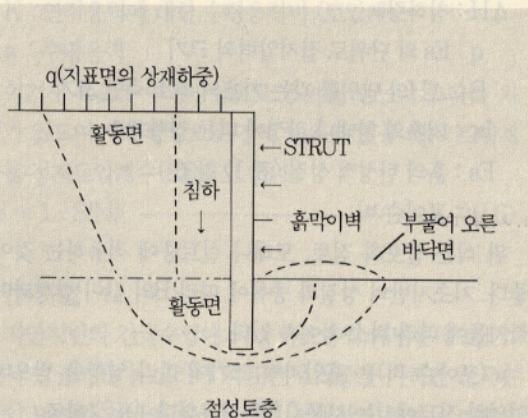
기타 : 1.0~2.0

〈그림 4〉 점토지반에서의 토크분포

(d) Peck 의 토크(1969)



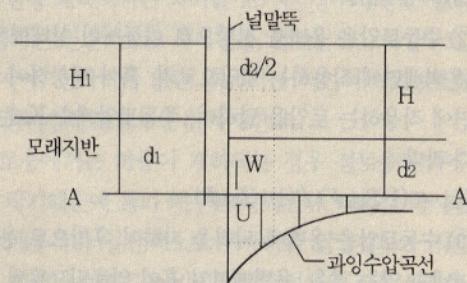
〈그림 5〉 Peck이 제안한 토크분포



〈그림 6〉 Heaving 현상

3. Boiling

지하수위가 높은 모래 혹은 자갈층과 같은 투수성의 지반을 강널말뚝이나 연속벽과 같은 차수성의 벽을 사용하여 터파기 내부를 배수하며 굴착하면 〈그림 7〉과 같이 벽의 배면과 터파기면의 지하수위차에 따라 생기는 상향의 침투압에 의해 모래의 유효응력이 감소, 혹은 소멸되고 부



〈그림 7〉 Boiling 현상

근에 물길이 발생하든가 벽부근의 모래가 끓어 나오는 것처럼 보인다. 이와같은 현상을 Boiling이라 하며, 이 경우 벽전면의 수동측 저항과 벽하단의 지지력이 없어질 뿐만 아니라 토팍자의 이동도 발생하기 때문에 구조물 및 주변 지반이 파괴되고 예기치 못한 사고와 연결된다.

계측관리 계획

계측관리의 계획단계에서는 자료를 충분히 수집, 조사하여 계측관리의 필요성을 파악하는 것이 중요하다.

아래 <그림 8>은 계측관리의 흐름을 나타낸 것이다.

1. 기설 구조물의 조사

기설 구조물에 대한 조사는 그 구조물의 관리 책임자 및 소유자 등으로부터 자료를 빌려 행하는 것이 일반적이다. 이러한 자료중 건설당시의 설계도서류로 부터는 다음 사항을 주로 조사한다.

- 구조물의 설계도, 구조계산서
- 사용재료와 그의 재질, 설계 지반조건
- 사용된 기준치 (설계조건, 허용지지력, 허용응력 등)
- 기초공, 하부공, 상부공사의 시공기록

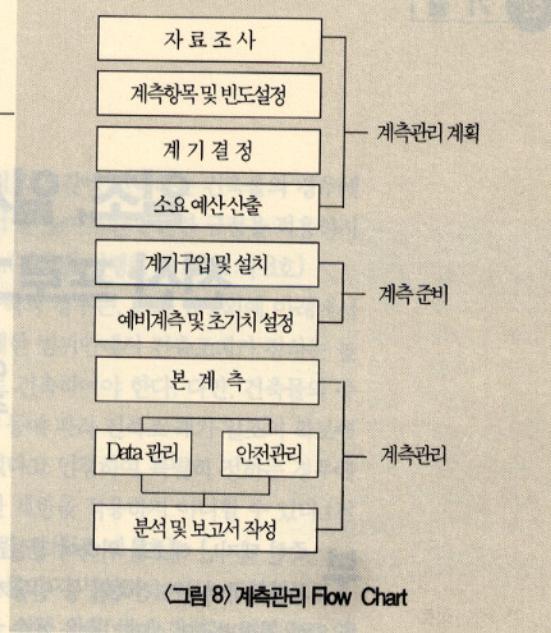
구조물은 건설후 보전외에 다른 목적에서 손대지는 경우가 많으므로 보전 사용 상황 등에 관한 조사도 필요하다.

- 건설 시기
- 변형, 지진, 화재 등 피해 기록
- 수선, 보강한 기록
- 관리 기준

이와 같은 기설 구조물에 관한 정보가 입수되면 현지에 출장하여 현지조사를 다음항목에 따라 수행한다.

- 이용 상황 (시공중 그 이용을 일시 중단할수 있는가 등)
- 하중의 현황
- 구조물의 치수
- 변위, 변형 등
- 신설 구조물과 기설 구조물의 상대 위치 (평면, 고저)
- 자료에 의해 얻어진 정보의 확인

앞에서 자료에 의한 조사와 현지조사에 관하여 서술하였지만 그것들은 상호 연관된 것이라는 점에 유의하여 유익한 조사를 하여야 한다.



<그림 8> 계측관리 Flow Chart

2. 지반 조사

지반조사는 Project를 계획할때 행하는 예비조사와, 상세한 설계 및 시공계획을 실시하는 본조사로 나누어진다. 통상적으로 예비조사에서는 이전의 자료를 수집하여 필요한 정보를 얻고, 본조사에서는 Boring을 하고 각종 시험을 하는것이 일반적이다.

3. 시공조건의 조사

근접시공은 중요한 기설 구조물에 접근하여 시공을 한다는 의미로써 보통시공에 비하여 시공조건이 까다롭다.

다음은 기설 중요 구조물이 존재하기 때문에 조사해 두어야 할 항목에 대해 기술한다.

- ① 시공상 제약을 받는 공간의 조사
 - 기설 구조물과의 시공 여유간격 (수평, 연직)
 - 고압선 등으로부터의 최소 거리
 - 상하수도, 가스관, 매설 Cable 등의 위치와 최소 거리
 - 통로의 확보 등
- ② 시공상 제약을 받는 시간의 조사
 - 철도에 접하는 경우의 작업 시간대
 - 통로를 설치하는 경우의 작업 시간대
 - 도심통과 토사운반 가능 시간대
- ③ 그외의 시공 환경 조사
 - 진동의 제한 (정밀기계를 취급하는 경우와 병원)
 - 소음의 제한 (주거지역)
 - 먼지 등