

지반거동 파악을 위한 체계적인 계측

박 광 준
(주) 대우엔지니어링 과장

지반거동 파악을 위한 체계적인 계측

박 광 준*
Park, Kwang-Joon

1. 개요

토질 및 기초공학은 그동안 기본이론의 발달, 실내 및 현장시험, 그리고 실제적인 설계와 시공등을 거치면서 지반 관련 구조물의 거동은 어느정도 예견되고 있으며, 이러한 지반거동에 대비한 구조물 설계가 이루어지고 있다. 그러나, 실제적인 지반거동은 지반구조의 불균일성, 조사 및 시험의 한계성, 모델 및 이론식의 단순성, 그리고 시공조건등에 따라 예상설계값과 현저한 차이를 보이는 이상거동을 나타내는 경우가 있기 때문에 경제적이고 안전한 시공을 위해서는 실제의 지반거동을 정확하게 파악할 수 있는 장치가 필요하다. 이것이 바로 현장계측이며, 이중 지반의 거동을 파악하기 위한 장치가 지반계측인 것이다. 따라서 지반계측은 예상되는 지반거동에 대한 적용대책의 적합성 여부를 확인하고 시공중 안전성 유무를 감시하는 안전장치인 것이다. 그러나, 현재 국내의 많은 토목현장에서 적용되고 있는 지반계측이 이러한 계측 본연의 업무와는 별도로 계측을 위한 계측, 시공과 유리된 계측, 행정요건을 만족시키기 위한 첨부 자료로서의 계측으로 전락한 배경에는 토질 및 기초 기술자와 계측 전문기술자의 체계적이지 못한 계측계획과 측정분석이 큰 역할을 하였음을 시인하지 않을 수 없다. 지반계측은 지반의 거동이론과 실무 경험이 많은 토질 및 기초공학 전문기술자가 계기의 원리, 기능, 이론을 습득하여 체계적으로 계획, 설치, 측정, 정리, 도화, 분석하였을 때 비로소 정확한 지반거동을 파악할 수 있을 것이다.

2. 토성 및 지반거동

2.1 토 성

지반계측은 대상 구조물이 지반이기 때문에 지반의 주 구성재료인 흙에 대한 성질을 알지 않고서는 정밀한 계측을 할 수 없다.

기본적인 흙의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 흙은 토립자와 공극으로 이루어졌으며, 공극은 물과 기체로 채워져 있다.
- 흙은 생성요인, 입자크기 및 응력이력에 따라 초연약점토에서 매우 굳은 풍화토 또는 자갈에 이르기까지 광범위한 강도크기의 차를 보일뿐만 아니라 투수계수에서도 큰 차이를 보이고 있다.
- 자연지반은 균질하거나 등방성이 아니다.
- 자연지반은 응력이력을 갖고 있다.
- 흙의 응력 - 변형거동은 탄성을 보이지 않는다.
- 흙은 압밀, thixotrophy, dessication, swelling, creep, softening, boiling 등 다양한 특성을 보인다.

* (주) 대우엔지니어링 과장

2.2 지반거동

지반계측은 결국 지반거동을 감지하는 작업이므로, 기존의 이론식이나 수치해석에 의해서 밝혀진 일반거동에 기초해서 계획되어야 한다. 지반계측이 적용되는 대상 구조물로는, 댐, 터널, 굴토공사, 사면, 도로성토, 연약지반 성토, 방파제(방조제), 해안매립, 기계기초, 내진기초등 매우 다양하므로 각 구조물별로 기존의 해석기법에 의해 밝혀진 지반거동 특성을 파악하여 계측계획을 수립하여야 할 것이다.

지반의 일반적인 거동특성을 요약하면 다음과 같다.

- 점토지반은 포화되었을 경우 하중변화에 따라 시간 의존적인 거동을 보인다.
- 점토지반은 생성기원, 점토광물의 함유량, 응력이력 및 전단특성에 따라서 큰 변화 특성을 보인다.
- 사질지반은 입자크기 및 다짐정도에 따라 큰 차이의 거동특성을 보인다.
- 사질지반은 점토지반에 비해서 짧은 시간동안에 탄성적인 거동특성을 나타낸다.
- 자연상태의 지반은 점토와 모래의 거동특성을 동시에 보이는 경우가 대부분이다.
- 각종 구조물별로 독특한 지반거동 특성을 나타낸다.

3. 지반거동의 예측 또는 측정기법

지반거동을 예측하기 위한 기초작업으로서 가장 먼저 시행하게 되는 것이 지반조사이며, 여기에서 획득한 지반정보와 토성자료를 이용하여 계산식이나 수치해석법에 의해 지반의 거동을 예측하게 된다. 그러나, 지반조사는 한정된 지역에 대해서 국부적으로 밖에 수행할 수 없을 뿐만 아니라 drilling, sounding, sampling등에 의해서도 완벽한 자연상태의 지반특성을 파악하는데는 한계가 있다. 한편 지반거동을 나타내는 대부분의 계산식은 매우 단순화된 가정모델에 기초하였거나 경험적으로 추정된 식이므로 항상 정해를 제시할 수 없다. 그리고 전산 프로그램을 이용하는 수치해석법도 역시 단순화된 가정모델에 기초하였을 뿐만 아니라 입력 토성치에 따라 큰 폭의 변화를 보이므로 맹신할 것이 못된다. 따라서 지반의 거동은 원지반을 그대로 유지한 상태에서 현장에 계측기를 매설하여 측정하는 것이 가장 정확하다고 할 수 있을 것이다. 그러나, 비체계적이고 비합리적인 현장계측계획에 의해서는 정확한 지반거동을 전혀 파악하지 못하는 경우도 있으므로 체계적인 계측을 위한 모든 노력이 집중되어야 할 것이다.

3.1 지반조사

지반조사는 지반에 구축되는 모든 구조물의 안전과 경제적인 건설 및 운영에 필요한 지반특성 및 거동인자를 규명할 수 있도록 횡수, 빈도, 간격, 심도, 시험종류, 구경등을 계획한다. 그리고 규명된 모든 정보는 설계자, 시공자, 감리자 및 감독자에게 모두 제공되어야 한다. 합리적인 지반조사 수행을 위해 사전에 파악되어야 할 사항은 다음과 같다.

- 지질학적 형성과정에 대한 공학적인 이해
- 지질특성 및 지층구조에 대한 이해
- 구조물의 기능 및 거동에 대한 이해
- 설계 및 해석방법에 대한 이해
- 시공성에 대한 이해

그러나, 현재 시행되고 있는 지반조사는 다음과 같은 현안 문제점과 제한성이 있다.

- 적절한 단가 미흡
- 획일적인 조사계획 및 시행

- 설계 및 시공과 유리
- 현장시험 및 실내시험 장비의 취약성 및 사용법 미숙
- 시료채취, 운반, 보관, 압출, 시편제작상의 문제점
- 시행업체의 영세성 및 기술력 취약
- 기능공의 인식부족 및 기능도 미흡

결론적으로, 지반거동 예측 및 설계 인자 파악을 위해 실시하는 지반조사는 토공작업에 있어 가장 기본적인 필수요건이긴하나 모든 지반조건 관련 정보를 충분히 제공해 주지는 못한다는 사실을 인식해야 한다.

3.2 계산식 및 수치해석법 이용

현재까지 개발되고 제시된 지반거동 관련 계산식이나 수치해석법들을 균질한 점토나 모래지반에 적용할 경우에는 정확한 지반조사 자료만 있다면 공학적으로 허용 가능한 한계까지 근접된 결과를 제공할 수 있다. 그러나 모든 계산식과 수치해석방법은 항상 기본적으로 몇가지 가정조건을 전제로 하고 있기 때문에 적용시에는 현장조건이 이와 유사한지 비교해 보아야 한다. 한편, 계산식이나 수치해석을 손쉽게 하기 위해 개발된 전산 프로그램들은 가정된 조건하에서 이론적으로는 매우 정확한 해답을 제시할 수 있으나, 결국 '쓰레기를 넣으면 쓰레기 밖에 나오지 않다'라는 말과같이 입력자료에 의해서 그 결과는 매우 큰 차이를 보이게 된다. 따라서, 충분한 토성 입력자료를 얻지 못하였을 경우에는 전산 해석결과의 절대치를 맹신하지말고 전체적인 경향을 파악하는 것으로 만족하여야 한다. 지반거동의 예측 또는 설계기법으로 적용하고 있는 각종 계산식과 수치해석법 역시 이론적으로는 매우 정밀하나 결국 현장 또는 실내시험에서 얻어진 값에 의해서 크게 좌우되므로 실제적인 지반거동을 예측하기에는 만족스럽지 못할 경우가 많다.

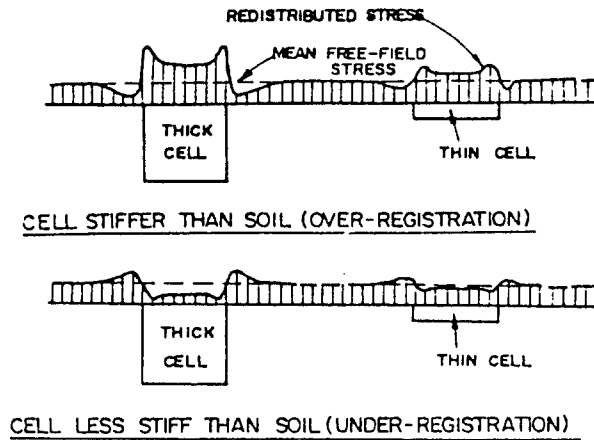
3.3 현장계측

현장계측 장비가 개발되지 않고 충분히 보급되지 못했던 과거에는, 제한된 지반조사에서 얻어진 지반특성치를 단순화된 계산식에 대입하여 지반거동을 예측하고 이에대한 대책을 수립하였었다. 그러나, 이러한 예측과정에서는 많은 불확정성의 요소를 내재하고 있었기 때문에 예상치 못한 과대거동이 발생하여 시공의 안전성을 위협하고 경제성을 저하시켰다. 그러나, 최근에는 좋은 성능의 현장계측기가 저렴한 가격으로 대량 보급됨으로써, 보다 정량적인 예측과 분석이 가능하게된 정보화 시공의 길이 열리게 되었다. 계측은 원지반에 계기를 직접 매설하여 측정하기 때문에 제한된 장소에서 채취된 소량의 시료에 의해서 얻어진 토성자료와 계산식에 의해서 구한 값보다 정확할 수 있다. 공학적으로 의미가 있는 지반거동의 범위는, 변위인 경우 수 cm에서 수 m, 토압이나 수압인 경우 수 kg에서 수 ton까지이나, 현대 과학의 소산인 정밀 계측장비는 수 나 수 mg/mm²등의 미소한 변화도 감지할 수 있으므로 어떠한 지반거동도 측정할 수 있다. 따라서 계측은 최소의 장비에 의해서 최대의 정보를 얻어낼 수 있도록 계기선정, 매설위치선정, 계기설치, 측정, 정리 및 분석이 합리적이며 체계적으로 이루어져야 하며, 측정된 결과는 빠른 시간내에 정리된후 간단한 형식으로 Plotting되어 현장변화상황을 한눈에 파악할 수 있어야 한다. 체계적으로 계획되고 설치된 계기에 의해서만이 현장의 정확한 지반거동을 파악할 수 있을 것이다.

4. 체계적인 지반계측을 위한 제언

4.1 흙과 계기의 상호작용

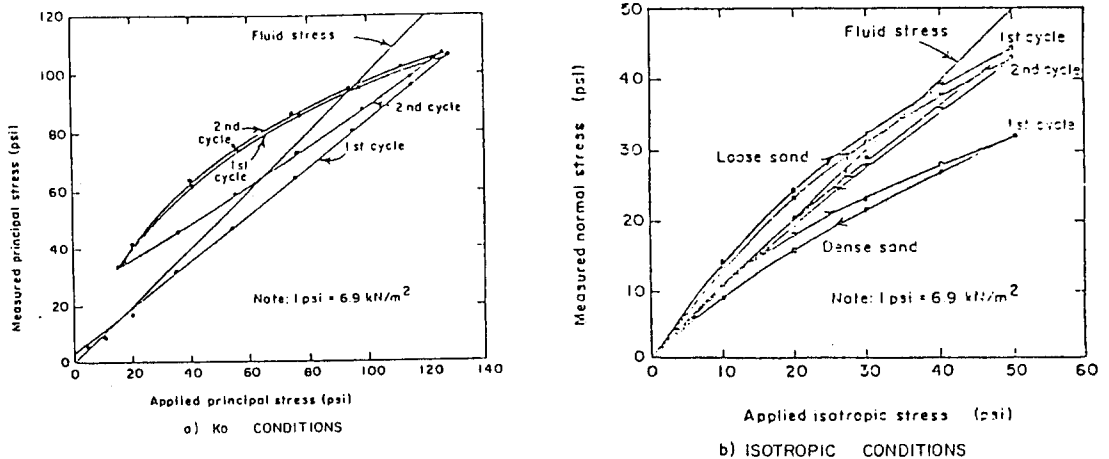
지반의 거동을 측정하기 위하여 계기를 매설하게 되면, 특히 Free Field용 계기의 매설인 경우에는 계기와 지반과의 상호작용에 의하여 계기주변의 지반응력과 변형이 영향을 받게 된다. 이는 계기의 형상, 지반과 계기간의 강성의 차이, 계기 매설에 따른 지반의 교란, 그리고 지열이나 콘크리트의 수화열등에 기인한다. 이러한 현상은 이론적으로도 잘 증명되어 있으며, 그 효과는 다음 <Fig.1-1>에 나타낸 바와 같다. 이에따라, 특히 토압의 경우에는 지반의 압력이 실제압력보다 과대측정되거나 과소측정될 수 있으므로 계기의 형태를 선정하거나 매설할 때 특히 유의하여야 한다.



<Fig. 1-1> Effect of Cell and Soil Having Different Thicknesses and Stiffnesses

4.2 계기의 검정

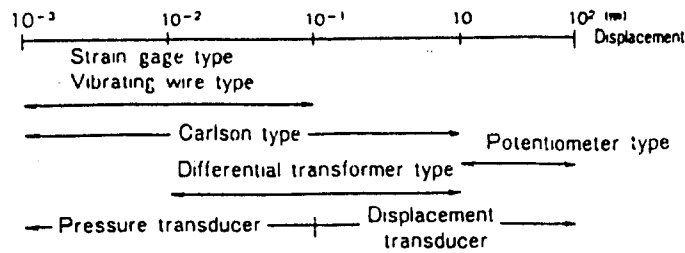
계기는 일반적으로 공장에서 엄격한 품질관리를 거쳐 생산되고 있으나, 공급 및 설치과정에서 충격, 열 및 전·자기적 영향에 의해서 측정기능에 장애를 갖게된다. 계기는 이와같이 계기자체의 내적요인에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 주변지반의 특성 및 조건에 따라서도 그 기능이 변하게 된다. <Fig.1-2>에 나타낸 바와 같이, 계기의 측정기능은 지반내의 응력상태 및 응력경로에 따라서 변하게 되므로, 계기를 설치하기전에 반드시 현장토를 사용하여 현장밀도와 같은 상태의 토체 또는 지반중에 계기를 매설한 후 액체압을 반복적으로 가압 및 감압을 실시하여 계기를 검정할 필요가 있다.



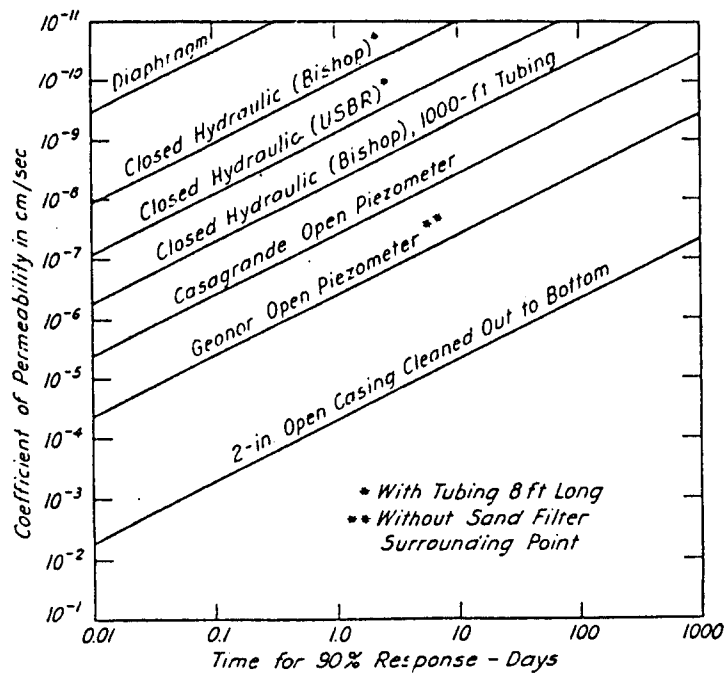
<Fig. 1-2> Stress Calibration Under Different Stress Conditions

4.3 계기의 선정

계기의 선정시에는 계측의 목적, 예상되는 측정량, 계기의 원리 및 기능, 작업규모, 작업의 중요성, 그리고 과거의 경험등을 신중히 고려하여야 한다. <Fig.1-3>은 계기의 측정범위에 따른 선정기준을 표시하고 있으며, <Fig.1-4>는 간극수압계의 반응시간이 설치되는 지반의 투수계수에 따라 변화하는 것을 설명하고 있는데, 이는 계측의 대상과 측정 기대치에 따라 계기선정을 달리해야 함을 말해주고 있다.



<Fig. 1-3> Displacement of Sensing Element and Type of Transducer



<Fig. 1-4> Approximate response times for various types of piezometers (after Hvorslev 1951, Penman 1961, Brooker and Lindberg 1965, and others).

Table 1-1은 전·자기를 이용한 각종 계측기의 상세한 특성과 선정기준을 나타내고 있다.

Table 1-1 계측기에 이용되고 있는 대표적 Transducer의 비교

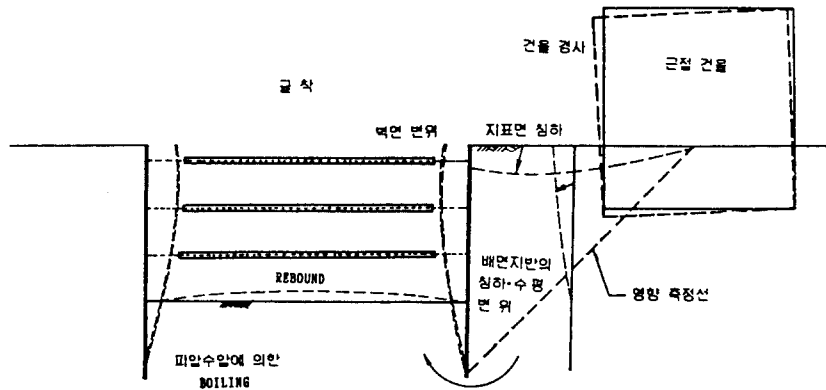
種 類 項 目	Potentiometer	Unbonded Strain Gage (Carlson)	Bonded Strain Gage	Vibrating Wire	Inductance (D.T.)
回 路 方 式	Wheatstone Bridge (零位法)	電位差計方式	Wheatstone Bridge (零位法 혹은 平衡法)	磁氣振動 周波數	電位差計式 혹은 偏位法
代 表 回 路					
電 源	D.C. (3~6 V)	D.C. (3 V)	A.C. (1.5~3V)	A.C. (100V)	A.C. (6~12V) D.C. (6~9V)
固 有 振 動 數	10 Hz 以下	約 200 Hz	~ 10,000Hz	400 Hz 以下	數拾 Hz 以下
動 的 應 答 數	數 Hz 以下	數拾 Hz 以下	~ 數 kHz	—	20 ~ 30 Hz
Cable 數	3	4	4	2	A.C. : 6 D.C. : 4
Cable 影 響	無 視 可 能	있 음 (補 正 可 能)	無 視 可 能	없 음	無 視 可 能
靜 電 誘 導 障 害	없 음	없 음	있 음	있 음	있 음
電 磁 誘 導 障 害	없 음	없 음	있 음	있 음	있 음
絕 緣 抵 抗 影 響	작 음	작 음	큼	작 음	큼
Signal 出 力	큼	작 음	작 음	작 음	큼
Amplifier	不 必 要	不 必 要	必 要	必 要	位 相 에 따 라 必 要
測 溫 機 能	없 음	있 음	없 음	있 음	없 음
溫 度 補 正	可 能	機 種 에 따 라 可 能	機 種 에 따 라 可 能	可 能	困 難
Casing의 剛 性	작 음	큼	매 우 큼	매 우 큼	매 우 작 음
堅 固 性	큼	작 음	매 우 큼	작 음	큼
測 定 範 圍	5 ~ 1,000 mm	0.005 ~ 5 mm	0.001 ~ 0.5 mm	0.005 ~ 10 mm	0.005 ~ 5 mm
器 種	적 음	많 음	많 음	적 음	많 음
最 適 用 途	大 容 量 變 位 計	土 壓 計 或 은 1 kg/cm ² 以上 의 水 壓 計	土 壓 計 或 은 1 kg/cm ² 以上 의 水 壓 計	土 壓 計, 水 壓 計 或 은 小 容 量 位 移 計	全 般 的 으 로 測 定 範 圍 의 모 든 計 測

(資料 : 電力土木技術協會 最新 測 量 工 學)

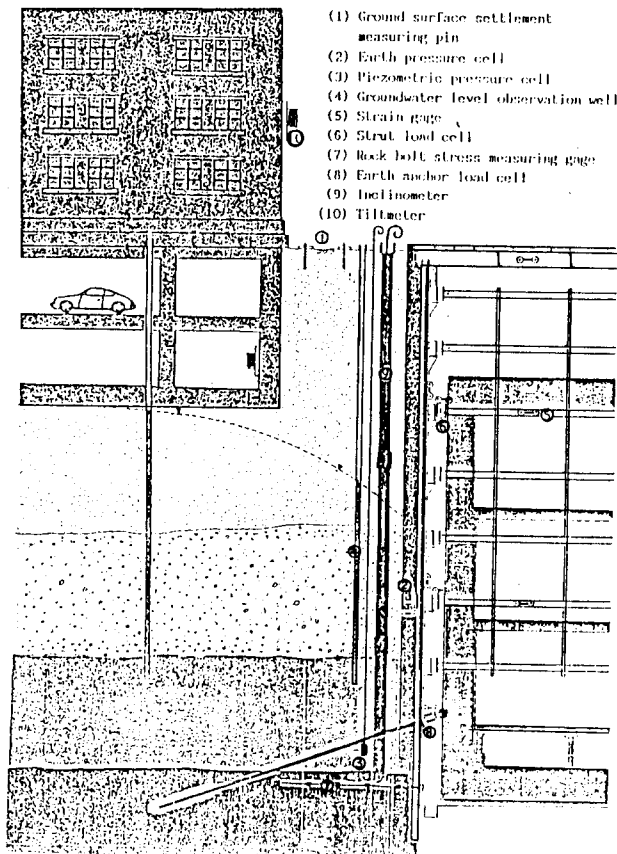
4.4 계기의 매설위치

계기매설은 시공에 의해서 지반 및 구조물의 거동이 가장 크게 발생되어 안전이 위협을 받을 것으로 예상되는 위치에 이루어져야 한다. 따라서 계기의 매설위치를 선정할 때에는 주변현황, 지반조건, 계측목적, 공사규모, 공사의 중요도, 경제성, 시공성등 많은 영향요인들을 종합적으로 분석하여 최소의 계기로써 최대의 정보를 얻을 수 있는 위치에 설치하여야 한다. 예를들어, 공사장 주변에 중요 구조물이 있는 경우에는 이곳에 계기를 중점 배치하여야 하며, 지층 구조상 연약층의 심도가 가장 깊은 곳이나 변위 및 응력이 가장 크게 발생되리라고 예상되는 지점, 그리고 유한요소법에 의해 해석을 수행한 단면에 계기를 설치하는 것이 바람직 하다.

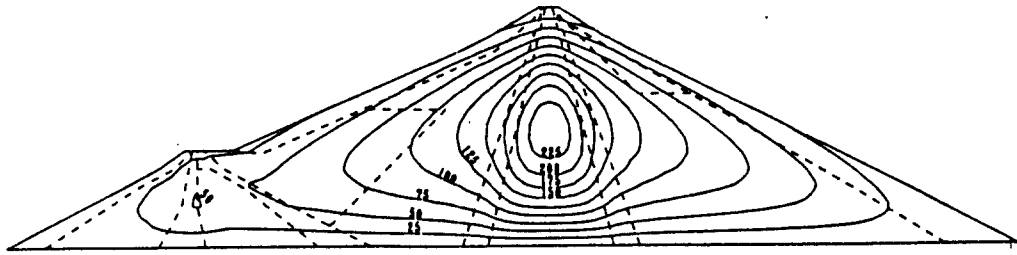
다음에 제시한 <Fig 1-5> ~ <Fig 1-13>은 굴토, 댐, 지하철 터널공사에 있어서의 지반 거동 특성에 따른 합리적인 계기 매설위치 선정방법을 제시한 것이다.



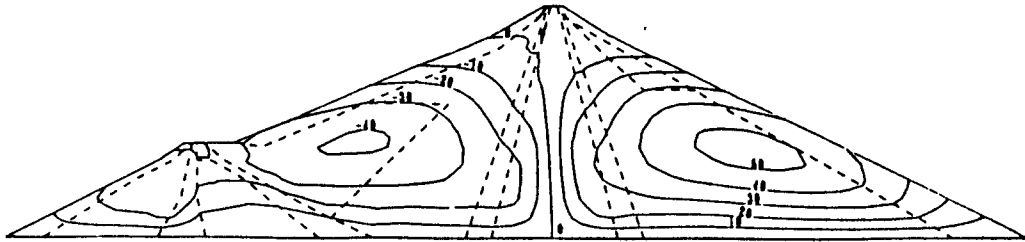
<Fig.1-5> 굴토공사시 지반거동



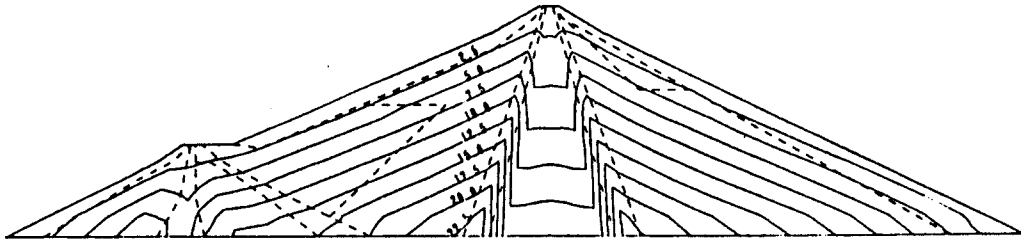
<Fig. 1-6> 굴토공사시 계측계획



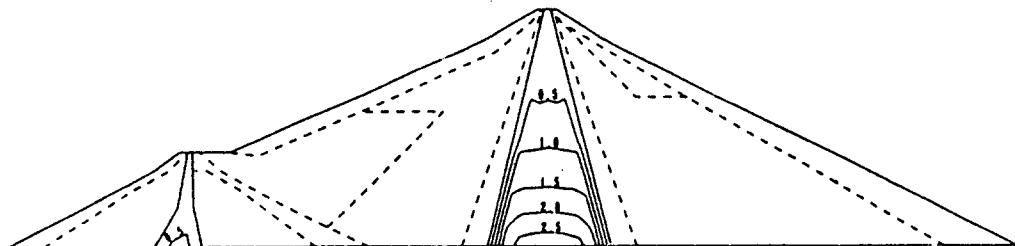
a) Vertical Displacement Contours End of Construction (Effective Stress Analysis)



b) Horizontal Displacement Contours End of Construction (Effective Stress Analysis)

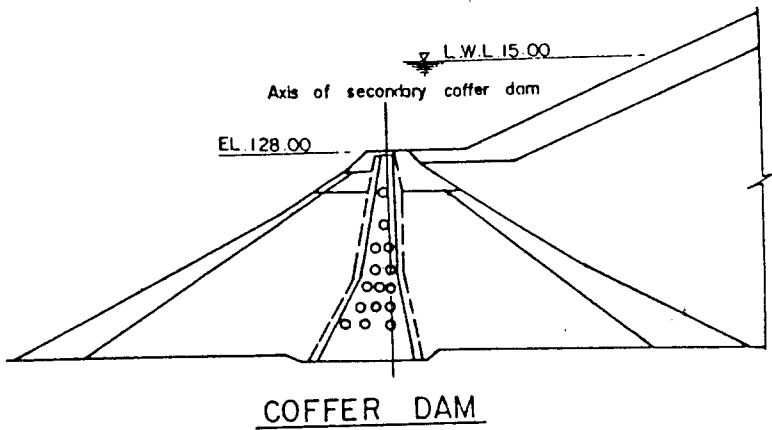
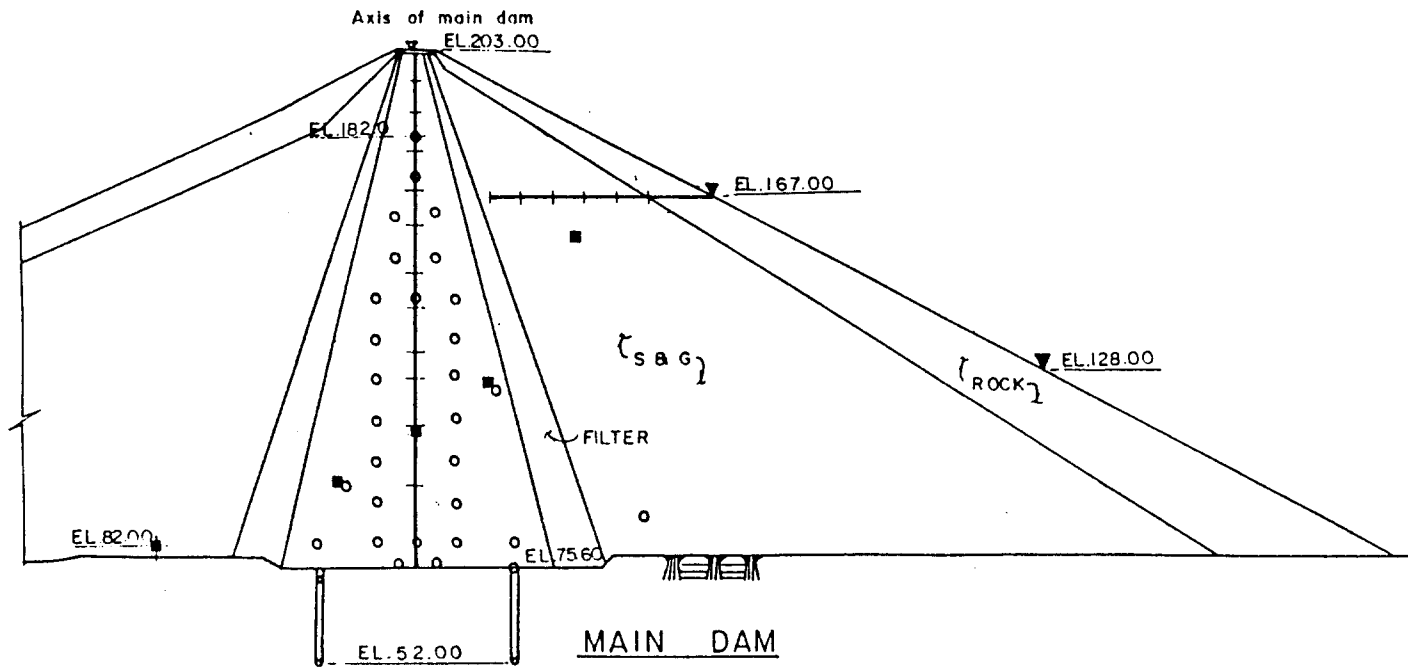


c) Major Principal Stress Contours End of Construction (Effective Stress Analysis)



d) Porewater Pressure Development Contours End of Construction (Effective Stress Analysis)

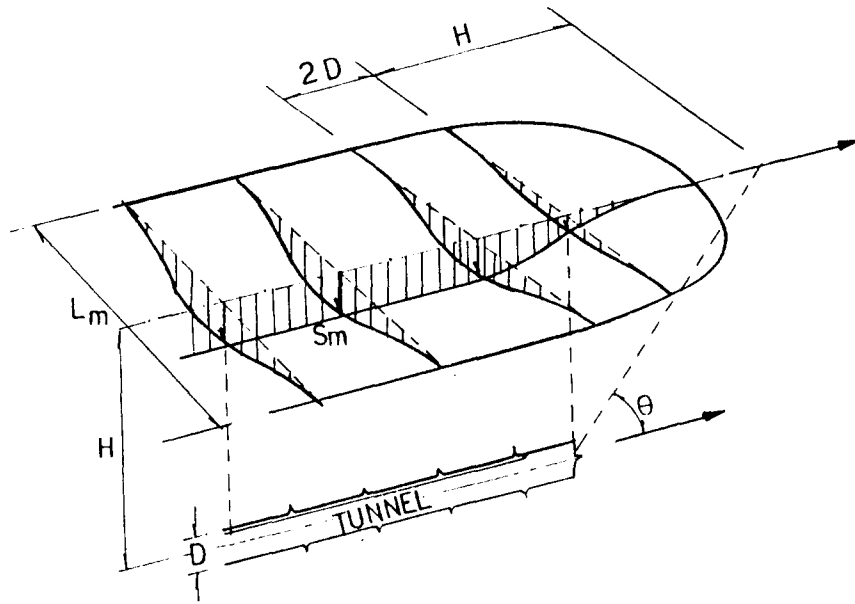
<Fig.1-7> 댐 축조시 제체거동



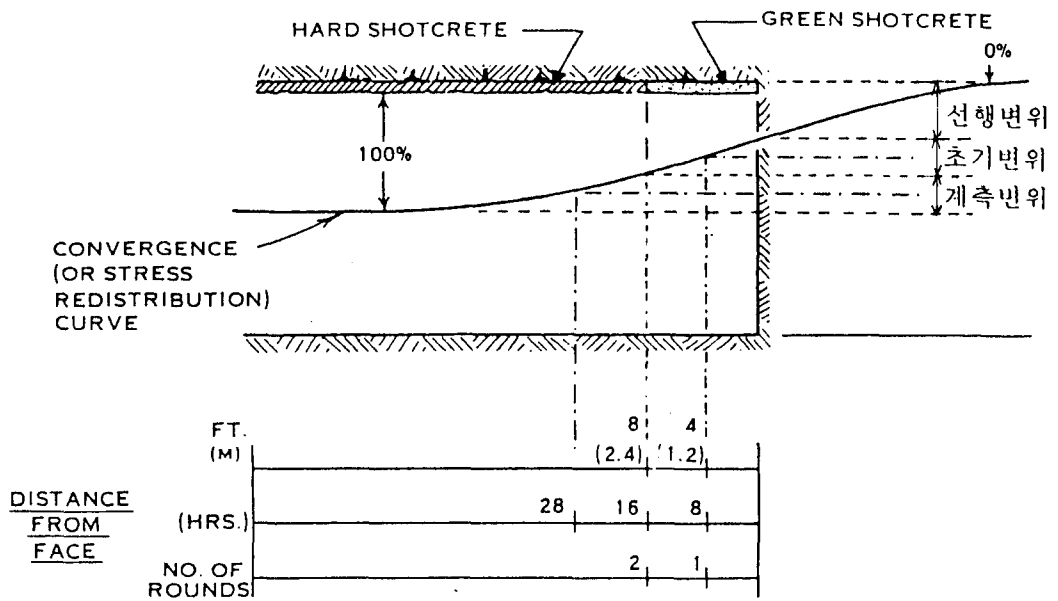
LEGEND

○	FORE PRESSURE
□	SOIL PRESSURE
↔↔↔	VETICAL & HORIZONTAL DISPLACEMENT
⋮	MULTI-LAYER SETTLEMENT
▽	DAM CREST SETTLEMENT
▽	DAM SURFACE SETTLEMENT

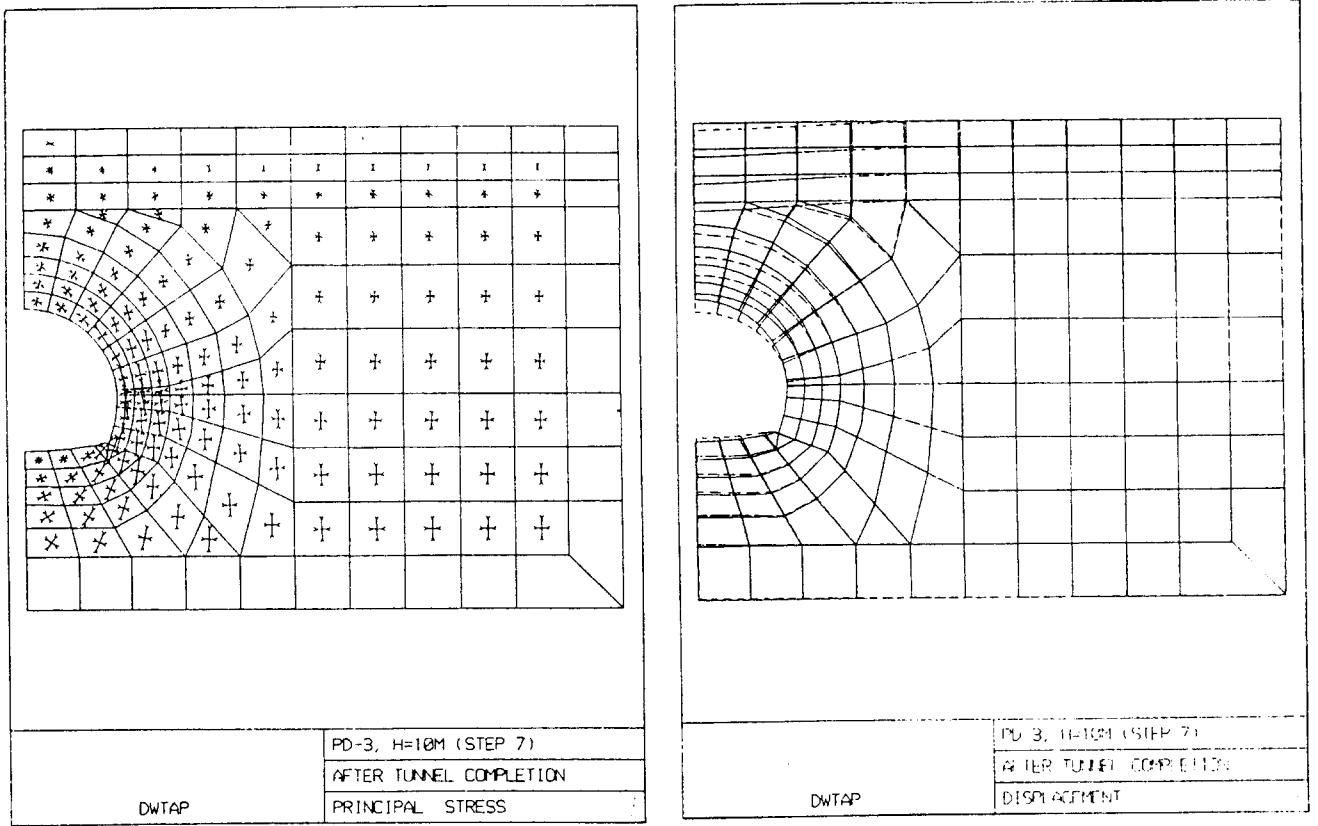
<Fig.1-8> 소양강 다목적댐의 계기 매설도



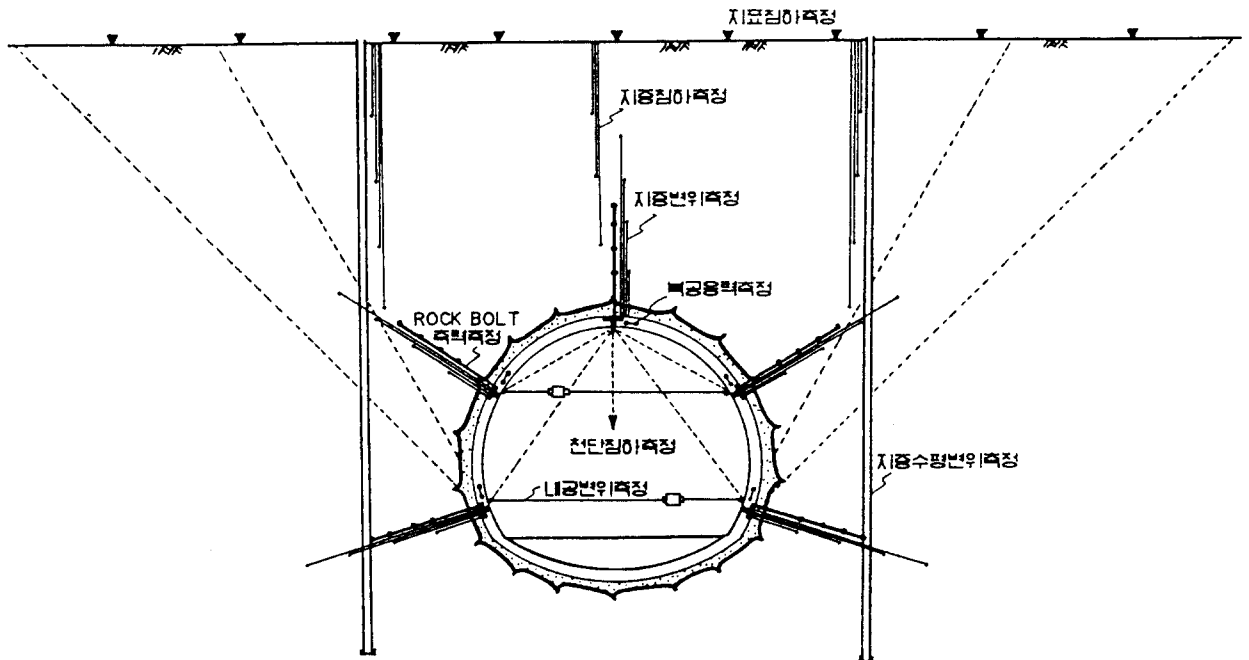
<Fig.1-9> 터널 굴착에 따른 지표면 침하특성



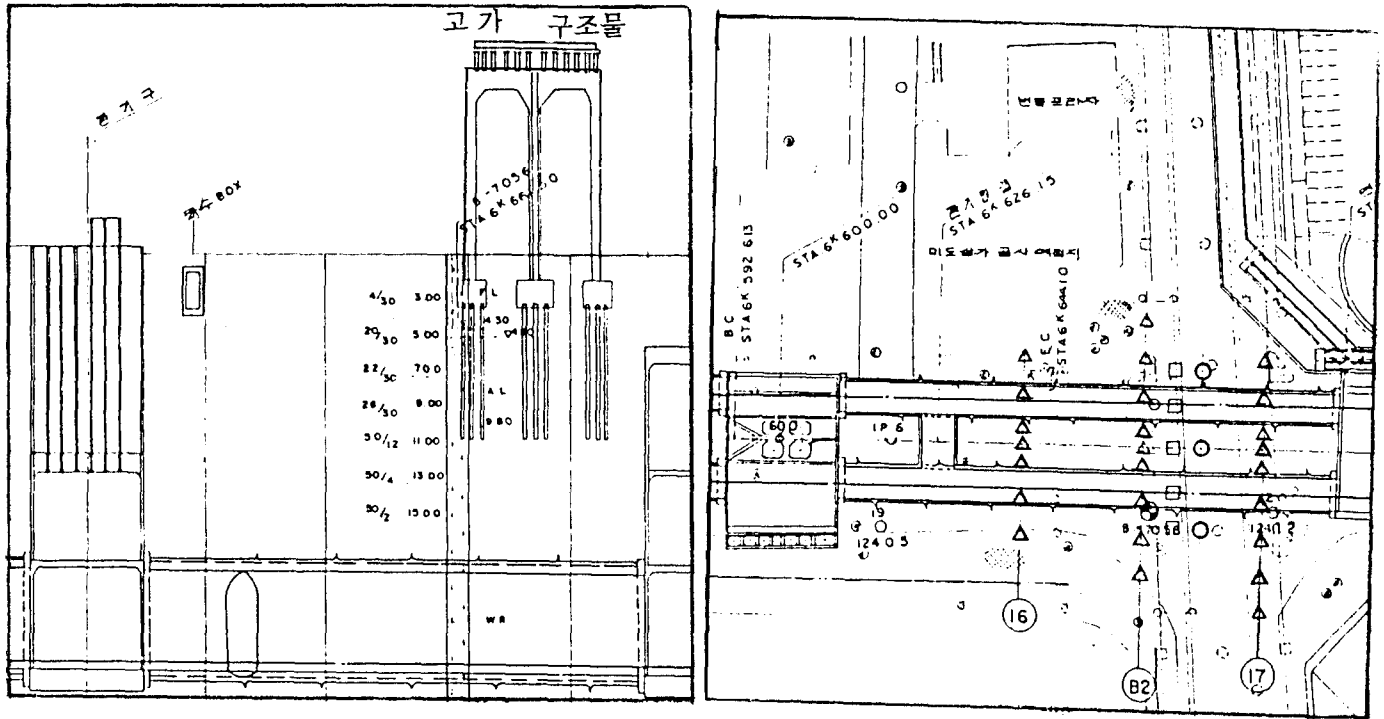
<Fig.1-10> 터널 굴착시 천단 침하특성



<Fig.1-11> FEM에 의한 터널굴착시 지반거동분석

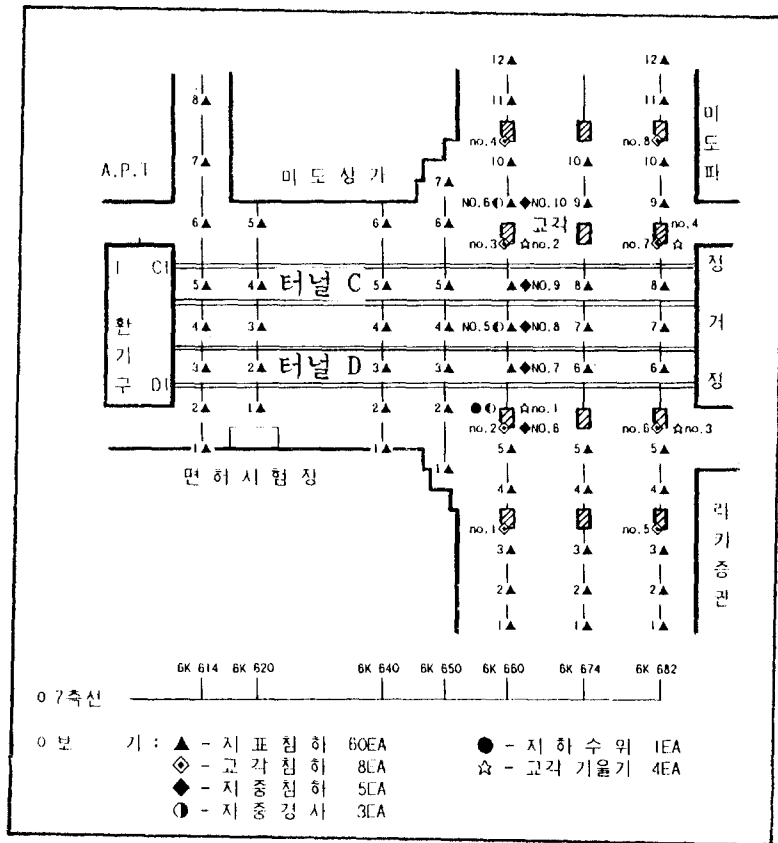


<Fig.1-12> 터널 계측계획



a) 고가구조물 하부 통과구간 종단면도

b) 실시설계상의 계획도



c) 수정된 체계적인 계획도

<Fig. 1-13> 터널 굴착시 주요구조물 통과구간 계획도

4.5 측정 및 분석

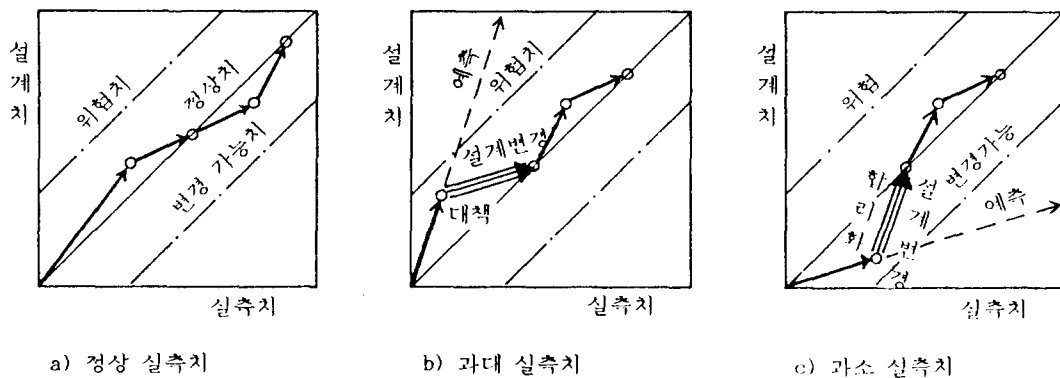
계기의 측정은 계측의 원리와 목적을 이해하고 있는 경험있는 기술자에 의해서 수행되어야 한다. 계측은 다음 Table 1-2에 나타낸 것과 같은 많은 오차가 개입되므로, 이러한 오차를 제거 또는 최소화할 수 있도록 계획단계에서 분석단계까지 담당 기술자의 체계적인 훈련이 필요하다.

계측을 통하여 수집된 자료는 당일로 기록, 정리, Plotting되어 즉시 분석될 수 있도록 준비되어야 하며, 기본적인 사항은 현장에서 판단하여 적절한 조치를 취하도록 하고, 예상치 못한 급격한 과대변화가 발생한 경우에는 즉시 계측 전문기술자에게 보고하여 정확한 원인을 분석하여 신속한 조치가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.

< Fig 1 - 14 > 는 측정된 계측치의 활용방안을 나타낸것이다.

Table 1 - 2 계측오차의 발생원인 및 방지대책

형 태	발 생 원 인	방 지 대 책
일상오차	<ul style="list-style-type: none"> 부주의 피로 오독 오기 계산실수 	<ul style="list-style-type: none"> 복수로 측정자 배치 중복 측정 평균치 이용 측정치 선별 심사 선측치와의 비교
계기오차	<ul style="list-style-type: none"> 계기오차 편차 미조정 영점 미조정 설치 미숙 	<ul style="list-style-type: none"> 영점 재조정 표준자, 무하중 검측기 사용
환경오차	<ul style="list-style-type: none"> 열, 습도, 진동, 먼지, 날씨, 기후, 침식 	<ul style="list-style-type: none"> 적합한 계기 선정 환경변화 기록 유지 환경 영향 보정
관측오차	<ul style="list-style-type: none"> 視差 개인 오차 	<ul style="list-style-type: none"> 측정자 관측 교육
특수오차	<ul style="list-style-type: none"> 계측기내 소음 저정밀도 고정밀도 	<ul style="list-style-type: none"> 정확한 계기 선정 복수로 측정기 배치 통계분석 적용



< Fig 1-14 > 계측치의 활용방안.

5. 결 론

지반계측은 토질 및 기초공학에 관한 체계적인 교육을 받은 기술자가 계기의 제반 원리, 기능, 이론을 습득하여 계획, 매설, 측정, 분석작업을 일관성 있게 수행하였을 때 비로서 체계적인 계측이 될 수 있을 것이며, 정확한 지반거동을 파악할 수 있을 것이다.

결론적으로, 체계적인 지반계측을 위해 고려하여야 할 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 계기 선정시에는 적용 지반의 특성을 파악한 후 지반과 계기와의 상호 관계를 검토하여야 한다.
- 선정된 계기는 매설전에 영점조정과 검정을 실시하여 정확한 품질의 계기를 매설한다.
- 계기의 매설위치는 구조물별로 일반적인 거동특성을 파악한 후 가장 취약한 곳에 설치하도록 한다.

* 참고문헌

1. 계측 관리 요령 (1992), 서울시 지하철 건설본부.
2. 박 광준, 유 태성 (1987), “선형 압밀 하중과 Wick Drain 공법을 이용한 연약지반 개량 공사의 계측관리” 논문집, 한국 지반 공학회.
3. 박 광준, 이인근 (1993), “도심지 지하철 터널의 붕괴유형과 원인” 1993년도 봄 학술 발표회 논문집, 한국 지반 공학회.
4. 소양강 다목적댐의 거동분석 및 안정해석 (1987), 보고서, 산업기지개발공사.
5. 유 태성 (1987), “거동분석을 통한 Earth-Rockfill 댐의 체계적인 계측” 학술 심포지움 논문집, 한국 토목학회.
6. Dibiagio, E., and Myrvoll, F. (1985), “Instrumentation Techniques and Equipment used to Monitor the Performance of Norwegian Embankment Dams”, Proceedings 15th ICOLD Congress, Lausanne, pp.1169-1197.
7. Duncan, J.M. D’Orazio, T.B., Chang, C.S., Wong, K.S. and Namiq. L.I. (1981), “Con2D: A Finite Element Computer Program for Analysis of Consolidation”, College of Engineering Office of Research Services, University of California Berkeley, California, Report No. UCB/GT/81-01.
8. Gnilsen R.(1989), Numerical Methods, Underground Structures, Design and Instrumentation, Elsevier, PP.84-128.
9. Hanna T.H. (1985), Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, TRANS TECH PUBLICATIONS.

10. Knight, D.J., Naylor, K.J., and Davis, P.D.(1985), "Strees-Strain Behavior of the Monasavu Soft Core Rockfill Dam: Prediction, Performance and Analysis", Proceedings 15th ICOLD Congress, Leusanne, pp.1299-1326.
11. Kulhawy, F.H., Duncan, J.M.and H.Bolton Seed,(1965), " Finite Element Analyses of Streeses and Movements in Embankments during Construction", College of Engineering Office of Research Servies, Unversity of California Berkely, Cailifornia, Report No. TE-69-4.
12. Ladd, C.C., Rixner, J.J. and Giffor'd, D.G. (1972), "Performance of Embankments with Sand Drains on Sensitive Clay", Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Vol.1, Part.1, pp.211-242.
13. Mitchell, J.K.(1986), "Practical Problems from Surprising Soil Behavior", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol.112, No.3, pp.259-289.
14. Thomas, H.S.H., and Ward, W.H.(1969), "The Design, Construction and Performance of a Vibrating Wire Earth Pressure Cell," Geotechnique, No.1, pp.39-51.
15. U.S. army corps of Engineers,(1976) "Instrumentation of Earth and Rock Fill Dams (Earth Movement and Pressure Measuring Devices)," DAEN-CWE-S, Engineer Manual No.1110-2-1908, Part 2 of 2.