

# 연약지반에서의 계측관리

1993.5

천 병 식 (한 양 대 교수)

남 순 성 (동 성 Eng. 이사)

# 목 차

## 1. 개 요

### 1.1 연약지반의 정의

### 1.2 연약지반에서의 문제점

## 2. 연약지반의 동태관측

### 2.1 계 측 항 목

### 2.2 침하, 변위 추정방법

## 3. 안 정 관 리

### 3.1 안정관리의 의미

### 3.2 정성적 관리

### 3.3 정량적 관리

## 4. 침 하 관 리

### 4.1 침하관리의 의미

### 4.2 실측치를 이용한 침하량 관리방법

## 5. 참 고 문 헌

부록 ; 국내연약지반계측사례

## 1. 개 요

연약지반에서 토목공사를 하는 경우, 주변지반의 거동을 각종의 계측기를 사용하여 계측하는 일이 많다. 계측의 목적은

- ① 설계시의 설계가정조건 및 예측치를 확인한다.
- ② 계측자료를 수집하여 실용적인 설계법을 개발한다.
- ③ 지반의 거동을 사전에 파악한다.

등을 들 수 있다. 이와 같이 여러가지 목적으로 계측을 수행하고 있지만, 지반의 거동에 관한 이러한 계측을 수행하는 실제이유는 지반의 불균질성과 복잡성 및 현재의 토질조사와 토질시험을 근거로한 예측의 정도가 충분하지 않기 때문이다.

Terzaghi는 지반과 관계되는 토목공사에 있어서 공사전에 지반조사에 근거한 설계예측을 행하고 실제공사에서는 전기간에 걸친 지반거동의 관측에 따라 수차수정하여 가는 방법이 최선이라고 하며, 이것을 Observational method(觀測修正法 또는 現場計測工法)라고 명했다. 이 Observational method는 예측이 곤란한 불균질하고 복잡한지반의 거동에 대응하는 가장 좋은방법이라고 할 수 있을 것이다.<sup>2)</sup>

본고에서는 연약지반상의 토목공사중 주로 성토문제에 관하여 서술하고자 한다.

### 1.1 연약지반의 정의

연약지반은 주로 점토나 실트와 같은 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토, 또는 이탄, 느슨한 모래 등으로 이루어진 토층으로 구성되어 있으며, 지하수위가 높고, 제체 및 구조물의 안정과 침하의 문제가 발생하는 지반을 말한다.

연약지반의 개략적인 판단기준은 표 1 과 같다.

표 1 연약지반의 판단기준

구 분	이탄질지반 및 점토질지반		사 질 토 지 반
층 두께	10 m 미만	10 m 이상	—
N 치	4 m 이하	6 m 이하	10 m 이하
$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.6 m 이하	1.0 m 이하	—
$q_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	8 m 이하	12 m 이하	40 m 이하

주)  $q_{c0}$  는 네덜란드식 삼축관 콘관입시험의 콘지수이다.

## 1.2 연약지반에서의 문제점<sup>2)</sup>

연약지반상의 성토공사의 문제는 지반파괴에 대한 안정성 및 과대한 침하 또는 변형으로 대별되며 설계 및 시공에 있어서는 제체의 안정 및 침하에 대한 주변지반에 미치는 영향에도 유의 해야 한다. 연약지반상의 설계, 시공시문제점은 아래와 같다.

- ① 안정의 문제
- ② 침하의 문제
- ③ 장기침하의 문제
- ④ 주변 지반의 변형에 따른 문제

### 1) 안정의 문제

연약지반상에 급속히 성토하면 지반의 측방 변형이 급격히 증가되며, 활동파괴가 발생된다. 활동 파괴가 발생하면 주변 지반이 융기 되는데, 그 영향 범위는 20~70m에 이르는 경우도 있다. 또, 활동 파괴된 지반은 크게 교란되어 강도가 저하되기 때문에 복구에 많은 시간과 경비를 요하게 된다. 따라서, 연약지반 대책은 제체의 안정확보를 충분히 고려한 완속 흙쌓기 시공에 의한 지반 강도의 증가를 유도하면서 성토하는 것을 원칙으로 한다.

### 2) 침하의 문제

그림1의 경우와 같이 침하에 의한 성토량의 증가 제체 상단의 폭이 부족해지는 문제가 발생한다. 그림2 및 그림3에 나타난 바와 같이 교대 접속부의 단차, 횡단구조물의 침하 문제도 발생하게 된다. 이로 인해 침하량이 큰 구간에서는 제체폭의 여유를 확보하면서 구조물 접속부나 횡단구조물부에 선행하중을 가하여 사전에 침하를 촉진시키는 것을 기본으로 한다.

과거의 경험에 따르면, 장기간에 걸친 제체 침하에 대해서는 지반처리공을 실시해도 침하촉진 효과나 저지효과를 얻지 못하는 경우가 많다. 이 때문에 제체 침하에 대해서는 방치 기간을 충분히 두는 것이 중요하다. 또한, 교대의 측방변위대책으로는 선행하중을 가하여 지반강도를 증가시키는 것이 효과적인 방법이다.

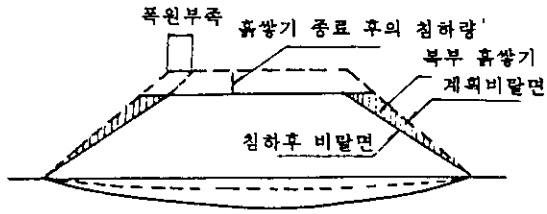


그림-1 제체의 침하에 따른 문제

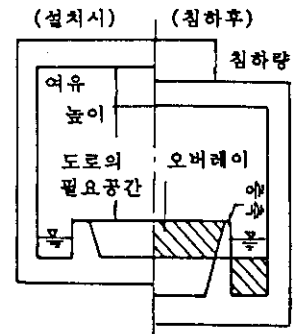


그림-2 횡단 구조물의 침하문제

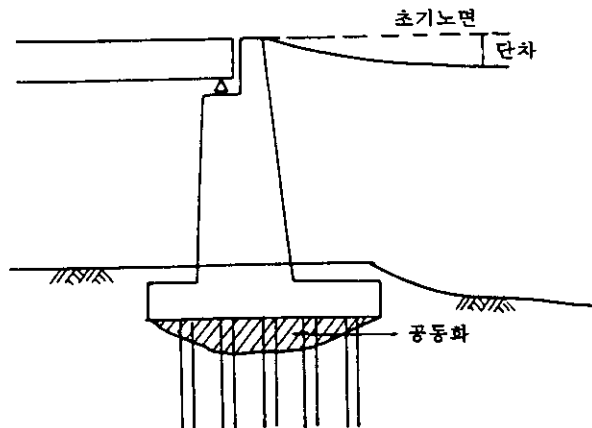


그림-3 교대 접속부의 침하문제

### 3) 장기침하의 문제

연약지반상의 제체의 침하는 공용개시 후에도 장기간에 걸쳐서 계속되는 경향이 있다. 그 때문에 횡단구조물의 단면부족, 배수불량 등 관리단계에서 보수를 필요로 하는 문제가 발생하는 경우가 많다. 따라서, 설계에 있어서는 장기침하를 예측해서 설계할 필요가 있다.

#### 4) 주변 지반의 변형에 따른 문제

연약지반상의 성토시에는 주변지반의 용기 및 측방 변형의 발생으로 주변의눈발이나 인가, 구조물에 피해를 줄 우려가 있다. 따라서, 성토로 인하여 피해가 예상되는 구간에 대해서는 적절한 대책이 강구되어야 한다.

#### 5) 설계의 불확실성에 따른 문제와 동태 관측

연약지반상에 제체를 시공할 경우에는 일반적인 지반의 경우보다도 상세한 토질 조사를 하고 이것에 근거하여 면밀한 설계를 하는 일이 중요하다. 그럼에도 불구하고 설계시에 예측했던 구조물이나 기초지반의 거동이 실제의 거동과 일치하지 않는 경우가 많고 공사중에 구조물이나 지반의 과대한 변형이나 파괴가 발생하는 일도 자주 일어난다.

이와 같이 설계시의 예측과 실제 거동이 일치하지 않는 원인은 층두께나 토성이 복잡하게 변화하고 있는 연약지반의 토질조사지점의 선정, 검토 단면의 모델화, 설계토질 정수의 결정, 계산식의 선택 등 설계과정에서 많은 불확실한 요소가 포함되기 때문이다. 따라서 시공시에서 이 불확실성을 배제하기 위한 방법으로 동태관측을중시하여 실제지반의 거동을 확실히 파악해서, 당초의 설계 내용 및 시공법을 수정하는데 적극적으로 활용하는 것이 중요하다.

## 2. 연약지반의 동태관측

연약지반에서의 성토공 시공시 계측을 통하여 제체 본체 및 지반의 거동과 토질 성상의 변화예측을 포함한 동태관측을 하는 목적은 제체의 안정 및 침하관리를 하는 데 있다. 즉 성토시의 안정관리와 시공후의 장기간에 걸친 침하와 예상이상의 부등침하로 인한 제체나 구조물에 발생하는 지장을 최소화 하는데 있다.

연약지반상의 성토시 제체하중이 지반의 지지력과 균형을 갖도록 제체하중을 시간적으로 관리하여 소정의 높이까지 가능한 한 빨리 성토하는 것이 가장 합리적인 시공법이다. 이때 안정관리란 제체파괴의 위험성을 판단하면서 성토속도나 시공순서등을 관리하는 것이며, 침하관리는 시공중에 동태관측을 실시하여 그 결과로부터 장래의 침하를 예측하여 장기 침하대책을 강구함과 함께 성토량을 파악하기 위해 실시하는 것이다.

### 2.1 계측 항목

#### 1) 침하 측정

##### ① 지표면 침하 측정 :

- 대상지점의 全沈下量을 측정한다.
- 성토속도의 조절, 선하중 제거시기 결정을 위한
- 측정기기 : 지표면 침하계, 수압식 침하계, 수평경사계

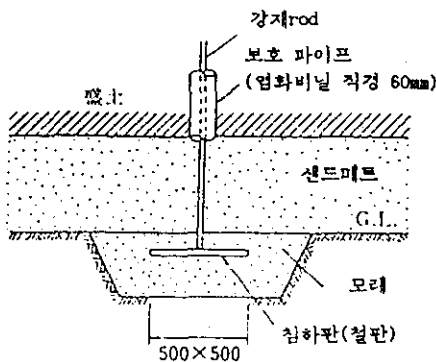


그림-4 지표면 침하계

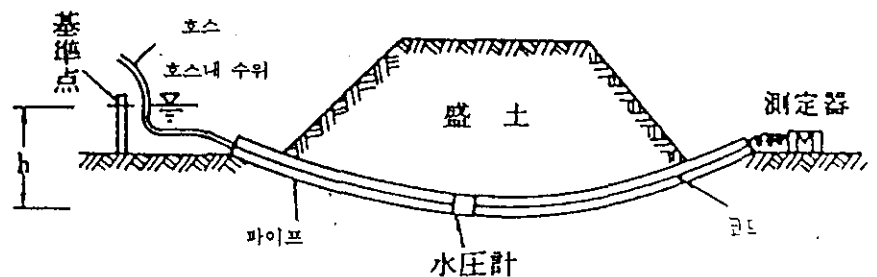


그림-5 수압식 침하계

② 심층 침하 측정 :

- 언약층이 두꺼운 경우 심부의 각층의 침하량을 측정한다.
- 성토속도조절, 선하중 제거시기 결정등에 그 결과를 이용한다
- 측정기기 : 심층형 침하계, 차동형 침하계, 연속식 침하계, 앵커식 침하계, 침하소자식 침하계

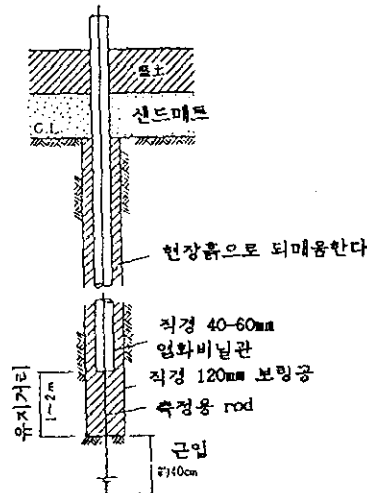


그림-6 심층형 침하계

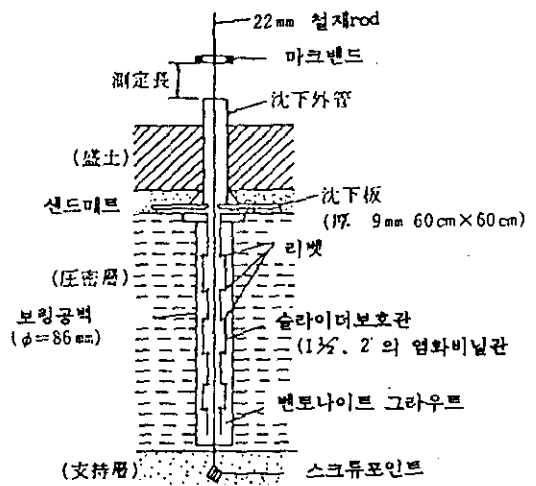


그림-7 차동형 침하계

2) 변위 측정

① 변위 측정 :

- 지표면의 수평방향 이동량, 성토단부의 침하, 용기물측정한다.
- 주로 구조물의 안정을 확인할 목적으로 설치하며 활동파괴의 예지, 축방유동 등을 관측하여, 성토작업의 안전성의 확보, 성토속도의 조절에 그 결과를 이용한다.
- 측정기기 : 지표면 변위 말뚝, 지표면 신축계, 테이프신축계

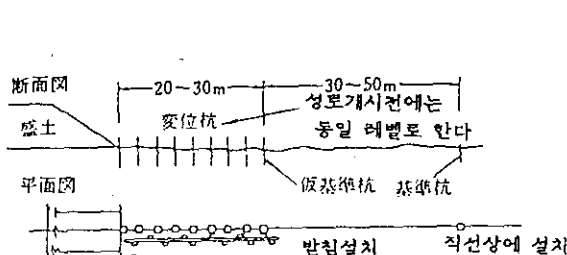


그림-8 지표면 변위 말뚝

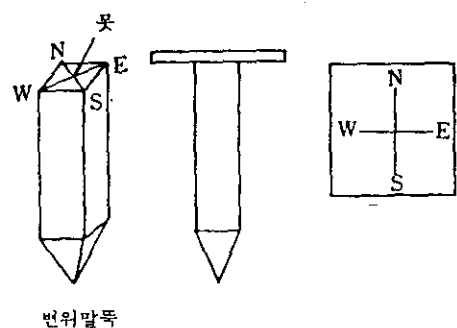


그림-9 변위말뚝과 변위판



지표면 신축계는 두점간의 지표면 변위를 말뚝과 인바선을 이용하여 5~10배로 확대하여 회전되는 기록용지에 연속하여 기록한다. 통상 7일간 연속하여 기록 되도록 하는데, 이동 속도에 따라 1일~1개월 까지도 사용된다. 말뚝의 침하영향 등을 받지만 특히 인바선 자체의 온도 변화와 바람 등의 영향을 받기 쉬우므로 인바선을 얽화비닐 파이프 보호할 필요가 있다.

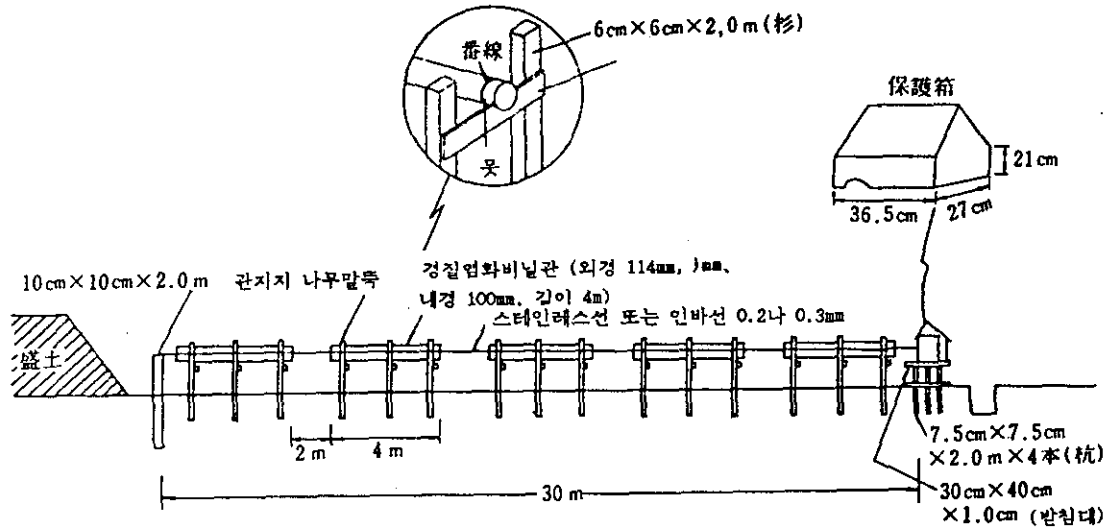


그림-10 지표면 신축계의 설치 예

② 지중 변위 측정 :

- 성토법면 단부의 언직 방향으로 지중의 수평변위를 측정 한다.
- 성토속도의 조절, 지중의 측방유동량과 활동면을 확인하기위하여 사용한다.
- 측정기기 : 지중변위계, 지중경사계

③ 경사의 측정 :

- 지표면의 각도 변화를 측정한다.
- 측정기기 : 지표면 경사계, 추(사계브리), 浮式變位計

3) 토 압 측정

연약지반상의 성토공사에서는 샌드파일의 하중 분담율을 확인하기 위하여 샌드파일 위에 작용하는 토압을 측정 하는데 사용하는 정도이며 일반적인 시공관리시에는 사용하지 않는다.

#### 4) 간극 수압 측정

성토하중에 의한 간극수압의 증감을 측정한다. 대책공의 효과 침하상태, 압밀진행상태의 확인 등에 이용된다. 지반내의 간극 수압을 측정하는 기기가 사용되는데, 전기식과 마노미터식이 있는데 전기식은 선단부의 필터를 통하여 내부에 전달되는 수압을 압력 변환기로서 전기적으로 측정하며, 마노미터식은 수압 그대로 도관내의 물을 통하여 마노메타 또는 불튼관에 전달되는 것이다. 마노메타식의 일종인 카사그란드 형은 마노메타부가 없고 선단에 필터가 있는 가는관을 언직으로 설치하여 도관내의 수위를 측정하게 된다. 원리적으로 간단한 것이 정밀도는 낮으나 현장에서는 양호한 결과를 얻을 수 있다.

각종 계기를 크게 나누면, 변형을 측정하는 것과 압력을 측정하는 것으로 나눌 수 있다. 연약지반에서는 일반적으로 변형을 측정하는 계기가 많이 사용되는데, 그것은 지반의 거동이 침하나 변위의 형태로 나타나며 변형의 측정이 간편하고 직접적이므로 정밀도가 양호한 다량의 측정치를 얻을 수 있기 때문이다. 수압과 토압 등 지반내의 압력을 측정하는 것은 계측기술상 여러가지 문제가 많다. 예를 들면 연약지반상의 성토공사에서 각극 수압을 측정하는데 성토가 진행되어도 간극수압의 상승이 측정되지 않거나, 수압 상승은 측정이 되었는데 이후의 저하가 측정되지 않는 수가 많았다.” 토압계의 경우에는 주변의 응력상태가 설치 전과 후가 다르거나, 지반과 토압계의 강성차로 인한 문제 등이 있다. 그러므로 간극수압이나 토압은 특별한 목적을 갖고 측정하는 경우, 즉 시험성토나 연구를 위한 경우등에 용의 주도한 준비를 하여 사용하며 일반공사에서는 그다지 사용상의 매력은 없다.

#### 2.2 침하, 변위 추정방법

침하, 변형을 예측하는 과정은 흙의 응력 - 변형을 관계의 모델화, 원지반의 응력상태와 경계조건의 파악, 계산방법 선택의 순으로 된다. 현재로서는 모든경우에 적용할 수 있는 원리는 있지만, 공학적인 해답을 줄 수 있는 방법은 단독으로서가 아니라 여러 가지 방법 중에서 문제의 특성에 맞는 것을 조합하여 공학적 판단에 의해 예측하게 된다.

압밀침하는 압밀침하량과 압밀속도의 문제이며, 재하상태에 따라 一次元壓密 또는 多次元壓密로 구분하여 검토할 필요가 있다. 일차원압밀은 Oedometer시험에 의하 것이 일반적이며, 다차원압밀변형의 문제는 Skempton, Bjerrum에 의한 과잉간극수압을 개입시킨 방법, Lambe에 의한 응력경로법(Stress path method), 과 FEM에 의한 방법이 있다. 이러한 방법은 원위치에서의 초기응력상태 설정, 흙의 응력 - 변형을 관계의 가정, 재하에 의한 응력변화에 따른 변형의 예측이라는 과정을 따르고 있다.

## 1) 일차원 압밀

점토층의 두께에 비하여 상당히 넓은 범위에 등분포하중이 놓인 경우에 적용된다. 두께 H인 점토층의 침하량 S는  $e - \log p$  관계로 부터 구해지며, 다음식을 이용한다.

$$S = H \cdot (e_0 - e) / (1 + e_0) \quad \text{--- (1)}$$

압밀속도에 관해서는 Terzaghi에 의한 과잉간극수압 u에 관하여 다음과 같은 형태의 열전도형 압밀방정식이 유도 되었다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{--- (2)}$$

$C_v$  ; 압밀계수  
 $z$  ; 심도

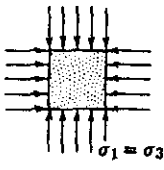
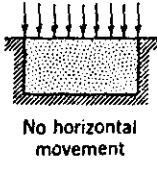
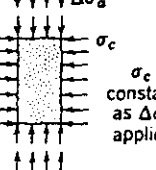
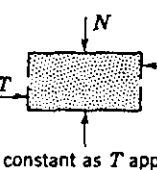
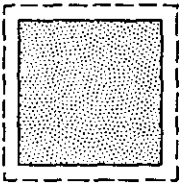
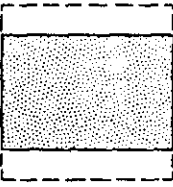
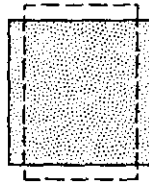
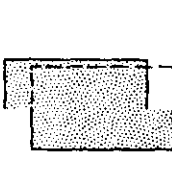
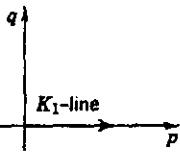
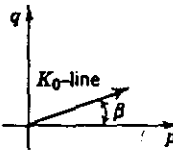
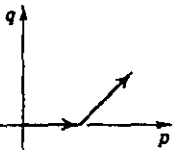
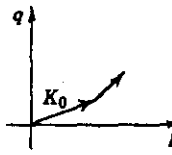
이에 대하여 三笠(미카)은 간극수압 u가 아니라 압축변형률에 관하여 같은모양의 식을 제시하였다. Terzaghi의 경우에는  $e - p$ 의 직선성을 가정하고 있는데 반하여, 三笠은  $e - \log p$ 가 직선이 된다는 것을 고려하였으므로 넓은범위에서의 e의 변화에서는 삼립의 식이 보다 일반적인 것이다. Terzaghi의 경우에는 u와 e의 시간적변화는 같지만 三笠의 식에서는 e의 시간적변화는 열전도형에 따르지만 u는  $e - \log p$ 의 관계에 따라 변화되며, 압밀도에서 u에 관한 압밀도는 e에 관한 것보다 지연되게 된다. 이것은  $e - p$  관계가 아래로 볼록한 곡선으로 되기 때문이다.

## 2) Lambe의 응력경로법(Stress path method)

흙은 그 본성으로서 비탄성, 이방성을 나타낸다고 이미 실험적으로 밝혀졌다. 이러한 흙의 비탄성적성질의 거동을 갖고 해석을 수행하는 기법 가운데, Lambe은 탄성론에 근거하여 응력분포 또는 응력변화를 구해 그 변화에 대응한 흙요소의 변형율을 실험실에서 구하여 침하를 추정하는 방법을 제한하여 응력경로법(Stress path method)라고 이름 붙였다. 이 응력경로법은 연약층 두께에 비하여 재하폭이 작은경우 예를들어 탱크의 침하 점토등에는 단순히 탄성해석으로는 얻을수 없는 문제의 해결이 가능하다. 응력경로법으로 침하량을 추정과정은 다음의 4가지 단계라 할 수 있다.

- ① 침하를 검토하는 구조물하의 지반내의 한점 또는 여러개의 점을 선정한다.
- ② 이 각점에 있어서 구조물의 재하에 따라 발생하는 응력경로를 추정한다.
- ③ 이렇게 추정된 응력경로에 따라 실내시험(삼축압축시험)을 행한다.
- ④ 침하의 검토에는 이 실내시험에서 얻어진 응력경로에 따라 발생된 변형률에 근거하여 추정한다.

그림-11 각종 시험상태에 대응한 응력경로 <sup>1)</sup>

Test	Isotropic compression	Confined compression (oedometer)	Triaxial compression	Direct shear
Basic conditions	 $\sigma_1 = \sigma_3$	 No horizontal movement	 $\Delta\sigma_a$ $\sigma_c$ constant as $\Delta\sigma_a$ applied	 $N$ constant as $T$ applied
Type of deformation	Volumetric 	Primarily volumetric but some distortion 	Distortion and volumetric 	Primarily distortion, but some volumetric 
Stress path	 $K_1$ -line	 $K_0$ -line $\beta$		 $K_0$
Uses	For study of purely volumetric strains	Very simple; approximates certain field conditions	Most common test for studying stress-strain and strength properties	Simple test for measuring strength

응력경로에는 전응력경로와 함께 유효응력경로라는 것이 있으며, 각각 전응력법, 유효응력법의 변형해석에 관련되어 사용되고 있다.

주로 Lambe이 제창한 응력경로법은 단순한 재하상태의 침하를 구하기 위한 간이법이기에 때문에 복잡한 경계조건에 대하여는 탄성론에 근거한 응력해석으로는 불충분하여 적당한 응력 - 변형률 관계를 이용한 FEM등에 의해 응력해석이 필요하다.

### 3) FEM(유한요소법)에 의한 침하, 변형계산

지반거동을 FEM으로 해석하기 위해서는 지반요소의 응력 - 변형율 - 시간관계 즉, 구성식과 경계조건의 2가지를 적절히 조합하여야 한다. 현재 FEM에 도입되어 사용 중인 흙의 구성식은 다음과 같은 것이 있다.

#### ① Duncan의 쌍곡선 표시법

Duncan의 쌍곡선표시법은 주로 사질토에 대하여 개발된 것으로, 4가지의 주요한 변수로 표시된다. 그것은  $\nu_i$ ,  $\nu_t$ ,  $E_i$ ,  $E_t$ 로서 각각 초기 포아손비, 점선포아손비, 초기 탄성율, 점선탄성율이다.

#### ② SHANSEP( Stress History and Normalized Soil Engineering Properties )

Ladd가 보습혼청색점토에 대하여 실험결과를 중심으로 점성토의 응력 - 변형율, 강도의 특성을 추정하도록 하는 수법이다. 의미있는 토질시험결과를 얻기위해서 시료의 교란, 응력경로법등이 문제를 해결하도록하는 것이며 많은 점성토가 규준화에 의해 응력 - 변형율과 강도특성이 통일적으로 표시되어 실험적 사실에 입각한 방법이다.

#### ③ CAM-CLAY MODEL

Roscoe에의해 추진되어온 점성토의 응력 - 변형율 관계이며, 삼축압축시험결과를 특히 탄소성모델로하여 나타낸 것이다.

기타 CAM- CLAY MODEL을 기본으로 하여 점성을 가미한 구성식등이 연구되고 있다.

### 3. 안정 관리

#### 3.1 안정관리의 의의

연약지반상의 성토의 기본적인 시공법은 성토하중에 따라 지반의 압밀을 진행시켜 전단강도를 강화하며, 순차적으로 성토해 나가는 것이다. 그림-12는 계산안전율과 실제평균성토 속도의 관계를 나타낸 것인데, '○' 안전율이 커져도 성토속도가 커지면, 파괴 또는 불안정한 상태로 된다는 것을 나타내고 있다.

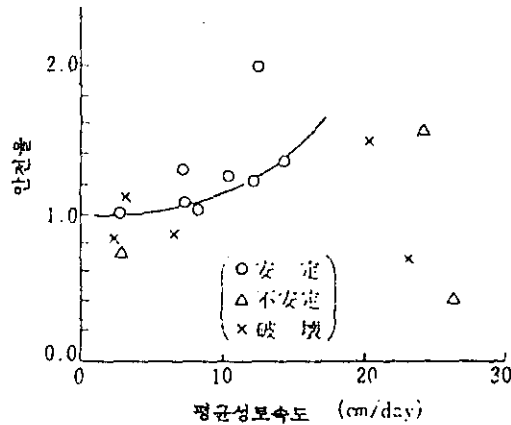


그림-12 안전율과 성토속도의 관계

따라서 성토하중의 증가가 지반의 강도 증가와 균형이 맞도록 성토 속도를 조절하는 것이 안정관리의 목적이다. 안정관리는 그림-13과 같이 현장계측, 즉 동태관측을 이용하여 수행 할 수 있다.

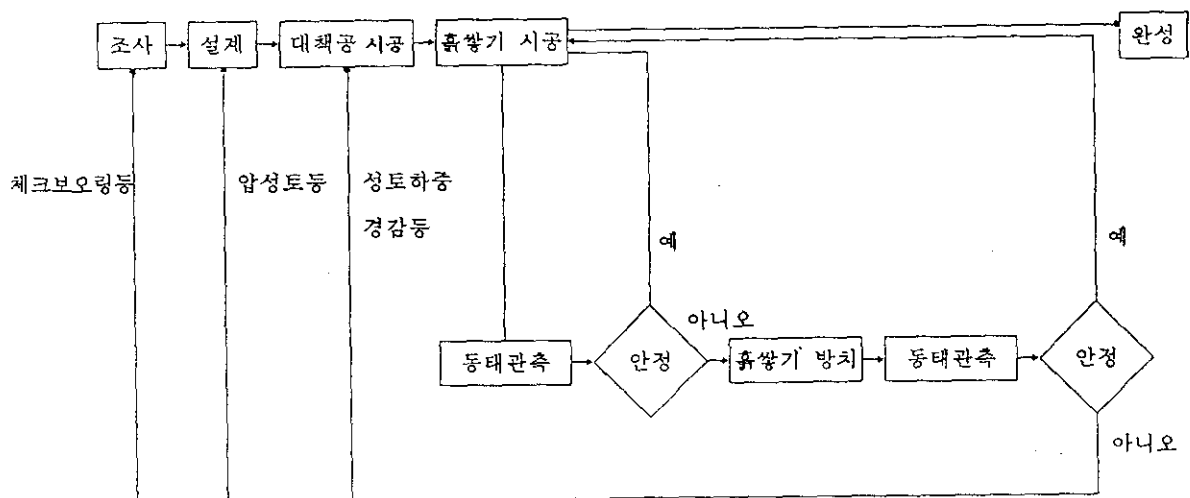
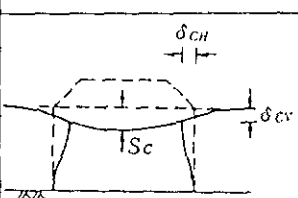
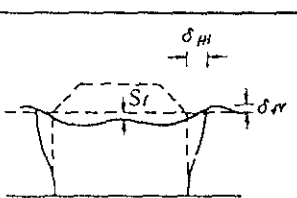


그림-13 성토공에서의 동태관측

연약지반상의 성토시 안정한 상태로 시공할수 있는 성토속도로서, 일본의 고 속도로 성토 실적에 의하면 유기질토 지반의 경우 3 ~ 5cm/日을 우선 목표로 한다. 따라서 이러한 속도를 기준으로하여 성토공사를 시작하며, 공사 진행중 동태관측을 통하여 안정관리로서 성토속도를 조절한다.

성토하중에 의해 지반내에 발생하는 현상은 압밀과 전단이 복합된 것이며, 압밀 이 전단보다 탁월하면 지반이 안정 상태이며 전단이 압밀보다 탁월하면 불안정 상태가 된다. 이러한 지반의 거동관계를 정리하면 아래 표와 같다.

표 - 2 지반의 거동과 안정관리 방법

	지 반 의 거 동		파 괴 경 향	안 정 관 리 방 법	
	압 밀	전 단		정 성 적 지 표	정 량 적 지 표
현 상	 <p>○체적압축발생 침하량 <math>S_c</math> 축방변위량 <math>\begin{cases} \delta_m \text{ (수평방향)} \\ \delta_{cv} \text{ (연직방향)} \end{cases}</math></p>	 <p>○형상변화발생 침하량 <math>S_r</math> 축방변위량 <math>\begin{cases} \delta_m \text{ (수평방향)} \\ \delta_v \text{ (연직방향)} \end{cases}</math></p>	○압밀변형에 비해서 전단 변형이 탁월할 때	○ S, $\delta_u$ , $\delta_v$ 의 거동 ○ Hair Crack 발생	○ $S \sim \delta_u$ 관리도 ○ $\Delta \delta_u / \Delta t - t$ 관리도 ○ $S \sim \delta_u / S$ 관리도 ○ $\Delta q_u / \Delta \delta_u \sim q_u$ 관리도 등
속 정 치	침하량 (성토중양부) 수평변위량 (성토법면단부) 연직변위량 (성토법면단부)	$S (= S_c + S_r)$ $\delta_u (= \delta_m + \delta_v)$ $\delta_v (= \delta_{cv} + \delta_m)$	○ $\delta_u$ 가 성토의 외속으로 증가한다 ○ $\delta_v$ 가 상향으로 증가한다		
강 상	○ 강도 증가	○ 강도증가 없음, 또는 저하	○ 지반의 강도(지지력) 이상의 성토하중이 재하될 때	○ $\Delta_u$ 의 거동 ○ 성토속도	○ $\Delta_u \sim q_u$ 관리도 ○ 안정계산
도 정 치	일축압축강도 $q_u$ 큰 강도 $q_c$ 등 성토하중 $q_c (= \gamma_{eff} H)$ 【 $\gamma_{eff}$ : 성토단체중량, 성토고】 과잉간극수압 $U_v$		○ $q_u$ , $q_c$ 등의 증가가 없거나 감소한다 ○ $\Delta_u$ 가 급증한다	○ 성토안정상 필요한 현장관리사항	○ Check Boring 등

### 3.2 정성적 관리

지반파괴 및 불안정 상태의 정성적인 경향은 다음과 같다.

- ① 성토의 천단부나 법면에 Arc-crack 발생
- ② 성토 중앙부의 침하가 급격히 증가 된다.
- ③ 성토 법면 끝 부분 지반의 수평 변위가 성토 외측 방향으로 급증
- ④ 성토법면 끝부분 지반의 수직변위가 상향으로 급증
- ⑤ 성토 작업을 중지하여도 ③, ④의 경향이 계속되며 지반내 간극 수압도 계속상승

상기의 경향이 각 측정항목의 측정치에서 나타나는 현상은 아래와 같다.

#### 1) 침하량

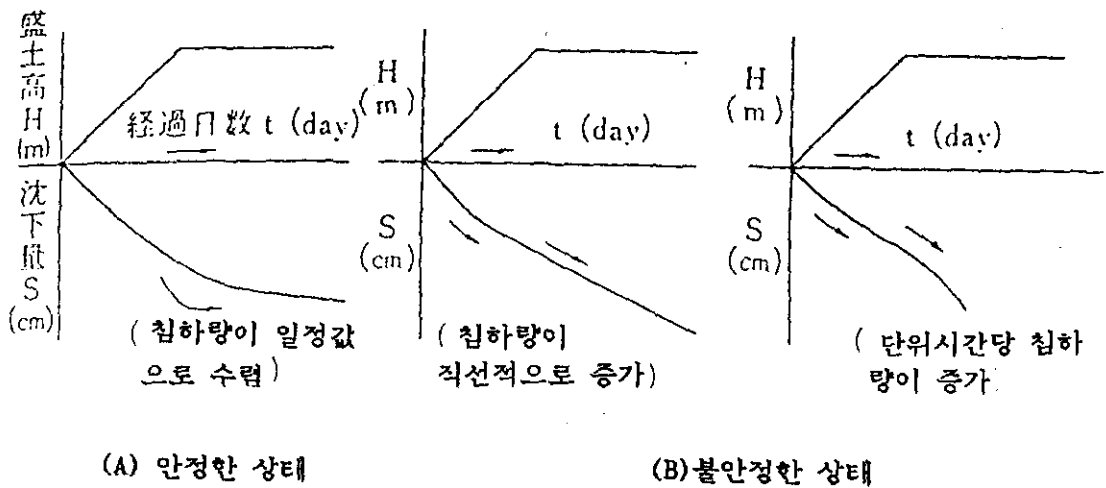
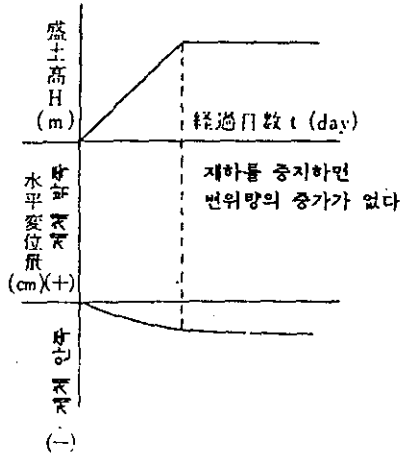


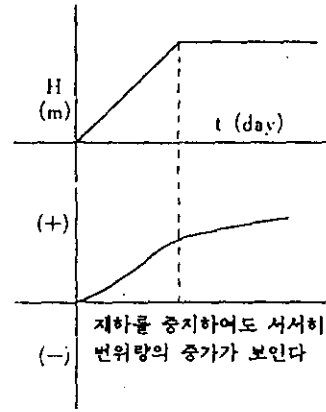
그림-14 침하량과 경시 변화



2) 지표면 변위

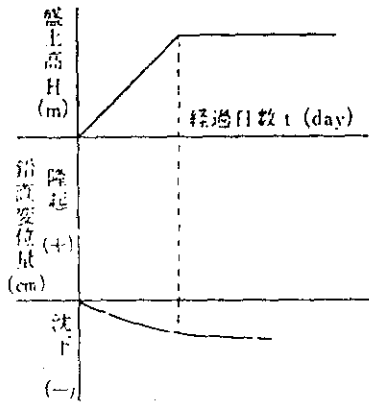


(A) 안정한 상태

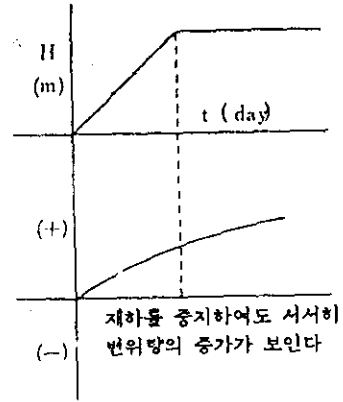


(B) 불안정한 상태

그림-15 변위 말뚝의 수평변위량의 경시 변화



(A) 안정한 상태



(B) 불안정한 상태

그림-16 변위 말뚝의 연직 변위량의 경시 변화

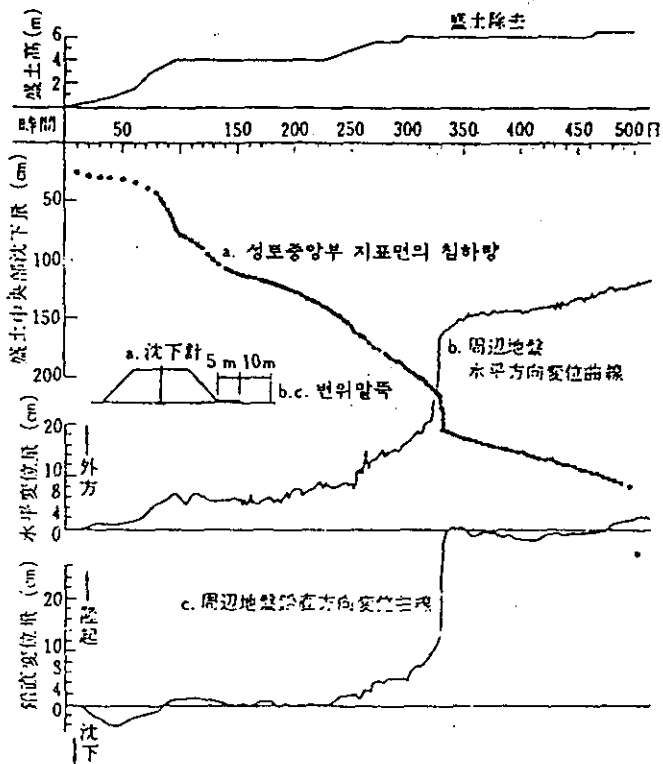


그림-17 침하계, 변위말뚝의 측정예(일본 東名高速道路 焼津지구)  
 도모에이 야기촌  
 (단면 - 나고야간)

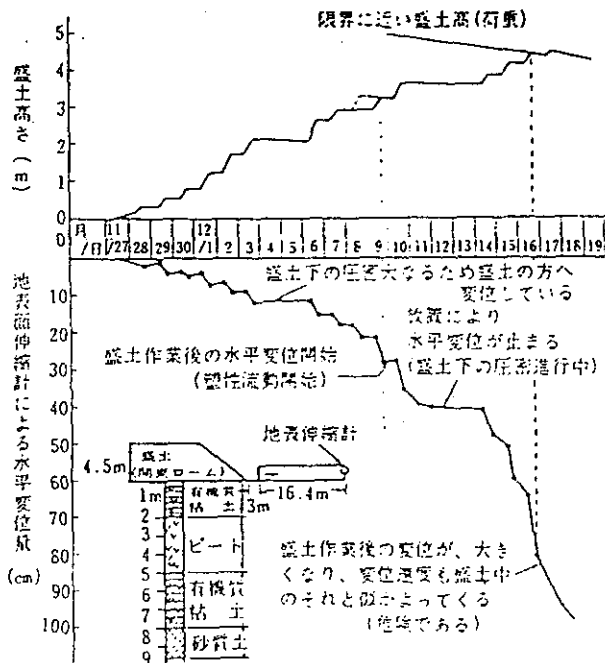


그림-18 신축계의 측정예(일본 東名高速道路 愛甲지구)  
 아이고

### 3) 지중 변위량

표-3 성토 작업 중단중의 측정치의 경시적 경향과 지반의 상태

지반상태 계기	I 기	II 기	III 기	IV 기	V 기
침하계 (공압부)	-----		침하	-----	
침하계 (법면단부)	-----		침하 또는 경지	용기	용기
변위량 (연직 변위)	침하	경지 또는 침하	용기	-----	
변위량 (수평 변위)	경지 또는 성토 속으로 변위	-----			
신속계	경지 또는 성토속	성토중 보다 변 위 속도 감소	-----		
성토상태	-----		있을	-----	
차단성토 기 불기	가	가	?	불기	불기

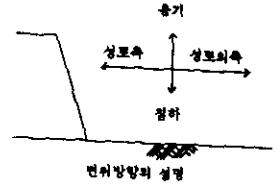
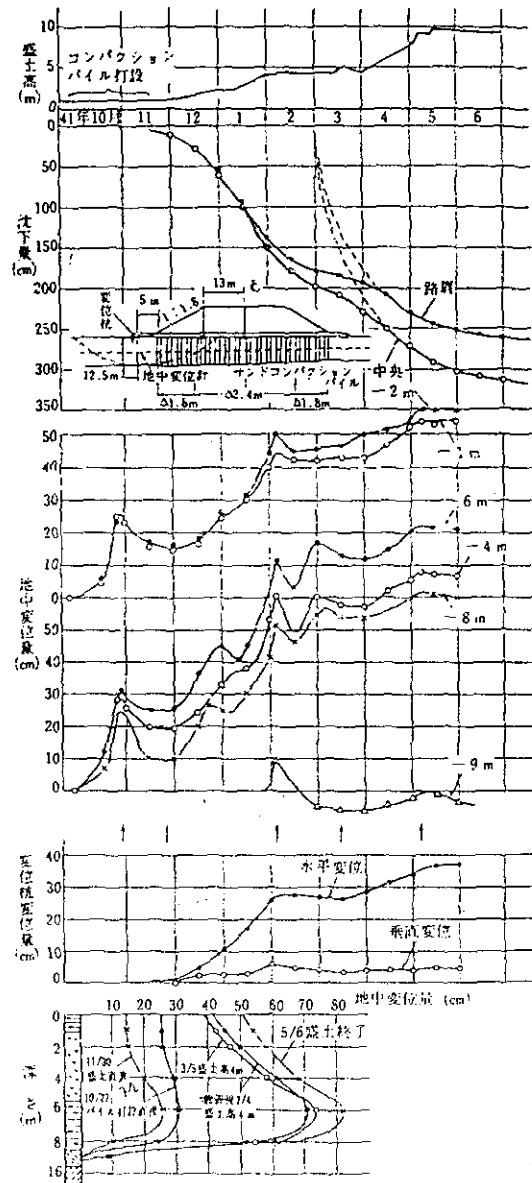


그림-19 地中變位計의 측정예  
(일본 東名고속도로 愛甲歌川지구)  
아이진 우에가와



### 3.3 정량적관리

과거부터 현장계측의 결과를 이용하여 성토체나 지반의 파괴를 정량적으로 예측하려는 여러가지 연구가 진행중이나 현재 일반적으로 사용되는 방법은 다음과 같은 것이 있다. 성토 중앙부의 침하량 S와 성토법면 끝부분의 수평변위량  $\delta$  및 성토 하중 q를 이용하여 안정관리 한다. S는 언약층이 매우 두꺼운 경우에는 안정에 관계되는 상층부의 침하량으로 하고,  $\delta$ 는 성토의 법면 끝 부분의 지표면 변위 말뚝 중 최대 변위를 나타내는 말뚝의 측정치로 하며 성토 바깥쪽으로의 변위를 정(正)으로 한다.

#### 1) S- $\delta$ 관리방법

S- $\delta$  관리도에서 하중이 작아 안정된 구간의 구배는 직선적이지만 하중이 커져 불안정하게 되면  $\delta$ 의 증가가 S에 비해 상대적으로 커지게 된다.

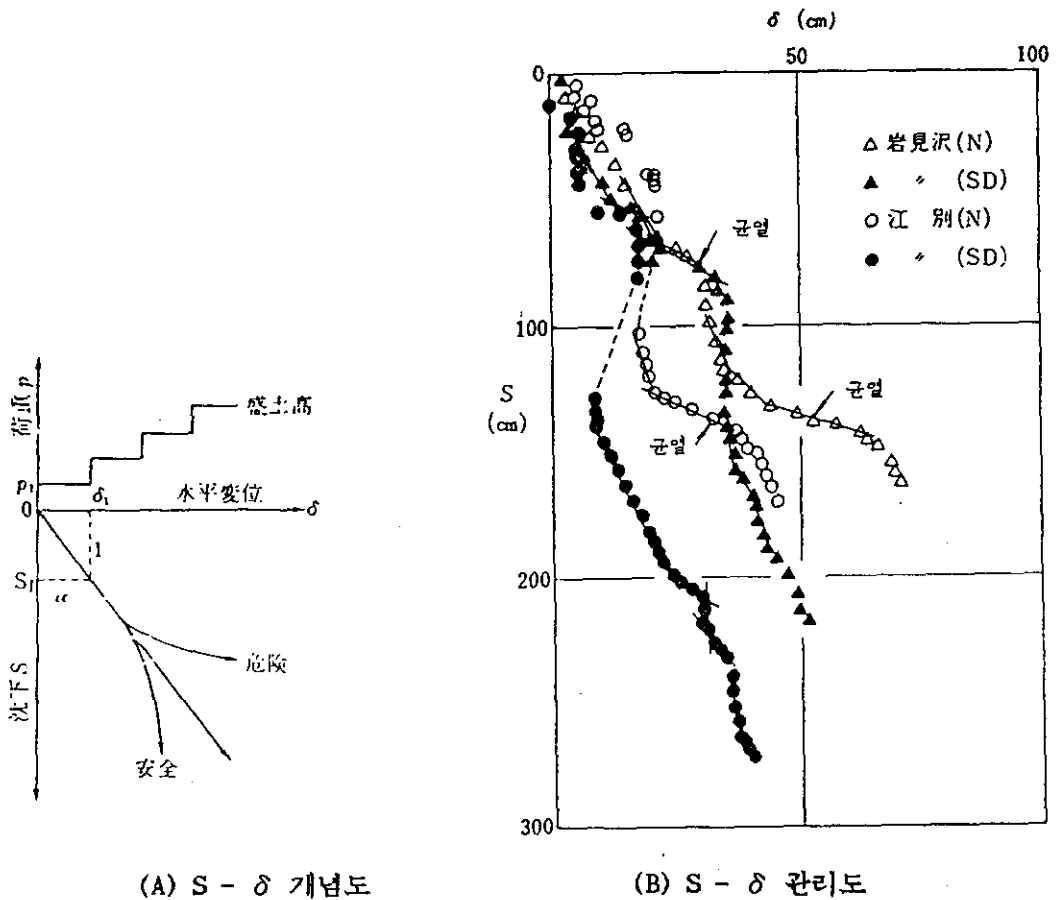


그림-20 침하(S) - 수평변위( $\delta$ )

외국의 실측 S- $\delta$ 관리도는 그림-20(B)와 같다. 그림에서 S- $\delta$ 관리도를 자세히 보면 단계성토에 따라 S- $\delta$ 곡선이 절곡되며 구배  $\alpha$  ( $\alpha = \Delta\delta / \Delta S$ )가 매 단계 커지게 된다. 재하후 방치기간을 두면 일단 증가된  $\alpha$ 는 점차 감소하게 된다. 여기서  $\alpha$ 를 주안점으로 하여 조사한 예가 다음의 그림-21과 같으며, 어떤  $\alpha$ 의 변화점 전후의 값을 각각  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 라 하여  $\alpha_2/\alpha_1$ 과  $\alpha_1$ 의 관계를 Plot한 것이다. 특히 그림중의 검은점은 재하에 의해 파괴 또는 불안정 상태가 된 경우이며, 흰점은 그렇지 않은 경우로서  $\alpha_2 = \alpha_1 + 0.5$  곡선은 안정과 불안정 영역으로 구분한다. 따라서 안정관리방법으로서 S- $\delta$ 관리법을 사용할 수 있을 것이다.

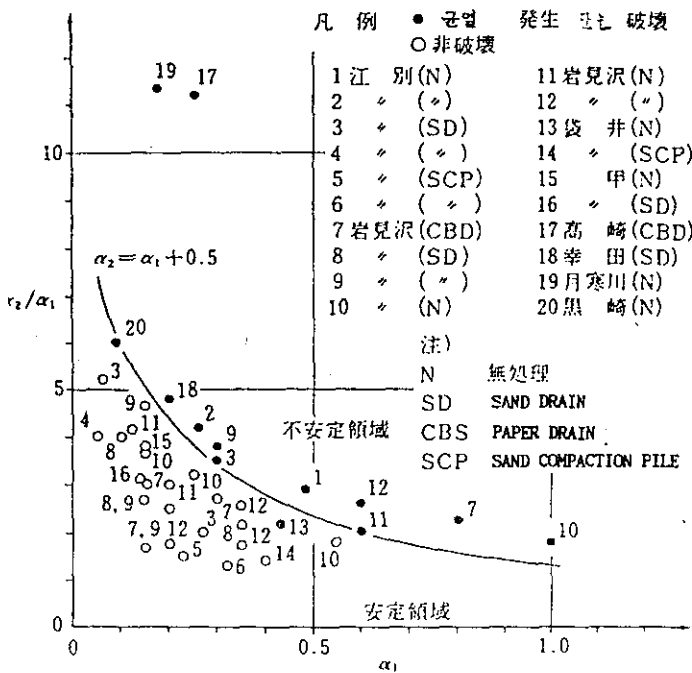


그림-21  $\alpha_2/\alpha_1 \sim \alpha_1$  관계

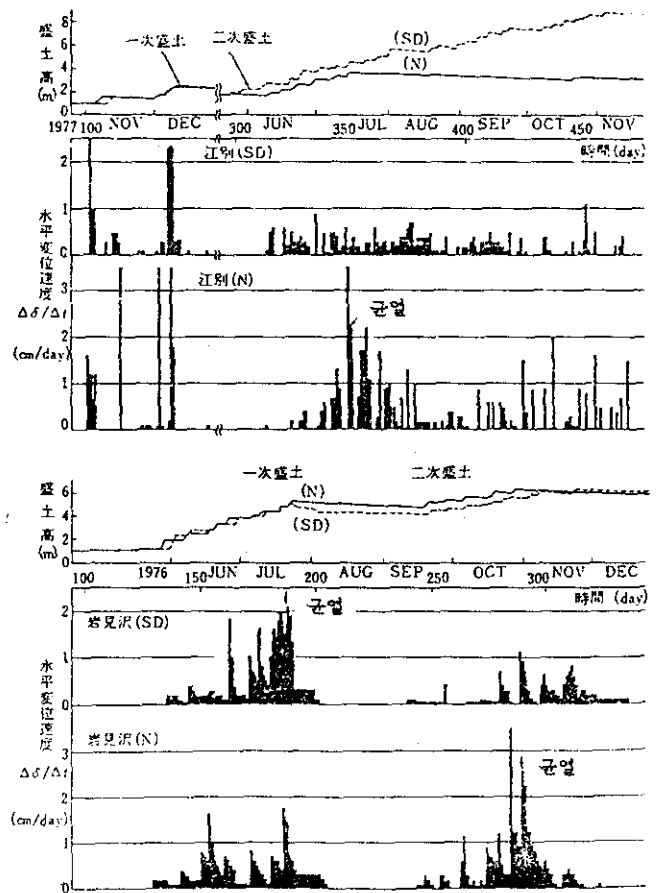
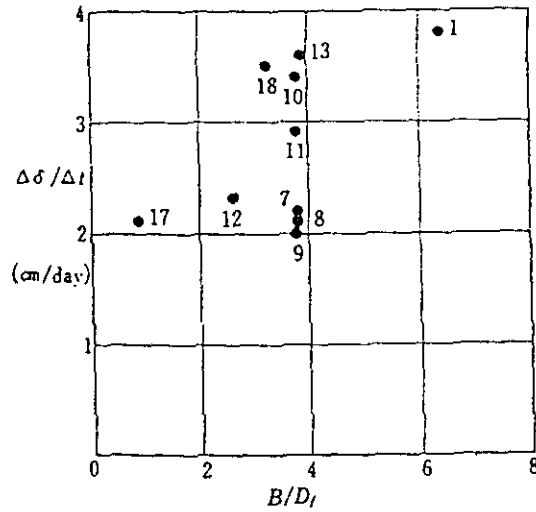


그림-22  $\Delta\delta/\Delta t$ 의 경시 변화

## 2) $\Delta\delta/\Delta t \sim t$ 관리 방법

$\delta$ 의 일일 변화량, 즉 수평변위 속도  $\Delta\delta/\Delta t$ 의 시간적 변화 관계를 이용하여 안정관리 하는 방법이다. 그림- 은 외국의 실측예이다. 이것에 의하면  $\Delta\delta/\Delta t$ 는 재하직후 Peak 치가 나타나고 이후 점차 감소하는 패턴을 매 재하시 마다 반복하고 있다.

$\Delta\delta/\Delta t$ 의 Peak 치가 과대하게 발생한 후 다음 재하까지,  $\Delta\delta/\Delta t$ 가 크게 감소하지 않은 경우에 균열이 발생되는등 불안정한 상태로 된다. 균열의 발생등 불안정한 상태가 발생된 재하단계의  $\Delta\delta/\Delta t$  Peak치를 그린것이 그림-23 이다. 여기서 가로축의 B/Df의 B는 성토폭의 반이며, Df는 추정 활동면까지의 깊이이다. 栗原<sup>3)</sup>은  $\Delta\delta/\Delta t \geq 2 \sim 3\text{cm/日}$ 을 불안정하게 되는 판단기준으로 제안하였다. 그러나 지표부가 매우 언약한 경우, 성토의 초기 단계에서  $\Delta\delta/\Delta t$ 의 Peak치가 매우 크게 나타나는 경우가 있는데 성토시 국부적인 파괴가 발생되기 쉬우나, 성토체의 전체적인 안정에는 무관하다. 따라서 위의 판단기준은 성토공사 후반단계의 안정관리에 유효하다.



주) 번호는 그림 21과 같다

그림-23 불안정한 상태에서의  $\Delta\delta/\Delta t$

### 3) S~ $\delta$ /S 관리방법

마판도  
松尾는 많은 성토파괴 예로부터 S~ $\delta$ /S 관계를 정리하여, 파괴는 일정한 곡선 부근에서 발생되고 있다는 것을 발견하였으며, 이 곡선을 파괴기준선으로 제시하였다. 시공중 S~ $\delta$ /S 관계가 이 파괴기준선 근처에 있는 경우에는 파괴에 이르는 경향이 있고 멀어지면 안정된다고 설명하였다. 아래 그림은 S~ $\delta$ /S 관리도의 예이다.

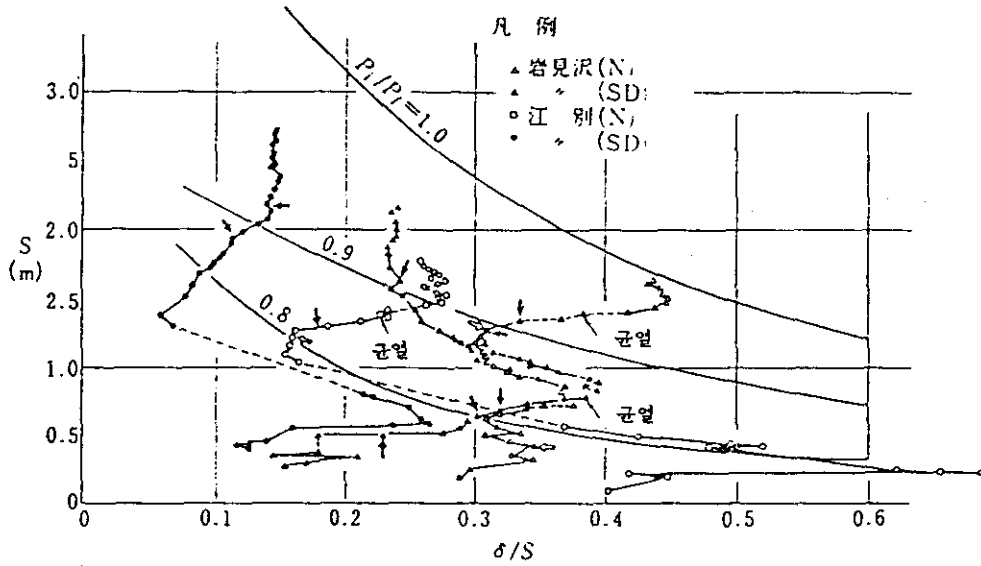


그림-24 S~ $\delta/S$  관리도

여기서,  $P_j$ 는 임의 시점의 성토하중이며,  $P_f$ 는 파괴시의 성토하중이다. 따라서  $P_j/P_f = 1.0$  곡선은 파괴기준선이며  $P_j/P_f = 0.8$ ,  $P_j/P_f = 0.9$ 는 파괴시 성토하중의 각각 80%, 90%를 의미한다.

$$P_j/P_f = 1.0 :$$

$$S = 5.93 \exp \{ 1.28(\delta/S)^2 - 3.41(\delta/S) \}$$

$$(0 < \delta/S \leq 1.4)$$

$$P_j/P_f = 0.9 :$$

$$S = 2.80 \exp \{ 0.40(\delta/S)^2 - 2.49(\delta/S) \}$$

$$(0 < \delta/S \leq 1.2)$$

$$P_j/P_f = 0.8 :$$

$$S = 2.94 \exp \{ 4.52(\delta/S)^2 - 6.37(\delta/S) \}$$

$$(0 < \delta/S \leq 0.8)$$

많은 예에 의하면, 불안정한 상태가 발생하는 것은 S~ $\delta/S$  관계가

- ① 성토초기에 크게 오른쪽으로 움직이는 경우
- ②  $P_j/P_f = 0.8 \sim 0.9$  부근에서 파괴기준선으로 향하여 오른쪽으로 나오는 경우
- ③ 파괴기준선 부근에 도달한 경우 등이다.

이러한 관리 방법은 시공과정 중에 성토가 안전상 상대적으로 어떤 상태에 있는지, 불안정한 경향으로 향하는지 등을 아는데 효과적이다.

#### 4) $\Delta q/\Delta \delta \sim q$ 관리 방법

開口<sup>2)</sup>는 수치계산에 의해 비배수 조건하에서 일정속도로 제하한 경우, 성토하중  $q$ 에 대하여  $\Delta q/\Delta \delta$ 가 거의 직선적으로 감소하는 것을 발견하였다.  $\Delta q/\Delta \delta$ 가 0으로 될때, 즉  $\Delta q/\Delta \delta$ 와  $q$ 의 관리도에서  $\Delta q/\Delta \delta$ 와  $q$ 의 직선이 횡축과 만나는 점이 파괴 하중이라고 제시하였다. 그림-25는 성토하중  $q$ 대신 성토고  $H$ 로서 나타낸  $\Delta q/\Delta \delta \sim H$  관계 예이다.

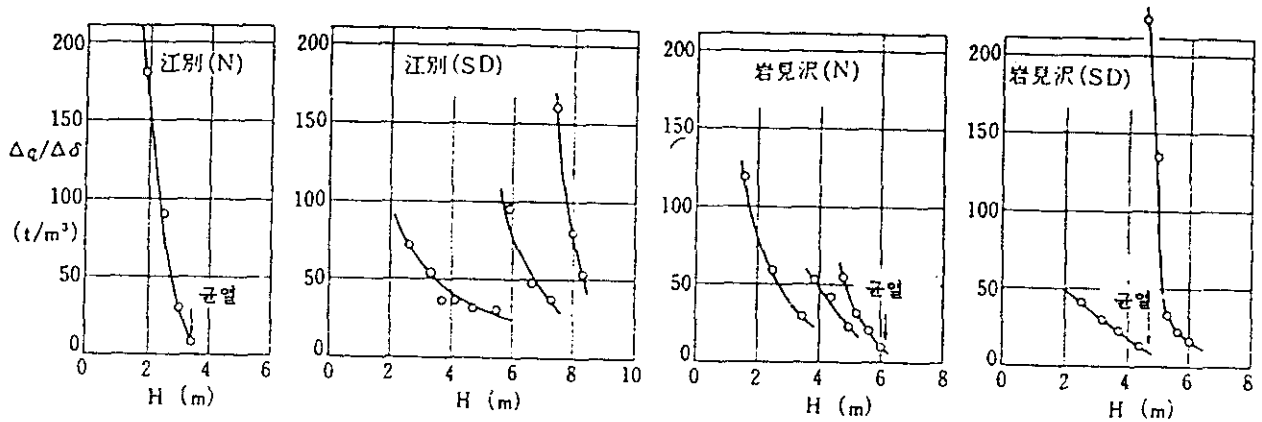
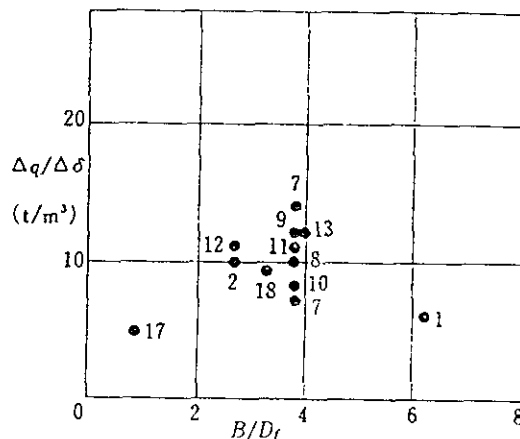


그림-25  $\Delta q/\Delta \delta \sim H$  관리도

실제시공에서는 비 배수조건도 아니며, 성토속도도 일정하지는 않기 때문에  $\Delta q/\Delta \delta \sim H$  관계는 꼭 그렇게 되는 것은 아니지만, 통상  $\Delta q/\Delta \delta$ 는  $H$ 의 증가와 함께 감소 경향을 나타낸다. 따라서 이와같은 감소경향으로서 한계성토고를 추정할수 있다. 그러나 성토속도가 매우 느린 경우에는  $\Delta q/\Delta \delta \sim H$  곡선이 완만하게 나타나 한계성토고의 추정이 곤란하다. 그림-25에서 여러개의 곡선으로 나누어져 있는 것은 재하도중의 방치기간이 있어  $\delta$ 의 증가가 정지 되었기 때문이다. 여러사례 중 균열이 발생된 경우의  $\Delta q/\Delta \delta$ 의 값을  $B/D_f$ 에 대하여 그려보면(그림-26)과 같다. 이것에 의하면  $\Delta q/\Delta \delta \leq 15t/m^3$  이 불안정의 판단기준이 된다.



주) 번호는 그림 21과 같다

그림-26 불안정상태에서의  $\Delta q/\Delta \delta$



## 4. 침하관리

### 4.1 침하관리의 의의

침하관리는 안정관리와 별개로 실시되는 것은 적다. 통상 함께 행해지며 사용하는 계기도 공통된다. 침하관리의 목적은 다음과 같다.

- 1) 장래 침하량을 예측하여 토탕, 성토단면 형상의 수정, 토공 계획고와 지중 구조물의 장기침하량을 결정한다.
- 2) 선하중(Preloading)의 재하기간과 제거시기를 결정한다.
- 3) 장래침하량의 예측에 따라 잔류 침하량을 추정하여 교대와 성토의 연결부 단차와 그외의 침하에 대한 대책을 검토한다.
- 4) 공사부지를 포함한 주변지반의 변형, 수토등 기존구조물의 변위등을 측정하여 장애가 발생되지 않도록 관리한다.

따라서 침하관리를 위해서는 성토중의 침하량 측정치를 이용한 장래침하량의 예측이 중요하다.

### 4.2 실측치를 이용한 침하량 추정법

시공중 침하량을 측정하여 장래의 침하량을 추정하는 방법은 아래의 몇가지가 있다.

#### 1) 쌍곡선법 (官川의 방법) 이야가와

이 방법은 침하속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정에 따른 것으로서 침하-시간곡선은 다음식과 같다.

$$S_t = S_o + \frac{1}{\alpha + \beta t}$$

여기서,  $S_t$  : 임의 시각  $t$ 에서의 침하량

$S_f$  : 최종 침하량

$S_o$  : 점토시점의 침하량

$$S_f = S_o + \frac{1}{\beta}$$

$t$  : 점토시점으로 부터 측정한 시간

$\alpha, \beta$  : 계 수

위 식을 변형하면

$$\frac{t}{St - S_0} = \alpha + \beta t$$

종축을  $t/(St-S_0)$ 로 잡고,  $t$ 에 따라 그리면 직선이 얻어지는데 이 직선의 종축절편이  $\alpha$ , 구배가  $\beta$ 이다.

## 2) $\sqrt{t}$ 法

순간적으로 하중을 가하여  $t$  시간후에 발생한 전 침하량  $S$ 는 재하 직후에 발생된 순간침하량  $S_i$ 와 시간과 함께 증가하는 침하량  $S_t$ 와의 합으로 표현되며,  $S_t$ 는 다음식에 의하면 기간의 편방근에 비례한다고 생각된다.

$$S = S_i + S_t = S_i + \frac{Ak \sqrt{t}}{\sqrt{1 + k^2 t}}$$

여기서,  $A$  :  $S_t$ 의 최종값을 주는 계수

$k$  : 침하속도를 지배하는 계수

위 식을 변형하면

$$\frac{t}{(S - S_i)^2} = \frac{1}{A^2 k^2} + \frac{1}{A^2} t \text{ 로 되며,}$$

$t / (S - S_i)^2$  과  $t$ 가 직선관계이다.

$S_i$ 를 적당히 선택하여  $t / (S - S_i)^2 \sim t$  관계가 직선으로 되도록 하면 이 직선의 절편과 구배로부터  $A, k$ 의 계수가 얻어진다. 최종 침하량은  $S_f = S_i + A$ 로 주어진다. 실제 시공의 경우와 같이 점증재하는 성토기간의 중간점을 시간의 원점으로 잡고 순간 재하의 조건으로 맞춘다.

### 3) 淺岡의 方法

아사모가

淺岡은 하중이 일정한 때에 침하량을 나타내는 간편식으로서 다음과 같은 차분식을 제시하였다.

$$S_j = \beta_0 + \beta_1 S_{j-1}$$

여기서  $S_j$  : 시간  $t$ 를 離散化하여  $t_j = \Delta t \times j$  ( $j = 0, 1, 2, \dots$ ) 으로

한때의 시간  $t_j$ 에 있어서의 침하량

$s_{j-1}$  : 시각  $t_{j-1} = \Delta t \times (j - 1)$  에서의 침하량

$\beta_0, \beta_1$  : 계 수

이식은 어떤시각  $t_j$ 에 있어서의 침하량  $S_j$ 와 그것에서  $\Delta t$  만큼전의 시간  $t_{j-1}$ 에서의 침하량  $S_{j-1}$  사이에 직선관계가 성립한다는 것을 나타내고 있다.  $\Delta t$ 는 임의로 잡고, 예를 들어  $\Delta t = 7$ 일로 하면 측정치 중에, 재하후 1일의 침하량과 8일의 침하량, 2일의 침하량과 9일의 침하량.....을 Plot 하면, 직선이 얻어진다. 직선의 절편과 구배로부터 계수  $\beta_0, \beta_1$  이 얻어진다.  $t = \infty$ 의 경우  $S_j = S_{j-1} = S_f$ , 즉 최종침하량이 되지만, 이것은 앞의 직선들과 원점을 통하는  $45^\circ$ 의 직선과의 교점이 최종침하량이라는 의미이다.

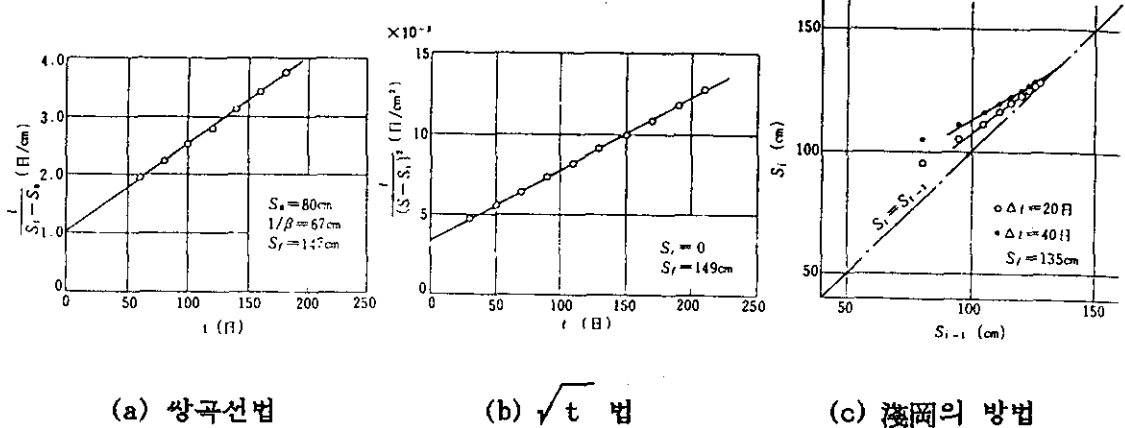


그림-27 장래 침하량의 추정 에

그 외에 Vertical Drain으로 연약지반 처리를 하는 경우 특히 문제로 되는 Ch(횡방향 압밀계수)를 재하중 초기의 실측침하량으로부터 직접 현장에서의 Ch를 정하여, 장래의 침하량을 예측하는 방법을 門田등이 제시하였다. 이것은  $Th - \log u / u_0$  관계에서 직선이 된다는 것을 이용한 것이다.<sup>5)</sup>

## 5. 참고문헌

- 1) T.W.Lambe, R.V,Whitman, "Soil Mechanics, SI Version", John Wiley & Son, p 116 - 121, 1979
- 2) 한국도로공사, "도로설계요령 제 2권 토공 및 배수", p192 - 240, 1992.12
- 3) 建設産業調査會, "土木建築技術者のための軟弱地盤ハンドブック", p40 - 65, p184 - 201, p425 - 455, 1981.9
- 4) Sekiguchi, H & T.Sibata, "Undrained Behavior of Soft Clay under Embankment Loading, 3rd Int. Cont. Numerical Methods in Geomechanics, Achen, 1979
- 5) 土質工學會, "地盤改良の調査設計から施工まで, 現場技術者の土と基礎シリーズ", 3巻, p42, p53-54, p68-72, 1978.3
- 6) 栗原則夫, "盛土設計法に對する確率論的アプローチ", 日本道路公團試験所報告, 1972
- 7) 栗原則夫, 一本英三郎, "動態観測の活用(道路盛土工における実施例)", 昭和52年度土木學會關西支部講習會テキスト, 1974

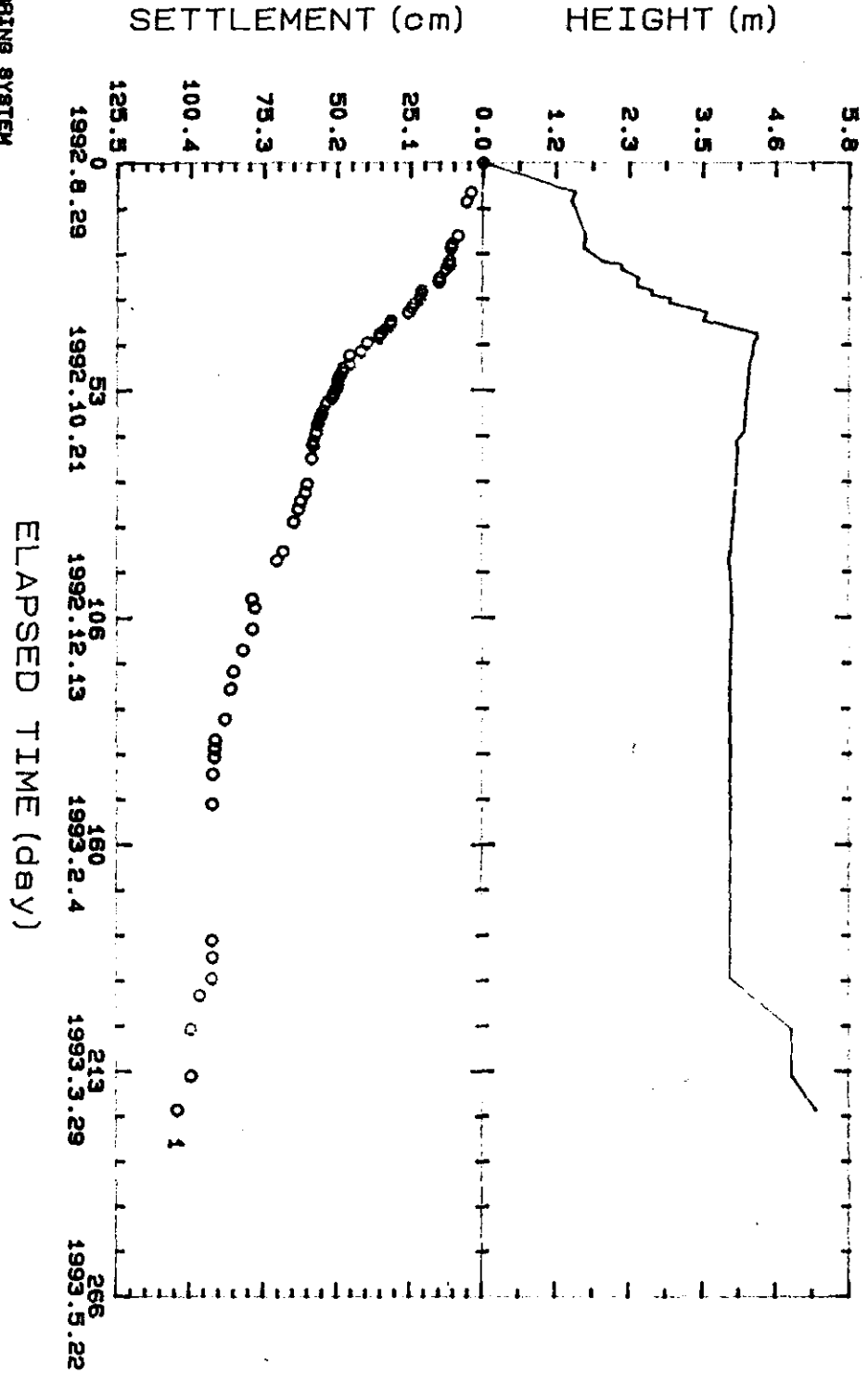
## 부록; 국내연약지반 계측사례

# GROUND SURFACE SETTLEMENT

TITLE : YK010

LOCATION : JOK220 (1)

FINAL DATE : 1993.04.08



EMBANKMENT MONITORING SYSTEM

ELAPSED TIME (day)

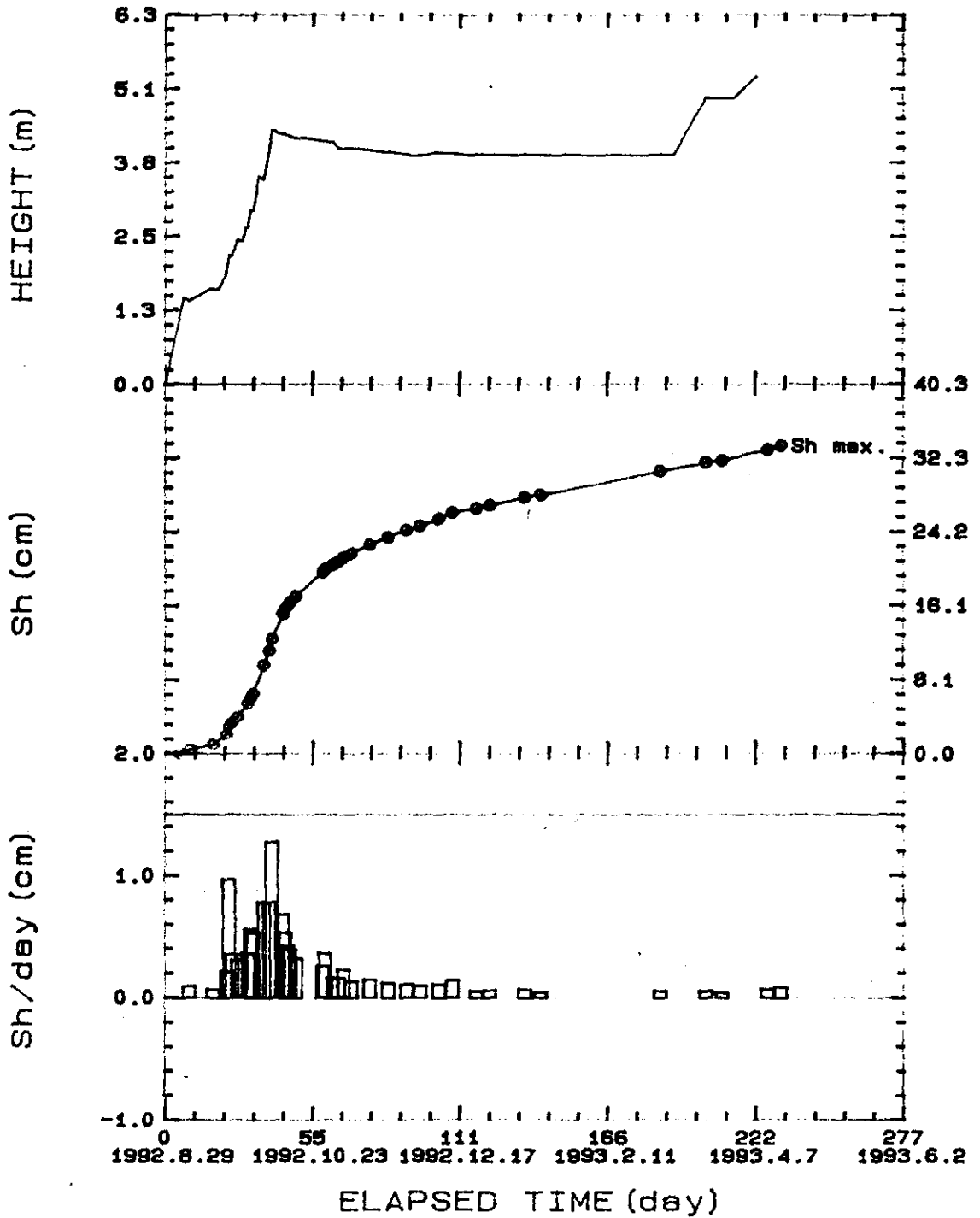
VERSION 1.70

# Sh & Sh/day

TITLE : YK010

LOCATION : JOK220

FINAL DATE : 1993.04.17



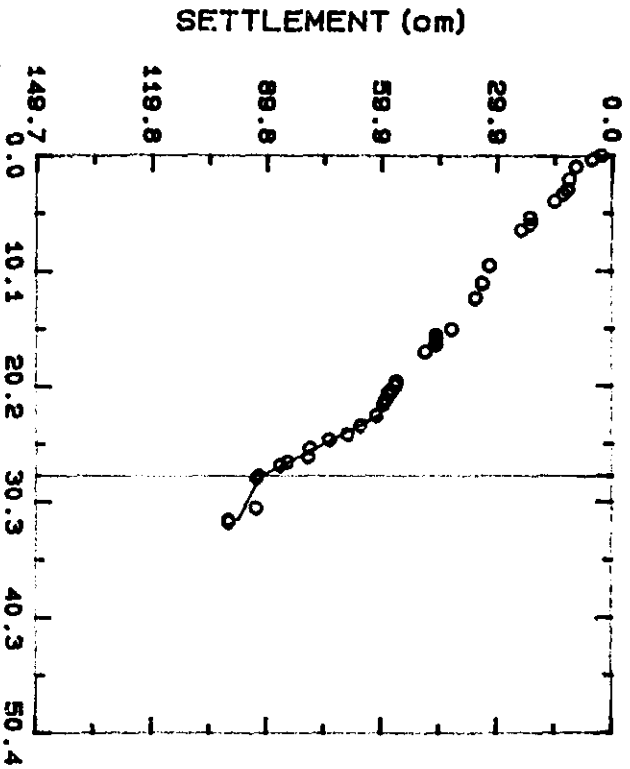
# RESULTS OF MEASUREMENT IN SITU

TITLE : YK010

LOCATION : JOK220

FINAL DATE : 1993.04.17

SV-Sh maximum METHOD

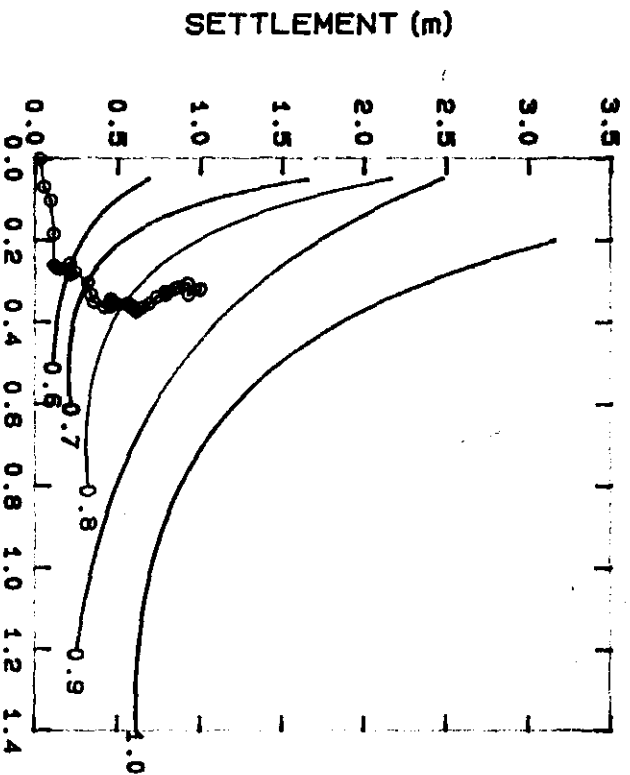


HORIZONTAL DISPLACEMENT (cm)

ALPHA1 = 0.17 ALPHA2 = 0.54

RESULT : STABLE

SV-Sh/SV METHOD



HORIZONTAL DISPLACEMENT/SETTLEMENT

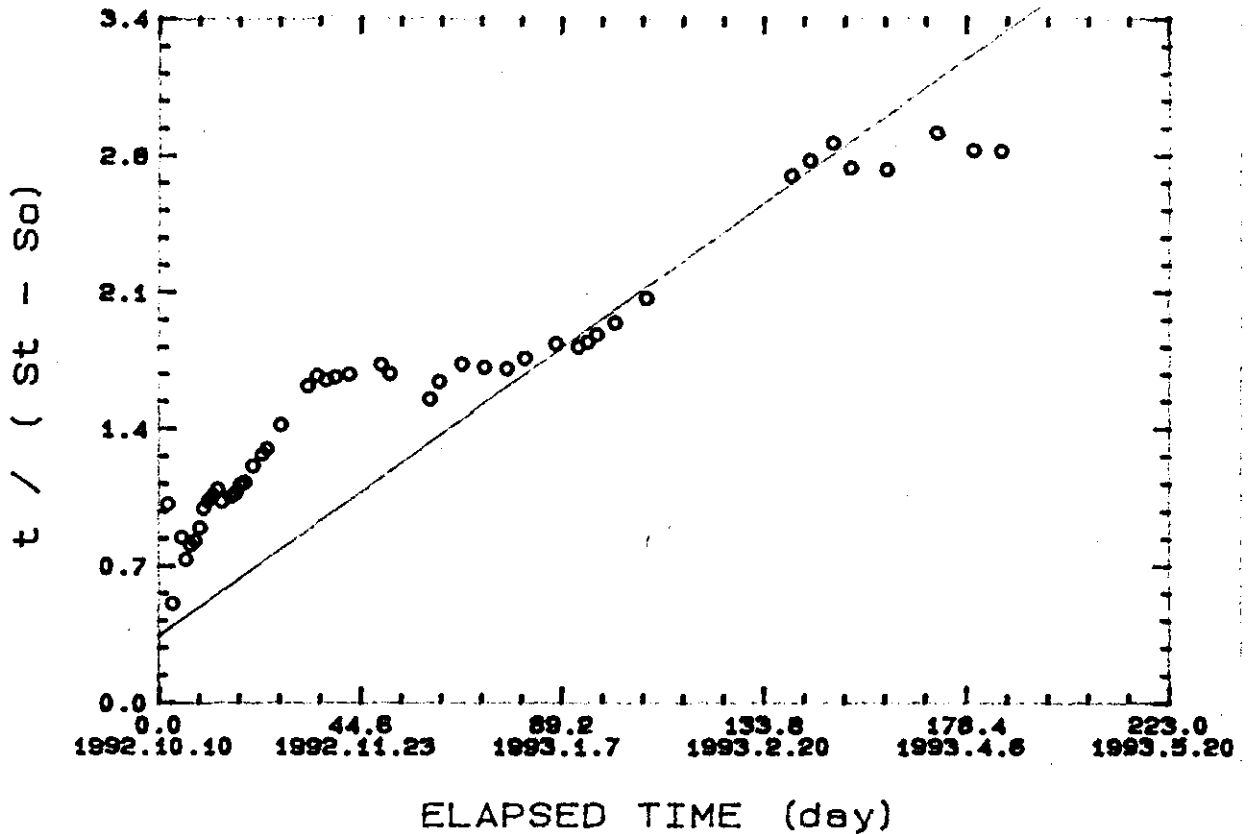
RESULT : STABLE



# RESULTS OF MEASUREMENT IN SITU

TITLE : YK010  
 LOCATION : JOK220  
 FINAL DATE : 1993.04.14

## HYPOBOLIC METHOD



ALPHA : 0.336  
 BETA : 0.016                      1 / BETA : 61.51  
 $St = So + t / ( ALPHA + BETA * t )$   
 INITIAL SETTLEMENT (cm) : 39.80  
 FINAL SETTLEMENT (cm) : 101.31  
 OPTIONAL ELAPSED TIME (day) : 201 ( 1993.4.29 )  
 SETTLE. OF OPTIONAL ELAPSED TIME (cm) : 95.58  
 DEGREE OF CONSOLIDATION (%) : 94.34  
 TIME OF CONSOLIDATION 90% (day) : 146.7 ( 1993.3.5 )

# Sh & Sh/day

TITLE : NK020

LOCATION : 10K120

FINAL DATE : 1993.04.13

