

지반구조물 거동의 정보확보와 시공에의 이용(III)

김 용 진*

3. 연약지반 개량과 계측

3.1 계측관리의 필요성

지반조사를 근거로 설계시 예측한 지반의 거동이 지반조사의 미비와 설계과정에 포함된 가정, 단순화 및 이상화에 따른 불확실성의 개입으로 인하여 현장에서 시공 중 또는 시공 후 실제 거동과 상이한 양상을 보이는 경우는 심심치 않게 경험하는 일로, 일반적으로 연약지반 공사의 경우 그 경향이 더욱 심하다 할 수 있다.

연약지반에 성토를 하는 경우 침하관리 및 안정관리의 수단으로 계측관리가 요구된다. 이때 주요 계측항목으로는 침하, 수평변위, 간극수압으로써 이로부터 성토에 따른 침하량을 추정하여 성토속도관리, 토공량 산출 및 상재 하중 제거시기 결정 등 시공지침을 얻을 수 있으며, 또한 침하량과 수평변위는 성토에 따른 지반의 전단활동에 대한 안정성 평가자료로 이용된다.

이렇듯 설계시 예측치 못한 지반의 거동을 추정하여 과도한 변형이나 파괴를 사전에 방지하고 필요한 대책마련을 위하여 현장계측관리에 의한 시공관리의 중요성은 한층 더 중요하게 부각되고 있다.

3.2 계측기의 선정 및 배치

일반적인 연약지반 계측관리 항목으로는 간극수압, 지표면 침하, 층별침하, 성토사면 선단의 수평 및 수직 변위 등이 있으며, 계측기의 배치간격은 연약지층구성 및 구조물의 중요도에 따라 달라질 수 있다.

3.2.1 간극수압 측정

(1) 개방형(Open Standpipe) 간극수압계
Standpipe와 다공질 Tip의 간단한 구조로 이루어져 있는 수압계로서 여러 종류의 지반에 걸쳐 장기적으로 비교적 안정된 측정치를 얻을 수 있으며, 별도의 탈기장치를 필요치 않고, 부식에 강하며, 가격이 저렴하고 다루기가 편리한 장점이 있다. 특히 투수계수가 중간이상의 지반에서 널리 사용되고 있다. 개방형 간극수압계는 신뢰도가 매우 높으므로 타 종류의 간극수압계를 검증하는데 이용되기도 한다. Standpipe내의 수위는 눈금이 매겨진 케이블과 케이블을 감는 드럼으로 구성된 Dipmeter로 측정하는 것이 일반적이며, 피압대수층과 같이 고수위가 예상되는 경우는 Standpipe에 부르돈관을 결합하여 간극수압을 측정하기도 한다.

(2) 수압식(Hydraulic)간극수압계

지중에 설치한 Tip과 필터를 통해 가해지는 수압을 튜브내의 물에 전달시켜 지상에 설치된

* 정회원, (주)다산컨설팅 지반공학부 전무이사

부르돈관이나 마노메타를 이용하여 수압을 측정하는 방식의 수압계로 측정원리 및 구조가 간단하고, 안정성 및 신뢰도가 높고 내구성도 좋은 장점이 있으며, 또한 과잉간극수압의 측정 시에는 마노메타의 일단을 지하수중에 넣어 측정함으로써 상대적으로 신뢰도 높은 측정치를 얻을 수 있다. 그러나, 튜브의 누수 방지를 위하여 매설시 세심한 주의가 필요하며, 동결기에는 동결의 우려가 있으므로 별도의 동결방지대책을 마련하거나, 타 형식의 간극수압계를 사용하여야 한다.

한편, 측정장치로 마노메타를 사용하는 간극수압계는 자동기록에 적합하지 않아서 측정과 유지관리면에서 다소 어려움이 있지만, 타 형식의 간극수압계보다 신뢰성 높은 계측치를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

(3) 전기식 간극수압계

수압에 의해 발생한 Tip 내부 다이어프램의 변형을 전기적 변환기를 이용하여 전기적 신호

로 출력을 얻는 형식의 수압계로, 자동기록이 용이한 장점으로 인하여 현재 사용되어 지고 있는 간극수압계의 대부분을 차지하고 있다. 그러나, 수압계 매설 후 검정이 불가능하고, 장기신뢰성에 문제가 있는 것으로 알려져 있다. (제로점 이동, Hysteresis 발생 등)

(4) 공기압식 (Pneumatic) 간극수압계

간극수압 측정 시 공기 또는 다른 유체를 사용하는 것 외에는 전기식 간극수압계와 작동원리가 유사한 간극수압계로, 측정지점의 선택이 자유롭고 (측정지점이 Tip의 직상향이어야 할 필요가 없음), 물을 사용하지 않으므로 동결의 위험도 없으며, 측정치의 정확도가 높고 설치가 용이한 장점을 가지고 있으나, 불포화지반의 음의 간극수압을 장기간 측정하는 경우에는 부적합한 것으로 알려져 있다.

종류별 간극수압계에 따른 특성들을 표 3.1에서 비교하였다.

표 3.1 간극수압계 특성 비교

	개방형	수압시	전기식(진동현식)	공기압식
구조	간단	간단	복잡	복잡
가격	저가	중간	고가	고가
Time Lag	길다	중간	짧다	짧다
측정위치	계기매설근처	중앙관측시스템	중앙관측시스템	중앙관측시스템
탈기장치	불필요	필요	불필요	불필요
장기신뢰성	중간	양호	불량	불량
동결문제	있음	있음	없음	없음
연속기록	곤란	곤란	용이	가능
음간극수압측정	안됨	가능	가능	안됨
온도의 영향	적다	중간	크다	중간

3.2.2 변위 측정

(1) 성토구조물 자체나 주변지반의 수평 및 수직 변위의 측정을 위해 사용되는 가장 간단하고 기본적인 방법이다. 일반적으로 변위말뚝은 10-15cm의 사각단면을 가진 나무말뚝을

50-100cm의 길이로 만들어 사용하며, 변위판은 변위말뚝 상단에 30×30cm 정도의 판을 부착하고 그 판 위에 측정점이나 표적을 설치하여 사용한다. 변위말뚝 및 변위판을 이용한 변위 측정 방법은 거의 모든 지반에 적용가능한 방

법으로 지표면 위로 돌출되는 변위말뚝의 높이는 20cm 정도로 하는 것이 바람직하며, 지반의 침하 및 융기의 측정은 변위말뚝 상단 중앙부에 못으로 측점을 만들어 직접 수준측량하여 구하게 되며, 수평변위는 Steel tape나 트랜싯 등으로 측량하여 구한다.

(2) 표면침하판

성토공사시 원지반의 전 침하량 및 성토구조물내 임의의 지점에서의 침하량을 구하기 위해 사용되는 것으로 침하판에 Rod를 용접한 간단한 구조로 되어있다. 일반적으로 침하판은 40-60cm의 사각형 강판이 사용되며, Rod와 흙과의 마찰을 제거하기 위해 Casing Pipe를 사용한다. 침하판 설치시 침하판과 설치면이 일체로 되어 침하할 수 있도록 하기 위하여 설치면과 침하판 사이에 소량의 모래를 포설하는 것이 좋으며, Rod의 선단이 지표위로 돌출해 있게되므로 파손에 주의하여야하고, Casing Pipe의 하단과 표면침하판의 간격(Clearance)은 예상침하량 보다 크게 두어야 한다. 계측시에는 부동점을 기준으로 침하판과 연결된 Rod 상단을 수준측량하여 침하량을 구한다.

(3) 심층형 침하계

원지반 심층부의 침하량을 측정하고자 할 때 사용되는 것으로 구조는 표면침하판과 유사하나, 단지 정착부로 침하판 대신 Anchor를 이용했다는 점이 다르며, 측정방법 및 유의사항은 표면침하계와 동일하고, 매우 연약한 점토층에서 사용되는 경우는 지반의 침하와는 관계없이 내관의 자중에 의해 침하계만 침하하는 경우가 있으므로 세심한 주의가 요구된다.

(4) Tell-Table Rod(고시막대)

침하 측정 및 타 측정의 기준점의 용도로 이용되며, 표면침하판과 심층형침하계를 결합한 형태로 침하의 영향이 미치지 않는 지지층에 그라우팅으로 Borros Anchor를 고정시킨 후 성토공사를 진행하다 침하측정이 요구되는 위

치에 침하판을 설치하여 침하량을 측정한다. 침하량은 Borros Anchor의 상단과 침하판 상단의 상대처짐(Relative Settlement)으로부터 산출하며, 일반적으로 상대침하는 Steel Tape를 이용하여 측정하지만, 다이알게이지를 이용하면 신뢰도 높은 측정치를 얻을 수 있다. 계측기간중 지표면 위로 돌출된 Borros Anchor의 상단부가 파손되지 않도록 주의해야 한다.

(5) 신축계(지표면변위계)

지표면 두 점사이의 상대변위를 측정하는 것으로서 원리와 구조가 간단하여 성토구조물의 측방유동이나 사면의 안정점토를 위해 널리 사용된다. 측정말뚝에 연결된 Invar선을 통해 전달된 지표면 변위를 기록장치로 부터 읽어 두 지점사이의 신축량을 구한다. Invar선은 계측의 정확도 확보를 위하여 P.V.C. Pipe등으로 보호해야 하며, 기록장치에도 보호상자를 설치하여 파손을 예방하여야 한다.

(6) Inclinator

지중의 수평변위측정에 이용되는 Inclinator는 탐색봉(Probe), 기록계(Indicator), Cable 및 Access Tube로 구성되어 있으며, 이중 Access Tube는 지하수위측정관으로도 이용 가능하다. 수평변위는 경사감지 Sensor가 내장된 탐색봉을 Access Tube의 저면부에서부터 0.5m 또는 1m씩 들어올리면서 수직축에 대한 경사각을 읽어 구하며, 정확도를 높이기 위한 방향의 측정이 끝나면 탐색봉을 180도 돌려서 반복측정한다. 측정하지 않을 때는 Access Tube로 이물질이 들어가는 것을 방지하기 위하여 덮개를 씌워놓아야 하며, 측정시에는 덮개를 열고 약 5-10분 정도 대기한 후 측정을 하여 Access Tube내의 온도와 대기온도와의 차이로 인한 오차를 줄여야 한다.

표 3.2에는 성토공사시 계측에 사용되는 계측기 및 목적을 나타내었다.

표 3.2 성토공사시 계측에 사용되는 계측기 및 목적

계측기	계측목적 및 결과이용	매설기준		
		A	B	C
표면침하판	대상지점의 전침하량 측정 (성토속도관리 및 Surcharge 제거시기의 결정등에 결과를 사용)	*		
층별침하계	특히 연약층이 두꺼운 곳에서 심부 각 층의 침하량을 측정. 심부의 지반거동을 파악 (성토속도관리 및 Surcharge 제거시기의 결정등에 결과를 사용)		*	
경사계	성토사면 하부지반의 수평변위를 측정 (성토속도의 관리, 지중의 측방이동량을 확인)			*
토압계	성토하중에 의한 연직방향의 증가토압을 측정 (특히 Sand Pile 타설장소 등에 있어서 Sand Pile과 주변지반의 하중분담율을 검토해서 그 효과를 확인)			*
간극수압계	성토하중에 의한 간극수압의 증감을 측정) 간극수압증감에 의해 대책공의 효과, 침하상태 확인에 이용)			*

여기서,

- A:대책공법 시공장소 및 안정, 침하가 문제 되는 장소에 통상사용
- B:특히 연약층이 두꺼운 곳에 설치할 필요가 있음
- C:매우 연약한 지반에서 Sand Pile의 효과 확인이 필요한 경우 등 특별한 경우에 한함

3.2.3 계측기의 선정기준

계측기의 선정시에는 계측기의 목적을 명확히 해서 목적을 충족시키기 위해, 관계되는 각종 조건들을 고려해야 한다. 계측기 선정시 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다.

- 측정의 종류
- 신뢰도
- 작동원리의 간편성
- 안정성
- 취급의 간편성
- 고장시 수리의 간편성
- 내구성(계측기 및 계측시스템)
- 측정범위 및 정확도
- Data 획득의 용이성
- 측정기간

3.2.4 계측위치의 선정

계측위치는 측정 대상물의 규모나 주변 구조물에의 영향 정도 및 지반의 특성 등에 따라 고려되어야 하며 성토자체 및 원지반이나 인접구조물의 거동을 충분히 고려하여 그 지역을 대표할 수 있는 곳으로 하여야 한다.

성토공 구간에서 계측시에는, 일반적으로 성토고가 높은 지점과 연약지반이 두꺼운 지점이 우선 계측지점으로 선정되며, 100-300m 정도(대체적으로 200m)의 성토공사 1회 작업구간에 1개소 선정하는 것이 일반적이다.

그러나, 도로성토가 하천제방의 배면매립층을 통과하는 경우에는 지반조건의 변화가 심하므로 이러한 경우는 대표적 지점을 선택하기는

표 3.3 일반적인 계측기의 배치 위치

계측기	계측기 배치 위치
표면침하판	성토천단의 중앙부 및 성토사면의 정상부
층별침하계	성토중앙부의 지중
경사계	성토사면 선단
간극수압계	층별침하계가 설치된 위치에서 3m 이내
변위말뚝	성토사면하부에 일정간격으로 배치
신축계	성토주변부 지표(경사하부)

어렵고 침하량이 큰 곳이라든가 성토의 진단활동과 파괴의 가능성이 있는 곳을 선정해서 성토시 공판리의 Checkpoint로 할 필요가 있다.

성토에 있어서 계측기들을 배치할 때는 표 3.3과 같은 기준에 따라 설치하는 것이 일반적

이다.

성토에 따르는 일반적인 성토자체 및 원지반의 거동은 그림 3.1과 같으며, 이에 따른 계측기 배치도의 예를 그림 3.2 및 3.3에 나타내었다.

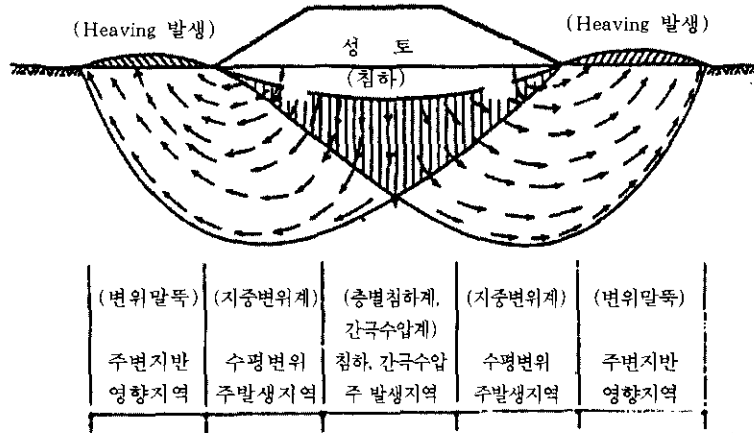


그림 3.1 성토시 일반적인 원지반의 거동

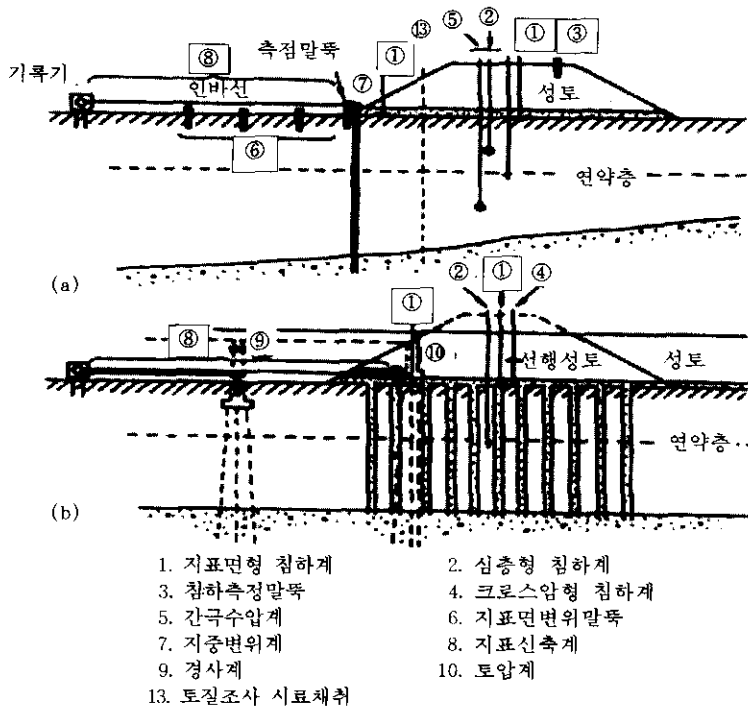


그림 3.2 계측기 배치예(1)

계측기 매설 상세도

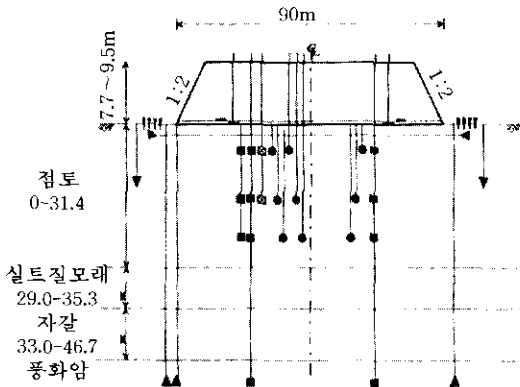


그림 3.3 계측기 배치에 (2)

범례			
구분	계측기명	TYPE	비고
■	층별침하계	진동현식	자동
■	층별침하계	M.C	수동
☒	층별침하계	SCREW	수동
●	간극수압계	진동현식	자동
●	간극수압계	공기식	수동
■	토압계	진동현식	자동
■	지표면침하판		수동
▲	경사계	전기식	자동
▲	경사계	가속감지식	수동
▶	전단면침하계	전기저항식	수동
▼▼▼▼	수평변위말뚝		수동
▼	지하수위계	진동현식	자동

3.3 계측빈도와 기간 및 계측방법

3.3.1 계측

동일측정자에 의한 계측은 여러측정자에 의한 계측이 가질수 있는 개인오차를 배제할 수 있으며, 또한 측정의 숙련으로 인한 계측기 및 측정의 특징 파악으로 계측기나 측정치의 이상을 조기에 발견할 수 있는 장점을 갖는다. 성토공사시 사용되는 침하계는 대부분 Level등의 측량기기로 침하를 측정하게 되는데, 이때 다음과 같은 사항에 유의하여야 한다.

- Level과 후시표척 및 전시표척과의 거리는 같게하고 70m 이내로 한다.
- Level과 전시표척 및 후시표척이 동일선상에 있도록 한다.
- 측정시 표척 아래쪽을 읽지 않도록 주의한다.
- 이상한 측정치가 나왔을 때에는 그것이 본질적인 것인가 또는 다짐기계나 차량동에 의한 인위적인 것인가를 명확히 하는 것이 좋다.
- 바람이 강하게 불거나 기후가 불량할 경우에는 측정을 삼가든가, 기록지에 그 상황을 기입하여 측정정도가 높지 않았음을 명기해 둔다.

침하계 이외 계측기들의 측정은 일반적으로 각기 특별한 측정장치를 이용하게 되므로, 각 계측기 및 측정장치에 따른 manual을 숙지한 후 실시하여야 한다.

3.3.2 계측빈도와 기간

측정은 일정한 시간마다 해야하며 측정빈도 및 기간은 공사의 규모 및 중요성, 공정 등에 따라 결정되는데, 일반적으로 표3.4와 같다.

3.3.3 계측방법

계측방법은 크게 수동식, 반자동식, 자동식으로 구분할 수 있다. 수동식은 계측담당자가 계측기의 값을 직접 읽거나 전기 신호를 분석하고 필요한 경우 컴퓨터를 이용하여 처리하는 방식으로 경제적인 면에서 시스템 구축에 따르는 비용이 상대적으로 적기는 하지만, 많은 시간을 필요로 하고 측정에 오차가 개입할 요소가 많으며, 매우 숙달된 인력이 필요하다는 단점이 있다. 반자동식의 경우는 일단 계측데이터를 읽어 컴퓨터에 입력하여 처리, 해석하는 방식으로 이루어지며, 시공 지역이 넓으면서 계측지점이 많거나 계측빈도가 상대적으로 적은 현장에 적합하며, 수동식에 비하여 측정 및

표 3.4 일반적인 계측빈도와 기간

계측기	지반계량공법, 기타 안정공법 시행 도중	성토공 시공중	성토 종료후		
			최초의 1개월	1개월-3개월	3개월이후
침하계	1일 1회	1일 1회	1일 1회	1주 1회	1개월 1회
지표변위말뚝	1일 1회	1일 1회	1일 1회	-	-
지표신축계	1일 1회	1일 1회	1일 1회	-	-
지중변위계	1일 1회	1일 1회	1일 1회	-	-
토압계	1일 1회	1일 1회	1일 1회	1주 1회	1개월 1회
간극수압계	1일 1회	1일 1회	1일 1회	1주 1회	1개월 1회

데이터 처리 시간을 크게 줄일 수 있다. 자동식은 측정에서부터 데이터 처리, 결과 분석까지 전 과정이 컴퓨터로 통제되는 방식이며, 많은 계측점이 집중되어 있거나 짧은 주기를 가지고 수시로 거동을 살펴보아야 할 경우 매우 적합하다. 그러나, 이 방식은 초기 투자 비용이 크기 때문에 모든 계측에 이를 적용하는 것은 불합리하다. 특히 계측대상 구간이 매우 광범위하기 마련인 성토 시공시의 계측관리에 자동 측정시스템을 도입하고자 할 때에는 신중하게 그 효율성과 경제성을 고려해야 한다.

일반적으로 계측방식은 현장여건에 따라 항목별로 위 세가지 방식을 적절히 혼용하는 것이 좋으며, 이와 함께 현장에 대한 육안관찰을 지속적으로 수행해야하는 것으로 알려져 있다.

3.4 안정관리방법 및 침하관리방법

연약지반공사시 발생하는 지반공학적인 문제는 일반적으로 성토나 구조물 또는 주변지반의 침하, 변형문제, 기초지반 성토 및 구조물의 안정, 지지력 문제들로 분류할 수 있으며, 따라서 계측관리의 주안은 주로 침하관리와 안정관리에 둘 수 있다.

3.4.1 안정관리

연약지반에서 안정관리로는 그림 3.4에 나타난 것처럼 성토중앙부지표에 생기는 침하량 S 와 성토사면 선단의 측방수평변위량을 측정하

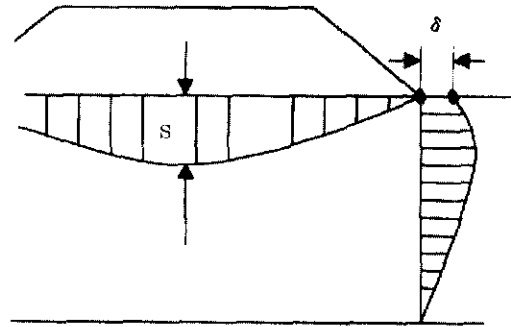


그림 3.4 침하량 S 와 수평변위량 δ

여 양자의 관계로부터 파괴를 예측하는 방법이 일반적으로 이루어지고 있다.

(1) 정성적 지표에 의한 안정관리 방법

성토 중앙부의 침하와 성토 사면 선단부의 수평 및 연직 변위량의 경향으로 지반의 안정 또는 불안정 상태를 정성적으로 판단할 수 있다.

지반이 안정된 상태이면 성토중앙부의 침하량이 시간의 경과에 따라 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이게 되지만, 지반이 불안정해지면 시간에 따라 침하량이 급격히 증가하는 경향을 나타낸다.

한편, 지표의 수평 및 연직 변위량의 경향에 의한 지반의 안정성은 표 3.5와 같이 예측할 수 있다.

표 3.5 지표면변위량에 따른 안정성 예측

	안정	불안정
수평 변위량	시간의 경과에 따라 크게 변하지 않고 성토측으로 이끌리는 경향	수평변위량이 급증하며 성토외측방향으로 밀려나감
연직 변위량	변화가 별로 없으며 성토하향으로 끌려들어감	상향으로 융기 발생

(2) 정량적 지표에 의한 안정관리 기법

① S-δ 관리도 이용법

그림 3.5에 나타난 것처럼, 성토의 시공단계마다 성토중양부의 침하량 S와 성토사면 선단의 수평변위량 δ의 관계를 그래프로 나타내면 재하하중이 작아 지반이 안정한 상태에서는 기울기가 직선적인 관계를 보이지만, 재하하중이 커짐에 따라 지반이 불안정하게 되면 기울기가 S에 비해 상대적으로 커져 S-δ의 기울기 α(=Δδ/ΔS)가 완만하게 된다. 즉, 재하하중 증가(성토고의 증가)로 지반이 불안정상태로 되면 값은 일정한 변곡점을 지나 점점 증가하게 된다. Tominaga(富永)는 그림 3.5에서와 같

이 구배 α의 변화를 안정상태의 지표로 보는 관리 방법을 제안하였다. 그림 3.6은 Kurihara(栗原)가 성토시 측정예를 이용하여 안정시의 구배 α₁과 불안정시의 α₂를 구해서 α₁-α₂/α₁ 관계를 나타낸 것으로 성토중 크랙이 생기거나 파괴된 경우는 α₁-α₂/α₁ 관계가 α₂=1.0, 0.8로 가정하여 구한 (A), (B)선의 위쪽에 존재하고 있음을 알 수 있다.

S-δ 관리도는 압밀변형과 전단변형의 균형

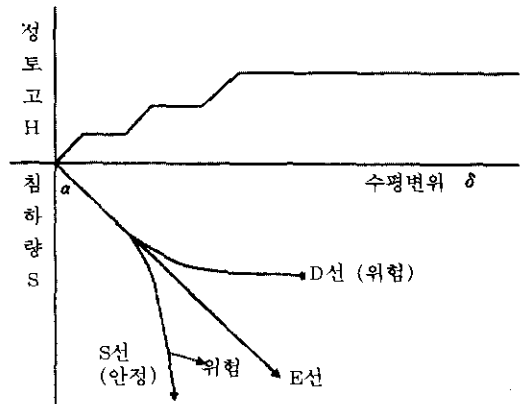


그림 3.5 S-δ에 의한 파괴 예지

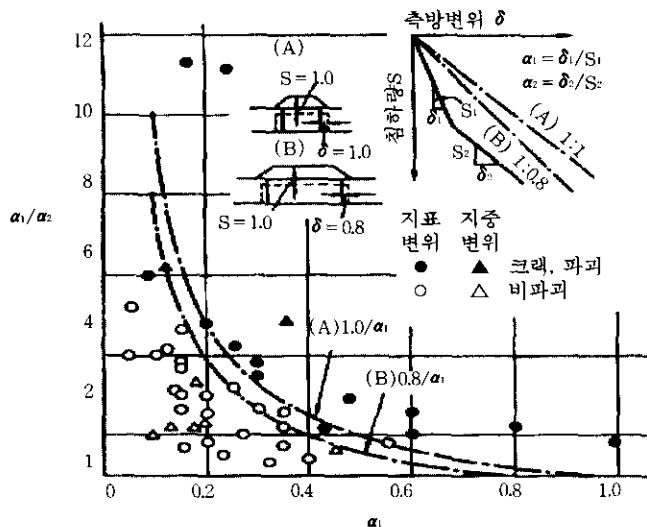


그림 3.6 α₁ - α₂/α₁ 관계

여부를 쉽게 파악할 수 있으며, 파괴의 징후가 초기에 발견될 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 이 관리도를 안정관리에 적용할 경우 초기 관리치로 $\alpha_2 \geq 0.7$ 또는 $\alpha_2 \geq \alpha_1 + 0.5$ 이면 불안정한 것으로 간주한다.

② S- δ /S 관리도 이용법

Matsuo(松尾)는 성토에 의한 지반파괴는 S- δ /S 관계가 파괴기준선이라고 불리는 일정한 곡선 근처에 도달하였을 때 발생하는 경향이 있음을 발견하고, S- δ /S 관계를 이용한 안정관리 방법을 제시하였다. 즉, 시공 중 S- δ /S 관계가 파괴기준선에 접근하면 파괴에 가까워지는 것이고, 반대로 멀어지면 안정한 상태를 나타내는 것을 의미한다. 그림 3.7은 S- δ /S 관리도를 이용한 안정관리 예로 P_i 는 임의의 시간에서의 성토하중, P는 파괴시의 성토하중을 나타내며, $P/P_i = 1.0$ 인 곡선은 파괴기준선을 나타내고 $P/P_i = 0.8$ 및 0.9 인 곡선은 S- δ /S 관계가 해당 곡선 근처에 도달하는 경우 성토하중이 파괴시의 80% 및 90%를 나타냄을 의미한다. Matsuo(松尾)등은 수치해석과 현장계측결과를 기초로 식 (3.1) 및 표 3.6과 같은 값들을 제안하였다.

S- δ /S 관리도를 성토시 안정관리에 적용하는 경우는 먼저 각 기준선을 도시해 놓고 그 시점에서의 S- δ /S 관계를 Plot해서 경향을 파악한다. Plot한 점이 파괴기준선에 접근하는 경우에는 성토하중을 감소시키거나 압성토 등의 대책공법으로 붕괴의 위험을 제거해야 한다. S- δ /S 관리도를 이용하면 성토시공 전기 간에 걸쳐 지반거동을 파악할 수 있다는 장점이 있으며, 일반적으로 S- δ /S 관계가 준파괴선에 도달하면 성토사면에 Crack이 나타나기 시작하므로, 판단 기준으로는 $P/P_i = 0.9$ 인 준파괴선을 이용한다. 그러나, 이 방법은 성토중 양부의 침하량이 40cm 이상일 경우에만 적용되어야 하는 단점이 있다.

$$S = \alpha \exp \left[b \left(\frac{\delta}{S} \right)^2 + c \left(\frac{\delta}{S} \right) \right] \quad (3.1)$$

표 3.6 S- δ /S 관리도별 계수

P/P_i	a	b	c	S- δ /S 범위
1.0	5.93	1.28	-3.41	$0 < S-\delta/S \leq 1.4$
0.9	2.80	0.40	-2.49	$0 < S-\delta/S \leq 1.2$
0.8	2.94	4.52	-6.37	$0 < S-\delta/S \leq 0.8$
0.7	2.66	9.68	-9.97	$0 < S-\delta/S \leq 0.6$
0.6	0.98	5.93	-7.37	$0 < S-\delta/S \leq 1.4$

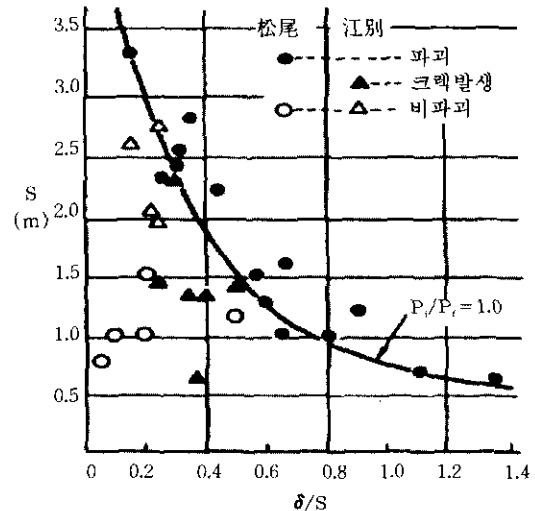


그림 3.7 S- δ /S 관리도 예

③ $\Delta q/\Delta \delta - q$ 법 ($\Delta h/\Delta \delta - h$)

Sekiguchi(關口)에 의해 제안된 방법으로 재하속도 및 측방변위 증분의 측정시간이 지정되면 측방변형계수 $\Delta q/\Delta \delta$ 가 성토하중 q에 따라서 변화하는 것을 기본으로 하고 있다. 즉, 지반이 비배수 조건에 놓여져 있을 때 측방변형계수 $\Delta q/\Delta \delta$ 는 성토하중 q가 어떤 값을 넘으면 q에 대해서 직선적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서, 지반의 극한지지력 q_u 를 $\Delta q/\Delta \delta = 0$ 상태에 도달했을 때의 q값으로 정의하면, $\Delta q/\Delta \delta - q$ 의 직선성을 이용하여 그림 3.8 (a)와 같이 외삽법으로 q_u 의 값을 예측할 수 있다. 균일한 성토의 경우는 그림 3.8(b)에 나타난 것처럼 q대신에 성토고 h를 이용하여

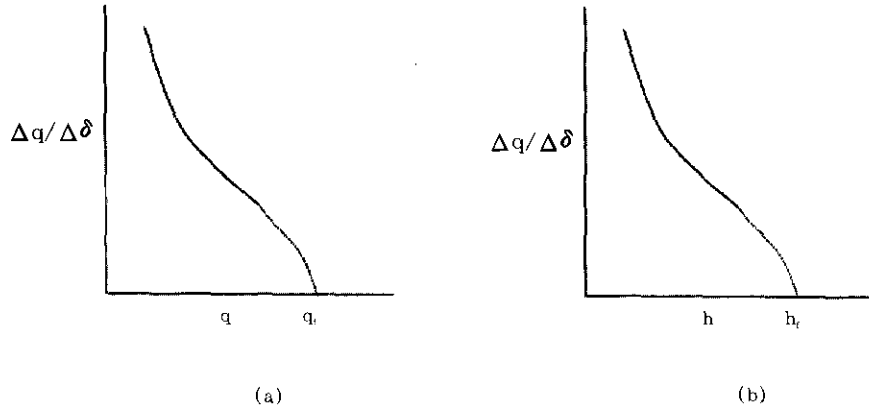


그림 3.8 $\Delta q/\Delta\delta$ -q법 및 $\Delta h/\Delta\delta$ -h법에

한계성토고 h_c 를 예측할 수가 있다. $\Delta q/\Delta\delta$ -q(또는 $\Delta h/\Delta\delta$ -h) 방법은 어느 정도까지 성토한 시점에서 그때까지 획득한 Data를 이용하여 한계성토고를 추정하는데 유효하며, 일반적으로 초기관리치는 $\Delta q/\Delta\delta \leq 15t/m^3$ 으로 한다.

④ $\Delta\delta/\Delta t$ -t 법

δ 의 1일당 변화량과 수평변위속도 $\Delta\delta/\Delta t$ 의 시간적인 변화량을 그림 3.9와 같이 그려 안정관리를 실시하는 방법이다. 일반적으로 $\Delta\delta/\Delta t$

는 성토하중 재하 직후에 peak값을 나타내다가 점차 감소하는 경향을 매 하중단계마다 보여 주게 된다. 또 $\Delta\delta/\Delta t$ 가 감소하다가 갑자기 커지는 경우는 성토과피나 균열이 발생하는 경우로 불안정상태로 해석할 수 있다. 즉, 1일당 변위속도 $\Delta\delta/\Delta t$ 로부터 성토속도와 한계성토고 등을 조정하여 안정관리를 할 수 있으며, Kurihara(栗原)는 $\Delta\delta/\Delta t \geq 2\text{cm/day}$ 를 불안정상태를 관리하는 기준으로 제시하였다.

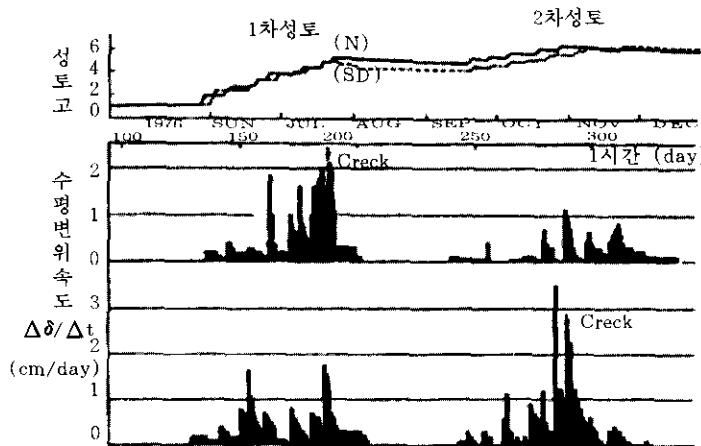


그림 3.9 $\Delta\delta/\Delta t$ -t법

⑤ 상대변위에 의한 파괴시기 예측법

Saitou(齋藤)에 의하여 성토에 의한 변위가 수렴하지 않고 변위속도가 점차 증가하는 경우 일정한 변위를 발생시키는데 요구되는 각 시간 사이에는 식(3.2)와 같은 관계가 있음이 알려졌다.

$$c = \frac{b^2}{a - b} \quad (3.2)$$

여기서, a: Δ / 변위를 일으키기 위한 시간
 b: a시간 이후 Δ / 변위를 일으키기 위한 시간
 c: b시간 이후 파괴까지의 시간

즉, 그림 3.10에서와 같이 시간을 횡축에 나타내고, OA를 일정변위를 발생시키는데 필요한 시간으로 보고 AB를 다음의 일정변위를 일으키기 위한 소요시간으로 했을 때, OA와 같게 AA₁을 수직으로 취하고 또 AB와 같게 BB₁을 취해서 A₁B₁을 연결하는 선과 횡축이 만나는 교점을 F라 하면, F가 붕괴시각을 나타내게 된다. 같은방법으로 CDE를 취해 C₁D₁E₁등을 구하면 A₁B₁C₁D₁E₁F는 일직선상에 있게 된다. 또한 그림에서 B₂C₂D₂E₂F도 일직선상에 있으며, C₃D₃E₃F 등도 마찬가지로 일직선상에 있음이 증명된다.

하지만 이는 이론적인 것으로, 실제의 반드시 직선을 나타내지는 않지만 평균적으로 보면 대체로 F점으로 수렴하는 것이 실측예에서 확인되고 있다. 그림 3.11은 실제로 붕괴한 실측예에 대해 적용했던 예를 나타내고 있다. 이 방법을 이용하면 파괴에 도달하는 시기를 예측할 수 있어 더욱 적합한 대책을 수립할 수 있는 장점이 있다.

3.4.2 침하관리

침하관리는 안정관리와 별개로 실시되며 측정치에 대한 장래의 예상침하량의 예측을 그 목적으로 한다.

(1) 쌍곡선법

시간의 경과에 따른 침하곡선이 쌍곡선식으

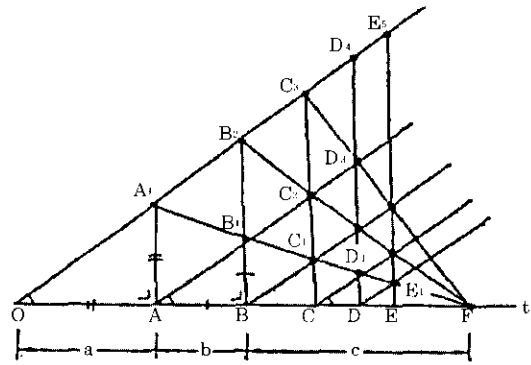


그림 3.10 활동파괴시각의 예측법

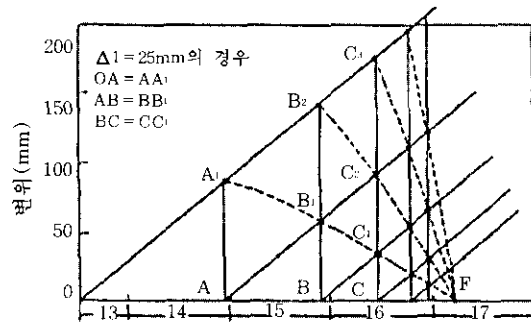


그림 3.11 파괴에 대한 적용 예

로 나타낼 수 있다는 가정하는 것으로, 쌍곡선의 방정식을 적용하여 초기침하량의 측정치로부터 장래침하량을 다음 식(3.3)으로 예측할 수 있다.

$$(t - t_0) / (S_t - S_0) = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (3.3)$$

여기서, t: 측정시점으로부터의 경과시간

S_t: 임의의 시간 t에 있어서의 침하량

S₀: 측정시점에서의 침하량

α, β: 계수(각각 그림 3.12의 절편 및 기울기)

식 (3.3)을 다음 식 (3.4)와 같이 표현한 후 시간을 무한대로 취하면 최종침하량(S_∞)은 식 (3.5)와 같이 구할 수 있다.

$$S_t = S_0 + t/(\alpha + \beta t) \quad (3.4)$$

$$S_\infty = S_0 + 1/\beta \quad (3.5)$$

따라서, 침하의 계측데이터를 그림 3.12와 같이 도식화한 후에 그 직선의 기울기를 구하면 최종압밀침하량을 예측할 수 있게 된다. 쌍곡선법은 성토시공도중 단기간 추정에 적절한 것으로 알려져 있다.

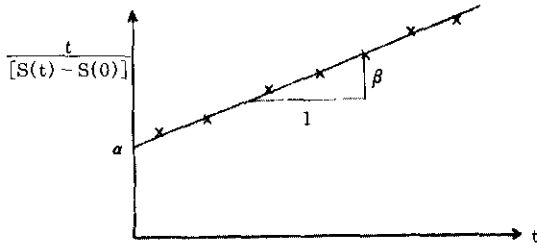


그림 3.12 쌍곡선법에 의한 최종침하량의 예측

(2) Hoshino 법

여러 실측치로부터 인정된 전단에 의한 유동변형을 포함한 진침하량은 시간의 평방근에 비례한다는 점을 기본원리로 하여 Hoshino는 $t = \infty$ 에서 일정한 값이 되도록 $S-t$ 관계를 쌍곡선법과 유사한 다음과 같은 식(3.6)으로 표시하였고 이를 도식화하면 그림 3.13과 같다.

$$(t - t_0)/(S_t - S_0)^2 = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (3.6)$$

최종침하량은 식 (3.6)에서 $t = \infty$ 라 하면 다음 식 (3.7)로 예측할 수 있다.

$$S_\infty = S_0 + 1/\sqrt{\beta} \quad (3.7)$$

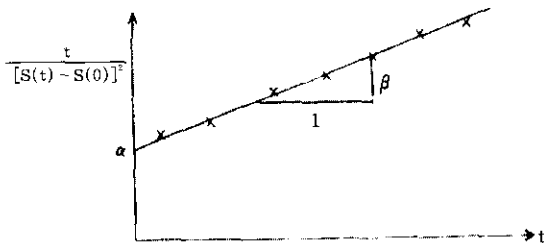


그림 3.13 Hoshino법에 의한 최종침하량의 예측

(3) Asaoka 방법

Asaoka는 시간 t_i 일 때의 침하량 S_i 와 Δt 시간전의 t_{i-1} 에서의 침하량 S_{i-1} 간에는 직선관계가 성립한다고 가정하고 다음 식 (3.8)과 같은 식을 제안하였다.

$$S_i = \alpha + \beta S_{i-1} \quad (3.8)$$

여기서,

S_i, S_{i-1} : 침하량을 일정한 시간간격(Δt)으로 나타내었을때의 각 t_i 및 t_{i-1} 에서의 침하량

α, β : 계수(그림 3.14에서의 절편 및 기울기)

그림 3.14에 나타난 바와 같이 $S-t$ 그래프에서 동일한 시간간격 Δt 으로 나누고 시간 $t_1, t_2, \dots, t_{i-1}, t_i, \dots$ 에 대응하는 $S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_i, \dots$ 를 구한 뒤 $S_{i-1} - S_i$ 축에 (S_{i-1}, S_i) 점을 찍고 그 점들을 연결한 직선과 $S_{i-1} = S_i$ 인 45° 선과 만나는 점이 최종침하량이 된다. 즉, 최종침하량(S_∞)은 식 (3.9)와 같다.

$$S_\infty = \alpha / (1 - \beta) \quad (3.9)$$

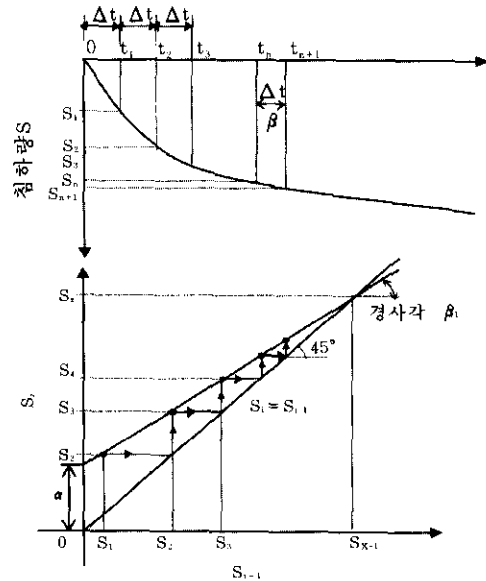


그림 3.14 Asaoka 방법에 의한 최종침하량 예측

(4) Log t 법

성토공사완료 후 장기간에 걸친 지반의 침하는 앞서 기술한 방법으로 추정할 경우 오차가 크다는 것이 계측예를 적용한 결과 밝혀졌으며, 그 원인으로는 과잉간극수압이 완전히 소산된 후에 계속되는 2차압밀인 것으로 알려져 있다.

장기간에 걸친 침하양상의 파악을 위하여 실측한 침하 Data를 근거로 제안된 Log t 방법은 장기적 침하가 Log t에 대해 직선적으로 진행된다는 관계를 이용한 방법으로, 그림 3.15에서와 같이 성토구조물의 장기침하량을 측정된 침하와 Log t관계를 그려 얻어진 직선을 연장하여 추정하는 방법이다.

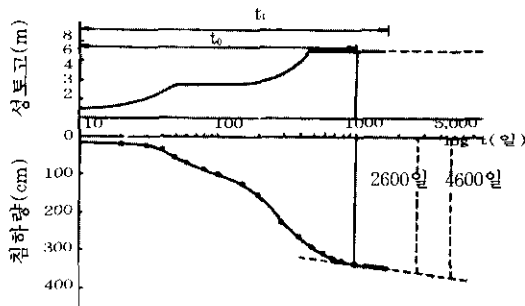


그림15. Log t법에 의한 침하량 추정 예

참 고 문 헌

1. John Dunnycliff (1981) "Long-Term Performance of Embankment Dam Instrumentation", Recent Developments in Geotechnical Engineering for Hydro Projects, ASCE, pp.1-22.
2. (주)대우건설기술연구소 (1997), 토공작업시 안정성 확보를 위한 현장계측의 활용에 관한 연구.
3. 稻田倍穂 (1989), 軟弱地盤에서의 土質工學.
4. 한국지반공학회 (1996), '연약지반' 지반공학 시리즈 6.
5. 이문수, 김영남 (1996), 연약지반(Ⅶ), 한국지반공학회지, Vol.12, No.5, pp.155-173.
6. 한국토지공사 (1997), 연약지반의 처리공법과 침하계측에 관한 연구.
7. 한국토지공사 (1997), 토지개발기술 1997년 봄호.