

연약지반(VII)

이 문 수*1

김 영 남*2

7. 연약지반 시공관리 및 시공사례

7.2 연약지반의 판정기준

7.1 개요

본 강좌에서는 연약지반의 일반적인 판정기준, 지반개량에 있어서 저성토의 문제점, 지반개량시의 중기의 주행성(trafficability)의 확보문제, 불규칙한 지층으로 구성된 도로부지의 연약지반개량공사, 마지막으로 현장계측에 관하여 필자들이 검토하였거나 설계한 사례를 중심으로 기술하고자 한다.

연약지반의 개략적인 판정기준을 나타낸 것이 표 1이다. 이 표에 의하면, 구조물의 종류에 따라 그 판정기준을 약간 다르게 하고 있으나 연약지반은 그 기준이 절대적인 것이 아니고 상대적인 것으로서 강도가 큰 지반에서도 재하하중이 커서 이 하중을 지지하지 못하면, 연약지반이라 할 수 있고, 연약한 지반일지라도 상재하중이 작아서 연약지반의 적용을 받지 아니할 수도 있다.

표 1. 연약지반 판정기준

구조물의 종류	지 반 상 태							판 정
	토질	층두께 (m)	N치	qu (t/m ²)	qc (t/m ²)	장기허용 지내력 (t/m ²)	함수비	
도 로	유기질토 세립토 조립토		2이하 2~4 4~10	2.5이하 2.5~5 5~10	12.5이하 12.5~25 25~50			연약지반(초연약) 연약지반(연약) 연약지반(보통)
고속도로	이 탄 토 점 성 토 사 질 토		4이하 4이하 10이하	5이하 5이하 5이하			100이상 50이상 20이상	연약지반 · ·
철 도		2이상 5이상 10이상	0 4이하 10이하					· · ·
필 땀			20이하	15이하				·
건 축			10이하			10이하		·

*1 정희원, 전남대학교 농과대학 농공학과 교수

*2 정희원, (주)동원토질 상무이사.토질 및 기초기술사

7.3 저성토의 문제점

후술하게 될 7.5의 현장사례의 경우와 같이 2~3m 정도의 저성토시공의 연약지반에서는 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- 1) 성토하중이 기본적으로 과소하기 때문에 계획대로 압밀이 진행되지 않는다. 더욱이 지하 수위가 높을 때는 소요압밀에 이르지 못하고 압밀시간도 지연된다.
- 2) 전단강도의 발현도 미미하고, 따라서 외적하중(충격, 통과차량)에 의해 변형이 쉽게 일어 날 수도 있다.
- 3) 성토하중이 작기 때문에 연약층 내에 강성이 상대적으로 큰 지층(예컨대 표토, 사력층)이 있을 때는 그 아래에까지 유효하중이 전달되기 어려워 압밀효과를 기대하기 곤란하다.
- 4) 성토하중이 작기 때문에 압밀효과가 깊은 범위까지 미치지 못하여 상층부에 집중된다. 동시에 2)항과 맞물려 차량 통과시는 진동현상(쿠션현상)을 일대에서 느낀다.
- 5) 노선방향으로 지반지지력에 강약의 차이가 있고, 성토부가 얇기 때문에 교통하중을 분산시키지 못하므로 완성후 시간이 지날수록 도로 진행방향으로 물결처럼 파상변형이 발생 한다(일종의 부등침하).
- 6) 잔류침하량이 오랫동안 누가하여 발생할 수 있다.
- 7) 성토부가 지하수위면으로부터 높지 않을 때는 동상 등의 대책이 필요하다.

이와 같은 경우에는 preloading을 충분히 하여 지반을 과압밀상태로 유지하는 것이 합리적인 공법중의 하나라고 볼 수 있다.

7.4 주행성 혹은 통행성(Trafficability)확보

7.4.1 통행성 검토의 제한성

연약지반을 개량하기 위하여는 지반개량용 장비(연직배수재 타입기, 토사운반 및 포설장비)를 연약지반상에서 통행이 가능하도록 하여야 되며 장비의 통행가능성 여부는 장비의

접지압과 지반의 전단강도에 의해 지배된다. 그러나 실제 장비가 연약지반상에서 주행을 할 때 지반이 받는 하중은 동적인 하중이 되며 지표면이 평탄하지 못하여 접지면적이 일정하지 않는 등 아래와 같은 여러 가지 복합적인 요인이 있어 그 해석에 제한이 있다.

- 1) 장비의 통행성(trafficability)은 연약지반 지표면으로부터 약 1~2m의 전단강도에 의해서 지배되며 일반적으로 지표면은 평탄하지 않고 또 지표면하 1~2m내의 전단강도는 변화가 심하다, 일반적으로 성토하중의 재하시는 건조로 인하여 발생된 인장균열(tension crack)내의 전단강도를 무시하고 해석한다. 그러나 실제 장비를 연약지반상에서 주행시키고자 할 때는 이 인장균열의 크기에 의해 통행성이 영향을 받게 되며, 또 지표면하 1~2m내의 전단강도는 수로 등이 있을 경우 부분적으로 연약한 곳이 있다.
- 2) 장비의 통행성은 지반의 지지력에 의해 지배되는데 일반적으로 해석에서 구한 지지력은 정적인 상태에 대한 지지력으로 동적하중인 장비의 움직임에 대한 지반의 거동에 대한 사항(즉 통행성의 여부)을 검토하는데 완전한 해석이 되지 못한다.
- 3) 장비가 연약지반상에서 주행할 때는 다소의 지반의 교란이 있으며 지반이 교란되면 전단강도는 저하된다. 그러나 설계 단계에서는 교란으로 인하여 저하된 전단강도를 고려하여 지반의 지지력을 검토할 수는 없다.
- 4) 연약지반상에 장비가 위치할 때 접지면적은 tire에 따라 다르며 또 지반의 평탄성에 따라 다르다. 특히 tire의 접지면적에 대한 명확한 수치적인 자료가 없다. 접지압은 장비의 중량 및 접지면적에 의해 지배되며 또 접지되는 위치에 따라 그 크기가 가변할 뿐만 아니라 편심이 걸리기도 한다.
- 5) 재료분리 및 지반보강의 기능으로 사용되

고 있는 저면 mat(geotextile)는 그 효과가 있음이 주지의 사실이나 이를 정량적으로 해석하는 데는 여러가지 가정과 모순을 내포하고 있다.

7.4.2 통행성 판단의 지침(Guide Line)

콘관입 저항치는 연약한 지반의 공사용 장비 진입여부 및 가능한 기종의 선택기준으로 이용되기도 한다. 다음 표 2는 굴착, 운반작업에 필요한 정적 콘관입 저항값의 최소치를 제시한 것이다.

콘관입 저항치를 실측한 자료가 없을 경우에는 콘지수(콘관입시험치)와 관련된 경험적인 관계를 이용하여 지반의 콘지수를 유추할 수 있을 것이다. 정적관입시험인 Dutch cone

표 2. 굴착, 운반작업에 필요한 정적 콘관입 저항치의 최소치

진설기계의 종류	콘관입 저항치(q_c , kg/cm ²)
초습지도우저	2
습지도우저	3
중형 보통 도우저	5
대형 보통 도우저	7
스크레이퍼 도우저	6
피견인식 스크레이퍼	10
모우터 스크레이퍼	12
덤프트럭	
특기사항	비배수 전단강도 0.3~0.5 ton/m ² 일 경우에는 보행이 곤란하며 0.5~0.7ton/m ² 일 경우에는 보행은 가능하나 습지 dozer의 주행이 불가함.

표 3. Approximate Relation Between Dutch-Cone & Standard Penetration Resistance (Peck, R.B. Hanson, W.E and Thornburn T.H Foundation Engineering. p115)

soil type	$\frac{q_b^*}{N}$
silts, sandy silts, slightly cohesive silt-sand mixtures	2.0
clean fine to medium sands and slightly silty sands	3 to 4
coarse sands and sands with little gravel	5 to 6
sandy gravels and gravels	8 to 10
* q_b = Dutch cone resistance, kg/cm ² N = standard penetration resistance.	

표 4. q_c -N Correlations

soil type	q_c/N	No. of tests	authors comp. tests
A	8-10		Schmertmann (1970)
A	18		Meigh-Nixon (1961)
B	5-16		Schmertmann (1970)
C	8		Meigh-Nixon (1961) and Y. Lacroix (1971)
C	10	122	De Alencar Velloso (1959)
C	4		Meyerof (1959)
D	3-4		Schmertmann (1970)
D	6	104	De Alencar Velloso (1959)
E	3-5	131	De Alencar Velloso (1959)
F	2	120	De Alencar Velloso (1959)
F	2		Schmertmann (1970)
F	4-5		Franki
G	3-5	202	De Alencar Velloso (1959)
G	2-3		Franki

q_c in kg/cm²

N in blows/100mm

A=sandy gravels and gravels

B=coarse sands and sands with little gravel

C=sand

D=clean, fine to medium sands, cohesive slightly silty sands

E=sandy silt

F=sandy clay, silty sand, cohesive silt-sand mixtures

G=clay, silty clay, clayey silt

(J. Kruizinga, SPT-CPT correlations, 1982)

Test와 동적관입시험의 상관성을 비교한다는 것 자체가 다소 무리한 점이 있으나 호환성의 필요성 때문에 다음의 그림-1 및 표-3~표-4에

서 보는 바와 같이 여러 토질기술자들에 의해 상관성이 검토되었다.

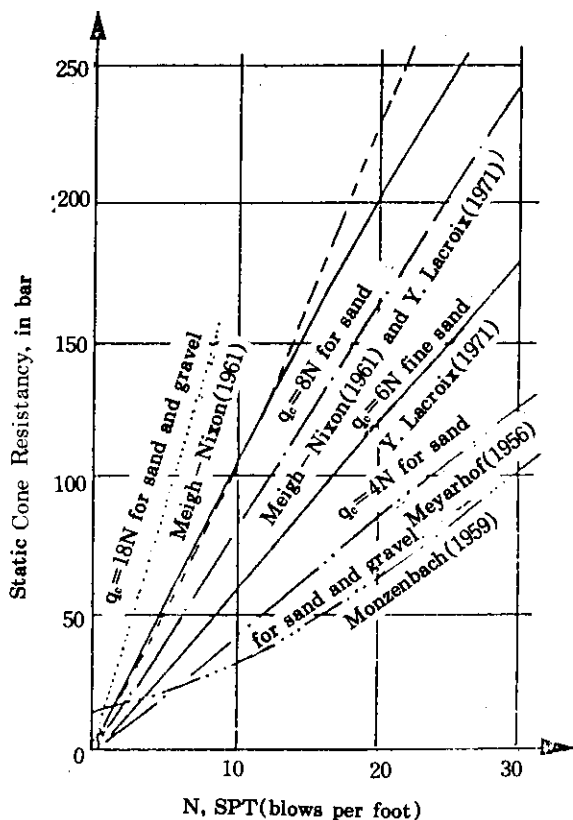


그림 1. N과 qc의 관계

점성토의 비배수 전단강도(S_u)와 (q_c)와의 관계는 지지력이론 $q_{wi} = S_u \cdot N_c + \gamma \times z$ 의 개념을 그대로 활용한 아래의 식과 같다.

$$q_c = S_u \cdot NK + \gamma \times z, S_u = \frac{q_c - \gamma \times z}{NK}$$

여기서 NK : cone factor

γ, z : 시험부위에서의 상재하중

Cone Factor, NK는 점토의 종류에 따라 상이한 값을 가지며, 일반적으로 9 이상의 값을 갖는다. NK를 결정하는데는 일반적으로 865mm 직경의 평판재하 시험을 수행하여 도출한다.

따라서 해석을 위해서는 지반에 대하여 NK

와 평판재하시험간의 관계식을 도출, 시험결과를 활용할 수 있는 검토가 선행되어야 할 것이다.

표 5는 London clay 및 기타의 실험 결과인데 표에 나타난 것처럼 NK의 범위는 검토의 종류에 따라 다양한 점에 유의하여야 된다.

표 5. 점성토의 종류에 따른 NK의 변화

점성토의 종류	NK	비고
London Clay, Brown	21~27	ø865mm 평판재하시험 기준
London Clay, Blue-Grey	32~35	
Boulder Clay	11~30	
Soft N.C Clay	15	실험실 시험기준
Sensitive Clay	12~24	

7.4.3 통행성 검토

1) 검토에 적용된 식

점토지반의 경우, 전단강도와 cone지수 관계식에서 cone지수를 구하면 1~3정도로 초습지 dozer내지 습지 dozer의 통행만 가능하다. 따라서 통행성(trafficability)확보를 위한 조치가 필요하다. 통행성 확보를 위한 지반보강 및 연약지반과의 재료분리효과와 세립분의 혼입을 방지하기 위한 filter기능을 갖는 저면 mat(geotxtile)를 사용하도록 계획하여 통행성 확보를 위한 복토두께를 검토한다. 연약지반상에 저면 mat 및 sand mat를 부설한 후 S.C.P타입장비가 재하되었을 때 연약지반의 지지력 검토는 Prandtl의 지지력을 이용한 그림 2와 같은 Yamanouchi(1970)의 모델을 적용한 지지력 계산식을 이용한다.

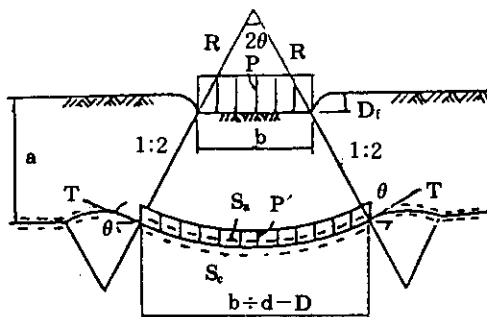


그림 2. Yamanouchi(1970)의 모델

$$q_s = \frac{1_s}{F} \left(1 + \frac{d - D_r}{b}\right) (5.3C + T \left(\frac{2\sin\theta}{b}\right) + \frac{1}{r}) + \frac{4 \cdot S_s \cdot R(1 + \cos\theta)}{b + d - D_r} + r_1 D_r$$

여기서,

q_s : 연약지반상의 허용지력

F_s : 안전율(단기로 1.5적용)

b : S.C.P 타설장비 접지폭

C : 연약지반상부의 점착력

D_r : S.C.P타설장비의 근입심도

d : sand mat 두께

T : mat에 생기는 최대 인장강도

S_s : mat의 전단저항

r : S.C.P타설장비 접지로 인해 발생하는 성토부의 용기를 원형으로 가정했을 경

우의 반경

γ_1 : sand mat의 단위중량

P : S.C.P타설장비의 접지압

앞의 식에서 mat의 전단저항 S_s 를 무시하고 성토부의 용기를 원형으로 가정하였을 때의 반경 r 을 반무한으로 크다고 보고 근입깊이 D_r 를 0으로 하고 복토두께 (d)로 정리하면 다음 식이 되며, 이 식으로부터 장비접지압에 대응되는 소요복토두께를 계산할 수 있다.

$$d = b \left\{ \frac{P \cdot F_s}{5.3C + \frac{2T \sin\theta}{b}} - 1 \right\}$$

2) S.C.P타입기의 중량 및 접지압

표 6은 국내에서 사용되고 있는 S.C.P타입기의 중량 및 접지압이다.

표 6. S.C.P타입기의 중량 및 접지압

장비명	규격	중량(ton)	비고
크레인 (크로올러형)	80ton	72.0	0.85×5.19m(B×L)
	60ton	54.0	0.85×4.9m(B×L)
	50ton	48.0	0.85×4.6m(B×L)
Leader	ℓ=36m	15.012	417kg/m(TOP단부 및 기타악세사리 포함)
Vibro Hammer	96kw	6.50	
Back Stay	ℓ=24m×2	3.02	φ318.5m/m×7ton(53.8kg/cm) Flange φ450×25t×8매×2조
Generator	300kw	3.3	
Air Tank	3.0m³	1.8	
Skip Bucket	1.1m³	1.45	
Hopper	1.0m³	2.0	Air Gate, Pitch Valve 부착포함
쇼업-쇼바		1.65	
Casing	φ400m/m×19t×27m	5.0	172kg/m+Angle 및 Air Pipe부착+Flange 포함
기타	부품전체	5.7	Airhose, E/Cable(60m), 장력계, 유압펌프 및 Tank(800kg), Bad(3200kg)
Total		93.432	※ 50Ton의 경우임
비고	○ 접지압 i) 크로올러 자체시공시 $93.432 \div (0.85 \times 4.6 \times 2) = 11.95 \text{ ton/m}^2$ ii) 슈판제작부착시 $93.432 \div (1.2 \times 4.6 \times 2) = 8.5 \text{ ton/m}^2$ 단, 슈판제작에 따른 중량(1.2×0.2×0.0025)을 46.8kg×108EA =5.054ton을 감안하면 약 9ton/m²의 접지압이 걸림.		

3) 타입장비의 통행성(trafficability)검토 결과

S.C.P 타입장비의 통행성(trafficability)을 확보하기 위한 소요복토 두께를 구하면 표 7과 같다. 계산 결과에 의하면, 크로올러 자체시공시 소요복토 두께는 1.3m로 계산되었다. 따라서

하나의 예로서 육상에서 시공을 실시하기 위해서 원지반에 mat를 포설한 후 약 4.5m까지 육상토를 이용하여 복토를 실시한 후 연약지반 처리를 실시한다면, 통행성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

표 7. S.C.P 장비의 소요 복토 두께 계산

구 분	크로올러 자체시공시	슈판 제작 부착시	비 고
접지압(ton/m^2)	11.95	9.0	
충격을 고려한 접지압(ton/m^2)	15.54	11.7	충격계수 1.3을 적용
타설장비 접지폭(m)	0.85	0.85	
계산된 소요복토두께(m)	1.30	0.77	
특 기 사 항	1. 안전율(F_s) 1.5 적용 2. C(비배수 전단강도)는 $1.0\text{ton}/\text{m}^2$ 을 적용 3. 설계접지압은 충격계수 1.3을 적용 4. 크로올러 50ton 적용시 계산값임 5. Geotextile의 경사각(θ)은 30° 임 6. Geotextile의 인장강도는 $5\text{ton}/\text{m}$ 를 적용하였으나 안전율 고려, $10\text{ton}/\text{m}$ 인 제품사용		

7.5 계측관리

7.5.1 개설

성토는 흙을 인공적으로 축조한 흙구조물로서 토목분야에서는 통상 도로성토, 철도성토, 하천제방, 공항, 플랜트, 택지조성 및 대규모 사력댐 축조공사에서 주로 실시한다.

이들 각 공종은 용도에 따라서 요구되는 관리항목이 다르지만, 일반적으로 성토공사에 있어서 조성시에는 성토 본체의 품질관리와 성토로 인한 주변지반의 영향 등이 주요 계측관리 항목이 되며, 성토구조물이 축조되는 원지반의 상태에 따라서도 계측관리항목이 다르다.

성토구조물이 축조되면, 그것을 지지하는 지반내에서는 성토중량에 의해 지중응력이 증가하게 되는데 사질토지반에서는 이것에 의한 전단파괴가 문제되는 경우는 거의 없으며, 변형도 무시할 수 있는 정도이다. 또한 지반의 침하가 큰 경우에도 그것이 비교적 단시간에 발생하는 탄성침하이면 문제가 되지 않는다. 그렇

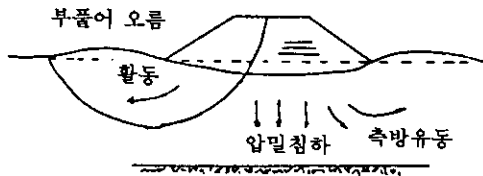
지만 지반이 연약한 경우에 지중응력의 증대는 여러가지 문제를 일으킨다. 대부분의 연약지반에서는 점성토가 포화상태에 있으므로 성토중량에 의한 탈수로 압밀침하가 생긴다. 압밀침하는 연약층의 두께나 성토의 중량 등에 따라 다르지만 상당히 오랜기간에 걸쳐 진행되고, 최종침하량은 성토본체의 압축침하나 지반의 탄성침하량과는 비교할 수 없을 정도로 크다. 압밀침하량은 압밀시험을 이용하여 이론적으로 계산할 수 있지만, 압밀이 종료하기까지의 시간이나 최종침하량의 실측치가 계산치와 큰 차이를 보이는 것이 일반적이다.

압밀문제와 함께 연약지반에서는 성토중량에 의해 전단변형이 증대하거나 경우에 따라서는 전단파괴를 일으키게 된다. 이러한 현상이 일어나지 않도록 하기 위해 성토의 시공관리를 하거나 압성토, 드레인, 치환공법 등의 대책공을 수립하여 실시하게 된다.

이와 같이 연약지반에서는 여러가지 문제가

발생하기 쉬우므로 견고한 지반을 선정하는 것이 좋지만, 도로, 철도 등의 공사에서 견고한 지반만으로 노선을 선정하는 것은 현실적으로 어려운 일이다. 한편, 연약지반의 토질은 지역에 따라 변화가 심하고, 예견할 수 없는 연약층이 존재하는 경우도 있다. 이러한 현상을 사전에 조사하기 위하여 대표지반에 대한 시추 및 실내시험을 수행하여 파악한다. 그러나 이들 시험결과로부터 지반거동을 정확히 예측하는 것은 용이하지 않다. 따라서 연약지반에 성토하는 경우는 침하관리 및 전단파괴방지와 대책공의 효과를 확인하기 위한 수단으로서 계측관리가 요구된다.

이상에 서술한 현상을 나타낸 것이 그림 3이다. 성토시 계측에 관한 요점을 서술하면, 연약지반 위의 성토에서는 성토본체의 계측보다는 지반의 압밀침하, 측방유동, 측방지반의 heaving, 지반의 전단파괴가 대상이 된다.



- 그림 3. 성토공사시 계측에 관계되는 대표적 거동

7.5.2 계측의 필요성

연약지반을 대상으로 하는 공사의 경우에는 보통지반의 경우보다 세밀한 토질조사를 행하고, 그것에 의거해서 보다 면밀한 설계를 하며, 시공도 세심한 주의를 기울이는 것이 일반적이다. 그러나 이와는 관계없이 공사중에 구조물이나 지반이 과대한 변형을 일으키거나 파괴에 이르는 경우가 있고, 반대로 아무런 과오없이 공사를 완료했어도 결과적으로 보면 과대설계가 된 경우가 있다. 이렇게 설계시에 예측한 구조물이나 지반의 거동이 시공시 실제의 거동과 일치하지 않은 예는 연약지반을 대상으로 하는 공사에서 자주 경험하는 것이다. 이러한 불일치가 생기는 원인은 설계과정에서 많은 단순화나 이상화가 행해지고 그 결과로 설계시 예측

중에 많은 불확실성이 개입되기 때문이다. 이처럼 설계에 포함되는 불확실성으로 인한 예측과 실제 거동사이의 불일치는 불가피한 것이지만, 그것으로 인해 구조물이나 지반이 과대한 변형을 일으키거나 파괴라는 돌이킬 수 없는 상황이 되지 않도록 하기 위해 현장계측에 근거한 시공관리에 의해서 예측치 못한 사태를 미연에 파악하여 필요한 대책을 강구하면서 공사를 진행하는 방법을 취하는 것이 중요하다.

연약지반상에 성토를 하는 경우, 주요 계측 항목은 침하와 수평변위가 되며, 침하측정의 목적은 성토 진행에 따라 공사중 또는 최종적으로 어느 정도 침하할 것인가를 추정해서 공사계획을 하기도 하고, 침하 상태를 파악해서 올바른 토공량을 산출하는 것을 주도하는 경우와 압밀에 의한 강도증대를 목적으로 하는 단계식 성토공법의 경우, 각 단계마다 압밀정도를 판정해서 다음 단계 성토를 수행하기 위한 시공지침을 얻는 것에 있다. 또 성토에 따른 원지반의 침하가 압밀에 의한 것인지 전단활동에 의한 것인지를 파악하기 위해 수평변위 계측을 병행하는 것이 일반적이다.

계측의 목적을 명확히 하는 것은 계측계획에서 가장 중요한 것이며, 이를 명료하게 정의함으로써 불필요한 계측을 방지하여 경제적이고 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다.

7.5.3 일반원칙

계측내용에 따라 필요한 계측기를 설치해야 하겠으나, 통상의 압밀시공과 관련, 다음 사항의 계측이 수행되어야 할 것이다. 지표면 침하, 층별 침하, 측방변위(경사), 간극수압 등이다. 이들 측정을 위한 계측기의 배치간격은 연약지층구성에 따라 달라질 것이다.

지반이 복잡하고 주요구조물이 축조된 경우에는 집중관리의 대상으로서 보다 철저하고, 많은 계측기를 설치하는 것이 일반화된 원칙이다. 또 일정 횡단면에서의 각 계측기의 설치위치에 대해서는 지표면 침하계 및 층별 침하계는 도로의 중앙부에, 경사계는 성토단면 하부에, 간극수압계는 성토단면 하부에 설치하는

것이 관행이다. 고성토구간에서는 성토단면 비탈끝에서 용기나 측방이동을 관측할 수 있도록 경사계나 기준표지를 설치하기를 권한다.

7.5.4 계측항목 및 계측기의 선정기준

성토공사시 주요 계측항목은 다음과 같으며, 이에 따른 계측기의 종류를 표 8에 나타내었다.

- 1) 일반적인 경우의 계측항목은 성토자체 및 원지반의 침하, 원지반의 간극수압, 성토사면 선단의 수평변위 및 수직변위이다.
- 2) 특별한 경우의 계측항목은 각 층별 침하, 성토자체 및 원지반의 수평변위, 원지반 심층부의 응력, 투수성 등이다.

계측기의 선정시에는 계측의 목적을 명확히 해서 목적을 충족시키기 위해, 관계되는 각종 조건들을 고려해야 한다. 이러한 조건들이 계측기 선정에 중요한 요소이기 때문이다. 계측기 선정시 고려되어야 할 각 항목에 대하여 기술하면 다음과 같다.

① 측정의 종류

측정의 종류는 요구되는 측정이 지표면의 변위인가, 경사량인가, 지중의 변위량인가 하는 것이며, 변위도 절대변위와 상대변위중 어느

것이 요구되는가를 명확히 판단해야 한다. 또한 시간관계에서는 연속적인 측정이 필요한가 또는 단속적 측정인가에 따라 계측기가 선정된다.

② 측정정확도

측정시 어느 정도의 정확도가 요구되는지의 판단은 계측기 구입 및 측정에 따르는 경제성과 직결된다. 측정목적과 정확도의 관계를 생각해 보면, 대량의 지하수를 양수함으로써 광범위한 지역이 침하하는 지반침하의 경우에는 연간 수 mm의 정확도가 요구되지만, 성토의 시공관리를 목적으로 하는 경우는 하루 수 mm의 오차는 큰 문제가 되지 않는다.

즉, 요구되는 정확도에 따라 계기의 선정뿐만 아니라 더 나아가서는 측정계획 자체도 달라진다.

③ 측정범위와 정확도

주로 전기식 변환기를 내장한 계측기에 해당되는 사항인데, 측정결과의 정확도를 높이기 위해서는 변환기 자체의 정확도가 높은 것이 좋다. 그러나 정확도는 측정범위에 대한 비가 1/100~1/200정도로 거의 일정하므로 이들의 관계를 파악해서 측정범위와 정확도를 모두 충

표 8. 성토공사시 계측에 이용되는 계측기 및 목적

계측기명	목적	매설기준		
		A	B	C
표면침하관	대상이 되는 지점의 전침하량 측정 (성토속도의 관리, Surchage 제거시기의 결정 등에 결과를 사용)	○		
층별침하계	특히 연약층이 두꺼운 곳에서 심부 각 층의 침하량을 측정, 심부의 지반거동을 파악 (성토속도의 관리, Surchage 제거시기의 결정 등에 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 하중 분담율을 검토해서 그 효과를 확인)			○
간극수압계	성토하중에 의한 간극수압의 증감을 측정 (간극수압의 증감에 의해 대책공의 효과, 침하상태의 확인에 이용)			○

여기서 A : 대책공법 시공장소 및 안정, 침하가 문제되는 장소에 통상 사용한다.

B : 특히 연약층이 두꺼운 곳에 설치할 필요가 있다.

C : 매우 연약한 지반에서 Sand Pile의 효과 확인이 필요한 경우 등 특별한 경우에 한한다.

측시될 수 있도록 계측기를 선정해야 한다. 즉, 어떤 범위까지는 높은 정도로 측정하고 어떤 범위에서는 정확도를 다소 저하시켜 범위를 확대할 것인가를 결정하는 것이다.

④ 측정기간

일반적으로 계측은 장기간에 계속되는 것이 많아서 다른 측정계기와 마찬가지로 다음과 같은 조건이 요구된다.

- i) 안정성이 양호한 것
- ii) 취급방법이 간편한 것
- iii) 고장시 수리가 간편한 것
- iv) 점정하기 쉬운 것

여기서

- A: 대책공법 시공장소 및 안정, 침하가 문제되는 장소에 통상 사용한다.
 B: 특히 연약층이 두꺼운 곳에 설치할 필요가 있다.
 C: 매우 연약한 지반에서 sand pile의 효과 확인이 필요한 경우 등 특별한 경우에 한한다.

7.5.5 계측위치의 선정

목적에 맞는 계측기를 선정 후 그 계측기를 어떻게 배치할 것인가 라는 것이 중요한 관건이 된다. 계측위치의 선정이 측정대상물의 규모나 주변구조물에의 영향 정도에 좌우된다는 것은 말할 나위도 없지만 측정 개소의 지형, 지질, 토질특성 등의 중요한 요소가 있다는 것도 간과할 수 없는 사항이다. 이러한 사항들을 파악하지 못하고 측정한다는 것은 단순히 계측한다라고 하는 요식행위에 그쳐, 필요한 자료를 얻지 못하는 결과를 초래하게 된다. 공사에 지침이 될 수 있는 결과를 얻기 위해서는 성토 자체 및 원지반이나 인접구조물의 거동을 충분히 고려하고 또 유사한 조건하에서 계측 예를 참고로 하여 배치하는 것이 좋다.

또한, 계측지점의 선정시 고려해야 할 사항은 그 계측지점이 지역을 대표할 수 있는가를 파악하는 것이다. 경제적인 측면에서 볼 때 지나치게 많은 지역에 계측점을 두는 것은 불리

하며, 방대한 계측결과가 오히려 혼란을 일으킬 수 있다.

도로공사시 성토공이 진행되는 구간에서 계측을 하는 경우, 일반적으로 성토고가 높은 지점과 연약지반이 두꺼운 지점이 우선 계측지점으로 선정되며, 100~300m정도(대체적으로 200m)의 성토공사 1회 작업구간에 1개소 선정하는 것이 일반적이다. 그러나 도로성토가 하천제방의 배면매립층을 통과하는 경우에는 지반조건의 변화가 심하므로 이러한 경우는 대표적 지점을 선택하기는 어렵고 침하량이 큰 곳이라든가 성토의 전단활동파괴의 가능성이 있는 곳을 선정해서 성토시공관리의 checkpoint로 할 필요가 있다. 성토에 있어서 표 8에서 기술한 계측기들을 배치할 때는 다음과 같은 기준에 따라 설치하는 것이 일반적이다.

- ① 표면침하판은 성토전단의 중앙부, 성토사면의 정상부에 배치한다.
- ② 층별침하계는 특히 연약층이 두꺼운 장소에서 각 층의 침하량을 알고자 할 때, 성토 중앙부의 지중에 배치한다.
- ③ 경사계(inclinometer)는 필요한 경우 성토사면 선단에 매설하고 각 깊이마다 수평변위량을 측정한다.
- ④ 간극수압계는 침하관리를 위해 층별침하계가 설치된 위치에서 3m이내에 설치한다. 성토에 따르는 일반적인 성토자체 및 원지반의 거동은 그림 5와 같으며, 이에 따른 대표적인 계측기 배치도를 그림 6에 나타내었다. 또 대규모 연약층이나 특별한 곳에서의 계측기 배치도는 그림 7과 같으며, 아래에 추천할만한 계측선정 위치를 약술한다.

그리고 압밀이 이론(설계)대로 일어나고 있는가를 매일 점검하여 성토-침하-시간곡선을 이들 계측결과로부터 기입하고 이상이 있으면 원인을 규명하여 시공속도를 조절한다.

또한, 교량과 같은 구조물은 통상 도로성토에 앞서 미리 착공하는 경우가 많은데, 그 후에 성토공사가 접근하면 교대의 측방이동이 시작

하여 성토완료 후에는 크게 측방이동이 발생한다. 이와 같은 위치는 피하는 것이 좋으나, 피할 수 없는 경우는 교대근방에 침하 및 측방이동을 점검할 수 있도록 설치해야 한다. 그러나 일단 측방이동이 발생하면 공사를 중지하거나 압밀하중을 제거하는 수 밖에 없으므로 사전에 측방이동 가능성을 검토해야 한다.

그 검토방법은 일본 건설성이나 일본 도로공단의 제안방법에 따르면 합리적이다. 우리나라에서의 계측결과를 보면 간극수압계는 거의 실행성이 없는 것으로 생각된다. 이 점을 외국에

서도 정도의 차이는 있어도 동일하다. 따라서 고가의 간극수압계보다는 침하계(연약지반, 성토층별)나 경사계의 수를 증가하는 것도 한 방법이다. 위치는 한 단면에 공사에 지장이 없는 한, 중앙의 연약층 침하계(경사계 포함) 양쪽으로 성토단계에 따라 1~2개를 나란히 배치하며, 혹시 이들이 작동하지 않을 경우를 고려하여 멀지 않은 곳에 다시 1조를 배치하면 더욱 좋다. 다만 이는 중요한 지점(위치)에 대한 권장 사항이다(그림4~5 참조).

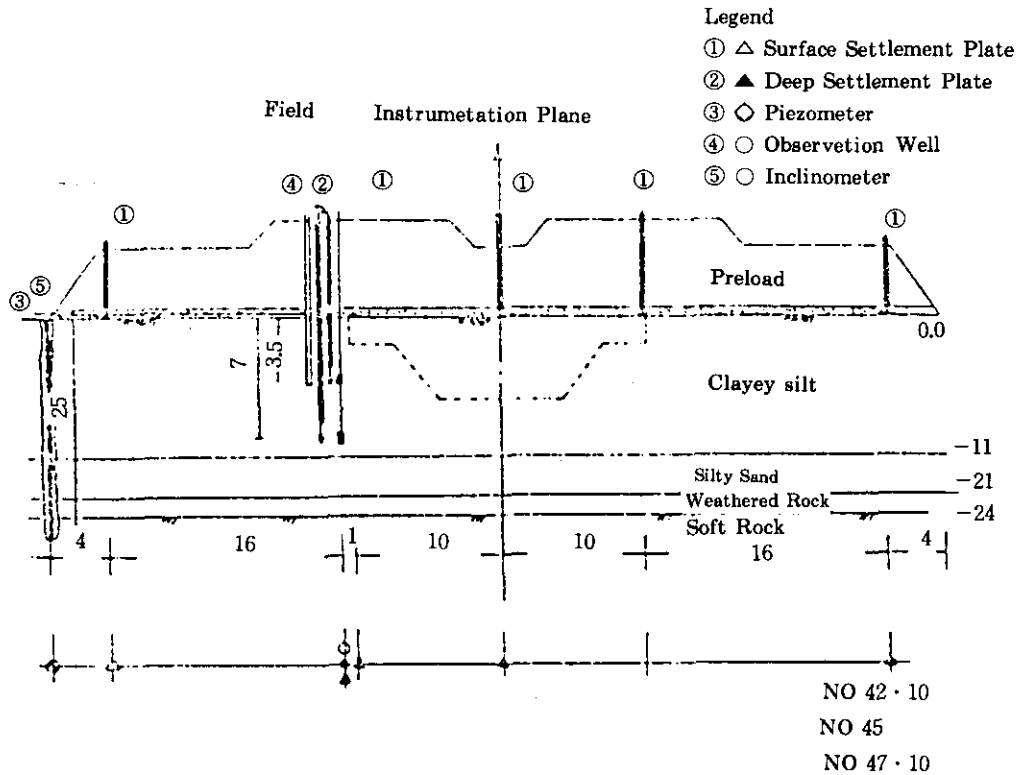
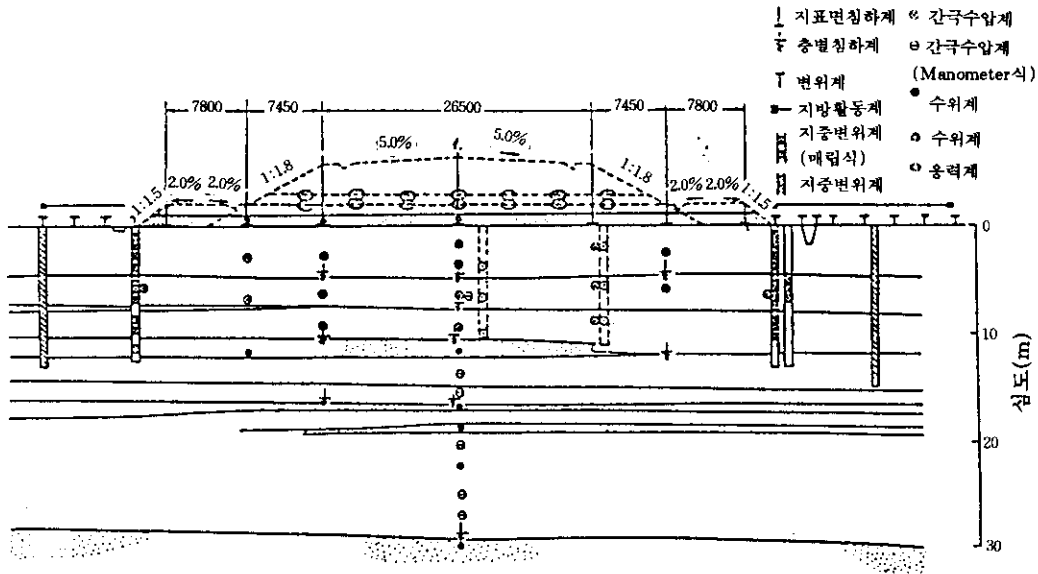


그림 4. 계측기배치 예 1(Plastic Drain Board 공구)

연약층의 깊이가 5m이내이고 성토고가 2.2m 이하의 저성토인 경우는 그 배치간격을 상대적으로 증가설치해도 가능하다고 판단된다.

마지막으로, 계측의 종류와 측정점의 배치 및 계측빈도에 대하여 계측전문회사와 상의도 필요함을 첨언한다.



7.5.6 침하관리

연직배수에 의한 지반개량시 압밀의 진행상황과 현장의 압밀특성(m_v , C_h)을 파악하기 위해서 지반의 침하를 관측하게 된다. 따라서 이 실측침하로부터 현장의 압밀도나 압밀특성을 추정하는 작업은 시공관리의 중요한 작업중의 하나이다. 이 작업의 구체적 내용은 실측침하 시간곡선에 이론곡선을 함께 그려서 그것으로부터 어떤 시간의 압밀도, 어떤 압밀도에 도달하는 시간 또는 최종침하량 등을 추정하는 것이다. 원래 그림 6에 나타난 실측침하곡선에 이론곡선을 그리는 것은 2개의 곡선을 중첩되도록 이론곡선의 종 및 횡좌표를 늘리는 것, 즉, 실측침하량 S 와 압밀도 U 와의 또는 경과시간 t 와 시간계수 T_h 와의 대응관계를 구하는 것이다. 이들 관계를 결합시키면 다음과 같다.

$$U(t) = \frac{S(t)}{S_r} \quad (1)$$

$$T_h = \frac{C_h}{d_c^2} t \quad (2)$$

이 두가지 관계에서 불명확한 양은 S_r 와 C_h 이고 이 두가지 양을 찾아내면 결합은 완료된다. 이와 같은 결합 방법은 $S \sim t$ 법, $S \sim \log t$ 법,

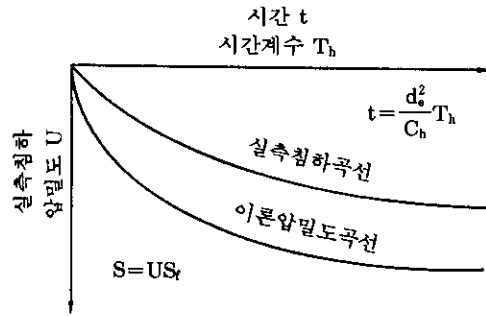


그림 6. $S \sim t$ 법에 의한 침하해석

$\log(1-U) \sim t$ 법 및 쌍곡선법등 4가지가 있으며 각각의 특징이 있다.

$S \sim t$ 법은 S_r 와 C_h 를 여러가지로 가정하여, 실측곡선과 가장 잘 일치하는 이론침하곡선을 시행착오법에 의해 구하는 것으로 원시적이기 때문에 복잡하지는 않고 기본적인 현황파악을 한 후에 최종적인 상황을 판단한다.

$S \sim \log t$ 법은 실측침하 S 를 $\log t$ 에 대해서 그린다. 시간좌표를 대수좌표(\log 좌표)로 하는 것은 자연좌표상의 선축이 대수좌표상의 평행이동에 상당하는 성질을 이용하고자 하는 것이다. 즉, 식(2)에 \log 를 취하면 아래 식과 같이 된다.

$$\log T_h = \log t + \log \frac{C_h}{d_s^2} \quad (3)$$

이론곡선 또는 실측곡선을 log축을 따라서

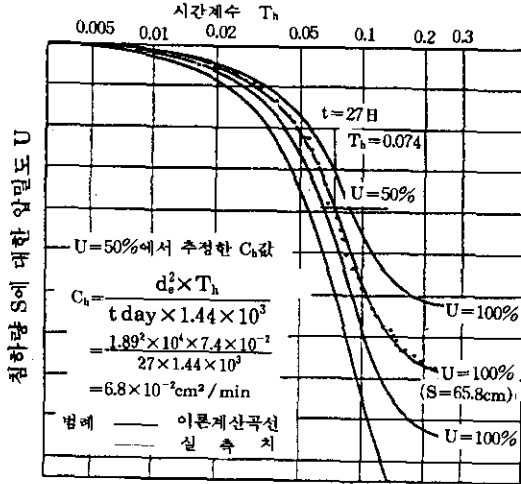


그림 7. S~logt법에 의한 침하해석 예

$\log(C_h/d_s^2)$ 만을 이동시키면 T_h 와 t 는 일치한다. 먼저 S~t법은 C_h 를 여러 가지로 바꾸어서 (시간계수축을 신장시키는 것과 동일) 이론침하곡선을 실측침하곡선으로 일치시키지만 S~logt법은 그 부분을 침하곡선의 평행이동으로 완성하려는 것이다.

따라서 압밀도축만을 늘리거나 줄이면 좋다. 구체적으로 U의 스케일을 여러 가지로 바꾸어서 그리고 $U \sim \log T_h$ 곡선군중에서 실측침하곡선과 가장 잘 일치하는 이론곡선 1개를 선택한다(그림 7). 따라서 $U=100\%$ 에 대응하는 침하를 S_0 로 해서 식(1)과 식(2)의 관계를 이용해서 C_h 를 계산한다.

$\log(1-U) \sim t$ 법은 門田⁴⁰⁾에 의해 제안된 방법이고 그는 Barron에 의해 제안된 압밀도의 근사식

$$U = 1 - \exp\left\{-\frac{8}{F(n)} T_h\right\} \quad (4)$$

여기서,

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \quad (5)$$

을 다음과 같이 수정하였다.

$$\log_{10}(1-U) = -0.4343 \frac{8T_h}{F(n)} \quad (6)$$

이것은 $\log_{10}(1-U)$ 와 T_h 또는 t 가 직선적인 관계가 있기 때문에 이 성질을 이용해서 C_h 와 S_0 를 결정한다. 우선, 어떤 시간(가능한한 경과 시간이 큰 것을 선택)의 압밀도를 가정한다. 이것은 C_h 와 S_0 를 가정하는 것과 다름 없다. 다

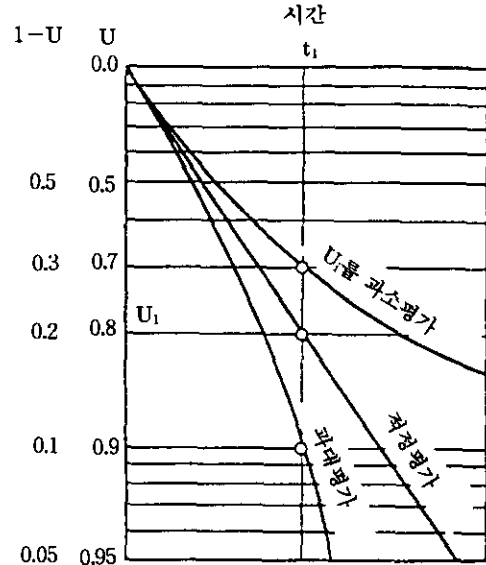


그림 8. $\log(1-U) \sim t$ 법의 모식도

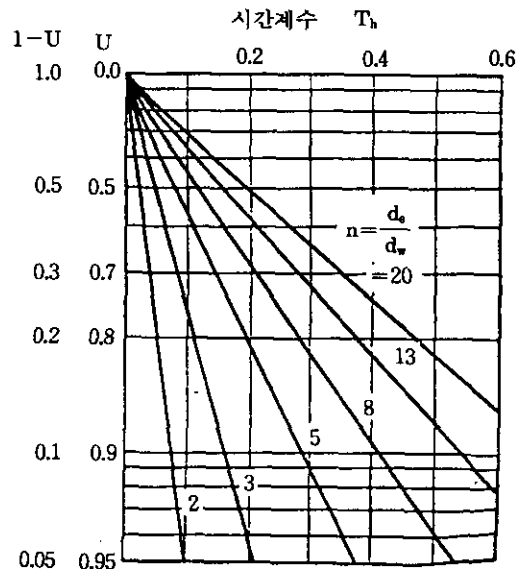


그림 9. $\log(1-U) \sim T_h$ 에 그려진 이론곡선

음으로 가정한 압밀도를 가지고 압밀도 10%, 20%, 30%의 시간을 구하고 $\log(1-U) \sim t$ 좌표에 일치시킨다.

가정한 압밀도가 정확하면 원점을 통과하는 직선을 얻을 수 있다. 압밀도를 과대하게 가정하면 직선이 되지 않으며 그림 7에서 처럼 아래쪽으로 그려진다. 또는 압밀도를 작게 가정하면 위쪽으로 그려진다. 이 성질을 이용해서 원점을 지나는 직선이 얻어질 때까지 압밀도의 가정을 수정하고 식(1) 및 식(2)를 사용해서 C_v 와 S_0 를 구한다. 단, 이 방법에 의한 근거는 Barron의 근사식이지만, 동일한 Barron식인 엄밀해를 $\log_{10}(1-U) \sim t$ 좌표에 그리면 그림 9에 나타낸 것 같이 원점을 지나는 직선이 얻어지지 않는다. 이러한 경향은 n 값이 작을수록 강하다. 따라서 이 방법을 적용할 경우에는 $\log_{10}(1-U) \sim t$ 곡선의 직선화에 중점을 두고 이 직선의 원점통과를 다소 가볍게 생각하는 것이 좋다.

쌍곡선법은 성토가 완료된 임의의 시간 t_1 이후의 압밀과정을 다음 식으로 근사화 시킬 수 있다(그림 10).

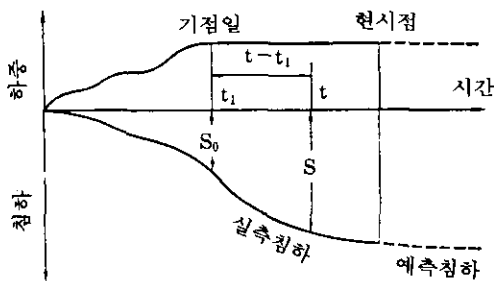


그림 10. 쌍곡선법의 모식도

$$S - S_0 = \frac{t - t_1}{\alpha + \beta(t - t_1)} \quad (7)$$

여기서,

t : 재하된 시점으로 부터의 경과시간

t_1 : 임의로 가정한 또는 관측을 시작한 시간

S : t 에 대한 전 침하량

S_0 : t_1 에 대한 침하량

α, β : t_1 의 선택방법에 따라 결정되는 정수

여기서 식(7)을 바꾸어 다시 쓰면 아래 식과 같이 된다.

$$\frac{t - t_1}{S - S_0} = \alpha + \beta(t - t_1) \quad (8)$$

$(t - t_1)/(S - S_0)$ 과 $(t - t_1)$ 과의 사이에는 직선관계가 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 관측치를 그림 11과 같이 그리면 α 는 절편이고, β 는 직선의 구배이다. α, β 가 구해지면 식(7)을 사용해서 임의 시간의 침하량을 추정할 수 있다. 또한 식(7)은 $t \rightarrow \infty$ 로 하면

$$S_\infty - S_0 = \frac{1}{\beta} \quad (9)$$

이 되고 $1/\beta$ 은 t_1 이후 압밀완료시 까지의 침하량을 나타낸다.

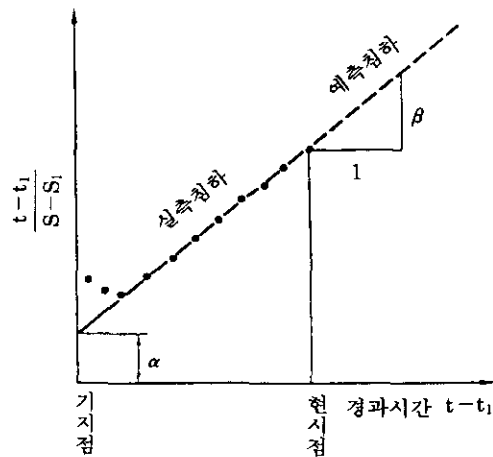


그림 11. 쌍곡선법으로 α, β 를 구하는 방법

따라서 S_0 이 관측되면 S_∞ 가 구해지고 식(1)과 식(2)에서 C_v 도 구해진다. 그림 12는 식(8)의 근사성을 검토하기 위해서 $n=5$ 인 경우의 이론곡선을 쌍곡선법의 좌표로 U_1 을 매개변수로 해

서 그런 것이다. 여기서, T_h , U_1 은 각각 t , S 에 대응되는 시간계수 및 압밀도이다. 이 그림을 보면 곡선은 $U=40\sim90\%$ 에서, U_1 의 값에 관계 없이 직선이지만 그 후는 $1/(1-U_1)$ 의 경사를 가지고 원점을 지나는 직선으로 접근한다.

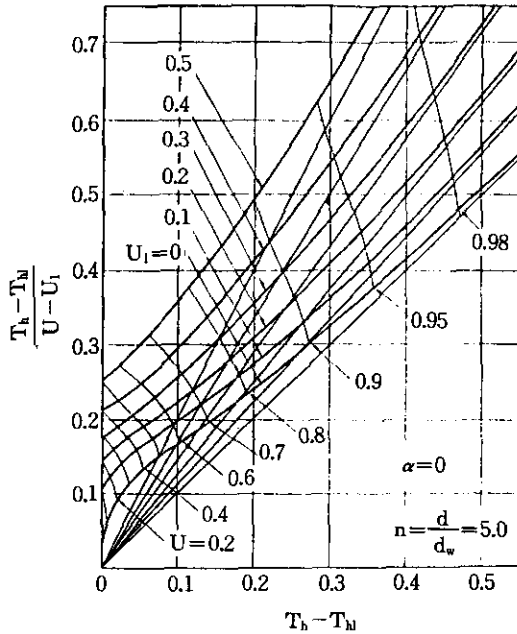


그림 12. 쌍곡선 근사법으로 그려진 이론곡선

여기서 쌍곡선법으로 현장 침하해석을 반복하면 $U=40\sim90\%$ 로 나타나는 직선부의 구배를 β 로 해서 구할 수 있다. 그러나 식(8)의 관계를 만족하는 β 는 이 직선부의 경사가 아니고 접근선의 경사이다. 따라서 직선부의 경사를 β 로 하는 것은 결과적으로 S_u 을 30% 정도 크게 보는 것이다. 그럼에도 불구하고 쌍곡선법에 의한 S_u 의 추정 정도가 높다는 보고가 많다. 그 이유중 하나는 다음과 같다.

탄성 압밀이론의 경우 침하는 일정치로 수렴하지만 실제의 점토에서는 압밀과정의 말기에 2차압밀이 탁월해서 침하가 시간의 log로 거의 직선적으로 비례해서 진행된다. 이것을 $U=40\sim90\%$ 가 되는 직선부를 연장시키면 $1/(1-U_1)$ 의 구배를 갖는 직선에 접근되지 않는 것으로 판단된다. 또한 쌍곡선법은 압밀과정의 초

기부분에 그다지 주목하지 않고 2차압밀을 포함해서 지금부터 생길 수 있는 침하만을 주목한 침하해석법이다. 이것에 비해 다른 3가지 해석법은 압밀과정의 일차압밀 부분만을 주목한 것으로 2차압밀 침하의 해석은 거의 고려되지 않는다. 따라서 목적에 맞는 해석법을 선택하지 않으면 안된다.

7.5.7 안정관리

연약지반에 대한 성토의 안정은 토질조사 및 토질시험의 정보를 통해서 당초 그 안정을 검토한다. 그러나 지반구성이나 흙의 성질이 복잡하기 때문에 안정에 상당한 여유가 있는 경우를 제외하고는 설계계산대로 공사를 진행하는 것은 상당히 위험하다. 따라서 시공중의 관측 결과를 토대로 지반의 안정상태를 파악하고 설계를 수정해 가면서 공사를 진행해야 한다. 지반의 파괴는 상식적으로 다음과 같이 말할 수 있다. 재하에 의해서 지반은 침하한다. 따라서 그 침하가 과대해지면 지반은 파괴된다. 따라서 침하를 통해서 파괴를 예측하여 미연에 사고를 방지할 수 있으므로 관측된 침하는 안전 관리의 중요한 단서가 된다. 단, 이 경우 침하는 비배수에 의해서 생기는 침하와 배수에 의해서 생기는 침하가 있는데 그 중 전자만이 파괴와 관련되고, 후자는 지반을 안정화시킨다. 일반적으로 2종류의 침하가 동시에 발생하기 때문에 양자를 구분하지 않으면 관측된 침하는 안정관리를 위한 정보가 되지 못한다. 그 외 여러가지 이유 때문에 지반의 안정상황은 침하외에 간극수압, 지표면 및 지중의 수평변위 그 밖의 정보를 종합적으로 검토해서 공사를 진행해야 한다.

또한, 연약지반의 안정이 배수상태와 밀접히 관련되고 단계재하방식이나 점증재하방식에 따라서 재하시의 배수상황이 다르기 때문에 사용된 재하형식의 안정관리 방식이나 착안점도 다소 다르다. 예를 들면, 단계재하 방식의 경우 각 단계의 하중이 비교적 급속도로 성토되기 때문에 이 재하기간에 압밀은 거의 진행되지 않지만 점증재하 방식의 경우 전하중을 비교적

작은 재하속도로 성토하기 때문에 그 재하기간에 압밀의 대부분이 완료된다. 따라서 전자는 재하기간에 지반의 거동을 비배수 조건으로 검토하기 때문에 문제가 간단하지만 후자는 재하기간에 지반거동을 비배수 변형과 압밀변형의 양측면에서 검토해야 하기 때문에 문제가 다소 복잡하다. 따라서 지반의 거동이 간단한지 복잡한지는 안정관리의 난이도에 직접 관련되며 안정이 용이하지 않을 경우에는 안정관리가 간단한 단계재하방식을 채용하지만 안정이 어느 정도 여유가 있는 경우에는 안정관리가 다소 복잡한 점증재하방식이 채용된다.

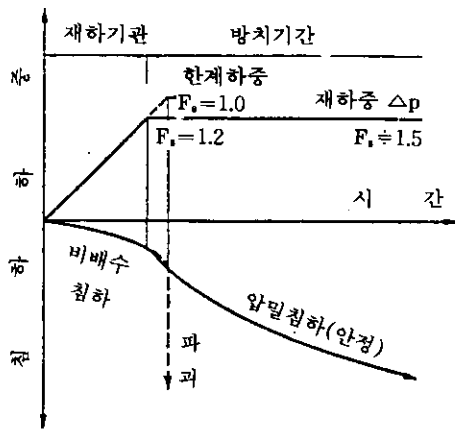


그림 13. 단계재하 방식에 대한 안정관리

단계재하 방식의 경우 그림 13에 모식적으로 나타낸 것과 같이 재하가 시작되면 비배수에 가까운 상태로 침하가 생기고 그대로 재하를 계속하면 한계하중에 도달해서 지반은 파괴된다. 여기서 각 단계의 재하중은 재하직전에 실시한 시추 결과를 가지고 그 크기가 결정된다. 그러나 일반적으로 사용된 안전율이 작다. 즉, 재하중이 한계하중에 가깝기 때문에 재하가 완료되기 직전에서 방치기간 시작점까지 지반의 안정도는 꽤 엄격한 상황이다. 따라서 이 기간이 재하방식에 대한 안정관리는 대단히 중요하고 현재의 상황이 파괴로 가는 가, 압밀되어 안정상태로 가는 가를 판정하지 않으면 안된다. 만약 불안정하다고 판단되면 성토의 중지, 경

우에 따라서 성토하중의 제거와 압성토 등 어떠한 대책을 강구하지 않으면 안된다. 또한 재하가 완료된 시점에서 지반이 안정되었다고 판단되면 상황이 변화되지 않는 한 시간과 함께 안전율은 증가하기 때문에 안정관리는 끝나고 침하관리에 전념하면 된다.

여기서, 간극수압, 지표면변위 및 지중변위 등이 지반의 안정상황에 따라서 어떻게 다른 거동을 보이는지 조사해 보기로 하자. 그림 14는 재하완료 전후의 간극수압의 거동을 모식적으로 나타낸 것이다. 안정된 경우 하중증분에 대해서 발생된 간극수압은 다소 작고, 재하 완료와 함께 급속히 감소된다.

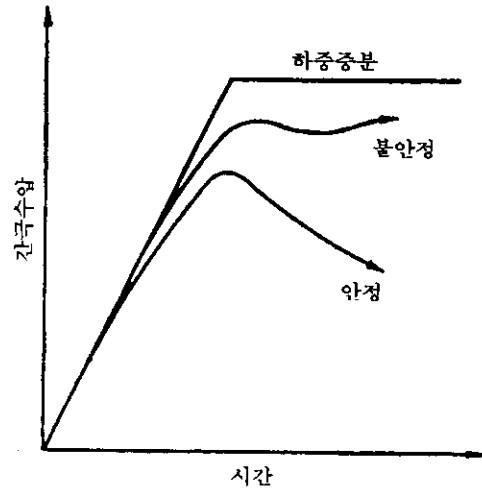


그림 14. 단계재하 방식에 의한 간극수압의 거동

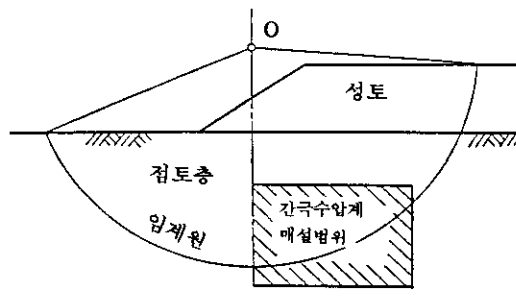


그림 15. 안정관리를 위한 간극수압계 매설범위

이것에 비해 불안정할 경우 발생된 간극수압은 안정된 경우와 비교해서 크고, 방치기간이 시작되더라도 감소하지 않고, 경우에 따라서는 증가한다. 이것은 간극수압이 등방응력에 의해서 발생될 뿐만 아니라 전단변형에 의해서도 발생되기 때문이다. 즉, 정규압밀점토는 전단변형과 함께 간극수압이 증가하고 파괴시에 최대가 된다. 이와 같은 점토의 성질을 다이레턴시 특성이라 부른다.

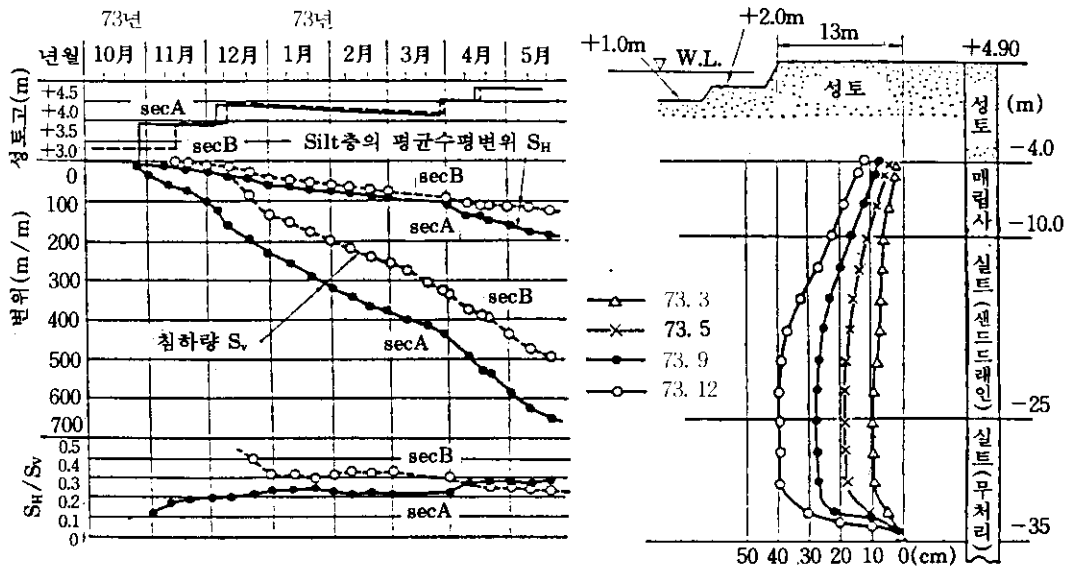
따라서 안정관리상 간극수압계는 전단변형이 가장 심한 위치에 매설해야 한다. 적절한 매설위치는 임계원으로 찾을 수 있고 대체적으로 그림 15에 나타난 범위내외이다.

한편, 지반은 변형이 과대해 지면 파괴되기 때문에 침하나 수평변위 등 변형에 관련되는 정보는 파괴와 직접 관련해서 안정관리에 있어서 매우 유효한 정보이다. 확실히 토류공의 안정관리 등은 토류벽의 변형에 관한 정보가 중요하고 토류벽 거동양상과 토류공의 안정도가 어느 정도 관련이 있어 실제로 이용되고 있다.

토류공과 같이 토류벽이라는 골격을 가진 흩구조물은 그의 골격의 거동에 착안해서 안정관리를 하면 좋다.

이에 반해서 연약지반의 성토와 같이 골격이 없는 흩구조물은 지반의 어느부분에 착안해서 변형이나 변위를 관측하는 것이 좋지만 이와 같은 거동의 표시들이 불안정할 것인지, 안정할 것인지에 관한 판단기준이 아직까지 확실하게 알려져 있지 않다. 이것은 특히 지중변위가 측정되기 때문에 앞으로의 연구에 기대를 한다.

그림 16과 그림 17은 지표면의 침하와 지중의 수평변위를 측정해서 안정관리를 실시한 예로 다음과 같은 방법으로 수행되었다. 먼저 측정위치로서는 지중의 수평변위가 제일 크다고 예상되는 임계원의 중심 바로 아래를 선정했다(그림 18). 이어서 이 지점의 지표면침하 S_v 와 지중의 최대수평변위 S_H 와의 비에 주목하여 시공중 $S_H/S_v < 0.3$ 으로 관리했다.



(a) 변위의 경과시간 변화

(b) sec A 단면도

그림 16. 지중변위에 의한 안정관리 예(I)(福島, 小川, 加登)

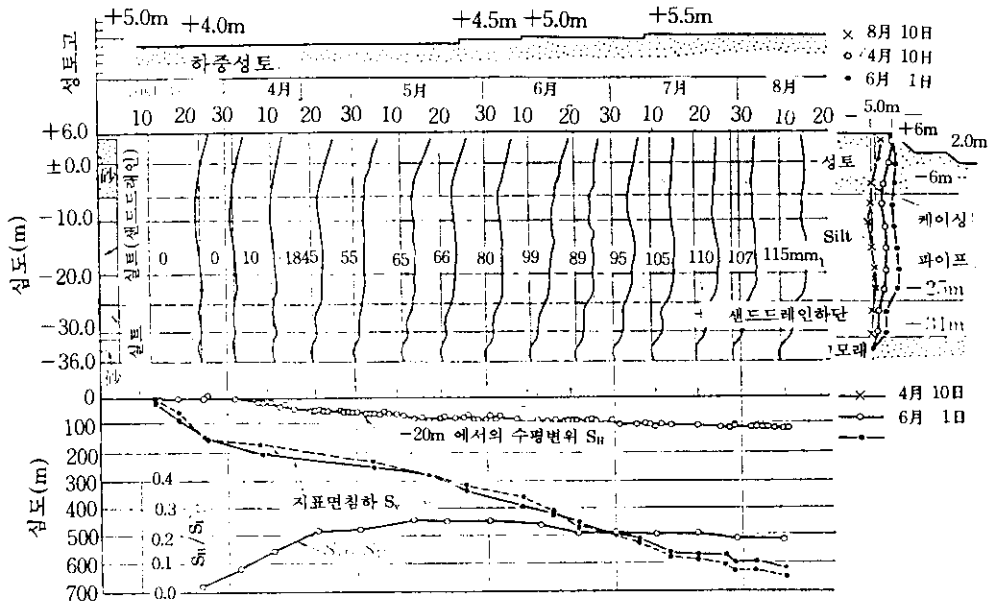


그림 17. 지중변위에 의한 안정관리 예(Ⅱ) (吉國, 加登)

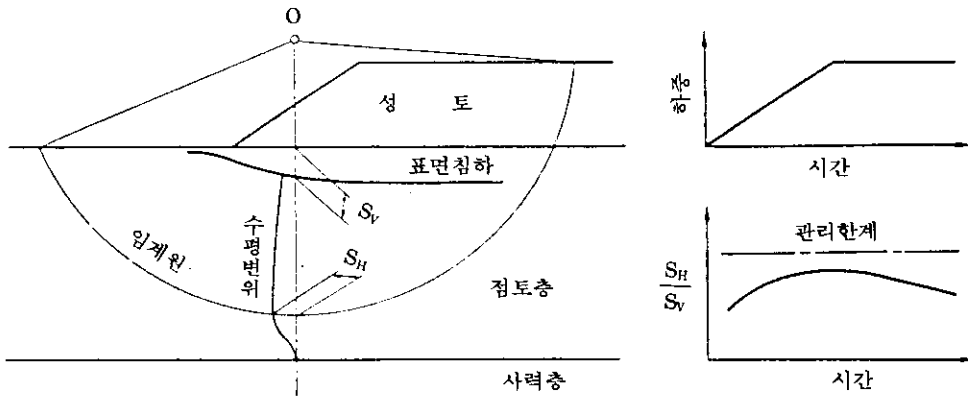


그림 18. 변형계측에 의한 안정관리

S_H/S_V 값에 주목한 이유는 그 비가 지반의 평균적 전단변형이나 압밀변형과 관련되어 있기 때문이다. 이 값이 크면 압밀은 거의 진행되지 않고 비배수 상태로 전단변형이 진행되고 있다는 것을 의미하고 지반은 불안정한 상황이 된다. 반면 이 값이 작고 압밀이 순조롭게 진행

되면 지반은 안정상태가 된다. 문제는 S_H/S_V 의 관리한계치의 크기이다. 이 안정관리 예에서 S_H/S_V 의 관리한계치는 한 두개의 현장 경험을 가지고 정한 것이기 때문에 더욱 많은 현장 데이터를 축적하면서 진행하면 S_H/S_V 에 의한 안정관리는 상당히 유효한 것이 될 것이다.

그림 16과 그림 17은 지반의 변형형태가 크게 다르다. 그림 16은 실트층 하단에 가까운 깊이에서 수평변위가 가장 크고 얕은부분 일수록 수평변위는 작다. 반면 그림 17은 지표면에서 샌드드레인 하단까지는 거의 동일한 수평변위가 발생되고 그보다 깊은 곳에서는 갑자기 변위가 작아진다. 이와 같이 심도방향으로 수평변위의 분포 양상은 상황에 따라서 다르지만, 상황고유의 패턴 중 그것이 하중의 크기나 시간에 따라서 그다지 크게 변하지 않는 점은 공통적이다. 최대 수평변위가 일어나는 심도가 상황에 따라서 거의 결정되고, 그것이 임계원이 통과하는 심도와 거의 일치하고 있다. 이 특징은 다른 현장의 계측예에서도 확인된 것이다.

변형계측에 의한 또 하나의 안정관리법은 성토법면 끝부분의 지표면의 연직 및 수평변위 거동에 착안한 방법으로 육상에서 시공할 경우에 사용한다. 성토측방에 대한 지표면의 수평변위는 지반이 안정된 경우 거의 정지상태이거나 성토측으로 빨려들어가는 것과 같이 변위한다. 그러나, 지반이 불안정한 경우, 성토의 외측으로 밀려나는 듯이 변위하고 재하를 중지해도 천천히 변위량이 증가한다. 한편 성토측방의 연직변위도 수평변위와 유사한 거동을 나타낸다. 즉, 안정된 경우는 융기되는 절대량도 작고, 침하의 경향에 비해 불안정한 경우는 융기되는 경향으로 보면 융기되는 절대량도 크고 재하를 중지해도 융기되는 경향은 계속된다. 이 상황을 도식적으로 나타낸 것이 그림 19이다.

지금까지 단계재하방식의 경우 안정관리법을 몇가지 설명했지만 그것은 간극수압에 관한 것을 제외하고는 거의 그대로 점중 재하방식에도 적용할 수 있다. 점중 재하방식의 경우 그림 19에 도식적으로 나타낸 것과 같이 천천히 재하되기 때문에 비배수상태에서 발생된 침하와 압밀침하가 혼재하고 있다.

단계 재하방식과 동일하게 점중재하 방식에서도 압밀에 의한 강도 증가를 기대해서 하중을 증가시키기 때문에 재하중 p 가운데서 얼마

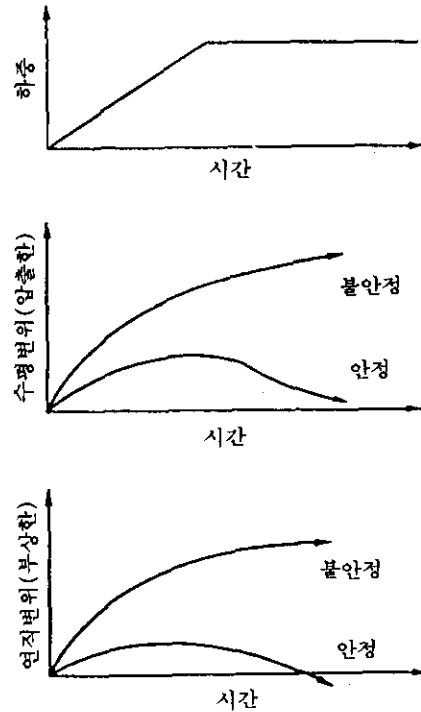


그림 19. 성토법면 끝부분의 지표면 변위에 의한 안정관리

가 유효응력 σ_v' 로 전환되고 있는가, 즉, σ_v'/p 값이 지반의 안정과 밀접히 관련된다. σ_v'/p 값은 지반의 재하속도가 클수록 작고, 재하기간의 초기에는 작지만 최종에는 크다. 따라서 재하가 시작될 때 하중의 절대치가 작고 초기 강도가 있기 때문에 지반의 안정도는 크다. 그러나 재하가 진행되면서 재하와 함께 압밀이 진행되지 않기 때문에 안전율은 서서히 저하된다. 그러나 시간이 경과하면서 σ_v'/p 값이 커지기 때문에 안전율은 회복을 시작하고 방치기간이 시작되면서 최종안전율에 도달해서 안정된다. 결국 점중재하 방식의 경우 지반이 가장 불안정한 시기는 재하 기간중이 될 것이다. 따라서 안전율의 최소값은 재하속도의 크기만큼 작고, 안전율의 최소값을 1로하면 재하속도가 한계의 재하속도로 된다. 역으로 아주 천천히 재

하하면 안전율의 최소값은 나타나지 않고 안전율은 단조롭게 감소해서 최종 안전율에 도달한다(그림 20).

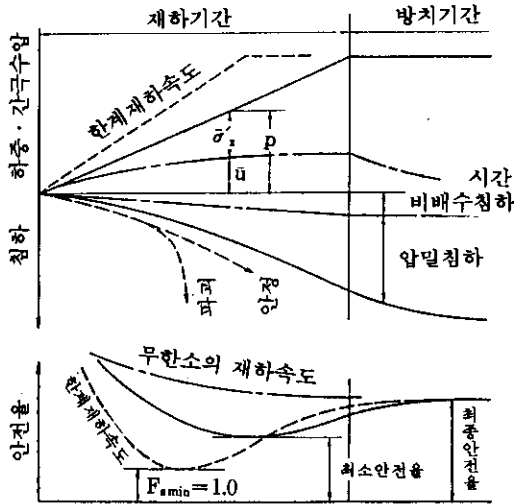


그림 20. 점중재하방식에 의한 안정관리

따라서 점중재하방식의 경우 재하가 거의 완료되고 방치기간에 들어가면 안정관리는 거의 끝난다. 그러나 이것은 압밀이 순조롭게 진행되고 있다는 확인이 필요하고 간극수압과 지반의 변형거동으로부터 이것을 확인하지 않으면 안된다. 즉, 그림 20에 나타낸 것과 같이 점중재하 방식의 경우 간극수압은 비교적 빠른 시기에 일정한 값이 되고 그 크기는 재하속도와 관련되며 재하속도가 클 수록 크다.

이 그림에서 최종침하 예정선과 침하곡선과의 차이가 평균간극수압이다. 또 같은 그림의 형태로 그려진 정울점중재하의 압밀침하곡선은 안전한 재하속도(p_r/t_1)의 결정과 간극수압

에 의한 안정관리에 유용한 것이다. 예를 들면, $n=5$ 의 샌드드레인 경우 재하기간 t_1 을 $T_{n1}=1.0$ 즉, $t_1=d^2/C_v$ 정도 이상이 되면 평균간극수압 \bar{u} 는 최종하중 p_r 의 40%를 초과하지 않아야 한다. 만약 초과하게 되면 이것은 압밀이 순조롭게 진행되지 않거나 파괴가 진행되고 있는지 어떤 지를 모르기 때문에 주의가 필요하다.

참고 문헌

1. 吉國 洋, 1979, "바치칼드레인工法の設計と施工管理", 技報堂
2. 전남대학교 공업기술연구소 1995, "금강하구 연안도로 개설공사의 연약지반 처리공법 및 도로의 안정성 검토"
3. 전남대학교 공업기술연구소 1995, "광양항 1단계 컨테이너 터미널 축조(하부공)공사 Plastic Drain재의 설치간격 검토"
4. 포항종합제철(주) 1996, "광양제철소 조강중산 사업 관련부지조성 기본 설계용역 보고서"
5. 정인준, 김명모 역, 1994, "기초공학 원론" 구미서관
6. 임병조, 1974, "기초공학" 야정문화사
7. 박병기 역, 1996, "연약지반의 토질공학" 새론출판사
8. 한국지반공학회, 1996, "연약지반", 지반공학 시리즈 6
9. 유재복, 1996, "토목시공기술사 문제해설" 예문사
10. 정진섭, 이문수 역, 1996, "한계상태 토질역학" 새론출판사
11. CRAIG, R.E., 1992, "Soil Mechanics", CHAPMAN & HALL.
12. Department of Navy, U.S.A. 1982, "Soil Mechanics Design Manual 7.1~7.3"