

KR C-04040

Rev.0, 5. December 2012

# 연 약 지 반

2012. 12. 5



한국철도시설공단



## 경 과 조 치

이 “철도설계지침 및 편람” 이전에 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

## 일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 코드별로 변경하였습니다.  
또한, 코드에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 항목별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시될 것이니 설계적용 시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람”에서 지침에 해당하는 본문은 설계 시 준수해야 하는 부분이고, 해설(이전 편람) 부분은 설계용역 업무수행의 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 제목 부분의 편람은 각 코드에서의 해설을 총칭한 것입니다.

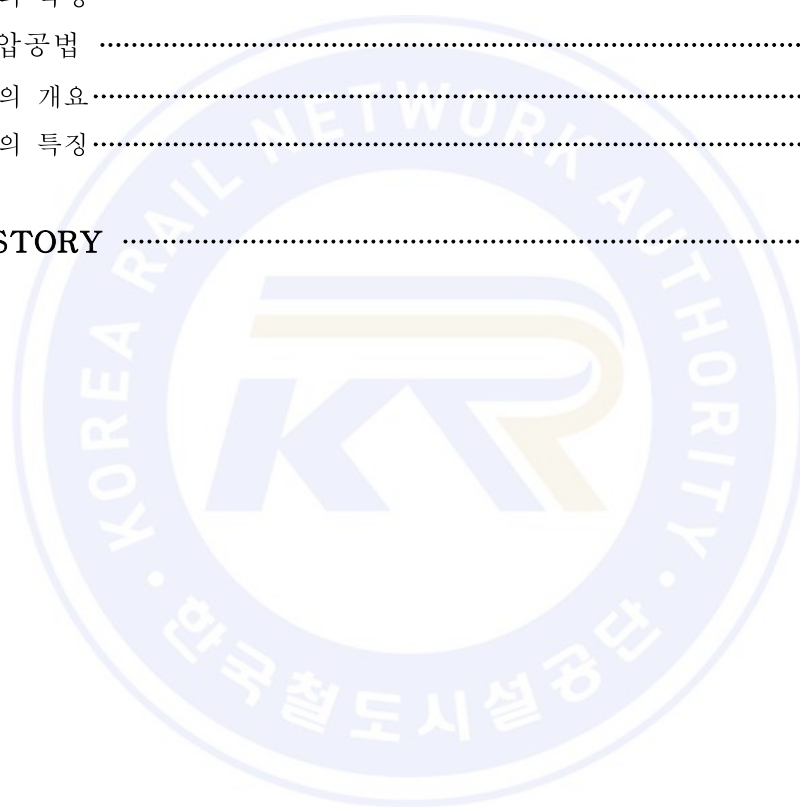
# 목 차

1. 용어의 정의 .....	1
2. 일반사항 .....	1
3. 연약지반의 판정 .....	1
4. 연약지반의 조사 및 시험 .....	2
5. 연약지반의 설계 .....	2
5.1 일반사항 .....	2
5.2 침하량 계산 .....	2
5.3 압밀시간 .....	3
5.4 연직배수공법의 압밀이론 .....	3
5.5 전단강도 특성 분석 .....	3
5.6 압밀에 의한 강도증가율 산정방법 .....	3
6. 연약지반개량공법 .....	3
7. 계측관리 .....	3
 해설 1. 일반사항 .....	 5
1. 연약지반 .....	5
2. 연약지반의 정의 .....	6
해설 2. 연약지반의 판정 .....	6
해설 3. 연약지반의 조사 및 시험 .....	8
1. 일반사항 .....	8
2. 지반조사 문제점 .....	10
2.1 지반조건에 따라 발생할 수 있는 문제점 .....	10
3. 지반조사 목적의 이해 부족에 따른 문제점 .....	10
해설 4. 연약지반의 설계 .....	11
1. 일반사항 .....	11
2. 응력이력 판정 .....	11
3. 침하량계산 .....	11
4. 압밀시간 .....	14
5. 연직배수공법 압밀이론 .....	15
6. 전단강도 특성분석 .....	18



7. 압밀에 의한 강도증가율 산정방법 .....	19
8. 설계토질정수 결정 .....	20
<b>해설 5. 연약지반개량공법 .....</b>	<b>22</b>
1. 일반사항 .....	22
2. 연약지반처리공법의 선정 .....	22
3. 샌드매트공 .....	24
3.1 공법개요 .....	24
3.2 샌드매트의 두께 산정방법 .....	25
3.3 시공 .....	28
4. 토목섬유보강공법 .....	28
4.1 공법개요 .....	28
4.2 지오그리드 시스템 보강공법 .....	29
5. 압밀축진공법(연직배수공법) .....	30
5.1 공법개요 .....	30
5.2 공법원리 .....	31
5.3 지반교란 및 배수저항 .....	33
5.4 개량효과 확인 .....	37
6. 모래다짐말뚝공법 .....	37
6.1 공법개요 .....	37
6.2 공법원리 .....	37
6.3 시공방법 및 관리 .....	38
7. 성토관리공법 .....	39
7.1 재하중(Preloading)공법 .....	39
7.2 압성토공법 .....	43
8. 치환공법 .....	44
8.1 공법 개요 .....	44
8.2 강제치환공법 .....	45
8.3 굴착치환공법 .....	45
8.4 공법 설계 .....	47
9. 표면처리공법 .....	48
9.1 표층배수공법 .....	48
9.2 혼합처리공법 .....	48
10. 지하수위 저하공법 .....	49
10.1 중력배수공법 .....	50
10.2 강제배수 .....	50
11. 경량성토공법 .....	51

12. 폭파다짐공법 .....	52
13. 동결공법 .....	53
13.1 공법개요.....	53
13.2 공법의 특성.....	54
14. 주입공법 .....	55
14.1 공법개요.....	55
14.2 주입공법의 시공.....	56
15. 생석회말뚝공법 .....	57
15.1 공법개요.....	57
15.2 공법의 특징.....	57
16. 침투압공법 .....	58
16.1 공법의 개요.....	58
16.2 공법의 특징.....	58
<b>RECORD HISTORY .....</b>	<b>60</b>



## 1. 용어의 정의

- (1) 변형계수 : 일축압축시험과 삼축압축시험으로 얻어진 축변형률-축응력 곡선의 기울기
- (2) 비화 : 건조한 점성토의 덩어리를 급속히 수중에 가라앉히면 내부에 갇힌 공기가 빠져 나아 흠덩어리가 부서지는 현상
- (3) 샘플러 : 흙시료를 채취하는 기구의 총칭
- (4) 시굴 : 토질조사를 위해 구멍과 도랑을 파는 것
- (5) 시추 : 지질조사나 광상의 탐사등을 위해 땅속 깊이 구멍을 파는 일
- (6) 원위치 시험 : 흙의 물리적, 역학적 성질을 샘플링하지 않고 지반 중에서 직접 알아보는 시험의 총칭
- (7) 원지반면 : 원지반의 표면
- (8) 잔류 침하량 : 연약지반에서 부지 사용개시 또는 교통개방 후에 향후 발생하는 침하량

## 2. 일반사항

연약지반은 성토규모나 구조물 목적에 따라 상대적인 의미로 평가되며, 원지반이 건설되는 구조물에 대해 안정성을 만족하지 못할 경우 연약지반으로 취급하여 지반보강이나 대책을 강구해야 한다.

## 3. 연약지반의 판정

- (1) 연약지반 유무판단은 시추조사와 병행하여 실시하는 원위치 조사인 표준관입시험 등으로부터 개략적인 판단을 실시한 후 콘관입시험 등을 통해 판단해야 한다.
- (2) 연약지반의 잠재성을 내포하고 있는 지반의 판정기준은 점성토 지반과 사질토 지반으로 나누어 판단한다.
- (3) 판정기준
  - ① 절대적 판정기준은 곤란하나 실무적 견지에서 판정기준은 필요하다. 점성토인 경우  $N \leq 4 \sim 6$ 의 기준이 일반적이며 설계사례 등에 의하면  $N \leq 10$ 으로 한 경우도 있다. 또한, 사질토는 일반적으로  $N \leq 10$ 으로 적용되고 있다.
  - ② 연약지반의 판정은 <표 1> 을 이용할 수 있다. 그러나 점성토 및 이탄질 지반에서의  $N$ 값을 이용한 연약지반 판정은 신중하게 적용해야 한다

표 1. 연약지반 판정기준

구분	점성토 및 이탄질 지반		사질토 지반
층두께	10m 미만	10m 이상	-
N치	4 이하	6 이하	10 이하
$q_u(kN/m^2)$	60 이하	100 이하	-



#### 4. 연약지반의 조사 및 시험

- (1) 연약지반의 특성을 평가하기 위해서는 일정한 조사항목과 시험이 요구되며, 시험 종목에 대해 심도별 응력이력과 전단강도 분포의 추이를 구하기 위해서는 동일 지반정수에 대해 최소한 회귀분석이 가능한 시험 수량을 확보해야 하며, 이를 토대로 안정적이고 경제적인 설계를 해야 한다.
- (2) 콘크리트 궤도 적용시 연약지반의 조사
  - ① 허용잔류침하량이 엄격히 제한되므로 <표 2> 와 같은 상세한 지반조사를 해야 한다.
  - ② 콘크리트 궤도의 노반침하 문제는 원위치조사에서 확인되지 않는 지형에서 주로 발생할 가능성이 있으므로, 전체노선에 대한 국부적인 연약지반대 평가가 필요하므로 필요구간에 대해 탄성과 탐사를 적용할 수 있다.

표 2. 연약지반 조사항목

조사항목	시험목적
핸드오거	연약지반 확인
시추조사	지층 확인
피에조콘 관입시험	연약지반 파악 및 설계정수 획득
간극수압 소산시험	압밀계수 산정
배인시험	비배수 전단강도 산정
탄성과 탐사	연약대 파악
실내시험 (함수비, 비중, 체분석, 입도, 액성, 소성, 전단, 삼축 압축, 일축 압축, 압밀, 기타시험 등)	지반정수 산정

#### 5. 연약지반의 설계

##### 5.1 일반사항

점성토층의 침하특성 파악을 위해 토성시험 및 압밀시험 결과로부터 선행압밀하중 ( $P_c$ ), 압축 및 재압축지수 ( $C_c$ ,  $C_r$ ), 초기간극비( $e_o$ ), 압밀계수( $C_v$ ,  $C_h$ ) 등을 분석해야 한다.

##### 5.2 침하량 계산

- (1) 일반적으로 점토지반의 즉시침하는 매우 작아서 무시하고 압밀침하는 간극수압의 소산으로 발생하는 1차 압밀침하량과 토립자의 재배치에 의한 2차 압밀침하량으로 구분하여 계산한다.



- (2) 침하량 계산방법은 현장 계측치와는 다소의 차이가 있을 수 있으므로 시공시 계측관리를 통하여 압밀침하를 검토해야 한다.
- (3) 허용 잔류침하량은 공사목적물에 따라 지반처리공법의 수량 및 지반의 안정, 공사기간에 큰 영향을 미치므로 지반의 특성 및 사용목적, 중요도, 공사기간, 경제성 등을 고려하여 결정해야 한다.

### 5.3 압밀시간

지반개량공사에는 공사기간이 중요한 요소로 작용하며 이를 예측하기 위해서는 시간에 따른 압밀도를 파악해야 한다.

### 5.4 연직배수공법의 압밀이론

- (1) 연직배수공법의 적용은 Barron의 압밀이론식과 Hansbo, Youshikuni, Onoue의 압밀이론식을 상호 보완하여 적용한다.
- (2) 주어진 기간 내에 소요의 압밀도를 달성할 수 있도록 배수재 간격을 적정하게 설계해야 한다.

### 5.5 전단강도 특성 분석

- (1) 전단강도 특성 분석은 전응력 해석과 유효응력 해석으로 구분될 수 있으며, 전응력 해석시에는 비배수 전단강도를 이용하고, 유효응력해석시에는 간극수압을 추정하여 해석해야 한다.
- (2) 연약지반에서는 성토 직후가 가장 위험한 경우이므로 이때를 대상으로 안정성 검토를 수행해야 한다.

### 5.6 압밀에 의한 강도증가율 산정방법

강도증가율의 산정은 비배수비압밀 삼축압축시험(UU) 및 일축압축시험(qu) 결과의 선형 회귀분석에 의한 방법, 압밀비배수 삼축압축시험(CU), 경험식을 이용하는 방법 등을 종합하여 사용한다.

## 6. 연약지반개량공법

연약지반 처리공법의 선정은 처리공법의 목적, 대상지반의 성질, 공기, 주변의 영향 등을 고려한 공법을 선정하여 소기의 목적을 달성할 수 있는지 비교·검토한 후에 최종적으로 경제적인 관점에서 최적공법을 선택해야 한다.

## 7. 계측관리

- (1) 연약지반 처리공법의 설계는 복잡한 토층 및 토질특성을 단순화, 설계 시 추정치와 지반조사 자료의 부족 및 불확실성을 감안하여 시공 중 현장관리 과정에서 계측을 통하



여 관리·검토되어야 한다.

- (2) 계측관리를 통하여 다음 단계에서 발생할 수 있는 지반거동을 사전에 파악해야 하며 이를 토대로 당초 설계의 적합성 파악 및 대책이 강구되어야 한다.
- (3) 지반이 복잡하고 주요 구조물이 축조된 경우 집중관리의 대상으로서 보다 철저하고 많은 계측기를 설치해야 하며, 이때 연약지반의 쌓기 재하시 지반거동을 고려해야 한다.
- (4) 목적에 맞는 계측기를 선정하여 배치해야 하고, 위치 선정은 측정 대상물의 규모나 주변 구조물의 영향 정도를 고려하여 결정해야 하며, 측정개소의 지형, 지질, 토질 특성 등을 검토하여 판단해야 한다.



## 해설 1. 일반사항

### 1. 연약지반

- (1) 이 해설은 원지반상에 토목구조물이 시공될 경우 상부하중에 대해 지반이 안정성을 만족하지 못하는 연약지반의 설계에 적용한다.
- (2) 연약지반은 하중재하에 따른 성토규모나 구조물의 목적에 따라 상대적인 의미로 평가되므로 정량적인 기준을 설정하는 것은 어렵고 잠재적 차원에서 원지반이 갖고 있는 지반특성치를 판단하여 향후 발생될 지반활동을 예측하는 차원에서 매우 중요하므로 불특정하중(장래 구조물계획 등) 등이 발생할 것을 예상하여 일정한 기준치 이하를 연약지반으로 설정할 필요가 있다.
- (3) 상재하중이 원지반상에 작용할 경우 지반은 상재하중에 대해 안전해야 하며, 차후에 건설될 구조물의 원지반으로서 안정성을 만족하지 못할 경우 지반보강이나 보완대책을 강구해야 하며 이와 같은 원지반의 보강대책 기준의 유무로서 연약지반이라는 용어를 사용한다.

### 2. 연약지반의 정의

연약지반이란 상대적 의미에서 정의되는 용어이나 일반적으로 정성적 차원에서 토층 구성상 점토나 실트와 같은 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토 또는 이탄토, 연약한 점성토, 느슨한 모래 등으로 구성되어 있으며 간극비가 커서 상재하중에 대해 체적변화를 크게 일으키는 점성토 지반에서 자연함수비가 액성한계보다 큰 지반을 말한다.



## 해설 2. 연약지반의 판정

- (1) 연약지반의 판정은 성토규모나 구조물 목적에 따라 상대적 의미로 평가된다. 즉, 시공성, 지반의 활동파괴, 구조물 지지력 확보 여부, 장기적인 압밀침하 등에 대한 안정성 평가이며, 불안정할 경우 연약지반으로 취급하여 대책을 강구하여야 한다.
- (2) 통상적으로 연약지반 유무판단은 시추조사와 병행하여 실시하는 원위치 조사인 표준관입시험으로부터 개략적인 판단을 실시한 후 정밀조사인 콘 관입시험 등을 통해 판단하여야 한다.
- (3) 일반적으로 연약지반의 잠재성을 내포하고 있는 지반의 판정기준은 점성토지반과 사질토 지반으로 나누어 판단한다.
- (4) 판정기준

일반적으로 연약지반의 잠재성을 내포하고 있는 지반의 판정기준은 <표 3>~<표 5>와 같다

표 3. 연약지반의 판단기준 「국토해양부, 2000」

구분	연약층두께 (m)	N값	일축압축강도 (kN/m <sup>2</sup> )	콘지수 (kN/m <sup>2</sup> )	비고
이탄질 및 점토질 지반	D < 10	4 이하	58.8 이하	784 이하	
	D ≥ 10	6 이하	98 이하	1,176 이하	
사질토 지반		10 이하		3,920 이하	

표 4. 구조물 종류에 따른 연약지반 판정기준 「한국도로공사, 2002」

구조물의 종류	지반 상태							판정
	토질	층두께	$N_{값}$	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_b$ (kN/m <sup>2</sup> )	함수비 (%)	
도로	-		2 이하	24.5 이하	122.5 이하	-	-	초연약
			2~4	24.5~49	122.5~245	-	-	연약
			4~8	49~98	245~490	-	-	보통
고속 도로	이탄층	-	4 이하	48 이하	-	-	-	연약지반
	점성토	-	4 이하	48 이하	-	-	-	
	사질토	-	10 이하	-	-	-	-	
철도	-		2m 이하	0	-	-	100 이상	연약지반
			5m 이하	2 이하	-	-	50 이상	
			10m 이상	4 이하	-	-	30 이상	
			30m 이상	30 이상	-	-	-	지지층
고속 철도	-		2 이하	-	19.6 이하	-	-	정밀조사필요
			2~5	-	245~490	-	-	연약층이 두꺼우면 추가조사 필요
			5 이상	-	490 이상	98 이하	-	연약지반 아님
건축	-	-	10 이하	-	-	-	-	연약지반
월댐	-	-	20 이하	-	-	-	-	연약지반

주)  $q_u$  : 일축압축강도,  $q_c$  : 콘관입 지지력,  $q_b$  : 장기허용지내력

표 5. 토질특성에 따른 연약지반 판정기준 「국토해양부, 2000」

지반 구분	토질 및 토질구분			토질 정수			
				$w_n(\%)$	$e_o$	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$N_{값}$
이탄 지반	고유 기질토	이탄토	섬유질 고압축토	300 이상	7.5 이상	39.2 이하	1 이하
		흑니	분해가 진척된 고유기질토	300~200	7.5~5.0		
점토 지반	세립토	유기질토	소성도 A선 이하의 유기질토	200~100	5.0~2.5	98 이하	4 이하
		화산회질 점토	소성도 A선 이상의 화산회질 2차 퇴적 점성토				
		실트	소성도 A선 이하, 다일러턴시가 큰 세립토	100~50	2.5~1.25		
		점토	소성도 A선 이상, 다일러턴시가 큰 세립토				
사질 지반	사질토	SM, SC	0.074mm체 통과량 15~20%	50~30	1.25~0.8	≒ 0	10 이하
		SP-SC SW-SM	0.074mm체 통과량 15% 이하	30 이하	0.8 이하		

주)  $w_n$  : 자연함수비,  $e_o$  : 초기간극비,  $q_u$  : 일축압축강도,  $N_{값}$  : 표준관입시험



### 해설 3. 연약지반의 조사 및 시험

#### 1. 일반사항

- (1) 연약지반의 특성을 평가하기 위해서는 일정한 조사항목과 시험이 요구된다.
- (2) 시험종목에 대해 심도별 응력이력과 전단강도 분포의 추이를 구하기 위해서는 종목에 따라 다소 차이는 있으나 동일 지반정수에 대해 최소한 회귀분석이 가능한 시험수량을 확보하여야 한다. 이 경우 시험수량은 연약지반 분포심도와 연장 등에 따라 다르나 기존사례에 따르면 100~200m마다 시추조사, 시추공당 3.0m마다 또는 층이 바뀔 때마다 1개의 불교란 시료를 채취하여 시험을 실시하여야 한다.

표 6. 지반조사 및 시험 종목

구분		지반조사 및 시험종목	지반정수	적용성
조사		· 시추조사, $N$ 값	· 지층파악, 개략적 강도정수	· 연약지반 판단, 배수층 판단
		· CPT, 배인시험	· 비배수전단강도	· 연약지반 판단, 지지력 및 활동파괴
시험	점 성 토	· 일축압축시험(비배수전단) · 삼축압축시험(압밀비배수)	· 지반의 전단강도 산정 (점착력)	· 지지력 · 활동파괴 검토 · 증가된 강도정수 산정 (단계별 성토시)
		· 압밀시험	· 압밀계수, 초기간극비 압축지수	· 압밀침하 및 응력이력
		· 장기압밀시험	· 2차 압밀계수	· 장기압밀침하
		· 액 · 소성한계시험 · 자연함수비 측정	· 소성지수, 액성지수, 자연함수비	· 연약지반의 개략적인 판단
		· 입도시험, 비중시험	· 비중, 입경가적곡선	· 흙의 분류 · 흙의 기본적 성질 파악
		· 공내 수평재하시험	· 변형계수	· 기초말뚝의 수평저항력
		· 동적 삼축압축시험	· 동적하중 압밀특성	· 반복하중에 의한 침하
		· 투수시험	· 투수계수	· 침투, 투수성 설계
		· PS검층, 공진주시험 (또는 삼축비틀림)변형시험	· 동적 전단변형특성	· 지진시의 지반변형
	사 질 토	· $N$ 값, 직접전단시험	· 전단강도(내부마찰각)	· 지지력, 지반의 개략적인 판단
		· 공내재하시험, $N$ 값	· 변형계수	· 압축침하, 기초말뚝 수평 저항력
		· 투수시험, 입도분석	· 수압, 간극비, 투수계수	· 파이핑
		· 지하수위 측정, $N$ 값, 입 도분석, 불교란 시료의 동적 시험	· 지하수위, 다짐비율 · 입도구성, 액상화저항력	· 지진시의 액상화



(3) <표 6>은 일반적으로 실시하는 지반조사 및 시험 종목이며, 개량공법에 따라 시험 종목을 세분하면 <표 7>과 같다.

표 7. 설계에 이용되는 지반조사 및 시험 종류

연약지반 개량공법 의 종류	대표적 용 질 토	원위치 시험					물 리 적 시 험							역 학 적 시 험								
		N 치	콘 관 입	배 인 시험	공 내 수 평 재 하 시험	단 공 식 투 수 시험	함 수 비	단 위 중 량	입 도 분석	액 소 성 한 계	습 윤 밀 도	유 기 물 함 유 량	일 축 압 축	압 밀	삼 축 압 축				동 적 삼 축	배 합 시험	C B R 시험	
															(UU)	(CU)	－ (CU)	(CD)				
표층처리 공법	점성토		○	△	△		○	○	○	○	○	○	○	○	△						△	
치환공법	점성토	○		△			○	○	○	○	○	○	○	○	△	△						
압성토 공법	점성토		○	△			○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△					
재하공법	점성토		○	△	△		○	○	○	○	○	○	○	○								
진공압밀 공법	점성토		○	△	△		○	○	○	○	○	○	○	○	○		○					
배수공법	점성토		○	△			○	○	○	○	○	○	○	○								
지하수위 저하공법	점성토		○				○	○	○	○	○	○	○	○								
	사질토	○			△	○	○	○											△			
생석회 공법	점성토		○	△	△		○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	△					
다짐모래 말뚝공법	점성토		○	△			○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	△					
	사질토	○			△	△	○	○	○		△								△			
동압밀 공법	점성토		○		○	△	○	○	○	○	△	○							△			
	사질토	○		△	○		○	○	○		○					△						
고결공법	점성토		○	△			○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△				○	
	사질토	○			△	△	○	○	○		△	△						△	△	○		
하중경감 공법	점성토		○	△			○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△					
흙쌓기보 강공법	점성토						○	○	○									△		○	○	
	사질토						○	○	○						△			△		○	○	
구조물에 의한 공법(말뚝 기초)	점성토	○	△		○	○	○	○	○										△			
	사질토	○	△		○		○	○	○				○	○	△							
완속재하 공법	점성토		○	△			○	○	○	○		○	○	△	○	△						

주) ○ : 일반적으로 수행하는 시험, △ : 경우에 따라 시행하는 시험



## 2. 지반조사의 문제점

### 2.1 지반조건에 따라 발생할 수 있는 문제점

- (1) 연약지반은 건설공사를 하기 전에 기술자가 대상지반의 지형·지질현황, 지반 및 현장 현황 등을 파악해야 한다. 이러한 정보들은 주로 기존의 자료를 수집하거나 현장답사 및 시험에 의해서 얻어지며, 공사의 목적, 구조물의 규모, 공기, 경제성 등과 밀접한 관계를 갖는다.
- (2) 지반조건에 따라 시공 중 발생할 수 있는 주요 문제점으로는 토층구성, 토층성상, 지하수위가 있으며 각각 고려할 항목으로는 토층의 분포상황, 지층의 심도, 지반표면의 경사, 연약층 두께, 배수층 유무, 모래층의 존재, 각 토층의 물리적 성질, 강도, 변형 특성, 압밀특성, 압축지수, 피압수의 존재, 양수에 의한 광범위한 지반침하, 모래층의 투수성과 유속 등이 있다.
- (3) 설계시점이나 시공 중 예상치 못했던 문제가 발생하는 것에 대비하여 정보화 시공에 의한 안정관리나 품질관리 등을 행하고 필요에 따라서 별도의 대책을 시행해야 한다.

### 3. 지반조사 목적의 이해 부족에 따른 문제점

- (1) 지반조사는 지반의 성층상태를 파악하고, 설계 대상에 따른 필요한 조사 및 실험을 통해 제반 설계정수를 유추하여 안정적이고 경제적인 설계를 하는데 그 목적이 있으나 이러한 조사목적에 정확히 이해하지 못한 경우 다음과 같은 문제점이 발생할 수 있다.
  - ① 실제 설계대상 목적물에 필요한 조사 및 시험의 수량은 적고, 상관관계가 적은 조사 및 시험빈도가 많은 경우
  - ② 지반자체가 설계대상이 되는 댐, 지하굴착, 연약지반 처리, 성토 등에 대한 조사 및 시험빈도가 적어 설계시 안전율을 크게 적용하여 상대적으로 공사비가 늘어나는 경우
  - ③ 현재 국내에서 실시하고 있는 조사방법은 시추조사와 표준관입시험 위주로 조사되고 있는바 정량적인 설계자료를 얻는데 한계가 있음
- (2) 따라서 신뢰성있는 설계자료를 얻기 위해서는 설계대상 목적물에 맞는 실내·외 조사, 시험의 수량 및 항목을 충분히 확보하여야 하며, 이를 토대로 안정적이고 경제적인 설계를 하여야 한다.



## 해설 4. 연약지반의 설계

### 1. 일반사항

- (1) 성토하중이 재하되면 지반의 침하가 발생하게 된다. 사질토층에서 발생하는 즉시침하는 짧은 시간에 발생하며 그 양도 작지만 점성토층에서는 침하시간이 지반의 압밀특성에 따라 지배를 받는다.
- (2) 점성토층의 압밀특성은 구조물 계획 및 연약지반의 처리와 안정성을 검토하는데 있어서 가장 지배적인 요소로 침하특성 파악을 위해 토성시험 및 압밀시험 결과로부터 선행압밀하중( $P_c$ ), 압축 및 재압축지수( $C_c$ ,  $C_r$ ), 초기 간극비( $e_0$ ), 압밀계수( $C_v$ ,  $C_h$ )등을 분석하여야 한다.

### 2. 응력이력 판정

흙은 과거에 작용했던 하중에 대해 일종의 기억능력을 소유하고 있는데, 이중 과거에 경험한 최대하중을 선행압밀하중(Preconsolidation pressure,  $P_c$ )이라 하며 현재 작용하고 있는 하중을 유효상재하중( $P_o$ )이라고 한다. 선행압밀하중이 현재 흙이 받고 있는 유효상재하중과 같으면 정규압밀점토(Normally Consolidated Clay), 유효 상재하중보다 크면 과압밀점토(Over Consolidated Clay)라 하며  $P_c$ 에 대한  $P_o$ 의 비를 과압밀비(OCR)라 하고 <식 (1)>과 같다.

$$OCR = \frac{P_c}{P_o} \quad (1)$$

여기서,  $OCR = 1$  : 정규압밀 점토

$OCR > 1$  : 과압밀 점토

과압밀비 산정을 위한 선행압밀하중( $P_c$ )은 Casagrande(1936)에 의해 제시된  $e$ - $\log p$  곡선에서 최대 변곡점을 찾는 방법이 가장 많이 사용되고 있다.

### 3. 침하량 계산

- (1) 연약지반의 침하의 경우, 일반적으로 점토지반의 즉시침하는 매우 작아서 무시하고 압밀침하는 간극수압의 소산으로 발생하는 1차 압밀침하량과 토립자의 재배치에 의한 2차 압밀침하량으로 구분된다.
- (2) 현재까지 주로 이용되는 침하량 계산방법은 지반을 균질하고 등방압밀 상태이며 탄성체로 가정하기 때문에 현장 계측치와는 다소의 차이가 있으므로 시공 시 계측관리를 통하여 압밀침하를 검토하여야 한다.
- (3) 점성토 지반의 침하량 예측은 Terzaghi의 1차원 압밀이론을 근거로 압밀침하량 산정방법은 일반적으로  $e$ - $\log P$ ,  $m_v$ ,  $C_c$ 법 등이 있으며, 각 방법들의 특징은 <표 8>과 같다.



표 8. 압밀침하량 산정방법 및 특징

구분	$e\text{-log } p$ 법	체적압축계수 $m_v$ 법	압축지수 $C_c$ 법
계산식	$S_c = \frac{\Delta e}{(1+e_o)} H$	$S_c = m_v \cdot \Delta p \cdot H$	$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1+e_o} \times \log\left(\frac{p_o + \Delta p}{p_o}\right)$
특징	$e\text{-log } p$ 법을 사용할 경우 간극비의 차는 비교적 정도가 좋지만 간극비의 절대치로는 꽤 오차가 있고 또한 많은 압밀시험결과를 모으면 $e\text{-log } p$ 곡선들이 흩어지는 선이 되어 1가지 평면적 곡선을 확정하기가 곤란하다.	체적압축계수를 사용할 경우 과압밀 영역에서 경사분산이 크나 정규압밀에서는 경사분산이 적어 1가지 직선이 되어 전체적으로 정도가 양호하다.	압축지수는 $e\text{-log } p$ 관계의 직선경사로 정의 되지만 평균적인 값을 채용하는 것에는 경사가 직선이 아닌 S형 Curve 또는 간극비의 불균일성 등으로 인하여 대단히 곤란하고 과대평가되는 위험이 있다. 심도별 압축지수는 추정 이 곤란하다.
적용 범위	이론적인 식으로 실제의 설계계산에는 거의 적용하지 않음	시험결과치가 많은 지역 또는 넓은 지역에 사용	압밀시험 개소가 적은 지역, 압밀시험을 하지 않고 물리적 시험치를 가지고 개략침하량 산정시 사용

1차 압밀침하량 크기는 <식 (2)>~<식 (4)>으로 구한다.

① 정규압밀점토일 경우 ( $p_o = p_c$ )

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1+e_o} \times \log \frac{p_o + \Delta p}{p_o} \quad (2)$$

② 과압밀점토일 경우 ( $p_o < p_c$ )

$p_o + \Delta p < p_c$  일 때

$$S_c = \frac{C_r \cdot H}{1+e_o} \times \log \frac{p_o + \Delta p}{p_o} \quad (3)$$

$p_o + \Delta p > p_c$  일 때

$$S_c = \frac{C_r \cdot H}{1+e_o} \times \log \frac{p_c}{p_o} + \frac{C_c \cdot H}{1+e_o} \times \log \frac{p_o + \Delta p}{p_c} \quad (4)$$

여기서,  $S_c$  : 압밀침하량       $C_r$  : 재압축지수  
 $H$  : 압밀층의 두께       $p_o$  : 유효상재하중  
 $e_o$  : 초기 간극비       $p_c$  : 선행압밀하중  
 $C_c$  : 압축지수       $\Delta p$  : 성토하중에 의한 하중증가

(4) 1차 압밀이 끝났어도 시간이 지남에 따라 점토입자의 크리프(Creep) 현상에 의해서 침하는 계속 일어난다. 이때의 침하를 2차 압밀침하라 하며, 2차 압밀침하량은 1차 압밀 종료시점의 유효응력, 간극비, 점토층 두께, 1차 압밀시간 등의 영향을 받는다.

- (5) 실제로 점토층이 두꺼울 때에는 1차 및 2차 압밀이 명확히 구별되지 않을 뿐만 아니라 동일한 토층에서 배수층 부근에서는 2차 압밀이 이미 시작되었다 해도 그 중앙에서는 1차 압밀이 진행되기도 한다. 따라서, 실제에 있어서 압밀침하량은 이와 같이 엄격히 구별되지 않음을 주의할 필요가 있다.

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e} \cdot H' \cdot \log \frac{t_p + t}{t_p} \quad (5)$$

여기서,  $S_s$  : 2차 압밀침하량

$C_\alpha$  : 2차 압축지수

$H'$  : 압밀층 두께(층두께-1차 압밀침하량)

$e$  : 1차 압밀후 간극비

$t$  : 1차 압밀 완료후 경과시간

$t_p$  : 1차 압밀 소요기간

- (6) 연약지반에 대한 처리대책을 계획할 때 허용 잔류침하량의 결정은 공기가 한정될 경우 연약지반처리공법의 수량에 큰 영향을 미치는 요소이므로 적용 시 많은 고려가 필요하다. 연약지반상의 시공 시 침하규준의 선정은 구조물의 특성 및 사용 목적, 중요도, 공사기간, 지반의 특성, 경제성 등을 고려하여 결정해야 한다.
- (7) 연약지반에 자갈도상을 계획하는 경우에는 보수가 용이하게 하여야 하고, 허용잔류침하량은 1차 침하량 기준으로 100mm 이하로 하여야 하며, 경제성 검토 등을 통하여 필요시 2차 침하량을 포함시킬 수 있다. 또한 기타 구조물의 경우 지반의 특성 및 사용목적, 중요도, 공사기간, 경제성 등을 고려하여 결정해야 하는데 각 기관별 허용 잔류침하량은 <표 9>~<표 12>와 같다.

표 9. 허용 잔류침하량 「한국도로공사, 2002」

조건	허용 잔류침하량(mm)	비고
포장공사 완료후의 노면 요철	100	연약지반의 지질특성상 장기침하 발생 가능
box culvert 시공시의 더울림시	300	
배수 시설	150~300	

표 10. 기초의 허용 잔류침하량

「일본건축학회, 건축 기초구조물 설계기준, 1974」

구조물 종류	콘크리트 블록조(mm)	철근콘크리트조(mm)		
기초 형식	연속기초	독립기초	연속기초	전면기초
표준치	20(10)	50(15)	100(20)	100(20)
최대치	40(20)	100(30)	200(40)	200(40)

주) ( )안의 값은 허용 부등침하량



표 11. 기초의 허용 최대침하량 및 부등침하량 『일본 도로공단 설계요령, 1980』

대상 지반	정정 구조물(mm)		부정정 구조물(mm)	
	최대침하량	상대 부등침하량	최대침하량	상대 부등침하량
모래지반상 기초	50	40	25	20
점토지반상 기초	100	40	50	20
복합지반상 기초	60	40	30	20

표 12. 인천국제공항 허용 잔류침하량 적용사례

시설	침하기준(mm)		허용 잔류침하량 (mm)	비고
	부등침하	전체침하		
활주로	30	75	75*	
유도로	50	100	100	
계류장	50	100	100	
도로, 주차장	-	100	100	
기타녹지	-	-	200	

주) \* 허용잔류침하(75mm) = 상부 해성층(25mm) + 하부 해성층(50mm)

- (8) 궤도구간에서의 잔류침하량은 연약지반의 지반개량 완료 후 수년 또는 수십년에 걸쳐 발생하며, 선로 하부가 자갈도상으로 계획되어 수시로 보수가 가능하므로 압밀침하에 대한 안정성 및 지층현황, 제반조건을 고려 허용 잔류침하량을 적용하여 열차의 운행에 지장을 초래하지 않도록 하여야 한다.

#### 4. 압밀시간

- (1) 연직방향 압밀계수(Coefficient of Consolidation,  $C_v$ )는 침하시간을 결정하는 주요변수로서 하중조건을 고려하여 대응하는 값이며, Lambe and Whitman에 의하면 반대수(半對數) 곡선상에서 선행압밀응력( $P_c$ ) 이상의 정규압밀 영역에서는 거의 일정하다고 보고된 바 있다. 따라서, 본 압밀계수는 대체로 선행제하 작업시 연직방향 배수시간을 산정할 경우 주로 사용한다.
- (2) 수평방향 압밀계수( $C_h$ )는 피에조콘의 간극수압 소산시험 결과를 이용하여 압밀계수를 추정하며 연직배수재를 타설하는 경우 침하시간을 계산하는데 사용한다.
- (3) 지반개량공사에는 공사기간이 중요한 요소로 작용하며 이를 예측하기 위해서는 연약지반의 시간에 따른 압밀도를 파악하여야 한다. 압밀시간은 Terzaghi의 1차원 압밀의 해법인 압밀도( $U$ )-시간( $t$ )의 관계에서 <식 (6)>~<식 (8)>으로 산정한다.

$$t = \frac{T_v \cdot H_{dr}^2}{c_v} \quad (6)$$

여기서,  $t$  : 압밀시간  
 $H_{dr}$  : 간극수의 배수거리  
 $T_v$  : 시간계수  
 $c_v$  : 압밀계수

$$0\% < U < 53\% \text{인 경우, } T_v = (\pi/4) \cdot (U/100)^2 \quad (7)$$

$$53\% < U < 100\% \text{인 경우, } T_v = 1.781 - 0.933 \log (100 - U) \quad (8)$$

한편, 배수조건은 연약층 하부에 투수성이 양호한 모래층이나 자갈층이 분포하는 경우 양면 배수조건으로 간주한다.

## 5. 연직배수공법의 압밀이론

- (1) 지반에 연직배수재가 설치된 경우에는 배수재를 중심으로 배수가 발생하므로, 점토층내의 배수 길이를 단축해서 지반의 압밀침하 촉진 및 강도 증가가 이루어진다.
- (2) 연직배수공법적용은 Barron의 압밀이론식과 Hansbo, Youshikuni, Onoue의 압밀이론식을 상호보완하여 적용한다.

### ① Barron의 압밀이론식

Barron(1948)은 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 기초를 두고 점토의 투수계수 및 체적압축계수가 압밀 중에 변화하지 않는다는 조건하에서 중공원주 방사형 압밀이론을 제안하고 배수재가 설치된 지반의 거동을 자유변형율(연성재하) 조건과 등변형율(강성재하) 조건으로 가정하여 침하양상과 압밀 과정을 검토하였다.

실제조건에서 상단면의 형태가 자유변형인지 등변형인지는 중공원주의 압축에 의한 단부조건에 의존하지만 유효원의 반경에 비해서 드레인의 길이가 상당히 긴 경우에는 등변위 조건으로 가정하더라도 큰 오차는 없는 것으로 알려져 있다.

등변형 조건에서 Barron의 압밀방정식은 <식 (9)>와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (9)$$

여기서,  $u$  : 임의의 위치와 시간의 과잉간극수압(%)

$t$  : 전 연직응력의 증가 이후의 시간(sec)

$z$  : 깊이방향의 심도(m)

$r$  : 동심원상의 중심으로부터 고려하고자 하는 지점의 거리(m)

$c_v$  : 연직방향 압밀계수( $m^2/sec$ )

$c_h$  : 수평방향 압밀계수( $m^2/sec$ )





위 식은 간격수가 연직방향 및 수평방향으로 흐를 경우의 압밀방정식이다. 그러나, 일반적으로 연직배수재는 점토층의 두께에 비해 상당히 작은 간격으로 타설되기 때문에 연직방향의 흐름은 무시하고 수평방향의 흐름만을 고려하여 압밀해석을 한다.

수평방향만의 흐름을 고려한 압밀방정식 및 그 해는 <식 (10)>, <식 (11)>과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (10)$$

$$U_h = 1 - \exp \left[ \frac{-8T_h}{F(n)} \right] \quad (11)$$

여기서,  $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ ,  $T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2}$ ,

$n$  : 간격비(=  $d_e/d_w$ )

$c_h$  : 수평방향 압밀계수( $m^2/sec$ )

$t$  : 압밀도를 구하고자 하는 임의의 시간(sec)

$d_w$  : 연직배수재의 환산직경(m)

$d_e$  : 등가유효원의 직경(m)

$U_h$  : 평균압밀도(%)

그러나 상기의 Barron식은 교란영역(Smear Zone)과 배수저항(Well Resistance) 효과를 고려하지 않으므로 압밀도를 과대 평가하는 경향이 있다.

## ② Hansbo의 압밀이론식

Hansbo(1981)는 연직배수재의 설치시 지반의 교란영향(Smear Effect) 및 배수재의 배수저항을 고려하여 임의의 깊이에서 압밀도를 계산하는 방법을 <식 (12)>와 같이 제안하였다.

$$U_{(z, T_h)} = 1 - \exp \left[ \frac{-8T_h}{F} \right] \quad (12)$$

여기서,  $F = F(n) + F_s + F_r$

$F(n)$  : 드레인 간격의 영향

$F_s$  : 교란의 영향

$F_r$  : 배수저항의 영향

배수재의 배수저항과 교란영역을 나타내면 <그림 1>과 같다. 그리고 배수재의 타설시 발생하는 지반교란의 영향으로 인한 투수계수의 감소효과는 투수계수 감소율( $k_h/k_s$ )을 이용하여 <식 (13)>과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \left( \frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \cdot \ln \left( \frac{d_s}{d_w} \right) \quad (13)$$

여기서,  $d_s$  : 드레인 주변의 교란영역의 직경(m)  
 $k_h$  : 원지반의 수평방향 투수계수(m/sec)  
 $k_s$  : 교란영역의 수평방향 투수계수(m/sec)  
 $d_s/d_w$  : 교란영역의 반경비

일반적으로 연직배수재는 타설심도가 깊은 경우에는 통수능력에 제한이 있으므로 배수재의 배수저항을 고려하기 위한 계수 Fr은 <식 (14)>이다.

$$F_r = \pi \cdot z \cdot (L - z) \cdot \frac{k_h}{q_w} \quad (14)$$

여기서,  $z$  : 배수재의 배수거리(m)  
 $L$  : 배수재의 길이(m, 일면배수=2H, 양면배수=H, H=압밀층 두께)  
 $k_h$  : 원지반의 수평방향 투수계수(m/sec)  
 $q_w$  : 배수재의 통수능력( $m^3/sec$ )

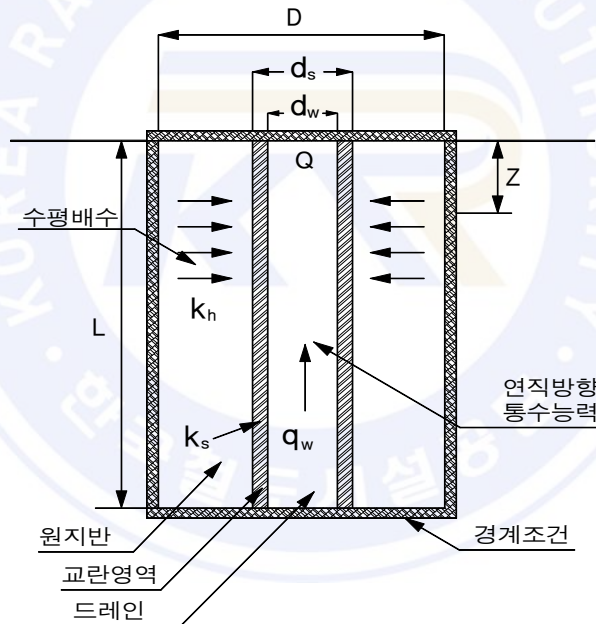


그림 1. 배수저항과 교란영역

### ③ Youshikuni의 압밀이론식

배수저항의 영향이 무시할 정도로 작은 경우, 즉 드레인 통수능력 이 큰 경우는 Hansbo의 방법은 전체 평균압밀도를 고려한 해를 구하기가 복잡하기 때문에 잘 이용되지 않으며 이러한 경우에 대해 Youshikuni(1974)는 배수저항을 고려하여 <식 (15)>와 같이 압밀도를 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n) + 0.8L}\right) \quad (15)$$

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

$$L = \frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{k_h}{k_w} \cdot \left( \frac{H}{d_w} \right)^2$$

$n$  : de/dw(간격비)

$t$  : 압밀도를 구하고자 하는 임의의 시간(sec)

$d_w$  : 연직배수재의 직경(m)

$d_e$  : 등가유효원의 직경(m)

$H$  : 배수재의 타설심도(m)

$k_w$  : 드레인의 투수계수(m/sec)

$k_h$  : 원지반의 수평방향 투수계수(m/sec)

#### ④ Onoue의 압밀이론식

Onoue(1988)는 Youshikuni가 제안한 배수저항계수(L)을 사용하여 투수성에 관계없이 교란영역과 배수저항의 효과를 고려할 수 있는 식을 <식 (16)>과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n') + 0.8L}\right) \quad (16)$$

여기서, 
$$F(n') = \frac{(n')^2}{(n')^2 - 1} \ln(n') - \frac{3(n')^2 - 1}{4(n')^2}$$

$$n' = n \cdot S^{\eta-1}, \quad \eta = k_h/k_s$$

(3) 연직배수재에 의한 지반개량의 목적은 주어진 기간내에 소요의 압밀도를 달성하기 위한 것으로 배수재의 배치간격을 조정함으로써 가능하다.

## 6. 전단강도 특성 분석

- (1) 점토광물을 많이 포함하고 있는 연약지반의 경우 전단강도 특성에 영향을 주는 주된 요소는 지반구조와 간극비(또는 자연함수비)이다.
- (2) 일반적으로 면모구조를 가진 지반의 경우가 분산구조를 가진 지반의 경우보다 더 큰 전단강도를 나타낼 수 있으며, 간극비가 작아질수록 입자간 접촉부가 많아지므로 입자간 미끄러짐에 저항하는 능력이 커지게 된다.
- (3) 연약지반의 문제를 해결하는 방법은 크게 전응력 해석과 유효응력 해석으로 구분될 수 있다. 전응력 해석시에는 주어진 대상문제를 전응력의 변화로 인한 지반거동을 검토하는 것으로 이 경우에는 비배수 전단강도를 이용한다. 반면 유효응력해석 시에는 유효응력의 변화로 인한 지반거동을 검토하는 것으로 이 경우에는 유효응력 산정시 요구되는 간극수압을 적절히 추정하여 해석하여야 한다.



- (4) 연약지반상에 성토를 하는 경우에는 성토직후가 가장 위험한 경우이므로 이 때를 대상으로 안정성 검토를 수행하여야 한다. 이 경우 연약지반의 파괴시 유발되는 간극수압 추정치가 매우 어렵고 특히 포화된 연약점토지반의 경우 시공직후 비배수 상태에 가까우므로 유효응력에 의한 해석보다 전응력으로 해석하는 것이 편리하다.
- (5) 자연지반의 점성토층의 비배수 전단강도는 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 것이 일반적이다. 이는 점성토의 비배수 전단강도는 유효상재하중과 밀접한 관계가 있기 때문이다.
- (6) 균질한 등방성 점성토층에 성토를 시행할 경우에 대하여 안정성을 검토하면 활동과 파괴선은 지층의 하부로 가려는 경향(즉 깊은파괴)이 있음을 많이 경험한다. 따라서 이러한 상태의 구조물의 안정성을 해석할 때는 심도에 따른 강도의 증가 경향을 찾는 일이 아주 중요한 사항이다. 심도에 따른 강도의 증가 경향은 심도별로 자연시료를 채취하여 비배수 전단강도를 파악하기 위한 시험(일축압축시험, 비압밀 비배수 삼축압축시험 및 급속전단시험 등)을 시행하여 그 결과를 통계적 방법 등을 이용, 분석하여 찾을 수 있다.
- (7) 단계별 성토시 비배수 전단강도는 압밀축진 후 일정량의 값으로 증가되며, 이를 산정하는 방법은 대단히 중요하나 현실적으로 단계별 압밀완료 후 확인조사 샘플링을 통해 시험값을 산정해야 한다. 그러나 시험비용과 시간 등의 문제로 인해 간접적인 방법에 의해 추정되는 경우도 있다.

## 7. 압밀에 의한 강도증가율 산정방법

- (1) 연약점성토는 성토하중에 의해 압밀이 진행됨에 따라 전단강도는 증가하게 된다. 과압밀점토의 경우 선행압밀하중( $P_c$ ) 이하의 하중조건에서는 강도증가분이 극히 미소하므로 강도증가에 의한  $\Delta C$ 는 무시한다. 성토하중에 의한 강도증가에 따른 점착력은 <그림 2>를 참조하여 <식 (17)>과 같이 산정한다.

$$c_u = c_{u0} + m_r(p_o + \Delta p - p_c) \cdot U \quad (17)$$

여기서,  $-p_o + \Delta p < p_c$  일 때 :  $c_u = c_{u0}$

$-p_o + \Delta p \geq p_c$  일 때 :  $c_u = c_{u0} + \Delta c$

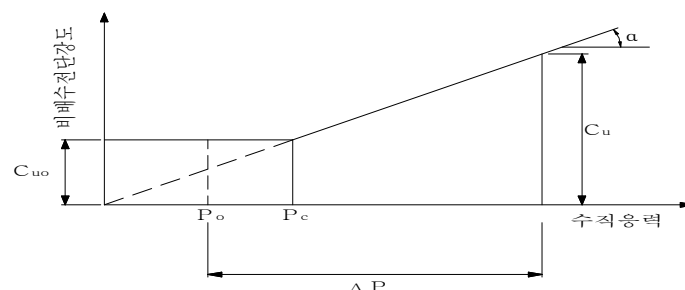


그림 2. 강도증가 개요도

(2) 강도증가율의 산정은 삼축압축시험(UU) 및 일축압축시험( $q_u$ ) 자료의 선형회귀분석에 의한 방법과 압밀비배수 삼축압축시험(CU), 경험식을 이용하는 방법 등을 종합하여 사용한다.

① 삼축압축시험 및 일축압축시험 자료의 선형회귀 분석

삼축압축 및 일축압축시험의 비배수전단강도 분포가 심도에 따라 증가하는 경우, 비배수전단강도는 <식 (18)>과 같다.

$$s_u = K \times Z + s_o \quad (18)$$

여기서,  $s_u$  : 임의의 깊이에서의 비배수전단강도(kN/m<sup>2</sup>)

$K$  : 깊이에 대한  $s_u$ 의 증가율(kN/m<sup>3</sup>)

$Z$  : 지표면에서부터 임의 지점까지의 깊이(m)

$s_o$  : 지표면에서의  $s_u$  값(kN/m<sup>2</sup>)

이때 강도증가율은 <식 (19)>로 구한다.

$$m = \frac{s_u}{p_o} = \frac{K}{\gamma} \quad (19)$$

② 압밀비배수 삼축압축시험 분석

압밀비배수 삼축압축시험에 의해 얻어진 Mohr-Coulomb의 파괴시 유효응력원을 이용하여 산정한다.

$$\left( \frac{s_u}{p_o} \right)_{CIU} = \frac{\sin \phi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'} \quad (20)$$

여기서,  $A_f = 1$  (정규압밀상태),  $CIU$  = 등방압밀-비배수 삼축시험

③ 경험식을 이용하는 방법

점토의 물리적 성질을 이용한 강도증가율 산정방법에는 많은 경험식들이 제안되어 있으며, 그 중에서 가장 보편적으로 이용되는 경험식은 Skempton식과 Hansbo식으로 정규압밀점토를 대상으로 한 <식 (21)>, <식 (22)>이다.

$$\text{Hansbo의 제안식: } m = \frac{s_u}{p_o} = 0.45w_L \quad (\text{조건: } w_L \geq 40) \quad (21)$$

$$\text{Skempton의 제안식: } m = \frac{s_u}{p_o} = 0.11 + 0.0037PI \quad (\text{조건: } PI \geq 10) \quad (22)$$

## 8. 설계토질정수 결정

(1) 교란시료에 대하여 행해지는 실내 토질시험은 시험자의 숙련도로 인한 개인별 오차가 크므로 각 개인별 시험결과를 반드시 기존의 일반적인 시험결과와 비교, 검토하여야 한다. 흙의 토질정수들은 그 흙을 공학적으로 분류하는데 직접적으로 사용될 뿐 아니라, 유효 상재하중을 산정하거나 흙의 거동을 개략적으로 판단하는데 중요하다

게 사용된다. 조사지역에 분포하는 지반의 토질에 대한 설계토질정수는 실내시험 및 현장 시험결과를 토대로 다음과 같은 사항이 검토·분석되어야 한다.

- ① 심도에 따른 함수비·액성한계 및 소성한계의 관계
  - ② 소성지수와 액성한계의 관계
  - ③ 압축지수와 액성한계의 관계
  - ④ 심도의 변화에 따른 비배수 전단강도의 관계
  - ⑤ 심도의 변화에 따른 선행압밀하중과 현재의 유효응력과의 관계
  - ⑥ 심도의 변화에 따른 압축지수 및 초기간극비
  - ⑦ 심도에 따른 단위체적중량
  - ⑧ 표준관입시험 N값과 일축압축강도와의 관계
  - ⑨ 액성한계와 유효응력과 압밀계수와의 관계
  - ⑩ 지반내 유효응력과 압밀계수와의 관계
  - ⑪ 단계 성토에 따른 강도증가계수의 결정
- (2) 연약지반 처리에 필요한 설계토질정수는 흙의 토질정수와 역학적 특성간의 관계를 통하여 사전에 지반거동을 개략적으로 예측함으로써 부가적인 조사와 시험법 결정 및 여러 가지 공학적 판단에 이용하며, <그림 3>과 같은 순서에 의하여 설계토질정수를 결정한다.

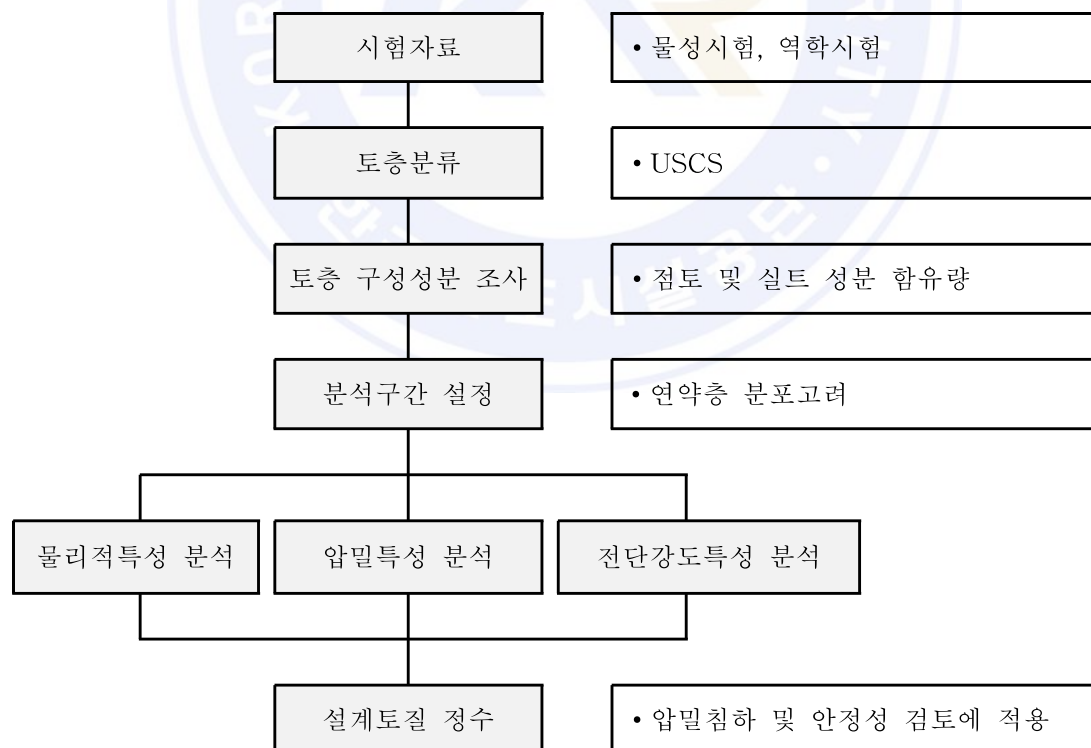



그림 3. 설계토질정수 결정 순서



## 해설 5. 연약지반개량공법

### 1. 일반사항

연약지반에 구조물이 설치될 때에 원지반을 그대로 이용하면 구조물, 제체 등에 안정상의 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 경우에 지반에 공학적 성질을 개선하여 그 안정성을 증대시키는 것을 지반개량이라고 한다. 일반적으로 연약지반의 처리공법의 목적은 강도특성의 개선, 변형특성의 개선, 지수성의 개선, 액상화 방지 등에 있다.

### 2. 연약지반 처리공법의 선정

- (1) 연약지반 처리에 따른 썩기는 아래와 같은 문제점이 발생하므로 이에 대한 충분한 계획을 통하여 연약지반처리공법을 선정하여야 한다.
- ① 열차하중이 썩기내에서 충분히 분산되지 못하여 원지반에 도달하고, 지반의 변형과 침하를 촉진한다.
  - ② 열차하중에 의하여 지반이 진동하기 쉽다.
  - ③ 썩기에 있어서 열차하중에 의하여 지반내의 응력이 썩기 자중에 의한 응력의 10% 이하가 되는 깊이는 약 3m이며, 시공기면으로부터 3m 사이의 상부 썩기에 있어서 그 재료나 다짐의 정도를 엄격히 하고 있는 것은 이 열차하중의 영향에 대하여 안전한 썩기로 하기 위함이다. 원지반 시공기면까지의 높이가 3m 미만인 연약지반 썩기의 경우에는 열차하중의 영향이 원지반까지 미치므로 지반처리가 필요하다.
- (2) 연약지반 처리공법의 종류는 프리로딩공법, 연직배수공법, 모래다짐말뚝(SCP) 공법 등과 최근 들어 그 사용 빈도가 증가하고 있는 동압밀공법 및 특수한 목적에서 사용되며 최근 국내에 도입되기 시작한 진공압밀공법 등 다양한 공법들이 있다. 이와 같이 다양한 연약지반 처리공법들을 개량원리와 개량목적 및 개량하고자 하는 지반의 상태에 따라 분류해 보면 <표 13>과 같다.

표 13. 처리목적과 적용지반에 의한 대책공법

개량원리	공법의 명칭		처리 목적	적용지반	
다짐	모래다짐말뚝		· 액상화 방지 · 침하감소 · 지반의 강도 증가	점성토, 사질토, 유기질토	
	동다짐공법			사질토	
	바이브로플로테이션공법				
	중추낙하 다짐공법		· 침하감소 · 액상화 방지	사질토	
	폭파다짐, 전기충격공법				
	동압밀공법				
고결처리	표층혼합처리공법		· 철도의 노상, 노반의 안정처리	점성토, 사질토, 유기질토	
	심층혼합처리공법				
	약액주입공법		· 활동파괴 방지 · 침하저지 및 감소 · 전단변형 방지 · 히빙 방지		
	고결공법				
	동결공법				
보강	복토공법		· 철도의 노상, 노반의 안정처리	점성토, 유기질토	
	표층피복공법 (시트, 매트, 필터)				· 국부파괴, 국부침하 방지
경량화	경량자재		· 지반의 지지력 향상 · 지반의 전단변형 억제 · 지반의 침하억제 · 활동 파괴의 방지 · 시공기계의 주행성 확보	점성토, 유기질토	
하중균형	압성토공법				
하중분산	침상공법				
	시트넷공법				
	샌드매트공법				
	표층혼합처리공법				
치환공법	굴착치환공법		· 활동파괴방지 · 침하의 감소 · 지반의 전단변형 억제	점성토, 사질토, 유기질토	
	강제치환공법				
	폭파치환공법				
압밀배수	프리로딩공법		· 잔류침하의 감소 · 지반의 강도 증가	점성토, 유기질토	
	연직배수 공법	샌드드레인공법			
		페이퍼드레인공법			
		팩드레인공법			
	지하수위 저하공법	웰포인트공법		사질토	
		깊은우물공법			
	진공압밀공법		· 압밀촉진 · 잔류침하 감소 · 지반의 강도 증가	점성토, 유기질토	
	생석회말뚝공법				
	전기침투공법				
	반투막공법				
	쇄석말뚝공법		· 액상화 방지	사질토	
	표층배수공법		· 표층지반강도 증가	점성토, 유기질토	



- (3) 처리대책의 목적, 대상지반의 성질, 공기, 주변의 영향 등을 고려한 공법을 선정하여 소기의 목적을 달성할 수 있는지 비교·검토한 후에 최종적으로 경제적인 관점에서 최적공법을 선택하여야 하며, 처리공법의 선정에 대한 흐름도는 <그림 4>와 같다.
- (4) 처리공법의 결정에는 풍부한 지식과 경험이 필요하고, 지반조건, 도로조건, 시공조건 등을 고려하여 선정하여야 하며, 단독공법으로 처리되는 경우도 있으나, 대부분 두 가지 이상의 공법을 혼용하는 경우가 일반적이다.
- ① 재하중공법(프리로딩, 진공압밀)+연직배수공법(샌드드레인, 팩드레인, 페이퍼드레인 등)
  - ② 재하중공법+압성토
  - ③ 연직배수공법+모래다짐말뚝공법
  - ④ 샌드매트+재하중공법(프리로딩, 진공압밀)+연직배수공법(샌드드레인, 팩드레인, 페이퍼드레인 등)
  - ⑤ 샌드매트+토목섬유(Geotextile)+재하중공법(프리로딩, 진공압밀)+연직배수공법(샌드드레인, 팩드레인, 페이퍼드레인 등)
  - ⑥ 샌드매트+토목섬유+재하중공법+압성토
  - ⑦ 샌드매트+토목섬유+연직배수공법+모래다짐말뚝공법
  - ⑧ 연직배수공법+혼합처리공법
  - ⑨ 기타

### 3. 샌드매트공

#### 3.1 공법개요

연약지반상에 부설되는 샌드매트(Sand Mat)는 연약지반의 압밀로 인해 배출되는 물의 원활한 배수를 위한 상부 배수층의 역할과 압성토 내로 지하수가 상승하는 것을 차단하는 지하 배수층의 역할 및 시공장비의 주행성(Trafficability)을 확보하기 위한 지지층 역할 등의 목적으로 부설된다.



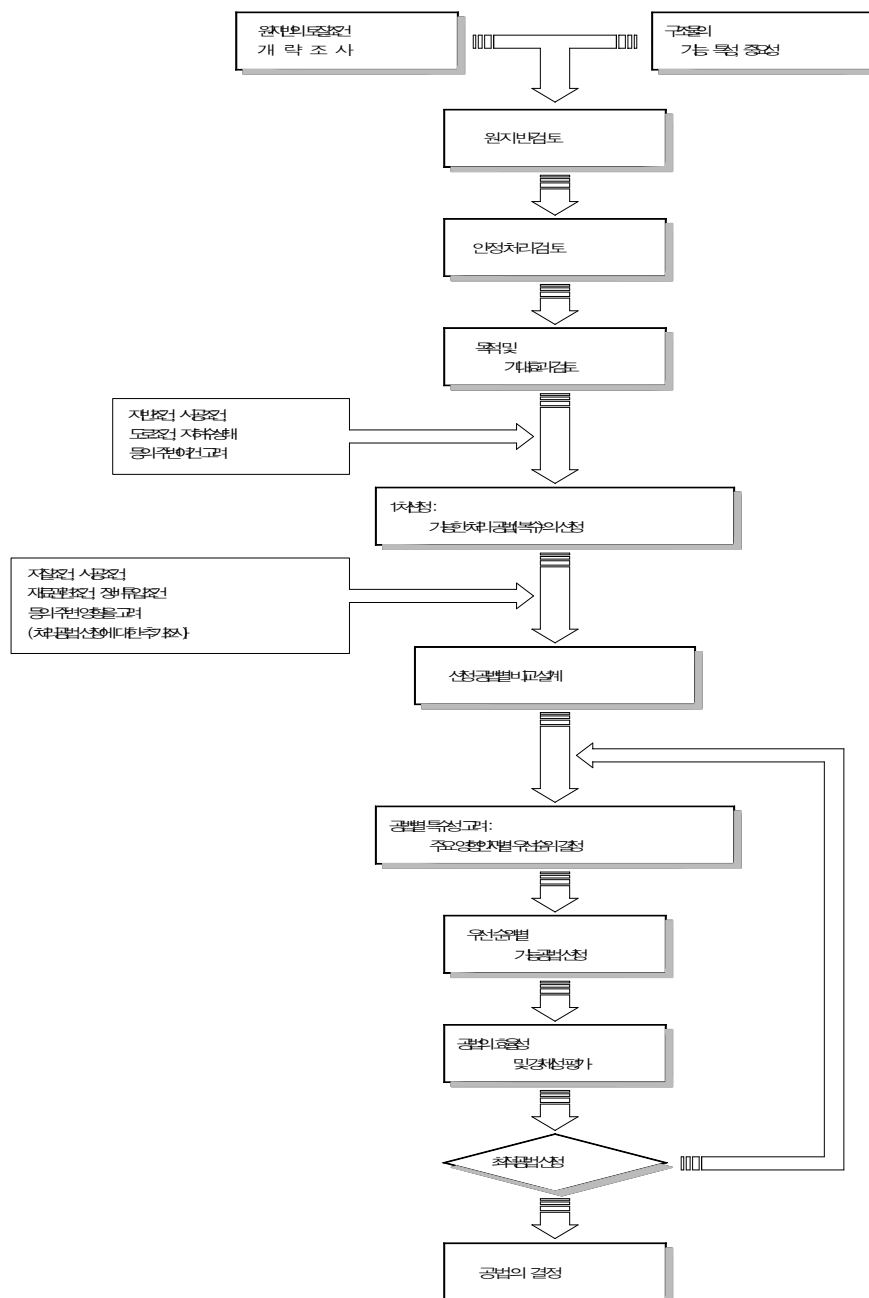


그림 4. 공법 결정 흐름도

### 3.2 샌드매트의 두께 산정방법

#### (1) 장비 주행성에 대한 샌드매트 두께 산정

대상지반이 연약 점토지반인 경우에는 비배수 전단강도가 장비의 주행성을 결정하는 주요 인자가 된다. 따라서 대상 연약지반의 비배수 전단강도가 주어지면 이를 사용하여 설계시 지반의 허용지지력값을 산정할 수 있고, 이로부터 장비의 주행성을 고려한 샌드매트의 두께를 결정할 수 있다. 참고로 연약지반의 평균 콘지지력을 바탕으로 가정된 샌드매트의 표준두께는 <표 14>와 같다.



표 14. 샌드매트의 두께 「국토해양부, 2000」

표층의 콘지지력 ( $\text{kN/m}^2$ )	샌드매트의 두께 (mm)
196 이상	500
196~98	500 ~ 800
98~73.5	800 ~ 1000
73.5~49	1000 ~ 1200
73.5 이하	1200

● 검토 예

① 극한 지지력 ( $c_u = 25\text{kN/m}^2$ 의 경우-)

$$q_u = 5.14 \times c_u = 128.5\text{kN/m}^2$$

② 사용장비(400kN 크롤러 크레인)

가. 장비 총 중량 : 620kN

나. 장비 중량 : 400kN

다. Leader : 170kN

라. 케이싱 : 25kN

마. Vibro Hammer : 25kN

바. 기준안전율(FS) : 1.5

사. 샌드매트 두께(h) : 0.5m로 가정

아.  $a = 4.775\text{m}$ ,  $b = 0.813\text{m}$ ,  $\theta = 26.56^\circ$

③ 크레인의 접지압<그림 5> 참조

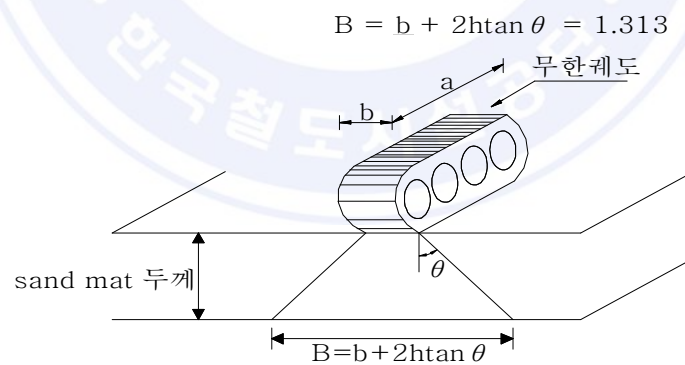


그림 5. 크레인 접지압

실제로는 샌드드레인 시공시에는 부대장비가 한쪽 바퀴에 집중되는 것으로 한다.  
( $P=400/2+170+25+25 = 420\text{kN}$ )

$$q_d = \frac{420}{4.775 \times 1.313} = 67\text{kN/m}^2$$

$$\textcircled{4} \text{ 안전율 } F_s = \frac{q_u}{q_d} = \frac{128.5}{67} = 1.9 > 1.5 \dots\dots\dots \text{OK}$$



## (2) 배수기능에 대한 샌드매트의 두께 산정

연약지반 상부에 부설되는 샌드매트는 연약지반이 압밀침하를 하면서 배출되는 간극수에 대한 수평배수로 역할을 수행할 수 있어야 한다. 따라서 연약층이 두꺼운 경우, 쌓기폭이 넓은 경우, 압밀로 인한 물의 배출이 많은 경우 등에는 배수로의 역할을 적절히 수행하기 위하여 충분한 샌드매트 두께가 요구된다.

샌드매트층에 의해 유발되는 총 침하량이 연약지반의 압밀침하량이라고 가정하면 단위길이 당 총 압밀 배수량은 <식 (23)>과 같다.

(일면배수일 경우)  $Q = L \cdot S = k \cdot i \cdot a = k \cdot \Delta h_w \cdot h / L$

$$\therefore h = \frac{L^2 \cdot S}{k \cdot \Delta h_w} \quad (23)$$

여기서,  $Q$  : 압밀배수량( $m^3/s$ ),  $L$  : 샌드매트의 배수거리( $m$ )

$S$  : 평균침하속도( $m/day$ ),  $k$  : 샌드매트 투수계수( $m/sec$ )

$h$  : 샌드매트 두께( $m$ ),  $\Delta h_w$  : 샌드매트내의 압력수두( $m$ )

### ● 검토 예(그림 6 참조)

#### ① 가정조건

가. 배수거리( $L$ ) : 25.0m

나. 평균침하속도( $S$ ) : 6.5mm/day

다. 샌드매트 두께( $H$ ) : 500mm

라. 양면배수조건 : 배수량( $Q$ )의 1/2

마. 샌드매트 투수계수( $k$ ):  $10^{-1}(mm/sec)=8,640(mm/day)$

#### ② 샌드매트 두께검토

$$\Delta h_w = \frac{L^2 S}{2 k H} = \frac{(25 \times 1000)^2 \times 6.5}{2 \times 8640 \times 500} = 470.2mm$$

$$\Delta h_w (=470.2mm) < H \dots\dots\dots OK$$

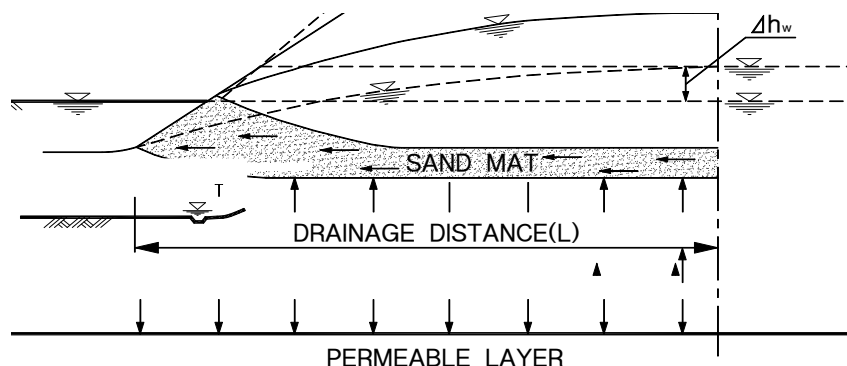


그림 6. 샌드매트 배수효과



### 3.3 시공

- (1) 샌드매트의 시공은 사전에 배수를 충분히 하여 시공에 따른 기초지반의 흐트러짐을 적게 하고, 점토 등이 섞여 들어가 배수효과에 지장을 주는 일이 없도록 계획한다. 또 샌드매트의 재료는 세립화하지 않는 재료를 선정할 필요가 있다.
- (2) 쌓기 범위가 넓은 경우 양측면을 먼저하고 지표면의 상황 및 연약정도에 따라 시공방법을 고려하며, 편압 등을 소홀히 하여 불균일한 부설두께가 되지 않도록 해야 한다.
- (3) 지하배수공의 배치에는 제체 종단방향 또는 횡단방향으로 설치하지만, 종단방향으로 설치할 경우는 통수거리를 짧게 하는 것이 유리하다.
- (4) 지하배수공은 샌드매트 안에 설치하여 배수공 내에 점토 등의 세립분이 침입하여 배수효과를 저하시키는 일이 없도록 유의할 필요가 있다. 특히, 샌드매트 깔기공으로 비교적 투수성이 나쁜 재료를 사용하였거나, 지하수가 많아 모래부설만으로는 배수효과를 충분히 기대할 수 없는 경우에는 지하배수공(쇄석, 유공관 등)을 시공하여 배수효과를 증가시키는 것이 바람직하다.
- (5) 지하배수공은 확실하게 옆 도랑에 접속시켜 모래부설층 속의 물을 배수시켜야 한다. 지하배수공 간격은 <표 15>를 표준으로 하지만, 현지 조건에 따라 변경할 수도 있다. 비교적 넓은 경우 지표수 및 간극수의 배수처리가 용이하지 않을 경우 원활한 배수처리를 위해 배수량을 감안하여 배수공 및 집수정을 설치하여야 한다.

표 15. 지하배수공의 간격 「한국도로공사, 2002」

75 $\mu$ m체 통과분, P(%)	지하 배수공의 간격 (m)	
	모래부설공 A	모래부설공 B
$P \leq 3$	필요없음	10 ~ 20
$3 < P \leq 10$	20	5 ~ 10
$10 < P \leq 15$	10 ~ 20	5
$15 < P \leq 25$	5 ~ 10	-

모래부설공은 연직배수 가능 여부에 따라 A, B로 구분되며, 모래부설공 A란 기초지반을 연직배수 등을 시공하지 않는 구간의 연약지반상에 모래를 부설하는 공법을 말하고, 모래부설공 B란 기초지반을 연직배수 등으로 처리한 구간의 연약지반상에 모래를 부설하는 공법을 말한다.

## 4. 토목섬유 보강공법

### 4.1 공법개요

토목섬유는 대표적인 토목용 합성재 소재이다. 그 기능으로는 여과, 배수, 분리, 보강 등이 있다. 그러나 최근에 발표된 문헌들에 의하면 토목섬유의 보강재로서 격자형의 지

오그리드와 셀 형태의 지오셀이 많이 사용되고 있다. 토목섬유 보강재는 토목섬유의 높은 인장력과 낮은 신장율로 인해 교통하중을 분산시키고 지반의 횡방향 변위를 억제시켜 노반의 지지력을 증가시킨다. 지오그리드는 이러한 조건들을 충족시키는데 비교적 가장 적합한 토목섬유 소재이다.

#### 4.2 지오그리드 시스템 보강공법

지오그리드는 높은 인장력과 지오그리드 구조의 공극에서 지오그리드의 접점에 의한 입자들의 엇물림 효과로 인해 교통하중으로 야기되는 지반의 응력을 감소시키고 횡방향 변위를 억제한다. 또한 지오그리드는 추가적인 여과 및 분리 기능이 필요한 경우에는 토목섬유와 함께 포설되어 노반층의 지지거동에 영향을 미친다. 따라서 지오그리드 시스템 보강공법은 노반의 지지력을 증가시키고 철도노반의 두께를 감소시킨다.

일반적으로 연약지반에서 노반 및 원지반의 보강을 위한 지오그리드 시스템 보강공법으로는 말뚝 위에 지오그리드로 보강된 성토체가 있다<그림 7>. 또한 지오그리드 시스템 보강공법은 일반적으로 <표 16>과 같은 목적으로 사용한다.

표 16. 지오그리드 시스템 보강공법의 사용목적

구분	목적
지오그리드 (Geogrid)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 원지반층과 노반층 입자들의 혼합 방지</li> <li>· 교통하중의 효과적인 하중 분산</li> <li>· 지반층 입자들의 횡방향 변위 억제</li> <li>· 지반층 입자들의 부스러짐 감소</li> </ul>
토목섬유	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배수효과 증진</li> <li>· 원지반층과 노반층 입자들의 혼합 차단</li> <li>· 노반의 지지력 향상</li> </ul>
말뚝	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 성토체 자중과 교통하중의 일부 응력을 개별적으로 지지된 말뚝에서 분담</li> </ul>

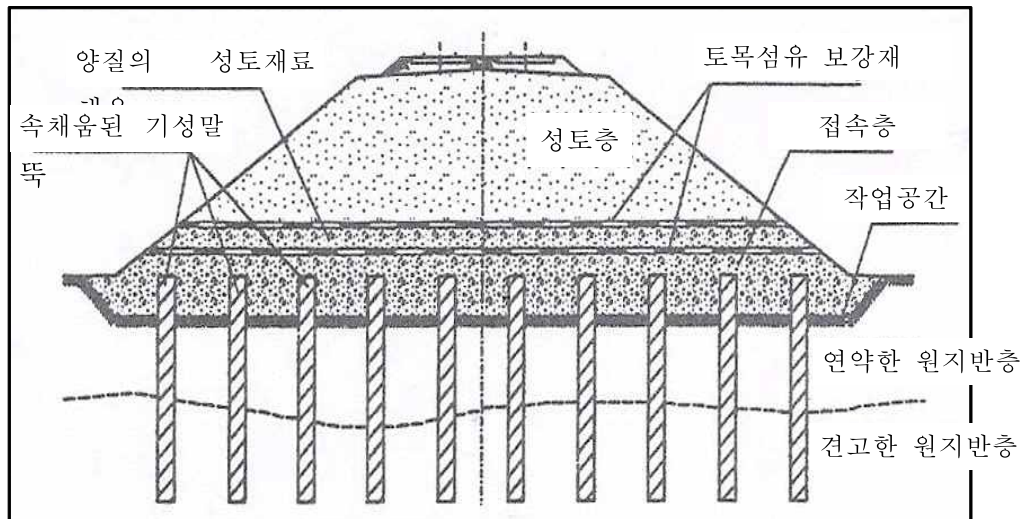


그림 7. 말뚝 위에 지오그리드로 보강된 성토체

- 주) 접속층: ① 원지반에서 선로에 인접한 구간의 지층에 양질의 사질토로 치환할 수 없는 유기질토 및 연약한 점성토층이 있는 경우
- ② 이들 토층을 흙구조물 쌓기 재료로 대체하는 것을 말하며, 이러한 접속층은 동상방지층 두께에 포함된다.
- ③ 토목섬유 매트 깔기공
- 일반적으로 연약지반에서의 쌓기 시공에서 사용되는 토목섬유의 종류로는 폴리프로필렌 (PP, polypropylen) 또는 폴리에스터 (PET, polyester) 등이 있다.
- 이때 폴리프로필렌 매트와 폴리에스터 매트는 <그림 8>을 참조하여 일반적으로 <표 17>과 같은 목적으로 부설된다.

표 17. 토목섬유의 부설목적

구분	목적
폴리프로필렌 매트 (PP 매트)	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 연약지반과 모래층의 혼합을 차단하여 모래매트의 기능 유지</li> <li>장비의 초기 진입시 필요한 운행성의 증진</li> <li>지반의 지지력 향상</li> <li>여과층으로서 배수효과 증진</li> </ul>
폴리에스터 매트 (PET 매트)	<ul style="list-style-type: none"> <li>연약지반 쌓기시 지지력 증대 및 비탈면 안정</li> <li>연약지반 쌓기시 장비 주행성 확보</li> <li>쌓기의 기층 안정</li> </ul>

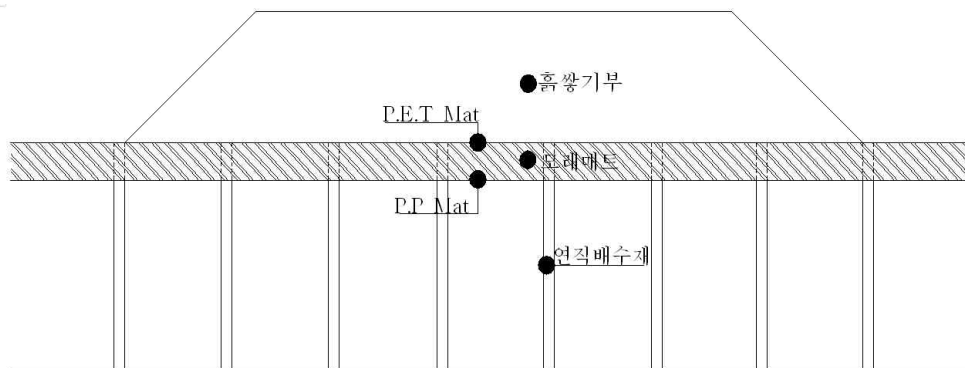


그림 8. 매트포설 단면도

## 5. 압밀촉진공법(연직배수공법)

### 5.1 공법개요

연직배수공법(VERTICAL Drain Method)은 연약층 사이에 주상의 투수층을 촘촘하게 땅 속에 배치하여 연약한 점성토 층의 배수거리를 짧게 하여 압밀침하를 촉진시켜 단기간 내에 지반을 안정화시키는 방법으로 샌드드레인, 페이퍼드레인, 팩드레인 등이 있으며 그 원리가 모두 동일하고 각 공법별 비교는 <표 18>이다.

샌드드레인은 직경 100~600mm 정도의 원형단면을 이용하며, 페이퍼드레인은 두께 3mm, 폭 100mm 정도의 장방형 단면을 사용한다.

팩드레인은 정방형 배치의 모래기둥 4개를 화학섬유로 된 직경 120mm의 자루에 모래를 채워 동시 타입이 가능케 한 것으로 4개를 동시에 이동하여 간격 등을 조정한다.

### 5.2 공법원리

Terzaghi의 1차원 압밀이론에 따라 점토층의 압밀에 요하는 시간  $t$ 와 최대배수거리  $H$ 의 관계는 <식 (24)>와 같다.

$$t = \frac{H^2 T_h}{c_v} \quad (24)$$

여기서,  $t$  : 압밀시간(sec)

$c_v$  : 압밀계수(m<sup>2</sup>/sec)

$T_h$  : 시간계수(무차원)

$H$  : 점토층의 두께(m)

위 <식 (24)>는 배수거리를 짧게 하는 방법을 이용하여 점토층의 압밀침하를 단시간에 종료할 수 있음을 의미한다. 연직배수공법은 점토지반에 드레인 말뚝을 만들어 물을 인공적으로 배출시켜 배수거리 단축을 통한 압밀시간을 단축시키는 공법이다.





연직배수공법은 배수재를 삼각형 또는 정방형으로 배치하여 타설한다. 이 때, 간극수압이 배수재내에 유입하는 범위는 각 배수재에 대해 등거리에 있는 원으로 둘러싸인 부분을 말하며, 육각형 배치도 정방형에 속하지만 해석적 취급을 용이하게 하기 위해 등면적의 원으로 치환하여 구한다. 이때의 원을 등가유효원  $d_e$ , 배수재 중심간격을  $d$ 라 하면, 삼각형 배치인 경우  $d_e = 1.05d$ , 사각형 배치일 경우  $d_e = 1.13d$ 식을 이용한다.

표 18. 연직배수공법 비교표 「국토해양부, 2000」

구분	샌드드레인공법	팩드레인공법	페이퍼드레인공법
공법원리	직경 0.4m 정도의 모래말뚝 설치 후 배수거리 단축을 통한 침하촉진	모래말뚝 대신 직경 120 mm인 섬유망에 모래를 충전하여 설치	개량원리는 드드레인과 동일하며 모래말뚝 대신 드레인 보드를 설치함
배수재	모래	섬유망 + 모래	드레인 보드
시공기간	중장기간	장기간	보통 정도
$N$ 값 관계	$N$ 값 20-30 이상 압입 곤란	$N$ 값 10이상 압입 곤란	$N$ 값 7-10 이상 압입 곤란
시공실적	많음	보통	많음
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>-상부에 매립층이 있을 경우 관입저항을 극복할 수 있음</li> <li>-국내 시공사례 및 경험 풍부</li> <li>-<math>N=25</math> 정도 까지 타설가능</li> <li>-모래말뚝이 활동에 대한 저항효과가 있다</li> <li>-투수효과가 확실함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-샌드드레인공법에 비하여 교란영역, 배수재 및 샌드심 절단 가능성 적음</li> <li>-모래의 양 절감 및 배수재 타설기간 단축</li> <li>-시공속도가 빠름</li> <li>-시공여부 확인 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-샌드드레인공법에 비하여 교란영역, 배수재 및 샌드심 절단 가능성 적음</li> <li>-국내 시공사례 및 경험 풍부, 장비가 가벼움 (약3-4t)</li> <li>-샌드드레인공법에 비하여 공사비 저렴함</li> <li>-재료의 구입이 용이</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>-모래말뚝 설치시 교란영역이 커짐</li> <li>-소성유동으로 인한 모래말뚝 및 자연적으로 형성된 샌드심 절단가능성 내재</li> <li>-양질의 모래가 다량 필요</li> <li>-장비중량이 커서 통행성 확보가 어려움</li> <li>-팩, 페이퍼드레인공법에 비해 시공속도가 느림</li> <li>-공사비가 고가임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-국내 시공사례 적음</li> <li>-철저한 품질관리 필요</li> <li>-연약지반 심도가 불규칙한 지역은 팩드레인 타설 심도 조절이 곤란</li> <li>-페이퍼 타입기보다 장비중량이 커서 접지압 관리가 어려움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-드레인 보드 제품의 철저한 관리 요망</li> <li>-맨드릴 타입기 사용으로 주행성 확보용 복토가 필요하며 철저한 시공관리 요망</li> </ul>
횡력에 의한 배수재 절단유무	있음	거의 없음	거의 없음
추정 공사비비율	약 1.8	약 1.3~1.5	1.0
배수효과	시공관리가 잘될 경우 양호하나 절단되면 배수효과 없음	양호	일반적으로 설계계산치보다도 드레인 효과가 지연됨
시공관리	곤란	양호	쉽다

페이퍼드레인에 의한 압밀과정은 등가유효원( $d_e$ )인 원형의 점성토 중심에 직경  $d_w$ 의 드레인이 삽입된 모델로 가정하여 해석한다.

직사각형 단면에서 원형단면으로의 환산은 <식 (25)>에 의해 구하며, 현재는 이에 안전계수를 곱하여 산출한다.

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \alpha \quad (25)$$

여기서,  $d_w$  : 드레인의 환산직경(mm)

$a, b$  : 드레인의 폭과 두께(mm)

$\alpha$  : 형상계수(무차원)

### 5.3 지반교란 및 배수저항

연직배수공법을 이탄이나 유기질점토, 항만 같은 곳에 퇴적되어 있는 매우 연약한 이토층에 적용하였을 경우 배수재 관입시 지반의 교란 및 교란에 의한 강도저하 문제 등 연직배수공법의 실효성에 대한 문제가 제기되고 있기 때문에 설계시 철저한 지반조사를 통해 지반특성을 분석하여 이를 고려한 설계를 하여야 할 것이다. 특히 샌드드레인공법 적용시 이탄층이나 유기질토에서는 압밀촉진 효과가 적으며 그 이유는 이들 지반은 샌드드레인이 없어도 침하가 빠르고 2차 압밀이 탁월하기 때문이다. 따라서 샌드드레인공법 적용시 주의 깊은 안정해석과 충분한 현장계측에 의한 시공관리가 수반되어야 한다.

현재 연직배수재를 이용한 지반계량 설계 시 흙의 특성과 배수조건의 불확실성으로 인하여 지반교란 영향, 지반교란 영역의 범위, 배수저항 등을 설계에 적용할 자료가 정량화 되어 있지 않다. 따라서 시험시공을 통하여 현장에 따라 적용성을 달리하여야 하며, 시험시공이 불가능한 경우 다음과 같이 현재 설계에 적용되는 국내외 연구 자료를 참고하여 적용한다.

#### 5.3.1 지반교란 영향 검토

##### (1) 지반교란 영향 개념(<그림 9> 참조)

연직배수재 타설시 배수재의 관입으로 주변지반에 전단변형과 변위등에 의해 교란된 영역을 지반교란 영역(Smear Zone)이라 하며, 배수재의 크기, 형상, 지반의 구조와 종류 및 배수재의 타입방식에 따라 달라진다. Bergado(1991) 등의 연구에 의하면 배수재의 직경이 커질수록 교란영역의 영향이 증가되는 것으로 보고되고 있다.

##### (2) 지반교란 영역의 범위

연직배수재 관입으로 주변지반에 발생하는 지반교란 영역의 범위를 기존문헌 및 국내에서 대단위 부지조성을 위해 실시한 연구보고서별로 분류하면 <표 19>, <표 20>과 같다.

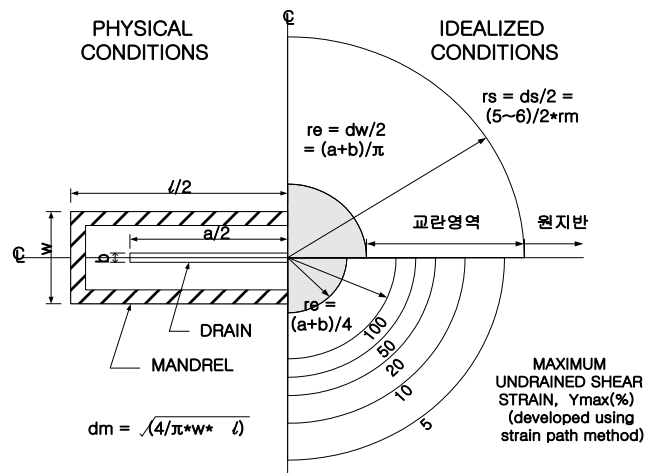


그림 9. Mandrel 주위의 지반교란 영역 「Rixner 등, 1986」

표 19. 국내 연구보고서 자료

구분	$d_s/d_w$ 범위	산정 방법
해안매립과 연약지반개량을 위한 신기술개발 보고서 (지반공학회 연구논문집 No.Ⅱ, 1995. 12.)	1.5 ~ 2.7	실내모형시험에서 배수재의 형상을 원형, 직사각형, 마름모형으로 구분하여 측정 원형 : 2.7, 마름모형 : 2.3, 직사각형 : 1.5~2.2
연약지반의 압밀 특성에 관한 연구 보고서 (한국토지공사, 1999. 12.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차현장시험 : 1.6~2.6</li> <li>2차현장시험 : 2.0~2.3</li> <li>CPT시험 : 2.6~8.1</li> </ul>	양산물금지구에서 1, 2차 현장시험 실시후 수평으로 채취된 자연시료의 실내시험 및 CPT시험으로부터 제안 (정사각형 및 직사각형 배수재 사용)
비고	$d_s$ : 지반교란 영역의 직경, $d_w$ : 배수재의 직경	

표 20. 기존문헌에 나타난 지반교란 영역의 범위

$d_s/d_w$ 범위	제안자	산정 방법
1.5	박병기 (1985)	$d_s/d_w=1.5$ 로 가정하여 Barron식에 modified Cam clay모델을 결합한 FEM해석을 실시하여 샌드드레인공법의 지반교란 영향을 고려하였다.
2.0	Hansbo (1987)	압밀침하의 예측값과 측정값 비교 및 Holtz & Holm (1973)의 연구에 기초하여 제안하였다.
	Bergado 등 (1990, 1991)	실내 및 현장시험을 실시하여 지반교란 영역의 수평투수계수는 연직투수계수와 같고 지반교란 영역의 범위는 배수재 직경의 2배라고 제안하였다.
2.5~3.0	Jamiokowski (1981)	Cone 관입시의 유효응력과 과잉간극수압을 이용하여 가정하였다.

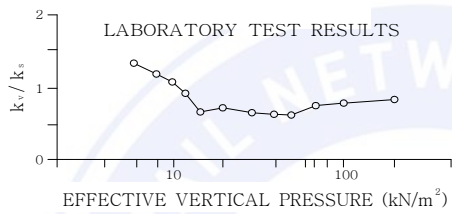
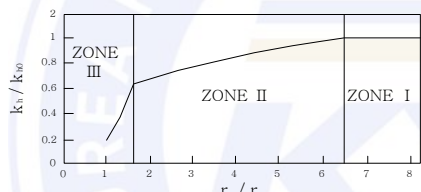


지반교란 영역의 범위는 기존문헌 및 연구보고서에 따라 정도의 차이를 나타내며, 범위는 1.5~3.0 정도이다.

### 5.3.2 지반교란 영역의 투수계수 검토

외국문헌에서 제안된 범위와 국내에서의 연구보고서 내용은 각각 <표 21>, <표 22>와 같다.

표 21. 기존문헌에 나타난 투수계수 관계

구분	범위	산정 방법
Hansbo (1987)	$k_s = k_v$	-
Bergado (1991)		배수재 부근에서 채취된 샘플에 대하여 표준압밀시험에서 투수계수를 구하여 유효연직압력에 따른 $k_v/k_s$ 의 관계를 나타내었으며, Hansbo의 결과와 유사하다고 제안하였다.
Onoue (1991)		간극률 감소에 의해 부분적으로 교란된 지역Ⅱ, 완전 교란된 지역Ⅲ으로 구분하여 교란( $k_h$ )과 불교란( $k_{ho}$ )의 비를 제안하였다.

주)  $k_s$  : 교란지역의 횡방향 투수계수,  $k_v$  : 비교란지역의 종방향 투수계수

표 22. 국내 연구에 의한 투수계수의 범위

구분	범위	산정 방법
해안매립과 연약지반개량을 위한 신기술개발 보고서 (지반공학회 연구논문집 No.Ⅱ, 1995. 12)	$k_s/k_h=0.5, k_s=k_v$	실내모형시험 후 수평으로 채취된 시료에 대하여 수평 투수시험을 실시하여 투수계수 산정
연약지반의 압밀특성에 관한 연구보고서 (한국토지공사, 1999. 12)	<ul style="list-style-type: none"> <li>실내모형시험 : <math>k_s/k_h = 0.68 \sim 0.86</math></li> <li>현장시험: <math>k_s/k_h = 0.6 \sim 0.7</math></li> </ul>	수평으로 채취된 시료로 압밀시험을 실시하여 산정

지반교란의 영향으로 인한 투수계수의 감소는 배수재의 기능을 감소시키는 원인이 될 수 있으며 기존의 연구결과 및 기존적용사례에 의하면  $k_s/k_h$  범위는 0.33~0.86 이다.

일반적으로 사용되는 범위는 0.33~0.50 정도로 이에 대한 압밀소요시간의 지연정도를 검토하여야 한다.



### 5.3.3 배수저항(well resistance) 검토

연약지반개량에 사용되는 연직 배수재는 타설시 손상, 측방압력, 압밀진행에 따른 꺾임 및 굴곡 등에 일정한 통수능력을 유지하여야 하며, 기존 문헌에 대한 제안치는 <표 23>과 같다.

표 23. 통수능력 제안치

제안자	제안치(mm <sup>3</sup> /sec)	측방압력	비고
Kremer 등(1982)	5,070 : 직선 1,520 : 절곡	100kN/m <sup>2</sup>	-
Kremer 등(1982)	2,500	15kN/m <sup>2</sup>	• 동수경사 : 1.0
Jamiolkowski 등(1983)	320~470	300~500kN/m <sup>2</sup>	• 배수재 길이 : 20.0m
Hansbo(1986)	1,590~3,170	-	-
Rixner 등(1986)	3,170	-	-
Holtz 등(1991)	3,170~4,760	300~500kN/m <sup>2</sup>	• 동수경사 : 1.0, 배수재 : 15.0~25.0m
Koda 등(1989)	3,170	50kN/m <sup>2</sup>	-

국외에서 제안된 연직 배수재의 배수용량 범위는 320~4,760mm<sup>3</sup>/sec로 제안자 및 시험방법에 따라 많은 차이를 나타내며, 압밀진행에 따라 배수용량은 <그림 10>과 같이 감소하는 것을 알 수 있다.

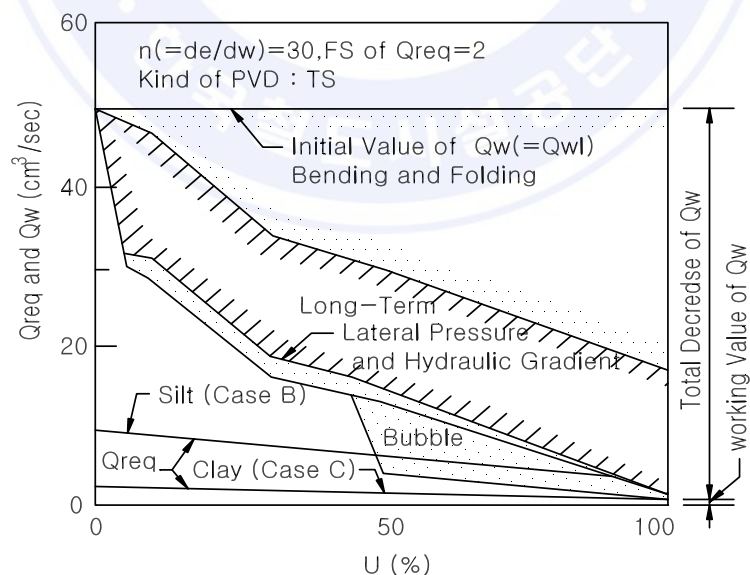


그림 10. 압밀도에 따른 배수용량의 변화

#### 5.4 개량효과 확인

연직배수공법의 효과확인에는 압밀의 진행상황(침하속진과 강도증가)의 파악이다. 이 때문에 작용된 압밀하중의 크기, 각 층마다의 침하량, 간극수압 등이 필요하다. 또한 개량범위 또는 재하된 쌓기의 형태에 대해서는 연직침하에 대하여 측방유동의 영향이 발생되기 때문에 수평변위의 측정도 필요하다.

계측관리를 통한 침하측정의 데이터와 계산치를 비교하거나 간극수압의 소산상황을 보면서 압밀의 진척상황을 판단하고 적절한 시기에는 자연시료를 채취하여 토질조사를 실시함으로써 지반개량의 효과를 직접 확인하는 것도 매우 좋은 방법이다.

이상과 같이 조사를 계속 혹은 적절하게 실시하여 압밀의 진척상황을 파악하여 예상과 다른 상황이 발견되면 원인을 규명하는 노력과 적절한 대책을 강구하는 것이 공사를 원활히 수행하는데 도움이 된다.

### 6. 모래다짐말뚝 공법

#### 6.1 공법개요

모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile)공법은 모래 또는 점성토로 이루어진 연약지반에 모래를 압입하여 비교적 잘 다져진 모래말뚝을 조성하는 지반개량공법이다.

본 공법은 매립지 등의 비교적 느슨한 사질토지반이나 사석지반에서 진동압입에 의한 원지반 다짐에 의해 지지력증가, 압축침하방지, 액상화방지, 전단저항 및 수평저항증대를 목적으로 사용되고 있다.

또, 점성토 지반에서는 단기적으로 주변점토보다 큰 전단강도를 가진 다짐모래말뚝을 촘촘히 조성하여 모래말뚝과 점토로 복합지반을 형성하므로 지반의 지지력과 전단저항을 증대시키고, 장기적으로 모래말뚝의 배수효과와 모래말뚝의 응력집중에 의한 압밀시간과 압밀침하량을 저감시킬 수 있으며, 재료는 동일한 효과를 가진 자갈, 쇄석 등을 이용할 수 있다.

#### 6.2 공법원리

모래다짐말뚝 공법의 설계는 원지반의 지지력과 압밀침하 등에 의한 치환율, 말뚝배치 형태 및 말뚝간격 및 직경결정 등의 검토를 실시한다. 모래말뚝은 <그림 11>과 같이 정방형, 정삼각형 배치로 하며, 치환율( $a_s$ )은 각각 <식 (26)>과 <식 (27)>에 의하여 구한다. 또한 치환율과 모래말뚝 단면적의 일반적인 설계 값은 <표 24>와 같다.

$$\text{정방형 배치(b)} : a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{d^2} \quad (26)$$

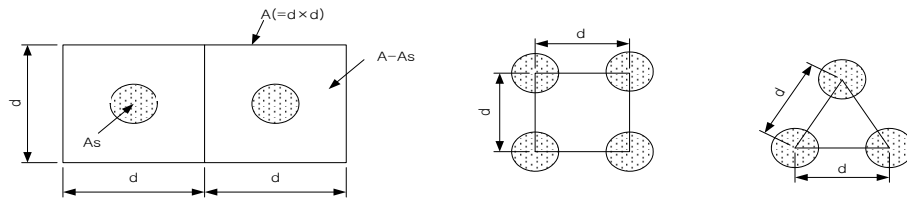
$$\text{정삼각형 배치(c)} : a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_s}{d^2} \quad (27)$$



여기서,  $A_s$  = 모래말뚝의 단면적,

$A$  = 모래말뚝의 단면적 + 점성토의 단면적

$d$  = 모래말뚝간격



(a) 치환율

(b) 정방형 배치

(c) 정삼각형 배치

그림 11. 모래말뚝 치환율 및 배치형태

표 24. 치환율 및 모래말뚝의 직경에 대한 일반적 설계값

토질	치환율	직경(mm)	비고
육상사질토	0.4	600~800	최근 들어 육상공사시 진동 및 소음을 고려하여, 모래말뚝의 직경을 300~450mm를 사용하는데, 주변에 미치는 영향을 고려하여 결정하여야 함.
해상사질토	0.4	800~1200	
육상점성토	0.4	600~800	
해상점성토	0.15~0.8	1000~2000 (표준 : 1600, 2000)	

### 6.3 시공방법 및 관리

모래다짐말뚝공법의 시공방법에는 크게 폭파다짐, 선단다짐, 선단 진동다짐 방식 등이 있으며, 이에 대한 내용 및 특징은 <표 25>와 같다. 시공관리는 시공 전, 시공 중, 시공 후로 나누어 실시하며, 시공 후에는 반드시 모래말뚝의 연직도 관리, 모래말뚝 타설에 따른 점토의 교란과 회복상황, 모래말뚝 지름과 말뚝강도에 대한 조사를 시행하여야 한다.

표 25. 모래다짐말뚝 공법의 시공방법

종류	내용	개요
폭파다짐 공법		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하에 매설된 폭발물의 폭발진동을 이용한 공법으로 깊은 다짐의 경우 신속하고 저렴한 지반개량방법이 된다</li> <li>- 시공순서 : 제팅(Jetting), 진동 또는 여타의 방법으로 파이프를 폭발물 매설깊이까지 관입→매설물장치→파이프내 흙 채움→폭발물 폭파</li> </ul>
진동다짐 공법		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원주형 또는 어뢰모양의 진동막대를 지반내 일정깊이까지 타입한 후 막대를 지상으로 인발시키면서 다짐을 수행하는 방법으로 진동막대의 모양과 모래충전방법에 따라 바이브로 프로우브, 바이브로 플로우데이팅, 바이브로 컴포우저 공법 등으로 분류</li> </ul>
동다짐공법		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개량 지반위에 무거운 물체를 낙하시키는 작업을 반복하여 다짐효과를 얻는 방법으로 동압밀공법, 중량다짐공법으로 불린다.</li> </ul>

## 7. 성토관리공법

### 7.1 재하중(Preloading)공법

연약지반의 공학적 성질을 개량하기 위한 한가지 방법으로서 연약지반 표면에 등분포 하중을 가하여 목적된 구조물의 설치 전에 필요한 만큼의 압축이 발생하도록 유도하는 공법을 재하중공법이라 한다. 재하중공법은 연약하고 압축성이 큰 지반에 상재하중을 가하는 작업이므로 지반붕괴에 대한 안정성이 문제가 되기 때문에 지반의 압밀 크기와 속도 등에 대한 정확한 자료가 필요하며, 지반 개량 시에는 철저한 지반조사가 수반되어야 한다.

공법설계에 있어서 문제가 되는 사항은 과재하중의 크기와 재하기간의 결정이다. 또한, 압밀시간의 단축을 위해서 지중에 배수를 위한 드레인을 타설하는 연직배수 공법이 사용되며, 주로 재하중공법과 병용하여 시공한다. 재하공법을 크게 분류하면 흩쌓기 방법에 따라서 단계 성토 시공법, 완사면공법, 압성토공법 등으로 분류할 수 있다. 사용목적에 의한 분류에 따라 재하중공법, 여성토공법, 흩쌓기 비탈면 파괴 방지용 재하공법 등으로 분류할 수 있다. 또한, <표 26>과 같이 재하재료에 따라 분류할 수 있다.

재하중공법은 일찍부터 철도, 도로를 위한 제방축조공사에 많이 쓰여져 왔다. 이 공법은 선행압밀 공법이라 하는데 건물기초, 교대기초, 철도노반, 단지개발에 많이 쓰이고 있다.

표 26. 재하재료에 의한 재하공법의 분류

재하공법	재 료	공법의 특징
흩쌓기공법	흙	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 필요한 성토고 확보 가능</li> <li>· 재료비 저가</li> <li>· 하중크기를 자유로이 할 수 있음</li> <li>· 활동파괴 주의</li> </ul>
대기압공법 (진공압밀공법)	대기압	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하중에 한계가 있으나 흩쌓기와 병행 가능</li> <li>· 재료비 저렴</li> <li>· 활동파괴 주의</li> <li>· 진공을 위한 기압 쉬트(Sheet) 설치 필요</li> </ul>
물하중공법	물	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단위 중량이 작기 때문에 하중에 한계가 있음</li> <li>· 누수 방지공과 주위에 제방 필요</li> <li>· 물의 침수 및 배수가 용이하지 않으면 사용을 피해야 함</li> </ul>
기타	콘크리트 강 재	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단위 체적중량이 높기 때문에 재하고를 낮게 할 수 있음</li> <li>· 재료비가 고가</li> <li>· 재하가 비교적 어려움</li> <li>· 재하시험 등 특수한 경우 이외에는 사용하지 않음</li> </ul>



### 7.1.1 공법 원리

#### (1) 1차 압밀침하와 2차 압밀침하

지반에 처음부터 설계하중( $P_d$ )만을 재하하였을 때, 1차 압밀 침하량과 시간의 관계를 나타내면 <그림 12>에 점선으로 표시한 곡선과 같이 되며, 이 그림에서  $S_d$ 는 최종 1차 압밀침하량을 의미한다. 동일지반의 설계하중보다 초과하중( $P_s$ )만큼 큰 하중을 재하한다면 1차 압밀침하량과 시간의 관계는 <그림 12>의 실선과 같이 되며 침하량의 크기가 설계하중에서 최종1차 침하량과 같아지는 시간( $t_c$ )이 경과하면 초과하중을 제거하여도 더 이상은 1차 압밀 침하가 일어나지 않을 것으로 기대된다.

재하중하상 상태에서 지반의 압밀침하량이  $S_d$ 에 이르는 시간( $t_c$ ) 경과 후의 평균 압밀도( $U_c$ )는 <식 (28)>과 같다. 즉, 개량하고자 하는 지반에 재하중을 가하고 평균 압밀도( $U_c$ )에 이르는 시간( $t_c$ )이 경과한 후 초과하중을 제거하면 설계하중에서 이론상 더 이상의 침하가 발생하지 않는다. 그러나, 실제의 시공시에는 흙쌓기가 순간적으로 재하되는 것이 아니며, 여성토 제거시 약간의 리바운드가 일어나므로 압밀촉진 효과가 다소 손실될 수 있다.

$$U_c = \log\left(1 + \frac{P_d}{P_o}\right) / \log\left[1 + \left(\frac{P_d}{P_o}\right)\left(1 + \frac{P_s}{P_d}\right)\right] \quad (28)$$

여기서,  $U_c$  : 평균압밀도

$P_s$  : 초과하중(kN/m<sup>2</sup>)

$P_d$  : 설계하중(kN/m<sup>2</sup>)

$P_o$  : 초기 유효응력(kN/m<sup>2</sup>)

재하중 공법을 이용하여 설계하중에서 2차 압밀침하가 일어나지 않도록 하려면 1차 압밀침하방지를 위해서 행한 것과 비슷한 방법으로 하중의 재하시간을 산출하여야 한다. 1차 압밀관계식 등을 이용하여 재하중에 의한 1차 압밀침하량이 설계하중하에서 2차 압축을 고려한 침하량,  $s_d + s_s$  보다 크게 되는 때의 평균압밀도( $U_c$ )는 <식 (29)>와 같다. 평균압밀도( $U_c$ )가 얻어지는 시간( $t_c$ )은 일상적인 방법으로 구할 수 있으며 2차 압축침하를 산정하는 시간( $t_c$ )은 목적 구조물의 수명이나 기타 사항 등을 고려해서 결정한다.

$$U_c = \frac{(1 - C_a \log \frac{t_s}{t_p}) \log(1 + \frac{P_d}{P_o})}{\log\left[\frac{1 + (\frac{P_d}{P_o}) + \frac{C_a}{C_c}(1 + e_o) \log \frac{t_s}{t_p}}{(1 + \frac{P_s}{P_d})}\right]} \quad (29)$$

여기서,  $U_c$  : 압밀도(무차원)

$C_c$  : 압축지수(무차원)

$C_a$  : 2차압밀지수(무차원)



- $e_o$  : 간극비(무차원)  
 $P_s$  : 초과하중( $\text{kN/m}^2$ )  
 $P_d$  : 설계하중( $\text{kN/m}^2$ )  
 $P_o$  : 초기 유효응력( $\text{kN/m}^2$ )

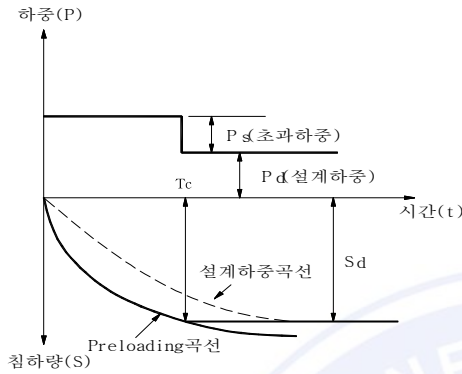


그림 12. 재하중에 의한 1차 압축침하

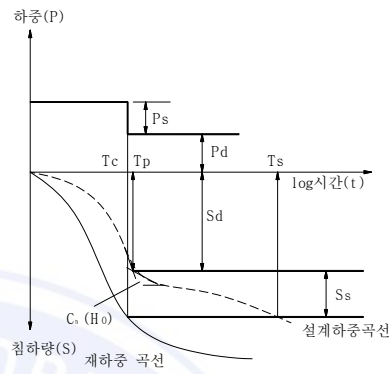


그림 13. 2차 압축 침하를 고려한 초과하중 제거시간

## (2) 재하단계의 결정

연약점토층에 재하중 공법을 적용하는 기간 중에는 압밀에 의한 강도증가가 이루어진다. 이 때의 강도증가를 고려하여 한계성토고 만큼 흙쌓기 시공하고, 이것을 반복하여 필요한 흙쌓기 높이만큼 시공해야 한다. 또한, 흙쌓기 후 흙쌓기 법면에 대한 안정성 검토는 전산프로그램을 이용하여 안전율 1.2 이상을 만족하도록 한다.

## (3) 재하에 따른 비배수 전단강도의 증가

재하중에 의한 압밀과정에서 지반의 비배수전단강도는 증가한다. 압밀에 의한 강도증가를 예측하기 위하여 흙의 소성지수와 유효연직응력에 대한 비배수 전단강도비( $c_u/p$ )의 관계나 압밀비배수 삼축시험 결과로부터 비배수 강도곡선 등을 이용한다.

삼축시험 결과에 의하면 비배수전단강도의 증가는 압밀응력의 크기와 밀접한 관계를 가진다. 재하중공법의 경우에는 상재하중에 의한 압밀이 완료되기 전에 하중의 일부를 제거하므로 상재하중 전부를 압밀응력으로 볼 수 없으며 특히, 지반내의 깊이에 따라 강도증가의 크기가 변화한다.

### 7.1.2 한계성토고 및 비탈면 안정검토시의 최소안전율

흙쌓기를 일시적으로 급속시공을 하면 안전율이 상당히 떨어지면서 활동파괴가 일어난다. 그러나 한계흙쌓기 높이까지 흙쌓기하여 방치하면 상부 흙쌓기 재하중에 의해 연약 점토층에 강도증가가 일어난다. 이 강도증가를 고려하여 재차 한계흙쌓기를 한다. 이와같은 과정을 반복하여 필요한 성토고 만큼 흙쌓기 한다. 이때 한계흙쌓기 시공 직전에는 안전율( $F_s$ )이 허용 최소안전율 정도가 되나 시간이 경과하면 강도증가에 의해서 안전율이 커지게 된다.



(1) 한계성토고

- ① 한계성토고란 지반보강을 하지 않는 원지반에 성토를 할 때 성토체를 보강하지 않고 성토할 수 있는 최대높이를 말한다.
- ② 한계성토고는 지지력 및 사면안정검토에 의하여 결정하며 이들 중 작은 값으로 결정한다.
- ③ 지지력에 의한 한계성토고  $H_c$ 는 연약층의 점착력( $c_u$ )에 대한 지반의 극한지지력( $q_d$ )을 구하여 <식 (30)>과 같이 결정한다.

$$H_c = \frac{q_d}{r_t F_s} \quad (30)$$

여기서,  $H_c$  : 한계성토고(m)  
 $r_t$  : 성토체의 단위중량( $\text{kN/m}^3$ )  
 $q$  : 극한지지력( $\text{kN/m}^2$ )  
 $F_s$  : 안전율

지반의 극한지지력은 연약층 두께 및 토질에 따라 <표 27>값을 사용한다.

표 27. 연약층 두께에 따른 점토지반의 극한지지력 「국토해양부, 2000」

구분	극한지지력( $q_d$ , $\text{kN/m}^2$ )
두꺼운 점토질지반 및 유기질토가 두껍게 퇴적된 이탄질지반	$3.6c_u$
보통의 점토질지반	$5.1c_u$
얇은 점토질지반 및 유기질토가 끼지 않은 얇은 이탄질지반	$7.3c_u$

- 한계성토고(1단계 성토) 검토 예
- 원지반 극한지지력(보통의 점토질 지반의 경우)

$$q_d = 5.1 \cdot c_u = 5.1 \times 19.6 = 99.96 \text{ kN/m}^2$$

여기서,  $c_u$  : 원지반의 점착력 =  $19.6 \text{ kN/m}^2$

- 한계성토고 산정

$$H_c = \frac{q_d}{r_t F_s} = \frac{99.96}{18.6 \times 1.1} \doteq 4.8 \text{ m}$$

여기서,  $H_c$  : 평균압밀도  
 $r_t$  : 성토체의 단위중량 =  $18.6 \text{ kN/m}^3$   
 $q_d$  : 원지반의 극한지지력 =  $99.96 \text{ kN/m}^2$   
 $F_s$  : 축조기간중 안전율 = 1.1

∴ 원지반 상태에서의 성토 가능한 최대높이인 한계성토고는 4.8m인 것으로 산출되었다.

## (2) 사면 안정검토시의 최소안전율

사면안정검토시 기관별 최소안전율 기준은 <표 28>과 같으며, 사면안정 해석시 고려할 사항은 다음과 같다.

- ① 가장 보편적인 한계평형방법(LEM : Limit Equilibrium Method)으로 산정한 안전율이 허용치 이상이면 성토사면은 파괴에 대해 안전하고, 변형은 허용치 이내로 한다.
- ② 안정해석은 현장의 배수조건을 파악하고, 배수상태에 따른 합당한 강도정수를 사용하여 수행 하여야 한다. 안정해석은 전응력해석법과 유효응력해석법이 있으나 편의상 전자로 한다.
- ③ 흙쌓기 비탈면의 최종 기울기는 흙쌓기 지지지반의 형상 및 강도와 흙쌓기 지반의 형상 및 강도 등을 고려한 비탈면안정을 해석하여 결정하여야 하며 실제 시공시 변경된 사항이 있을 경우에는 반드시 재설계를 하여야 한다.

표 28. 기관별 최소안전율

구분		최소안전율(Fs)	
한국도로공사	도로설계요령(2002)	축조기간중	Fs ≥ 1.1
		공용하중 개시후	Fs ≥ 1.3
	도로설계 실무편람(1996)	축조기간중	Fs ≥ 1.2
		공용하중 개시후	Fs ≥ 1.3
국토해양부(2003)		구조물기초 설계기준	Fs ≥ 1.3

## 7.2 압성토공법

압성토공법은 기존의 제체 외측에 하중으로 작용하는 제체를 축조하여 기초지반의 활동파괴에 대해 활동에 저항하는 모멘트를 증가시켜 활동파괴를 방지하는 공법이다.

압성토 부분은 공사용도로, 부체도로, 여유폭, 환경시설대 등으로 활용될 수 있는 이점 외에 흙쌓기에 따른 지반변형을 경감시키는 효과도 있다. 압성토는 원호활동의 원리 및 시공실적에서 보아도 가장 확실한 공법이며, 그 외의 공법과 비교할 때 경제성 측면에서도 유리한 경우가 많기 때문에 효과적이다.

### 7.2.1 압성토 설계에서의 고려사항

#### (1) 타당성조사 단계

압성토 높이의 표준은 제체 높이의 1/2~1/3 정도이다. 높이를 결정하면 압성토 폭을 제체 높이의 2배 정도로 상정하고 안정계산을 하여 소요의 안전율을 얻도록 한다.

#### (2) 실시설계 단계

압성토의 높이(H)는 일반적으로 <식 (31)>로 구한 값을 표준으로 설계한다.



$$H = \frac{H_{ec}}{F_s} \quad (31)$$

여기서,  $H$  : 압성토 높이  
 $H_{ec}$  : 한계 체체 높이  
 $F_s$  : 안전율(보통 3.0)

### 7.2.2 시공

압성토공법의 시공은 일반적으로 먼저 샌드매트를 시공하고 다음에 압성토부분을 포함한 흙쌓기를 시공한 후에 계속해서 체체를 시공한다. 샌드매트 시공 후 흙쌓기 시공시 압성토부분을 선행시켜 시공하고, 이것을 공사용 도로로 이용하는 것은 체체의 안정상 효과적인 방법이다.

## 8. 치환공법

치환공법과 이하 (9)(표면처리공법)~(15)(생석회 말뚝공법)은 「전문가를 위한 기초공학, 1996」의 자료를 이용하여 수록하였으며, 보다 상세한 것은 참고문헌을 이용하기 바란다.

### 8.1 공법 개요

연약지반상에서 구조물 건설이 요구될 때, 구조물의 안정 혹은 침하를 검토하는 데 문제가 되는 연약층을 제거하고 양질토(수침에 의해서도 지지력이 잘 저하되지 않는 모래 등의 조립토)와 바꿔 넣는 공법을 치환공법이라고 한다. 치환공법은 개량원리가 극히 명확하기 때문에 재하중공법과 함께 오래 전부터 이용되었으며, 일반적인 지반개량공법으로서 비교적 중요한 구조물에 대해서 널리 실시되고 있다. 치환공법이 채용되는 대규모 구조물은 육상공사에서의 철도 흙쌓기, 도로 흙쌓기, 하천제방과 항만공사에서의 안벽, 방파제, 호안 등이다.

치환공법은 육상 공사시에는 치환단면을 고려하여 전층치환과 부분치환으로 나눌 수 있으며, 시공방법에 따라 굴착치환과 강제치환으로 구분된다. 강제치환에는 흙쌓기 자중에 의한 강제치환, 폭파치환과 다지기 모래말뚝에 의한 치환 등이 있다. 굴착치환공법은 연약토를 지반개량을 필요로 하지 않는 깊이까지 굴착해서 양질토사로 메우는 공법이다. 연약층의 두께가 3m 정도 이하로 얇은 경우는 전층치환을 채용한 경우라도 개량에 요하는 기간은 비교적 짧아도 되므로 확실한 효과를 확보할 수 있다. 강제치환공법은 연약토를 굴착하는 일없이 제거 혹은 배제해서 양질토와 바꿔 넣기를 한다. 시공방법에 의해서 흙쌓기 자중 강제치환, 폭파치환, 다짐모래말뚝 치환이 있다.

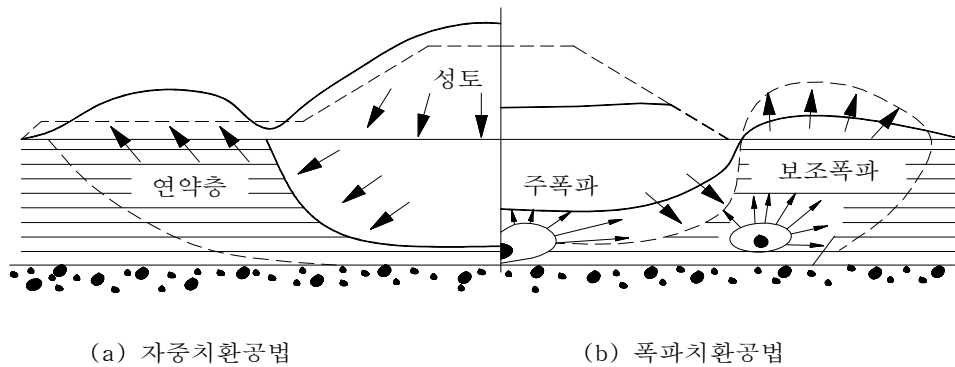


그림 14. 치환공법의 예

## 8.2 강제치환공법

이 공법은 성토의 자중에 의해 연약층을 강제적으로 밀어내든지 연약층에 폭약을 삽입하여 폭파에 의해 연약층을 밀어내어 양질의 성토재료로 치환, 성토의 침하를 감소시키고 안정을 확보하는 것이다.

이 가운데 자중치환공법은 <그림 14(a)>에 나타난 바와 같이 성토의 자중에 의해 연약층을 측방으로 밀어내어 양질의 성토재료로 치환하는 것이다. 성토의 측방으로 압출된 연약층은 제거하든가, 압성토로 이용하는 일이 많다. 연약층의 압출을 촉진 조장함과 동시에 성토사면의 잔류침하를 작게 하기 위해서는 측방 용기토를 제거할 뿐만 아니라 적극적으로 성토측방부를 굴착 제거하면 된다. 또 연약층 중에 워터젯(Water Jet)를 뿜어넣어 지반을 연화하거나 성토에 자중 이상의 여성을 행하는 것도 연약층의 압출촉진 효과가 있다.

폭파치환공법은 <그림 14(b)>에 나타난 것처럼 연약층 안에 폭약을 삽입하여 폭파에 의해 연약층을 측방으로 밀어내는 것이다. 이 방법은 이탄지반에 대해 유효하지만 느슨한 사질토지반의 경우에는 폭파에 의한 연약층의 다짐효과도 기대할 수 있다. 이상과 같이 치환공법에 의하면 성토종료후의 침하나 안정에 대해 효과가 있는 것도 물론이지만 다음과 같은 점에 단점이 있어 적용되는 기회는 매우 적다.

- (1) 강제적으로 연약토와 성토를 치환하므로 완성된 성토가 균일하게 잘 다짐이 되어 있다는 보장은 없다. 또 성토재료가 부족한 현장에는 부적당하다.
- (2) 이 공법은 인가나 전답에 피해를 줄 위험이 많으므로 벌판, 늪지 등 이외의 지역에서는 용지사정 때문에 적용하는 것이 어렵다.

## 8.3 굴착치환공법

연약층의 일부 또는 전부를 굴착 제거하여 양질토로 치환하고, 저성토 노면의 변형이나 치환성토상에 시공하는 성토 혹은 구조물의 침하를 감소하여 장기간에 걸쳐 안정을 도모하는 공법이다.





이 공법은 구조물의 기초, 철도, 도로 혹은 제방의 성토, 호안 및 안벽의 기초 등에 자주 쓰이고 있다. 연약지반의 처리로는 가장 확실한 방법이지만 제거한 흙의 사토처리가 용이하고 적당한 치환재료가 손쉽게 구입할 수 있는 지가 경제적인 면의 열쇠가 된다. 철도 등에 있어서 연약층의 굴착제거 공법은 일반적으로 다음과 같이 된다.

- (1) 저성토에서 연약층이 철도하중에 의한 노면변형의 원인이 되는 경우에는 성토의 기초가 되는 두께 약 3m 이내의 얇은 연약층은 <그림 15(a)>에 나타난 것처럼 전면적으로 굴착 제거하여 양질의 재료로 치환, 철도하중에 의한 노면의 변형을 막고 장기간에 걸쳐 안정을 확보한다.
- (2) 얇은 연약층상에 고성토를 시공할 경우에는 <그림 15(b)>에 나타난 것처럼 샌드매트로 처리하여 연약층의 제거치환을 행하지 않는다. 그러나 목적에 따라서는 <그림 15(c)>에 나타난 것처럼 구조물 기초부분만 일부 굴착 제거하여 양질재료로 치환하는 경우가 있다.
- (3) 연약층의 두께가 약 3m 이상에 이르는 경우에는 시공이 용이한 상층만을 <그림 15(d)>에 나타난 것처럼 일부 제거하여 치환하고, 복합지반으로 성토의 안정을 꾀하고 또 침하를 촉진한다.

연약지반에서는 지하수위가 높고 지표의 지지력이 작으므로 직접 굴착운반 기계를 타고 들어가는 것은 매우 곤란하다. 따라서 드레그라인, 슬랙라인, 드레그스크레이퍼 등의 굴착기계나 샌드펌프 등의 준설기계를 사용하는 것이 유리하다. 이 경우 굴착 깊이는 철도나 도로 등의 성토 등에서는 3m 정도를 일단 경제한도로 하고 있지만, 간척 제방 등에서는 굴착장비 등의 능력에 따라 10~20m정도의 깊이까지 굴착치환이 가능하다고 말할 수 있다.

<그림 15(e)>는 굴착에 드레그라인을 이용하여 굴착토의 반출, 양질재의 반입, 토사의 부설 또는 포설 및 다짐 등을 시행하고 있는 예를 나타낸 것이다.

치환부에 사용하는 양질재의 선정에 대해서는 성토고, 연약층의 두께, 구조물의 종류 및 지하수위 등을 고려하여 재료로서 될 수 있는 한 배수성이 양호하고 장래 지하수위 이하가 되더라도 충분히 지지력을 확보할 수 있는 모래, 자갈 그 외의 조립토를 선택하는 것이 바람직하다.



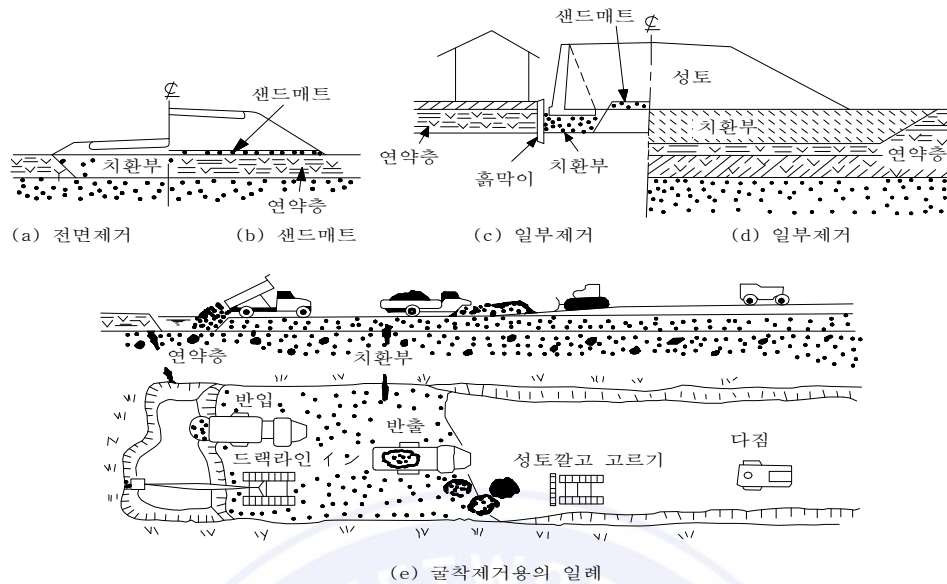


그림 15. 굴착치환공법


시공에 대해서는 굴착토를 성토상에 방치하는 일이 없이 굴착과 동시에 연약토를 반출 사토한다. 또 굴착부의 경사면의 붕괴를 막기 위해 굴착의 진행에 따라서 조속히 치환재료의 반입을 하는 것도 중요하다. 또한 <그림 15(c)>에서처럼 인가에 근접하여 치환을 할 경우는 특히 굴착경사면 보호를 위한 토류벽 등의 처리를 안전하게 시행하여야 한다.

#### 8.4 공법 설계

연약지반의 강도나 지하수위에 관한 지반조사 결과에 따라 시공 시의 검토로 굴착깊이, 굴착경사도, 시공기계 배치에 의한 상재하중 등을 고려하여 안정계산을 실시하고 시공순서를 결정한다. 완성시에 대해서는 완성단면에 대한 안정과 침하의 검토를 한다. 침하에 대하여 완전치환 단면의 경우 문제가 발생하지 않지만, 연약층의 일부를 남긴 부분치환을 실시한 경우에는 연약층의 침하검토가 중요하다. 특히, 연약지반이 고유기질토의 경우에는 치환재가 되는 양질토와의 습윤밀도 차에 의해 연약층이 장기간에 걸쳐서 침하하여 상부의 구조물에 피해를 미치게 된다.

치환재가 되는 양질토는 수침에 의해 서로 전단강도를 잃지 않고 지지력을 확보할 수 있는 모래 및 자갈 등의 조립재가 바람직하다.

굴착에 의해서 생긴 비탈면의 안정은 굴착깊이와 연약토의 전단강도에 의해서 정해진다. 굴착 후에는 가능한 한 신속히 치환재료로 메워서 비탈면 붕괴를 막아야 하며, 흙쌓기 자중에 의한 강제치환공법 등의 강제치환을 할 경우, 육상에서 시행하는 점축식과 해상에서 바지선을 이용한 점고식이 있는데, 제체 축조로 인한 융기현상에 주의하고 미치환 점토층을 고려한 제체의 안정검토를 해야 한다. 또한, 사운딩 등에 의해 흙쌓기의 단면 형상파악을 실시하여 잔류침하 발생 가능성을 검토한다.



## 9. 표면처리공법

표면처리공법은 지반의 표층부분이 매우 연약한 경우에 적용되고 표층의 강도증가와 균질화를 도모하여 중기(重機)의 시공성을 양호하게 함과 동시에 저성토 등에서 생기는 부등침하를 방지하는 공법이다.

### 9.1 표층배수공법

시공 시 지표에 트렌치를 굴착하여 지표수를 배제하고 지반표층부의 함수비를 저하시켜 시공기계의 주행성(Trafficability)을 확보한다. 성토를 시공할 때는 굴착한 트렌치를 시공 중의 지하배수구로서 이용하기 때문에 투수성이 양호한 사질토 등으로 되메운다.

트렌치의 배치는 성토나 굴착의 평면형상이나 지표구배, 기존도로 등을 생각해서 병렬, 바둑판 무늬 또는 화살깃 모양으로 한다. 지하배수구로서 적용할 경우의 트렌치 상호의 간격은 성토 제1층으로서 시공하는 샌드 매트 두께나 투수성에도 의하지만 일반적으로 5~10m 간격으로 하여 트렌치의 일부가 절단되어도 전체의 배수에 지장이 없도록 가능한 조밀한 간격으로 하는 것이 바람직하다. 트렌치는 일반적으로 폭 0.5m, 심도 0.5~1.0m 정도로 한다.

### 9.2 혼합처리공법

혼합처리공법은 지표면으로부터 심도가 3m 이내인 표층부위나 심층의 지반강도증가를 목적으로 주로 시멘트 등의 고화재를 슬러리 상태로 연약지반에 혼합하는 공법이다.

연약지반에서 혼합처리공법의 설계시에는 안정재의 선정 및 실내 배합시험의 검토, 처리대상 지반의 소요강도와 처리두께 등을 고려하여 결정하여야 한다. 처리지반의 강도 및 두께는 처리하고자 하는 대상지반의 상태 및 시공기계, 재하구조물의 종류에 따라 결정한다. 이에 대한 설계법으로는 여러층의 이방성 탄성체 지반으로 해석하는 방법, 지반반력법에 의한 방법, 지반내 응력에 의한 방법, 펀칭전단(Punching Shear)에 의한 방법 등이 있다.

연약지반의 혼합처리공법에 대한 시공방법을 살펴보면, 일반적으로 백호우를 사용하는 방법은 간편하게 시공할 수 있으며, 해상의 경우 전용선을 이용하는 경우도 가능하다. 혼합처리공법에 사용되는 재료의 비교분석은 <표 29>와 같다.

표 29. 혼합처리 재료의 비교분석

구 분	지반 상태						재료			혼합 및 다짐			효과	
	점성 토	사질 토	$w \approx w_L$ 지반	$w \geq (1.5 \sim 2) w_L$ 인 지반	유기물 적당히 포함된 지반	유기물 많이 포함된 지반	수 급 용 이 성	취 급 시 의 안 전 성	가 격	밀크 상태로 사용 가능 여부	점성 토와 혼합 정도	다짐 공정	빠른 개 량 효과 확인 가능 여부	장기 강도
생석회	◎	△	○	△	○	△	○	×	보통	×	○	필요	◎	○
보통포틀랜드시멘트	○	○	○	△	○	×	◎	○	저렴	○	△	불필요	△	○
고 로 시멘트	○	○	○	○	○	△	○	○	저렴	○	△	불필요	△	○
토 질 개량용 시멘트	◎	○	○	◎	○	○	○	○	고가	○	△	불필요	△	○

주) ◎ : 적합, ○ : 양호, △ : 보통, × : 부적합,  $w$  : 함수비,  $w_L$  : 액성한계

## 10. 지하수위 저하공법

연약지반의 지하수위를 저하시킴으로서 다음과 같은 효과가 얻어진다.

- 굴착작업이 용이해진다. 투수성이 좋은 사질지반에서는 dry work가 가능해진다.
- 굴착토를 성토에 전용할 경우에 흙의 함수비를 저하할 수 있다. 또 굴착토를 사토할 때도 작업이 용이해진다.
- 굴착사면의 간극수압을 저하시키고 점성토지반에 있어서 사면의 활동파괴나 굴착면에 생기는 허빙을 막고 토류벽 등에 작용하는 과대토압을 억제한다. 또 사질지반에서는 보일링 또는 퀵샌드나 파이핑 등에 따른 사면의 변형을 방지한다.
- 수위저하에 따른 재하중 증가로 인해 하부 연약층 압밀을 촉진시킬 수 있다.
- 성토 아래의 지하수위를 저하시키면 연약한 사질지반의 지진시에 생기는 액상화를 방지할 수 있다.

투수계수가 작은 점토질 지반의 지하수위를 저하시키는 것은 일반적으로 곤란하지만, 도중에 모래나 자갈층과 같은 얇은 층이 존재할 때 배수층으로 잘 이용하면 매우 광범위하게 지하수위를 저하시킬 수 있다. 투수성이 좋은 사질지반이나 이탄질지반의 배수는 용이하지만 대상지반에 점성토층이 존재할 때 특별한 주의를 요하므로 배수공법의 적용에 있어서는 사전에 충분한 토질조사를 해 두는 것이 필요하다.

지하수위 저하공법은 배수공법에 따라 중력배수 및 강제배수로 크게 나눌 수 있다.



## 10.1 중력배수공법

집수장 배수공, 암거 배수공 및 깊은 우물공 등이 포함된다. 집수장 배수는 굴착저면의 물을 집수정이라고 부르는 집수장소에 자연 유입시켜 수중펌프 등을 사용하여 배수시키는 것이다. 굴착의 진행에 따라 집수정을 순차적으로 파내려가는 것보다 깊은 우물을 당초부터 최종굴착 저면까지 굴착해 두는 것이 유리하다. 암거 배수공은 <그림 16(a)>에 나타난 것처럼 굴착저면에 트렌치를 미리 시공하여 사전에 지하수위를 저하시킨 후 굴착을 진행하는 공법이다. 그림과 같이 모래층 등의 배수층이 존재할 때는 넓은 범위의 지하수위를 저하시킬 수가 있어 유리하다. 암거배수에는 유공관을 사용하는 지하배수구가 포함되어 있어 지하수위를 저하시키는데 광범위하게 사용된다.

## 10.2 강제배수

강제배수공법은 가장 많이 쓰이는 웰 포인트공은 굴착부분의 양측 또는 주변을 웰 포인트라 부르는 간이우물을 설치하여 지하수를 양수함에 따라 <그림 16(b)>에서 처럼 지하수위를 저하시키는 것이다.

특히 주의할 점은 불투수 점성토층을 사이에 둔 지반에 웰 포인트공법을 적용했을 경우 <그림 16(c)>에 나타난 것처럼 점성토 상층의 상부지하수에는 웰 포인트가 효과가 없으므로 웰 포인트를 하고 나서도 굴착사면의 붕괴를 막을 수가 없었던 예도 적지 않다.

배큘 딥웰(Vacuum Deep Well)은 웰 포인트와 같은 구상에서 출발한 것이며 웰 포인트공은 수량이 너무 많은 경우 등에 이용된다. 설치가능한 웰은 직경이 150~600mm, 깊이 8~120m정도이다.

실트분이나 점토분을 많이 포함한 지반에서는 투수계수가 작고, 웰 포인트나 배큘 딥웰로 효과적인 지하배수를 할 수 없게 된다. 이와 같이 연약지반의 포화된 점성토 안에 일대의 전극을 삽입하여 직류전류를 흐르게 하면 흙 속의 간극수는 대부분 음극을 향해서 흐른다. 이와 같은 강제유동현상을 전기침투라 부르며 이 현상을 이용하여 진공배수 등의 기계적인 배수가 곤란한 세립토의 간극수를 배수시키는 것이 전기침투공법이다.

이상과 같은 공법에 의해서 깊은 대수층에서 대량의 배수를 하면 주변의 보다 넓은 범위에 걸쳐 지하수위를 저하시켜 지반침하나 우물고갈 등을 일으키는 경우가 있다. 일례를 나타낸 것이 <그림 17(a)>이고 대수층의 투수계수에 의해 영향이 500m 정도에까지 미치는 경우도 있고 도시부의 공사에서는 큰 환경문제를 일으킬 수 있다. <그림 17(b)> 및 <그림 17(c)>는 이상의 대책으로서 행한 널말뚝에 의한 차수벽과 지하수를 환원하여 수위의 저하를 막는 복수공법의 예를 나타낸 것이다.

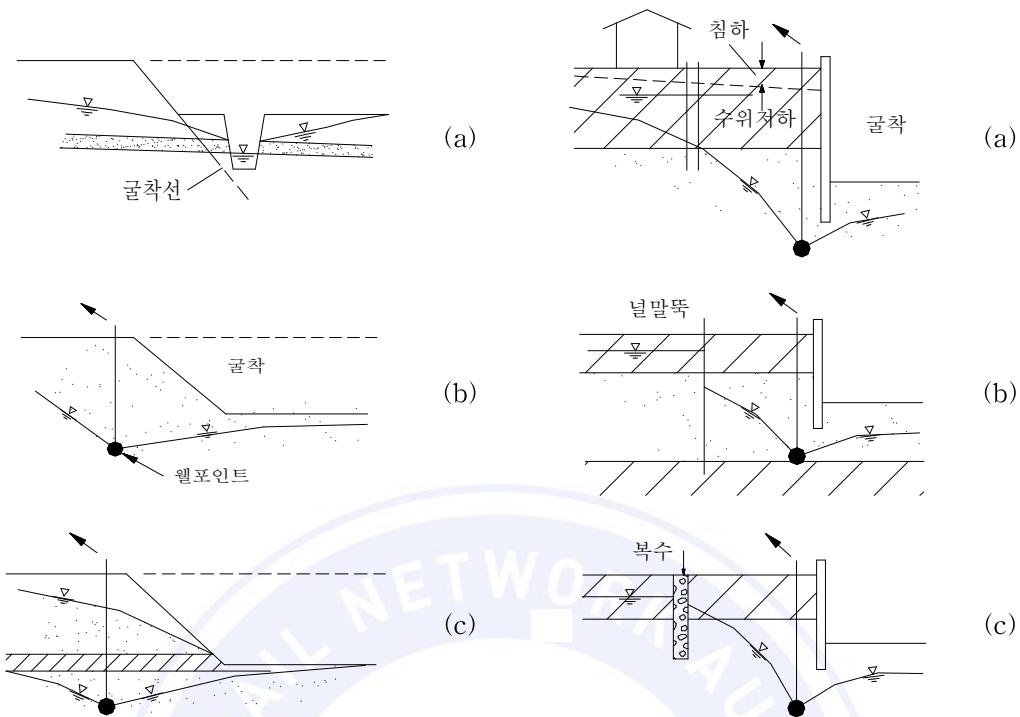


그림 16. 배수방법

그림 17. 지하수위 저하대책

## 11. 경량성토공법

경량성토공법은 경량골재, EPS(Expanded Polystyrene), 발포우레탄(EU) 등이 있다. EPS는 보통 발포스티로폼으로 불리워지고 있으며, 공업 재료적으로는 발포스틸렌으로 불리워진다.

EPS는 알갱이 형태의 폴리스틸렌 수지에 발포제를 첨가한 후 가열 연화시킴과 동시에 기체를 발생시켜 발포수지로 한 재료이다.

국내에서는 1970년대 초에 EPS를 생산하기 시작하여 그동안 포장재나 건물의 단열재 등으로 활용되어 왔다. EPS가 부피  $1m^3$  정도의 대형 블록형태로 제조되어 토목공사에 흙쌓기재로서 적용되기 시작한 것은 1972년 노르웨이 국립도로연구소(NRRL)에서 EPS 흙쌓기공법을 개발하면서부터 이다.(NRRL, 1987)

국내에서는 1993년 10월 서해안 고속도로 건설현장에서 교대 뒷채움재로 EPS 블록이 최초로 사용되었다. EPS 쌓기공법의 계획·설계는 대상 흙구조물의 종류, 규모, 중요성 등을 고려하여, 다른공법과 종합적인 비교를 통해 EPS 흙쌓기공법의 장점을 최대한 발휘할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

EPS 쌓기공법은 발포폴리스틸렌의 대형블록을 경량 흙쌓기재료로 토목공사에 이용하는 공법으로 EPS의 단위체적중량이 흙의 약 1/100정도로 가벼운 초경량성에 가장 큰 장점이 있다. 일반적으로 EPS 흙쌓기공법은 대형 EPS 블록을 흙쌓기재료 및 뒷채움재료로서 철도, 도로, 공원조성 등의 각종 토목공사에 적용된다.





발포우레탄(EU)은 중량이 가볍고 강도가 높은 특성을 가지고 있으며, EPS보다는 중량이 무겁고 강도는 높은 성질을 가진다. 가까운 일본에서는 연약지반, 옹벽, 교대, 기초, 비탈면 분야에서 경량성토재, 뒷채움재, 안정재, 보강재, 그라우팅재 등으로 사용되고 있다.

## 12. 폭파다짐 공법

사질지반을 다지는 방법 중에서 폭파다짐방법 (<그림 18> 참조)를 이용하여 동적충격하중을 가하는 방법이 가장 경제적인 방법이다.(Ivanov, 1967)

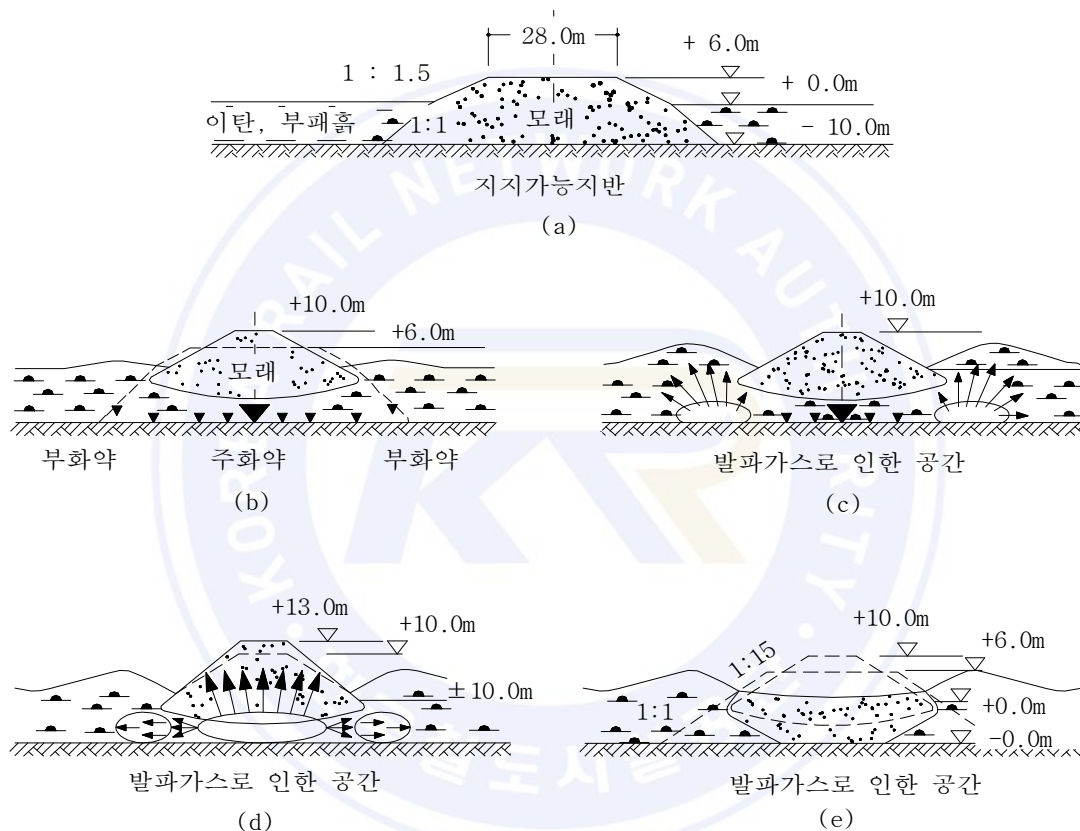


그림 18. 폭발을 이용한 다짐방법

소량의 폭발물(Ammoniumnitrat, TNT등)을 사질지반에 설치하고 여러개를 집단으로 지연발파시킨다. 발파에 의한 다짐이 10mm 이상 일어나는 범위의 반경을 R(m)이라고 하면 반경 R과 그때 소요된 폭발물의 중량 C와의 사이에는 <식 (32)>와 같은 관계가 성립한다.

$$R = K_3^3 \sqrt{C} \quad (32)$$

$$a = 2K_4^3 \sqrt{C} \quad (33)$$

한편 <식 (33)>을 이용하여 폭발물 설치 격자간격(a)를 구할 수 있으며,  $K_3$ 와  $K_4$ 는 사질토의 상대밀도에 따라 <표 30>값을 이용한다.



표 30. 상대밀도에 따른  $K_3$ ,  $K_4$ 값

지반의 종류	상대밀도	$K_3$	$K_4$
미세사질토	0~0.2	25~15	5~4
	0.3~0.4	5~8	3
	>0.4	>7	<2.5
중간사질토	0.3~0.4	8~7	3~2.5
	>0.4	>6	<2.5

이 공법의 발파선단모양과 발파시스템은 각각 <그림 19>, <그림 20>이다.

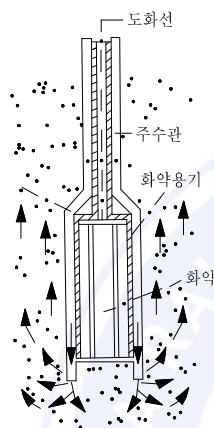


그림 19. 발파선단의 모양

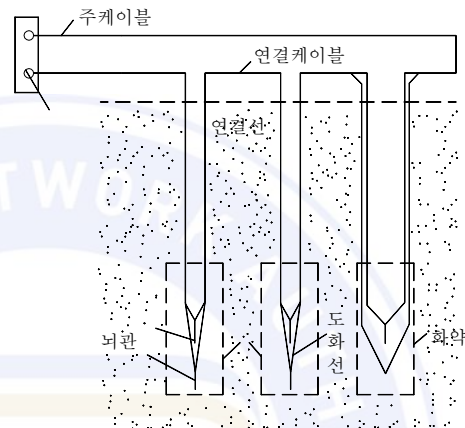


그림 20. 발파시스템

지연발파를 위한 지연시간은 폭발물을 설치하는 위치 사이에서 피에조미터로 측정한 과잉간극수압을 고려하여 결정하며, 폭발로 인한 과잉간극수압이 소멸된 후에 다음 단계를 폭발시킨다.

장약량을 깊이 방향으로 다르게 설치하고 상부에서부터 시작하여 지연발파를 행한다. 일반적으로 적은 양의 화약을 여러개 사용하는 것이 소수의 많은 양을 사용하는 것보다 경제적이고 환경피해가 적게 일어난다.

폭파점은 3m 정도 피복층을 가져야 하며 피복층의 다짐은 실제로 크게 일어나지 않는다. 폭파방법은 넓은 면적에서 중간정도 상대밀도까지 다짐을 하기에 적합하다. 이는 암스테르담(Amsterdam) 항만공사에 적용한 사례가 있다.(Barendsen & Kok, 1983, Smolczyk, 1982, 1983)

## 13. 동결공법

### 13.1 공법개요

땅속에 매설한 동결관동에 의해 흙의 간극수를 일시적으로 동결시켜 지반의 강도 및 차수성을 향상시키고 그 사이에 목적의 공사를 하는 일종의 가설공법이다. 동결공법에는 냉각재의 종류, 열교환의 형식 등에 따라 <그림 21>에 나타난 가스방식(저온액



화 가스방식)과 브라인 방식이 있다.

두 가지 방식 어느 것이 유리할지는 시공목적이나 현장의 사정에 따라 다르지만 일반적으로 시공연장이 짧을 때 가스방식이 유리하다고 한다.

동결공법의 장점은 토질에 관계없이 똑같이 동결할 수 있고 동결토의 강도가 크고, 차수가 완전하며, 시공관리가 용이하고 시공의 신뢰성이 높은 안전시공이 가능한 것 등이다. 한편 단점은 흙의 동결시에 있어서 팽창영향이 주변에 미치는 점, 동결을 제거했을 때 유해한 침하를 생기게 하는 점, 지하수의 유속이 클 때는 동결이 곤란한 점이 있으나 안전성, 확실성이 요구되는 도시내의 굴착공사, 특히, 쉘드공사나 대용량 지하식 LNG 탱크의 건설 등에 적용되고 있다.

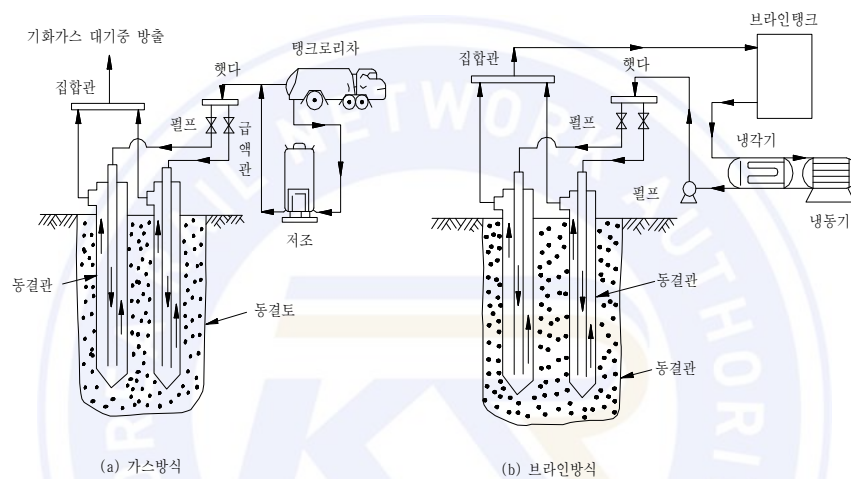


그림 21. 동결공법의 시스템

### 13.2 공법의 특성

동결공법은 터널이나 수직갱 뿐만 아니라 깊은 굴착공간의 안정에도 적용되며 지반의 함수비가 충분하기만 하면 모든 토질에 적용이 가능하다.

동결공법은 주입공법 적용이 문제가 되는 매우 미세한 실트질 지반에서도 적용이 가능하며 동결흡벽은 강성이 있을 뿐만 아니라 가장 확실한 차수벽이 된다. 동결지반의 강성도는 동결온도에 따라 다르며 시간에 따라 변화한다.

동결공법은 다음과 같은 장단점이 있다.

(장점)

- (1) 모든 토질에 적용이 가능하다.
- (2) 동결지반의 강도는 원지반강도의 수배에서 수십배로 대단히 크다.
- (3) 고결범위와 고결정도가 균일하다.
- (4) 동결지반은 차수성이 우수하며, 콘크리트나 암반과의 부착도 완전하고 강하다.
- (5) 동결지반의 자연해동 속도는 5~10mm/day로 늦어서 정진등으로 인한 예기치 않은 사고가 일어나는 일이 적다.

(6) 공사가 완료된 후에 별도의 해체 비용이 들지 않는다.

(단점)

- (1) 간극수가 동결되면 체적이 팽창하여 동결범위내의 지반과 구조물을 밀어 올린다. 반대로 해동되면 지반을 이완시킨다.
- (2) 지하수가 흐르는 경우에는 효율이 떨어지며 유속이 200mm/day 이상인 지반에서는 동결이 불가능하다.
- (3) 일반적으로 동결공법의 공사비는 다른 재래공법보다 비싸다. 따라서 다른 공법으로 는 시공이 곤란한 경우나 공기가 부족한 경우에 한정하여 적용된다.

## 14. 주입공법

### 14.1 공법개요

주입공법은 주사바늘을 사용하여 체내에 주사하는 것처럼 비교적 가는관(주입관이라고 함)을 사용하여 여러 가지의 주입재(그라우트라고 함)를 지반속에 압력을 가하여 넣는 것이다. 그리고 지반속의 간극, 공동, 균열등을 메워서 그 지수성이나 강도증가를 유발시키는 지반개량공법의 하나이며, 다음과 같은 경우에 자주 적용된다.

- (1) 지수 : 기초 또는 지하굴착에 있어서 용수 파이프, 보일링등의 방지, 기초공사에 있어서의 지하수유속 억제, 누수방지
  - (2) 지반강화 : 기초 또는 지하굴착에 있어서의 붕괴방지, 기초지반의 지지력증가, 교대 등의 횡토압 구조물에 가중되는 토압의 저감
  - (3) 변상방지 : 굴착지반 부근의 기설구조물의 방호, 기초구조물의 보강
- 일반적인 그라우트의 주입제 종류는 <그림 22>와 같이 구분한다.

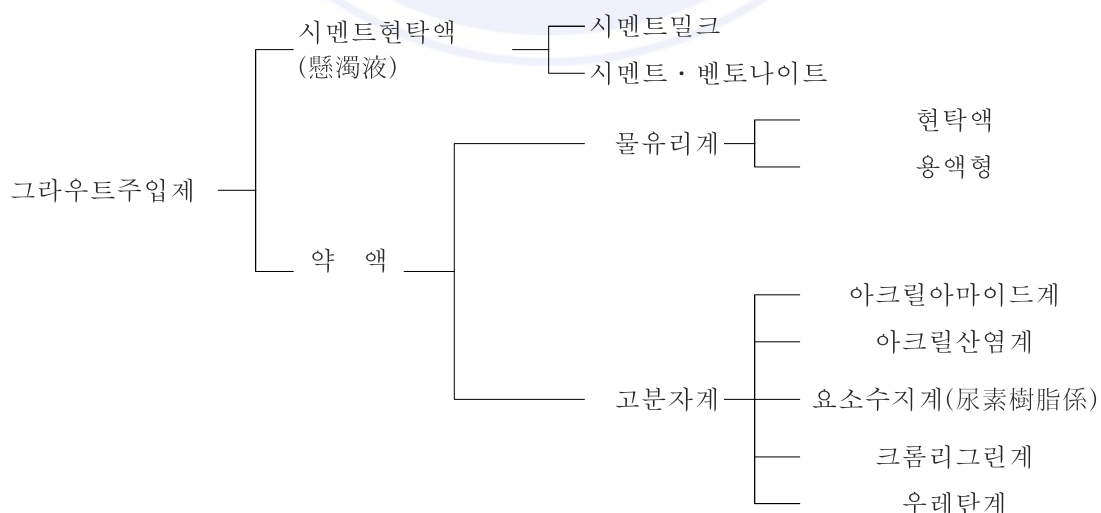


그림 22. 그라우트 주입제의 종류



시멘트나 벤토나이트는 입자구조이기 때문에 이것을 세립토에 주입하는 것은 불가능에 가깝고 고결시간을 자유롭게 조절할 수도 없다. 약액을 이용하면 이들의 결점을 제거하고 세립의 지반에도 적용할 수 있지만 약액에 따라서는 지하수 오염의 염려가 있어 약액은 주재료가 케이션 나트륨인 불유리계로, 극물 또는 불소화합물을 포함하지 않는 것으로 제한되고 있다.

## 14.2 주입공법의 시공

### 14.2.1 주입압

주입제의 점성은 시간에 따라 서서히 증가하고 응결시간이 가까워질수록 점성이 커져서 주입이 어려워지므로 주입중에 점차 주입압을 올려야 한다. 그러나 주입압이 과다하면 국부적으로 지반파괴가 일어나서 약액이 지표로 흘러나오는 통로가 형성된다. 주입압은 대체적으로 깊이 1m에 대하여  $9.8 \sim 19.6 \text{ kN/m}^2$ 까지로 한다.

주입제의 응결시간이 너무 짧으면 주입관이 막히든가 예정범위까지 균일하게 주입되지 않고 반대로 너무 길면 예정 외의 범위까지 약액이 침투한다.

### 14.2.2 주입방법

재료를 주입하기 위한 주입관은 천공하거나, 타설 또는 워터제팅(Water Jetting)으로 원하는 깊이까지 삽입한다. 주입제를 효과적으로 주입하기 위해서는 다음과 같은 방법이 적용된다.

#### (1) 반복주입

지반이 불균질하여 투수계수에 변화가 있는 경우에는, 먼저 점성이 비교적 큰 주입제를 주입하여 처리한 후에 점성이 작은 주입제를 다른 주입공에서 반복 주입한다.

#### (2) 단계주입

지반은 깊이에 따라 투수계수와 간극수압이 다르다. 따라서 개량할 지반을 깊이에 따라 여러 구간으로 나누고 각각의 지반에 따라 조건을 달리하여 주입한다. 목적하는 심도까지 보링한 후에 파이프를 빼올리면서 주입하면 경제적이긴 하지만 때에 따라서 약액이 파이프를 통하여 분출할 때가 있다. 그러므로 일반적으로 안전하게 주입하려면 지표에서부터 하부로 차례로 보링하고 주입하는 과정으로 단계 주입한다.

#### (3) 유도주입

균질한 지반에서는 약액이 방사상으로 흐르지만 투수성이 큰 방향이 있으면 그 방향으로 흐름이 집중된다. 주입시 약액의 흐름방향을 인위적으로 규제하거나 주입을 쉽게 하기 위하여 웰 포인트나 전기침투 등의 도움을 빌리는 경우가 있는데 이를 유도주입이라 한다.

### 14.2.3 주입후의 관리

약액주입은 불확실한 요소가 많으므로 원하는 범위에 충분하고 균일하게 시공되었는지 확인할 필요가 있다. 그러므로 시공 후에 가능한 한 많은 보링이나 사운딩을 실시

시하여 주입성과를 확인해야 한다.

## 15. 생석회말뚝공법

### 15.1 공법개요

생석회말뚝공법(Chemico Pile)은 생석회가 물을 흡수하면 발열반응을 일으켜 소석회가 되며, 이때에 그 체적이 2배로 팽창하는 원리를 이용하여 연약점성토중에 생석회의 말뚝을 박아 지반을 개량하는 공법을 말한다.

생석회기둥은 주위의 지반에서 수분을 쉽게 탈취하여 체적이 커지면서 지반을 수평으로 압축하여 물의 탈수를 용이하게 하며 이 과정에서 지반의 압밀을 촉진시켜 강도를 증가시킨다. 이때의 반응은 발열반응이므로 지반을 건조시키는 효과도 있다. 또한 지반과 석회의 접촉부분에서는 특정한 점토광물이 석회와 화학반응하여 탄산칼슘 등을 형성하므로 지반의 강도가 한층 더 증가한다.

생석회말뚝공법은 침투압공법과 같은 탈수효과, 소결공법과 같은 건조 및 화학반응효과, 프리로딩 공법에 유사한 압축효과 등을 동시에 가지며, 지반개량공법으로는 역사가 짧지만 장래 유망한 개량공법이다.

### 15.2 공법의 특징

#### 15.2.1 흡수

생석회의 화학반응에 필요한 물은 생석회 중량의 0.23배, 실제적비로 1.09배 정도이다. 반응 후의 석회는 함수비가 영(Zero)으로 수분을 빨아들이는 힘(Suction)이 커서 점성토 중의 수분이 석회기둥 쪽으로 이동한다. 석회기둥이 흡수하는 수량은 모세관 흡수량이라 하며, 근사적으로 석회기둥이 포화되는데 필요한 수량으로 간주한다.

#### 15.2.2 발열

생석회가 물을 흡수하여 소석회가 되는 반응은 발열반응으로 발열량은 생석회 1kg 당 279kcal이며, 발열량의 일부는 지반의 온도상승에 소비되고 전도, 복사, 대류 등에 의해서 소산되며, 일부는 물의 증발을 촉진하여 건조효과를 나타낸다. 물의 증발에 기여하는 유효열량의 크기는 지반개량구역의 크기와 온도 등에 의해 영향을 받으나 잘 알려져 있지 않다. 그러나 보통 석회기둥에 근접한 일부 주변지반에만 열이 가해지며 전체적으로는 그다지 기대할 수 없다.

#### 15.2.3 팽창

석회기둥은 반응 후 체적이 팽창하여 팽창한 체적의 일부는 지반을 전단변형 시켜서 허병 등을 발생시키지만 대부분의 팽창체적은 지반을 횡방향으로 압축 탈수시켜서 점성토의 압밀을 촉진시킨다. 그러나 석회기둥은 지반의 탈수-건조 효과가 크며 팽창효과는 보조적 역할을 할 때가 많다.





#### 15.2.4 화학변화

석회화 점토광물과 일으키는 화학변화는 점토광물의 종류에 따라 다르며, 시간적으로 반드시 빠르지는 않지만 지반의 강도 증가효과가 탈수-건조효과에 비해 훨씬 크고 일축압축강도가 980~2,940kN/m<sup>2</sup> 될 경우가 있다. 그러나 이 반응은 석회와 점성토가 서로 접하는 약 0.5m정도의 주변영역에 한정된다. 그러나 발열량이 커서(최고 400℃) 오히려 시공상의 문제가 발생될 때가 많으며 생석회가 인체에 유해하므로 특히 호흡기와 신체접촉에 주의하여 취급해야 한다.

생석회말뚝공법에서는 탈수에 의하여 지반이 수축하는 대신에 석회말뚝이 팽창하므로 다른 개량공법에서와 같은 심한 침하는 일어나지 않는다. 또한 생석회말뚝이 말뚝의 효과도 갖기 때문에 응력이 말뚝에 집중되어서 점성토지반의 침하가 상당히 경감된다.

### 16. 침투압공법

#### 16.1 공법의 개요

침투압공법은 함수비가 큰 연약점토층에 반투막이 있는 중공원통을 삽입하고 그 속에 농도가 큰 용액을 넣어서 침투현상을 이용하여 점성토 중의 수분을 빨아내는 방법이다. 반투막은 물분자는 통과시키지만 용질은 통과시키지 않으므로 지반내 물만이 용액층으로 흡수되어 지반의 함수비가 작아진다. 이러한 침투현상을 이용하여 지반내 물을 배수하는 방법을 침투압공법이라 하고 이때의 수두차를 침투압이라 한다.

#### 16.2 공법의 특징

침투압은 상재하중에 해당하며, 용액의 농도로 그 크기를 조절할 수 있다. 또한 침투압은 용액의 종류와 농도 및 온도에 따라 변하지만 혼한 수용액으로 큰 압력을 간단히 만들 수도 있다. 이 공법은 침투현상을 이용하지만 점성토중에 물을 배수하여 체적을 감소시키고 강도를 증가시키는 원리는 샌드드레인 공법과 같으며, 대기압공법이나 웰포인트공법과 같이 상재하중을 사용하지 않고서 간극수압을 작게하고 유효하중을 증가시켜서 압밀을 촉진시키는 공법이다.

침투압공법은 상재하중이 필요하지 않으므로 두께 1m 정도의 모래매트 설치도 어려운 극히 연약한 지반에서도 비교적 쉽게 시공할 수 있고, 성토에 수반되는 안정성 문제가 없다. 용액이 물을 흡수하여 농도가 낮아지면 흡수효과가 저하되므로 지속적으로 용질의 보급이 필요하다.

##### 16.2.1 반투막

반투막은 용질의 분자를 통과시키지 않아야 하므로 투수성이 작고 매우 얇아야 하



며, 또 부분적으로도 파손되어서는 안되므로 잘 보호해야 한다. 보통 폴리비닐알코올의 반투막을 두꺼운 섬유 사이에 삽입하고 나선모양으로 감아서 중공원통을 만든다. 중공원통은 직경이 클수록 흡과 접하는 면적이 넓어서 유리하지만 체적과 타설관계상 보통 0.25m 정도로 한다.

중공원통은 보통 1.25m 간격의 정삼각형 배치를 하며 시공 깊이는 클수록 유효하중이 커져서 유리하지만 현재는 3m 정도의 시공이 가능하므로 침투압공법은 대개 표층의 개량에 적용된다.

#### 16.2.2 용액

용액은 물에 녹기 쉽고 분자의 크기가 크며 침투압이 큰 것이면 무엇이랄도 좋고, 펄프나 섬유 공법의 폐액 등을 이용할 수 있다. 생망초( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) 등과 같은 공장 폐액을 이용하면 경제적이다. 특히 생망초 등과 같은 결정질 고체는 취급이 편리하고 효과적이다.

#### 16.2.3 투과수량

반투막에 의한 물의 흡수량은 투과속도, 즉 침투압의 크기에 비례한다. 침투압은 일반적으로 극히 크며 용액의 농도와 절대 온도에 비례한다. 그러나 전 침투압이 그대로 유효하중으로 작용되지는 않으며 토피압(충중량)에서 증기압을 뺀 것이 이론적인 한계값이다. 토피압이 없는 지표면이나 실험실에서는  $100\text{kN/m}^2$  정도가 한도이다.



## RECORD HISTORY

Rev.0('12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.

