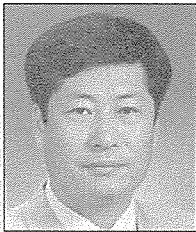


기성연직배수공법의 합리적 설계와 시공



선진엔지니어링(주)

전무 이춘석

1. 기성연직배수공법

연약지반 개량공법(Ground improvement, Ground modification)은 원리에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) 지하수저하 : Well point, Deep well
- 2) 탈수(배수축진) : Sand drain, Plastic board drain, Sand pack drain, Menard drain, 생석회 말뚝, 전기 침투, 쇄석기등 등
- 3) 다짐 : Sand compaction pile, Vibrofloatation, 둥다짐, 쇄석기등, 유압해머다짐, Resonance compaction, 표층다짐등
- 4) 재하 : Preloading, 원속재하, 압성토, 경량성토, 진공 압밀 등
- 5) 고결 : 약액주입, 천층혼합처리, 심층혼합처리, 고압분사, 동결 등
- 6) 치환 : 굴착, 강제치환, Compaction grouting system, 동치환 등
- 7) 보강등 : 토목섬유, pile cap, sand mat 등

연약점성토를 대상으로 토공구조물 등에 많이 사용되는 방법중의 하나가 탈수원리에 의한 공법이며 그 중에서 공장제작 즉, 기성작품을 이용하는 연직배수공법을 기성연직배수공법이라 할 수 있다. 기성연직배수공법을 대상으로 설계와 시공시 고려사항 및 유의해야 할 점을 기술하면 다음과 같다.

2. 설계단계

2.1 지반조사

구조물기초 설계기준해설(2003. 건설교통부제정), 지반공학시리즈 "지반조사결과의 해석 및 이용" (2003, 한국지반공학회)등을 참조하여 현장조사, 현장시험과 실내



시험을 계획한다.

시추조사와 Vane, Dutch cone 관입시험, Piezo cone 관입시험, Dilatometer등의 정적Sounding을 시행하여 연약지반을 포함한 지층구성의 평면적 범위와 깊이분포를 파악하며 3~5m 간격으로 불교란 시료를 채취하여 지반의 물리적, 역학적 특성이 파악되도록 한다. 일반적으로 물리적 시험은 함수비, 비중, 액성한계, 소성한계, 입도분석이며 역학적 시험은 일축압축, 삼축압축(UU, CU), 압밀시험으로 필요시 공진주시험등 내진관련시험을 추가할 수 있으며 중요한 것은 심도별로 지반의 토질정수(Soil parameter)가 결정되도록 한다.

현장시험은 Sounding에 의한 값은 실내시험과의 대비가 되어야하며 또한 대비하므로써 시공시 개량확인 등 유효한 자료가 될 수 있다.

연직배수설계시 원칙적으로 수평방향 압밀계수의 파악이 필요하며 피조콘관입시험에 의한 소산시험, Rowe cell 압밀시험, 보통의 방법으로 채취된 시료를 90° 회전하여 압밀시험으로 구할 수 있다.

2.2 Smear effect, Well resistance 고려

연직배수재 타설시 주변지반이 교란되는데 이 교란범위를 smear zone이라하며 타설직경의 3~4배가 일반적으로 발생하고 교란의 영향으로 투수성이 감소하는 현상을 smear effect라 한다. 또한, Well resistance는 연직배수재의 방사선 방향 즉, 수평방향으로만의 투수성을 고려하고 연직방향의 배수성은 충분하다고 설정할 때 실제 현장에서는 간극수가 배수재를 통해 배출되는데 저항을 받게되는 것이다.

따라서, 이들의 영향으로 압밀이 지연되는 현상이 발생하게 되며 일례로 OO현장에서 6개월 방치기간의 목표로 개량을 계획했는데 1년이 지나도 목표치에 도달되지 못하

였다. 물론 압밀지연의 여러영향이 있으나 이들의 영향도 충분히 관여되었다고 판단할 수 있다. 다음은 smear effect와 Well resistance을 설계시 고려하는 방법들이다.

가. Hansbo 제안식(1981)

$$(1) U_h = 1 - \exp^{-87t/\mu_{sw}}$$

여기서, U_h : 임의의 깊이와 시간계수에 대한 압밀도

$$T_h : \text{시간계수 } (\frac{C_h \cdot t}{d_e^2}),$$

C_h : 수평방향 압밀계수

t : 압밀시간, d_e : 영향원직경,

μ_{sw} : 압밀속도 영향인자

μ_{sw} = 타설간격 영향 + smear 영향 + Well저항영향

$$= (\ln \frac{d_e}{d_w} - 0.75) + (\frac{K_h}{K_s} \ln \frac{d_s}{d_w}) + (\pi Z(2H-Z) \frac{K_h}{q_w})$$

여기서, d_e : 영향원직경 (정4각형배치 $d_e = 1.128d$,

정3각형배치 $d_e = 1.05d$, d : 배수재간격)

d_w : 배수재직경,

K_h : 연약층의 수평투수계수

K_s : 연약층의 smear zone 투수계수

d_s : smear zone의 직경, Z : 임의의 깊이

H : 연약층 두께, q_w : 배수재 통수능력

(2) K_s, d_s 결정

① 현장시험을 통하여 교란범위와 투수계수를 구함.

② 개략범위

① 교란범위: 멘드릴 직경의 3-4배

① 투수계수(K_s) = ($\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$) 불교란시료 투수계수

(3) 배수재 통수능력(Delft 시험기준)

① 배수재 주위를 고무 멤브레인으로 감쌘

② 멤브레인사이에 점토 채움

③ 타설심도 횡압의 2배를 축압으로 적용

④ 시험은 직립조건과 20% 자유변형에 대해 실시

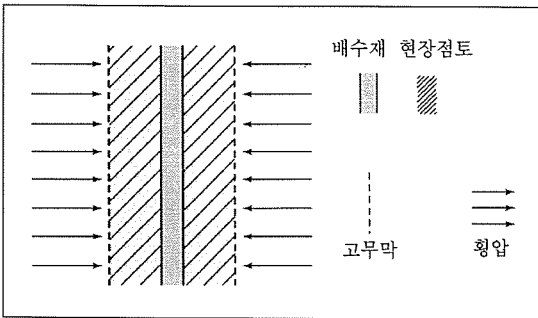


그림 1.

나. 수직방향 압밀계수 사용방법
(Smear 영향만 고려)

(1) 성립배경

- ① $C_h = (2\sim 10) C_v$ 임.
- ② 교란된 $C_h \approx$ 불교란된 C_v

(2) 방법

- ① Hansbo 제안식의 μ_{sw} 계산시 smear 영향 무시
- ② 시간계수 적용시 $C_h = C_v$ 로 하며 $T_h = (\frac{C_v \cdot t}{d_e^2})$ 로 함.

다. Yoshikuni (1979) 방법

(1) well저항에 대한 근사적 대책

(2) 방법

① $U_h = 1 - \exp(-8T_h/(F+L))$

여기서, F : 타설간격 영향계수 ($\ln \frac{d_e}{d_w} - 0.75$)

L : well 저항 영향계수 ($\frac{3\ell}{\pi} \frac{K_h}{K_w} (\frac{\ell}{d_w})^2$)

ℓ : 배수재 길이

K_w : 배수재의 투수계수

라. Oneue(1988)방법

(1) 교란영향과 배수저항 영향 고려함

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

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

$n' = n S^{n+1}, n = \frac{d_e}{d_w}, \eta = \frac{K_h}{K_s}, S = \frac{d_w}{d_s}$

L : Yoshikuni식과 같음

마. 연직압밀계수 감소방법(일본의 시공사례 근거)

Smear 영향과 Well 저항을 고려하여 $C_h = (\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}) C_v$ 로 적용함.

2.3 배수재길이와 간격결정

배수재 길이는 연약지반깊이, 발생침하량, 허용잔류침하량, 타설기계의 능력등을 감안하여야 하고, 배치간격은 공사기간의 공정으로부터 개량기간을 설정하고 소요압밀도에 따라 결정한다.

2.4 장비주행성과 Sand mat두께

일반적으로 사용하는 토목섬유와 Sand mat포설을 중심으로 기술하고자 하며 토목섬유는 연약점토와 Sand mat의 분리, 균등침하유도, 표층부 보강에 의한 주행성(Trafficability)확보 기능이고, Sand mat는 간극수배제, 주행성 확보, 장래지하수 상승 억제기능이 있으며, Sand mat포설두께는 다음으로 결정할 수 있다.

가. 배수기능 확보

$Q = L \cdot S = K \cdot i \cdot A = \frac{K \cdot \Delta h \cdot h}{L}$

$\Delta h = \frac{L^2 \cdot S}{K \cdot h}$



여기서, Q : 침하에 의한 배수량
 L : Sand Mat의 배수거리
 S : 침하속도 평균치
 K : Sand Mat 투수계수
 i : 동수구배 ($\Delta h/L$)
 A : 통수면적
 h : Sand Mat 두께
 Δh : Sand Mat내 수위

① $K = 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ (864cm/일)인 경우

$$\Delta h = \frac{1,650^2 \times 0.35}{864 \times 50} = 22\text{cm}$$

($L = 1,650\text{cm}, S = 0.35\text{cm/일}$ 가정)

② $K = 5 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ (432cm/일)인 경우

$$\Delta h = \frac{1,650^2 \times 0.35}{432 \times 50} = 44\text{cm}$$

침하진행중 Sand Mat에 변형이 발생치 않는다는 가정 하에 계산된 Δh 가 h 보다 작게 산정되는 경우 배수기능

적 측면의 적정 Sand Mat 포설두께가 확보된 것으로 볼 수 있다.

나. 주행성확보

(1) 경험적인 값

사용장비 접지압과 표층부 콘지수에 따라 50~100cm 정도(표 1참조).

(2) Sand Mat 두께(토목섬유 미포설)

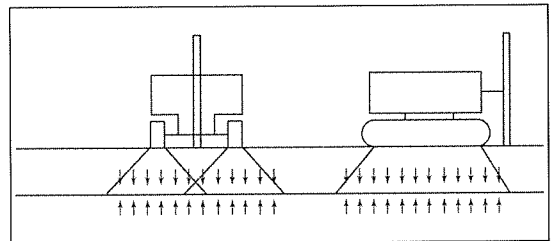


그림 2.

$$F_s = q_d/q \geq 1.5$$

$$q_d = C \cdot N_c + \gamma_t \cdot D_f$$

$$q = q_B + q_M$$

표 1. 토공기계의 접지압에 따른 모래층의 포설두께

항 목		모래층 두께 (cm)	비 고
(i) 사용토공 기계중의 최대접지압(kgf/cm ²)	0.7 이하	50	(i), (ii)의 조건고려 결정함
	0.7 ~ 1.0	50 ~ 80	
	1.0 ~ 1.5	80 ~ 120	
	1.5 ~ 2.5	120 ~ 150	
	2.5 이상	150 이상	
(ii) 연약층표면의 콘지수 q_c (kgf/cm ²)	2.0 이상	50	
	2.0 ~ 1.0	50 ~ 80	
	1.0 ~ 0.75	80 ~ 120	
	0.75 ~ 0.5	120 ~ 150	
	0.5 이하	150 이상	

여기서, q_d : 지지력 (tonf/m²)

q : 상재하중 (tonf/m²)

C : 원지반 점착력 (tonf/m²)

q_B : 성토하중 (tonf/m²)

N_c : 지지력 계수 (Terzaghi, $N_c = 5.7$)

γ_t : 단위중량, D_f : Sand Mat 두께

q_M : 장비하중 = $W(1+i)/(D' \cdot L')$ (tonf/m²)

W : 장비하중 (tonf) i : 충격계수 (0.2)

D', L' : 45° 분산에 의한 재하중 폭, 길이

참고: 土と基礎, Vol.42 No.1 p67, 일본토질공학회

예: 장비중량: 55 t, 접지폭: 0.9m, 접지길이: 3.8m,
점착력: $C = 2$ tonf/m², Sand Mat 두께: 50cm

$$q_d = 2 \times 5.7 + 1.8 \times 0.5 = 12.3 \text{ tonf/m}^2$$

$$q = q_B + q_M = 1.8 \times 0.5 + \frac{55 \times 1.2}{(0.9+1)(3.8+1)} = 8.14 \text{ tonf/m}^2$$

$$\therefore \text{안전율} \frac{12.3}{8.14} = 1.51 > 1.5$$

(3) Sand Mat 두께(토목섬유포설)

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

여기서, b : 접지폭 (0.9m)

P : 접지압 $55 \div (0.9 \times 3.8 \times 2) = 8.04 \text{ tonf/m}^2$

[충격고려: $8.04 \times 1.2 = 9.65 \text{ tonf/m}^2$]

F_s : 1.5 c : 점착력 2 tonf/m²

T : MAT 인장력 5 tonf/m²

→ 2.5 tonf/m² 적용

θ : 20° 가정 (접선각)

$$\text{예: } d = 0.9 \left(\frac{9.65 \times 1.5}{5.3 \times 2 + (2 \times 2.5 \cdot \sin 20 / 0.9)} - 1 \right) = 14 \text{cm}$$

3. 시공단계

3.1 재료

- (1) 타설시 손상이 발생되지 않게 적당한 인장강도가 필요함.(50~100kgf)
- (2) 타설심도에 상응하는 횡압(Lateral pressure)에 대해 통수능력이 확보되어야 함.
- (3) 압밀진행에 따른 변형 발생시에도 통수능력의 확보가 필요함.
- (4) 세립자 이동으로 filter에 clogging(구멍막힘현상)이 생겨도 적정투수성의 확보가 필요함.
- (5) 지중의 박테리아등 미생물에 의한 손상이 적어야 함.
- (6) 보관시 건조, 통풍이 잘되는 곳에 보관하고 우수, 대기중 장기간 노출이 되지 않게 함.

3.2 준비

- (1) 지표를 평탄하게 정지하고 돌, 이물질은 제거하고 평편도는 2% 이하로 함.
- (2) 저면 매트는 연약토와 Sand mat 분리, 장비주행성 확보, 균등침하유도의 기능이므로 시공장비, Sand mat, 연약층의 표층전단강도를 고려한 인장력의 재료를 선정함.
- (3) 저면매트는 이음부 접합이 잘되어 중기작업시 용기, 찢어짐이 발생되지 않게 함.
- (4) Sand mat는 간극수배수, 지하수상승억제, 저면매트와 함께 초기 trafficability 확보의 기능이므로 시공장비 접지압, 배수량, 저면 매트 연약층의 전단강도를 고려해서 두께가 결정되어야 함.
- (5) 저면 토목섬유 포설후 가급적 조기에 샌드매트를 포설하여 저면토목섬유를 노출로부터 보호함.
- (6) Sand mat는 75 μ m제 통과량 15%이하, 투수계수 $1 \times$



10⁻³cm/sec 이상인 재료로 고성토인 경우 다짐으로 투수성이 감소되므로 하중조건에 따라 투수성 확보가 되어함.

- (7) 배수가 원활하지 못할 경우 Sand mat 내에 유공판 등을 5~20m 간격으로 포설계획함.
- (8) Sand mat는 두께가 일정이상 되어야하고 연속된 층을 형성함이 매우 중요하고 점토가 혼입되지 않도록 함.

3.3 PDB 타설

- (1) 타설시 교란이 최소화되도록 해야하고 맨드릴 이용을 하고 형태는 원형보다 사각형, 마름모꼴을 사용함.
- (2) 맨드릴식은 장비규모가 커짐을 감안하여 표층보강 처리가 되어야함.
- (4) 표층이 견고하거나 자갈등이 혼재한 경우는 무리하게 타입하지 말고 Auger boring으로 굴착후 타입함.
- (5) 연직도 유지가 중요하여 진동식보다 정적유압식이

교란에 유리함.

- (6) 타입자동기록장치로 위치, 깊이, 타설속도 등을 유 지관리함.

3.4 성토, 계측, 지반개량 확인

- (1) 성토는 수평으로 균등성토하며 용기, 함몰, 측방유동 등에 유의하여 시공함.
- (2) 연약지반 계측과 관련된 침하판, 층별침하계, 간극수압계, 지하수위계, 경사계 등을 매설하고 시공초기에는 빈도를 높이고 지반의 안정추세에 따라 빈도를 낮추어 시행함.
- (3) 고성토인 경우 선행재하시 침하량이 커 성토하부가 지하수위 아래에 있게되므로 단위중량 감소됨을 고려해 추가성토여부를 고려해야 함.
- (4) 침하량, 시간분석, 시추조사, 실내시험, Sounding 등으로 개량목표 확인을 하며 Sounding이용시 실내시험과 대비가 필요함.

[참고문헌]

1. 김상규(1995), 밴드드레인의 품질과 연약지반 개량효과의 관련, 95가을학술발표논문집, 한국지반공학회, pp1~20
2. 박영목(1995), 플라스틱드레인재의 배수성능에 관한 연구, 95년도 토목섬유학술발표논문집, 국제토목섬유학회한국지부, pp85~94
3. 박윤식, 정경환, 박성재(1998), 플라스틱보드드레인(Plastic Board Drain)의 통수능력 평가에 대한 연구, 98학술발표회논문집(II), 대한토목학회, pp273~276
4. 한국지반공학회(1995), 연약지반
5. 한국지반공학회(1998), 토목섬유 설계 및 시공요령, pp407~470
6. 대한토목학회(1999), 토목기술강좌, 토목시공·지반분야
7. 건설교통부(1996), 도로공사표준시방서, pp56~64
8. 건설교통부(2002), 2002년도 시방서, pp5-1~5-36