

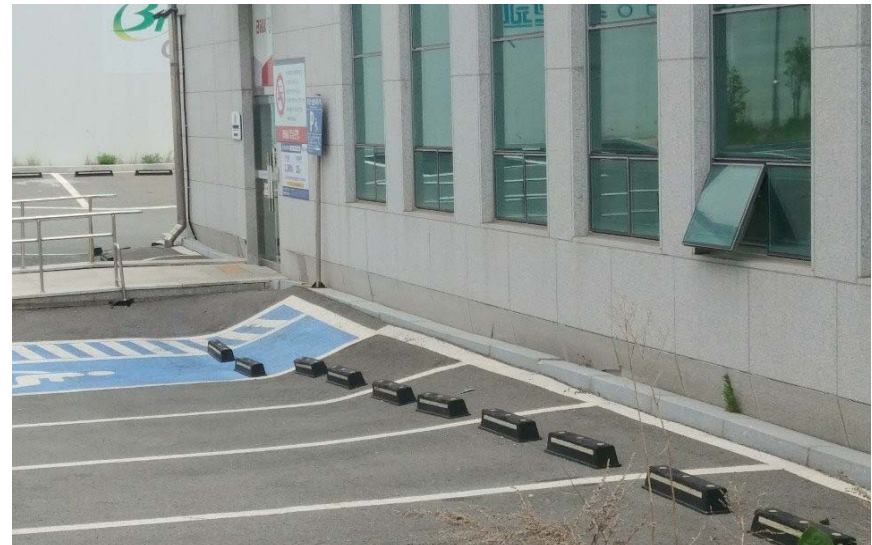


기 초 공 학

조 성 하 (토질 및 기초 기술사)
(shacho88@gmail.com / 010-5351-1751)

제8장 연약지반

연약지반 Soft Ground



8.1 연약지반의 정의

8.1.1 연약지반의 정의와 국내 연약지반의 분포

- 연약지반이란 건물 교량 도로 및 댐 등과 같은 구조물의 하중을 원상태로는 지지할 수 없는 지반을 말하며, 간극비가 큰 실트층이나 점토층, 압축성이 큰 유기질토층, 느슨한 모래층 등을 말함
- 연약지반에서는 구조물의 하중 크기와 점토층의 두께에 따라 예상하지 못한 큰 압밀침하가 유발될 수도 있음.
- 공사 중 전도, 침하 등의 사고 발생
- 연약지반을 대상으로 공사할 때 활동에 대한 안정성과 함께 침하량(압축지수)이 얼마나, 어느 기간 동안 발생하는 가(압밀계수)를 파악하는 것이 중요



(a) 성토사면 활동



(b) 흙막이 변형



(c) 교대측방 유동



(d) 액상화



(e) 파이핑

연약지반에 발생하는 지반공학적 문제 현상

8.1 연약지반의 정의

8.1.1 연약지반의 정의와 국내 연약지반의 분포



부산 괘법동 항타기 전도(2011. 7. 12)



보성 임성리 굴착장비 침하(2016. 3)



부산 명지신도시 도로 침하(2020. 10)

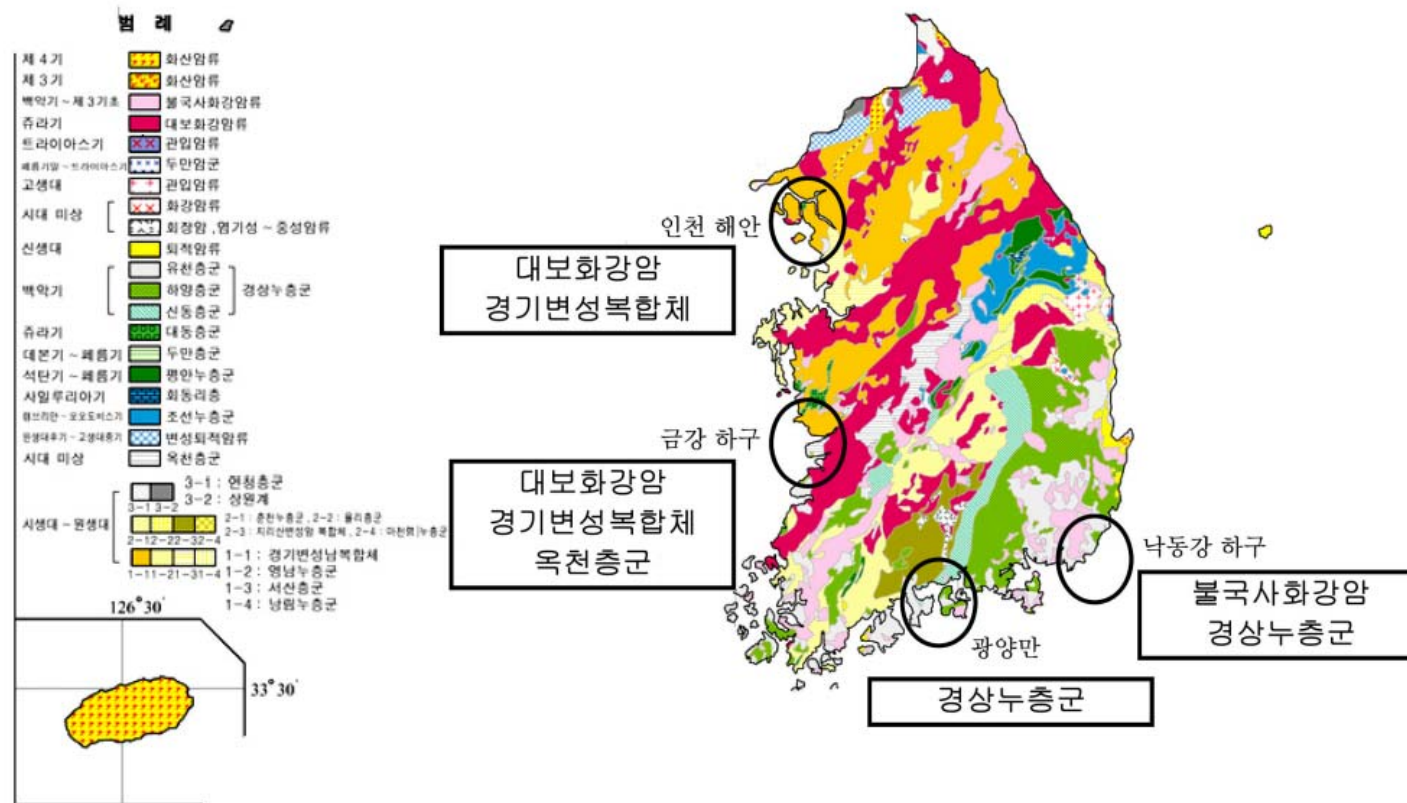


OO산업단지 PBD 장비 전도

8.1 연약지반의 정의

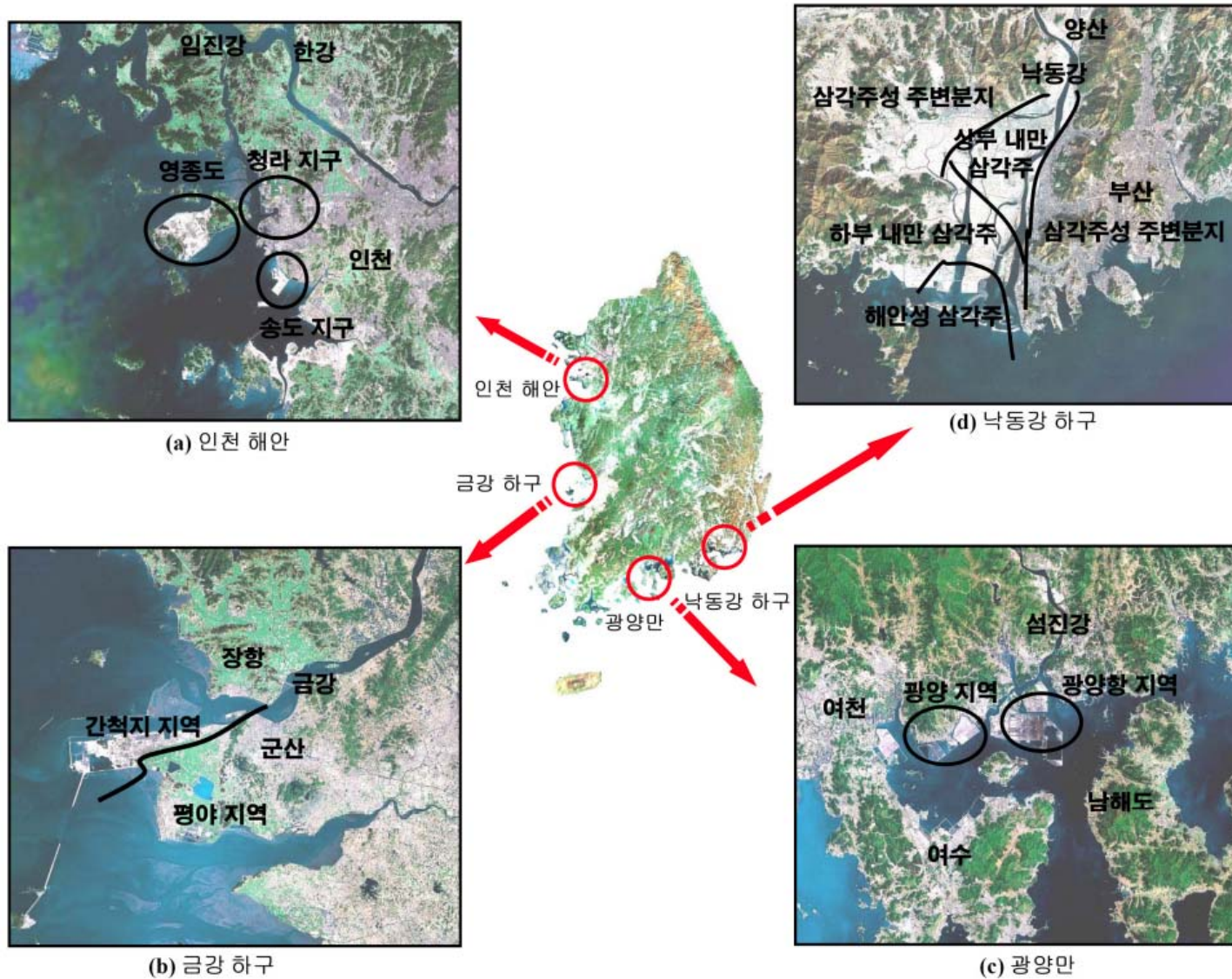
8.1.1 연약지반의 정의와 국내 연약지반의 분포

- 연약지반은 지형적인 특징과 지질환경에 따라 퇴적물의 종류와 특성이 달라짐
- 퇴적의 주요 동력인 하천 유수와 풍화 쇄설물의 종류에 따라 공학적 성질 지배됨
- 주요 하천 하구에 집중적으로 연약지반 형성



8.1 연약지반의 정의

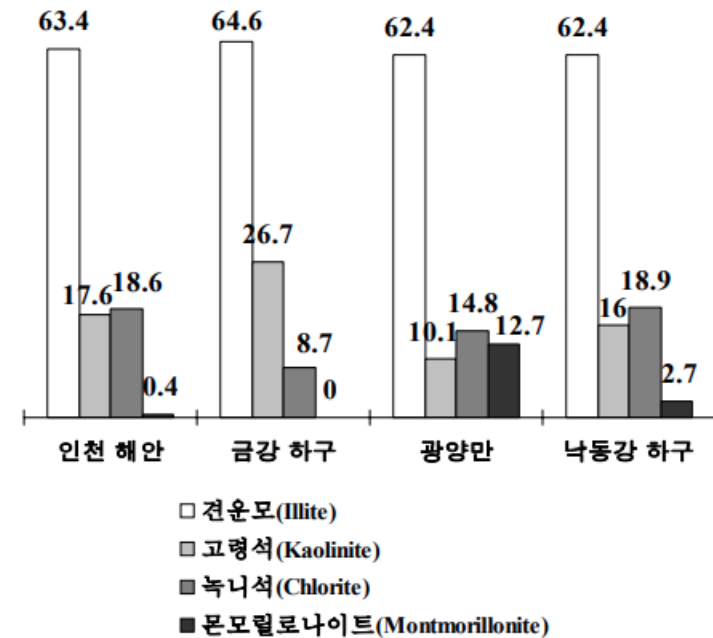
8.1.1 연약지반의 정의와 국내 연약지반의 분포



8.1 연약지반의 정의

8.1.1 연약지반의 정의와 국내 연약지반의 분포

- 점토광물 종류와 구성에 따라 연약지반의 공학적 특성이 달라짐
- 주요 점토광물로는 견운모, 고령석, 녹니석이며 일부 몬모릴로나이트가 함유
- 화강암, 편마암을 기반암으로 하는 지역특성과 중국해 해저퇴적물 유입으로 견운모의 함유량이 큼
- 퇴적암이 우세한 광양만과 낙동강 하구는 몬모릴로나이트의 함유량이 상대적으로 큼
- 화성암이 우세한 인천 해안과 금강 하구는 고령석 함유량이 크게 분포



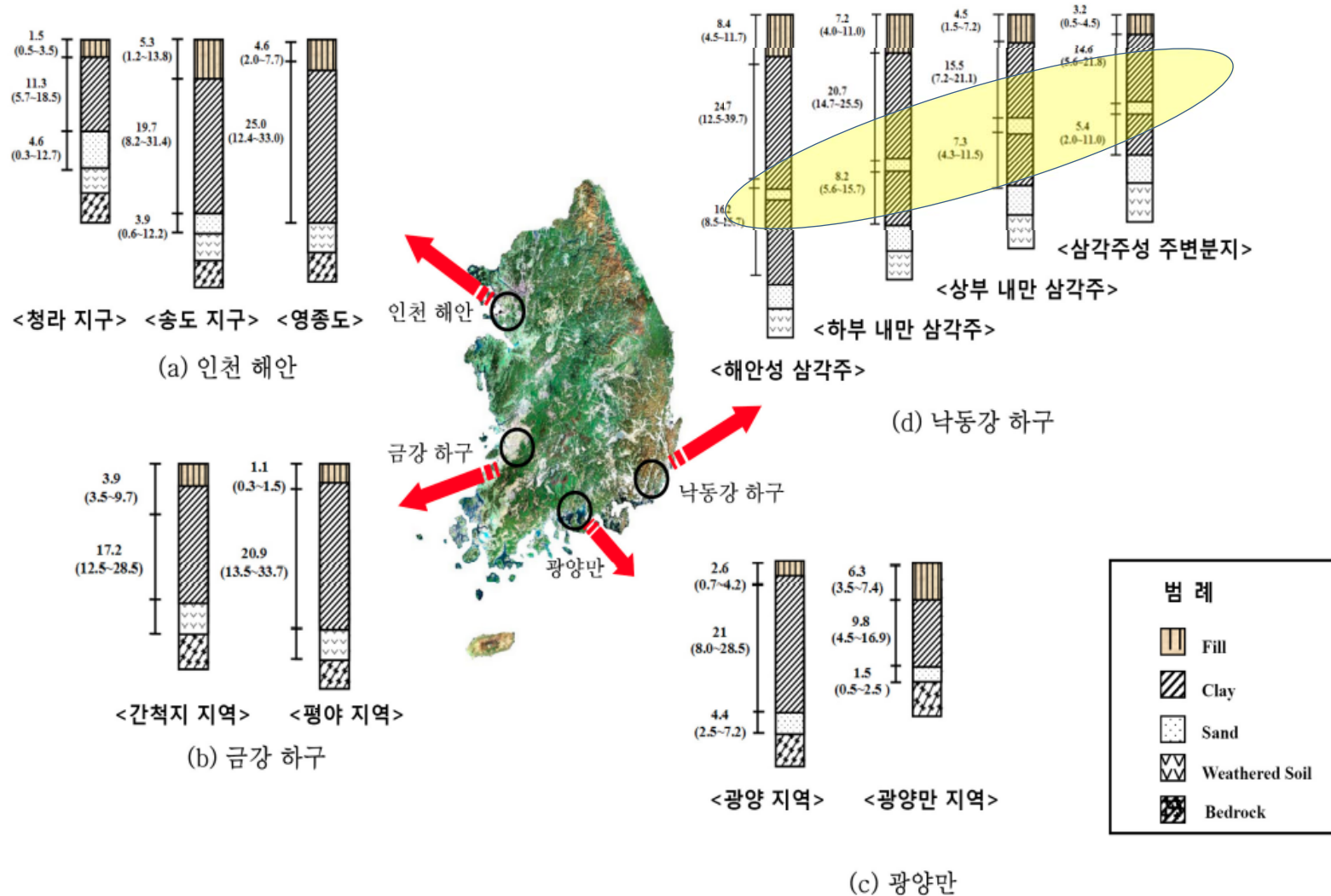
지역별 점토 함유량

8.1 연약지반의 정의

| | 지역 분류 | 점토층 두께(m) | No.200 체 통과량 (%) | US CS | PI (%) | w_n (%) | OCR | C_c | s_u (kg/cm ²) |
|-----------|--------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|--------------------------------|
| 인천 해안 | 청라 지구 | 11.3 (5.7~18.5) | 85.2 | CL, ML | 19.8 (15.4~24.1) | 36 (32.4~40.6) | 1.02 | 0.28 (0.09~0.47) | 0.28 (0.10~0.46) |
| | 송도 지구 | 19.7 (98.2~31.4) | 73.1 | | 13.7 (14.3~25.8) | 32.7 (28.4~37.2) | 0.90 | 0.24 (0.06~0.42) | 0.35 (0.17~0.50) |
| | 영종도 | 25.0 (12.4~33.0) | 83.0 | | 15.1 (4.3~31.0) | 34.9 (21.1~45.3) | 0.78 | 0.27 (0.14~0.40) | 0.21 (0.07~0.41) |
| 금강 하구 | 간척지 지역 | 17.2 (12.5~28.5) | 70.9 | CL, ML | 15.4 (10.8~24.7) | 32.2 (21.1~53.4) | 0.69 | 0.33 (0.13~0.52) | 0.33 (0.07~0.49) |
| | 평야 지역 | 20.9 (13.5~33.7) | 75.6 | | 18.6 (13.7~28.4) | 40.1 (17.5~53.5) | 1.11 | 0.40 (0.18~0.67) | 0.22 (0.09~0.45) |
| 광양 만 | 광양 지역 | 21.0 (8.0~28.5) | 90.4 | CH, CL | 41.6 (20.3~62.8) | 78.5 (48.5~108.6) | 0.79 | 0.89 (0.67~1.28) | 0.22 (0.04~0.49) |
| | 광양항 지역 | 9.8 (4.5~16.9) | 89.4 | | 40.2 (16.9~63.5) | 68.4 (40.7~96.1) | 0.92 | 0.63 (0.41~1.28) | 0.36 (0.03~0.86) |
| 낙동강 하구 | 해안성 삼각주 | 40.9 (21.0~65.4) | 85.4 | CH, CL, ML | 29.3 (14.7~42.4) | 50.0 (28.8~68.9) | 0.78 | 0.62 (0.21~1.64) | 0.33 (0.21~0.45) |
| | 하부 내만 삼각주 | 28.9 (20.3~41.2) | 82.5 | | 27.1 (17.5~38.3) | 39.9 (23.2~58.8) | 0.87 | 0.45 (0.22~1.13) | 0.44 (0.25~0.58) |
| | 상부 내만 삼각주 | 22.8 (11.5~32.6) | 79.8 | | 25.0 (16.3~37.2) | 42.4 (19.2~65.8) | 0.91 | 0.55 (0.26~1.32) | 0.62 (0.33~0.81) |
| | 삼각주성 주변분지 | 20.0 (97.6~31.8) | 88.9 | | 30.0 (17.0~38.3) | 39.3 (24.5~55.8) | 1.25 | 0.65 (0.23~1.33) | 0.32 (0.13~0.42) |

8.1 연약지반의 정의

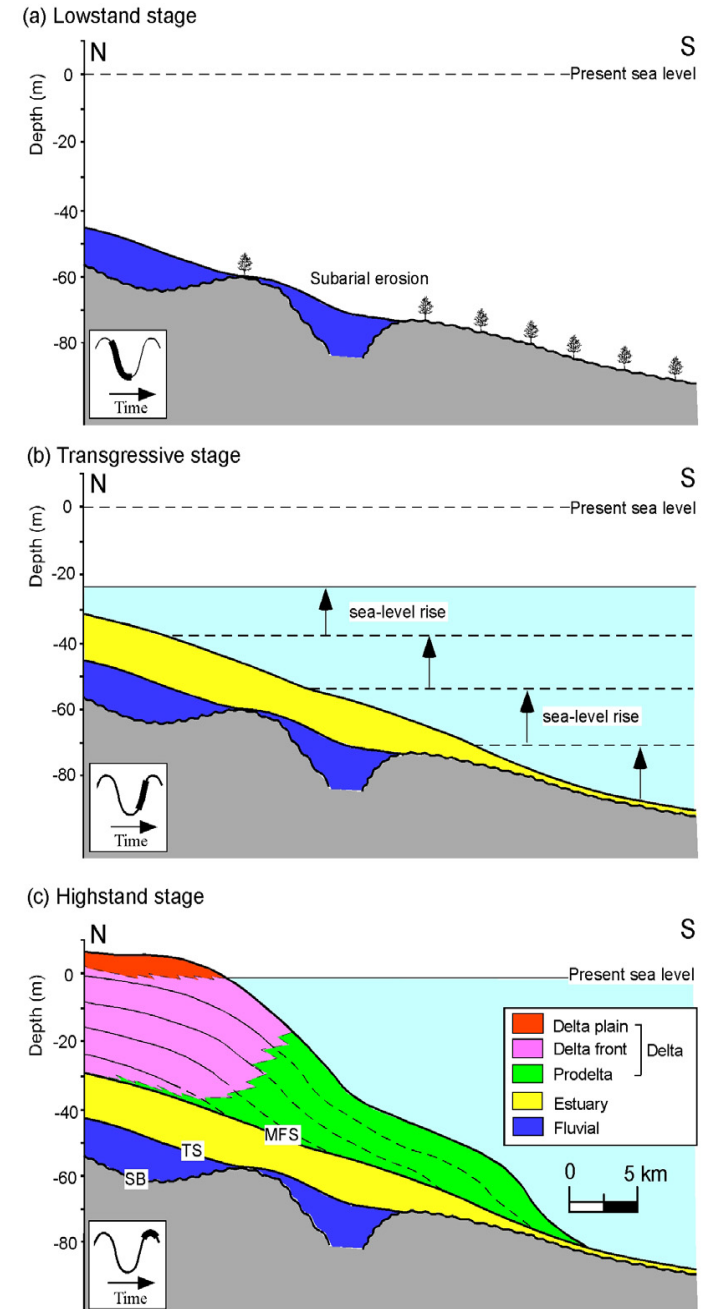
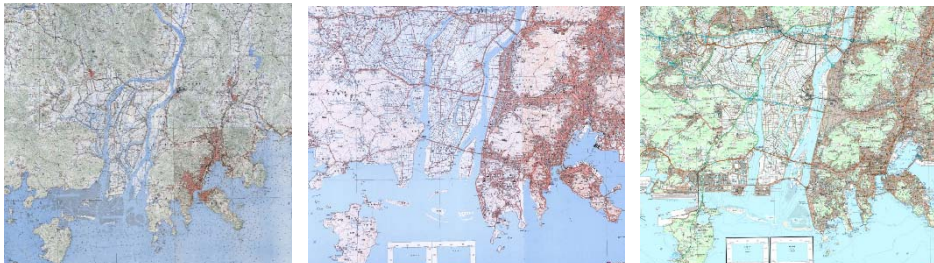
8.1.1 연약지반의 정의와 국내 연약지반의 분포



8.1 연약지반의 정의

낙동강 하구 퇴적 환경

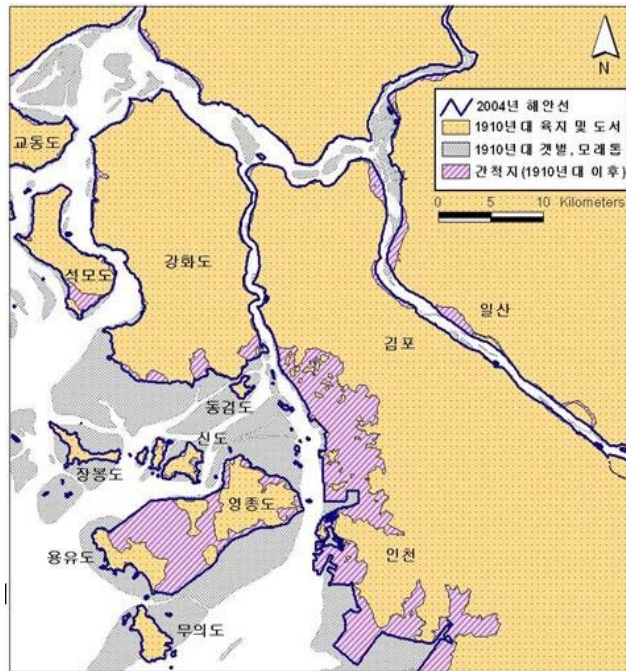
- 녹산, 명지, 부산 신항만 등 지표하 70m까지 연약지반이 분포하는 개발 지역
- 1987년 11월 낙동강 하구둑 공사로 퇴적환경 변화
- 중생대 백악기 화산활동에 의한 안산암 복합체 형성 후 화강암이 관입
- 4개의 퇴적환경으로 구분됨
- 하성퇴적층 - 자갈, 전석을 포함한 무질서한 사질 퇴적, 지점별 기반암선 상이
- 해수면 상승에 의한 점토와 사질토 퇴적이 교호, 렌즈상 사질토 불규칙한 분포
- 6천년 전 현재 해수면에 도달하면서 세립퇴적물이 최상층 연약지반 형성



8.1 연약지반의 정의

인천 경기지역의 연약지반

- 고려시대부터 군량미 확보를 위한 간척사업 시행. 19세기 말까지 인천시 일부는 바다와 갯벌
- 1970년대 후반 중동 건설경기 침체로 철수한 인력과 장비를 활용하여 김포지구 간척사업
- 1978년부터 동아건설-김포간척지, 현대건설-서산간척지 개발
- 청라도를 중심으로 6개의 방조제를 시공하여 내측 연약지반 3800ha를 국토화
- 송도국제도시 1996년부터 매립공사 2005년에 완료, 영종도~용유도를 매립하여 국제공항 건설



인천 지역 해안 간척사업에 따른 지형 변화



김포지구 간척사업

8.1 연약지반의 정의

1985년



2000년





8.1.2 연약지반의 판정기준

- 간극비가 큰 실트, 점토, 유기질토 등이나 표준관입시험 값이 10이하인 느슨한 다짐정도를 갖는 사질토도 연약지반으로 분류할 수 있음
- 정량적으로 구분하기 위해서 일축압축강도와 원위치조사 결과가 자주 이용됨

연약지반 판정기준(KDS 11 30 05 연약지반 설계 일반)

| 구분 | 점성토 및 이탄질 지반 | | 사질토 지반 |
|----------------------|--------------|----------|----------|
| 층두께 | 10m 미만 | 10m 이상 | - |
| N값 | 4 이하 | 6 이하 | 10 이하 |
| $q_u(\text{kN/m}^2)$ | 60 이하 | 100 이하 | - |
| $q_c(\text{kN/m}^2)$ | 800 이하 | 1,200 이하 | 4,000 이하 |

8.1.3 연약지반에서 발생하는 문제들

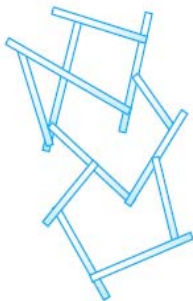
- 연약지반에 구조물을 세우거나 흙쌓기를 하면 기초 지반의 **지지력이 부족**하고 **침하가 크게 유발**됨
- 사질토에서 **지진이나 진동**으로 인해 지반이 **액상화**되어 지지력이 저하되고 급격한 체적감소 현상이 발생
- 점성토 지반에서는 공사용 장비의 **주행이 곤란**하고, 굴착공사에서 **분사현상**이나 **응기현상**이 유발될 가능성이 많아짐



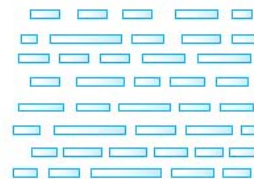
8.2 연약지반 입자 특성 및 지반구조 특성

8.2.1 점토광물 입자의 특성과 지반 구조 특성

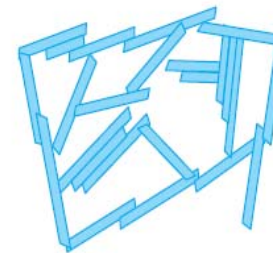
- 입자가 크거나 물속에 많은 양이온이 존재하는 경우에는 입자 주변에 형성된 이중 확산층의 두께가 상대적으로 작으므로 입자간에 작용하는 반발력보다 입자 가장자리의 양전하와 입자 표면의 음전하에 의한 인력이 우세하여 면모구조를 형성함
- 입자가 매우 작거나 물속에 매우 적은 양의 양이온이 존재하는 경우에는 입자 주변에 형성된 이중 확산층의 두께가 매우 두터우므로 입자 간에 작용하는 반발력이 보다 우세하게 되어 서로 평행한 형태의 분산구조를 형성함
- 해수와 같이 양이온 농도가 높은 주변 환경에서 결합된 입자들은 면모구조를 형성할 때와 마찬가지로 입자 표면과 모서리가 서로 전기적인 인장력으로 인해 결합이 쉽게 이루어짐으로써 간극비가 매우 크게 형성되는 엮기성 면모구조를 형성



(a) 면모구조



(b) 분산구조



(c) 엮기성 면모구조

점토광물의 구조

8.2.2 연약지반의 물리적 특성

- 점토광물 입자의 크기가 작을수록 액성한계가 크므로 따라서 지반 내의 점토광물 입자 특성에 따라 조성된 지반의 자연함수비 값이 좌우될 수 있음
- 일반적으로 큰 자연함수비를 가질수록 연약한 지반이며 통일분류법에 의해 분류하면 CH특성을 가지는 지반일수록 연약한 지반특성을 가지게 됨

8.2.3 연약지반의 공학적 거동 특성

- 연약지반은 주어진 하중 변화에 의해 변위가 많이 유발되는 지반으로 정의
- 지반 구조 중에서 입자 간에 상대적인 변위가 크게 유발될 수 있는 간극비가 큰 구조를 가질수록 일반적으로 지반변위가 많이 유발되는 연약지반의 특성을 나타내게 됨
- 형성된 지반이 대부분 입자 간 전기적 힘이 없는 조립토 입자들로 구성된 경우에는 입자 모양이 일반적으로 둥글거나 각진 형태의 모양을 가지게 되며 이와 같은 경우 자연적으로 조성되는 지반구조는 봉소구조가 형성됨
- 상대밀도가 작은 포화된 모래지반이 진동하중을 받는 경우에는 비교적 큰 변위 발생, 점토광물을 포함하는 경우에는 정적하중에서도 큰 변위 유발

8.3 연약지반의 압밀특성

설계 일반사항(KDS 11 30 05)

- 1) 점성토층의 침하특성을 파악하기 위해 토성시험 및 압밀시험 결과로부터 선행압밀하중, 압축 및 재압축지수, 초기간극비, 압밀계수 등을 분석하여야 한다.
- 2) 침하량 계산 시 고려사항
 - ① 일반적으로 점토지반의 즉시침하는 매우 작아서 무시하고 압밀침하는 간극수압의 소산으로 발생하는 1차 압밀침하량과 토립자의 재배치에 의한 이차압축침하량으로 구분하여 계산한다.
 - ② 침하량 계산방법은 현장 계측값과는 다소의 차이가 있을 수 있으므로 시공 시 계측을 통하여 압밀침하를 관리하여야 한다.
 - ③ 허용잔류침하량은 공사목적물에 따라 지반개량공법의 수량 및 지반의 안정, 공사기간에 큰 영향을 미치므로 지반 특성 및 사용목적, 중요도, 공사기간, 경제성 등을 고려하여 결정하여야 한다.

8.3 연약지반의 압밀특성

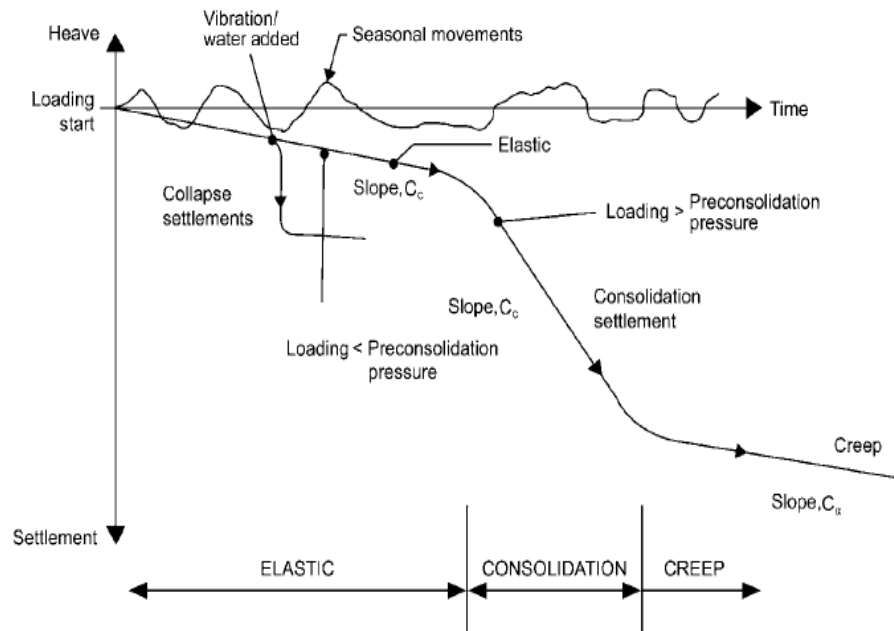
설계 일반사항(KDS 11 30 05)

- 3) 압밀시간은 지반개량공사에 있어서 공사기간을 결정짓는 중요한 요소로 작용하며 이를 예측하기 위해서는 시간에 따른 압밀도를 면밀히 파악하여야 한다.
- 4) 전단강도 특성을 분석하는 데 있어서 다음 사항을 고려하여야 한다.
 - ① 전단강도 특성 분석은 전응력해석과 유효응력해석으로 구분될 수 있으며, 전응력해석 시에는 비배수전단강도를 이용하고, 유효응력해석 시에는 간극수압을 결정하여 해석하여야 한다.
 - ② 연약지반에서는 성토 직후가 가장 위험한 경우이므로 이때를 대상으로 안정성 검토를 수행하여야 한다.
- 5) 압밀에 의한 강도증가율을 산정하는 방법에는 비압밀비배수(UU: Unconsolidated Undrained) 삼축 압축시험 및 일축압축시험 결과의 선형회귀분석에 의한 방법, 압밀비배수(CU: Consolidated Undrained) 삼축압축시험과 경험식을 이용하는 방법 등이 있으므로 이들을 종합하여 사용한다.

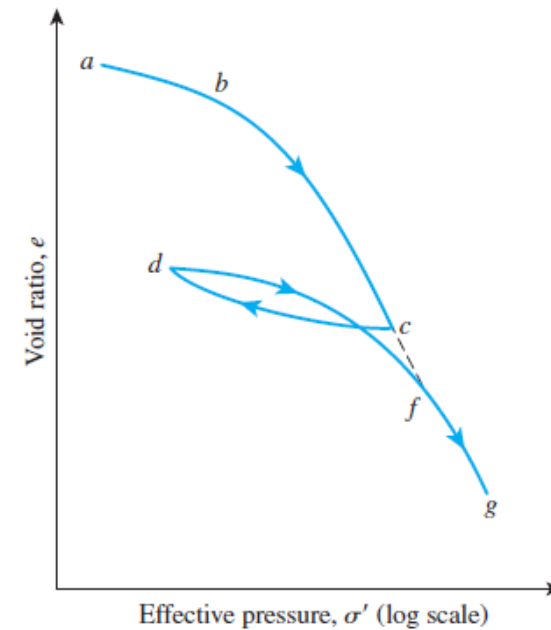
8.3 연약지반의 압밀특성

8.3.1 최종 침하량

- 점토지반 – 최초 탄성침하 후 압밀침하(consolidation settlement)가 수 개월~ 수 년간 침하 지속
- 투수성이 낮은($>10^{-5}$ cm/sec) 점토지반의 과잉간극수압 소산에 따른 압축 변형
- 압밀침하-압축지수(C_c)를 사용하여 침하량 산정
- 압밀 종료 후 흙구조 파괴, 입자 압축, 재배열 등에 의한 2차압밀지수(C_{α})를 사용하여 침하량 산정



세립지반의 기초 침하 발생



압밀시험 간극비-유효압력 관계

8.3.1 최종 침하량

$$S_f = \epsilon H = \frac{\Delta e}{1 + e_o} H = \frac{C_c H}{1 + e_o} \log \frac{p'_o + \Delta p'}{p'_o}$$

여기서 압축지수 C_c 는 점토지반의 특성에 따라 달라지는 계수로 압밀실험에서 얻어진 반대수축(semi-log)의 간극비-하중 관계로부터 구할 수 있음

p'_o 는 점토지반 중간지점에서의 초기 유효응력이고, $\Delta p'$ 은 추가되는 유효응력임

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad (\text{비교란 점토의 경우})$$

$$C_c = 0.007(LL - 10) \quad (\text{교란 점토의 경우})$$

과압밀된 지반의 경우에는 선행압밀하중까지 발생하는 침하량 산정 시에는 팽창지수가 이용되며 이때 팽창지수 C_s 또한 압밀실험에 의해 구할 수 있고 일반적으로 압축지수의 약 1/5~1/10 정도

$$S_f = \frac{C_s}{1 + e_o} H \log \frac{p'_c}{p'_o} + \frac{C_c H}{1 + e_o} \log \frac{p'_f}{p'_c}$$

여기서 p'_c 는 선행압밀하중이고 p'_f 는 최종단계에서의 유효응력임

8.3.2 Terzaghi의 압밀 이론

● Terzaghi는 다음과 같은 기본 가정 하에 일차원 압밀 이론식을 유도하였음

- ① 점토지반은 균질하고 완전 포화
- ② Darcy의 법칙이 유효
- ③ 흙 입자와 물은 비압축성
- ④ 미소 변형률 가정 : 투수계수와 압축계수를 상수로 가정
- ⑤ 이차 압밀량 무시 : 간극비와 하중 관계가 유일

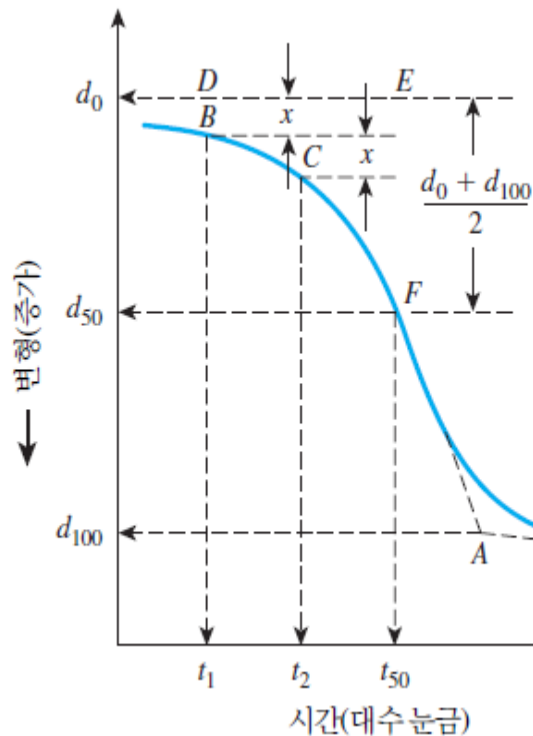
이와 같은 가정 사항들을 바탕으로 평형방정식, 연속방정식 및 응력-변형률 관계를 이용하여 다음 식과 같은 일차원 압밀 방정식을 유도 할 수 있음

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t}, \quad \left(c_v = \frac{k_z (1 + e)}{\gamma_w a_v} = \frac{k_z}{\gamma_w m_v} \right)$$

8.3.5 압밀계수 산정

❖ log t 법

- 압밀도(U)또는 압밀소요시간(t)을 구하는데 필요한 값으로 시간-변형량 곡선으로부터 구할 수 있다.



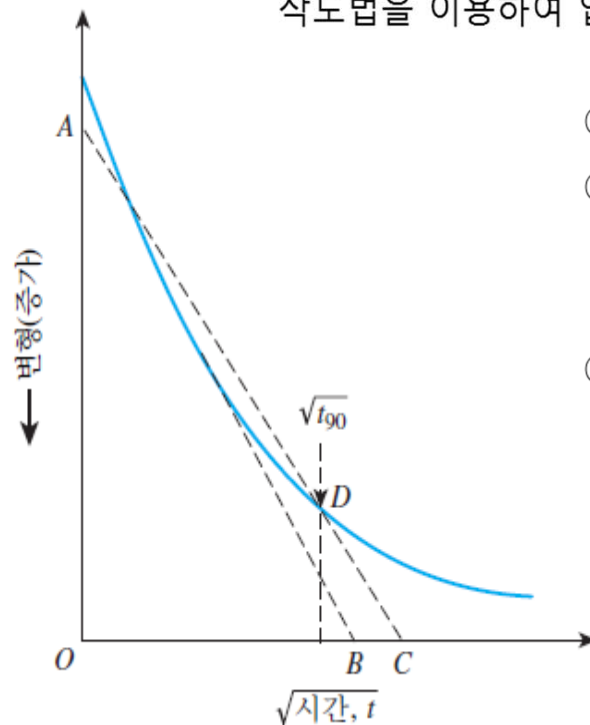
- ① 1차 압밀과 2차 압밀의 직선부분을 연장하여 교점 A 를 구한다.
 A 점의 종좌표를 d_{100} 이라고 표시한다. 즉 1차 압밀이 100% 완료 되었을 때의 변형량이다.
- ② 로그좌표에서 $t = 0$ 일 때의 초기점을 그릴 수 없다.
따라서 $t_1 = \text{약 } 0.1 \text{분}$ 부근의 한점 B 를 선정하고, $t_2 = 4t_1$ 인 C 점을 선정한다. 시간($t_2 - t_1$)동안 시료에 발생된 변형량의 차 = x .
- ③ $BD = x$ 인 수평선 DE 를 긋는다. 선 DE 에 해당하는 변형량을 d_0 이라고 표시한다. 즉, 압밀이 0%일 때의 눈금이다.
- ④ 압밀곡선상에서 점 F 의 종좌표는 1차 압밀이 50% 진행되었을 때의 변형량이며(d_{50}) 횡좌표는 이에 대응하는 시간(t_{50})을 나타낸다.
- ⑤ 평균압밀도, $U = 50\%$ 일 때, 시간계수 $T_{50} = 0.197$
 이므로 압밀계수 C_v 의 항으로 표현하면,

$$C_v = \frac{T_{50} \cdot H^2_{dr}}{t_{50}} = \frac{0.197 \cdot H^2_{dr}}{t_{50}}$$

8.3.5 압밀계수 산정

❖ \sqrt{t} 법

\sqrt{t} 법에서는 주어진 하중 증가에 대해 발생하는 변형량을 \sqrt{t} 의 함수로 도시했다. 작도법을 이용하여 압밀계수를 결정하는 절차를 다음과 같이 기술한다.



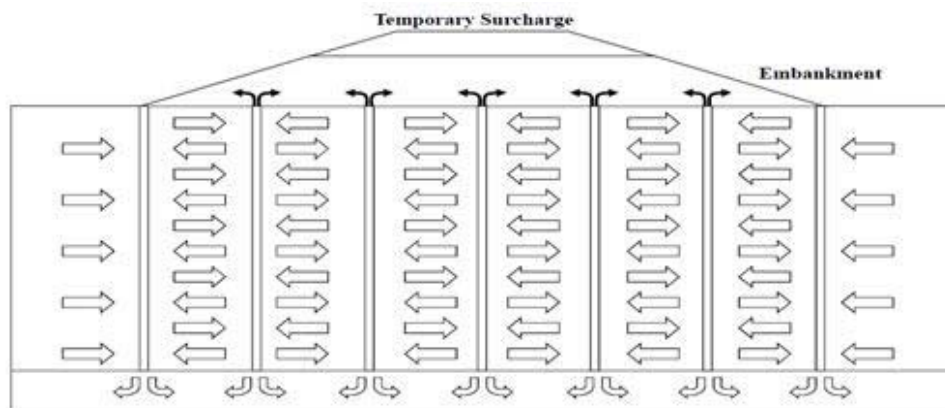
- ① 그림에서 초기의 직선부 AB 를 긋는다.
- ② $\overline{OC} = 1.15\overline{OB}$ 가 되도록 선 AC 를 긋는다. 압밀곡선과 AC 선이 만나는 점 D 의 횡좌표는 압밀이 90%진행되었을 때의 변형량(d_{90})이며, 횡좌표는 이에 대응하는 시간(t_{90})을 나타낸다.
- ③ 평균압밀도, $U = 90\%$ 일 때, 시간계수 $T_{90} = 0.848$ 이므로 압밀계수 C_v 의 항으로 표현하면,

$$C_v = \frac{T_{90} \cdot H^2_{dr}}{t_{90}} = \frac{0.848 \cdot H^2_{dr}}{t_{90}}$$

8.4 연직 배수재가 설치된 연약지반의 압밀해석 이론

8.4.1 연직 배수재의 특징

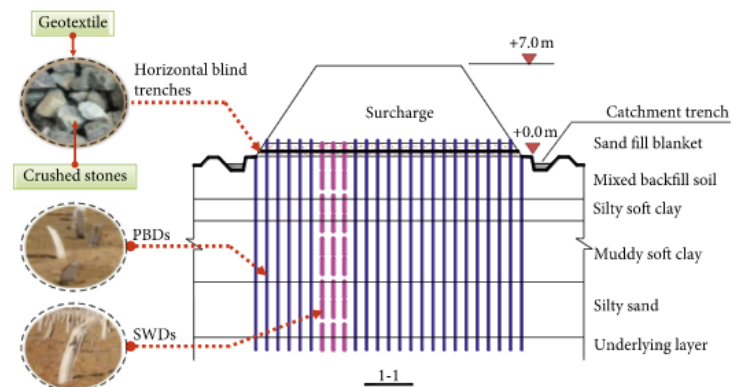
❖ 연직 배수재 – 배수거리 감소시켜 압밀 소요 시간 단축



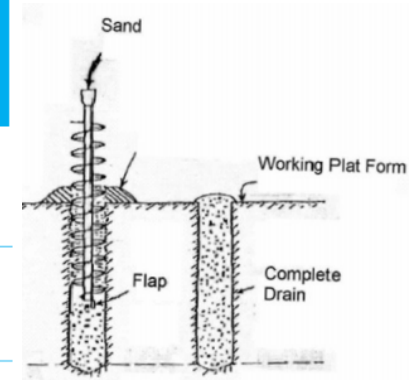
8.4 연직 배수재가 설치된 연약지반의 압밀해석 이론

8.4.1 연직 배수재의 특징

- ① 연직 모래 배수재는 1926년 Moran에 의해 처음 제안되었으며 1934년 미국 California Bay Bridge 접근도로 기초 연약 지반 안정화를 위해 처음 현장에 적용됨
- ② 1970년대에 개선된 PBD가 소개되기 전까지는 **모래 배수재**가 널리 이용 되었으며 현재 많은 종류의 PBD 연직 배수재가 이용됨
- ③ **PBD** 또는 **팩 드레인(sand wick drain)**의 장점은 빠르고 쉽게 설치가 가능하며 경제적이고 일체성을 보장할 수 있음
- ④ 배수거리를 단축시키는 연직배수재는 압밀속도를 증가시키기 위해서 상재하중(surcharge)을 가하는 것이 효과적임



| 배수재 형태 | 시공 중 변위 | 설치방법 | 전형적인 값 | | |
|--------|---------------|--|--------------|--------------|-------------|
| | | | 배수재 지름(m) | 배수재 간격(m) | 최대 길이(m) |
| 모래 배수재 | 많이 유발됨 | 항타 또는 진동 | 0.5~0.6 | 1.5~5.0 | 30 |
| 팩 드레인 | 중간 정도 유발됨 | 항타 또는 진동 | 0.06~0.15 | 1.2~4.0 | 30 |
| 모래 배수재 | 적게 유발됨 | Continuous flight hollow stem auger | 0.3~0.5 | 2.0~5.0 | 35 |
| 모래 배수재 | 거의 유발되지 않음 | 압입 | 0.2~0.3 | 2.0~5.0 | 30 |
| PBD | 중간정도 유발됨 | 압입 또는 진동 | 0.05~0.1 | 1.2~3.2. | 60 |



배수재 설치 방법 및 이로 인한 변위, 전형적인 간격, 지름 및 길이

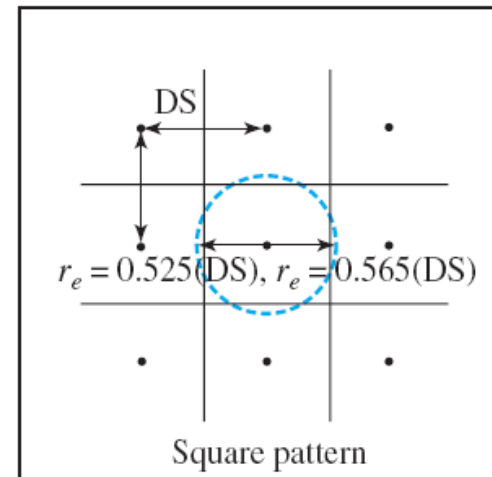
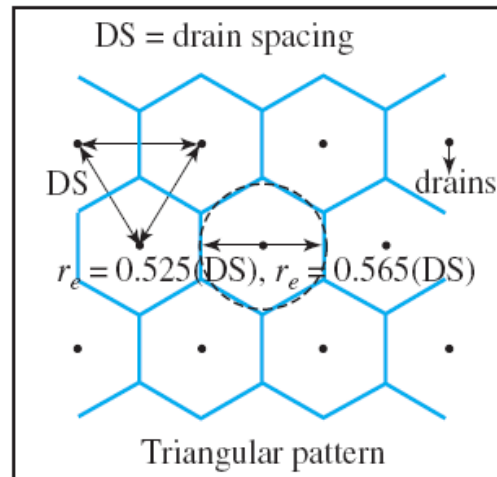
| 교란 유형 | 교란 원인 |
|---|---|
| 미어짐 (smear) | 모든 설치방법에 의해 야기됨 |
| 지반 변위 및 재성형 | 끝이 닫혀있는 맨드렐의 삽입으로 인해 지반 변위가 바깥쪽으로 유발됨 시추 오거(auger)를 제거하는 과정에서의 안쪽으로의 지반 변위 |
| 시추액 내의 세립자 (drilling mud)로 인한 그라우팅(grouting) 효과 | 얇은 모래층 내로의 미세 입자 유입 |
| 배수재 옆면에 형성 가 능한 얇은 세립 입자 막 | 시추액 내의 세립자에 의해 형성됨 |
| 얇은 모래층의 변형 | 맨드렐 설치 및 제거 과정에서 유발됨 |

배수재 설치로 인한 교란의 유형과 원인

❖연직 배수재의 영향 반경

- 연직 배수재는 보통 삼각형 또는 사각형 형태로 설치됨
- 배수재의 설치간격을 DS일 때 영향반경

삼각형 : $r_e = 0.525(DS)$ 사각형 $r_e = 0.565(DS)$



전형적인 배수재 설치 형태

❖PBD의 배수능력

- PBD의 배수 능력에 영향을 주는 요소들은 코어의 형태 및 모양, 배수재의 단면적, 구속압력, 필터재 및 막힘 현상, 필터재의 크리프로 인한 늘어짐, 투수계수 및 내구성 등이 있음
- 대부분의 경우 배수재의 통수능력은 $1000\text{ m}^3 / \text{yr}$ 보다 작으며 같은 배수재의 경우에도 시험 방법에 따라 크게 차이를 나타내므로 표준 시험장비 및 방법이 요구됨
- 종이 필터재의 경우 특히 시간에 따라 통수능력이 급격히 감소하며 실제 어느 정도 시간 경과 후 종이 필터재는 없어지는 결과를 나타냄

❖교란 영역

- 배수재 설치 시 설치 방법 및 지반의 예민비에 따라 교란영역이 달라짐
- 압축성을 증가시키고 비배수 강도를 감소시킴 또한 주변 흙을 미어지게 함(smeared)
- 예민비에 따라 증가되는 경향을 나타내며 대부분 배수재 반경의 2~3배의 영역이 교란되는 결과를 나타냄
- 교란 영역의 투수계수는 일반적으로 비교란 지반의 연직 투수계수와 같다고 가정함



8.5 연약지반 개량공법의 분류 및 원리

연약지반 개량공법의 종류

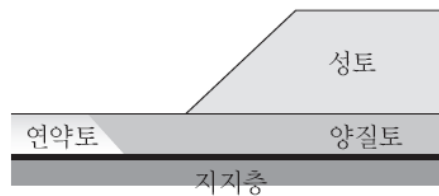
| 개량 원리 | 공법 명칭 | | 공법 개요 | 적용 토질 |
|----------|----------------|--------------|-------------------------------|----------|
| 치 환 | 굴착치환공법 | | 연약토를 굴착하여 제거하고 양질토로 치환 | 점성토 |
| | 강제치환공법 | | 연약토를 성토나 폭파로 제거하고 양질토로 치환 | |
| 배 수 | 재하 중공 법 | 선행재하공법 | 구조물을 세우기 전에 미리 하중을 가하여 압밀을 촉진 | 점성토 |
| | | 진공압밀공법 | 지중을 진공으로 만들어 대기압을 하중으로 이용 | |
| | | 지하수위저하공법 | 웰포인트나 깊은 우물을 설치하여 지하수를 배수 | |
| | 연직 배수 공법 | Sand drain공법 | 지중에 모래 기둥을 설치하여 배수 촉진 | |
| | | Pack drain공법 | 지중에 모래를 채운 포대를 설치하여 배수 촉진 | |
| | | PBD공법 | 지중에 배수용 PBD를 설치하여 배수 촉진 | |
| | 생석회 말뚝공법 | | 지반에 설치한 생석회말뚝이 흡수 팽창 | |
| | 표층배수공법 | | 트렌치를 파거나 자연건조로 표층을 배수 | |

| | | | | |
|------------------|--------------------|---------|--|------------|
| 다 짐 | 모래 다짐말뚝 (SCP)공법 | | 압입 및 진동으로 느슨한 모래지반 및 연약한 점성토지반에 다짐 모래말뚝을 설치 | 사질토 점성토 |
| | Vibroflotation공법 | | 진동으로 모래기둥 설치 | 사질토 |
| | 동다짐공법 | | 무거운 추를 낙하시켜 충격으로 지반을 다짐 | |
| | 심층혼합처리공법 | | 석회나 시멘트를 연약토와 혼합하여 고화처리 | 점성토 |
| 고 결 | 표층혼합처리공법 | | 석회나 시멘트를 표층토와 혼합하여 고화처리 | |
| | 주입공법 | | 현탁액이나 약액을 지반에 주입하여 고화처리 | 사질토 |
| 열 처 리 | 동결공법 | | 지반을 일정기간 인공적으로 동결 | 사질토 |
| | 소결공법 | | 지반에 열풍을 가하여 건조 | 점성토 |
| 하 중 조 절 | 압성토공법 | | 성토본체 측방에 작은 성토를 하여 안정 도모 | 점성토 |
| | 하중경감공법 | | 경량 자재를 사용하여 안정 도모 | |
| | Sand mat공법 | | 지표면을 모래로 덮어 하중을 분산 | |
| 보 강 | 표층피복 공법 | Sheet공법 | 표층에 Sheet를 설치하여 성토의 안정 도모 | 점성토 |
| | | Net공법 | 표층에 Net를 설치하여 성토의 안정 도모 | |
| | 침상공법 | | 연약지반에 나무나 철근을 부설하여 하중 분산 | 사질토 점성토 |
| | 보강토공법 | | 흙내부에 보강재를 부설하여 안정 도모 | |

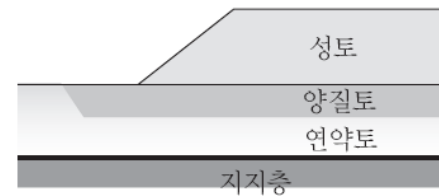
8.5.1 점성토에 적합한 대표적인 개량공법

1) 치환공법(굴착 치환, 강제 치환)

- 지표면 가까이 있는 연약한 점성토를 양질의 지반으로 치환하는 공법
- 시공이 간단하고 효과가 확실하며, 공기단축이 가능
- 적정 시공 깊이 3m(최대 10m)

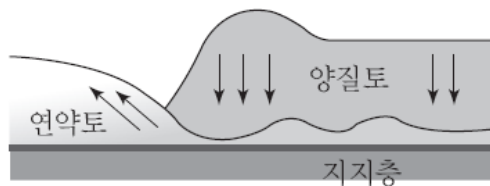


(a) 전체 굴착 치환공법

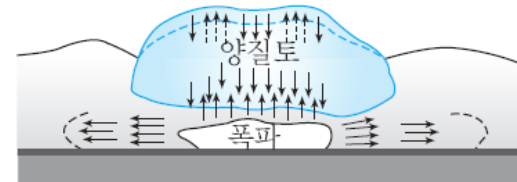


(b) 부분 굴착 치환공법

굴착 치환공법



(a) 성토 자중 강제치환공법



(b) 폭파 강제 치환공법

강제 치환공법

2) 선행재하공법

- 정규압밀이나 미압밀 상태에 있는 점토층에 하중이 가해지면 과잉 간극수압이 발생
- 시간이 경과함에 따라 발생한 간극수가 서서히 배수되면서 간극비가 작아지는 압밀현상 발생
- 압축성이 큰 정규압밀 점토층이 지표 가까이에 존재시 큰 빌딩, 도로, 제방 또는 흙 댐 등의 설로 큰 압밀침하 예상시 미리 하중을 가하여 **공사 후 압밀침하를 예방**하기 위한 공법

• 성토하중재하공법

개량 대상이 되는 지반 위에 성토를 실시하여 전응력을 증가시켜 유효응력을 증가시키는 방법

• 지하수위저하공법

웰 포인트(Well point)나 딥웰(Deep well)에 의해 지하수위를 저하시켜 유효응력을 증가시킴
투수계수 10^{-4}cm/sec 이하 조건에서는 부적절

• 진공압밀공법

지표면에 배기(배수도 겸함)층으로서 모래를 포설하고 기밀 시트(sheet) 밀폐 후 그 속의 공기 및 물을 배제해서 부압 상태로 만들고 시트 내외의 압력차에 의해 유효응력을 증가시키는 방법

| 공법 종류 | 공법 개요 |
|--------------|-------|
| 성토하중 재하공법 | |
| 지하수위 저하공법 | |
| 진공압밀공법 | |

여러 가지 선행 재하공법 종류와 개요

3) 연직배수공법(vertical drain method)

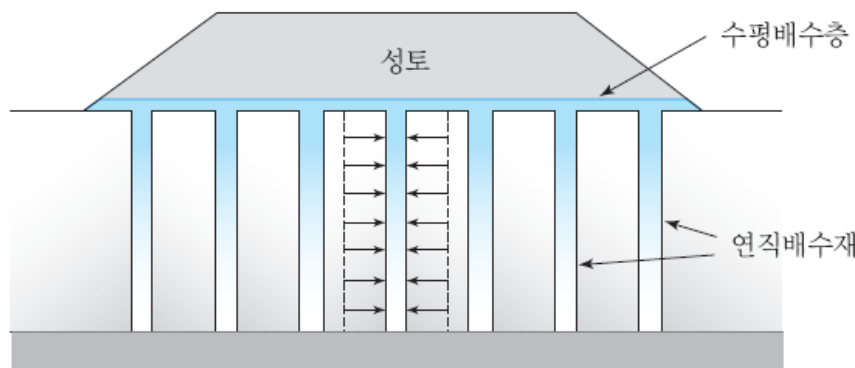


연약한 점성토층 내에 인공적으로 연직 배수재를 설치하여 배수거리를 단축시켜서 압밀을 촉진시키는 공법

- 모래 배수공법(Sand drain method)
- PBD(Prefabricated band-shaped drain)
- 팩 드레인공법(Pack drain method) (Sand wick drain)

① 모래배수공법

연직 배수공법 중 가장 먼저 개발된 공법으로 모든 지반 조건이 동일한 상태에서 점토층에 연직방향으로 모래 기둥을 조성하여 배수거리를 감소시켜 배수시간을 단축시킴



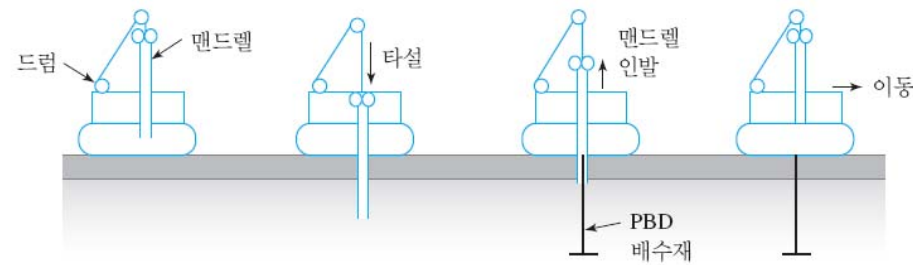
모래 배수공법

$$t_2 = \frac{T_v H^2}{c_v}$$

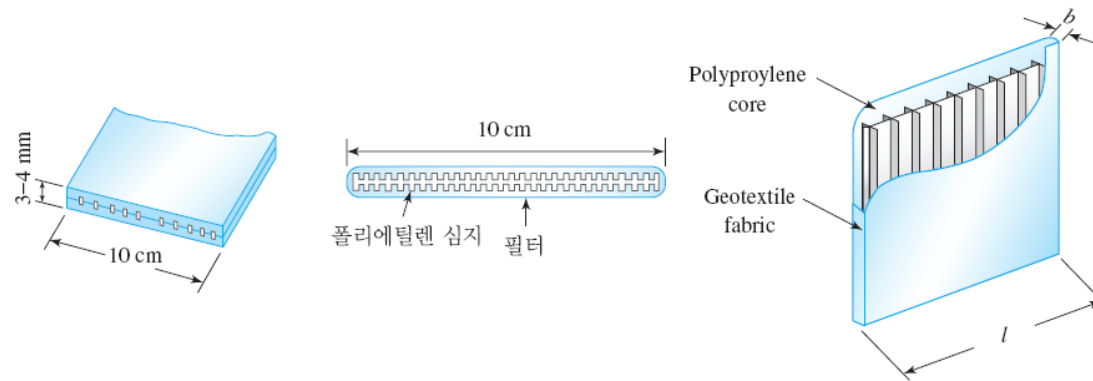
- 모래 배수재 직경 : 15 ~ 75cm
- 모래 배수재 간격 : 1.5 ~ 3m
- 시공깊이 : 50m (max)

② PBD공법

모래 배수공법의 대안으로 개발, PBD가 들어있는 맨드렐(mandrel)을 점토층에 삽입한 후 PBD를 남겨두고 맨드렐만을 빼내며, PBD가 연직배수 통로의 역할을 수행 압밀 촉진



PBD의 설치과정

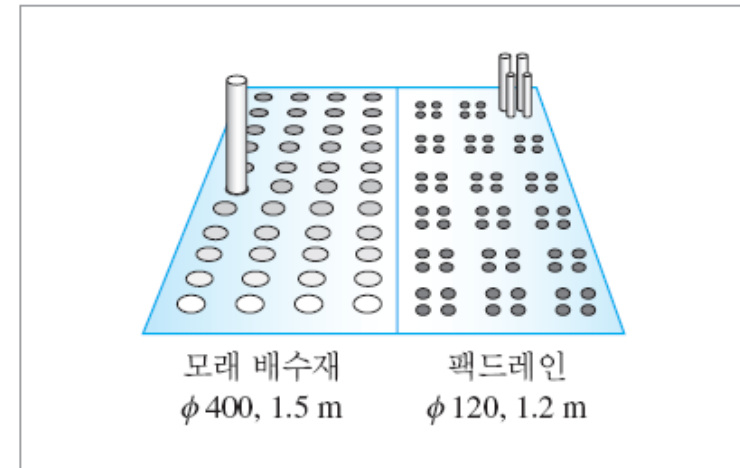
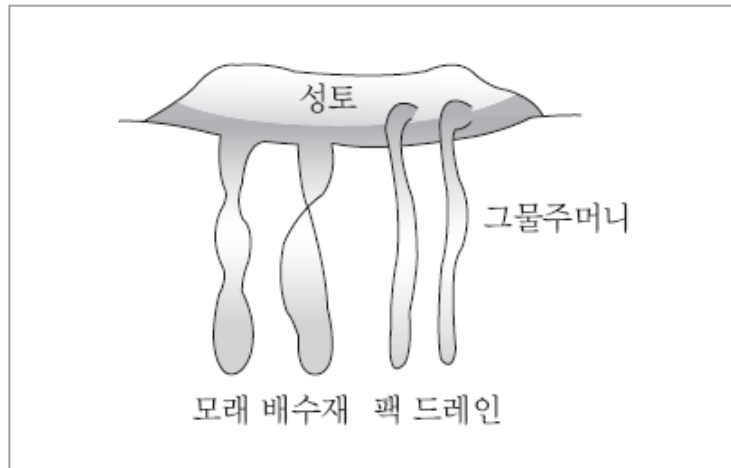


PBD의 단면 및 구성

③ 팩 드레인공법

모래 배수공법을 개량한 공법으로 지중에 설치되는 모래 기둥 형성에 필요한 모래의 양을 줄이면서 배수 기능은 유지하도록 투수성이 있는 합성 수지 포대에 모래를 채워 드레인 재로 사용하는 방법

- 직경 : 12cm
- 간격 : 1.2m
- 시공 깊이 : 50m (max)



모래 배수재와 Pack drain 비교

• PBD 타설 간격 설계

- ① 공기에 적정한 경과일수에 대한 압밀도(U)의 값을 정함
- ② 타설 간격을 1.0~3.0m 범위에서 가정
- ③ 타설 배열을 결정하여 등가 영향원 반경(r_e)를 산정
- ④ 예상 사용 PBD재의 규격에 맞추어 등가 환산반경(r_w)을 구함
- ⑤ 산출한 r_e 와 r_w 의 비(n)를 산출
- ⑥ 토질 조건 중에서 대상 토층의 수평방향 압밀계수(c_h)를 정함
- ⑦ 현장 및 실내시험을 통하여 맨드렐 관입에 따른 주변 지반의 교란
- ⑧ 범위(s)의 설정과 교란 영역에서의 투수계수 k_s 를 취함
- ⑨ 소요 압밀도(U)에 이르는 시간(t)을 산정

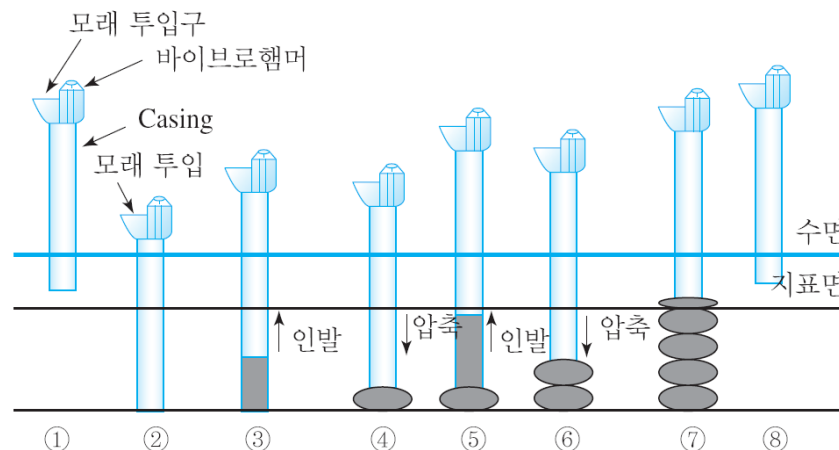
$$t = (r_e)^2 \times \frac{T_h}{c_h} \quad \text{여기서, } T_h = \text{수평방향 이론 시간계수}$$

$$c_h = \text{수평방향 압밀계수(cm}^2\text{/day)}$$

4) 모래다짐말뚝(Sand compaction pile method, SCP)



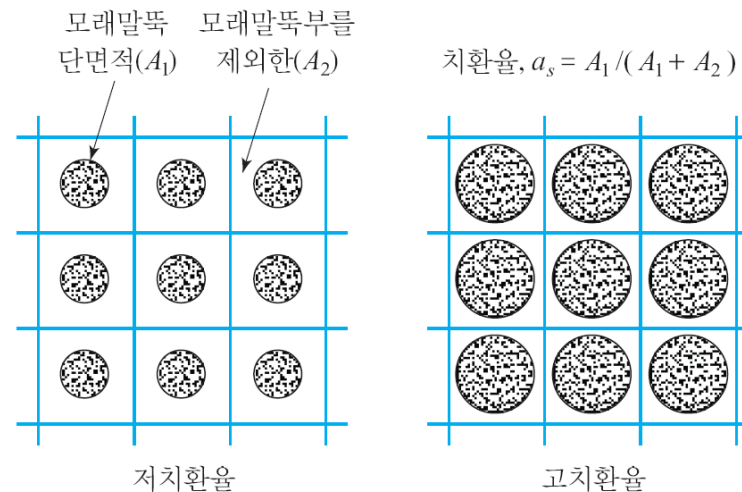
- 모래 또는 점토로 구성된 연약지반에 모래(또는 유사재료)를 압입하여 큰 직경의 다져진 모래와 **복합 지반**을 만들어 강도증가는 물론 모래 배수재로서 압밀 축진을 기대
- SCP공법 이용 지반종류
 - 사질토, 화산회토 등의 사질지반과 점성토, 이토(peat), 산호 등이 혼합된 점성토 지반
 - 사질토 지반과 점성토 지반이 서로 혼재된 지반 등의 연약지반 전체
- 지반별 조성방법
 - 사질토 지반 : 모래재료의 진동 압입에 의한 원 지반의 입자를 재배열 시킴으로써 다짐(밀도증가)도 증가를 기대
 - 점성토 지반 : 단기적으로는 주변 점토보다 큰 전단강도를 가진 모래 다짐말뚝을 촘촘히 조성하여 모래 말뚝과 점토로 된 복합 지반을 형성, 장기적으로 모래말뚝의 배수효과, 응력분담



SCP공법의 시공순서

| 공 법 | 공법의 효과 | | | | | | 시 공 | | | | |
|-------|--------|--------|----------|----------|-------|--------|------------|-------|-------|----------|------------|
| | 침하 대책 | | 안정대책 | | | | | | | | |
| | 압 밀 촉진 | 침 하 감소 | 전단 변형 억제 | 강도 증가 촉진 | 활동 저항 | 액상화 방지 | 대상 토질 | 개량 효과 | 공기 | 공비 | 표준모래 말뚝직경 |
| 모래 배수 | ● | × | ○ | ○ | ○ | × | 점성토 | ○ | 중기 | 보통 | 400~500 mm |
| SCP | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | 점성토 사질토 | ● | 단기~중기 | 약간 높음 | 700 mm |
| 팩 드레인 | ● | × | ○ | ○ | × | × | 점성토 | ○ | 중기 | 보통 | 120 mm |
| PBD | ● | × | ○ | ○ | × | × | 점성토 | ○ | 중기 | 보통 | — |

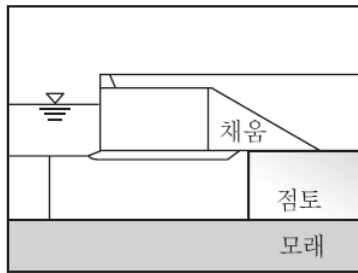
SCP와 유사 공법의 효과 대비표(연약지반, 2005)



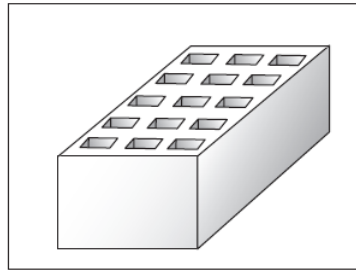
치환율(a_s)

5) 심층혼합처리공법

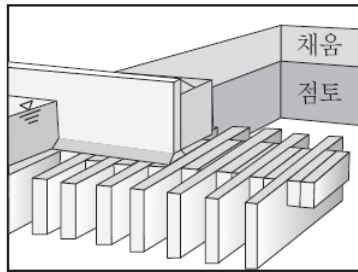
- 심층혼합처리공법(Deep Cement Mixing, DCM)은 연약지반 내에 시멘트와 물을 혼합한 안정 처리재(경화재, 고화재 등)를 저압으로 주입 특수 교반기를 회전시켜 교반 혼합하는 방법
- 연약지반 내의 간극수의 수화반응 및 수화 생성물과 점토광물의 이온교환, 포졸란 반응 등의 화학적 반응에 의하여 단시간에 연약지반의 강도를 향상시키는 공법
- 원위치 연약지반에 비하여 매우 큰 강도와 변형계수를 가지며, 2.0m~ 34.0m까지 시공가능
- 연약지반에 경화재를 혼합하여 화학적으로 처리하여 연약지반에 비해 월등히 큰 강도를 가지나 콘크리트와 비교해서 1/10정도의 압축강도를 보임
- 기계식 혼합처리 방식
 - 석회, 시멘트 등의 안정재를 압축 공기나 유압 펌프로 깊은 곳까지 공급하고 교반 날개로 원 위치의 흙과 혼합하는 방식
 - CDM(Cement Deep Mixing), CGS(Compaction Grouting System)등
- 분사식 혼합처리 방식
 - 고압의 시멘트 용액을 분사하며 분사구를 회전시켜 흙과 안정재를 혼합하는 방식
 - JSP(Jumbo special Pile), SIG(Super Injection Grouting), RJP등



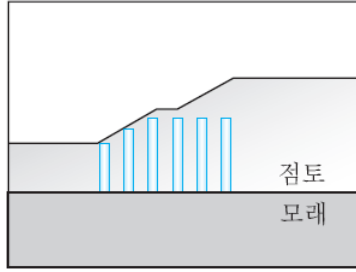
(a) 블록식



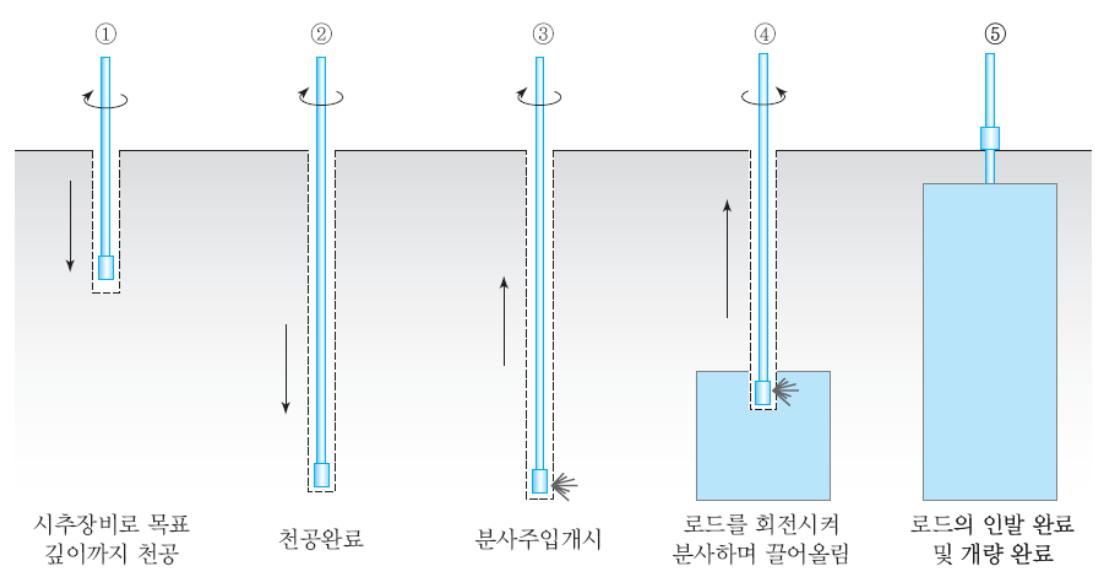
(b) 격자식



(c) 벽 식



(d) 말뚝식



분사식 심층혼합처리공법 개요도

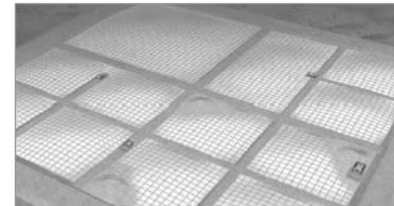
심층혼합처리공법 개량 형태

| 검토 항목 | 내 용 |
|-------------|--|
| 안정재의 종류 | 보통 포틀랜드 시멘트, 고로 시멘트, 석회 |
| 물 시멘트비(W/C) | 해상 0.6이하, 육상 1.0이하 |
| 안정재 첨가량 | 일반 점성토 80~200 kgf/m ³ , 유기질토 200~400 kgf/m ³ |
| 재령 | 표준 1, 2, 4주 |
| 공시체 수 | 1시료 당 2~3개 |
| 공시체 시험 항목 | 일축압축시험 |

심층혼합처리공법 배합설계 검토 사항

6) 표층개량공법

- 지표면에서 깊이 약 3m 이내의 연약토를 석회, 시멘트 플라이애쉬, 아스팔트 등의 안정재와 혼합하여 지반 강도를 증가시키는 공법, 강도와 신축성을 갖는 재료를 포설하는 공법, 지표를 외곽으로 배수시키는 공법 등으로 구분



지오그리드공법



대나무매트공법



토목섬유공법



수평모래배수재공법



작업전경(Am firol+Disc wheel)



Suction device

| 분류 | 원리 | 주요 공법 |
|--------|--------|--|
| 표층부설 | 표층 보강 | 토목섬유공법, 대나무 매트공법, 로프네트공법 |
| | 치환 | 굴착 치환공법, 강제 치환공법 |
| 연약층 개량 | 배수(압밀) | 자연 건조공법, PTM, 수평 모래배수공법(Sand mat), 수평 진공배수공법 |
| | 고결 | 표층 혼합처리공법 |

표층개량공법의 분류

다양한 표층개량공법

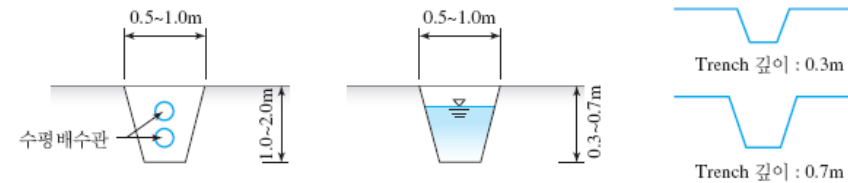
(1) 표층부설공법

- 성토 및 복토에 따른 연약지반의 국부적인 파괴를 경감시키기 위하여 초연약지반의 표층에 토목섬유, 로프네트, 대나무 등을 부설하여 단기간 내에 건설장비의 주행이 가능하도록 하는 공법
 - 토목섬유공법은 표층 개량에 가장 널리 적용되는 공법으로 토목섬유를 연약지반 표면에 깔고 그 위에 양질의 토사를 성토하는 공법 (상부 토사의 함몰 방지, 건설장비의 장비 주행성 확보)
- ※ 토목섬유 : 지오텍스타일, 지오멤브레인, 지오그리드 등 (주요기능 : 배수, 분리, 보강, 필터 등)

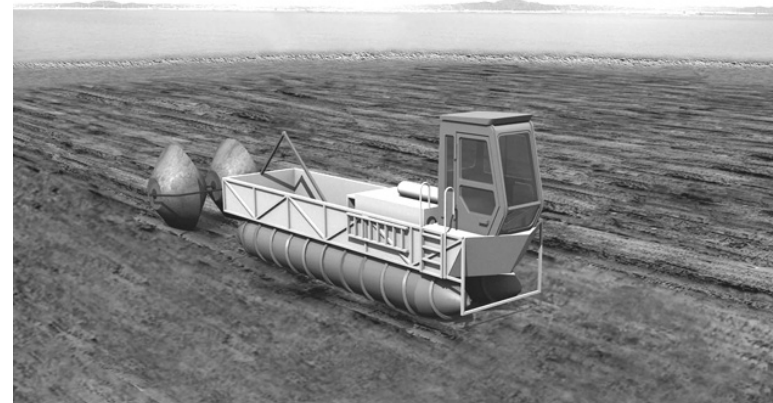


(2) 표면배수공법

- 준설매립에 의하여 연약지반을 조성하는 경우 준설 완료 후 건조시 크러스트가 형성되고, 준설토의 자중 압밀과 우수에 의해 표면에 표면수가 존재
- PTM(Progressive Trench Method) 공법 : 체계적인 트렌치를 조성하고 트렌치의 깊이와 간격을 조절하여 적극적으로 배수유도 (자연배수와 강제 배수에 의해 자연증발 조건 발휘 등)



표면배수공법 종류



(3) 표층 혼합처리 공법

- 석회 안정처리

연약한 세립토의 안정을 위해 5~10% 비율로 석회(lime)를 점성토에 혼합, 양이온 교환, 응집 작용 및 포졸란 반응에 의한 화학적 반응 발생

- 시멘트 안정처리

시멘트 적절량(6~14%)을 흙과 교반하여 현장 워커빌리티 및 강도 증가

- 플라이애쉬 안정처리

플라이 애쉬(10~35%), 석회(2~10%) + Water 첨가 후 다짐

- 액성한계, 소성지수 감소, 강도증가, 워커빌리티 증가 등



표층혼합처리공법

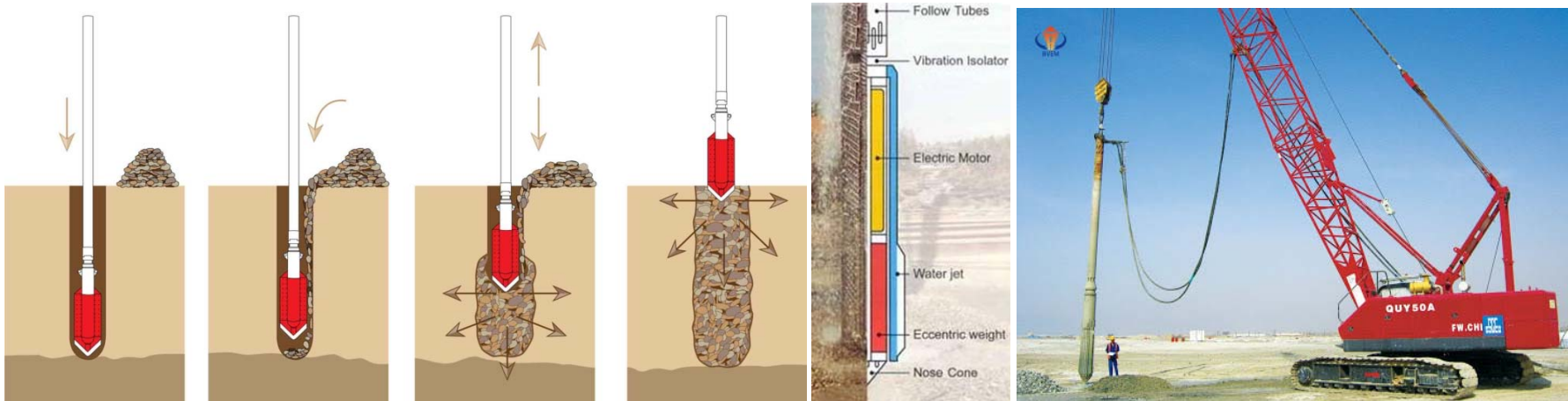
8.5.2 사질토에 적합한 개량공법

1. 바이브로플로테이션(Vibrofloatation) 공법



• 공법개요

- 느슨한 사질토지반의 진동 다짐공법으로 약 2m의 Vibroflot(편심하중내장) 봉형 진동체를 사용하여 편심하중의 회전에 의한 수평진동과 선단에서의 사수(워터제트)에 의해 분사현상을 일으켜 소정 깊이까지 진동체를 삽입하고 그 측면에 모래와 쇄석을 투입하면서 진동을 가해 지반을 다지는 공법
- 효과 : 개량 후 지반강도 25~40tf/m² 증가 (강성 증가 및 침하저감과 응력 분산효과 발생)
- 대상지반 : 실트 20%이하, 점토가 10%이하인 사질토 (진동기 간격 1~3m, 다짐영역 반경 1.2~5m)



2. 동다짐(Dynamic Compaction)공법

- 공법개요

- 중량 10~40tf, 밀면적 3~4m²의 강재 블록이나 콘크리트 블록과 같은 중추를 10~30m의 높은 곳에서 여러 차례 낙하시켜 충격과 진동으로 지반을 개량하는 공법
- 주로 과잉간극수압 소산이 빠른 사질토 지반이나 매립 지반을 개량하는데 효과적



$$D = \alpha \sqrt{WH}$$

여기서, D : 영향깊이(m)

W : 중추의 무게(tf)

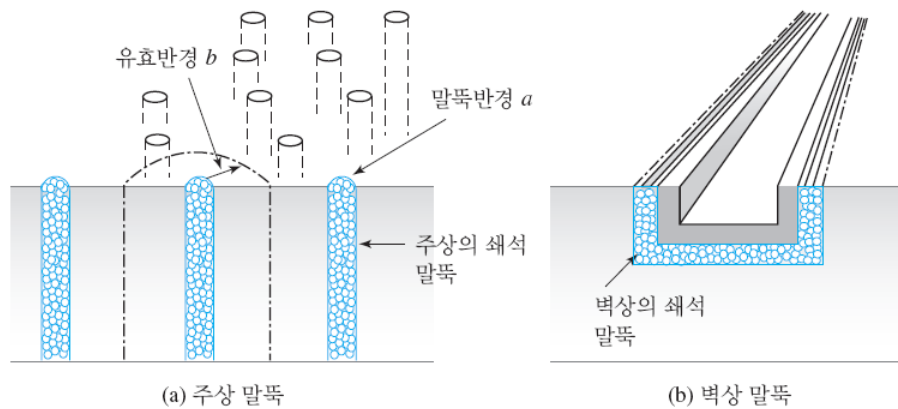
H : 낙하높이(m)

α : 경험계수(0.3~0.7), 보통 0.5

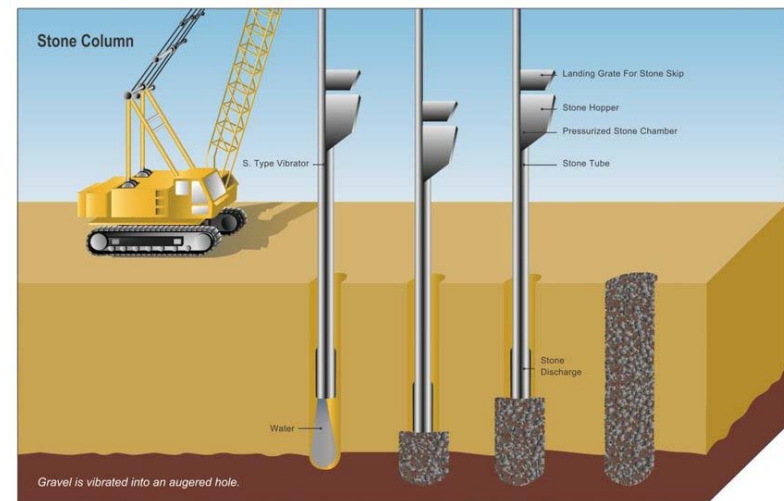
3. 쇄석말뚝(Stone Column)공법

- 공법개요

- 쇄석 등의 투수성이 우수한 재료를 모래지반 중에 주상, 또는 벽상으로 타설하고, 배수효과를 이용해서 지진 시에 발생하는 과잉간극수압을 억제함과 동시에 소산을 앞당겨서 지반의 액상화를 방지하는 공법
- Vibrofloatation 공법과 원리적으로 유사



쇄석말뚝의 설치 모식도



8.5.3 연약지반상의 팽이기초공법

- 공법개요

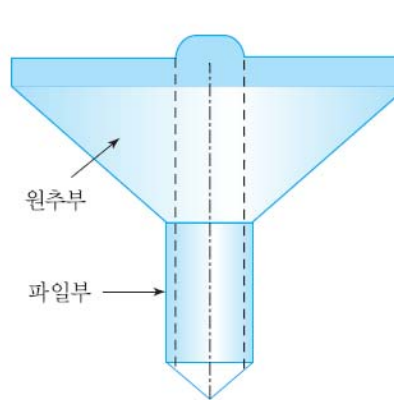
- Top-base공법 이라고도 하며, 팽이모양의 콘크리트 말뚝을 연약지반 내에 기초로 활용하여 침하 억제효과와 지지력 증가 효과를 동시에 얻을 수 있는 일종의 연약지반 강성 매트공법

- 예상 지지력

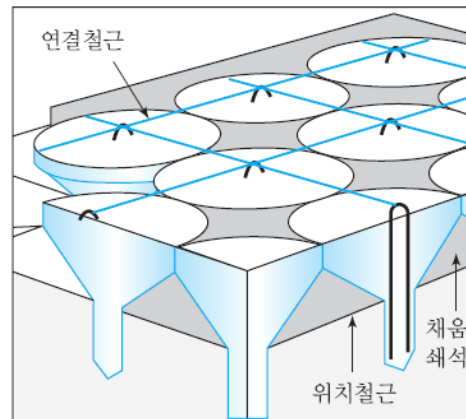
점성토 10~30 tf/m² , 사질토 10~40 tf/m²

- 시공과정

- | | |
|---------------------|------------|
| ① 부설지반 정비 및 위치철근 설치 | ② 팽이말뚝 부설 |
| ③ 채움쇄석의 진동다짐 | ④ 연결철근의 결속 |



(a) 팽이말뚝 형상도



(b) 팽이말뚝 부설 단면도

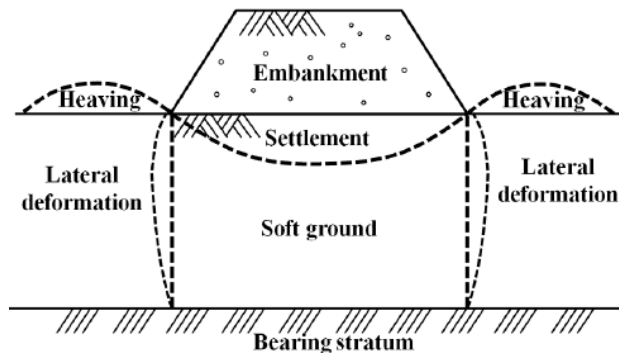


8.6 연약지반 계측관리

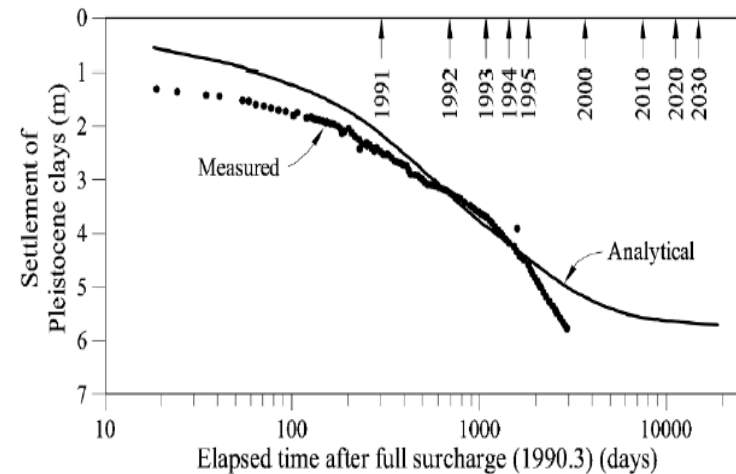
8.6.1 개요

- 계측관리 개요

- 연약지반에 성토 등의 구조물을 구축할 때 설계 단계에서 공사의 최종 단계까지의 거동을 미리 정확하게 예측하기 어려움
- 기인요소 : 지반조사의 한계성, 설계시 이론 적용을 위한 단순화, 가정 지반의 불균일성 및 불균질성, 시공의 어려움 등
- 현실적으로 이러한 문제점을 극복하기 위해 시간에 따른 지반의 거동을 관측하여 시공 단계마다 특성을 분석하고 다음 단계의 상황 예측



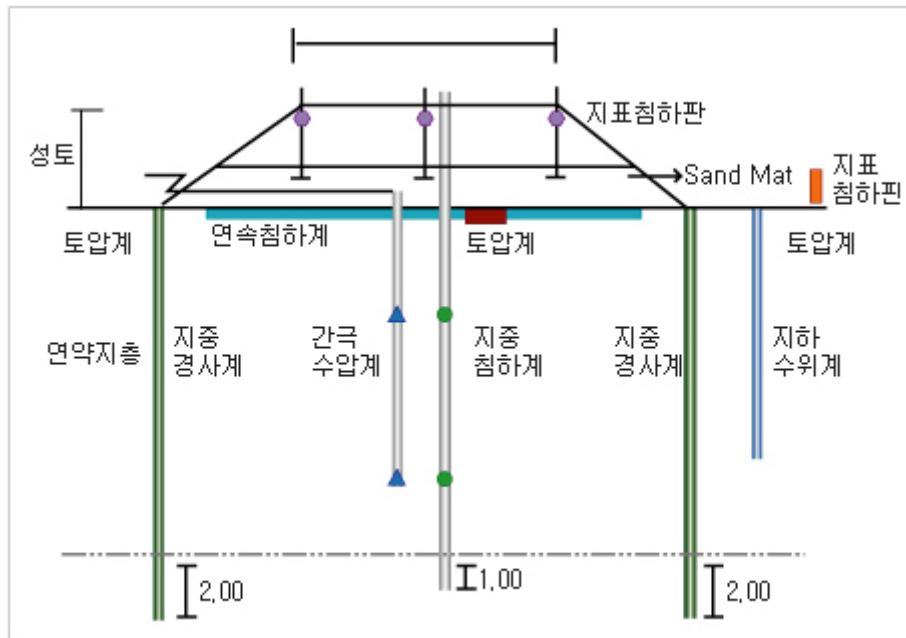
연약지반 상 성토로 인한 지반 거동



간사이 국제공항의 홍적세 점토층의 압밀로 인한
인공섬의 침하량 발생

8.6.2 계측기의 종류와 설치 원칙

- 침하, 수평변위, 지하수위면, 간극 수압을 측정하여 연약지반 거동 안정관리
- 지표면 침하판 침하거동을 파악하기 위하여 가장 많이 사용되고 측정값이 신뢰도가 높음
- 지중 침하계(층별 침하계) : 연약 층 내의 층별침하 계측
- 간극 수압계 및 지하수위계 : 침하속도 및 압밀도 파악(과잉간극수압 측정)
- 경사계 및 토압계 : 수평변위와 성토체의 유효 단위중량 파악



【 계측기 설치 배치도 】

연약지반 계측관리



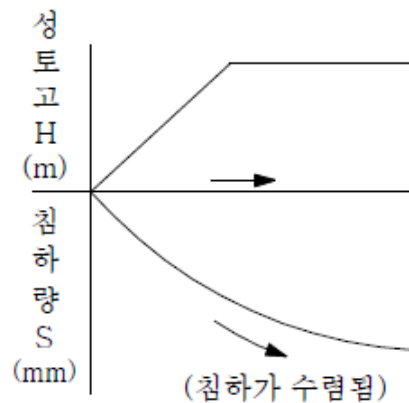


8.6.2 계측기의 종류와 설치 원칙

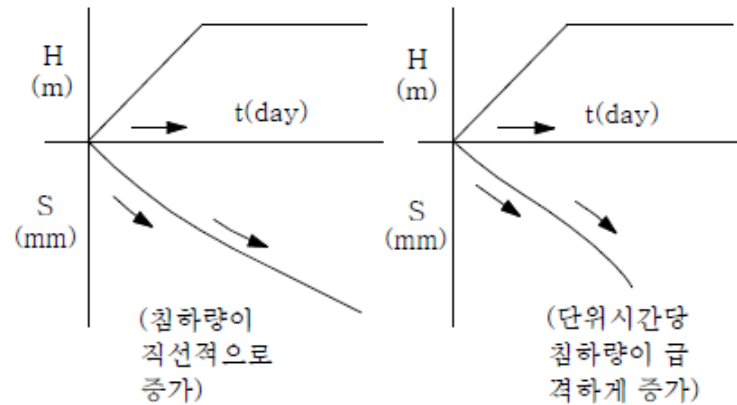
| 계측기명 | 계측목적 및 검토사항 | 계측기 배치원칙 |
|-------|---|---|
| 층별침하계 | <ul style="list-style-type: none">• 연약점토 지반의 심도별 압밀침하량 측정 및 지표면 침하량과 비교분석• 측정된 침하량을 이용하여 지반의 층별 압밀정수 추정 | <ul style="list-style-type: none">• 연약심도가 깊거나 고성토 지역에 간극수압계와 동일지점에 설치• 공당 소자는 3개씩 |
| 간극수압계 | <ul style="list-style-type: none">• 흙쌓기 하중에 의한 지반내 간극수압의 변화측정• 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력증가량 유추• 압밀의 효과 확인• 압밀진행 및 강도증가상황 확인 | <ul style="list-style-type: none">• 연약심도가 깊거나 고성토 지역에 층별침하계와 동일지점에 설치• 공당 소자는 3개씩 |
| 경사계 | <ul style="list-style-type: none">• 흙쌓기 비탈면부의 지반내 수평방향의 변형량과 변형속도 측정• 흙쌓기 중앙부의 최대침하량과 함께분석하여 흙쌓기 비탈면의 안정관리• 측방유동 토압에 의한 교대의 안정성확인 | <ul style="list-style-type: none">• 전단파괴가 우려되는 고성토지역에 좌, 우 비탈면에 설치• 현장상황에 따라 교대전후면 또는 측면에 설치 |
| 지하수위계 | <ul style="list-style-type: none">• 흙쌓기에 의한 지하수위의 변화파악• 간극수압과 비교하여 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력 증가량 유추 | <ul style="list-style-type: none">• 간극수압계가 설치되는 지점에서 흙쌓기에 의해 자연 지하수위가 영향을 받지 않도록 흙쌓기 비탈면에 이격하여 설치 |
| 지표침하판 | <ul style="list-style-type: none">• 설치지점의 전침하량 측정• 흙쌓기 속도 조절, 프리로딩 제거시기판정 | <ul style="list-style-type: none">• 연약지반 흙쌓기 시 100m간격으로 흙쌓기 단면 중앙에 설치 |

8.6.3 침하 관리

- 불확실성이 큰 지반설계에서 실제 측정을 통해 설계 수정 – 정보화 시공(Observational method)
- 현재까지 측정된 자료를 분석하여 최종 예상 침하량, 압밀도, 압밀 종료 시간 분석
- 발생침하량을 통해 성토 높이, 성토 속도, 제거시기를 결정
- 쌍곡선 법, \sqrt{t} 법(호시노법), 아사오카법 등이 있음



(a) 안정한 상태



(b) 불안정한 상태

시간 경과별 침하 진행상태로 판단하는 안정성

1. 쌍곡선법(Hyperbolic 방법)

성토가 완료되고 하중이 일정해진 후의 침하 속도는 쌍곡선적으로 감소한다는 가정

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)}$$

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta}$$

S_t : 기준시간으로부터 경과시간 t 에서의 침하량

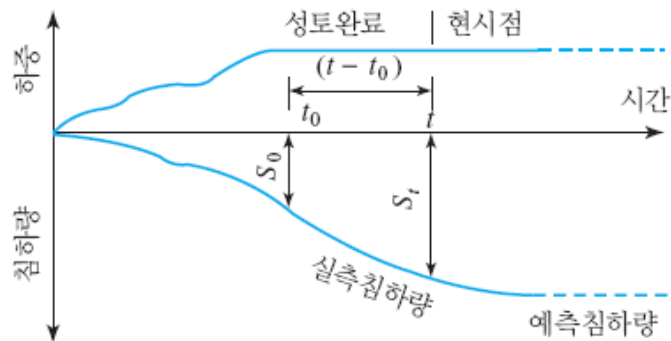
S_0 : 기준시간 t_0 에서의 침하량

t : 계측시간

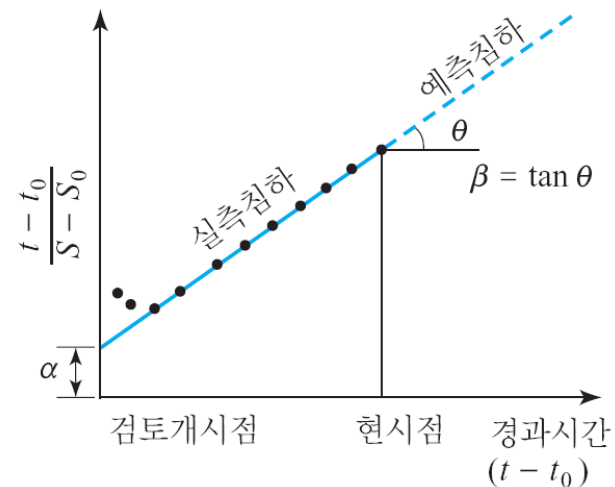
S_f : 최종침하량

식 9.107을 다시 정리하면,

$$\frac{t - t_0}{S_t - S_0} = \alpha + \beta(t - t_0)$$



쌍곡선법에 의한 침하량 예측



쌍곡선법에서 계수를 구하는 방법

2. \sqrt{t} 법(Hoshino 방법)

침하 속도가 시간의 제곱근에 비례한다는 가정으로 장래 임의의 시간과 최종침하량을 구하는 방법

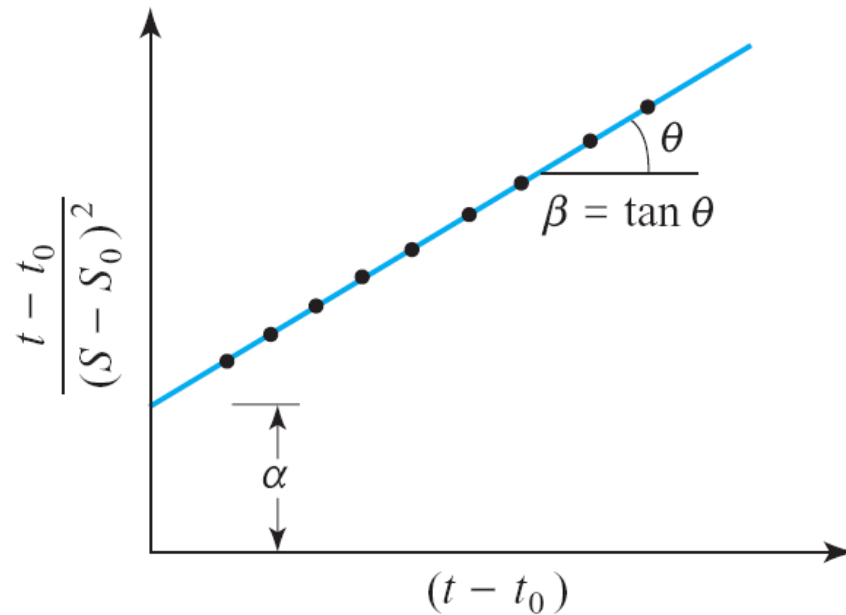


그림 9.57 \sqrt{t} 법에서 계수를 구하는 과정

$$S_t = S_0 + \frac{Ak\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{1+k^2(t-t_0)}}$$

$$S_f = S_0 + A = S_0 + \sqrt{\frac{1}{\beta}}$$

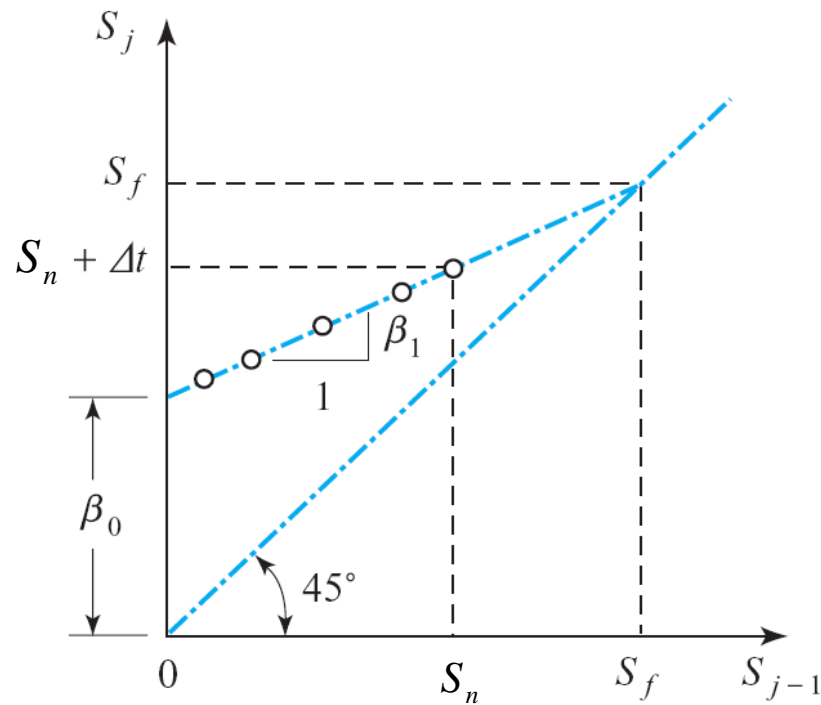
여기서, A, k : 침하 실측치로부터 구하는 계수

식 9.110을 다시 정리하면,

$$\frac{t-t_0}{(S_t-S_0)^2} = \frac{1}{A^2k^2} + \frac{1}{A^2}(t-t_0) = \alpha + \beta(t-t_0)$$

3. Asaoka 방법

1차원 압밀방정식을 이용하여 침하 계측치로부터 임의 시간의 침하량을 도해적으로 구하는 방법



$$S_n = \beta_0 + \beta_1 S_{n-1}$$

$$c_v = -\frac{5}{12} H^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t}$$

여기서, H : 압밀층 두께

Asaoka 방법에서 계수를 구하는 과정