

Soil Compaction

흙의 다짐

- ❖ 동적 또는 정적 하중을 가하여 흙의 밀도를 높인다
 - ❖ 흙의 강도증가 및 침하량 감소
 - ❖ 고속도로, 흙 댐, 제방, 철도, 택지조성 등...
 - ❖ 성토사면 안정성 증대
-
- ❖ 강륜(smooth-wheel), 양족(sheepsfoot)로울러
 - ❖ 공기고무타이어 로울러, 진동 로울러
 - ❖ 바이브로플로테이션(vibroflotation)

1. General Principles of Compaction

❖ 다짐의 원리

- 흙 속의 간극(공기) 제거에 의한 체적압축
- 중량은 불변
- 흙의 다짐 정도는 건조단위중량으로 평가
- 다짐 시 물을 흙에 첨가 → 물은 윤활유 역할 → 흙 입자들은 서로 미끄러져서 조밀해짐
- 함수비가 증가함에 따라 다져진 흙의 건조단위중량 증가

1. General Principles of Compaction

$$\omega=0 ; \gamma=\gamma_d=\gamma_1$$

- 함수비가 증가되는 상태에서 동일한 다짐에너지 → 단위 부피당 흙 무게 증가

$$\omega=\omega_1 ; \gamma=\gamma_2 \quad \gamma_{d(\omega=\omega_1)} = \gamma_{d(\omega=0)} + \Delta\gamma_d$$

- 임의 함수비 초과하면 함수비가 증가함에 따라 건조단위중량 감소

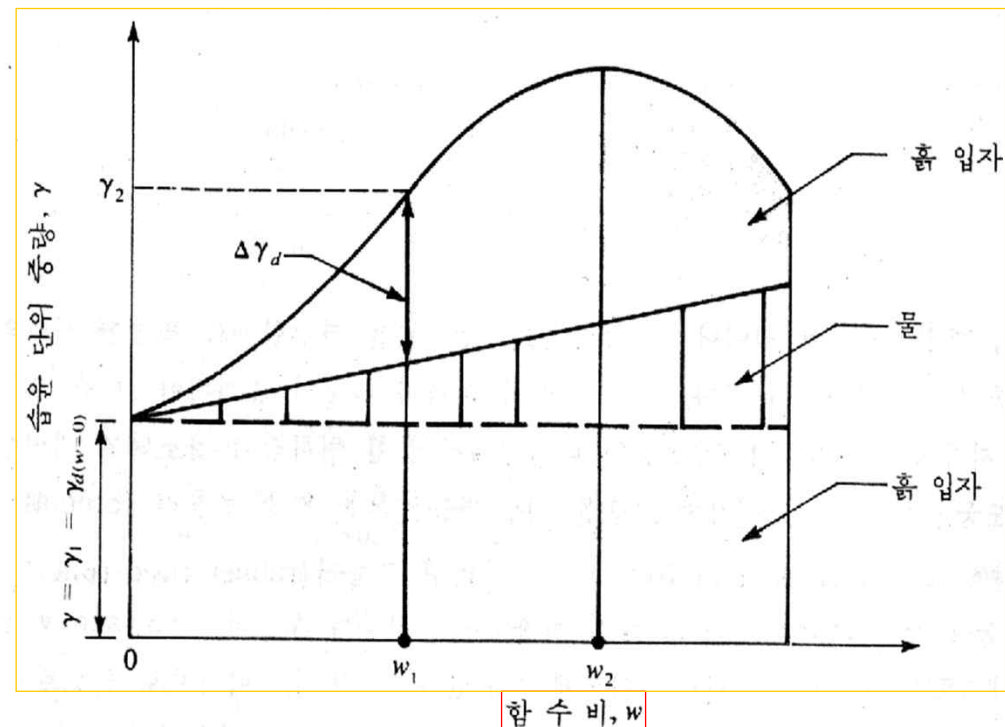
- 고체입자들로 채워져

있던 공간 → 물이 차지

- 최대건조단위중량 $\gamma_{d(max)}$
(Maximum dry unit weight)

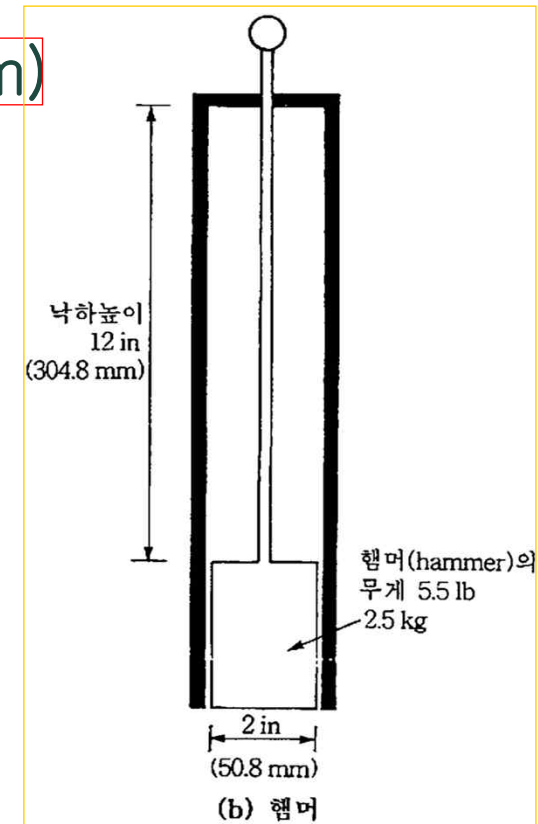
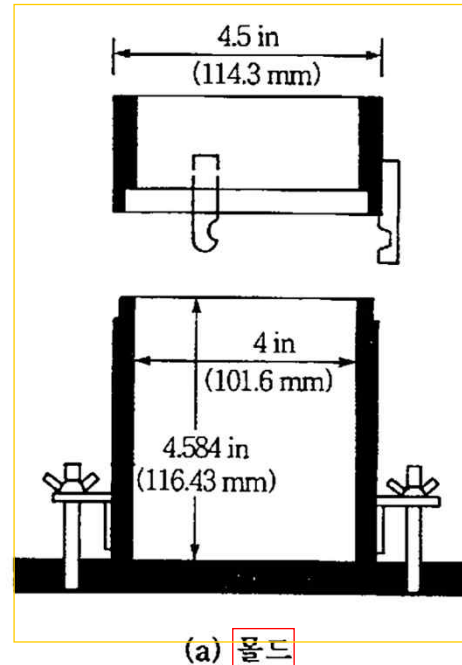
→

최적함수비 (OMC ; Optimum moisture content)



2. Standard Proctor Test

- ❖ 표준다짐시험 (ASTM D-698; A방법)
- ❖ 몰드부피(V) : 943.3cm^3 , 몰드직경(D) : 101.6mm
- ❖ 다짐 층수(L) : 3층, 각 층당 다짐횟수(#) : 25회
- ❖ 햄머무게(W): 5.5 lb (2.5kg)
- ❖ 햄머의 낙하높이(H): $12"$ (304.8mm)



2. 표준다짐시험

❖ ASTM (D-698)

1999년

❖ 습윤단위중량

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}}$$

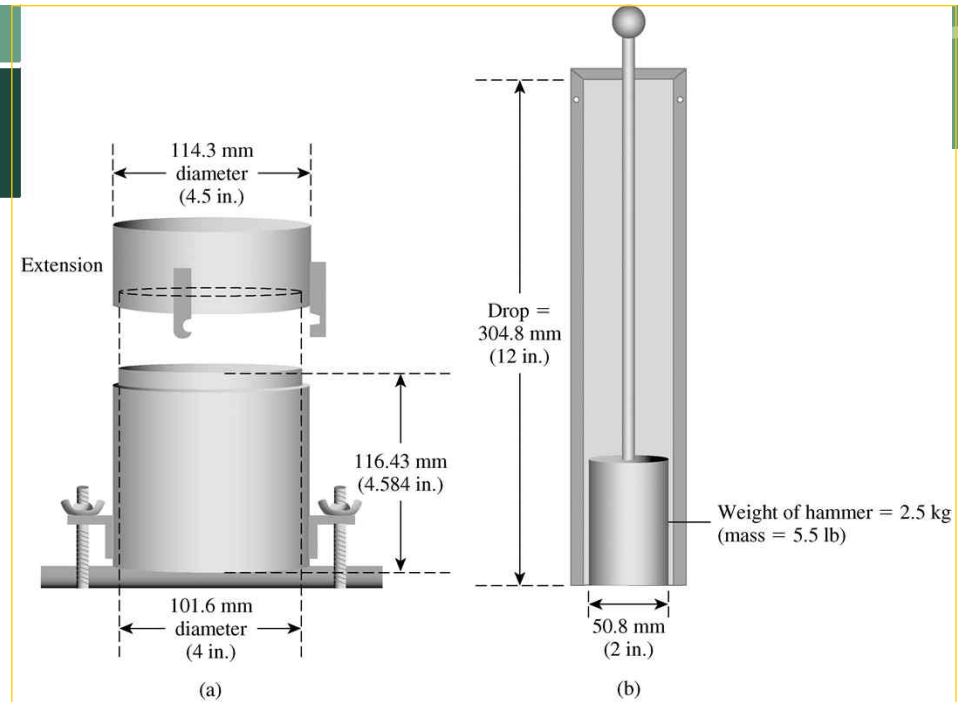


Figure 5.2 Standard Proctor test equipment: (a) mold; (b) hammer; (c) photograph of laboratory equipment used for test

2. Standard Proctor test

이론적 최대 건조단위중량

- 간극사이에 공기가 존재하지 않을 경우 → 포화도 100%
- 영 공기 간극(zero air void)

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{\omega(\%)}{100}}$$

Maximum Dry Unit Weight $\gamma_{d(max)}$

Optimum Moisture Content (OMC) ω_{opt}

$$\gamma_{d(theory)} = \gamma_{zav} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + \omega \cdot G_s} = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \omega}$$

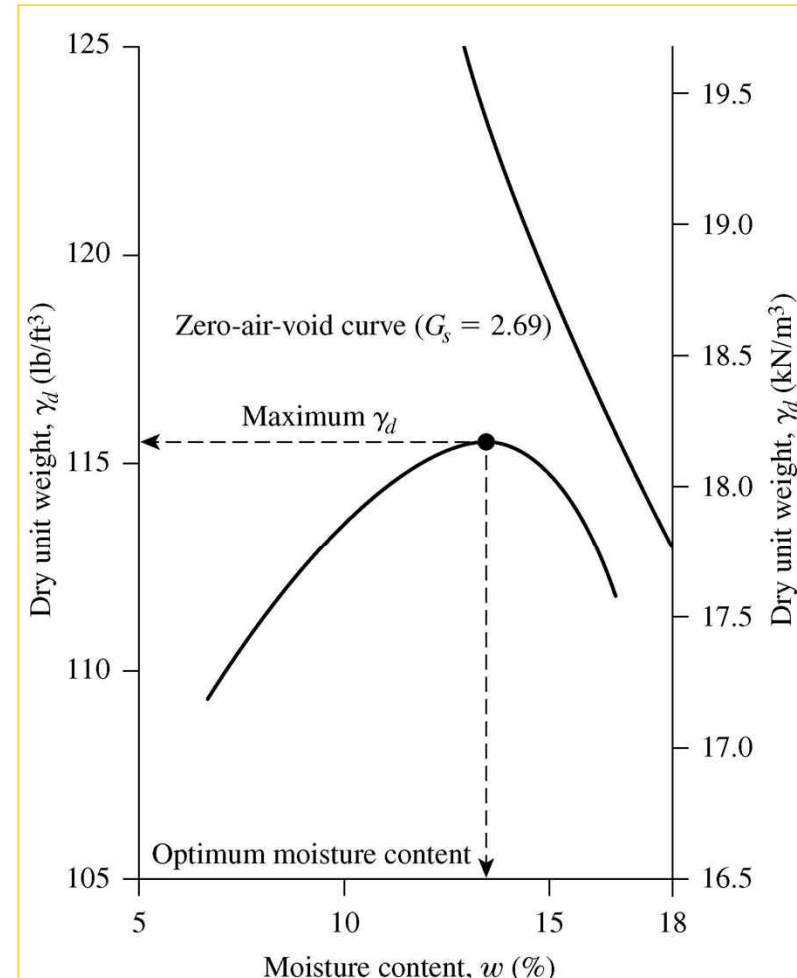


Figure 5.3 Standard Proctor compaction test results for a silty clay

3. Factors affecting Compaction

❖ 다짐에 영향을 주는 요소들

- 함수비
- 흙의 종류
- 다짐에너지
- 기타..

❖ 흙의 종류에 따른 영향

- 입도분포
- 입자모양
- 흙고체의 비중
- 흙 입자의 형태
- 점토성분의 종류 및 양

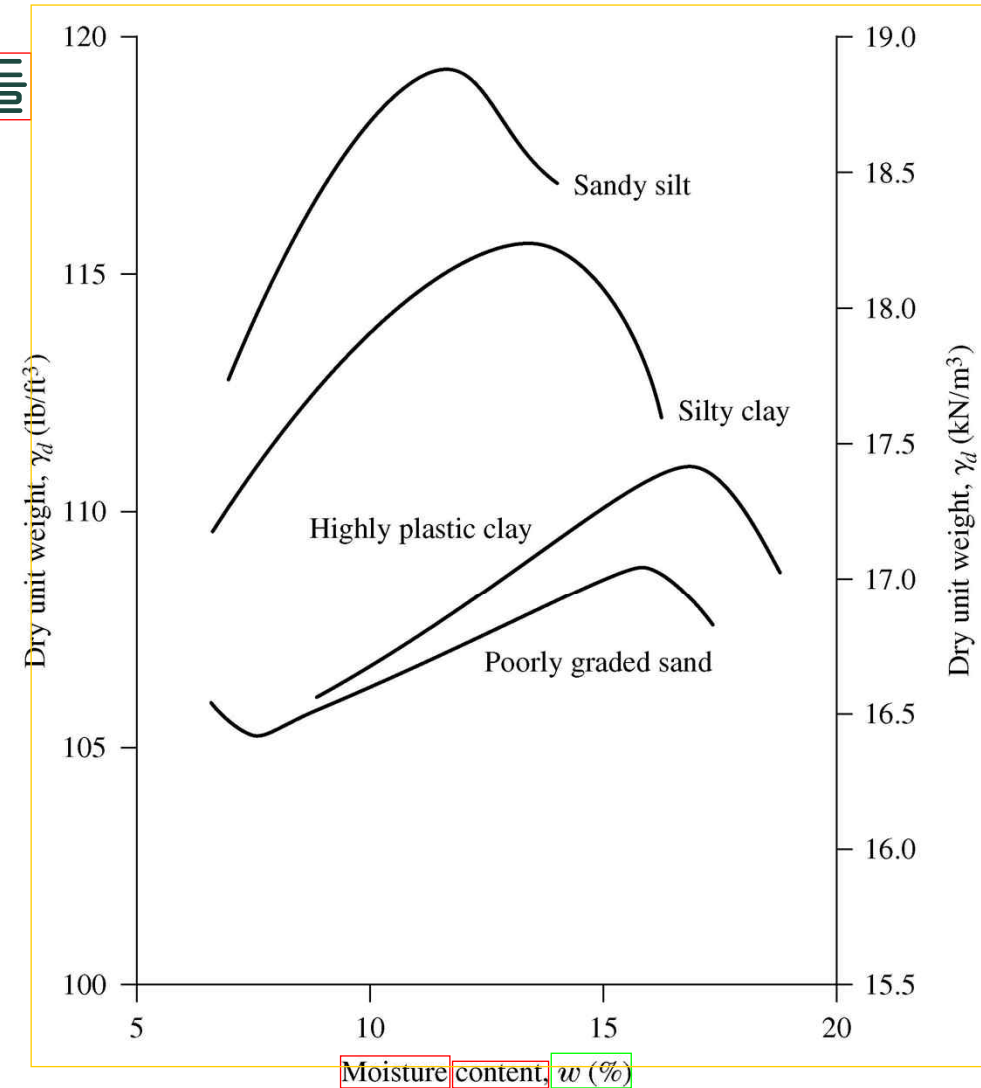


Figure 5.4 Typical compaction curves for four soils (ASTM D-698)

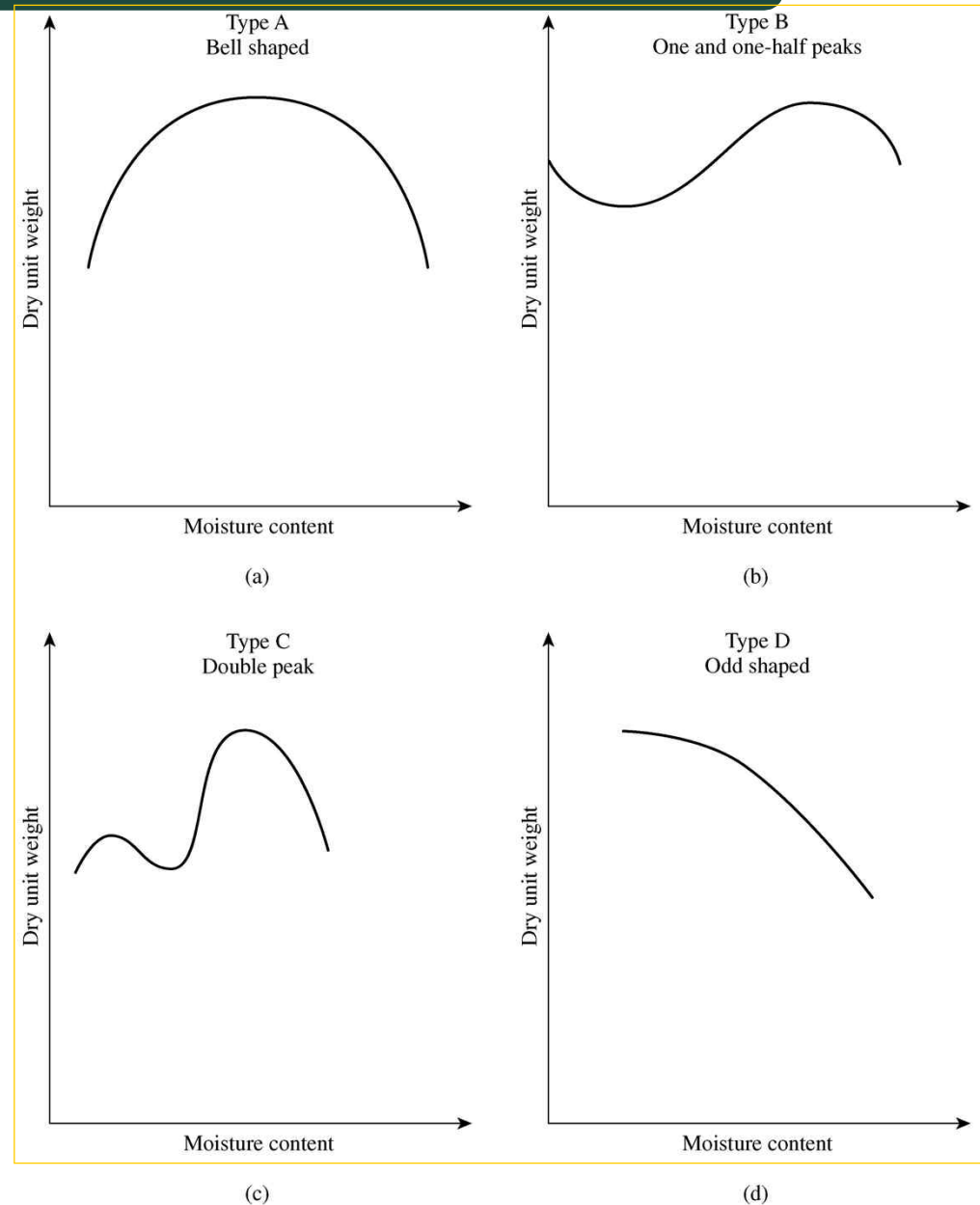
3. Factors affecting Compaction

- ❖ 흙의 종류에 따른 영향
- ❖ ASTM(D-698)
- ❖ Lee & Suedkamp(1972)
- ❖ 35개 흙 시료

일반적인 경우 - (a)

액성한계 30% 이하 - (b), (c)

액성한계 70% 이상 - (c), (d)



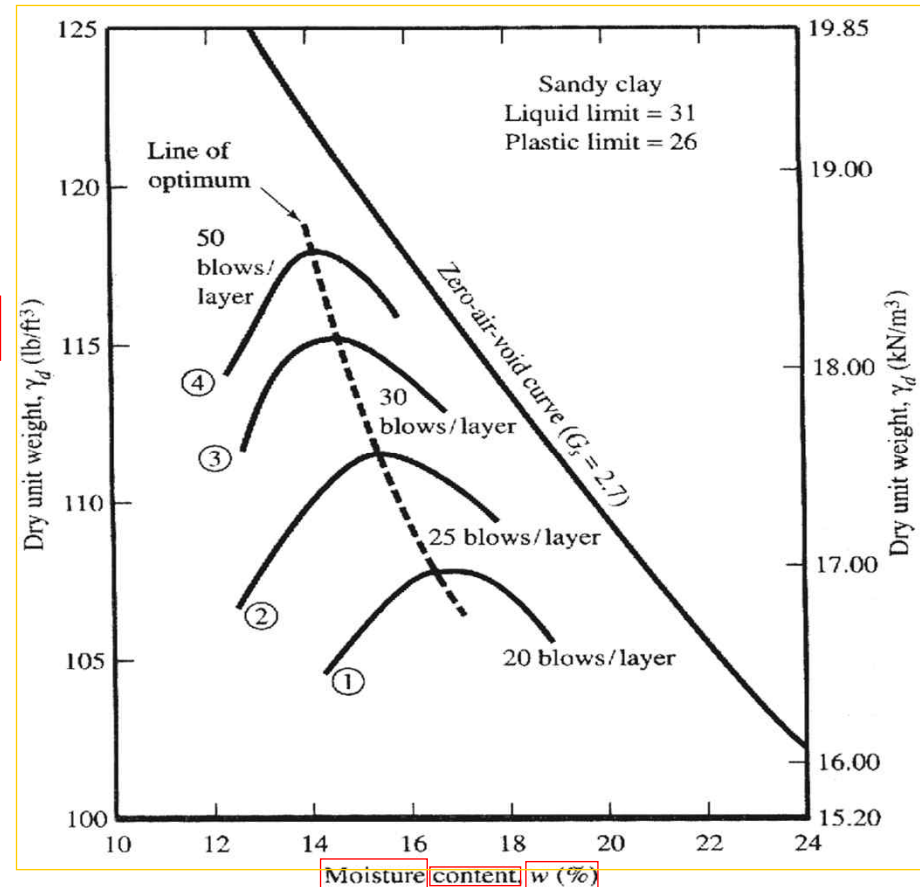
3. Factors affecting Compaction

❖ 다짐 에너지에 의한 영향

- 다짐 에너지

$$E = \frac{W_h \cdot H_h \cdot N_l \cdot N_c}{V_m} = 594 \sim 600 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

- ❖ Weight of hammer(W_h)
- ❖ Height of drop of hammer(H_h)
- ❖ Number of layer(N_l)
- ❖ Number of blows per layer(N_c)
- ❖ Volume of mold(V_m)



4. Modified Proctor Test

❖ 수정 다짐시험(Modified Proctor Test)

- 다짐기계의 대형화 및 다짐상태의 개선 → 현장조건에 근접한 실내 다짐시험 모색
- ASTM 시험(D-1557): 4.54kg hammer, 5 layer, 25 blows

Compaction method	A	B	C	D	E
Weight of hammer	2.5kgf	2.5kgf	4.5kgf	4.5kgf	4.5kgf
Diameter of mold	10cm	15cm	10cm	15cm	15cm
Number of layers	3	3	5	5	3
Number of blows per layer	25	55	25	55	92
Maximum allowable grain size	19mm	37.5mm	19mm	19mm	37.5mm

4. Modified Proctor Test

❖ Omar et al.(2003)-311개

- 자갈 45개
- 사질토 264개
- 점토 2개
- ASTM 1557 C방법

❖ $\rho_{d(max)}$

❖ $\omega_{(opt)}$

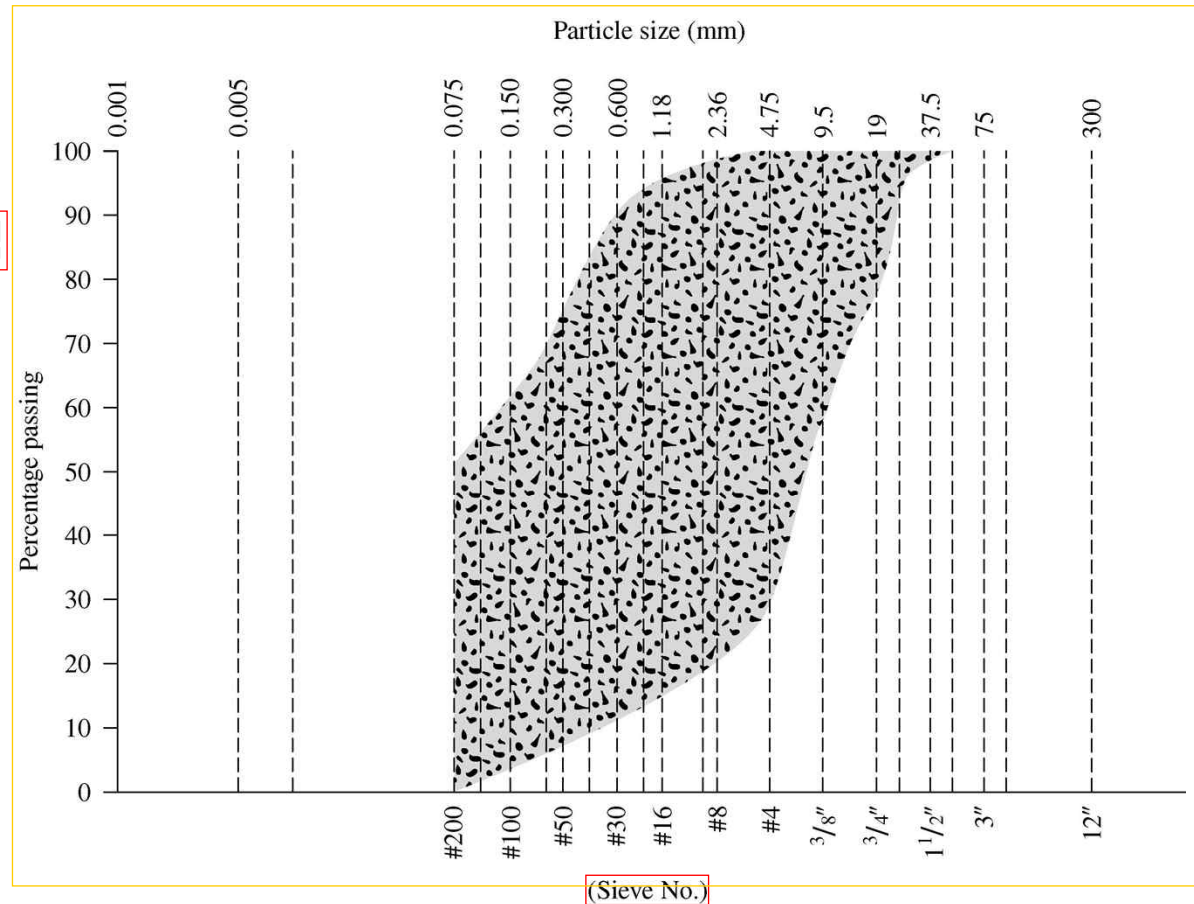


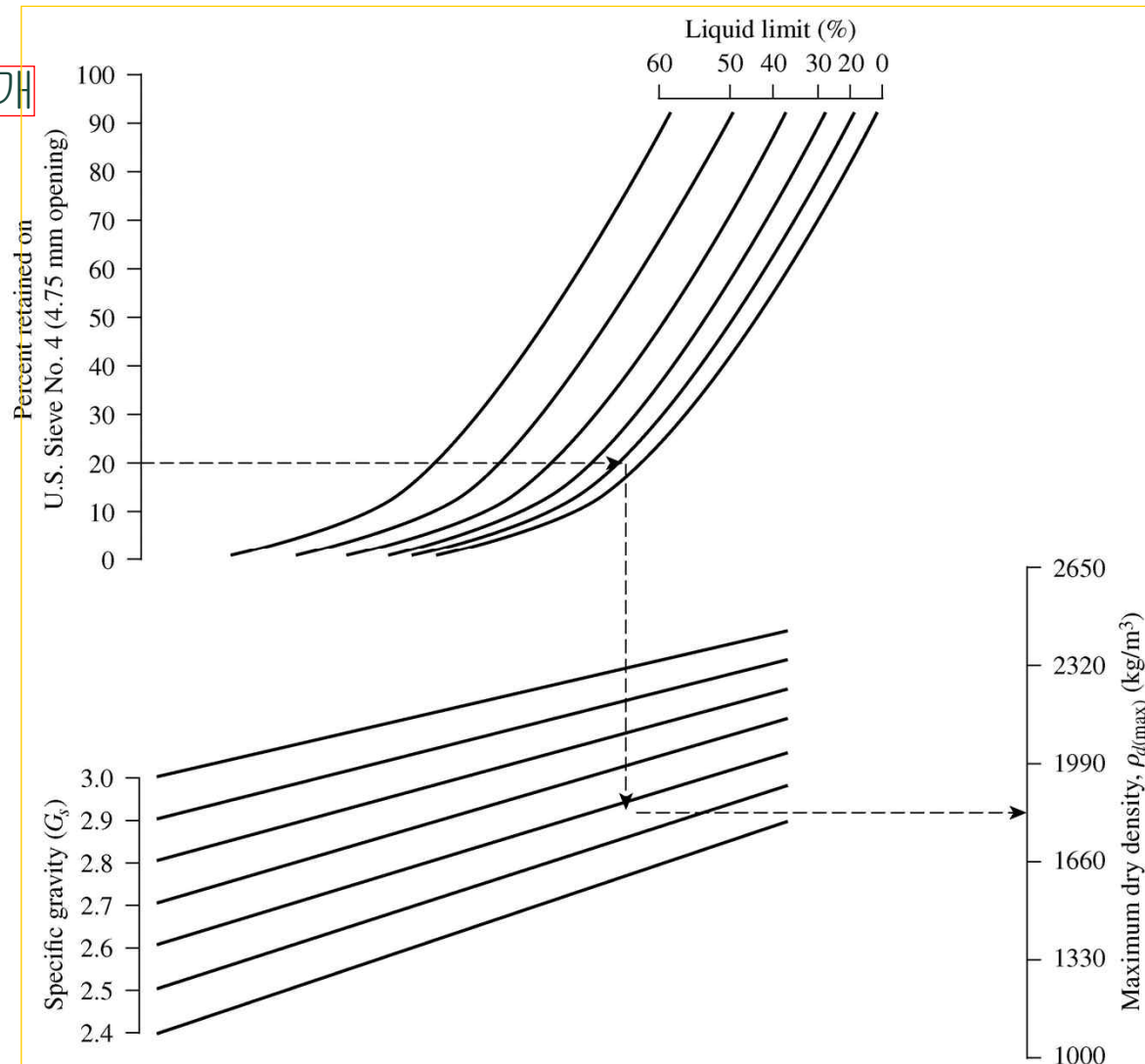
Figure 5.7 Range of grain-size distribution of all soils tested by Omar, et al. (2003)

4. Modified Proctor Test

$$\rho_{d(max)} = [4,804,574 G_s - 195.55 LL^2 + 156,971 (R\#4)^{0.5} - 9,527,830]^{0.5}$$

❖ Omar et al.(2003)-311개

- 자갈 45개
- 사질토 264개
- 점토 2개
- ASTM 1557 C방법

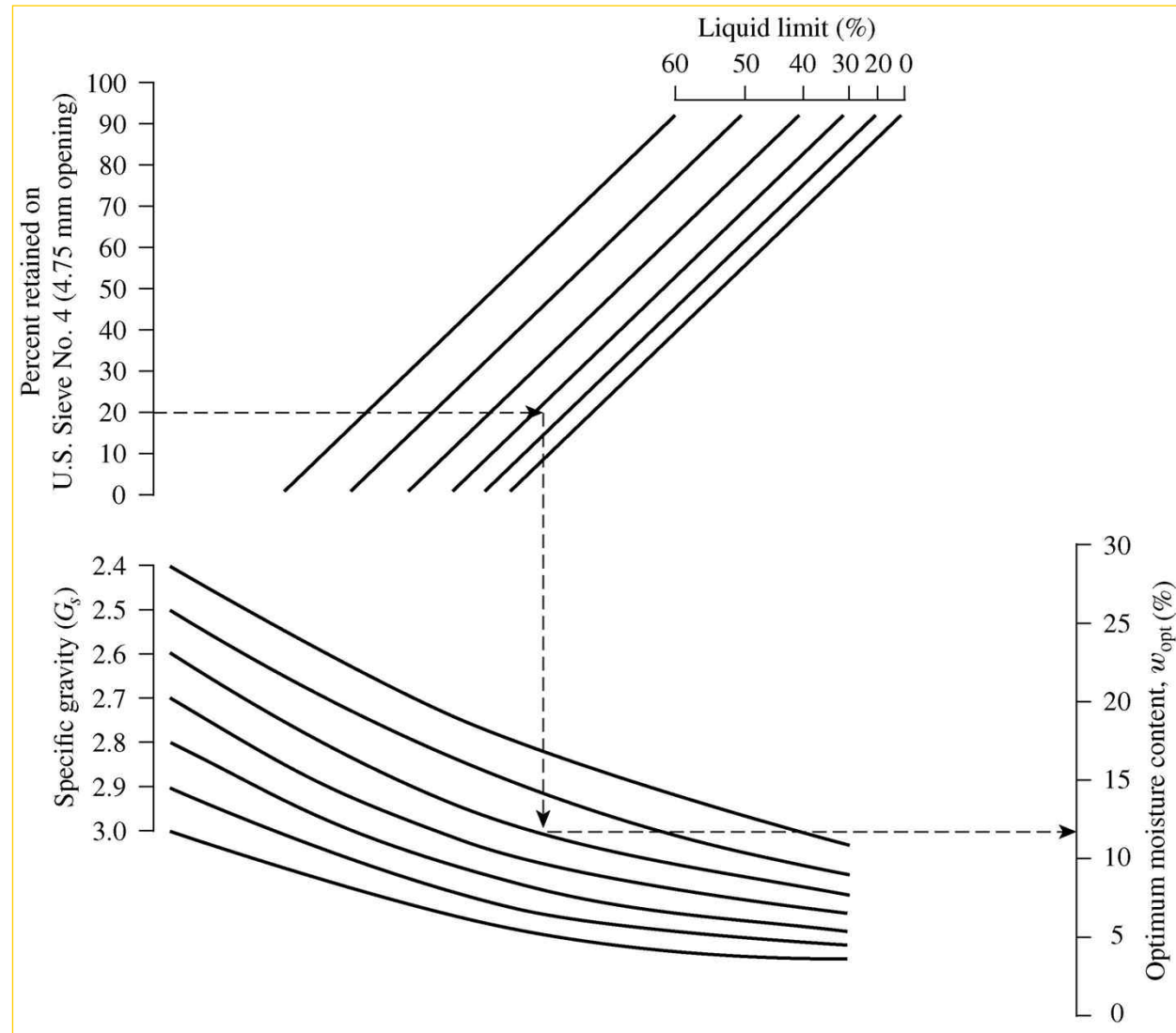




4. Modified Proctor Test

$$\ln(\omega_{\text{opt}}) = 1.195 \times 10^{-4} \text{LL}^2 - 1.964 G_s - 6.617 \times 10^5 (\text{R\#4}) + 7.651$$

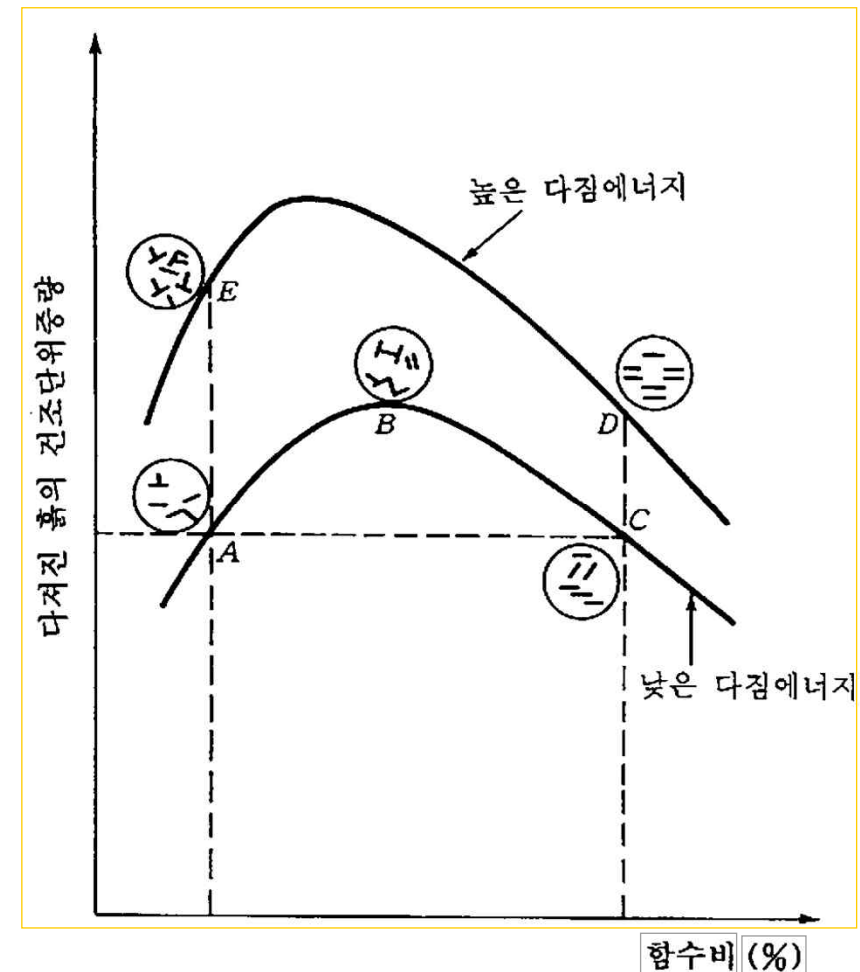
Omar et al.(2003)



5. Structure of Compacted Cohesive Soil

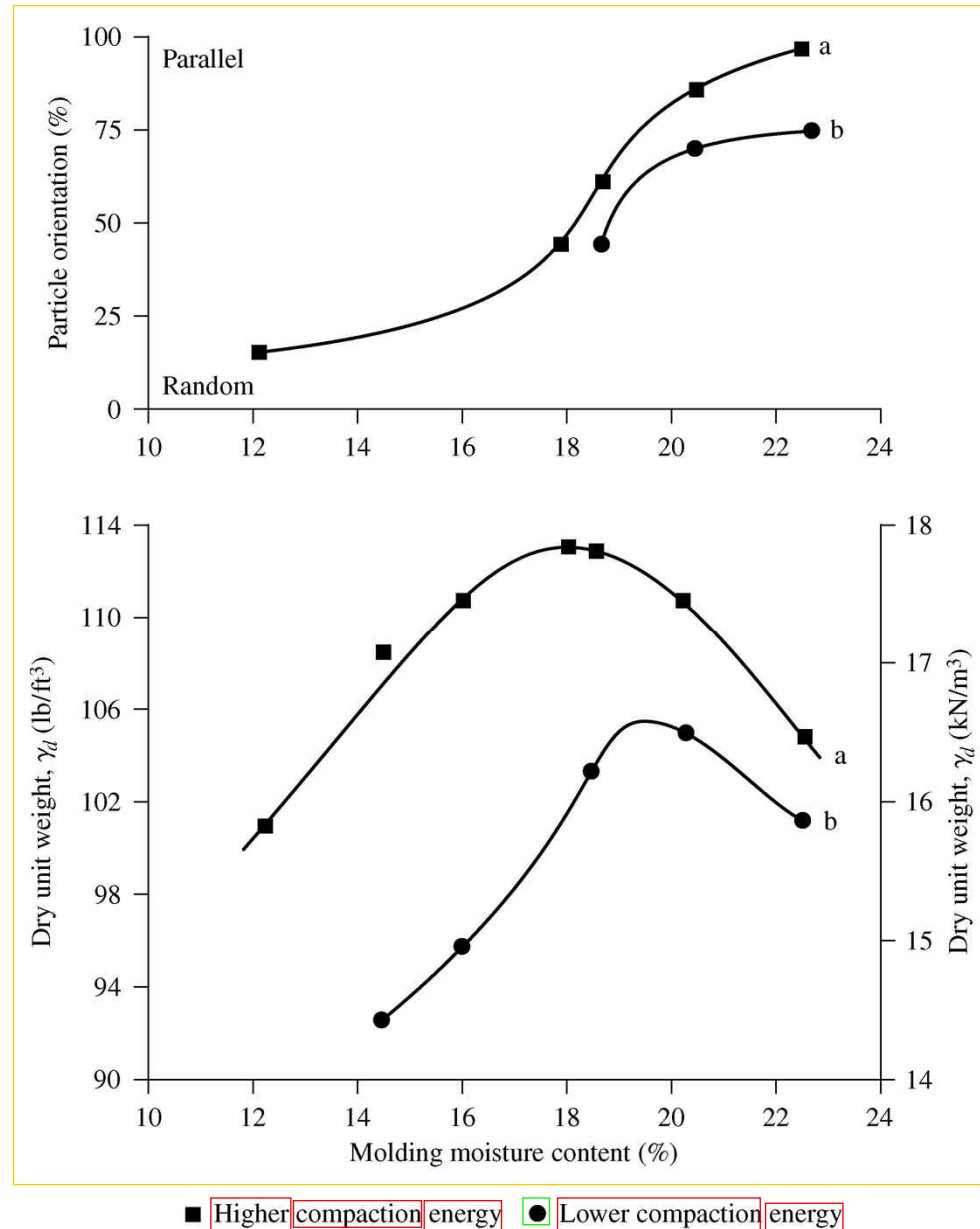
❖ 다짐을 받은 점성토의 구조

- **A, E** : 낮은 함수비상태 :
점토입자를 둘러싸고 있는
확산이중층 발달 부진 → 입자간
인력 부진
- **B** : 함수비 증가 : 입자 주위에
확산이중층 발달 → 입자간 인력
증가 → 면모화 발달 → 높은
건조단위중량
- **C** : 높은 함수비로 부피 팽창 →
배열성 크게함 → 분산구조화 →
단위중량 감소
- **D** : 일정 함수비 상태에서 높은
다짐에너지 → 점토입자 배열이
평행한 상태로 되려는 경향 →
구조교란 → 분산구조



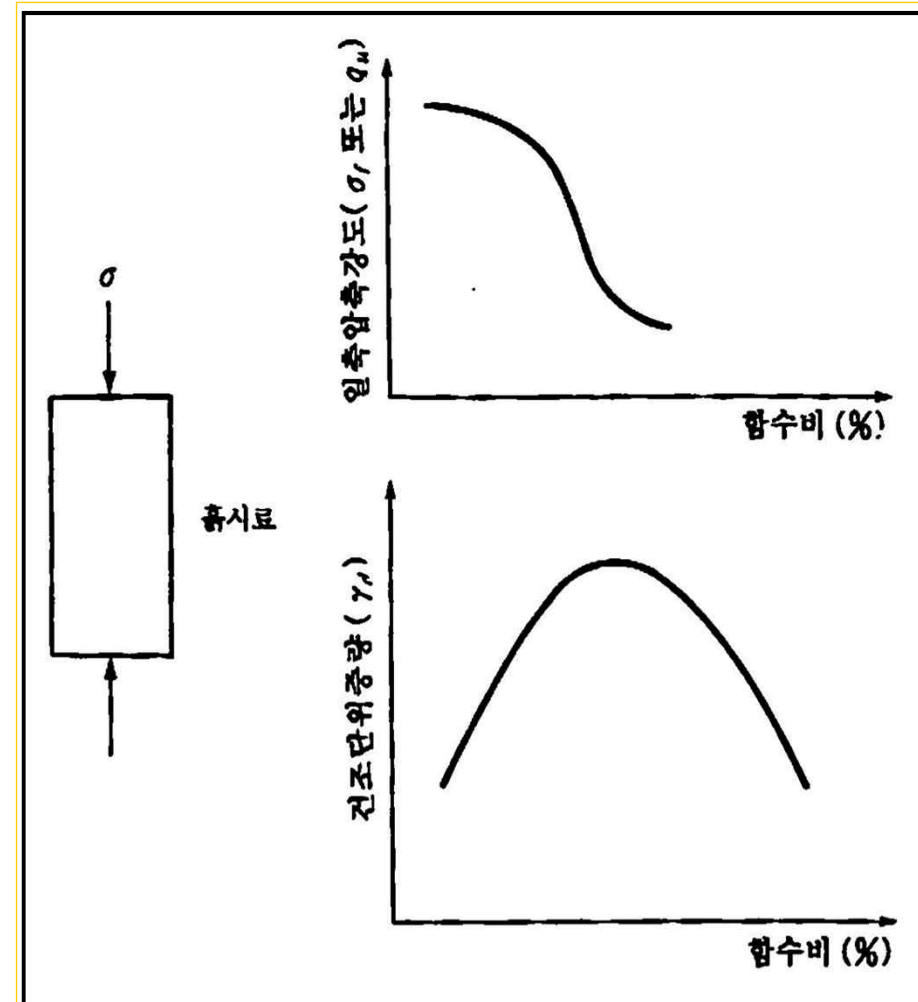
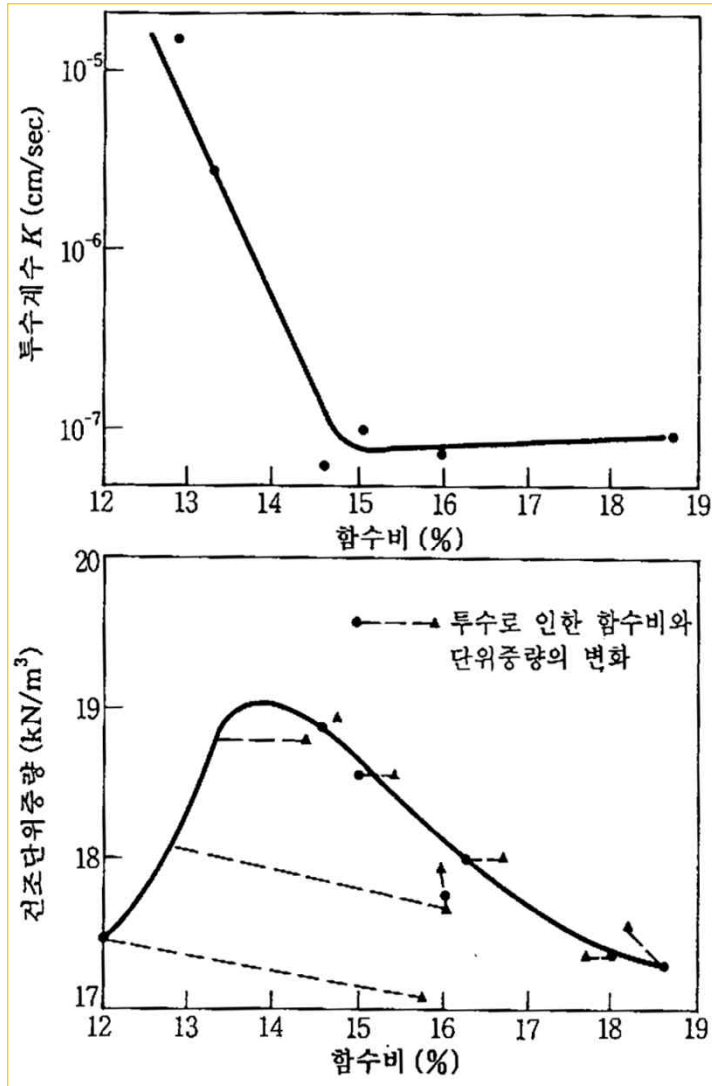
5. Structure of Compacted Cohesive Soil

- ❖ Lambe(1958)
- ❖ Boston blue clay
- ❖ 함수비에 따른 입자배열
- ❖ Seed & Chan(1959)



6. Effect of Compaction on Cohesive Soil Properties

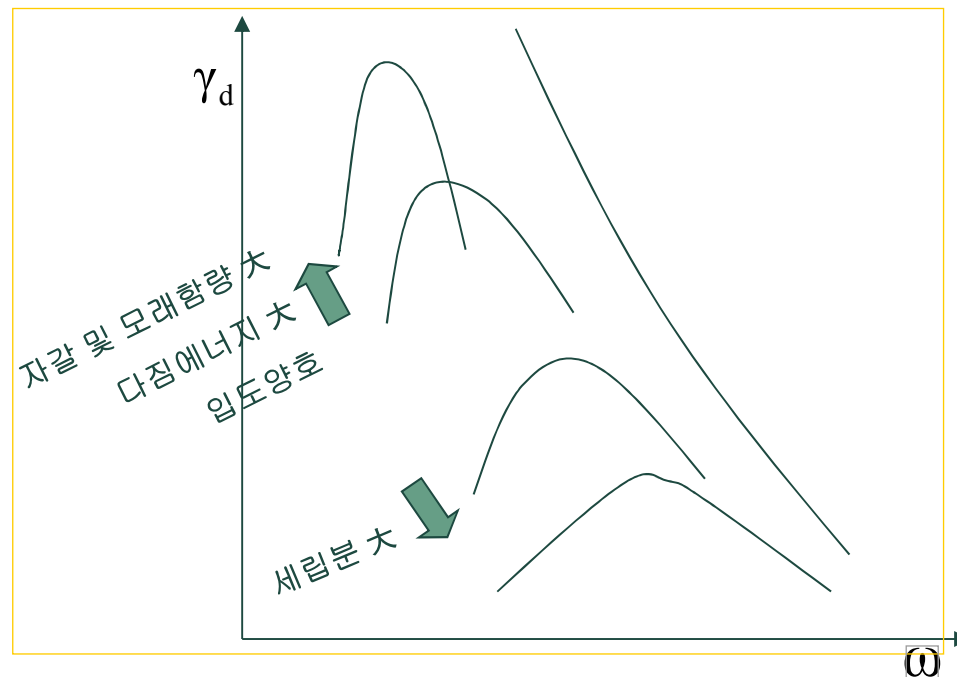
❖ 투수계수에 미치는 영향-점토 ❖ 압축강도에 미치는 영향-점토



7. Characteristics of Compaction Curves

❖ 다짐곡선의 성질

- $\gamma_{d(max)}$ 가 클수록 ω_{opt} 은 작음
- 사질토는 $\gamma_{d(max)}$ 가 크고, 다짐곡선의 기울기가 급함
- 점성토는 $\gamma_{d(max)}$ 가 작고, 다짐곡선의 기울기가 완만
- 다짐에너지가 클수록 $\gamma_{d(max)}$ 가 크고 ω_{opt} 는 작아짐
- 자갈 및 모래 함유량이 많을수록 $\gamma_{d(max)}$ 가 크고 ω_{opt} 는 작아짐



8. Field Compaction

❖ 현장다짐

- 실험실 → 표준다짐, 수정다짐시험, Hammer에 의한 다짐
- 현장 → 실내 다짐시험에 근거 → 건설기계, Roller에 의한 다짐
- 토질종류, 상태에 따라 다짐기계 선택

❖ 강륜롤러(Smooth wheel roller, Drum roller)

- 사질토, 점성토로 구성된 성토의 마무리 작업, 두꺼운 성토에 부적합

❖ 공기 타이어 롤러(Pneumatic rubber tired roller)

- 사질토, 점성토 지반 다지기, 압축작용과 반죽작용

❖ 양족롤러(Sheepsfoot roller)

- 드럼 표면에 돌기를 부착, 점성토 다짐에 효과

❖ 진동롤러(Vibration roller)

- 드럼에 진동기 부착, 사질토 다짐에 효과

8. Compaction Equipment

❖ 강륜롤러(Smooth wheel roller, Drum roller)

- 사질토/점성토 성토의 마무리 작업, 두꺼운 성토에 부적합($31\sim38\text{Mg/m}^2$)

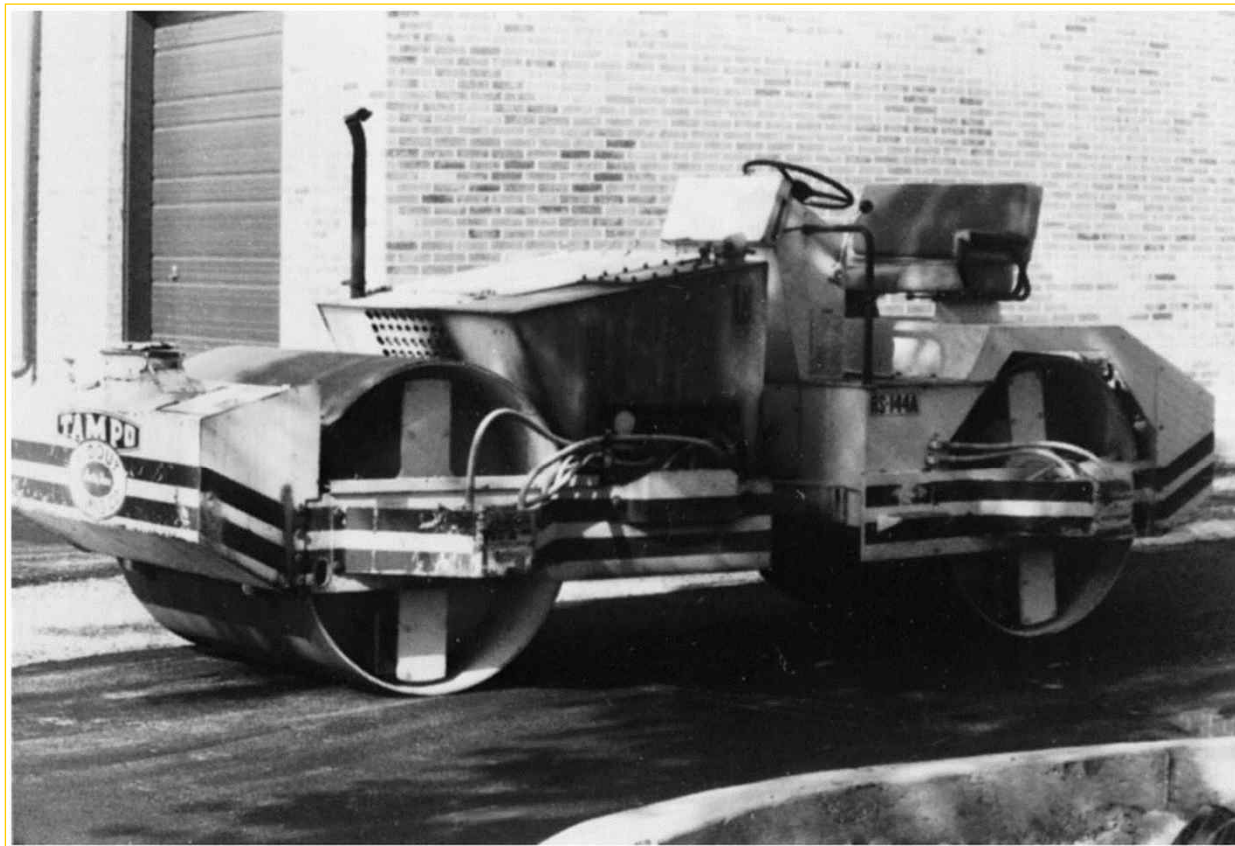


Figure 5.19 Smooth-wheel roller (Courtesy of David A. Carroll, Austin, Texas)

8. Compaction Equipment

❖ 공기 타이어 롤러(Pneumatic rubber tired roller)

- 사질토, 점성토 지반 다지기, 압축작용과 반죽작용 ($58.5 \sim 69 \text{ Mg/m}^2$)



Figure 5.20 Pneumatic rubber-tired roller (Courtesy of David A. Carroll, Austin, Texas)

8. Compaction Equipment

❖ 양족롤러(Sheepsfoot roller)

- 드럼 표면에 돌기를 부착, 점성토 다짐에 효과 ($138\sim690\text{Mg/m}^2$)

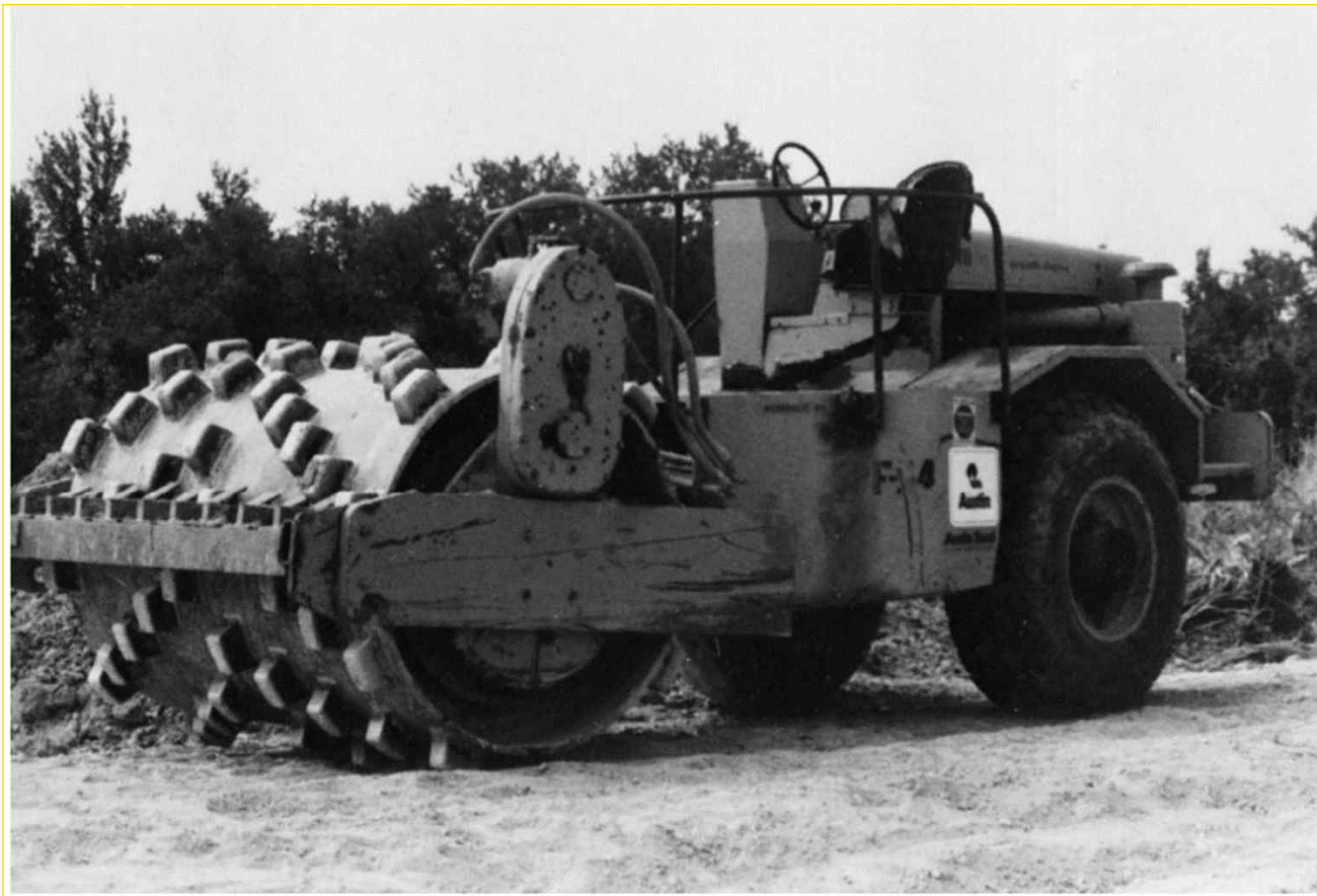


Figure 5.21 Sheepsfoot roller (Courtesy of David A. Carroll, Austin, Texas)

8. Compaction Equipment

❖ 진동롤러(Vibration roller)

- 드럼에 진동기 부착, 사질토에 가장 다짐에 효과가 크다

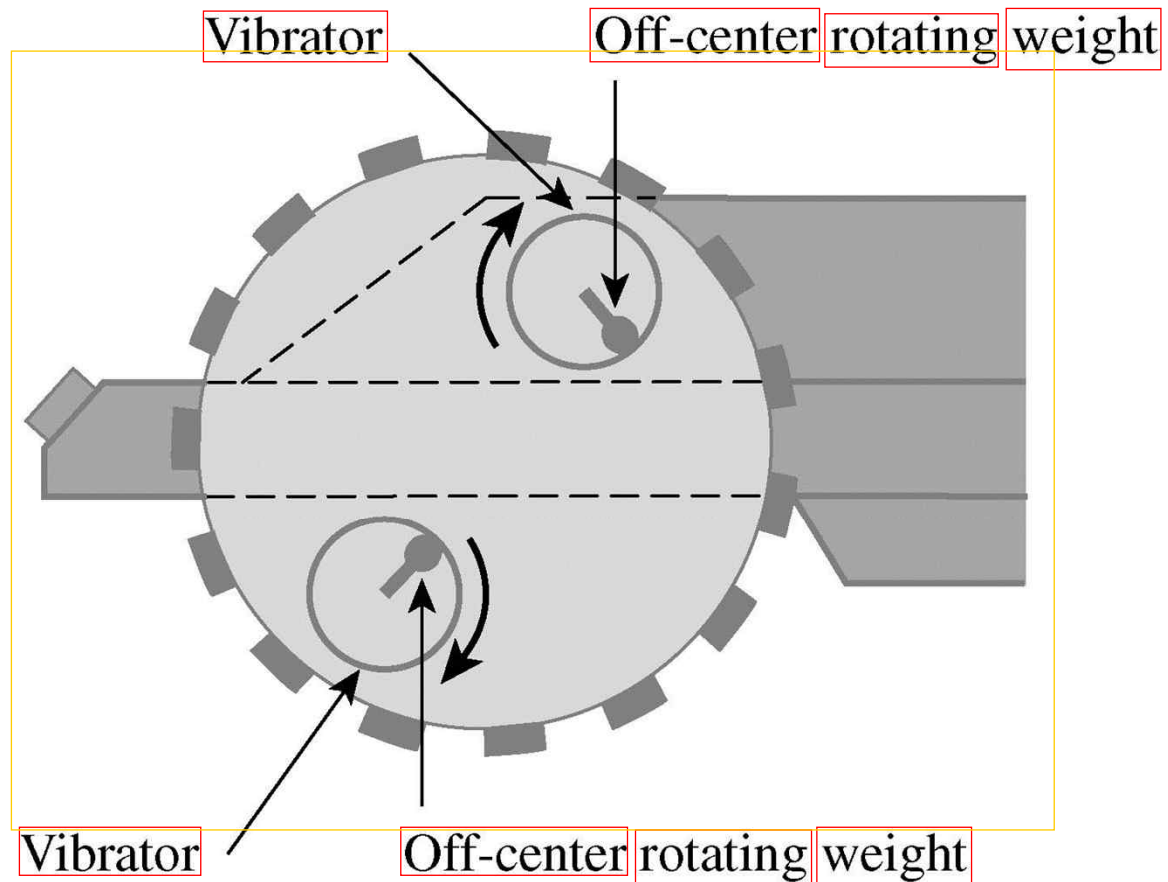
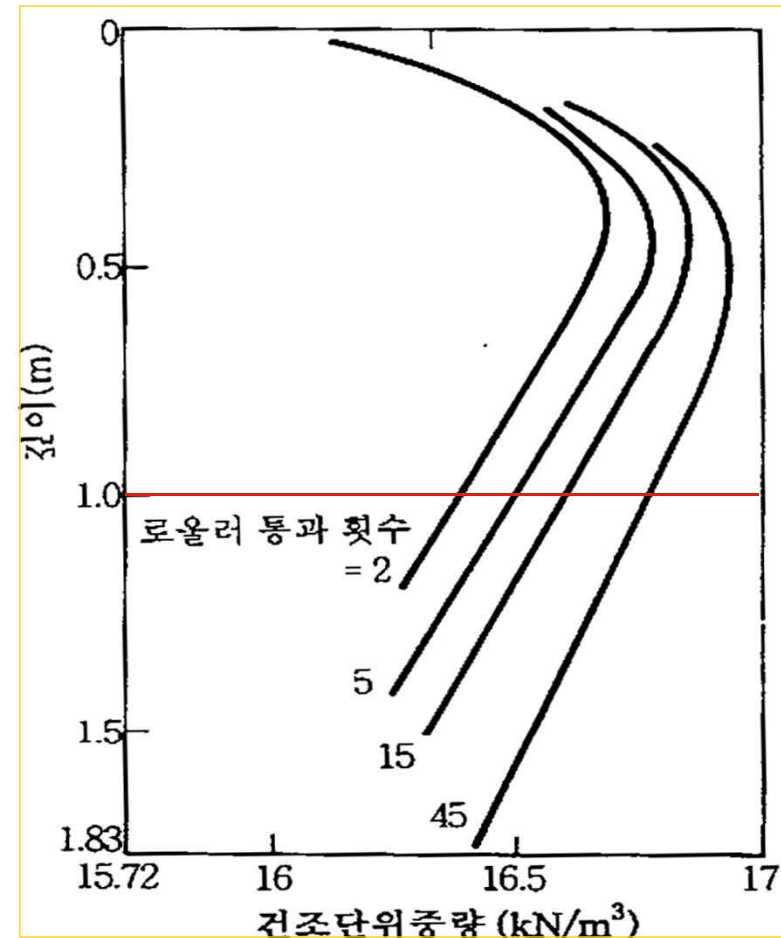
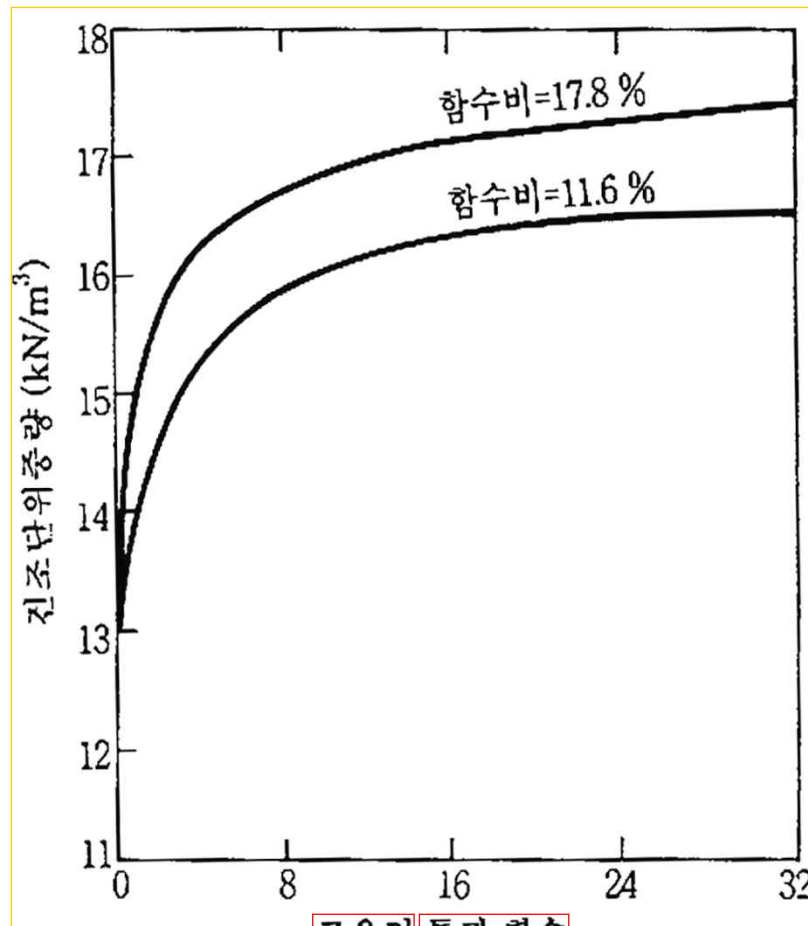


Figure 5.22 Principles of vibratory rollers

8. Field Compaction

❖ 롤러 통과 횟수에 의한 다짐의 영향 (10~15회)



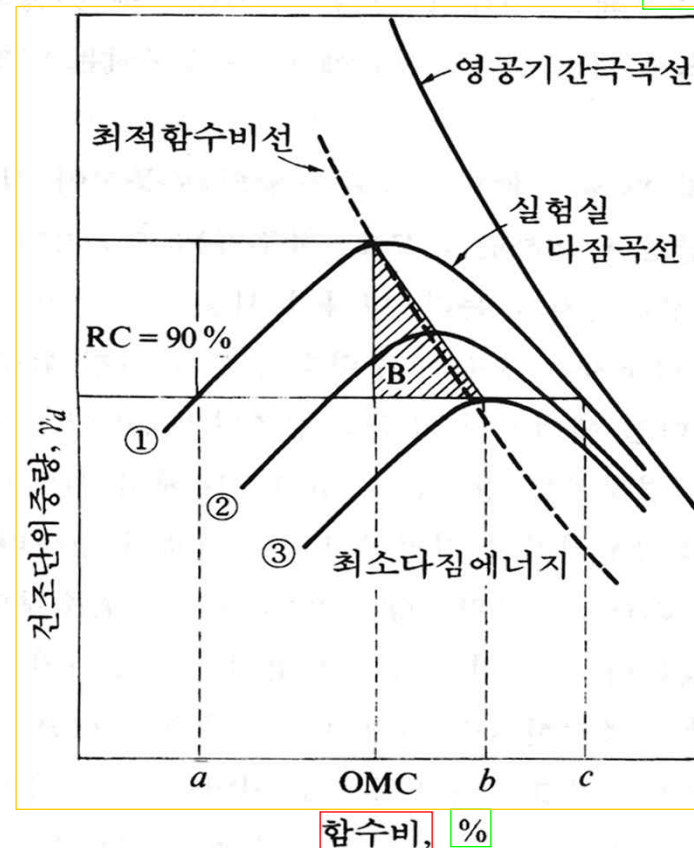
9. Specification for Field Compaction

❖ 현장 다짐에 관한 규정

- 현장에서의 다짐도 → 실내 다짐시험시 최대 건조단위중량의 90~95%

- 상대다짐도(RC ; Relative Compaction)

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(\text{field})}}{\gamma_{d(\text{lab})}} \times 100$$

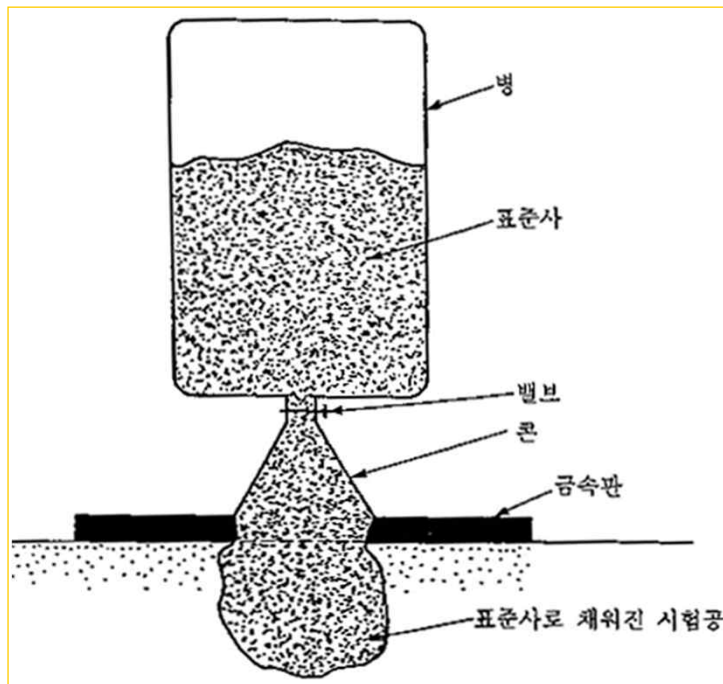


10. Determination of Field Unit Weight of Compaction

❖ 현장에서 단위중량 결정

- 현장에서 다짐작업시 규정된 단위중량에 도달했는지 확인 필요
- 모래 치환법(Sand cone method), 고무 풍선법(Rubber balloon method), 핵 밀도기 사용법(Use of a nuclear density meter)

❖ 모래 치환법



$$W_{(\text{hole \& cone})} = W_{(\text{full bottle})} - W_{(\text{remain bottle})}$$

$$V = \frac{W_{(\text{hole \& cone})} - W_{(\text{cone})}}{\gamma_{d(\text{sand})}}$$

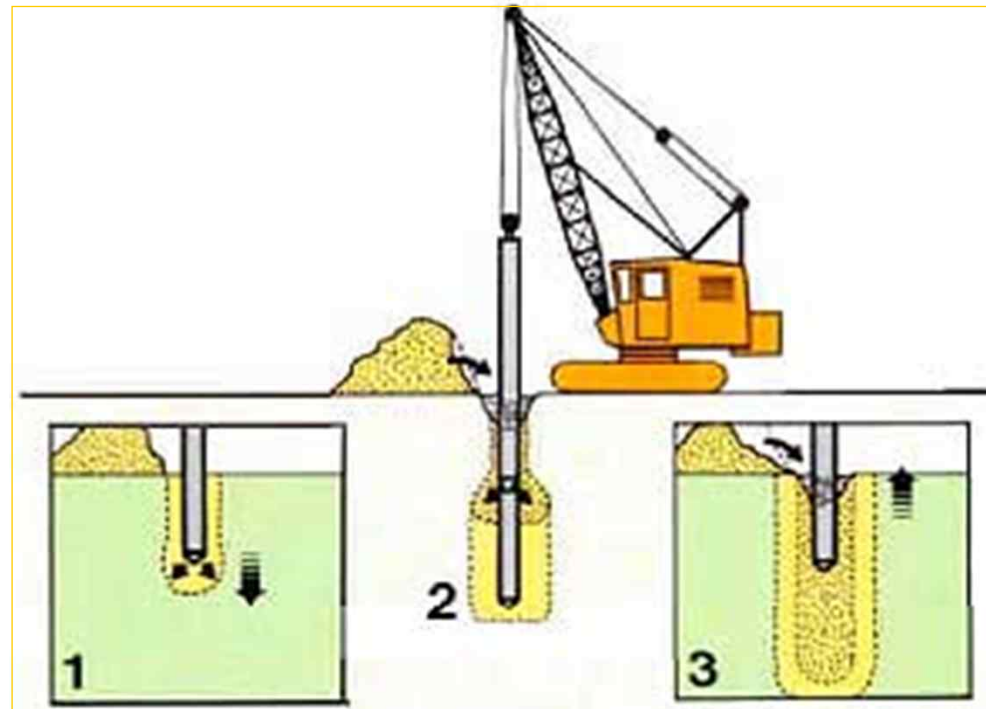
$$W_{d(\text{soil})} = \frac{W_{t(\text{soil})}}{1 + \frac{\omega_{(\text{soil})}(\%) }{100}}$$

$$\gamma_{d(\text{soil})} = \frac{W_{d(\text{soil})}}{V}$$

11. Special Compaction Techniques

❖ 특수한 다짐 기술

- 바이브로 플로테이션(Vibroflotation)
- 지반 심층부 다짐 (현장에서 널리 사용되는 기술)
- 느슨하고 두꺼운 조립토층의 다짐, 바이브로 플로를 분사현상(quick condition)을 이용 지반에 관입하여 사질토를 주입하고 진동시키면서 상승



11. Special Compaction Techniques

❖ 특수한 다짐 기술

- 동적 다짐(Dynamic Compaction)
- 느슨한 사질 지반의 다짐, 무거운 추를 반복적으로 지반에 낙하 → 사질토 채움
- 발파공법 → 조립토의 밀도증대, 토층두께의 2/3 지점에 폭약 설치

