

# 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

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

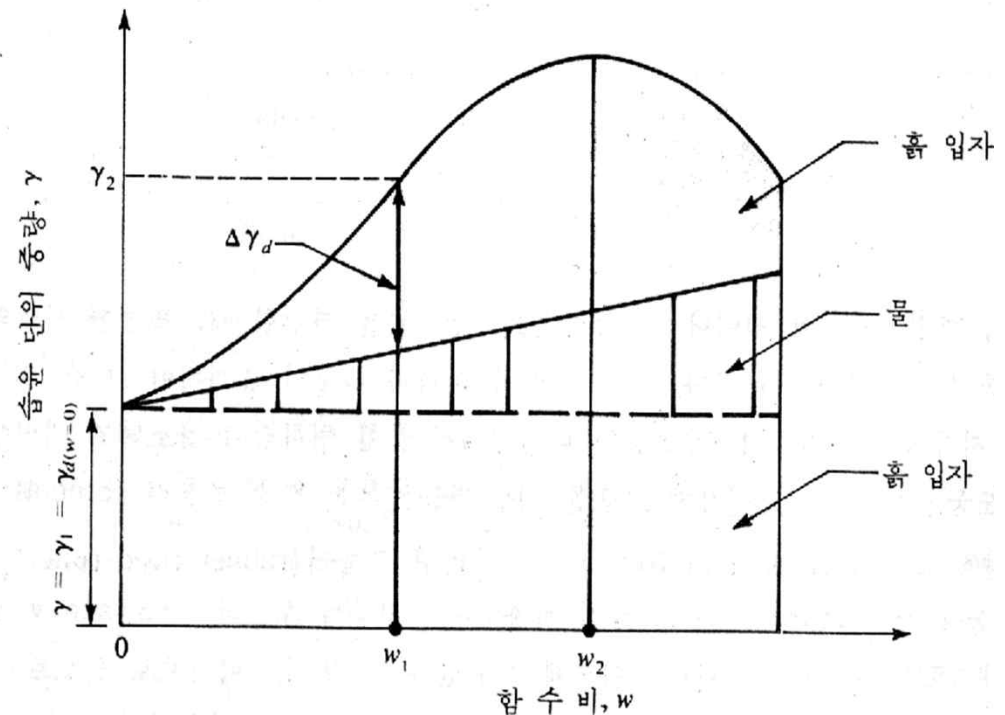
- 함수비가 증가되는 상태에서 동일한 다짐에너지 → 단위 부피당 흙 무게 증가

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

- 임의 함수비 초과하면 함수비가 증가함에 따라 건조단위중량 감소

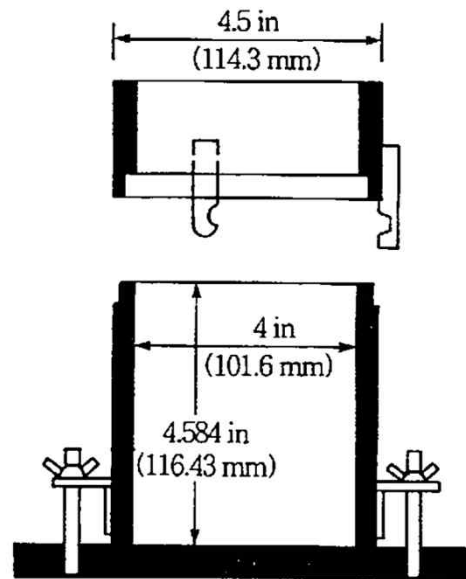
- 고체입자들로 채워져  
있던 공간 → 물이 차지

- 최대건조단위중량  $\gamma_{d(max)}$   
(Maximum dry unit weight)  
→  
최적함수비 (OMC ; Optimum  
moisture content)

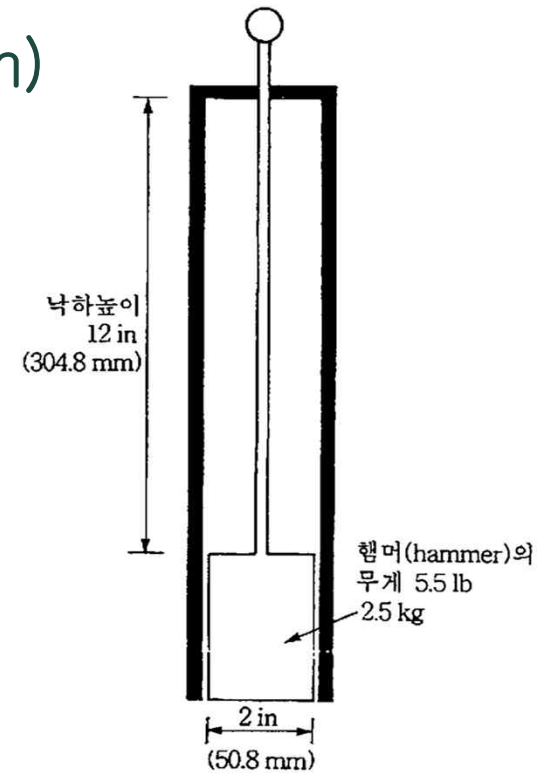


## 2. Standard Proctor Test

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



(a) 몰드



(b) 햄머

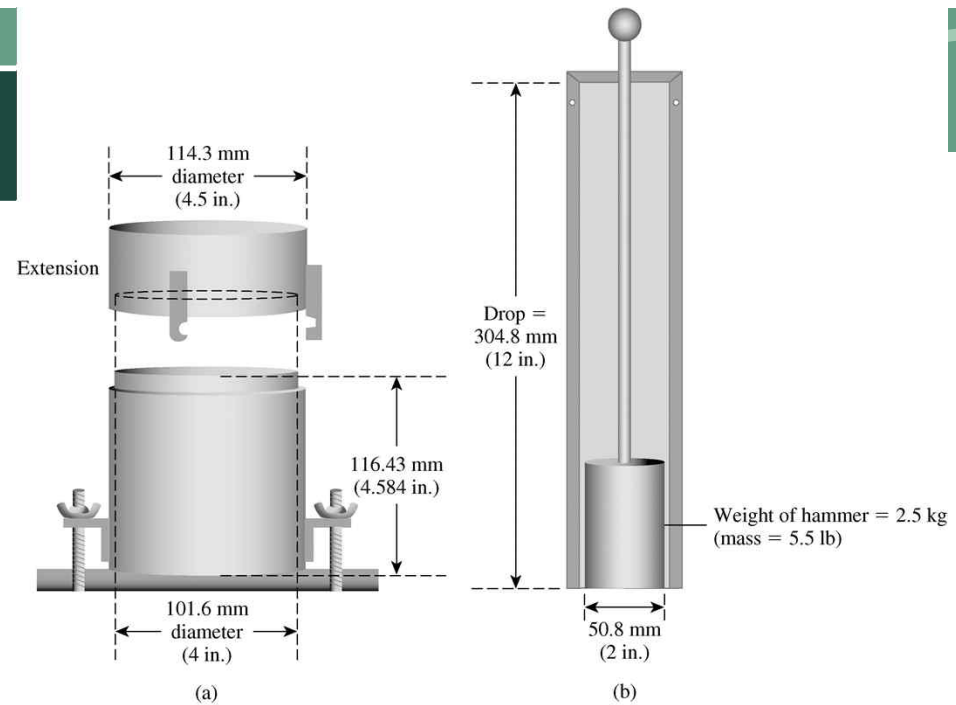
## 2. 표준다짐시험

❖ 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 최대건조단위중량

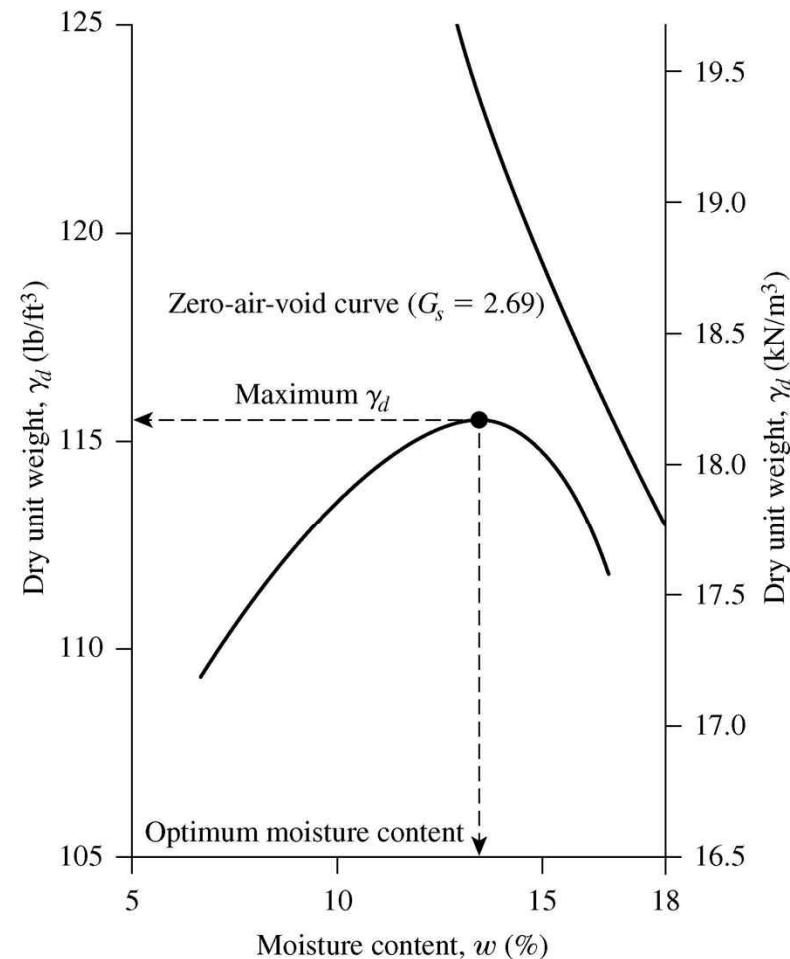
- 간극사이에 공기가 존재하지 않을 경우 → 포화도 **100%**
- 영 공기 간극(**zero air void**)

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

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

**Optimum Moisture Content (OMC)**  $\omega_{\text{opt}}$

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



**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

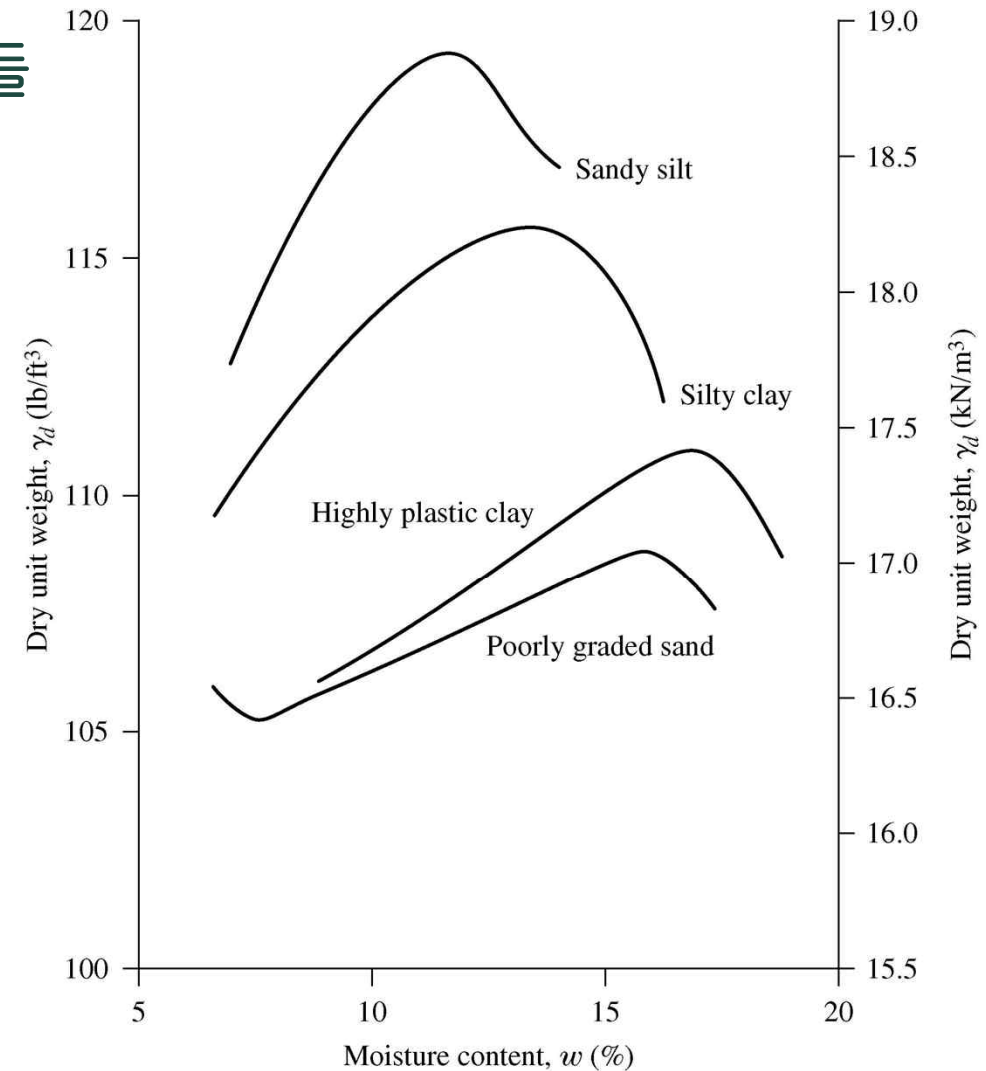


Figure 5.4 Typical compaction curves for four soils (ASTM D-698)

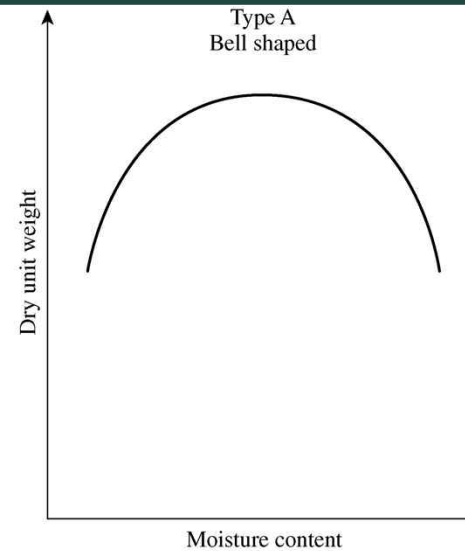
# 3. Factors affecting Compaction

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

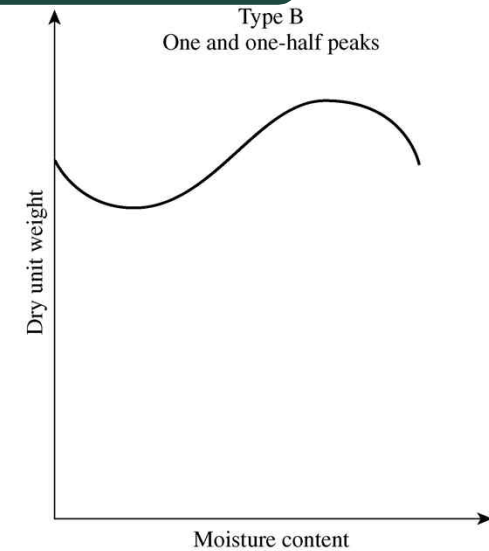
일반적인 경우 – (a)

액성한계 30% 이하 – (b), (c)

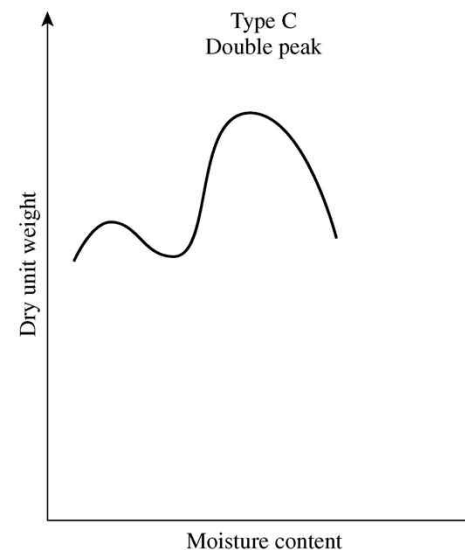
액성한계 70% 이상 – (c), (d)



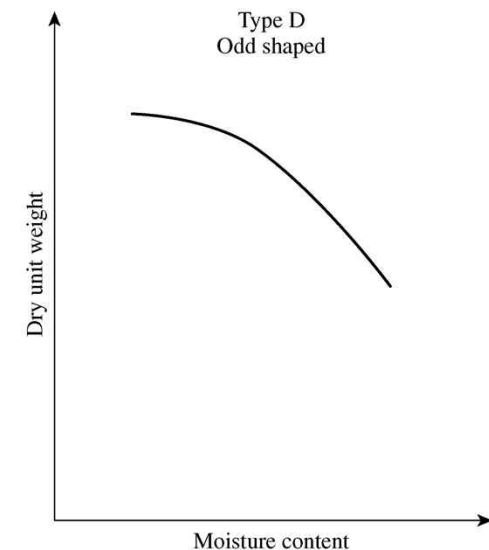
(a)



(b)



(c)



(d)

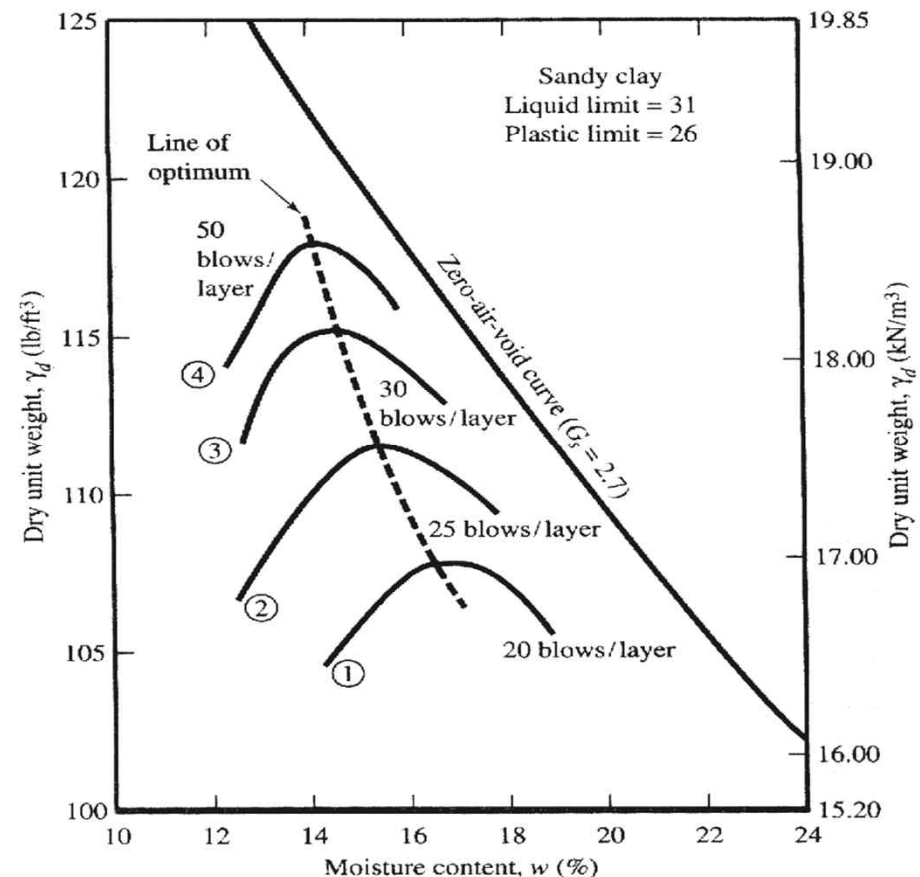


# 3. Factors affecting Compaction

## ❖ 다짐 에너지에 의한 영향

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

- ❖ 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 |

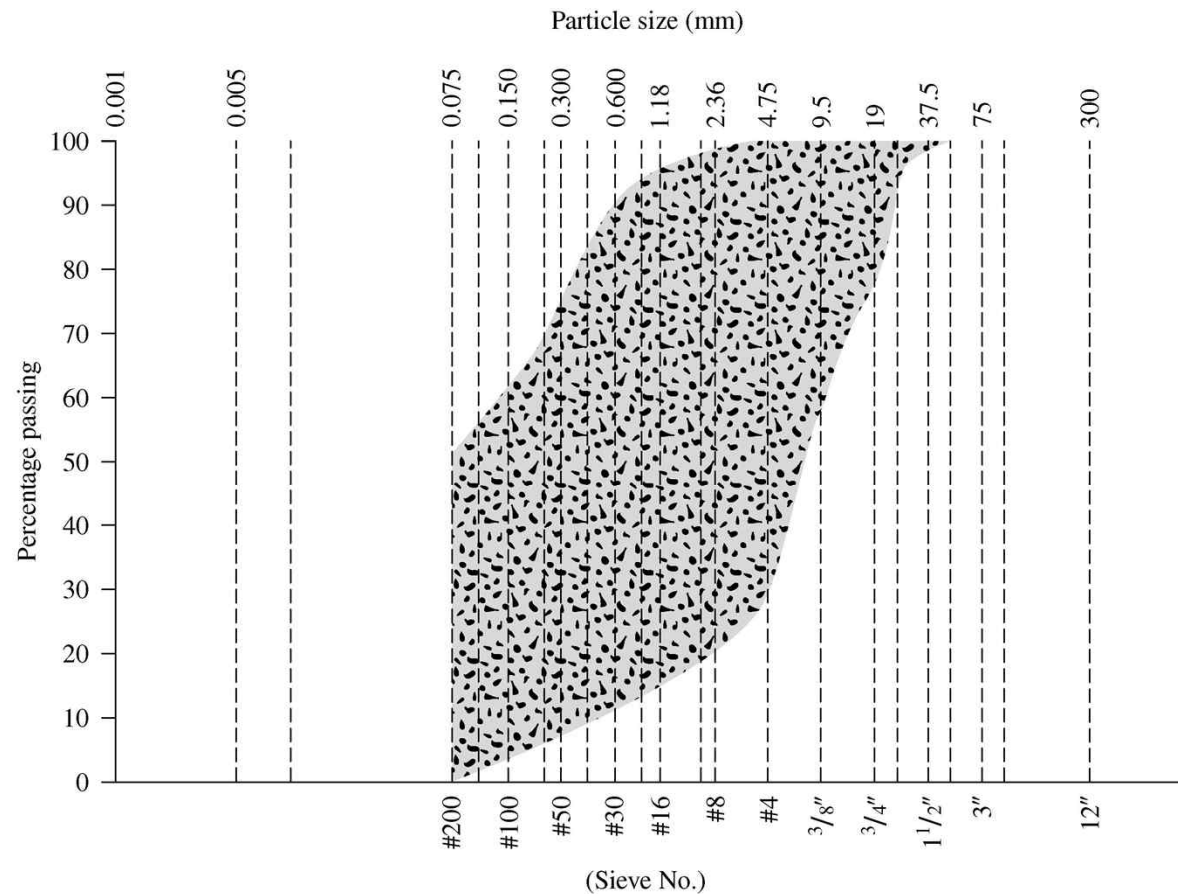
## 4. Modified Proctor Test

### ❖ Omar et al.(2003)-311개

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

❖  $\rho_{d(max)}$

❖  $\omega_{(opt)}$



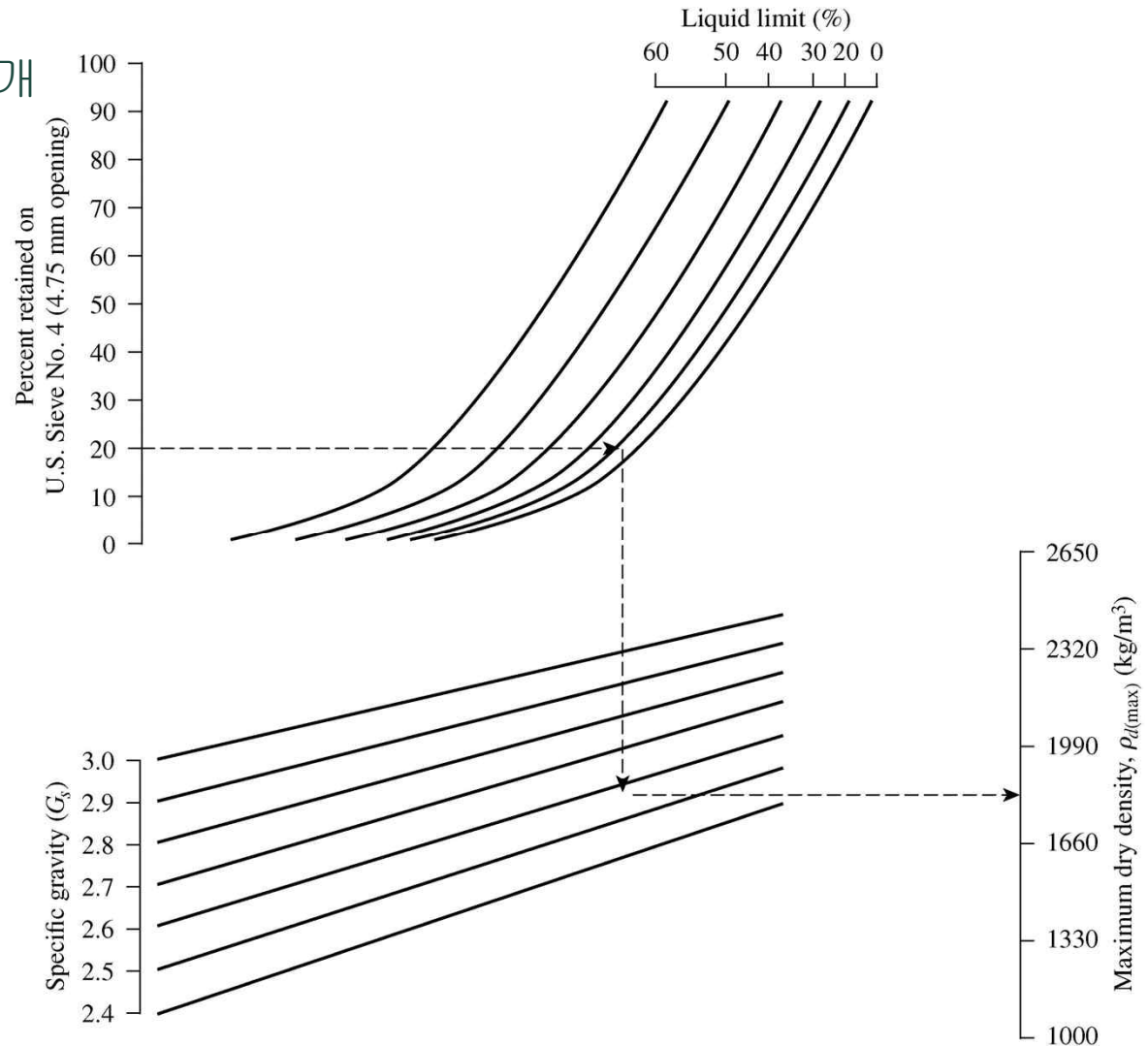
**Figure 5.7** Range of grain-size distribution of all soils tested by Omar, *et al.* (2003)

# 4. Modified Proctor Test

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

## ❖ Omar et al.(2003)-311개

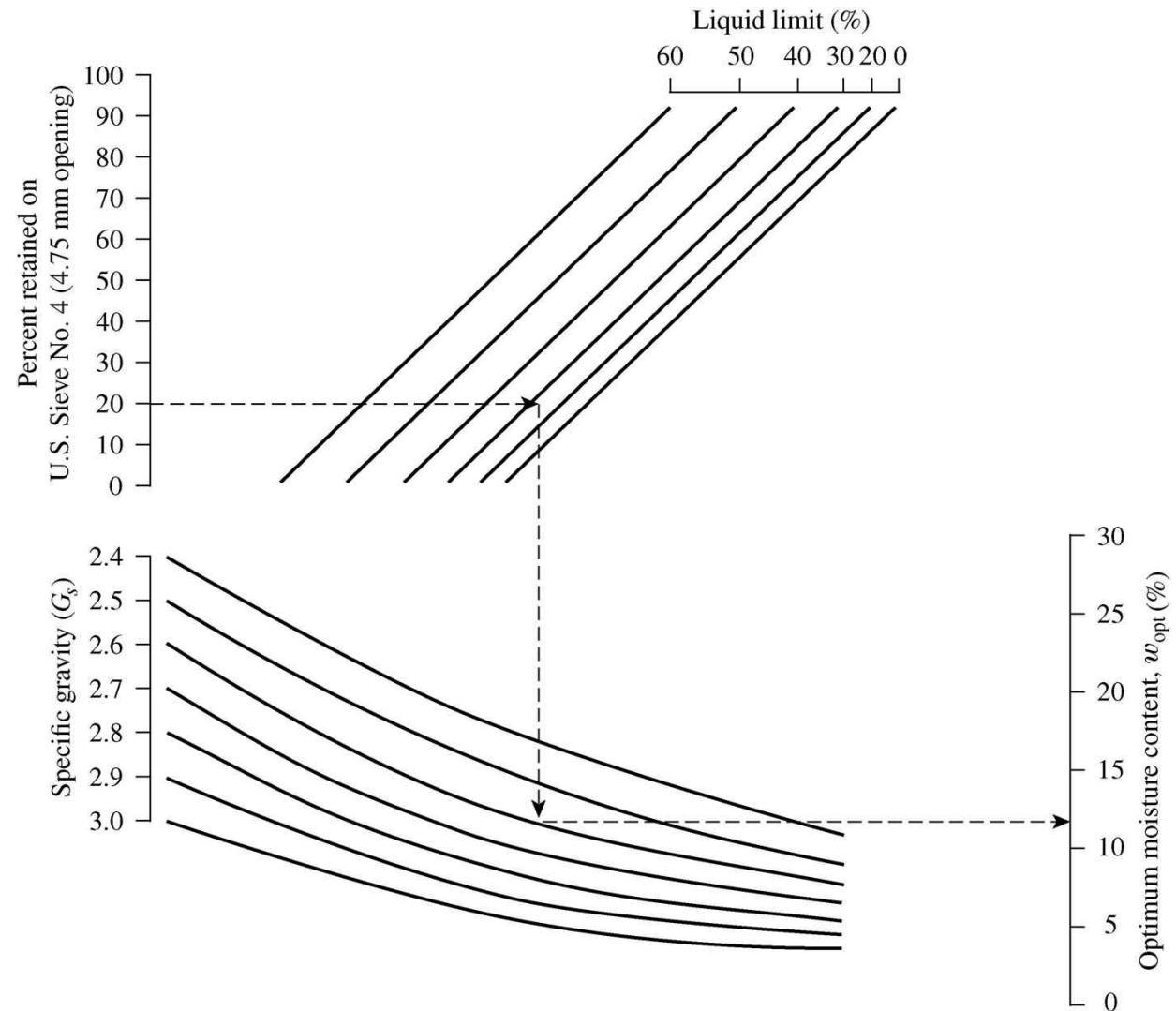
- 자갈 45개
- 사질토 264개
- 점토 2개
- ASTM 1557 C방법



# 4. Modified Proctor Test

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

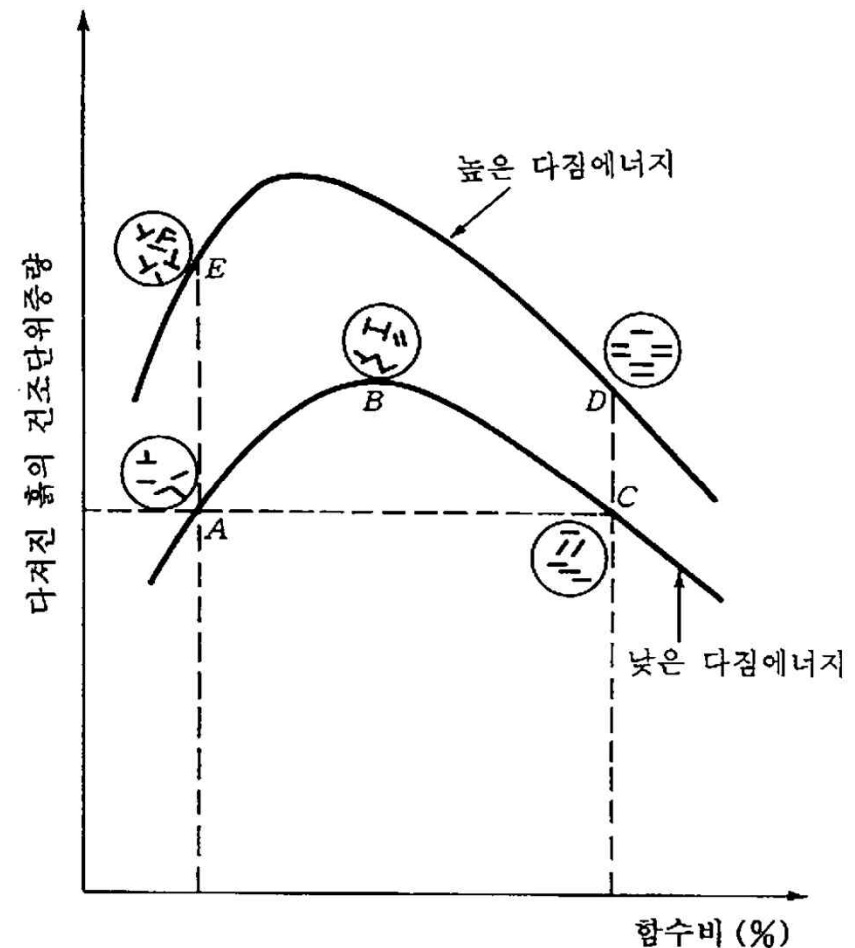
❖ Omar et al.(2003)



## 5. Structure of Compacted Cohesive Soil

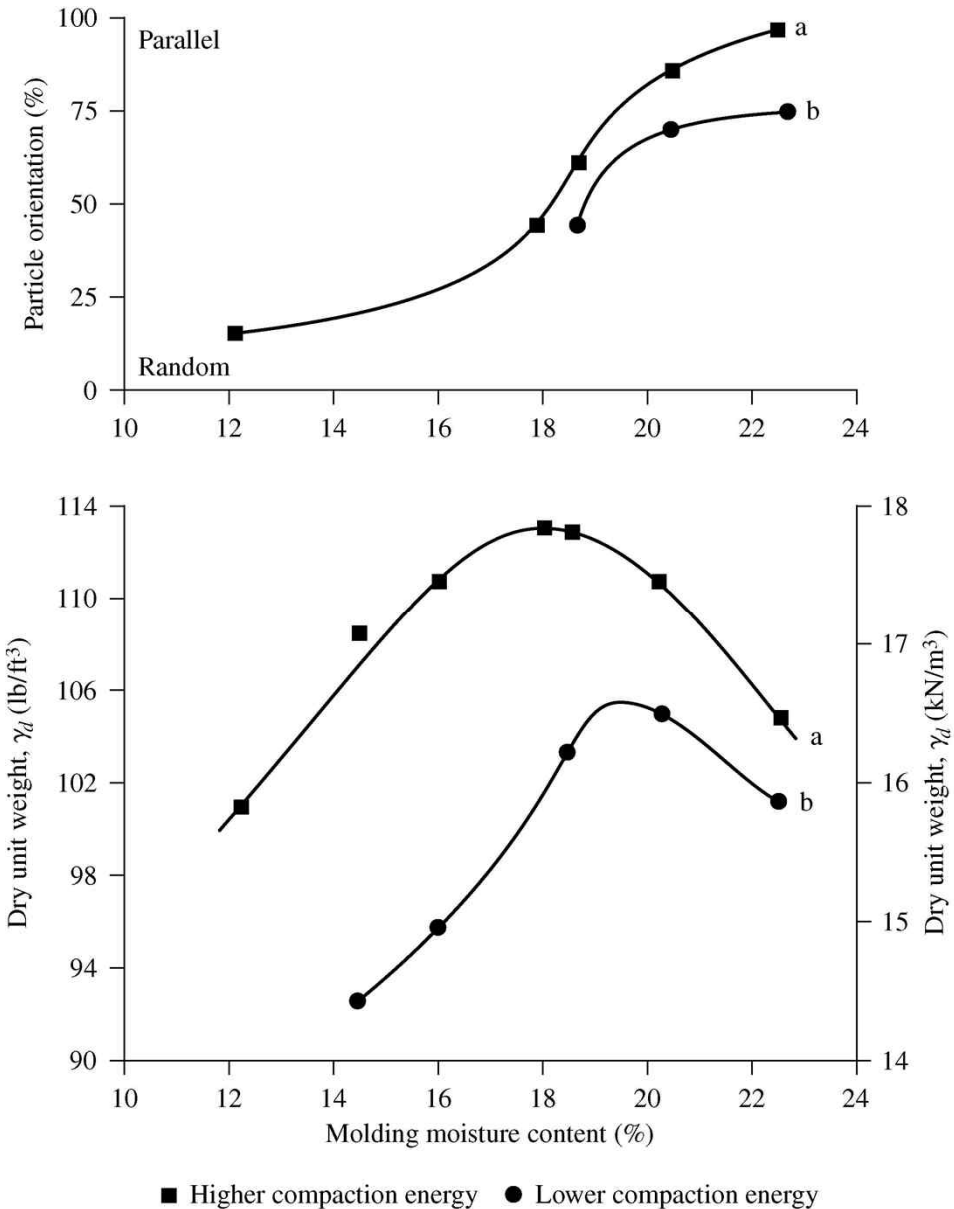
### ❖ 다짐을 받은 점성토의 구조

- **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

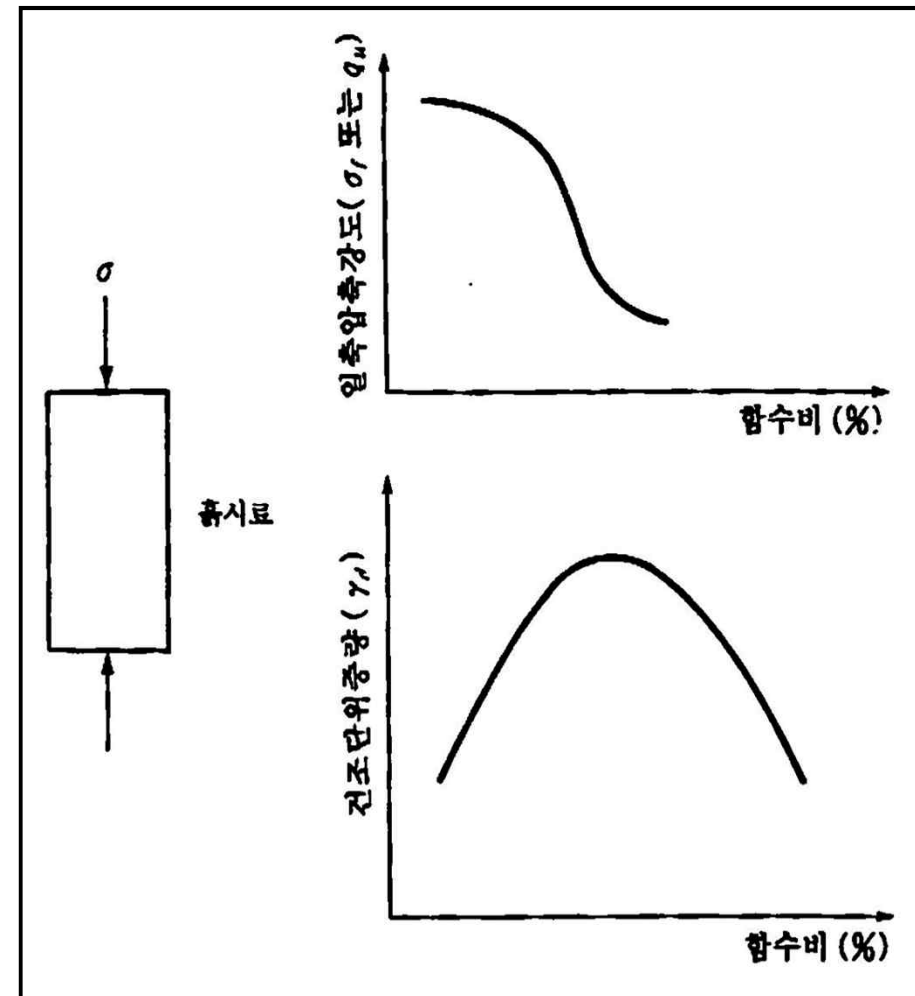
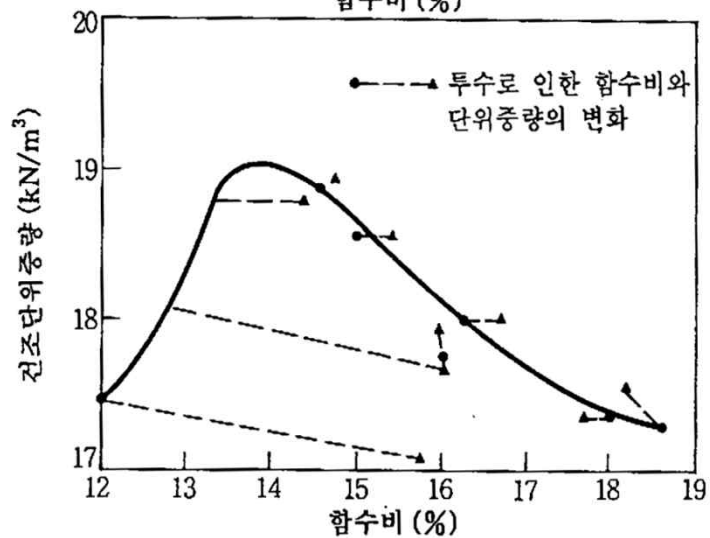
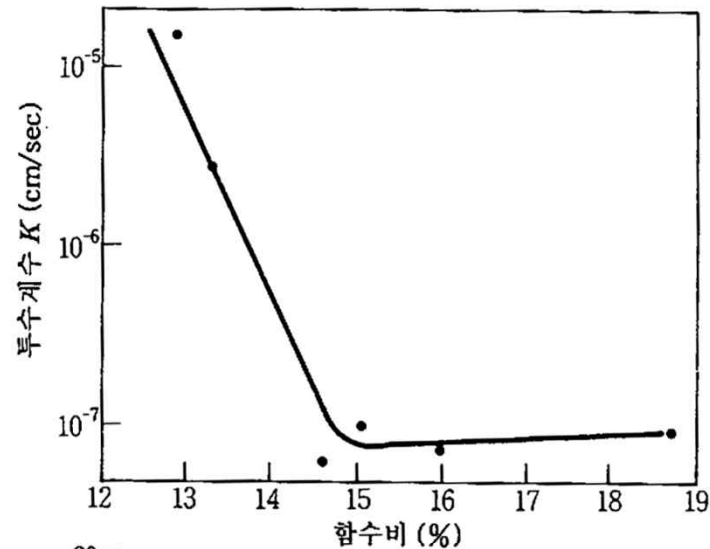
- ❖ Lambe(1958)
- ❖ Boston blue clay
- ❖ 함수비에 따른 입자배열
- ❖ Seed & Chan(1959)





## 6. Effect of Compaction on Cohesive Soil Properties

❖ 투수계수에 미치는 영향-점토 ❖ 압축강도에 미치는 영향-점토

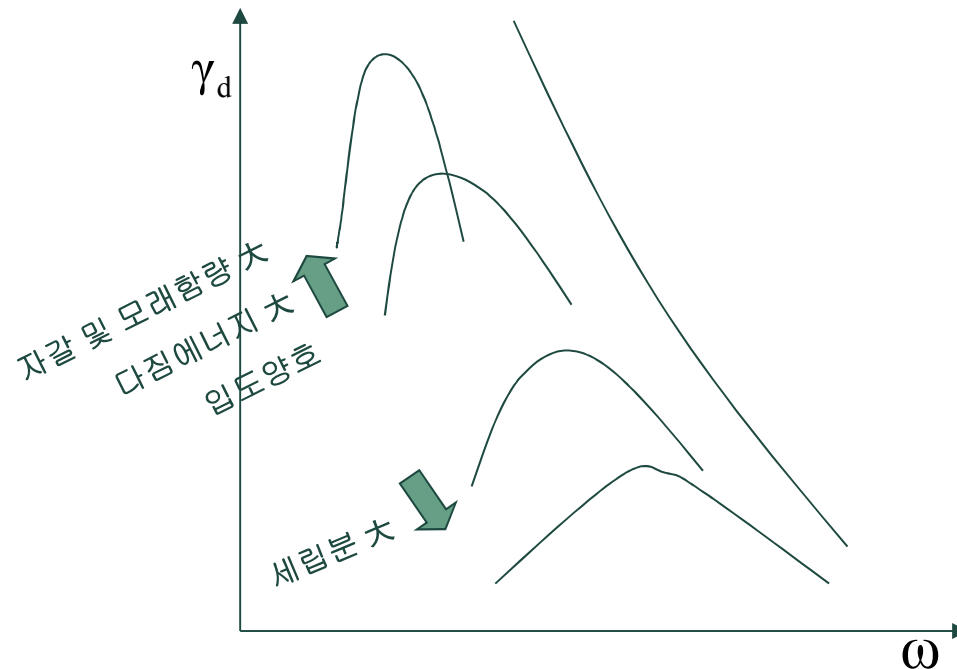




## 7. Characteristics of Compaction Curves

### ❖ 다짐곡선의 성질

- $\gamma_{d(max)}$  가 클수록  $\omega_{opt}$  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  $\omega_{opt}$  는 작아짐
- 자갈 및 모래 함유량이 많을수록  $\gamma_{d(max)}$  가 크고  $\omega_{opt}$  는 작아짐



## 8. Field Compaction

### ❖ 현장다짐

- 실험실 → 표준다짐, 수정다짐시험, **Hammer**에 의한 다짐
- 현장 → 실내 다짐시험에 근거 → 건설기계, **Roller**에 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

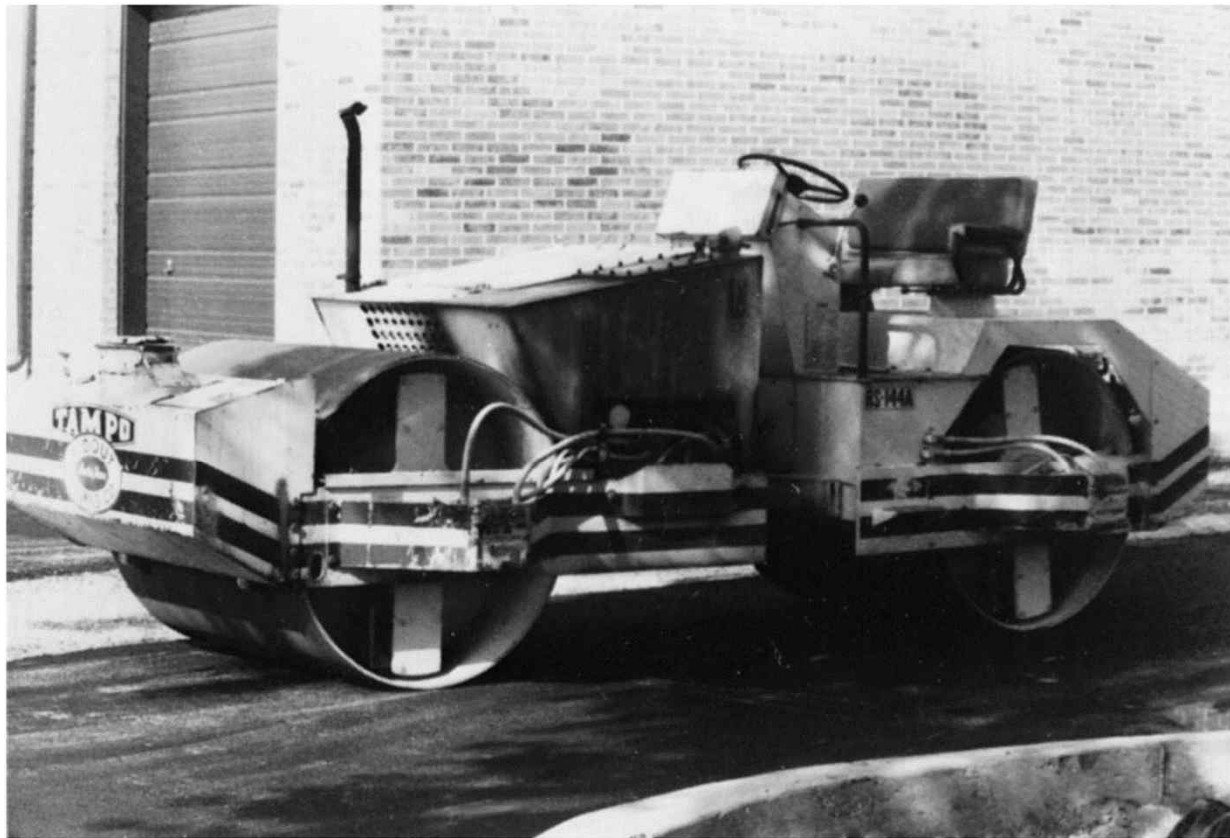
### ❖ 진동롤러(**Vibration roller**)

- 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 ( $138\sim690\text{Mg/m}^2$ )

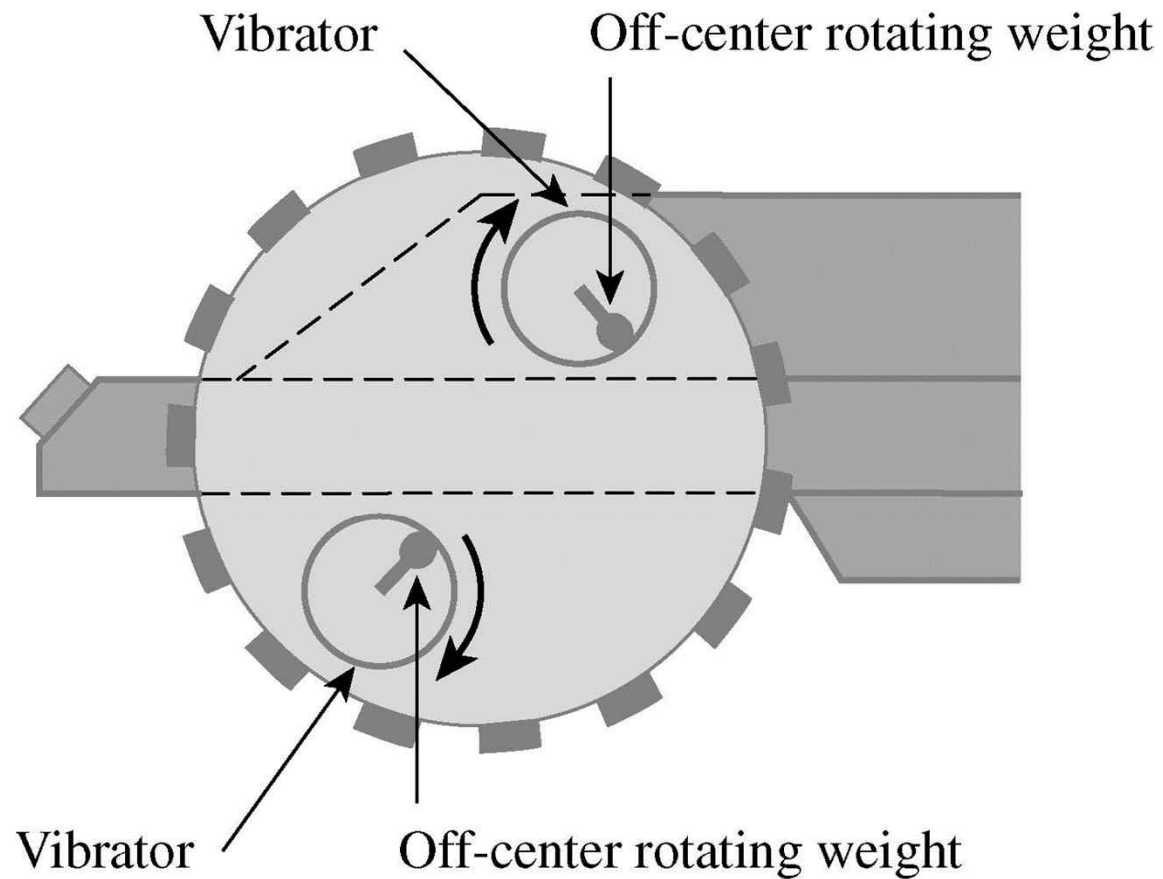


**Figure 5.21** Sheepsfoot roller (Courtesy of David A. Carroll, Austin, Texas)

## 8. Compaction Equipment

### ❖ 진동롤러(Vibration roller)

- 드럼에 진동기 부착, 사질토에 가장 다짐에 효과가 크다

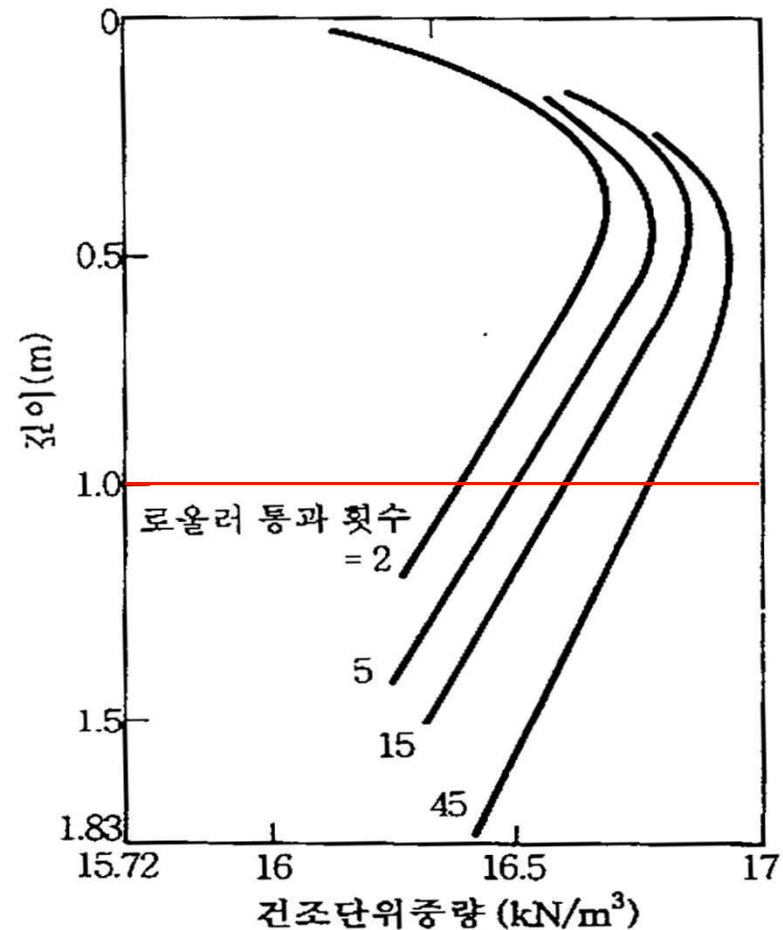
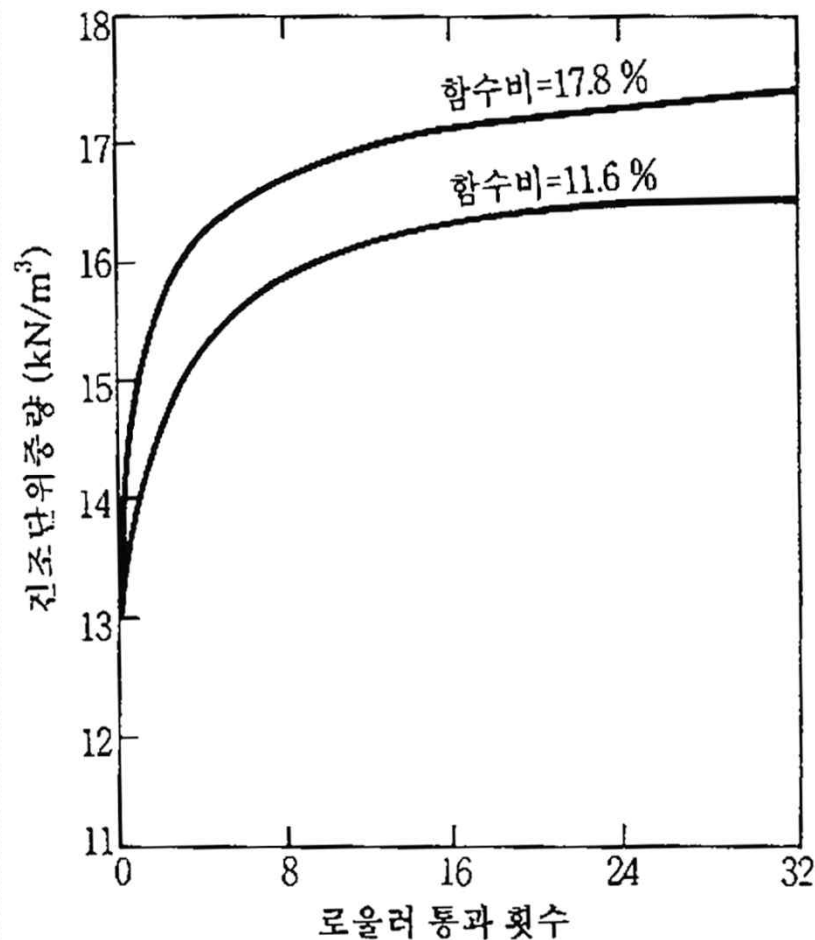


**Figure 5.22** Principles of vibratory rollers



## 8. Field Compaction

❖ 롤러 통과 횟수에 의한 다짐의 영향 (10~15회)

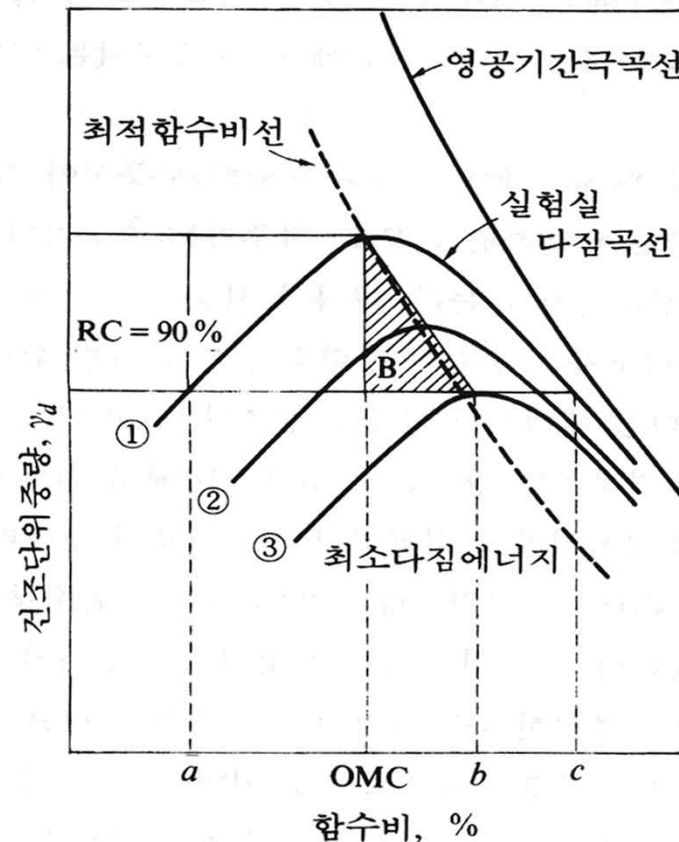


## 9. Specification for Field Compaction

### ❖ 현장 다짐에 관한 규정

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

- 상대다짐도(RC ; Relative Compaction)  $R(\%) = \frac{\gamma_{d(field)}}{\gamma_{d(lab)}} \times 100$



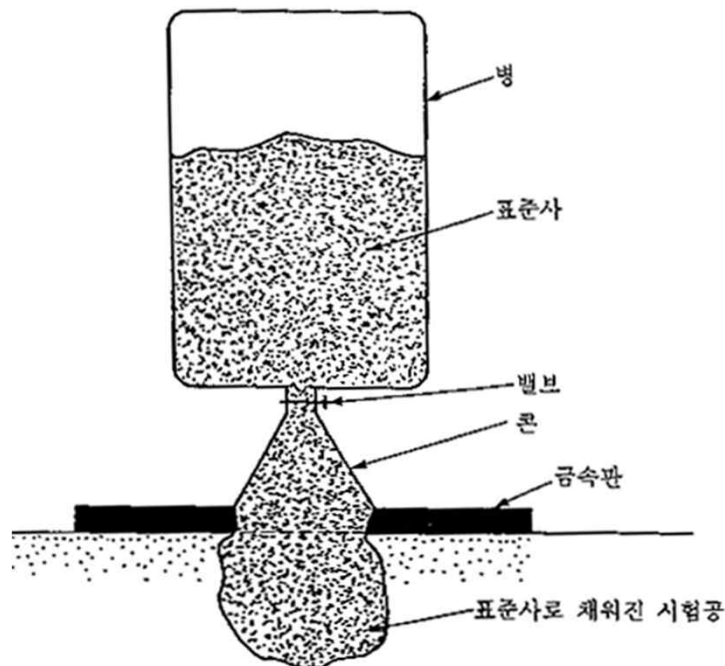


## 10. Determination of Field Unit Weight of Compaction

### ❖ 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



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

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

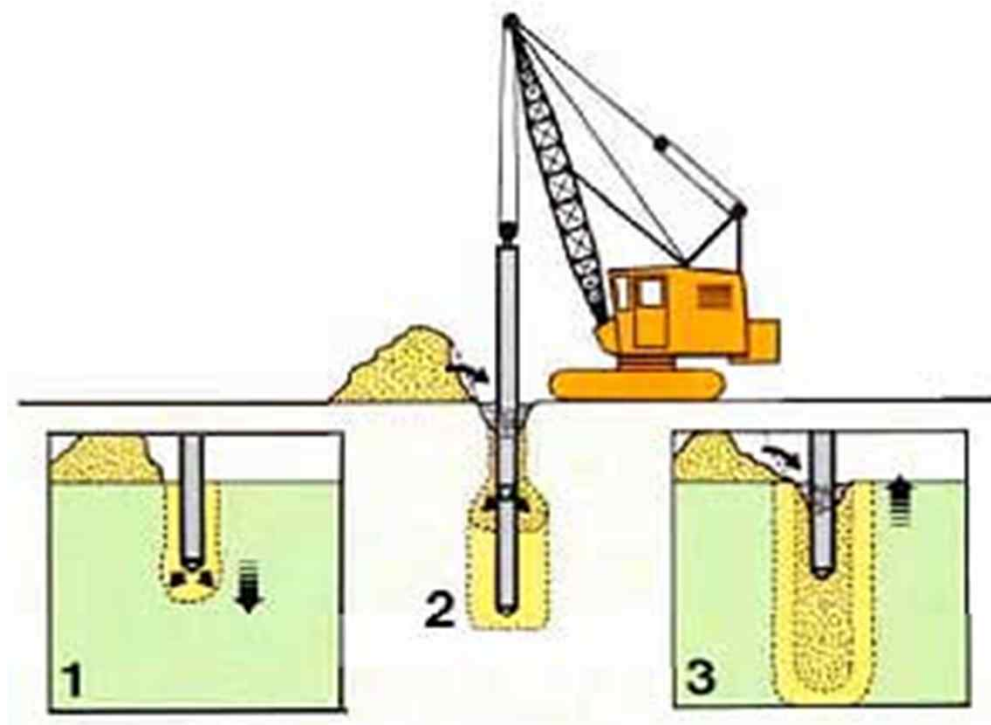
$$W_{d(\text{soil})} = \frac{W_{t(\text{soil})}}{1 + \frac{\omega_{(\text{soil})} (\%) }{100}}$$

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

# 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

