

다짐粘性土의 動的剪斷彈性係數

Dynamic Shear Modulus of Compacted Clayey Soil

姜秉熙*
Kang, Byung Hee

Abstract

Dynamic shear modulus of the compacted clayey soil was determined by the resonant column test to study the parametric effects of confining pressure, shear strain amplitude, molding water content, compaction energy, void ratio and the degree of saturation. The effect of each of these parameters on the dynamic shear modulus is found to be significant and can be explained in terms of the changes in soil by compaction.

Dynamic shear modulus of the compacted soil is increased significantly by compaction and compaction at the dry side of the optimum moisture content is much more effective. It is also found that the dynamic shear modulus shows a good correlation to the static shear strength of the compacted soil. Therefore the dynamic shear modulus of the compacted soil for a certain confining pressure may be obtained easily from the unconfined compression strength.

要 旨

拘束應力, 剪斷變形率振幅, 다짐含水比, 다짐에너지, 間隙比 및 飽和도가 다짐粘性土의 動的剪斷彈性係數에 미치는 影響을 研究하기 위하여 圓柱共振試驗을 하였다. 이들 각각의 要素들은 다짐흙의 動的剪斷彈性係數에 큰 影響을 나타내며 그 原因은 다짐에 의한 흙의 여러 가지 變化로서 說明할 수 있다.

흙의 動的剪斷彈性係數는 다짐에 의해서 크게 增加되며 最適含水比 乾燥側의 含水比에서 다지는 것이 훨씬 더 効果적이다. 그리고 動的剪斷彈性係數와 靜的剪斷強度는 좋은 相關關係를 나타내며 이를 利用하여 어떤 一定한 拘束應力에 대한 動的剪斷彈性係數를 一軸壓縮強度로부터 쉽게 구할 수가 있다.

1. 序 論

動的剪斷彈性係數 및 減衰(damping)와 같은 흙의 動的性質을 決定하는 일은 動荷重을 받는 基礎, 地震으로 인한 地盤運動 및 흙-構造物相

互作用(soil-structure interaction)등의 分析에 大端히 重要하다.

이들에 관해서는 Hardin and Drnevich^(9,10), Richart⁽¹¹⁾ 및 Wood⁽¹²⁾에 의해서 比較的 詳細하게 다루어졌으며 測定하는 方法도 상당히 發達하여 比較的 正確하게 測定할 수가 있게 되었

* 正會員 · 仁荷大學校 工科學科 土木工學科 副教授

다. 그러나 실험절차는 靜的인 試驗에 비해 복잡하고 또 많은 測定裝置가 必要하다.

土工構造物이나 다져서 安定시킨 基礎地盤 위에 動的荷重이 加하여지는 경우 흙의 다짐과 다진 흙의 動的 性質과의 關係를 알아야만 動的荷重에 適合한 土工構造物 및 基礎地盤이 되도록 다짐을 할 수가 있다. 흙의 다짐과 動的 性質에 關한 研究는 大端히 稀少하며 위에서 言及한 여러 研究에서도 이에 關해서는 전혀 언급되지 않았으며 最近의 연구^(2,4)에서 석회 및 홀라이에쉬(fly ash)로써 處理하여 다진 흙의 動的 性質에 關해 언급되어 있을 뿐이다.

본 연구에서는 흙의 다짐과 다져진 흙의 剪斷 彈性係數와의 關係를 究明하여 動的荷重에 效果的인 土工構造物과 基礎地盤의 다짐조건을 提示하고 또 대단히 쉬운 靜的 試驗인 一軸壓縮試驗 結果를 利用하여 다진 흙의 動的剪斷 彈性係數를 推定하고자 한다.

2. 實 驗

2.1 試 料

사용한 흙시료는 보통 흙에다 空氣乾燥狀態에서 벤토나이트를 약 15% 混合한 粒度가 좋은 흙으로서 粒度 및 物理的 性質은 아래의 표 1과 같다. 그리고 X-線廻折法에 의한 鑛物分析結果 캐올리나이트(kaolinite) 및 몬모릴로나이트(montmorillonite)의 粘土鑛物과 石英이 多量 含有되어 있다.

2.2 圓柱共振試驗裝置

振動을 일으키게 하는 裝置는 Hardin 이 考案한 것으로서 三軸室內에서 拘束應力을 받고 있는 供試體의 머리부분에 비틀림진동(torsional vibration)을 加할 수 있도록 되어 있다. 이 裝置는 현재 널리 使用되고 있으며 이에 關해서는 Hardin and Music⁽¹¹⁾이 詳細하게 說明한 바 있다. 그리고 전체 試驗裝置의 構成圖는 그림 1과 같다.

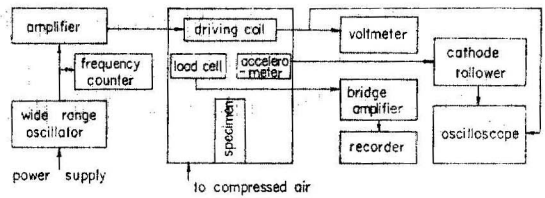


그림 1. Schematic Diagram of Resonant Column Test

2.3 試 驗

計劃된 다짐含水比가 되도록 미리 準備한 흙시료를 Havard miniature compaction mold에 5층으로 나누어 넣고 매층마다 1.65 lb의 槌를 8 inch 높이에서 自由落下시켜서 供試體를 만들었으며 落下回數를 매층마다 5번, 23번 및 14번으로 조정하므로써 다짐에너지를 각각 標準프록터다짐에너지 12,400 ft-lb/ft³, 修正프록터다짐에너지 56,300 ft-lb/ft³ 및 이들의 중간 정도인 34,350 ft-lb/ft³의 다짐에너지가 되도록 하였다. 이렇게 準備한 供試體를 三軸室內에 넣고 4가지의 다른 拘束應力(3, 10, 20, 35 psi)을 加한 후 가장 낮은 剪斷變形率振幅(shear strain amplitude)인 2.8×10^{-5} 가 되도록 Oscillator를 조정한 후 振動數를 徐徐히 增加시키므로써 共振振動數(resonant frequency)를 구하고 그때의 振幅, 入力電壓(input voltage) 및 位相角(phase angle)을 구하였다. 그리고는 Oscillator를 다시 조정하여 共振振幅의 0.5배 및 0.707배되는 振動數를 구하였다. 그리고 나서 다시 剪斷變形率幅을 4.7×10^{-5} , 7.5×10^{-5} , 14.9×10^{-5} 및 28.0×10^{-5} 이 되도록 하여 위와 같은 시험을 되풀이하였다. 계속해서 다음 段階의 拘束應力으로 增加시킨 후 剪斷變形率振幅을 增加시키면서 위와 같은 시험을 반복하였다.

모든 시험에서 供試體의 머리부분에 약 2 psi의 軸方向應力을 加해주므로써 供試體와 供試體 cap 사이에 미끄럼이 일어나지 않도록 하였다.

표 1. Properties of Soil

G_s	ω_l	ω_s	I_p	Activity	<200 sieve	clay size (<2 μ)	classification
2.70	84.2%	16.4%	63.2	1.03	61.6%	22.5%	CH

표 2. Test Conditions for Resonant Column Test

compaction energy (ft-lb/ft ³)	confining pressure (psi)	shear strain amplitude ($\times 10^{-5}$)
12,400(standard Proctor)	3	2.8
34,350(middle Proctor)*	10	4.7
56,300(modified Proctor)	20	7.5
	35	14.9
		28.0

* 다짐에너지 34,350 ft-lb/ft³를 여기서 middle Proctor compaction energy라 부름.

以上과 같은 圓柱共振試驗이 끝나는데로 이 供試體를 一軸壓縮試驗機에 올려놓고 0.0285 inch/min의 속도로 시험을 행하여 一軸壓縮強度를 구하였다. 圓柱共振試驗條件은 표 2와 같다.

含水比를 달리해서 標準프로덕터다짐에너지로서 다진 供試體는 8개 이고 修正프로덕터다짐에너지 시험의 供試體는 6개, 그리고 중간다짐에너지 시험의 供試體는 8개로서 모두 22개의 공시체에 대해서 표 2에서와 같이 4가지의 拘束應力과 5가지의 剪斷變形率振幅에 대한 시험을 하므로서 총 300가지의 圓柱共振試驗과 22개의 一軸壓縮強度試驗을 하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 다짐곡선 및 一軸壓縮強度

22개의 供試體에 대한 다짐곡선과 一軸壓縮強度曲線을 그림 2에서 그렸다. 다짐에너지가 클수록 最適含水比는 減少하나 最大乾燥單位重量은 커지며 다짐含水比에 대한 乾燥單位重量의 變化는 다짐에너지가 클수록 더 敏感하다. 또 다짐에너지가 클수록 最大強度는 더 커지고 最大強度를 나타내는 含水比는 적어진다. 그리고 이 最大強度를 나타내는 다짐含水比는 그림 2 및 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 다짐에너

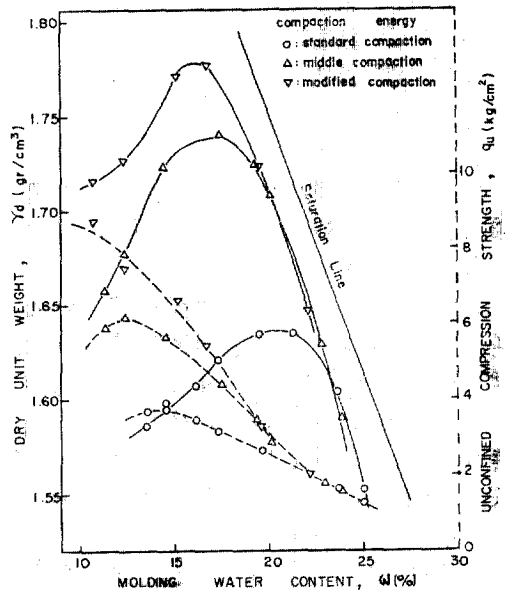


그림 2. Compaction Curves and Strength Curves.

지에 대한 시험에서 다같이 最適含水比 보다 적다. 이와 같은 사실은 이미 여러 연구에^(13,16) 의해서 알려진 바 있다.

3.2 剪斷彈性係數에 影響을 끼치는 要素

Hardin and Black⁽⁷⁾은 흙의 動的剪斷彈性係數

표 3. Max. dry unit weight and molding water content for max. unconfined compression strength

	compaction curve		strength curve	
	$\omega_{opt}(\%)$	max $\gamma_d(\text{gr/cm}^3)$	$\omega_m(\%)*$	max $q_u(\text{kg/cm}^2)$
standard compaction	20.6	1.64	14.5	3.72
middle compaction	17.4	1.74	12.4	6.15
modified compaction	16.2	1.78	<10.7	>8.73

* ω_m 는 max. q_u 가 일어나는 含水比.

를 다음과 같은 여러 가지 要素의 函數로 나타내었다.

$$G = f(\bar{\sigma}_0, e, H, S, \tau_0, C, A, F, T, \theta, K)$$

식중 $\bar{\sigma}_0$: effective octahedral normal stress

e : 間隙比

H : 周圍應力歷史 및 振動歷史

S : 飽和度

τ_0 : octahedral shear stress

C : 粒子特性 즉 모양, 크기, 粒度 및 粗成鑛物

A : 變形率의 振幅

F : 振動數

T : 時間

Q : 흙의 構造

K : 溫度

다짐粘性土의 動的剪斷彈性係數에 影響을 끼치는 몇가지 要素에 關係를 檢討하고자 한다.

(1) 다짐含水比

그림 3에서는 最大動的剪斷彈性係數 G_{max} 와 다짐함수비 ω 와의 關係를 다짐에너지 별로 나타내었으며 그림 4에서는 $G_{max}-\omega$ 關係를 平均拘束應力 별로 나타내었다. 여기서 最大動的剪斷彈性係數는 剪斷變形率이 2.0×10^{-5} 인 경우의 動的剪斷彈性係數를 취하였다. 그림 3 및 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 다짐함수비가 10%에서 25% 범위내에서는 G_{max} 値는 다짐함수비가 적을수록 증가하는 傾向을 보이고 있으며 同一한 다짐함수비에 대한 G_{max} 値는 다짐에너지가 클수록 일반적으로 크다. 다짐에너지크기의 差異

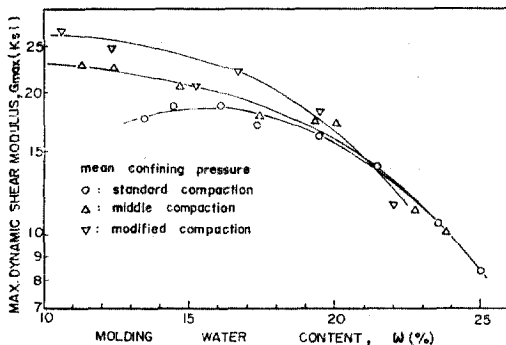


그림 3. Maximum Dynamic Shear Modulus versus Molding Water Content.

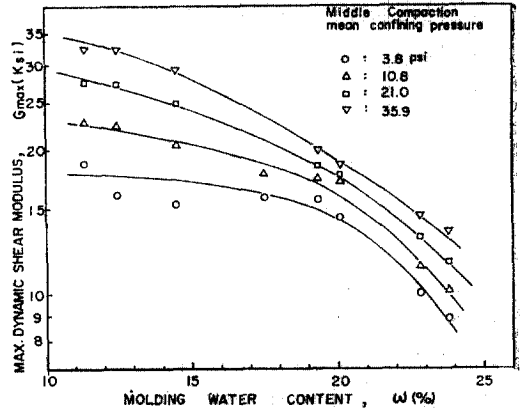


그림 4. Effect of Confining Pressure on the Max. Dynamic Shear Modulus-Molding Water Content Relationship.

로 인한 G_{max} 値의 差異는 다짐함수비가 적을수록 더 크고 함수비가 어떤 값보다 크게 되면 G_{max} 値는 거의 비슷하거나 오히려 큰 다짐에너지의 G_{max} 値가 적어지는 傾向을 보여 준다. 그리고 다짐함수비가 감소할수록 G_{max} 의 증가속도는 감소한다. 同一한 다짐에너지에 의해서 다져진 공시체의 G_{max} 値는 다짐함수비가 적을수록 一般적으로 큰 이유는 다짐함수비가 적을수록 공시체의 흙의 構造는 變形에 대한 抵抗力이 큰 綿毛構造(flocculated structure)로 더 많이 發達하게 되고 또 負의 間隙水壓으로 인해 有效應力이 더 크게되어 變形에 대한 抵抗力도 더 크게 되므로 G_{max} 値도 크게 된다.

그리고 또 $G_{max}-\omega$ 關係에 대한 拘束應力の 영향도 다짐에너지의 영향과 비슷한 傾向을 보여 주고 있다.

그림 5에서는 動的剪斷彈性係數와 다짐함수비와의 關係를 剪斷變形率振幅 별로 나타내었으며 이들 관계곡선은 다짐곡선과 비슷한 모양을 보이며 同一한 다짐함수비에 대한 動的剪斷彈性係數는 變形率振幅이 적을수록 크고 剪斷彈性係數의 尖頭值를 나타내는 함수비는 變形率振幅이 적을수록 적은 傾向을 보이고 또한 이 함수비는 모든 剪斷變形率振幅에서 最適含水比(20.6%)보다 훨씬 적다.

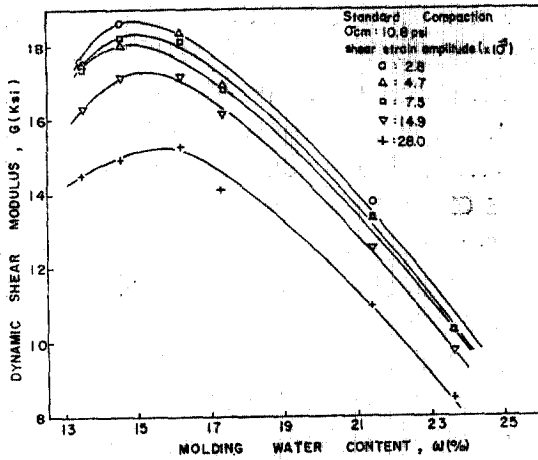


그림 5. Dynamic Shear Modulus-Molding Water Content Relationships by Shear Strain Amplitude.

(2) 飽和度

그림 6은 最大動的剪斷彈性係數와 飽和도와의 關係曲線을 平均拘束應力의 크기 별로 나타내었다. 즉 飽和도가 클수록 G_{max} 値는 減少하고 그 減少速度는 拘束應力이 클수록 크며 또 一定한 飽和度에 대한 G_{max} 値는 拘束應力이 클수록 크다. 그리고 非粘性土에 대해서도 一般的으로 위와 같이 粘性土와 비슷한 結果를 얻었으나 飽和도의 影響이 比較的 적다는 사실이 여러 연구에 (4, 9, 12, 17) 의해서 이미 밝혀진 바 있다.

剪斷彈性係數와 飽和도와의 關係는 다음과 같이 說明된다. 즉 Biot (3)에 의하면 流體로 飽和되

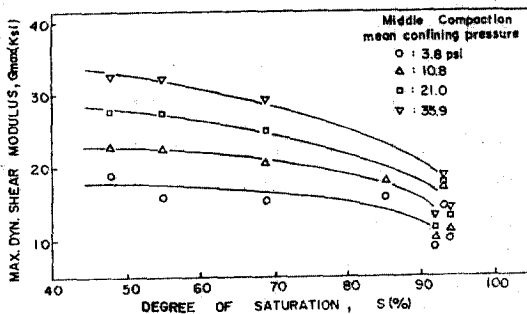


그림 6. Effect of Degree of Saturation on Maximum Dynamic Shear Modulus.

어 있는 多孔性固體내의 剪斷波速度 v_s 는 아래와 같이 표시된다.

$$v_s = \left(\frac{G}{\rho_s + \frac{\rho_f \cdot \rho_a}{\rho_f + \rho_a}} \right)^{1/2}$$

식중 ρ_s = 土粒子的 單位質量

ρ_f = 流體의 單位質量

ρ_a = 결보기 單位質量

따라서 飽和도가 增加되면 결보기單位質量이 增加하므로 剪斷波速度는 減少된다. 그러므로 剪斷彈性係數는 剪斷波速度의 自乘에 比例하므로 飽和도가 增加하면 剪斷彈性係數는 減少하게 된다.

Hardin and Drnevich (6)는 건조밀도가 100 lb/ft³인 실트질점토의 飽和도를 70%에서 100%로 增加시켰을 때 4 kg/cm²의 平均拘束應力下에서 G_{max} 値는 38 ksi에서 17 ksi로 減少되었다고 하였다.

특히 본 연구에서와 같이 다짐공시체를 사용한 경우 공시체의 飽和도가 크면 클수록 다짐함수비도 크므로 다져진 흙의 構造는 變形에 대한 抵抗力이 적은 分散構造(dispersed structure)로 더 많이 發達하게 되므로 同一한 間隙比일지라도 G_{max} 値는 減少하게 된다. 흙의 構造가 綿毛構造인 경우의 剪斷彈性係數가 分散構造의 경우보다 훨씬 더 크다는 사실은 이미 잘 알려져 있다 (3, 7).

(3) 拘束應力

그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 拘束應力이 增加하면 G_{max} 値는 모든 다짐함수비에서 增加하고 이 關係는 log-log 눈금상에서 直線的이다.

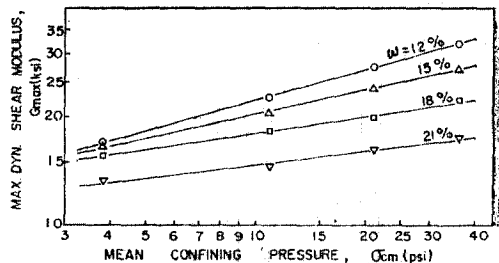


그림 7. Maximum Dynamic Shear Modulus versus Mean Confining Pressure.

표 4. a and b values for $G_{max} = a\sigma_{cm}^b$

molding water content, ω (%)	a	b
12	11.617	0.283
15	12.327	0.219
18	12.714	0.156
21	11.151	0.123

즉 $G_{max} = a\sigma_{cm}^b$ 으로 나타내어지고 G_{max} 및 平均拘束應力 σ_{cm} 의 단위는 각각 ksi 및 psi 로 나타내었을 때 각 다짐함수비에 대한 a 및 b 는 표 4 와 같다. 平均拘束應力이 1.0 psi 일 때의 G_{max} 值인 a 值는 다짐함수비에 관계없이 크기가 비슷하나 b 值는 다짐함수비가 클수록 작아지므로 拘束應力의 增加에 따른 G_{max} 值의 增加速度는 다짐함수비가 클수록 작아진다. 그리고 또 함수비가 12%에서 21% 범위내에서는 同一한 拘束應力에 대한 G_{max} 值는 다짐함수비가 감소할수록 증가하는 경향을 보여준다.

그림 8에서도 역시 平均拘束應力이 增加함에 따라 다짐함수비가 一定한 ($\omega = 17.4\%$) 供試體의 動的剪斷彈性係數는 모든 剪斷變形率振幅에서 增加하고 이 관계도 log-log 눈금상에서 直線的이다. 그리고 또한 一定한 拘束應力에 대해서는 剪斷變形率振幅이 적을수록 剪斷彈性係數는 增加함을 볼 수 있다.

既存의 많은 연구자료에^(5,6,7) 의하면 G_{max} 值는 平均有效主應力의 1/2 乘에 比例한다고 한다. 그러나 變形率振幅이 큰 경우에는 剪斷彈性係數는 흙의 強度에 주로 영향을 받으므로 G_{max} 值는 平均有效主應力($\bar{\sigma}_0$)의 1.0 乘에 가까와진다. 따라서 G_{max} 值는 $\bar{\sigma}_0$ 의 b 乘에 比例하고 이 b 值는 變形率振幅이 적은 경우의 0.5에서부터 큰 경우

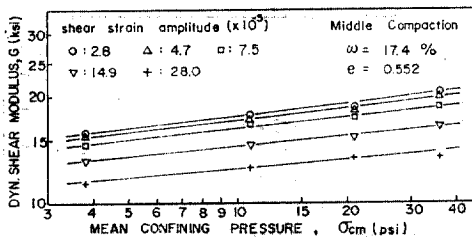


그림 8. Dynamic Shear Modulus-Mean Confining Pressure Relationships by Shear Strain Amplitude.

의 1.0까지 변한다⁽⁹⁾. 이들 資料는 거의 대부분이 乾燥砂에 대한 實驗值이므로 본 연구에서는 바로 適用될 수는 없으나 그 傾向은 비슷하다. 平均拘束應力 σ_{cm} 值는 有效應力이 아니고 全應力이므로 b 值는 적을 것으로 예상되며 본 연구에서 b 值는 예상대로 1/2 보다 훨씬 적다. 平均拘束應力을 有效應力으로 표시했을 때 Au and Chae⁽²⁾ 는 벤토나이트에서 b 值를 0.1이었음을 나타내었고 Hardin and Black⁽⁸⁾ 도 활성도가 2.13인 예민 점토에서 b 值는 약 0.14임을 구하였다.

(4) 間隙比

그림 9에서는 平均拘束應力이 10.8 psi 인 경우 供試體의 間隙比의 G_{max} 와의 關係曲線을 다 점에너지별로 그렸다. 同一한 間隙比에 대해서

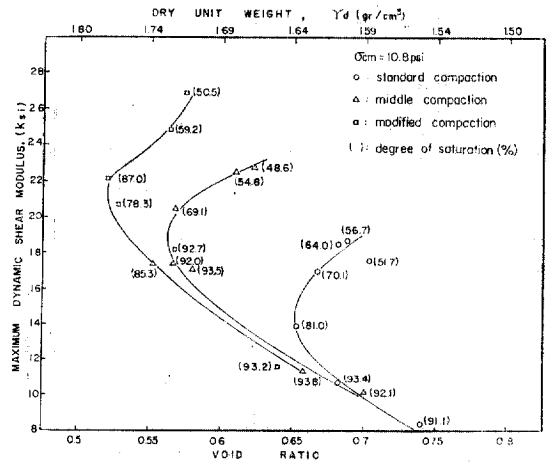


그림 9. Maximum Dynamic Shear Modulus versus Void Ratio.

乾燥側의 含水比에서 다짐 供試體의 G_{max} 值는 濕潤側의 含水比에서 다짐 供試體의 G_{max} 值보다 훨씬 더 크며 이 曲線들은 다짐곡선의 모양과 대단히 비슷하다. 그리고 飽和도가 同一한 경우 間隙比가 增加하면 G_{max} 值는 減少한다. 同一한 間隙比인 경우 最適含水比의 乾燥側含水比에서 다짐 흙은 負의 間隙水壓으로 인한 有效應力의 增加와 綿毛構造를 갖는 흙의 構造 때문에 乾燥側의 G_{max} 值가 濕潤側에서보다 크게 된다.

Hardin and Richart⁽¹²⁾ 의 연구에 의하면 乾燥砂의 剪斷波速度는 모래입자의 크기, 粒度 및 相

對密度에 관계없이 間隙比에 反比例한다고 했다. 乾燥砂는 飽和度에 無關하고 흙의 構造變化가 비 교적 적으므로 이 연구결과는 본 연구결과에서 포화도가 같은 흙의 G_{max} 値는 間隙比의 減少에 따라 增加하는 사실을 뒷받침해 주고 있다. 그리고 粘性土인 경우에도 이와 같은 연구결과(4,7)가 밝혀진 바 있다. 그리고 그림 9에서 同一한 間隙比일지라도 큰 다짐에너지로서 다진 흙의 G_{max} 値는 작은 다짐에너지로서 다진 흙의 G_{max} 値보다 크다는 사실을 볼 수 있다. 이는 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 다짐에너지가 큰 경우 同一한 間隙比를 얻게 되는 다짐함수비는 작기 때문이다. 그리고 또 다른 이유는 다짐함수비 및 포화도의 差異로 인한 先行應力歷史의 差異때문일 것으로 생각된다. 즉 飽和度가 높은 경우에는 同一한 크기의 間隙比를 얻는데 必要한 다짐에너지는 比較的 적으므로 이 供試體의 拘束應力에 대한 過壓密比는 비교적 적게 된다. 그러나 飽和度가 낮은 경우에는 이와 同一한 間隙比를 얻는데 所要되는 다짐에너지는 크므로 이 供試體의 過壓密比는 크게 된다. 따라서 剪斷彈性係數는 過壓密比에 比例하므로(8) 다짐에너지가 클수록 G_{max} 値는 크게 된다고 說明할 수 있다.

(5) 剪斷變形率振幅

그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 一定한 크기의 拘束應力을 받는 供試體의 剪斷彈性係數의 크기는 剪斷變形率振幅이 크면 클수록 減少하며

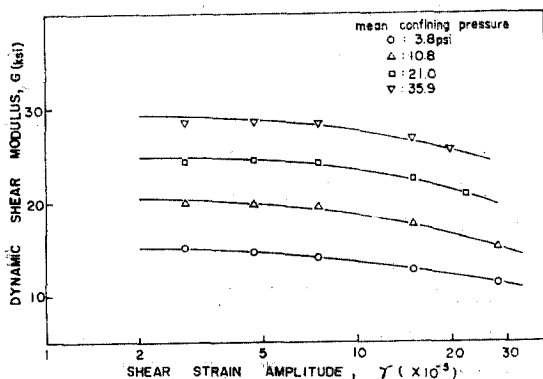


그림 10. Effect of Shear Strain Amplitude on Dynamic Shear Modulus.

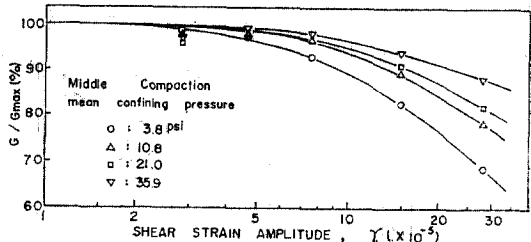


그림 11. Effect of Shear Strain Amplitude on Dynamic Modulus Ratio.

또한 一定한 剪斷變形率振幅에 대해서는 拘束應力이 클수록 剪斷彈性係數는 크다. 이와 같은 傾向은 몇몇 研究結果에서(2,9,12) 이미 밝혀진 바와 같으며 특히 剪斷彈性係數는 粘性土에서보다 非粘性土에서 剪斷變形率振幅에 더 敏感하다고(4,9)한다.

그림 11에서는 剪斷變形率振幅의 增加에 따른 剪斷彈性係數의 減少速度를 平均拘束應力의 크기에 따라 나타내었으며 平均拘束應力이 적을수록 剪斷彈性係數는 剪斷變形率振幅의 크기에 더 큰 影響을 받는다는 것을 보여주고 있다. 그리고 剪斷變形率振幅이 대단히 적은 범위에서는 動的剪斷彈性係數의 변화는 거의 無視할 수 있을 정도로 적다. Hardin and Black(7) 역시 剪斷變形率振幅이 1×10^{-4} 보다 작은 경우 粘土의 剪斷彈性係數는 變形率振幅의 크기에 無關하다고 했다.

3.3 靜的強度와 動的剪斷彈性係數와의 相關關係

그림 12에서 볼 수 있는 바와 같이 어떤 一定한 拘束應力에 대해서는 一軸壓縮強度 q_u 가 增加함에 따라 G_{max} 値는 增加하며 그 增加率은 拘束應力이 클수록 더 크다. 이 관계는

$$G_{max} = a + b \log(q_u)$$

로 표시되고 G_{max} 및 q_u 의 단위는 각각 ksi 및 kg/cm^2 이다. 平均拘束應力 σ_{cm} 이 3.8 psi 인 경우 a 및 b 値는 6.681 및 14.295 이고 또 σ_{cm} 値가 10.8 psi 인 경우 a 및 b 値는 각각 6.50 및 20.385 이다. 그리고 σ_{cm} 値가 35.9 psi 以下인 범위에서는 이들 a 및 b 値는 σ_{cm} 値의 函數로서 각각 다음 식으로 나타내어진다.

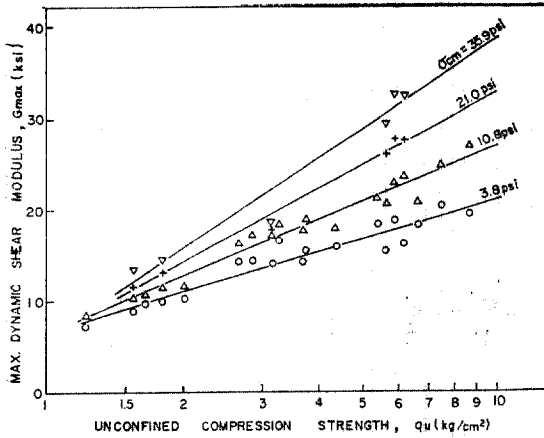


그림 12. Correlation between Max. Dynamic Shear Modulus and Unconfined Compression Strength.

$$a = 6.881 - 0.0456 \sigma_{cm} + 0.00037 \sigma_{cm}^2 \quad \sigma_{cm} < 35.9 \text{ psi}$$

$$b = 10.811 + 0.9782 \sigma_{cm} - 0.010 \sigma_{cm}^2 \quad \sigma_{cm} > 35.9 \text{ psi}$$
 위의 $G_{max} - q_u - \sigma_{cm}$ 의 관계는 다짐에너지 및 다짐함수비에 관계없이 성립된다. 그러나 다른 종류의 흙에 대해서도 이 관계식이適用될 수 있는지는 확인되지 않았다. Au⁽¹⁾에 의하면 G_{max} 와 非排水三軸試驗에 의한 強度 $\bar{\sigma}_d$ 와의 관계는 $G_{max} = a + b\bar{\sigma}_d$ 의 一次式으로 나타나며 흙의 종류에 의해서만 a 및 b 값이 달라진다고 했다.

4. 結 論

1. 最適含水比의 乾燥側의 含水比에서 다짐粘性土의 最大動的剪斷彈性係數는 同一한 間隙比를 갖는 濕潤側의 最大動的剪斷彈性係數보다 훨씬 크다.

2. 다짐粘性土에서 飽和도가 同一한 경우 間隙比가 클수록 最大動的剪斷彈性係數는 減少하는 傾向을 보인다.

3. 그러나 同一한 間隙比를 갖는 粘性土에서는 飽和도가 클수록 最大剪斷彈性係數는 減少하고 減少率은 拘束應力이 클수록 크다.

4. 그리고 또 一定한 飽和도에 대한 最大剪斷彈性係數는 拘束應力이 클수록 크다. 즉 다짐粘性土의 G_{max} 値와 平均拘束應力 σ_{cm} 와의 關係는 $G_{max} = a\sigma_{cm}^b$ 로 나타낼 수 있으며 다짐함수비가 12~21% 범위내에서는 a 値는 거의 一定하나 b

値는 다짐함수비가 클수록 減少하는 傾向을 보여준다.

5. 一定한 크기의 拘束應力下에서 다짐粘性土의 剪斷彈性係數는 剪斷變形率振幅이 크면 클수록 減少하며 또한 一定한 剪斷變形率振幅에 대해서는 拘束應力이 크면 클수록 剪斷彈性係數는 크다. 그러나 拘束應力이 작을수록 剪斷彈性係數는 剪斷變形率振幅의 크기에 더 큰 影響을 받는다.

6. 다짐粘性土의 最大動的剪斷彈性係數 G_{max} 와 一軸壓縮強度 q_u 와의 關係는 $G_{max} = a + b \log(q_u)$ 로서 나타내어지고 a 및 b 는 平均拘束應力 σ_{cm} 의 函數로써 표시된다. 이러한 $G_{max} - q_u - \sigma_{cm}$ 의 關係는 다짐에너지 및 다짐함수비에 關係없이 성립된다.

參 考 文 獻

1. Au, W.C., "Dynamic Shear Modulus and Damping in Additive-Treated Expansive Soils," *PhD Dissertation*, Rutgers University, October, 1978.
2. Au, W.C., and Chae, Y.S., "Dynamic Shear Modulus of Treated Expansive Soils," *J. GED, ASCE, Vol. 106, No. GT3*, March 1980, pp. 255-273.
3. Biot, M.A. "Theory of Propagation of Elastic Waves in A Fluidsaturated Porous Solids", *J. Acoustical Society of America. Vol. 28*, March, 1956, pp.168-191.
4. Chae, Y.S., and Chiang, Y.C., "Dynamic Properties of Lime and LFA Treated Soils," *Proc. of ASCE, GED, Specially Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, June, 1978, Vol. 1, pp.308-324.
5. Drnevich, V.P., and Richart, F.E. Jr., "Dynamic Prestraining of Dry Sand," *J. SMFD, ASCE, Vol. 96, No. SM 2, March 1970*, pp.453-469.
6. Hardin, B. O., "Dynamic Versus Static Shear Modulus for Dry Sand," *Material Research and Standards, ASTM, Vol. 5, No. 5*, May 1965, pp.232-235.
7. Hardin, B.O., and Black, W.L., "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay," *J. SMFD, ASCE, Vol. 94, No. SM 2*, March 1968, pp.

353-369.

8. Hardin, B.O., and Black, W.L., Closure to "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay," *J. SMFD, ASCE, Vol. 95, No. SM 6*, Nov. 1969, pp.1531-1539.
9. Hardin, B.O., and Drnevich, V.P., "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects," *J. SMFD, ASCE, Vol. 98, No. SM 6*, June 1972, pp.603-624.
10. Hardin, B.O., and Drnevich, V.P., "Shear Modulus and Damping Soils: Design Equations and Curves," *J. SMFD, ASCE, Vol. 98, No. SMT*, July, 1972, pp.667-692.
11. Hardin, B.O., and Music, J., "Apparatus for Vibration of Soil Specimens during the Triaxial Test," *Instrumentation and Apparatus for Soils and Rocks, ASTM, STP. 392*, 1965, pp.55-74.
12. Hardin, B.O., and Richart, F.E. Jr., "Elastic Waves Velocities in Granular Soils," *J. SMFD, ASCE, Vol. 89, Feb. 1963*, pp.33-65.
13. Lambe, T.W., "The Engineering Behavior of Compacted Clay," *J. SMFD, ASCE, Vol. 84, No. SM 2*, May, 1958, pp.1-35.
14. Richart, F.E. Jr., "Some Effects of Dynamic Soil Properties on Soil-Structure Interaction," *J.G-ED, ASCE, Vol. 101, No. GT 12*, Dec. 1975, pp.1193-1240.
15. Richart, F.E. Jr., Hall, J.R. Jr., and Woods, R. D., "Vibrations of Soils and Foundation," Prentice-Hall, Inc. 1970, p.414.
16. Seed, H.B., and Chan, C.K., "Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays," *J. SMFD, ASCE, Vol. 88, No. SM 3*, June 1962, pp.53-87.
17. Wood, R.D., "Parameters Affecting Elastic Properties," *Proc. DMSR 77*, Karlsruhe, Sept. 1977, Vol. 1, pp.37-59.

(接受: 1983. 4. 13)