

砂質土 위에 놓인 剛性 圓形基礎의 垂直振動

Vertical Vibration of Rigid Circular Footings on Sand

金	秀	一*
Kim,	Soo	Il
閔	應	基**
Min,	Tuk	Ki

Abstract

A simplified single degree of freedom analog with mass-spring-dashpot is proposed in this study. The simplified analog can describe the dynamic behavior of a rigid circular footings whose contact pressures are parabolic. The analog proposed in this study shows remarkable agreement when compared with the elastic half-space theory. The analog is also compared with vertical vibration test results of model concrete footings.

For the vibration experiments, 11 circular footings with different mass ratio are constructed. The elastic half-space is represented by compacted sand layer. A constant force excitation vibrator is used for the dynamic loading. The frequency range for vibration tests is 30 to 100 Hz.

From the dynamic experiments, it is found that the measured resonant frequencies agree very well with the analog results, however, the ratio of theoretical and measured resonant amplitudes vary between 0.5 and 1.7. It is also found that, when the dynamic force is increased, the resonant frequency is decreased slightly and the resonant amplitude is increased slightly.

要 旨

本 研究에서는 接地壓分布를 拋物線으로 假定한 機械基礎에 垂直 正規振動 荷重이 加해질 경우의 振動 舉動을 解析할 수 있는 質量-스프링-減衰의 一自由度인 단순화 된 애널로그(analog)를 提案 하였다. 本 研究에서 提案된 애널로그는 彈性 半無限體 理論과 잘 一致하였다. 또한 本 애널로그는 模型 콘크리트 基礎의 垂直 振動 實驗을 通하여 實驗値와 比較하였다.

振動 實驗에서 模型 基礎는 質量比가 各各 다른 11個의 圓形 基礎를 使用하였으며 實驗 地盤은 모래로 盛土하여 使用하였다. 本 實驗에서 振動 荷重은 一定 振幅의 振動 載荷 裝置를 使用하였으며 振動 實驗의 周波數 범위는 30~100 Hz 이었다.

實驗 結果 實測 共振周波數는 理論値와 잘 부합하였으나 理論 共振變位와 實測 共振變位의 比는 0.5~1.7 사이에서 變化됨을 알 수 있었다. 또한 荷重이 增加됨에 따라 共振周波數는 약간 減小하며 共振變位는 약간 增加함을 알 수 있었다.

*正會員 · 延世大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

**正會員 · 蔚山大學校 工科大學 助教授, 土木工學科

1. 序 論

機械基礎와 같은 動荷重을 받는 基礎의 設計에서는 動荷重의 크기 및 振動 周波數에 따라 作動機械나 作業員에 영향을 주지 않는 基礎의 振動 變位를 考慮하여 基礎의 斷面 形象 및 크기를 決定하여야 한다. 그러나 現在 機械基礎의 設計에 一般적으로 使用되고 있는 彈性 半無限體 理論은 複雜한 地盤條件의 適用이 容易하지 않기 때문에 實際 問題의 解析은 困難하다.

基礎의 動的 舉動에 관한 現代의인 研究은 1904年 Lamb⁽¹⁾의 研究에서 始作되었으며, 이를 토대로 Reissner⁽²⁾는 垂直 振動 舉動의 特性을 밝혔다. 그後 Quinlan⁽³⁾과 Sung⁽⁴⁾은 垂直 變位の 分布를 均等 혹은 線形으로 假定하여 解를 提示하였으며, Arnold et al.⁽⁵⁾과 Bycroft⁽⁶⁾은 水平 및 로킹(rocking) 振動에 대한 解를 提示하였다. Hsieh⁽⁷⁾와 Lysmer⁽⁸⁾는 基礎-흙 시스템을 質量-스프링-減衰의 單純 振動 시스템으로 취급하여 스프링常數와 減衰係數를 基礎의 크기, 地盤의 動的 物性 및 振動 周波數의 函數로 表現하였다. Lysmer et al.⁽⁸⁾은 이를 더욱 확장 發展시켜 振動周波數와는 無關한 形態의 스프링常數와 減衰係數를 提案하여 半無限體 해석에 결정적인 영향을 주었다. Richart et al.⁽¹⁰⁾, Hall⁽¹¹⁾, Whitmann⁽¹²⁾은 Lysmer의 方法을 모든 振動 모오드에 확장 적용하여, 소위 集中定數要素系(lumped parameter system) 理論의 기틀을 마련하였다.

本 研究에서는 接地壓이 拋物線 分布인 基礎-흙 시스템의 振動 舉動의 特性을 解析할 수 있는 集中定數要素모델을 提示하고, 모래 地盤 위에 놓인 圓形 模型基礎에 대한 垂直 振動 實驗을 通하여, 提案된 모델의 適合성을 알아보는 本 研究의 目的이 있다.

2. 基礎-흙 시스템의 動的 解析

2.1 彈性 半無限體 理論

彈性 半無限體 理論은 基礎가 놓인 地盤을 均質, 等方的 完全 彈性的 半無限體로 假定한 것

이다. Reissner⁽²⁾는 均等한 分布의 荷重을 받는 彈性 半無限體 위에 놓인 圓形 基礎의 中央에서의 垂直 처짐을 다음과 같이 提示하였다.

$$Z = \frac{P_0}{Gr_0} (f_1 + if_2) e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서 Z 은 基礎 中央에서의 垂直 처짐, P_0 는 基礎에 作用하는 動的 荷重의 振幅, G 는 地盤의 動剪斷彈性係數, r_0 는 基礎의 半徑, f_1 및 f_2 는 無次元 變位函數, ω 는 外力의 角周波數이며 t 는 時間이다. Reissner는 無次元 周波數 a_0 과 無次元 質量比 b 를 다음 式으로 定義하였다.

$$a_0 = \omega r_0 \sqrt{\rho/G} = \omega r_0 / V_s \dots\dots\dots (2.2)$$

$$b = m / \rho r_0^3 \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서 ρ 는 地盤의 密度, V_s 는 剪斷波의 速度, m 은 地盤 위에 놓인 基礎와 振動機의 總 質量이다.

Reissner는 基礎 變位の 振幅, A_s 를 다음 式으로 나타내었다.

$$A_s = \frac{P_0}{Gr_0} Z \dots\dots\dots (2.4)$$

(2.4)式에서 Z 는 無次元 變位量으로 다음 式으로 주어지는 값이다.

$$Z = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - ba_0^2 f_1^2) + (ba_0^2 f_2^2)}} \dots\dots (2.5)$$

그後 Quinlan⁽³⁾과 Sung⁽⁴⁾은 이 理論을 더욱 확장하여 剛性基礎(그림 2.1 a), 軟性基礎(그림 2.1 b), 및 接地壓이 拋物線 分布인 基礎(그림 2.1 c)에 대한 解를 提示하였다.

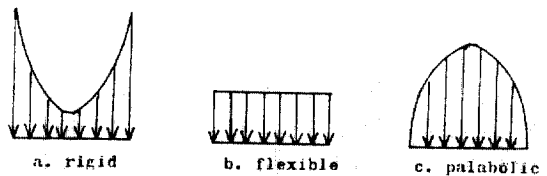


그림 2.1 接地壓의 分布

2.2 集中定數要素(Lumped Parameter System)

彈性 半無限體 理論은 計算이 複雜할 뿐 아니라 基礎의 모양, 크기, 묻힘 깊이, 地盤 상태 등의 變數들에 대한 영향을 考慮하기가 매우 어렵다. 진동 해석에 있어서 좀 더 便利한 方法은 基礎-흙 시스템을 集中定數要素系 즉 一自由도의 質量-스프링-減衰 시스템으로 나타내는

것이다.

지난 수 십년간 振動實驗의 結果로부터 適切한 集中定數要素를 求하여 理論曲線과 一致시키려는 시도가 많이 행하여 졌다. Hertwig et al.⁽¹³⁾은 同一 地盤이라 할지라도 實驗條件이 變하면 그에 對應하는 다른 集中定數要素를 使用하여야 한다고 주장하였으며, Reissner⁽¹²⁾는 半無限體 理論과 集中定數要素系의 結果를 比較하여 集中定數要素를 周波數의 函數로 하면 두 方法이 잘 一致함을 보였다. Hsieh⁽⁷⁾는 이 周波數에 關係되는 係數를 더욱 자세히 說明하였으며, Lysmer et al.⁽⁹⁾은 垂直荷重을 받는 剛性基礎에 대하여 彈性 半無限體 理論과 잘 一致하며 振動周波數와는 無關係한 소위 Lysmer Analog를 개발하였다. Lysmer는 垂直荷重을 받는 剛性基礎의 運動方程式을 다음 式으로 提示하였다.

$$m\ddot{z} + \frac{3.4}{1-\nu} r_0^2 \sqrt{\rho} G \dot{z} + \frac{4Gr_0}{1-\nu} z = P_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots(2.6)$$

(2.6)式에서 ν 는 포아손 비이며 z 위의 \cdot 은 시간에 대한 미분을 意味한다.

2.3 單純化된 擬로그(Simplified Analog)

本 研究에서는 數學的으로 分析할 수 있는 모델을 개발하기 위하여, 基礎 地盤을 完全 彈性이고 等方, 均質의 半無限體로 취급하여, 基礎를 通하여 垂直應力만이 地盤에 傳達된다고 假定하였다. 前 節에서 說明한 Lysmer 方法은 剛性基礎(그림 2.1 a)에 관한 解로, 모래 地盤 위에 놓인 基礎의 해석에는 適用하기가 어려웠다. 모래 地盤에서 靜力學的인 接地壓의 分布는 拋物線 分布이다. 따라서 本 研究에서는 接地壓을 拋物線 分布(그림 2.1 c)로 假定하고 Lysmer 方法을 適用하여 集中定數要素를 求하였다.

垂直荷重 $P_0 \cdot e^{i\omega t}$ 가 加해질 때 變位 z 는 다음 式으로 表示된다.

$$z = \frac{P_0}{k} F e^{i\omega t} \dots\dots\dots(2.7)$$

여기서 F 는 복소수 無次元 變位函數로 $F = F_1 + iF_2$ 이고, k 는 靜力學的 스프링 常數로 $k = \frac{4Gr_0}{1-\nu}$ 이다. 따라서 (2.7)式은 다음 式으로 쓸 수 있다.

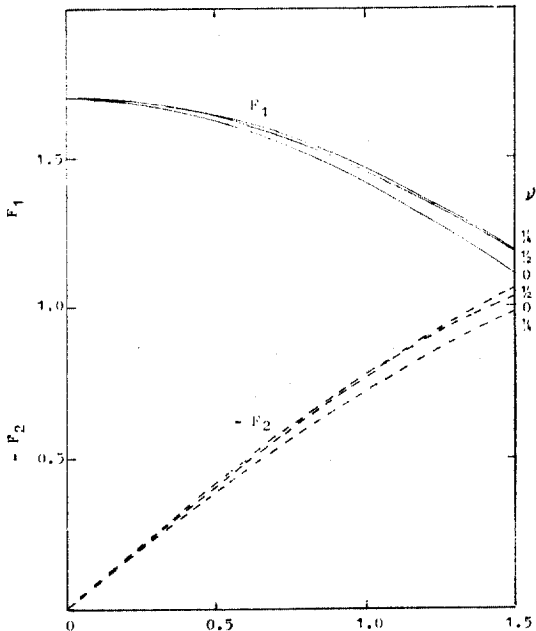


그림 2.2 接地壓이 拋物線 分布인 圓形基礎의 變位函數

$$z = \frac{P_0}{Gr_0} \left[\frac{1-\nu}{4} F_1 + i \frac{1-\nu}{4} F_2 \right] e^{i\omega t} \dots\dots(2.8)$$

變位函數 F_1, F_2 는 (2.8)式과 (2.1)式으로부터 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$F_1 = \frac{4}{1-\nu} f_1 \dots\dots\dots(2.9)$$

$$F_2 = \frac{4}{1-\nu} f_2$$

無次元, 變位函數 f_1, f_2 는 포아손 비 ν 에 따라 無次元 周波數 a_0 의 다항式으로 表示되는 값이다. 그림 2.2는 接地壓이 拋物線인 경우에 대하여 Sung⁽⁴⁾이 提示한 f_1 및 f_2 를 (2.9)式에 代入하여 求한 F_1 및 F_2 를 無次元 周波數 a_0 에 대하여 圖示한 것이다. 그림 2.2는 變位函數 F_1, F_2 가 모두 포아손 비에 關係없이 거의 一定한 값을 가짐을 보여 준다. 따라서 變位函數 f_1, f_2 대신 F_1, F_2 를 使用하는 것이 매우 便利하다.

흙-基礎 시스템을 그림 2.3과 같은 一自由度 시스템으로 表示할 수 있다면 매우 便利할 것이다. 그림 2.3에서 먼저 無質量($m=0$) 시스템인 경우에 대해 考慮해 본다. 이 시스템의 平衡方程式은 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$C\dot{z} + Kz = P_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots(2.10)$$

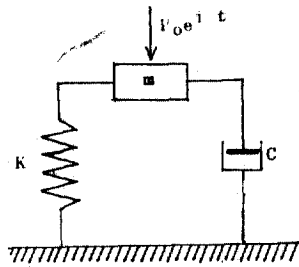


그림 2.3 一自由度 시스템

(2.10)式에서 C 는 減衰係數, K 는 스프링 常數이다. 變位 z 는 (2.7)式으로 주어지는 값으로 이를 (2.10)式에 代入하여 整理하면 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$K = k_1 k \dots\dots\dots (2.11)$$

$$C = c_1 k r_0 \sqrt{\rho/G} \dots\dots\dots (2.12)$$

윗 式에서 k_1, c_1 은 常數로서

$$k_1 = \frac{F_1}{F_1^2 + F_2^2} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$c_1 = \frac{-F_2/a_0}{F_1^2 + F_2^2} \dots\dots\dots (2.14)$$

이다. 그림 2.4는 k_1 과 c_1 의 값을 無次元 周波數 a_0 에 대해 圖示한 것이다.

다음은 質量 시스템에 대해 考慮해 본다. 質量 시스템의 平衡方程式은 다음 式으로 주어진다.

$$m\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = P_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.15)$$

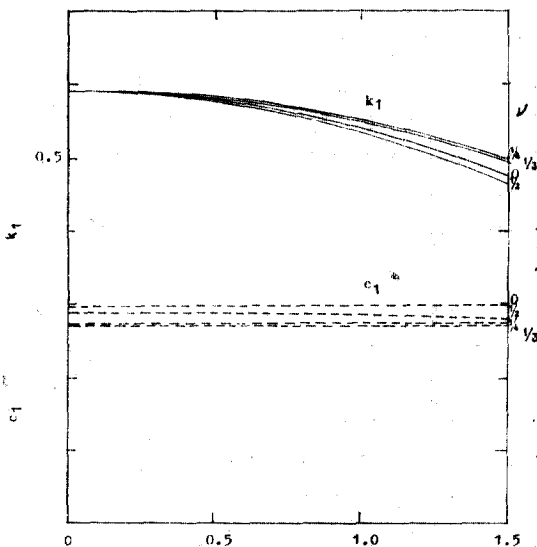


그림 2.4 接地壓이 拋物線 分布인 圓形基礎의 c_1 및 k_1

(2.15)式은 (2.11), (2.12)式으로부터 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$m\ddot{z} + c_1 k r_0 \sqrt{\rho/G} \dot{z} + k_1 k z = P_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.16)$$

(2.16)式의 解는 (2.7)式으로 주어지며, (2.7)式과 (2.16)式으로부터 變位函數 F 는 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$F = \frac{1}{(k_1 - B a_0^2) + i c_1 a_0} \dots\dots\dots (2.17)$$

여기서 $B = \frac{1-\nu}{4} b$ 로 無次元量이다. (2.17)

式은 複소수로 實數部와 虛數部로 나눌 수 있다면 實際 처짐을 求할 수 있을 것이다. 그림 2.3의 單純 振動 시스템의 變位는 一般적으로 增幅係數(magnification factor), M 을 利用하여 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$z = \frac{P_0}{k} M \cos(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (2.18)$$

여기서 ϕ 는 位相角이다. 따라서 (2.7), (2.17), (2.18)式으로부터 實數部를 분리할 수 있으며, 증폭계수 M 은 다음 式으로 쓸 수 있다.

$$M = |F| = \sqrt{\frac{1}{(k_1 - B a_0^2)^2 + (c_1 a_0)^2}} \dots\dots\dots (2.19)$$

一般적으로 모래 地盤의 포아손 比는 $0.25 < \nu < 0.33$ 의 범위 안에 있으며 그림 2.4로부터 이 범위에서 c_1 및 k_1 의 값은 各各 포아손 比에 關係없이 거의 一致하고 있다. 後述하는 바와 같이 實驗地盤의 포아손 比 $\nu = 0.226$ 이었다. 또한 共振周波數는 一般적으로 $0.5 < a_0 < 1.0$ 의 범위에 있다(그림 4.3 참조). 따라서 c_1 및 k_1 의 값을 그림 2.4로부터 이 범위에서의 平均值로 擇하면 $c_1 = 0.275, k_1 = 0.57$ 이 된다. 이 값을 (2.16)式에 代入하면 基礎 一축 시스템은 다음의 質量 一스프링 一減衰의 單純化된 애널로그(simplified analog)로 代치시킬 수 있다.

$$m\ddot{z} + \frac{1.1r_0^2}{1-\nu} \sqrt{\rho \cdot G} \dot{z} + \frac{2.28Gr_0}{1-\nu} z = P_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.20)$$

(2.20)式은 一自由度 시스템의 式으로 그 解는 이미 잘 알려져 있다. (2.20)式의 解를 增幅係數 M 으로 表示하면 便利하다.

$$M = \frac{z}{P_0/k} = \frac{1}{\sqrt{(0.57 - B a_0^2)^2 + (0.275 a_0)^2}} \dots\dots\dots (2.21)$$

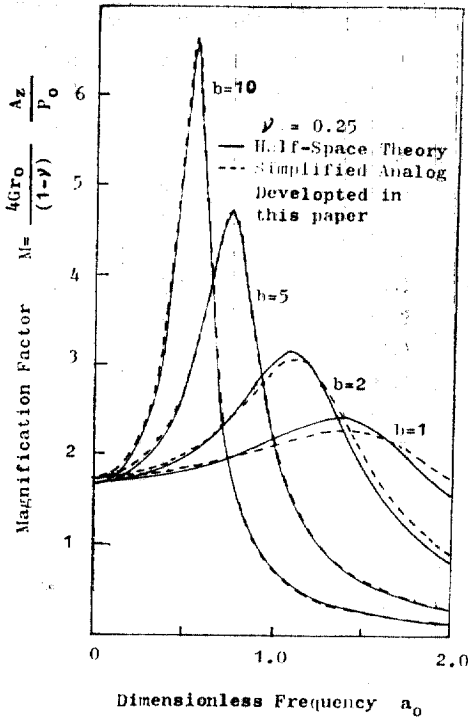


그림 2.5 一定荷重의 垂直正規振動을 받는 圓形基礎의 增幅係數

그림 2.5는 (2.21)식의 單純化된 愛널로그에 의한 增幅係數(점선)와 彈性半無限體 理論⁽⁴⁾에 의한 增幅係數(실선)를 圖示한 것으로 特히 共振周波數 주위에서 두 값이 매우 잘 一致함을 보여 주고 있다. Analog method에서 공진상태에서의 變位, A_{res} 와 그때의 周波數, ω_{res} 는 $\frac{\partial M}{\partial a_0} = 0$ 로부터 求할 수 있으며 式은 다음과 같다.

$$A_{res} = \frac{P_0}{k} \frac{B}{0.21\sqrt{B}-0.04} \dots\dots (2.22)$$

$$\omega_{res} = \frac{V_s}{r_0} \frac{\sqrt{0.57B}-0.04}{B} \dots\dots (2.23)$$

3. 實 驗

本 研究에서는 屋外에 實驗 地盤을 조성하고, 模型 圓形 콘크리트 基礎를 製作하여 垂直 正規 振動 實驗을 行하였다.

3.1 實驗 地盤

表面에서 깊지 않은 곳에 岩盤, 혹은 다른 층

이 存在하게 되면 基礎의 처짐 舉動은 彈性 半無限體 理論으로 해석할 수가 없다. 一般的으로 荷重에 의한 영향은 壓力球(pressure bulb)의 깊이까지로 보고 있으며, Gerrand et al.⁽¹⁴⁾은 半無限體에서 垂直荷重을 받는 圓形 基礎에서 中心線을 따라 發生하는 垂直 應力의 크기는 깊이 $z_0 > 4r_0$ 가 되면 基礎에 加해지는 平均應力의 10% 미만이 됨을 밝힌 바 있다.

本 實驗에서는 自然 地盤을 깊이 1.8 m, 直徑 4 m의 圓筒형으로 굴착한 後 모래를 채우고 다짐기로 다져 實驗地盤을 조성하였다. 模型 基礎의 最大半徑은 0.45 m로 地盤의 깊이에 대한 比가 4 以上이 되며, 또한 모래 地盤 아래 있는 원지반의 彈性係數와 置換 모래 地盤의 彈性係數의 比에 큰 差異가 없으므로 本 地盤에서의 진동해석을 彈性半無限體 理論으로 해석하여도 무방할 것으로 판단된다.

實驗 地盤은 전술한 바와 같이 기존지반을 굴착한 後, 漢江 모래를 채워 다짐을 하여 조성하였다. 이 때 모래는 4번 체를 通過한 것을 使用하였으며, 5 cm의 뒷채움 높이다. 다짐기를 利用하여 몰다짐을 하였다.

實驗 地盤의 物性은 比重이 2.65, 건조단위중량이 1.68 t/m³, 습윤단위중량이 1.78 t/m³으로 統一分類法에 의해 分類하면 SP이고 均等係數 Cu가 2.3인 모래 地盤이다. 實驗 地盤의 動的 物性은 Cross-hole 方法을 利用하여 測定하였으며, Cross-hole 方法의 概要는 그림 3.1과 같다. 彈性波 速度 測定은 깊이 0.3, 0.5, 0.7, 1.0

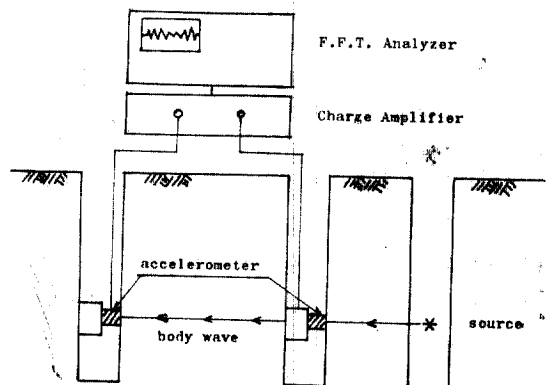


그림 3.1 Cross-hole Method의 概要圖

표 3.1 模型基礎의 諸元 및 質量比

Dia (m)	Height (m)	Weight (N)	Mass (kgm)	Mass Ratio ($b = m/\rho r^3$)
0.51	0.59	4707	480	16.3
0.51	0.37	3648	372	12.6
0.51	0.14	2609	266	9.0
0.60	0.36	4237	432	9.0
0.60	0.284	3766	384	8.0
0.60	0.21	3295	336	7.0
0.70	0.38	5237	534	7.0
0.70	0.29	4492	458	6.0
0.70	0.21	3746	382	5.0
0.80	0.32	5590	570	5.0
0.90	0.20	4835	493	3.0

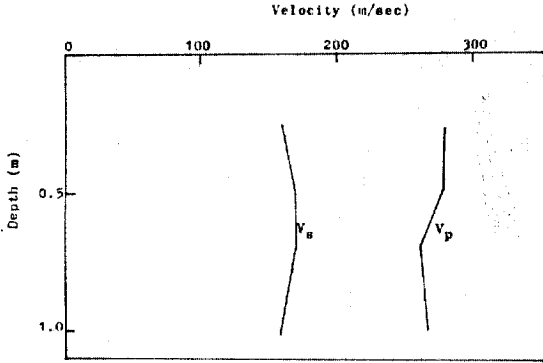


그림 3.2 實驗地盤의 壓縮波 速度 및 剪斷波 速度

m에서 각각 행하였다. 그림 3.2는 깊이에 따른 탄성파 속도의 변화를 보여 주고 있다. 깊이에 따라 탄성파 속도의 변화가 크지 않으므로,共振變位 및 共振周波數의 計算에는 平均値를 使用하여 壓縮波 速度 $V_c=276.5\text{m/sec}$, 剪斷波 速度 $V_s=164.5\text{m/sec}$ 로 하였다. 포아송 비 ν 는 V_c 및 V_s 로부터 다음식으로 算定할 수가 있다.

$$\nu = \frac{V_c^2 - 2V_s^2}{2(V_c^2 - V_s^2)} \dots\dots\dots(3.1)$$

윗 식에 의해 算定된 포아송 비는 0.226 이었다.

3.2 實驗裝置

基礎의 動的 舉動은 基礎의 直徑 및 質量比의 變化에 크게 영향을 받는다. 따라서 模型基礎는 直徑 0.51~0.90 m의 圓形 콘크리트 基礎를 質量比를 變化시키면서 製作하였다. 製作된 11個의 模型基礎의 諸元 및 質量比는 표 3.1과 같다. 표에서의 무게는 振動機의 무게를 포함한 것이다.

지금까지 大部分의 正規振動實驗에서는 回轉 質量形의 振動機가 많이 利用되어 왔으나, 本實驗에서는 一定荷重의 振動을 줄 수 있는 振動機로 實驗을 行하였다. 振動機에 의해 模型基礎에 加해지는 動荷重은 荷重計를 使用하여 測定하였으며, 模型基礎의 動的 變位는 加速度計를 利用하여 測定하였다. 振動信號의 分析은 Dual Channel Fast Fourier Transform Analyzer를 使用하였고, 資料記錄計 (data recorder)와 디지털 도형작성기(digital plotter)를 利用하여 實測된

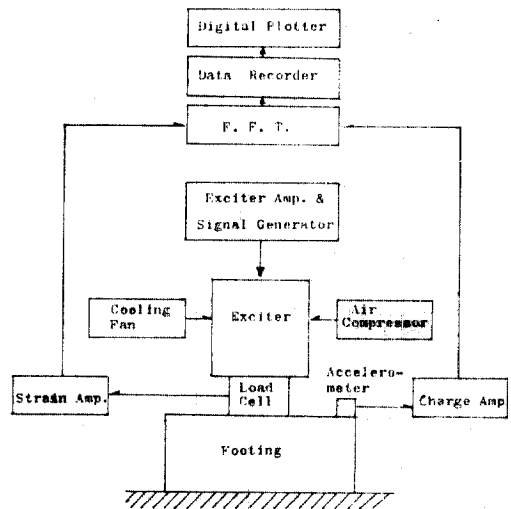


그림 3.3 實驗裝置의 개요도

信號를 기록, 혹은 저장하였다. 實驗裝置의 개요도는 그림 3.3과 같다.

3.3 垂直 正規振動 實驗

垂直 正規振動 實驗은 模型基礎를 實驗地盤 中央部에 水平으로 設置하고 施行하였다. 本實驗에서는 一定荷重의 振動을 줄 수 있는 振動機로 實驗을 行하였으며, 振動實驗時 模型基礎에 垂直荷重만을 加하기 위하여 模型基礎와 振動機를 水平이 되도록 設置하고, 낮은 周波數에서 로킹이 發生하는 것을 最大限 줄이고 振動機를 保護하기 위하여 振動機 지지대를 設置하였다.

實驗時 振動荷重은 每 基礎마다 5가지로 變化시키며 實驗을 行하였다. 振動周波數는 30~

100 Hz 사이에서 每 5 Hz 마다 實驗을 行하였으 며, 最大 振幅이 發生하는 周波數 주위에서는 더 욱 나누어 1 Hz 간격으로 測定하였다. 資料의 수 집은 周波數를 변경시킨 後 F.F.T. Analyzer (Fast Fourier Transform Analyzer)로서 周波數 信號를 觀測하여 前 實驗의 영향(transient) 이없어졌다고 判斷되던 그 後 每 2초의 資料를 연속적으로 16 set를 測定하여 그 平均値를 求 하였다. 荷重 및 加速度의 진폭은 파워 스펙 트럼(power spectrum)으로부터 求하였다. 즉 正規振動의 파워 스펙트럼은 정현함수의 自己 相關 函數(auto-correlation function)를 Fourier 변환한 量으로 다음 式으로 表示된다.

$$G_{xx}(f) = \frac{X^2}{2} \delta(f - f_0) \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서 X 는 정현함수의 진폭이고, $\delta(f - f_0)$ 는 $f = f_0$ 에서 델타函數(delta function)이다. 델 타 函數의 定義에 의해

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} \infty & \text{for } f = f_0 \dots\dots\dots (3.3) \\ 0 & \text{for } f \neq f_0 \end{cases}$$

$$\int_{f_0 - \epsilon}^{f_0 + \epsilon} G_{xx}(f) df = \frac{X^2}{2} \dots\dots\dots (3.4)$$

가 된다. 여기서 ϵ 은 임의의 미소량이다. 따

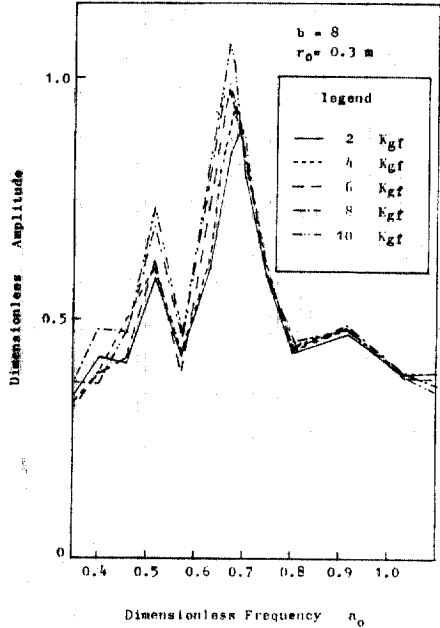


그림 4.2 垂直振動 實驗 結果

라서 (3.4)式으로부터 진폭 X 를 求할 수 있다. 模型基礎의 變位量은 測定된 加速度量을 積分함 으로서 求하였다.

4. 實驗結果 및 考察

各 模型 基礎에 대하여 一定荷重(constant-force)의 垂直 振動實驗을 施行하였다. 本 研究에 서는 모래 地盤 위에 놓인 圓形 콘크리트 基礎 에 대한 垂直 正規振動 實驗의 實測結果를 本 論文에서 提案된 單純化된 愛널로그와 比較分析 하였다.

그림 4.1은 荷重 增加에 따른 模型基礎의 變位 曲線을 나타내는 代表的인 그림이다. 그림 4.1 은 荷重이 增加함에 따라 最大變位가 發生하는 周波數가 약간 減小함을 보여 주고 있다. 이는 다른 研究家들에 의해서도 觀測된 바 있으며, Richart et al.⁽¹⁵⁾은 '有效半徑(effective radius)의 減小'의 개념으로 說明한 바 있다.

그림 4.2는 周波數에 따른 無次元 變位量을 圖示한 代表的인 그림이다. 그림 4.2로부터 各 曲線은 荷重의 크기에 크게 關係없이 거의 一定 한 값을 주고 있어 無次元量들의 適合性을 보

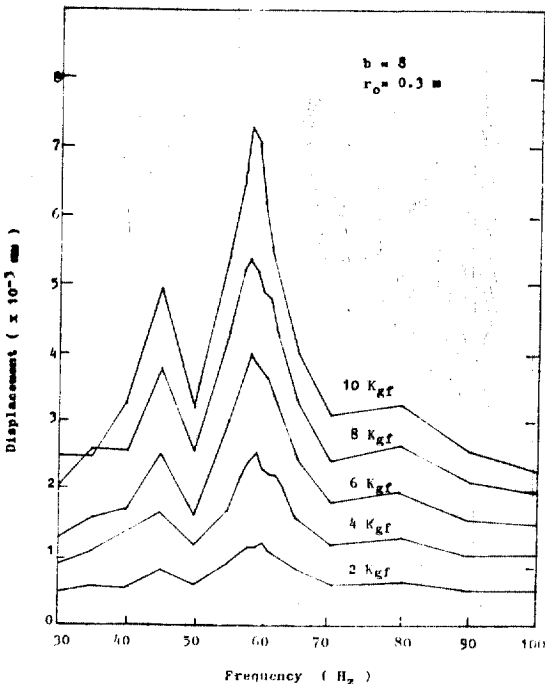


그림 4.1 垂直振動 實驗 結果

여 준다. 또한 그림 4.2는 荷重이 增加함에 따라 最大變位가 發生하는 周波數는 약간 減小하고, 無次元 最大變位量은 약간 增加하는 傾向을 보여 주고 있으며, 이는 다른 研究家들⁽¹⁸⁾에 의해서도 觀測된 바 있다.

그림 4.3은 無次元 周波數와 質量比의 關係를 보여 준다. 實測 最大變位 周波數가 本 研究에서 提案된 애널로그 방법과 잘 부합됨을 보여 주고 있다. 또한 그림 4.3은 荷重의 增加에 따라 最大變位 周波數는 약간 減小하는 傾向을 보여 주고 있다. 그림 4.4는 垂直 變位の 最大 無次元 振幅을 質量比에 대해 圖示한 것이다. 實測 最大變位는 特別한 傾向을 보여 주고 있지

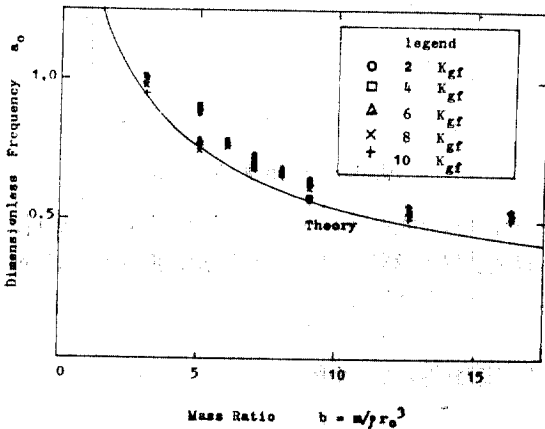


그림 4.3 最大變位 周波數

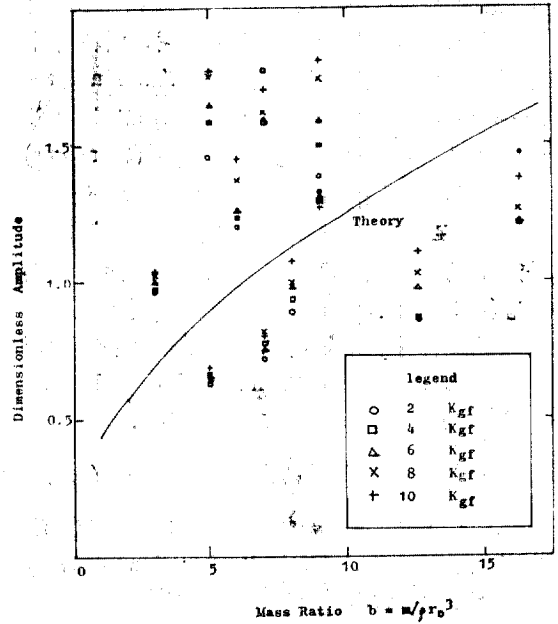


그림 4.4 最大變位

않을 뿐 아니라 理論値와 상당히 큰 差異를 나타내고 있다. 또한 荷重의 增加에 따라 最大變位量도 增加하는 傾向을 보여 준다. 그림 4.5는 本實驗에서 行한 55個의 資料에 대하여 最大變位の 理論値 z_{theory} 와 實測値 z_{meas} 의 比를 圖示한 것이다. 그림 4.5로부터 荷重이 增加함에 따라 z_{theory}/z_{meas} 의 比가 減小하는 傾向을 나타냄

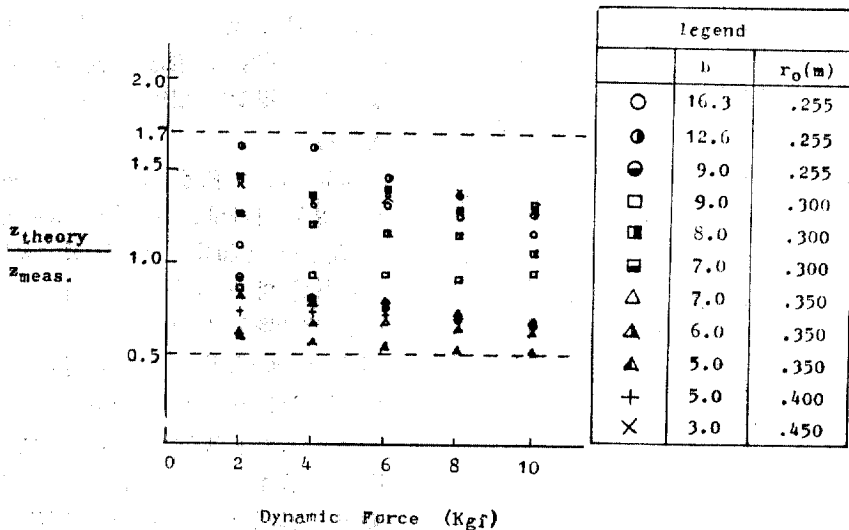


그림 4.5 實測共振 變位와 理論 共振 變位の 比

을 알 수 있다. 또한 全 實驗에 對한 z_{theory}/z_{meas} 의 比가 0.5~1.7 사이의 값을 나타내었다. Richart et al.⁽¹⁴⁾은 Eglin Site와 Vicksburg Site에서 施行한 94個의 實驗結果의 分析으로부터 z_{theory}/z_{meas} 의 比가 0.5~2.0 사이에 있음을 보여 준 바 있다. 따라서 現 基礎設計 時 一般의 適用되고 있는 安全率 2~3이 適合함을 알 수 있다.

5. 結 論

모래 地盤 위에 놓인 圓形基礎가 一定荷重(constant force)의 垂直 振動을 받을 時의 舉動에 對해 研究한 結果 다음의 結論을 얻었다.

1. 接地壓이 拋物線 分布인 경우, 基礎의 舉動을 一自由度の 質量-스프링-減衰의 集中定數要素系의 運動方程式으로 提示하였으며, 이 愛널로그는 特別히 共振周波數 周위에서 彈性 半無限體 理論과 잘 一致하였다.

2. 直徑과 質量比가 다른 11個의 圓形 콘크리트 模型 基礎에 對하여 垂直 正規振動 實驗을 施行한 結果, 實測된 最大變位 周波數는 理論值과 잘 부합됨을 알 수 있었다. 또한 實測 最大變位는 特別한 傾向을 보여 주고 있지 않았으나, 理論 最大變位와의 比가 全 55個의 實驗資料에 對하여 0.5~1.7 사이로, 安全率을 考慮한 기준이론에 의한 設計方法이 滿足할 만한 것으로 思料된다.

3. 또한 많은 研究家들에 의해서도 觀測된 바와 같이 荷重의 增加에 따라 最大變位 周波數는 약간 減小하는 傾向을 보였으며, 無次元 最大變位量은 荷重의 增加에 따라 약간 增加하는 傾向을 보임을 알 수 있었다.

感謝의 글

本 論文은 1983年 9月부터 1986年 2月까지 韓國科學財團의 支援으로 研究되고 있는 『無作爲 振動 技法을 利用한 機械 基礎의 振動 解析에 關한 實驗의 研究』의 中間 報告書로 研究費를 支援해 준 韓國科學財團에 깊은 感謝를 드린다.

1. Lamb, H., "On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid", *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Ser. A, Vol. 203, pp. 1~42, 1904.*
2. Reissner, E., "Stationäre, Axialsymmetrische durch eine Schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes," *Ingenieur Archiv, Vol. 7, part 6, pp. 381~396, 1936.*
3. Quinlan, P.M., "The Elastic Theory of Soil Dynamics", *Symposium on Dynamic Testing of Soils, ASTM STP No. 156, pp. 3~34, 1953.*
4. Sung, T.Y., "Vibration in Semi-Infinite Solids due to Periodic Surface Loadings", *Symposium on Dynamic Testing of Soils, ASTM STP No. 156, pp. 35~64, 1953.*
5. Arnold, R.N., Bycroft, G.N., and Warburton, G.B., "Forced Vibrations of a Body on an Infinite Elastic Solid", *J. Appl. Mech. Trans., A-SME, Vol. 77, pp. 391~401, 1955.*
6. Bycroft, G.N., "Forced Vibrations of a Rigid Circular Plate on a Semi-Infinite Elastic Space and on an Elastic Stratum", *Philosophical Transactions, Royal Society, London, Ser. A, Vol. 248, pp. 327~368, 1956.*
7. Hsieh, T.K., "Foundation Vibrations", *Proc. Institution of Civil Engineers, Vol. 22, pp. 211~226, 1962.*
8. Lysmer, J., "Vertical Motion of Rigid Footings", Ph. D. thesis, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1965.
9. Lymer, J., and Richart, F.E., Jr., "Dynamic Response of Footings to vertical Loading", *J. Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 92, No. SM 1, pp. 65~91, 1966.*
10. Richart, F.E., Woods, R.D., and Hall, J.R., Jr., *Vibrations of Soil and Foundations, Prentice-Hall, p. 414, 1970.*
11. Hall, J.R., Jr., "Coupled Rocking and Sliding Oscillations of Rigid Circular Footings", *Proc. International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials,*

- Albuquerque, pp.139~148, 1969.
12. Whitman, R., "Soil-Platform Interaction", *Proc. Conf. on Behav. of Offshore Struct*", NGI, Oslo, Vol. 1, No. 817, 1976.
 13. Hertwig A., Früh G., and Lorenz, H., "Die Ermittlung Der für das Bauwesen wichtigsten Eigenschaften des Bodens durch Enzwungene Schwingungen", *DEGEBO*, No. 1, p. 45, 1933.
 14. Gerrard, C.M., and Harrison, W.J., "Circular Loads Applied to a Cross-Anisotropic Halfspace", *Paper 8, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization: Div. Appl. Mech., Australia*, pp.5~22, 1970.
 15. Richart, F.E., Jr., and Whitman, R.V., "Comparison of Footing Vibration Tests with Theory", *J. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, Vol. 83, No. SM 6, pp.143~167, 1967.

(接受: 1985. 7. 31)