

760352

5(3)81

1642

土壤與基礎振動學

Vibrations of Soils
and Foundations

原著者：F. E. Richart, Jr.

J. R. Hall, Jr.

R. D. Woods

譯述者：郭 俊 良

校核者：趙 國 華

科技圖書股份有限公司

土壤與基礎振動學

Vibrations of Soils
and Foundations

原著者：F. E. Richart, Jr.

J. R. Hall, Jr.

R. D. Woods

譯述者：郭 俊 良

校核者：趙 國 華

科技圖書股份有限公司

本書原為土木研究所學生編寫的教本，現因國內有關土壤及基礎學術的程度提高，本書內容已成為土木工程系高年級生的選修教本。故將其譯成中文出版，以便有志進修土壤與基礎受到振動時的性能得一優良的中文教本。

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：土壤與基礎振動學
原著者：Richart, Hall, Woods
譯述者：郭俊良
發行人：趙國華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市復興南路一段360號7樓之三
電話：7056781・7073230
郵政劃撥帳號 15697

七十一年十月初版

特價新台幣140元

科技圖書公司

060358

符 號

本書中所用的符號，係依據在 Paris (1961) 召開 International Society of Soil Mechanics and Foundation 所提出“*List of Recommended Symbols for Soil Mechanics*”與“*Nomenclature for Soil Mechanics*,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings, American Society of Civil Engineers*, Vol. 88, No. SM 3 (June 1962), Paper No. 3183。但有少數情況，符號亦用於其他範圍，應避免混亂。當同一符號代表兩個意義，例如， e 可視為孔隙比或自然對數的底，在本書中應清楚辨別。

符號在本書中第一次出現時即被定義；出現多次者，則列在下面。若符號表示一有因次的量，則因次列在符號之後。若無指示因次，即表示符號為純數。

A (ft)	= 位移振幅
A (ft ²)	= 面積
A_x (ft)	= 水平振盪的振幅
A_z (ft)	= 垂直振動的振幅
A_θ (rad.)	= 繞對稱的垂直軸的角旋轉振幅
A_ψ (rad.)	= 繞一水平軸的角旋轉振幅

α_0	= 無因次頻率，由方程式 (7-2) 定義
$\tilde{\alpha}_0$	= 單自由度系統的無因次頻率因數，由方程式 (2-72) 定義
α_{om}	= 在振動的最大振幅的無因次頻率
B (lb/ft ²)	= 統體模數，或壓縮模數
B	= 單自由度系統的無因次質量因數，由方程式 (2-73) 定義
B_x	= 剛性圓形基腳的水平震盪的質量比，由方程式 (7-56) 定義
B_z	= 剛性圓形基腳置在彈性半空間上的垂直振動的質量比，由方程式 (7-23) 定義
B_θ	= 剛性圓形基腳繞一垂直軸作扭曲震盪的質量比，由方程式 (7-38) 定義
B_ψ	= 剛性圓形基腳繞一通過基腳底面的水平軸搖動的質量比，由方程式 (7-44) 定義
b	= 無因次質量比，由方程式 (7-3) 定義
C_i	= 任意常數
c (ft)	= 一矩形基腳的長邊的一半長度 (見圖 7-12)
c (lb-sec/in.)	= 滯性阻尼係數
c_c (lb-sec/in.)	= 臨界阻尼，由方程式 (2-31) 定義
c_x (lb-sec/in.)	= 水平震盪的阻尼常數
c_z (lb-sec/in.)	= 垂直振動的阻尼常數
c_ψ (lb-sec/rad)	= 基腳繞水平軸搖動的阻尼常數
c' (lb/ft ²)	= 有效凝聚力截距
D	= 阻尼比，由方程式 (2-32) 定義
D_r	= 非凝聚性土壤的相對密度，由方程式 (6-37) 定義
D_x	= 水平震動的阻尼比，由對剛性圓形基腳方程式 (7-63) 定義
D_z	= 垂直震盪的阻尼比，由對剛性圓形基腳方程式 (7-62) 定義
D_θ	= 扭曲震盪的阻尼比，由對剛性圓形基腳方程式 (7-65) 定義

D_ψ	= 剛性圓形基脚繞水平軸搖動的阻尼比 由方程式 (7-53) 定義
d (ft)	= 矩形基礎的半寬度 (見圖 7-12)
E (lb/in. ²)	= 線性變形模數, 楊氏模數
e	= 孔隙比 (每單位固體成分體積的孔隙體積); 自然對數底
e (in.)	= 偏心矩, 由旋轉質量重心至旋轉中心的距離
F	= Lysmer's 位移函數, 由方程式 (7-21) 定義
F_1, F_2	= Lysmer's 位移函數 F 的分量
f (cycles/sec)	= 頻率
f_b (cycles/sec)	= 波差頻率
f_d (cycles/sec)	= 阻尼自然頻率
f_m (cycles/sec)	= 固定力振幅激發的共振頻率
f_{mr} (cycles/sec)	= 旋轉質量型激發的共振頻率
f_n (cycles/sec)	= 無阻尼自然頻率
f_1, f_2	= Reissner's 位移函數的分量
G (lb/in. ²)	= 剪力變形模數或剪力模數
G_s	= 比重、材料的單位重量與水的單位重量比
g (ft/sec ²)	= 重力加速度 (32.17 ft/sec ²)
H (ft)	= 土壤層次厚度
I (ft-lb-sec ²)	= 質量極質性矩
I_θ (ft-lb-sec ²)	= 基脚繞一垂直軸旋轉的質量慣性矩
I_ψ (ft-lb-sec ²)	= 基脚繞一水平軸旋轉質量慣性矩
i	= $\sqrt{-1}$
K_0	= 靜止的土壓係數 (在土壤內任一點, 垂直截面上的正應力與水平截面上的正應力比)
k (lb/in.)	= 彈簧常數
k_e (lb/in.)	= 對等彈簧常數

k_{xs} (lb/in.)	= 水平位移對外施力 Q 。關係的彈性常數，由對剛性圓形基腳的方程式 (7-60) 定義
k_z (lb/in.)	= 垂直位移子對外施力 Q 。關係的彈性常數；剛性圓形基腳在彈性半空間上的彈簧常數，由方程式 (7-26) 定義
$k_{\Theta s}$ (in.-lb/rad)	= 繞垂直軸的角轉量對外施靜轉矩關係的彈簧常數，由方程式 (7-37) 定義
k_{ψ} (in.-lb/rad)	= 旋轉的彈簧常數
$k_{\psi s}$ (in.-lb/rad)	= 繞水平軸的角轉動量，對外施靜力矩關係的彈簧係數，由方程式 (7-50) 定義
k' (lb/ft ³)	= 地基反力模數
L (ft)	= 波長
L_R (ft)	= Rayleigh 波的波長
l (ft)	= 桿或梁的長度
M	= 振幅倍率因數
M_r	= 振幅倍率因數，由方程式 (7-25) 定義
M_z	= 振幅倍率因數，由方程式 (7-58) 定義
$M_{\Theta m}$	= 振幅倍率因數，由方程式 (7-39) 定義
$M_{\Theta r m}$	= 振幅倍率因數，由方程式 (7-41) 定義
M_{ψ}	= 振幅倍率因數，由方程式 (7-45) 定義
$M_{\psi r}$	= 振幅倍率因數，由方程式 (7-47) 定義
m (lb-sec ² /ft)	= 質量 ($m = W/g$)
m_e (lb-sec ² /ft)	= 在旋轉質量震盪器中的總偏心質量
m_1 (lb-sec ² /ft)	= 在多質量震盪器中每一偏心重量的質量
N	= 波數 ($N = 2\pi / L$)
n	= 孔隙率，孔隙總體積與土壤總體積之比
P (lb)	= 作用力
P_o (lb)	= 作用於彈性體的週期力的振幅
p (lb/ft ²)	= 流體壓力
Q (lb)	= 作用於彈性系統的時間相依外力
Q_o (lb)	= 作用於彈性系統的外力振幅

x (ft)	= 水平距離
x_c (ft)	= 橫越距離，在折射測量中，直接波與折射波同時到達點的距離
x_s (ft)	= 由靜力 Q 。所產生的水平位移，由對剛性圓形基脚的方程式 (7-59) 定義
x (ft)	= 在旋轉質量震盪器中，不平衡重量至旋轉中心的水平力臂
z (ft)	= 垂直方向的距離，向下為正
z_o (ft)	= 彈性半空間表面上圓形荷重區中心的垂直距離
z_s (ft)	= 由靜荷重 Q 。所產生的垂直位移
$\dot{z}$ (ft/sec)	= 垂直方向的速度
$\ddot{z}$ (ft/sec ²)	= 垂直方向的加速度
α (1/ft)	= 減衰係數，由方程式 (6-27) 定義
α	= 剪力波速度對壓力波速度關係的參數：

$$\alpha = \sqrt{\frac{G}{\lambda + 2G}} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}}$$

γ (lb/ft ³)	= 土壤單位重量
γ_d (lb/ft ³)	= 土壤單位乾重
γ_s (lb/ft ³)	= 固體顆粒的單位重量
γ_w (lb/ft ³)	= 水的單位重量 (62.4 lb/ft ³)
γ' (lb/ft ³)	= 浸水土壤的單位重量
γ_{ij}	= 剪應變
γ_{z0}	= 空心圓柱土壤試體受扭曲時所發生的平均最大剪應變振幅
δ	= 對數遞減，由方程式 (2-39) 定義
δ_L (rad)	= 在滯彈性固體中的損失角度，由方程式 (6-30) 定義
ϵ_i	= 在 i 方向的線性應變
ϵ	= 彈性體的三次方膨脹或體積應變 ($\epsilon = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$)

R (ft)	= 半徑
r (ft)	= 至座標原點的距離
r_0 (ft)	= 圓形基腳半徑
$\bar{r}$ (ft)	= 旋轉半徑
S	= 飽和度
T (sec)	= 週期
T (ft-lb)	= 扭矩
T_b (sec)	= 脈動週期
T_n (sec)	= 無阻尼自然週期
T_θ (ft-lb)	= 繞垂直軸的扭矩
T_ψ (ft-lb)	= 繞水平軸的扭矩
t (sec)	= 時間
$U(z)$	= 位移 u 的空間性變異
u (ft)	= x 方向的位移
$\dot{u}$ (ft/sec)	= x 方向的速度
u (lb/ft ²)	= 土壤中的孔隙壓力
V (ft ³)	= 總體積
V_s (ft ³)	= 固體顆粒的總體積
V_v (ft ³)	= 孔隙總體積
v (ft/sec)	= 波傳遞速度
v_a (ft/sec)	= 音波在空氣中的速度
v_C (ft/sec)	= 縱向或桿波的速度
v_P (ft/sec)	= 膨脹波或主波 (P -波) 的速度
v_R (ft/sec)	= Rayleigh 波 (R -波) 的速度
v_S (ft/sec)	= 剪力波 (S -波) 的速度
v_w (ft/sec)	= 音波在水中的速度
$\bar{v}$ (ft/sec)	= 外視速度
W (lb)	= 重量
$W(z)$	= 位移 w 的空間性變異
w (ft)	= 在 z 方向的位移

$\tilde{\epsilon}$	= 在流體中的三次方膨脹或體積應變
θ	= 角度
Θ	= 繞對稱軸的角轉動量
Θ_s	= 剛性圓形基脚承受轉矩繞一垂直軸的角轉動量

λ (與 G) (lb/in.²) = Lamé's 常數：

$$\left(\lambda = \frac{2\nu G}{1 - 2\nu} \right)$$

μ lb-sec/in. ²	= 滯性的剪力係數
ν	= 卜桑比
π	= 3.14159...
ρ (lb-sec ² /ft ⁴)	= 質量密度 ($\rho = \gamma/g$)
σ_i (lb/ft ²)	= 在 i 方向的總正應力
$\bar{\sigma}_o$ (lb/ft ²)	= 平均有效正應力或有效八面體正應力
τ_{ij} (lb/ft ²)	= 剪應力
τ_o (lb/ft ²)	= 八面體剪應力，由方程式 (6-22) 定義
Φ	= 勢能函數
ϕ' (deg)	= 土壤的有效內摩擦角
φ	= 相角
ψ	= 繞一水平軸的角轉動量
ψ_s	= 由靜力矩引起基脚繞水平軸的角轉動量
Ψ	= 勢能函數
ω (rad/sec)	= 圓周頻率
ω_d (rad/sec)	= 阻尼自然圓周頻率
ω_n (rad/sec)	= 無阻尼自然圓周頻率
ω_z (rad/sec)	= 非耦合移動的自然頻率
ω_ψ (rad/sec)	= 非耦合旋轉的自然頻率
∇^2	= Laplacian 運算 ($\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ 對卡氏座標)

註標

x, y, z	相關於卡氏座標
r, θ, z	相關於圓柱座標
$1, 2, 3$	相關於主應力或應變的方向
i, j, k	表示通用座標方向
$\exp$	作為自然對數的底

原 序

在過去二十年間，關於土壤與基礎的振動問題漸受重視，並在過去十年中又有許多受到注目的發展。此項新的貢獻中，包括計算基礎的動力感應新理論程序、決定土壤動力行為的野外與試驗室方法的改進，用野外測定以計算原型方法的施行等。本書的目的是描述有關基礎對動荷重反應的分析、設計、與測定，以及振動通過土壤的傳遞。重點是由機械產生的振動量，但對地震或爆炸荷重所造成的動力條件、理論與結果，亦可適用。

本書係根據作者自 1961 年以來，在大學的土壤動力學課程所授的講義經整理而成。假設讀者已熟悉靜力學與基本動力學，但對振動理論的正式課程未及完全學到。在第二章中，將以後要用到基本振動理論先予學習。這課程原作爲在 1968 年夏季，由工程師與教授參加組織的研習會的兩週短期課程之用。發現本書的內容很容易爲實踐工程師所吸收，且這些資料可供研究所第一年課程的基礎。

在整本書中，亦包括，指出需作進一步在分析與試驗上研究的課題。在應用上，較着重原型裝置的行為在野外計算的需求。唯有能從原型測定迴歸至設計程序，對目前設計方法的應用與改進才有信心。第九章是設備，在使讀者能熟悉振動測定裝置的理論與型式，以獲得土壤與基礎振動時的野外與試驗室的數據。

作者非常感謝許多前輩顧問與同事的鼓勵與支持。在參考文獻中，姓名出現的次數，可表現出他個人對土壤與基礎振動論題的貢獻。K. Terzaghi 教授在 1951 年指導作者將注意力集中於土壤動力問題，並給予無數支持與鼓勵。在土壤動力問題的分析中，有一些最近的改善，是基於 N. M. Newmark 教授所發展的方法，由於他的鼓勵與關心，使我們在這領域中能繼續的努力。經與 R. V. Whitman 教授的討論後，對我們選取與從事作爲繼續研究的論題，有特殊的意義。許多年青的同事，如 T. Y. Sung 博士與 B. O. Hardin 教授，J. Lysmer，與 V. P. Drnevich 對本書中的觀念與方法都有直接的貢獻。特別感謝 Mr. M. P. Blake 的小心校對與寶貴的意見。

最後，作者很感謝密西根大學土木系的大力支持本書的準備與進展。也很感謝 **Pauline Bentley** 女士與 **Reta Teachout** 小姐作很小心的打字工作。

F. E. RICHART, JR. 李查德

J. R. HALL, JR. 霍 爾

R. D. WOODS 胡 茲

目 錄

第一章 概論

1.1	設計準則	2
1.2	外施荷重與控制準則間之量的關係	2
1.3	土壤性質的計算	3
1.4	設計程序	3

第二章 基本系統的振動

2.1	振動運動	6
2.2	諧和運動的向量表示法	10
2.3	單自由度系統	11
2.4	單自由度系統的相 - 平面分析	32
2.5	二自由度系統	48
2.6	連續系統的自然頻率	57

第三章 等向性均質彈性介質中的波傳遞

3.1	受限彈性介質中的波	60
3.2	在等向性無限均質彈性介質中的波	75
3.4	在彈性半空間中的波	80

第四章 層次系統中的彈性波

4.1	在邊界的波能分佈	93
4.2	地震法的要素	100

4.3	穩態振動技巧	111
-----	--------	-----

第五章 飽和介質中的波傳遞

5.1	概 論	121
5.2	理想流體中的壓力波	123
5.3	多孔性飽和固體中的波傳遞	132
5.4	水位對土壤中波傳遞的影響	136
5.5	結 論	139

第六章 土壤受動力荷重的行爲

6.1	概 論	140
6.2	密接彈性球體的行爲	141
6.3	土壤承受小振幅振動荷重的行爲	151
6.4	大振幅荷重下的土壤行爲	170

第七章 基礎置在彈性介質上振動的理論

7.1	概 論	191
7.2	Lamb (1904) 與動力 Boussinesq 問題	192
7.3	置在彈性半空間表面上基腳的垂直震盪	194
7.4	彈性半空間上圓形基腳的扭曲震盪	213
7.5	彈性半空間上基腳的搖動震盪	216
7.6	一圓盤置在彈性半空間上的滑動震盪	221
7.7	關於剛性圓形基腳置在彈性半空間上振動的等比阻尼	224
7.8	剛性圓形基腳置在彈性半空間上的耦合搖動與滑動	227
7.9	由一彈性層支承的剛性圓形基腳的震盪	230
7.10	由樁或沉箱支承的剛性基礎的振動	235

第八章 基礎的隔離

8.1	用位置來隔離	244
8.2	用障壁來隔離	247

第九章 試驗室與野外觀測裝置

9.1	基本電子元件·····	264
9.2	電的測定裝置·····	269
9.3	振動感應器及其校正·····	275
9.4	電纜與連接插頭·····	289
9.5	野外試驗的振動測定·····	292
9.6	共振 - 柱體試驗·····	300

第十章 動力荷重基礎的設計

10.1	概 論·····	308
10.2	設計準則·····	308
10.3	動力荷重·····	309
10.4	分析機械基礎動力感應方法簡史·····	332
10.5	統括參數振動系統·····	336
10.6	基礎的垂直振動分析與設計·····	345
10.7	基礎的搖擺振動分析與設計·····	369
10.8	結 論·····	379

附 錄	·····	381
-----	-------	-----

參考文獻	·····	387
------	-------	-----

索 引	·····	403
-----	-------	-----

第一章

概 論

在基礎設計中，對於抵抗由機械或外來所導致的動力問題，仍需要由局部土壤條件與環境因素，以獲得其特殊解答。基礎，必需首先滿足靜力荷重的要求，然後，亦需滿足抵抗動力的條件。

抵抗動力荷重條件的設計，必須先解決下列諸問題：(1)所選取的設計功能的破壞，需考慮些什麼？破壞準則（ failure criteria ）的數值極限為何？(2)外施荷重與在破壞準則中顯著份量的關係為何？(3)我們如何確定計算這些顯著份量？(4)最後，計算出這些顯著份量後，在設計程序中，我們選取何種安全因數（或計算這些量的信賴度的統計估計）？

編寫這本書的根本理由，乃是提出近代的資料，以幫助解決在設計程序中的問題(1)至(4)。這些資料，用來補充的，已由 Rausch (1943), Lorenz (1960), Barkan (1962), Major (1962), Harris 與 Crede (1961)* 所寫的書中，得到可貴的資料。

* 所有的參考資料，均列在書末的參考資料章節中，並依字母次序列出。