

天然地基工地載重試驗的討論

(鐵道研究通訊抽印本第2號)

鐵道部鐵道研究所

一九五四年五月·北京

天然地基工地載重試驗的討論

土壤研究組 周 鏡

地基承载力的確定是設計和施工工作中的重要問題。目前確定天然地基承载力的方法有三種：（一）根據蘇聯天然地基設計規範，（二）根據工地載重試驗的結果，和（三）根據理論公式來計算。第一種方法只需對於鉆探取得的土壤樣品作一系列物理性質的試驗，但若遇地質不良的情況，土壤性質超出了規範書的範圍之外，或者建築物特別重要需要更慎重地決定承载力時，便須要採用第二種和第三種方法。第三種方法還需要試驗土壤的摩擦角與粘着力，而第二種方法則不需要特殊的試驗室設備，可以直接地在工地進行。因此，這個方法在過去和現在都是許多工程師所最熟習的方法。

許多工程師認為工地載重試驗方法非常簡單，並將試驗所得的結果直接應用於建築物基礎的設計。事實上，這裡面還存在着許多問題：（一）地基的極限承载力和基礎安置的深度及寬度有關，而建築物基礎的面積比荷重板面積要大得多；（二）基礎的沉降和其寬度有關；（三）土層中附加應力的分佈深度與基礎寬度有關，因而須考慮到地層的不均勻性。根據上述三個主要理由，我們不能將試驗結果直接應用到建築物基礎的設計，只能認為工地載重試驗是一較大規模的土壤力學性質的試驗。在應用這試驗結果時，仍須根據地層的情況和土壤力學理論進行詳細的分析。

本文根據我們學習蘇聯先進經驗的體會，從理論上簡略地介紹分析工地載重試驗結果的方法，和蘇聯的資料，並對土壤載重試驗中某些問題加以討論，以供現場的同志們參考。

一、荷重板的作用與影響

假定地層是一等向均勻半無限狀的彈性物體，那麼根據 Буссинеск 的公式可以求出集中荷重下土層中任意一點的應力。進一步可以確定地面局部承受均勻荷重時，地層中應力分佈的情況。在圖（1）中，A 是荷重板，B 是設計的柱基，都承受強度為 P 公斤/公分² 的壓力。基礎下的曲線是地層中垂直應力的等壓線。從圖（1）中可以看出，應力傳佈的深度是與基礎的寬度有關。當地層為均勻的土壤時，基礎的寬度愈大，受壓層也愈深，如果單位面積的壓力相同，基礎寬度愈大，所將發生的沉降也愈大。如在地層較深處有一層軟弱層，如圖（1）所示，則由於荷重板 A 上的荷重對軟弱層所增加的應力可以忽略不計，但柱基 B 對該軟弱層引起相當大的附加應力，因此載重試驗的結果僅反映了上層土的性質，而在柱基 B 的情況下，則須考慮到下臥軟弱層的允許承载力問題，以及由於軟弱層的壓縮性所引起的過度沉降。

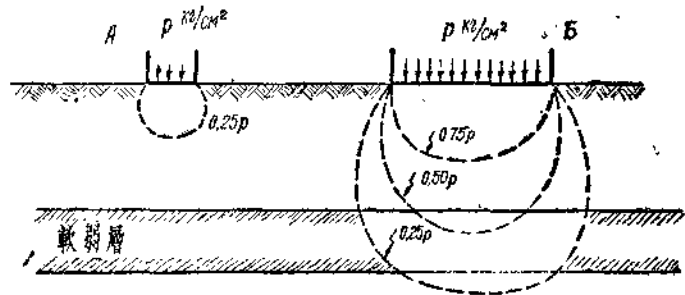


圖 1. 由於基礎面積的不同，在地層中所產生的應力分佈情況（A）荷重板，（B）柱基

上面談到的荷重板面積和沉降的關係，僅只考慮到上層受壓力而產生垂直向的壓縮現象。這種現象當荷重板面積大於一定限度時，是符合於實際情況的。但是當荷重板面積過小時，沉降的發生則不是由於土

層的壓縮，而是由於荷重板下的土壤向四周湧出。因此荷重板過小時，相反地會產生過量的沉降。這一點已被 $\Pi p o c o$ 所做的試驗證實。圖(2)是荷重板的面積與沉降關係。圖(2a)是在沙土上試驗的結果，圖(2b)是在粘性土壤上試驗的結果。 $\Pi p o c o$ 研究的資料對土地載重試驗時，荷重板尺寸的正确選擇具有極重要的意義。試驗指出，當荷重板的面積大於一定限度時，沉降量是與負荷面積的平方根成正比。為了使載重試驗得到正確的结果，H. A. Цитович 教授建議：工地載重試驗時，所用圓形荷重板的直徑不應小於 30—50 公分；方形荷重板的邊長不應小於 45 公分。規範中一般規定的最小尺寸為 40×40 公分和 70.7×70.7 公分兩種。

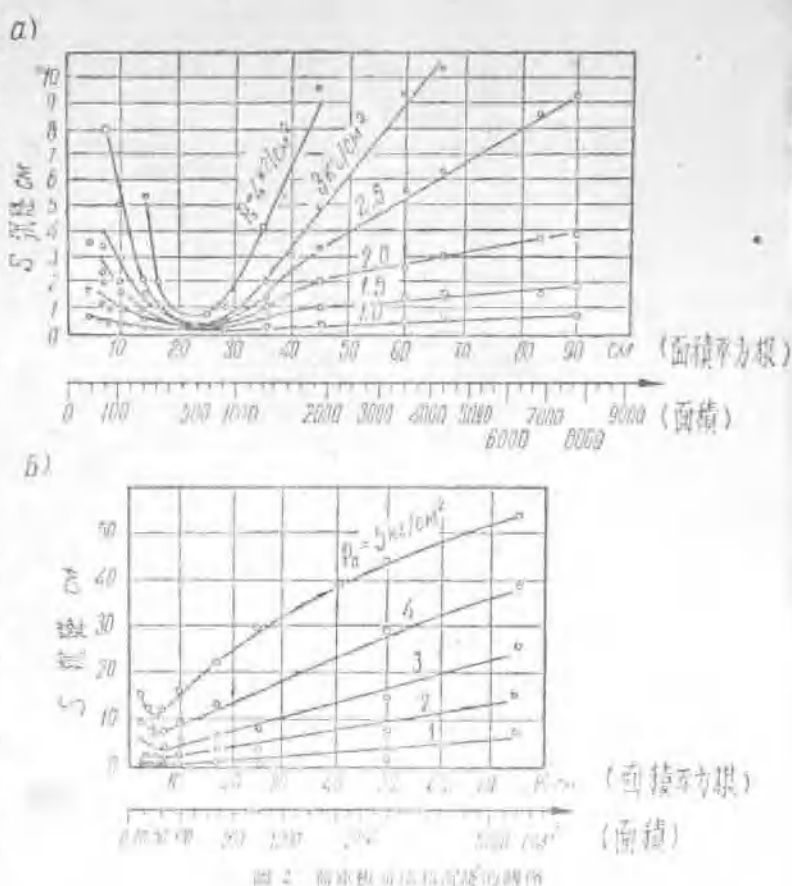


圖 2 荷重板面積與沉降的關係

二、 極限承載力和荷重板的邊長 a 以及安置深度 b 的關係

在確定基礎的允許荷重時，除了要知道土壤的強度外，還要知道由於土壤的壓縮而引起的建築物下沉問題。因此將載重試驗結果應用到基礎設計時，必須將上述兩個問題分別進行分析。然後根據土質力學設計的要求來確定允許承載力。在本節將討論土壤的強度，即極限承載力問題。下一章再討論根據載重試驗的結果來分析沉降的問題。

工地載重試驗是在一小塊面積上進行，而建築物的基礎面積往往要大許多倍，因此必須考慮到允許承載力和荷重板面積和深度的關係。這關係是決定基礎的寬度和深度，分述於後：

(一) 地層為均勻的砂質土壤——根據理論的分析和試驗的結果，砂土的允許承載力是隨基礎的面積增大而增加，隨基礎安置深度的增加而增加。而砂土極限的允許承載力不是平面應力問題，而是一個空間應力問題。由於空間問題的複雜性，目前對砂土上基礎的極限承載力尚無精確的公式，更不能得到正確的解答。B. Г. Березанский 簡化了基礎土壤的變形問題，因為他考慮到砂土的平均極限承載力的近似值：

$$P_{cp} = \frac{1}{2} \left[q \left(1 + M^{\frac{0.85\omega}{\cos \frac{\Phi}{2}}} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2} \right) + \gamma n \frac{N}{\pi+1} (M^{\omega+1} - 1) e^{\frac{0.85\omega}{\cos \frac{\Phi}{2}}} \right] \times (\cos \Phi + \sin \Phi) (\pi + \Phi) \operatorname{tg} \Phi \quad (1)$$

其中， M^{ω} ， ω ，和 N 都是砂土內摩擦角的函數，

q 是側表面荷重，如基礎安置於地面下 h 的深度，砂土的容重為 γ ，則可令 $q = \gamma h$ ，即基礎底面以上土的自重，

n 是圓形基礎半徑（方形基礎時則為邊長的一半），

P_{cp} 是平均極限壓力。

當土層為均勻的砂土時，則公式（1）中的 γ 和 Φ 都是常數，因而公式（1）可簡化為：

$$P_{cp} = [Kq + K' \gamma n] \quad (2)$$

其中， K 和 K' 都是 Φ 的函數

從公式（2）可以看出，平均極限壓力是和基礎安置的深度，和基礎的邊長有關。如果另一方形基礎建築於同樣的砂質土壤上，基礎的邊長為 $2A$ ，安置的深度為 H ，則根據公式（2）平均極限壓力等於，

$$P'_{cp} = \gamma [KH + K'A] \quad (3)$$

如果兩個基礎的邊長和安置深度間存在着下列關係，即

$$\frac{h}{n} = \frac{H}{A} \quad (4)$$

則將 $h = \frac{H}{A} n$ 代入式（2）得到

$$P_{cp} = \gamma \left[K \frac{H}{A} n + K' n \right]$$

於是乘以 $\frac{A}{n}$ ，則

$$P_{cp} \frac{A}{n} = \gamma [KH + K'A]$$

或

$$P'_{cp} = P_{cp} \frac{A}{n} \quad (5)$$

因此，在均勻的砂質土壤進行載重試驗時，如令荷重板的邊長，試驗的深度與建築物基礎的邊長，深度間符合公式（4），即 $\frac{h}{n} = \frac{H}{A}$ 的關係時，從載重試驗得到的允許壓力（當這壓力不超過 P_0 時，圖4），可以用公式（5）來計算建築物基礎的允許壓力。

根據上述的結論，知道砂土的容許力是和基礎的 $\frac{h}{n}$ 比值有關。如果工地載重試驗是在與基礎底面同一水平的深度進行，則載重試驗所得到的允許壓力不能依照公式（5）來增加。

如果我們用不同深度基礎底面同一水平的深度處，用兩個面積不同的荷重板進行載重試驗，則理論上可以用公式（2）中的常數 K 和 K' 的數值，然後用來計算基礎的允許壓力。

在公式（2）中， h 值固定後，平均壓力 P_{cp} 的增加數和 n 的增加數成直線關係。經過換算，可得到下面的公式：

$$P' = P \left[1 + \Delta P \left(\frac{n'}{n} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

其中, P' 是基礎寬度為 $2a'$ 時的允許壓力,

P 是寬度為 $2a$ 的荷重板的允許壓力 (試驗的深度與基礎底面同一水平)。

ΔP 是係數, 與 ϕ , h 以及荷重板寬度 $2a$ 有關。

假若試驗所用荷重板的面積固定, 均勻砂土的內摩擦角 ϕ 已確定, 則當基礎安置的深度 h 改變時, 可根據 Борезаницв 的理論公式 (1) 來計算 ΔP 的數值。

表一 荷重板為 40×40 公分時 ΔP 的數值

ΔP 與 ϕ	公分 100	200	300	400	500
25°	0.142	0.077	0.052	0.04	0.032
35°	0.16	0.087	0.06	0.045	0.037

表二 荷重板為 70.7×70.7 公分時 ΔP 的數值

ΔP 與 ϕ	公分 100	200	300	400	500
25°	0.226	0.128	0.089	0.068	0.055
35°	0.252	0.144	0.101	0.078	0.063

普通用的荷重板尺寸為 40×40 公分和 70.7×70.7 公分兩種, 砂土的內摩擦角 ϕ 的值在 $25^\circ - 35^\circ$ 之間, 因此根據試驗時深度 h 值, 參考表一和表二中 ΔP 的數值, 利用公式 (6), 可以估計寬度為 $2a'$ 的基礎的允許壓力。

(二) 地層為均勻的粘性土壤——空間應力問題本身已是一複雜問題, 如果土壤中存在有粘着力 c 時, 使得問題更為複雜化, 正確的解答同樣是不可能的。В. Г. Борезаницв 根據直綫破裂面的假定, 並假設破壞區內土體的自重為零, 得到圓形基礎在極限平衡條件下, 其極限壓力的近似解 (圖 3)。圓形基礎中心的極限壓力大, 基礎的邊緣極限壓力較小, 壓力的變化可以假定是直綫的關係。中心的極限壓力, $\sigma_z(0)$, 和邊緣極限壓力 $\sigma_z(a)$ 可以根據下述公式來計算:

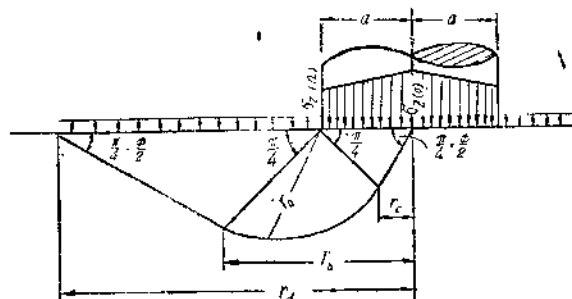


圖 3. 柱形基礎荷重下地基中近似破裂線圖

$$\sigma_z(a) = (q + c \operatorname{ctg} \phi) \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{-\pi \operatorname{tg} \phi} - c \operatorname{ctg} \phi \quad (7)$$

$$\sigma_z(0) = (q + c \operatorname{ctg} \phi) \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_b} \right)^\omega e^{-\pi \operatorname{tg} \phi} + \frac{\omega}{2 \cos \frac{\phi}{2}} \frac{I}{2} - c \operatorname{ctg} \phi \quad (8)$$

其中, $\frac{\gamma_d}{\gamma_b}$ 和 I 都是粘土性土的內摩擦角 ϕ 的函數。

從公式 (7) 和公式 (8) 中可以看出, 在粘性土壤上, 如果忽略土體自重, 則圓形基礎的極限壓力是和側表面荷重 q 有關, 也可說是和基礎安置的深度 h 有關; 但和基礎寬度 $2a$ 無關, 在公式 (8) 中 γ_d 和 γ_b 確是 $\operatorname{tg}(\phi)$ 的函數, 但 $\frac{\gamma_d}{\gamma_b}$ 則僅為 ϕ 的函數。В. И. Новоторцев 根據類似的假定得到的條形

基礎的平均極限壓力的公式中，也沒有基礎寬度的因素。因此，當土體自重為零的條件下，可以假定粘性土壤的承载力與基礎的寬度或面積無關。

事實上，基礎相當深時，即 q 的數值相當大時，破壞區內土體的自重可以忽略不計，如果淺基礎，則應考慮到土體的自重影響。因此基礎的寬度和允許壓力仍有一定的關係，但沒有砂土那樣顯著，這一點從蘇聯的天然地層設計規範中的規定可以得到證實。但是這方面理論上的分析是一較複雜的問題，因此可認為粘性土壤的承载力不受基礎寬度改變的影響。

三、載重試驗的“沉降與壓力曲線”的分析

前節介紹了如何分析載重試驗的承载力的方法。但是事實上在選擇地基的允許承载力時還須考慮由於基礎的修建而引起的土層壓縮。面積較大的基礎所能承受的荷重常受它的允許平均沉降量和沉降差的規定所限制。下面簡單地介紹根據載重試驗來估計基礎沉降的方法。

工地載重試驗既然是一大規模的土壤試驗，因此也可能根據它的試驗結果來確定土壤的某些性質，如壓縮係數，變形模量和滲透係數等。

在估計建築物沉降量的許多方法中，H.A. Цитович 教授建議用等值層的方法。考慮到土壤在有限制的側向膨脹下壓縮，將受壓層換算為等值層的厚度以便直接應用直線變形的關係。計算的公式是

$$S = \frac{a}{1 + e_0} h_s P = a_0 h_s P \quad (9)$$

其中， S 是總沉降量，

a 是壓縮係數，

e_0 是土壤的天然空隙比，

$$a_0 = \frac{a}{1 + e_0}$$

P 為單位壓力

h_s 是等值層厚度。

等值層的厚度， $h_s = A_0 b$ ，其中 b 為荷重板的寬， A_0 是與荷重板的剛性及土壤的性質有關的係數。載重試驗所用荷重板及支柱根據一般規定的尺寸，可認為是剛性基礎。表三中是方形剛性基礎計算平均沉降所用 A_0 的數值。

表三 方形剛性基礎 A_0 的值

土 壤 種 類	卵石和礫石 砂			可 塑 性 砂 質 粘 土		高 塑 性 粘 土
	硬粘土和砂質粘土		砂 質 壤 土	可塑性粘土		
μ	0.1	0.2	0.25	0.30	0.35	0.40
$A_{0.1}$	0.96	1.01	1.07	1.17	1.34	1.71

載重試驗所得壓力和沉降曲線一般具有圖四的形式。在壓力 P_0 以前土層是處於壓密階段。 P_0 是一定面積的荷重以下的極限壓力。超過這壓力，荷重板下的土壤將發生塑性的流動。因此在壓力從 0 到 P_0 的範圍中壓力和沉降的關係，可以應用於直線變形的公式，即公式 (9)。從公式 (9) 中。

$$a_0 = \frac{a}{1 + e_0} = \frac{e_0 - e_1}{P(1 - e_0)}$$

$$\therefore e_1 = e_0 - a_0 P (1 + e_0)$$

$$\therefore a_0 P = \frac{S}{h_s}$$

$$e_1 = e_0 - \frac{S}{h_s} (1 + e_0) \dots \dots \dots (10)$$

公式(10)中, h_s 可以根據荷重板的面積, 土壤的性質來確定, e_0 是土壤的天然空隙比, S 是不同荷重下的穩定沉降量, e_1 是符合於該荷重時土壤的空隙比, 因此用公式(10)可以確定 0— P_0 範圍內任一壓力 P 時的空隙比。

當壓力超過 P_0 時, 壓縮曲線不符合直線的形式而變為對數曲線, 因此應用 Н. Н. Иванов 教授的公式來計算:

$$e_c = e_1 - \frac{\ln P_c}{A} \dots \dots \dots (11)$$

其中, e_1 為單位壓力等於 1 公斤/公分² 時的空隙比,

e_c 為符合於壓力時 P_c 的空隙比,

A 為常數。

從公式(10)中計算出 e_1 的值和壓力為 P_0 時空隙比 e_0 的值, 然後代入公式(11)來計算常數項 A 的數值。再倒回來求任一壓力 P_c 時的空隙比 e_c 。

* 根據上述方法即可繪成壓縮曲線圖, 從而估計基礎的沉降量。

如果在鉆孔中進行深層載重試驗, 根據 С. А. Поза 的研究, 當荷重板的直徑 d 和深度 h 間的比值為 $h \leq 20d$ 時, 則可近似地用下式來估計載重板中心的沉降。

$$S_0 = \frac{1}{8} \frac{(3-4\mu)(\mu+1)}{(1-\mu)} \cdot \frac{Pl}{E_0} \dots \dots \dots (12)$$

其中, μ 為土壤的側膨脹係數,

P 為單位壓力、

d 為荷重板直徑

E_0 為土壤的變形模量。

土壤的側膨脹係數 μ 可從表中根據土壤的種類來確定。在載重試驗中, 知道 d , S_0 和 n 的值, 代入公式(12)計算出 E_0 的值。再倒回估來計算基礎的沉降。公式(12)僅能應用於荷重板上的壓力不超過 P_0 值的範圍, 同時公式(12)估計沉降時, 應注意 h 和 d 的比值關係。

從公式(12)亦可計算等值層 h_s 的值, 若

$$\frac{1}{8} \frac{(3-4\mu)(\mu+1)}{(1-\mu)} \cdot \frac{Pl}{E_0} = s_0 \quad h_s \quad P$$

用 $E_0 = \frac{\beta(1+e_0)}{s}$... $\beta = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}$ 和 $s_0 = \frac{s}{1+e_0}$ 代入, 則

$$h_s = \frac{1}{8} \frac{(3-4\mu)}{(1-4\mu)} d \dots \dots \dots (13)$$

從公式(13)計算出 h_s 的直較之用表三計算出的 h_s 值要小約一倍。由此可知深層試驗時荷重板的沉降亦比淺層探坑試驗時要小得多。

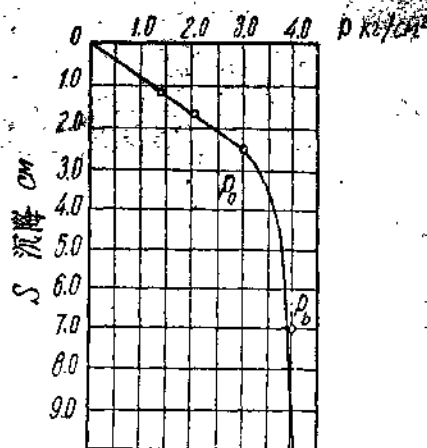


圖 4. 壓力與沉降曲線

四、載重試驗的“沉降與時間曲線”的分析

載重試驗時, 每增加一次荷重, 可將荷重板性質用沉降和時間的曲線來表示, 如圖五所示。從圖中可以看出任意時間 t 時的沉降量, 以及該沉降佔穩定總沉降量的百分數。因此若載重試驗是在飽和的土層上進行, 則可以根據滲壓理論來計算受壓層內地層的平均滲透係數 K 。從滲壓理論知道,

$$t = \frac{4 H_0^2}{\pi^2 C} N \quad (14)$$

其中, t 為達到任意沉降量所需時間,

$$H_0 = \frac{2h_s}{1+\epsilon_0},$$

C 為滲壓係數

N 為時間係數, (與土層中滲壓壓力分佈情況有關)

假若荷重板在一定壓力下的穩定總沉降量為 S ,

當時間為 t 時的沉降量為 St , 則沉降百分數為 $\frac{St}{S}$

Q 。載重試驗的情況下, 土層中滲壓力的分佈一般符合於單向滲透, 頂點向下的三角形分佈情況。因此在不同的 Q 值時 N 的數值可以在表四中查出。

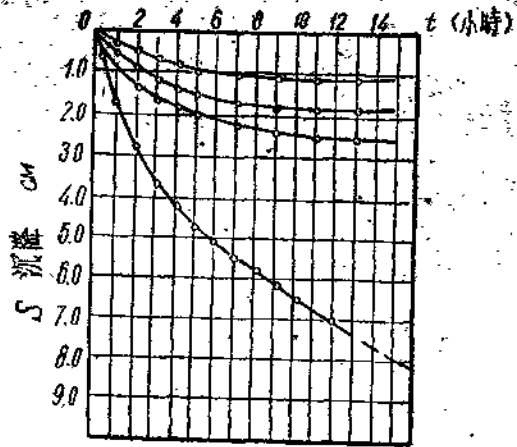


圖 5. 沉降與時間曲線

表四 Q 與 N 的數值

$Q = \frac{St}{S}$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
N	0.002	0.005	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.13	0.18	0.24
$Q = \frac{St}{S}$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	
N	0.32	0.42	0.54	0.69	0.88	1.08	1.36	1.77	2.54	

將 $H_0 = \frac{2h_s}{1+\epsilon_0}$, $C = \frac{K}{a(1+\epsilon_0)\gamma}$, 和 $a = \frac{a_0}{1+\epsilon_0}$ 代入公式 (14) 則

$$K = \frac{16h_s^2 a_0 \gamma}{\pi^2 t} N \quad (15)$$

公式 (15) 的右面各項中 γ 為土壤的容重, 其他各項的數值都可從載重試驗結果中來確定

五、載重試驗應注意事項

為使載重試驗的結果具有相當的正確性, 必須事先掌握建築地區地層的地質, 水文資料, 然後確定試驗的地點和數量。進一步根據地質和土壤性質的資料來分析結果。

試驗前坑底修整時, 必須儘可能地避免破壞土壤的天然結構。天然結構的破壞或土層表面因開挖而發生微量膨脹時, 則載重試驗開始時, 會引起較大量的, 不合規律的沉降。如有這種現象發生時, 則對這一部分沉降不予考慮。

在砂土中進行載重試驗時, 如果地下水在坑底下一公尺左右, 則應在地下水位的高度進行試驗。否則砂土在毛細管作用下, 將產生假粘著力的現象, 因而使得試驗結果發生偏高的誤差。當地下水高於基礎底面時, 則應先將地下水位降至基礎底面, 然後進行試驗。

如果地層係由成層的不同性質的土壤組成, 則須事先了解地層分佈的情況和厚度。在建築物基礎影響的深度內, 必須在不同性質的土層分別進行試驗。根據上述的理論, 分別確定各層土壤的性質。如果下臥層為一軟弱層, 如圖 (6) 所示, 則在軟弱層上必須進行載重試驗。該軟弱層的允許承載力應大於上層

土層自重和基礎所引起的附加應力之和，即

$$P = \gamma h + P' \quad (17)$$

其中， P 為軟弱層的允許承载力，

γ 為上層土的容重，

h 為軟弱層離地面的深度，

P' 為基礎引起的附加應力。

當發現軟弱層時，除去軟弱層強度要符合公式(17)的要求外，還要注意軟弱層的壓縮性，是否會引起建築物過量的沉降。

成層土上載重試驗結果的分析是一繁雜的計算工作，應根據地層中應力分佈情況，各層土壤的厚度，荷重板影響的深度，地下水情況，各層土壤的性質等結合起來考慮。

地層傾斜很大的地區，更應注意到承載試驗的代表性，和基礎底面土層的均勻性。砂土上進行試驗，則應注意到地下水的流動是否會引起流沙現象。

在黃土地區進行承載試驗，如須了解黃土的浸水沉降性時，亦可按照在三公斤/公分²下浸水法進行，從而確定黃土的大孔隙係數。但這種試驗最好能在試驗室中進行。

在鉆孔中進行深層承載試驗時，為了能利用公式(12)估計沉降，應使深度 h 和荷重板直徑 d 的比值 $\frac{h}{d}$ 不小於15，最好大於20。

理論上在同一種均勻的土壤上圓形基礎的極限壓力比條形基礎為大，因此承載試驗的結果用於條形基礎時，是有出入的。但是一般應用時都不考慮這誤差。

總之。在確定地基承载力時，不能單獨地直接從載重試驗結果來估計。應結合地質，水文地質和土壤剖面的資料具體地進行分析。對面積較大的基礎應考慮到選定的允許壓力可能引起的沉降量。重要的建築物則應將載重試驗和試驗室的工作配合起來進行比較，然後考慮到建築物的結構，基礎的形狀等來做最後的選擇。

參 考 文 獻

1. Н.А.Цытович, Механика Грунтов. 1951
2. Б.Г.Березанцев, Осесимметричная Задача теории Продольного Равновесия Сыпучей Среды. 1952.
3. К.Terzaghi and R.B.Peck, Soil mechanics in engineering Practice, 1948

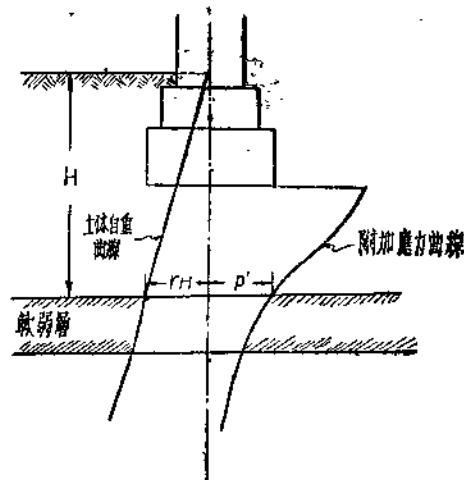


圖 6. 地基中應力分佈圖