

道路路面結構理論

翁朝慶編著

中國科學圖書儀器公司
出版

道路路面結構理論

翁朝慶編著

中國科學圖書儀器公司
出版

內 容 介 紹

本書基本上係根據蘇聯有關路面結構的名著酌加補充編寫而成。其中並參加編著者研究所得之地基形變模量公式以及其他適合中國應用之設計資料。全書分二篇及一個附錄：上篇論柔性路面，下篇論剛性路面，附錄中介紹蘇聯設計資料之應用範圍，為適合設計吾國道路時需用之補充資料。

本書可供大學公路專業作為教材之用，亦可供從事公路設計者參攷之需。

道路路面結構理論

編 著 者 翁 朝 慶

出 版 者 中國科學圖書儀器公司
印 上海延安中路 537 號 電話 64545

總 經 售 中國圖書發行公司

★ 有 版 權 ★

CE. 66—0.15 25 開 70 頁及插頁 4 張 101 千字 每千冊用紙 6.36 令

新定價 ¥ 10,600 1954 年 5 月初版 0001—2000

上海市書刊出版業營業許可證出零貳柒號

序

自從蘇聯的先進道路建築學術介紹到中國來之後，使中國在這一方面的學術上跨入了一個新的階段。介紹這種學術的主要書籍是伊萬諾夫教授 (Профессор Н.Н. Иванов) 所著的“公路路面學” (Строительство Автомобильных Дорог) 一書，其上冊曾由中央交通部譯有中文本刊行，並曾修訂。

原書是為蘇聯高等學校所寫，故對於若干公式的來源與若干具體細節不必盡列，在蘇聯儘有其他書籍可資參攷。再則，根據蘇聯高等學校學生所受先修課程的訓練，若干有關土壤力學、材料力學以及築路材料的內容，原書亦無贅述的必要。這兩方面的情況，對於中國高等學校來說是有點不同的。因此，用這本書當作教本，在教與學都有相當的困難。筆者曾以伊萬諾夫教授原書的上下兩冊作為藍本，講授過一次，在講授過程中對於這些困難曾經親身體驗過。

我國的道路工作者現在也大半以該書為工作的指針，但是在吸收與消化中所遇到的困難與在教學中所遇到的不相上下。例如，對於地基土壤形變模量的公式，就找不到它的來源，因而有許多人認它是經驗公式，想從試驗來證實它。也有人認為其中的若干公式既是經驗的，祇適合於蘇聯的情況，拿到中國來用就會有問題。對於若干資料的數值，也同樣地有適於蘇聯未必適於中國之感。對另一些問題則議論紛紛，莫衷一是——如柔性路面設計中車輛

的換算係數 K ,就是此類問題之一。

這些困難不僅僅是發生於譯文的出入,不僅僅是發生於中蘇行文習慣之不同。主要的還是資料與公式的來源問題,個別地還攙雜一些別的原因在內。如果不掃除這些困難,對於吸收蘇聯先進學術與經驗,是有妨礙的。

筆者根據教學中的體會以及其後的繼續研究,先就其中最主要的柔性路面與剛性路面兩章予以改編補充,寫成這本小冊子。基本材料係取自伊萬諾夫教授的原書,個別部份也吸收了其他蘇聯書籍與英美書籍的材料。應當提到的是:有幾處是由筆者自行研究而略予補充或改動的;主要的是:

(甲)柔性路面一篇中所提到的荷重、車輪與路面接觸面相當圓的直徑以及形變累積公式等,均經另行分析,俾適於在中國採用。

(乙)地基形變模量的公式及剛性路面一篇內地基反應係數與地基形變模量的關係公式,係經筆者探源導出;關於後一公式,並對伊萬諾夫教授原書中之解釋稍予修正。

(丙)關於柔性路面與剛性路面的厚度計算公式,筆者另行製成諸模圖,應用時似較原書所列者為方便。

為閱讀與教學的方便計,基本材料均按比較合理的秩序編列於柔性路面與剛性路面兩篇內。其他僅具參攷性的材料或涉及討論較多之處,則集於附錄中。

實際上,這本小冊子在性質上祇是一種初步的學習報告或者初步改編的嘗試。印成小冊子的形式,交流上稍為便利,交流的面也可以更廣一些。希望從各方面收到些意見,俾使這本小冊子將來能修訂得較好,在吸收蘇聯先進學術上多起一點作用。

翁朝慶 於上海 1954年3月

目 錄

序

上篇 柔性路面結構理論

1. 問題的性質與影響的因素..... 1
2. 過去的柔性路面強度理論之缺點..... 4
3. 新強度理論的基礎..... 7
4. 建立新強度理論中所要解決的問題..... 8
5. 設計方法的概述及設計的前提..... 13
6. 地基形變模量及多層路面形變模量..... 15
 地基形變模量 需要的路面整體形變模量 多層路面換算成為相當
 的單層路面之方法
7. 路面計算中應用之資料..... 27
 路面結構層的計算形變模量 地基土壤形變模量 輪胎的傳壓面積
 和單位壓力 車輛作用加權(或減權)的係數 k 形變累積規律之分析
8. 路面厚度計算舉例..... 48
9. 設計時應注意之要點..... 57
 容許的極限形變之選擇 材料的利用 面層型式 厚度及其配合
 基礎層
10. 各種情況下路面結構示例..... 64

下篇 剛性路面結構理論

11. 剛性路面的工作特點..... 69
12. 根據垂直荷重計算的剛性路面應力與厚度..... 70
 敖爾德公式 威士特卡德公式 基礎反應係數與地基形變模量之關
 係 公式的精密度 公式應用中的幾個問題 巴布可夫修正的解赫
 契爾公式 六角形或長方形混凝土版之計算
13. 溫度變化、濕度及地基形變對於混凝土路面的影響..... 87
 摩擦係數 版內一致溫度變化之情況 由於溫度坡差的翹曲應力

地基形變及濕度的影響 混凝土基礎中之溫度應力	
14. 鋼筋的計算.....	97
縱向邊緣鋼筋 橫縫之傳力桿 溫度應力鋼筋	
15. 脹縫寬度.....	100
16. 水泥混凝土路面厚度計算舉例.....	101

附錄

上 篇

柔性路面結構理論

1. 問題的性質與影響的因素

一般的工程結構採用剛性(彈性)材料;其強度理論多以下列兩個基本前提為根據:(甲)決定作用於結構上的外力以及由於外力而產生的最大應力——這些外力多半是直接作用於結構的構材上,或則是由一件構材傳到另一件構材的作用力,並且是可以比較明確地求出來的;(乙)採用安全係數,並根據材料的最大抵抗力,選定材料的容許應力,藉以保證結構在重複的外力作用——甚至相反的外力作用——之下維持必要的強度。對於剛性(彈性)材料選擇安全係數時,須使之在重複的、甚至相反的外力作用之下仍能保證其強度;或者說,要保證應力在疲勞限度以內。剛性(彈性)材料如受到相當大的應力以至發生顯著的形變時,則自此點(通常所謂屈服點)很快地就達到完全破壞的程度。但實際所選定的安全係數或材料的容許應力,距離產生此種形變的情況很遠;在材料的容許應力之下,材料所表現的形變主要是彈性形變,材料的塑性形變(剩餘形變)小得微乎其微。在剛性(彈性)材料的結構設計中,一般地是不考慮塑性形變的(先進的鋼筋混凝土設計為例外)。

當外力作用於塑性材料時,所發生的情況與前述者大不相同。

第一，塑性材料在不十分大的外力之下即發生塑性形變（剩餘形變），雖則在開始時這種形變不甚顯著，而荷重作用的次數愈多，形變也就累積得愈多（註一）。以土壤為例，在土壤力學中曾述及土壤在重複受壓下之塑性形變累積情況，如圖 1 所示。在第一次受到

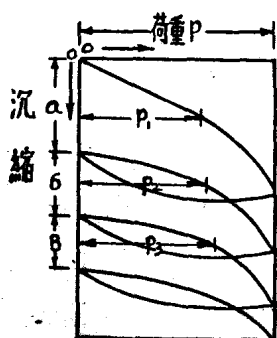


圖 1.

荷重 P 所壓時，產生之塑性形變為 a ；在第二次受到荷重 P 所壓時，產生之塑性形變為 b ，而累積之塑性形變為 $(a + b)$ ；第三次受壓後之累積塑性形變為 $(a + b + c)$ 。柔性路面材料受到外力後，所產生之塑性形變數值及其累積之規律，容或與此不同，但其隨作用次數而累積，則為相同的現象。

第二，如以形變與荷重間直線比例關係之臨界點，作為衡量材料強度之指標，則在第一次受壓時其強度為 P_1 （見圖 1），第二次受壓時其強度為 P_2 ，第三次時為 P_3 ；每次受壓後其強度均有增高（雖則此規律祇可應用於某範圍內）。材料強度之增高，固然是值得注意的一點；但強度增高而同時產生較大的塑性形變，則道路之使用（行車）已受到損害。故對於用塑性材料的路面討論強度時，必不可忘去與使用狀態密切相關的塑性形變，以及形變的累積數值（甚至於累積的規律）。

第三，材料（不論是剛性的，還是塑性的）在受到外力後多少要有一些塑性形變（剩餘形變），祇是視材料種類的不同及外力的大小，

註一：H.H. 伊萬諾夫所著公路路面學一書中謂為：「荷重作用次數愈多，累積也就愈快」，容係筆誤。在以後所述形變累積規律一段內，曾述及在某範圍內形變的累積是按對數的規律進行的，可證其不是「愈快」。

此項形變的數值有所不同。在剛性材料中，吾人謂為無塑性形變，實際是說此項塑性形變極小，幾於小至不可測出。對於塑性材料，也可以定出一個塑性形變的數值，認為此數值是不可測出的，或認為此數值是不必計較的。在一次作用下而產生此數值之塑性形變的荷重，稱之為“平衡荷重”，如圖 2 中之 P 。若多次作用，則此荷重必須減小，方可維持形變不超出“不可測出”的範圍；作用的次數愈多，此荷重亦須減小得愈多；但荷重減小至某一限度時，即便重複作用極多次數，仍不致產生可測出的形變，此種荷重如圖 2 所示之 P' 。此理固與剛性材料疲勞限度之理相似，但一則以破壞為

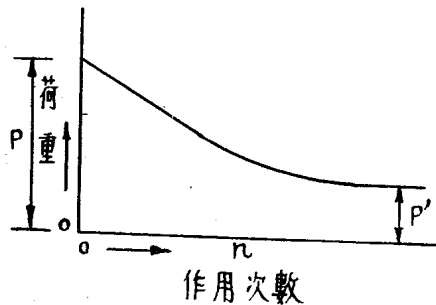


圖 2.

準，而塑性材料則以不可測出的形變為準。根據蘇聯道路科學研究院研究所得，如實際荷重為一次的平衡荷重之 $1/3$ 左右，亦即安全係數為 3 左右，則在極多次重複下，仍可免除形變的發生。若是築路時把材料強度提高得那麼多，使實際荷重祇是相對地成為一次平衡荷重的 $1/3$ ——則在經濟上說，可能是極不上算的，某些塑性材料甚至不可能具有如此高的強度。換言之，塑性材料祇做到有較小的安全係數（低於 3，通常是 1.5 至 2），也就是說不可能避免有塑性形變，而必須把形變的數值或其累積的數值在一定的範圍

內予以限制。

根據以上的討論可知，討論柔性路面的強度時，必須自形變與形變的累積情況出發。荷重的反復性與重複性，對於形變的累積是有重大關係的；此外，總的荷重及傳遞壓力的面積決定了單位壓力，因而影響了形變數值，荷重作用的延續時間也影響了形變；故交通密度與交通性質是影響路面強度的基本因素。從另一方面說，顯然的，路面各層的及地基的形變模量愈低時，路面的形變也愈為顯著。

2. 過去的柔性路面強度理論之缺點

過去，在美國以及在中國與其他各國，柔性路面的強度理論中完全以各種路面傳達壓力於下層的特性及地基土壤承載力的大小，作為研究與核算的根據。這種理論在美國仍被採用着。在蘇聯的先進學說介紹到中國來之前，這種理論也一直支配着我們對於柔性路面強度的研究方向。所有那些美國理論，例如麻省公式、瀝青協會公式、何少氏公式、荷德培氏公式以及毫塞氏公式，祇不過是在車輪與路面的接觸面、傳達壓力的情況及決定土壤承載力的方式等等方面互有出入，而其共同的基本出發點還是在於“傳達壓力的特性”及“地基土壤承載力”。這些理論不能得出確定的答案，主要的是由於其出發點之一（地基土壤承載力）本身就蘊含了嚴重的缺點。

所謂地基承載力，是地基土壤受到荷重時，在荷重與形變間保持直線比例的臨界點上之荷重（或者對於這種荷重除以一安全係數）；也就如同其他工程材料中，按照虎克定理所訂定的比例限值；如圖 3 中所示的 a 點的應力 P ，就稱之為土壤的承載力。或者如

美國所用的，以一塊與輪胎接觸面等面積的圓形承載板，施壓於土壤上，當地基下陷達到某一預定的形變（普通為 2.5 公厘），此時所施的單位壓力就稱之為土壤承載力。

這種理論的第一個缺點是：為達到某一預定形變而需要的單位壓力，隨着承載板的大小而有變化。當承載板所施的單位壓

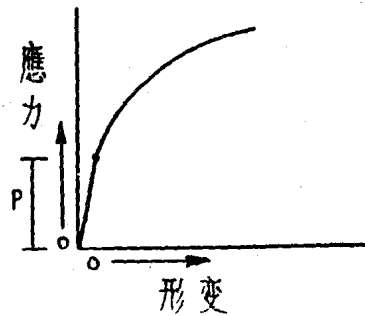


圖 3.

力與土壤形變間的關係，在比例限度範圍以內，地基土壤的形變模量可以下式表示之（其演證方法見 6 節）：

$$E = p \frac{D}{l},$$

其中： E ——以承載板試驗時所得之形變模量，

p ——可以引起形變 l 之單位壓力，

D ——圓形承載板之直徑。

自上式可以看出，當 E 與 l 為固定值時， p 與 D 成反比例的關係，即 $p \propto \frac{1}{D}$ 。（當然是在某一種範圍之內，保持此種關係。普通汽車輪胎與路面接觸面之等面積圓的直徑變化於 23~30 公分範圍內，飛機輪胎者可達 70~100 公分——至少在此範圍內， p 與 D 保持着反比例的關係）。也就是說，傳壓面的直徑愈大，達到同一形變所需的單位壓力就愈小，也就是地基承載力愈低。這樣，不論是試驗所得的或是實際發生的所謂“承載力”都不是一種確定的數值；因此，以地基土壤承載力為出發點的理論必然得不到可靠的根據。

這種理論的第二個缺點是：祇考慮了地基土壤的承载力，而未考慮到路面的強度與形變。在某些情況中，當土壤上所受到的單位壓力尚未達到地基承载力以前，路面即已破壞。在荷重一次作用之下，路面整體（包括地基土壤在內）的形變模量為 $E_{np} = C \frac{pD}{l}$ ($= \frac{\alpha \pi p D}{2l}$ ，其中 C 與 α 為係數，其演證方法見 6 節）。在某種荷

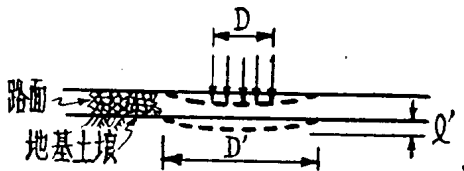


圖 4.

重 p_1 ，與某項接觸面等圓直徑 D_1 之下，路面整體所得形變為 l_1 。設測定地基承载力時承載板直徑為 D_2 ，預定之形變為 l_2 ，所得承载力為 p_2 。由於路面的整體形變模量總是高於地基土壤的形變模量，故在路面破壞時的 l_1 總是小於測定地基承载力時的形變 l_2 。若是傳遞壓力至地基土壤的情況為 $\frac{D'_1}{l_1} > \frac{D_2}{l_2}$ (D'_1 為土壤上傳壓面的直徑，總是大大於 D_1 的)，則代入 $E = p \frac{D}{l}$ 之公式，所得之地基受壓力 p 必小於所測定之承载力 p_2 。是即，路面破壞時地基的承载力尚未充份利用；換言之，如以地基之承载力為準而設計路面，則在達到此承载力之前，路面早已破壞。如此，則此種設計方式乃為地基而設計，並非為路面及路面整體而設計矣。

這種理論的第三個缺點是：在荷重的重複作用下，難於決定地基承载力。當土壤受壓後，其密實度有所增高，亦即其抵抗力增大；第二次再行施壓，則必須施以更大的壓力，方能得到與第一次相等

的形變。此即謂每次施壓後其承载力即增高；自圖 1 中亦可看到，第一次所試得之承载力為 p_1 ，而第二次所得為 p_2 ，第三次所得為 p_3 。如此，則所謂承载力係以何等的重複次數為準？如以第一次的為準，則與以後的實際情況就不相符了。

在那些計算方法中，不論是以經驗直接訂定地基承载力，還是根據地基土壤的磨擦係數與粘結係數來計算地基土壤的塑性形變數值，還是根據側面推力或三軸壓力來計算路面的或地基的形變數值——總之，以承载力為根據，則承载力有那些不確定的因素，並且也沒有考慮到路面的工作情況（路面形變與行車的關係）；以路面或地基形變數值為根據的，也同樣地沒有考慮到路面的整體情況。更重要的是，這些理論都未曾討論到路面形變的累積情況。即便是美國的加省承載比值法（C.B.R. 法），也都多少犯了以上所述的毛病。

3. 新強度理論的基礎

蘇聯道路科學研究院在試驗室及在實地情況中的試驗，都明顯地指出：當一定尺寸的承載板在路面上下陷達某種數值時，路面即開始破壞。不論這種形變是由靜荷重的延續作用而促成的，抑或是由於行車的短時間重複作用而引起的——其破壞時的形變數值並無差別。荷重的性質，亦即加力的方式（或是逐漸增長至一定的大小，或是在極短時間內有衝擊作用）僅影響於個別荷重在施力的那一次所造成的形變數值，但對於危及路面強度的最後形變數值是沒有影響的。

這項試驗與觀察的結論就啓示了：可以採用危及路面強度的最後形變——或者是極限形變——作為柔性路面的設計基礎。這種

形變在一方面表現了它的固定性，在另一方面又與道路使用上的要求相結合。可以用與輪胎接觸面等面積的圓形承載板在路面上施做試驗，確定路面的極限形變數值。同時給予極限形變一個界說：極限形變是靜荷重逐漸增加而達荷重與形變間的直線關係開始破壞時（比例限值）的形變。

這個界說把“危及路面強度”的程度，予以指定。根據前述的蘇聯試驗結果，不論是用靜荷重作試驗、還是實際行車、還是不同的加力方式，祇要形變達到這樣的數值，就認定路面強度受到危害。柔性路面設計就是根據這一情況而推演出來的。

4. 建立新強度理論中所要解決的問題

理論的基礎雖已選定，但是要把試驗情況和實際情況聯繫起來，要把一次測定的情況和多次重複作用的累積形變情況聯繫起來，其中還有些問題有待於解決。

第一個問題是：形變受到承載板直徑大小的影響而有變化。在第2節中曾述及，在同一形變的情況下，承載板的直徑 D 與所施單位壓力 p 成反比例的關係。這句話也可以換一種說法：在所施單位壓力 p 相同時，承載板的直徑 D 與所發生的形變 l 成正比例的關係（當然也是祇在某一範圍內是如此的）。這種關係可用於個別形變，亦可應用於極限形變。由試驗知道，當承載板的直徑為18~25公分時，路面的極限形變變化於0.8~1.5公分範圍內，平均等於1公分。汽車輪胎的接觸面變化範圍較小，其等面積圓直徑變化於23~30公分範圍內；但飛機輪胎的接觸面變化可達一倍及一倍以上（達100公分的等面積圓直徑）。

這項變化會不會影響於設計工作——是待解決的問題之一。由

於 l 與 D 的關係在某範圍內成為正比例，亦即 $\frac{l}{D}$ 可設為常數（在 0.035~0.06 範圍內）；如果把 $\frac{l}{D}$ 之值導入地基形變模量的公式

$E = \frac{pD}{l}$ 內，或導入多層路面形變模量的公式 $E_{np} = \frac{\alpha \pi p D}{2l}$ 內，

就不會影響 E 與 p 的關係，或是 E_{np} 與 p 的關係。因此，用形變模量的方式來計算時，這一個問題是沒有影響的。

第二個問題是：建立理論時，可以自兩個不同的出發點開始：（甲）由逐漸增大的靜荷重而達到累積的極限形變；（乙）由車輪在一次作用下而發生所允許的形變。在第一情況中，極限形變當然要在形變與荷重的直線關係範圍內；在第二情況中，所發生的是小的彈性塑性形變，毫無疑問的，應力與形變必然保持着直線關係。

在第一情況中，因為靜荷重是一次作用的，為了要達到極限形變，必須把荷重加大。在第二情況中，必須決定一次作用下的容許形變，此項形變數值必須較極限形變縮小若干倍，庶在規定的多次作用情況下所累積而成的總形變，適與極限形變相當。在荷重（單位壓力）與形變成直線關係的條件下，荷重的加大倍數（在第一情況中）與形變的減小倍數（在第二情況中）是相等的。在圖 5（甲）中，在一次作用中要達到 n 次作用所造成的極限形變，則荷重必須為實際車輪荷重的 $\frac{p'}{p}$ 倍，此項倍數係自形變的累積規律中在 n 次作用時所算出者。在圖 5（乙）中，在同一荷重（單位壓力）下，一次作用所允許的形變 l' ，經 n 次作用後累積成為極限形變 l ，則 $\frac{l}{l'}$ 之比亦係自形變累積規律在 n 次作用時所算出者。既係均自同一形變累積規律中、並同在 n 次作用下所算出者，故 p' 較 p 所大之倍

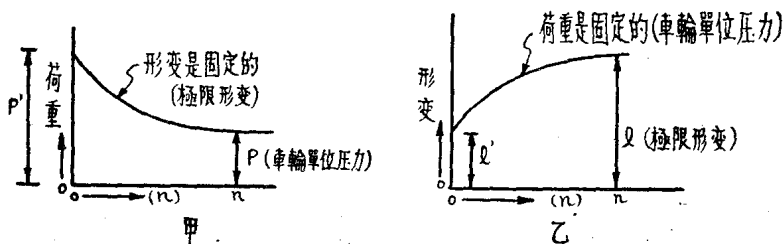


圖 5.

數，必等於 l' 較 l 所小之倍數。因此，建立理論時自任何一出發點開始，均可得到同樣的結果。

第三個問題是：必須找出在荷重重複作用下的路面剩餘形變累積規律。找到了這項規律，才能夠自上述兩個出發點中的任何一個：或是由一次作用而達到極限形變的荷重，求出允許的車輪荷重；或是在實際車輪荷重的一次作用下，找出所發生的形變與累積的形變，並自此而建立整個的理論。為找出此項規律，蘇聯道路科學研究院曾在試驗室及試驗用的環道上做過多次試驗，並在通行大量汽車的公路上驗證其結果。

在具有某種強度安全係數的路面上，以重複荷重所做的試驗結果固定地指出，形變的增加係按照下列公式所示的規律進行：

$$a + b \log n \quad (1)$$

其中： n ——荷重重複作用的次數，

a 及 b ——為二係數，決定於路面強度的實有安全係數，並決定於荷重的性質——荷重作用的延續時間——以及決定於重複的頻率。

要符合於路面的實際工作情況，問題就複雜了。第一，地基狀態變動時，形變也有增加。地基形變模量在一年中變化頗鉅，而自路面強度的觀點出發，祇須考慮地基形變模量數值最低的時期（若最