

269914



散体结构力学

Г. Р. 克列因 著



人民铁道出版社



散 体 結 構 力 学

Г. К. 克 列 因 著

陈大鵬 王荣璽 徐文煥 合 譯
項忠权 范文田

人 民 鉄 道 出 版 社

一 九 六 〇 年 • 北 京

本書詳細地研究了散體結構力學应用于土壤和谷物等方面所遇到的一些基本問題；除研究了理論解法以外，還敘述了試驗工作及基本試驗研究的結果。為了便于實際計算，作了許多輔助圖表并例舉一些數值上的算例。

本書可供建築結構工程技術人員在設計各種與壓力有關的結構物、以及設計擋土牆及其他與散體有關的結構物時作參考用。

散體結構力學

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА СЫПУЧИХ ТЕЛ

蘇聯 Г. К. КЛЕИНС

蘇聯國家建築出版社（1956年莫斯科俄文版）

ГОССТРОЙИЗДАТ（Москва 1956）

陳大鵬 王榮望 徐文煥

項忠權

范文田

合譯

人民鐵道出版社出版

（北京市霞公府17號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第010號

新華書店發行

北京市印刷一廠印

書號1601 開本787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張9 $\frac{1}{16}$ 字數213千

1960年2月第1版

1960年2月第1版第1次印刷

印數0,001—3,800冊。定價（8）0.80元

前 言

为完成苏共第 20 次代表大会关于發展 国民 經濟第六个五年計劃的指示中所規定的工業、水力和特种建筑物及房屋的設計任务，就需要解决一些有关确定影响建筑物的土壤压力和土壤承受建筑物載荷的承載能力的問題。

1954 年 3 月苏共中央全会所通过的关于今后谷物增产及开垦处女地和荒地的決議中，規定有要在国内东部各地区修筑谷倉和儲粮庫等决定，因此，对于这些建筑物的計算以及对散体結構力学的研究等問題，在目前來說是具有特殊现实性的。

在土壤力学中，为了簡化研究工作起見，我們用一种計算模拟物来代替土壤，最常采用的計算模拟物就是“散体”。

必須指出的是，最近几年来，由于进行了一些重要的研究，結果已經將散体結構力学的內容充实了，但是这些研究的結果，在設計实际工作中迄今仍未能十分普遍地采用。这是因为在各种雜誌上与文集上所發表的有关这项著作，能够得到大多数的了解是很困难的。因此，感到有必要在本書中以十分簡明的形式来叙述有关散体結構力学的各項主要問題。

本書的目的就是为着弥补上述的缺陷而編写的，它和研究同一問題的其他著作所不同之点：1) 它把較多的篇幅用于叙述問題的物理方面和实验方面；2) 不仅研究了散体的極限平衡，也研究了散体的彈性平衡；3) 反映了極限状态的方法。作者編写本書时，曾尽可能地参考了与本問題有关的国内外最新文献。

作者在研究每一問題时，首先是对严格的解法（就数学意义而言）进行了叙述，然后才述及实践中广泛流傳的簡化

解法。这种叙述的次序，便于对许多附加的假设进行评价（许多简化解法都是以这些附加假设为基础而建立起来的），当然这丝毫不能意味着作者打算把它们推到不重要的地位上去。

作者对于科学技术界著名的活动家B.M.基勒底什教授，技术科学博士H.H.别祖霍夫教授所给予的宝贵指示表示衷心的感谢；并对技术科学硕士A.M.阿凡纳西也夫讲师在本稿编写时提出了有益的意見以併表示謝意。

目 录

前 言	1
緒 論	1
§ 1. 散体結構力学的主题和任务	1
§ 2. 散体結構力学的发展簡述	4
第一章 散体的力学性質	11
§ 3. 散体的粒徑, 顆粒形狀, 顆粒組成及其均匀度	11
§ 4. 散体的孔隙度, 含水量及容重	14
§ 5. 散体的变形	18
§ 6. 散体的抗剪强度, 內摩擦和粘結力	19
§ 7. 散体的抗压强度和压密	28
§ 8. 天然坡角和側压力系数	33
§ 9. 散体的变形和压力間的一般規律	37
第二章 散体的应力理論	42
§ 10. 散体的計算用型式及其对土的应用条件	42
§ 11. 平面問題的平衡微分方程式	46
§ 12. 傾斜面上的应力。最大偏角	50
§ 13. 散体的極限平衡条件	54
§ 14. 散体应力状态的圖解法	58
§ 15. 平面問題里散体極限应力状态的微分方程式(B.B.索科洛夫斯基方程)	67
§ 16. 軸对称問題的微分方程 (B.Γ.別列贊采夫方程)	71
第三章 建築物基础的穩定性	74
§ 17. 基础的穩定条件	74
§ 18. 極限应力状态理論的解	77

§ 19. 考虑紧密土楔的形成对基础稳定性的計算.....	82
§ 20. 基础稳定性的簡化計算.....	91
§ 21. 試驗数据.....	97
第四章 边坡的稳定性.....	102
§ 22. 边坡的稳定条件.....	102
§ 23. 用極限应力状态理論的解法.....	104
§ 24. 边坡稳定性的实用計算方法.....	110
§ 25. 观测与試驗数据.....	117
第五章 挡土墙上的散体压力.....	119
§ 26. 挡土墙的工作情况.....	119
§ 27. 某些平面問題精确解的基本結果.....	124
§ 28. 某些对称問題解法的主要結果.....	129
§ 29. 按滑动面为曲綫时計算填料作用于挡土牆 上的压力的圖解法.....	131
§ 30. 压力沿牆高的分布.....	136
§ 31. 折綫形表面上的散体压力。散体具有整齐 層次的情况。地下水的影响.....	139
§ 32. 被动散体抗力.....	146
第六章 滑动面用平面代替时确定挡土墙上散体压力 的方法.....	148
§ 33. 基本假定.....	148
§ 34. 基本定理.....	152
§ 35. 用几何作圖法确定散体对挡土牆的主动压 力.....	154
§ 36. 計算挡土牆上散体主动压力的公式.....	160
§ 37. 作用在散体頂面上的荷載的影响.....	163
§ 38. 确定散体对挡土牆的压力时散体粘結力的	

計算及求散体压力的特殊情况.....	175
§ 39. 用平面代替滑动面的方法应用范围.....	180
§ 40. 空間問題.....	186
§ 41. 散体的被动压力.....	195
第七章 确定挡土墙上散体压力方面的观察和試驗資料.....	198
§ 42. 求挡土墙上散体压力的其他方法.....	198
§ 43. 观察和試驗的資料.....	205
第八章 在深置墙基底上的散体压力.....	215
§ 44. 深置墙的工作情况.....	215
§ 45. 深置墙在散体强度为弹性阶段时的計算.....	218
§ 46. 深置墙在散体極限强度阶段时的計算.....	223
§ 47. 試驗資料.....	228
第九章 儲藏庫壁部及底部的散体压力.....	233
§ 48. 問題提要.....	233
§ 49. 儲料庫壁部及底板上填料靜压力的決定.....	235
§ 50. 試驗及观察的資料.....	242
第十章 散体内修建結構物的散体压力.....	246
§ 51. 問題提要.....	246
§ 52. 埋設于距地面不深的結構物上的散体压力.....	246
§ 53. 距地面很深处用暗挖法修建的結構物上的散体压力.....	250
§ 54. 用明挖法修建或埋設的地下結構物上的散体压力.....	254
§ 55. 試驗及观察的資料.....	263
結 論.....	270
散体結構力学中应用極限状态的方法.....	270
参考書目.....	273

緒 論

§ 1. 散体結構力学的主题和任务

有許多物体，大部份是由个别的比較均匀的質点構成的，例如砂質土壤和卵石，谷物，面粉，砂糖，碎煤，水泥，粒狀的和粉狀的化学藥品等等。这些物体，按其物理性質而言，是介于固体和液体之間的。它們被称为**散粒体**或簡称为**散体**。

散体与固体之不同，在于它的質点的移动性，它仅能在明显的限度內保持形狀，在于它向保护層上加压力的特性，它不能够或有極小的能力抵抗拉力，并且还在于它的抗剪能力是依作用着的压力而变化。

液体与散体之不同，在于它的質点的大流动性，缺少恒定的形狀，并具有較小的抗剪能力。

由材料、尺寸和形狀来看，散体的質点可以是均匀的也可以是不均匀的；它的三个尺度是同量的，或是不同量的；它的表面是光滑的或粗糙的。質点可以处于彈性或塑性状态，它們具有某种程度的强度。

散体質点之形狀是極其不同的。

介于質点中間的地方，叫作空隙。空隙可以由空气，水，或某种膠凝物質充滿。

在本書第一章中，將詳細論述散体的物理-力学性質。

散体的力学运动（亦即它們随時間不同对于其他物体的位置而作的变化）以及散体質点間的相对位置的改变（也就是它們的变形），構成了散体力学。

散体結構力学的內容就是：叙述在各种不同的載荷以及由建筑物方面傳来的作用力的作用下，推求确定散体压力和

抗力的方法。

如所周知，彈、塑性固体力学分为两个基本方向。第一个就是材料力学和結構力学所采用的方向，它的特征是引用了若干簡化假設以使我们得以只用起碼的方法，而不必用复杂的数学工具，就可以解出某些問題。第二个就是彈性理論和塑性理論中所采用的方向，它的特征是尽可能多的把解題数学严格性提到首位上来；这在許多情形，是需要应用复杂与細致的数学方法。

液体力学分为水力学和流体力学。

散体力学也可分为二个方向。假定滑移面为某种形式，据此而建立起来的理論，属于第一个方向，这些理論可以用起碼的方法解决許多重要的实际問題。第二个方向被我們称作散狀介質理論；这个方向是从所研究的散狀介質体积內每一个点的極限平衡条件和平衡微分方程式出發的。

当然，我們不可能尖銳地划出散体力学这两个方向間的界限，同时，这种界限也是不稳定的。散体力学問題的若干解法，往往是处于以上两个方向的中間位置，因之也就可以把它們归于其中任一方。随着散体力学的发展，一些为試驗所証实的散狀介質理論解法，代替了用概略的假定而建立的解法，因之这些散狀介質理論的解法就应当轉到散体結構力学方面去。但是，完全摒棄散体結構力学的起碼方法，按照下列原因看来，也是不正确的。

首先，在實踐中引用許多散狀介質理論解法，是非常复杂的，而同时所導出的結果，却又与按起碼方法得出的差別不大。

其次，散狀介質理論，虽然遵循着保持数学上的严格解法的目的，它并非永远能反映出在真正散体中發生的物理現象的一切基本方面。同时，考虑这些已經用数学形式写出的

現象，也是过于复杂的事。因之，在許多情形下，散狀介質理論并不能回答建筑实践所提出的問題，換言之，就是它与真实情况有分歧；在这种情况下，我們不可避免地必須采用一些起碼的解法。这些解法近似地考虑了一系列重要因素，并在实践中得到了驗證。

散体結構力学的起碼方法应当是与散狀介質理論的發展平行着發展起来。因之，不应当像最近一个时期以前那样，把散体力学起碼方法的发展工作，局限于只研究处于極限平衡状态的散体。

应当对处于静止状态，亦即稳定或彈性状态、平衡状态以及运动状态的散体同样进行研究。在这个方向上，直至目前不过只走了第一步，但是这两个問題却具有很大的实践意义。

解决極限平衡問題时，就本質来看，我們是在研討散体的破坏阶段；因之在固体变形体力学中，極限平衡理論与塑性理論所研究的問題，就相当于这一类型的問題。于是，不研討散体的变形与位移，也可能解出这类問題。算式包括了內摩擦力和粘着力，这两者都是散体的基本力学性質。这一类的典型問題，就是推求在获得不大位移的挡土牆上的压力的問題。由于这一小小位移，靠挡土牆支持的散体开始了运动。

一般說来，不研究散体的变形和位移，亦即不采用某种彈性規律，而要解决散体彈性平衡理論問題是不可能的。推求处于彈性平衡状态的挡土牆及地下建筑物上的压力就屬於这种問題。

作为結構力学一部分的散体結構力学，一般地都包括在杆件系統結構力学教程中。随着土壤力学的發展及其被划分为一个独立的課程，散体力学就作为对發生于土壤中的力学

現象进行研究的一种方法，而归到土壤力学中。

除去散体力学計算模拟物之外，在現代土壤力学中还应用了一系列其他計算模拟物如彈性体，塑性体，土壤質体等等。

土壤力学中，沒有唯一的計算模拟物，以天然土壤的多种多样的性質，及其依潮湿度、溫度、荷載以及其他因素之不同，而采取不同状态的能力，就可以說明这一点。

虽然散体力学的角色远比研究土壤力学中所用的某一种力学模拟物来得寬闊得多，但土壤仍是应用散体力学方法的最重要的对象。

正像其他力学各部分一样，散体力学是以試驗为基础的；这些試驗使我們可以闡明散体中所發生的現象和过程的物理方面，使我們可以建立起一些前提和假設。应当注意到，只有通过試驗，才能得出在算式中所包含的各种不同散体的物理力学特性数值。試驗在散体力学中，比在其他力学各部分中，具有更大的意义；这是因为，人們对散体中發生的現象和过程比固体力学和液体力学研究得少，而它們又比固体力学中的現象和过程更为复杂。

§ 2. 散体結構力学的發展簡述

正如其他力学各部分一样，散体力学的誕生和發展是与技术的發展連系着的。

众所周知，列昂納德·达·芬奇(1452—1519)与伽利留·伽利略(1564—1642)的著作，乃是使結構力学成为一門独立課程的开始。

稍迟一些时候，在十七世紀 与建筑問題、城防工事問題有关的散体力学誕生了。

由于铁路運輸業有建筑桥墩、桥台和修建铁路路基填土

的需要，自十九世紀三十年代起，在結構力學，特別是散體力學的面前出現了新問題。

在十九世紀的後半期，結構力學在這些方面（建築堤壩，大橋，碼頭和基礎）繼續走向日益完善；這些方面要求進一步強力地發展散體力學。

在蘇聯，隨著幾個五年計劃所提給建築工作者的任務，使散體結構力學取得了很大發展；這些任務要求我們解決與土壤和其他散體有關的一系列複雜問題。

* * *

十七世紀末第一次公佈了關於散體力學的研究工作。這個研究工作的目的就是要推求填土作用於擋土牆上的壓力。M.布由列的著作是這方面首批著作之一。該著作採用了下列假定：當牆剪移時，某部分散體，沿着穿過牆背底邊的天然坡平面發生滑動。儘管這一假定有着明顯的錯誤，布由列方法却包含着合理的原理——關於擋土牆剪移的原理，關於散體某一部分溜動的原理以及關於滑移平面的原理；無疑地，這些原理幫助了K.庫倫[130]使他在1773年得以相當準確地解出了同一問題。庫倫根據了這些假設，並且在這以外，他還採用了Γ.伽利略在1638年所採用的極限平衡原理，以及阿芒頓在1699年用試驗方法建立的靜摩擦規律。在1638年，伽利略曾用這一原理來決定梁在彎曲時的承載能力。

對於一個特殊情況：填土表面為水平面，牆背面是豎直的，並且牆背面絕對光滑。庫倫建議按照沿某一平面滑動稜體的極限平衡條件，來決定土壤加於牆上的壓力。至於這個平面的傾度，則應按擋土牆最大反力條件選取。庫倫不僅致力於尋求真正的滑移面，他也同樣地注意到不要把牆的計算壓力估計成小於實際壓力。庫倫的工作是伽利略、布由列和阿芒頓建議的綜合，是向前邁進了一大步，並且至今仍然未

失去它的意义。

后来，龐色列(1840年)[137]，庫里曼(1860年)[129]，列勃汗(1871年)[140]和 М.列維(1833年)發展了庫命理論。他們把庫命理論推广到当填土表面为任意形狀时；有傾斜和折綫形牆粗糙牆面的算例中去；而在研究工作中，他們主要是应用圖解法。在 А.И. 普里列沙也夫 [89]，В.П. 斯克雷里尼克夫 [100]，И.П. 普洛柯費耶夫 [91]，Н.И. 別祖霍夫 [3, 5]，А.С. 伊洛瓦伊斯基 [55]，В.В. 辛磊里尼克夫 [99]，Г.А. 杜布洛夫 [48]，М.Г. 別斯金 [16] 等人的著作中，庫命理論得臻完善。

Б.Н. 日莫其金的著作，近于上述方向的著作。日氏 [53] 的著作，是与水工建筑物中極重要的問題——多孔圍堰中填土內压的計算問題很有关系的。

建筑技术的發展，使建筑物作用于土壤上的压力加大，并且往往又使我們必須把这个压力加于軟土之上。这就給散体力学提出了新任务——根据基底穩定性条件来决定基础埋置深度。

在上一世紀七十年代，Г.Е. 保克尔曾建議了解解這一問題的近似解法。而В.И. 庫尔鳩莫夫却是对這一問題进行試驗研究的先驅。庫氏于 1889 年第一个对基础埋置模型下面以及它的旁边的砂粒运动，进行了試驗研究 [66]。

庫尔鳩莫夫以及他的后繼者（在这些人中，首先应当提到 Н.П. 普茲列夫斯基，И.В. 雅魯波列斯基）指出，Г.Е. 包克尔公式会导致不可靠的結果，这是因为包克尔对于例如基础寬度这样重要的因素，却没有考虑。基础下土壤穩定性問題，需作进一步研究，后来包克尔公式就被 П.К. 楊克夫斯基，Н.П. 普茲列夫斯基，С.И. 別尔捷茨基，Н.М. 捷尔謝万諾夫等人的更完善的公式所代替。

Г.克列[64]和B.費連紐斯[113]曾研究了在水工、鐵路、公路建筑，以及矿山工作中甚为重要的边坡稳定性計算工作。他們建議采用圓柱形滑移面。但是除了重复試算法以外，他們并未提出其他推求最“危險面”的方法。依靠制造圖表来簡化計算，是計算工作的根本簡化办法；这一工作是由M.M. 索科洛夫斯基完成而發表的^①。M.H. 高里什坦[34]，Г.М. 沙胡年茨[122]，B.M. 罗米傑[71]等人的著作，曾把这一問題作了进一步的發展。

苏联学者詳細地研究了另外一种对水工和筑路工作很重要的問題——埋置薄牆和埋置大塊狀牆的計算問題。这一問題早先是由Г.克列研究的

应当指出，И.П. 普洛柯費耶夫[91]以及A.坎辛和H.布丹諾夫[59]的著作。这些著作創始了在水平力作用下埋置牆的計算理論。这些理論并經 И.Е. 斯克列賓[101]，С.С. 达維道夫[41]，И.В. 烏尔班[112]，Д.В. 安节利斯基[1]，С.М. 庫得林[65]，B.H. 日莫其金[51]等人予以發展和扩充了。

Н.И. 別祖霍夫[8]，对埋置薄牆与埋置大塊牆的計算理論，作出了巨大的貢獻。在一系列工作中，在土床系数沿深度采任意規律而变化的条件下，別氏对任意剖面、任意平面形狀的挡土牆，提出了决定牆的剛度、强度和穩定性問題的一般解法。

在这些著作中，已經以明显的方式，提及关于研究建筑物三种不同極限状态和把安全系数分佈到建筑物各个組成部分上等極限状态現代方法的基本概念。

有意义的是这个富有成果的概念，居然誕生于散体結構力学中。

● 見“莫斯科-伏尔加建設”杂志№3-4, 1937.

在 1895 年，揚森[131]根据豎直压力在每一水平面上呈均匀分佈的假設，第一个解决了散狀物貯存倉的倉底和倉壁压力的計算問題。Л.М. 叶米良諾夫[49]和 E.M. 古齐尔提供了更准确的解答。

散体由小孔流出时，要發生动力現象，是 C.Г. 塔赫塔梅謝夫在 1940 年首先發現的。

推求地下建築物載荷的問題，与散体力学有着密切的关系。

根据坑道上面會發生卸載拱这一假定而来决定地下建築物載荷的第一次嘗試，应当归功于 B. 李特[142]。这个假定是，在坑道上面會出現由岩石本身所構成的卸載拱，而这个拱却承受了坑道上面的質体所产生的压力。在 Ф. 恩格謝尔，O. 克米列耳，特别是在 M.M. 普罗托吉雅克諾夫[92]的著作中，都对这一假說作了进一步的發展。普氏則把散体力学的方法应用到岩石上去了。

散体力学的另外一个方向（我們姑且称它为散狀介質理論）是在 1857 年由 B. 蘭金[139]創始的。蘭氏研究了佔有半个空間的重散体的極限应力状态，亦即，上述散体形成了一个上面由表面所局限，且三向無限大的巨塊。蘭金並沒有充分的根据，但是他却建議把引用散体均匀塊子所取得的結果，用到那些由于有了挡土牆，散体均匀性受到破坏的情况中去。

在列維[135]，溫克列耳，莫尔和費立姆[146]的著作中，曾对蘭金理論作了若干补充。

在 Ф. 克堯切尔的著作中[132, 133]（發表于 1891—1909 年間）和在 Л. 普朗特耳，Г. 列依斯聶尔[141]，A. 卡克[128]等人的著作中，这一理論又得到了进一步的發展。Ф. 克堯切耳把寻求滑移表面实际形狀的問題，归結为变分問題。

H.П. 普茲列夫斯基的原始著作是近于散体力学中这一方

向的。普氏建立了彈性理論平面問題的平衡微分方程式，作為這一工作的基礎。於是，在變形不連續條件以外，他又引用了一個假設，設給定點之切應力為該點與坐標原點間極角的函數。

這樣，在Н.П.普茲列夫斯基的著作中，已經包括了土壤中應力作簡單經向分佈的概念。後來，Н.Н.伊萬諾夫，戈利費斯，弗列里赫等人發展了這一概念。

Н.П.普茲列夫斯基第一個說出了隨時間而改變的土壓力的動力性質；他導出了在最松散狀態下和在靜止狀態下的土壓力計算公式。算式導出的結果極其切合於試驗和觀察數據。

И.В.雅魯波利斯基[124]繼續了Н.П.普茲列夫斯基的工作。雅氏於1933年，用試驗方法，肯定了散體對擋土牆所施加的壓力，依牆的位移而變化。研究了試驗數據之後，雅氏確定了這些數值之間的數學關係。К.太沙基[145]曾大規模地進行了類似的研究。

本世紀三十年代末年，在實踐方面，差不多散體極限理論中的一切重要問題，都是用結構力學方法來解決，即是对滑移表面的形狀作出了各種不同的假定，根據這些假定進行求解。儘管這樣，當時對於散體極限應力狀態理論的一般嚴格解法（如蘭金所創始的），並未進行研究。1938—1941年間，В.И.諾沃託爾切夫，朝着這一方向邁進了一步。諾氏[80]並未使用複雜的數學工具，但是他却得出了一系列重要解答。尤其是在豎直和水平力作用下，研究了計算建築物基底穩定性的方法，亦即，在比Л.普朗特耳（1920年）更為廣泛的前提下，解決了這一問題。В.И.諾沃託爾切夫的著作，給計算建築物基底穩定性的方法打下了基礎。1941年水力發電工程總局（Главгидроэнергостроя）刊行的“水工建築物