

土力学的理論原理及其实际应用

魏汝龙 译

建筑工程出版社出版

土力学的理論原理及其实际应用

魏汝龙 译

建筑工程出版社出版

內容提要 本書總結了當時土力學方面的成就，根據土顆粒和分子水的特性，詳細說明了作為散布體的土的物理性質；分析了飽和土在各種條件下的內力狀況、毛細管張力的作用和氣化與汽化的產生、潛水在土骨架中的滲流，以及這種滲流對土體內部壓力和結構的影響。本書也詳細研究了各種土的三向壓縮與抗剪強度、土的直綫固結與非直綫固結理論，並導出了應用公式。

本書可供土力學工程師和一般技術人員以及大學建築系學生參考之用。

原書說明

書 名 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ
И ИХ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

著 者 Заслуженный деятель науки и техники, член-корреспондент академии наук СССР Н. М. Герсевич
и кандидат технических наук Д. Е. Польшин

出版者 Государственное издательство строительной литературы.

**出版年份
及 地 点** Москва, -1948.

土力學的理論原理及其實際應用

魏 汝 龍 譯

*

建築工程出版社出版（北京市東門外南禮士路）

（北京市書刊出版業營業許可證出字第052號）

建築工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書字752 256千字 850×1163 1/32 印張9 7/8

1958年3月第1版 1958年3月第1次印刷

印數：1-2,060冊

定價：（10）1.80元

目 录

通用的主要符号和术语	8
序 言	9
第一章 土的物理性质	12
第一节 土的本质	12
第二节 土中的应力	14
第三节 表面现象	17
第四节 分子水的力学性质	19
第五节 最大分子持水量	21
第六节 土的粘性	22
第七节 土的压缩和膨胀 液限	23
第八节 等值压力	26
第九节 分子水的冻结	28
第十节 刚性骨架的土	29
第十一节 土的基本力学指标	30
第十二节 土中全部孔隙均充满水的情况 饱和土	34
第十三节 土的变形与含水量的关系 压缩曲线	36
第十四节 临界含水量 塑限	39
第十五节 土的结构	41
第十六节 触变现象	43
第十七节 沉积岩土的形成条件	47
第二章 饱和土动力学原理	49
第十八节 饱和土动力学的课题	49
第十九节 饱和土的静力状态 压力的两种系统	50
第二十节 土力学中的统计方法 饱和土的悬浮问题	54
第二一节 新的术语	55
第二二节 压缩系数	56
第二三节 毛细管作用 负的静水压力	58

第二四节	飽和土的非壓縮性原理	63
第二五节	飽和土中壓力和含水量之間的关系	67
第二六节	土的收縮	69
第二七节	用力學模型解釋飽和土中所發生的現象	72
第二八节	外部荷重對於毛細管壓力的影响	73
第二九节	彈性和剛性骨架的土的干縮 塑性指数的意义	74
第三〇节	土樣从鑽孔和探坑中取出时的狀態	76
第三一节	土的出水 地下水位 滲出壓力	78
第三二节	水文地質調查時区别毛細管水和重力水的标准	81
第三三节	土樣中毛細管壓力的作用	83
第三四节	用毛細管壓力確定自重壓力	83
第三五节	关于土中毛細管現象的总的結論	84
第三六节	懸着水	86
第三七节	固結儀和三軸壓縮儀	86
第三八节	試驗確定土骨架在水中的懸浮作用	88
第三九节	达西定律	89
第四〇节	潛水和土骨架相互影响的規律 勁水壓力	92
第四一节	粘土地基上快速加載的危險性 地基中排水層的作用	94
第四二节	土的膨脹	96
第四三节	滲透的古典理論	98
第四四节	用擋土牆擋住滑坡	101
第四五节	斜坡上勁水壓力的作用	104
第四六节	勁水力懸浮作用	105
第四七节	懸液中的靜水壓力	107
第四八节	用孟哥夫斯基教授的方法設置矿井式的無支撐深井	108
第四九节	懸液作用的分析和計算	110
第五〇节	潛水由層流變到紊流 雷諾数	113
第五一节	从壓力較小處滲流到壓力較大處的条件	115
第五二节	用壓力計測定地下水位	116
第五三节	地下水層流上升時的現象	119
第五四节	飽和土动力学观点中的达西定律	121
第五五节	飽和土上基础的沉降	128
第五六节	固結理論	129

第五七节	在粘土地基上建造土坝时的見解 稳定系数	134
第五八节	利用垂直的排水 加速固結并利用二向和三向固結理論 加以計算	136
第三章	飽和土动力学的实际应用	141
第五九节	土中小量排水的抽水	141
第六〇节	多層土中的抽水	143
第六一节	在沉箱中用抽水降低压力	145
第六二节	土中抽水时毛細管水和重力水的分界綫	145
第六三节	土中抽水对于土的沉降的影响	147
第六四节	M. E. 克諾蘭教授在施工前人工压縮地基的方法	149
第六五节	彈性骨架的飽和土在挖开的基槽中的情况	153
第六六节	矿山压力	155
第六七节	剛性骨架的土的特点 自發下沉	157
第六八节	临界孔隙率	161
第六九节	松散沉积的形成条件 防止自發下沉	164
第七〇节	計算边坡时动水压力、中性压力、有效压力和全压力之間 的关系	165
第七一节	下雨期間不透水地基上路基稳定性的計算	166
第七二节	保護路基和擋土牆稳定性的結構措施	170
第七三节	利用使地基固結的方法在軟土上建筑港口建筑物	172
第四章	飽和土中汽化和气化的理論	174
第七四节	土样从鑽孔中取出时的状态	174
第七五节	水在力学模型中的蒸發条件	176
第七六节	潛水的蒸發条件	177
第七七节	試样由于汽化而膨脹的条件	179
第七八节	压縮試驗中的矛盾及其可能消除的方法	180
第七九节	弯液面的影响	183
第八〇节	毛氏蘭原理	185
第八一节	推导气化的基本公式	189
第八二节	肯尔定律应用到潛水中时的特点 气化公式的分析	192
第八三节	解确定試样由于气体而膨脹的方程式	193
第八四节	与相的規律的相似性	195
第八五节	土中全压力的变化所引起的水分的轉移	195

第八六节	选择含气的軟土上的基础型式	197
第八七节	在飽含气的土中的沉箱內的工作	197
第八八节	土中析出气体的一般理論	199
第八九节	飽含气的水的渗透	200
第九〇节	飽含气的水渗透时不析出气体的条件	201
第九一节	降低水位装置中的井孔的工作条件	201
第九二节	飽含气的地下水位变化对于析出气体的影响	202
第九三节	气体从鑽孔中噴出	204
第五章	試样的三向压缩	205
第九四节	平面問題中应力理論的論点	205
第九五节	側压力系数	208
第九六节	無限自由的砂層中的压力	213
第九七节	平面問題中的水容量原理	214
第九八节	空間問題中的水容量原理	217
第九九节	外荷重对于毛細管張力的影响	219
第一〇〇节	压碎土样以确定摩擦系数	220
第一〇一节	飽和土的强度条件	221
第一〇二节	混凝土和土的强度与中性压力無關的試驗証明	223
第六章	非直綫变形理論	227
第一〇三节	变形模量	227
第一〇四节	無限小的变形 絕對变形模量	229
第一〇五节	側压力系数 λ 和泊桑比 μ 之間的关系	229
第一〇六节	絕對变形模量和孔隙比之間的关系	230
第一〇七节	絕對变形模量和相对变形模量之間的关系	232
第一〇八节	絕對变形模量和相对变形模量的几何意义	233
第一〇九节	彈性力学公式在土中应用的条件	234
第一一〇节	总的結論和所得关系的驗證	238
第七章	剪切理論	240
第一一一节	庫倫圖	240
第一一二节	变形主枝上的剪切条件	242
第一一三节	預压土的剪切	244
第一一四节	在物理学上証明摩擦角与土的密度关系	246
第一一五节	剪切与孔隙比的关系	250

第一一六节	破坏后的剪切现象 触变的影响	252
第一一七节	压缩曲线的应用范围	253
第八章 饱和土状态中的粘性土和淤泥性土的直线固结理论		
		258
第一一八节	前 言	258
第一一九节	直线固结的定义和范例	259
第一二〇节	直线固结的方程式组 土骨架的运动方程式	260
第一二一节	直线固结时潜水的运动方程式	266
第一二二节	直线固结时有效压力的微分方程式	267
第一二三节	压缩系数和渗透系数不变时粘土直线固结的简化方程式	270
第九章 饱和土状态中的粘性土和淤泥性的非直线固结理论		
		283
第一二四节	连续体力学的原则和定理	283
第一二五节	土力学中的应力张量和变形张量之间的关系	292
第一二六节	饱和土状态中的土的一般固结方程式	302
第一二七节	渗透系数和变形系数不变的均质饱和土的近似固结方程式	310
第一二八节	論 B. A. 弗洛林所給出的饱和土的近似固结方程式	314

通用的主要符号和术语

名 称	符 号	单 位
水的容重.....	Δ	克/立方公分
土的总容重.....	G_{dr}	克/立方公分
土的浮容重.....	G_n	克/立方公分
骨架的比重.....	γ	克/立方公分
土骨架的相对比重($\frac{\gamma}{\Delta}$).....	γ_0	0
水头.....	H	公分
压力高度.....	h	公分
水力梯度.....	J	0
雷诺数.....	Re	0
含水量.....	w	%
最大分子持水量时的含水量.....	w_m	%
孔隙比.....	ε	0
渗透系数.....	k	公分/秒
压缩系数.....	α	平方公分/公斤
稳定系数.....	c	公分·秒/公斤
侧压力系数.....	ξ	0
泊桑比.....	η	0
动水压力.....	D	公斤/立方公分
有效压力.....	P	公斤/平方公分
中性压力(水压力、汽压力 and 气压力, 各有其相应的底标).....	w	公斤/平方公分
毛细管压力.....	p_k	公斤/平方公分
渗出压力.....	p_e	公斤/平方公分
自重压力.....	p_g	公斤/平方公分
等值压力.....	p_e	公斤/平方公分
内压力(粘性).....	p_s	公斤/平方公分
主应力.....	R, S, U	公斤/平方公分
相对变形模量.....	E	公斤/平方公分
绝对变形模量.....	E_a	公斤/平方公分
最大偏角.....	θ	度
摩阻角.....	φ	度
表面张力.....	α	公斤/公分

序 言

土力学是工程力学的一个分支,它研究散布物体 (дисперсные тела) 的变形和强度。因此,土力学是散体力学,和研究連續物体 (сплошные тела) 的彈性和塑性力学不同。与后二者比較起来,則土力学更为复杂,且有下列几个不同的特点。

第一,它建立在相当广闊的物理基础上;而彈性力学則是从数学上研究建立在非常狹窄的物理基础上(虎克定律)的問題。只有在各国不同的研究者們所积累的資料說明了散布物体各种不同的物理性質后,土力学才提到科学的高度上来。

第二,彈性力学研究变形和应力成直綫关系的物体,而土則是非直綫变形体,在研究其中的力学过程时,就不能不采用新的概念。

第三,在散布物体中經常有水,这对其力学性質有很重要的影响;又由於它在散布物体中有三种状态·分子水,毛細管水和重力水,而且在外力作用下各有其反应,故在研究水的影响时就更为复杂。

第四,散布物体中可能有气体,在力学作用下必須考虑其热力学性質。

第五,和連續物体不同,散布力学采用統計学的方法,这种方法是以前散布物体各部分的平均情况相差不大为基础的。因为确定平均值是統計学的課題,所以一切基本上取決於平均情况的方法均称为統計方法。因此,土力学的一切概念均具有統計的特征。例如,关于散布物体中某一已知点的应力的概念不能当作是組成該物体的某些顆粒的应力;这样的理解很不合适,正好像在彈性力学中企圖將彈性概念应用到个别分子上一样;应力应理解为物体中某一假想分出面上的平均应力,此面愈大,則这种概念愈明确。

如果土粒間孔隙的平均直徑為 0.01 公厘，這不是說土中所有的孔隙實際上都是這樣大小；而只是說，土中一切與孔隙大小有關的現象，都與全部孔隙具有相同的直徑（等於 0.01 公厘等等）時一樣。

土力學是在最近才出現的，共計只有 20~30 年，而且這門科目的範圍和內容尚未完全搞清。很多人把它和工程地質學相混淆，忽略了後者是地質學的一部分，只有地質學家才能予以發展。地質學的方法完全不同於力學的方法；其中完全沒有試驗，而以觀察為最主要的研究方法。

在個別情況下，地質學家所搜集的實際材料可以作為檢驗力學結論的基礎。但是，若要从地質學的前提去解決像建築物的沉降、土的容許荷重、土坡穩定、隧洞上的土壓力等問題時，則應注意，在這一類情況下，我們已進入物理、力學及其方法的範疇，這些問題中的地質觀察只能當作是為了組織相應的試驗而應予注意的原始材料，而不能當作是某種概念的基礎。

在我們的學術中，尚有所謂地質工程學^①（геотехника）的名詞，這種名詞很不明確，它可以包括一切有關土的問題，如：土力學、地質學、水文地質學、對土起作用的化學方法等。顯然，地質工程學不是一門科學的科目，而是為了便於教學的一種課程，因為其中闡述各種科學科目的成就，很像中等學校中講授的所謂“宇宙學”（космография）這門課程，它彙集了天體學、氣象學、地文地質學以及其他自然科學部門中的各科知識。

本書的目的是要反映目前的土力學的情況。在我們的“飽和土動力學原理”第三版（1937 年出版）以後，又積聚了許多新的研究成果（其中主要是蘇聯學者們的），所以很多地方必須修訂，並且應按另一種方式來闡述。此時，我們認為，闡述以彈性力學為基礎的計算方法以及在某些情況下應用到解決土力學問題的一些工程力學計算方法是多餘的，因為這些方法可以在相應的課程中介紹。我們最主要的目的是要確立由土力學導出的並由實際應用說明的

① 有時譯作地工學或土工學——譯者注。

基本概念和原理,沒有这些基本概念和原理,就不可能解决实际问题。我們的書名为“土力学的理論原理”,也正是符合这个目的。

目前,土力学已發展到这种程度,以致在“饱和土动力学原理”中所闡述的許多篇都得取消,而縮減为章。其中,需要用数学方法的固結理論已由技术科学副博士 Д. Е. 包利兴發展成一般的形式,本書也按照他的編纂將其列为第八章和第九章。

因为本書主要系供建筑工程师之用,考虑到这些人已受了專門教育的特点,所以在說明土的物理和力学性質时采用了能够解釋任何現象的力学模型,而不深入研究这些現象的物理本質。

最后,對於苏联科学院主席团对本書給予的出版前的审核表示感谢。

對於 Л. А. 巴甫洛娃(Павлова)和 З. Г. 馬卡罗娃(Макарова)幫助我們校閱原文,並為本書編制圖例說明材料,同样表示感谢。

Н. М. 格尔赛万諾夫

第一章 土的物理性質

第一节 土的本質

如果除去我們並不感到特殊兴趣的岩石所組成的土不予考虑,則所有其余的土可以分为两个主要类别:砂类土和粘土类土。

虽然,地質学家和建筑工程师对于这种分类的意见是一致的,但他們所根据的观点則不同。地質学家从其起源的观点上来区分这两类土。砂是由岩石經過力学破坏而形成的;而且砂的粒徑取决于岩石这种力学破坏的延續時間和粉碎程度。粘土則是由岩石經過化学破坏而产生的。

工程师采用上述分类是由于这两类土的建筑性能迥然不同。事实上,甚至在表面上看来,砂和粘土也象是两种完全不同的材料。其中引起我們注意的最重要的差别有以下几点:

1. 粘土的含水量,即其中水重与干土重之比,有很大的变化范围——大致从3% (硬粘土) 到610% (河口細微的粘土沉积);但是,以同样單位表示的砂的含水量則在相当窄的范围内变化——从0 (干的粗砂) 到40% (流砂)。

2. 在变干和含水量减小时,粘土經過三种状态:流动 (稀粘土),塑性和坚硬,而且其硬度可达到在挖掘时需要用爆炸的程度。塑性状态的特征是,在局部的外压力作用下,土能改变其形状并發生变动,但其体积不变。砂在連續地变干时只經過二种状态,即:如为粗砂,則它从流动状态变成松散物体;如为極細砂,則它从流动状态变成固体状态。这样,砂絕對沒有塑性状态。因此,通常說,粘土是塑性的,而砂是非塑性的。

3. 在变干时,粘土的体积大为减小,并且發生龟裂,砂則否。

4. 粘土的压縮性很大;砂的压縮性則相当小。

5. 在外力作用下，粘土壓縮得非常慢；而砂則緊接在加荷後即完全壓縮。

6. 砂在一切狀態中均透水。粗砂特別透水，因此常利用它作為排水層。塑性和堅硬狀態的粘土實際上是不透水的。

在遇到純粹的砂或粘土時，所有上述兩類土在性質上的巨大差別就特別顯著。但是，在自然界中往往埋積着很多混合起源的土^①。此時，上述各種特性就具有中間的性質，根據這些性質來確定該種土近於砂類土或粘土類土。因此地質學家就定出間於這兩類土中間的類別，即所謂砂壤土和壤土等。但是，對於工程師來說，這種分類還遠未能滿意，因為，一方面它不能概括土的各種極其不同的性質的全部差異，而另一方面，它使這個問題變得很不明確，這些不明確往往只是重大的誤解的根源。土的各種人為的分類方法，無論它假定得如何恰當，對於計算土的承載能力來說，都只是治標的方法，而只有在分類方法能以數字來表示土的性質時，才能真正解決這個問題。

研究土的物理性質正是在這個方向上進行的，從這種研究中可以得出下述情況。

無論什麼樣的土，總是由大大小小的固體顆粒組成的。砂是由各種大小的粒狀顆粒所組成。砂粒的直徑從1~2公厘到0.01公厘。

粘土顆粒與砂顆粒的不同僅在於其尺寸小得多，而且形狀也不同；粘土顆粒成薄片狀，其最大的尺寸不超過 2μ ，而其厚度則不超過 0.1μ （ $1\mu = 0.01$ 公厘）。

土的性質在質的方面的一切差異都決定於上述兩種情況，即組成土的顆粒的大小和形狀，同時，這些性質表現的決定性因素是顆粒間孔隙中的水。顆粒間孔隙的大小具有特別重要的意義。孔隙小時，水顯示出毛細管性質，而孔隙大時則無此種性質。因此在細粒土和粗粒土的性質之間就有巨大的差別。這也說明了為什麼

① 即由於力學破壞和化學破壞同時發生而生成的土——譯者注。

細砂和粘土的性質很相似，不过，由于砂顆粒的剛性較粘土顆粒大，某些性質上的差別仍然存在。

这样，土的性質在質的方面的差別就歸結到數的關係上，即歸結到可以用數字表示的關係上，並且，現在可以認為，我們在關於土的知識方面，正在從以前那種描述的科學的狀態過渡到精確的科學的水平。

第二节 土中的应力

任何土在力學上都应当作為各種粗細的固體的集結體 (агломерат)，這些固體在自重和作用在土上的外力（例如建築物的重量、水壓力等）的影響下互相擠壓着。這些力從土的某些顆粒通過接觸點而傳到另一些顆粒上，沿着複雜而混亂的途徑傳布，這些途徑構成此種土的所謂結構網。

此時，需要對土力學中所運用的關於土中應力的概念稍加研究，因為它不像工程力學的其他部分所研究的連續物體中那樣清楚。

為了更加明晰地確定土中應力的概念，我們用任意一個平面 S 將整個的土骨架 (скелет) 體假想地切成兩部分—— I 和 II ，並

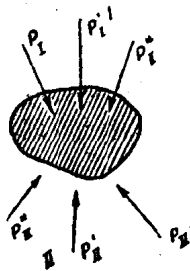


圖 1

在此平面上分出一塊任意形狀的面积 (圖 1)。

研究位於此平面兩邊的 I 和 II 部分中的並與此平面相毗連的骨架顆粒之間的壓力時，我們可用 P_I 、 P'_I 、 P''_I 代表從第 I 部分的顆粒上傳到第 II 部分顆粒中來的力系，用 P_{II} 、 P'_{II} 、 P''_{II} 表示作用在第 I 部分顆粒上的第 II 部分的相應的反作用力。按照“作用力等於反作用力”的定律，這些力與第一種力相等而方向相反，並作

用於相應顆粒的接觸點上。通過面积 $d\omega$ 的上述兩組力系有其各自不同的數值和方向。但是我們可以證明， P_I 力系的幾何和（合力）與 P_{II} 力系的幾何和相等而方向相反，即

$$\sum P_I = \sum P_{II}。$$

由於既不知顆粒的精確分布情況，又不知力的數量及其方向的規律，在我們的一切計算中，我們用想像的連續分布在面積 $d\omega$ 上的力系來代替這些真正的各別的力，這些連續分布的力在 $d\omega$ 的單位面積上的數量稱為土骨架中的 P 系應力。

為了使連續分布在面素 (элементарная площадка) $d\omega$ 上的力系能夠代替通過 $d\omega$ 上的各別力的力系，則必須使其合力的數值和方向與各別力的力系的合力相同。這樣，如果在任意點中所取的面积 $d\omega$ 上有 P_n 力系作用，其合力等於 $\sum P_n$ ，則根據上述原理，該點中的 P 系應力等於：

$$p = \frac{\sum P_n}{d\omega}.$$

在本截面 S 的範圍中的一點上選擇不同形狀的面积 $d\omega$ 時，從這種 $p = \frac{\sum P_n}{d\omega}$ 的定義可以得出各種彼此不同的 p 值。在彈性力學中證明(參閱 Ф. С. 雅辛斯基教授“彈性力學”第五章第九節)，一般對於比較均勻的和細顆粒的物體，在同一平面中不同形狀的面积上用這種方法確定的應力之間的差，等於應力值的 $\frac{1}{m}$ ，並且：

$$m \leq \sqrt{\frac{L}{\tau}},$$

式中 L ——與該物體的綫尺度是同階的長度；

τ ——與某種體素 (элемент тела) 的尺度是同階的微量長度，該種體素在分成小塊時還能保持一切代表該物體特征的物理性質。

現在我們更詳細地來說明這個問題。從幾何學的观点來看，物體可以無窮地分割，但是在物理學中，物體的可分性却有限度，例如，將花崗石連續分割，最後，我們將得到這樣的小塊，它已經不再是花崗石，而是雲母、正長石或石英(花崗石的組成部分)。如果我們將粘土塊分成小塊，則最後得到無論在形狀或物理性質和化學成分方面都不同的砂顆粒和膠體顆粒；甚至將鋼分成小塊時，也得出不同性質和不同含碳量的顆粒。當然，精確地測量 τ 值是不可能的；只能確定該值的階。

因此, $\frac{1}{m} = \sqrt{\frac{\tau}{L}}$ 是确定应力时的誤差的相对(但决不是絕對的)度量, 或表示确定应力时取决于物体的均匀程度和顆粒細度的相对精度, 其值决定于总尺度 L 和組成該物体的小塊的尺度 τ 。在表 1 中, 我們列举了許多边長为 L 的立方体的相对数字。

表 1

物 体 名 称	L (公分)	τ (公分)	$\frac{1}{m} = \sqrt{\frac{\tau}{L}}$
絕對均匀的物体(水)	L	0	0
花崗石立方体	20	2	1/3.16
同上	200	2	1/10
花崗石立方体, 大小为 180 立方公里(地壳的均匀程度)	18×10^6	2	1/3000
粘土壤	1	0.0001	1/100
鋼	1	0.0001	1/100

这样, 理論上的結論仅能运用到均匀的和細顆粒的物体中去, 在这种物体中, $\frac{1}{m}$ 值与 1 比較起来可以忽略不計。

为了研究土体内任何一定地点的骨架中的应力, 假想地分出立方形的体素 $abcd$ (圖 2A), 与土体的总尺度比較起来, 其尺度相

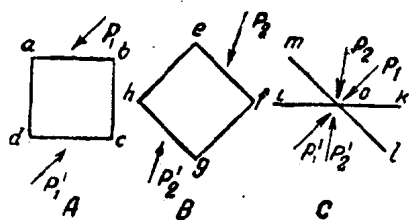


圖 2

当小, 可以把它当作無限小。

同时, 与土骨架的單个顆粒比較起来, 这个立方体應該相当大, 以便可以根据上表对它运用应力理論。例如, 對於粘土, 可以認為这种立方体的边長是

1 公分或 1 公厘。此时, 研究

立方体的 ab 边, 可以得出某个一定的应力 p_1 , 一般來說, p_1 傾斜于立方体的表面。在立方体的下边 cd 上有应力 p_1' 作用, p_1' 与 p_1 相差無限小(由於立方体的尺度無限小), 但方向正好相反。將立方体和应力的圖形移到小比例尺的圖上, 我們用 O 点表示立方体(圖 2C), 并引直線 ik 平行于 ab 和 cd , 这条直線代表力的作用面