

地下水动力学

П. П. 克利門托夫 著

地质出版社

地下水动力学

(动力水文地质学)

П. П. 克利門托夫 著

地质出版社

1958·北京

ДИНАМИКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД
(ДИНАМИЧЕСКАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ)

ПРОФ. П. П. КЛИМЕНТОВ

本書系П. П.克利門托夫教授在我國長春地質勘探學院為研究生講授“地下水動力學”而編寫的講義。其內容極其豐富，可稱為目前地下水動力學方面的較好作品。

本書由劉英林、張志誠、李耀光、陳恩齊翻譯，由寧有義和王秉忱校訂。

本書適用於地質院校的師生，也可供從事水文地質和工程地質專業的工程技術人員參考。

地下水动力学

著者 П. П. 克利門托夫
譯者 劉英林、張志誠等
出版者 地質出版社

北京宣武門外永光寺西街3号

北京市書刊出版業營業許可證出字第050号

發行者 新華書店
印刷者 天津市第一印刷厂

印数(京)1—3,200册 1953年7月北京第1版
开本31"×34" 1/25 1958年7月第1次印刷
字数465,000 印張 20¹⁸/₂₅ 插頁2
定价(10)2.60元

目 錄

著者序

緒論 地下水动力学的發展簡史及其任务	9
第一章 地下水在岩層內的运动形式及滲透基本定律	15
§ 1. 在非飽和粒狀岩層中水的运动形式	15
§ 2. 地下水运动的基本定律	20
第二章 研究滲透的實驗室方法及野外方法	33
§ 1. 測定滲透系数的實驗室方法	33
1. 根据粒度成分和孔隙度計算滲透系数	34
2. 用仪器測定滲透系数	47
§ 2. 透水系数的概念	58
§ 3. 包气帶中非飽水岩石的滲透	61
§ 4. 地下水运动的实际流速	72
第三章 自流水和潛水主要类型的形成与埋藏条件簡述	83
第四章 均質岩層中地下水的穩定运动	103
§ 1. 滲透基本定律应用于均質岩層中地下水运动方面的某些一般問題	103
§ 2. 沿流向流量固定和含水層厚度不变时, 地下水在均質含水層中的运动	108
§ 3. 潛水在隔水底層为水平的岩層中的非均匀流	110
§ 4. 地下水在厚度变化之岩層中的非均匀流	112
1. 計算傾斜隔水底層的裘布依近似方程式	112
2. 正坡时潛水非均匀流的巴甫洛夫斯基方程式	116
3. 逆坡时潛水非均匀流的巴甫洛夫斯基方程式	121
4. 隔水層傾斜时潛水非均匀流的張忠胤公式	123
§ 5. 过渡为无压流的隔水底層为水平时的承压水流	129
§ 6. 当隔水層底面坡度变化时, 潛水在均質成分岩層中的运动	131

§ 7. 均匀渗入时潛水在河間地塊的运动。潛水分水嶺的位置	132
1. 考慮渗入时潛水在隔水底層为水平的河間地塊內的运动	132
2. 考慮渗入时潛水在隔水底層为傾斜的河間地塊中的运动	137
§ 8. 放射流方程式	146
§ 9. 研究潛水在滲流槽中运动的試驗工作	148
§10. 地下水运动理論的簡單結論	152
第五章 非均質岩層中地下水的穩定运动	154
§ 1. 非均質含水層的基本类型	154
§ 2. 非均質岩層中滲透的規律	156
§ 3. 成層岩層的平均滲透系数	157
§ 4. 非均質岩層中地下水运动的基本方程式	162
§ 5. 岩石導水性沿水平方向急剧变化的情况下, 地下水在岩層中 运动的基本方程式	165
§ 6. 導水性沿水平方向漸变时, 承压地下水在厚度不变的水平岩 層中运动的基本方程式	166
第六章 潛水非穩定(随時間变化)运动	169
§ 1. 潛水变量运动的卡明斯基有限差数方程式	170
§ 2. 潛水变量运动的吉林斯基有限差数方程式	178
§ 3. 潛水变量运动的基本微分方程式	182
§ 4. 干旱时期泉湧水量的方程式	184
§ 5. 沿岸地带潛水位的变化	186
第七章 潛水的迴水	189
§ 1. 潛水迴水現象总述	189
§ 2. 穩定流条件下潛水迴水的測定	192
1. 水平隔水底層	192
2. 傾斜隔水底層	195
§ 3. 考慮渗入的河間地塊潛水迴水計算	201
§ 4. 非均質岩層中固定迴水的計算	205
§ 5. 非平面潛流固定迴水的近似計算	207
§ 6. 潛水迴水随時間的發展	208

第八章 水工建筑物下潜水的运动和水庫的滲漏	218
§ 1. 水工建筑区內的滲透現象	218
§ 2. 水工建筑物下滲透的某些流体力学原理	220
1. 地下水运动的水动力网	223
2. 等角制圖法	226
§ 3. 巴甫洛夫斯基的电比拟法 (爱格达法)	235
§ 4. 滲流对岩石的作用	238
§ 5. 平面护坦坝下滲流量	244
1. 根据巴甫洛夫斯基公式测定滲流量	244
2. 根据卡明斯基近似公式求滲流量	245
§ 6. 坝基非均質岩層中的滲流量	246
§ 7. 水工建筑物的繞流滲失	253
§ 8. 水庫的滲失	259
§ 9. 經過土坝的滲透	268
§ 10. 渠道的滲透	273
第九章 地下水向引水建筑的运动	277
§ 1. 引水建筑物的类型	277
§ 2. 在穩定运动和非穩定运动条件下地下水向引水建筑的流动	279
§ 3. 潛水向水平引水建筑的运动	281
§ 4. 地下水向潛水井和自流井的运动	288
1. 地下水向自流井运动方程式	289
2. 地下水向潛水井运动方程式	296
3. 地下水向潛水井和自流井运动的克利門托夫方程式	307
4. 地下水向潛水自流井运动方程式	317
5. 含水層狀構造地下水向潛水井和自流井运动方程式	319
6. 井直徑对其湧水量的影响	324
§ 5. 影响半徑之測定	326
§ 6. 裂隙岩層中地下水的运动	332
§ 7. 井湧水量与水位降低的关系曲綫	338
§ 8. 吸收孔	346
§ 9. 用抽水、注水和压水方法測定滲透系数	354

1. 根据在均質岩層中抽水資料測定滲透系数	354
2. 根据非均質岩層抽水資料測定滲透系数	386
3. 根据湧水量和水位降低不穩定时, 不完整潛水井抽水資料測定滲透系数	389
4. 根据注水試驗資料測定滲透系数	392
5. 根据压水試驗結果測定滲透系数	401
6. 根据井中水位恢复速度測定滲透系数	401
§10. 干預鑽孔計算	402
1. 按一定方式分布的自流干預孔	402
2. 沿地段邊緣排列的干預自流井和潛水井	406
3. 布置在河流附近的干預潛水孔	416
4. 阿里托夫斯基削減近似水力法	421
第十章 非均質成分地下水的分布和运动簡述	426
§ 1. 不同化学成分液体的水动力干預作用条件	426
§ 2. 費拉托夫关于地下水化学成分形成的重力假說	429
§ 3. 地下水的密度, 粘度和飽气度对其运动速度的影响	439
§ 4. 液体的引用压力	445
第十一章 礦山坑道湧水量預測問題	453
§ 1. 湧水量計算的水文地質原理	453
§ 2. 根据水文地質类似法測定湧水量	456
1. 排水的实际資料是根据水文地質类似法測定礦山坑道湧水量的基礎	456
2. 根据生產坑道單位湧水量測定可能的湧水量	457
§ 3. 根据含水系数測定湧水量	461
§ 4. 根据水均衡測定湧水量	462
§ 5. 根据地下水运动力学公式測定湧水量	469
1. 井筒湧水量的計算公式	469
2. 井筒湧水量計算实例	470
§ 6. 礦山坑道湧水量計算	471
1. 根据“大井”法測定湧水量	472
2. 設計的采礦企業含水系数之近似測定	473
3. 根据电比拟 (ЭГДА) 法測定湧水量	476

4. 根据水动力分析测定湧水量(当三个岩層相互影响时)	481
附錄 I	485
附錄 II	490
附錄 III	493
参考文献	509

著 者 序

本書系于1956年為中華人民共和國長春地質勘探學院水文地質及工程地質系的研究生、進修教師和教師講授“地下水動力學”課程的講稿。

講稿內容符合莫斯科奧爾忠尼啓則地質勘探學院編制的，并于1955年經蘇聯高等教育部批准的本課程的教學大綱。

但是鑒于研究生和進修教師在不久的將來，即將在中華人民共和國地質勘探院校中獨立開課、領導實習課和實驗課，所以本講稿的分量增加很多。

補充教學大綱又講授了礦山坑道湧水量的幾個理論問題（第十一章）和地下水化學成分形成的重力說（第十章）。應當補充說明，關於第十一章“礦山坑道湧水量預測問題”，根據礦床的地質勘探和水文地質調查資料，解決這些問題具有極其重大的實際意義，所以，這一章無疑應該補充加入教學大綱中。

也必須強調指出，講稿的內容是符合高等學校水文地質專業要求的。

本書不僅系統地闡述了地下水運動規律學說，也討論了岩石的滲透特性（第二章）；第一次說明了主要類型自流水和潛水的埋藏和形成條件（第三章）；簡述了非均質地下水的分布和運動（第十章）；並研究了某些其他理論，另外也討論了根據注水和壓水資料測定滲透系數的方法（第九章），這些問題一般在“地下水普查與勘探”課程中討論。

可見，本書內容已超出“地下水動力學原理”或“地下水動力學”課程名稱的範圍。作者認為，本書內容更較比符合新的名稱——“動力水文地質學”。

П. П. 克利門托夫

于中華人民共和國長春地質勘探學院，1956年2月14日

緒 論

地下水动力学的發展簡史及其任务

地下水动力学(动力水文地质学)是关于水在多孔岩石和裂隙岩石内运动的学說。無論是在天然因素的影响下,或在人为因素影响下,例如降低水位,地下水在自然条件下皆可產生运动。

多孔介質(砂)中滲透現象的研究,是由法國水力学家达尔西开始的,1852年他首次在裝滿砂子的圓筒仪器內進行試驗。这些試驗,确定出了多孔介質中滲透的基本定律,后来,許多其他研究家也作过类似的試驗。

关于地下水运动学說的理論基礎,主要是苏联学者創立的,如 H. E. 茹科夫斯基、H. H. 巴甫洛夫斯基、Л. С. 列依別俊、П. Я. 鮑魯巴丽諾娃——科芹娜等。

茹科夫斯基对潛水运动的初期研究(理論研究和實驗室研究)是在1888年。

1922年巴甫洛夫斯基院士創立了水工建筑物下潛水运动的精确的流体力学理論。巴甫洛夫斯基在世界科学上第一次提出利用雷諾参数作为直綫滲透定律(达尔西定律)准則。电比拟法(ЭГДА法)的制定,也归功于巴甫洛夫斯基院士。这一方法目前在科学研究机关和設計机关都广泛应用。

很久之后,茹科夫斯基醉心于巴甫洛夫斯基的工作,而又开始从事滲透的理論研究。B. H. 謝尔卡契夫和B. B. 拉普克指出:茹科夫斯基这一研究的开端,符合于苏联地下水力学發展的第一階段。

在研究滲透理論时,茹科夫斯基作出了一个滲透理論的新結論,这一結論比布西涅斯克和弗尔赫格依麥尔的結論更新穎和全面。此外,他还研究了多孔介質中毛細管上升的問題,并解决了在天然地下

水流条件下流向鑽孔和集水廊道水流的一些新問題。

茹科夫斯基善于把自己的理論研究及实际活动結合起來。譬如，在十九世紀八十年代，茹科夫斯基被吸收参加莫斯科市供水委员会工作。这一委员会的建立，是因为梅契申水源地的地下水資源已經不能滿足莫斯科的需要，根据茹科夫斯基的建議，委员会得出不应繼續擴建梅契申水源地的結論，因此，通过了必需建設魯布列夫抽水站的決議。

列依別俊院士的理論研究和實驗室研究是在巴庫市進行的。从1921年起，列依別俊院士就成为从事与开采石油和天然气有关的地下水力学問題研究的苏联学派的創始人。他首先導出天然气和气化液体在多孔介質中运动的微分方程式，确定出天然气鑽孔工作的特点，制定了岩層内石油和天然气的儲量計算方法，闡明了地下水排挤石油和天然气的現象等。1934年列依別俊院士曾發表一篇重要的專論——水、石油和天然气的地下水力学。

科学院通訊院士鮑魯巴丽諾娃-科芹娜于1942—1945年間曾解决了一系列复雜問題，也包括地下石油水力学方面的問題。1952年，魯巴丽諾娃-科芹娜發表了“潛水运动理論”（可作为基本教材）。

茹科夫斯基、巴洛洛夫斯基和列依別俊的思想，在許多著作中得到了進一步的發展，如Е. А. 查馬林、В. В. 維捷尔尼柯夫、С. А. 赫利斯契安諾維奇、В. И. 阿拉文、А. А. 科拉斯諾波里斯基、Г. Н. 卡明斯基、Н. К. 吉林斯基、В. С. 柯茲洛夫、Ф. Б. 涅里遜——斯科尔尼亞柯夫、С. Н. 努麥洛夫、С. К. 阿布拉莫夫、М. Е. 阿利托夫斯基、謝尔卡契夫、В. Б. 拉普克和其他研究家們的著作。

除了上述电比拟法之外，查馬林院士于1931年曾提出另一种研究滲透的寶貴方法。这一方法是測定在垂直裂隙滲透槽中的滲透，在这种槽內，毛細管裂隙代替岩層，液体沿槽內裂隙运动。

1912年科拉斯諾波里斯基導出一些关于水在裂隙岩層內滲透的公式。在这些公式中水头损失与水流坡度的 $1/2$ 次方成正比。还应当指出，在Г. М. 罗米捷的著作中，广泛地研究了裂隙岩層中的滲透（1951年）。

因此，由于苏联学者——水动力学家、水力学家、水文地质学家们的集体工作的结果，就建立了地下水运动学说的原理。

卡明斯基通讯院士在研究水文地质学的地下水运动方面，亦有很大的功绩，他研究了潜水在成分为非均质岩层中的运动规律，而且建立了潜水在时间上为非稳定运动的理论。卡明斯基是“地下水动力学原理”一书的作者。本书系为地质勘探学院水文地质和工程地质专业而写。卡明斯基的著作，使地下水动力学的理论有可能与地质和水文地质天然条件相接近，可能精确地解决测定坑道涌水量方面的某些实际问题。

A. Ф. 列别捷夫创立了水在包气带岩层内的运动理论；这一理论发表在“土壤水和潜水”的一篇论文内（1936年）。在列别捷夫的理论创立之前，就曾作过很多的实验室研究。

苏联五年计划时间的大规模建设，促使了苏联学者所创立的地下水运动理论飞速发展起来。最近几十年来在茹科夫斯基、巴甫洛夫斯基和其他学者的理论基础之上，苏联科学家们在整个水文地质领域中，特别是在地下水动力学方面，迅速地提高科学知识水平。

为了供水和降低水位，很多巨大工程项目都进行了大规模的水文地质调查。对流向垂直和水平引水建筑（单一的或相互影响的）的地下水运动作过理论研究的曾有吉林斯基、谢尔卡契夫、卡明斯基、阿利托夫斯基、库萨金、阿布拉莫夫等。A. H. 柯斯嘉科夫、和P. P. 丘卡耶夫在水平引水建筑的计算工作方面享有很大的声望。

巴甫洛夫斯基关于水库中水渗透的理论，在查马林、卡明斯基、B. Л. 涅德利格、涅里遜-斯科尔尼亚柯夫、H. H. 宾德曼以及吉林斯基等人的著作中获得了进一步的发展。

A. K. 鲍尔德列夫、查马林、卡明斯基、H. C. 涅斯捷洛夫、宾德曼制定了包气带岩层透水性的测定方法。

近年来，地下水动力学的某些原理，在预测矿区坑道涌水量方面广泛开始应用。有关坑道涌水量计算的一些问题，在M. B. 塞洛瓦特克的“坑道中地下水涌水量的计算方法”一书中（1950年），和在П. П. 克利门托夫、卡明斯基、欧维奇尼柯夫的“矿床水文地质学”教本中

(1953年)可以找到。

地下水动力学某些原理的应用例题,在以下几种教本中有所研究:(1)克利門托夫著的“地下水动力学習題集”(1951年);(2)И. В. 加尔曼諾夫和列別捷夫合著的“地下水动力学習題”(1952年)和(3)施克巴拉諾維奇著的“水文地質計算”(1954年)。

須特別強調指出,苏联学者們的許多理論研究,是和实验室的試驗相配合進行的,有时亦在自然环境下進行理論研究。自然环境下的理論研究,具有重大意义,因为这样可以將某些理論上的結論在不同自然条件下加以驗證。

在地下水动力学方面,中國学者所寫的近代科学著作,据我們所知僅有二篇:(1)“隔水層傾斜时計算潛水均匀运动的新方法”(張忠胤著1956年)及(2)“土坝上垂直排水設備的滲漏計算”(陈繼生著1955年)。

至于外國学者們的貢獻,首先應該提出的,是以达尔西定律为基础的法國水力学家Ж. 裘布依所進行的滲透理論研究。裘布依在1857年所从事的研究,導出了对于揭露潛水和自流水的垂直引水建筑計算公式。

1897-1898年,出版了Г. 斯利赫捷尔的“潛水理論研究”一書,布西涅斯克發表了“地下水运动理論研究”一書(1904年)。1953年弗尔赫格依麥尔所寫的一篇題为“水力学”的學術論文譯成俄文出版;1949年馬斯克特的“均質液体在多孔介質中的流动”一書亦譯成俄文出版。此外,尚有外國学者發表的許多著作。

做为水文地質學一部分的地下水动力学,不僅与一系列地質学科——岩石学、地貌学、構造地質等等有密切关系,而且也同水力学、水动力学以及水文学密切相关。

大家知道,水力学是关于液体的平衡和运动条件及規律,并用这些定律解决实际問題的科學。地下水动力学就应用了力学中的定律和其中的某些方法。

水动力学是流体力学的一部分,它是关于液体在外力作用下运动的科學,是关于液体和与其接触的物体在相对运动时所產生的机械作用的科學。水动力学的定律在地下水动力学中应用很广。

陸地水文学——关于陸地上地表水的科学，它研究水池和水流，即研究海洋、湖泊、河流、沼澤以至潛水。在“**水文地質概論**”〔54〕中已指出了地表水和地下水具有一种水力学联系，当时也曾強調指出地下水(主要是潛水)是補給許多河流的經常水源；某些河流中的水，特別是在干旱地区，补充潛水資源。因此，在地表水及地下水之間存在着密切的水力学联系。

地下水动力学对于解决水文地質方面的实际問題，具有極其重要意义。水工建筑时，測定水庫滲失量所具有的特殊重大意义，即以足說明这一点。此外，水工建筑的結構及大小，通常决定于水的渗透条件和渗透的多寡。当水在坝基、閘門、洩水建筑及其他建筑下部渗透时，地下水流不僅对建筑物施加压力，并冲刷建筑物基底的土壤。渗透水流的这种作用經常造成一些嚴重事故。实际証明，大多数建筑之所以损坏，正是由于渗透水流的这种破坏作用所致。

如果在潛水面以下施工，有时甚至在承压含水層頂板以下施工，那么就應該將这时所挖掘的建筑基坑完全疏干。为此目的，通常开鑿某种型式的排水設備（例如降低水位的干扰鑽孔組）。在人工降低水位的主要問題中，应指出确定排水設備数目的必要性，因为安裝这些設備要能保証地下水降低到預計的水位。

为供水目的利用潛水或自流水时，通常要通鑿鑽孔、井、水平廊道以及其他引水建筑，它們的湧水量是根据地下水动力学的某些公式計算的。这时研究地下水动态問題就更加重要，而有时还需要收集有关布置取水建筑地区的水均衡資料。

在沼澤化地段或潛水位埋藏不深的地区設計疏干系統时，進行渗透計算具有重要意义。

農田疏干的設計与測定干渠及其他溝渠滲失量，密切相关。

礦床的开采，經常与排水有关，因此当進行礦床的水文地質勘察时就应預測坑道的湧水量及其动态。

最后須強調指出，在解决大量实际問題时地下水动力学应用極為广泛。不言而喻，虽然前述一些实例是几个典型，但实际問題还远非于此。

与其他許多科学一样，苏联学者用劳动所創建起來的地下水动力学，也只是在偉大的十月社会主义革命以后才开始飛躍發展，因为社会主义的計劃經營方式，須要对地下水加以全面的和深入的研究。

大規模地發展水工、工業、采礦、民用建筑及其他各种建筑事業不僅会促進許多科学進一步發展，其中也包括水文地質——“地下水动力学”（动力水文地質学），又可以为檢查用理論所求出的公式，提供丰富的資料。

全体苏联学者，在研究滲透理論方面，完成了重大的科学研究工作。今天他們的理論在世界科学上已居首要地位。

第一章

地下水在岩層內的运动形式及滲透基本定律

§ 1. 在非飽和粒狀岩層中水的运动形式

根据岩層飽水程度以及水的物理状态，水在包气帶內的运动，可有数种不同形式。水的运动是在某些因素的影响下進行的：蒸發、滲透、温度差、分子引力、表面張力以及其他等因素。

以包气帶最上部的岩層湿度变化最为剧烈。这种現象与降水的蒸發和滲透有关。当蒸發时包气帶的上部岩層極其干燥。因此，通常这时只有吸着水停留在里面，同时薄膜水自下而上运动，而在某些情況下（如果这一作用是發生在毛細管上升帶內）毛細管水亦自下而上运动。

当大气降水降落时，一部分滲透水“浸湿”已干燥的上層吸着水，薄膜水和毛細管水这时又恢复了正常；只有岩層“浸湿”后剩余下來的水才在重力的影响下滲透。

下面來研究一下上述的最后三种因素（温度差、分子引力和表面張力）。

汽态水呈水汽状态和空气一道存在缺水的岩層孔隙和裂隙內，包含在包气帶空气內的水汽，处于近飽和状态，周期性干燥的上部岩層例外。汽态水具有一种很大的流动性，从压力大的地方向压力小的地方移动。压力差决定于各种不同土壤層和岩層內的温度差，而温度差又使各种地段內岩層絕对湿度的改变。在这一作用下，較冷岩層內的湿度增加，而較热岩層內的湿度則下降。应当着重指出，在蒸汽張力差的影响下，包气帶岩層內的水汽既可以同空气一道移动（土壤層和壤下層的特点），又可以不依空气循环为轉移而运动，关于这一点前

已叙及。水汽从張力大的地方向張力小的地方移动的規律，是列別捷夫〔62〕經過實驗証明确定的。

汽态水由大气圈進入岩層。当水分蒸發时，汽态水亦能在土壤層中形成。当土壤和土壤內的空气冷却到零点和零点以下时，汽态水可以凝結。由于汽态水在某些地区蒸發和在其他地区凝結，对土壤和岩層內水分的重新分布，有很大影响。

在含有吸着水和薄膜水，而沒有重力水的岩層內，水分只是呈薄膜水形式移动着，从湿度較大的岩層移向湿度較小的岩層。在分子引力作用下，水的薄膜非常緩慢地移动。薄膜最大厚度的岩層湿度，列別捷夫称之为最大分子水容度。在沒有致密液体物質的非飽水岩層內，不存在有靜水压力。水在非飽水岩層內的运动性質，决定于岩層的湿度。如上所述，如果岩層的湿度小于最大分子水容度，从地面渗透的水就首先去“浸湿”干的或水分少的岩石顆粒；当从地表滲入的水量不大时，后者可能完全变成薄膜水，在处于完全为薄膜水浸潤状态的岩層內，重力水是在重力和表面張力的影响下進行运动。这两种力的同时作用，是水在非飽水岩層中滲入的特点。

水在岩層內的运动过程有以下兩種情况。

如果水以小股的不連續的零星細束或水滴向下滲入，不能飽和全部岩層，从而对空气在岩層空洞內的运动沒有重大影响的話，那么这时水只在重力影响下，沒有靜水压力的参与進行运动。水的这种运动形式叫做自由滲入。可以想到，大气降水就是以这一方式滲入岩層內的。

但是，假如水是在大面積上呈連續体向非飽水岩層滲入的話（这里不考慮岩層內含有空气的較小地段），那么水的这种运动形式，就是正常渗透。水庫和溝渠儲水后，或者在大塊土地放水灌溉，而使相当大的面積上完全被水的連續薄層所复盖，此时水向非飽水岩層滲入的情形即可做为正常滲入的例子。水的这种运动形式就会对上部岩層形成靜水压力。正常渗透时，在滲入水的下部水面上有毛細力作用，其作用方向与靜水压力的作用方向相同。

我們以下例說明在非飽水的顆粒狀岩層中的运动形式：