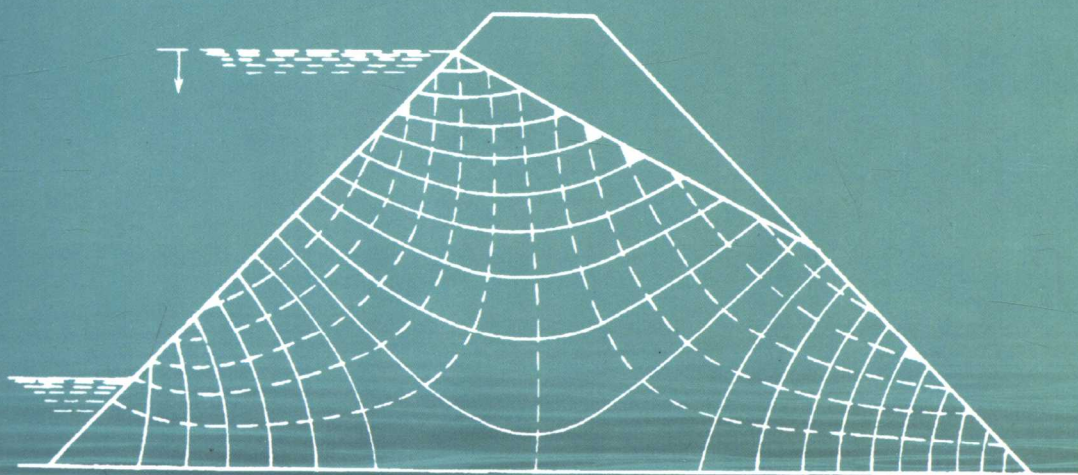


Progress in Seepage Research and
Application for Hydraulic Engineering

水工渗流研究 与应用进展

段祥宝 谢兴华 速宝玉 主编



黄河水利出版社

水工涵洞研究 与应用进展

张其成 王 强 王 磊 编



中国水利水电出版社

Progress in Seepage Research and Application for Hydraulic Engineering

水工渗流研究与应用进展

——第五届全国水利工程渗流学术研讨会论文集

段祥宝 谢兴华 速宝玉 主编

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

水工渗流研究与应用进展 / 段祥宝, 谢兴华, 速宝玉
主编. — 郑州: 黄河水利出版社, 2006.10
ISBN 7-80734-150-5

I. 水… II. ①段… ②谢… ③速… III. 水工建筑物
渗流-渗流控制-研究 IV. TV223.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 125195 号

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940

传真: 0371-66022620

E-mail: hhsicbs@126.com

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 880 mm × 1 230 mm 1 / 16

印张: 32.875

字数: 900 千字

印数: 1—2 000

版次: 2006 年 10 月第 1 版

印次: 2006 年 10 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-80734-150-5 / TV · 481

定价: 72.00 元

第五届全国水利工程渗流学术研讨会

主办单位：中国水利学会岩土力学专业委员会

中国水利学会工程管理专业委员会

承办单位：南京水利科学研究院

河海大学

水利部大坝安全管理中心

中国水利水电科学研究院

长江科学院

黄河水利科学研究院

江苏省水利厅

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室

水利部水科学与水工程重点试验室

第五届全国水利工程渗流学术研讨会

顾问委员会(排名不分先后)

名誉主任 薛禹群

副主任 周君亮 吴中如 李佩成 张蔚榛 毛昶熙 周保中 顾淦臣
酆能惠

委员 沙金焯 吴良骥 陶同康 李定方 刘 杰 许国安 李思慎
孔祥言 速宝玉 刘嘉炘 李君纯 吴世余 茹建辉 白永年
谢春红 陈士俊

学术委员会(排名不分先后)

主任 薛禹群

副主任 毛昶熙 严以新 陈生水 杨晓东 李思慎 吴良骥 刘嘉炘
刘 杰 速宝玉 陈士俊

委员 吴昌瑜 张家发 丁留谦 温彦锋 王恩志 段祥宝 丁家平
卢德唐 王士军 杨正华 汪自力 张俊霞 周志芳 詹美礼
朱岳明 陈建生 沈振中 王 媛 陈五一 张宗亮 张春生

组织委员会

主任 蔡跃波

副主任 谢晓华 赵 坚 李 云 李同春 蔡正银 李 雷 段祥宝
王士军

委员 谢兴华 程 璐 吴金山 盛金昌 何淑媛

序

渗流既是水力学又是岩土力学不可缺少的组成部分；也是水工结构、坝工建设、防洪排涝、水文地质、地下水文、农田水利、灌溉排水、地下水资源开发利用和石油开采、矿床疏干以及污染、环保等学科中的内容。因此可以说渗流是涉及到很多学科领域的边缘学科。由于各有关学科的不断发展和生产实践中提出的渗流问题日益广泛、复杂，使渗流逐渐发展成为具有自己的理论、方法和应用范围的综合性独立学科。作为流体力学或水力学的一个分枝来说，就是地下水动力学，地下水力学；渗流力学，渗流水力学；多孔介质中流体动力学，岩土水力学等。

对于水利水电工程中最广泛的水库、堤坝等的安全问题，渗流破坏更为突出，在国内外的土石坝失事原因实例调查中占 40% 左右。可见水工渗流学科急需发展的重要性。到 2004 年底，全国已经建成水库 8.5 万多座（不包括港、澳、台地区），总库容 5 542 亿立方米。建成堤防 27.7 万公里，保护 5.31 亿人口和 0.44 亿公顷耕地。大坝和堤防的防洪、灌溉、发电、供水、航运、旅游和改善生态等综合效益巨大，是我国社会经济的重要基础设施和全国防洪保安工程体系的重要组成部分。这些工程的安危与效益的兴衰，很大程度上依赖于水工渗流理论及其应用的效果。

学术讨论会是百家争鸣的最佳园地，是促进学术发展的动力和重要措施，也是发展创新、少走弯路、总结经验、培育新生力量的教练场。中国水利学会岩土力学和工程管理两专业委员会发起了全国渗流学术讨论会，先后于 1983 年在泰安、1986 年在大庸、1990 年在临潼、1993 年在南宁等地召开了四届讨论会，每届会议都有百余篇论文，交流和讨论了水工渗流的科研成果和实践经验，促进了学术发展，有助于提高我国水利水电工程科研、设计、施工、管理的技术水平。时隔 13 年，经过北京、南京、武汉、郑州、广州等全国各地关心渗流学术发展的单位和学者的协商，再召开今年的第五届水工渗流学术讨论会，得到了全国渗流界的支持，历时不到一年，收到论文百余篇，经筛选编辑成书正式出版供大家交流。

论文集的出版提供了渗流理论与应用的一批重要文献资料，将促进渗流同行的学术交流和渗流学科的发展，促进渗流理论和方法在工程中更广泛地应用，推动渗流力学向更宽领域更深层次发展。

作为长期从事渗流研究的工作者，受托匆忙草写此序，希望今后能定期召开渗流学术研讨会，促进我国渗流学科进一步发展，能及时赶超世界先进水平。

最后向致力于渗流研究与实践的专家学者们表示崇高的敬意，对论文集《水工渗流研究与应用进展》的出版表示衷心的祝贺，祝贺第五届全国水工渗流学术研讨会胜利召开！

毛昶熙

2006 年 10 月

前 言

渗流学科是一个覆盖面极广的领域,涉及水利水电工程、土木工程、铁路、公路、港口、防灾减灾、农田水利、石油、矿山、建筑、环境保护等众多行业。1998年长江特大洪水以来,国家加大水利投入,所开展的全国堤防建设和病险水库除险加固中大部分问题均与渗流有关,防渗加固技术也有长足进步,尤其是近年来西南水电建设如火如荼,渗控技术尤为关键。渗控技术解决了许多工程问题,也积累了丰硕的成果。

在此大好形势下,第五届全国水利工程渗流学术研讨会于2006年10月下旬在南京召开。本次会议就1998年以来渗流力学的科研成果进行交流,深入总结渗流学科在科研、设计、施工、管理等方面的进展,加强各单位的交流与沟通,对今后的研究方向提出建议和展望,促进国内水工渗流学科的进步与发展,更好地为水利工程建设服务。

本次会议共收到论文100多篇,内容涉及渗流基本理论与基本规律研究;渗透变形试验;渗流数值模拟计算,渗流控制措施及经验总结,堤坝隐患探测、安全监测、安全评价和安全管理技术,地下水资源、污染与生态环境,多场耦合、多相渗流及矿山、石油、交通、建筑等领域渗流问题。本论文集涵盖内容丰富,学术气氛浓厚,呈现出百家争鸣、百花齐放的好景象。

本次会议由中国水利学会岩土力学专业委员会和工程管理专业委员会联合主办,南京水利科学研究院、水利部大坝安全管理中心、河海大学、中国水利水电科学研究院、长江科学院、黄河水利科学研究院、江苏省水利厅、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室和水利部水科学与水工程重点实验室承办。我们对两专业委员会的支持和关心及各相关单位的鼎力支持表示诚挚的敬意和谢意。

本论文集承蒙黄河水利出版社出版,为保证出版质量,有关人员严格把关、认真校对、精心制作,尤其会议学术委员会专家为本次会议论文细心审稿,在此,谨对论文集编辑出版中付出辛勤劳动的人员表示衷心的感谢。

第五届全国水利工程渗流学术研讨会筹委会

2006年10月

目 录

一、渗流基本规律研究

渗流水力学中某些概念性问题的讨论	1
堤坝防渗体的内部渗透稳定性和外部渗透稳定性	7
滑坡计算中的渗流水力学问题	13
对堤坝工程渗流分析研究几个问题的建议	18
按太沙基理论和渗径比法控制的双层地基压重设计	25
致密泥岩中流体渗流规律研究	33
运用离散单元法研究土体管涌机理初探	37
承压含水层非稳定井流的滞流效应及其理论分析	43

二、渗透变形特性和控制

高水压力作用下垫层料和过渡料渗透变形试验研究	48
察汗乌苏混凝土面板坝垫层料试验研究	52
寺坪混凝土面板砂砾石坝填料渗透特性研究	56
黄河下游堤防土体非饱和渗透特性试验研究	62
岩体水力劈裂圆筒模型实验研究	66
尼山水库天然铺盖渗透变形试验研究分析	74

三、渗流中数值模拟计算

SUSAP 饱和—非饱和渗流分析软件的开发与应用	80
考虑空气阻力影响的降雨入渗过程分析研究	83
煤矿突水数值模拟	89
渗流随机有限元法在黄河大堤淤背宽度计算中的应用	95
无单元法在渗流计算中的应用	100
三维裂隙网络与多孔介质渗流的等效方法研究	106
堤后有深开挖的堤坝渗流及其稳定分析	111
郑东新区龙湖水系三维渗流计算分析研究	117
饱和和非饱和渗流作用下岩石高边坡降雨过程稳定性研究	122
北江大堤石角段 8+750~11+316 渗流场分析研究	129
考虑减压井井损的计算方法研究	134
兴隆水利枢纽深基坑开挖中的降水计算分析	141
库水作用下边坡稳定性两种分析方法的比较	147
降雨入渗对土坝渗流及其稳定性的研究	152
不同气候地区降雨条件下的渗流稳定状况分析	158
基于随机理论的渗透参数反演分析方法及应用	162
城区区域性渗流场水平面有限元简化分析方法	168
基坑降水中的地下水流数值模拟	174
基于裂隙岩体温度场分布的等效隙宽反演	180

四、渗流控制措施及经验总结

长江重要堤防的防渗工程	186
-------------------	-----

汛期堤防的防渗漏抢险技术研究	195
复杂坝基渗流控制方法和效果分析	203
土坝劈裂灌浆的抗渗作用	210
长江重要堤防隐蔽工程中的渗流控制工程研究	214
富水水库大坝减压井管涌原因分析	219
小水库土坝防渗加固技术	223
治理土坝渗流破坏的综合技术	226
溪洛渡围堰堰基防渗研究	230
浅析小湾水电站深厚复杂堰基防渗结构	236
蔡家沟水库病险成因分析	242
丹江口水利枢纽左岸土石坝测压管水位异常情况分析	248
王河地下水库高喷灌浆与沉模墙试验研究	254
人工深水湖湖底防渗技术研究	259
某水库溢洪道地基渗漏处理措施及效果分析	264
鄱阳湖圩堤渗流稳定分析	268
复合土工膜在水库防渗加固工程中的应用研究	272
老虎嘴水电站左岸渗流控制和渗流特性分析	275
汉江兴隆水利枢纽围堰渗流控制措施研究	281
刚柔结合防渗技术在水库除险加固工程中的应用	288
土工膜的选材试验和应用	295
大坝实时安全分析评价软件研制	300
土工模袋在唐岛湾综合治理工程中的应用	305

五、堤坝探测、监测、安全评价及安全管理

青海省英德尔水库溃坝现场调查分析	309
黄河大堤某堤段背河坑塘对防洪安全影响评价	313
利用 ICP 化学示踪法现场观测大坝渗漏	318
利用声发射技术预报堤防工程险情	324
东方红水库浆砌石重力坝渗流性态评价	329
基于修正证据理论的土石坝渗流警兆辨识研究	334
混凝土坝坝体与坝基互馈研究	339
山美水库大坝渗流安全分析评价	345
新疆吉林台一级水电站混凝土面板堆石坝渗漏成因分析	351
英那河水库大坝右坝段渗流异常研究	356
大石埠水库除险加固防渗效果评价	360
短港水库大坝安全分析	365
堤坝隐患探测在合群水库的应用分析	371
走马庄Ⅳ号坝渗流观测资料分析	374
密云水库潮河主坝渗流分析	380
某船闸底板渗漏地质雷达探测及防渗措施研究	386
已建水库工程地质勘察技术问题	391
基于 WEB 技术构架水库综合信息化管理系统	395
我国的水库大坝安全管理	399
密云水库第一溢洪道渗流及抗滑稳定分析	404
黄河下游大堤隐患的快速探测技术	409
自然电场法在水库大坝安全评价中的应用	413

嘶马弯道斜坡非均匀沙起动.....	418
碗窑水库碾压混凝土大坝坝基渗流性态正反分析.....	423

六、地下水资源、污染与生态环境

地下水污染问题的对流扩散方程 在运动质点坐标系上的数值解法.....	429
火力发电厂贮灰场灰水渗漏对环境的影响.....	435
氟在非饱和分层土壤中迁移规律的试验研究.....	440
水利工程中的渗流与生态.....	445
超采地下水对地质生态环境的影响分析.....	450
裂隙岩体地下水溶质运移规律的研究.....	455
新疆玛纳斯河流域地下水污染及其防治研究.....	462
沧州市深层地下水超采引起的生态环境问题及其治理.....	466
河道边坡侵蚀原理及其治理对策研究.....	471
RUSLE 在农业非点源污染量化中的应用分析.....	477
地下水库的建设与管理.....	482
洪水资源利用探讨.....	486

七、多场耦合及其他领域渗流问题

钻孔过程中的流固热耦合作用数值分析.....	491
非达西渗流模型模拟青藏铁路抛石路基冻土层温度.....	495
堆浸工艺中流动—反应—变形—传质耦合过程数值模拟.....	500
油藏注采系统有效性初探.....	504
渗透动水压力作用下的裂隙岩体渗流与应力耦合分析.....	511

渗流水力学中某些概念性问题的讨论

毛昶熙

(南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘 要: 水工渗流力学中有些常用的名词、术语、理论和定律, 应用于不同领域或历经演变, 会发生某些疏忽、误解。混淆现象, 甚至在工程计算问题中发生严重差错。为此, 本文对这些渗流学术语等的涵义概念性问题及其正确应用作一解释讨论, 特别是渗流作用力的问题及其应用评价。

关键词: 测压管水位 动水压力 渗透力 孔隙水压力 滑坡 管涌 规范

在渗流研究过程中所接触到的书籍、论文, 其中有些名词、术语、理论和定律, 由于译名、符号或学科上的习惯有所不同, 或者在理解和应用方面逐渐发展演变也就不尽一致了。所以容易被人混淆、误解, 一不注意, 引用到工程问题的计算中会发生严重差错。为此提出这些概念性问题讨论供参考。所附的图示取自文献[1]。

1 达西定律中的水头

$$v = \frac{Q}{A} = -k \frac{dh}{ds} = kJ, \quad h = \frac{p}{\gamma} + z \quad (1)$$

式中的水头 h 是指任取某水平基面以上的测管水面高度或测管水位, 称它为测压管水头容易与测点的压力水头 p/γ 相混。从能量方程考虑应称 h 为势能水头, 促使流动的水头是 h 而不是 $p/p/\gamma$, 如图 1 所示, $p_1/\gamma < p_2/\gamma$ 。

水头差 $h_1 - h_2$ 为流程 L 距离克服阻力所做的功, 可称为驱动水头。水力坡降 $J = (h_1 - h_2)/L$ 表示单位重流体沿程的能量损失率, 代表渗流阻力的大小, 可称为驱动力。 $\gamma(h_1 - h_2)$ 可称之为驱动压力或动水压力。

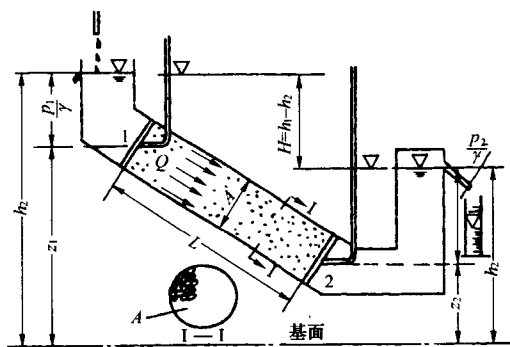


图 1 任意倾斜流动的水头示意

Darcy 定律的 $v-J$ 线性变化, 严格说, 只有砂类土在一定范围内适用, 强透水粗粒土和难透水粘性土都不适用。

有些问题的理论推导, 引用 Darcy 定律时, 若不注意上述要求, 其结果应用到实际就有一定的局限性。关于流-固耦合计算的问题也应注意边界条件的统一性。

2 静水压力与浮力

土粒在静水中受到浮力的累加总和与作为土体所受到的浮力是同等的, 都是等于上下表面的静水压力差, 转化为浮力就等于土体同体积的水重, 这一重要发现称为阿基米德原理。应用到土体稳定性计算方面, 静水

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2005007)

第一作者简介: 毛昶熙, 1918 年生, 男, 教授级高工, 从事渗流控制研究, Email: seep2006@163.com

压力或浮力能使土体或土粒的有效重量减轻, 削减了抵抗破坏的力, 因而可称为消极的破坏力。太沙基在土力学中称这种静水压力的荷重为中性压力(neutral pressure), 只是从孔隙水的传递不影响骨架土的接触结构情况, 不发生任何土体变形考虑的, 但却会令人误解为毫无力学作用的概念。

3 动水压力与渗透力

如图 1 所示, 沿流程任意两截面上的水头差 h_1-h_2 , 即驱动水头, (h_1-h_2) 即动水压力。此力作用到整个截面上或者作用到土粒表面上的两种考虑, 都可引证出它转化为单位土体的渗透力表达式, 即 $f_s=\gamma J$, 此式一般认为是太沙基导出的, 但苏联则称此式是普日列夫斯基导出的。在土力学中太沙基称此力为渗透压力(seepage pressure), 很容易被人误解为面积上的压力, 所以还是称它为渗透力或渗流力(seepage force)为好, 因为它代表着单位土体内部渗流的体积力(body force), 也有直译为体力的。

动水压力转化为渗透力与静水压力转化为浮力, 都是把外力转化为均匀分布的内力, 这两大发现, 在渗流水力学的发展史上可说是“跃进”, 因为把复杂的多个表面水压力转化为单纯的渗流体积力, 应用起来简单方便。决不是像文献[5]所指出的渗透力是虚构的, 引向复杂化, 与科学背道而驰等的说法。

渗透力的发现者尚有争论, 不过在水力学中早有水流冲刷河床的拖引力(tractive force)公式 $\tau=\gamma J D$, 在单位深度($D=1\text{ m}$)时, 拖引力就等于渗透力公式。这就说明引证渗透力公式时, 无论是水流作用在土体上或者是群体的颗粒上, 结果是等同的, 而且与土体孔隙率 n 没有关系, 当 $n=1$, 完全是水体时仍然适用。

由渗流作用力的两个分力: 静水压力和动水压力, 或其转化的浮力($-\gamma$)和渗透力(γJ), 一个是消极破坏力, 另一个是积极破坏力, 密切关系着岩土的稳定。从水土作用力平衡计算的数学式推导^[1], 可归纳绘如图 2 以单位土体表示的力的图示, 并得出结论: 土体浮重与其渗透力相加等于饱和重与其周边表面水压力相加。图 2 示代表单位土体总容重 γ_t 的 AB 线右侧力的 $\triangle ABF$ 与 $\triangle ACF$ 即说明: 土体周边水压力的合力 $-\nabla P$ 与饱和土体重 γ_t 相加等价于土体的渗透力 γJ 与土体浮重 γ' 相加。当水土作用力所产生的合力 $R=0$ 时, 则处于临界平衡状态, 当沿渗流方向的渗透力 γJ 大于土体或土粒的抗拒力时, 即发生渗透变形, 对于流土破坏或管涌冲刷研究具有重要意义, 也说明了渗透破坏问题中常以渗透坡降 J 作为衡量指标的理论根据。

图 2 所示左边代表土粒重 γ_s 和土体重 γ_t , 孔隙水重 $n\gamma$ 与干土重 γ_d 代表浮力的同体积的水重 γ 与土体浮重 γ' 等之间的关系。左边土重与右边水力对比, 当临界平衡状态时即得到 $\gamma J = \gamma'$, 或临界坡降

$$J = \frac{\gamma'}{\gamma} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) (1-n), \text{ 即太沙基的流土型破坏管涌临界坡降公式 } J=(s-1)(1-n)。$$

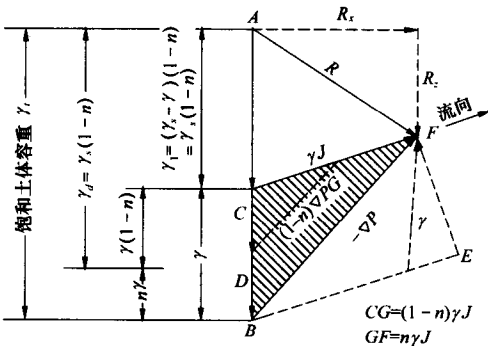


图 2 饱和和渗流单位土体的力的图示

4 垂直管涌与水平管涌

堤坝下游地面局部冒水涌砂现象, 属于垂直管涌现象, 太沙基的理论管涌临界坡降公式 $J=(s-1)(1-n) \approx 1$, 它只适用于管涌的发生, 而且是向上渗流的流土型破坏, 并不能判断是否危险, 因为会否向上游发展通连江河水库, 还决定于较长距离渗径的水平管涌临界坡降, 粉细砂地基的临界值 $J_c \approx 0.1$; 此临界值也适用于管涌土的砂砾石地基。在规范中推荐管涌临界或允许水力坡降时不加区别, 就容易被人引用时误解。

垂直向上渗流的管涌临界坡降, 决定于土的结构, 对于粘性土覆盖层或均匀的砂, 可用太沙基公式计算 $J_c \approx 1$ 。对于砂砾石地基, 则依赖于颗分曲线^[2], 其临界坡降可用公式 $J_c = \frac{7d_s}{d_f} [4p_f(1-n)]^2$ 计算, 填料粒径

$d_f = 1.3\sqrt{d_{85}d_{15}}$, p_f 为相应于 d_f 的填料重量百分数, 要在土料颗粒分曲线上查得; n 为土料孔隙率; d_5 查颗粒分曲线相当于游离性的细砂粒约 0.2mm。同时此式方括号中的值就是确定管涌土与非管涌土的判据, 即 $4p_f(1-n)$ 小于 1 为管涌土, 大于 1 为非管涌土, 即破坏形式为局部流土, 计算值 $J_c=0.6 \sim 0.9$ 附近, 管涌土的计算值 $J_c=0.1 \sim 0.6$ 。因此, 用此公式计算的结果, 即可以平均值 $J_c=0.75$ 作为分界判断是管涌土($J_c<0.75$)或非管涌土的流土型破坏($J_c>0.75$)。

垂直管涌, 砂沸也就是流砂, 它不是一种物质类型, 只是一种现象, 是渗透变形的一种极端形式, 也是一种液化形式。粉细砂容易液化, 均匀粗砾也可液化, 原理是渗透力 γJ 等于或超过土体浮重, 或者颗粒表面水流拖引力 $n\gamma J$ 等于或超过颗粒浮重。在实验室里, 很容易按此原理上升水流表演化现象, 包括拳击箱壁的振动液化。在土力学中则以有效应力、剪应力等于零视之。同样在动态下(振动)的液化, 也可从瞬时孔隙水压力剧增加以研究。如果沟通水力学与土力学, 将会促使渗透变形问题研究的发展, 只不过管涌是局部的, 液化是整体的。

5 滤层与反滤层

滤层(filter)原是给水工程中砂滤水的名词。太沙基早年修建一座砂基上的低坝, 由于下游渗流出口管涌而失事后, 开始滤层防止出口管涌的研究, 因为坝下游出渗由下向上, 正好与给水工程滤水方向相反, 故称它为反滤层(inverted filter), 提出了反滤层设计规格, 这是太沙基的一个大发现。随后用于土坝、排水等各种方向渗流出口的防护措施, 各国文献就自然不再用“反”字了。可是我国屡次修订规范仍不加改正, 虽然一字之差, 却让人糊涂。

滤层保护渗流出口防止管涌发生是最有效而简便的措施, 可提高安全性或其临界坡降至少 30~50%, 甚至加倍。

6 孔隙水压力与超孔隙水压力

孔隙水压力, 顾名思义, 应该是岩土孔隙中充水的压力, 不管它是无压渗流的静水压力, 还是封闭的承压水超静水压力; 也就是上面介绍的静水压力和动水压力两个渗流作用力。在渗流场计算中只需考虑一个势能水头 h 或其作用下的渗流压力, 也即孔隙水压力。但在土力学中又有超孔隙水压力(excess pore water pressure)区别于孔隙水压力, 脱开固结理论就很难广泛被人理解。所以太沙基在他的两本土力学中坚持用超静水压力(excess hydrostatic pressure), 它就相当于动水压力, 容易广泛沟通水力学的概念, 不易误解。

7 稳定性计算中水土作用力的易犯错误

渗流作用下的土体破坏, 管涌或滑坡, 在稳定性计算中若不对上面所述的概念理解区分, 就容易犯以下的计算错误:

7.1 孔隙水压力与渗透力的重复计算

这可能是由于强调孔隙水压力与强调渗透力的不同观点, 而缺少沟通的原因, 所以在有限单元计算中会发生滑动面上计算孔隙水压的同时, 又计算了滑动体内单元的渗透力, 此等两次重复考虑渗流作用力的差错, 岩体力学家(Louis, 1977)也曾指出过同样软基固结沉降计算中, 在外荷载包括边界水荷载的作用下, 也会发生重复考虑渗透力的差错。因此, 必须理解边界力转化为体积力的等价关系。

7.2 水土作用力不相匹配的差错

即忘记了上面论证的计算的重要法则: “用孔隙水压力时就必须与土的饱和重相平衡, 用渗透力时就必须与土体浮重相平衡”。因此在有限单元法计算覆盖土层厚度的稳定性时会发生土层浮重与土层单元底面的孔隙水压力相比计算安全系数的错误。容易发生此项差错的原因, 也可能长期受土石坝设计规范中规定“库水位以下的土体采用浮重”的词句有关。此项水土作用力的差错匹配, 严格说也就相当于重复两次计算了渗流作用力。

如图 3 所示, 坑底土层厚度 T 的所受单位渗透力 $\gamma J \left(= \gamma \frac{h}{T} \right)$ 等于土体浮容重 γ'_1 时, 即开始顶穿土层, 浮

动或管涌砂沸。若用底面水头压力 $\gamma(T+h)$, 则必须与其上土体饱和重 $(\gamma_1+\gamma)T$ 相平衡计算顶穿土层的可能性。

两种土重各与其相应水力的比值,在临界平衡时应该相同,但作为稳定性安全系数而计算此两种比值时是不同的。考虑渗流情况用渗透力计算的安全系数,在大于临界值1的情况偏大。究竟哪一种安全系数比较合理,要看问题性质是以渗透力或渗流坡降衡量土体破坏的,还是以孔隙水压力的。如果计算程序受到限制,像土坝设计规范中规定库水位以下用土体浮重,土条底面用孔隙水压力时,则必须用超静水压力,即如图3所示,

动水头 h 的压力 γh ,实际上也就是渗透力($\gamma \frac{h}{T} \cdot T$)。

由此超静压或动水压 γh (土体上下游面的水头差)与渗透力 $\gamma J T$ (沿程渗流拖引土粒前进或挤压土体的体积力)的等值转换关系,再一次提醒研究土体的渗透变形或压缩固结问题时,不要重复计算它们。此力在土力学应力应变计算中就可以作为渗透应力考虑,它的沿流向深度分布和对有效应力的影响,如图4所示,(a)为向上渗流,同图3(b)为向下渗流,渗透力(超静压)加大了沿程深度 z 的土体有效应力,因而对土体产生压密固结作用,而且随着渗流沿程深度成直线增加,到底部排水面压密最甚。同时也将形成沿程不均匀的渗透系数和坡降分布。若再考虑到压密固结过程的非稳定渗流,底部排水面渗出坡降最大,也将是最大压密处。

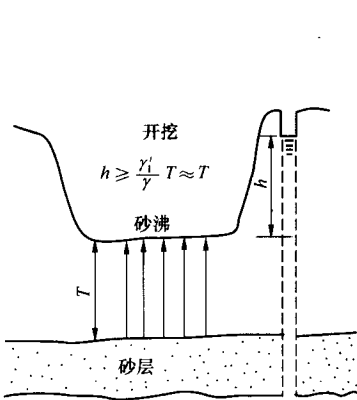


图3 压土厚度渗透破坏示意

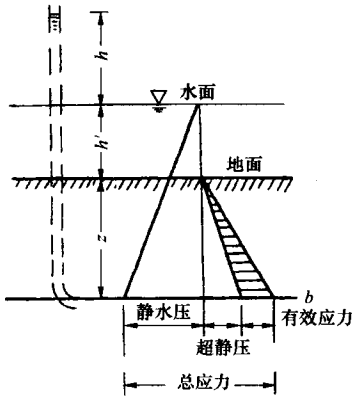
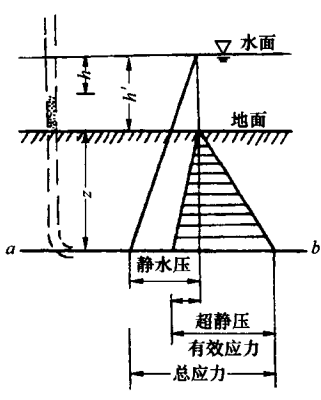


图4 地下水垂直流动时的地下应力分布



同样,对于水平向渗流,没有土体自重应力时,只有渗透力 $\gamma J x$ 沿流向挤压土体,由于沿流程逐段渗透力的累加,到渗流出口最大,若无滤层防护,即首先破坏,如图5所示细砂层中渗流形成的流砂现象。对于管涌土渗流,细粒也将不断被拖引前进拥挤到渗流出口。

应注意,此处 γh 转换为 $\gamma J z$ 或 $\gamma J x$ 的等值关系,只限于平行渗流一维问题,一般的渗流场就须考虑土体单元周边各水压力与渗透力的等值转换关系;由此比较,在应力应变和压缩固结计算中,用渗透力(应力)取代孔隙水压力可能是较简便精确的。

7.3 渗透力与孔隙水压力等价计算中的误解

在稳定性平衡计算中,例如滑坡问题,在力学上和数学上都论证过^[1, 3]:采用渗透力算法与采用孔隙水压力算法是等价的,但是并非渗透力等于孔隙水压力(静水压力),如图6所示,滑动土条极限平衡时力的多边形:土条周边水压力 W_1 、 W_2 、 U 之和等于渗透力 F_s 加上浮力($-G_w$);为方便计算,通常是把浮力改成土体浮重了。忽略了其中这项置换关系,容易把渗透力完全等同周边水压力作为外荷载去研究分析应力、位移等土力学问题,就会得出不同的结果。

7.4 流网与孔隙水压力的差别:渗流对滑坡的影响比地震力还大;正确计算渗流场引用流网,还没有足够重视,在长期应用的土坝设计规范中,分析上游水位骤降时的流网却是向下游渗流的,而且计算土条周边的孔隙水压力都是浸润线下的静水压力,如图6所示的假设流网及压力分布。但实际的压力分布远非静水压力,遇到土层分布复杂、有排水或软基夹层等,其流网将与静水压力分布有惊人的差别,稳定性安全系数的计算结果自然会显著差别,它会比选取土条间力的不同算法的差别更大。同时可知由流网计算土条或土单元的渗流坡降或渗透力(大小、方向、作用点)要比计算周边静水压力的合力既精确又省时间(Cedergren, 1989)。

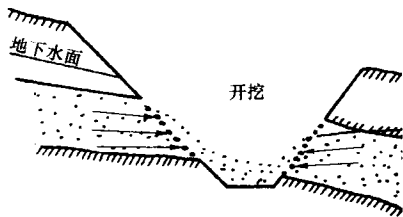


图5 流砂现象

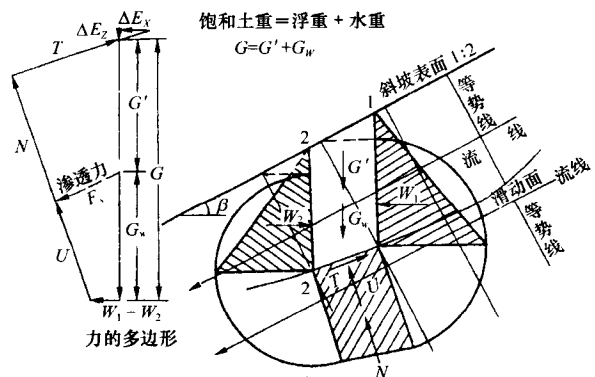


图6 土条周边水压力与渗透力的关系

8 规范中有关滑坡计算的渗流问题

水利部组编的规范、手册关于边坡稳定计算都极力强调孔隙水压力算法。与建设部、铁道部采用渗透力的习惯不同，而且对水土之间作用力的概念叙述不清，容易被人误解发生以上所述的几项差错。例如 85 年的土石坝设计规范，滑坡计算中规定饱和渗流区的两种不同取土重方法，上游水位骤降时的错误流网，土条周边假定的静水压力分布等都值得质疑讨论。此后的修订规范或新编边坡规范，又可能是在若干年来受学报号召岩土界反对渗透力算法的影响下，仍然抄袭旧规范沿用下来。甚至影响一些学报拒登渗透力算法观点的论文。如此学风，正严重影响着学术的正确发展。

9 滑坡计算有限元法的优点

无处讨论此学术问题，只好会议上再次提出采用渗透力的滑坡有限元法优于早年的采用孔隙水压力的垂直条分法。我们已有多篇论文，并归纳有 9 项互相对比的优缺点。欢迎针对这些比较各点提出批评讨论。这里不妨再从力学概念上讨论此问题如下：

在土坡极限平衡计算中，认为土体刚性静态时，土力(重力)是静力学问题；动力则是水力(渗流)，其中静水压力化为浮力，以土体浮重表之，也属静力学问题；只有动水压力化为渗透力是动力学问题了。根据静力学原理把滑动土体分离成若干土条或单元的自由体，各自由体之间的内力变成彼此相等的外力；当各自由体累加合成整体时，还原的土条单元之间内力互相抵消，可只考虑滑裂面上力的平衡。可是渗流的动力作用在各单元自由体再累加集合起来并不能互相抵消。土力学家曾对土条单元之间的侧压力作了各种不同的假定；例如瑞典圆弧法不计土条间压力，毕肖普法只考虑土条间水平压力，简布法假设推力线法，莫根斯坦假定函数关系的侧压力法，司喷色假定常数比值侧压力法等。但经过典型实例计算比较结果，其安全系数差别很小，最大差 7%，一般差 2%，这可能就是土条间内力基本上互相抵消的原因。同时如果考虑渗流不当，例如上述静、动水压力问题，在某些渗流严重情况下就会发生百分之几十的误差；也可能就是由于单元体集合起来没有互相抵消的功效。如果把边界水压力改为体积力的渗透力，自然就不存在这个边界力误差问题了。

再回顾数值计算有限元法的概念，它是把连续体结构离散化为有限个单元体的集合体，实质上是有限个自由度的体系代替了无限自由度的连续体，作了物理上的近似，与差分法描述连续体作了数学上的近似有别，概念上清楚，就是划分单元愈密就趋于真值，单元之间的静态内力可不加考虑。由此可知习惯采用的垂直土条单元，也只有在浅层滑动尚可适用。因此划分足够多的三角形单元采用渗透力算法，自然就是求精确必由之路。这样在滑动面上求极限平衡即得出下面圆弧滑动的安全系数公式

$$\eta = \frac{R[c'l + \Sigma(Z \cos \alpha' - X \sin \alpha') \tan \varphi']}{\Sigma[Zr \sin \alpha + X(2r \cos \alpha - R \cos \alpha')]} \quad (2)$$

式中：X、Z 为三角形单元的体积力(有效自重，渗透力及地震力)的水平分量和垂直分量；R 为滑弧半径；r 为计算单元重心的半径距； α 为其半径距与铅垂线所成的角度； α' 为单元正下方滑动面上交点的半径与铅垂线所成的角度。

渗流饱和区都取土体浮重，非饱和区取自然重，外水压力不计。由计算机程序 UNSST2 连续计算各时段

渗流场及其相应的抗滑安全系数甚是方便。但也有极力反对渗透力观点的,说单元渗透力 $\gamma\Delta$ 计算必须积分,很繁等,并且编入了土力学教材书中,这是不符合实际情况的,应作更正,免得影响读者的思维。

10 沟通水力学与土力学

水土之间沟通起来有助于土力学和渗流水力学的发展,上面已谈到一些名词概念上的异同,若从不同角度观察事物就能取得新的认识,开阔视线,启发研究比较,互相借鉴。例如我们初学土力学后结合渗流提出的:用非稳定渗流方程计算排水固结软基沉降的方法^[6];由洪峰在堤基土层传播迟后时间公式 $\Delta t = \sqrt{\frac{TS_s}{2\pi k}} \cdot x$ 直接应用测定各种土样贮水率参数 S_s 的试验建议^[7];在波浪作用下计算护坡内渗流场求得的块体大小稳定性计算公式^[8];海滩软基上筑堤坝的有限元法复合圆弧滑动计算公式^[9]等,供参考讨论。

最后引用土力学权威太沙基在一次鉴定会上的讲话结束此概念性讨论文,当时他还是地质学者,谦虚地说(Terzaghi, 1929):“坝基质量鉴定,不仅要对地质条件仔细研究,而且要精通渗流水力学,从水力学来分析地质条件的重要性。”这一段话就让我们不同研究领域的学者学习它的精神吧。

参考文献

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制, 中国水利水电出版社, 2003
- [2] 毛昶熙. 管涌与滤层的研究, 岩土力学, 2005(2)(5)
- [3] 毛昶熙, 陈平, 李祖貽, 等. 渗流作用下的坝坡稳定有限元法分析, 岩土工程学报, 1982(3)
- [4] 毛昶熙, 李吉庆, 段祥宝. 渗流作用下土坡圆弧滑动有限元计算, 岩土工程学报, 2001(6)讨论文 2002(3)
- [5] 沈珠江. 莫把虚构当真实. 岩土工程学报, 2003(6), 讨论文 2004(1)
- [6] 毛昶熙, 段祥宝, 等. 粘土铺盖的沉降裂缝计算方法, 岩土力学, 2004(1)
- [7] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 洪峰过程非稳定渗流管涌试验研究与理论分析, 水利学报, 2005(9)
- [8] 毛昶熙, 段祥宝, 毛佩郁. 海堤护坡块体的稳定性分析, 水利学报, 2000(8)
- [9] 毛昶熙, 段祥宝, 毛佩郁, 等. 海堤结构型式及抗滑稳定性计算分析, 水利学报, 1999(11), 海洋工程英文版 1998(3)