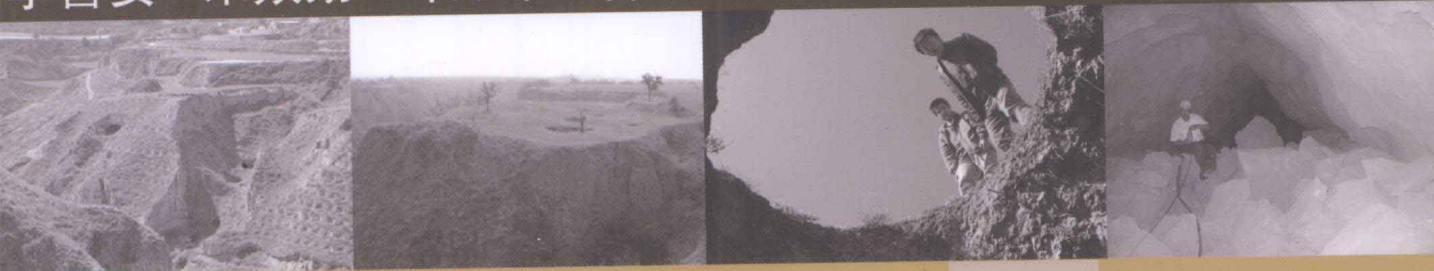


Engineering geological research on tunnel-erosion in loess

黄土洞穴潜蚀工程地质

李喜安 宋焱勋 叶万军 著



Engineering geological research on tunnel-erosion in loess

黄土洞穴潜蚀工程地质

李喜安 宋焱勋 叶万军 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

黄土潜蚀工程地质属于黄土工程地质与黄土潜蚀的边缘学科,本书是第一部将黄土工程地质与黄土潜蚀相结合的专著。

本书首先就目前国内外容易混淆的关于潜蚀及其相关概念进行了必要的辨析和澄清,建立了基本潜蚀作用的概念模型,并通过理论推导、物理模拟等手段对黄土潜蚀作用发生的临界条件及其破坏机理进行了探讨。分析总结了黄土洞穴潜蚀灾害的类型和致灾机理,并对黄土洞穴的成因机理、形成演化过程进行了深入研究。为了研究潜蚀作用与灾害性块体运动之间的关系,在本书的最后对黄土洞穴环境下黄土边坡的破坏类型及其稳定性进行了初步分析。

本书可供工程地质学、黄土力学、岩土工程学、水土保持等领域的科研技术人员及高等院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

黄土洞穴潜蚀工程地质/李喜安,宋焱勋,叶万军
著. —上海:同济大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-5608-4434-3

I. ①黄… II. ①李… ②宋… ③叶… III. ①黄土结构-窑洞-潜蚀作用-研究②黄土结构-窑洞-工程地质-研究 IV. ①P642.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第184394号

黄土洞穴潜蚀工程地质

李喜安 宋焱勋 叶万军 著

责任编辑 高晓辉 责任校对 杨江淮 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社

(www.tongjipress.com.cn 地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 苏州望电印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13

印 数 1—1 100

字 数 324 000

版 次 2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4434-3

定 价 39.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

“八百里秦川尘土飞扬，三千万秦人齐吼秦腔”，在黄土高原这片神奇的黄土地上，世代代憨厚朴实的黄土地人用他们的勤劳和智慧谱写了中华民族五千多年灿烂的文明。黄土高原，这个分布着世界上最典型、厚度最大、最为连续的黄土的神秘高原，已成为全世界黄土相关研究的热土。“九曲黄河万里沙，浪淘风簸自天涯”，奔腾不息的黄河，在哺育黄河两岸生灵的同时，也在永不停息地剥蚀、雕刻着这片土地，在一望无垠的黄土地上留下了无数纵横交错、蜿蜒曲折的沟壑，造就了世界上独一无二的黄土塬、黄土梁、黄土峁等典型的黄土地貌。

这片数百万年来沉积的黄土，为我们带来了沃野千里、谷稼殷积、水草丰美的农牧环境，为我们带来了数千年的黄土文明，也为我们带来了不计其数的黄土地质灾害。在这些地质灾害中，黄土潜蚀洞穴灾害因其隐蔽性和突发性的特点而显得最为独特，而这些在黄土高原广为分布的黄土洞穴潜蚀地貌，为黄土高原这片神奇的土地平添了几分神秘的色彩。

作为一种独特的侵蚀方式，黄土洞穴潜蚀造成的水土流失危害巨大。据有关文献记载，宁县马槽沟在1960年一次暴雨中，因沟头发生洞穴侵蚀而使得沟头一次向原畔推进了40m；武山县在1959—1961年的三年当中，每年每平方公里的梯田上平均发生洞穴85个，合计侵蚀量200t；邓家堡在1962年一场暴雨中，288亩（约0.19km²）梯田上形成陷穴193个（含陷穴坍塌而成的地边壑），每平方公里合计侵蚀量6300t。又如笔者在2002年野外调查发现，四十里铺公路边的十余亩梯田中竟发育各种洞穴153个，每平方公里合计侵蚀量8000t。这些洞穴不仅造成严重的水土流失，而且还给梯田工程、蓄水灌溉工程等农业基本建设带来了严重危害。

黄土高原上的公路、铁路大都直接建在黄土层之上，加之其线性分布特点，致使黄土洞穴对此类工程的危害极为严重。国道211甘肃环县境内K217+600处，2002年8月4日一场大雨后，公路黄土路基中的暗穴塌陷30多米，后虽经抢修但因降雨而再次塌陷，造成交通中断达15天。甘肃庆阳—西峰国道K13+800~K13+812段，因暗穴塌陷所引发的黄土洞穴灾害46处，最大的一个陷穴直径竟达21.9m，深度达到11m，由于黄土洞穴过于密集、危害太大，迫使该段公路最终报废而不得不改线；定西公路四十里铺段，200m长度范围内的路肩、路面上竟发育各种黄土洞穴100余个；甘肃静宁—秦安公路在2000年曾发生汽车行驶诱发路基下暗穴的塌陷，导致汽车掉进陷坑中；据对甘肃庆阳公路总段公路水毁资料的随机抽查和不完全统计，2002年仅4~7月份，国道211、国道309、省道202等公路的庆阳段因黄土暗穴造成的重大公路灾害点达到58个，直接损失400余万元；定西地区每年7~10月份，因暴雨形成的公路黄土暗穴塌陷、边坡破坏及涵洞破坏，其养护和应急灾害处理费用高达8000余万元，由此而造成的交通中断及交通事故等所带来的损失则更为惨重。黄土洞穴对铁路运输的危害也较为严重，如陇海铁路甘草店段在1954年8月因暴雨使得路基中发育的暗穴塌陷，造成路面钻洞，引起客

车颠覆，使人们的生命和财产遭受损失。除此之外，黄土洞穴还对黄土地区的输油、输气及输水管道以及拦蓄水工程、厂房、民居等各类工业与民用建筑均构成了不同程度的威胁。

更值得注意的是，黄土洞穴的危害还表现在影响着其他地质灾害的产生和发展，这些地质灾害最终以水土流失、崩塌、滑坡、泥石流等各种形式表现出来。在黄土洞穴广为分布的黄土高原，许多黄土崩塌、滑塌以及中-小型滑坡与黄土洞穴的发生和发展关系密切，甚至互为因果。黄土边坡随其内部黄土洞穴的发生、发展而滑塌破坏，这种现象在黄土洞穴广为分布的黄土高原地区尤为普遍。另外，作为黄土高原地区地表水的一种排泄方式，黄土暗穴也为黄土地区的泥石流灾害提供了水源和物源。

在工程地质领域，关于潜蚀的研究最早且以后也大多数是围绕着渗流对堤坝、围堰、基坑工程的渗透变形和渗透破坏展开的，其中以对管涌的研究最为深入。1898年，印度恒河的Narora大坝因管涌而发生溃决，这次事故首次引起了工程地质界对管涌现象的普遍关注。早在1905年，Buckley认为围堰是否发生管涌破坏只与渗流路径的长度有关，提出了蠕变系数的概念。1910年Bligh基于大量的管涌破坏的现场研究，提出了抵抗管涌破坏临界水力梯度的经验公式。1922年Terzaghi基于土体中垂向力的平衡的分析，提出了著名的公式计算临界水力梯度。1937年Casagrande曾描述过与渗流有关的内部侵蚀引起的土质岸堤失稳，并且给出了根据流网计算临界水力梯度的公式。然而令人遗憾的是，在黄土工程地质领域，人们原本为了研究块体运动而开始注意潜蚀这一现象，但却在研究块体运动后很大程度上忽视了潜蚀。目前无论是在黄土洞穴潜蚀过程的作用机理研究方面，还是在洞穴潜蚀速率的定量研究方面，乃至潜蚀作用与块体运动的关系等方面的研究，均尚未得到应有的重视。

为了从根本上预防黄土暗穴对公路的危害，交通部将“探测湿陷性黄土暗穴技术研究”作为2001年西部交通建设科技项目的招标项目，笔者的博士导师彭建兵教授承担了这一研究任务，在历时三年的研究工作中，导师带领我们不畏寒冬酷暑，数次奔波在黄土高原的梁梁峁峁、沟沟岔岔，成千上万的黄土洞穴中都留下了我们的足迹。丰富的野外调查和勘探资料为黄土洞穴的分类、分布规律、成因等方面的研究奠定了坚实的基础。2007年，笔者有幸申请到了国家自然科学基金面上项目资助(40772182)，着重围绕黄土洞穴侵蚀速率开展了一系列探索性的研究。2010年笔者得到了长安大学中央高校基础研究支持计划专项资金资助(CHD2010JC008)，对潜蚀环境下黄土斜坡的滑塌机制初步开展了一些研究，本书是在对这些项目部分研究成果进行总结的基础上编写而成。

书中首先就目前国内容易混淆的关于潜蚀及其相关概念进行了必要的辨析和澄清，建立了基本潜蚀作用的概念模型，并通过理论推导、物理模拟等手段对黄土潜蚀作用发生的临界条件及其破坏机理进行了探讨。分析总结了黄土洞穴潜蚀灾害的类型和致灾机理，并对黄土洞穴的成因机理、形成演化过程进行了深入研究。为了研究潜蚀作用与灾害性块体运动的关系，在本书的最后对黄土洞穴环境下黄土边坡的破坏类型及其稳定性进行了初步分析。

虽然黄土潜蚀工程地质问题已经变得越来越突出，但由于黄土潜蚀工程地质问题本身命

题很大，而各行各业关于潜蚀工程地质问题涉及的领域又比较狭窄，加之行业之间缺乏理论和经验知识的交流和渗透，同样也由于潜蚀作用发生环境的多样性、作用方式的复杂性、发生过程的随机性等原因，使得潜蚀工程地质方面的研究还十分薄弱。本书是第一部将黄土洞穴潜蚀与黄土工程地质相结合的专著，其宗旨是希望以黄土洞穴潜蚀为例，抛砖引玉，引发同行们对黄土潜蚀灾害进一步的关注和思考，以便能够早日建立更为系统的黄土潜蚀工程地质理论框架体系。笔者相信，随着黄土潜蚀工程地质研究的不断深入，我们有望从黄土潜蚀这一崭新的视角重新审视黄土工程地质学科领域许多目前尚且难以完满回答的问题。

目 录

前言

1 黄土潜蚀作用研究综述	1
1.1 概念的提出及研究现状	1
1.2 存在的主要问题	4
1.3 拟解决的主要问题	4
2 潜蚀作用相关概念辨析	7
2.1 渗透力及地下径流形式	7
2.2 潜蚀作用概念模型	9
2.2.1 管涌、渗透压密、接触管涌、接触冲刷	10
2.2.2 流土、突涌与接触流土	12
2.2.3 流砂	16
2.2.4 地下冲刷侵蚀	17
2.2.5 洞穴侵蚀	17
3 潜蚀作用发生的临界条件	21
3.1 渗透侵蚀作用激发条件的理论推导	21
3.1.1 管涌及渗透压密的激发条件	21
3.1.2 流土发生的临界条件	23
3.1.3 突涌发生的临界条件	24
3.1.4 地下径流冲蚀动能公式	25
3.2 关于潜蚀作用概念模型的讨论	26
3.2.1 潜蚀与非潜蚀	26
3.2.2 潜蚀作用的继发性、动态性和复杂性	27
3.3 黄土地层突涌破坏机理物理模拟	27
3.4 黄土地层突涌破坏机理数值模拟	33

4 黄土洞穴潜蚀灾害 37

4.1 黄土洞穴潜蚀的直接危害 37

4.2 黄土洞穴潜蚀的间接危害 38

4.3 黄土洞穴潜蚀灾害及其成灾机理——以公路黄土暗穴为例 38

4.3.1 黄土暗穴对公路工程危害的一般特点 40

4.3.2 黄土暗穴对公路工程的直接危害及其致灾机理 42

4.3.3 黄土暗穴对公路工程的间接危害及其致灾机理 49

5 黄土洞穴的成因机理 55

5.1 黄土土性与洞穴形成的关系 55

5.1.1 黄土的渗透性与黄土洞穴形成的关系 55

5.1.2黄土的崩解性与暗穴形成的关系 57

5.1.3黄土的湿陷性与洞穴形成的关系 62

5.2 黄土节理裂隙与黄土洞穴形成的关系 65

5.2.1 构造节理裂隙与黄土洞穴形成的关系 65

5.2.2 垂直节理裂隙与黄土洞穴形成的关系 66

5.2.3 卸荷裂隙与黄土洞穴形成的关系 68

5.2.4 湿陷裂隙与黄土洞穴形成的关系 68

5.2.5 风化裂隙与暗穴形成的关系 69

5.3 地下水与黄土洞穴形成的关系 71

5.3.1 黄土地层中地下水的类型 71

5.3.2 地下水在黄土洞穴形成过程中的作用机理 72

5.3.3 黄土洞穴成因的多样性 80

6 黄土洞穴的形成演化过程 83

6.1 黄土洞穴内部构造特征 83

6.1.1 黄土暗穴断面特征 83

6.1.2 黄土暗穴空间形态特征 85

6.1.3 黄土暗穴内部构造特征	86
6.2 黄土洞穴孕育期及其特征	87
6.3 黄土洞穴形成期及其特征	88
6.4 黄土洞穴发展期及其特征	89
6.5 黄土洞穴破坏期及其特征	90
6.6 黄土洞穴消亡期及其特征	91
7 黄土崩解性试验研究	93
7.1 大试块黄土崩解试验及原位崩解试验介绍	94
7.2 黄土的崩解机理	95
7.2.1 黄土崩解作用的本质	95
7.2.2 黄土崩解作用的特点	97
7.3 黄土崩解性的影响因素及其机理	97
7.3.1 天然含水率对黄土崩解性的影响机理	97
7.3.2 黄土的结构性对其崩解性的影响	98
7.3.3 黄土崩解过程中的边界效应	98
7.4 黄土崩解动力学研究	100
7.4.1 试验方法	100
7.4.2 试验结果与讨论	101
8 黄土抗冲性试验研究	107
8.1 黄土洞穴大试块抗冲性试验研究	107
8.1.1 试验设计	107
8.1.2 试验结果分析	109
8.2 原位冲刷试验	113
8.2.1 试验目的及试验工况设计	113
8.2.2 试验步骤	113
8.2.3 试验结果分析	113

9 黄土洞穴侵蚀速率试验研究	119
9.1 黄土洞穴侵蚀速率物理模拟试验	119
9.1.1 试验装置及工况设计	119
9.1.2 试验结果及分析	120
9.2 大型天然黄土洞穴系统现场冲刷试验	143
9.2.1 试验区概况	143
9.2.2 试验目的及主要装置	144
9.2.3 试验过程及现象观察	145
9.2.4 试验结果分析	145
10 洞穴环境下黄土边坡稳定性分析	151
10.1 洞穴环境下黄土边坡破坏类型	151
10.1.1 洞穴或洞穴系统的形成及其变形破坏	151
10.1.2 洞穴引发边坡的局部或整体变形破坏	155
10.1.3 洞穴对边坡破坏体的后生改造	158
10.2 洞穴潜蚀环境下黄土边坡稳定性分析	158
10.2.1 暗穴沿坡面倾向发育时黄土边坡稳定性有限元分析	158
10.2.2 暗穴沿坡脚发育时黄土边坡稳定性有限元分析	164
10.2.3 基于强度折减法的暗穴环境下非饱和黄土边坡稳定性有限元分析	168
11 结论及展望	179
11.1 主要结论	179
11.2 展望	182
参考文献	183

1 黄土潜蚀作用研究综述

1.1 概念的提出及研究现状

潜蚀(sub-erosion)泛指在地表以下地下水的作用使地层发生的各种形式的侵蚀,主要包括物理潜蚀(physical sub-erosion)和化学潜蚀(chemical sub-erosion)两种主要类型。在地质学领域,早在1886年Von Richthofen研究黄土地貌时就曾注意到黄土地层中的潜蚀现象。1888年,Cussen发现在新西兰怀卡托河盆中的冲积层中存在大量竖向漏斗状洞穴,并推断这些洞穴是地下水通过地下土层时形成的。地下水通过这些冲积土层时,先在地下形成孔洞,进而发展成地下河,从而实现对地下松散物质的侵蚀搬运。同时,Cussen推断含有碳酸的水在经过地下松散堆积物时可能会对其有一定的溶解作用。1895年印度曾有人在实验室对洞穴潜蚀这一现象进行过一些研究,1897年Haworth^[1]、1901年Johnson^[2]在研究堪萨斯州西部自然地理时也曾提到潜蚀作用的影响;1914年Collier^[3]曾报道过俄勒冈州东部潜蚀洞穴,同年Huntington在研究美国旱地气候时也提到该地区的潜蚀洞穴,1917年Gregory在研究美国印第安纳瓦霍地质时对该区的潜蚀洞穴也有提及。此后,许多地质学、地貌学、气候学、地理学、水土保持等领域的诸多学者在进行研究工作的过程中,对世界各地的潜蚀现象都有所提及。虽然在1963年以前并没有出现针对潜蚀进行专门研究的较为系统的文献,但相关资料^[4-12]表明,在中国、澳大利亚、玻利维亚、哥伦比亚、伊朗、新西兰、南非以及美国的夏威夷、亚利桑那州、加利福尼亚州、蒙大拿州、内华达州、新墨西哥州、北达科他州、俄勒冈州、南达科他州、怀俄明州等国家和地区普遍存在黄土潜蚀洞穴。

1963年,Bryan首次较为系统地报道了潜蚀现象,认为潜蚀是沿着粉砂质土、弱固结粉砂岩、泥岩或同类基岩土层或岩层内部的渗流排泄通道而发生的,指出了地下径流侵蚀对地貌塑造和土壤侵蚀的重要性。尤其是潜蚀现象在干旱地区的土层中分布广泛,在一些地区会造成严重的土壤侵蚀问题。随后Parker和Jenne在1967年、Bell在1968年、Heede在1971年都相

继报道了美国干旱地区的潜蚀现象,1980年Gilman和Newson,1981年Jones报道了在大不列颠湿润地区的潜蚀现象。1982年一些研究报告报道了在Bryan和Yair干旱半干旱地区的潜蚀作用。20世纪60~70年代,关于盆地产流复杂性的证据越来越多,而这一时期有关地下径流对暴雨水力学特性响应的证据开始出现^[14]。与此同时,在不同气候区不同土壤类型中有关潜蚀特征报道也越来越多。同时,地下径流和潜蚀过程及其与潮湿沼泽地水力学过程的关系、荒地地貌的关系,以及与半干旱地区土壤侵蚀的关系也引起了人们广泛的兴趣^[15-47],其结果引起了首批关于潜蚀水力学意义及地貌学意义方面的研究热潮^[48-56, 135]。

国内关于地下潜蚀方面的研究多集中于黄土洞穴侵蚀的成因上,其观点主要有机械侵蚀说、溶蚀说、多因素综合成因说三种。机械侵蚀的观点认为黄土暗穴的形成是流水沿黄土劈理下渗或从动物洞穴灌入地下而发生地下机械侵蚀引起的^[136],因为陷穴发育的地区总是在沟边、塬畔、黄土裂隙众多的地点^[137];陷穴形成的主导素除土状堆积物的性质、径流的局部集中外,与地面的波折、地下裂点及暴雨性质也有关系^[138],并把陷穴的形成与沟头的形成联系起来,认为其与沟蚀作用相似。溶蚀观点认为黄土暗穴是一种碎屑喀斯特,是由于地下水的溶蚀及胶体土粒被重力水悬浮流失,加上崩塌作用形成的^[139],并把黄土柱、黄土墙、黄土塔和陷穴、盲沟等侵蚀形态与喀斯特地区的地形相比,称为“假喀斯特”(或黄土喀斯特)。多因素成因观点认为陷穴形成过程中既有机械作用,也有化学作用,陷穴是这两种共同作用的产物。就这两种作用的影响大小来说,以机械作用为主,尤其是保证土粒能被运移的缝隙的存在,起了决定性作用^[140]。到了20世纪八九十年代,我国的一些学者对黄土洞穴的成因及分类也进行过进一步探讨,取得了一些较有实际应用价值的重要成果。王斌科^[141]认为黄土物质结构疏松,垂直节理发育,遇水容易崩解,这是洞穴形成的内在原因。适宜水流积聚和排泄的地形,土层的抗冲蚀性差异及土内裂隙的存在是陷穴形成的基本条件,他将黄土洞穴划分为陷穴、跌穴及其派生残余形态和水凼窝四种类型,基本上仍是机械侵蚀为主,是机械侵蚀成因观点的深化。王景明^[142]认为构造节理控制了相应地区的黄土喀斯特及潜蚀地貌形态、展布方向和发育程度,是黄土喀斯特和潜蚀地貌的重要构造基础,他发展了多因素成因的观点,并对黄土喀斯特的特征及其演化过程进行了阐述。另外,孙建中也曾在“黄土高原第四纪”中对陷穴与湿陷性问题进行过有益探讨。彭建兵、李喜安等^[143-150]对黄土洞穴的成因进行了较为系统深入的研究,认为黄土的疏松结构、渗透性、湿陷性和崩解性等特性是黄土洞穴形成的根本内在因素,黄土地貌、黄土地层厚度、地层结构特征、地质构造条件、水文地质条件等是形成黄土洞穴重要的外部条件,而水则是对黄土或黄土地层以一定的方式通过一定的途径进行侵蚀而最终形成黄土洞穴的源动力。在黄土洞穴形成的过程中,水对洞穴壁上黄土的直接作用主要有冲蚀作用、潜蚀作用、崩解作用等,间接作用主要是由其所引起的重力崩塌作用以及其他作用。不同种类的黄土洞穴,其成因机理不尽相同。同一种类的洞穴在其不同的发展演化阶段其侵蚀机理也会有较大差异,甚至对于同一洞穴的不同部位,其侵蚀机理也常常差异较大。黄土洞穴的形成机理是一个十分复杂的物理化学过程,其作用对象是疏

松多孔的具有特殊结构的强湿陷性、强崩解性和渗透性的黄土，作用途径是黄土地层中发育的垂直节理、构造节理、卸荷节理、湿陷节理等强径流通道或强渗流通道，作用方式主要以水的冲蚀作用和潜蚀作用为主，兼有湿陷作用、崩解作用、重力作用、风化作用、生物作用等一系列综合因素的影响。他们通过详细观察，将黄土洞穴的形成演化过程分为以湿陷和潜蚀为主的孕育期、以潜蚀和冲蚀作用为主的形成期、以冲蚀为主扩大洞径的发展期、以重力坍塌和冲蚀为主的破坏期以及趋于自稳平衡的消亡期等5个阶段。

在工程地质领域，关于潜蚀的研究最早且以后多数是围绕着渗流对堤坝、围堰、基坑工程的渗透变形和渗透破坏展开的，其中以对管涌的研究最为广泛而深入。1898年，印度恒河的Narora大坝因管涌而发生溃决，这次事故首次引起了工程地质界对管涌现象的普遍关注。早在1905年，Buckley认为围堰是否发生管涌破坏只与渗流路径的长度有关，提出了蠕变系数的概念，并且首先提出了总梯度方法，他将总水头梯度定义为每单位长度的水头损失，蠕变系数的倒数就是总水头梯度。Bligh基于大量的管涌破坏的现场研究，提出了抵抗管涌破坏临界水力梯度的经验公式，并根据地基土的类型不同，给出了经验值。Terzaghi基于土体中垂向力的平衡的分析，在1922年提出了著名的公式计算临界水力梯度。他在模型试验中观察到了在渗流作用下表层下部的侵蚀和体积的隆起两个过程，即首次通过试验模拟了管涌和流土两种现象，指出双层地基弱透水层下的渗透力超过其上部弱透水层有效重量（浮容重）时，就会发生流土，同时提出了用反滤层保护渗流出口防止管涌侵蚀的原理，给出了第一个反滤层设计的准则。Lane根据考虑了流线的垂直运动和孔隙介质的各向异性，发展了Buckley和Bligh的计算模型，分析了200多个构造物，建立了经验公式确定蠕变系数，并给出了经验值。Khosla在1936年提出了在约束流中各种不同边界条件下临界水力梯度的确定方法。Casagrande在1937年曾描述过与渗流有关的内部侵蚀引起的土质岸堤失稳，并且给出了根据流网计算临界水力梯度的公式。此后国内外许多学者围绕管涌发生的水力坡度曾展开过广泛的研究。自从Terzaghi开展管涌的模型试验以来，大批研究者如等相继进行了大量的试验和模拟工作。另外，Terzaghi在1931年曾就Mississippi盆地由于下伏沙层的潜蚀造成的地面沉降进行过研究。

除此之外，一些学者曾先后就滑坡与潜蚀的关系进行过一些研究。地下水排水不畅所产生的高孔隙水压力是发生大块体侵蚀的一个主要原因，因此洞穴侵蚀与边坡稳定性二者的联系被关注。当存在地下洞穴系统时，地下渗流可被洞穴系统所截获，洞穴系统也可引导地表水向坡下排泄，这一过程可以使得孔隙水压力降低从而降低滑坡的危险性。然而，如果洞穴系统不连续^[59]或因为塌陷阻滞而使得洞穴系统内部水流不畅，则往往会迅速形成巨大的静水压力而导致边坡破坏^[58]。一些学者也曾提及边坡上发育的洞穴侵蚀，认为其对边坡的稳定性有所影响。彭建兵、李喜安等曾指出黄土洞穴的发生与黄土地区的滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝等地质灾害具有十分密切的关系。国外一些学者^[68-76]也曾对洞穴侵蚀与道路工程的关系进行过讨论。彭建兵、李喜安等首次将黄土洞穴作为黄土高原一种独特的地质灾害灾种，就黄土洞穴的分布规律、黄土洞穴对公路的危害、黄土洞穴稳定性评价、黄土暗穴探测技术、

黄土暗穴预测预报、黄土洞穴黄土地层地表径流下潜模式等方面也展开过深入研究，到目前为止，这些研究是关于黄土洞穴潜蚀较为系统的成果。

1.2 存在的主要问题

目前，潜蚀工程地质问题已广泛涉及水利水电工程、土木工程、铁路工程、公路工程、港口工程、防灾减灾工程、农田水利工程、矿山工程、建筑工程、环保工程等众多行业领域，随着各类工程建设活动的不断开展，方方面面的潜蚀工程地质问题已经变得越来越突出，在相当程度上决定和影响各类工程的设计、建设和维护。但由于潜蚀工程地质问题本身命题很大，可以说是一项浩大的系统工程，而各行各业关于潜蚀工程地质问题涉及的领域又比较狭窄，行业之间一方面缺乏理论和经验知识的交流和渗透，另一方面也由于潜蚀作用发生环境的多样性、作用方式的复杂性、发生过程的随机性等，使得潜蚀工程地质方面的研究还十分薄弱，主要表现在以下几个方面：

(1) 各种潜蚀作用过程的概念模型有待建立。正确的分类与命名是科学研究的基础，在潜蚀工程地质研究过程中所接触到的国内外诸多文献中，涉及渗透、潜蚀及其相关的各种作用、过程和现象的许多名词、术语，由于学科上的习惯不同、表达方式不同、研究目的和所要表达的意思不同以及文化的差异，或者在理解和应用方面的发展和演变，使得原本用来描述同一本质现象或过程的名词或术语变得不能统一，甚至用相同的术语来描述本质不同的作用或过程，这使得有的文献在运用概念时比较随意，容易造成人们的混淆和误解，对科研工作、工程建设甚至教学工作都会造成影响。

(2) 各种潜蚀过程的作用机理以及各种现象的激发条件均有待进一步深入研究。目前只是关于高渗透压力下管涌、流土的激发条件研究较为深入，而对于其他过程的激发条件，尤其是在低渗透压力下的种种过程研究则相对较浅。

(3) 对潜蚀速率的定量研究还十分欠缺。由于潜蚀作用过程的复杂多样性、突发性和不稳定性等原因，使得关于潜蚀速率的定量研究较少。

(4) 潜蚀作用与块体运动的关系尚未得到重视。在地质工程领域，人们原本为了研究块体运动而开始研究潜蚀，却在研究块体运动后忽视了潜蚀的研究。目前有关潜蚀与崩、滑、流关系的研究无论在内容的丰富程度还是在研究深度上都十分缺乏。

1.3 拟解决的主要问题

本书主要围绕潜蚀工程地质目前存在的一些核心问题开展相关研究工作，涉及的内容主要有以下几点：

(1) 从根本发生机理及其作用特征出发，就目前国内外容易混淆的关于潜蚀及其相关概念进行一些必要的辨析和澄清，严格界定各种潜蚀作用相关概念的内涵和外延，初步建立起清晰的各种潜蚀作用概念模型。

(2) 在建立起的潜蚀作用概念模型的基础上, 以典型的潜蚀作用为主要对象, 通过理论推导, 对各种作用的激发条件及其影响因素进行初步研究。

(3) 以黄土洞穴潜蚀灾害为例, 对洞穴潜蚀灾害的一般特点进行分析总结, 并以黄土分布区的公路工程为例, 深入研究黄土暗穴对公路工程的危害及其致灾机理。在此基础上, 从黄土的渗透性、崩解性、湿陷性、黄土节理裂隙、地下水等因素与黄土洞穴形成的关系出发, 对黄土洞穴的成因机理及其形成演化过程进行深入研究。

(4) 针对性地设计试验, 对崩解性、抗冲刷性这两种影响黄土洞穴侵蚀速率的主要土性因素进行研究, 重点揭示黄土的崩解机理以及黄土抗冲刷性的各种影响因素。

(5) 针对黄土洞穴侵蚀速率开展相关的试验研究, 通过试验定量揭示初始干密度、初始含水率等因素对黄土洞穴侵蚀速率的影响, 同时根据试验过程中观察到的现象结合野外调查, 对黄土洞穴的侵蚀特征进行深入研究。

(6) 对洞穴环境下一般黄土边坡的破坏类型及其发生机理进行分析总结, 在此基础上借助数值计算方法, 对洞穴环境下黄土边坡的稳定性进行研究。

2 潜蚀作用相关概念辨析

全球范围内广泛发生的侵蚀作用，很早就引起了人们的注意，但由于没有及时形成一门系统的学科，全世界不同领域的诸多学者曾用很多不同的名词对潜蚀作用及其相关的概念、术语进行过描述。如“*seepage*”或“*soil seepage*”^[60, 61]、“*natural tunneling*”^[62]、“*gullies-by-sinking*”^[63]、“*sink-hole erosion*”^[64, 65]等等，国内如“渗透变形”、“渗透破坏”、“渗透失稳”、“潜蚀”、“溶蚀”、“洞穴，侵蚀”、“洞穴冲刷”、“暗蚀”、“暗沟侵蚀”、“流砂”、“砂沸”、“突涌”、“液化”、“溜滑”、“接触流土”、“层内侵蚀”等等，由于学科上的习惯不同，表达方式不同，研究目的和所要表达的意思不同以及不同国家的文化差异，或者在理解和应用方面逐渐地发展和演变，使得原本用来描述同一本质现象或过程的名词或术语变得不能统一，甚至用相同的术语来描述本质不同的作用或过程，虽然国内外有些学者曾为了界定这些概念做过一些努力，但至今仍未能妥善解决，致使有的文献在运用概念时比较随意，常造成人们的混淆和误解，因此本节首先就国内外关于潜蚀及其相关概念进行一些必要的澄清。

2.1 渗透力及地下径流形式

渗透力的概念提出后，围绕其是否存在曾经在土力学界发生过激烈争议，但目前这一概念已广泛为人们接受。渗透力又称为渗流力（*seepage force*）或动水压力（*seepage pressure*），是由于渗流运动而对土颗粒表面产生的法向力和切向力的合力。以饱和渗流（*saturated seepage flow*）为例，饱和渗流中水对土颗粒表面的作用力包括静水压力（*hydrostatic*，图2-1中的 T_1 ）、超静水压力（*excess hydrostatic pressure*，图2-1中的 T_2 ）和切向力（图2-1中的 J ），前二者沿颗粒表面的法向分布，后者沿颗粒表面的切向分布。超静水压力是由于饱和渗流的运动而对土颗粒产生的法向力，切向力则是由于饱和渗流的运动而施加在颗粒表面切线方向上的面力。