

水利部公益性行业科研专项经费项目(201301034)

The Ministry of Water Resources
public special funds for scientific
research project (201301034)

黄河下游堤岸稳定性机理研究

赵宇坤 李庆安 赵 宁 成洪凯 著



黄河水利出版社

水利部公益性行业科研专项经费项目(2

黄河下游堤岸稳定性机理研究

赵宇坤 李庆安 赵 宁 成洪凯 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

黄河下游堤岸是自明清以来陆续修建的,堤岸稳定关系到黄河平原地区人民生命财产的安全。洪水长期浸泡及水位升降影响边坡的稳定性。本书在总结前人研究成果的基础上,针对日前边坡中存在的一些问题,以黄河下游标准化堤岸为例,对洪水长期浸泡和水位升降情况下的稳定性进行系统分析。通过选取黄河下游标准化堤岸土样,进行不同浸泡时间的室内土工试验,获得了土体被水长期浸泡条件下的力学性能变化机理,并对试验结果进行分析和预测。本文引入非饱和渗流理论,以黄河下游标准化堤岸济南段右岸桩号 28+000 为例,分析了水位升降过程中坡体内流速矢量、体积含水量、孔隙水压力等的暂态响应规律,并基于渗流模拟得到孔隙水压力分布,分析了边坡的动态稳定性变化规律,着重研究了水位骤降条件下的堤岸坡体渗流场变化、稳定性变化以及失稳机理。

本书可供从事水电工程设计、科研、施工与管理,以及环境影响评估等工作的技术人员参考使用,也可作为岩土、水利专业本科生、研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

黄河下游堤岸稳定性机理研究/赵宇坤等著. —郑州:
黄河水利出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5509-0900-7

I. ①黄… II. ①赵… III. ①黄河—下游—堤岸—稳定
性—理论研究—高等职业教育—教材 IV. ①TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 203428 号

组稿编辑:路夷坦 电话:0371-66022111 E-mail:hhslyt@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:10.5

字数:243 千字

印数:1—1 000

版次:2014 年 12 月第 1 版

印次:2014 年 12 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

序

黄河是我国的第二大河流,也是中华民族的母亲河,它孕育了灿烂的华夏文明。黄河下游河道是举世闻名的“善淤、善决、善徙”的地上悬河,黄河下游堤防是明清以来断续修建,经过多次加高培厚形成的。黄河下游现行河道是 1855 年在河南兰考铜瓦厢决口,改道北流,夺大清河入海后形成的,全长 628 km。黄河下游两岸堤防的安危,不仅关系到黄淮海平原地区人民生命财产安全,而且水退沙存,河渠淤塞,农田沙化,生态环境将长期难以恢复。

赵宇坤博士毕业后一直从事黄河下游堤防安全方面的科研和设计工作。出版的专著《黄河下游堤岸稳定性机理研究》,在总结前人研究成果的基础上,以黄河下游标准化堤防为例,对洪水长期浸泡和水位升降等非稳定流情况下黄河堤岸的稳定性机理进行了系统深入的分析研究。我认为这是本书的特色和与其他堤防相关成果的不同之处。

鉴于水利工程中水位升降及水位骤降诱发边坡失稳机理的复杂性,书中论述的问题尚需要进一步研究。提出问题就是解决问题的一半,希望本书的出版能引起有关专家学者的兴趣,触发相关深入讨论,以利于黄河长久安澜。

特作此序。

刘汉东
2014 年 5 月

前 言

本书以洪水长期浸泡及水位升降影响边坡的稳定性为主线展开介绍,采用理论介绍与工程实例演算相结合的形式,全面深入地对洪水长期浸泡及水位升降对边坡的影响和作用机理进行研究,对黄河堤防稳定性研究的通常计算方式方法进行了弥补,实用性强,有利于推广。在讲述山东黄河历史变迁、介绍常用堤防稳定分析方法的同时,着重介绍了现代堤防的非稳定渗流的分析方法,对日常工作中常用的稳定渗流分析所未涉及的层面进行了介绍和分析,并应用工程实例进行阐述和验证,使读者能够深入浅出地掌握非稳定渗流理论以及稳定分析方法。内容包括山东黄河的历史变迁,常用堤防稳定分析方法,洪水浸泡的土性参数试验,洪水浸泡的堤岸稳定分析,洪水升降期的堤岸渗流规律及变形破坏规律,水位变化条件下的堤岸模型试验研究,水位升降条件下的堤岸稳定性分析。本书主要特点如下。

(1) 基于实际工程中,土工试验部分只针对黄河堤岸取土土样进行试验,没有考虑洪水浸泡问题的现状,本文提出新的试验方案,即被洪水浸泡不同时间后的堤岸土体强度的土工试验,为堤岸土体的现有试验工况做出补充,该试验结果对黄河大堤的其他堤段的实际工程运用中的类似情况,提供了试验依据和参考。

(2) 针对多年黄河下游来水情况,考虑黄河堤岸在被洪水浸泡几十天的情况下的稳定性,建立了洪水长期浸泡后黄河下游标准化堤岸稳定性分析模型,获得了洪水长期浸泡后的堤岸稳定性结果,对现有黄河堤岸稳定性评价体系做出补充,并对黄河下游标准化堤岸在类似工况下的运行安全稳定问题,提供了参考。

(3) 鉴于在以往的黄河大堤稳定性分析中,均基于饱和渗流理论进行渗流、稳定分析,与黄河大堤实际临水条件和工程运行状况相差较大,本文基于饱和-非饱和渗流理论,建立了饱和-非饱和渗流有限元模型,对水位升降特别是水位骤降条件下的堤坡暂态响应规律、暂态稳定性进行了系统研究,得到了堤坡在不同水位、不同洪水下降速度情况下的动态稳定性变化规律,并分析了洪水长期浸泡耦合水位骤降条件下的堤坡稳定性。

(4) 采用水工模型试验与地质力学模型试验相结合的方法,建立了黄河下游标准化堤岸水工模型,对水位骤降引起的堤岸失稳状态进行了模型试验研究,获得了水位骤降条件下堤岸的稳定状态模型,其特点是在水位骤降的速度和降水水位达到一定条件时,产生滑坡,并具有一定的突变性和连续性,为后续研究提供了参考数据。

(5) 获得了堤坡随洪水浸泡时间变化的稳定状态图、洪水水位以不同速度下降至不同水位时的稳定状态图、洪水水位下降组合洪水浸泡条件下的稳定状态图,依据图中两条安全系数曲线划分出稳定状态、临界状态和破坏状态三个区域,并可从图中得到各状态下对应的安全系数和浸泡时间、洪水下降速度以及下降后的洪水水位,可应用于工程实践并加以推广。

本书由赵宇坤、李庆安、赵宁、成洪凯著,其中赵宇坤负责第6、8、9章,李庆安负责第

2 章,赵宁负责第 4、5、7 章,成洪凯负责第 1、3 章。全书由赵宇坤统稿。本书在编写过程中得到了许多同行的帮助和支持,在此一并表示感谢。特别感谢华北水利水电大学刘汉东副校长对本书提出的宝贵意见和建议以及为本书作序!由于编者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月

目 录

序

前 言

1	引 言	(1)
1.1	研究背景	(1)
1.2	国内外研究现状及存在问题	(9)
1.3	本文研究内容及研究方法	(10)
2	黄河下游山东段的历史变迁	(12)
2.1	1855 年至 1949 年 9 月(新中国成立前)阶段	(12)
2.2	1949 年 9 月至 1985 年年底阶段	(17)
2.3	1985 年年底至 2009 年阶段	(39)
2.4	河道整治经验分析	(51)
2.5	本章小结	(61)
3	常用堤岸稳定分析方法	(62)
3.1	定性分析方法	(62)
3.2	定量分析方法	(63)
3.3	本章小结	(77)
4	考虑洪水浸泡的堤岸土性参数试验研究	(78)
4.1	工程背景	(78)
4.2	试验准备	(82)
4.3	试验过程及结果分析	(83)
4.4	洪水长期浸泡后的土性参数预测	(88)
4.5	本章小结	(91)
5	考虑洪水浸泡的堤岸稳定性分析	(93)
5.1	洪水浸泡对堤岸稳定的影响	(93)
5.2	洪水浸泡的堤岸稳定性(安全系数)预测	(99)
5.3	洪水长期浸泡过程堤岸坡体失稳破坏机理	(100)
5.4	本章小结	(101)
6	洪水位升降期的堤岸渗流规律及变形破坏规律	(102)
6.1	非饱和土特点简介	(102)
6.2	饱和-非饱和渗流分析的数学模型及求解	(102)
6.3	土-水特征曲线	(106)
6.4	渗透性函数	(110)
6.5	洪水升降过程中堤岸边坡暂态渗流场特征分析	(113)

6.6	本章小结	(128)
7	水位变化条件下堤岸模型试验研究	(129)
7.1	模型试验研究现状	(129)
7.2	模型试验相似原理	(129)
7.3	模型试验设计	(130)
7.4	本章小结	(136)
8	水位升降条件下的堤岸稳定性分析	(137)
8.1	水位上升期堤岸稳定性分析	(137)
8.2	水位上升组合洪水浸泡条件下的堤岸稳定性分析	(138)
8.3	水位下降期堤岸稳定性分析	(139)
8.4	水位下降组合洪水浸泡条件下堤岸稳定性分析	(140)
8.5	水位骤降条件下堤岸稳定性分析	(142)
8.6	本章小结	(151)
9	结 论	(153)
9.1	主要结论	(153)
9.2	主要创新点	(154)
9.3	展 望	(155)
	参考文献	(156)

1 引 言

1.1 研究背景

1.1.1 黄河概况

黄河是我国的第二大河,也是中华民族的母亲河,它孕育了灿烂的华夏文明,哺育了千千万万的中华儿女。

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省(区),在山东省垦利县注入渤海。对于黄河,黄河干流全长 5 464 km,流域面积 79.5 万 km^2 (包括内流区 4.2 万 km^2),上下游受洪水影响的范围共约 91.5 万 km^2 ,流域人口 1.1 亿人,占全国人口的 8.7%,耕地 1.97 亿亩。上下游河南、山东沿黄关系密切的地区,总人口 1.89 亿人,耕地面积约 3 亿亩。

黄河根据河道流经地区的自然环境和人文情势,将其作了上、中、下游的划分,见图 1-1。黄河上游长 346 km,从河源至内蒙古自治区托克托(河口镇),河流穿越青藏高原,流经峡谷,其间分布有 20 多个著名的峡谷。这里山高坡陡,落差大,蕴藏着丰富的水力资源。水多沙少、河水较清、流量均匀是该河段的水文特征。黄河流出青铜峡之后,其地势平坦开阔,进入宁夏平原和内蒙古河套平原。这里水渠纵横交错,成为黄河上游最早的农业开发区之一。黄河中游 1 234 km,从内蒙古自治区托克托县的河口镇到河南郑州桃花峪。该段河道的水文特征:由于夏秋季多暴雨,沙源丰富,多水多沙,洪峰流量大,含沙量高,成为世界有名的多沙河流。河道淤积与侵蚀河段交互出现,峡谷与宽谷相间。黄河下游 786 km,从河南郑州桃花峪到山东垦利县,由西向东流经华北平原。河道坡降小,水流平缓。加之河道宽浅散乱,泥沙淤积严重,河床逐渐升高,两岸几乎全靠大堤作为屏障。河道滩面一般高出两岸地面 2~5 m,有的高达 10 m,是世界上著名的“悬河”。

河南郑州桃花峪以下的黄河河段为黄河下游,河长 786 km,流域面积仅 2.3 万 km^2 ,占全流域面积的 3%;下游河段总落差 93.6 m,平均比降 0.12‰;区间增加的水量占黄河水量的 3.5%。由于黄河泥沙量大,下游河段长期淤积形成举世闻名的“地上悬河”,黄河约束在大堤内成为海河流域与淮河流域的分水岭。除大汶河由东平湖汇入外,本河段无较大支流汇入。黄河下游位置及河道简图如图 1-2 所示。历史上,下游河段决口泛滥频繁,给中华民族带来了沉重的灾难。下游河段除南岸东平湖至济南间为低山丘陵外,其余全靠堤防挡水,临黄大堤长 1 324 km,堤线总貌前宽后窄,艾山以上堤距 5~20 km,艾山以下堤距为 0.5~5 km,造成行洪困难。为达到“上拦下排,两岸分滞”的治黄方针,开辟

注:1 亩=1/15 hm^2 ,全书同。

了北金堤和东平湖两大滞洪区。但因黄河泥沙居世界之冠,多年平均每年进入下游泥沙16亿t,其中3亿~4亿t泥沙淤积在河道内,每年河床升高约0.1m,形成了日益增高的“地上悬河”。1950~1990年河床淤高2~3m,滩地一般高出背河地面3~5m,多的高达10~11m。而且黄河主流游荡摇摆不定,经常发生“淤槽刷滩”“横河”“斜河”等现象,造成河水大溜顶冲和顺堤行洪冲刷堤脚,威胁着大堤的安全。黄河下游堤岸很多段是明清以来断续修建,经过多次加高培厚而成的,又因其“常年不临水,临水即高位”的特殊性,所以,对黄河大堤的抗滑稳定需要做出全面的科学的评价,以期对下游黄河大堤的加固和整修提供依据。

1.1.2 近年洪水危害简介

洪水灾害居各种自然灾害之首,而且其发生的频率和严重程度有不断加大的趋势。我国自古以来就是水患大国。按照国内七大江河考虑,约有1/2的人口和70%的资产集中在洪泛区内,一旦洪水破堤泛滥,损失必然严重。例如1991年的江淮洪水就给江苏、安徽两省带来直接经济损失484亿元,已接近长江三峡工程的原预算投资总额,间接损失更是无法计算。1998年长江洪水九江大堤溃堤,造成巨大的损失。1998年长江洪水过后,国家投入巨资加固黄河大堤,为黄河大堤的安稳提供了物质基础。

黄河下游的洪水,主要来自中游三个河段,即河口镇至龙门间(简称河龙间),龙门至三门峡间(简称龙三间),三门峡至花园口间(简称三花间)。这三个区间产生的洪水是构成下游洪水的主体。上述三个不同来源区的洪水,组成花园口站三种不同类型的洪水:

(1)以三门峡以上的河龙间和龙三间来水为主形成的大洪水(称为上大洪水)。如1933年洪水,陕县站实测洪峰流量 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$;1843年大洪水,据调查估算陕县站洪峰流量为 $36\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。这类洪水具有峰高、量大、含沙量大的特点,对下游防洪威胁严重。

(2)三门峡以下三花间来水为主(称为下大洪水)。如1958年花园口站实测洪峰流量 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 和调查的1761年花园口站 $32\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 洪水。这类洪水的特点是涨势猛、洪峰高、含沙量小、预见期短,对黄河下游防洪威胁最大。

(3)以三门峡以上的龙三间和三门峡以下的三花间共同来水组成的大洪水(称为上下较大洪水)。如1957年及1964年洪水,花园口站流量分别为 $13\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $9\,430\text{ m}^3/\text{s}$ 。其特点是洪峰较低,但历时较长,对下游堤岸威胁也相当严重。

黄河下游河道是举世闻名的“善淤、善决、善徙”的地上悬河。历史上黄河下游水患灾害频发,从公元前602年至1938年的2540年中,下游决口泛滥的年份就有543年,共计1590次,其间的黄河下游河道经历了5次迁徙。历史上洪水波及范围北抵天津,南达江淮,纵横25万 km^2 ,给国家和人民带来了沉重的灾难。洪流所经之处,房屋倒塌,人畜漂没。洪水过后,疾病流行,河道淤塞,良田沙化,土壤盐碱化,对环境造成的破坏性影响,长期难以恢复。

从1911年到1946年的35年间,黄河下游发生 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上洪水8次,有7次决口泛滥,灾害严重。其中,1933年陕县站洪峰流量 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 洪水,花园口站洪峰流量为 $20\,400\text{ m}^3/\text{s}$,水大沙多,边涨边淤,水位特高,洪水一出峡谷,从温县、武陟到兰考、长垣,两岸堤岸共决口61处,不少是洪水漫过堤顶决口成灾。淹没冀、鲁、豫、苏四省30县

黄河流域示意图

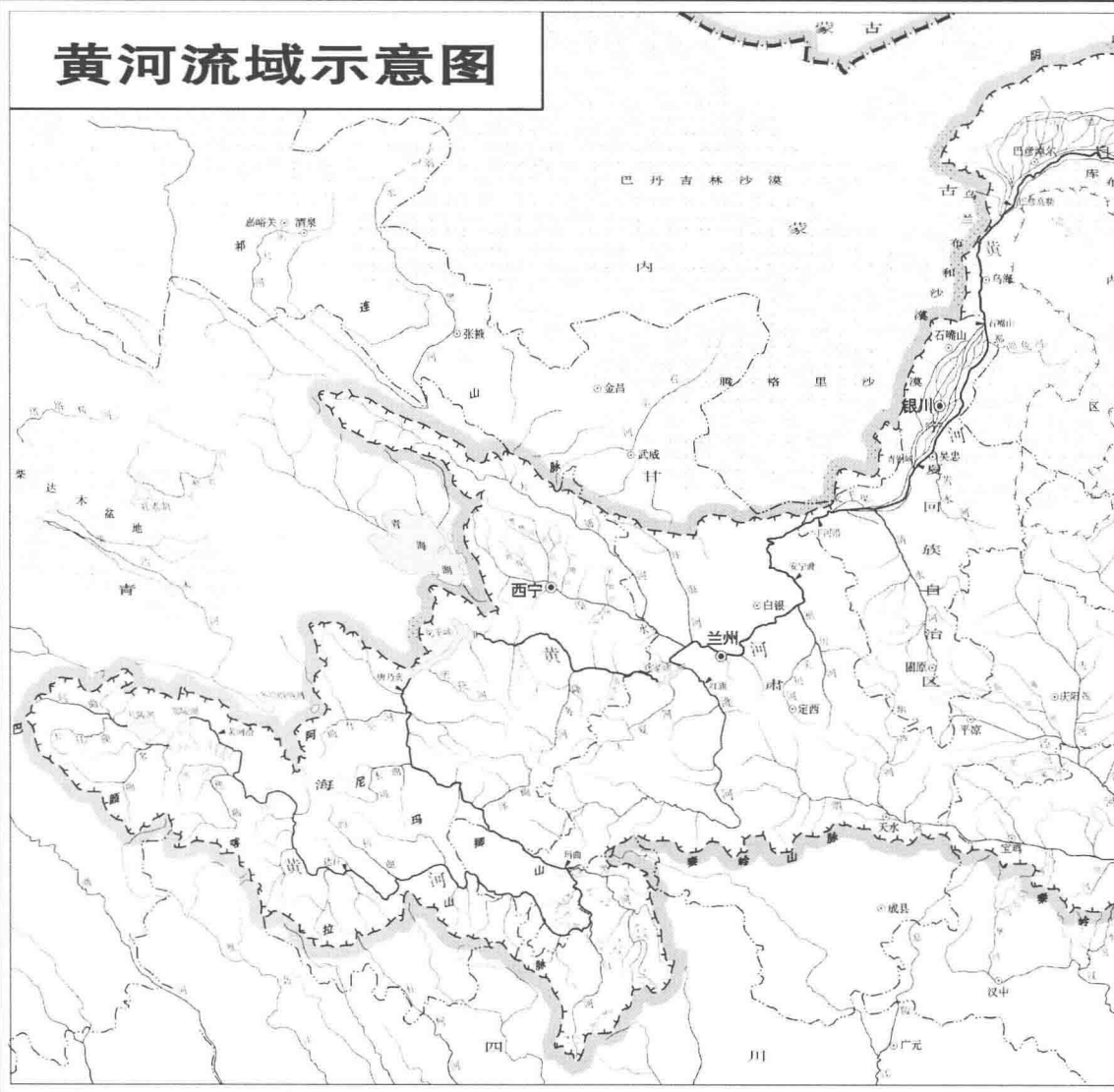
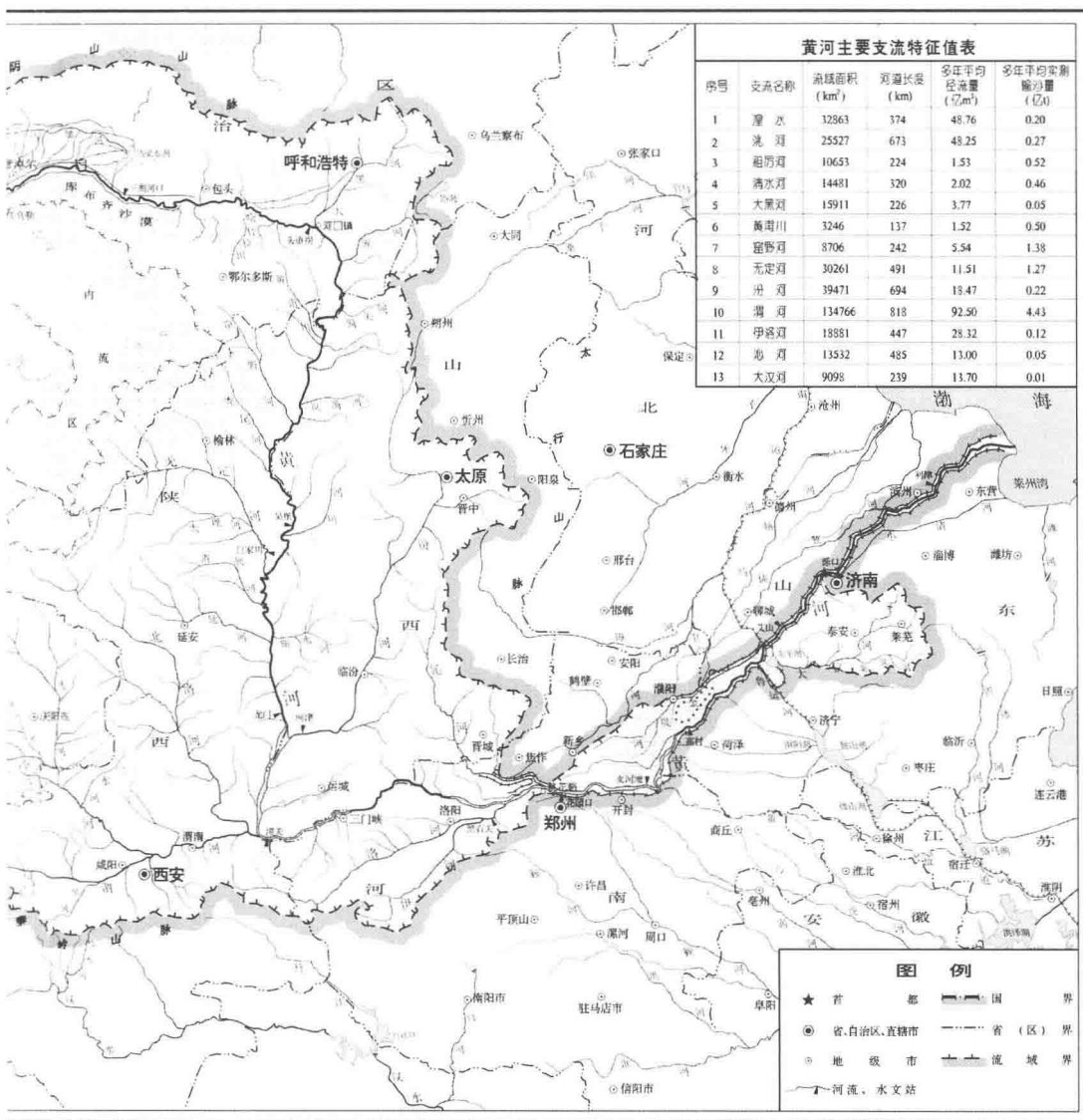


图 1-1 黄河流域示



可流域示意图

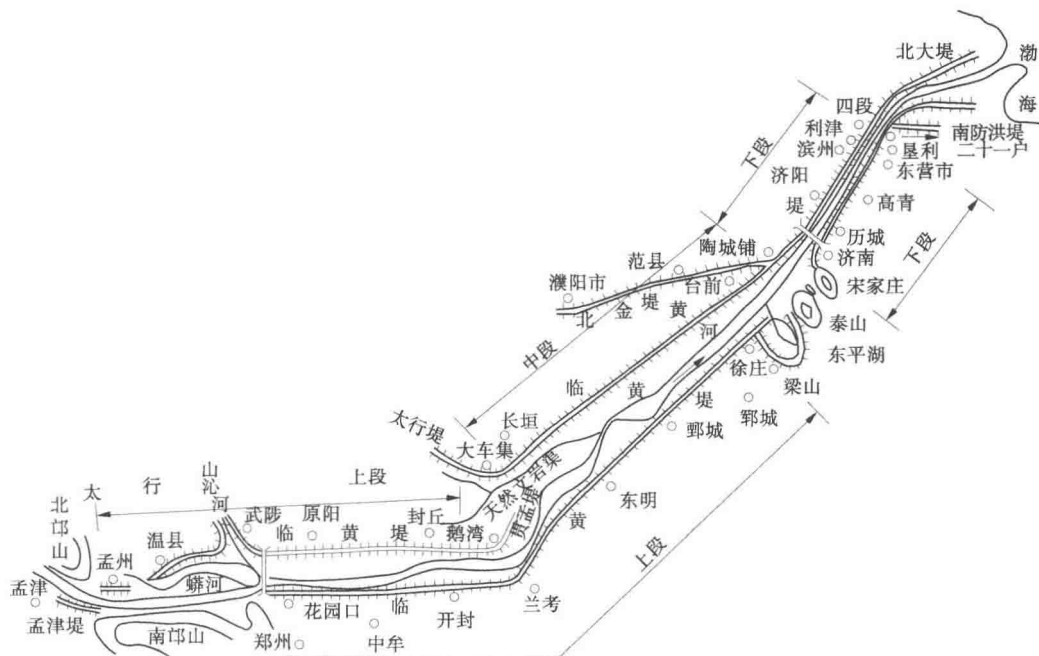


图 1-2 黄河下游位置及河道简图

6 592 km²,受灾人口 273 万,死亡 12 700 人。1935 年花园站洪峰流量为 14 900 m³/s,在山东鄄城董庄决口,溃水淹没鲁、苏两省 27 县,受灾人口 341 万,受灾面积 12 215 km²。由于泥沙淤积,还导致河床宽浅,溜势多变,一旦大溜顶冲大堤,也常发生冲决。几次大洪水引起的黄河下游堤岸及近堤险情情况统计见表 1-1。黄河决口后,如长期不能堵合,即形成河道迁徙改道。

表 1-1 几次大洪水黄河下游堤岸及近堤险情统计

年份	管涌(个)	渗水(m)	漏洞(个)	滑坡(m)	裂缝(m)	陷坑(个)
1958	4 312	59 960	18	23 879	1 392	228
1976	2 925	10 252	3	75 131	3 778	34
1982	83	3 900	3	355	798	27
1996	8	40 383	0	0	5 280	3

年份	花园口站流量 (m ³ /s)	假堤		出险次数	出现频率(%)
		长度(m)	水深(m)		
1958	22 300	—	4~6	1 998	39.9
1976	9 210	1 080	4~5	1 700	34.0
1982	15 300	887	2~4	1 136	22.7
1996	7 600	951	2~4	170	3.4

人民治黄 50 多年来,共发生同样大的洪水 12 次,却没有一次决口成灾。其中,1958 年花园口站发生人民治黄以来的最大洪水,洪峰流量达 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$,比 1933 年洪水还大,经过河南、山东两省 200 多万军民的严密防守和大力抢护,终于在不分洪的情况下战胜了洪水。1982 年花园口站洪峰流量为 $15\,300\text{ m}^3/\text{s}$,经 30 万军民的努力防守,安全入海。2003 年黄河秋汛兰考至东明黄河大堤严重偎水,偎水长度近 50 km。尤其是东明河段大堤 1/2 ~ 2/3 被洪水淹没,洪水最深达 6.0 m,偎水深度创历史最高。

2008 年上半年,全国范围内发生洪涝灾害。入汛后,我国西南东部、华南、江南、浙闽沿海先后出现大到暴雨天气过程。持续不断的强降雨,使长江、珠江、西江、闽江等流域部分干流和支流,发生超警戒水位洪水。暴雨洪水造成受灾人口 3 800 多万人,因灾难死亡和失踪 200 多人,倒塌房屋超过 12 万间,直接经济损失 260 亿元。权威分析显示,此轮暴雨洪水过程呈现三个显著特点:一是降雨范围广、强度大、历时长。二是洪水来得快、涨势猛、量级高。全国共 40 多条河流、约 130 处水文站发生了超警戒水位的洪水。广西梧州站水位从 6 月 10 日的 9 m 多起涨,至 15 日已接近 25 m。三是受灾范围广、灾情重、损失大。2008 年上半年,全国共有 20 多个省份和新疆生产建设兵团发生洪涝灾害。截至 6 月 5 日 12 时,全国农作物受灾面积 227.4 万 hm^2 ,成灾 110.0 万 hm^2 ,受灾人口 3 856 万人,因灾死亡 169 人,失踪 1 000 多人,倒塌房屋 12.57 万间,直接经济损失 260 亿元。

洪水无情在于它发生的时间、地点、强度都很难预测。所以,在洪水有可能威胁到的地方,应尽量做好防范工作。黄河堤岸牵系着千千万万的百姓的幸福,其重要程度要求我们做到在各种各样的洪水情况下的预测和保护工作。

在做了大量工作的基础上,本文的预期结果会对黄河下游堤岸的实际工程运用有很好的参照和指导作用。可以预测在高水位洪水长期浸泡黄河下游堤岸后,堤岸的稳定情况;可以预测在洪水水位骤降情况下,黄河下游堤岸的稳定情况。

1.1.3 水对堤岸边坡稳定性的影响

河道充水后,地下水对边坡岩土体物理力学性质的影响,一方面岩土体饱水软化,由于水的润滑作用,土体颗粒间的摩阻系数及胶结能力降低,边坡潜在滑动面抗剪强度降低,进而降低了坡体的抗滑力;另一方面,当河道运行时,河流水位反复升降,使得坡体内出现循环的渗流作用,地下水渗流对坡体产生溶滤作用,即细小颗粒在地下水的作用下发生运移,坡体出现侵蚀现象,坡体潜在滑动面出现微观或宏观上的孔穴,从而使得潜在滑动面的抗剪强度降低。

浸没于河水中的岩土体受到水的浮托作用,浮托力的大小等于水下计算岩土体的体积和水重度的乘积,一般水下边坡在计算滑体重量时,按其浮重度考虑。浮托力对边坡稳定性有两方面的影响。由于浮托力减小了滑体的有效重量,一方面,它降低了滑面的阻滑力,给边坡的稳定性带来不利的影响,另一方面,滑体重量的减小,使其下滑力减小,有助于边坡的稳定,因而,不能简单地评价浮托力对边坡稳定性的利弊,而应根据具体的工程地质条件和岩土体的力学参数进行综合评判。

1.2 国内外研究现状及存在问题

1.2.1 研究现状

堤岸稳定分析的工况分无水、设防水位,即满水和水位骤变几种情况。无水时,一般稳定安全系数都很高,堤岸失稳现象较少。设防水位期的稳定渗流情况下,安全系数虽不及无水条件下高,但不是最危险情况,基本能满足稳定要求。目前对于堤岸稳定性的分析,均基于规范做常规分析,没有考虑到极端恶劣条件下的堤岸运行情况。

受黄河下游河道调蓄能力影响,黄河下游河道是一个相当大的自然滞洪区,对洪水有显著的滞洪削峰作用,尤其对小花间发生的较大洪水,因峰型较瘦,其滞洪削峰作用更为显著。大洪水对堤岸的浸泡作用应予以重视。洪水时期,正常水位以上土体受洪水浸泡作用,堤岸土质软化,其土体强度明显下降,同时由于堤内浸润线抬升而使渗透力增大,这些因素都增加了堤岸的不稳定性,甚至可能带来安全隐患。文献[5]~[9]对水浸泡后土的强度指标的变化和由此引发的边坡稳定问题作了研究,认为土质边坡受到高水位的洪水浸泡会导致强度指标 c 降低。

王思敬等通过对比板岩泥化夹层浸水前后抗剪强度曲线发现, $\tan\varphi$ 值下降达 15%~20%,黏聚力 c 值下降 35%~75%。

廖红建,韩波等通过试验研究了浸水使土体强度降低的程度,结果表明,浸水后土堤的黏聚力 c 降低可达 55%,而对内摩擦角 φ 几乎没有影响。

琼斯(Jones)等调查了 Roosevelt 湖附近地区 1941~1953 年发生的一些滑坡,结果发现,有 49% 发生在 1941~1942 年的蓄水初期,30% 发生在水位骤降 10~20 m 的情况下,其余为发生在其他时间的小型滑坡。在日本,大约 60% 的水库滑坡发生在库水位骤降时期,其余 40% 发生在水位上升时期,包括初期蓄水。瓦依昂水库滑坡事件是滑坡研究史上的重要里程碑。该水库在 1960 年初次蓄水至 652 m 高程时其边坡上出现一个小崩塌,同时在上部平台上发生裂缝。于是通过降低水位,对滑坡的稳定性进行调查。1963 年第二次蓄水时,从正常水位下降之后,2.4 亿 m^3 的滑坡体突然滑入水库,溢出的水流袭击了与 Piave 河汇合处的 Longarone 镇,造成灾难性的后果。

一般而言,自然边坡经过长期的地质作用,在自然营力的作用下,绝大多数已经趋于稳定,但在河流高水位运行后,由于河流水位的升高,边坡的水文地质条件发生了很大的改变,其岩土物理力学性质出现恶化,表现为岩土体的抗剪强度降低,浮托力增大,原处于极限平衡状态或接近极限平衡状态的岸坡往往发生失稳破坏。特别是在水位骤降时,由于岩土体排水不畅,岸坡中的地下水形成了滞后的渗透力,使得坡体的下滑力急剧增加,促使滑坡产生,其变形破坏具有突发性。由此可见,在对堤岸边坡进行稳定性分析时,应考虑水位骤降的影响。文献[15]~[22]对水位骤降的水库岸坡稳定情况作了分析和研究。

Neuman 采用 Galerkin 加权残值法(即 Galerkin 有限元法)求解二维饱和-非饱和渗流,利用有限元方法对工程边坡的渗流自由面进行研究。