

九江长江干堤溃口段破坏机理及处理措施

Failure mechanism and treatment of a burst stretch of the Yangtze River dike in Jiujiang

吴昌瑜, 丁金华

(长江科学院 土工研究所, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 根据现场调查、勘探和试验成果, 分析了 1998 年九江市堤防溃口段的破坏机理, 用有限元法研究了不同因素对破坏所起的作用, 提出了分析结论。并从堤防汛期和汛后的险情治理方面, 分析了保护下游渗流出口的重要性。

关键词: 溃口堤段; 破坏机理; 渗流出口; 抗渗强度

中图分类号: TV 871

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)05-0557-06

作者简介: 吴昌瑜, 女, 1949 年生, 教授级高工, 长江科学院土工研究所所长, 主要从事岩土工程渗流及控制研究。

WU Chang-yu, DING Jir-hua

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: A comprehensive research has been made on mechanism of Jiujiang dike failure in 1998 by investigation, exploration and various soil tests. The influence of each factor on the failure has been analyzed and some conclusions are derived. Besides, the importance of protection for inner side of dike during and after flood season has been studied as well.

Key words: dike break; failure mechanism; seepage exit; strength against seepage

1 引言^y

1998 年, 长江流域发生了历史上罕见的特大洪水。长江中下游地区超警戒水位达 60~90 d, 流域内河堤发生了数以万计的险情, 其中最危险的是堤防溃决, 这类险情发展迅猛、危害巨大。1998 年江西九江市堤、湖北牌洲湾、孟溪垸和湖南安造垸等重要堤段发生了溃堤, 由于溃堤在瞬间发生, 附近居民来不及防范或撤离, 损失特别严重。为了防止此类灾害再度发生, 找到正确合理的预防和抢险措施, 有必要对这类险情的破坏机理进行深入的探讨。为此, 本文对险情最严重、影响最大的九江市堤防溃口进行了研究。

2 溃口段基本情况及分析

2.1 背景条件

1998 年 8 月 7 日, 九江市长江干堤[#]4~[#]5 闸口间的堤段发生了溃口险情(溃口段平面图见图 1)。溃口宽度达 62 m, 是 1998 年重大险情之一。

对于溃口段的总体情况, 长江委于 1998 年 11 月会同有关单位进行了调查。由于时间滞后和情况变化, 难以得到溃口当天准确完整的现场资料, 但对于堤段的基本状况和溃口的过程有了一定的了解, 具体汇总如下:

(1) 溃口堤段兴建于 1968 年, 1998 年以前未发生过重大险情, 但每年汛期下游坡脚渗水较严重^[1]。

(2) 1996 年在堤外兴建一座码头时, 修建围堰挖开了上游堤脚的覆盖层, 深达 3.7 m, 回填材料含有块石等强透水材料, 未曾恢复地表原状。

(3) 1998 年江西段长江干堤在溃堤前已经历超警戒水位 45 d, 最高水位 23.03 m(1998 年 8 月 2 日), 溃口时江水位 22.87 m(1998 年 8 月 7 日)。

(4) 溃口发生前该堤段下游坡后有较多杂草和菜地, 无法观察高水位期间堤坡堤后地表变化以及险情发生前的渗透变形迹象。

(5) 堤后有一污水塘, 距堤脚 2~20 m, 原为永安河故道, 塘水位不详。根据地形条件和当时塘水需抽排入江的情况, 估计不低于 18.2 m, 不高于 19 m。

(6) 首先被居民隔塘发现险情的堤段部位为堤防下游坡脚处, 当时该处出现了 3 个冒水泉眼, 流水声响亮, 水柱高约 20 cm, 孔径不详。1 h 后堤顶塌陷, 出现 2 m 左右大坑, 随后发展为溃口。

(7) 堤防没有发现白蚁和其他有害生物。

(8) 勘探资料和溃口前后水下地形测量表明^[2]: 该堤段处于凹岸, 外滩有较薄的粘性淤积覆盖层, 厚约 0.7~1.0 m。溃口上游侧和下游侧的探槽和钻孔揭示, 堤身填土为砾质和粉质粘土, 密实度不均匀, 渗透性较弱。堤身与原地面结合处有不连续的粉质壤土层, 密实度也很不均匀, 其下部为堤基粉质粘土。整个

^y 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50099620)

收稿日期: 2000-11-27

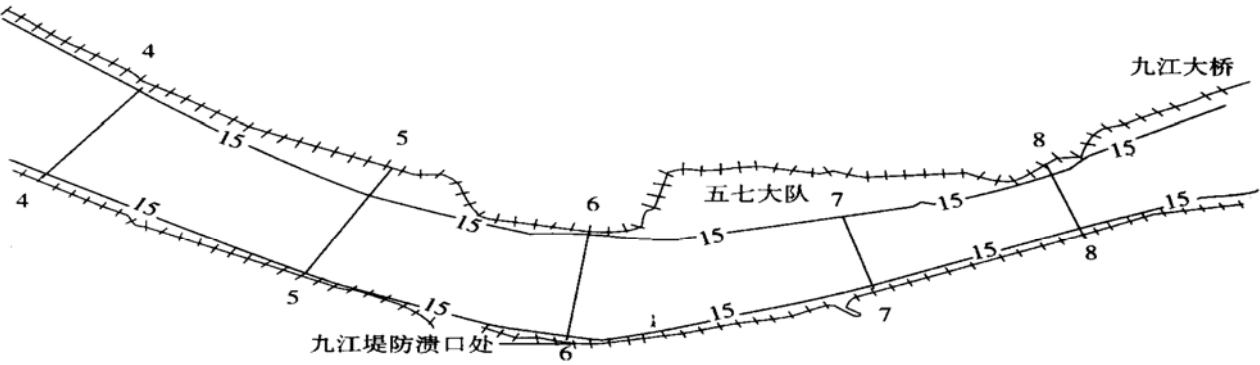


图 1 九江市防洪堤溃口段平面图

Fig. 1 Broken section of Jiujiang city dike

弱透水层厚度约为 12 m, 在弱透水层下部为渗透性较强的砂、砾、卵石层, 见图 2、3。

2.2 土工试验及成果

依靠溃口段两侧的探槽和钻孔取出一定量的原状土样, 进行了土的物理力学试验、渗透变形试验、土的冲刷试验和矿物化学分析, 以便了解该堤段土的工程特性并进一步了解堤防溃口的内在原因。取样位置、试验项目及成果见图 2、图 4 和表 1~ 4^[3,4]。

表 1 取样及试验安排一览表

Table 1 Sampling and testing arrangement

编号	土类	取样地点	高程 /m	自堤顶下深度/m	试验安排
jx1	粉质粘土	下游槽	18.00	6.10	常规土工试验
jx2	中粉质壤土	上游槽	19.40	4.47	常规土工试验
jx3	砾质粘土	上游槽	23.37	0.50	常规土工试验
jx4	粉质粘土	上游槽	19.95	3.92	渗透变形试验
jx5	中粉质壤土	上游槽	19.40	4.47	渗透变形试验
jx6	中粉质壤土	上游槽	19.40	4.47	冲刷试验

表 2 土样力学指标

Table 2 Mechanical properties of sample

试样编号	压缩系数 /MPa ⁻¹	粘聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
		固结快剪	慢剪	固结快剪	慢剪
jx1	0.272	9.3	17.4	29.0	30.3
jx2	0.350	10.5	23.0	31.3	31.7

表 3 渗透系数试验成果

Table 3 Results of permeability tests

土样	试样号	干密度 / (g·cm ⁻³)	渗透系数 k_{10} / (cm·s ⁻¹)	备注
jx1	试样 A	1.48	1.38×10^{-5}	土工试验成果
	试样 B	1.48	6.54×10^{-4}	
jx2	试样 A	1.43	1.39×10^{-4}	土工试验成果
	试样 B	1.43	1.00×10^{-3}	
jx4	试样 A	1.48	8.81×10^{-4}	渗透变形试验成果
	试样 B	1.48	4.70×10^{-3}	
jx5	试样 A	1.43	2.62×10^{-3}	渗透变形试验成果
	试样 B	—	2.72×10^{-4}	

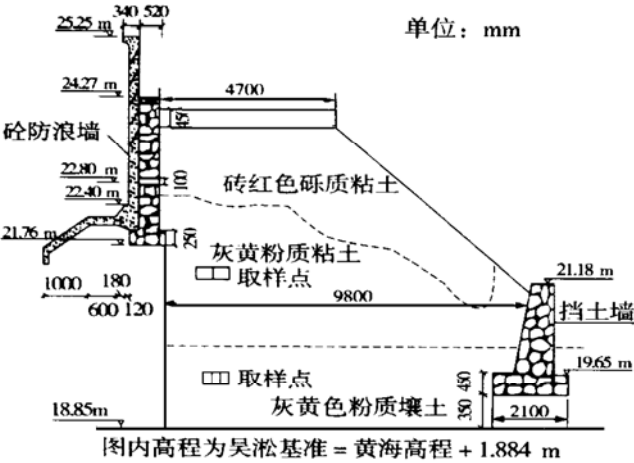


图 2 九江大堤溃口上游探槽地质剖面示意图

Fig. 2 Geologic profile of the dike

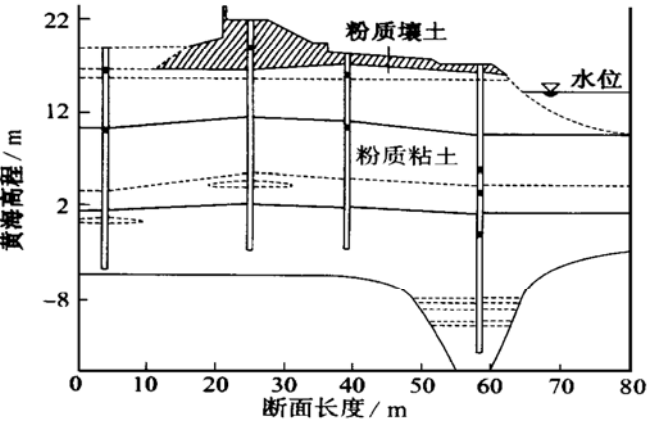


图 3 7-7 工程地质剖面示意图

Fig. 3 Geologic profile of section 7-7

(9) 堤防下游面设有浆砌块石挡土墙, 其渗流和工程性能目前尚无设计和竣工资料可查。调查发现, 墙体内部不密实, 但墙体下游面勾缝严密, 溃口时墙表面无漏水现象。挡土墙底部与堤基结合不紧密, 夹有一层较薄的粉质壤土层直至下游坡面, 上游槽至下游槽土层厚度为 0~ 35 cm, 位于最先发现出险的部位。

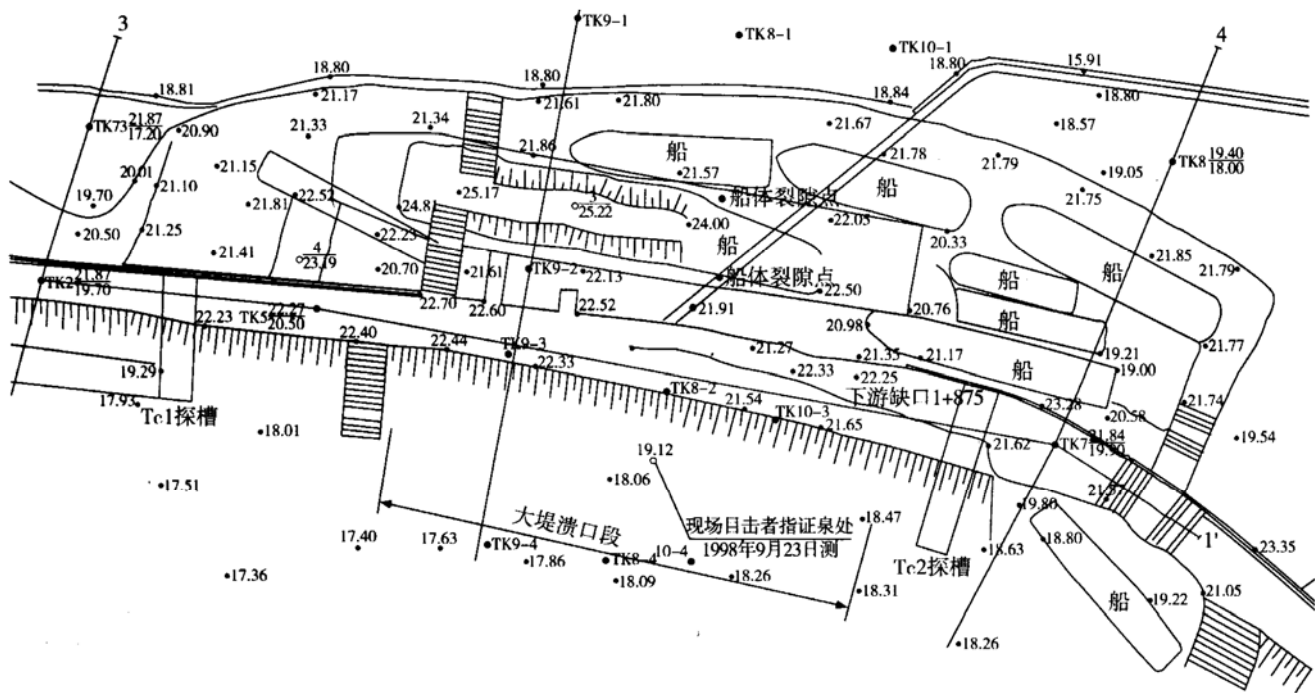


图 4 九江大堤溃口段勘探及取样位置布置图

Fig. 4 Arrangement of exploration and sampling on the broken section

表 4 堤基 堤身土的渗透系数与破坏比降试验成果

Table 4 Results of permeability and failure gradient tests on dike body and foundation

试 样	土 类	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		渗透变形			试验单位
		k_{10}	k_{20}	临界比降 J_{cr}	破坏比降 J_f	破坏型式	
堤身土	jx4 粉质粘土	8.81×10^{-4}		4.16	5.18	局部流土	长科院
		4.70×10^{-4}					
			1.89×10^{-4}	9.198	11.91	流土破坏	南科院
堤基表层	jx5 粉质壤土		5.08×10^{-4}	0.779	1.199	流土破坏	南科院
		2.62×10^{-3}		0.99	1.22	局部流土	长科院
		2.72×10^{-4}					
堤基土	jx1 粉质粘土	1.01×10^{-5}		10.114	12.852	流土破坏	南科院

从表 2 可以看出,堤身的土料具有较高的力学指标。表 3 表明:两种土料的渗透性都不均匀,同一取土点的土样在同样的干密度条件下,渗透系数相差较大。

从表 4 可以看出,堤身和基础的土料均属于流土类土,其中粉质粘土的临界比降和破坏比降远大于粉质壤土的测值,表明该段粉质粘土的抗渗强度远大于后者。

土的矿化分析结果表明:土样的易溶盐及有机质含量均不高,用作堤防填筑土料是适宜的。另外,冲刷试验结果表明:粉质壤土的冲刷启动流速为 3.54 cm/s ,意味着有裂缝或不利接触面的粉质壤土土体易于形成冲刷变形。

通过对资料的分析,溃决原因可初步判断如下。

(1) 地形测量显示该段堤防处于凹岸,江滩有落淤,表明汛期长江对岸坡没有特别的淘刷作用,可排除溃口原因为江水动力淘刷引起的破坏。

(2) 九江堤防土体的矿化分析指标和抗剪强度指

标表明,土质条件较好,且下游堤坡设有浆砌块石挡土墙,正常条件下,堤坡不易产生强度破坏,由此可排除溃口原因为堤身剪切失稳引起的破坏。

(3) 由于没有生物迹象,可排除溃口原因为生物造成的堤防结构性缺陷而引起的破坏。

(4) 试验表明,该堤段堤身填土不均匀,上游槽粉质粘土试样与下游槽同类土试样的渗透系数相差 10 倍以上。堤基与堤身之间的粉质壤土薄层除了层厚和渗透性分布不均匀外,其渗透系数大于粉质粘土,抗渗性能低于粉质粘土,并处于堤防最敏感的出逸段,因此在堤防整体结构中是工程性质最差并可能产生渗透变形的土层。可见这段堤防在渗透稳定方面确实存在薄弱环节。

3 渗流计算

勘探和试验成果将溃口原因集中到渗透破坏方

面。采用数学模型, 分别对 1998 年汛期江水位作用下, 渗流运动对堤防溃口的影响, 以及渗流运动的每一环节 堤防的每一组成部分对溃口发生所起的作用进行了分析, 得出了结论。

3.1 渗流计算模型

由于堤防的形状和受力条件大体上呈二维特性, 取其典型段面采用二维有限元模型进行模拟。同时, 针对九江堤防从 1998 年 6 月即开始抵御高洪水位的现状, 将模型考虑为稳定、饱和渗流状态进行研究, 控制方程为典型的拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) = 0$$

边界条件为

$$h|_{\gamma_1} = H(x, y), \text{ 给定水头边界(I 类边界)}$$

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\gamma_2} = -q(x, y), \text{ 给定流量边界(II 类边界)}$$

3.2 计算参数及边界条件确定

计算参数及边界条件的确定对成果的合理性至关重要。由于现有资料的局限, 计算通过有针对性的敏感分析和反馈分析来模拟溃口时的堤防状态, 分析的依据主要是地勘资料、土工试验成果和调查收集的溃口现象。基本考虑如下:

(1) 溃口段渗流剖面的几何形状依照地勘资料和调查资料给出, 见图 2。上游入渗边界的作用水头按实测资料分别取汛期最高水位 23.03 m 和溃口时水位 22.87 m。为了解其他水位的影响, 也考虑了较低的汛

期水位 22.00 m 和 21.38 m 来依次进行计算。另外, 经资料分析将水塘取为下游边界, 水位取为 19.00 m, 并采用不同的江滩形状模拟上游边滩开挖后的影响。

(2) 堤身浸润线通过迭代计算求得, 即按 II 类边界处理, I 类边界校核, 直至满足计算精度要求(误差小于 5 mm)。

(3) 各土层渗透系数的取值见表 5, 表中按土工试验结果采取了堤身粉质粘土、粉质壤土和下游挡土墙的渗透系数及其不同组合, 以便分析造成溃堤的条件及其必然性。

3.3 堤防坡脚渗透稳定性判断

渗透稳定性判断采用安全比降法, 以土层出逸点渗透比降 J 小于或等于土体允许比降 J_0 作为安全标准。若 $J > J_0$, 即认为土体将产生渗透变形, 失去渗透稳定性, 表达式为

$$J \leq J_0$$

其中 $J = \Delta H / \Delta L$ 。在本项研究中, 按照坡脚土体中性质最差的粉质壤土的临界、破坏比降试验结果对堤坡渗透稳定进行判断。

4 计算结果与分析

通过数十个方案的计算比较, 逐步缩小研究范围, 最后采用的计算方案见表 5, 计算结果见表 6(以挡土墙底部与堤基相交点 A 的出逸比降为主), 部分方案的渗流场等势线分布见图 5, 对于研究方案的考虑和计算成果的分析简单叙述如下。

表 5 九江溃口段渗流计算方案

Table 5 Seepage analysis of the broken section

方案	上游水位 /m	其他条件	混凝土防	堤身粉质	堤基粉质	地基粉质	下游挡土墙		堤基粉细	挡土墙下
			渗墙 k_1	粘土 k_2	壤土 k_3	粘土 k_4	k_5	k_6	砂 k_7	薄层厚度
			$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	/cm
1	23.03	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-3}	13
2	23.03	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	23
3	23.03	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	13
4	23.03	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
5	23.03	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	4
6	22.87	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
7	22.87	开挖	2×10^{-7}	8.81×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
8	22.87	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	4.70×10^{-4}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
9	22.87	未开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
10	22.87	未开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
11	22.87	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	2.62×10^{-3}	2.62×10^{-3}	1.00×10^{-3}	8
12	22.00	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8
13	21.38	开挖	2×10^{-7}	4.70×10^{-4}	2.62×10^{-3}	1.38×10^{-5}	4.70×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-3}	8

下游水位取 19.00 m。

表 6 九江溃口段渗流计算成果

方案	出逸点高程 /m	墙脚 A 处	
		垂直比降	水平比降
1	20.23	0.11	1.08
2	19.88	0.11	0.72
3	20.28	0.11	1.10
4	20.66	0.10	1.54
5	21.21	0.08	2.38
6	20.58	0.09	1.48
7	20.96	0.11	1.76
8	20.21	0.21	2.62
9	20.55	0.09	1.44
10	20.41	0.09	1.33
11	19.55	0.04	0.69
12	20.08	0.08	1.14
13	19.70	0.05	0.76

(1) 堤防溃口的必然性

计算中根据试验结果的合理范围选取各种参数进行模拟计算，均得出了墙脚 A 处出逸比降 $J > J_0$ 的结果，证明了堤防溃口的原因主要由渗透破坏引起。

(2) 下游出口段的影响

考虑到挡土墙下游面勾缝严密，对墙体出口部位的渗透性分别采用 10^{-5} 和 10^{-6} cm/s 的假定。计算结果显示，两方案墙脚处承受的水平出逸比降均超过粉质壤土的临界比降，表明挡土墙段采用弱透水的下游面对堤防整体的渗透稳定性不利，其渗透性只要大于挡土墙的 10 倍或以上，就会造成较大的出逸比降，见方案 1, 3。

(3) 粉质壤土及其层厚的影响

方案 6 与方案 8 比较了粉质壤土可能的渗透性变化。计算显示各方案墙脚出逸比降均大于粉质壤土的临界比降，表明在其他不利因素的共同作用下，该土层具备了发生渗透破坏的条件。同时，该处粉质壤土由于抗渗性差，其透水性较低者更为不利。

根据上下游探槽揭示的地层情况，方案 2 至方案 5 比较了粉质壤土层各种可能的厚度(4~ 23 cm) 对坡脚渗透稳定的影响。结果表明该处水平出逸比降随薄层厚度的减小而增大，数值为 0.72~ 2.38，除层厚度为 23 cm 时接近坡脚土临界比降外，其余均大于临界比降，部分值甚至超出了破坏比降。表明挡土墙底部有粉质壤土薄层，而且该层土在墙脚后又有下游临空面存在，为渗透破坏的发生提供了便利条件。

(4) 堤防土体和填筑的影响

计算时采用试验资料中渗透系数的较大值来模拟堤身粉质粘土填筑差的情况，得到的坡脚出逸比降为 1.76，大于填筑密实时的结果 1.33，同时也超出了土体破坏比降，见方案 6 与方案 7，即堤身填筑不密实增加了堤防整体的不安全性。

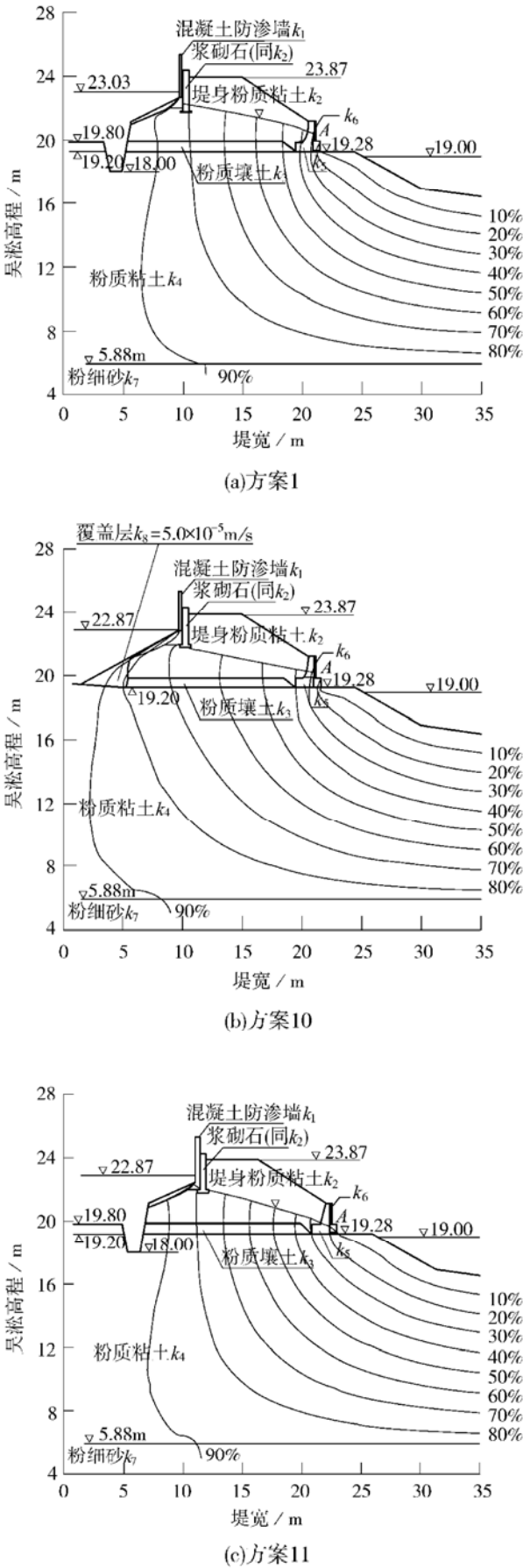


图 5 部分方案渗流场等势线分布图
Fig. 5 Distribution of equipotentials

(5) 外江水位的影响

方案4与方案6比较了溃口时江水位与1998年最高水位的影响,所得到的坡脚出逸比降分别为1.48和1.54,均超过了粉质壤土的破坏比降,表明溃口段的土层结构和渗流进出口状况难以抵御1998年居高不下的江水位条件。与调查结果“每年汛期下游坡脚渗水较严重”也是相吻合的。

方案12和13比较了其他汛期江水位的影响。当考虑江水位为22 m时,出逸比降为1.14,大于坡脚土体的临界比降。当江水位采用21.38 m时,出逸比降为0.76,接近其临界比降。表明当汛期江水位超过21.5 m且持续时间较长时,溃口堤段渗透稳定性就会受到较大的威胁。

(6) 上游堤脚开挖的影响

方案9与方案10模拟上游坡脚未遭改变时可能的天然形状。与外滩开挖而其他条件相同的方案6计算结果相比,天然条件下的下游坡脚出逸比降均小于开挖后的情况,表明上游江滩开挖后未予以复原加固,加剧了堤防的不安全。

(7) 该堤段的除险加固

为了找到有效的除险加固途径,方案11研究了在堤防下游面增加排水反滤结构而其他条件不变的情况,即假设挡土墙下游部位渗透性为 10^{-3} cm/s 。计算表明:在此情况下,下游坡脚的出逸比降为0.69,堤防的渗透稳定基本得到了保障。此外,专门的粘性土裂缝自愈试验也表明^[5,6]:对下游出口采用本身渗透稳定且满足反滤原则的材料加以保护,可提高出逸部位抗渗强度两倍以上。这一措施施工方便,效果明显,表明从下游面减轻和消除险情是有可能的。该结果也同时说明,即使在原有不利条件下,如能及早发现堤后的渗透变形迹象,及早采取排水反滤措施,削减渗透水头,防止土粒大量流失,保住大堤是有可能的。

5 结 论

(1) 对溃口堤段采用二维稳定饱和流有限元计算,按勘察资料及土料特性试验成果对相应边界和土层渗透性参数进行选取,得到的计算结果与实际状况相吻合,表明试验成果、计算模型和参数的选取范围是合理的,计算结果可信。

(2) 通过分析归纳出溃口原因以及溃口堤段各组成部分对堤防溃决所起的作用:挡土墙下部的粉质壤土土层厚度小、抗渗强度低,是导致堤防溃口渗流破坏的首发部位和通道;下游挡土墙出口段渗透性低,增大了出口处的渗流力,影响了堤防整体渗透稳定;堤身粉

质粘土填筑质量差和上游坡脚开挖后未予以复原加固,加剧了堤防的渗透变形。另外,高水位持续时间长且超过21.5 m后,受这些不利因素的综合影响,堤防下游坡脚的出逸比降逐渐接近和超过临界比降,使该处首先发生渗透变形;由于得不到及时加固和治理,随着江水位的继续增高,土体流失量逐渐增多,渗透变形范围渐渐向堤内发展,逐渐形成渗漏通道,直至堤身出现空洞,引起上部塌陷、整体失稳以至溃决。

(3) 在汛期,因堤防下游部位渗透变形而造成局部渗透破坏的现象应引起高度重视。有效的抢险方法是“上堵下排”,随意挖掉上游保护层或堵住下游出逸面都是不可取的。这一点在现实中往往受到忽视,对于如何处理堤防下游部位更是缺乏认识。当汛期堤防上游侧难以保护时,及时做好下游渗流出口的导渗、反滤也能收到显著效果。

(4) 在汛后堤防加固中,改善下游的出口状况应得到充分的重视。研究表明:即使像九江溃口段的堤身和江水位条件,在改变下游出口段的结构和渗透性后,坡脚承受的出逸比降也可显著降低,使堤防由渗透破坏转化为渗透稳定。这种措施易于实现,成本较低廉,其恰当的材料和结构形式应予深入研究。

(5) 研究中的一些假定,如溃口段上游边界开挖前后的准确形态、下游挡土墙的渗透性参数等,是根据推断而采取的。作为溃口研究是有效的,总体上不会偏离问题的本质,但与实际会有一定出入。另外,计算条件不可能精确重现溃口段的种种原貌,勘察和试验工作的深度也有所局限,特别是计算采取稳定流模型带来的误差,均有待于今后在类似的研究中得到完善。

九江市堤溃口调查工作是在长江水利委员会成昆煌副总工程师的领导下完成的。参加试验工作的还有余建平、王满兴、孙厚才、许季军、丁红顺等,在此深表感谢。

参考文献:

- [1] 市区防洪工程设计说明(0+000~2+911.5)[Z]. 九江:九江市水利设计院,1995.
- [2] 徐福兴,等. 九江城防溃口段地质勘察说明[R]. 武汉:长江水利委员会综勘局,1998.
- [3] 余建平,等. 九江市长江干堤98'溃口段土工试验说明[R]. 武汉:长江科学院土工研究所,1998.
- [4] 姜树海,等. 渗透系数和渗透变形试验说明[R]. 南京:南京水利科学研究院水工研究所,1998.
- [5] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [6] 吴昌瑜. 王甫洲水利枢纽土坝渗流研究报告[R]. 武汉:长江科学院,1989.