

日本阿武隈川的洪水灾害及其综合治理

朱 伟¹, 山村和也²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098; 2. 日本大学, 日本千葉 275 - 8575)

摘要 通过日本阿武隈川的洪水灾害及其综合治理的实例, 阐述日本在防洪整治方面的经验. 在讨论了引起洪水灾害的主要原因后, 对以河堤加固为主的各种方案进行了分析. 对于防洪整治的技术难点——地基防渗问题, 重点进行了分析和探讨.

关键词 洪水灾害 综合治理 河堤加固 地基防渗 渗流 有限元分析

中图分类号 P343.1;TV87 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)01-0061-06

阿武隈川是横跨日本福岛和宫城两县的河流, 干流长 239 km, 在 1966 年被日本建设省指定为一级河川(图 1). 阿武隈川拥有 5 400 km² 的流域面积, 高水位时的流量, 在上游福岛地区为 7 000 m³/s, 在下游的岩沼地区为 10 700 m³/s. 由于阿武隈川拥有多达 196 条的支流, 而且具有较为陡峻的水力坡降(1/1 000 ~ 1/2 000), 所以洪水的形成具有快而猛的特点, 在历史上曾多次造成洪水灾害.

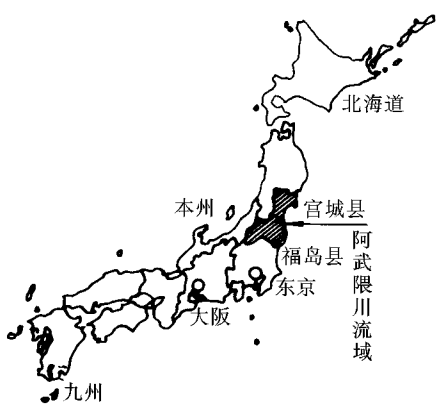


图 1 阿武隈川流域的地理位置
Fig.1 The geographic position of the Abukumagawa River

1998 年 8 月阿武隈川再次发生洪水灾害, 造成了较大规模的经济损失. 在近几年日本发生的洪水灾害中, 阿武隈川的洪水灾害规模较大, 引起了政府的重视. 因此, 国家动用特别财政, 启动了阿武隈川综合治理工程.

本文通过阿武隈川洪水灾害及其综合治理工程的实例, 对洪水灾害的原因进行了分析. 在对综合治理工程的整体作了介绍以后, 对堤防加固方案进行了技术性探讨. 针对地基防渗这一技术难点, 通过有限的渗流分析, 对各种方案的技术效果进行了研究, 其中的一些经验可为我国的洪水整治工作提供参考.

1 1998 年 8 月阿武隈川的洪水灾害

1998 年 8 月底, 4 号、5 号台风在日本相继登陆, 受其影响, 在阿武隈川上游和中游发生了暴雨. 在 8 月 26 日 ~ 9 月 1 日之间最大降雨量达到 1 269 mm(真船观测所), 各支流水位相继上涨, 多数支流超过了历史最高水位. 此后, 干流水位上涨, 在中上游福岛县内发生了各种类型的洪水灾害.

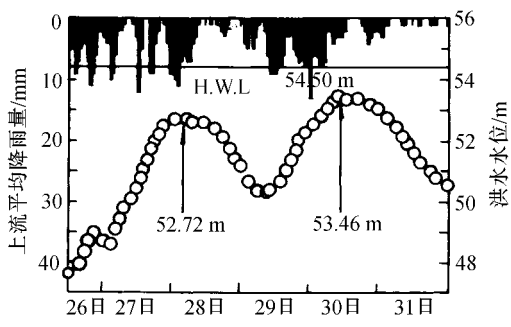


图 2 8 月份福岛地区的洪水以及降雨
Fig.2 Flood and rainfall of the Fukushima district

福岛地区的降雨和洪水水位的状况见图 2. 此次洪峰分两次, 共持续将近 5 d, 第 2 次洪峰水位接近设计高水水位. 在这期间, 上游的平均降雨量达到 457 mm, 福岛地区也降雨 314 mm. 除大量的降雨造成内涝以外, 河堤遭受到各种各样的破坏. 按照破坏类型和地点可将其总结为图 3. 在这次洪水中,

虽然干堤没有发生决堤,但是支流的杉田川发生两处漫溢,荒川由于淘刷崩岸而造成了决堤.另外,在无堤地段洪水漫溢,支流和干流的汇聚处普遍发生了浸水.干堤的破坏主要表现为地基渗漏,在 10 km、80 km 前后地段多处发生了管涌,喷砂现象.另外,由于洪水的冲刷造成多处河堤损坏.在背水坡虽然发生几处滑坡,但其规模较小,未能影响河堤整体的稳定性.

洪水发生后,管辖阿武隈川上中游地区的建设省福岛工事事务所立即成立了抢险指挥部,组织各方人力、物力对危险地段进行了抢险工作.根据笔者的不完全统计,共出动 3 600 多人次.参加者以水防队、自卫队为主,加上部分本地的协力企业.必须指出,由于日本纯农业人口极少,居民的抗洪抢险意识淡薄,当地居民参加抢险工作者只有寥寥数十人.在这一意义上,从人力来讲,日本社会无法动员大量人员进行抗洪工作.但在设备上,出动了大量的排水泵车、砂袋充填车、照明车,各种作业车、卫星通讯车和指挥车发挥了一定的作用.通过抗洪抢险活动,排除了一些由于管涌、冲刷所造成的险情.

根据日本官方的统计,在福岛县由这次洪水所造成的人身和财产的损失见表 1.除此之外,对各种农业、林业设施所造成的损失达到 821 亿日元(约合 55 亿元人民币).

从阿武隈川的洪水灾害可以看出,在日本的高度经济发展的反面,都市和居民对洪水灾害的承受能力大大下降,洪水一旦泛滥就会给社会带来巨大的损失.

2 阿武隈川的综合治理工程

阿武隈川的洪水灾害发生以后,日本政府动用特别财政,在福岛县辖区内共投资 800 亿日元(约合 53 亿元人民币),启动号称‘阿武隈川平成的大整治’的综合治理工程.这一项目由建设省福岛工事事务所实施,预定在 2 年内完成整个整治工作.

建设省福岛工事事务所对于工程的实施提出了三项基本方针:

a. 采用综合措施,从根本上治理洪水.根据这次洪水灾害中出现的各种问题,采用新筑堤、建设大型泵站方法,设立移动泵车并对部分河床进行清淤处理,解决漫溢和排涝的问题.加固河堤以解决河堤渗漏、地基渗漏以及滑坡的问题.增加护坡,提高河堤的抗冲刷、抗淘刷的能力.到目前为止,初步制订的工程内容见表 2.各种对策的实施地段和地点见图 4.

b. 推行具有防洪能力的都市建设.在市区内设置避难地域,制作明记避难地和避难路线的防灾地图,向各家各户发放.导入高度情报系统,以便及时掌握灾害状况,迅速有效地指挥、组织抗洪工作.加强水防团的建设.

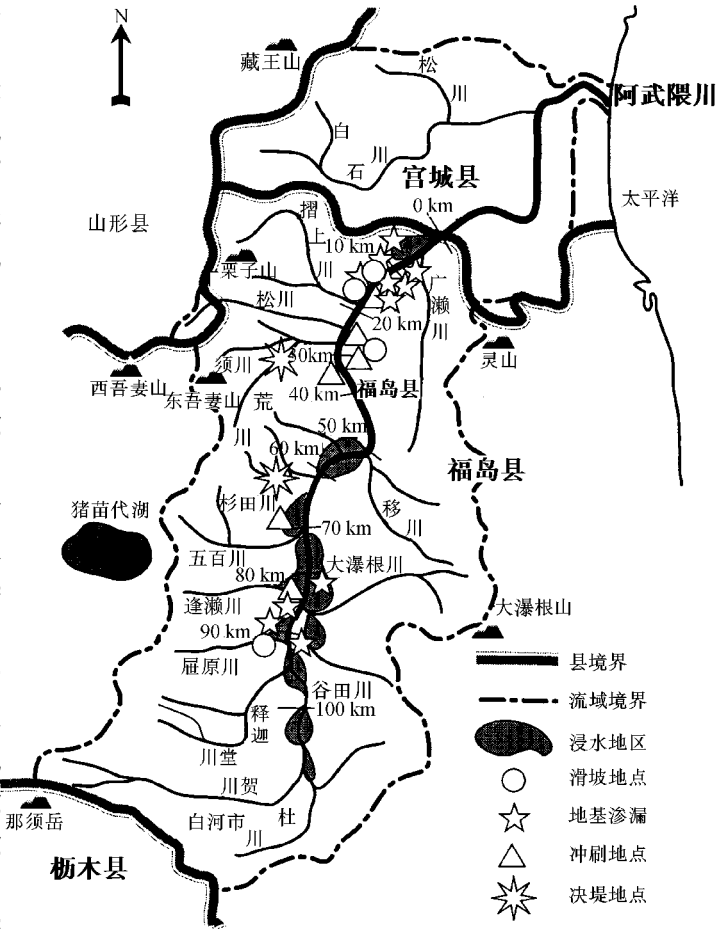


图 3 阿武隈川流域以及洪水灾害

Fig.3 The Abukumagawa River basin and flood disaster

表 1 灾害状况一览表

Table 1 The list of disaster situation

人身灾害/人		住宅灾害/幢			其它建筑/幢	
死亡	受伤	全毁	半毁	破损	浸水	浸水等
11	19	31	44	165	3 782	34

表 2 阿武隈川洪水灾害综合治理主要内容

Table 2 Main contents of countermeasures for Abukumagawa River fold disaster

目的	内容	数量
漫溢对策	新筑堤防	13 km
	水车站	3 个
渍水对策	水泵车	6 台
	堤防加固	28 km
渗漏-滑坡综合对策	护坡	约 200 处

c. 创造美观自然的沿岸环境 :为了美化阿武隈川的沿岸环境,新设的混凝土护坡全部使用表土进行覆盖,并加以绿化.积极导入多自然型工法,维护河岸的自然面貌,并分区设置水边公园,以便于人们尽情享受河川的自然风光.

概括阿武隈川综合治理工程的特点,可以发现两点:一是不但从技术上采用了河堤加固等整治措施,也积极地从组织上、意识上提高城市的抗洪能力;二是最大限度地考虑了各种环境问题,重视河川景观的建设.

在这一治理工程的技术问题中,河堤的加固问题非常关键,建设省福岛工事事务所设立了各种技术委员会,组织全国专家对技术问题进行讨论,最终选定处理方案.

3 阿武隈川的堤防及其加固

3.1 阿武隈川堤防以及地基的概况

阿武隈川堤防的标准断面和地基条件见图 5,一般来说堤高在 6 m 左右,边坡为 1:2.堤身多由细-中砂组成,在部分地段夹杂着一些碎石.阿武隈川堤防的堤基一般为双层地基,表土层为透水性较差的粉砂土层,下卧强透水的冲积砂砾层,再下面是洪积砂砾层(其透水系数是冲积砂砾层的 1/10 左右).在一些地段,冲积砂砾层中存在 1 m 左右的粘土质夹层.另外,也有一些地段不存在表土层,或者表土层较薄.阿武隈川堤防边坡较陡,堤身和堤基的透水性较大.

3.2 阿武隈川堤防加固方案

根据这次洪水中堤防所出现的问题,河堤的加固以堤身防渗、地基防渗和临水坡面防冲刷为主要内容.对日本的现有加固技术进行比较,根据地基条件,初步拟定 3 种方案(图 6).

首先是堤身的加固,根据堤身透水性大,边坡较陡的特点,在临水坡采用双层土工膜防渗并结合抗冲刷措施,在其上部设置混凝土护坡.为了绿化堤防环境,在护坡的上部进行培土处理,既能放缓边坡到 1:3,也能够保证表层植物生长的环境.

相对来讲,地基防渗透加固的方案比较复杂.考虑到堤基变化多端的地层条件,根据其特点,用三种方案逐次对应.如果在强透水的冲积砂砾层内存在 1 m 以上的粘土夹层,就采用钢板桩防渗墙对地基进行防渗处理(第一方案).如果没有粘土夹层,或者粘土夹层太薄的话,就用钢板桩防渗墙延伸到洪积砂砾层内(深度达到 10~13 m).如果实施这一措施后未能达到临界比降 $i_c < 0.5$ 的条件的话,再在背水坡脚设置排水层,进行减压(第二方案).如果表土层下卧弱透水的粘土层,就只设置排水层(第三方案).

3.3 阿武隈川堤防加固中的问题点

阿武隈川综合治理工程的关键在于加固堤防,而地基防渗问题则成为最大的技术难点,这是因为阿武隈

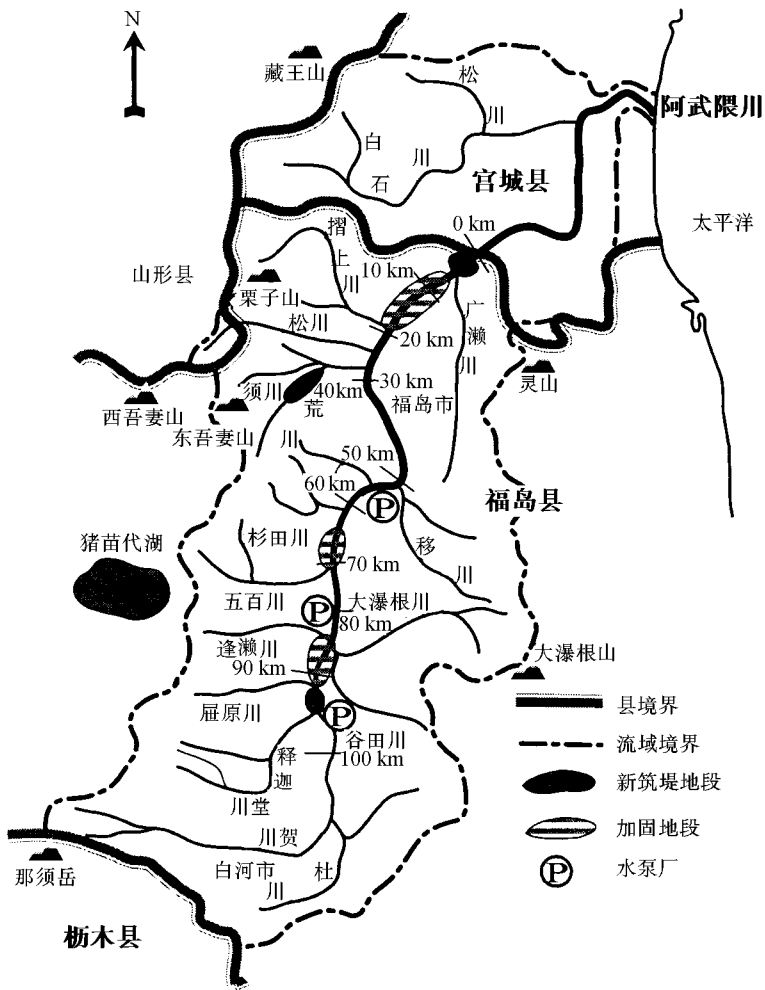


图 4 阿武隈川洪水灾害综合治理计划

Fig.4 The plan of countermeasures for Abukumagawa River flood disaster

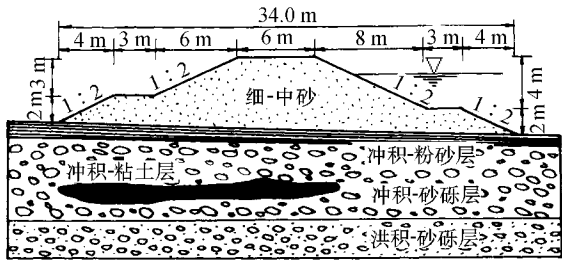


图 5 阿武隈川堤防的标准断面和地基条件

Fig.5 Standard cross section and ground condition of Abukumagawa River embankment

川的河堤地基存在着以下的特点：

- a. 表土的透水性较大,厚度较小.与日本的其它发生强烈地基渗漏的河川相比较,表土不是难透水的粘土层,而是透水系数均为 $5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 的粉砂层,其厚度在 1 m 左右.
- b. 初期的地下水位较深.由于旧河道等古地貌的影响,除局部地段地下水较浅,其余一般均在地表下 3~4 m 左右.
- c. 在大多数地段,地基中没有好的遮水层.洪积砂砾层虽然只是冲积砂砾层透水系数的 1/10 左右,但仍然具有 $3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的较大的透水系数.
- d. 洪水的持续时间比较短.由于地势的缘故,阿武隈川的洪水持续时间比较短.历次洪水多在 2~3 d 内回落,而本次洪水因为具有两次洪峰,其持续时间达到了 4~5 d.

由于这些特点,这次洪水时虽然发生了多数管涌等地基漏水现象,但其规模和危害程度都相对较小.据此,产生了是否需要采用造价较高的钢板桩防渗墙进行治理的问题.由于这次加固工程的预算较足,加上小规模渗漏也不能允许的治理方针,最终选用了钢板桩的方案.但这一方案在经济方面留下了一定的疑问.另外,由于地基缺少好的隔水层等问题,钢板桩防渗墙是否能够达到彻底解决地基渗漏的预期效果,也就成了一个重要的技术问题.

4 地基渗漏的防治及其效果分析

为了分析各种地基条件下渗漏的发生机制和钢板防渗墙的效果,在此进行了有限元的渗流解析.

4.1 有限元分析的基本条件

有限元的渗流分析采用了可以同时考虑降雨和洪水渗透的饱和-非饱和计算法^[1].有限元分析的网格见图 7.除河堤以外,考虑下部的表土、强透水的冲积砂砾层以及作为隔水层的粘土层或洪积砂砾层,并可根据计算的需要改变表土和隔水层的厚度及透水系数.另外,考虑到广范围内地下水对渗流的影响,将计算范围扩大到背水侧前方 100 m 处.各地层的透水系数以及反映非饱和领域水分移动特征的 Van Genuchten^[2] 参数见表 3.钢板桩防渗墙的透水系数是将其换算为厚 1 m 的土体时的数值.有限元计算分两个阶段:第一阶段进行稳定流计算,目的是为了得到洪水前期河堤以及地基的初始水分值以及地下水的位置,降雨强度使用湿润期平均渗透强度(4.5 mm/d)^[3].第二阶段进行非稳定流计算,作用外力采用图 2 所示的洪水和降雨.根据渗流计算可以得到等势线的分布,并根据坡脚表土层底板下的承压水头,进一步掌握局部渗透比降.

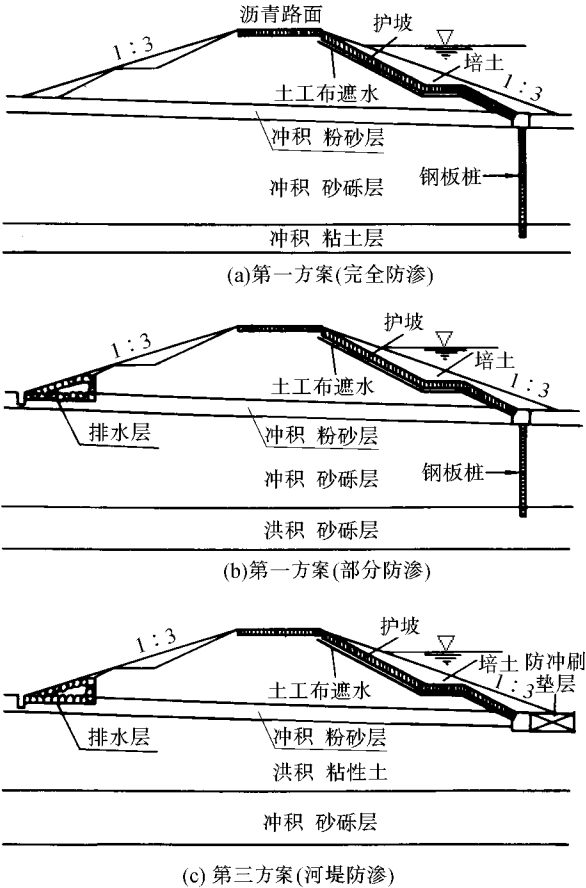


图 6 阿武隈川堤防的三种加固方案

Fig.6 Three methods of reinforcement of Abukumagawa River embankment

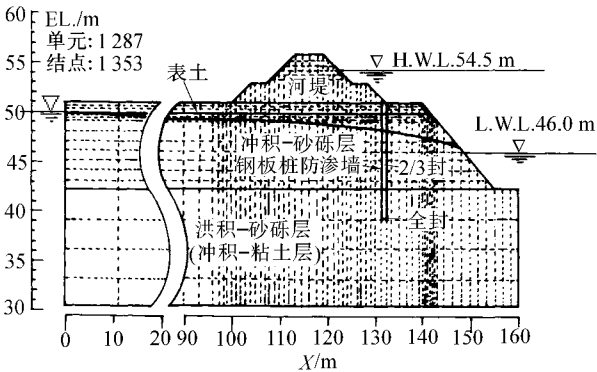


图 7 有限元解析网格及条件

Fig.7 Mesh and condition of the finite element method analysis

表 3 阿武隈川河堤以及地基的渗透特性

土性		透水系数	VG 模式的参数		
		$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	α/cm^{-1}	n	θ_s θ_r
筑堤土		1.0×10^{-3}	0.020	3.0	0.50 0.05
钢板桩防渗墙		5.0×10^{-4}	0.010	2.0	0.55 0.10
地基	表 土	5.0×10^{-4}	0.010	2.0	0.55 0.10
	冲积砂砾	4.0×10^{-2}	0.150	5.0	0.35 0.00
	洪积砂砾	3.0×10^{-3}	0.150	5.0	0.35 0.00
	冲积粘土	1.0×10^{-5}	0.008	1.0	0.60 0.15

4.2 地基渗漏及其影响因素

为了选择可靠的渗漏防止方法,首先需要搞清地基渗漏的机制.阿武隈川河堤地基表土透水性较大,地下水较深,明确这些特点对管涌发生的影响,对防渗工程的成功与否是很重要的.

4.2.1 地下水位的影响

在第一阶段的渗流计算时,对计算范围左侧的水位进行变化,右侧河川保持低水位,以此对洪水渗透时初期地下水位的影响进行分析.从计算结果中,将 8 月份背水坡脚附近表土层底板下的水头进行整理可以得到图 8 的结果.可以看到,由于地下水位较深,在厚 1 m 表土的底板和地下水面之间存在着一个非饱和带.非饱和带的存在,对表土底板下水压力的增加起一个缓冲作用.第一次洪峰中处于非饱和状态的负压逐渐减少.第二次洪峰发生时孔隙水由负压转为正压,地基逐渐饱和.在初期水位较高(GL-1.0 m)的条件下,表土底板的水压力迅速上升,渗透比降超过 0.5,产生了发生管涌的条件.而在初期水位较低时水压水的增加有限,不具备发生管涌的条件.由此可以推测,本次洪水时的喷砂现象多发生于初期地下水位较浅的部位.

4.2.2 表土透水性的影响

阿武隈川的表层土的透水系数相对较大,为了掌握这一特征对地基渗漏的影响,把表 3 所示表土的透水系数作为 k_0 ,对 $0.1k_0\sim 20k_0$ 范围不同的透水系数进行了计算,得到图 9 的结果.此时,左侧水位设定在 GL-1.0 m 处.可以看出,表土透水系数较小时,地下水的上升较为缓慢.但是,一旦地下水位上升到达表土层底面以后,水压力的增加迅速,并可达到较大数值,能够引起强烈的管涌.而表土透水系数较大时,虽然地下水位的上升较快,但水压力的增加较小,未能达到发生管涌的条件.以阿武隈川为例,如果表土的透水系数为下卧强水层的 1/10 以下的话,存在发生管涌的危险.而表土和强透水层的透水系数相差在 10 倍以内的话,对于本次阿武隈川的洪水来说发生管涌的可能性不大.

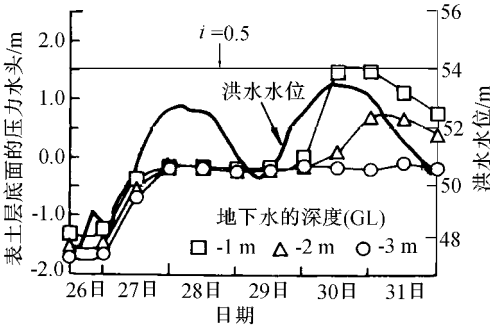


图 8 地下水的深度与孔隙水压力

Fig.8 Relationship between the depth of ground water level and pore water pressure

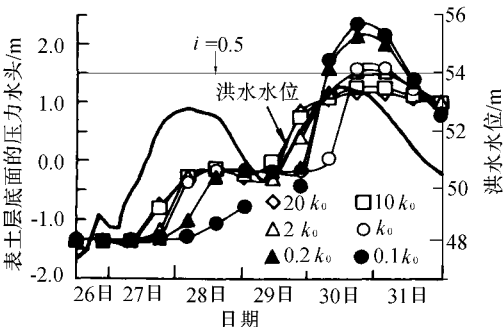


图 9 8 月份阿武隈川表土的透水系数与孔隙水压力

Fig.9 Relationship between permeability of surface soil and pore water pressure

4.3 地基渗漏方案的效果分析

根据阿武隈川地基的特征,用 GL-1.0 m 处 8 月份的地下水位和透水系数为 k_0 的表土层对地基防渗方案的效果进行了分析.根据计算结果,把成功的方案总结为图 10.方案 1 和方案 2 是用钢板桩防渗墙封闭到粘土层和洪积砂砾层.而排水层是在背水坡脚设置,除具有降低堤身内浸润线的效果以外,并穿透 1 m 的表土层,对表土层起减压作用.从计算结果可知,只要对强透水的冲积砂砾层进行封闭的话,对于本次洪水来讲,一般均可将渗透比降控制在 0.5 以内.另外,合理地设置排水层也可达到同样的效果.如作经济性比较的

话,排水层是一个事半功倍的方法,但使用时应考虑设置适当的反滤层。

图 11 是几种不妥当的防渗方法的计算结果.方案 1-0 和方案 2-0 是采用悬挂式防渗墙,只封闭到强透水层层厚的 $2/3$,其下部分别是粘土层和洪积砂砾层.而排水层方案是在背水坡脚设置,其底面只进入表土层 0.5 m .这几种方法都不能降低洪水渗透时表土层底的承压水头,不宜采用。

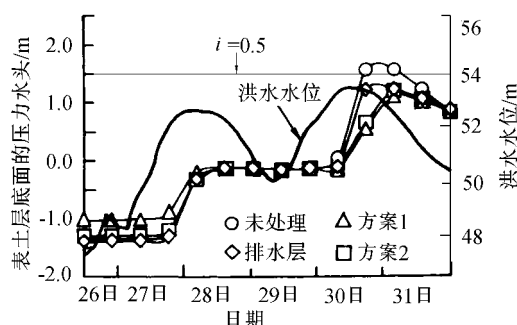


图 10 经过完全防渗处理后的孔隙水压力

Fig. 10 The pore water pressure after successful permeation-prevention treatment

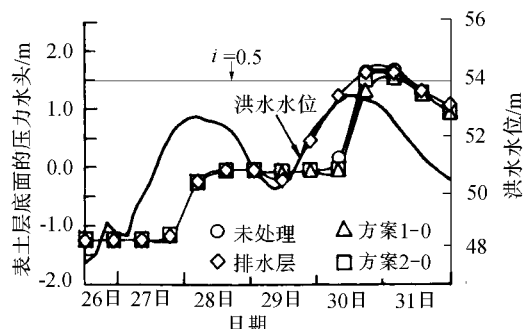


图 11 防渗处理不当时的孔隙水压力

Fig. 11 The pore water pressure after improper permeation-prevention treatment

5 结 语

本文通过阿武隈川的洪水灾害及其综合治理的实例,介绍日本在防洪整治方面的做法,并对防洪整治的技术难点——地基防渗问题重点进行了分析和探讨.从中得知:(a)在日本经济高度发展的同时,居民的防洪意识逐渐淡漠,都市对洪水灾害的承受能力大大下降.(b)从阿武隈川及其综合治理的特点可以发现,除加固河堤、增加防洪设施以外,还需重视提高市民的意识,在提高都市的防洪能力上下功夫,并能够结合河堤加固,兼顾美化环境.(c)渗流分析表明,在阿武隈川具有发生管涌危险的地段应具备地下水位浅、表土透水性差的条件.(d)地基防渗是阿武隈川河堤加固的主要问题.用钢板桩防渗墙对强透水层完全封闭,或用排水层进行减压,都可达到防渗漏的目的,应作经济性的比较和分析.(e)由于悬挂式防渗墙的效果有限,在没有良好隔水层时,应避免采用防渗墙,而采用减压措施。

本研究在现场调查和资料收集中,受到日本建设省福岛工事事务所广木谦三所长以及应用地质河川部雨宫清部长的大力协助,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 朱伟.堤防の安定性に影响を持つ堤体内渗透流の研究[D]:[学位论文].日本千葉:日本大学,1996.10~24
- [2] van Genuchten M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J], Soil Sci Am J, 1980, 44 (5): 892~898.
- [3] 朱伟,山村和也.堤防の长期的な水分量の变动[J].JSCE No.582,1997.99~108.

Flood and Comprehensive Regulation of the Abukumagawa River

ZHU Wei¹, Yamamura Kazuya²

(1. College of civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Nihon Univ., Chiba Japan 275-8575)

Abstract By use of an example of the Abukumagawa river, the experiences in flood protection in Japan are reviewed. First the cause of the flood disaster of the Abukumagawa river in 1998 is discussed, then the methods to reinforce the river embankment are introduced. The key technical points to prevent the boiling and piping in the levee foundation are also discussed.

Key words flood disaster; comprehensive regulation; reinforcement of levee; seepage flow; FEM; prevention of piping and boiling