

# 汉江城固段防洪河堤渗透机理与防治方案研究\*

李守义<sup>1</sup>, 张晓飞<sup>1</sup>, 冯海波<sup>1</sup>, 边 罡<sup>2</sup>

(1 西安理工大学 水电学院, 陕西 西安 710048; 2 汉中市河道管理处, 陕西 汉中 723000)

[摘 要] 根据汉江城固段堤防工程土料室内试验资料与河堤、堤基土料分布, 运用渗流理论和有限元法, 通过多方案计算分析, 研究了该段粉沙土河堤发生渗透破坏的机理, 分析了1998年“8·20”洪水造成河堤背水坡脚和附近农田内发生渗透破坏的主要原因, 提出了防治渗透破坏的工程措施。

[关键词] 汉江河堤; 渗透破坏; 渗流理论; 工程措施

[中图分类号] TV 871. 2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)05-0183-04

汉江城固段河道洪、枯流量相差悬殊, 洪峰突涨猛落, 洪水过程线峰尖体瘦, 干流一次洪水历时5~7 d。河道、河床宽浅, 漫滩大, 枯水期河槽弯曲, 弯道凹岸冲刷严重。根据汉中水文站的实测资料和历史洪水资料分析计算, 汉江城固段不同频率的洪水量和洪水位为: 100年一遇洪水流量11 486 m<sup>3</sup>/s, 洪水位507.48 m; 50年一遇洪水流量10 185 m<sup>3</sup>/s, 洪水位507.07 m; 20年一遇洪水流量8 363 m<sup>3</sup>/s, 洪水位506.41 m; 10年一遇洪水流量6 951 m<sup>3</sup>/s, 洪水位505.86 m。说明该段河道宽浅, 不同频率洪峰流量的水位变化不大。

该段防洪河堤修建于1991年, 设计河堤提高5.0 m, 迎水坡坡比1:2.5, 背水坡坡比1:3.0, 堤顶宽度5.0 m。1998年发生“8·20”大洪水(约20年一遇洪水)时, 河堤背水坡脚处及附近农田内多处发生流土和管涌破坏。对该段防洪堤渗透机理进行分析, 可以发现“8·20”洪水造成渗透破坏的原因, 并

对症下药对河堤进行除险加固。

## 1 河堤和堤基土料特性

汉江城固段两岸的河堤工程大部分座落在高漫滩和一级阶地上, 部分堤处于二级阶地上。根据现场勘察和室内土样试验结果分析可知, 河堤土料属于中砂和粉土, 土样的不均匀系数 $C_u$ 为3.82~7.12, 曲率系数 $C_c$ 为0.74~1.49, 土料级配连续, 渗透破坏形式主要为流土, 允许水力坡降为0.35~0.64。堤基土料属于粗砂、中砂和粉土, 土样的不均匀系数 $C_u$ 为2.79~10.8, 曲率系数 $C_c$ 为1.15~1.89, 土料的级配连续, 渗透破坏形式为管涌和流土<sup>[1]</sup>, 允许水力坡降为0.26~0.32。

河堤地基表层(2 m)及堤外农田表层均存在不同厚度的细颗粒土层, 在统计河堤堤基土样试验资料时, 地面以下2 m内称为堤基1, 2 m以下称为堤基2。河堤和堤基土样物理力学试验结果见表1。

表1 汉江城固段河堤土样试验结果

Table 1 The test result of soil sample of the dike of Chenggu Section of Hanjiang river

取样位置 Position of sampling	渗透系数/ (cm · s <sup>-1</sup> ) Permeability coefficient	允许水力坡降 Permiss ion hydraulic gradient	不均匀系数 $C_u$ U neven coefficient	曲率系数 $C_c$ Curvature coefficient	渗透破坏形式 Pemeable destroy manner
河堤 Dike	$3.73 \times 10^{-4}$	0.35	6.1	1.1	流土 Mass flow
堤基1 Dike base 1	$4.73 \times 10^{-4}$	0.32	4.47	2.2	流土 Mass flow
堤基2 Dike base 2	$5.32 \times 10^{-3}$	0.26	6.0	1.67	管涌 Piping

## 2 渗流计算分析

### 2.1 基本理论

如图1所示的河堤渗流问题中, 整个河堤和地

基可划分为饱和区 $\Omega_1$ (渗流实域)和无渗流区 $\Omega_2$ (渗流虚域), 根据达西定律可得控制方程为<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{在 } \Omega_1 \text{ 上} \quad (1)$$

\* [收稿日期] 2002-11-05

[作者简介] 李守义(1955-), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 主要从事水工结构研究。

式中,  $H$  为水头函数,  $K_x, K_z, K_N$  分别为  $x, z, N$  方向的渗透系数,  $N$  为法向。

(1) 式的边界条件为:

$$H = H_1, \text{ 在 } AB, BC \text{ 段上;}$$

$$H = H_2, \text{ 在 } EF_1, F_1F_2, F_2G \text{ 段上;}$$

$$K_N \frac{\partial H}{\partial N} = 0, \text{ 在 } CD, AN, HG \text{ 段上。}$$

根据变分原理, 上述问题等价于泛函  $I(H)$  的极小值问题<sup>[31]</sup>:

$$I(H) = \int_{\Omega_1} \frac{1}{2} \left[ K_x \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_z \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz \quad (2)$$

将渗流区域剖分为有限个 ( $n$ ) 单元后, 则有

$$I(H) = \sum_{e=1}^n I^e = \sum_{e=1}^n \int_e \frac{1}{2} \left[ K_x \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_z \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz \quad (3)$$

$$\text{令 } \frac{\partial I(H)}{\partial H} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial I^e}{\partial H} = 0$$

则有

$$[K_1]\{H_1\} = \{Q_1\} \quad (4)$$

式中,  $[K_1], \{H_1\}, \{Q_1\}$  分别为计算域  $\Omega_1$  中的总渗透矩阵、节点水头列阵和节点等效流量列阵。

因自由面  $CD$  的位置和实域  $\Omega_1$  的大小未知, 需经迭代计算才能得到。若取计算域  $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$ , 可在

$\Omega$  和  $\Omega_2$  中分别列出:

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (5)$$

$$[K_2]\{H_2\} = \{Q_2\} \quad (6)$$

式中,  $[K], [K_2], \{H\}, \{H_2\}, \{Q\}, \{Q_2\}$  分别为对应于计算域  $\Omega$  和  $\Omega_2$  的总渗透矩阵、节点水头列阵和节点等效流量列阵。

通过增添零元素, 可以将式 (4) 和 (6) 增阶到与式 (5) 同阶, 则有:

$$\begin{cases} [K] = [K_1] + [K_2] \\ \{Q\} = \{Q_1\} + \{Q_2\} \\ \{H\} = \{H_1\} + \{H_2\} \end{cases} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (4) 得:

$$[K]\{H_1\} = \{Q\} - \{Q_2\} + \{\Delta Q\} \quad (8)$$

式中,  $\{\Delta Q\} = [K_2]\{H_1\}$  为渗流虚域  $\Omega_2$  中虚单元所贡献的节点虚流量列阵。在迭代过程中  $\{Q_2\}$  很小, 主要修正节点虚流量  $\{\Delta Q\}$ 。

采用迭代计算求解  $\{H\}$ , 如解  $\{H\}$  满足沿自由面法向无流量交换条件, 则  $\{H\}$  为问题的解。实际计算中, 若自由面法向流量交换值小于某一事先给定的允许值  $\epsilon$ , 则迭代计算结束。然后根据条件  $H = z$  搜索出自由面和溢出点的确切位置, 再根据各点的  $H$  值给出  $\Omega_1$  区的等势线图, 计算出各结点的水力坡降  $i_0$ 。

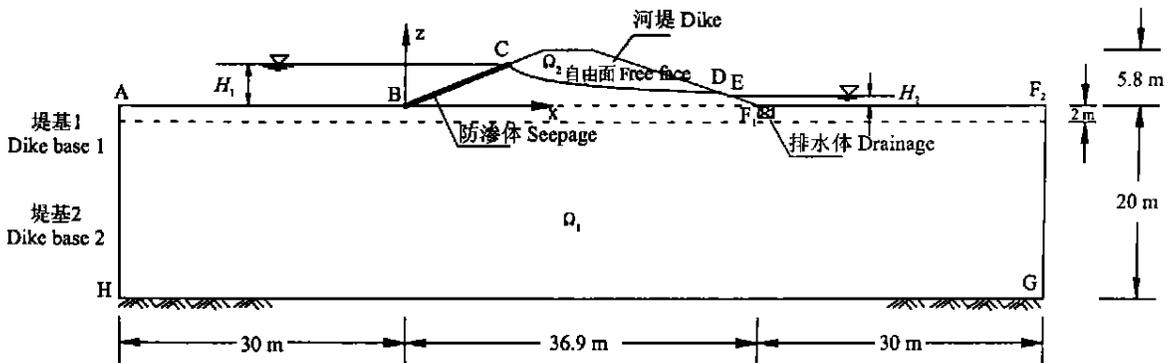


图 1 汉江河堤渗流计算模型

Fig 1 The permeability computing model of the dike of Chenggu Section of Hanjiang river

### 2.2 计算模型

沿水流方向截取单位长度堤段作为计算对象, 计算模型见图 1。河堤高 5.8 m, 临水面水深  $H_1 = 4.5$  m, 背水坡水深  $H_2 = 0.0$  m, 河堤和堤基土样物理力学见表 1。

### 2.3 管涌机理和防治措施研究

根据上述基本理论和计算模型, 对无防渗无排水方案、临水面设防渗土工膜方案、横断面中心设防

渗土工膜方案和背水坡脚设排水沟等方案分别进行了计算比较, 结果表明: 强的地基透水性和较厚的透水层, 是造成河堤背水坡脚和附近农田内发生渗透破坏的主要原因。为了研究技术上可行、经济上合理的防治渗透破坏的较优方案, 选取 4 种防渗及排水方案, 即: (1) 无防渗无排水设施; (2) 临水面铺设土工膜; (3) 背水坡脚设排水沟; (4) 临水面铺设土工膜+ 背水坡脚设排水沟。

根据室内试验参数(表 2), 进行渗流分析计算。

4 种方案的浸润线溢出点高度分别为 1.73, 1.23, 0.41, 0.28 m, 关键部位的水力坡降见表 3, 等水头线见图 2~ 图 5。

由表 3 关键部位的水力坡降可知, 采用方案 1 时背水坡一侧关键部位的水力坡降最大值为 1.37, 采用方案 2 和方案 3 后, 水力坡降最大值分别降为 1.04 和 0.37, 仍大于允许水力坡降 0.26。采用方案 4 后, 水力坡降最大值为 0.25, 略小于允许水力坡降。

表 2 汉江河堤渗流计算参数

Table 2 The computing pemmeate parameter of the dike of Chenggu Section of Hanjiang river

材料名称 Material	渗透系数 Pemeability coefficient	
	$K_x/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_z/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
堤基 1 Dike base 1	$4.73 \times 10^{-4}$	$4.73 \times 10^{-4}$
堤基 2 Dike base 2	$5.32 \times 10^{-3}$	$5.32 \times 10^{-3}$
防渗体 Dam to prevent pemmeation	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-10}$
河堤 Dike	$3.73 \times 10^{-4}$	$3.73 \times 10^{-4}$
排水体 Discharge section	$1.0 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$

表 3 4 种防渗及排水方案关键部位水力坡降

Table 3 The hydraulic gradient of key position of 4 pemmeation prevention and drainage schemes

X 坐标/m X coordinate	Z 坐标/m Z coordinate	水力坡降 Hydraulic gradient			
		方案 1 No. 1 scheme	方案 2 No. 2 scheme	方案 3 No. 3 scheme	方案 4 No. 4 scheme
29.42	1.16	0.07	0.03	0.11	0.06
31.01	1.16	0.46	0.11	0.13	0.07
32.61	1.16	0.32	0.04	0.16	0.09
30.74	0.58	0.07	0.03	0.13	0.07
32.50	0.58	0.07	0.04	0.16	0.09
34.27	0.58	0.61	0.36	0.20	0.12
32.06	0.00	0.07	0.04	0.15	0.09
33.99	0.00	0.07	0.04	0.20	0.12
35.92	0.00	0.80	0.59	0.28	0.17
34.97	0.50	0.02	0.02	0.02	0.01
36.90	0.50	1.37	1.04	0.00	0.00
39.90	0.50	1.19	0.92	0.00	0.00
42.90	0.50	1.03	0.82	0.26	0.18
45.90	0.50	0.89	0.72	0.36	0.24
48.90	0.50	0.75	0.62	0.37	0.25
51.90	0.50	0.61	0.52	0.34	0.23
54.90	0.50	0.48	0.42	0.29	0.19
57.90	0.50	0.35	0.32	0.22	0.15

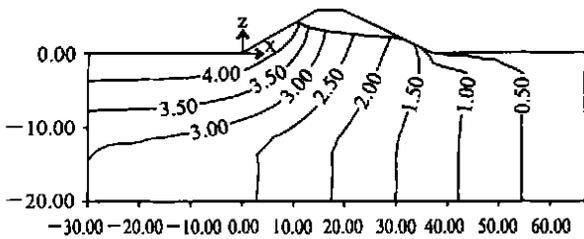


图 2 无防渗无排水设施等水头线

Fig. 2 Isohydraulic head line without pemmeation prevention

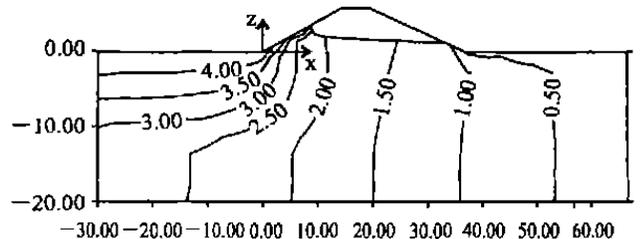


图 3 临水面铺设土工膜等水头线

Fig. 3 Isohydraulic head line with geomembrane on the river side face

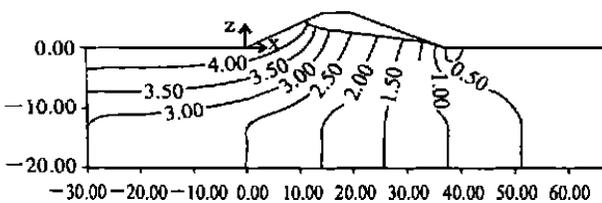


图 4 背水坡坡脚设排水沟等水头线

Fig. 4 Isohydraulic head line with drainage ditch on the slope angle of downstream slope

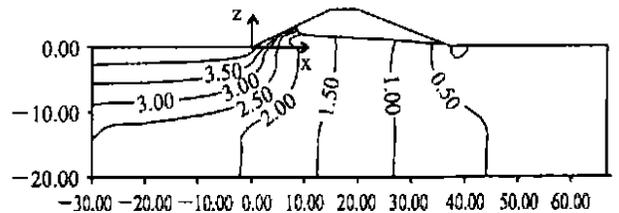


图 5 临水面设土工膜+背水坡坡脚设排水沟等水头线

Fig. 5 Isohydraulic head line with geomembrane on the river side face and drainage ditch on the slope angle of downstream slope

由图 2~ 5 可知, 方案 2 能显著降低河堤临水坡一侧的水头值, 方案 3 能显著降低河堤背水坡一侧的水头值, 采用方案 4 后, 则河堤整体水头值都得到降低。

### 3 结 语

经过对河堤按无防渗无排水设施方案、临水面铺设防渗土工膜方案、背水坡坡脚设排水沟排水方案、临水面铺设防渗土工膜+ 背水坡坡脚设排水沟排水相结合方案进行渗流计算分析, 可以得出如下结论:

(1) 河堤背水坡坡脚附近发生渗透破坏的主要原因是堤基存在透水性较强且较厚的透水层, 导致河堤背水坡坡脚及附近农田存在较大的水力坡降。

(2) 河堤是由粉细砂填筑而成, 其本身的透水性比较强, 渗透系数比较大。在高水位运行时, 河堤内浸润线较高, 背水坡浸润线溢出点以下水力坡降较大。

(3) 河堤临水面铺设防渗土工膜后, 可以有效降低河堤浸润线, 且对河堤背水坡坡脚附近的水力坡降有比较明显的降低作用。

(4) 河堤背水坡坡脚设排水沟排水, 可以有效降低因堤基透水性强而引起的河堤背水坡坡脚及附近农田的水力坡降, 也对河堤(特别是河堤背水坡一侧)浸润线有明显的降低作用。

鉴于以上计算和分析结果, 宜采用先堵后排的防治渗透破坏方案, 即在河堤临水面铺设土工膜防渗, 背水坡坡脚设排水沟排水的综合防治措施。

#### [参考文献]

- [1] 王宏硕, 翁情达. 水工建筑物(专题部分)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.  
 [2] 刘慈群, 王晓冬. 双渗透介质中轴对称二维不定产渗流[J]. 水利学报, 1995, (2): 12- 18.  
 [3] 毛昶照. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1975.

## A nalysis of the osmotic failure mechanism and study on the preventive measure on the dike of Chenggu Section of Hanjiang river

L I Shou-yi<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-fei<sup>1</sup>, FENG Hai-bo<sup>1</sup>, BIAN Gang<sup>2</sup>

(1 College of Water Conservancy and Hydraulics, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Hanzhong Watercourse Management Office, Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

**Abstract:** According to the laboratory test data of soil and soil distribution in the body and foundation of the dike of Chenggu Section of Hanjiang river, by means of permeability theory and the FEM, the mechanism of the osmotic failure of the dike by the silt soil has been studied via several schemes. The main reason of the osmotic failure in the nearby farm and the slope bottom of the back slope of the dike in the "8·20" flood in 1998 was analyzed, a recommended preventive engineering measure is put forward.

**Key words:** Hanjiang dike; osmotic failure; permeability theory; engineering measure