

# 新光大桥桥墩钢板桩围堰抗渗问题分析

曹 洪, 罗 彦, 周红星

(华南理工大学 土木工程系, 广东 广州 510641)

**摘要:** 新光大桥 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>桥墩采用钢板桩围堰, 是目前广东省最大的围堰之一, 针对施工中与钢板桩相关的渗漏问题进行了分析研究: (1) 对钢板桩缝渗漏问题, 考虑缝内与缝外渗透系数的不同, 修正了等代渗透系数公式并用其分析砂层中钢板桩缝自愈过程对等代渗透系数的影响, 给出了计算最终渗透量和估算初始抽水量的计算依据; (2) 利用水平面二维有限元程序的计算结果说明了钢板桩桩底的绕渗只会引起渗流量增大而不影响围堰安全; (3) 论证了围堰底面封堵与导排的利弊, 提出了解决方案, 使工程能够顺利完成。

**关键词:** 水利工程; 钢板桩; 围堰; 抗渗; 自愈

**中图分类号:** TV 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)01 - 0152 - 06

## ANALYSIS OF PERMEABILITY OF COFFERDAM WITH ARMOR-PLATE PILE FOR XINGUANG BRIDGE'S PIER

CAO Hong, LUO Yan, ZHOU Hong-xing

(Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

**Abstract:** Xinguang bridge project is the pivotal project of Xinguang throughway, and it will be the longest half-through arch bridge with three continuous spans in the world. The constructions of piers No.5 and No.6 meet much difficulty in this project due to the large-span, deep water, and intricate geologic conditions as well as water inpouring into hardpan in their sits. On account of all those factors, cofferdam with steel sheet pile is employed in this project with large dimensions, which is the largest steel sheet pile cofferdam in deep water in Guangdong Province. However, successful implementation of this project lies in how to solve the permeating problems of steel sheet pile cofferdam. As to the permeability problem, the formula for the equivalent permeability coefficients is modified. On basis of this modified formula, a variety of the equivalent permeability coefficients is modified during the self-healing up process of the steel sheet pile in the sandy layer are analyzed; and the calculation of the final seepage quantity as well as an estimation of the initial quantity of the pumped water are presented. Moreover, it is concluded that permeability below the root of steel sheet pile will not cause seepage failure but only increase the leakage, which is confirmed by the two-dimensions finite element program on horizontal plane. Eventually, corresponding settlement was generated after a full account of both the merits and demerits of the cofferdam base in both draining and blocking up approaches. This project was completed smoothly, and complementary supporting evidences of the self-healing process of the steel sheet pile were deduced.

**Key words:** hydraulic engineering; steel sheet pile; cofferdam; permeability; self-heal

**收稿日期:** 2005 - 06 - 03; **修回日期:** 2005 - 09 - 08

**作者简介:** 曹 洪(1954 -), 男, 博士, 1982年毕业于湖南大学力学系, 现任高级工程师, 主要从事堤防渗流及岩土工程方面的研究工作。E-mail: caohscut@126.com。

# 1 引 言

新光大桥是广州城区南拓的重要干线——新光快速公路的控制工程，主跨 428 m，全长 1 082 m，建成后将是目前世界上最长的三跨连续中承式拱桥。其中，5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>桥墩位于南珠江沥滘水道中，每个桥墩由 36 根桩及承台构成，承台平面尺寸 34.7 m×48.3 m，厚 6.0 m，底面高程-2.04 m(广州市政高程，下同)，承台下混凝土垫层 0.5 m 厚，施工需开挖或抽水到-2.54 m。河道最高水位为 7.40 m，施工期实际水位 5.00~6.90 m，随潮汐涨落，6<sup>#</sup>桥墩水深 10.00~15.00 m，5<sup>#</sup>桥墩水深 7.00~10.00 m。

桥墩附近地层主要是海陆交互相沉积层(Q<sub>4</sub><sup>mc</sup>)、亚黏土层(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、河流相冲积砂层(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、粉砂质泥岩残积土层(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、下伏基岩(K<sub>1</sub>b<sup>1</sup>)。其中，5<sup>#</sup>桥墩河床面为淤泥层，其下为砂层，淤泥层到河中心尖灭，砂层直接与江水相通(见图 1)；6<sup>#</sup>桥墩河床面砂层直接出露，砂层下为粉砂质泥岩风化带，局部有薄层残积土或全风化层，部分砂层直接与强、中风化岩接触(见图 2)。

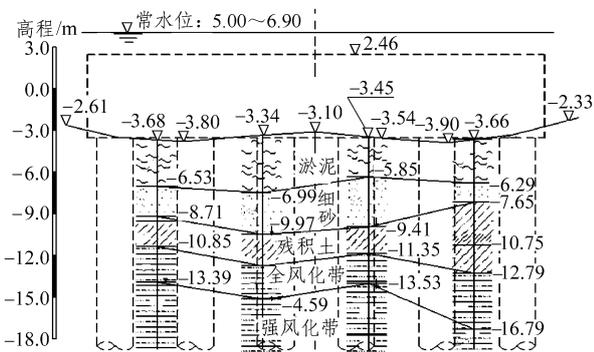
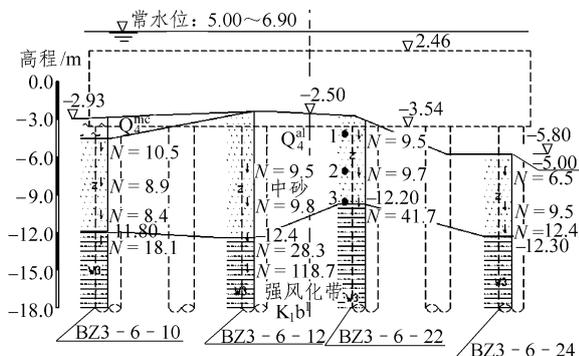


图 1 5<sup>#</sup>桥墩典型地质剖面图

Fig.1 Typical geological conditions of pier No.5



N—标准贯入击数(单位: 击)

图 2 6<sup>#</sup>桥墩典型地质剖面图

Fig.2 Typical geological conditions of pier No.6

为保证承台的施工，采用单层钢板桩加钢支撑围堰，围堰平面尺寸为 38 m×52 m，见图 3。采用 FSP IV 型钢板桩，用 2 条 12 m 长的钢板桩接驳为 1 条，长 24 m。

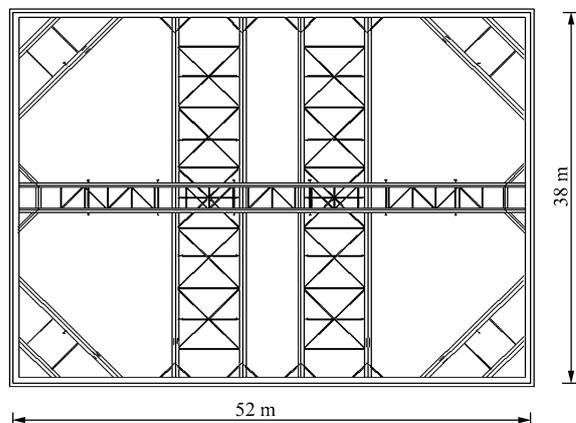


图 3 钢板桩围堰支撑布置图

Fig.3 Disposal of brace for steel sheet pile

由于钢板桩围堰面积大，水较深，除了要解决强度、稳定方面的问题外，还需解决以下有关渗流方面的问题：

- (1) 钢板桩接缝漏水问题。
- (2) 钢板桩桩底的绕渗问题及岩层的渗漏问题。
- (3) 与混凝土封底、河床面淤泥层及混凝土垫层等相关的抗浮、排渗减压问题。

## 2 钢板桩接缝漏水计算方法

钢板桩接缝漏水问题主要分 2 个部分：

(1) 河床面以上部分。对这部分可采用各种人工方法<sup>[1~5]</sup>进行封堵。抽水初期由于钢板桩不受力，接缝处于松弛状态，漏水较大。待钢板桩两侧有了一定水位差，接缝被压紧，漏水量很小。因此，计算时这部分钢板桩接缝可按不透水计。

(2) 砂层部分。这部分无法用人工填堵，且土中钢板桩变形量小，接缝压不紧，在计算时应考虑其透水性。

实际钢板桩接缝为曲线缝(见图 4)，为研究方便，通常将曲线缝概化成直线缝<sup>[6]</sup>(见图 5)。图 5 中 *l* 为曲线缝从入口至出口的长度，一般约 80 mm；*m* 为缝宽，一般为 0~2 mm；2*b* 为钢板桩宽度，也是接缝间距；钢板桩前后各有一段渗流急变区，*L* 则

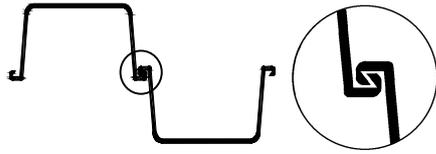


图4 钢板桩实际接缝示意图

Fig.4 Actual joint sketches of steel sheet pile

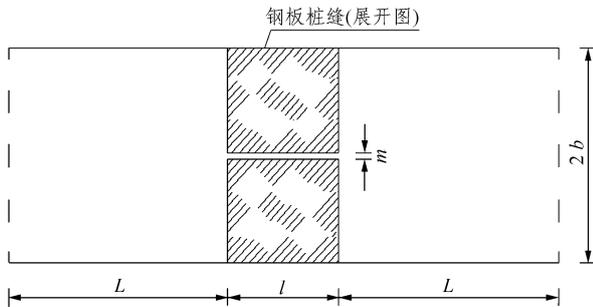


图5 钢板桩单元模型示意图

Fig.5 Model sketch of steel sheet pile cell

为计算区域的长度，一般要求  $L \geq 2b$ 。

设钢板桩附近砂层渗透系数为  $k$ ，把钢板桩接缝的渗流急变区假想为  $\delta = 2L$  (忽略钢板厚度) 的均质弱透水帷幕，其等代的渗透系数  $k'$  由涅德里加用保角变换方法求出<sup>[7]</sup>，即

$$k' = \eta k \tag{1}$$

其中，

$$\eta = \frac{\delta/2b}{\frac{l}{m} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arch} \frac{2 \operatorname{ch}(\pi L/b)}{1 - \sin \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{m}{b}\right)}} \tag{2}$$

朱丹，毛昶熙<sup>[6]</sup>也推导出了类似公式，其结果在  $L \geq 2b$  时可简化成与式(1)相同的形式。

式(1)的推导包含缝内砂土与附近砂层渗透系数相同的假设。实际上缝内渗透系数是变化的，设为  $k_1$ 。抽水前缝中仅有钢板桩打入时进入的松散砂土， $k_1 \gg k$ ；开始抽水后，由于桩缝入口处水力坡降非常大，附近的砂层会发生渗透破坏，细颗粒随水流进桩缝内，而桩缝出口处水力坡降向外迅速降低，细颗粒进入后就会滞留并逐渐填满桩缝，随着钢板桩内外水头差增大，缝内砂土逐渐被压密，渗透系数逐渐变小，直至  $k_1 \ll k$ 。若考虑  $k_1$  的变化，式(2)应改为

$$\eta = \frac{\delta/2b}{\frac{lk}{mk_1} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arch} \frac{2 \operatorname{ch}(\pi L/b)}{1 - \sin \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{m}{b}\right)}} \tag{3}$$

式(2)中分母的第1项  $lk/(mk_1)$  所占比例是逐渐变化的。当  $k_1 \gg k$  时，该项很小，可忽略不计；当  $k_1 \ll k$  时，该项远大于分母的第2项。

计算时，取  $L = 400 \text{ mm}$ ， $b = 200 \text{ mm}$ ， $l = 80 \text{ mm}$ ， $\delta = 800 \text{ mm}$ 。表1列出了  $k_1$  对  $\eta$  的影响，由该表可见， $\eta$  随抽水过程可发生数百倍的变化，这正是钢板桩围堰的工程特性(自愈过程)。前苏联的建议值  $\eta = 0.0025 \sim 0.0050$ <sup>[7]</sup> 可视为缝内砂土被压密后的状态。而  $k_1 \gg k$  的  $\eta$  值则是上极限，可用于对抽水初期漏水量的估计。

表1  $k_1$  对  $\eta$  的影响

Table 1 Values of  $\eta$  corresponding to the values of  $k_1$

m/mm	$\eta$		
	$k_1 \gg k$	$k_1 = k$	$k/k_1 = 10$
2.0	0.627 0	0.051 0	0.005 5
1.0	0.557 0	0.026 0	0.002 8
0.5	0.501 0	0.013 0	0.001 4

根据上述分析，促使“自愈”的重要条件是：桩缝出口处有砂土使水力坡降迅速减小。在围堰内桩缝附近为创造这一条件，在砂层表面必须采取抛填石粉反滤保护。

采用二维有限元程序<sup>[8]</sup>计算，计算区域在围堰内考虑到对称性可取围堰短边的一半，外侧取  $80 \text{ m}$ ，围堰内抛填  $1.0 \text{ m}$  石粉，围堰外水位按  $7.00 \text{ m}$  取值，围堰内抽水到  $-2.50 \text{ m}$ 。钢板桩按打入岩面  $0.5 \text{ m}$  计，渗透系数按  $\eta = 0.0050$  折算取值，具体见表2。

表2 渗透系数取值

Table 2 Permeability coefficients

介质	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
中、细砂层	$1.0 \times 10^{-2}$
风化岩层	$4.0 \times 10^{-5}$
河床以下钢板桩(厚 $800 \text{ mm}$ )	$5.0 \times 10^{-5}$
淤泥	$1.0 \times 10^{-7}$
石粉反滤	$5.0 \times 10^{-1}$

6<sup>#</sup>桥墩计算得到的渗流流线及等水头线见图 6。从图中可以看出,大部分渗水(流线 3~11)通过钢板桩缝。渗流量按单宽计算结果  $11.2 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$  乘以围堰周长 180 m 近似估计,为  $2\ 020 \text{ m}^3/\text{d}$ (或约  $84 \text{ m}^3/\text{h}$ )。

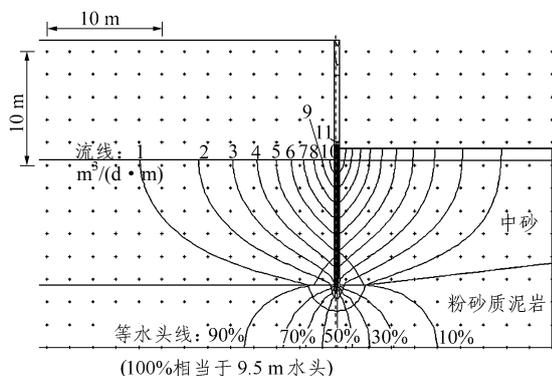


图 6 剖面渗流流线及等水头线图

Fig.6 Streamline and isopotential line sketch of section seepage

上述渗流量代表抽水到围堰底时、维持内外 9.50 m 水头差所需的抽水量,是自愈后的结果。刚开始抽水时,由于  $\eta$  值比自愈后的  $\eta$  值大数百倍,漏水量很大,但此时内外水头差很小,如取 1.00~2.00 m,则漏水量相当于计算渗流量的 10~20 倍。开始抽水时,准备的抽水设备能力必须大于此漏水量(本工程采用的抽水设备的抽水量为  $3\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,约为计算渗流量的 30 倍)。随着自愈发展,漏水量将很快下降。

钢板桩附近砂层的垂直水力坡降,由于抛填石粉、砂层的垂直水力坡降最大值为 0.30,与利用太沙基无黏性土流土抗渗比降公式  $J_{cr} = (G_s - 1)(1 - n)$  的计算结果 0.99 相比,其安全系数大于 2 倍,满足设计要求。

### 3 钢板桩嵌岩情况及岩层渗漏问题

6<sup>#</sup>桥墩河床面砂层直接出露,且砂层以下即为强风化岩,钢板桩难以打入。由于桩嵌入砂层约 10 m 深,在 10.00 m 水头作用下,从桩底绕渗,平均水力坡降  $J$  不会超过 0.50,不会发生渗透破坏<sup>[9, 10]</sup>。桩底绕渗主要是渗流量的问题。

为此进行如下验算:(1) 桩端进入弱透水层面;

(2) 桩端未进入弱透水层,验算结果见表 3。

表 3 钢板桩端与弱透水层距离对垂直水力坡降及渗流量的影响

Table 3 Influence of the space between the pile end and rock layer on the vertical hydraulic grade and seepage

桩端进入弱透水层深度/m	垂直水力坡降 $J$	渗流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
0.50	0.30	2 020
0.25	0.38	3 265
0.50	0.40	3 730
1.00	0.43	4 200

当桩端距离弱透水面有一定距离时,砂层的垂直水力坡降稍有增大,而渗流量则增大到 1.6~2.0 倍。

以 6<sup>#</sup>桥墩为例对岩层渗透性变化情况进行敏感性分析,岩层渗透系数增大 10 倍,渗流量增加到 2.1 倍。

桩端绕渗和岩层渗漏的水不通过板桩缝,与自愈过程无关,抽水初期由于水位差很小,这两项的实际量很小,相对于抽水初期的大渗流量可忽略不计;抽水到底,钢板桩缝基本自愈后这两项渗流量的比重才达到上面提及的倍数,因此工程上是可以接受的。

### 4 围堰内底面的抗浮稳定问题

围堰内底面的问题主要有围堰内封底问题、混凝土垫层的抗浮稳定问题以及 5<sup>#</sup>桥墩河床面淤泥层的抗浮稳定问题。这 3 个问题实质上都可以归结为水压力与弱透水层自重之间的平衡问题。下面对这 3 个问题分述如下:

#### (1) 围堰内封底问题

在初步设计方案中,围堰内要用 3.3 m 混凝土封底。一方面抗浮很难满足要求,另一方面由于钢板桩变形大,潮汐涨落,船只碰撞都可能使钢板桩与封底混凝土脱离而出现缝隙,封底很难做到。

针对混凝土封底周边存在不同宽度缝时的渗流量、垂直水力坡降、水压进行分析计算,结果列于表 4。

由表 4 可见,封底时抗浮是不满足要求的,但只要有很小的缝隙,底面水压力迅速降低,可保证抗浮稳定,而渗流量已与不封底时差别不大,只是

表4 不同封底方案的渗流量、垂直水力坡降、水压比较  
Table 4 Comparison of seepage, vertical hydraulic grade, hydraulic pressure among several distinct schemes

封底方案	渗流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	封底边缘 砂土 $J_c$	封底中部 水压力/kPa
不封底	2 020	0.30	-
全封底	0	-	123.4
部分封底, 缝宽 0.02 m	1 698	2.49	55.8
部分封底, 缝宽 0.10 m	1 731	1.89	54.0
部分封底, 缝宽 1.00 m	1 882	0.76	45.9
垫层厚 0.5 m, 缝宽 1.00 m	1 936	-	20.0

缝宽太小时, 封底边缘砂土垂直水力坡降大于临界坡降( $J_c \approx 1.00$ ), 会引起喷砂并淘空底面。因此, 采用不封底或在封底边界保留足够缝宽对工程有利。

### (2) 混凝土垫层的抗浮稳定问题

采用不封底方案, 仍需浇注厚 0.5 m 的混凝土垫层, 垫层周边距钢板桩 1.0 m。垫层中部底面水压力 20 kPa, 大于垫层自重压力, 很可能顶穿破坏垫层, 必须在垫层下铺设碎石导渗沟, 降低垫层底的水压。

### (3) 5<sup>#</sup>桥墩河床面淤泥层的抗浮稳定问题

5<sup>#</sup>桥墩河床面淤泥层在砂层上, 其作用相当于封底。在高水头作用下, 淤泥层底的水压非常大, 淤泥层自重不足会被顶穿, 给施工造成不便。因此, 需要在围堰中部约 16 m×16 m 区域挖穿淤泥换填石粉, 为淤泥层底部水压力提供释放通道。

## 5 工程实施情况

2004年7月中旬开始插打钢板桩, 6<sup>#</sup>桥墩桩底仅达岩面, 5<sup>#</sup>桥墩桩底入弱透水层较深; 9月初安装第1层支撑开始试抽水; 此后抛填石粉、分层抽水及安装支撑, 10月上旬抽水到围堰底, 铺设碎石导渗沟后浇垫层, 并在其上浇注承台; 2005年1月完成承台, 拔除钢板桩。

6<sup>#</sup>桥墩试抽水时, 抽水机的装机容量为 1 500  $\text{m}^3/\text{h}$ , 仅能维持 10 cm 内外水头差, 漏水量很大。正式抽水时, 增加抽水机功率到 3 000  $\text{m}^3/\text{h}$ , 抽水进展顺利, 降下去 3 m 并安装好第2层支撑。此时由于施工要求, 需将水位回升 2 m, 停机等待, 整个回水过程历时 5 h, 按围堰面积 2 000  $\text{m}^2$  估算, 此

时渗流量约为 800  $\text{m}^3/\text{h}$ , 自愈的影响已经非常明显。抽水到围堰底时, 只需用几台潜水泵(流量不超过 100  $\text{m}^3/\text{h}$ )就可以维持围堰内外 8.0~9.0 m 的水头差, 这一数量与前述计算结果基本相符。

由于各阶段抽水时内外水头差不同, 无法直接用渗流量作比较。用渗流量  $Q$  与对应水头差  $\Delta h$  的比值  $q(q = Q/\Delta h)$  可以较好地显示自愈过程。开始抽水、回水及抽水到围堰底 3 个时段,  $\Delta h$  分别取为 0.1, 2.0 和 8.0 m, 则  $q$  分别对应为 15 000, 400 和 12  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^{-1})$ 。前 2 个时段  $q$  值分别是最后时段  $q$  值的 1 250 和 33 倍。

拔出钢板桩后, 从接缝槽中可找到残留的土块, 高程位置在砂层以下土层面附近, 土块呈片状分层, 一半为土, 与附近土质相同, 应是打桩时进入的; 另一半为粉、细砂, 明显是由水流带入的, 且已被压得十分坚硬密实, 可以作为钢板桩自愈效果的辅证。

5<sup>#</sup>桥墩施工、抽水情况与 6<sup>#</sup>桥墩相似, 初期抽水量同样很大, 后期渗水量稍少。

## 6 结 论

(1) 新光大桥 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>桥墩钢板桩围堰工程已成功实施, 分析计算结果与工程实施情况吻合较好。

(2) 钢板桩在砂层以上部分可采用各种人工的方法进行封堵; 砂层中钢板桩会随着抽水过程自愈, 初始和最终渗透系数会相差数百倍, 计算时应采用不同的取值; 在施工过程初始阶段渗水量大, 需多准备抽水设备, 围堰内外形成一定水位差之后, 渗水量会显著降低。

(3) 钢板桩桩底应入弱透水层, 若工程上实施困难, 则必须保证足够的渗径, 以控制渗流量在可接受的范围内。

(4) 围堰内底面的水宜疏排不宜强堵。

### 参考文献(References):

- [1] 姜中祖, 钟敬钧. 番禺大桥水上主塔基础钢板桩围堰施工[J]. 广东公路交通, 1997, 49(3): 11 - 15.(Jiang Zhongzu, Zhong Jingjun. The armor-plate cofferdam construction for king-tower foundation in water of Panyu Bridge[J]. Guangdong Highway Communications, 1997, 49(3): 11 - 15.(in Chinese))
- [2] 饶世豪. 博罗大桥沉井施工[J]. 水运工程, 1997, (9): 53 - 55.(Rao

- Shihao. The open caisson foundation construction of Boluo bridge[J]. Port and Waterway Engineering, 1997, (9): 53 - 55.(in Chinese))
- [3] 王松茂, 丘宏余. 钢板桩支护在深水基坑开挖中的应用[J]. 广东水利水运, 2002, (6): 25 - 29.(Wang Songmao, Qiu Hongyu. Application of armor-plate pile cofferdam to process of off-shore excavation[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002, (6): 25 - 29.(in Chinese))
- [4] 张建宏. 钢板桩围护结构渗水及挖孔桩流沙问题的处理措施[J]. 建筑技术, 2000, 31: 13 - 16.(Zhang Jianhong. Solutions of water penetration in steel plate enclosure of pile and removable sand issue in hand excavating piling[J]. Architecture Technology, 2000, 31: 13 - 16.(in Chinese))
- [5] 刘金秋, 薛春刚. 10 万吨船台围堰工程施工[J]. 水运工程, 2004, (11): 125 - 128.(Liu Jinqiu, Xue Chungang. Construction of cofferdams for a slipway for ships up to 100000 DWT[J]. Port and Waterway Engineering, 2004, (11): 125 - 128.(in Chinese))
- [6] 朱 丹, 毛昶熙. 闸基板桩缝对渗流影响的计算[J]. 人民黄河, 1997, (2): 15 - 19.(Zhu Dan, Mao Changxi. Calculation seepage under the influence of the plate-pile joint in the foundation of milldam[J]. Yellow River, 1997, (2): 15 - 19.(in Chinese))
- [7] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(Mao Changxi. Seepage Computation Analysis and Control[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [8] 曹 洪, 张 挺, 陈小丹, 等. 多层强透水地基渗流计算的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 185 - 1 190.(Cao Hong, Zhang Ting, Chen Xiaodan, et al. Application of seepage calculation for multi-layered strong permeable soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 185 - 1 190.(in Chinese))
- [9] 刘忠玉, 乐金朝, 苗天德. 无黏性土中管涌的毛管模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3 871 - 3 876.(Liu Zhongyu, Yue Jinchao, Miao Tiande. Capillary-tube model for piping in noncohesive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3 871 - 3 876.(in Chinese)).
- [10] 王国强. 信江界牌枢纽工程基坑渗透稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 213 - 216.(Wang Guoqiang. The foundational pit's percolation stability evaluation of the key water control project in Xinjiangjiepai[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 213 - 216.(in Chinese))

## 我国拟建造 5 条跨海隧道

在中俄工程科技研讨会上, 防护工程专家、中国工程院院士钱七虎介绍, 在最近的 20~30 a 内, 我国正考虑建造 5 条跨海隧道。

这 5 条跨海隧道分别是大连到烟台的渤海湾跨海隧道, 由上海到宁波的杭州海湾工程, 连接香港、澳门与广州、深圳和珠海的伶仃洋跨海工程, 连接广东和海南两省的琼州海峡跨海工程, 连接福建和台湾的台湾海峡跨海工程。这些宏伟艰巨的工程方案可能是桥隧结合, 其中, 海底隧道将是主要的部分, 且有许多岩土工程的课题尚待解决。

我国第一条海底隧道——厦门东通道工程已于年内动工, 预计 2010 年建成。项目全长 9 km, 跨海主体工程长约 6 km, 隧道最深在海平面下约 70 m。第二条海底隧道——青岛到黄岛隧道将于明年动工, 全长 5.5 km。

和建桥相比, 越江跨海隧道可以不受大雾、台风等气候变化的影响, 具有稳定的运行能力和较强的抗地震能力, 还可一隧多用。

在上海, 穿越黄浦江已建 8 条水底隧道。另外, 杭州、宁波、南京、武汉、广州、厦门、青海也已建、在建或筹建越江跨海隧道。其中, 上海崇明越江通道工程采用“南隧北桥”方案。

摘自《人民铁道》2005 年 5 月 17 日 A4 版