

北江大堤石角堤段渗漏探测分析

Study on leakage of Shijiao section of Beijiang river dyke

陈建生, 刘建刚

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 从北江大堤石角段的地质环境条件出发, 根据同位素示踪和天然示踪(包括水文地球化学条件)的实际资料综合分析论证了石角段的基岩渗漏, 认为石角段历年发生的渗透变形主要源于基岩集中渗漏通道, 并通过连通试验证实。目前存在两条集中渗漏通道, 并仍处于进一步的发展过程中。

关键词: 渗透变形; 温度电导; 流速流向; 连通试验; 水文地球化学

中图分类号: TV 223.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0436-06

作者简介: 陈建生(1955-), 男, 江苏泗阳人, 教授, 博导。

CHEN Jian-sheng, LIU Jian-gang

(College of Civil Engineering of Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: According to the synthesis information of geological environment condition and the data determined by isotope tracer and natural tracer analysis that include hydrogeochemistry condition of Beijiang river dyke leakage, the reason of leakage and infiltration distortion of the dyke in the past years is the existence of some concentrated seepage passageways in the rock. Tracer communicating test by borehole identifies there are two seepage passageways existed in the rock and they are developing further.

Key words: infiltration distortion; temperature and conductivity; direction and velocity of the flow; tracer communicating test; hydrogeochemistry

1 北江大堤石角段地质环境条件及问题的提出*

广东省北江大堤石角段是事故多发地段, 有“屡修屡决”的历史记载, 最近的历史记载是 1994 年 6 月的五十年一遇和 1997 年 7 月的二十年一遇洪水时在距堤脚近 140, 150 m 的莲藕塘和啤酒厂一带发生严重的喷水、冒砂现象(出险点位置见图 1), 1994 年冒砂 250 m³, 1997 年冒砂 120 m³。该地段堤基下松散层厚度为 28~30 m, 从上到下分布了粘土层(厚 2.9~8.0 m)、细中砂层(厚 6~15 m)、中粗砂及砾质粗砂层(厚约 2~8 m)及连续分布的砂卵石砾石层(厚 7~8 m, 局部超过 10 m)。基岩为棕红色粉质细砂岩为主, 间夹灰白色的砂砾岩和砾岩, 泥质和钙质胶结, 含灰岩砾岩。遥感资料显示该地段断层分布较多, 在卫星遥感图可以清楚地看到在 7+340~7+390 存在一条基岩强渗漏带, 试验已经证实该强渗漏带位于堤顶下 50~70 m, 造成了 1994 年 6 月的“管涌”涌砂。在桩号为 7+370 的堤顶部另有一条北东向的断层, 基本上与图 1 中由观测孔 T19[#]、T10[#] 和 T9[#] 三孔组成的连线一致。地下水与江水之间水力联系十分密切, 且水位相当, 常常同步升降, 滞后不明显。江水呈弱酸性, pH 值 6.2 左右, 堤内各孔 pH 值接近 7.0。基岩地层已有不同程度的溶蚀现象, 如堤内 T10[#] 孔分别在深 55, 61, 62 m 处发生分

别达 0.33, 0.70, 0.40 m 的三次跌钻, 堤顶的 T18[#]、T19[#]、T26[#] 孔在深度 50~70 m 处都发生了多次跌钻, 渗透流速极大。对石角地段经常发生渗透变形的根源有不同的认识, 且争论颇多。按传统的认识, 松散层尤其是砂砾石层的透水性远比基岩强, 因此堤内发生的渗透变形均归咎于松散层的渗透, 堤基的所有防渗加固、减压措施也只针对松散层。然而北江大堤在 1990 年 10 月到 1994 年 4 月的 4 年间, 花巨资对石角段 5.3 km 的松散层进行了全截式的高喷防渗处理, 完工两个月后遇五十年一遇洪水时仍发生严重的喷水冒砂, 并在 7+330 剖面上距堤脚较远观测孔 B5[#] 的水位高于距堤脚较近的 B4[#] 孔; 在 2001 年 4 月 6 月和 7 月的洪水期间, 距堤脚较远的减压井 51[#] (8.65 L/s)、50[#] (7.57 L/s)、49[#] (5.36 L/s) (图 1 中 T13[#] 观测孔附近圆弧形分布) 的流量远大于距堤脚较近的减压井 13[#] (3.3 L/s)、14[#] (1.31 L/s)、15[#] (4.11 L/s)、16[#] (3.71 L/s) (图 1 中直线分布) 流量, 且 T13[#] 号观测孔水位也高于其他周围孔, 后排的减压井平均流量是前排的 3 倍。这些现象都无法从松散层渗透理论得到满意的解释。固然, 江水通过松散层发生渗透是客观的, 但我们认为它不是北江大堤石角段历史上事故多发的主要原因, 最根本的原因是基岩中的集中渗漏。在断层分布及基岩风化严重或溶蚀条件下, 尤其是形成通

* 收稿日期: 2001-10-08

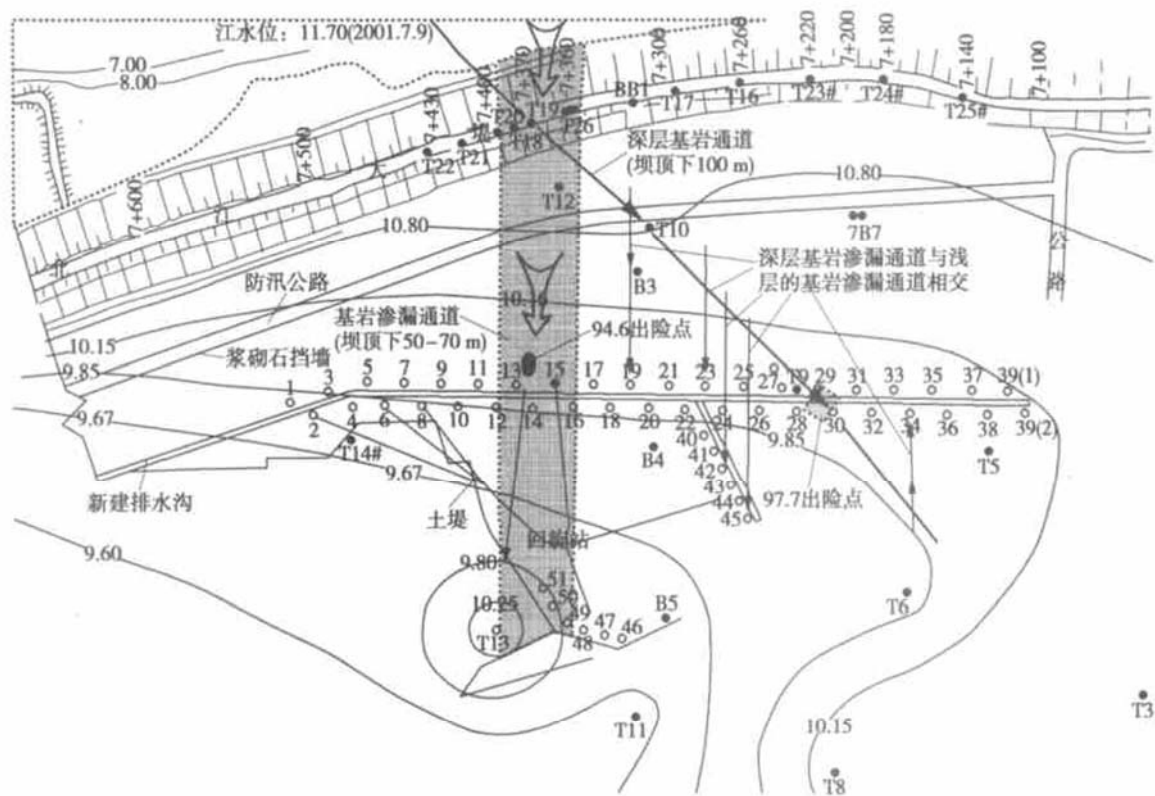


图 1 北江大堤石角段观测孔、减压井、强渗漏通道及地下水等综合平面示意图

Fig. 1 Observation holes, relief wells and strong leakage pathway in Shijiao region of Beijiang dyke

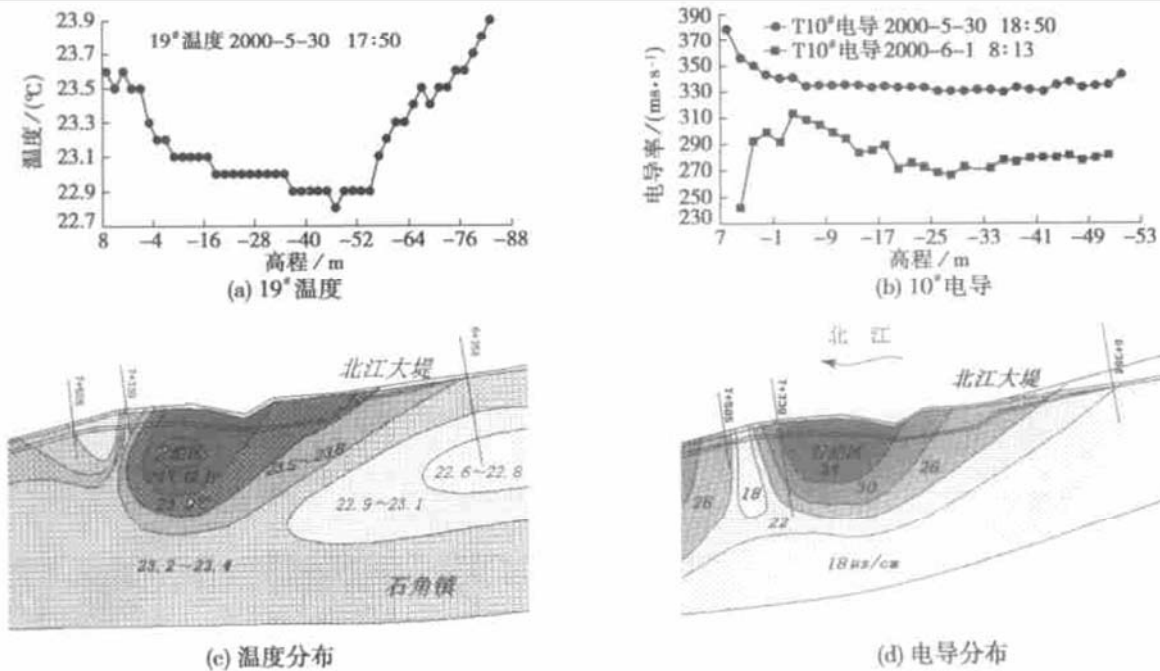


图 2 北江大堤石角段地层中温度与电导分布

Fig. 2 Distribution of temperture and electric conductivity in Shijiao region of Beijiang dyke

道后,局部基岩的渗透性是可以远大于松散层的,从石角段的地质环境条件看,基岩中发生集中渗漏是可能的。近三年来,我们运用各种测试手段(包括同位素示踪和天然示踪等综合测试手段)进行了测试,分析研究后认为基岩中发生了集中渗漏,而且渗漏严重^[1],以下

从地下水流速流向和天然示踪方面论述石角段基岩中发生的集中渗漏。

2 地下水的温度和电导分析

对基岩中存在强渗漏通道的认识是从观测孔基岩

部分发现低温谷开始的 (如图 2 (a), (b)), 低温和低电导谷的出现意味着基岩得到了外江江底低温低电导水的直接补给。通过测定地下水中的温度与电导发现, 管涌区可分为高温高电导与低温低电导两个区域, 参见图 2 (c), (d)。高温和高电导区域位于堤内 7+ 140~ 7+ 330。该区域的水主要源于深层的基岩渗漏通道, 连通试验发现该基岩通道在堤顶 100 m 以下, 通道的倾角为 30~ 35°, 如图 3 所示, 该区的温度高于周围 1 °C 左右, 正常情况下大约为深度每增加 100 m 地层的温度增加 3 °C, 温度增高表明渗漏水来自深部基岩, 由于深层渗漏通道与浅部较大的裂隙相连接, 高温高电导水通过这些次级通道补给砾石层, 造成通道附近区域均为高温与高电导。从观测孔水与江水同步变化看, 它的补给源仍是江水, 但补给位置更远, 补给途径更深更长。在“管涌”区内, T19[#]、T10[#] 和 T9[#] 三孔孔底均为高温, 1997 年 7 月的“管涌”区位于三孔连线上并十分靠近 T9[#] 孔, 所以认为三孔是相通的, 并且直接导致了 1997 年 7 月的“管涌”。

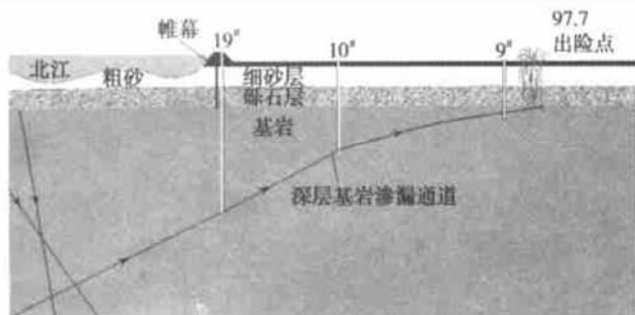


图 3 1997 年 7 月“管涌”发生在 7+ 330~ 7+ 390 的深部基岩强渗漏通道分布图

Fig. 3 Distribution of the strong leakage pathway in bedrock with piping orifice from 7+ 330 to 7+ 390 on July 1997

在堤顶 7+ 330~ 7+ 390 (深度 50~ 70 m) 一带存在一个低温与低电导区, 同位素示踪试验发现这一带的渗透流速极大, 地质上也存在断裂构造, 可以在卫星遥感图上清楚地看到, 属于强渗漏带, 如图 4 所示。

由于该通道较浅, 受到江水的直接补给, 形成了低温和低电导区域。位于该通道上减压井中的流量远大于其他的减压井, 而后排的减压井流量大于前排的减压井流量。正是该强渗漏带造成了 1994 年 6 月的“管涌”。由于该基岩渗漏通道在堤顶下的深度较浅, 宽度约为 60 m, 厚度 20 m 范围 (堤顶下 50~ 70 m) 存在空洞与松散结构, 该构造上部的基岩不到 10 m 厚, 并且并不是很完整, 若不及时进行加固处理可能会造成垮堤的危险。

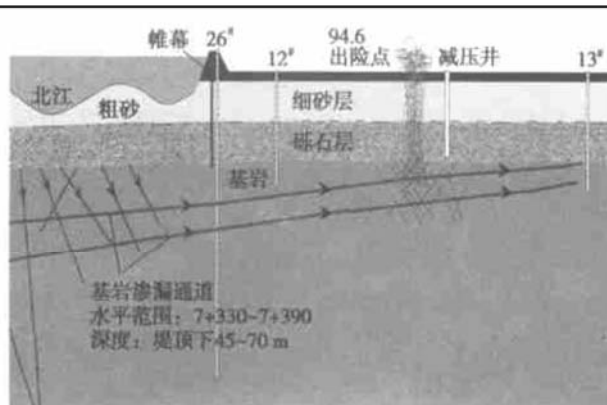


图 4 1994 年 6 月“管涌”发生在 7+ 330~ 7+ 390 的堤顶下 50~ 70 m 基岩中的强渗漏带剖面图

Fig. 4 Strong leakage pathway with the piping in bedrock below the dyke appeared in June 1997

3 地下水流速流向分析

深层基岩通道是否存在, T19[#] 与 T10[#] 之间的连通性是关键。基岩中地下水流速流向的测定发现, 即使有微弱的江水位升降, 基岩地下水与江水之间也存在密切的补排关系, 尤其是 T19[#] 和 T10[#] 孔, 即江水上涨时, 江水补给基岩地下水, 各观测孔基岩段存在向上的垂向流, 水位的升降几乎没有滞后性, 平均水平流向与 T19[#] → T10[#] → T9[#] 走向大体一致; 江水下降时, 基岩地下水排泄给江水, 各观测孔基岩段存在向下的垂向流, 平均水平流向与江水上漲时相反。渗透流速的大小与江水升降幅度和地层的渗透性密切相关, 江水升降幅度微弱时渗透流速一般很小, 但是在跌钻处或是在强透水地带渗透流速仍然很大, 如 T19[#] 和 T10[#] 的跌钻处流速最大。总之, 基岩中存在较大的水平流和垂向流, 以 T19[#] → T10[#] → 管涌区最为强烈, 而且呈交替式运动。

4 连通试验分析

基于上述地下水流向的认识, 江水位下降时若在 T10[#] 孔内投盐, 则 T19[#] 孔内应能接收到而使电导值增大。2000 年 6 月 26 日至 30 日江水位下降, 27 日上午 10 时在 10[#] 孔内集中投入 20 kg 食盐, 使 T10[#] 底部 (55 m 深, - 38 m 高程) 为源部位, T19[#] 孔在投盐前的电导本底值为 249 (26 日 17 时测), 而投盐后仅 6 h 也就是 27 日 16 时 20 分, 底部 (100 m 深, - 83 m 高程) 电导已升至 429, 之后孔内电导的变化如图 5 所示。可以看出, 孔底电导最大, 向上逐渐减小, 在孔底电导增加的同时上部也逐渐增大, 这说明 T10[#] 孔底的盐分是通过两孔底部的基岩通道流向 19[#] 的, 从而进一步证

明了T19[#]→T10[#]→T9[#]→管涌区基岩通道的客观存在,参见图3。

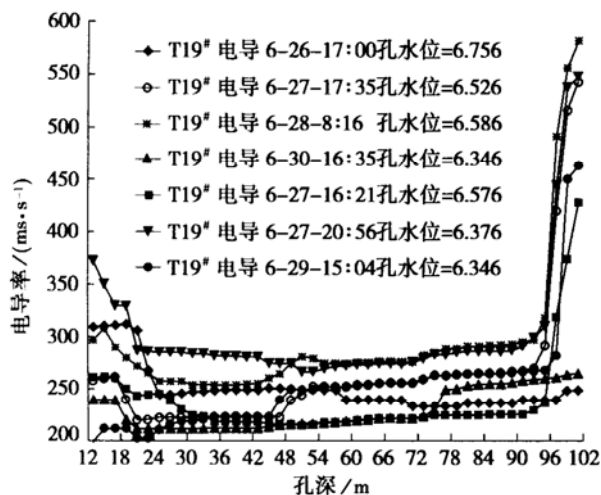


图5 连通试验时19[#]孔内电导值变化曲线

Fig. 5 Electric conductivity curve in T19[#] borehole during water connection test

我们在T19[#]与T20[#]孔之间的连通试验证实了强渗透带的存在,2000年12月17日9:40我们将10 kg食盐化成食盐水投放在T19[#]中,半小时后在T20[#]孔接收到了电导变化曲线,在基岩强渗漏带48~71 m处最先接收到了示踪剂,参见图6;1h20min后,砾石层与砂层接收到示踪剂,但浓度比基岩强渗漏带中的低;1h53min后浓度又有所下降,但并未到底。

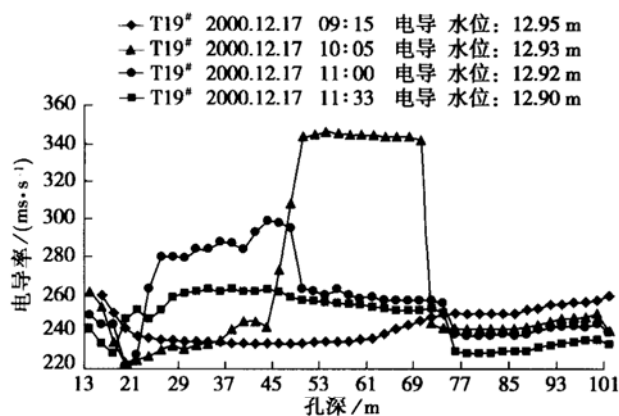


图6 T19[#]与T20[#]孔之间的连通时T19[#]的电导变化

Fig. 6 Conductivity curve in T19[#] during water connection test between T19[#] and T20[#]

5 减压井排水量分析

通过对减压井中的排水量分析研究发现:后排减压井51[#](8.65 L/s) 50[#](7.57 L/s) 49[#](5.36 L/s)的排水量最大,前排减压井13[#](3.3 L/s) 14[#](1.31 L/s) 15[#](4.11 L/s) 16[#](3.71 L/s)的排水量次之,这几个井都正好在浅层基岩的强渗漏带上,参见图1,由

于地层是倾斜的,强渗漏通道距离后排减压井更近,所以流量也更大,还造成了观测孔T13[#]的水位高于周围的14[#]等孔。

由于在堤顶除了7+330~7+390的强渗漏带为连通的外,其余在17[#]、16[#]、23[#]、24[#]孔之间并不连通。流向测定发现基岩渗漏的方向一般都与堤坝正交或斜交。在T19[#]→T10[#]→管涌区的强渗漏通道为倾斜,参见图3。倾角大的深部通道与浅层基岩裂隙通道在空间上相交,渗漏通道中的水将通过这些相交的小裂隙通道迅速补给砾石层,减压井19[#]、23[#]、42[#]、25[#]、44[#]、45[#]、30[#]、34[#]中的流量较大正是这个原因(因为1997年管涌区的地下水为高温与高电导,而堤顶BB1[#] T16[#] T17[#] T23[#] T24[#] T25[#]孔都为低温与低电导,所以减压井中的主要排水量来自于深部基岩),参见图7、图8与图1。这就可以解释为什么后排减压井如42[#]、44[#]、45[#]、30[#]、34[#]的流量大于前排。后排减压井41[#]~51[#]每孔的平均排水量为前排(1[#]~39[#])每孔平均排水量的3倍。

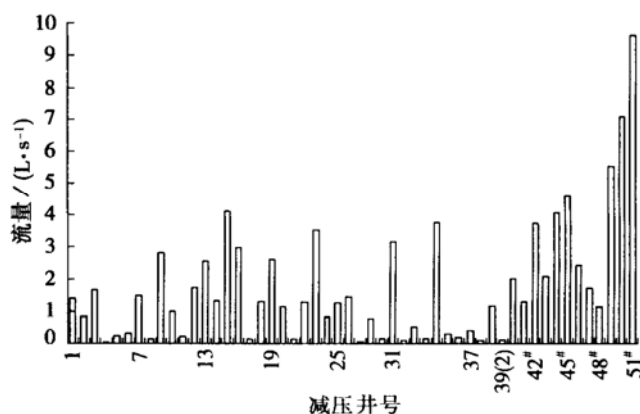


图7 北江大堤石角段减压井流量分布

(2001年4月21~23日平均流量(L/s))

Fig. 7 Average flow distribution in relief wells (L/s) from 21 to 23, April 2001 in Shijiao region of Beijiang dyke

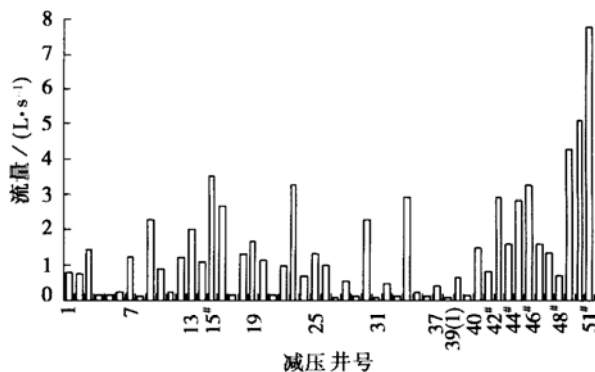


图8 北江大堤石角段减压井流量分布

(2001年6月14~16日平均流量(L/s))

Fig. 8 Average flow distribution in relief wells (L/s) from 14 to 16, June 2001 in Shijiao region of Beijiang dyke

表 1 基岩水质分析结果

Table 1 Test result of water quality

采样位置	电导率 ($\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$)	硫酸盐	Cl 离子	重碳酸根	钙离子	镁离子	钠钾离子	二氧化硅	水化学类型
/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)									
T5	29.4	< 5.0	10.60	130.0	44.1	7.29	3.70	22.6	HCO_3-Ca
T6	15.3	< 5.0	4.95	66.3	19.2	5.83	2.00	25.0	$\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$
BT7	38.3	47.8	7.08	128.0	60.9	6.80	3.80	16.4	$\text{HCO}_3, \text{SO}_4\text{Ca}$
T8	37.2	< 5.0	3.54	195.0	58.5	10.20	7.20	23.0	HCO_3-Ca
T11	46.0	9.2	4.60	231.0	78.6	10.70	3.30	22.6	HCO_3-Ca
T12	18.2	< 5.0	4.60	80.1	28.1	8.26	0.00	19.9	$\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$
T13	40.2	< 5.0	4.25	213.0	67.3	9.72	6.70	15.8	HCO_3-Ca
T14	17.2	< 5.0	2.12	78.6	25.7	5.83	0.00	17.7	$\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$
T16	30.7	14.8	4.95	143.0	51.3	11.70	0.00	18.4	$\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$
T17	40.2	11.5	3.54	181.0	65.7	7.78	0.90	24.1	HCO_3-Ca
T21	34.5	6.5	5.66	150.0	52.9	10.70	0.00	22.1	$\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$
T26	24.9	< 5.0	7.08	110.0	36.9	6.80	1.20	19.5	HCO_3-Ca
T9 北边冒水	36.4	12.1	1.77	175.0	65.7	4.86	3.00	23.4	HCO_3-Ca
江水	17.2	< 5.0	2.83	77.6	20.8	3.40	9.10	9.85	HCO_3-Ca

6 基岩的水文地球化学特征分析

地下水的地球化学特性也是分析研究堤基渗漏强度和部位的有效手段^[2]。针对北江大堤石角段复杂的水文地质条件,在国际著名西班牙堤防专家 Plata 教授的指导下,对各观测孔进行了取样分析(表 1),由于各孔深入基岩,样品取自孔底,因此水样的地球化学特性基本反映了基岩的水文地质条件特性。

(1) T8[#] 孔: 位于管涌区的边缘,电导率较高,二氧化硅的含量中等,Cl⁻ 离子含量低,可能受降水影响。再就它所处的位置看,地下水理应流动缓慢且远距离迁移,但二氧化硅的含量不如上述四个孔高,与 T11[#] 孔比较,电导率、Cl⁻ 离子含量及水位均低于 T11[#] 孔,故地下水流向 T11[#] 孔。

(2) T12[#] T13[#] T14[#] 孔: T13[#] 孔及其附近的减压井在 2001 年的汛期水位高、流量大, T13[#] 孔水位甚至高于位于其上游的 T14[#] 孔、北边的 T6[#] 孔和其他各孔,这一定存在深部基岩的强渗漏通道,先比较 T14[#] 和 T13[#] 两孔的电导和 Cl⁻ 离子含量,两者均是 T14[#] 低于 T13[#],看起来是符合地下水径流的水化学规律的,但水位是 T13[#] 高于 T14[#],说明两孔地下水有不同的补给水源;再比较 T13[#] 和 T12[#] 孔,二氧化硅和 Cl⁻ 离子含量比较接近,但电导率 T13[#] 明显高于 T12[#] 孔,水位的情况是 T12[#] 高于 T13[#] 孔,这说明 T12[#] 与 T13[#] 之间是相通的,这一通道恰巧跨越了 1994 年 6 月五十年一遇洪水时的出险点。T12[#] 与 T13[#] 的取样深度分别为 37 m 和 35 m,入岩不到 10 m,因此这一通道大致位于基岩的风化带内,由于 T12[#] 孔入基岩的深度不够,未能揭露强渗漏带。T12[#] 的电导率和二氧化硅含量

均较低,接近于江水但又高于江水的值,该孔的位置比较接近于堤轴,水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$ 型,这些说明 T12[#] 孔的基岩地下水与江水水力联系十分密切。通道的入口与 T19[#] → T10[#] → T9[#] 通道入口接近,但深度是不同的。

综合上述分析,在基岩内已形成了从 T19[#] T26[#] → T12[#] → T13[#] 的集中渗漏通道,深度位于高程 - 33 ~ - 53 m 之间。另外, T14[#] 的水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$ 型,镁的含量增大是因为基岩地层中有灰岩砾石,在弱酸性的江水作用所致,这正好说明了 T14[#] 与该通道无关,它直接接受江水的补给。

(3) T11[#] 孔: 位于管涌区的边缘,电导率、二氧化硅的含量、Cl⁻ 离子含量均高于 T13[#] 孔,但水位低于 T13[#] 孔,因此接受 T13[#] 孔地下水的补给。

(4) BT7[#] 孔: 水化学类型最特别的一个孔,为 $\text{HCO}_3, \text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水。虽然电导率不低,达 38.3 ms/m,但其二氧化硅的含量不高,且位置离堤轴又近,说明 BT7[#] 孔附近基岩中接受了江水的补给但地下水活动并不活跃,因此水中 Cl⁻ 离子含量有所提高,硝酸根含量的提高进一步说明地下水径流缓慢,因此它与位于 T9[#] 附近的管涌区以及 T10[#] 孔水力联系不密切,即 T9[#] 附近的管涌区地下水并不来自 BT7[#] 孔方向,这一点在别的方面分析时也得到同样的结论。

(5) T6[#] 孔: 位于基岩集中渗漏通道 T19[#] → T10[#] → T9[#] 附近管涌区的延线上,很容易联想这一基岩集中渗漏通道是否延伸到了 T6[#] 孔,水化学分析肯定了这个猜想。T6[#] 的 Cl⁻ 离子含量及电导均低于周围的 T5[#] 和 T8[#] 孔,因此, T6[#] 孔基岩不会得到 T5[#] 和 T8[#] 孔方向地下水的补给;与 T13[#] 孔比较,虽然 Cl⁻ 离子

含量 $T6^{\#}$ 高于 $T13^{\#}$ 孔,但电导却 $T13^{\#}$ 孔高于 $T6^{\#}$,来自 $T13^{\#}$ 孔方向的补给也是不可能的, $T6^{\#}$ 的 Cl^{-} 离子含量由 $T9^{\#}$ 附近管涌区的地下水补给而增加。

总之,从水化学分析基岩集中渗漏通道已由 $T19^{\#} \rightarrow T10^{\#} \rightarrow T9^{\#}$ 附近管涌区延伸到了 $T6^{\#}$ 孔。

(6) $T9^{\#}$ 北边地面冒水:位于 $T9^{\#}$ 旁的减压井边上和距 $T9^{\#}$ 孔4 m处的减压井另侧的两个地面冒水孔,它们所处的正是1997年7月二十年一遇洪水时的出险点。电导率和二氧化硅含量均高,说明是深部基岩集中渗漏补给,但其 Cl^{-} 离子含量仅1.77 mg/L,甚至比江水还低,与大气降水十分接近,而在取水样的前几天恰巧下了大雨,故这两处冒水孔的水既有深部基岩集中渗漏补给成分,也有降水补给的成分。

(7) $T5^{\#}$ 孔:位于管涌区的边缘,接近生活区, Cl^{-} 离子含量偏高,电导率和二氧化硅含量不低,说明地下水流动缓慢;与 $T6^{\#}$ 孔比较, $T5^{\#}$ 孔的电导率和二氧化硅及 Cl^{-} 离子含量均高于 $T6^{\#}$ 孔,水位也高于 $T6^{\#}$ 孔,因此 $T5^{\#}$ 孔与延伸了的基岩集中渗漏 $T9^{\#} \rightarrow T6^{\#}$ 之间不存在明显的水力联系。

(8) $T16^{\#}$ 、 $T17^{\#}$ 、 $T21^{\#}$ 和 $T26^{\#}$ 孔:均位于堤顶。 $T16^{\#}$ 、 $T17^{\#}$ 、 $T21^{\#}$ 三孔的电导率高,二氧化硅含量不高, Cl^{-} 离子含量与江水接近,反映了这三孔的基岩地下水接受了江水的补给,但流动缓慢,基岩透水性差。对 $T26^{\#}$ 孔,其电导率在堤顶各孔中是最低的,二氧化硅含量也较低,说明与江水水力联系较为密切,基岩透水性较强,在洪水期间应注意观察。

7 结 论

(1)北江大堤石角段的地质环境条件具有明显的复杂性,根据室内测定到的堤内砂层与砾石层的渗透系数($10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/s)进行的数值计算与分析很容易作出“管涌”来自松散层的错误结论。钻孔中取出的

岩芯砂样在水的循环作用下砂层与砾石层岩样中的细颗粒已经被带走,使得室内测定到的渗透系数大了两到三个数量级,注水试验和示踪试验得到的渗透系数为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm/s。

(2)断裂构造的发育是石角段基岩型渗漏的基础。在大多数堤顶钻孔中发现,江水涨落时跌钻强渗漏段的水样为浑浊状,水力冲刷对于泥质胶结的软岩的溶蚀作用明显,是形成集中渗漏通道的关键。石角段发生的渗透变形主要源于基岩集中渗漏通道,目前存在两条集中渗漏通道,并仍处于进一步的发展过程中。

(3)基岩深部集中渗漏通道 $T19^{\#} \rightarrow T10^{\#} \rightarrow T9^{\#}$ (图1中粗黑箭头线)是1997年7月发生险情的直接原因,该通道目前已经延伸到了 $T6^{\#}$ 孔,深部的集中渗漏通道与浅层的基岩构造相交,使流经深部通道的水迅速补给到 $T9^{\#}$ 孔周围一带的砾石层,造成这一带的高温与高电导, $T9^{\#}$ 孔北边4 m处的地面涌水就是来自该深层通道的补给;基岩浅部集中渗漏通道 $T26^{\#} \rightarrow T12^{\#} \rightarrow T13^{\#}$ (图1中阴影)是1994年6月发生险情的直接原因,其喷水冒砂的部位恰巧位于这一通道上,也是今年汛期 $T13^{\#}$ 孔高水位及其附近减压井高流量的原因。

(4)2001年7月11日10时的江水位已经低于 $T9^{\#}$ 孔附近出水点的高程,但地表的涌水仍然持续了很长一段时间; $T10^{\#}$ 孔中垂向流的变化规律也能发现深层渗漏通道的水位滞后于江水位一段时间。二者都表明深层渗漏通道在河床底受到江水的补给方式为经过了松散的砂砾石层。

参考文献:

- [1] 刘建刚,陈建生,陈亮.北江大堤石角段基岩渗漏评价及形成机理分析[J].水文地质工程地质,2001,(4):23-25.
- [2] 李学礼.水文地球化学[M].北京:原子能出版社,1988.