

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231007003

## 北江大堤管涌加固工程问题剖析\*

李兴文<sup>1</sup>, 陈建生<sup>2</sup>

(1. 中电建生态环境集团有限公司, 广东 深圳 518102; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 北江大堤石角段尽管经历了4次大规模的加固工程,但在十年一遇的洪水中,堤防仍然面临管涌险情。经对北江大堤石角段的管涌进行分析,发现这些反复出现的问题主要集中在红砂岩层。所谓的管涌通道实际上是红砂岩中的一些溶洞,是红砂岩中的碳酸盐钙质胶结物在水岩反应中流失钙离子后形成的,属于化学侵蚀的结果。北江石角段断裂带发育,江水通过断裂带与左岸的地下水直接连通,河水与地下水通过断裂带与溶洞往复流动,在CO<sub>2</sub>的参与下发生水岩反应,导致红砂岩中的钙质胶结物被溶蚀,从而形成溶洞。在洪水期间,随着江水位上涨,外江水位高于地表,江水压力通过溶洞传递到堤角覆盖层之下。当江水压力大于覆盖层的浮容重,则会发生流土破坏,进而演变成管涌。研究认为,在枯水期通过钻孔灌浆的方法将红砂岩层中的溶洞填充,才能全面消除管涌危害。

**关键词:** 北江大堤; 石角段; 管涌; 红砂岩; 溶洞; 化学侵蚀

**中图分类号:** P614 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0243-07

### Analysis of Problems in Reinforcement Project of Beijiang River Embankment Piping

LI Xingwen<sup>1</sup>, CHEN Jiansheng<sup>2</sup>

(1. PowerChina Eco-Environmental Group Co., Ltd., Shenzhen 518102, China;

2. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Despite undergoing four large-scale reinforcement projects, the Shijiao section of the Beijiang River embankment still faces the risk of piping during once-in-a-decade floods. An analysis of the recurrent piping disasters in this section reveals that the primary issues are concentrated in the red sandstone layers. The so-called piping channels are actually cavities in the red sandstone formed by the loss of calcium ions from the carbonate calcium cement during water-rock reactions, representing a result of chemical erosion. The fault zones are developed in the Shijiao section, and the river water is directly connected to the underground water on the left bank through the fault zone. River water and groundwater flow reciprocally through the fault zone and cavities, and water-rock reactions occur with the participation of CO<sub>2</sub>. This process leads to the dissolution of calcium-cemented materials in the red sandstone, forming cavities. During the flood period, as the water level rises and the outer river water level is higher than the ground surface, the pressure of river water is transmitted through the cavities to the layer beneath the embankment cover. When the water pressure exceeds the buoyant unit weight

\* 收稿日期:2023-10-07;修回日期:2024-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51578212)资助

作者简介:李兴文(1977—),男,高级工程师,硕士。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:535515170@qq.com

of the cover layer, soil erosion occurs, eventually evolving into piping. Research suggests that filling the cavities in the red sandstone layer through grouting with boreholes during the dry season is necessary to comprehensively eliminate the hazards associated with piping.

**Keywords:** Beijing River embankment; Shijiao section; piping; red sandstone; karst cavity; chemical erosion

## 0 工程背景

管涌是堤防工程中最常见的险情之一。在1998年长江大洪水期间,中下游堤防发生的险情共计73 825处,其中较大险情1 702处,有51.2%是由管涌引起的;长江干流堤防较大险情698处,管涌引起的占52.4%<sup>[1]</sup>。管涌会导致大坝或堤防底部的土体在渗流力的作用下,土颗粒不断脱离骨架随着水流向外排出,形成孔道,大坝或堤防地基土壤骨架遭到破坏。随着孔道的不断扩大,基土被掏空,引发大坝或堤防坍塌,造成决堤、垮坝等险情。

北江位于广州市的北部,其大堤石角段历史上是管涌灾害频发地段,有着“屡修屡决”的历史记载。在1915年的珠江流域暴雨中,北江大堤石角段曾发生决堤,导致洪水淹没了广州市,致使广州市区水淹7天7夜,洪灾造成广州及珠江三角洲地区受灾人口达378万,死伤超10万人,造成了巨大的人员和财产损失。为了彻底解除管涌隐患,同时确保加固工程能够抵抗百年一遇的洪水,1989~2004年期间广东省水利厅进行了四次大规模的加固工程,并组织了多次学术研讨会,邀请国内外专家对北江大堤石角段管涌发生原因与治理方案进行了深入讨论。关于管涌产生原因存在严重分歧,一种观点认为,管涌是土体遭受到了渗透破坏,属于物理破坏;另一种观点则认为,管涌发生在钙质胶结的红砂岩中,属于化学破坏<sup>[2-9]</sup>。最终,水利厅采纳了土体中发生管涌破坏的工程处理方案,进行了灌浆、压渗与排水相结合的加固工程。然而,加固工程实施后,北江大堤石角段在2005年6月与2022年6月分别经历了两次十年一遇的洪水,尽管外江水位远低于设计标准,但管涌问题再次显现,表明石角段的管涌治理工程没能达到预期效果,长期遗留的管涌隐患仍旧十分严峻。

## 1 研究区地质概况

北江从清远到三水段穿越红砂岩地层,历史上

曾多次在这段发生决堤。北江大堤石角段堤顶高程17 m,堤高11 m左右,下卧第四系冲积层,总厚度25~30 m,剖面如图1所示<sup>[8]</sup>。石角堤段自修建以来,汛期在外江较高水位作用下,堤内管涌冒砂、牛皮胀等现象严重。早期认为管涌仅与第四系冲积层水有关,而与基岩水无关。1990~1994年期间对管涌频发的石角5.3 km段堤顶的砂卵石层进行高喷灌浆,在基岩岩层上形成连续阻水墙。但在1994年6月的五十年一遇和1997年7月的二十年一遇洪水中,北江大堤仍发生了严重的管涌,涌砂量分别达到250 m<sup>3</sup>与120 m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>。可见高喷灌浆没有解决堤内管涌问题,管涌发生的原因可能不在第四纪冲洪积层。

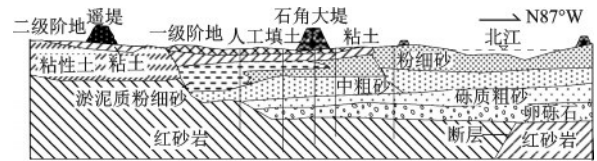


图1 北江大堤石角段典型工程地质剖面示意<sup>[8]</sup>

Fig.1 Typical geological cross-section schematic of Shijiao section in the Beijiang River embankment<sup>[8]</sup>

广东省广泛分布红砂岩地层,北江是穿越该地区最大的河流,从清远到三水一段,北江沿红砂岩的西部边界流过。北江大堤位于江南,都处于红砂岩地区,如图2所示<sup>[11]</sup>。北江大堤石角镇以下的堤段基础为第三系红层上的第四系冲积层,其上部为薄层壤土,下层为透水的砂、卵石层,深达30余米。第三系红层是厚度达几百米的红砂岩层,形成于晚白垩纪至早古新纪时期<sup>[12]</sup>。红砂岩中的钙结壳为湖相沉积的泥灰岩,而钙结核则是湖底水下环境沉积形成<sup>[13]</sup>。红砂岩剖面钙质含量随地层变化,均值约为6.6%<sup>[14]</sup>。北江大堤石角段地势低平,是南北向河谷冲积平原,东西宽约1~2 km。沿江左岸有两级河漫滩冲积阶地,高程为6~9 m和10~14 m,下伏为第三系红层。平原东面是海拔80~200 m的丘陵山区,江中有砂质心滩,随江水位变动而时隐时显。

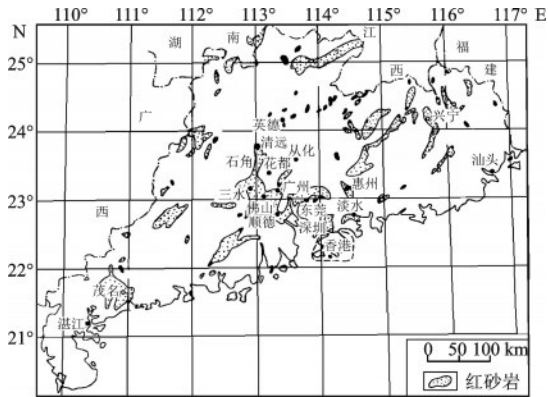


图2 广东省钙质胶结成因的红砂岩分布<sup>[11]</sup>

Fig.2 The distribution of red sandstone with carbonate calcium cementation origin in Guangdong Province<sup>[11]</sup>

红砂岩主要由砂岩、页岩、泥岩、灰岩、石膏等颗粒组成。由于这些土颗粒被钙质胶结成固态,红砂岩遭到化学侵蚀后,随着钙质流失将产生溶洞,这些溶洞沿断裂带分布。流经红砂岩地区的河流,如果河床下覆的张性断裂带发育,河水与两岸地下水可能通过断裂带联通,从而造成溶洞发育。河底红砂岩中的溶洞可以迅速将河水传输到两岸,在洪水期间造成管涌。北江大堤石角段溶洞发育,其中部分为多层串珠状溶洞,填充物主要是软塑黏性土、砂层或卵砾石,而部分溶洞则没有填充物,钻探时漏水现象严重。在清远枢纽二线船闸场区内,共完成858个钻孔,其中320个发现溶洞,见洞率为37.3%,溶洞高度为0.20~12.80 m,层顶埋深为25.20~69.30 m<sup>[14]</sup>。

地质勘探结果显示,在北江大堤石角段管涌区域内的15个钻孔(详见图3)中,采集到的红砂岩呈现朱红、红褐色,为粉细砂岩,夹有灰白色砾岩。红砂岩层的倾角在5~20°,局部夹有全风化土或破碎软弱夹层。岩芯洗净后手摸有泥质感,放入清水中

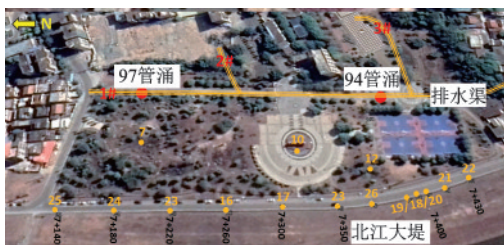


图3 北江大堤石角段管涌频发带排水减压孔及排水渠分布  
Fig.3 Distribution of pressure-reducing holes and drainage channels in the area prone to frequent piping in the Shijiao section of the Beijiang River embankment

水变浑浊,滴上稀盐酸后,粉砂岩及砾岩均冒大量气泡。粉砂岩的主要碎屑物包括石英、长石及少量白云母、岩屑等,颗粒分选性较好,呈钙质胶结,胶结物占总量的25%~30%。方解石占90%~95%,泥质占10%~15%。砾岩中的砾石成分包括灰岩、细砂岩及少量粉质、泥质岩,砾石占80%~85%,其中灰岩占50%~55%,粉砂质泥岩占5%~10%。胶结物占15%~20%,其中钙质占60%~65%,泥质占30%~35%。由于长期水岩反应,岩芯显示不同程度的溶蚀<sup>[15]</sup>。

地质勘探结果显示,在北江大堤石角段管涌区域内的15个钻孔(详见图3)中,采集到的红砂岩呈现朱红、红褐色,为粉细砂岩,夹有灰白色砾岩。红砂岩层的倾角在5~20°,局部夹有全风化土或破碎软弱夹层。岩芯洗净后手摸有泥质感,放入清水中水变浑浊,滴上稀盐酸后,粉砂岩及砾岩均冒大量气泡。粉砂岩的主要碎屑物包括石英、长石及少量白云母、岩屑等,颗粒分选性较好,呈钙质胶结,胶结物占总量的25%~30%。方解石占90%~95%,泥质占10%~15%。砾岩中的砾石成分包括灰岩、细砂岩及少量粉质、泥质岩,砾石占80%~85%,其中灰岩占50%~55%,粉砂质泥岩占5%~10%。胶结物占15%~20%,其中钙质占60%~65%,泥质占30%~35%。由于长期水岩反应,岩芯显示不同程度的溶蚀<sup>[15]</sup>。

在石角段桩号7+140~7+430的15个钻孔中,有7个钻孔揭露的红砂岩中存在溶洞。在坝顶的12个钻孔中,共揭露了16个红砂岩层中的溶洞,其直径在0.5~3.7 m。1997年的管涌点与24号钻孔中的溶洞相对应,而1994年的管涌点与19-18-20号钻孔中的溶洞相对应。其中最多一个钻孔揭露的溶洞达到4个,溶洞距离地表最近的距离约为30 m。图4中圈出的溶洞集中分布带距离地表30 m,这一区域显然是堤防可能出现塌陷的地带<sup>[16]</sup>。

## 2 研究结果与机理分析

钻孔揭露发现,北江大堤石角段管涌频发区的红砂岩地层中存在溶洞,如图4所示。采用稀释测速方法对钻孔中的渗透流速进行了测定。图5展示了10号孔中渗透流速及垂向流随深度的分布。由于钻孔水流带来的细颗粒在钻孔底部淤积了将近

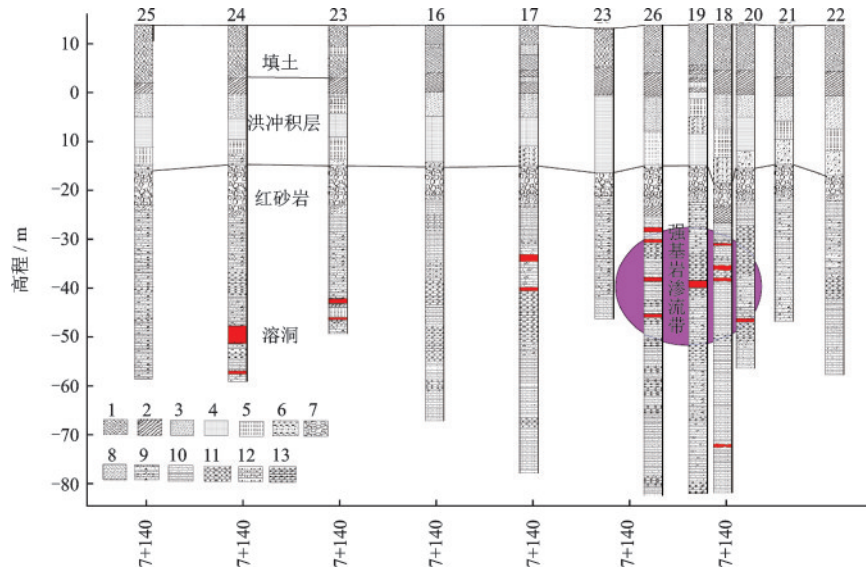


图4 石角段管涌发生区堤顶钻孔中溶洞分布剖面

Fig.4 Profile map of karst caves distribution in boreholes at the crest of the embankment in the piping zone of the Shijiao section  
注:1-壤土;2-冲击黏土;3-粉细砂;4-细砂;5-粗砂;6-砾质粗砂;7-卵砾石;8-砾质黏土;9-全风化砂砾岩;10-弱风化砂岩;11-弱风化砾岩;12-强风化砂岩;13-弱风化砾岩夹砂岩

5 m, 测量深度为 58 m。可见埋深 50~58 m 段的渗透流速极大, 最大值超过 30 m/d, 这表明在这个深度范围内, 红砂岩地层中存在着高速的渗流。需要注意的是, 测量期间为枯水期, 江水位与两岸的地下水位差值很小, 说明渗透流速的增大主因为地下水的流动而非江水的影响。

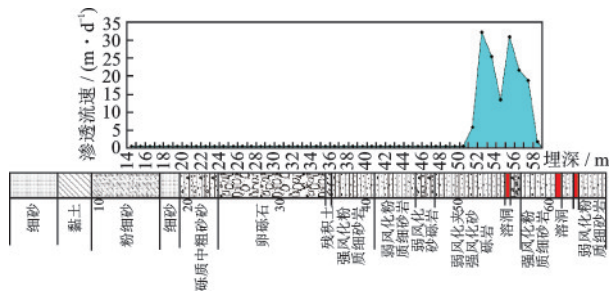


图5 石角T10#观测孔中溶洞、渗透流速与垂向流分布  
Fig.5 Distribution of karst caves, permeability flow velocity, and vertical flow in observation hole T10# in Shijiao section

环境同位素示踪试验发现, 洪水期间, 江水通过红砂岩层中的溶洞快速传输到观测孔中, 孔中的温度与电导率同时发生突变, 从而证实基岩溶洞与江水是连通的, 据此判断, 石角段断裂带发育, 江水通过断裂带与堤防两岸的地下水连通, 地下水在反复流动的过程中发生了水岩反应, 红砂岩层中的钙质被不断溶蚀形成溶洞<sup>[17]</sup>, 溶洞极有可能形成导水

通道并诱发了管涌。

大多数对于北江大堤管涌成因的认识都是基于传统的土力学土体渗透破坏机理, 所采取的工程加固方案也是导渗压渗、设反滤圈井、减压井等常规措施, 但从洪水期管涌频发段的排水孔观测数据可以看出, 东西向分布的2号与3号排水渠中排水井的平均涌水量是南北走向的1号排水渠中排水井涌水量的3倍<sup>[17]</sup>(见图3), 结合上述试验和勘探结果, 分析其原因在于, 加强排水虽可适当释放渗透水压, 但也加速了红砂岩层中钙质的溶解, 使岩层中的溶洞迅速扩大, 导致外江水位的压力更容易传递到覆盖层以下, 覆盖层土体薄弱处受到水压冲击而形成流土破坏, 严重时在堤角出现管涌现象。

也就是说, 北江大堤的管涌通道更有可能发生在钙质胶结的红砂岩层中, 这些通道是在长期的化学侵蚀作用下形成的。由于北江水是通过红砂岩层中的溶洞与堤内的地下水连通的(图6), 只要找到历史上曾经发生过的管涌位置, 就可以大致判断出溶洞所在地带; 在枯水期从河道一侧的堤角进行钻探, 揭露溶洞后自上而下进行灌浆封堵处理, 并根据排水量确定溶洞的封堵效果, 以达到工程治理的目的。

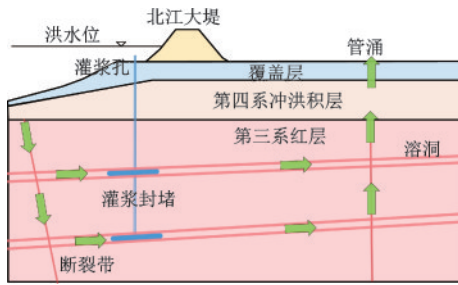


图6 北江大堤红砂岩管涌产生机制及工程加固示意

Fig.6 Schematic diagram of mechanism and engineering reinforcement of red sandstone piping in the Beijiang River embankment

### 3 讨论

作者自1992年第一次应邀去北江大堤视察就开始关注石角段发生的管涌破坏,历经4年大规模的现场试验和勘探十数次,采用各种渗漏探测方法对管涌区开展调查,并首次将自流井理论用于管涌发生初期地层承压水头与流速的分布研究<sup>[7]</sup>,该方法后被茅昶熙教授所采用<sup>[2-4]</sup>。

在决定北江大堤加固方案之前曾邀请过有关单位和专家参加研讨会,虽有国际知名专家赞同作者提出的基岩中存在强渗漏通道的见解,并建议对大堤下部红砂岩层中的溶洞进行封堵处理,但与会的大部分专家表示质疑,最终通过了坝顶高喷灌浆、堤内压渗砂和修建减压井的加固方案。52个减压井都深入到红砂岩层中,岩层溶洞中的水直接通过减压井自流溢出,汇入三条排水渠中,如图3所示。其结果就是,堤内承压水位减低了,减少了地表覆盖层中流土的发生,但减压井排水加大了下部溶洞中的输水量,堤内外地下水通过溶洞的交换量增大,溶洞遭受的化学侵蚀也增大了。虽然一些研究人员通过模型计算认为石角段的防渗工程是有效的<sup>[18]</sup>,但防渗工程竣工后,每逢高水位险情还是不断。2005年6月在石角下灵洲距堤防170 m处又发生管涌,管涌点出现在减压井排水渠的东部。2022年6月同样的管涌险情再度出现。

1997年7月石角段发生管涌时的外江水位为13.97 m,北江大堤防洪标准为二十年一遇洪水;1994年6月发生管涌时外江水位为14.65 m,提高到百年一遇,石角段设计洪峰流量18 800 m<sup>3</sup>/s,相应水位15.36 m;2005年6月北江洪水时石角段桩号10+300离堤130 m处发生管涌,此时最高江水位仅

12.35 m<sup>[19]</sup>;2022年6月23日,外江水位12.12 m,石角段出现的管涌达到11处,在灵洲Ⅱ段发现距离堤脚约170 m外水田的管涌不但水量大,而且浑浊带沙,涌水高度约0.4 m,涌水口直径约0.3 m。值得注意的是,2005年6月与2022年6月发生管涌的外江水位都只达到十年一遇,远远低于1994年百年一遇的防洪设计标准。经过4次大规模工程加固后的北江大堤防洪能力非增反弱,值得深思。

事实证明,在北江大堤加固工程中,对石角段下基岩断裂带的透水性认识不足。新生代以来,随着青藏高原的快速隆升,形成了一些新的构造,这些构造具有一定的活动性<sup>[20]</sup>。基岩中的张性导水断裂通过地下水与江水相连,岩层中含有钙质胶结,由于钙质与水中的CO<sub>2</sub>发生水岩反应后生成碳酸根离子与钙离子,钙质溶蚀后在红砂岩层中形成溶洞,而砂颗粒则沉积在溶洞下部,失去了承载能力。一旦溶洞发生塌陷,则可能发生垮堤。由于溶洞塌陷都与洪水有关,给北江大堤的防洪留下了极大的地质隐患。

现有的渗流计算由于缺乏地质参数和准确的边界条件,对渗透破坏的认识仍有一定局限性。尤其对于数值模拟而言,涉及到裂隙和溶洞等离散单元的处理,将非均匀边界的地质体等效为均匀介质反演渗流场可能导致对真实情况的误判,所得结果不一定可靠。如果没有全面了解复杂的工程背景并进行深入的水文地质勘查,而是直接利用概念模型得到的渗流场去指导防渗加固工程,可能会导致严重的后果,石角段的加固工程就是一个典型的范例。

### 4 结语

管涌有物理与化学两种成因,对于化学成因的管涌而言,管涌通道是由红砂岩层中导水的溶洞形成的,这些溶洞是化学侵蚀的结果,溶洞沿着富含钙质的层位发育,溶洞发育与断裂带的活动性有关。北江大堤石角段的加固工程对于管涌的预防效果不理想,应尽量减少地下水在溶洞中的对流作用,建议关闭堤内减压井,定期采样进行水化学分析,根据钙、镁等离子的分布情况判断红砂岩溶蚀的程度。

化学成因的管涌与土体中管涌的成因不同,红砂岩层中溶洞形成的时间很长,地表压渗与排水孔

减压的方式难以进行预防。采用灌浆方法自上而下封堵红砂岩层中的溶洞,减小江水与堤内地下水在溶洞中的交换量,是预防由于管涌产生的形变导致垮堤最有效的工程加固措施。在汛期要加强汛期出水点的观测,确定溶洞的可能位置,在枯水期及时进行勘探并进行灌浆封堵处理。同时加强堤防的形变观测,通过形变及时发现溶洞的塌陷,预防在洪水期发生垮堤。

## 参考文献:

- [1] 姚秋玲,丁留谦,刘昌军,等.堤基管涌破坏特性研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2014,12(4):349-357.  
Yao Q L, Ding L Q, Liu C J, et al. Overview on the research of the mechanism of backward erosion piping in dike foundations[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4): 349-357. (in Chinese)
- [2] 毛昶熙,段祥宝,蔡金榜,等.北江大堤典型堤段管涌试验研究与分析[J].水利学报,2005,36(7):818-824.  
Mao C X, Duan X B, Cai J B, et al. Experimental study and analysis on piping of levee in Beijiang River [J]. Shuili Xuebao, 2005, 36(7):818-824. (in Chinese)
- [3] 毛昶熙,段祥宝,蔡金榜,等.堤基渗流管涌发展的理论分析[J].水利学报,2004,35(12):46-50.  
Mao C X, Duan X B, Cai J B, et al. Theoretical analysis on piping development of levee foundation[J]. Shuili Xuebao, 2004, 35(12):46-50. (in Chinese)
- [4] 毛昶熙,段祥宝,蔡金榜,等.悬挂式防渗墙控制管涌发展的理论分析[J].水利学报,2005,36(2):174-178.  
Mao C X, Duan X B, Cai J B, et al. Theoretical analysis on piping development control by means of suspended cut-off wall [J]. Shuili Xuebao, 2005, 36(2): 174-178. (in Chinese)
- [5] 茹建辉.关于堤基渗流无害管涌试验研究的讨论(续)[J].水利学报,2006,37(6):764-766.  
Ru J H. Discussion on experimental study of seepage and harmless piping in dike foundation (continued)[J]. Shuili Xuebao, 2006, 37(6):764-766. (in Chinese)
- [6] 陈建生,李兴文,茹建辉,等.北江大堤石角段同位素综合示踪探测管涌研究[J].工程勘察,2001(6):4-30.  
Chen J S, Li X W, Ru J H, et al. Study on piping detection with synthetic isotope tracer in Shijiao section of North River[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(6):4-30. (in Chinese)
- [7] 陈建生,李兴文,赵维炳.堤防管涌产生集中渗漏通道机理与探测方法研究[J].水利学报,2000,31(9):48-54.  
Chen J S, Li X W, Zhao W B. Study on piping leakage mechanism[J]. Shuili Xuebao, 2000,31(9):48-54. (in Chinese)
- [8] 叶合欣,黄春华,陈建生,等.北江大堤石角管涌多发段基岩地质条件分析[J].水文地质工程地质,2003,30(4):76-78.
- [9] 陈建生,董海洲.井中测定流速广义示踪稀释物理模型[J].水利学报,2002,33(9):122-130.  
Chen J S, Dong H Z. Generalized physical model of tracer dilution for measuring seepage velocity in well [J]. Shuili Xuebao, 2002, 33(9):122-130. (in Chinese)
- [10] 陈建生,董海洲,陈亮.采用环境同位素方法研究北江大堤石角段基岩渗漏通道[J].水科学进展,2003,14(1):57-61.  
Chen J S, Dong H Z, Chen L. Application of the environment isotope method to study on the leakage passage in foundation of Beijiang Dyke Shijiao section [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1):57-61. (in Chinese)
- [11] 刘尚仁.广东的红层岩溶及其机制[J].中国岩溶,1994(4):395-403.  
Liu S R. Red beds karst of Guangdong and its mechanism [J]. Carsologica Sinica, 1994(4):395-403. (in Chinese)
- [12] 黄仁金.广东南雄盆地白垩系与第三系界线及轮藻化石[J].古生物学报,1988,41:457-468.  
Huang R J. Charophytes of Nanxiong Basin, Guangdong and its cretaceous-tertiary boundary [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1988, 41:457-468. (in Chinese)
- [13] 王文艳.南雄盆地大塘剖面红色地层的磁化率变化机制及其古气候意义[D].福州:福建师范大学,2017.  
Wang W Y. Magnetic susceptibility change mechanism in Datang, Nanxiong Basin and its paleoclimate significances [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017. (in Chinese)
- [14] 黄茂兴.溶洞发育区超深地下连续墙施工处理技术[J].广东水利水电,2021(6):75-80.  
Huang M X. New treatment technology for super-deep diaphragm wall construction in rich karst cave geology [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(6):75-80. (in Chinese)
- [15] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等.软岩在饱水过程中水溶液化学成分变化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3813-3817.  
Zhou C Y, Deng Y M, Tan X S, et al. Testing study on variation regularities of solution components in satu-

- ration of soft rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (22) : 3813-3817. (in Chinese)
- [16] 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,2001,28(4): 23-26.  
Liu J G, Chen J S, Chen L. Evaluation of rock seepage and analysis of formation mechanism for Shijiao dike [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28 (4):23-26. (in Chinese)
- [17] 陈建生,刘建刚.北江大堤石角堤段渗漏探测分析[J].岩土工程学报,2002,24(4): 436-441.  
Chen J S, Liu J G. Study on leakage of Shijiao section of Beijiang river dyke[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(4): 436-441. (in Chinese)
- [18] 张挺,曹洪,詹杰民,等.北江大堤石角堤段防渗工程效果分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11): 2235-2241.  
Zhang T, Cao H, Zhan J M, et al. Effect analysis of preventing seepage engineering in Shijiao segment of North River levee[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2235-2241. (in Chinese)
- [19] 周红星,曹洪,叶锋.北江大堤石角段8+750~11+316渗流场分析研究[C]//第五届全国水利工程渗流学术研讨会.郑州:黄河水利出版社,2006.  
Zhou H X, Cao H, Ye F. Analysis of seepage field of Shijiao Segment 8+750~11+316 of North river levee [C]//The 5th National Symposium on Seepage in Water Conservancy Projects. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese)
- [20] 李宁新.北江大堤石角段若干地质问题初步分析[J].人民珠江,2000(2): 15-18.  
Li N X. Preliminary analysis of geologic issues in Shijiao Section of North River Grand Levee[J]. Pearl River, 2000(2): 15-18. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)