

付开隆,蒋良文,冯涛,等. 贵广铁路甘棠江特大桥 19、20 号墩异常沉降原因分析及整治措施[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 674-680.
DOI:10.11932/karst20160609

贵广铁路甘棠江特大桥 19、20 号墩异常 沉降原因分析及整治措施

付开隆,蒋良文,冯涛,刘蜀江
(中铁二院工程集团有限责任公司,成都 610031)

摘 要:2014 年 5 月 15 日~9 月 1 日期间,已建成的贵广铁路甘棠江特大桥 19 号墩基础产生了 50.6~52.2 mm 的异常下沉,20 号墩基础产生了 12.4~16.3 mm 的异常下沉。现场补充完成了机动钻探、原位测试及室内试验工作。分析认为在多年强降雨条件下,深覆盖型岩溶强烈发育区的岩溶水水位波动产生潜蚀引起的岩溶塌陷,是导致该桥 19、20 号墩(采用摩擦桩基础,桩长约 20 m)产生异常沉降的主要原因。对 19、20 号桥墩基底采取端承桩基础补强后,经过近 2 年的沉降观测,没有再发生异常沉降。文章认为在类似深覆盖型岩溶强烈发育区实施桥梁工程时,原则上应采用置于完整基岩内的端承桩基础。

关键词:桥墩异常沉降;原因分析;岩溶塌陷;细粒土流失;整治;甘棠江特大桥

中图分类号:U443.22;P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2016)06-0674-07

0 引 言

桂林是我国岩溶塌陷最为发育地区之一^[1]。在桂林市区,无论是河床、河谷阶地、峰林平原、峰丛谷地及其他覆盖区,其覆盖的碳酸盐岩顶面形态相差较大,埋藏的溶沟、溶槽、石芽和落水洞极为发育,在同一建筑场地钻探发现,水平距离相差 2~4 m,而基岩顶面标高往往相差 5~10 m。而有的地段发育相对深度达 30~40 m 的溶槽,这类深切的溶槽一般受构造断裂和岩溶裂隙的控制,对场地稳定极为不利^[2]。在铁路建设中,对岩溶塌陷影响深度的认识也是逐步加强:南昆铁路建设时,覆土厚度大于 15 m 则不考虑岩溶塌陷影响;在内昆、株六铁路建设期间,原则上,覆土厚度大于 20 m 不考虑岩溶塌陷影响;而在浙赣铁路建设期间,覆土厚度达 30 m 的地段却发生了岩溶塌陷。

许多学者已从不同角度对岩溶塌陷进行研究,陈

亮晶等^[3]提出:从发生岩溶地面塌陷的时间特征来看,岩溶地面塌陷集中发生在雨季;从发生岩溶地面塌陷位置特征来看,岩溶地面塌陷全部分布在疏干排水形成的降落漏斗范围内;从覆盖层性质来看,覆盖层厚度较薄、力学性质差且双层结构土,地质环境极其脆弱是产生塌陷的内在因素。这种覆盖土层广泛分布于岩溶发育的冲沟及冲积平原区。贾龙等^[4]提出土洞初始形成至土洞顶板达到极限深度的时间段多是渐进破坏的过程,土洞会存在相对稳定的时期,只有在一定条件影响下才进一步发展;如果覆盖层较薄或过于松散,土洞相对稳定的时期会很短甚至没有,土体往往在基岩顶板附近直接破坏并迅速向上发展在地表形成塌坑;较为坚硬的黏土层中,土洞以拱顶中部塌落和拉张破坏为主,拱顶土体先发生拉张破坏并向上逐步切穿地表,最终可以形成坑壁较为陡直的桶状塌陷坑或坛状塌坑。蒋小珍等^[5]提出,单层土体结构的岩溶土洞发育机制是:土洞首先在基岩面形

第一作者简介:付开隆(1971—),男,教授级高级工程师,现工作于中铁二院工程集团有限责任公司地勘院,主要从事铁路工程的地质勘察、设计及地灾研究工作。E-mail:442406287@qq.com。
收稿日期:2015-04-26

成,然后逐渐往地面扩展,其发育扩展过程可分为 3 个阶段:①基岩面附近阶段,土洞形成与地下水位的承压状态和地下水位初始下降速度密切相关,此阶段土洞的形态是以缝(洞)的形式存在,形成通道,通道规模较小;②地下水包气带(季节变动带)阶段,土洞扩展以地下水反复浸泡下发生崩解作用为主,规模较大;③近地表(垂直渗入带)阶段,土洞扩展以上部降雨入渗,洞顶剥落为主,崩塌块体较大。

贵广高速铁路甘棠江特大桥 19、20 号桥墩基础覆土厚度达到 40~65 m,为深层沉积区发生的岩溶塌陷。本文根据该桥建成后的观测资料,详细分析导致桥墩基础异常沉降的工程地质、水文地质原因。重新加固处理后观察表明,未发生沉降,确保了桥梁运营的安全。

1 工程概况

贵广铁路甘棠江特大桥位于桂林市北郊,中心里程为 D3K420+619.16,孔跨布置为 26×32 m+2×24 m+1×32 m+(48+80+48) m,连续梁+53×32 m+1×24 m+2×32 m+2×24 m,为跨越甘棠江(漓江支流)而设,桥长 2 988.351 m。全桥 91 个墩台,设计采用摩擦桩基础的桥墩 22 个(其中基岩为可溶岩的桥墩 17 个),采用柱桩基础的墩台 69 个。最大墩高 19.5 m,其中 19 号墩高 13 m,20 号墩高 13.5 m。

19、20 号墩采用预制架设单箱单室简支箱梁,矩形、园端形实体墩,钻孔灌注摩擦桩基础,桩长 20 m,桩径 1.0 m,桩数为 10 根。各墩施工节点时间及相应沉降情况见表 1。

表 1 19、20 号墩施工节点时间及累计沉降情况

Table 1 Accumulative subsidence at key points of No. 19 & No. 20 bridge piers after their construction

19 号墩					20 号墩			
位置	施工开始时间	施工完成时间	各施工节点完成后累计沉降量/mm	沉降是否满足规范要求	施工开始时间	施工完成时间	各施工节点完成后累计沉降量/mm	沉降是否满足规范要求
桩基	2010-08-29	2010-10-17	未测量		2010-08-12	2010-10-15	未测量	
承台	2010-12-20	2011-01-08	未测量		2010-12-21	2011-01-15	未测量	
墩身	2011-07-20	2011-07-31	5.15	满足	2011-07-08	2011-07-13	5.40	满足
梁体架设	2012-09-14	2012-09-14	5.24	满足	2012-09-15	2012-09-15	5.53	满足
桥面系	2012-11-27	2012-11-28	5.26	满足	2012-12-01	2012-12-02	5.50	满足
无砟轨道板	2013-04-04	2013-05-09	6.13	满足	2013-04-04	2013-05-09	6.23	满足
轨道铺设	2014-6-11	2014-06-17	52.2	不满足	2014-06-11	2014-06-17	16.3	不满足

2014 年 9 月 1 日上午,采集轨道精调数据时发现 18~21 号墩区间无砟轨道的标高出现不同程度的下降,最大下降值较设计标高低 46 mm(位于 19 号墩处)。9 月 1 日下午,补充墩身沉降测量显示:19 号墩 19-1 观测点(左侧)与 2014 年 5 月 15 日测量数据相比较下沉 52.2 mm,19-2 观测点(右侧)下沉 50.6 mm;20 号墩 20-1 观测点(左侧)与 2014 年 5 月 15 日测量数据相比较下沉 12.4 mm,20-2 观测点(右侧)下沉 16.3 mm。从 19、20 号墩沉降观测值曲线图来看(图 1),自墩身施工结束至梁体架设完成的这段时间内,19 号墩墩身在梁体及桥面系荷载作用下产生了 6.13 mm 的沉降量,20 号墩墩身在梁体及桥面系荷载作用下产生了 6.23 mm 的沉降量;之后至 2014 年 5 月 15 日,在无砟轨道板施工、轨道铺设等过程中墩身均未产生明显沉降。据此分析,19、

20 号墩的异常沉降发生于 2014 年 5 月 15 日至 9 月 1 日之间,属于较短时间内的快速下沉。

2 地质条件

2.1 区域地质概况

桥址位于桂林市北郊,属典型溶蚀平原区深覆盖层地带,绝对高程 150~180 m,相对高差 5~30 m。地形平坦开阔,起伏小,地表为水田、旱地以及居民区,植被较少。

桥址覆盖层土体为第四系全新统冲洪积(Q₄^{al+pl})粉质黏土、粉砂、粗砂、细圆砾土、粗圆砾土,覆盖层土体厚 5~60 m;下伏基岩为灰岩、白云质灰岩及页岩等。

地表水为甘棠江,河流较宽,流量受季节变化影

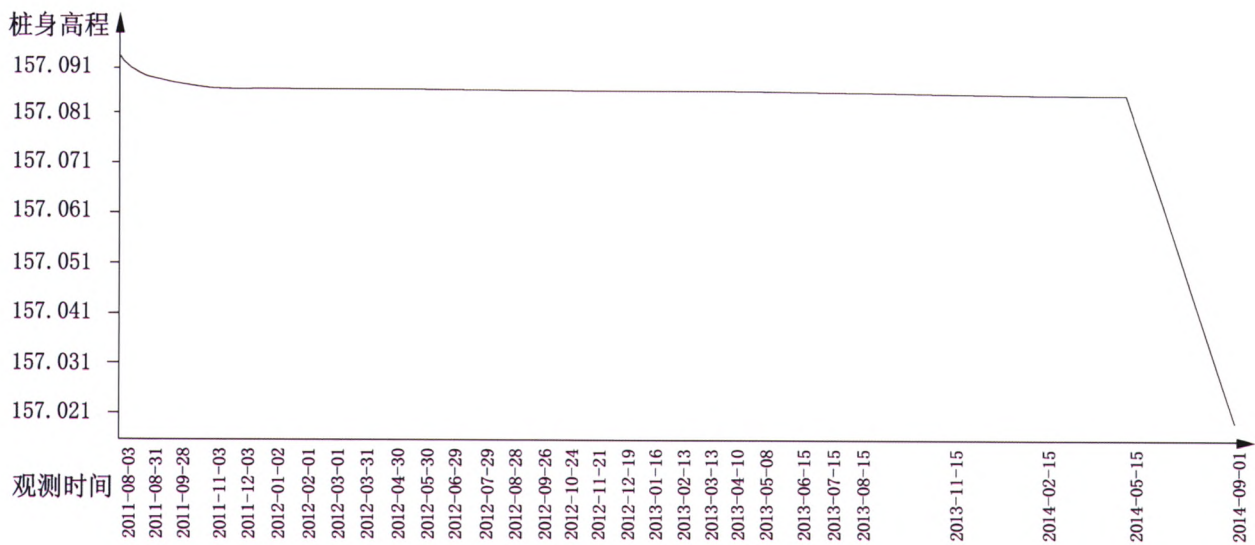


图 1 19 号墩沉降观测曲线图

Fig. 1 Diagram showing the observed subsidence of No. 19 pier's

响较大。地下水以孔隙水、岩溶水为主。孔隙水赋存于第四系全新统冲洪积覆盖层土体中,水位埋深 0~5 m,砂层和圆砾覆盖层土体为主要含水层,粘性土透水性差。岩溶水丰富,其分布具不均一性。地下水受大气降雨及地表河水补给。

2.2 19、20 号墩基础地质特征

19 号墩覆盖层厚 26.4~46.4 m。表层为粉质黏土,下以粗圆砾土为主,桩身和桩底局部夹透镜状的(含)圆砾粉质黏土(含圆砾 25%~40%)(图 2)。下伏基岩为强岩溶化灰岩,基岩面起伏很大,高差达 20 m(最高高程为 130.17 m,最低为 110.03 m)。岩溶强烈发育,共实施的 7 个钻孔中有 6 个钻孔揭示溶洞,溶洞最大竖向高度达 23 m,充填松散的砂、圆砾、卵石及软塑一流塑状黏土。编号为 Z-19-6(里程 D3K421+74.20 右 6.36 m)的钻孔在粗圆砾土中揭示一处高 2.1 m 的空洞(高程 135.53~133.43 m)。地下水位埋深 4.3~4.8 m。

20 号墩覆盖层厚 49.8~61.6 m。表层为粉质黏土,表层下以粗圆砾土为主,桩身和桩底所处地层岩性为夹透镜状的软粉质黏土。桩底以下局部夹透镜状的微含圆砾粉质黏土(含 5%~25%的圆砾),在覆盖层土体底部分布厚 10~18 m 的含圆砾粉质黏土(含 25%~35%的圆砾)(图 2)。下伏基岩为强岩溶化灰岩,基岩面起伏较大,相对高差达 12 m(最高高程为 106.77 m,最低为 94.82 m)。溶洞最大竖直高度 6 m,充填松散的砂、圆砾及软塑一流塑状黏土。地下水位埋深 1.2~4.7 m。

从原位测试(动探)成果看(见图 3),19、20 号墩

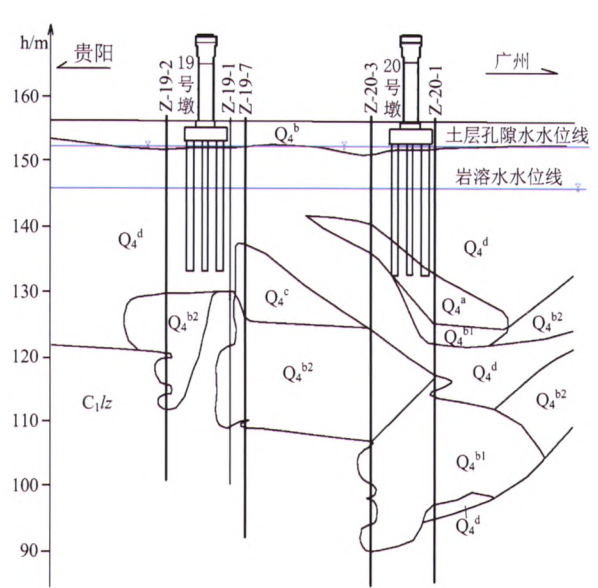


图 2 19、20 号墩地质纵断面图

Fig. 2 Geological cross section of No. 19 & No. 20 piers

Q₄¹—软粉质黏土 Q₄¹—粉质黏土 Q₄¹—微含圆砾粉质黏土
Q₄²—含圆砾粉质黏土 Q₄¹—粗圆砾土 Q₄¹—粗圆砾土

基底覆盖层土体上部承载力能达到 400 kPa 以上,向下承载力逐步降低,最低承载力仅 150 kPa。说明上部土体较为密实,下部土体密实度渐渐变差,与基岩接触带覆盖层土体密实度最低,呈现“上紧下松、上硬下软”的土体土力学特征反律的地质现象。

根据监测结果(见图 2),桥址地下水(孔隙水和岩溶水)之间形成较大的水头差。覆盖层土体孔隙水位普遍为地表下 1~5 m,而 19 号墩旁完成的基岩水位观测结果表明,岩溶水水头为地表下 8~10 m。说明受下部透镜状透水性较差的((微)含圆砾)粉质黏

土阻隔,覆盖层土体内孔隙水与可溶岩内岩溶水具有不同的地下水头(岩溶水水头普遍低于覆盖层土体内潜水水头),从而存在覆盖层土体内孔隙水补给基岩内岩溶水的渗流过程,渗流作用可以使溶洞、溶沟、溶槽附近的覆盖层土体持续流失形成土洞。

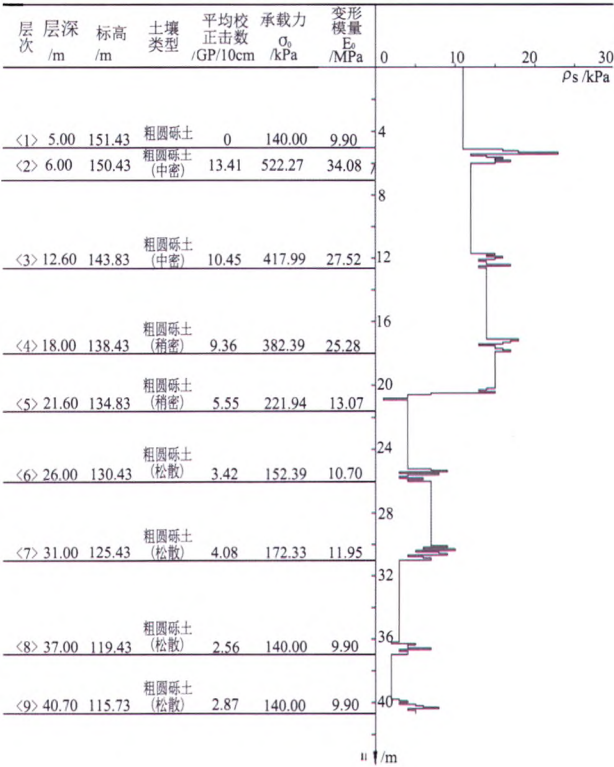


图 3 19 号墩 6 号孔动力触探成果图

Fig. 3 No. 19 pier's monitored displacement against time

3 沉降原因分析

对岩溶塌陷的形成机理分析认为^[2],地下水活动是土洞的形成、发展,直致发生塌陷过程中最活跃的因素,特别是地下水位在基岩面上下波动的幅度和频度,对崩解和搬运土粒或流土的速度有重要作用。根据可溶岩地区塌陷试验成果,土体在地下水渗流作用下发生漏失是形成塌陷的主要原因^[7]。地下水潜蚀型塌陷形成的整个过程的时间可长可短,长者几年,甚至上百年,短者只需几小时或几分钟,这主要取决于地下水水位变幅、频度、搬运能力、土体崩解速率、覆盖层土体厚度以及地下岩溶的规模、连通性等。地下水变幅愈大,频度愈高,搬运能力亦愈强,土体的崩解率亦愈大;覆盖层土体愈薄,地下岩溶规模愈大,连通性愈好,所需的时间就愈短,反之愈长^[8]。

本桥址位于深覆盖动荡型岩溶强烈发育的准平原化杂相沉积区。19、20 号桥墩基底为“上紧下松、上硬下软”的圆砾土夹透镜状黏性土,总体特征为第

四系沉积土体普遍较厚且厚度变化大,透镜状((微)含圆砾)粉质黏土空间分布不均匀;圆砾土密实度自上而下由中密、密实为主逐渐演变为以稍密、松散为主;其变形模量和基本承载力逐渐变小,而压缩性逐渐变大。

根据灵川气象站的记录,桥址区近年降雨量波动幅度较大,如 2014 年 4—8 月总降雨量达 1 533 mm,超出本地区 4—8 月多年平均降雨量 50%。受下部透水性较差的((微)含圆砾)黏性土阻隔,可溶岩内岩溶水水头普遍低于覆盖层土体内孔隙潜水水头(水头差达 7~9 m)。强岩溶化灰岩中的岩溶水水位大幅度波动产生潜蚀作用,导致覆盖层土体结构的细颗粒物质漏失,从而使桩周土侧壁摩擦力和下卧层力学强度降低;同时,细颗粒物质的流失容易形成土洞,土洞的变形和最终塌陷也是 19、20 号桥墩基础沉降的原因。在 19 号墩身施工期间,曾于 18 号墩右侧约 50 m 处葱地内发生过塌陷(照片 1);2014 年 10 月,21 号墩右侧 80 m 处产生的自然岩溶塌陷坑(照片 2);



照片 1 18 号墩右侧约 50 m 塌陷坑

Photo 1 Karst collapse pit 50 m apart at the right side of No. 18 pier



照片 2 21 号墩右侧约 80 m 处塌陷坑

Photo 1 Karst collapse pit happened on October 21 2014, 80 m apart at the right side of No. 21 pier

加之整治钻孔过程中于 19 号墩旁孔深 20.9~23.0 m 处发现土洞,均表明桥址近年潜蚀作用加强,土洞快速发育,桥区演变为岩溶塌陷易发生区。

4 沉降整治措施

4.1 注浆加固措施

在分清沉降原因的基础上,现场决定采用增设桩桩补强措施来加固 19、20 号桥墩。为减小桩基础成孔时对原告土体结构的扰动,先对桥墩基础周围覆盖层土体进行注浆加固处理。在注浆过程中先后采用了 3 种注浆加固工艺:一是普通花管灌注普通硅酸盐水泥浆加固,但完成 4 个孔的注浆(累计注浆量 64.1

m³)后,却因浆液从地表溢出而注浆压力达不到设计要求而终止;二是采用袖伐管灌注普通水泥浆工艺,因注浆量较大且注浆压力长时间达不到设计要求而现场决定灌注水泥—水玻璃双液浆,但因浆液凝固较快,多次发生堵管事故,完成 4 个孔的注浆后不得不另行研究其它注浆方法;最后决定采用钻杆后退式灌注硫铝酸盐水泥的注浆工艺完成桥墩加固工作,采用该工艺共完成注浆孔 26 孔,共灌注硫铝酸盐水泥浆 3 370 m³(平均每孔注浆量 129.6 m³)。19、20 号墩注浆施工时间为 9 月 21 日至 10 月 19 日。因注浆过程中桥墩下沉量持续加大,可能影响到运营安全,注浆工作于 10 月 19 日停止。注浆施工及桩基施工过程中的桥墩沉降情况见图 4、图 5。

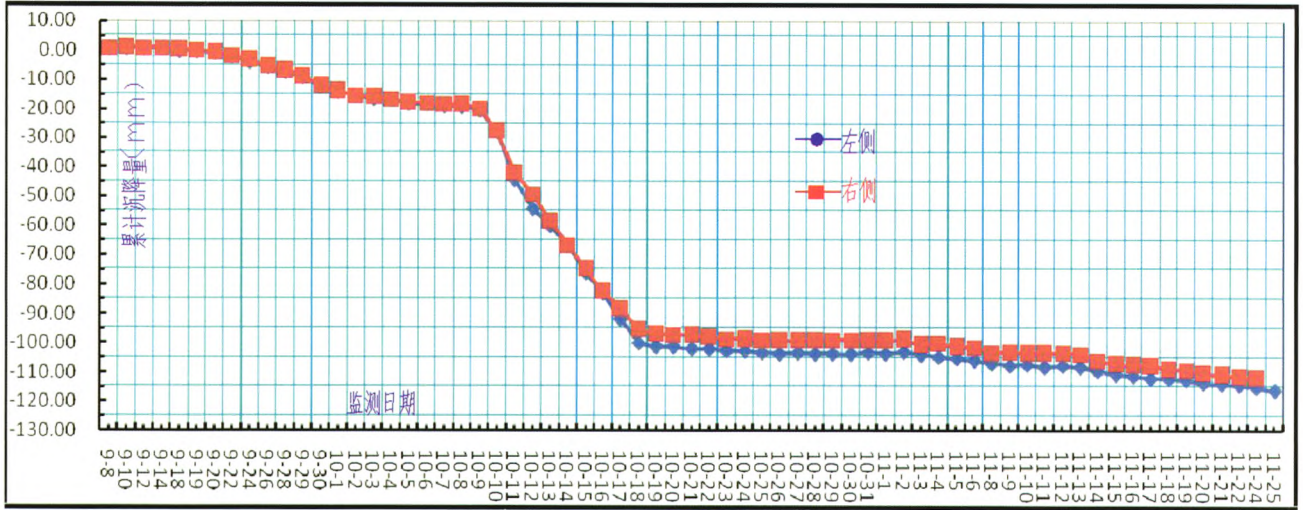


图 4 19 号墩沉降—时间变化关系曲线图

Fig. 4 No. 19 pier's monitored displacement against time

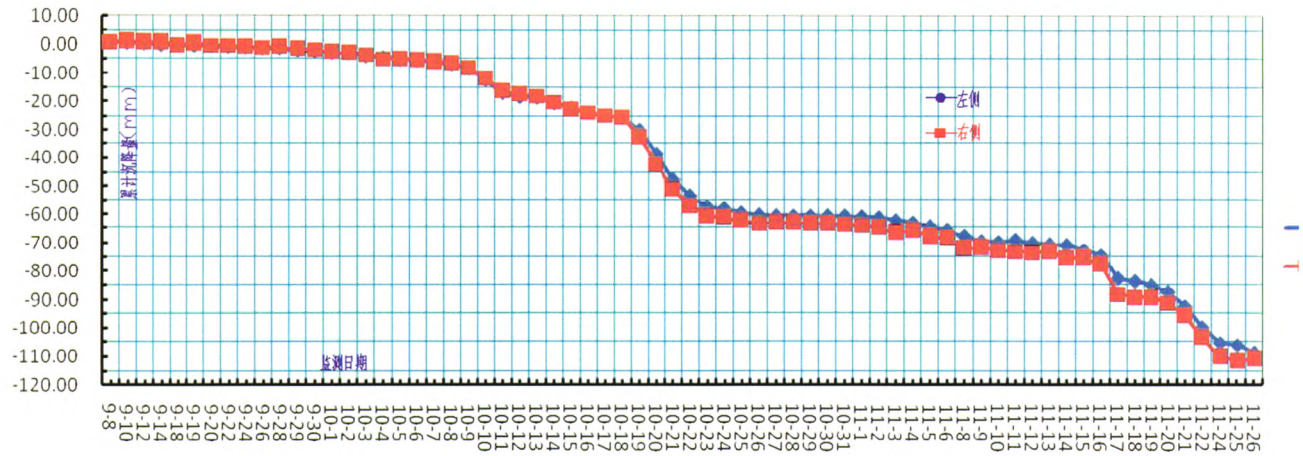


图 5 20 号墩沉降—时间变化关系曲线图

Fig. 5 No. 20 pier's monitored displacement against time

4.2 混凝土灌注桩补强措施

根据施工现场要求及覆盖层地质情况,桥墩基础

补强加固采用横向加桩方案,即在 19、20 墩左右侧各增设 3 根直径 1.5 m 的混凝土灌注桩进行加固,桩底

置于完整基岩内。桩基布置平面、横断面见图 6。为了减少施工过程中对桥墩的再次扰动,现场采用了钢套筒超前钻进且不拔出套筒的工艺。从实施情况来看,施工中还是产生了少量沉降,其中 19 号墩沉降量为 10 mm,20 号墩沉降量为 50 mm。分析 19 号墩沉降量相对较小的原因是注浆加固阶段的注浆量较大,土体胶结较完整的缘故。基桩钻进过程中,上部较密

实的覆盖层土体内,基桩钻进速度较慢,既有桥墩沉降量较小;随着钻进深度逐渐增加,钻进速度逐渐加快,桥墩沉降量也逐渐增大;基桩钻进到达土石界面附近和穿过溶洞或倒悬状岩体时,桥墩沉降量明显增大。上述沉降现象进一步印证了桥址附近覆盖层土体具有“上紧下松、上硬下软”的土体力学特征反律的地质现象。

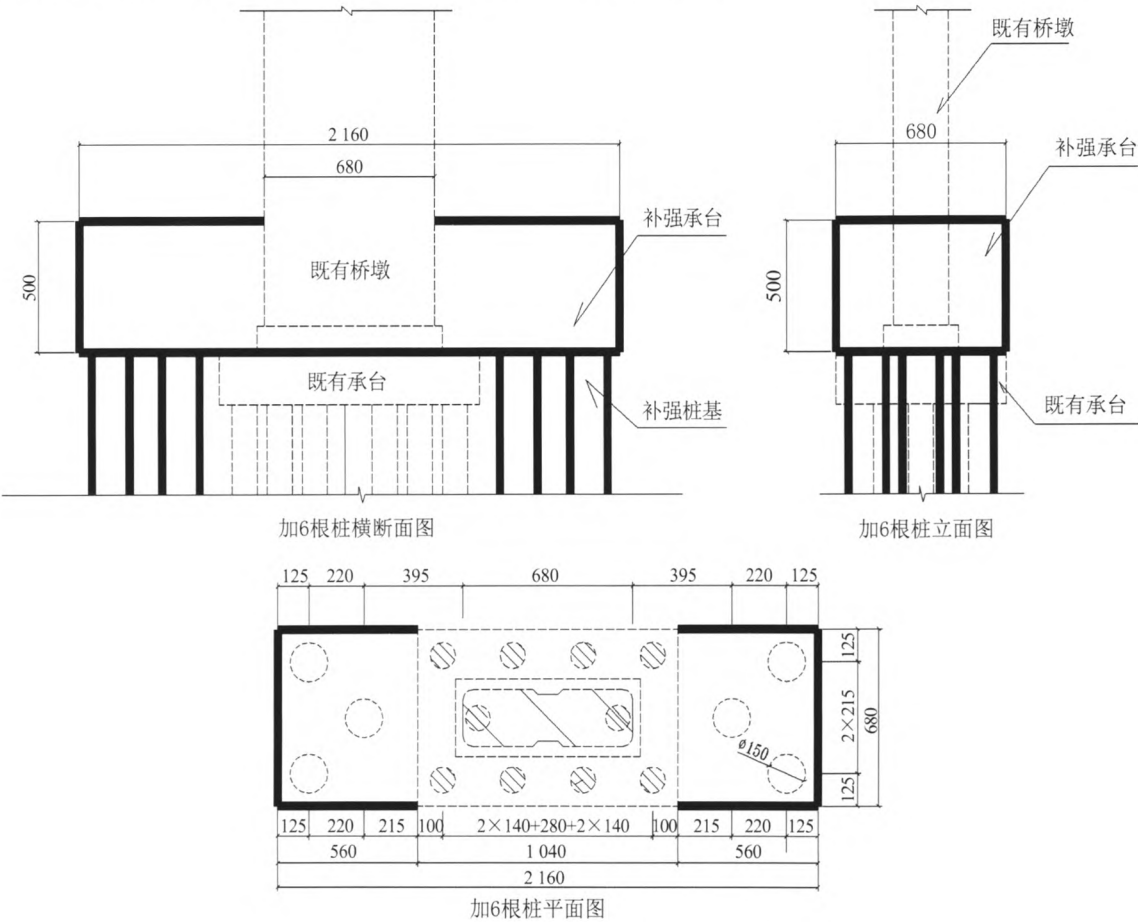


图 6 补强桩基布置平面、横断面图

Fig. 6 Plan view and profile of the reinforced pile foundation

4.3 补强施工完成后沉降监测情况

补强施工于 2014 年 12 月 24 日全部完成,根据补强设计要求,若 19、20 号墩进一步发生沉降,则其梁体、墩身及承台整体受力均可全部转换至新增柱桩。新增柱桩桩底置于完整基岩内,受压后下沉变形量有限,因而桥墩整体下沉量满足《高速铁路设计规范》的要求,补强工程的实施确保了贵广铁路按期开通且安全运营。在补强桩基施工结束至承台修建完成的过程中(2014 年 11 月 26 日至 12 月 25 日),由于机具干扰,加之新建承台遮挡了原设置的沉降观测点,故墩身沉降观测工作未能持续进行。承台施工结束后,墩身重新设置了观测点,恢复沉降观测。至 2015 年 3 月,19 号墩补强施工结束后累计新增沉降

量为 0.81~0.93 mm,20 号墩累计新增沉降量为 0.15~0.32 mm,均小于规范允许值。至 2015 年 9 月,从 19 号墩沉降观测结果图来看,在墩身受力自摩擦桩向端承桩转换的过程中,墩身整体产生了约 3 mm 的总沉降量,沉降稳定时间达到 5 个月左右。此后,墩身未再产生沉降,整体处于稳定状态(图 7)。

5 结 论

甘棠江特大桥桥址位于深覆盖动荡型岩溶强烈发育的准平原化杂相沉积区,覆盖层土质成分复杂,纵、横向变化大,普遍具有“上紧下松、上硬下软”的“土层土力学特征反律的地质现象”。

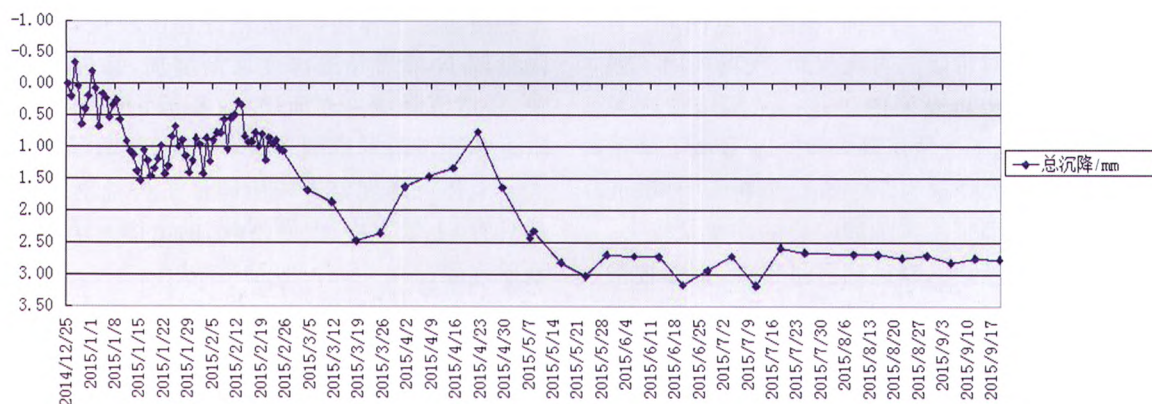


图7 补强工程完成后19号墩沉降观测成果图

Fig. 7 No. 19 pier subsidence monitoring result after implementation of reinforced pile foundation

下覆灰岩中溶洞、溶沟、溶槽极发育,地下水位大幅度波动产生潜蚀导致细粒土流失,造成摩擦桩墩台侧壁摩阻力降低引起较大工后沉降,并易在土层中形成土洞引起塌陷,导致桥墩突然快速下沉。在类似深覆盖型岩溶强烈发育区实施桥梁工程时,原则上应采用置于完整基岩内的端承桩基础。

分析全桥处于相同地质背景的其他采用摩擦桩受力基础的桥墩(共15个)也可能产生较大的沉降。因此,在补充勘探的基础上,对全桥处于相同地质背景的其他摩擦桩受力基础,也补强为端承桩受力基础。

参考文献

[1] 卢耀如,雷明堂,李瑜,等. 贵广铁路雄村—贺州段岩溶地质与线路比选咨询研究[R]. 中铁二院工程集团有限责任公司,2008:49-95.

- [2] 万志清,秦四清,祁生文. 桂林市岩溶塌陷及防治[J]. 工程地质学报,2001,9(2):199-203.
- [3] 陈亮晶,孙锡良,皮景,等. 湖南宁乡大成桥地区岩溶地面塌陷分布特征及影响因素分析[J]. 中国岩溶,2014,33(4):490-497.
- [4] 贾龙,蒙彦,管振德. 岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J]. 中国岩溶,2014,33(3):294-298.
- [5] 蒋小珍,雷明堂,管振德. 单层土体结构岩溶土洞的形成机理[J]. 中国岩溶,2012,31(4):426-432.
- [6] 钱建平. 桂林市岩溶塌陷的基本特征和防治对策[J]. 矿产与地质,2007,21(4):200-204.
- [7] 蒋小珍. 岩溶塌陷发育条件的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1998,9(11):187-191.
- [8] 王柳宁,高武振. 桂林市西城区地下水活动与岩溶塌陷的关系[J]. 桂林工学院学报,2000,20(2):106-111.
- [9] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. 水文地质工程地质,2005,32(2):107-110.

Cause analysis and treatment measures to the abnormal subsidence of Gantangjiang bridge No. 19&20 piers of Guiyang-Guangzhou railway

FU Kailong, JIANG Liangwen, FENG Tao, LIU Shujiang
(China Railway ErYuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract From May 15, 2014 to September 1, the No. 19 and No. 20 piers of Gantangjiang super major bridge at Guiyang-Guangzhou railway had experienced abnormal subsidence with the downward displacement of 50.6–52.2 mm and 12.4–16.3 mm, respectively. In order to understand the reason of the subsidence and to propose appropriate measures to the problem of bridge pier displacement, mobile drilling, in situ and laboratory geotechnical tests were completed. Field observation and testing data jointly shew that the agelong heavy rainfall condition and subsequent underground karst water fluctuation caused karst collapse occurred at the underlying strongly karstified limestone. This was the main reason of geological impact on the subsidence of No. 19 and No. 20 piers with friction pile foundation and the pile length of about 20 m. For engineering remediation, end bearing pile foundations were respectively added in the both bridge piers. After about 1 year's displacement monitoring, the subsidence of the piers has been properly controlled, which suggest that the reinforced measurement is safe and reliable; and the end bearing pile foundation is generally suitable when other railway bridges are carried out in the similar case of deep covered strong karst limestone area.

Key words bridge pier subsidence, cause analysis, karst collapse, fine-grained soil loss, engineering remediation, Gantangjiang railroad bridge

(编辑 张玲)