

肇庆大桥扩建匝道桥桩基础设计与施工探究

文 / 黎金明 肇庆学院

摘要：肇庆大桥扩建匝道桥项目针对新旧桥结构差异与复杂地质条件，以投资控制为核心，研究桩基关键技术。通过分析上部结构、基础及地质数据，采用嵌岩端承桩设计，创新应用全套管全回转工艺，分区实施差异化施工策略，有效解决溶洞发育、厚砂层等难题，实现了安全、经济与技术的平衡。

关键词：肇庆大桥扩建匝道桥；岩溶发育区；桩基础设计；全套管全回转钻机灌注桩施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.067

引言

肇庆大桥横跨西江，连接端州区与高要区，是贯通紫云大道与砚都大道的重要通道。该桥由新旧两桥组成，旧桥建于2001年，长2500米，宽17米；新桥建于2020年，长4315米，宽19米。为完善端州城东新区东河滩地路网，2020年5月市政府立项建设衔接建设一路的匝道桥工程，包括连接旧桥的A匝道和连接新桥的B匝道。可研估算表明，建筑安装工程费中桥梁工程占比超93%，而桥梁基础部分占比超60%，因此桩基础的设计与施工成为影响项目投资控制的关键。

一、工程概况

（一）新、旧桥结构现状

肇庆大桥新桥与本项目拼宽部分采用的是20m一联的预制预应力混凝土小箱梁桥面连续梁，下部结构采用的是桩柱式桥墩加盖梁，桥梁桩基采用嵌岩桩设计，桩基穿过溶洞并保证桩底有一定的持力层厚度（不小于3D完整岩层），桩基长度50~70米。

肇庆大桥旧桥与本项目拼宽部分采用的是20m一联的现浇钢筋混凝土单箱三室箱梁，下部结构采用的是桩柱式桥墩，桥梁桩基采用摩擦桩设计，桩基长度分部范围为35~45米，桩端位于沙层内，距离溶洞顶预留一定的安全距离。肇庆大桥新、旧桥横断面如下图：

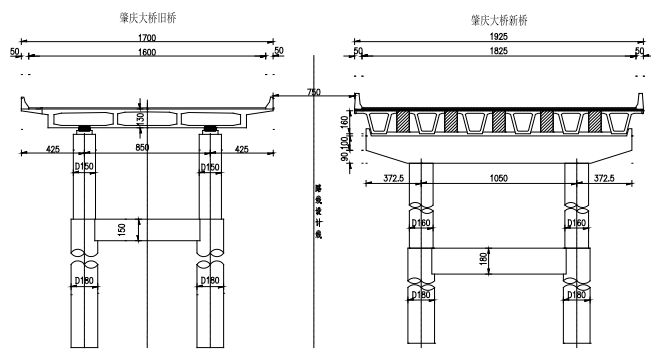


图1 肇庆大桥旧桥横断面 肇庆大桥新桥横断面

（二）项目地质勘察情况

肇庆大桥桥址区地貌上属西江冲积平原，地形平坦开阔，水网发育，根据勘察结果地质分布从地面往下一般为素填土、粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粉砂、细砂、卵石、强风化炭质泥岩、溶洞及中风化炭质泥岩。A、B匝道桥工勘察布孔51个，结果显示25个有溶洞，

见洞率49.0%，最小溶洞高度0.2米，最大溶洞高度22.5米。

二、扩建匝道桥桩基础设计探究

A匝道拼宽桥梁距离肇庆大桥旧桥桩基中心距离为4.9~10.9米，B匝道拼宽桥梁距离肇庆大桥新桥桩基中心距离为5.5~6.6米。肇庆大桥新桥采用嵌岩桩设计，外侧新建B匝道桥梁桩基在5米外施工，满足大于两倍桩基直径，对肇庆大桥新桥的基础影响较小。而肇庆大桥旧桥采用的摩擦桩设计，且桩基长度较短，桩底为沙层，在地下水水位变化及溶洞的作用下持力层的可靠性较差，A匝道桥桩基施工对旧桥基础会造成一定影响，因此A匝道桥桩基基础是设计的重点。下面主要以A匝道桥桥梁桩基础设计展开研究。

（一）A匝道桥上部结构设计

A匝道桥全长565米，其中与市政路链接线长度103米、桥梁长度462米，研究重点是桥梁部分。桥梁从与肇庆大桥旧桥拼接开始分为4.4米拼宽段（JK1+796~JK1+716）、4.4~9米变宽段（JK1+716~JK1+576）和9米等宽段（JK1+576~JK0+383）三段。桥梁上部结构拼宽段与肇庆大桥引桥对孔设置，上部结构采用等高现浇箱梁，箱梁高度1.4米，箱梁腹板采用4:1斜率的斜腹板。主梁采用A类预应力混凝土结构，横梁采用钢筋混凝土结构，匝道桥上跨桥下路为了避让桥下路采用门架墩上跨桥下路，门架墩横梁采用主梁外伸横梁的结构形式，外伸横梁与主梁横梁合为一体。

A匝道桥共设24个（1#~24#）桥墩，拼宽段桥面宽度小于5米采用花瓶墩加转换承台连接桩基，拼宽段桥面宽度大于5米计标准段采用花瓶墩加承台连接桩基，上跨肇庆大桥桥下路采用门架墩，门架墩柱采用1.2米方柱加转换承台连接桩基，横梁采用主梁合建的外伸横梁，外伸横梁采用A类预应力混凝土结构。

（二）匝道桥桩基础设计

1. 桩基础受力形式选择

根据地质勘察报告，项目所在地岩溶较为发育，见洞率较高，且匝道桥上部荷载较大，根据有关规范标准，桩基础应采用灌注桩，但采用摩擦桩还是嵌岩端承桩设计，则需要进一步论证。

摩擦桩设计不扰动底层下方的溶洞，利于施工，但

对现状旧桥摩擦桩基础干扰较大，且摩擦桩持力层为深厚沙层，在外侧西江水影响下加剧新建桥梁结构不均匀沉降。嵌岩端承桩设计安全可靠，但施工难度大，既要解决穿过溶洞、确保端承载力厚度问题，又要解决施工期间减少对桩身周边土体和地下水影响。桥梁基础设计首先要确保自身结构安全可靠，同时要减少对现状桥梁安全影响。因此，本项目桩基础应采用嵌岩端承桩设计，但施工时需采取措施，采用有效的施工工艺，确保成桩质量及减少对桩身周边土体和地下水影响。

2. 桩径设计

桩基直径一般按以下步骤拟定：（1）计算桩顶力（恒载+活载）；（2）根据经验初步拟定桩基直径；（3）验算下部结构。

（1）桩顶力计算。根据《公路桥涵设计通用规范》JTG60-2015，桩顶力主要包括“上部结构恒载+活荷载”，经计算，A 匝道 1#~11# 桥墩桩顶力计算值为 2551.0~6129.3KN。（2）桩基直径初步拟定。

考虑到 1#~6# 桥墩位于拼宽桥且桥宽较窄，桥面宽度为 4.4~5m，在满足桥梁施工机械距离旧桥安全距离的前提下，难以布置群桩或者多桩基础，故在拼宽段拟采用单桩基础，在桥梁宽度较大处施工空间容许的前提下采用双桩基础。根据桥梁设计经验，通常以“恒载+活载”下桩基应力不超过 3MPa 控制，根据试算结果且尽量减少桩基直径种类以方便施工，初步拟定拼宽段采用 1.8m 直径单桩，非拼宽段采用 1.3m 双桩。

3. 下部结构验算

以 A 匝道第一联（1#~2# 墩之间）为例阐述桥梁下部结构抗震验算，本桥 E1、E2 作用均可采用 SM/MM 分析计算方法。

抗震分析采用多振型反应谱法，水平设计加速度反应谱由下式确定：

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T < 0.1s \\ S_{\max} & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g / T) & T > T_g \end{cases}$$

$$S_{\max} = 2.25C_i C_s C_d A$$

式中：T_g—特征周期（s）；

T—结构自振周期（s）；

S_{max}—水平设计加速度反应谱最大值；

C_i—抗震重要性系数；

C_s—场地系数；

C_d—阻尼调整系数；

A—水平向设计基本地震加速度峰值。

项目场地位于抗震设防烈度 7 度区，设计基本地震加速度值为 0.10g，场地类别为 III 类，特征周期值为 0.35s，具体参数输入如下所示。根据桥墩结构形式且桥墩通长配筋，取墩底最不利截面进行验算，验算结果如下所示：

E1 地震作用下的桥墩抗震验算结果

| 位置 | 墩号 | 恒载 +E1 纵向最不利组合 首次屈服 | | | 是否屈服 |
|----|----|---------------------|--------------|--------------|------|
| | | 轴力 (KN) | 弯矩 (KN.m) | 弯矩 (KN.m) | |
| 墩底 | 3# | 2228.3 | 2293.4 | 6149.0 | 未屈服 |

进行 E2 地震作用下的抗震验算时考虑固定支座在该地震荷载作用下的破坏，三个主墩共同承受地震作用。E2 地震作用下内力提取结果如下：

E2 地震作用下的桥墩抗震验算结果

| 位置 | 墩号 | 恒载 +E2 纵向最不利组合 首次屈服 | | | 是否屈服 |
|----|----|---------------------|--------------|--------------|------|
| | | 轴力 (KN) | 弯矩 (KN.m) | 弯矩 (KN.m) | |
| 墩底 | 3# | 2797.6 | 5395.7 | 6735.2 | 未屈服 |

综上所述，拟定的桥梁桩基尺寸满足规范的计算要求。

（三）A 匝道桥整体结构设计

A 匝道桥桩上部结构和基础整体设计如下：1#~6# 墩拼宽采用花瓶墩加转换承台接 1 根直径 1.8 米灌注桩，7#~11# 和 16#~24# 墩采用花瓶墩加转换承台接 2 根直径 1.3 米灌注桩，12#~15# 上跨肇庆大桥桥下路采用 1.2 米方柱门架墩加转换承台接直径 1.5 米灌注桩，横梁采用主梁合建的外伸横梁，外伸横梁采用 A 类预应力混凝土结构。桩基均采用嵌岩桩设计，入岩深度按 1D 控制，且满足桩底以下完整岩层厚度不小于 3D（D 为桩基直径）。A 匝道桥梁结构整体设计布置图见图 2。

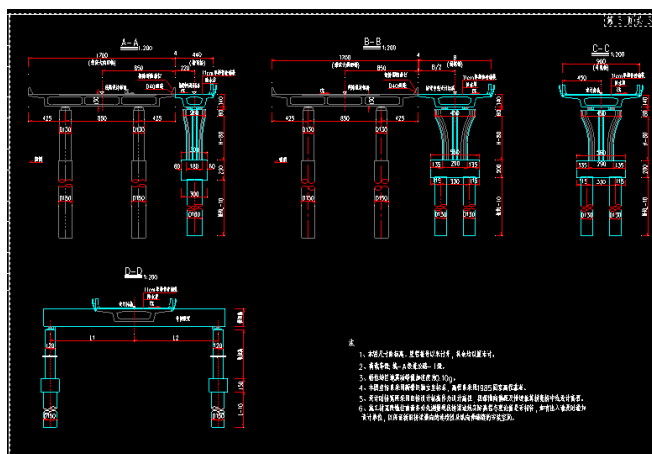


图 2 A 匝道桥梁结构布置图

三、扩建匝道桥桩基础施工探究

根据设计图纸和超前钻资料，A 匝道上部结构分为 6 联，设计 24 个桥墩、44 根桩（其中有溶洞 23 根）；B 匝道上部结构分为 7 联，设计 27 个桥墩、44 根桩（其中有溶洞 33 根）；桩基见洞率 63.6%。项目区属于强烈岩溶发育区，常规的冲钻孔、旋挖成桩工艺无法满足要求。参照国内成功案例，经多方案比选，根据对现状桥梁的影响程度，采用全回转钻机“一次性全焊工作套管（不回收）+全桩长泥浆反压”或全回转钻机“全焊工作套管（回收）+全桩长泥浆反压”施工技术。

(一) 全回转钻机工艺原理

全套管全回转钻机是集全液压动力和传动、机电液联合控制于一体的新型钻机，钻机最大回转扭矩为 $5292\text{kN}\cdot\text{m}$ 。利用全套管全回转钻机产生的下压力和扭矩力，驱动钢套管转动，利用管口的高强度刀头对土体（或较硬物体）等障碍物进行切削，将套管钻入地下，采用履带吊车配合冲抓斗清空套管内土体、碎岩，遇有溶洞位置，先切穿上层覆盖岩土，然后进行溶洞填充处理，再继续钻进至设计岩面，采用旋挖钻机钻进取岩成孔。在土石覆盖层施工时利用全套管全回转钻机回转装置的回转，使钢套管与土石覆盖层间的摩阻力大大减少，边回转边压入，同时利用冲抓斗、冲击锤挖掘取渣。在整个钻进过程，钢套管起到护壁作用，避免施工过程中出现塌孔等安全隐患，有效确保在岩溶地质的成孔率。全回转钻机可利用自身良好的垂直度调节性能及钻速、钻压与扭矩的自动控制性，能全过程控制钢套管的垂直度及中心偏位，保证桩孔满足设计及规范要求。

(二) 全回转钻机工艺控制范围

根据匝道桥桩基础布置图，考虑根据对现状桥梁的影响程度，结合经济性，分区域采用全回转钻机“一次性全焊工作套管（不回收）+全桩长泥浆反压”或全回转钻机“全工具套管（回收）+全桩长泥浆反压”，或者采用常规冲钻孔方式进行设计、施工，区域划分原则如下：A 匝道桥在距现状旧桥边缘 30 米范围内（1~18#墩位）所有桩基采用不拔管方式；B 匝道桥距现状新桥边缘 30 米范围内（9#~26#墩位）地勘显示有溶洞的桩基采用不拔管方式、没有溶洞的桩基采用拔管方式；距离现状桥梁 30 米以外的桩基采用常规冲钻孔方式。为此，A 匝道桥共有 30 根桩基采用不拔管方式，B 匝道桥共有 12 根桩基采用不拔管方式、5 根桩基采用拔管方式，其余 41 根桩基采用常规冲钻孔方式。

(三) 施工重点难点

本项目基础施工难点是遇特殊地层（特别是溶洞）的处理，对比常规冲钻孔溶洞处理方法，全套管全回转施工法溶洞处理质量更有保证。溶洞处理需根据地质勘察和超前钻资料，按溶洞大小及溶洞内填充物制定一桩一方案。处理方法如下：

1. 体积较小的溶洞处理方法——“回填片石+粘土+(水泥)”

(1) 施工准备，施工前在桩机旁准备不少于 10m^3 粘土、碎石土；

(2) 对于体积较小的溶洞，首次回填优先采用“回填片石+粘土”，按片石：粘土=1:1 回填，若经过多次回填，效果甚微则增加水泥回填，回填料按片石：粘土：水泥=0.4:0.5:0.1，实际比例可以根据现场实际地质情况进行调整。

(3) 回填量应超出溶洞顶板 5m，在套管内用重锤夯实，再重新钻进。钻进时密切注意护筒内泥浆面的水平

位置变化情况，当泥浆面迅速下降时，首先要赶快补水。发现泥浆面继续下降时，迅速采用挖掘机将施工前准备好的粘碎石土向钻孔中投入，沉入孔底，回填高度根据漏浆量而定，使溶洞内填满，形成护壁后，再继续施工。当再次漏浆时，仍按上述方法反复回填，直至不再漏浆为止。

2. 体积较大溶洞处理——“回填混凝土”

(1) 对于体积较大的空溶洞，为保证桩基混凝土灌注质量，需提前对空溶洞进行水下混凝土灌注填充是最直接有效的方法。当钻进至空溶洞底部之后，将套管拔起至空溶洞顶部以上至少 3 米（如钻机顶部套管外露过长影响混凝土灌注需先拆掉一节套管），形成一定的混凝土柱压力，让空溶洞得到充分的填充。

(2) 填充采用低标号泵送混凝土，灌注工艺与桩基水下混凝土相同。

(3) 溶洞封底混凝土灌入时，若出现泥浆漏失现象，表明封底混凝土从导管泄入时击穿桩底的溶洞顶壁，此时应注意护筒内泥浆面的水平位置变化情况。泥浆面高度下降幅度不大时，表明下方溶洞仅为中小型溶洞，可继续灌注混凝土填充溶洞。若泥浆面高度下降幅度非常剧烈，混凝土全部流入溶洞内，导管已升起混凝土面，此时应停止混凝土浇筑，采用回填粘土固壁等方法对溶洞进行处理再重新浇筑混凝土。

结语

肇庆大桥扩建匝道桥项目根据现状新、旧桥的上部结构、基础形式及地质勘察资料，综合考虑项目投资控制因素，运用国内相对成熟且较为先进的桩基础施工技术，通过设计与施工反复论证，采用全套管全回转施工工艺，分区域采取不拔管或拔管施工。施工期间采用各种监测手段，密切关注现状桥梁变形情况，又通过低应变、抽芯、静载等手段检测桩基的施工质量，监测数据反映现状桥梁变形很小，桩基检测数据反映桩基质量很好。最终在概算批复的建安造价内完成建设任务，实现了安全、经济与技术的完美结合。

参考文献

[1] 《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG3363-2019). 北京：人民交通出版社，2020：31。
 [2] 《广东省岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》(GDJTG/TA01-2016). 广州：广东省交通厅，2017：11。
 [3] 刘陆平，周指示. 反应谱法在小箱梁桥梁下部抗震计算中的应用[J]. 《城市道桥与防洪》，2016(2)：101-103。
 [4] 曹礼林. 全回转全套管设备在特殊环境复杂地层桩孔灌注桩中的应用[J]. 价值工程，2018(9)：124-127。
 [5] 黄建喜，钟林东. 桥梁桩基强岩溶发育全套管全回转钻机施工方法[J]. 《西部交通科技》，2021(4)：151-154。