

青藏高原冻土区桥梁使用状况调研及对新建工程的启示

陈建兵¹ 熊治华^{2*} 李军¹ 李晓竹¹ 朱东鹏¹

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司 陕西 西安 710075; 2.同济大学桥梁工程系 上海 200092)

摘要: 为了给青藏高速桥梁方案设计提供技术支持,对青藏铁路、青藏公路桥梁运营情况开展了调研。调研起点为格尔木,终点为拉萨,全程共 1183 公里。从桥型选择、方案设计、病害情况等方面,对冻土区现有桥梁开展全面的分析和总结。调研发现桥梁下部墩柱开裂、路桥过渡段不均匀沉降等典型病害。结合青藏高速公路桥梁设计实际情况,分别对冻土桩基设计方法、构造;上部结构选型、路桥过渡段处置方案等关键技术问题提出了工程解决方案。

关键词: 桥梁工程; 调研; 青藏铁路; 钢混组合结构桥梁; 多年冻土

中图分类号: U442.5

Field Survey on Bridges in Permafrost region of Qing-Tibet Plateau and its

Inspiration on the New Project

CHEN Jian-bing¹, XIONG Zhi-hua^{2*}, LI Jun¹, LI Xiao-zhu¹, ZHU Dong-peng¹

(1.CCCC First Highway Consultants., Co., Ltd, Xi'an, 710075, China

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: In order to provide the technical support for the Qinghai-Tibet Highway bridge design, a field survey was carried out. The survey started from Golmud and ended in Lhasa, which was a 1183 kilometers route. A comprehensive analysis was made on the aspects of bridge type selection, scheme design, bridge deterioration etc. Typical deteriorations such as pier crack, bridge transition segment un-uniform settlement were found. Considering the specific situation of Qinghai-Tibet Highway bridge design, practical solutions were proposed on these governing issues: pile design and configuration in permafrost region, superstructure selection, bridge transition segment design.

Key words: bridge engineering; survey; Qinghai-Tibet Railway; steel-concrete composite bridge; permafrost

0 引言

青藏高速公路格尔木至那曲段于 2017 年开始进行初步设计,路线穿越青藏高原多年冻土区、世界文化遗产-可可西里等自然保护区。项目总体桥隧比较高,其中桥梁总长度目前设置为约 120km,工程走廊带内包含青藏铁路、青藏公路、格拉输油管线等工程。受多年冻土影响,除了正常跨越需求桥涵外,“以桥代路”是处理复杂冻土路基的有效措施^[1]。考虑到多年冻土区目前有多座已运营桥梁,这些结构运营性能及设计经验可为即将建设的青藏高速桥梁提供可靠的参考

依据,作者从格尔木至拉萨开展了调研,途径西大滩、不冻泉、唐古拉山、那曲等,共计里程 1183 公里。在全面分析调研资料的基础上,对青藏高速桥梁设计面临的关键技术问题予以了分析并给出了相应的解决方案。

1. 青藏铁路桥梁调研

1.1 桥型特点

青藏铁路大量使用了 8~32m 预应力混凝土 T 梁,并在强震区和跨线处采用了 24m、32m 钢-混组合梁,这些桥型如图 1 所示,8m 预应力混凝土 T 梁用于如清水河等“以桥代路”桥梁^[2]。主梁混凝土中掺加改性材料以提高其抗冻融性

能,另外混凝土主梁外表面均采用了特殊涂层进行涂装。16m, 24m 预应力混凝土梁采用先张法以提高其耐久性^[3]。对于钢-混组合梁,其由 2 片钢板梁和混凝土板组成,2 片主梁腹板中心间距为 2.0m, 24m 跨径钢梁高度为 1.98m^[4]。下部桩基采用钻孔灌注桩,桩径分为 1.0 和 1.25m 两

类。在强冻胀的场地,将承台抬高至少 30cm 形成高桩承台以消除冻胀力,将桩基底部进行扩孔,进一步增强其抗拔能力。青藏铁路桥梁支座采用 YZM 圆柱面钢支座,其具有结构高度低、抗震、耐久性强等特点^[3]。



(a) 预应力 T 梁



(b) 钢-混组合梁



(c) 钢-混组合梁细部

图 1 青藏铁路桥型

1.2 铁路桥梁病害

在青藏铁路沿线调研中发现铁路桥梁总体运营情况良好,病害主要集中在桥墩开裂、整体融沉等方面。图 2 为现场拍摄铁路桥墩开裂情况,类似的问题较为普遍,特别是对于高墩表现尤为明显。图 2(a)墩底处采用了复合材料包裹加固、图 2(b)采用了钢板包裹加固,可发现外包钢板已经发生脱落。铁路相关部门对于这些病害不仅进

行了上述外包加固材料的处理,而且对大部分裂缝采用了封闭处理,图 2(a)中较为显眼的规则条形即为处理后留下的痕迹。在调查中,对采用钢-混组合梁上部的桥墩进行查看时,均没有用肉眼能观察到的裂缝发生。这种情况也进一步表明,混凝土上部自重大大加之铁路巨大的活载效应,另外墩身施工过程中可能产生的瑕疵,这些因素叠加在一起即造成混凝土 T 梁桥桥墩容易开裂。



图2 青藏铁路桥墩病害

整体融沉也是青藏铁路桥梁的一个典型病害,如图3所示。图中桥梁位于唐古拉山站附近,其9个墩台无一例外发生了融沉,通过现场观察,此桥墩最初采用了热棒对桩基周围进行了处理,但处置效果不明显,因此后来采用了扩大承台并

增加桩基的加固方法。目前该桥处于正常运营状态。另外,在路桥过渡段,路基与桥梁不均匀沉降的情况也存在,但对于铁路,可以通过道砟厚度来进行调整,处置相对公路桥梁来说较为便利和经济。



图3 桥墩整体融沉

2. 青藏公路桥梁调研

青藏公路始建于1950年,先后历经四次整治^[5],目前道路为黑色沥青路面,交通量极大,特别是格尔木往拉萨方向重型运载车辆连绵不绝,调研途中交通堵塞几乎每天发生。相对于青藏铁路来说,青藏公路桥梁比例非常小,且桥梁绝对大多数为小跨径桥梁。桥梁结构形式大多为空心板、T梁、小箱梁。桥梁病害主要集中在下

部、路桥过渡段、伸缩缝等。图4反映了这些典型病害:其中图4(a)为墩底设置的钢套筒在河水冲刷和锈蚀作用后的情况;图4(b)反映了路桥过渡段,桥梁部分未发生融沉,而路基部分发生了明显的融沉,现场测量高差接近10cm,且黑色路面为后期采取过整治措施。图4(c)为雪水河桥的伸缩缝病害,在调研过程中发现大量类似的伸缩缝病害,究其原因,主要包括:伸缩缝自身的

问题如橡胶构件在高原环境下耐久性差,格尔木至拉萨方向超载、重载交通量大、路桥过渡段不均匀沉降等因素。图 4(d)为预制混凝土 T 梁现浇

部分的顶板下翼缘的裂缝。在楚玛尔河附近,图 4(e)中桥梁由于下部受到反复冻融作用,墩柱发生了侧移导致落梁



(a)冲刷及套筒腐蚀



(b)路桥过渡段严重沉陷



(c)伸缩缝破坏



(d)现浇混凝土裂缝



(e)落梁

图 4 青藏公路桥梁病害

3. 青藏高速桥梁建设面临的挑战与解决方案

3.1 冻土桩基

通过上述调研资料可知,青藏铁路桥梁桩基设计经受了冻土复杂地质条件的考验,为青藏铁路安全运营奠定了基石。新建的青藏高原高速公路桥梁其上部恒载较大,桩径比现有铁路桩基大,那么其施工过程中,桩基水化热对桩周冻土的扰动也更大。另外,对于个别大跨径连续梁桥,桩基采用群桩基础,承台下存在多处热源。为此,需根据地温及地质条件对其桩间距进行合理控制

以保证其桩周冻土的整体稳定性。

关于冻土中桩承载力计算,在施工图设计阶段应进行试桩来确定典型土层和桩基的冻结强度。在本阶段,本文建议采用青藏铁路桩基根据地温分区按冻结和融合两种状态设计的思路^[6],并将融沉等级纳入到多年冻土与桩之间的冻结强度中,冻结强度取值见表 1。为了安全起见,冻土上限深度内的土层不考虑摩擦力,同时对于地温高于 -0.5°C 的区域,宜采用融化状态计算桩基长度。

表 1 多年冻土与桩表面冻结强度建议值(kPa)

土层 类型	融沉 等级	土质地温 $^{\circ}\text{C}$						
		-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-4.0
黏性土	I ~ III	54	81	108	135	162	198	252

	IV	48	72	96	120	144	176	224
砂土	I ~III	72	117	153	189	225	261	342
	IV	64	104	136	168	200	232	304
碎石土	I ~III	63	99	135	171	207	243	315
	IV	56	88	120	152	184	216	280

在青藏铁路南口河 1#桥等工程中,扩底钻孔灌注桩已得到工程应用和验证^[7]。扩底钻孔灌注桩在一般的钻孔灌注桩的底部采用特殊的扩孔钻头扩大孔底,其构造示意图如图 5,在冻土区可发挥其优越的抗冻拔性能,同时其竖向承载力也获得明显提高。近年来,由于国内巨大的桥梁建设规模,桥梁施工机械得到飞速发展,扩底钻孔灌注桩机械施工工艺已较为成熟。在土层均为粉土或粘土等冻胀力较严重的情况下,优先可选用扩底钻孔灌注桩。青藏公路在历次改造中新建桥梁桩头为了减小冻胀力采用了钢管护筒,在此

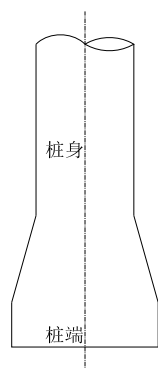


图 5 扩底桩示意图

3.2 上部结构方案

青藏高原西大滩至那曲段,除风火山口、唐古拉山口等特殊地形,大部分地势平坦,为此采用标准化、装配式上部结构对设计、工程经济极为有利。考虑到运输、制作、环境等因素,传统中小跨径预制混凝土小箱梁、T 梁在此项目中应用有如下的限制: 1、运输成本高; 2、全部采用预制混凝土结构,在预制场附近需要消耗大量的

次调研中发现,钢管外壁严重锈蚀。在青藏铁路桥梁承台设计中,采用了新材料聚氨酯缓冲层以减小冻胀力。鉴于上述思路,本文建议在桩头采用玻璃纤维复合材料(GFRP)护筒,如图 6 所示,日本和美国已有采用 GFRP 建成的实桥工程^[8,9]。此构造有如下优势: 1.GFRP 护筒表面光滑,摩擦系数较钢材小,其削弱冻胀力效果更为明显; 2.GFRP 护筒中添加抗碱性材料其耐久性更为突出; 3.GFRP 护筒延性好,在地震等极端荷载作用下对桩基有显著加固和保护作用。

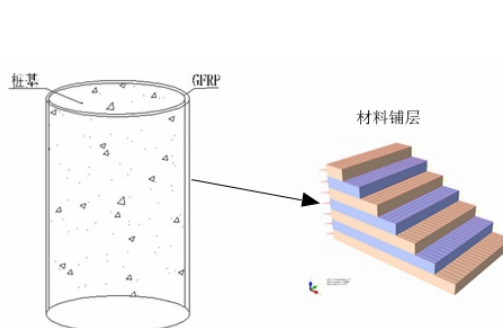


图 6 GFRP 桩护筒示意图

水和混凝土相关材料,对生态环境影响大; 3、强震区桥梁的抗震设计,混凝土上部自重重大,需大规模采用隔震的配套产品,大幅增加工程造价,同时增加下部的工程量,带来的附加影响是加大冻土的扰动,对下部桩基形成安全隐患。据此,在冻土稳定区,非强震区,可采用 16m 混凝土矮 T 梁;在冻土地温高极不稳定区、以桥带路、高烈度区等情况下,推荐采用 30m、40m 钢-混

组合梁, 上述跨径均采用结构简支桥面连续。

对于组合梁方案, 在运输路线允许情况下, 可采用作者提出的整体式组合梁方案^[10]。在路况差、转弯半径小的路段, 任然采用先梁后板, 预制板现场结合的方案, 板的分块宜采用横向整

体纵向分块, 有利于减少单孔施工工序。对于 30m 及以下跨径的组合梁混凝土桥面板, 桥面板可通过加大纵筋配筋率来提高抗裂能力, 尽量避免采用后张法预应力带来的耐久性问题^[11]。

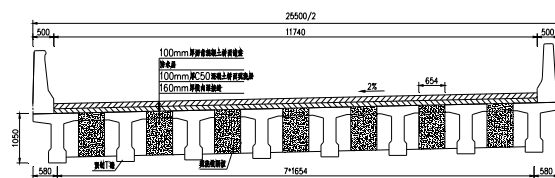


图 7 矮 T 梁示意图

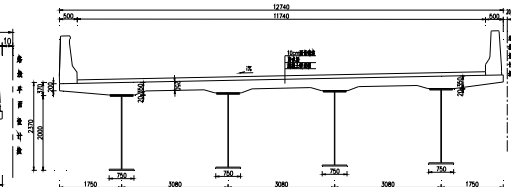


图 8 40m 跨径钢-混组合梁示意图

在极不稳定冻土路段, 采用路基方案造价高且有较大沉降风险, “以桥代路”是冻土地区处理其常用的技术手段。在本项目中, 以 120m 桥长为例, 在高温极不稳定冻土区, 地温为 -0.2°C 左右, 综合考虑上、下部, 对 30m、40m 四主梁钢-混进行了经济性对比, 下部采用桩-柱式桥墩, 桥台采用肋式桥台, 上、下部造价如表 2 所示。

经对比后发现, 用钢量 30m 比 40m 跨径小, 但由于减少了下部结构数量, 上、下部总体造价来看 40m 跨径仅比 30m 跨径高约 6%。若考虑高原冻土区仅 5-10 月适宜施工, 40m 跨径具有显著的优势。

表 2 120m 桥长不同跨径造价对比

构件及材料	30m 跨径	40m 跨径
上部		
混凝土 (m^3)	336.8	327.0
钢材 (t)	280.8	318.3
钢筋 (t)	35.0	35.0
下部		
柱式桥墩	$\Phi 1.4$, 墩高 10m	$\Phi 1.8$, 墩高 10m
钻孔灌注桩	$\Phi 1.6$, 桩长 46m	$\Phi 2.0$, 桩长 51m
总造价 (万)	1245.9	1329.0

3.3 路桥过渡段

从调研的资料可发现青藏公路普遍存在路桥过渡段不均匀沉降的问题, 同时带来的问题是桥台处伸缩缝使用寿命大打折扣。本次新建桥梁在场地允许情况下可优先考虑肋式桥台-片块石路基过渡方案 (图 9), 由于肋式桥台肋板之间有空隙使得背墙后路基土体和外界可实现对流, 同时路基部分采用片块石逐渐过渡, 与桥台临近的路基整体自身也可保持冻土地温。此外, 根据青藏铁路的经验^[12], 在桥头路基周围设置横向阻水堤可以有效减少水向台后迁移减小不均匀变形。

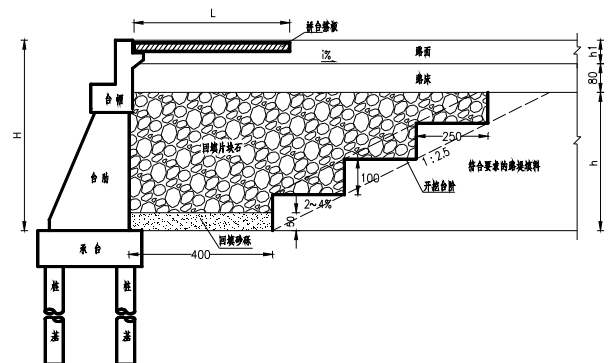


图 9 肋式桥台-片块石路基过渡

4. 结语

青藏铁路桥梁在冻土区工程建设中实现了突破并得到了时间的检验,其工程经验在青藏高原高速建设中应充分吸纳,并根据高速公路实际情况予以改进应用;鉴于青藏高原特殊地理环境,中小跨径简支梁桥是青藏高原的主要桥型,钢-混组合梁在结构安全、施工便利、生态环保方面有巨大的优势。对于桩基设计、路桥过渡段处理本文提出了一系列工程建议可供参考。

参考文献

- [1] 章金钊. 高原多年冻土地区桥涵设计与施工研究[J]. 中国铁道科学, 2001(4):40-46.
- ZHANG Jin-zhao. Study on Design and Construction of Bridge and Culvert in Secular Frozen Earth Area in Plateau [J]. China Railway Science, 2001(4):40-46.
- [2] 雷晓峰, 吴少海, 李承根. 青藏铁路以桥代路设计特点[J]. 冰川冻土, 2003, 25(b08):75-79.
- LEI Xiao-feng, WU Shao-hai, LI Cheng-gen. Bridge Instead of Embankment Design Concept for the Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(b08):75-79.
- [3] 吴少海. 青藏铁路格拉段桥涵设计简介[J]. 铁道标准设计, 2004(12):31-36.
- WU Shao-hai. An Introduction to Bridge and Culvert Design for Golmud-Lhasa Section of Qinghai-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2004(12):31-36.
- [4] 柳学发, 陈良江, 李兴云. 青藏铁路冻土区钢梁与钢筋混凝土板结合梁设计[J]. 钢结构, 2002, 17(05):1-2.
- LIU Xue-fa, CHEN Liang-jiang, LI Xing-yun. Design of Composite Girder with Steel Beams and RC Slabs for Qinghai-Tibet Railway in Frozen Soil Region [J]. Steel Construction, 2002, 17(05):1-2.
- [5] 汪双杰, 陈建兵, 李仙虎. 多年冻土地区公路修筑技术研究与实践[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2):384-392.
- WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, LI Xian-hu. The Highway Construction Technology in Permafrost Regions: Research and Engineering Practice [J] Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2):384-392.
- [6] 铁路桥涵地基和基础设计规范 TB10093-2017
- [7] 柏小明, 宋泽勇. 高原多年冻土区桥梁钻孔扩底桩旋挖钻施工[J]. 铁道工程学报, 2003(z1):91-92.
- BO Xiao-ming, SONG Ze-yong. Construction of Rotary Drilling in Expanded-Based Pile for Bridge in Plateau Permafrost Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003(z1):91-92.
- [8] 刘玉擎, 都鹭, 辛灏辉, 等. 拉挤 GFRP 型材层合板螺栓连接试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6):223-229.
- LIU Yu-qing, DU Wu, XIN Hao-hui et al. Experiments on Bolted Joints of Pultruded GFRP Laminates [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6):223-229.
- [9] Xin H, Mosallam A, Liu Y, et al. Analytical and experimental evaluation of flexural behavior of FRP pultruded composite profiles for bridge deck structural design[J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 123-149.
- [10] Chen Jianbing, Xiong Zhihua, Zhu Dongpeng et al. Composite Bridge Design and Pile Freeze Back Test in Cold and High-Altitude Permafrost Regions[A]. 中国科学技术协会.2017 世界交通运输大会论文集(上册) [C].中国科学技术协会.,2017:6.
- [11] 熊治华. 矩形钢管混凝土桁架桥节点试验与上部设计方法研究[D].长安大学. 2015
- XIONG Zhi-hua. Rectangular concrete-filled tubular truss composite bridge joint's experiment and superstructure design method analysis [D]. Chang'an University, 2015
- [12] 熊治文. 青藏铁路多年冻土区桥梁墩台变形机理及其整治技术研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2011.
- XIONG Zhi-wen. Study on Deformation Mechanism and Treatment Measures of Pier and Abutment in Permafrost Area along Qinghai-Tibet Railway [D]. Chinese Academy of Railway Sciences, 2011