

复杂施工环境下新型钢管—混凝土组合桩设计 关键参数优化研究

刘广波, 李晋*, 王昕, 张小宁

(山东交通学院, 山东 济南 250357)

摘要: 在大跨度钢箱梁斜拉桥步履式顶推施工过程中,需要在几条铁路线间搭设临时墩,存在施工空间小、地下水位高、工期紧的难题。该文以新疆阿克苏纺织大桥为研究对象,提出了钢管—混凝土组合桩设计方案,通过组合桩承载能力计算、钢管混凝土黏结力试验、钢管桩与人工挖孔灌注桩连接段黏结应力分析,优化了钢管桩的埋深以及钢管桩与人工挖孔灌注桩的连接长度等设计关键参数。

关键词: 临时墩; 钢管—混凝土组合桩; 钢管混凝土黏结力

随着中国交通事业的发展,出现了各种复杂施工工况与复杂地质条件下施工的难题,需要根据具体的工程特点设计相应方案。近年来,复杂工况下桥梁建设中人工挖孔灌注桩与钢管桩得到广泛应用。仇玉良等以大保高速公路为例,采用人工挖孔灌注桩解决了滇西山区地形复杂、岩层破碎、地层岩性主要为“滇西红层”的桩基承载力问题;张琳等运用人工挖孔灌注桩解决了土层内存夹层、桩端基岩持力层埋深较浅的工程问题;陈小钰等结合青岛某工程对人工挖孔灌注桩进行了竖向静载荷试验与桩身内力测试,结果表明:桩身侧摩阻力值为勘测推荐值的2.5倍,且桩顶卸载回弹率大、承载力较高。青山长江公路大桥与上海外环隧道基坑围护施工中采用钢管桩施工方案解决了施工荷载大、工期紧、工况复杂的工程难题;平潭海峡公铁两用大桥栈桥采用钢管桩基础克服了工期短、水流急、表层岩石强度高的问题;杭州湾跨海大桥采用了5474根钢管桩应对多种恶劣自然条件。由此可见,人工挖孔灌注桩施工工序简便,可以避免使用大型设备,同时对周围建筑物及地基影响较小、单桩承载力高;钢管桩施工工期短。在阿克苏纺织大桥顶推施工中,需要在几条铁路线间搭设临时墩基础,单纯运用人工挖孔灌注桩开挖深度太大,不能保证铁路路基的稳定性;而单纯运用钢管桩则承载能力不易满足施工要求。为此该文提出钢管—混凝土组合桩设计方案。

1 设计方案

1.1 工程概况

阿克苏纺织大桥是连接新疆阿克苏纺织工业城与阿克苏市区的重要通道,在国家“一带一路”战略中具有独特的地位和作用。主桥采用独塔双索面结合梁斜拉桥,跨度布置为 $2 \times 140 \text{ m} = 280 \text{ m}$,主梁全长为279.4 m,梁高2.6 m,采用顶推施工法。施工过程中需要在铁路农资线、棉麻线、南疆线、南疆复线等重要交通干线间修建临时墩基础,但是受到施工作业空间狭小以及水位较高的限制,大型设备无法到达施工现场,使施工受阻。

1.2 桩基础设计方案

临时墩基础的布置位置特殊,既要保证桩基础的承载能力,又要确保周围铁路线的正常运营,避免在施工过程中对铁路路基造成安全隐患。由于工作面狭小、地下水位高,经方案比选决定采用钢管—混凝土组合桩的方案。组合桩基础主要由钢管、人工挖孔混凝土灌注桩组成,临时墩布置见图1。首先人工挖孔至规定标高,将钢管压入孔底下并高出孔底一定距离,然后将绑扎完毕的钢筋笼吊装至孔内并将钢管与钢筋笼焊接为整体,最后浇筑混凝土。

人工挖孔灌注桩施工过程影响小、承载能力好,但

收稿日期:2019-05-05(修改稿)

作者简介:刘广波,男,硕士研究生,E-mail:2043152478@qq.com

*通信作者:李晋,男,博士,教授,E-mail:85934491@qq.com

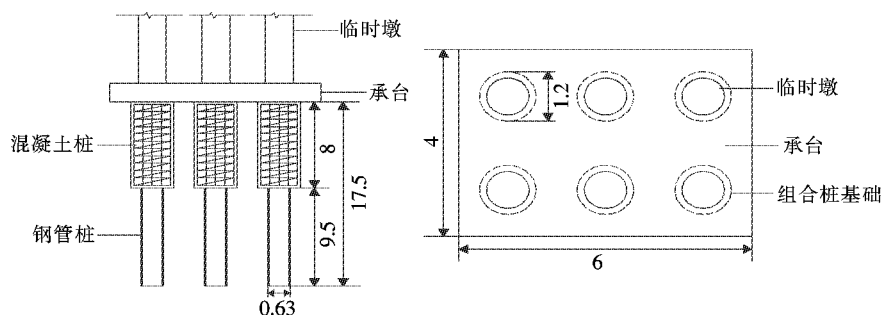


图 1 临时墩基础布置(单位:m)

是受工期与周围铁路线的影响开挖深度与桩径有限,最后确定人工挖孔 8 m、桩径为 1.2 m。由此人工挖孔灌注桩的桩长、桩径以及该部分桩的承载能力都已确定。施工过程中每根组合桩所受的荷载不同,通过计算选取最不利荷载,计算钢管桩承担剩余荷载所需要的长度。

考虑到钢管桩与人工挖孔灌注桩的连接问题,即结构的整体性,钢管桩采用直径 0.63 m 的钢管,钢管桩桩顶预留部分钢管延伸到人工挖孔灌注桩内形成整体共同参与受力。但此结合位置仍然是薄弱处,存在发生局部变形的可能,此位置荷载仅靠预留钢管与混凝土的黏结力承担,因此解决此位置处的承载力问题成为工程的重点。通过查阅前人对钢管与混凝土的黏结力研究,黏结强度的计算公式并不十分明确。蔡绍怀等将混凝土强度作为单一变量建立公式;Gourley 等将钢管桩的径厚比作为单一变量建立公式,通过验证得知理论值与试验值相差较大;康希良等将多个参数(径厚比、长径比、混凝土强度、含钢率以及约束效应系数等)都考虑在内建立钢管桩与混凝土黏结强度计算公式,经验证得知理论值与试验值的离散程度有所降低,但仍有较大的差异。因此钢管与混凝土的黏结强度是由多个参数一起控制的,通过理论计算并不能确保连接处钢管桩与混凝土的黏结强度。该文通过试验确定钢管桩与混凝土的黏结强度及钢管的预留长度。

2 钢管桩—混凝土界面黏结试验

2.1 试验方案

根据实际工程进行缩尺试验,设计了 3 种结构形式,模型几何比为 1:3.7,原材料都与该组合桩相同。试验一方面测试钢管桩与混凝土的抗剪强度,另一方面探究钢管桩与混凝土连接长度对界面抗剪强度的影

响。试验进行钢管推出试验,每种结构形式的试验都制备了 3 个试件,试件主要参数如表 1 所示。

表 1 试件主要参数

试件 编号	连接长 度/mm	混凝土 等级	外钢管直 径/mm	内钢管直 径/mm	试件 个数
T1	200	C30	325	171	3
T2	300	C30	325	171	3
T3	400	C30	325	171	3

试件养护 28 d 后进行黏结力试验,测试在 MTS 压力机上进行,加载速率为 200 N/s,试验荷载分别由仪器计算机控制系统和力传感器输出,采用连续采集方式记录接触面的滑移量,当试件产生较大位移且压力机荷载值不变时,终止试验,试验装置简图如图 2。

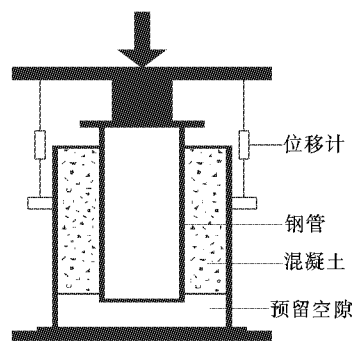


图 2 钢管桩推出装置

2.2 试验数据分析

图 3~5 为 3 种结构组合的应力—应变曲线图。

应力 τ 与应变 s 分别为:

$$\tau = N/A, s = S/L \quad (1)$$

式中: N 为施加的荷载; A 为钢管与混凝土的接触面积; S 为钢管与混凝土的相对位移; L 为钢管与混凝土的连接长度。

由图 3~5 可得:钢管与混凝土的黏结强度分别为 0.57、0.58、0.6 MPa,随着钢管与混凝土连接长度的增

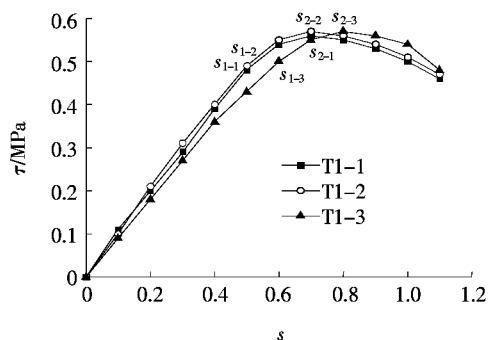


图3 试件 T1 的应力—应变图形

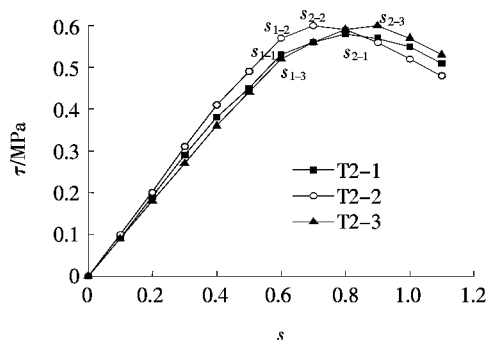


图4 试件 T2 的应力—应变图形

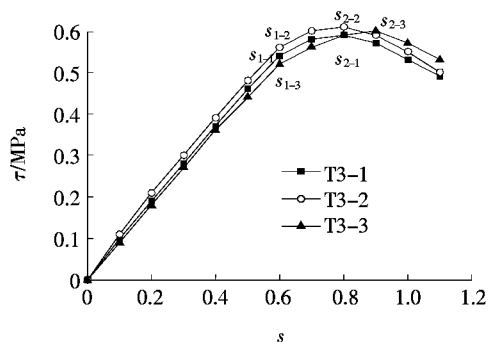


图5 试件 T3 的应力—应变图形

加黏结强度也有一些提升,但提升的幅度不大。钢管与混凝土的黏结力主要由钢管与混凝土的化学胶结力、机械咬合力、摩擦力组成。3种结构的发展趋势相同, s_1 点之前应变随应力的增加呈线性增长,表现为线性关系,此阶段黏结力主要由钢管与混凝土间的化学胶结力和机械咬合力组成。随着应力的增大曲线斜率变缓,非线性增长出现峰值 s_2 点, s_2 点之后曲线向下发展,随后趋于平缓。当曲线达到 s_1 点后,化学胶结力已充分发挥,这时主要是机械咬合力与摩擦力发挥作用,钢管壁凸起不平与混凝土面咬合产生的阻力,因此曲线由 s_1 发展到 s_2 的过程是非线性的。当达到峰值点时机械咬合力也充分发挥,此时达到钢管与混凝土的黏结强度,只剩下界面间摩擦力发挥作用。

通过试验研究得到,钢管与混凝土之间的黏结强度为0.5 MPa以上。

3 钢管桩长度计算

桥梁施工过程中,钢管—混凝土组合桩是作为一个整体参与受力,计算时组合桩的承载能力由桩侧摩阻力与桩端处土的承载能力提供,而桩侧摩阻力由人工挖孔灌注桩与钢管桩的摩阻力组成,桩端处土的承载能力由钢管桩桩端土的承载力决定。

经过计算在静载作用下,钢梁安装到位,混凝土板及湿接缝施工完成,所有重力作用在临时墩时,临时墩钢管桩桩基最大荷载为1 536.3 kN,主要承受钢梁、桥面板自重及临时荷载。土层从地面向下依次为粉砂层(层厚 5.9 m)、细砂层(层厚 2.3 m)、圆砾土(层厚 1.2 m)、细砂层(层厚 4.5 m)、粉土(层厚 1.7 m)、细砂层(层厚 2.7 m)。各土层与桩侧摩擦阻力标准值依次为:粉砂层 45 kPa,细砂层 55 kPa,圆砾土 60 kPa,细砂层 40 kPa,粉土 35 kPa,细砂层 40 kPa。

根据 JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》,人工挖孔灌注桩桩侧摩阻力计算见式(1):

$$[R_a] = \frac{1}{2} u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i \quad (1)$$

式中: $[R_a]$ 为单桩轴向受压承载力容许值(kN); u 为桩身周长(m); l_i 为承台底面或局部冲刷线以下各土层的厚度(m); q_{ik} 为与 l_i 对应的各土层与桩侧的摩阻力标准值(kPa)。

根据 JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》,钢管桩桩侧摩阻力与桩端土承载力计算公式如下:

$$[R_a] = \frac{1}{2} \left(u \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i q_{ik} + \alpha_r A_p q_{rk} \right) \quad (2)$$

式中: A_p 为桩身横截面积(m^2); q_{rk} 为桩端处土的承载力标准值(kPa); α_i 为振动沉桩对各土层桩侧摩阻力的影响系数; α_r 为振动沉桩对各土层桩端承载力的影响系数。

将人工挖孔灌注桩的数据代入式(1)计算得桩侧摩阻力为 718.2 kN,其余施工荷载则由钢管桩承担,假设钢管桩需要深入到最下层的细砂层,则设钢管桩长度为 x ,根据规范该细砂层的承载能力为 3 000 kPa,通过计算可得 $x=8.38$ m,出于安全考虑钢管桩的长度定为 9.5 m。这样考虑桩侧摩阻力加大了,并且随着钢管桩桩端进入持力层的深度增大,桩端土的

承载能力也有一定程度的增大,确保了桩的承载能力。

4 组合桩连接长度计算

对于钢管桩与人工挖孔灌注桩连接长度的确定,首先根据工程经验假设一个连接长度,然后通过理论计算检验是否符合承载力的要求,不满足承载力要求再做相应调整。

组合桩桩顶受 1 536.3 kN 轴力,轴力自桩顶到桩底逐渐减小,计算轴力时将桩端承载力忽略,作为安全储备,轴力全由桩侧摩阻力抵消,而连接段上下截面所受轴力差值为钢管桩与人工挖孔灌注桩所受剪切力,在组合桩施工时,为了保证钢管桩与人工挖孔灌注桩现浇混凝土界面的紧密性,连接段长度不宜太小,故假设钢管桩与人工挖孔灌注桩的连接长度为 0.7 m,则计算此状态下连接段所受应力。

连接段上截面受到轴力为 763.8 kN、下截面受到轴力为 702.3 kN,见图 6。则所受剪切力为 61.5 kN,钢管桩与人工挖孔灌注桩接触面积为 1.385 m²,其中钢管内部的混凝土承载力作为安全储备不予考虑,计算公式如下:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

式中: σ 为连接段钢管黏结强度; P 为剪切力(kN); A 为接触面积(m²)。

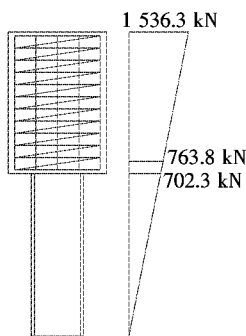


图 6 轴力图

经计算,钢管—混凝土组合桩连接段受到的剪切应力为 0.044 MPa,远小于钢管与混凝土的黏结强度 0.5 MPa,因此假设连接长度 0.7 m 成立。

5 结论

(1) 通过钢管桩—混凝土黏结力试验,得出随着

钢管与混凝土连接长度的增加黏结强度也有相应增大,测得黏结强度为 0.5 MPa。

(2) 根据组合桩桩侧摩阻力与桩端承载力,计算得出钢管桩长度为 9.5 m。

(3) 当组合桩连接段为 0.7 m 时所受剪切应力为 0.044 MPa,远小于试验测得的 0.5 MPa,假设成立。

参考文献:

- [1] 仇玉良,谢永利.滇西山区灌注桩竖向承载性能的试验研究[J].土木工程学报,2004(8).
- [2] 张琳,李晶.人工挖孔与机械钻孔结合灌注桩的设计及工程应用[J].建筑结构,2013(12).
- [3] 陈小钰,张明义,白晓宇.人工挖孔嵌岩灌注桩承载特性现场试验与机理分析[J].土木建筑与环境工程,2017(5).
- [4] 王寅峰,吴杰良.武汉青山长江公路大桥南主墩锁口钢管桩围堰设计[J].桥梁建设,2017(1).
- [5] 姚德波,殷新锋.基坑锁口钢管桩围堰的受力行为分析[J].中外公路,2017(2).
- [6] 王东辉,张立超.平潭海峡公铁两用大桥栈桥设计[J].桥梁建设,2015(4).
- [7] 陈涛.杭州湾跨海大桥钢管桩成套关键技术[J].公路,2010(5).
- [8] 吴明威,陈林,刘冬冬.挖孔桩干浇机制砂自密实混凝土施工技术[J].中外公路,2016(6).
- [9] Musarra M, Massad F. Static Load Tests in an Instrumented Rock Socket Barrette Pile[J]. Soils and Rocks, 2015, 38(2): 163—177.
- [10] 贾强,王浩东,张鑫.桩周土开挖状态下钢管桩稳定性研究[J].土木工程学报,2018(9).
- [11] 薛立红,蔡绍怀.钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(上)[J].建筑科学,1996(3).
- [12] Gourley B C, Tort C, Hajjar J F, et al. A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tubebeam-Columns[R]. Urbana, Illinois: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at UrbanaChampaign, 2008: 179—180.
- [13] 康希良.钢管混凝土组合力学性能及粘结滑移性能研究[D].西安建筑科技大学硕士学位论文,2008.
- [14] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [15] 王会永,袁昂.沿海软土路基 CFG 桩加固挤密作用模拟研究[J].中外公路,2017(3).
- [16] 陈万鹏,罗忠涛.多层地基中摩擦型单桩沉降分析的传递矩阵法[J].中外公路,2017(6).