

和若铁路预制装配式桥墩优化设计研究

张 军¹,徐 镭²,李一鸣¹,于 博¹

(1.兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070; 2.中铁二十一局集团第一工程有限公司,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要:以新建和若铁路预制装配式桥墩作为研究对象,研究铁路预制装配式桥墩构造设计对受载作用下其结构合理性、安全性及经济性影响。采用国家现行铁路桥涵设计规范对预制空心墩进行上部结构自重、二期、列车制动力三者组合加载。根据控制空心墩不同壁厚、不同预应力束数、不同墩柱后浇段高度等因素,基于 MIDAS CIVIL 软件建立桥墩受力模型,得到3类不同控制因素在墩顶、墩底和墩身关键点处发生的位移与弯矩的变化。研究表明:墩柱壁厚按45 cm设计时可以满足和若铁路实际工程的设计需要,同时也能获得更大的安全性和稳定性,与壁厚40 cm相比位移降低17.61%,弯矩变化很小,整体结构更加经济合理,能保证行车安全;预应力束数按12根设计时足以满足桥墩的力学性能,构造更经济合理;墩柱后浇段按4 m设计时能够更好满足和若铁路实际工程需要,同时提高结构的安全性和稳定性,与3.2 m相比墩顶水平位移降低1.61%,对弯矩影响不大。通过优化对未来预制装配式桥墩设计提供了理论指导和参考意义。

关键词:铁路桥;预制墩柱;安全性;后浇段;优化设计

中图分类号: U445.55

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)09-0171-05

0 引 言

在土木工程领域大发展的背景下,我国开始对预制装配式结构有了更高的重视,不仅应用于成熟的房屋建筑,还应用在较为成熟的桥梁上部结构和隧道中,同时向桥梁下部结构预拼装阶段发展,以改变现有桥梁施工方式。与传统桥梁设计施工方式相比,这种预拼装方式能减少对环境的污染、节省工期、减少不必要的浪费、改善施工过程且能保证工程质量。

基于预制装配式结构,国内外开展了相关研究。如美国新泽西州的胜利桥^[1],美国德克萨斯州183高架桥,2002年建成的SH 66 over Lake Ray Hubbard桥盖梁与墩身间采取了钢筋和波纹管连接技术,美国佐治亚州 Interstate 85 interchange桥整体采用预制拼装技术,美国华盛顿州 I-5 Grand Mount to Maytown I/C两跨径预制梁桥于2011年完工,预制构件间通过金属波纹管连接构造形成整体。我国在20世纪90年代初期开始研究预制装配化墩柱,在2002年修建的东海大桥,除岛墩为现场浇筑外,其

余均为预制装配式桥墩^[2];杭州湾跨海大桥中的引桥大部分采取的是预制装配化墩柱^[3];上海长江大桥中部分跨径桥墩应用了预制装配构造技术^[4];浙江舟山金堂大桥中非通航孔跨间桥墩采用预制拼装式墩柱,从而提高了施工速度^[5]。

随着预制构件在装配化设计与施工技术方面的大力推广,已开展大部分有关预应力钢束连接构造、墩型形式选择等的预制拼装桥墩^[6-12]。

1 工程概况

新建一铁路,线路总长825.5 km。桥梁全长88.9 km,占线路总长的10.5%,全线墩柱均不高,墩高小于10 m的桥墩占70%。路基全长736.6 km,占线路总长的89.5%。全线地质以粉砂、细砂、细圆砾土、粗圆砾土、卵石土为主。全线地震动峰值加速度值为0.05~0.15g,地震动反应谱特征周期为0.40~0.45 s。具体工程实际背景见图1,线路标准见表1。

2 总体概述

2.1 构件设计

本文以(24×24)m等跨梁段直线预制拼装桥墩为设计依据,在此基础上进行相关项目优化,图2为盖梁整体构造图,图3为桥墩整体构造图。

预制装配式墩身分为一至二,两个节段,墩身直

收稿日期:2022-10-10

基金项目:中国铁建股份有限公司重大科技计划项目(2019-A01)

作者简介:张军(1993—),男,在读硕士研究生,主要从事桥梁设计研究工作。



图1 新建铁路

表1 线路标准

线路等级	正线数目	活载	设计速度 / (km·h ⁻¹)	最小曲线 半径 /m
I级	单线	ZKH活载	160	1 600

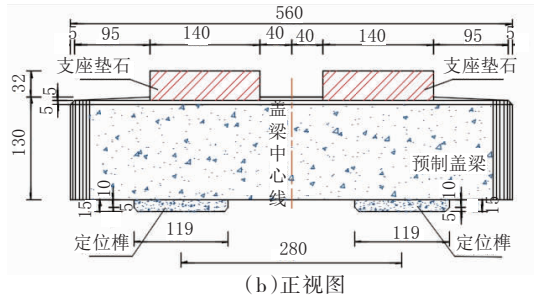
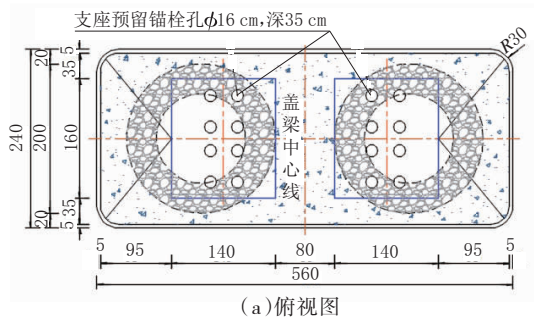


图2 盖梁整体构造图(单位:cm)

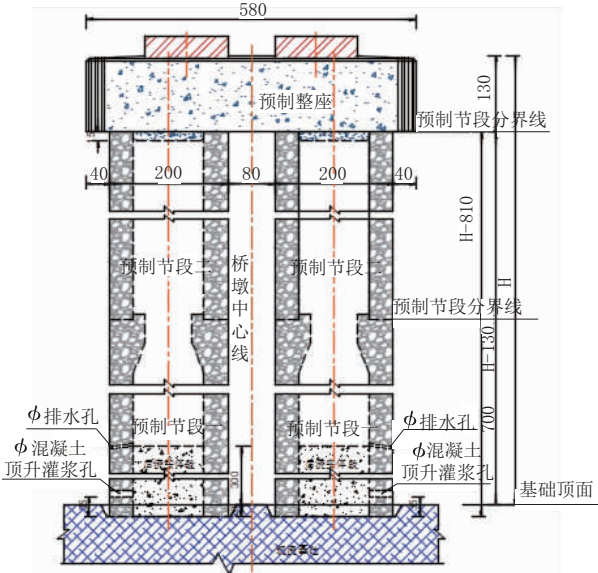


图3 桥墩整体构造图(单位:cm)

径 2 m,壁厚 40 cm。现浇杯形基础、墩身节段、盖梁间通过采用预应力束连接为整体结构,在预制节段分界面处涂抹环氧树脂胶,进行密封性及可靠性连接处理。预应力锚固端应设置在现浇基础内,采用 PM15-12 型锚具,张拉端设置在盖梁顶部,并预留左右各 6 孔张拉槽口及支座锚栓孔,采用 DSM15-12 型锚具,基础预留深度 160 cm 锚穴。盖梁底部与墩身对应位置处设置高 15 cm,直径 119 cm 的圆形锚固定位棒。

2.2 构件材料

盖梁、墩身均采用 C50 混凝土,现浇杯形基础采用 C40 混凝土;预应力束采用符合《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014)标准的 $\phi 15.2$ mm 高强度低松弛钢绞线;盖梁采用 $\phi 25$ 、 $\phi 20$ 、 $\phi 16$ 、 $\phi 12$ HRB400 级及 10 HPB300 级钢筋,配筋率为 6.9%,墩身采用 $\phi 12$ HRB400 级及 $\phi 10$ HPB300 级钢筋,配筋率为 4.0%(按照一个桥墩计算)。

2.3 荷载计算

主梁自重为 189.7 t,二期恒载为 78.83 kN/m,则作用在单个桥墩上部结构恒载为 3 788.92 kN。列车活载采用 ZKH 活载,动力系数采用最新《铁路桥涵设计规范》(TB 1002—2017)相关规定进行计算,得出列车制动力为 304.51 kN。

3 固端边界干扰局部应力

通过空心墩构造看,墩身、盖梁及承台连接部位,相当于固端的边界条件,对墩壁变形起着约束作用,因而产生局部的纵向应力和环向应力,称为边界干扰局部应力^[13]。假设将圆环空心墩视为受中心压力 P 作用的圆柱壳,端部变形和约束情况见图 4。

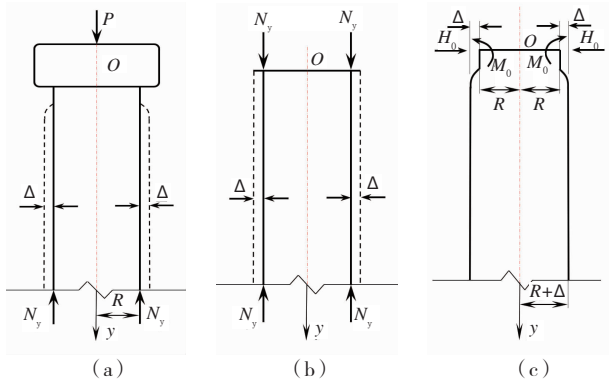


图4 中心受压下圆柱形空心墩端部变形约束情况

中心受压单位宽墩壁承受均匀轴向压力和压应力为:

$$N_y = P / (2 \pi R) \tag{1}$$

$$\sigma_y = N_y / d = P / (2 \pi R d) \quad (2)$$
式中: P 为墩柱中心压力; R 为固端转动半径; d 为墩柱壁厚。

在压应力作用下,如果顶帽墩壁变形无约束,则墩壁会产生向外的均匀自由扩张变形,其值为:

$$\Delta = R \varepsilon_0 = R \nu \varepsilon_y = R \nu (\sigma_y / E) = R \nu (N_y / Ed) = P \nu / (2 \pi d E) \quad (3)$$

式中: ε_0 为墩壁环向应变; ε_y 为墩壁纵向应变; ν 为混凝土的泊松系数,可取 1/6; E 为混凝土弹性模量; N_y 、 σ_y 含义同式(1)和(2)所述。

在实际中,盖梁和承台及墩身为固结,要约束墩壁向外变形,同时还需保持转角为零,应在墩身端部作用着均匀的径向附加剪力 H_0 和 M_0 弯矩,使端部产生相反的位移为:

$$\Delta^- = -\Delta = -P \nu N_y / (Ed) = -P \nu / (2 \pi d E) \quad (4)$$

从而使径向变位 ω 和 θ 角变位都为零。

基于圆柱形薄壳结构在边界均匀荷载 H_0 和 M_0 作用下壳体的变位和内力公式,根据转角为零的边界条件,可推导出 H_0 与 M_0 之间的关系式:

$$M_0 = H_0 R / (2k) \quad (5)$$

其中: $k = \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} \sqrt{R/d}$ 为墩柱径胀系数,依据规范在墩柱转动半径 R 和 d 壁厚比值不同时取自不同值。

圆柱壳体在端部均匀荷载 H_0 和 M_0 作用下的径向变形和内力计算公式为:

$$\omega = -H_0 R k / (Ed) e^{-(ky/R)} \times \sqrt{2} \cos(ky/R - \pi/4) \quad (6)$$
$$M_y = \sqrt{2} H_0 R / (2k) e^{-(ky/R)} \times \cos(ky/R + \pi/4) \quad (7)$$
$$N_\phi = -\sqrt{2} H_0 k e^{-(ky/R)} \times \cos(ky/R + \pi/4) \quad (8)$$

式中: ω 为径向位移,向外为正; M_y 为墩壁所受单位宽度上的弯矩,外侧受压为正; M_ϕ 为墩壁所受单位宽度上的环向轴力,拉正压负;其他符号含义同式(1)、式(2)、式(3)及式(5)的解释一致。

再根据边界条件 $y=0, \omega = \Delta^- = -\Delta = -P \nu N_y / (Ed)$,由式(6)可得

$$H_0 = \Delta Ed / (Rk) = \nu N_y / k \quad (9)$$

将式(9)带入到式(7)和式(8)中可得中心受压作用下,固端干扰产生的单位宽度附加纵向弯矩、环向弯矩和环向轴力为:

$$M_y = \sqrt{2} \nu N_y R / (2k^2) e^{-(ky/R)} \times \cos(ky/R + \pi/4) \quad (10)$$
$$N_\phi = \sqrt{2} \nu N_y e^{-(ky/R)} \times \cos(ky/R + \pi/4) \quad (11)$$
$$M_\phi = \nu M_y \quad (12)$$

由此产生的纵向和环向局部应力,可按照高度 d 为 d 的单位宽矩形板进行计算:

$$\sigma_y^- = 6M_y / d^2 \quad (13)$$
$$\sigma_\phi = N_\phi / d \pm 6M_\phi / d^2 \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可以看出,纵向局部应力与纵向局部弯矩有关, M_y 按负指数振动函数变化,衰减很快。 N_ϕ 和 M_ϕ 与环向局部应力有关,距离端部一定位置处会产生环向拉应力。

4 优化设计

4.1 墩柱壁厚优化设计

本文结合实际墩柱外径为 2 m,墩高为 12 m,外径、墩高始终保持不变,改变墩柱壁厚,选取 b 为 35 cm、40 cm、45 cm、50 cm 四种不同壁厚形式(见表 2),利用 MIDAS CIVIL 有限元进行上部结构重力、列车制动力等主要荷载工况的施加,根据各控制点处内力、位移数值对比分析其力学性能、结构安全性及稳定性影响。

表 2 墩柱壁厚设置		
墩高 H/cm	外径 D/cm	壁厚 b/cm
1 200	200	35
1 200	200	40
1 200	200	45
1 200	200	50

4.2 预应力束数优化设计

本文设置预应力束束数为 $n=10, 12, 14, 16$ 束四种情况,基于 MIDAS CIVIL 有限元分析软件,将上部结构自重、列车制动力等主要荷载工况施加到盖梁顶部,根据各控制点处内力、位移数值对比分析其力学性能、结构安全性及稳定性影响。预应力束的张拉力为 1 264.98 MPa,现已增减墩柱预应力束束数,保持张拉力不变,见表 3。

表 3 预应力束数设置	
预应力束数 $n/\text{束}$	控制张拉力 /MPa
10	1 264.98
12	1 264.98
14	1 264.98
16	1 264.98

4.3 后浇段优化设计

本文结合实际墩柱外径为 2 m,墩高为 12 m,外径、墩高始终保持不变,仅改变墩柱后浇段高度,选取后浇段为 $h=2.0, 3.0, 3.2, 4.0$ m 四种不同高度(见表 4),基于 MIDAS CIVIL 有限元分析软件,将上部结构自重、列车制动力等主要荷载工况施加到盖梁

顶部,根据各控制点处内力、位移数值对比分析其力学性能、结构安全性及稳定性影响。

表 4 后浇段高度设置

墩柱壁厚 b/cm	后浇段高度 h/cm
40	200
40	300
40	320
40	400

5 结构分析

本文选取 MIDAS CIVIL 有限元模拟软件作为桥墩结构建模工具,桥墩模型每 10 cm 建立一个节点,重要位置对节点进行细分,整个双柱式空心墩共建立节点 251 个,建立单元 246 个。

桥墩承台顶设置了后浇实体段,采用 C55 微膨胀混凝土浇筑,并预留后浇段连接钢筋,通过墩柱、承台与后浇段三者形成固结,达到整体受力作用,从而提高结构稳定性和耐久性。

5.1 墩柱壁厚优化分析

对墩柱壁厚分别为 b 为 35、40、45、50 cm 的桥墩进行 MIDAS 有限元模拟分析,此时保持预应力束数为 12、外径 2 m、后浇段高度为 3.2 m 三项参数不变,应得出整体桥墩模拟结果,见图 5 所示。桥墩设置四种不同壁厚经 MIDAS 有限元分析得出最大内力和位移运算结果汇总见表 5。

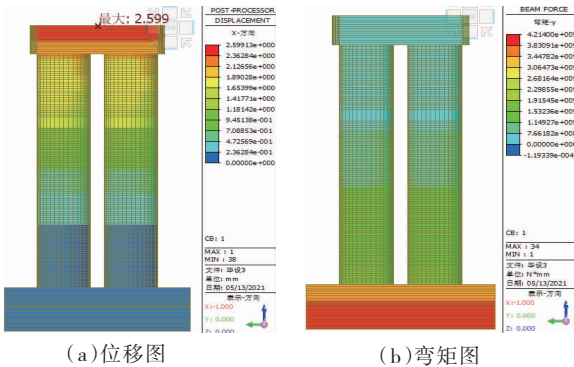


图 5 桥墩 50 cm 壁厚模拟结果

表 5 桥墩不同壁厚指标运算结果汇总

外径 D/m	壁厚 b/cm	最大位移 δ/mm	最大弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
2.0	35	4.660	4 213.999 96
2.0	40	3.787	4 213.999 97
2.0	45	3.120	4 213.999 98
2.0	50	2.599	4 213.999 98

通过对表 5 及图 6 分析结果发现:将桥墩壁厚降低后,其承受上部荷载产生的墩顶位移有所增

加,相比 40 cm 原尺寸位移增加较快。桥墩壁厚设为 50 cm 时,其承受上部荷载产生的墩顶位移降低明显,相比 40 cm 原尺寸位移降低 31.37%。桥墩产生的最大弯矩随壁厚增加而增大,但增加幅度不大对桥墩受力情况并没有较大影响。可见 50 cm 壁厚设计的桥墩可以满足和若铁路实际工程项目的设计要求,较为合理。

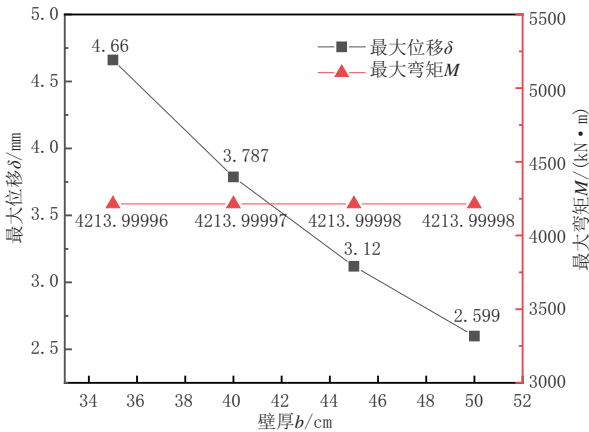


图 6 壁厚变化对弯矩及位移影响结果对比

5.2 预应力束数优化分析

对墩柱预应力束数分别为 $n=10, 12, 14, 16$ 束的桥墩进行 MIDAS 有限元模拟分析,此时保持壁厚 40 cm、外径 2 m、后浇段高度为 3.2 m,三项参数不变,得出整体桥墩模拟结果,见图 7 所示。桥墩设置四种不同预应力束经 MIDAS 有限元分析得出最大内力和位移运算结果汇总见表 6。

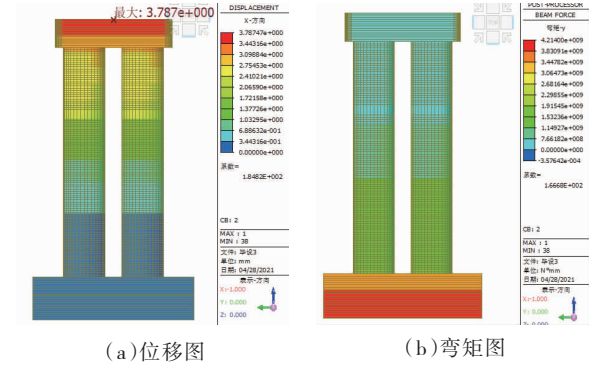


图 7 12 束预应力筋模拟结果

表 6 桥墩不同预应力束数指标运算结果汇总

壁厚 b/cm	束数 n	最大位移 δ/mm	最大弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
40	10	3.802	4 283.000 00
40	12	3.787	4 213.999 97
40	14	3.773	4 213.999 97
40	16	3.759	4 214.000 01

通过对表 6 及图 8 分析结果发现:将桥墩预应力束数增加后,其承受上部荷载产生的墩顶位移有

明显减小。当预应力束设为 10 时,与 12 束相比最大水平位移增加了 0.39%,预应力束为 14 时,其最大水平位移降低 0.37%,足以满足和若铁路的设计要求。桥墩产生的最大弯矩随束数增加而减小,但减小幅度不明显,对桥墩并不造成任何影响。可见 12 束预应力设计的桥墩可以满足和若铁路实际工程项目的的设计需求,较为合理。

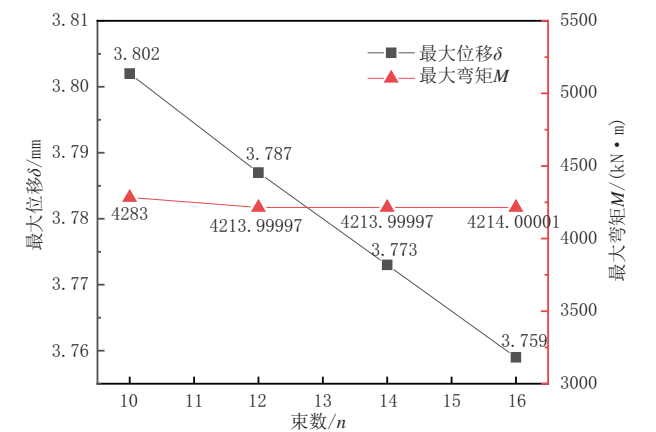


图 8 预应力束数变化对弯矩及位移影响结果对比

5.3 后浇段高度优化分析

本文对墩柱后浇段高度分别为 $h=2,3,3.2,4$ m 的桥墩进行 MIDAS 有限元模拟分析,此时保持壁厚 40 cm、外径 2 m 两项参数不变,得出整体桥墩模拟结果,见图 9 所示。桥墩设置四种不同后浇段高度经 MIDAS 有限元分析得出最大内力和位移运算结果汇总见表 7。

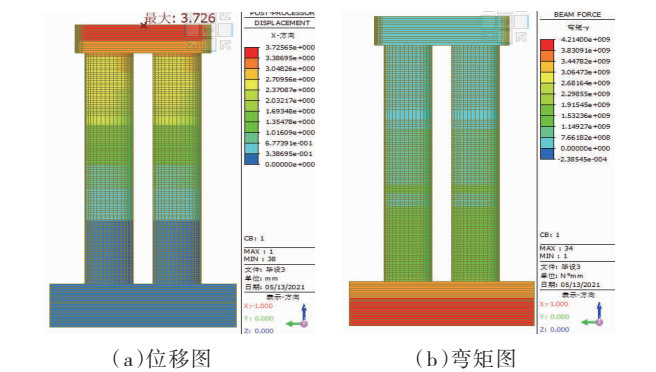


图 9 4 m 后浇段高度模拟结果

表 7 桥墩不同后浇段高度指标运算结果汇总

后浇段高 h/m	壁厚 b/cm	最大位移 δ/mm	最大弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$
2.0	40	3.864	4 213.999 99
3.0	40	3.787	4 213.999 97
3.2	40	3.787	4 213.999 97
4.0	40	3.726	4 213.999 99

通过对表 7 及图 10 分析结果发现:将桥墩后浇段高度增加后,其承受上部荷载产生的墩顶位移有

所减小。当后浇段高设为 2 m 时,较原结构高度 3.2 m 相比最大水平位移增加了 2.03%;当后浇段高为 4 m 时,其最大水平位移降低 1.61%,足以满足和若铁路的设计要求。桥墩产生的最大弯矩随后浇段高度增加而减小,但减小幅度较小,对桥墩并不造成任何影响。可见后浇段高度为 4 m 的桥墩可以满足和若铁路实际工程项目的的设计需求,较为合理。

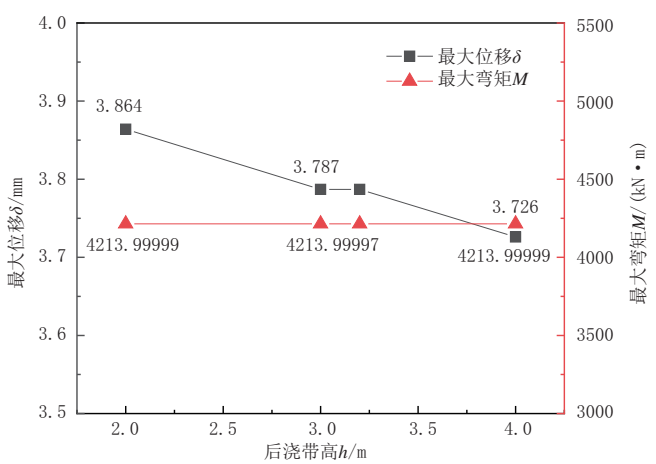


图 10 后浇段高度变化对弯矩及位移影响结果对比

6 结 语

通过对和若铁路预制装配式桥墩在墩柱壁厚、预应力束数及后浇段高度三者单因素影响下的优化设计研究及固端边界干扰局部应力影响,基于 MIDAS CIVIL 有限元模拟分析最终得出以下结论:

- (1)桥墩壁厚发生改变时,能不同程度影响其力学性能,并且影响程度在设计允许范围内。设计壁厚为 45 cm 时能够更好满足实际工程的设计需求,也能获得更大的安全性和稳定性。
- (2)预应力束数变化时,对于桥墩力学性能并没有较大影响,预应力束数按 12 根设计时能满足桥墩构造设计更经济合理。
- (3)桥墩后浇段高度改变时,承受同一荷载后对整个桥墩的力学性能提升较低。后浇段高度为 4m 时能更好满足实际工程的设计需求,保证了结构既经济合理又安全可靠。

参考文献:

[1] OUYC.Precast segmental post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions [J]. Dissertations & Theses-Gradworks.2007,DAI/B 68-05.

[2] 王志强,葛继平,魏红一.东海大桥预应力混凝土桥墩抗震性能分析[J].同济大学学报自然科学版,2008,36(11):1462-1466.

[3] 吴伟胜,王仁贵,王铎夫.杭州湾跨海大桥高墩区引桥总体及上部结构设计[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2005 年全国桥梁学术会议.2005.

通过实体分析可知,盖梁端部主拉应力较大,故在盖梁端部增加斜向加强筋,与上下层主筋焊接在一起,如图10所示。

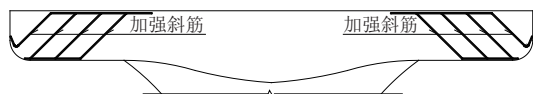


图10 下层盖梁端部加强斜筋

5 结 语

本文选取地铁高架区间弹弓型墩进行设计,对上下墩柱、上下盖梁进行设计分析,并对整墩进行实体分析,结论如下:

(1)桥墩上部为开口结构,不仅要关注单墩纵向线刚度,还要关注相邻桥墩之间的由于相对位移产生的转角。在上部净空受限无法做系梁的情况下,在

上墩柱下部增设倒角,增加上下部结构的连接是有效的。

(2)上墩柱与下盖梁之间的钢筋需相互交叠,并满足锚固长度,以形成完整的受力体系。

(3)由实体分析可得出,局部倒角及盖梁端部存在应力集中,需针对性地加强普通钢筋配置,防止产生裂缝。

参考文献:

- [1] 李伟.Y型桥墩动力荷载下的受力性能研究[D].安徽:安徽建筑大学,2014.
- [2] 马晓刚.某城市桥下有平行下穿地铁隧道的桥墩设计[J].城市道桥与防洪,2011(8):173-176.
- [3] 舒亮.高速铁路简支梁桥墩顶纵向刚度差研究[J].湖南交通科技,2019,45(1):133-137.
- [4] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].

(上接第175页)

- [4] 过震文,黄少文,邵长宇.预制拼装技术在上海长江大桥中的应用[J].世界桥梁,2009(a01):22-26.
- [5] 万绍平.预制桥墩湿接头的施工技术要点[J].城市道桥与防洪,2009(11):72-75.
- [6] 葛继平.节段拼装桥墩抗震性能试验研究与理论分析[D].上海:同济大学,2008.
- [7] 刘丰.节段拼装预应力混凝土桥墩拟静力试验和分析研究[D].上海:同济大学,2008.
- [8] 赵宁.预制节段拼装空心混凝土桥墩拟静力试验和分分析研究[D].上海:同济大学,2009.
- [9] 王媛媛.节段拼装预应力混凝土桥梁抗震数值分析模型研究[D].上海:同济大学,2010.
- [10] 王军文,张伟光,李建中.预应力混凝土空心墩拟静力试验与数值分析[J].桥梁建设,2015,45(3):63-69.
- [11] 包龙生,张远宝,桑中伟,等.波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J].中国公路学报,2018,31(12):242-249.
- [12] 邵淑营.灌浆波纹管连接装配式桥墩抗震性能研究[D].福州:福州大学,2018.
- [13] 盛洪飞.桥梁墩台与基础工程[M].北京:人民交通出版社,2014:70-73.