

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.019

引用格式:任梦威,赵明富,付华,等.单点拖拉式顶推施工中薄壁高墩受力安全性分析[J].公路与汽运,2025,41(2):89-91+123.

Citation:REN Mengwei,ZHAO Mingfu,FU Hua,et al.Stress safety analysis of thin wall high pier in single-point dragging and incremental launching construction[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):89-91+123.

单点拖拉式顶推施工中薄壁高墩受力安全性分析^{*}

任梦威¹,赵明富²,付华²,许红胜¹,杜海¹

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.贵州省公路工程集团有限公司,贵州 贵阳 550008)

摘要:某山区特大桥引桥钢-混组合梁单点拖拉式顶推施工中,采取分阶段提前张拉水平钢绞线串联墩柱的措施,保证永久薄壁高墩的受力安全。文中采用有限元软件 SAP2000 的非线性阶段施工分析模块建立永久薄壁高墩分析模型和顶推施工过程工况,模拟单点拖拉式顶推过程中薄壁高墩的受力状态,确认高墩的受力安全性,并对顶推施工中高墩顶部偏移和墩底应力实测结果与有限元计算结果进行对比。结果表明,采取分阶段张拉墩柱间水平钢绞线的措施能较好地减小钢-混组合梁顶推过程中永久薄壁高墩的受力安全风险;理论计算值与现场实测值的误差较小,文中计算方法可用于薄壁高墩受力安全性分析。

关键词:桥梁;钢-混组合梁;单点拖拉式顶推;薄壁高墩;串联拉索;分阶段张拉

中图分类号:U441.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0087-05

提高施工安全性是桥梁顶推施工技术可持续发展的关键。为解决传统顶推施工的不稳定性和不确定性及难以满足施工安全质量管理要求的问题,将 BIM(Building Information Modeling,建筑信息模型)技术和北斗定位系统应用于桥梁顶推施工方案设计及全过程监控预警^[1-2],但对顶推施工中各子系统的安全控制研究不足。单点拖拉式顶推法以其施工简便、施工周期短、施工适应性强等优点,被广泛应用于跨越既有铁路、公路线和山区峡谷地区桥梁工程^[3]。但山区桥梁大多桥墩较高,单点顶推会导致各墩柱承受较大的水平力,使高墩底部产生较大弯矩,对高墩安全性产生一定影响^[4]。且桥墩所受水平力与纵坡坡度、滑道摩擦因数及竖向压力等因素相关,随着工况的不断变化,高墩所受竖向力发生变化。顶推过程中高墩处于动态复合受力状态^[5],如何保证超高墩柱的安全成为单点拖拉式顶推施工顺利进行的关键因素之一。方美平等分析了曲线连续刚构桥桥墩在合龙顶推力作用下的力学行为^[6]。任会川将临时墩钢管上部采用纵向拉杆串联成整体并分别锚固在两端桥台后的顶推反力座上,以抵抗顶推过程中桥墩水平力^[7]。陈东风等认为临时墩与桥墩间施加预应力拉索更加经济合理且安全,并将

临时支墩优化设计成薄壁混凝土空心墩桩式结构^[8]。巫建晖等提出了在临时墩顶部施加水平拉索并对水平拉索实施预张拉的改进措施^[9]。李艳哲等提出了一种在高临时墩顶部设置水平拉索并设置水平位移指示标志及顶推变位超限急停开关的顶推方法^[10]。黄绍结等研究发现临时墩最大应力随索力的增大而减小,两者基本呈线性关系^[11]。张军等构建拉索索力数学模型,以临时墩水平力最小为优化目标,基于线性规划理论求解了最优拉索张拉力^[12]。现有研究大多以较低的施工临时墩为依托,研究成果集中于墩柱间水平拉索的作用效应及索力优化,没有分析拉索张拉时机和控制原则对高墩结构的影响,对高墩的安全性保障还有待深入和细化。为确定拉索张拉时机对桥墩的影响,本文以某山区特大桥引桥钢-混组合梁无导梁矮塔斜拉单点拖拉式顶推施工为依托,以分阶段张拉高墩间水平拉索为控制原则,研究永久薄壁高墩结构底部混凝土受力状态及施工过程中高墩的偏移量,为提高单点拖拉式顶推施工的安全性提供参考。

1 工程概况

某山区特大桥引桥采用工字型钢-混组合梁+

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278143);贵州省公路工程集团有限公司科技项目(YF2022-06-02)

预应力混凝土现浇箱梁,组合钢梁分为两联,4跨一联,共8跨。引桥桥墩采用空心薄壁墩,墩柱最高 101.00 m、最低 70.23 m。引桥总体布置见图 1。

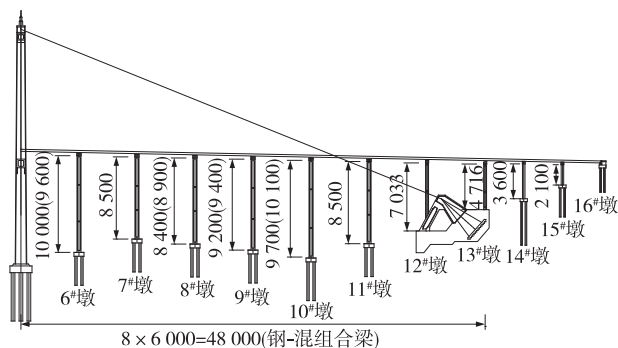


图 1 引桥的总体布置(单位:cm)

钢梁高度 2.7 m,半幅桥横向布置 4 片钢板梁,横向间距 3.3 m,横向每两片工字钢主梁组成一榀结构,其截面形式见图 2。

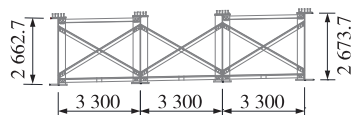


图 2 组合梁横断面示意图(单位:mm)

2 顶推施工方案

2.1 方案介绍

钢-混组合梁采用无导梁矮塔斜拉单点拖拉式顶推方法施工,从 13# 墩往 5# 桥塔方向顶推。牵引点设置在钢梁前端,顶推千斤顶设置在下横梁支墩处。顶推平台采用 2 m×4 m 贝雷梁支架搭设,在顶推平台和各桥墩墩顶安装滑道梁,然后在顶推平台上逐段拼装各节段钢梁,安装索塔、斜拉索、抗风索与牵引索。斜拉索张拉至预定索力且配重布置完成后,开始钢梁顶推施工。施工布置见图 3。

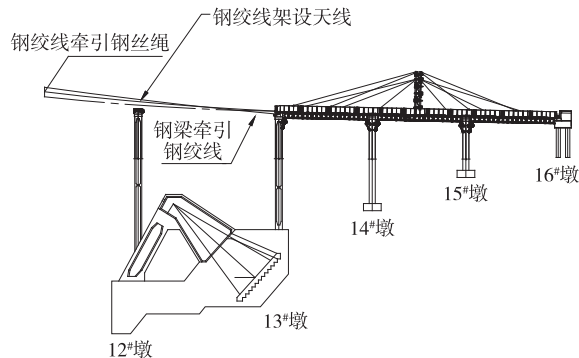


图 3 顶推施工布置示意图

2.2 拉索布置

通过分析计算顶推过程中各墩柱的最大摩擦力,确定拉索规格、数量及布置方式。6#~12# 墩单幅每跨设置 2 束 $3\phi^{s}15.2$ mm、抗拉强度为 1 870 MPa 的钢绞线连接水平拉索,固定端设置在桥墩两侧;12#~13# 墩设置 2 束 $4\phi^{s}15.2$ mm、抗拉强度为 1 870 MPa 的钢绞线斜拉背索,一端连接 12# 墩柱,另外一端锚固在重力锚预埋件上(见图 4)。

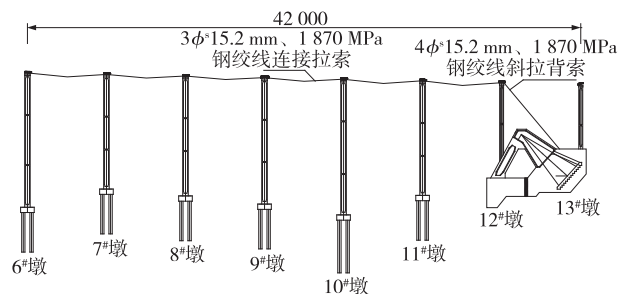


图 4 引桥“串联”钢绞线示意图(单位:cm)

2.3 张拉控制

该引桥具有墩柱高、跨数多、跨度长等特点,为保证墩柱受力安全,区别于常规张拉方式,采取主动控制张拉方式。拉索张拉时机:钢梁在 $(n-1)^{\#}$ ~ $n^{\#}$ 墩跨内顶推并将要上 $n^{\#}$ 墩时,在 $(n-1)^{\#}$ 墩上张拉 $(n-1)^{\#}$ ~ $n^{\#}$ 墩跨内钢绞线。

3 桥墩受力和位移分析

3.1 建立有限元模型

运用有限元软件 SAP2000 对顶推施工过程进行三维空间建模。高墩混凝土结构采用 Shell 薄壳单元模拟,拉索运用框架单元(调整其抗弯刚度为零)模拟;高墩和斜拉索下部节点按固结处理,约束 3 个方向平动自由度和转动自由度;钢绞线与高墩之间的联系使用共节点处理模拟^[13]。有限元模型见图 5。

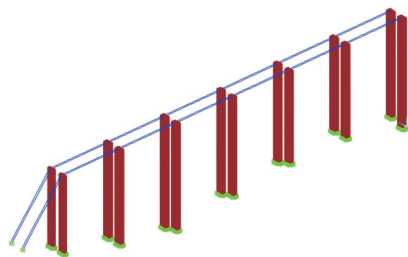


图 5 顶推施工有限元模型

3.2 分析工况

根据分阶段张拉拉索的步骤,考虑各墩的最不

利受力情况,将施工过程分为 7 种工况(见表 1),利用 SAP2000 中非线性阶段施工功能对各工况进行计算。

表 1 顶推施工过程分析工况

工况编号	施工工况
CS1	从 13 [#] 墩顶推至 12 [#] 墩,未上墩时,张拉 13 [#] ~12 [#] 墩跨内钢绞线
CS2	从 12 [#] 墩顶推至 11 [#] 墩,未上墩时,张拉 12 [#] ~11 [#] 墩跨内钢绞线
CS3	从 11 [#] 墩顶推至 10 [#] 墩,未上墩时,张拉 11 [#] ~10 [#] 墩跨内钢绞线
CS4	从 10 [#] 墩顶推至 9 [#] 墩,未上墩时,张拉 10 [#] ~9 [#] 墩跨内钢绞线
CS5	从 9 [#] 墩顶推至 8 [#] 墩,未上墩时,张拉 9 [#] ~8 [#] 墩跨内钢绞线
CS6	从 8 [#] 墩顶推至 7 [#] 墩,未上墩时,张拉 8 [#] ~7 [#] 墩跨内钢绞线
CS7	从 7 [#] 墩顶推至 6 [#] 墩,未上墩时,张拉 7 [#] ~6 [#] 墩跨内钢绞线

3.3 荷载添加

(1) 自质量。高墩与拉索自质量由软件自动计算添加。

(2) 墩顶所受竖向反力。顶推过程中,钢梁对墩柱产生的竖向压力即支座反力见表 2。

表 2 各工况下各墩墩顶支座反力

工况	各墩墩顶支座反力/kN						
编号	6 [#] 墩	7 [#] 墩	8 [#] 墩	9 [#] 墩	10 [#] 墩	11 [#] 墩	12 [#] 墩
CS1							5 867
CS2						5 015	3 155
CS3					5 578	2 956	2 198
CS4				5 576	2 975	2 037	2 251
CS5			5 578	2 975	2 037	2 081	2 096
CS6		5 576	2 975	2 037	2 088	2 023	2 026
CS7	5 576	2 975	2 037	2 088	2 025	1 987	2 091

(3) 水平摩擦力。钢梁与高墩相对运动产生的动摩擦力为竖向反力与摩擦因数的乘积,方向与顶推方向一致。

(4) 风荷载。按 JTG/T 3360-01—2018《公路

桥梁抗风设计规范》对风荷载的规定计算风荷载。

(5) 温度荷载。主要考虑薄壁空心高墩的日照温度作用,日照正温差 T_1 取 14.00 ℃、 T_2 取 5.50 ℃,负温差 T_1 取 -7.00 ℃、 T_2 取 -2.75 ℃。

3.4 张拉索力的确定

由于顶推施工时拉索是在钢梁未上 $n^{\#}$ 墩时在 $n^{\#}$ 墩进行预拉,预拉力大小可能影响 $n^{\#}$ 墩的安全状态,须根据计算确定桥墩受力情况,设置合适的预拉力,且该预拉力应能保证拉索具有一定的刚度,满足传力条件。模型分析计算的拉索预拉力见表 3。

表 3 各跨每根拉索的预拉力

墩柱编号	预拉力/kN		墩柱编号	预拉力/kN	
	左幅	右幅		左幅	右幅
6 [#] 墩~7 [#] 墩	37	40	10 [#] 墩~11 [#] 墩	35	32
7 [#] 墩~8 [#] 墩	45	44	11 [#] 墩~12 [#] 墩	35	35
8 [#] 墩~9 [#] 墩	44	40	12 [#] 墩~13 [#] 墩	60	60
9 [#] 墩~10 [#] 墩	32	30			

3.5 结果分析

以左幅为例,利用有限元软件 SAP2000 对 7 种工况进行模拟,各工况下墩柱间拉索分阶段张拉及顶推过程中墩底最大应力、墩顶最大偏移量及墩柱间拉索最大索力见表 4~6。

从表 4~6 可以看出:1) 各墩墩底拉应力不超过 1.3 MPa,且顶推过程中部分墩底还有一定的压应力安全储备,小于 C40 混凝土抗拉强度设计值。2) 各工况下各墩墩顶最大偏移量的最大值为 9.9 cm,未超过安全控制范围。3) 最大墩柱间拉索索力出现在 6[#]~7[#]墩,为 466 kN,未超过拉索的安全限值。

表 4 各工况下各墩墩底最大应力

工况	各墩墩底最大应力/MPa						
编号	6 [#] 墩	7 [#] 墩	8 [#] 墩	9 [#] 墩	10 [#] 墩	11 [#] 墩	12 [#] 墩
CS1							0.80
CS2						-0.54	1.21
CS3					-1.07	-0.06	0.97
CS4				-0.32	-0.67	-0.20	0.87
CS5			-0.59	-0.10	-0.87	-0.31	0.83
CS6		-0.87	-0.40	-0.31	-0.95	-0.35	0.81
CS7	-2.00	-0.66	-0.61	-0.41	-0.99	-0.36	0.81

注:正值为拉应力,负值为压应力。

表 5 各工况下各墩墩顶最大偏移量

工况	各墩墩顶最大偏移量/cm						
编号	6 [#] 墩	7 [#] 墩	8 [#] 墩	9 [#] 墩	10 [#] 墩	11 [#] 墩	12 [#] 墩
CS1							6.5
CS2						5.3	9.9
CS3					6.2	8.1	9.7
CS4				6.2	9.2	8.2	9.7
CS5			4.2	9.7	9.5	8.3	9.8
CS6		3.7	7.3	9.9	9.6	8.3	9.8
CS7	4.6	6.9	7.5	9.9	9.6	8.4	9.8

表 6 顶推过程中墩柱间拉索最大索力

墩柱编号	索力/kN		墩柱编号	索力/kN	
	左幅	右幅		左幅	右幅
6 [#] 墩~7 [#] 墩	466	466	10 [#] 墩~11 [#] 墩	345	352
7 [#] 墩~8 [#] 墩	320	322	11 [#] 墩~12 [#] 墩	335	333
8 [#] 墩~9 [#] 墩	350	359	12 [#] 墩~13 [#] 墩	312	308
9 [#] 墩~10 [#] 墩	329	339			

3.6 方案对比

为更好地说明上述拉索张拉时机对桥墩应力控制的优越性,以下述 3 种方案为基础建立有限元模型,在相同顶推工况、相同边界条件及荷载情况下进行对比分析计算;方案一为墩柱间不采取任何措施;方案二为提前张拉柱间拉索;方案三为文中所述张拉方案。各方案下各墩墩底应力见表 7。

表 7 3 种方案下左幅各墩墩底应力

桥墩编号	各方案下桥墩墩底应力/MPa		
	方案一	方案二	方案三
12 [#]	3.96	1.43	1.21
11 [#]	1.23	0.41	-0.06
10 [#]	1.90	-0.24	-0.67
9 [#]	1.72	0.48	-0.10

从表 7 可看出:方案三下薄壁高墩墩底应力最小;方案二下墩底应力与方案三相比偏大;方案一下墩底应力最大,甚至超出应力安全控制范围。

4 顶推过程中桥墩应力和位移监控

4.1 测点布置

顶推过程中高墩的内力和位移时刻都在发生变化。为确保施工过程的安全,该引桥顶推施工过程

中对典型工况下高墩的底部应力进行监测,监测断面主要包括高墩底部受拉面侧、受压面侧和桥墩两侧面。设置 8 个测点进行监测,其中 1[#]~3[#]测点位于桥墩小桩号面,5[#]~7[#]测点位于桥墩大桩号面,4[#]、8[#]测点位于桥墩两侧(见图 6)。

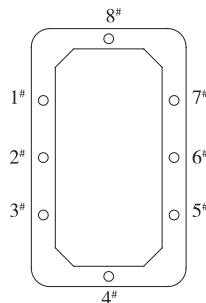


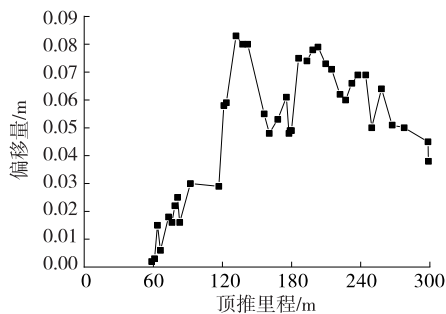
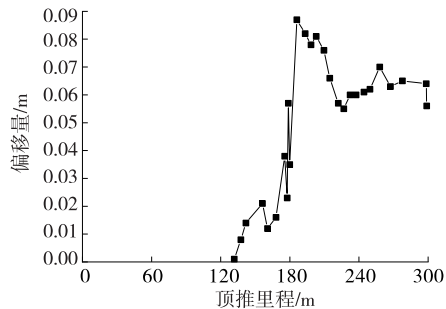
图 6 墩底应力测点布置示意图

顶推施工中,过大的偏移量会导致结构出现较大拉应力,情况严重时甚至会导致结构开裂。因此,在高墩顶部布置棱镜位移测点,对顶推过程中高墩的纵向偏移情况进行监测。

4.2 墩顶纵向偏移情况

各典型工况下左幅第一联桥墩(9[#]~12[#]墩)墩顶纵向偏移量见图 7~10。

由图 7~10 可知:顶推过程中各墩的偏位情况较复杂,在 60 m 顶推里程内, $n^{\#}$ 墩的偏位时刻在发生变化;钢梁顶推快上 $(n-1)^{\#}$ 墩时, $n^{\#}$ 墩的偏移量最大,随后慢慢减小。可见,墩柱间钢绞线对桥墩

图 7 12[#]墩墩顶纵向偏移量图 8 11[#]墩墩顶纵向偏移量

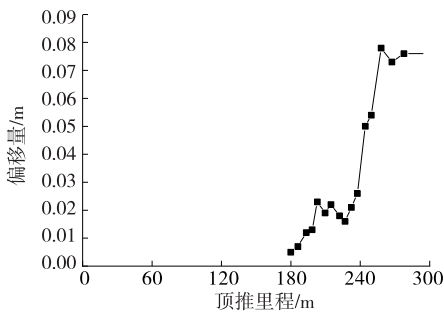


图 9 10#墩墩顶纵向偏移量

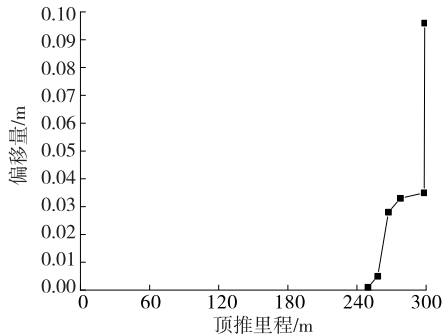


图 10 9#墩墩顶纵向偏移量

偏位的影响较显著。

4.3 墩底应力和墩顶偏移量理论值与实测值对比

为反映顶推施工过程中桥墩底部应力情况,选取各工况下 6#测点的最大应力值与对应工况下有限元计算的理论值进行对比,结果见表 8。相同工况下 9#~12#墩墩顶最大偏移量实测值与理论值对比见表 9。

表 8 左幅 9#~12#墩墩底 6#测点最大应力实测值与理论值对比

桥墩编号	墩底最大应力/MPa		实测值与理论值的误差/%
	理论值	实测值	
12#	1.653	1.480	10.47
11#	1.542	1.389	9.92
10#	1.224	1.072	12.42
9#	1.195	1.032	13.64

表 9 左幅 9#~12#墩墩顶最大偏移量实测值与理论值对比

桥墩编号	墩顶最大偏移量/cm		实测值与理论值的误差/%
	理论值	实测值	
12#	9.9	9.5	4.04
11#	9.2	8.8	4.34
10#	8.2	7.9	3.66
9#	6.2	5.9	4.84

由表 8、表 9 可知:顶推过程中薄壁高墩墩底最大应力和墩顶最大偏移量实测值与理论值的变化趋势相同,数值相差较小,墩顶最大偏移量误差小于 5%,墩底应力误差不超过 15%。采用在桥墩间分阶段张拉拉索的施工控制措施,能在简化单点拖拉式顶推施工的同时保证施工精度。

5 结论

(1) 在单点拖拉式顶推施工中,采取分阶段张拉墩柱间水平钢绞线的措施可减小高墩的纵向偏位并降低墩底应力水平。

(2) 采用分阶段张拉墩柱间水平钢绞线的措施,顶推过程中各墩墩底应力实测值与理论值的误差不超过 15%,墩顶偏位误差不超过 5%,理论计算与实测结果的一致性较好,本文采用的有限元分析方法能较好地模拟单点拖拉式顶推施工中薄壁高墩的受力状态。

(3) 采用张拉墩柱间水平钢绞线的措施,可改善桥墩的受力情况,减小钢梁顶推施工对永久薄壁高墩的不利影响,使桥墩强度和受力满足要求。

参考文献:

[1] 王金国,任晚晚,丛培,等.BIM 技术在钢-混组合连续梁桥顶推施工中的应用[J].公路与汽运,2023(2):98-102.

[2] 张洪亮.基于北斗定位的预制框架顶推施工监控系统设计及应用[J].公路与汽运,2020(5):93-96.

[3] 唐军.跨高速铁路大跨径双幅简支钢箱梁同步拖拉式顶推施工技术[J].中国科技信息,2021(13):82-84.

[4] 吴笑雷.单点顶推技术与多点顶推技术对比研究[J].铁道建筑,2018,58(10):31-35.

[5] 陈双庆,谭光耀.单点顶推施工支撑墩受力分析及优化研究[J].湖南交通科技,2015,41(3):92-95.

[6] 方美平,陈欣韵,王旭燚,等.不对称小半径曲线连续刚构桥合龙顶推效应分析[J].公路与汽运,2021(3):114-118.

[7] 任会川.临近铁路并跨越高速公路系杆拱桥施工的纵移横移关键技术[J].公路与汽运,2020(3):129-131+135.

[8] 陈东风.薄壁空心墩加水平拉索在桥梁顶推法施工中的运用[J].中外建筑,2001(2):67-68.

[9] 巫建晖,涂永生,杜嘉骅.连续钢梁顶推过程中临时墩受力分析[J].公路与汽运,2012(4):205-208.

[10] 李艳哲,秦顺全,夏学军,等.一种高临时墩顶推方法:CN102383378B[P].2014-03-19.