

大跨度悬臂浇筑 RC 拱桥结构参数敏感性分析

闻超, 田仲初, 朱清华

(长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为保证大跨度 RC 拱桥在主拱圈悬浇施工过程中结构的受力安全及成桥后最大程度满足合理成桥状态, 以贵州在建夹石特大桥为工程背景, 研究在最大悬臂状态下拱圈应力、拱圈线形、塔架偏位及扣索索力对主拱圈自重、主拱圈弹性模量、扣锚索初张索力、塔架弹性模量、扣锚索弹性模量、挂篮荷载、温度作用、环境相对湿度等结构参数的敏感程度。结果表明, 主拱圈自重、扣锚索初张索力、温度作用对悬臂施工中的结构行为有较大影响, 属于主要敏感性参数, 桥梁施工过程中需严格控制拱圈节段自重和扣锚索初张索力, 同时避免剧烈温度变化对结构产生不利影响。

关键词: 桥梁; RC 拱桥; 悬臂浇筑; 拱圈应力; 拱圈线形; 初张索力; 塔架偏位; 敏感性分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0126-04

采用悬臂浇筑法施工的钢筋砼拱桥的施工控制目标是保证各构件在悬臂施工中的受力安全及成桥后内力和线形最大程度达到理想状态。实际施工中, 由于跨径较大、节段较多, 钢筋砼拱桥要经过长时间的悬臂施工及复杂的体系转换。桥梁施工受周围环境变化、材料性能差异、临时施工荷载变化等因素影响, 若这些影响未能及时有效消除, 会导致结构实际状态与目标状态产生较大差异, 从而危及施工安全。在大跨度 RC 拱桥悬浇中对结构行为进行参数敏感性分析, 找出对各构件产生显著影响的结构参数至关重要。该文以贵州在建夹石特大桥为研究背景, 运用有限元程序 MIDAS/Civil 进行计算分析, 通过改变主拱圈自重、主拱圈刚度、扣锚索索力、温度作用、扣锚索刚度、塔架刚度、砼徐变、挂篮荷载等结构参数, 分析其对悬臂施工中拱圈线形、截面应力、扣索索力及塔架偏位等结构行为的敏感程度。

1 工程概况

夹石特大桥地处贵州省沿河县夹石镇境内, 桥梁全长 390 m, 总体布置为 $(4 \times 30 + 240 + 30)$ m。主跨为横跨乌江的上承式 RC 箱形拱桥(见图 1), 拱

箱为单箱双室结构, 高 4.1 m, 宽 10 m。主拱圈采用拱轴系数为 1.74 的悬链线为拱轴线, 净跨径 225 m, 净矢高 37.5 m, 净矢跨比 1/6。主拱圈采用 C55 砼, 纵桥向分 43 个拱段, 除运用支架现浇两拱脚 1# 拱段、吊架现浇合龙口外, 其余 40 个拱段均利用塔架斜拉扣挂进行悬臂施工, 每浇筑完一个拱段, 张拉一组扣锚索。

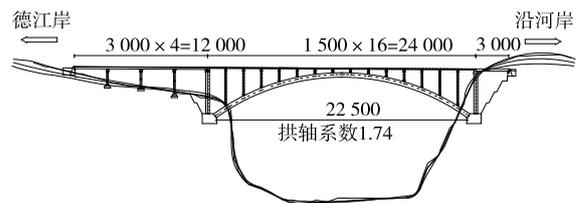


图 1 夹石特大桥全桥立面布置(单位: cm)

主拱圈运用临时塔架进行斜拉扣挂悬浇施工, 为将塔架水平偏位控制在合理范围内, 将扣索、锚索通过锚箱分离开。全桥共 42 组扣锚索(见图 2), 每半跨分 21 组扣锚索, 每束扣锚索分别有 10~30 根钢绞线, 其中 1#~3# 扣索锚固于交界墩墩顶的锚箱上, 4#~21# 扣索锚固于塔架的各锚箱上; 各锚索锚固于各桥台上, 桥台均采用大体积砼与预应力岩

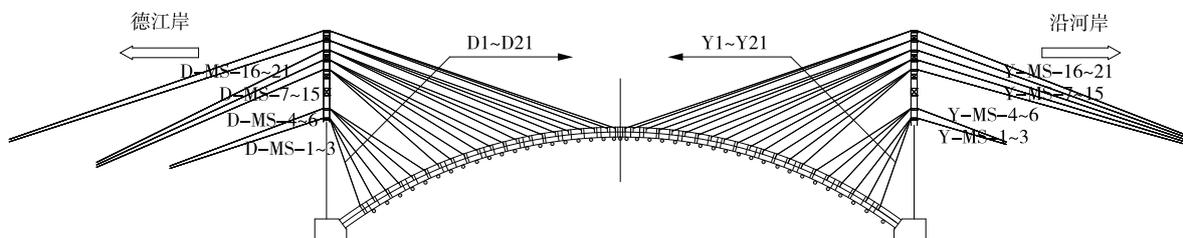


图 2 夹石特大桥扣锚索布置

锚相结合。悬浇拱段最大长度为6.042 m,最大重量为268.66 t。扣索采用星式布置,角度为 $19.14^\circ \sim 71.15^\circ$ 。

2 有限元仿真与结构参数选取

2.1 有限元仿真

为准确了解桥梁施工过程中各构件真实受力状态,运用有限元程序MIDAS/Civil对夹石特大桥施工过程进行仿真计算,有限元模型见图3。全桥共909个单元、913个节点,其中扣锚索桁架单元168个。利用梁单元模拟主拱圈、交界墩、立柱、临时塔架及锚箱,利用仅受拉的桁架单元模拟扣锚索,利用节点集中力模拟挂篮、横隔板荷载。拱圈与立柱通过设置刚性连接模拟,扣点与塔架、锚点与塔架之间采用弹性连接模拟,拱脚、锚索约束条件采用固结。根据施工组织流程,分为95个施工阶段,对各施工工况进行仿真计算。

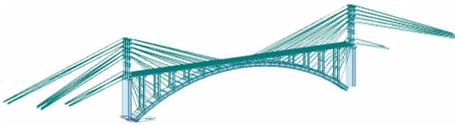


图3 夹石特大桥全桥有限元模型

2.2 结构参数选取

根据悬臂浇筑法施工的大跨度RC拱桥受力特点,选取可能发生并会对结构实际状态产生较大影响的结构参数,根据施工控制经验确定各结构参数变化范围。计算时仅变化单一参数,其余参数保持不变,计算在各参数影响下拱圈截面应力、拱圈线形、扣索索力、塔架偏位等结构行为的变化情况,选出对结构行为产生较大影响的参数,确定主要敏感性参数,从而在悬浇过程中对各主要敏感性参数进行有效识别、分析、控制。

结合工程实际情况,查阅相关文献资料,在最大悬臂状态下,选取主拱圈自重、主拱圈弹性模量、扣锚索初张索力、整体升温、挂篮荷载、扣锚索弹性模量、塔架弹性模量、环境相对湿度8个结构参数进行敏感性分析,参数取值见表1。

3 结构参数敏感性计算与分析

3.1 结构参数对主拱圈线形的影响

对于悬臂现浇施工的砼桥梁,节段无应力状态在现场形成,且施工后桥梁线形很难进行较大规模调整。因此,悬臂浇筑前有必要对影响主拱圈线形

表1 结构参数取值

结构参数	取值	变化值
拱圈自重	按设计值	+5%
拱圈弹性模型	3.55×10^4 MPa	+5%
扣索弹性模型	1.95×10^5 MPa	+5%
扣索初张索力	按优化值	+5%
挂篮重量	90 t	+5%
塔架弹性模量	2.06×10^5 MPa	+5%
环境相对湿度	70%	+10%
整体升温	按设计值	+10℃

的结构参数进行严格控制,使拱圈线形达到理想状态。以半幅主拱圈为研究对象,分析最大悬臂状态下各结构参数发生单一变化时主拱圈各拱段的竖向位移,结果见图4,以上拱为“+”、下挠为“-”。

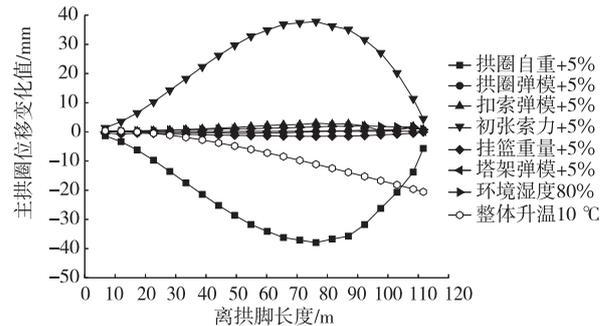


图4 主拱圈竖向位移变化

由图4可知:扣锚索初张索力、主拱圈自重增加5%时,主拱圈竖向位移变化显著,影响程度从拱脚到3/8拱圈位置达到最大,从3/8拱圈位置到拱顶逐渐减小,变化最大值分别为37.97和-37.8 mm;温度变化对主拱圈竖向位移的影响次之,影响程度从拱脚到拱顶竖向位移不断增大,其变化值最大为-20.56 mm;主拱圈弹性模量、扣锚索弹性模量、挂篮重量、环境相对湿度、塔架弹性模量变化对主拱圈竖向位移的影响微小,最大变化在5 mm以内。

3.2 结构参数对主拱圈截面应力的影响

运用塔架斜拉扣挂法施工的大跨度RC拱桥,主拱圈悬浇过程中拱圈截面上下缘拉、压应力相互交替。由于砼材料的抗拉能力较差,结构参数误差较大时,可能会使主拱圈截面的拉应力过大,过大的拉应力会导致主拱圈出现裂缝,危及桥梁结构的安全和使用耐久性。以半幅拱圈为研究对象,分析在最大悬臂状态下各结构参数发生单一变化时主拱圈各控制截面顶、底板的应力变化,结果见图5,以拉应力为“+”、压应力为“-”。

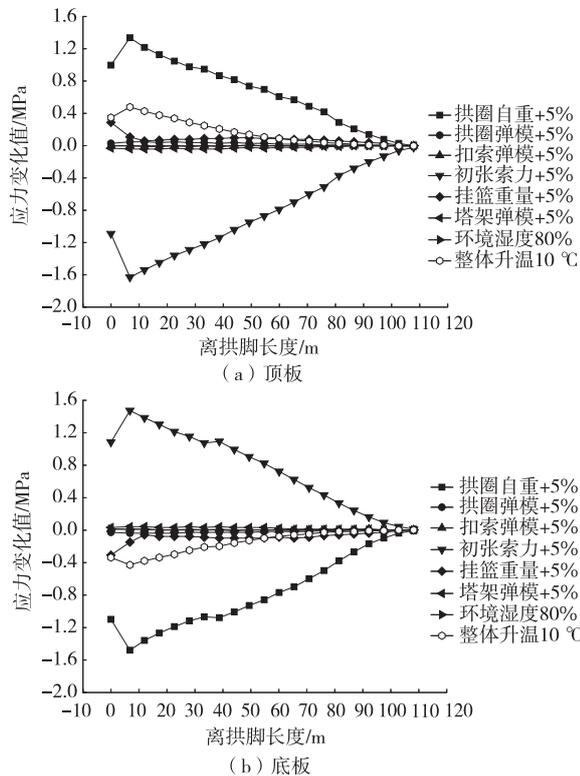


图5 主拱圈关键截面顶、底板应力变化

由图5可知:主拱圈自重和扣锚索初张索力增加5%时,主拱圈关键截面顶、底板应力变化显著,扣锚索初张索力增加对拱圈截面顶板产生压应力、对底板产生拉应力,最大变化分别为-1.63和1.47 MPa;主拱圈自重增加对拱圈截面顶板产生拉应力、对底板产生压应力,最大变化分别为1.34和-1.48 MPa;温度变化的影响次之,最大变化为对顶板增加0.48 MPa的拉应力、对底板增加-0.43 MPa的压应力;拱圈弹性模量、拉索弹性模量、塔架弹性模量、挂篮自重、环境相对湿度变化对拱圈截面应力有微小影响。

3.3 结构参数对扣索索力的影响

扣索作为大跨度RC拱桥悬浇施工中的临时承重结构,将主拱圈节段自重传递给塔架,索力过大或过小都会对拱圈线形和截面应力产生偏差。为避免多次张拉对结构产生不利影响,施工中扣锚索均按“一次张拉到位”进行张拉。以半幅主拱圈为研究对象,分析最大悬臂状态下各结构参数发生单一变化时各扣索索力的变化,结果见图6,以索力增大为“+”、索力减小为“-”。

由图6可知:拱圈自重增加5%对各组扣索索力影响较大,影响最大的为12#扣索,索力最大增加115 kN。扣索初张索力增加5%对各组扣索的影响

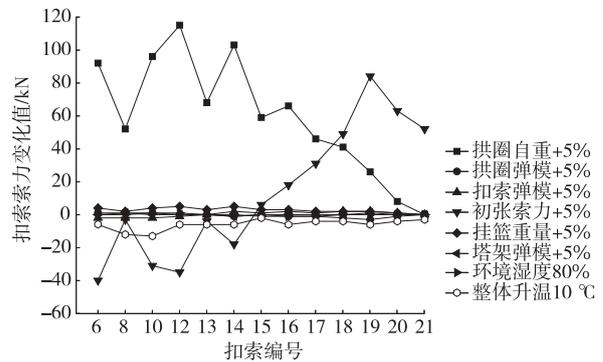


图6 最大悬臂状态下扣索索力变化

有较大差别,6#~15#扣索索力有所减小,最多减小40 kN,对应于6#扣索;16#~21#扣索索力有所增大,最多增大82 kN,对应于19#扣索。整体升温对索力的影响次之,最大影响值为13 kN,为12#扣索。其余各结构参数对最大悬臂状态下扣索索力有较小影响,最大索力变化在5 kN以内。

3.4 结构参数对塔架偏位的影响

塔架作为斜拉扣挂悬臂浇筑施工中的临时支撑结构,其偏位可在一定程度上反映塔架和交界墩的实际受力状态,也将直接影响拱圈线形和截面应力。如果塔架水平偏位过大,不仅影响塔架的整体稳定性和交界墩底受力情况,更危及施工安全。以半幅主拱圈为研究对象,分析最大悬臂状态下各结构参数发生单一变化对塔架偏位的影响,结果见图7,以靠河侧偏位为“+”、靠岸侧偏位为“-”。

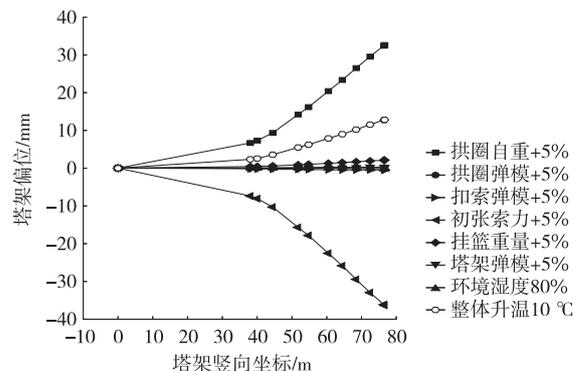


图7 最大悬臂状态下塔架偏位变化

由图7可知:交界墩受各结构参数的影响较小,最大变化为交界墩顶的10 mm。拱圈自重增加5%,塔架向靠江一侧发生最大水平位移32.59 mm;扣索初张索力增加5%时,塔架向靠岸一侧发生最大水平位移36.31 mm。上述2个参数增加5%对最大悬臂状态下塔架偏位的影响较大。整体升温对塔架偏位的影响次之,最大影响为靠江侧发生位移

12.81 mm。其余各结构参数对最大悬臂状态下塔架偏位的影响较小,最大变化在3 mm以内。

3.5 结构参数敏感性分析结果

对上述8个结构参数进行敏感性分析,得到最

大悬臂状态下拱圈线形、拱圈应力、扣索索力、塔架偏位对各结构参数变化的敏感程度,确定主要敏感性参数及次要敏感性参数(见表2)。

由表2可知:主拱圈自重、扣锚索初张索力、温

表2 最大悬臂状态下结构行为的参数敏感性分析

结构参数	参数变化量	变形		应力				扣索索力		塔架偏位	
		变化量/ mm	幅度/ %	顶板		底板		变化量/ kN	幅度/ %	变化量/ mm	幅度/ %
				变化量/ MPa	幅度/ %	变化量/ MPa	幅度/ %				
扣索初张索力	5%	37.80	46.48	-1.63	54.15	1.47	42.86	84	3.67	-36.31	193.99
拱圈自重	5%	-37.97	46.69	1.34	44.52	-1.48	43.15	115	5.93	32.59	174.11
整体升温	+10℃	-20.56	54.67	0.48	15.88	-0.43	15.88	13	0.91	12.81	68.41
挂篮重量	5%	1.54	1.89	0.29	3.65	-0.31	4.37	5	0.27	2.11	11.25
扣索弹性模量	5%	2.97	3.65	-0.01	0.43	0.01	0.30	2	0.21	-0.47	2.52
塔架弹性模量	5%	0.24	0.47	-0.04	1.33	0.04	1.17	1	0.07	0.28	1.51
拱圈弹性模量	5%	1.41	1.66	0.05	1.66	-0.04	1.17	-3	0.19	0.21	1.13
环境相对湿度	+10%	2.04	2.78	0.01	0.62	0.01	0.27	1	0.09	-0.18	0.69

度作用对悬臂施工中结构行为有较大影响,为主要敏感性参数;塔架刚度、扣锚索刚度、拱圈刚度、挂篮荷载对悬臂施工中结构行为影响较小,为次要敏感性参数。塔架偏位受结构参数影响最大,最大影响幅度达193.99%;拱圈线形、拱圈应力受结构参数影响次之,最大影响幅度分别为54.67%和54.15%;施工过程中扣索索力受结构参数影响最小,最大影响幅度仅5.93%,施工中扣锚索索力可不作为控制性指标,保证扣锚索初张索力的张拉精度即可;各参数变化对主拱圈控制截面顶、底板应力的影响程度刚好相反,且影响量接近,表明在施工控制时需同时关注顶、底板应力变化,使其均在合理范围内。

4 结论

以贵州夹石特大桥为工程背景,利用有限元程序MIDAS/Civil对全桥进行仿真计算,采用单一变量法对最大悬臂状态下结构行为进行参数敏感性分析,得出以下结论:

(1) 主拱圈自重对拱圈线形、截面应力、塔架偏位有显著影响,属于敏感性参数。施工过程中应严格测试砼容重,控制模板变形、砼浇筑数量,保证拱段浇筑砼不超方、不欠方。

(2) 扣锚索初张索力对拱圈线形、截面应力、塔架偏位有显著影响,属于主要敏感性参数。张拉扣锚索时应采用频率法和拉索延伸量法相结合精准测量初张索力,并与油压表张拉值进行比对,将扣锚索

初张索力误差控制在合理范围内。

(3) 温度作用对拱圈线形、截面应力、塔架偏位有显著影响,属于主要敏感性因素。悬浇过程中应尽量规避在剧烈温度变化条件下进行施工和测量,减小温度变化对结构行为的不利影响。

(4) 拱圈刚度、拉索刚度、塔架刚度、挂篮荷载对最大悬臂状态下结构行为的影响较小,属于次要敏感性参数。

(5) 应力作为悬臂浇筑法施工中的重点和难点,各参数对顶、底板应力的影响大致相反。施工过程中为保证结构受力安全,在重点关注顶板应力的同时,也应关注底板受力。

(6) 按“一次张拉到位”的思想张拉扣锚索,索力受各结构参数的影响较小,可不作重点关注。

参考文献:

- [1] 卢云贵,彭文平,田仲初.大跨钢筋混凝土箱拱悬浇扣挂施工控制研究[J].中外公路,2013,33(2):189-192.
- [2] 常星.大跨钢筋混凝土箱形拱桥悬臂浇筑技术[J].中外公路,2019,39(6):130-132.
- [3] 张宪堂,余辉,秦文彬,等.钢箱梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):41-47+55.
- [4] TIAN Zhong-chu,PENG Wen-ping,ZHANG Jian-ren, et al.Determination of initial cable force of cantilever casting concrete arch bridge using stress balance and influence matrix methods[J]. Journal of Central South

表3 桥墩稳定性分析结果

阶次	无系梁时分析结果			有系梁时分析结果		
	特征值	容许误差	失稳方向	特征值	容许误差	失稳方向
1	18.40	0.00	纵向	21.57	0.00	横向
2	21.60	0.00	横向	24.51	0.00	纵向
3	73.45	1.31×10^{-27}	纵向	75.75	0.00	纵向
4	85.55	1.04×10^{-23}	纵向	121.97	3.84×10^{-48}	横向
5	122.33	6.24×10^{-17}	横向	180.22	2.61×10^{-31}	纵向

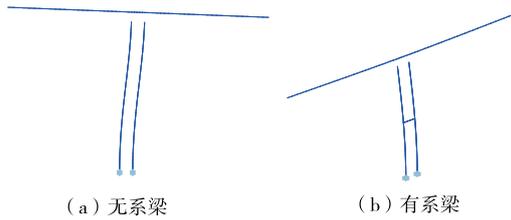


图5 桥墩一阶失稳模态

度来提高桥墩屈曲稳定性。

3 结论

(1) 山区地形地质条件复杂,地面高差大、两岸陡峭,且有岩溶、陡崖、崩塌堆积体等不良地质,桥型选择需优先考虑避开不利地质条件,同时考虑经济性和技术可行性。

(2) 根据甲茶河特大桥的地形地貌,结合地质情况、路线情况,采用大跨径桥梁,桥型主要为大跨径连续刚构、拱桥及斜拉桥,通过比选及优化,最终确定(104+200+104) m 连续刚构桥方案。

(3) 大跨径高墩连续刚构桥设计中需采取措施控制箱梁裂缝、跨中下挠问题,同时对桥墩稳定性进行分析。

参考文献:

[1] 周剑萍.高原山区高速公路跨越沟谷地形时的桥型比选[J].公路,2013(5):87-90.

[2] 刘明文,丁作常.基于多方案的桥型方案比选研究[J].公路交通技术,2017,33(3):43-46.

[3] 姚正中,邓晓红,李银斌,等.山区连续刚构桥选型及设计[J].中外公路,2014,34(4):166-169.

[4] 何飞,周礼平,范磊.贵州山区在役连续刚构桥发展现状调查与分析[J].中外公路,2015,35(3):120-123.

[5] 谢全敏,殷建强,杨文东.基于 AHP 和 GC-TOPSIS 的山区桥型方案比选[J].公路交通科技,2019,36(3):102-108.

[6] 石贵军.流架 I 号大桥设计[J].中外公路,2010,30(5):173-175.

[7] 冯祁.大跨径 PC 箱梁桥底板崩裂机理研究[D].西安:长安大学,2018.

[8] 徐超.大跨高墩连续刚构桥桥墩结构型式研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.

[9] 薛兴伟.大跨 PC 梁桥跨中下挠及裂缝控制研究[D].广州:暨南大学,2013.

[10] 胡铁山,王勇,夏俊波.全寿命周期成本分析在不同材料桥梁方案比选中的应用[J].公路与汽运,2020(1):147-150.

[11] 郭红雨.南村黄河特大桥主桥总体设计[J].公路与汽运,2020(2):103-107.

[12] 徐桂英.山区高速公路桥梁方案比选[J].交通世界(建养·机械),2010(12):175-177.

[1] 周剑萍.高原山区高速公路跨越沟谷地形时的桥型比选[J].公路,2013(5):87-90.

[2] 刘明文,丁作常.基于多方案的桥型方案比选研究[J].公路交通技术,2017,33(3):43-46.

[3] 姚正中,邓晓红,李银斌,等.山区连续刚构桥选型及设计[J].中外公路,2014,34(4):166-169.

[4] 何飞,周礼平,范磊.贵州山区在役连续刚构桥发展现状调查与分析[J].中外公路,2015,35(3):120-123.

[5] 谢全敏,殷建强,杨文东.基于 AHP 和 GC-TOPSIS 的山区桥型方案比选[J].公路交通科技,2019,36(3):102-108.

[6] 石贵军.流架 I 号大桥设计[J].中外公路,2010,30(5):173-175.

[7] 冯祁.大跨径 PC 箱梁桥底板崩裂机理研究[D].西安:长安大学,2018.

[8] 徐超.大跨高墩连续刚构桥桥墩结构型式研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.

[9] 薛兴伟.大跨 PC 梁桥跨中下挠及裂缝控制研究[D].广州:暨南大学,2013.

[10] 胡铁山,王勇,夏俊波.全寿命周期成本分析在不同材料桥梁方案比选中的应用[J].公路与汽运,2020(1):147-150.

[11] 郭红雨.南村黄河特大桥主桥总体设计[J].公路与汽运,2020(2):103-107.

[12] 徐桂英.山区高速公路桥梁方案比选[J].交通世界(建养·机械),2010(12):175-177.

收稿日期:2020-09-23

(上接第 129 页)

University, 2019, 26(11): 3140-3155.

[5] 韩洪举,郭吉平.沙坨特大桥施工控制参数敏感性分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019(3):168-171.

[6] 鞠玉财,田仲初,刘春山.贵州木蓬特大桥参数敏感性分析[J].公路与汽运,2013(3):166-170.

[7] 刘来君,倪富陶,张筱雨,等.预应力混凝土矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J].中外公路,2015,35(4):142-144.

[8] 唐启.泉州湾跨海大桥钢混组合梁施工控制参数敏感性分析[J].世界桥梁,2016,44(5):57-61.

[9] 张铎,何畏,蒋长江,等.攀枝花新密地大桥拱圈悬臂浇筑施工监控[J].桥梁建设,2012,42(4):87-92.

[10] 吴欣,王祺顺,张祖军.大跨径 RC 拱桥悬臂浇筑过程中临时预应力效应分析[J].公路工程,2019,44(3):11-16.

[11] 伍新民,田仲初.考虑预应力的大跨径 RC 拱桥悬浇阶段关键参数影响效应分析[J].公路工程,2019,44(6):15-20+103.

收稿日期:2020-08-15