

浇筑式沥青混合料疲劳性能影响因素分析

孟华君

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广州 佛山 528041)

摘要: 浇筑式(GA)沥青混合料的抗疲劳特性对桥面铺装结构的使用寿命有重要影响。文中通过四点弯曲疲劳试验,分析沥青类型、油石比、应变水平及拌和温度等因素对 GA 沥青混合料劲度模量、加载次数、滞后角的影响。结果显示,随沥青结合料用量的增加,GA 沥青混合料的劲度模量呈下降趋势,破坏时的疲劳加载次数和滞后角呈增加趋势;随应变水平的增加,劲度模量和疲劳加载次数呈下降趋势;随拌和温度的升高,GA 沥青混合料的劲度模量呈增加趋势、滞后角呈下降趋势,180~240 ℃时温度变化对滞后角的影响显著,240~260 ℃时滞后角变化较平缓;合理调整最佳沥青用量或控制拌和温度,能降低或避免 GA 沥青混合料老化问题,提高桥面铺装结构的整体刚度,延长其使用寿命。

关键词: 桥梁;浇筑式(GA)沥青混合料;疲劳性能;应变水平;拌和温度;滞后角

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0121-05

浇筑式(GA)沥青混合料已在国外得到广泛应用,国内近年来在桥面铺装、防水结构层中提出了推荐应用计划,对 GA 沥青混合料的研究也逐渐得到重视。张文等研究了沥青和改性剂类型等对沥青混合料路用性能的影响,提出采用高粘度 SBS 改性沥青作为胶结料,并给出了沥青复合掺配技术参数;薛昕等分析了 GA 沥青混合料的应用现状及存在的问题;向源等分析了 GA 沥青混合料的高温稳定特性,提出级配变化对混合料高温性能的影响较小,而沥青用量、填料用量及温度对其影响显著;聂文等分析了不同施工工艺下 GA 沥青混合料的疲劳特性,指出拌和时间是影响其冲击韧性指标的关键因素。目前,钢桥面铺装结构存在许多问题,尤其是重载交通下的车辙、裂缝现象,如山东胜利黄河大桥局部出现网状裂缝和横、纵裂缝,江阴长江大桥通车早期就出现一系列病害。研究显示,GA 沥青混合料的主要问题在于其耐久性不足和荷载与局部环境反复作用下的疲劳破坏。该文通过四点弯曲疲劳试验,分析沥青类型、油石比、应变水平及拌和温度等对 GA 沥青混合料劲度模量、加载次数及滞后角的影响,为实体工程应用提供技术支持。

1 试验材料及方案

1.1 原材料

GA 沥青混合料中沥青含量较高,要求沥青在高温下具备良好的流动性、和易性。试验选用国内

常用的 30[#]、70[#] 沥青为基质沥青,采用天然湖沥青 TLA(见表 1)和 SBS 改性剂对其复合改性。粗集料选用玄武岩,细集料选择石灰岩水洗机制砂,矿粉为石灰岩(见表 2)。

表 1 TLA 的技术指标

试验项目	试验结果	规范要求
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	3.1	0~5
软化点/℃	91	≥90
灰分/%	37.17	33~38
密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.262	实测

表 2 矿粉的检测结果

试验项目	试验结果	规范要求
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.728	≥2.5
塑性指数/%	2.4	<4
亲水系数	0.50	<0.8

1.2 沥青胶结料配比与级配设计

目前常用的 GA 沥青胶结料为硬质沥青 30[#]、50[#] 等,通过掺加一定量湖沥青或岩沥青进行改性。采用 30[#]、70[#] 基质沥青,通过添加 TLA 和 SBS 改性剂进行改性,配比分别为 AH30[#]+TLA+SBS(69%+25%+6%)、AH70[#]+TLA+SBS(60%+35%+5%),其检测结果见表 3。选择德国生产的 PMB25 作为对比产品。

表3 AH30[#]+TLA+SBS和AH70[#]+TLA+SBS沥青性能检测结果

沥青类型	针入度(25℃,100 g, 5 s)/(0.1 mm)	软化点 $T_{R\&B}/^{\circ}\text{C}$	延度(10℃,5 cm/min)/cm	弹性恢复率 (25℃)/%	闪点/℃	离析试验(软 化点差)/℃
AH30 [#] +TLA+SBS	26	82	36	65	292	1.0
AH70 [#] +TLA+SBS	30	78	48	72	280	0.5
规范要求	10~40	≥ 72	≥ 10	≥ 50	≥ 240	≤ 2

鉴于目前中国对于GA沥青混合料级配设计无完善的技术标准,参照德国、日本和俄罗斯等国家

标准级配设计范围,确定表4所示GA-10沥青混合料合成级配。

表4 级配组成

级配类型	通过下列筛孔(mm)的百分率/%								
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2
级配上限	20	24	27	32	38	48	63	80	100
级配下限	30	36	40	46	52	63	80	100	100
GA-10	28.2	34.5	37.5	43.0	47.9	58.2	74.1	98.2	100

1.3 疲劳试验方案

与普通沥青混合料相比,GA中粗集料偏少,填料、细集料、沥青含量较高,结构空隙率低于1%(具有良好的粘弹性),流动度较好,施工温度为220~240℃,属于悬浮密实结构,力学强度与沥青胶结料性能密切相关。实践显示,GA沥青混合料易出现疲劳裂缝,严重影响桥面结构层的使用寿命。

加州伯克利分校、美国沥青协会、SHRP等针对沥青混合料的疲劳性能进行了三分点小梁弯曲疲劳试验、间接拉伸(劈裂)试验和四点弯曲试验等,SHRP通过对各试验方法的参数进行敏感性可靠度分析,提出四点弯曲疲劳试验对沥青胶结料的敏感性较强。采用该试验方法对GA沥青混合料进行疲劳性能检测,试验按JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行。采用UTM-100电动液压伺服试验机,采取正弦波应变控制模式,频率10 Hz,温度15℃,试件标准尺寸为385 mm×65 mm×50 mm。通过加载次数、应变值、劲度模量、滞后角、耗散能等指标对GA沥青混合料的疲劳性能进行分析。

2 试验结果分析

2.1 沥青胶结料影响因素分析

动态劲度模量越大,相同条件下沥青路面的应力与应变比值越大,承受的荷载越大,应变变形降低。采用8.0%、8.5%和9.0%3种沥青用量,应变水平取600 $\mu\epsilon$,分析沥青胶结料用量和类型对GA

沥青混合料劲度模量的影响,结果见图1。

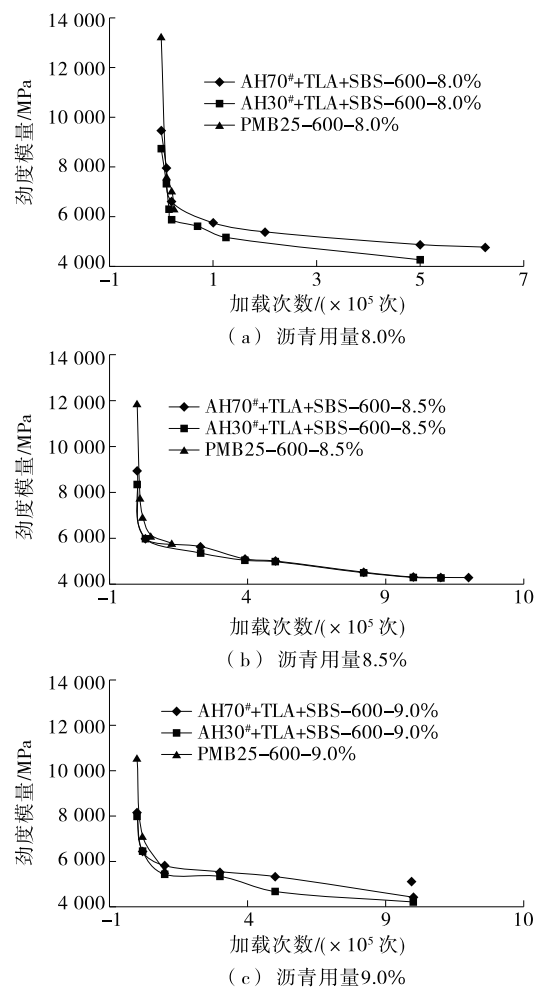


图1 沥青胶结料用量和类型对GA沥青混合料劲度模量的影响

由图 1 可知:1) 随沥青用量的增加,GA 沥青混合料的初始劲度模量呈下降趋势,达到 50% 初始劲度模量的疲劳作用次数先增加后下降。这与沥青混合料的最佳沥青用量有关,超过最佳用量,其疲劳寿命显著下降。以 AH70[#] + TLA + SBS 为例,油石比 8.5% 时,疲劳作用次数为 12×10^5 次,与 8.0% 和 9.0% 时相比分别提高 92% 和 20%。2) 劲度模量随累积加载次数的增加呈线性下降趋势,且随油石比的增加,累积加载次数增加,但不同沥青类型间的变化程度不一致。合理沥青用量下,采用 AH70[#] + TLA + SBS 改性的 GA 沥青砼的疲劳特性最佳, AH30[#] + TLA + SBS 次之, PMB25 的最差。采用硬质沥青 TLA + SBS 复合改性的 GA 沥青砼的劲度模量远高于德国产品,抵抗车辆荷载和路面变形的能力优于其他产品。

2.2 滞后角影响因素分析

滞后角表征沥青混合料粘弹性组分比例大小,滞后角越大,则粘性成分越多;反之,混合料倾向于弹性。图 2 为 3 种沥青胶结料滞后角随加载次数的变化情况。

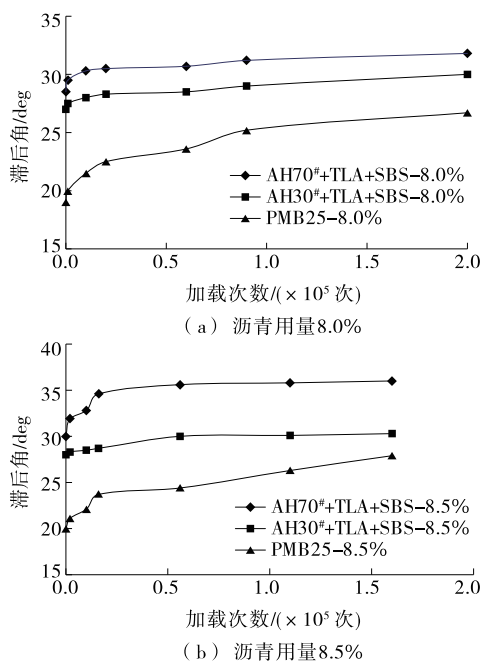


图 2 不同沥青用量下 GA 沥青混合料滞后角试验结果

由图 2 可知:1) 随油石比增加,滞后角增大。说明沥青用量增加,提高了 GA 沥青混合料沥青胶浆组分比例,沥青膜厚度增加,混合料粘性成分增加,在荷载作用下产生变形的滞后性更显著。如 AH70[#] 沥青,油石比为 8.0% 和 8.5% 时,加载破坏

时的滞后角分别为 31.8 和 36 deg。2) 随加载次数增加,滞后角呈逐渐增加趋势。说明相同沥青用量条件下,GA 沥青混合料的滞后性随疲劳作用次数增加越显著,沥青混合料中粘性成分增加,可恢复的弹性成分降低。PMB25 沥青的滞后角随加载次数变化的敏感性高于 AH70[#]、AH30[#] 沥青。

2.3 应变水平影响因素分析

选择 600、800、1 200 和 1 400 $\mu\epsilon$ 4 种应变水平,油石比 8.0%,分析不同应变水平下 GA 沥青混合料劲度模量随加载次数的变化情况,结果见图 3、图 4。

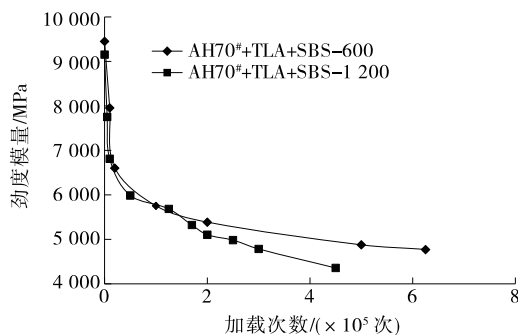


图 3 不同应变水平下 GA 沥青混合料劲度模量试验结果

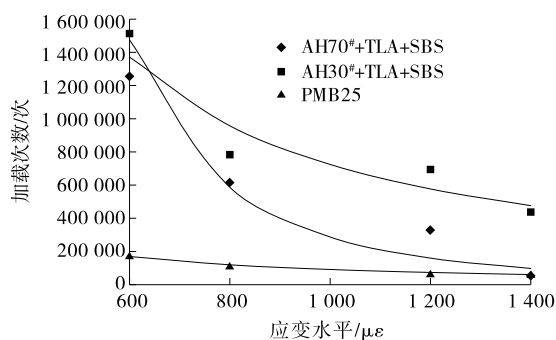


图 4 应变水平与 GA 沥青混合料疲劳加载次数的关系

由图 3、图 4 可知:1) 应变水平对劲度模量有显著影响,随应变水平增加劲度模量呈下降趋势,且随疲劳加载次数增加二者差异越大。说明应变水平提高劣化了 GA 沥青混合料的疲劳寿命,对于桥面铺装结构,应严格控制桥面结构总的弯曲变形程度。以 AH70[#] + TLA + SBS 为例,应变水平为 600 和 1 200 $\mu\epsilon$ 时,初始劲度模量分别为 9 453 和 9 155 MPa,加载次数为 4.5×10^5 次时劲度模量分别为 5 120 和 4 358 MPa,且二者的疲劳寿命为 6.25×10^5 和 4.5×10^5 次,相差约 28%。2) 加载次数随着应变水平的增加显著下降,二者呈幂函数关系(见表 5)。其中 AH70[#] 沥青的曲线斜率最大, AH30[#] 沥青次之, PMB25 沥青最小,说明 AH70[#] 沥青受应变水平

的影响较大。应变水平为 $1\,400\ \mu\epsilon$ 时, AH70[#] 沥青的加载次数为 5.365×10^4 次, 与应变水平 $600\ \mu\epsilon$ 相比, 降低 95.7%; AH30[#] 沥青的加载次数降低 71.7%, PMB25 沥青下降 63.6%。

表 5 应变水平与 GA 沥青混合料加载次数的关系

沥青类型	关系公式
AH70 [#] + TLA + SBS	$y = 10^{15} x^{-3.2011}, R^2 = 0.834\,4$
AH30 [#] + TLA + SBS	$y = 4 \times 10^9 x^{-1.2488}, R^2 = 0.883\,9$
PMB25	$y = 4 \times 10^8 x^{-1.2068}, R^2 = 0.994\,5$

2.4 拌和温度影响因素分析

拌和温度的高低决定 GA 沥青混合料是否具备良好的流动性、工作和易性。国外一般采用 $200 \sim 220\ ^\circ\text{C}$ 施工温度, 国内部分桥面工程采用 $240\ ^\circ\text{C}$ 施工温度才能获得良好的流动性。但温度提高会导致沥青胶结料加速老化, 影响 GA 沥青混合料的疲劳特性。另外, 与普通沥青路面相比, 桥面铺装结构受环境的影响更严重, 极端高、低温的反复作用更显著, 对疲劳性能的考验更严峻。因此, 需通过深入研究确定 GA 沥青混合料的拌和温度。选择拌和温度 180 、 200 、 220 、 240 和 $260\ ^\circ\text{C}$ 进行试验分析, 结果见图 5~7。

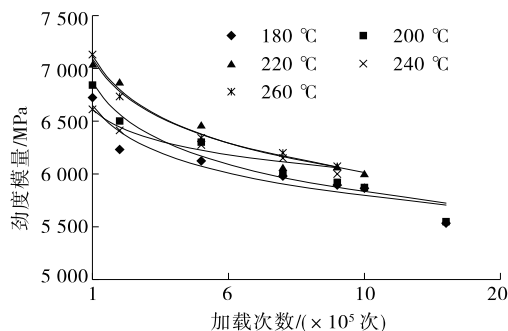


图 5 不同拌和温度下 GA 沥青混合料劲度模量试验结果 (AH70[#] + TLA + SBS)

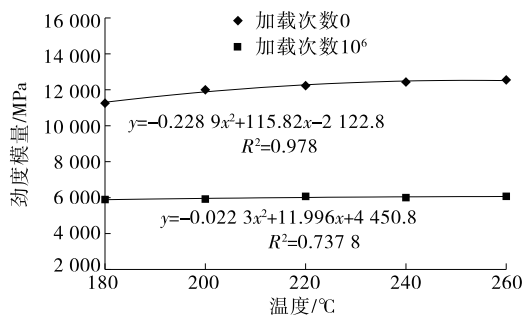


图 6 GA 沥青混合料劲度模量与拌和温度的关系 (AH70[#] + TLA + SBS)

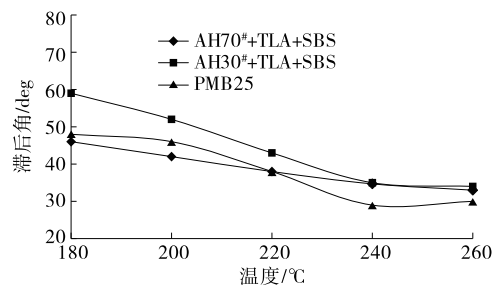


图 7 GA 沥青混合料滞后角与拌和温度的关系

由图 5~6 可知: 1) 随着拌和温度的增加, GA 沥青混合料劲度模量逐渐增加, 且二者具有较高的相关性, 相关系数达 0.87。说明拌和温度对 GA 沥青混合料疲劳特性存在显著影响, 合理控制拌和温度能有效保证其路用性能。以 AH70[#] + TLA + SBS 沥青为例, 温度为 180 、 $260\ ^\circ\text{C}$ 时其初始劲度模量分别为 $11\,256$ 和 $12\,550\ \text{MPa}$ 。2) 拌和温度对加载次数也存在显著影响, 温度提高进一步降低了 GA 沥青混合料疲劳破坏的加载次数。根据不同温度下劲度模量与加载次数的关系, 利用方程拟合得到二者的关系公式 (见表 6)。劲度模量变化的斜率随温度提高而显著增加, 说明拌和温度增加提高了 GA 沥青混合料劲度模量对加载次数的敏感性。以 AH70[#] + TLA + SBS 沥青为例, 180 、 $260\ ^\circ\text{C}$ 时, 破坏时的加载次数分别为 14×10^5 和 9×10^5 次。

表 6 GA 沥青混合料劲度模量与拌和温度的关系

温度/ $^\circ\text{C}$	关系公式
180	$y = -357.8 \ln x + 10\,769, R^2 = 0.900\,4$
200	$y = -432.18 \ln x + 11\,840, R^2 = 0.948\,6$
220	$y = -461.42 \ln x + 12\,432, R^2 = 0.971\,1$
240	$y = -221.15 \ln x + 9\,145.9, R^2 = 0.985\,0$
260	$y = -464.54 \ln x + 12\,445, R^2 = 0.992\,7$

由图 7 可知: 1) 随着拌和温度的增加, 滞后角呈线性下降趋势, 且温度增加对滞后角的劣化幅度与沥青类型相关。拌和温度升高促使 GA 沥青混合料粘性成分发生转移, 降低了其抗疲劳性能。如 AH70[#] 沥青, 温度从 $180\ ^\circ\text{C}$ 升高至 $260\ ^\circ\text{C}$, 滞后角从 $46\ \text{deg}$ 降至 $33\ \text{deg}$, 降低约 28.2%; AH30[#] 和 PMB25 沥青分别降低约 42.4%、37.5%。2) 不同拌和温度范围对滞后角的影响规律并不一致。 $180 \sim 240\ ^\circ\text{C}$ 时, 温度变化对滞后角的劣化幅度更显著; 而 $240 \sim 260\ ^\circ\text{C}$ 时, 滞后角变化较平缓。与 $180\ ^\circ\text{C}$ 时相比, $240\ ^\circ\text{C}$ 时, AH70[#]、AH30[#] 和 PMB25 沥青的滞后角分别降低约 24.6%、40.7% 和 39.6%; 而 $260\ ^\circ\text{C}$

时,与 240℃时相比,3种沥青的滞后角分别下降约 4.8%、2.8%和 3.4%。

拌和温度升高对沥青混合料的影响主要是促进沥青老化,对沥青组分进行转移,使沥青质增加,轻质组分、改性剂等进一步挥发。对于 GA 沥青混合料,较高的拌和温度直接促进沥青老化,影响 SBS 改性剂对沥青性能的改善作用,表现为疲劳性能降低。因此,施工过程中在考虑 GA 沥青混合料拌和工作性、流动性的同时应降低或严格控制温度,避免温度过高劣化其疲劳特性。

3 结论

(1) 沥青用量对 GA 沥青混合料的劲度模量、疲劳加载次数及滞后角等指标存在显著影响,随沥青用量增加,劲度模量下降,破坏时的疲劳加载次数和滞后角增加。在最佳油石比范围内,采用沥青用量的上限有助于延长 GA 沥青混合料的疲劳寿命,否则会劣化其抗疲劳特性。

(2) 应变水平对 GA 沥青混合料的劲度模量和加载疲劳次数存在显著劣化作用,随应变水平增加,劲度模量和加载次数下降,劣化了其疲劳寿命。其中 AH70[#]+TLA+SBS 沥青受应变水平的影响最大,AH30[#]+TLA+SBS 沥青次之,PMB25 最小。

(3) 随拌和温度增加,GA 沥青混合料的劲度

模量逐渐增加,滞后角下降,提高了劲度模量受加载次数影响的敏感性,降低了混合料的疲劳寿命。180~240℃时温度变化对滞后角的影响更显著,240~260℃时滞后角变化较平缓。建议施工过程中考虑拌和料工作性、流动性的同时降低拌和温度,避免温度过高劣化 GA 沥青混合料的使用寿命。

参考文献:

- [1] 张文,蒋福山,刘新平,等.浇注式混凝土高性能高粘沥青材料的试验研究[J].中外公路,2013,33(3).
- [2] 薛听,王民,张华.浇筑式沥青混凝土在钢桥面铺装中的应用现状[J].公路交通技术,2011(5).
- [3] 万涛涛,邹桂莲.国外浇筑式钢桥面铺装方案在中国的应用探究[J].公路与汽运,2012(5).
- [4] 向源,赵新美,闫东波.浇注式沥青混凝土高温稳定性影响因素分析[J].中外公路,2009,29(5).
- [5] 聂文,张肖宁,吴志勇.不同工艺对浇筑式沥青混合料疲劳性能的影响[J].交通科学与工程,2013,29(4).
- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S].
- [7] 郝增恒.微观尺度下浇筑式沥青混合料超热老化机理[J].建筑材料学报,2013,16(3).
- [8] 王民.橡胶粉复合改性沥青浇筑式沥青混凝土性能研究[J].交通科学与工程,2012,28(1).

收稿日期:2018-08-06

(上接第 120 页)

5 结论

(1) 单步模数搜索合成法确定的支点标高调整方案可满足泸州沱江四桥变曲率竖曲线钢箱梁步履式顶推的要求,除临时墩 L4 支反力稍微超出限值(控制值 1 700 t,计算值 1 706 t)外,其他支点反力均在限值以内;顶推梁弯曲应力均未超出限值,滑道初始标高及滑道标高调整方案可行。

(2) 支点反力对标高调整量很敏感,标高调整中滑道标高的调整精度宜控制在 5 mm 以内。

(3) 考虑到支点反力对标高调整量的敏感性,当调整工况中出现多个位置同时调整时,各支点调整应分级(如 1~2 cm 为一级)同步进行。

参考文献:

- [1] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学报,2016,29(2).
- [2] 胡志坚,孔祥韶,吴卫国.九堡大桥顶推施工模型试验

[J].公路交通科技,2012,29(1).

- [3] 谢祺.步履式顶推施工工艺对钢箱梁局部受力的分析研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [4] 李传习,王俊,董创文,等.联合 ANSYS 与 MATLAB 进行钢箱梁顶推施工仿真优化[J].交通与计算机,2008,26(6).
- [5] 王娣,梅秀道.顶推施工算法及临时墩支座标高调整优化[J].世界桥梁,2010(3).
- [6] 崔清强.复杂预制线形钢箱梁顶推计算分析[J].桥梁建设,2009(6).
- [7] 董创文,李传习,张玉平,等.变曲率竖曲线梁顶推过程支点标高调整方案确定的单步模数搜索合成法[J].土木工程学报,2015,48(1).
- [8] 张玉平,董创文.江东大桥双塔单跨空间主缆自锚式悬索桥的施工控制[J].公路交通科技,2010,27(7).
- [9] 董创文.钢箱梁顶推关键问题研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [10] 张晔芝,谢晓慧.铁路特大桥钢箱梁顶推过程受力分析及改善方法[J].中国铁道科学,2009,30(3).

收稿日期:2018-03-16