

世界交通运输工程技术论坛 —— (WTC2021) —— 论文集 (上册)

世界交通运输大会执委会◎编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

本 册 目 录

第一篇 公 路 工 程

地下防洪墙对半刚性沥青路面受力特性影响分析	尹祖超 蔡 鹏 汪鹏福 袁卢均 郑 璐(3)
Investigation on the Self-healing Behavior of Asphalt Binder Based on the Molecular Dynamics Simulation	Yan Li Bowei Sun Jingwen Liu(8)
基于随机细观模型的沥青混合料劈裂行为研究	马 迪 汤 文 王 欢 吕悦晶(17)
移动荷载作用下沥青路面反射裂缝影响因素分析	宋 帅 何 帅 杨茂林(26)
Flame Resistance and Pavement Performance of Asphalt Mixture Incorporating Composite Flame Retardant	Yao Tengfei Han Sen Men Changpeng Zhang Zhuang Dong Shihao Li Yang(32)
基于旧路分层铣刨的沥青老化规律及老化程度分级	郝 林 陈 钊 吴建灵 王选仓 李燕军(46)
Preliminary Study on the Problem of Improving the Interfacial Properties of Fiber and Asphalt Binder	Junxian Huang Zhibin Su Susu Xing Jing Li Canyun Mao(52)
矿料分异型沥青混合料路用性能及力学参数研究	吴喜荣 郑南翔 雷俊安(58)
层间黏结状态对沥青路面结构使用寿命的影响分析	孙 强 李 夏 江照伟 韦金城(68)
半刚性基层沥青路面横向裂缝发展规律及影响因素研究	朱玉琴 倪富健 周 岚 丛 菱(73)
平交口抗车辙沥青路面结构与材料一体化设计研究	蒋应军 倪辰秧 张 宇 易 勇 邓长清(79)
万州大跨度悬索桥 LUHPC 钢桥面铺装组合方案分析	李鸿盛 胡凤明 宋 健 丁庆军 付 军(89)
全温域条件下沥青路面加速加载响应规律分析	徐希忠 韦金城 张晓萌 符东绪 李作钰(94)
温度和剪切速率对沥青-集料试件剪切力学特性的影响	汪忠明 王永春 董满生 吴大师(101)
基于力学响应的沥青面层改性分级标准研究	罗耀芦 王选仓 张 义 邓玉缘 宋丽萍(107)
高速公路隧道路面抗滑性能分布规律及养护关键技术研究	徐志祥 吁新华(112)
基于胎路耦合的沥青路面摩擦行为数值仿真	余 苗 罗延生 童锦尧 陈海峰 孔令云(118)
冰-沥青路面黏结特征分析	胡新悦 冷滨滨 王中俊 吕廷军(127)
某山区干线公路灾害恢复重建对策及实践	陈俞嘉 康孝先 周子豪 陈祥斌(134)
水性环氧超薄磨耗层抗滑耐久性试验研究	李晶晶 张 擎(138)
既有桥梁水下基础防冲刷措施与关键技术分析	周子豪 康孝先 陈俞嘉 陈祥斌(144)
The Anti-stripping Performance of the Anti-skid Wear Layer of Highway Tunnel Cement Concrete Pavement	Qing Zhang Wenbo Ding Tong Shi Hongchang Guo Yakun Liu(148)
正负变温条件下引气水泥混凝土强度增长规律研究	梁 磊(156)

Research on Low Temperature Performance of SBS Modified Asphalt under the Action of Different Regenerants	Yanan Cui Maorong Li Lidian Guo Lu Liu(159)
沥青材料分析研究技术进展	高润杰 陈玉(170)
冻融循环下冷拌环氧沥青的韧性衰减规律	王俊彦 于新 丁功瀛 阮伟(175)
基于DSR流变学测试的老化SBS改性沥青性能变化规律	田周义 李福林 寇小舟 吴祥海 张壮(182)
一种常温黏稠乳化沥青胶结料的研究	吴玉辉 蒋明伟 吴耀东 赵冬明 邱百万(189)
融雪盐化物掺量对沥青胶浆性能影响研究	温钰婷 郭鸿晨(194)
SBS改性沥青热储存稳定性试验方法研究	彭煜 从艳丽 杨克红(199)
基于沥青性能快速检测方法的胶粉改性沥青的蠕变变形恢复研究	蔡凤杰 冯振刚 姚冬冬 陈婷婷 韦金城(204)
冷补沥青混合料材料设计及其性能研究	孙焱焱 刘安述 吴双全 郑斌 郭艳明(210)
Evaluating the Relationship between Internal Structure and Moisture Damage of Fiber-reinforced Steel Slag Asphalt Mixture	Wenzhen Wang Aiqin Shen Ziming He Lusheng Wang(216)
温度及老化时间对沥青混合料抗疲劳性能影响的试验研究	张金喜 张阳光 韩丁丁 糕永昌 郭旺达(225)
Experimental Study on Optimum Asphalt Content of Basalt Fiber Asphalt Mixtures Considering Fine Aggregates Reduction	Yao Zhang Yuhao Wu Bangwei Wu Peng Xiao Haochen Wu(231)
乳化沥青冷再生混合料动态模量影响因素研究	李洪祥(240)
Study on the Influence of Benign Temperature Induced Admixture on Thermal Induced Performance of Cement Concrete	Lv Jiaoyng Tian Bo Quan Lei Li Sili(244)
Research on Freeze-thaw Durability of Porous Concrete based on the Pore Characteristics and Supplementary Cementitious Materials	Li Zhang Hui Li Hanbing Wang(251)
Influence of Fluidity of Cement Paste, Cement Dosage and Vibration Forming Mode on the Anti-segregation Performance of Pervious Concrete	Yong Feng Hui Li Haonan Zhou(257)
纤维用量对砂浆的工作性和强度影响研究	郝运 曹阳森 张帆 胡鑫康 张进(270)
Application Evaluation of Steel Slag in Road Base	Wuju Wei Jinyu Xu Bingfeng Zheng Chao Han(274)
基于微观角度废橡胶复合材料性能研究进展	高润杰 陈玉(281)
Effect of Humidity and Oxygen on the Weathering Aging Process of High Viscosity Modified Asphalt Using a Coupled Rheology-Morphology-Chemistry Characterization Approach	Mingjun Hu Weiwei Zhou Daquan Sun Jianmin Ma(288)
Improving Rheological and Mechanical Performance of Epoxy Asphalt Modified with Graphene Oxide	Jingjing Si Yang Li Junyan Wang Xiaoyong Zou Xin Yu(301)
基于果脯废糖液的公路用液态融雪剂试验研究	向豪 弥海晨 陈华鑫(307)
Research on the Carbon Materials/Polymer Self-sensing Composites for Pavement Micro-strain Detection	Xue Xin Ming Liang Linping Su Zhengmei Qiu Zhanyong Yao(314)

碱激发矿渣—硅酸盐水泥复合胶凝材料性能与微观结构试验研究	丁 博 张金喜 王建刚 党海笑 (326)
建筑垃圾在道路工程中的应用综述	李 想 毛雪松 (332)
基于通行能力和安全性分析的集散一级公路硬路肩宽度研究	张方哲 赵一飞 杨思杰 (335)
Study on Inspection of Highway Three-dimension Sight Distance Method Based on Civil 3D	Zhibo Liu Tao Wu Yuhua Peng (341)
高速公路连续下坡路段货车追尾风险研究	马如鹏 胡 涛 王亚楠 (350)
公路隧道路段静态行车风险指标体系构建与评估	杨榕玮 靳敏达 张昆仑 (357)
高速公路连续下坡路段货车运行速度模型适用性分析	吕 博 罗昱伟 任士鹏 (367)
道路行车风险评估模型综述	谢永淑 任晓玮 向宇杰 唐忠泽 杨雅钧 (373)
高速公路同向曲线路段车辆行驶轨迹研究	李永春 李 泉 刘 斌 杨榕玮 靳敏达 (382)
高速公路分路段横净距评价方法与改善措施	向宇杰 李丙焱 谢永淑 唐忠泽 胡瑞来 (392)
高速公路隧道与主线出入口小净距路段行驶特征分析	唐忠泽 翟艺阳 张昆仑 杨雅钧 谢永淑 (399)
A New Method of Safety Evaluation for Sharp Bend and Steep Slope Sections of Highway	
Based on Braking Behavior	Yajun Yang Hong Zhang Bo Wang Yongshu Xie Yijing Zhao (408)
公路运行速度模型研究综述	黄春富 魏东东 王亚楠 马如鹏 白 杰 (426)
Study on the Influence Factors of Point Load Test by Flat Joint Model of PFC3D	
	Zhi He Wuchao Yang Peijie Yin Changgen Yan (435)
不同击实功下黄土回弹模量变化规律分析	刘贤旺 杜秦文 赵伟杰 程灿灿 魏 进 (445)
颗粒圆度对路基填料振动压实影响的离散元分析	方传峰 聂志红 刘维正 刘顺凯 (450)
Influence of Relative Humidity on Physical Properties of Bound Water Adsorbed by Loess	
	Hao Zhou Xuesong Mao (459)
有关硅藻土及地基处理方法研究现状分析	谢锦倩 张宏光 杨婷婷 (470)
结合水对黄土抗剪强度的影响研究	周 豪 毛雪松 (474)
Stability Analysis of Cracked Loess Slope Based on Upper-bound Method	
	Linxuan Zhu (479)
Analysis of the Influence of Pipe Pile Composite Foundation on the Earth Pressure and	
Deformation Characteristics of Circular Pipe Culvert	
	Zhenyu Song Weifeng Zhao Zhongju Feng Siqi Wang Yumeng Hao (487)
路面状态对水泥磷石膏稳定土路基模量的影响研究	
	彭 波 王振生 宋云峰 李奕娜 刘 帅 (496)
滨海地区地下水位动态变化对土体影响研究	程马遥 曾 洋 魏 永 杨 虹 (502)
某高速公路顺层路堑高边坡病害处治	张 魁 (508)
沿海地区岩溶发育区路基处治技术数值分析	伊力夏提·奥斯曼 (512)
地下水位变化对基坑非稳定渗流的影响研究	程马遥 魏 永 曾 洋 杨 虹 (520)
不同击实功对黄土压实特性影响试验研究	黄鑫中 杜秦文 李宝江 石 磊 魏 进 (527)

蒸发条件下非饱和砂性土水汽迁移试验研究	张建勋 毛雪松(535)
Experimental Study on Strength Degradation Characteristics of Cement-improved Loess under Wetting-drying Cycles	Jiangtao Fan Yingjun Jiang Tian Tian Yong Yi(541)
TX-B 型固化剂复配无机材料改良黄土强度特性研究	梁燕 陈晨 刘霜 吴仁悠 张婧(550)
混凝土结构裂缝检测系统的设计	龚涛 苏时玲 廖丽琼(554)
青藏公路路基不均匀变形对路面病害的影响分析	李铭 支喜兰(558)
基于惩罚型变权物元理论模型的路面使用性能评价	黄卫国 张硕 胡勇(563)
ECA-10 在预防性养护中的应用及跟踪	顾艳静(570)
盲沟在泡沫沥青冷再生路面中的应用	顾艳静(576)
基于红外光谱的老化沥青转移率研究	唐伟 李宁 于新 詹贺 张宇(579)
Research on the Remaining Service Life and Rutting Deformation of Highway Pavements	Longsong Jiang Shujie Wang Huiyong Wang(586)
道路非开挖注浆加固材料性能研究	李亚 张瑜 陈先勇(593)
Study on Multi-Scale Finite Element Model for Bridge Load Test	Wei Wang(596)
基于 RAP 精细化分离技术的全比例冷再生微表处技术在高速公路中的应用	高立波 周健楠 戴康瑜 张伟 齐盛涛(603)
氯盐类融雪剂性能影响因素及评价方法	夏金平 韩森 张秋瑞(610)
A Mechanical Approach to Restore Road Friction Coefficient under Various Snowpack Conditions	Weixin Yang Jinrui Shi Xiaochen Zhang Sirui Zhang(614)
绿色理念在昌九高速公路改扩建工程中的应用实践	付凯敏 黄智华 曹林辉(621)

第二篇 桥梁工程

基于文化、生态、体验的桥梁设计实践初探——以唐岛海湾大桥为例	李敏(629)
Effects of Complex Temperature Actions on the Dynamic Response of High-Speed Railway Trains	Hongye Gou Tianqi Zhao Rui Yang Liang Li(633)
装配式箱涵在公路中的应用实践及思考	付凯敏 黄智华 聂建春 曹林辉(640)
Disease Mechanism and Influence Analysis on Force-bearing Members of Composite Beam Cable-stayed Bridge	Chi Wang Hanhao Zhang Linhao Zhu(644)
A New Model for Slender Columns Retrofitted with CFRP	Zhengpu Yang Peiwen He Peng Wang(653)
Force Analysis of T-beam from Simple Support to Continuous	Liu Yu Zhang Qichen Wang Xinyue Chen Peiqi He Zhiguo Wang Guitong Zhang(662)
Analysis of Mechanical Capacity of Continuous Rigid Frame Bridge under the Climate of Chloride Erosion	Lei Hao Feng Chen Bin Zha(672)
基于海外设计实践的桥梁汽车荷载对比研究	商雪枫 潘竺兰(681)

系杆拱桥吊杆更换关键技术研究	商雪枫(686)
曲线钢箱组合梁桥空间受力特征及简化设计方法研究	朱 钊 贺拴海 宋一凡 李 源 沈传东(694)
Modal Frequency Analysis of Suspension Bridge under the Action of Temperature	Qichen Wang Xiaoyue Gao(700)
钢筋混凝土桥梁用融雪剂的探讨	吴玉辉 蒋明伟(714)
基于机器视觉技术和深度学习算法的桥梁荷载时空分布识别系统	易雨时 乔可鑫 张 路(718)
Safety Evaluation of Continuous Beam Bridges under Heavy Load	Yushi Yi Lu Zhang(730)
Research on Non-stationary Characteristics of Wind Field at Bridge Site Based on Multiresolution Analysis	Huan Zhang Zufeng Liu Cong Li Yang Wang(738)
基于有限元的钢围堰施工阶段分析	朱豪杰 张谢东 汪 威 李志锋 潘靖勃(748)
The Effect of Ernst Equation on the Dynamic Characteristics of Double-Tower Cable-Stayed Bridge with Different Heights of Towers	Lu Wang(754)
Shear Behavior of Joints in Precast Concrete Segmental Bridges	Hao Chen Liang Xie Gao Cheng Zhiheng Zhang Kaiqiang Wang(760)
Study on Boundaries Between Straight Bridges and Curved Bridges with Box Section in Cantilever Construction	Liang Xie Hao Chen Gao Cheng Zhiheng Zhang Bohua Wen(767)
桩径变化对不同剥落厚度下桩基横轴向承载特性影响	冯忠居 全超文 李 铁 白少奋(773)
Construction Technology of Pile Foundation of Bridge passing through Extra-large Karst Cave	Shaofen Bai Junhua Cai Zhongju Feng Chenming Xia Huiyun Chen(781)
V 形峡谷地区空间 Y 形钢箱拱桥缆索吊装系统设计	黄 骞 邬晓光 胡科坚 徐 宁(788)
Automatic Modal Identification Based on Graph Clustering and Outlier Detection	Shengyu Liu Xin Sun(799)
不同中小跨径梁桥动态称重算法对比研究	乔可鑫 韩万水 陈适之 易雨时(808)
Structural Safety Assessment of Steel-concrete Composite Girder Cable-stayed Bridge Exposed to Fires on Deck	Linhao Zhu Haoyun Yuan Chi Wang Zhi Liu(816)
刚构-连续结构体系梁桥组合式桥墩力学性能分析	杨 光 徐 岳(825)
高墩超多跨连续刚构桥合龙方案与顶推控制研究	朱军生 陆泽磊 牛六喜 王少鹏(830)
Component Importance Analysis of Composite Girder Cable-stayed Bridge Based on Generalized Structural Stiffness	Binxian Wang Hanhao Zhang Zhi Liu Huishuang Xiao(835)
Study on Construction Control Parameters of Pile Foundation of Highway Bridge passing through Beaded Karst Cave	Junhua Cai Zhongju Feng Jie Cai Huiyun Chen Shaofen Bai(843)
Analysis of Long-term Deformation Sensitive Parameters of Extradosed Cable-stayed Bridge	Guang Yang Lingzhu Yang Yue Zhao(850)
连续刚构桥施工中大悬臂停工的分析研究	陆泽磊 张永飞 朱军生(857)
Research on Preventive Maintenance Timing of Steel-Concrete Composite Beam Cable-stayed Bridge	Zhi Liu Hanhao Zhang Binxin Wang Linhao Zhu(861)

Finite Element Analysis of Pile-Soil Interaction under Scouring	Haofei Cao Wenliang Hu Huishuang Xiao Haoyun Yuan(868)
中等跨径钢-混凝土组合箱梁桥负弯矩区力学性能研究	姬子田 张之恒 程 高 谢 亮 王鹏琪(876)
Study on Shrinkage of Concrete with Multi Row Stud Connectors in Steel-concrete Composite Beams	Shuaishuai Zhang Laijun Liu Changjiang Yu Peiqi He(882)
Research on Slender Column with Circular Cross-section Considering Boundary Condition and Imperfection	Peng Wang Zhengpu Yang Peiwen He Jiawei Niu Runxiang He(893)
小半径曲线简支叠合梁桥设计分析	张 蕊(898)
Prediction of Effective Width of Varying Depth Box-girder Bridge Using Artificial Neural Network	Kejian Hu Xiaoguang Wu(902)
箱形截面独柱墩连续弯桥倾覆稳定性分析	肖慧双 李 源 宋一凡 边旭辉(912)
Force Analysis of Frame Abutment	Kunkun Jiang Huishuang Xiao Fujun Li(918)
大跨度斜交框架式地道桥空间有限元分析研究	范香艳 刘来君 丁 昊 王 鑫(927)
矩形空心钢筋混凝土高墩延性抗震性能分析	廖泳华 张谢东(931)
Research on the Technology of Lag Pouring of Wet-joint Used in Composite Girder Cable-stayed Bridge	Tianrui Gao Zhenbei Liu Haijing Ning(937)
双向压弯下空心矩形截面桥墩承载力分析	孟宪聪 张谢东(948)
基于挠度影响线导数的连续梁桥损伤识别	王康迪 生尧文(953)
Performance Evaluation of Bridge with Cracks under Heavy Load	Yushi Yi Kexin Qiao(958)
Dynamic Analysis for Hanger Fracture of Network Arch Bridge	Ruixuan Li Xianwu Hao Teng Xu Xinke Cao(968)
基于 CFD 数值模拟研究扁平流线型钢箱梁流场和三分力系数	王 路(976)
中承式钢桁架拱桥设计参数敏感性分析	许汉铮 任浪博 韦 辉 唐署博(980)
大跨径桥梁风致振动和抗风措施研究	王 路(986)
高强钢丝及缆索体抗火性能研究进展	厉 莹 沈锐利 陈 巍(989)
The Formulation of the Error Control Range of Composite Beam Section Size Based on Monte Carlo Method	Liuyu Zhang Xingyue Chen Xiaochuan Shi Qichen Wang(993)
Study on Shrinkage Properties of Stud Connectors for Steel-composite Beams	Changjiang Yu Laijun Liu Jie Zhang(1002)
单向流及往复流作用下桩基局部冲刷研究	翁博文 郭 健 吴继耀(1012)
准设计状态下简支梁桥冲击系数研究	赵 洋 曹 群(1021)
基于模糊综合评价法的桥梁火灾脆弱性评价	李 洁 徐 峰(1028)
承托设置对钢混组合箱梁桥面板横向预应力效应的影响	杨领柱 杨 光(1035)
弹性支承压杆承载力数值分析	何培文 杨正朴 王 鹏 贺润祥 牛家伟(1040)
提高铁路悬索桥竖向刚度的结构措施研究	陈 鑫 沈锐利 童登国(1045)
变权理论在桥梁评定中的应用	张亚博 陈 峰 彭文锋 曹黎明 查 斌(1049)

中等跨径钢-混凝土组合箱梁桥 负弯矩区力学性能研究

姬子田¹ 张之恒¹ 程 高^{1,2,3} 谢 亮¹ 王鹏琪¹

(1. 长安大学公路学院; 2. 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室;
3. 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室(西安))

摘 要 为研究墩顶横梁内充填混凝土对中等跨径钢箱组合梁桥负弯矩区受力性能的影响,基于对 K146+177.763 阜城村 G211 分离立交进行的前期实时数据采集,建立有限元数值分析模型,其有效性得到理论与试验数据的验证。运用有限元方法对模型计算结果进行对比分析,并以填充混凝土的强度等级作为变量进行参数分析。研究结果表明:墩顶填充混凝土可以有效地降低负弯矩区钢梁下翼缘的应力;考虑墩顶横梁内充填混凝土作用后,桥梁的结构刚度略有提高,中跨跨中挠度及底板受力略有减少;增大横梁内混凝土强度等级,对钢箱组合梁桥内力及变形的变化幅度影响不大,最大变化幅度不超过 4%。由有限元模型计算得到的结构特征内力和位移与理论、实测结果吻合较好,可为中等跨径钢-混凝土组合箱梁桥负弯矩区的设计与研究提供参考。

关键词 桥梁工程 力学性能 现场实测试验 钢-混凝土组合箱梁 负弯矩区 有限元分析

0 引 言

钢-混凝土组合梁因其材料的优点即混凝土受压性能好,钢材可以承受较大拉力,并且结构轻巧,厂内可实现快速预制和装配,施工便捷,缩短工期,在桥梁工程领域得以广泛使用。组合梁桥按照受力通常可以分为简支组合梁桥和连续组合梁桥。与简支组合梁桥相比,连续组合梁桥正负弯矩分配合理,使跨中正弯矩大幅度减少,结构跨越能力增强,提高了其刚度和结构整体性能^[1]。箱型截面是一种薄壁闭口截面,抗弯抗扭性能得到改善,可抵抗正负弯矩,广泛应用于连续梁桥。然而,连续梁在中间支点位置附近不可避免的会产生负弯矩使这部分桥面板受拉多发生混凝土开裂,中性轴以下钢箱梁下翼缘受到压力会发生局部失稳现象,减少结构的使用年限,限制了钢-混凝土组合箱梁桥的发展,也使得研究组合梁桥负弯矩区力学性能成为一种趋势。

针对负弯矩附近截面中性轴以上桥面板多发生混凝土开裂问题,近些年来国内外学者投入了大量的试验与理论研究。聂建国等^[2]提出一种新型的抗拔不抗剪连接件新技术,研发连接件的构造形式,并进行大量的性能对比试验,表明这种新型连接件具有很好的力学性能,在不削弱负弯矩区结构的极限抗弯承载力和刚度的同时,可以显著降低桥面板混凝土的开裂。刘永健等^[3]提出了在负弯矩区的混凝土桥面板里面布置预应力钢筋并使用抗拔不抗剪的连接件形成组合桁梁结构,通过在跨中位置施加反向的集中荷载来模拟连续梁中间支点的受力,对 2 榀矩形钢管混凝土组合桁梁结构进行试验加载,表明采用在混凝土桥面板内布置预应力钢筋与局部释放剪切作用的连接件形成的组合桁梁结构可以显著降低桥面板混凝土的开裂,但对结构抗弯承载力影响不明显。欧阳政^[4]分析了正负弯矩区不同的混凝土强度等级、不同抗剪连接程度、不同混凝土翼板处横向配筋率对连续组合梁结构承载能力、界面黏结滑移、挠度、负弯矩开裂荷载的影响。桥面板采取钢纤维混凝土的方法^[5-7]、合理变换施工阶段、改进施工工艺^[8-10]或分析对比不同连接件力学性能^[11]等改善结构负弯矩区桥面板混凝土开裂。目前,钢-混凝土组合结构桥面板混凝土防开裂的方法总体可以归纳为:纵向配置预应力钢筋、群钉技术、梁底填筑混凝土形成双层组合梁、改进施工方法等^[2]。周安等^[12]在负弯矩下对 5 根简支梁依照文献^[13]提出的临界高厚比的要求进行

承载力试验, 钢箱梁发生局部屈曲。刘洋等^[14]对钢-混凝土组合梁结构在负弯矩区易发生畸变屈曲现象进行参数分析。Xu 等^[15]对两跨钢箱组合梁的双层组合效应进行试验, 表明双层组合可以缓解桥面板混凝土开裂, 并且可以有效改善钢箱梁的局部稳定性。聂建国等^[16]进行相关实桥试验, 表明双层组合对钢箱梁稳定性影响是有利的, 并且提高了结构刚度。

既有文献在解决钢-混凝土组合箱梁结构负弯矩区桥面板混凝土易开裂和钢梁易屈曲问题方面虽取得了一定的效果, 但仍然存在一些不足, 目前尚未形成优势突出的解决方案。本文以 K146 + 177.763 阜城村 G211 分离立交桥为工程背景, 通过现场实桥试验, 进行实时数据采集并建立非线性有限元全桥模型, 对比分析了有限元计算结果与理论、实测结果, 以墩顶填充混凝土的常用强度等级为变量进行参数分析, 探讨墩顶横梁内填充混凝土对组合梁负弯矩区力学性能的影响。

1 工程案例

1.1 工程概况

K146 + 177.763 阜城村 G211 分离立交桥位于甘肃省庆城县马岭镇下午旗与卅铺镇阜城村交界处, 桥跨设计是 30m + 40m + 30m, 不含桥台侧墙在内, 桥梁全长 100m, 三跨一联等截面钢-混凝土组合梁桥 (图1)。主梁采用多箱单室等高连续组合梁, 截面中心处组合梁高 2m, 全桥混凝土板厚 25/40cm, 钢箱梁采用斜腹式开口截面, 钢箱梁之间设小纵梁, 增加混凝土板刚度, 主梁横截面尺寸如图 2 所示, 结构体系是连续体系。钢箱梁横隔板分为支点横隔板和跨中横隔板, 均采用实腹式横隔板形式, 横隔板间距按照 3.5m 或者 4m 一道布置, 局部位位置稍作调整, 横隔板间腹板每隔 1m 设置一道竖向加劲肋, 箱梁上翼缘宽度是 60cm, 厚度是 2.5cm, 斜腹板厚度是 1.6cm, 底板厚为 2cm。桥面板与钢箱梁通过焊钉形成组合结构, 共同受力。桥墩台均设置 GPZ(II) 支座, 所有 DX 型支座均应顺桥向放置, 桥墩墩顶横梁内填充 C50 无收缩混凝土, C50 无收缩混凝土应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》的规定。无收缩混凝土水胶比不宜大于 0.5, 最小胶凝材料用量 360kg/m³, 混凝土膨胀剂用量 30-50kg/m³, 桥面板限制膨胀率设计值不小于 0.02%, 无收缩混凝土的配合比设计, 应该满足设计所需要的强度、膨胀性能、抗渗性、耐久性等技术指标和施工工作性能要求。施工方法简便、快捷, 填充的混凝土与横隔梁、箱梁底板形成组合形式, 参与结构受力。

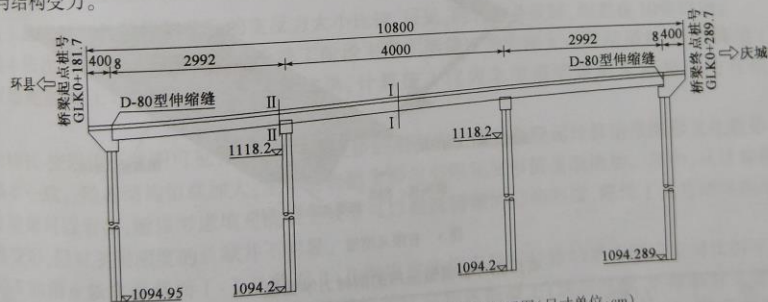


图1 K146 + 177.763 阜城村 G211 分离立交总体布置图 (尺寸单位: cm)

1.2 数据采集

依据连续组合箱梁桥的受力特点, 对桥梁施工阶段全过程进行实时数据采集。主要的施工阶段有: 现场拼装钢箱梁、绑扎桥面板钢筋并浇筑正弯矩区混凝土、预压堆载、拆除临时支架、浇筑负弯矩区混凝土、卸除预压堆载、桥面二期铺装等附属设施。主要测试项目有: 全桥挠度变化, 中跨跨中截面 (I-I) 截面应变, 中支点截面 (II-II) 截面应变, 主桥挠度变化采集使用精密水准仪, 测点沿纵向平均布置, 充分保证精度要求。控制截面应变采用 JMZX-3001L 智能弦式数码应变计。挠度及应变各测点布置如图 2 所示。

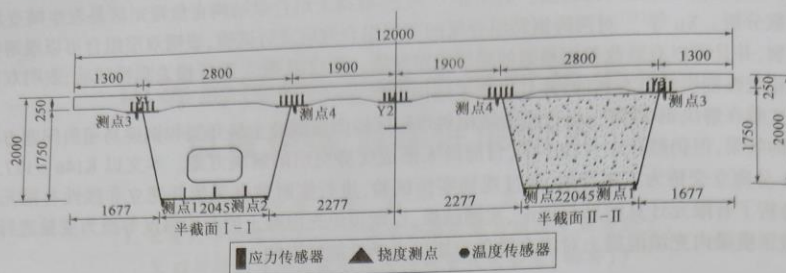


图2 K146+177.763 阜城村 G211 分离立交横断面图(尺寸单位:mm)

2 有限元数值分析

2.1 有限元模型的建立

采用有限元软件 ABAQUS 建立实桥模型,保证满足计算精度的前提下,简化模型仅对单片主梁进行模拟,如图3所示。为探讨墩顶填充混凝土的作用,按照横梁内是否考虑填充混凝土作为主要变量分别建立模型,钢-混凝土组合梁桥有限元仿真模型共有8部分组成,即混凝土桥面板、钢筋网、钢梁、底板加劲肋、腹板加劲肋、填充混凝土块、横隔板、支座。钢材与混凝土的力学性能如表1、表2所示。

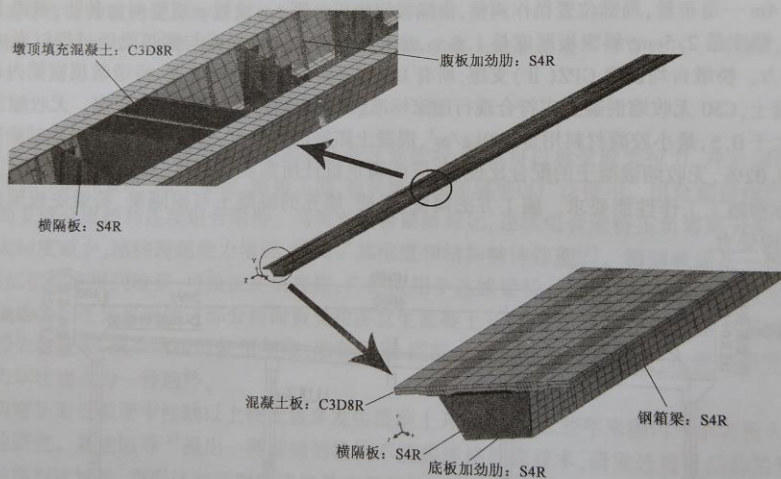


图3 有限元模型

有限元分析模型采用的钢材力学性能

表1

名称	f_y (MPa)	f_u/f_y	E (MPa)	ν	ρ (t/mm^3)
钢梁	345	1.42	2.06×10^5	0.25 ~ 0.3	7.85×10^{-9}
钢筋	400	1.35	2×10^5	0.3	7.85×10^{-9}
加劲肋	345	1.42	2.06×10^5	0.25 ~ 0.3	7.85×10^{-9}
横隔板	345	1.42	2.06×10^5	0.25 ~ 0.3	7.85×10^{-9}
支座	345	1.42	2.06×10^5	0.25 ~ 0.3	—

注: f_y -屈服强度; f_u -抗拉强度; E -弹性模量; ν -泊松比; ρ -质量密度。

有限元分析模型采用的混凝土力学性能

名 称	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E (MPa)	ν	ρ (t/mm) ³
混凝土桥面板	32.4	2.65	3.45×10^4	0.2	2.6×10^{-9}
填充混凝土块	32.4	2.65	3.45×10^4	0.2	2.6×10^{-9}

注: f_c -混凝土轴心抗压强度; f_t -混凝土抗拉强度; E -弹性模量; ν -泊松比; ρ -质量密度。

混凝土桥面板、支座、填充混凝土块用实体单元 C3D8R;钢筋选用桁架单元 T3D2;钢箱梁、加劲肋、横隔板采用减缩积分壳单元 S4R。满足计算精度的要求下,忽略混凝土板内钢筋及钢梁翼缘与混凝土板的剪切、滑移作用,钢筋网与混凝土板之间用 Embedded 方式,将钢筋嵌入混凝土中,两者协同工作。混凝土填充块体与钢梁、钢梁底板与临时支架之间用面接触;支座与钢梁底板、加劲肋、横隔板与钢梁之间采用 Tie 命令,使它们相互绑定在一起。

2.2 结果验证与分析

三跨连续钢-混组合箱梁桥,依照结构力学的力法方法,通过简化结构形式,求解支座反力得出的理论结果与有限元计算结果对比如表 3 所示。Z1-Z4 表示图 1 中所示从左至右的支座编号,工况一表示浇筑负弯矩区混凝土施工阶段,工况二表示桥面二期铺装施工阶段。

支座反力理论计算与有限元计算的比较

表 3

编 号	工 况 一			工 况 二		
	RT1/N	RT2/N	RT2/RT1	RT1/N	RT2/N	RT2/RT1
Z1	677164.04	722553	1.07	967537.94	1051230	1.09
Z2	2207168.22	2106940	0.95	3371794.32	3260800	0.97
Z3	2207168.22	2110600	0.96	3371794.32	3264690	0.97
Z4	677164.04	721288	1.07	967537.94	1049900	1.09

注:RT1 为支座反力理论结果;RT2 为支座反力有限元计算结果。

表 3 是理论解与数值解获得的支反力大小比较,可见,两者吻合较好,相差在 10% 以内。

图 4 依次为工况一和工况二两个施工阶段主梁实测挠度与有限元计算结果对比,计算值 1 代表考虑墩顶填充混凝土作用的有限元计算结果,计算值 2 代表未考虑墩顶填充混凝土的有限元计算结果。

由桥长-变形值折线图可见,两种工况下主桥的刚度实测值与有限元计算结果图形变化趋势相同,大小也基本一致。随着结构恒载加大,主梁的实测变形与有限元变形值逐渐增加。其中,从计算值 1 与计算值 2 结果可以看出,墩顶考虑填充混凝土效应可以提高桥梁的结构刚度,降低了负弯矩区内结构的向上挠曲变形,但对主梁刚度的贡献并不明显。

图 5 和图 6 依次是截面 I-I 及截面 II-II 钢箱梁底板有限元计算结果所得应变对比情况,横坐标分别表示现场拼装钢箱梁、绑扎桥面板钢筋并浇筑正弯矩区混凝土、预压堆载、拆除临时支架、浇筑负弯矩区混凝土、卸除预压堆载、施工桥面二期铺装 7 个施工阶段。从图中不难看出,箱梁底板应变随施工阶段的不同呈现不断累积的过程,拆除临时支架后应变会有很大增加,施工过程中应该注意该阶段结构产生不合理变形;考虑墩顶填充混凝土时,中跨跨中截面底板应变略有减小,但是影响不大;截面 II-II 箱梁底板应变由有限元计算结果对比可知,两个计算值相差较大,桥面二期铺装等附属设施完成时,两种模型计算得到的钢箱梁底板应变相差 47%。表明在墩顶箱内填充混凝土后,可以显著限制钢箱截面的变形,混凝土代替钢梁参与受压,有效地降低钢箱梁下翼缘的应力,提高其局部稳定性,在实际设计过程中不用在负弯矩区专门设计厚钢板,减少了用钢量,为现场施工带来方便。

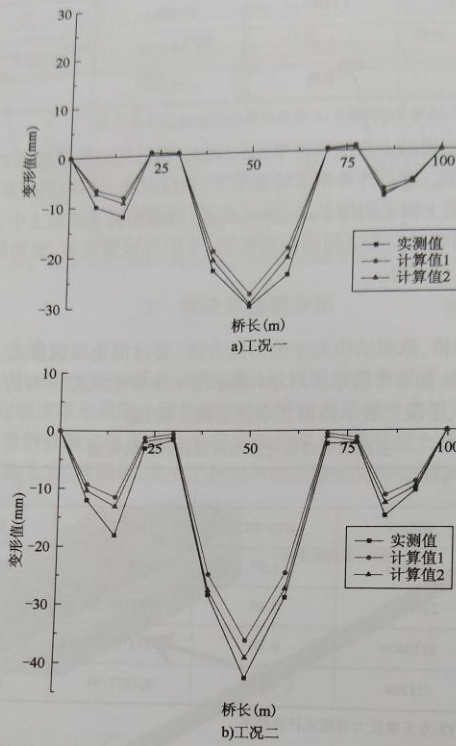


图4 不同工况作用下全桥变形对比

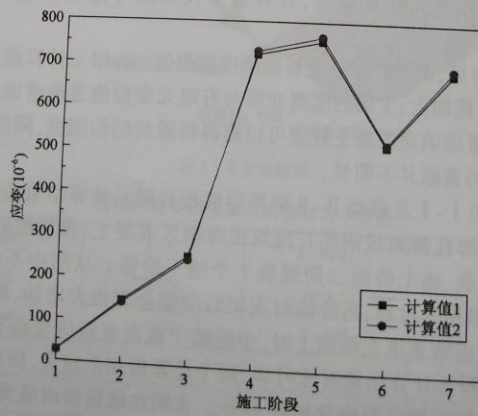


图5 截面 I-1 钢箱梁底板应变

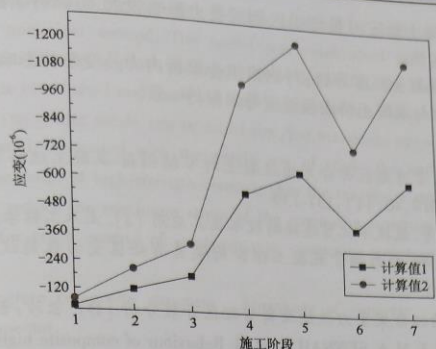


图6 截面II-II钢箱梁底板应变

3 参数分析

为考察墩顶填充混凝土对钢-混凝土组合箱梁桥整体力学行为的影响,对 K146 + 177.763 阜城村 G211 分离立交桥建立有限元全桥模型,以填充混凝土的强度等级为变量进行参数分析。依据已建成的桥梁实例,常用混凝土的强度等级范围是 C30 ~ C60,图 7 给出钢-混凝土组合连续梁桥内力及变形随混凝土强度等级的变化情况。图中 S_0 和 U_0 表示未考虑填充混凝土作用时对应截面的应变与变形;从图 7 可以看出,考虑填充混凝土作用后,连续梁支点底板应变明显减少,中跨挠度略有减小。混凝土强度等级由 C30 加大到 C60,上述作用有所提高,但是变化幅度不大,并呈逐渐放缓趋势,最大变化幅度不超过 4%。综合墩顶填充混凝土对钢箱组合连续梁桥的影响,考虑到施工便捷性,墩顶填充混凝土宜与混凝土桥面板强度等级保持一致。

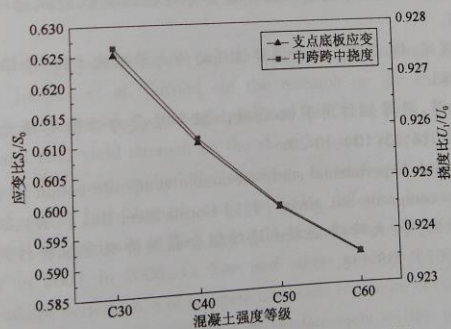


图7 钢箱组合梁桥内力及变形随混凝土强度等级变化

4 结 语

本文基于对 K146 + 177.763 阜城村 G211 分离立交桥进行实桥实时数据采集,建立考虑施工阶段的有限元全桥模型,通过有限元仿真计算与理论、实测结果对比分析,并对墩顶横梁内填充混凝土的重要变混凝土强度等级进行参数分析,得出以下几点结论:

- (1) 中等跨径钢-混凝土组合箱梁桥中支点处填充混凝土,可以参与结构受力,提高桥梁的整体刚度,降低了负弯矩区内结构的向上挠曲变形,但对主梁刚度的贡献并不明显。

(2)考虑墩顶填充混凝土效应对负弯矩区钢梁受力影响较大,可以有效的降低钢箱梁下翼缘的应力,提高钢箱梁的结构稳定性。

(3)改变墩顶横梁内混凝土强度等级,对钢箱组合梁桥内力及变形的影响幅度不大,考虑到施工的便捷性,墩顶填充混凝土宜与混凝土桥面板强度等级保持一致。

参考文献

- [1] 羊海林,郑艳,莫时旭.负弯矩区部分填充混凝土对窄幅钢箱-混凝土组合梁受力性能影响试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(11):131-139.
- [2] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等.抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J].土木工程学报,2015,48(04):7-14.
- [3] 刘永健,王康宁,刘彬,等.矩形钢管混凝土组合梁负弯矩区受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(09):74-83.
- [4] 欧阳政.钢-混凝土连续组合梁受力性能及负弯矩区开裂分析[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [5] HAMODA A,HOSSAIN K M A,SENNAH K,et al. Behaviour of composite high performance concrete slab on steel I-beams subjected to static hogging moment [J]. Engineering Structures,2017,140:51-65.
- [6] Lin W,YODA T,TANIGUCHI N. Application of SFRC in steel-concrete composite beams subjected to hogging moment [J]. J Constr Steel Res (UK),2014,101:175-183.
- [7] 周安,戴航,刘其伟.体内预应力钢纤维混凝土-钢组合梁负弯矩区抗裂及裂缝宽度试验研究[J].建筑结构学报,2007,28(03):82-90.
- [8] 梁心普.中支点顶升法控制钢混组合梁桥面板裂缝[J].科技创新与应用,2019,(09):115-117.
- [9] 朱家海.连续组合梁桥负弯矩区支点顶升施工受力研究[J].中外公路,2014,34(03):110-113.
- [10] 郑和晖,巫兴发,黄跃,等.钢-混组合连续梁负弯矩区桥面板抗裂措施[J].中外公路,2014,34(05):152-155.
- [11] 彭元诚,刘玉擎.大宁河特大桥钢-混组合连续梁负弯矩区受力特性模型试验研究[J].世界桥梁,2012,40(01):28-31.
- [12] 周安,戴航,刘其伟.钢箱-预应力混凝土组合梁负弯矩区结构性能试验研究[J].土木工程学报,2009,42(12):69-75.
- [13] 樊健生,聂建国,吴道闻.钢-混凝土组合梁弹性屈曲的力学性能[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(06):786-788.
- [14] 刘洋,童乐为,孙波,等.负弯矩作用下钢-混凝土组合梁受力性能有限元分析及受弯承载力计算[J].建筑结构学报,2014,35(10):10-20.
- [15] XU C,SU Q,WU C,et al. Experimental study on double composite action in the negative flexural region of two-span continuous composite box girder [J]. J Constr Steel Res (UK),2011,67(10):1636-1648.
- [16] 聂建国,李法雄,樊健生,等.大跨钢-混凝土连续组合箱梁桥双重组合作用[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(02):133-138.

Study on Shrinkage of Concrete with Multi Row Stud Connectors in Steel-concrete Composite Beams

Shuaishuai Zhang Laijun Liu Changjiang Yu Peiqi He
(School of Highway, Chang'an University)

Abstract To study the shrinkage performance of high strength concrete confined by studs, based on the