

引用本文:罗小烨,陈宝春,黄福云,等. 不同类型桩基支撑的整体桥力学性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(5):151-160.

LUO Xiao-ye, CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun, et al. Mechanical Property of Integral Bridge Supported by Different Types of Pile Foundations[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 151-160.

DOI:10.19815/j.jace.2019.12002

不同类型桩基支撑的整体桥力学性能

罗小烨¹, 陈宝春¹, 黄福云¹, 郭维强¹, 单玉麟¹, 庄一舟²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:以福建永春县上坂大桥作为工程背景建立了全桥有限元模型,通过实桥静载、动载试验对模型进行验证,并在整体式桥台下分别设置了矩形桩、圆形桩、预应力高强混凝土(PHC)管桩、钢管桩、H型钢桩、工型超高性能混凝土(UHPC)桩和工型 UHPC-矩形变截面桩,研究了整体桥采用不同类型桩基时对其整体力学性能的影响。结果表明:有限元模型的计算基频较实测值减小了 5.5%,第 1 阶模态均为横向侧飘,主梁在汽车偏载和中载作用下出现的竖向挠度与实测挠度较吻合,验证了有限元模型的合理性;随着整体温度的升高,不同类型桩基支撑的整体桥主梁和桩基最大正、负弯矩和剪力随之增大,主梁竖向挠度随之减小,梁端水平位移也呈现明显的增长趋势,但在相同温度荷载作用下,整体式桥台下设置不同类型桩基对梁端水平位移的影响很小;桩身显著变形区主要出现在 0~6.4D(D 为桩径)埋深处,在更大埋深处基本可忽略,表现出了柔性桩的变形性能;随着变截面桩的上部 UHPC 桩段抗弯刚度的增大,主梁最大正、负弯矩与桩身最大弯矩均显著增大,桩顶水平变形显著减小;随着上部 UHPC 桩段长度的增加,主梁最大正、负弯矩与桩身最大弯矩先呈现明显的增长趋势,而后趋于稳定,桩顶水平变形则先呈现明显减小趋势,随后趋于稳定;上部 UHPC 桩段长度一般取为桩基总长的 36%,对整体桥主梁和桩基的受力较好,为 UHPC 桩段的经济长度;温差小于 15℃时,整体桥采用不同类型桩基时对主梁和桩基的受力影响不大;随着温差继续增大,整体桥采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩或工型 UHPC-矩形变截面桩时主梁和桩基的受力性能更好。

关键词:整体桥;桩基;力学性能;动载试验;参数分析

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)05-0151-10

Mechanical Property of Integral Bridge Supported by Different Types of Pile Foundations

LUO Xiao-ye¹, CHEN Bao-chun¹, HUANG Fu-yun¹, GUO Wei-qiang¹,
SHAN Yu-lin¹, ZHUANG Yi-zhou²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: Yongchun Shangban bridge in Fujian province was selected as the engineering background and its finite element model was established. The calculation model was validated by

收稿日期:2019-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51578161,51778147);福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目(601897)

作者简介:罗小烨(1990-),男,福建龙岩人,工学博士研究生,E-mail:511731938@qq.com。

通信作者:黄福云(1979-),男,江西丰城人,研究员,博士研究生导师,工学博士,E-mail:Huangfuyun@fzu.edu.cn。

static and dynamic load tests on practical bridge, and then different types of pile foundations such as rectangle pile, circular pile, pre-stressed high-strength concrete (PHC) pipe pile, steel pipe pile, H-shaped steel pile, I-shaped ultra-high performance concrete (UHPC) pile and I-shaped UHPC-rectangular variable section pile were designed to support the integral abutment in the model, aiming to study the impact of different types of pile foundations on the overall mechanical properties of integral bridge. The results show that the calculated fundamental frequency of the finite element model is 5.5% lower than the measured value, and the first vibrating model is lateral drift. The vertical deflection of the main beam under the action of vehicle eccentric load and medium load is consistent with the measured deflection, which verifies the rationality of the finite element model. With the increase of the overall temperature, the maximum positive and negative bending moments and shear forces of the main beam and pile foundation of the integral bridge supported by different types of pile foundation increase, the vertical deflection of the main beam decreases, and the horizontal displacement of the beam end also shows an obvious growth trend. Under the same temperature load, different types of pile foundation under the integral abutment have little effect on the horizontal displacement of the beam end. The significant deformation area of pile body mainly occurs in 0-6.4D (D is pile diameter) buried depth, which can be ignored in larger buried depth, showing the deformation performance of flexible pile. With the increase of the bending rigidity of the upper UHPC section of the variable section pile, the maximum positive and negative bending moments of the main beam and the maximum bending moments of the pile shaft increase significantly, and the horizontal deformation of the pile top decreases significantly. With the increase of the length of the upper UHPC pile section, the maximum positive and negative bending moment of the main beam and the maximum bending moment of the pile body first show an obvious growth trend, and then basically tend to be stable, and the horizontal deformation of pile top first decreases and then tends to be stable. The length of the upper UHPC pile section is generally taken as 36% of the total length of the pile foundation, which is better for the overall bridge girder and pile foundation, and is the economic length of the UHPC pile section. When the temperature difference is less than 15 °C, the influence of different types of pile foundation on the stress of main beam and pile foundation is not significant. As the temperature difference continues to increase, when H-shaped steel pile, I-shaped UHPC pile or I-shaped UHPC rectangular variable section pile is used for the whole bridge, the mechanical performance of the main beam and pile foundation is better.

Key words: integral bridge; pile foundation; mechanical property; dynamic load test; parameter analysis

0 引言

整体式桥台无缝桥(简称整体桥)的上部结构与桥台、基础整体浇筑成一体,使其具有较好的整体性和耐久性,同时具有行车舒适和抗震性好等优点,相比传统有缝桥,整体桥受温度的影响较大。在日照温差和季节性温差影响下,主梁收缩膨胀引起的往复变形主要由桩基础承受,从而引起较为显著的桩-土相互作用^[1-4]。为此,通常要求整体桥采用柔性桩基础以最大限度地吸纳上部结构的温度变形。

目前,混凝土桩、H型钢桩、钢管桩、薄壁钢管混凝土桩等不同截面和材料类型的桩基都在整体桥中得到了应用。在英国、日本、韩国、加拿大等国家,H型钢桩被广泛应用于整体桥中,许多学者对其在整体桥中的应用也开展了大量研究^[5-9]。结果表明,H型钢桩具有较大的侧向强度和变形能力,可较好地应用于整体桥中。此外,也有部分国家修建的整体桥以混凝土桩或其他类型的桩基为主,如中国桥台基础以刚性扩大基础或混凝土桩基为主,修建的整体桥主要以混凝土桩基为主^[2,10-11],德国、瑞典及

欧洲其他大部分国家常采用现浇钢筋混凝土桩、预应力混凝土桩、外包钢管钢筋混凝土桩或钢管混凝土桩^[12]。对于钢筋混凝土桩、预应力混凝土桩和预应力高强混凝土(PHC)管桩等桩型在整体桥中的应用也展开了较多研究^[13-17]。研究认为混凝土桩的刚度较大,侧向变形能力有限,抗裂能力弱,仅可应用于较小跨度的整体桥中,若对其进行合理设计可有效改善混凝土桩的开裂能力,但需要在桩内布置更多的预应力钢筋,从而使整体桥的最大设计长度达到 200 m。近年来,新型材料超高性能混凝土(UHPC)快速发展,其具备高强度、高韧性、高耐久性和抗腐蚀等特性^[18-20],符合整体桥柔性桩基的受力特点,一些国内外学者对 UHPC 桩或 UHPC 材料与普通混凝土组合的变截面桩在整体桥中的应用也展开了相关研究^[21-23],结果显示 UHPC 桩及其相应的变截面桩能有效提高基础柔度,可适应整体桥纵桥向变形的需要,是一种适合中国国情、有发展前景的整体桥新型桩基。从大量研究可知,不同类型的桩基在整体桥中都具有一定程度的应用,然而大多数主要局限于单一类型桩基在整体桥中的应用研究,对于整体式桥台下设置不同类型桩基对整体桥力学性能的影响缺乏深入分析,通过进一步的对比研究,能更好地了解不同类型桩基支撑的整体桥受力差异。

为此,依托中国已修建的最长整体桥,建立全桥有限元模型,模型中在整体式桥台下分别设置了矩形桩、圆形桩、PHC 管桩、钢管桩、H 型钢桩、工型 UHPC 桩和工型 UHPC-矩形变截面桩等不同截面和材料类型的桩基,研究桥台下设置不同类型桩基对整体桥主梁和桩基受力性能的影响,并对新型 UHPC-矩形变截面桩的上部 UHPC 桩段长度和侧向抗弯刚度等参数进行分析,研究结果可为整体桥的设计和相關规范的制定提供参考。

1 工程背景

1.1 工程简介

福建永春县上坂大桥是中国代表性的整体式桥台桥梁,如图 1 所示。桥长 137.1 m,桥宽 8.5 m。该桥上部采用 4×30 m 预应力混凝土 T 梁,梁高 1.8 m,采用 C50 混凝土,按先简支后连续法进行施工。桥墩为双柱式钢筋混凝土结构,采用 C30 混凝土,墩底为扩大基础。桥台为钢筋混凝土整体式桥台,矩形扩孔桩基础,沿横桥向单排布置 4 根,均采用 C30 混凝土。公路等级为二级,设计荷载为汽-20、挂-100。

1.2 桩基设计

以原型矩形桩为基础,分别选取了国内外整体桥中已应用和开展过研究的桩基类型:矩形桩、圆形桩、PHC 管桩、钢管桩、H 型钢桩、工型 UHPC 桩和工型 UHPC-矩形变截面桩,如图 2 所示。

整体桥桩基础主要以弱轴向受力为主,采取了竖向承载力等强度和弱轴向等宽的原则确定其截面尺寸^[21]。工型 UHPC 桩采用抗压强度 130 MPa、弹性模量 43 GPa 的 UHPC130 材料^[19,24],其轴心抗压强度设计值 f_c 。根据文献^[22]进行计算,取值 54.35 MPa;根据现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[25]与《钢结构设计规范》(GB 50017—2017)^[26],矩形和圆形桩采用 C30 混凝土,轴心抗压强度设计值 f_c 为 14.3 MPa,弹性模量 E 为 30 GPa;钢管桩与 H 型钢桩采用 Q235 钢材,抗压强度设计值 f_c 为 215 MPa,弹性模量 E 为 206 GPa;PHC 管桩采用 C80 混凝土,轴心抗压强度设计值 f_c 为 35.9 MPa,弹性模量 E 为 38 GPa。工型 UHPC-矩形变截面桩分为上、下部分,上部分 3 m 段采用工型 UHPC 桩,下部分 9.6 m 段采用矩形截面桩。各桩基截面特性见表 1。

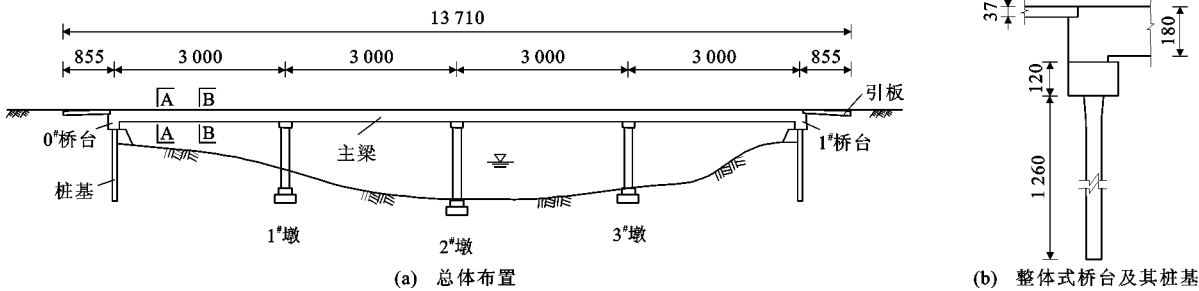


图 1 上坂大桥(单位:cm)
Fig. 1 Shangban Bridge (Unit:cm)

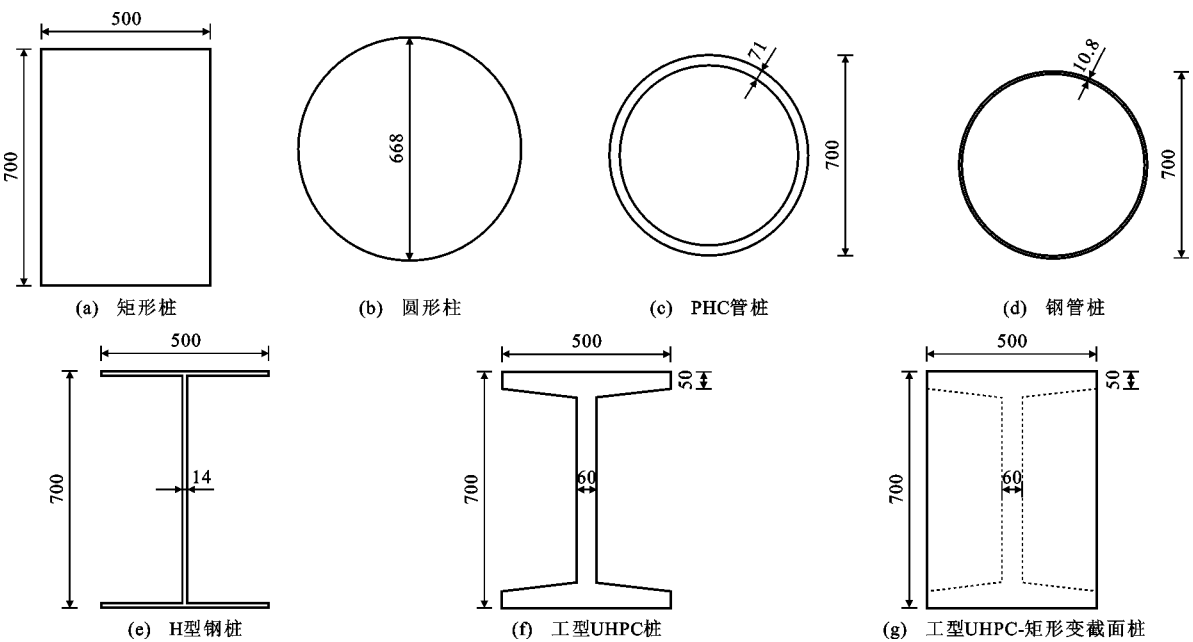


图 2 桩基截面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Section Dimensions of Pile Foundations (Unit:mm)

表 1 各类型桩基截面特性

Tab. 1 Section Characteristics of Some Types of Pile Foundations

桩基类型	抗压强度设计值/MPa	截面面积/ 10^4 mm^2	截面强度/ 10^5 kN	弱轴向受力宽度/mm	纵桥向抗弯刚度/ $(10^7\text{ N}\cdot\text{m}^4)$
矩形桩	14.30	35.00	50.05	700	21.90
圆形桩	14.30	35.05	50.12	668	29.30
PHC 管桩	35.90	14.03	50.37	700	26.70
钢管桩	215.00	2.34	50.31	700	28.60
H 型钢桩	215.00	2.34	50.31	700	6.01
工型 UHPC 桩	54.35	9.18	49.89	700	4.96
变截面桩	54.35	9.18	49.89	700	4.96

由表 1 可知:与原型桩相比,PHC 管桩的截面强度增幅最大,达 0.64%,圆形桩的弱轴向受力宽度降幅最大,达 4.6%,其误差均较小,说明 7 类等效桩基对整体桥力学性能的影响具有较高的可比性;此外,相比原型桩,H 型钢桩、工型 UHPC 桩和工型 UHPC-矩形变截面桩的纵桥向抗弯刚度分别减小了 72.6%,77.4%和 77.4%,而其余类型桩的纵向抗弯刚度均有所提高,最大提高了 33.8%。

2 有限元模型及验证

2.1 有限元模型

采用 MIDAS/Civil 软件建立上坂大桥全桥有限元模型,见图 3。主梁采用梁格法建模,T 梁、桥台、矩形桩与桥墩均采用杆系梁单元模拟,T 梁之间的横向连接采用虚拟横梁模拟。墩顶主梁支座为板式橡胶支座,通过弹性连接模拟。主梁、桥台及其桩基之间均采用固接。桥台桩底埋入中风化岩层不少

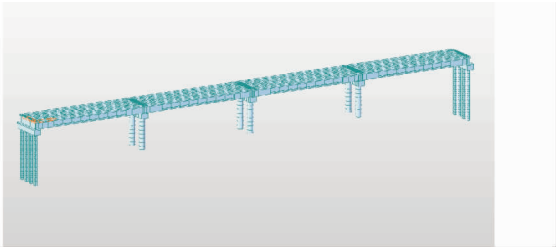


图 3 整体桥有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Integral Bridge

于 2.0 m,桥墩扩大基础埋入中风化岩层不少于 1.5 m,故桩底与墩底均采用固接。桥面铺装采用板单元模拟,模型中同时考虑了其自重的荷载作用和对结构刚度的贡献。全桥有限元模型共计 791 个单元和 619 个节点。

模型中考虑了结构-土相互作用,包括桩-土和桥台-土相互作用。原桥桩基周围采用扩孔形式填入松散砂性土,桩侧土采用线性土弹簧进行模拟,从

桩顶往下 12 m 部分以 0.5 m 为间隔进行单元划分,随后桩最底部单元以 0.6 m 为间隔。土弹簧刚度和桩基计算宽度 b_0 采用现行的《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[27] 中的 m 法进行计算,且砂土水平抗力系数的比例系数 m 值取为 $15\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-4}$,圆形桩的计算宽度 b_0 取 1.352 m,PHC 管桩和钢管桩的计算宽度 b_0 取 1.395 m,其余桩的计算宽度 b_0 取 1.550 m。台后土压力采用静止土压力和仅受压的非线性土弹簧(温升时按被动土压力计算,温降时按主动土压力计算)进行模拟,静止土压力与受压弹簧刚度计算可参见文献^{[28],[29]}。

2.2 模型验证

对上坂大桥分别开展了静载、动载试验,其中动载试验主要测试环境激励作用下桥梁的振动模态与频率 f ,静载试验主要测试汽车荷载作用下主梁的竖向变形值。对于静载试验,考虑结构对称性与整体桥的受力特点,选取边跨为测试段,测试截面为边跨 1/4,1/2 截面,即图 1 所示 A-A,B-B 截面。通过静载、动载试验结果对有限元模型进行验证,分别给出了实桥与有限元模型的动载(图 4)和静载(图 5)结果对比。

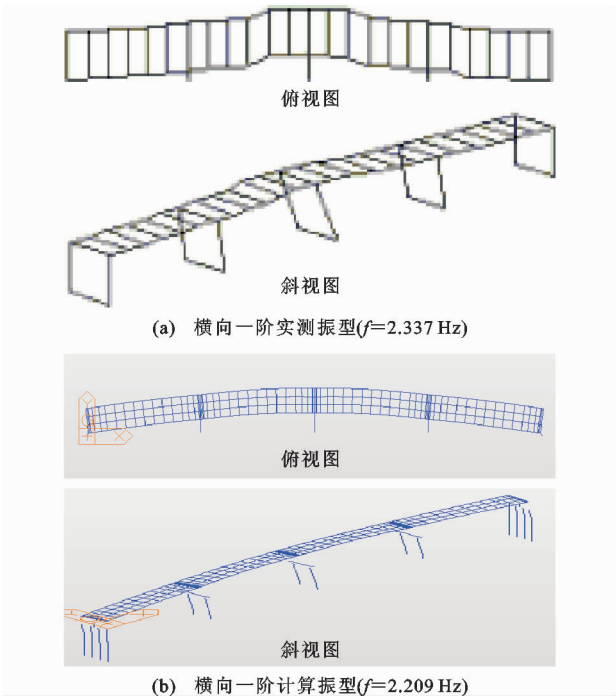


图 4 整体桥实测振型与计算振型

Fig. 4 Measured and Calculated Vibration Modes of Integral Bridge

由图 4 可知,一阶实测振型与计算振型均为横向侧飘,计算基频较实测基频减小了 5.5%,两者差

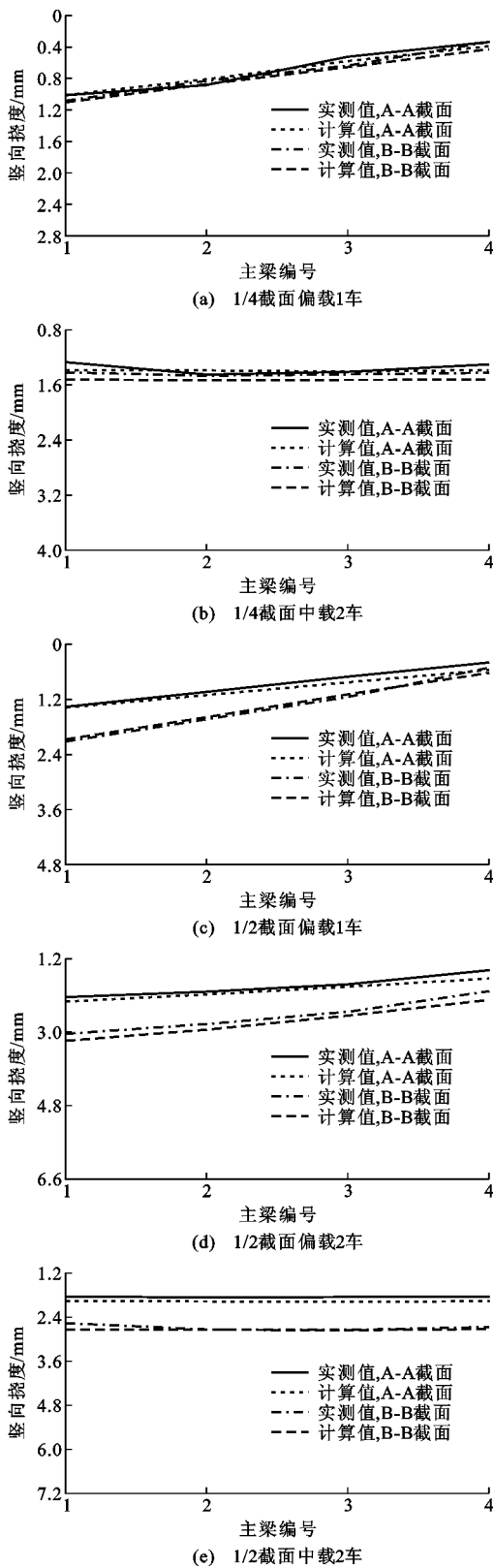


图 5 边跨 1/4,1/2 截面主梁竖向挠度实测值与计算值

Fig. 5 Measured and Calculated Vertical Deflections of Main Girders at 1/4 and 1/2 Side Spans

值较小,说明有限元模型较准确,可用于分析该桥梁的力学性能。

由图 5 可知,在汽车偏载和中载作用下,边跨 1~4 号梁 1/4,1/2 截面的竖向挠度实测值与计算值具有相同的变化规律,两者结果较吻合,进一步表明有限元模型能反映结构的受力情况。

3 整体桥力学性能分析

3.1 主梁受力性能分析

整体桥受温度的影响最为敏感,故研究中考考虑恒载与温度变化组合作用对整体桥受力性能的影响。考虑升、降温对结构受力的影响规律相似,数值相反,故在研究中仅考虑整体升温的影响,荷载工况为整体升温 0~45 ℃与恒载的组合作用。

图 6 给出了在不同荷载工况下,各类桩基支撑的整体桥主梁梁端与跨中的最大弯矩和剪力值(其中 DL+5 表示恒载和整体升温 5 ℃组合作用,其余以此类推)。由图 6 可知,在结构自重与温度荷载组合作用下,随着整体温度的升高,各类桩基支撑的整体桥梁端最大负弯矩、跨中最大正弯矩、梁端最大负剪力与跨内最大正剪力均呈现明显的增长。研究发现,采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩与工型 UHPC-矩形变截面桩支撑的整体桥主梁内力较为接近,而矩形桩、圆形桩、钢管桩与 PHC 管桩支撑的整体桥主梁内力较为接近。以 H 型钢桩支撑的整体桥主梁内力最小,受力最佳,而圆形桩支撑的整体桥主梁内力最大,受力最差,在恒载与整体升温 45 ℃组合作用下,后者的梁端负弯矩、跨中正弯矩、梁端剪力与跨中剪力分别较前者增大了 41.6%,5.2%,8.1%和 4.1%。因此,研究认为温差小于 15 ℃时,整体桥采用不同类型桩基对主梁受力的影响不大;随着温差继续增大,整体桥采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩或工型 UHPC-矩形变截面桩时,其主梁可表现出更好的力学性能。

主梁热胀冷缩引起的梁端水平位移主要由桥头引板、桥台及其桩基础承受,其中大部分变形主要由桩基础承受,而小部分变形主要通过桥头引板传递至接线路面处,因此梁端水平位移也是整体桥受力的重点关注问题之一。图 7 分析了整体升温 0~45 ℃与恒载组合作用下的梁端水平位移和主梁竖向挠度。由图 7 可知,在结构自重与整体升温 0~45 ℃组合作用下,各类桩基支撑的整体桥梁端水平位移呈现增长趋势,而主梁竖向挠度呈现减小趋势。在相同荷载工况作用下,各类桩基支撑的整体桥梁端水平位移较为接近。研究表明,采用不同类型桩基对整体桥梁端水平变形的影响不大。此外,由图 7

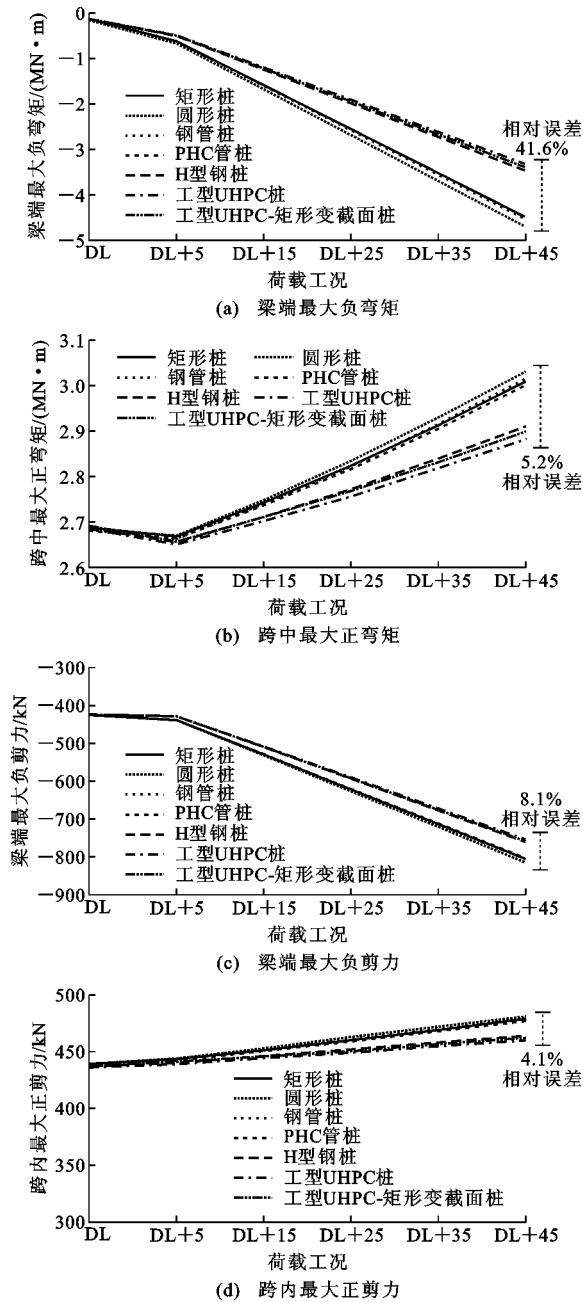


图 6 恒载与整体升温组合作用下的主梁内力
Fig. 6 Internal Forces of Main Girders Under Combination of Dead Load and Uniform Temperature Rise

还可知,在恒载与整体升温 45 ℃的组合作用下,H 型钢桩支撑的整体桥主梁竖向挠度最小,而圆形桩支撑的整体桥主梁竖向挠度最大,后者较前者增大了 5.6%。采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩或工型 UHPC-矩形变截面桩作为整体桥桩基可有效改善主梁的竖向变形性能。

3.2 桩基受力性能分析

在温度荷载作用下,整体桥桩基将产生较大的水平往复变形,通常要求采用柔性桩基以吸纳上部

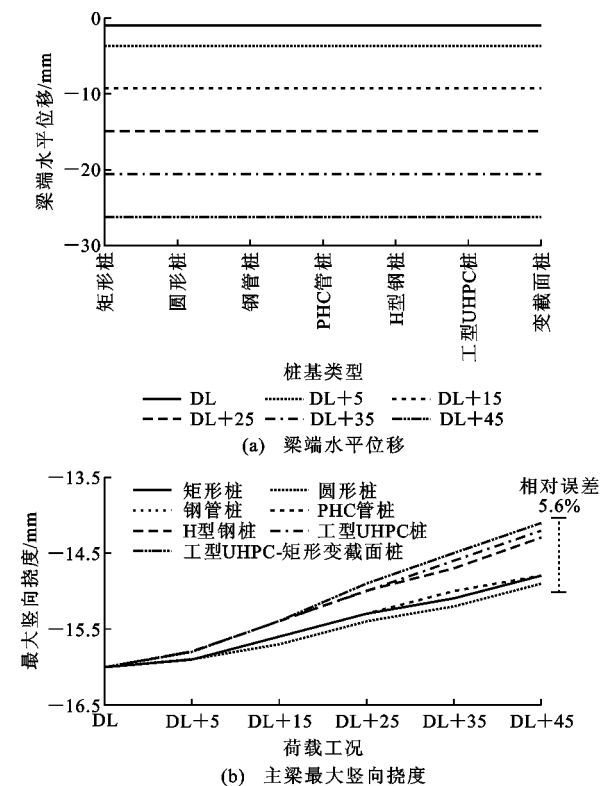


图 7 恒载与整体升温组合作用下的主梁变形性能
Fig. 7 Deformation Behaviors of Main Girders Under Combination of Dead Load and Uniform Temperature Rise

结构引起的变形,是整体桥最为薄弱的受力部位之一。因此,考虑恒载与整体升温 $0\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组合作用下,对整体桥不同类型桩基的受力性能展开研究。

图 8 给出了恒载与整体升温 $0\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组合作用下整体桥桩基的弯矩和剪力。由图 8 可知,考虑结构自重作用下,随着整体温度的升高,桩基最大正、负弯矩和剪力增大。H 型钢桩、工型 UHPC 桩与工型 UHPC-矩形变截面桩的桩身弯矩和剪力较小且较为接近,受力性能较优,而矩形桩、圆形桩、钢管桩与 PHC 管桩的桩身弯矩和剪力增长较快,桩基受力较大。由图 8 还可知,圆形桩的桩身最大正、负弯矩和正、负剪力分别较 H 型钢桩增大了 96.3%, 153.8%, 56.6% 和 93.2%。当温差较大时,整体桥采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩或工型 UHPC-矩形变截面桩可显著改善桩基的受力性能。

在恒载与整体升温 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组合作用下,整体桥的桩基受力显著,故图 9(a) 仅给出整体桥桩基在恒载与整体升温 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组合作用下沿埋深方向的水平变形,图 9(b) 则给出了在恒载与整体升温 $0\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组合作用下的整体桥桩顶水平位移。通过研究发现,

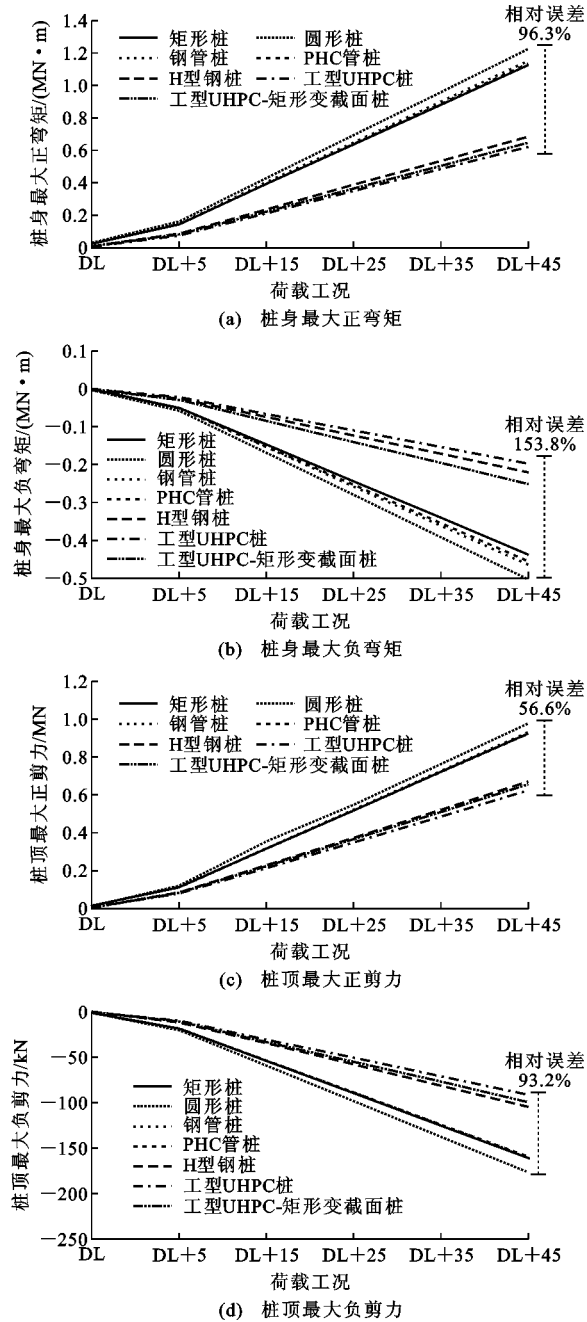


图 8 恒载与整体升温组合作用下的桩基内力
Fig. 8 Internal Forces of Pile Foundations Under Combination of Dead Load and Uniform Temperature Rise

在恒载与整体升温 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组合作用下桩身基本在埋深 $0\sim 6.4D$ ($0\sim 4.48\text{ m}$, D 为 700 mm) 范围内产生了显著的变形,大于 $6.4D$ 埋深以后桩基变形基本可忽略,表现出了柔性桩的变形性能。此外, H 型钢桩、工型 UHPC 桩与工型 UHPC-矩形变截面桩的桩顶变形明显更大,总体较矩形桩、圆形桩、钢管桩与 PHC 管桩增大了 13.7%,表现出更好的侧向变形能力。

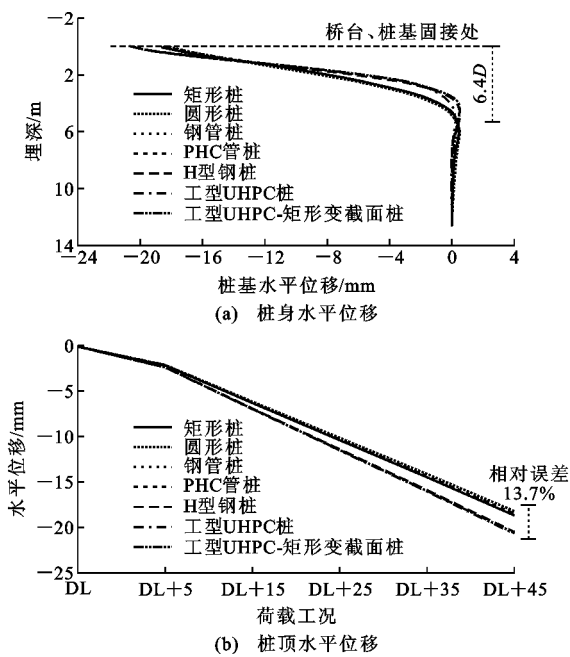


图 9 恒载与整体升温组合作用下的桩基变形性能
Fig. 9 Deformation Behaviors of Pile Foundations Under Combination of Dead Load and Uniform Temperature Rise

4 参数分析

通过研究可知,整体桥采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩与工型 UHPC-矩形变截面桩可有效改善主梁和桩基的受力性能。目前,H 型钢桩已大量应用在整体桥中,但其仍存在打桩困难且易屈曲、易腐蚀等问题。UHPC 作为一种具有高强度、高韧性、抗腐蚀等优点的新型材料,符合整体桥桩基的受力特点。为此,一种新型的整体桥 UHPC 桩基或 UHPC 与普通混凝土相结合的变截面桩被提出。整体桥桩基的侧向变形主要集中于桩基上段部分,桩基下段部分的变形较小,在桩基上段部分采用 UHPC 材料可减小桩基截面,提高其侧向变形能力,桩基下段部分采用普通混凝土矩形截面,主要起到竖向承载的作用。因此,整体桥采用 UHPC-矩形变截面桩可有效地发挥 2 种材料的特性。

为了进一步探讨 UHPC-矩形变截面桩在整体桥中的受力优势,分别开展桩基上部 UHPC 桩身与桩基下部矩形桩身的截面弱轴向抗弯刚度比、桩基上部 UHPC 桩长等参数分析。由表 1 可知,文中采用的 UHPC 桩段与矩形桩段的抗弯刚度比值为 0.23,在此基础上分别取两者刚度比为 0.13,0.23,0.33,0.63,0.93。UHPC 桩节段长 3 m,与桩基全长 12.60 m 的比值为 0.24,故分别选取了 UHPC 桩段长与桩基总长之比 0.12,0.24,0.36,0.48,

0.74,1.00 作为分析参数。图 10 和图 11 分别给出了在恒载与整体升温 45℃ 组合作用下整体桥的主梁和桩基受力性能。

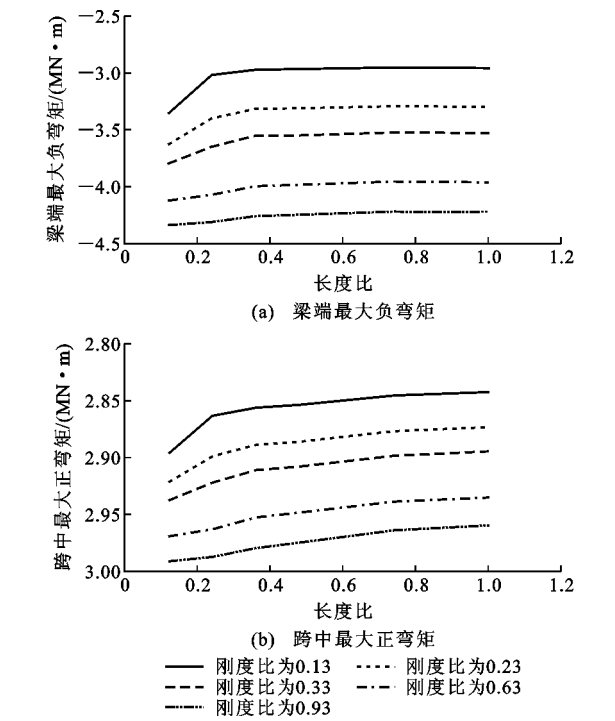


图 10 恒载与整体升温 45 °C 组合作用下的主梁弯矩
Fig. 10 Bending Moments of Main Girders Under Combination of Dead Load and Uniform Temperature Rise 45 °C

由图 10 和图 11 可知,变截面桩的 UHPC 桩段长度与侧向抗弯刚度对整体桥主梁和桩基受力的影响较大,主梁梁端最大正弯矩、跨内最大负弯矩与桩身最大弯矩均随着侧向抗弯刚度的增大而显著增大,桩顶水平变形则显著减小。然而,随着 UHPC 桩段长度的增大,主梁梁端最大正弯矩、跨内最大负弯矩与桩身最大弯矩首先出现明显的增长,而后基本趋于稳定状态,相反桩顶水平变形则先出现明显减小,随后趋于稳定。此外,UHPC 桩段长度取为桩基总长的 36%(4.54 m)时对于整体桥主梁与桩基的受力均较好,这与图 9(a)显示的桩基显著变形区 0~6.4D(0~4.48 m)较为吻合,也是 UHPC 桩段的经济长度。

5 结语

(1)上坂大桥有限元模型的计算基频较实测值减小了 5.5%,一阶模态均为横向侧飘,主梁分别在汽车偏载和中载作用下的竖向挠度与实测挠度较吻合,验证了有限元模型的合理性。

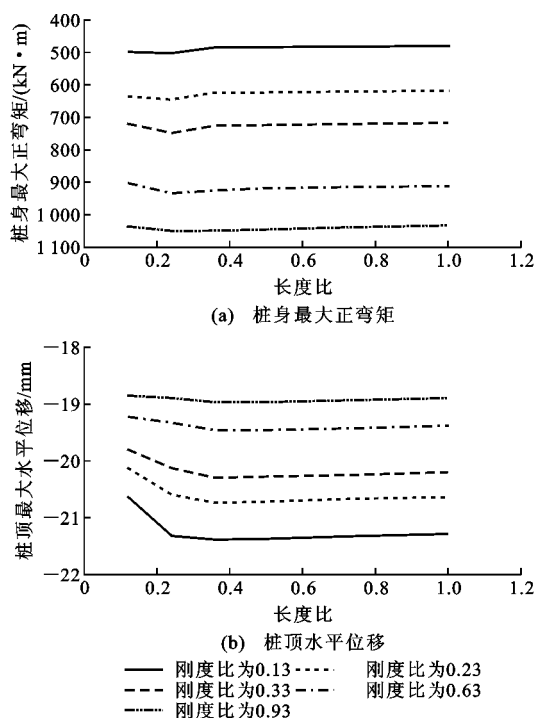


图 11 恒载与整体升温 45 °C 组合作用下的桩基变形性能

Fig. 11 Deformation Behaviors of Pile Foundations Under Combination of Dead Load and Uniform Temperature Rise 45 °C

(2) 随着整体温度的升高, 各类桩基支撑的整体桥主梁最大正、负弯矩和剪力随之增大, 梁端水平位移也呈现显著增长趋势, 而主梁竖向挠度随之减小; 在相同荷载工况下, 采用不同类型桩基对整体桥梁梁端水平的影响很小。

(3) 温差小于 15 °C 时, 整体桥采用不同类型桩基对其主梁和桩基的受力性能影响不大; 随着温差继续增大, 整体桥采用 H 型钢桩、工型 UHPC 桩或工型 UHPC-矩形变截面桩时, 其主梁和桩基表现出了更好的受力性能。

(4) 随着温度的升高, 桩基的最大正、负弯矩和剪力呈现显著增大, 桩顶水平变形也呈现明显增长; 桩身基本在埋深 0~6.4D 范围内出现较大变形, 在更大埋深处基本可忽略, 表现出了柔性桩的变形性能。

(5) 随着变截面桩的上部 UHPC 桩段抗弯刚度的增大, 主梁最大正、负弯矩与桩身最大弯矩显著增大, 而桩顶水平变形显著减小; 随着上部 UHPC 桩段长度的增加, 主梁最大正、负弯矩与桩身最大弯矩首先出现明显的增长, 而后基本趋于稳定, 相反桩顶水平变形先出现明显减小, 随后趋于稳定。UHPC 桩段一般取为桩基总长的 36% 时, 对整体桥主梁和

桩基的受力较好, 也是 UHPC 桩段的经济长度。

参考文献:

References:

- [1] WASSERMAN E P, WALKER J H. Highway Structures Design Handbook[M]. Chicago: American Iron and Steel Institute, 1996.
- [2] 陈宝春, 庄一舟, 黄福云, 等. 无伸缩缝桥梁[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2019.
CHEN Bao-chun, ZHUANG Yi-zhou, HUANG Fu-yun, et al. Jointless Bridges[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [3] ERHAN S, DICLELI M. Effect of Dynamic Soil-bridge Interaction Modeling Assumptions on the Calculated Seismic Response of Integral Bridges[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66: 42-55.
- [4] 许震, 罗小焯, 陈宝春, 等. 均匀温度下多跨半刚接整体桥受力性能[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2019, 47(5): 669-674, 682.
XU Zhen, LUO Xiao-ye, CHEN Bao-chun, et al. Mechanical Performance of Multi-span Semi-rigid Integral Bridge Under Uniform Temperature[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2019, 47(5): 669-674, 682.
- [5] AZIZINAMINI A, YAKEL A, SHERAFATI A, et al. Flexible Pile Head in Jointless Bridges: Design Provisions for H-piles in Cohesive Soils[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3): 04015064.
- [6] OESTERLE R G, TABATABAI H, LAWSON T J, et al. Jointless and Integral Abutment Bridges: Analytical Research and Proposed Design Procedures[R]. Washington DC: FHWA, 2002.
- [7] LAFAVE J M, FAHNESTOCK L A, JARRETT M W, et al. Numerical Simulations and Field Monitoring of Integral Abutment Bridges[C]//INGRAFFEA N, LIBBY M. American Society of Civil Engineers Structures Congress. Portland, Oregon, 2015: 561-572.
- [8] CIVJAN S A, BONCZAR C, BRENA S F, et al. Integral Abutment Bridge Behavior: Parametric Analysis of a Massachusetts Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(1): 64-71.
- [9] DICLELI M. Analytical Prediction of Thermal Displacement Capacity of Integral Bridges Built on Sand[J]. Advances in Structural Engineering, 2005, 8(1): 15-30.
- [10] 陈宝春, 付鑫, 庄一舟, 等. 中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 87-95.

- CHEN Bao-chun, FU Cui, ZHUANG Yi-zhou, et al. Application Status and Development Strategy of Jointless Bridge in China[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1): 87-95.
- [11] 吴庆雄, 刘钰薇, 江越胜, 等. 墩梁半刚性连接的钢-混组合梁整体桥设计[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 101-106.
- WU Qing-xiong, LIU Yu-wei, JIANG Yue-sheng, et al. Design of Integral Bridge with Steel-concrete Composite Girder Connected by Semi-rigid Joint[J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 101-106.
- [12] WHITE H, PETURSSON H, COLLIN P. Integral Abutment Bridges: The European Way[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2010, 15(3): 201-208.
- [13] KONG B, CAI C S, ZHANG Y. Parametric Study of an Integral Abutment Bridge Supported by Prestressed Precast Concrete Piles[J]. Engineering Structures, 2016, 120: 37-48.
- [14] GAMA D, DE ALMEIDA J F. Concrete Integral Abutment Bridges with Reinforced Concrete Piles[J]. Structural Concrete, 2014, 15(3): 292-304.
- [15] KAMEL M R, BENAK J V, TADROS M K, et al. Prestressed Concrete Piles in Jointless Bridges[J]. PCI Journal, 1996, 41(2): 56-67.
- [16] BURDETTE E G, HOWARD S C, TIDWELL J B, et al. Lateral Load Tests on Prestressed Concrete Piles Supporting Integral Abutments[J]. PCI Journal, 2004, 49(5): 70-77.
- [17] 庄一舟, 黄福云, 钱海敏, 等. PHC 管桩-土相互作用受力性能拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 42-51, 71.
- ZHUANG Yi-zhou, HUANG Fu-yun, QIAN Hai-min, et al. Pseudo-static Research on Mechanic Behavior of PHC Piles with Soil-pile Interaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 42-51, 71.
- [18] 陈宝春, 季 韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- CHEN Bao-chun, JI Tao, HUANG Qing-wei, et al. Review of Research on Ultra-high Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24.
- [19] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A Review on Ultra High Performance Concrete: Part II. Hydration, Microstructure and Properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377.
- [20] BRUHWILER E, DENARIE E. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4): 450-457.
- [21] 陈宝春, 陈国栋, 苏家战, 等. 采用 UHPC-RC 阶梯桩的整体桥试设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(1): 1-8.
- CHEN Bao-chun, CHEN Guo-dong, SU Jia-zhan, et al. Trial-design Study on Integral Abutment Bridge by Using UHPC-RC Stagewise Piles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(1): 1-7.
- [22] 戴沂新. 整体桥 H 型 UHPC 桩基本结构受压性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- DAI Yi-xin. Experimental Research on the Compressive Properties of H-shaped UHPC Columns Piles in Integral Abutment Bridge[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [23] NG K W, GARDER J, SRITHARAN S. Investigation of Ultra High Performance Concrete Piles for Integral Abutment Bridges[J]. Engineering Structures, 2015, 105: 220-230.
- [24] 陈宝春, 黄卿维, 王远洋, 等. 中国第一座超高性能混凝土 (UHPC) 拱桥的设计与施工[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 67-71.
- CHEN Bao-chun, HUANG Qing-wei, WANG Yuan-yang, et al. Design and Construction of the First Ultra-high Performance Concrete (UHPC) Arch Bridge in China[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(1): 67-71.
- [25] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [26] GB 50017—2017, 钢结构设计规范[S].
- GB 50017—2017, Code for Design of Steel Structures [S].
- [27] JTG 3363—2019, 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- JTG 3363—2019, Specifications for Design of Foundation of Highway Bridges and Culverts[S].
- [28] DAVID T K, FORTH J P, YE J. Superstructure Behavior of a Stub-type Integral Abutment Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(6): 04014012.
- [29] KIM W, LAWMAN J A. Integral Abutment Bridge Response Under Thermal Loading [J]. Engineering Structures, 2010, 32(6): 1495-1508.