

文章编号:1673-2049(2018)01-0001-08

采用 UHPC-RC 阶梯桩的整体桥试设计

陈宝春¹, 陈国栋¹, 苏家战¹, 林上顺², 薛俊青¹, TABATABAI Habib³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
3. 威斯康星大学 土木工程系, 威斯康星 密尔沃基 53202)

摘要:为了增大桥台基础柔度, 适应整体桥纵桥向变形需要, 提出了上部采用超高性能混凝土 (UHPC) 材料、下部采用普通混凝土 (RC) 材料的 UHPC-RC 阶梯桩, 进行了这种新型桩基整体桥的试设计, 在桩顶 3 m 范围内用截面尺寸为 30 cm×30 cm 的 UHPC 代替原来的 70 cm×50 (70) cm 普通混凝土, 并采用 MIDAS 软件建立了全桥空间有限元模型。研究表明: 恒载作用下, 试设计桥梁端负弯矩相比于原桥明显减小; 在偏载和中载作用下, 试设计桥主梁在桥台处的负弯矩分别减小 14.2% 和 22.8%; 整体降温作用下, 主梁的轴力和弯矩均都有显著减小, 桩身的最大剪力和最大弯矩出现在桩顶位置, 分别减小 52.2%, 59.8%; 在整体升温作用下, 桥台的最大剪力和最大弯矩出现在桥台顶部位置, 分别减小 32.6%, 45.8%; UHPC-RC 阶梯桩是一种适合中国国情、有发展前景的无缝桥桩基新结构。

关键词:试设计; UHPC-RC 阶梯桩; 整体桥; 桩-土相互作用

中图分类号: U443.1 **文献标志码:** A

Trial-design Study on Integral Abutment Bridge by Using UHPC-RC Stagewise Piles

CHEN Bao-chun¹, CHEN Guo-dong¹, SU Jia-zhan¹, LIN Shang-shun²,
XUE Jun-qing¹, TABATABAI Habib³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350118, Fujian, China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China; 3. Department of Civil Engineering, The University of Wisconsin, Milwaukee 53202, Wisconsin, America)

Abstract: A UHPC-RC stagewise pile with ultra high performance concrete (UHPC) was proposed to increase the flexibility of the foundation and adapt to the longitudinal deformation of the integral bridge. The trial-design of integral abutment bridge employing such a new kind pile was performed. In the top 3 m of the pile, UHPC with 30 cm×30 cm section was used to instead of the original 70 cm×50 (70) cm RC. The finite element model of the whole bridge was established by using MIDAS software. The study results show that negative bending moment at the end of the beam in the trial-design bridge is obviously reduced compared to the original bridge under dead load. The negative bending moments decrease about 14.2% and 22.8% respectively under offset load and central load. When the temperature drops, the axial force and bending moment of beam are significantly reduced. The maximum shear force and bending moment of the pile occur at the top of the pile, and they decrease about 52.2%, 59.8%, respectively. When the

收稿日期: 2017-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578161); 福州市科技局市校合作项目 (2016-G-62)

作者简介: 陈宝春 (1958-), 男, 福建罗源人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn。

temperature rises up, the maximum shear force and bending moment of the abutment appear at the top of the abutment, and decrease by 32.6% and 45.8%, respectively. Trial-design study indicates that UHPC-RC stagewise pile is a new type pile which is suitable to be used in integral bridge in China.

Key words: trial-design; UHPC-RC stagewise pile; integral abutment bridge; soil-pile interaction

0 引言

无缝桥常用的桥型有整体桥、半整体桥和延伸桥面板桥 3 种。在 3 种无缝桥中,整体桥取消了伸缩缝、伸缩装置和支座,因此整体性与耐久性均最好^[1],在国外应用最多,而在中国应用极少。文献[2]调查表明,截至 2016 年 4 月中国已建和在建的整体桥仅 4 座,占所有无缝桥(共 40 座)的 10%。美国 2004 年调查结果显示,已建的整体桥约有 9 000 座,占所有无缝桥(16 900 余座)的 53.3%^[3]。

整体桥要求桥台基础为柔性结构,美国整体桥桥台桩基多采用 H 型钢桩,因其存在钢锈蚀、价格高、打入时遇到岩石易屈曲破坏等缺点,在中国较少使用。中国常用的混凝土桩在整体桥中应用时因其刚度较大、变形能力较差,而导致上部结构和桩基受力较大,影响了整体桥的推广应用^[4]。

为此,提出了采用超高性能混凝土(UHPC)桩与普通混凝土(RC)桩相结合的阶梯桩构思。具体来说,桩上半部分为 UHPC 材料,利用其具有超强抗压强度和一定抗拉强度的特点,可采用较小截面,减小其刚度,增大其变形能力,以适应整体桥纵桥向变形的需要;桩的下半部仍为混凝土材料,承受轴向力为主,发挥原有混凝土桩(摩擦桩、端承桩、嵌岩桩)的作用,称这种桩为 UHPC-RC 阶梯桩。将这种阶梯桩应用于整体桥,既保持了混凝土桩的经济性,适合中国的国情,又能为无缝桥提供一种新的桩基形式,满足其需要较大纵桥向变形的需求。

UHPC 是以细砂为骨料,以水泥和活性矿物掺合料为胶凝材料,并加入高效外加剂和高强度微细钢纤维,形成的一种高强度、高密实度、高耐久性和高韧性的水泥基材料,在土木工程中有着广阔的应用前景^[5]。然而,作为新材料,受认识、造价、技术成熟度等因素影响,大面积推广应用还需要一段时间。由于材料用量不大、功能作用明显,将 UHPC 应用于阶梯桩中更易于取得良好的推广效果。

为探讨整体桥采用 UHPC-RC 阶梯桩的可行性,本文进行了试设计研究。以上坂大桥为背景工程,进行了 UHPC-RC 阶梯桩的试设计,建立了该

桥的有限元模型并进行了设计计算和结构验算,重点考察了试设计桥与原桥内力的变化,为进一步研究 UHPC-RC 阶梯桩提供基础资料。

1 试设计

上坂大桥是一座预应力混凝土 T 梁整体桥,位于福建省永春县,总体布置如图 1 所示。该桥上部结构采用 4×30 m 连续 T 梁,全长 137.1 m,主梁高 1.8 m,桥面宽 8.5 m(净 7.5 m+2×0.5 m)。上部结构沿横桥向布置 4 片 T 梁。T 梁之间采用湿接缝连接。桥墩采用双柱式桥墩和扩大基础,桥墩与上部结构采用板式橡胶支座连接。该桥的设计荷载等级为汽-20 级、挂-100 级。上坂大桥于 2004 年 1 月建成通车,目前全桥运行状况依然良好,因无伸缩缝与支座,十几年来几乎不需要养护维修,充分显示了整体桥少维护、免维护的优越性。

该桥采用整体式桥台,主梁与桥台连接处固接,不设置伸缩缝,桥台采用刚性矮桥台和挖孔桩基础。为了承担上部结构纵桥向温差等引起的变形,桥台桩基础采用单排 4 根沿弱轴弯曲的矩形柱桩,截面尺寸为 70 cm×50 cm。在桩顶 1 m 范围内柱桩的尺寸由 70 cm×50 cm 变化到 70 cm×70 cm,以避免桩、台连接处的刚度变化过大而在连接处产生裂缝。矩形桩采用 C30 混凝土,桩身全长 12.6 m。由于柱桩埋入凝灰岩层 6 m,为增大下部结构柔度,施工时采用挖孔桩方式,在桩土间填入松散砂性土,确保矩形桩具有一定的自由变形能力。桥台-桩节点构造如图 2 所示。

试设计桥仅修改原桥桥台桩基为阶梯桩,其余结构与原桥相同,桩基周围采用与原桥相同的挖孔桩形式填入松散砂性土来满足其下部结构的柔度。原桥桩截面尺寸为 70 cm×50 cm,材料采用 C30 混凝土(抗压强度为 30 MPa,弹性模量为 30 GPa),试设计桥桩材料采用 C130 的 UHPC(抗压强度为 130 MPa,弹性模量为 43 GPa)^[6-7],根据竖向承载力等强度计算原则,试设计桩截面尺寸拟采用 30 cm×30 cm 的方形截面。

阶梯桩的上部为 3 m 长的方形截面 UHPC 桩,

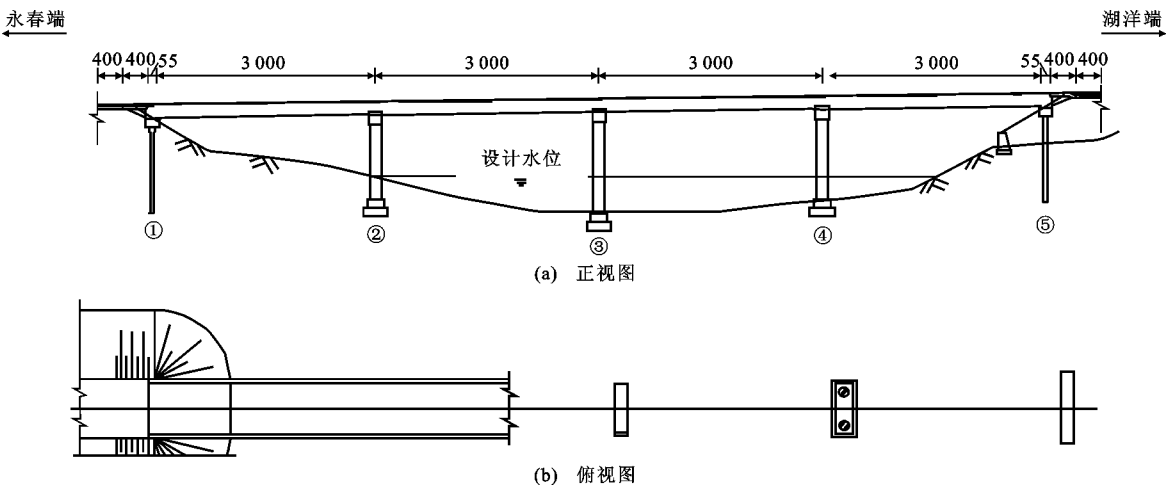


图 1 上板大桥总体布置(单位:cm)
Fig. 1 General Arrangement of Shangban Bridge (Unit:cm)

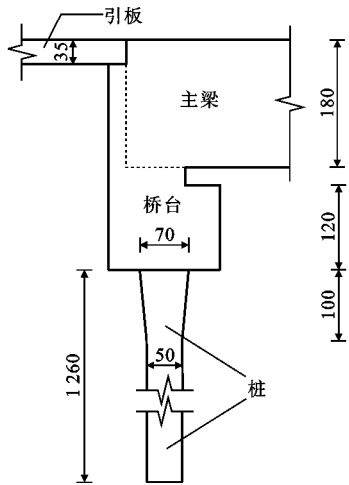


图 2 上板大桥桥台-桩节点构造(单位:cm)
Fig. 2 Joint Structure of Abutment and Pile in Shangban Bridge (Unit:cm)

下部为 9.6 m 长的矩形截面 RC 桩,与原桥相同。原桥和试设计桥的桩截面尺寸比较见图 3。

RC 桩段的配筋与原桥相同,见图 4,UHPC 桩段的配筋如图 5 所示。根据计算可得,试设计桩的柔度是原桥桩的 2.65 倍,两者相差较大。

2 有限元模型

2.1 模型概述

采用 MIDAS 软件建立原桥和试设计桥的有限元空间梁格模型,见图 6,原桥具有对称性,故仅显示半桥模型。模型中 T 梁、桥台、桩以及桥墩皆用梁单元模拟,T 梁之间的横向湿接缝用虚拟横梁模拟。虚拟横梁使用了 6 种不同宽度的矩形截面,横隔板采用梯形截面,虚拟横梁和横隔板共同构成了桥梁的横向连接。横隔梁材料采用不计质量的 C50

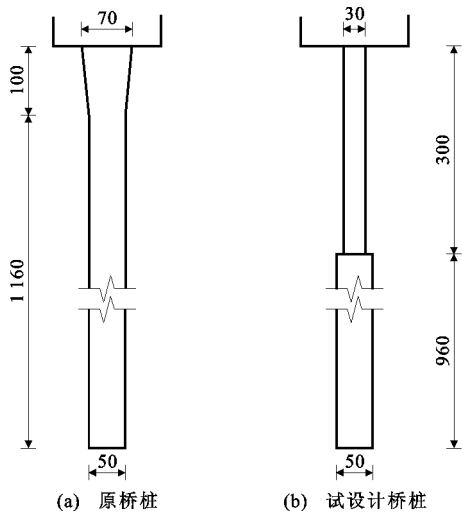


图 3 原桥和试设计桥的桩截面尺寸比较(单位:cm)
Fig. 3 Comparison of Pile Section Sizes of Original Bridge and Trial-design Bridge (Unit:cm)

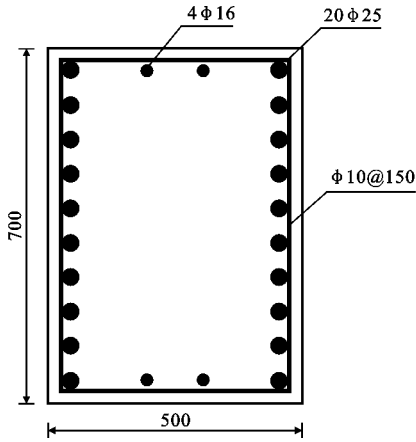


图 4 RC 桩段配筋(单位:mm)
Fig. 4 Reinforcement of RC Pile Section (Unit:mm)

混凝土材料。主梁支座为板式橡胶支座,故模型中

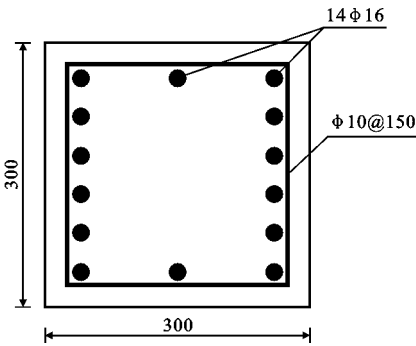
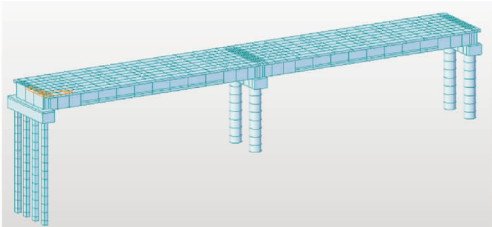
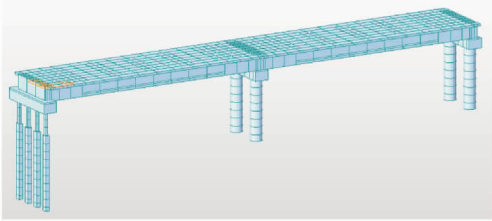


图 5 UHPC 桩段配筋 (单位:mm)

Fig. 5 Reinforcement of UHPC Pile Section (Unit:mm)



(a) 原桥



(b) 试设计桥

图 6 原桥与试设计桥的有限元模型 (半桥长)

Fig. 6 Finite Element Models of Original Bridge and Trial-design Bridge (Half Bridge)

采用弹性连接模拟,通过支座刚度计算公式可得支座的剪切刚度取值为 $2.67\times10^3\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。由于整体桥桥台与主梁完全固接在一起,因此有限元模型中采用刚性连接进行模拟。桥台桩基础底部埋入中风化岩层不少于 2 m ,桥墩底部扩大基础埋入中风化岩层不少于 1.5 m ,因此桩底与桥墩底皆采用

表 2 边跨跨中实测挠度值与有限元计算值比较

工况	1/4 跨偏载 1 车			1/4 跨中载 2 车			1/2 跨偏载 1 车			1/2 跨偏载 2 车			1/2 跨中载 2 车		
	w_m/mm	w_l/mm	$E/\%$	w_m/mm	w_l/mm	$E/\%$	w_m/mm	w_l/mm	$E/\%$	w_m/mm	w_l/mm	$E/\%$	w_m/mm	w_l/mm	$E/\%$
1 号梁	1.09	1.17	7.3	1.42	1.52	7.0	2.11	2.25	6.6	3.03	3.27	7.9	2.65	2.76	4.2
2 号梁	0.83	0.89	7.2	1.47	1.56	6.1	1.64	1.76	7.3	2.80	2.87	2.5	2.73	2.84	4.0
3 号梁	0.64	0.68	6.3	1.45	1.56	7.6	1.14	1.21	6.1	2.50	2.56	2.4	2.74	2.84	3.6
4 号梁	0.34	0.36	5.9	1.42	1.52	7.0	0.52	0.55	5.8	1.98	2.12	7.1	2.67	2.76	3.4

从表 2 可以看出,有限元模型的挠度计算值与原桥实测值相对误差均不超过 10% ,说明本文采用的有限元模型能较准确地模拟静力荷载下的受力性

能,可用于设计计算。

固接模拟。原桥有限元模型共 515 个节点和 687 个单元,试设计桥有限元模型节点数、单元数与原桥相同。

本模型考虑了桩-土相互作用和桥台-土相互作用。采用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD63—2007)^[8]中的 m 法来模拟挖孔桩侧的松散砂性土,桩侧土采用线性土弹簧,即假设桩身任一截面所受的横向弹性土抗力和该截面处的侧向位移成正比^[8]。桩周采用挖孔桩形式填入松散砂性土,依据规范要求:当土质为细沙、中砂、中密粉土时,土水平抗力系数的比例系数值取为 $10\ 000\sim20\ 000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-4}$,为稳妥考虑,取 $15\ 000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-4}$ 。有限元模型中桥台后填土土压力计算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)来模拟^[9-22]。为了更精确地模拟桥梁的实际受力情况,将模型划分为 3 个主要的施工阶段:简支阶段、连续阶段、成桥阶段。

2.2 原桥的模型验证

文献[23]对原桥进行了静动载试验,表 1 给出了实测频率与本文模型计算频率的比较。由表 1 可知,前几阶频率的相对误差均小于 10% ,说明该有限元模型较为准确,可以用来分析桥梁的结构性能。

表 1 原桥频率实测值与计算值比较

Tab. 1 Comparison Between Measured Values and Calculated Values of Frequency of Original Bridge

振型	实测频率/Hz	计算频率/Hz	相对误差/%
横向一阶	2.337	2.516	7.7
横向二阶	4.092	3.707	-9.4
竖向一阶	4.686	4.465	-4.7
竖向二阶	5.812	5.326	-8.4
竖向三阶	7.337	7.570	3.2

表 2 给出了 5 种工况下上部结构边跨跨中截面主梁挠度实测值 w_m 与有限元计算值 w_l ,以及两者的相对误差 E 。

通过考虑表 3 中的 5 种荷载组合工况^[24],对试

设计桥进行验算,其中荷载组合Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ为承载能力极限状态组合,荷载组合Ⅴ为正常使用极限状态的频遇组合,恒载包括自重、二期恒载和静止土压力。

表 3 荷载组合工况
Tab. 3 Load Combination Conditions

荷载组合	荷载安全系数及荷载名称
Ⅰ	1.2 倍恒载+1.0 倍预应力+1.0 倍收缩徐变+1.4 倍汽车荷载(含冲击)+0.75×1.4 倍整体升温
Ⅱ	1.2 倍恒载+1.0 倍预应力+1.0 倍收缩徐变+1.4 倍汽车荷载(含冲击)+0.75×1.4 倍整体降温
Ⅲ	1.2 倍恒载+1.0 倍预应力+1.0 倍收缩徐变+0.75×1.4 倍汽车荷载(含冲击)+1.4 倍整体升温
Ⅳ	1.2 倍恒载+1.0 倍预应力+1.0 倍收缩徐变+0.75×1.4 倍汽车荷载(含冲击)+1.4 倍整体降温
Ⅴ	1.0 倍恒载+1.0 倍预应力+1.0 倍收缩徐变+0.7 倍汽车荷载(不计冲击)+0.8 倍整体升温

上部结构验算结果表明,试设计桥承载能力极限状态下的主梁正截面抗弯承载力验算和斜截面抗剪承载力验算均满足规范 JTG D62—2004^[25]的要求,并具有一定的安全储备。抗裂验算中,截面最大应力为 0.915 MPa,小于容许拉应力 1.855 MPa。挠度验算中,主梁短期最大挠度为 30.41 mm,考虑增长系数后,长期挠度值为 43.33 mm,小于规范规定的容许值 50 mm(计算跨径 30 m 的 1/600),满足要求。

下部结构验算结果表明,桩的容许承载力为 1 622.18 kN,大于单桩承载力设计值 1 235.5 kN,满足承载力验算。UHPC 桩段和 RC 桩段的桩身竖向强度分别为 3 868.8 kN 和 3 260.3 kN,均大于桩基竖向强度设计值 1 900 kN。最大裂缝出现在桩顶和桥台的节点位置处,其裂缝宽度为 0.18 mm,小于 0.2 mm,故满足裂缝宽度要求。

因此,试设计桥的设计验算可以通过。

3 有限元计算结果分析

3.1 竖向荷载作用

在竖向荷载(恒载和活载)作用下,原桥和试设计桥的桥台和桩基内力基本一致,本文仅分析了竖向荷载对两者主梁内力的影响。

3.1.1 恒载作用下主梁弯矩

由于结构具有对称性,并且荷载对称分布,因此本文仅对半桥长结构的内力进行比较。该桥采用先简支后连续的施工方法,恒载计算分阶段进行。图 7 为主梁在恒载作用下的弯矩图,其中括号内的数

值为试设计桥的弯矩值。由图 7 可知,在恒载作用下,试设计桥桥台支座处主梁负弯矩较原桥明显减小,由原桥的 177.6 kN·m 减小到试设计桥的 112.7 kN·m,降幅为 36.5%,这是由于试设计桥采用了柔性桩,桩顶承担的弯矩减小,弯矩从桩顶经过桥台传递至主梁端部位置,从而减小了主梁的负弯矩,说明采用柔性阶梯桩能有效减小桥台支座处主梁的负弯矩。恒载对于跨中弯矩的影响很小(第 1 跨增加 0.7%,第 2 跨减少 0.2%),可以忽略不计。

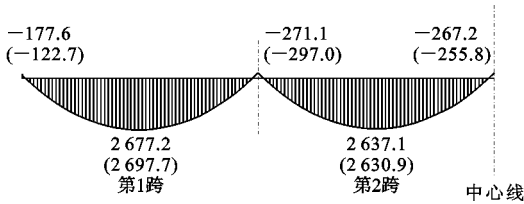


图 7 主梁在恒载作用下的弯矩(单位:kN·m)

Fig. 7 Moment of Girder Under Dead Load (Unit:kN·m)

3.1.2 汽车荷载作用下主梁弯矩

根据 JTG D60—2015^[26],采用 2 种汽车荷载作用(偏载和中载),对主梁弯矩进行计算。图 8 和图 9 分别为主梁在偏载和中载作用下的弯矩图,其中括号内的数值为试设计桥弯矩值。由图 8 可知,在偏载和中载作用下,试设计桥桥台处的主梁负弯矩分别减小 14.2%和 22.8%,主梁正弯矩略有增加,其他位置的弯矩变化不超过 10%。说明在汽车荷载作用下,柔性阶梯桩对桥台处的主梁产生有利的影响,而对其他位置的影响较小。

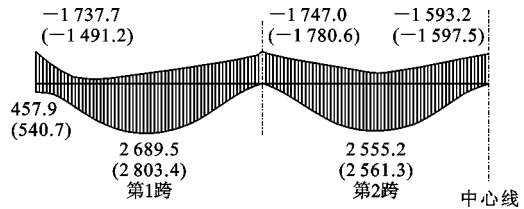


图 8 主梁在偏载作用下的弯矩包络图(单位:kN·m)

Fig. 8 Movement Envelop Diagram of Girder Under Offset Load(Unit:kN·m)

3.2 温度荷载作用

与有缝桥相比,整体桥最大的不同在于荷载作用下纵桥向变形对结构受力的影响。在纵向荷载中,温度作用对整体桥的影响最为明显。根据整体桥中不同结构在整体升温 and 整体降温下的受力特点,主梁和桩基在整体降温作用下内力较大(主梁混凝土结构受拉也更为不利),桥台在整体升温作用下内力较大。因此,本文主要讨论整体降温下主梁的

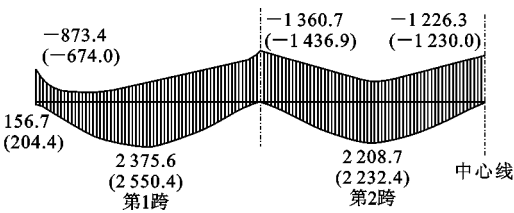


图 9 主梁在中载作用下的弯矩包络图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Fig. 9 Movement Envelop Diagram of Girder Under Central Load(Unit: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

内力、桩基的内力、整体升温下桥台的内力,进一步探究原桥与 UHPC-RC 阶梯桩试设计桥纵桥向的受力行为。

表 4 整体降温作用下主梁的内力

Tab. 4 Internal Forces of Girder when Temperature Goes Down

内力	桥台弯矩/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$	第 1 跨轴力/ kN	1 号墩弯矩/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$	第 2 跨轴力/ kN	2 号墩弯矩/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$
原桥	1 277.6	345.3	-288.1	357.9	147.4
试设计桥	605.2	174.8	-173.5	187.5	66.8
下降幅值/%	52.6	49.4	39.7	47.6	54.7

3.2.2 整体降温作用下桩基内力

在整体升温作用下,整体桥结构变形由台后搭板、桥台填土和桩基水平刚度吸收,但在整体降温作用下,台后填土不提供拉力,整体桥结构的变形主要由桩基承担。桩基全桩长范围内的内力分布如图 10,11 所示。

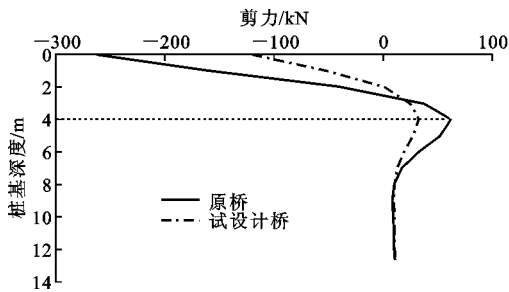


图 10 桩基剪力

Fig. 10 Shear Forces of Pile Foundation

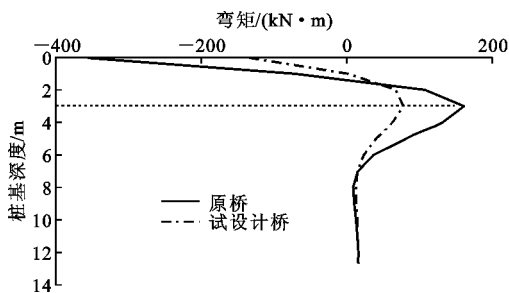


图 11 桩基弯矩

Fig. 11 Moments of Pile Foundation

柔性阶梯桩的内力分布趋势与原桥桩的趋势相近。采用水平刚度更小的阶梯桩,增大主梁收缩位

3.2.1 整体降温作用下主梁内力

整体桥桥台与主梁固接,在整体降温作用下主梁收缩,台下桩基约束主梁变形,混凝土 T 梁中产生拉应力,这对于以受压为主的混凝土材料极为不利,故应着重考虑主梁在降温作用下的内力。

表 4 为整体降温作用下主梁的内力。由表 4 可知,在整体降温作用下,试设计桥的主梁弯矩和轴力下降明显,下降幅值基本都超过了 40%。通过有限元模型计算可知,原桥的桩顶位移为 6.5 mm,试设计桥的桩顶位移为 7.8 mm,增大 20.2%。因此,降温作用下,采用柔性桩的桥梁结构收缩位移有所增加,而轴力和弯矩分别都有大幅度的降低。

移,使得因结构自身约束而产生的桩基内力减小。剪力线的反向弯曲点出现在 4 m 深度,弯矩线的反向弯曲点出现在 3 m 深度。

原桥桩和试设计桥桩在全桩长范围内的最大弯矩和最大剪力都出现在桩顶位置,最大值汇总于表 5。通过采用柔性阶梯桩,桩身全长范围的内力均明显减小,桩顶的最大剪力和最大弯矩分别减小 52.2%,59.8%。

表 5 桩顶内力比较

Tab. 5 Comparison of Internal Forces at Top of Piles

内力	剪力/ kN	弯矩/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$
原桥	-307.6	-401.2
试设计桥	-147.1	-161.2
下降幅值/%	52.2	59.8

3.2.3 整体升温作用下桥台内力

在整体升温作用下,桥台往填土方向运动,受到桥台后填土的约束,产生较大的被动土压力,与降温作用相比,此时桥台的内力值更大,最大剪力和最大弯矩都出现在桥台顶部。桥台弯矩值和桥台高度呈线性关系,内力最大值见表 6。

表 6 桥台顶部内力比较

Tab. 6 Comparison of Internal Forces at Top of Abutments

内力	剪力/ kN	弯矩/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$
原桥	1 701.4	3 546.2
试设计	1 146.2	1 919.9
下降幅值/%	32.6	45.8

表 6 中最大剪力和最大弯矩分别比原桥减小

32.6%,45.8%。通过有限元模型计算可知,原桥的桩顶位移为6.1 mm,试设计桥的桩顶位移为7.1 mm,增大16.4%。

4 结 语

(1)整体桥桩基础上部采用UHPC、下部采用RC的UHPC-RC阶梯桩能大幅度增大基础柔度,适应整体桥纵桥向变形需要,是一种适合中国国情、有发展前景的无缝桥桩基新结构。

(2)在恒载作用下,采用柔性阶梯桩能有效减小梁端的负弯矩,其比原桥降低36.5%,对跨中受力的影响越小,一般可以忽略不计。在偏载和中载作用下,试设计桥的主梁呈现正弯矩增大和负弯矩减小的趋势,对于梁端的影响较显著,负弯矩分别减小14.2%和22.8%,对于其他位置的影响较小。

(3)在整体降温作用下,主梁的轴力和弯矩都有明显减小,有利于混凝土桥梁上部结构的受力;桩基的内力在全桩身范围内也明显减小,桩身最大剪力和最大弯矩出现在桩顶位置,与原桥相比分别减小52.2%,59.8%。在整体升温作用下,桥台最大剪力和最大弯矩与原桥相比分别减小32.6%,45.8%。

(4)试设计桥的桩顶位移比原桥大,升温时增大了16.4%,降温时增大了20.2%,反映出桥梁上部结构将产生更大的伸缩变形,故对桥梁引板处的伸缩缝变形量要相应加大。

(5)需要注意的是,该桥型仅具有一定的适用性,对于中国桥梁下部结构应用最为广泛的钻孔灌注桩是否仍能适用,还需要进一步的分析探讨。

参考文献:

References:

[1] 陈宝春,庄一舟, BRISEGHIELLA B. 无伸缩缝桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
CHEN Bao-chun, ZHUANG Yi-zhou, BRISEGHIELLA B. Jointless Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,2013.

[2] DBJ/T13-265-2017,福建省城市无伸缩缝桥梁技术规范[S].
DBJ/T13-265-2017, Technical Specifications for Municipal Joint-less Bridges in Fujian Province[S].

[3] 洪锦祥,彭大文.永春县上坂大桥的设计——无伸缩缝桥梁的应用实践[J].福建建筑,2004(5):50-52.
HONG Jin-xiang, PENG Da-wen. Design of Shangban Integral Abutment Bridge — Engineering Application of Jointless Bridge[J]. Fujian Architecture & Construction,2004(5):50-52.

[4] GAMA D, ALMEIDA J F. Concrete Integral Abutment Bridges with Reinforced Concrete Piles[J]. Structural Concrete,2014,15(3):292-304.

[5] 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.

[6] 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 Arch Bridge in China[J]. Journal of China & Foreign Highway,2016,36(1):67-71.

[7] 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.

[8] JTG D63—2007,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
JTG D63—2007, Code for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts[S].

[8] BROMS B B. Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils[J]. Journal of Soil Mechanic and Foundation, 1964,90(2):27-64.

[9] YU T L, SUN X L, ZHANG S F. Analysis of Integral Abutment Bridge Static Load Test[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,361-363:1406-1413.

[10] 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.

[11] 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.

[12] KIM W, LAMAN J A. Integral Abutment Bridge Response Under Thermal Loading [J]. Engineering Structures,2010,32(6):1495-1508.

[13] HUNTLEY S A, VALSANGKAR A J. Behaviour of H-piles Supporting an Integral Abutment Bridge[J]. Canadian Geotechnical Journal,2014,51(7):713-734.

[14] GIRTON D D, HAWKINSON T R, GREIMANN L F. Validation of Design Recommendation for Integral Abutment Piles[J]. Journal of Structural Engineering,1991,117(7):2117-2134.

- [15] DUNKER K F, LIU D. Foundations for Integral Abutments[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2007, 12(1): 22-30.
- [16] WHITE D J, MEKKAWY M M, SRITHARAN S, et al. Underlying Cause for Settlement of Bridge Approach Pavement Systems[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21(4): 273-282.
- [17] NASSIRI S S, BAHRI P S, MOLOHON D, et al. A Prediction Model for Overtopped Levee-floodwall Erosion Rates Based on the Plasticity Index and Compaction Level[J]. Geotechnical Special Publication, 2017, 278: 437-443.
- [18] 张磊, 伍石生, 黄卫, 等. 面向桥面铺装动力响应分析的多尺度桥梁模型[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 87-93.
ZHANG Lei, WU Shi-sheng, HUANG Wei, et al. Multi-scale Model for the Bridge Deck-pavement Dynamic Analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 87-93.
- [19] WENG X L, CUI Z F, SONG W J, et al. Response Mechanism for Widened Pavement Structure Subjected to Ground Differential Settlement[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2013, 29(1): 73-78.
- [20] TIAN S, ZHANG T, LI W F. Impact of Rubber Particles on Heat-shielding Property of Bridge Deck Pavement[J]. Advanced Materials Research, 2011, 280: 27-30.
- [21] WANG W, LIU S, WANG Q Z, et al. The Impact of Traffic-induced Bridge Vibration on Rapid Repairing High-performance Concrete for Bridge Deck Pavement Repairs[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 2014: 632051.
- [22] WANG X W, TIAN W L, GAO S L, et al. Performance of the Hybrid Fibers Reinforced Concrete and Its Application on the Bridge Deck Pavement [C]// PENG Q Y, WANG K C P, QIU Y J, et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering. New York: ASCE, 2009: 1699-1704.
- [23] 洪锦祥. 整体式桥台桥梁的简化计算模型与受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2006.
HONG Jin-xiang. Research on Simplified Calculation Model and Loaded Behavior of Integral Abutment Bridges[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [24] 彭大文, 洪锦祥. 整体式桥台桥梁设计中的荷载组合研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2009, 31(3): 112-116.
PENG Da-wen, HONG Jin-xiang. Research on Load Combinations in Integral Abutment Bridges Design [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2009, 31(3): 112-116.
- [25] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts[S].
- [26] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S].