

预制装配式混凝土盖梁受力性能分析

吴从晓^{1,2},高鹏瑜^{1*},张广海³,张崇斌⁴

(1.广州大学 土木工程学院,广东 广州 510006;2.广州理工学院,广东 广州 510540;

3.比亚迪建设工程有限公司,广东 深圳 518118;4.中铁工程设计咨询集团有限公司,北京市 100020)

摘要:为研究预制装配式混凝土桥墩盖梁的受力性能,对预制盖梁壳内浇混凝土的构件进行静载试验,采用有限元软件Abaqus对预制盖梁壳内浇筑混凝土界面采用插筋和混凝土抗剪键的不同构造措施的盖梁试件进行数值仿真分析,在此基础上建立装配式盖梁和现浇盖梁模型,开展拟静力低周往复位移分析。结果表明:装配式盖梁采用预制外壳内部现浇方案可行;桥墩与牛腿整浇成型能够临时固定盖梁和增强节点连接性能;预制盖梁壳内浇筑混凝土界面采用混凝土抗剪键和插筋都能发挥其良好的传力性能;装配式盖梁等同于现浇盖梁,装配式盖梁峰值承载力比现浇盖梁提高,延性系数降低。

关键词:轨道工程;装配式盖梁;静载试验;有限元分析;插筋;混凝土抗剪键

中图分类号:U443

文献标志码:A

0 引言

盖梁和墩柱是桥墩的主要组成部分,预制盖梁和墩柱采用分段式施工,其连接方式有灌浆金属波纹管连接,灌浆套筒连接,插槽式连接,承插式连接4类形式。相关学者^[1-4]也对这4类连接方式进行了相关研究,结果表明:4种连接方式均能发挥良好的连接性能。采用灌浆金属波纹管和灌浆套筒连接对构件的精度要求比较高,插槽式和承插式连接能够降低对精度要求,施工操作性更高。预制装配式钢筋混凝土盖梁^[5]由预制盖梁外壳、墩柱牛腿、后浇混凝土、混凝土抗剪键和插筋组成,其制作是预制加工好盖梁外壳,在现场吊装盖梁外壳到墩柱上,通过牛腿临时固定盖梁外壳,再吊装钢筋笼和后浇混凝土整浇成型。相比于现浇桥墩盖梁,制作时可免除模板,提高施工效率和质量。对于预制装配式盖梁,由于存在二次浇筑,节点连接新旧混凝土交接面的可靠性是影响其性能的关键因素。目前国内外学者^[6-8]研

究主要集中在盖梁的整体预制拼装技术,对于外壳预制内部现浇^[9]研究相对较少,此类新旧混凝土的界面^[10]常使用凿毛法和高压水枪处理。在实际工程中,会存在混凝土未达到强度要求就开始凿毛和高压水枪处理,导致界面出现一层破碎层不能完全清理,降低了新旧混凝土的黏结性能。基于以上研究,为了进一步提高新旧混凝土界面的黏结性能,以预制装配式盖梁为对象,对墩柱牛腿连接以及盖梁新旧混凝土交接面采用插筋和混凝土抗剪键两种不同构造进行试验和分析,研究其传力性能的可靠性。

1 新型盖梁构造

以一种适合于单轨桥墩盖梁和墩身的预制钢筋混凝土盖梁为对象,其属于“墩身预制外壳内部核心钢筋混凝土现浇”的组成形式。新型盖梁主要是将盖梁和墩身装配化,先预制加工好墩柱及环形凸台(下称牛腿)和盖梁钢筋混凝土外壳,在现场将盖梁外壳吊装到墩身上,并安装钢筋笼,再浇筑壳内混

收稿日期:2023-01-16

基金项目:广州市科技计划项目(编号:202102010506);中国中铁重点研发计划项目(编号:2018-重点-03);中铁设计研发计划项目(编号:研2018-26)

作者简介:吴从晓,男,博士,副教授.E-mail:wu-congxiao@163.com

*通信作者:高鹏瑜,男,硕士研究生.E-mail:572364079@qq.com

图3 新旧混凝土2种不同连接方式

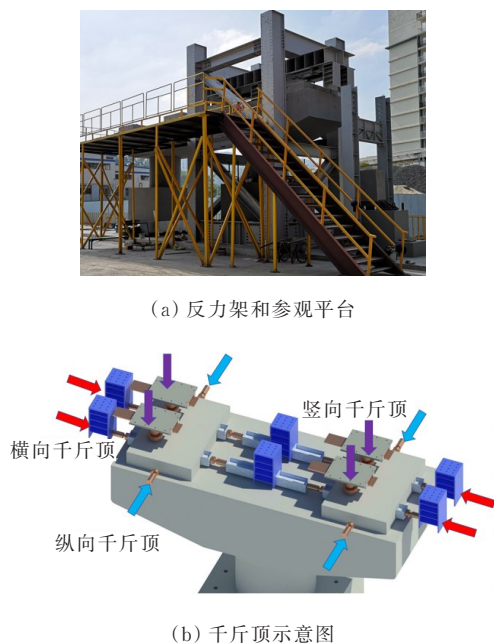


图 4 反力架设计和千斤顶荷载作用位置示意图

功能静态采集系统同时采集数据,主要采集位移计和压力传感器以及预埋在构件中的应变片的应变值。应变片及位移计布置如图 5 所示。

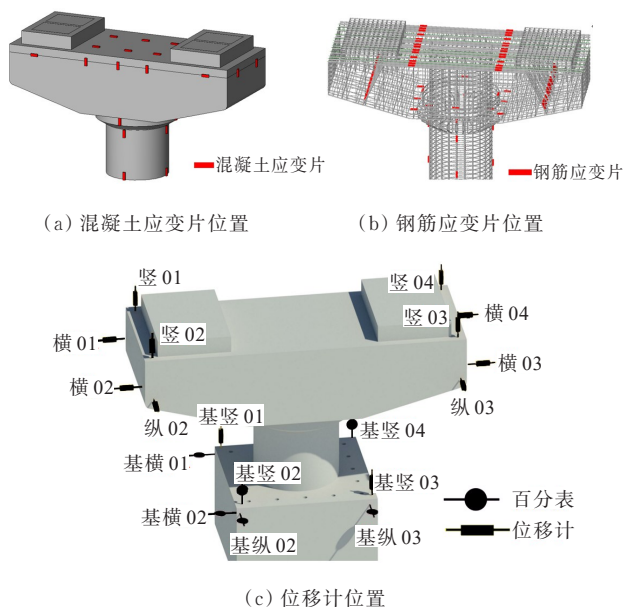


图 5 应变片和位移计布置示意图

2.4 加载制度

根据《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)选取恒载、活载,风载和地震力,制定了各工况下的荷载组合值,如表 1 所示均为正方向的工况,反方向工况,即除了竖向荷载外,所有荷载均更改方向,正反工况设计目的为验证盖梁两种不同构造性能对比。Case-01 中横向力主要由横向摇摆力和离心力提供,

Case-03 和 Case-06 则在 Case-01 的基础上分别考虑了风载和设计地震力的作用;验证盖梁与墩柱连接性能可靠性。Case-02 主要验证盖梁顶面 and 外壳正背立面的钢筋混凝土抗拉性能,Case-04 中的横向力在 Case-02 的基础上增加了风荷载;Case-05 和 Case-07 考虑了制动力和设计地震力作用的情况,验证盖梁与墩柱牛腿连接性能可靠性。Case-0(n)-01 表示荷载正向加载;Case-0(n)-02 表示除竖向荷载外其余荷载反向加载。

表 1 各工况下的荷载组合值

工况号	加载支座 编号	竖向力 P_z/kN	横向力 P_x/kN	纵向力 P_y/kN	弯矩 $M_y/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
Case-01-01	1、2、3、4	-787.65	36.07	0	-269.02
Case-02-01	1、2	-787.65	-36.07	0	269.02
	3、4	-787.65	36.07	0	-269.02
Case-03-01	1、2、3、4	-787.65	83.24	0	-342.53
Case-04-01	1、2	-787.65	-83.24	0	342.53
	3、4	-787.65	83.24	0	-342.53
Case-05-01	1、2、3、4	-787.65	0	84	-224.31
Case-06-01	1、2、3、4	-787.65	109.73	0	-370.97
Case-07-01	1、2、3、4	-787.65	0	160.2	-370.97

轨道车正常运营时,竖向力(P_z)主要由自重、二期恒载、行车活载以及冲击力组成;横向力(P_x)主要由轨道车转弯时产生的横向摇摆力、离心力组成;纵向力(P_y)主要由制动力组成;弯矩主要由横向力作用在轨道梁上,轨道梁与盖梁铸铁支座之间存在高差产生,通过将荷载作用点转移到铸铁支座上而产生弯矩。支座的编号和方向如图 6 所示,其中混凝土抗剪键处于盖梁支座 01、02 处,插筋处于盖梁支座 03、04 处。

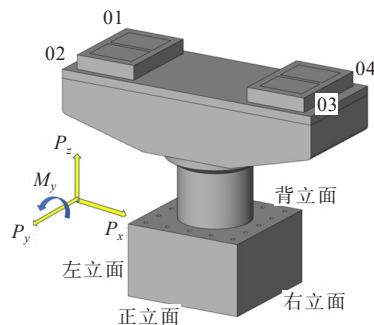


图 6 盖梁支座编号和方向

为了便于试验的开展,同工况中仅考虑施加横向力或纵向力中的一个方向上的荷载;试验过程中

竖向千斤顶通过偏移作用点来提供全部弯矩,横向千斤顶则不提供弯矩。

2.5 材性试验

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),通过对试验用混凝土立方体标准试块(150 mm×150 mm×150 mm,3个立方体标准试块为1组)进行抗压试验,得到试验混凝土的材料强度。混凝土采用C40,实测的弹性模量为40.3 GPa,轴心抗压强度为47.53 MPa。

根据《金属材料 拉伸试验 第1部分 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010),通过对试验用钢材进行拉伸试验,得出试验钢筋的材料强度如表2所示。

表2 钢材实测力学性能

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
12	518	663	19.7
20	448	595	19.4
28	465	630	18.9

3 有限元模型

3.1 材料参数

3.1.1 混凝土本构模型

采用有限元软件Abaqus建模,混凝土本构模型采用混凝土塑性损伤模型^[11-13],该CDP模型适用于单调荷载下的混凝土材料性能。混凝土CDP模型的强度为C40,弹性模量为40.3 GPa,泊松比为0.2,本构模型采用混凝土受拉受压应力应变全曲线等统一计算公式^[14-15],其计算结果与试验所采用的混凝土实测材性试验结果吻合较好。

3.1.2 钢筋本构模型

钢筋的本构模型采用“Esmacily-Xiao 钢筋模型^[16]”,有关设计如下:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_y \\ f_y & \epsilon_y < \epsilon \leq k_1 \epsilon_y \\ k_3 f_y + \frac{E_s(1-k_3)}{\epsilon_y(k_2-k_1)} (\epsilon - k_2 \epsilon_y)^2 & \epsilon > k_1 \epsilon_y \end{cases}$$

式中: σ 、 ϵ 分别为钢筋的应力和应变; E_s 为钢筋的弹性模量,取值为 2×10^5 N/mm²; f_y 、 $\epsilon_y = f_y/E_s$ 分别为钢筋的屈服强度和屈服应变; k_1 为钢筋硬化起点应变

与屈服应变的比值; k_2 为钢筋峰值应变与屈服应变的比值; k_3 为钢筋极限应变与屈服应变的比值; k_4 为钢筋峰值应力与屈服强度的比值。 k_1 、 k_2 、 k_3 分别取3、20、1.3。

3.2 单元选取

使用有限元软件Abaqus建模中,混凝土采用C3D8R单元,钢筋采用T3D2单元。钢筋完全嵌固在混凝土中,且不考虑钢筋和混凝土之间的黏结滑移。外壳混凝土、后浇混凝土、墩柱混凝土单元的网格尺寸为100 mm,墩柱牛腿和抗剪键混凝土单元的网格尺寸为40 mm;弯起钢筋、抗剪钢筋、牛腿钢筋单元的网格尺寸为10 mm,其余钢筋单元的网格尺寸为20 mm。网格划分如图7所示。

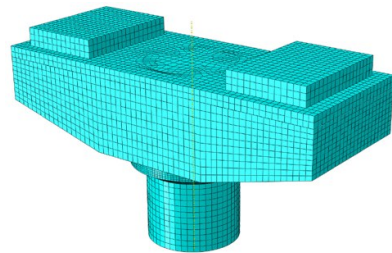


图7 装配式盖梁网格划分示意图

3.3 边界条件和接触设置

在试验中,盖梁的墩柱与基础相连接,基础通过地锚螺栓嵌固在反力架的地梁上,在计算模型边界条件中,盖梁墩柱底部完全固结。

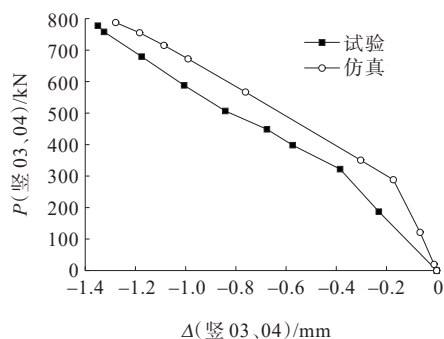
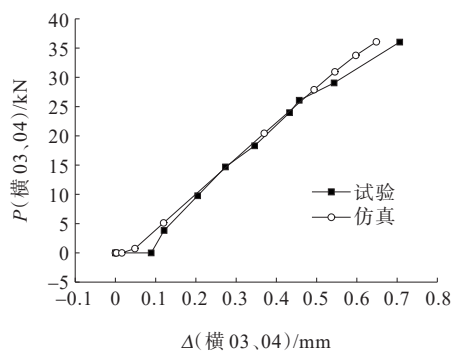
新旧混凝土之间的接触处理如下:切向摩擦系数取0.85,法向设置允许接触后分离的“硬”接触。

3.4 加载制度

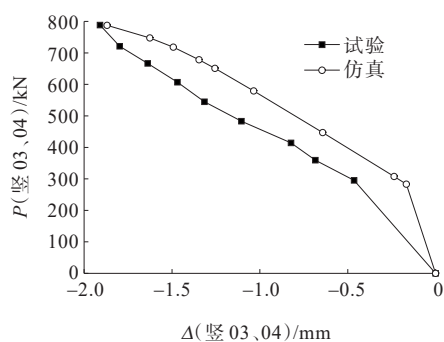
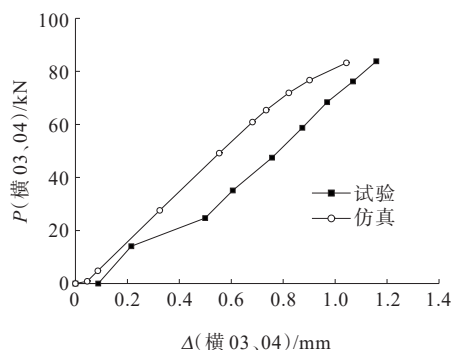
为了与试验加载制度一致,有限元分析亦采用荷载控制加载,工况如表1所示,每个工况荷载分2次加载,首先将各支座上的竖向荷载先加载到276.68 kN,用于模拟上部构件自重,接着再施加竖向荷载、横向荷载或纵向荷载到指定荷载值,在有限元软件Abaqus中可以单独提供弯矩。

4 模型验证

本项目已进行了2组试验工况,为了验证有限元模型和分析方法的正确性,对比有限元仿真数据和试验数据,已有试验结果Case-01-01和Case-03-01数据与模拟计算结果对比如图8所示。



(a) Case-01-01



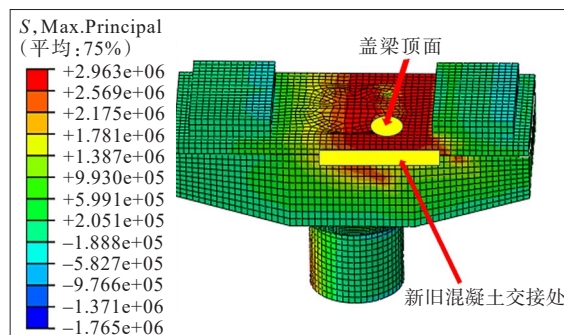
(b) Case-03-01

图 8 试验和仿真数据对比

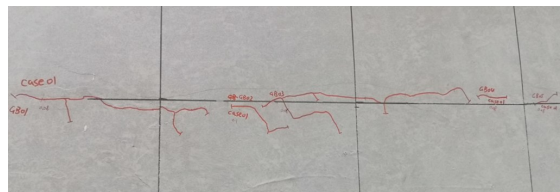
由图 8 可得:

(1) 采用相同荷载作用下的位移差值作为判断依据, 总体上看, 有限元模拟结果曲线和试验结果曲线大致相吻合, 荷载加载终值最大误差为 18%, 其主要来源于试验构件的施工和安装存在不可避免的精度误差。

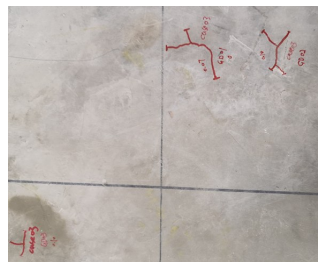
(2) 当混凝土的最大拉应力大于 2.95 MPa 时易发生开裂。试验过程中混凝土开裂情况和有限元仿真计算的应力云图对比如图 9 所示, 试验过程中, 盖梁顶面出现了许多细小裂纹, 而盖梁正背立面的新旧混凝土交接缝处发生相对错动, 产生较多裂纹。试验中盖梁混凝土的开裂情况和有限元仿真中混凝土的应力云图相似, 说明有限元模型的准确性。



(a) 混凝土应力云图(单位: Pa)



(b) 盖梁正立面新旧混凝土交接处



(c) 盖梁顶面(图示网格 200 mm×200 mm)

图 9 有限元仿真混凝土应力云图和试验结果对比

4.1 装配式盖梁两种不同连接方式的性能分析

4.1.1 力和位移曲线

根据《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)可知: ① 钢筋混凝土梁的悬臂端产生的最大挠度不应超过悬臂长度的 $1/300$, 即 7 mm。由上述竖向力和位移曲线可知在设计地震力中产生的最大竖向挠度为 2.48 mm < 7 mm, 说明装配式盖梁采用插筋和混凝土抗剪键两种连接形式可行; 墩台顶面的弹性水平位移应满足 $\Delta < 5\sqrt{L}$, 其中 L 不足 24 m, 取值为 24 m, 即 $\Delta = 24.495$ mm, 上述横向位移和纵向位移中

的最大值为1.6 mm,远小于规范限值,说明盖梁与墩柱之间采用牛腿连接的方案可行。

7种工况力和位移曲线如图10~12所示。

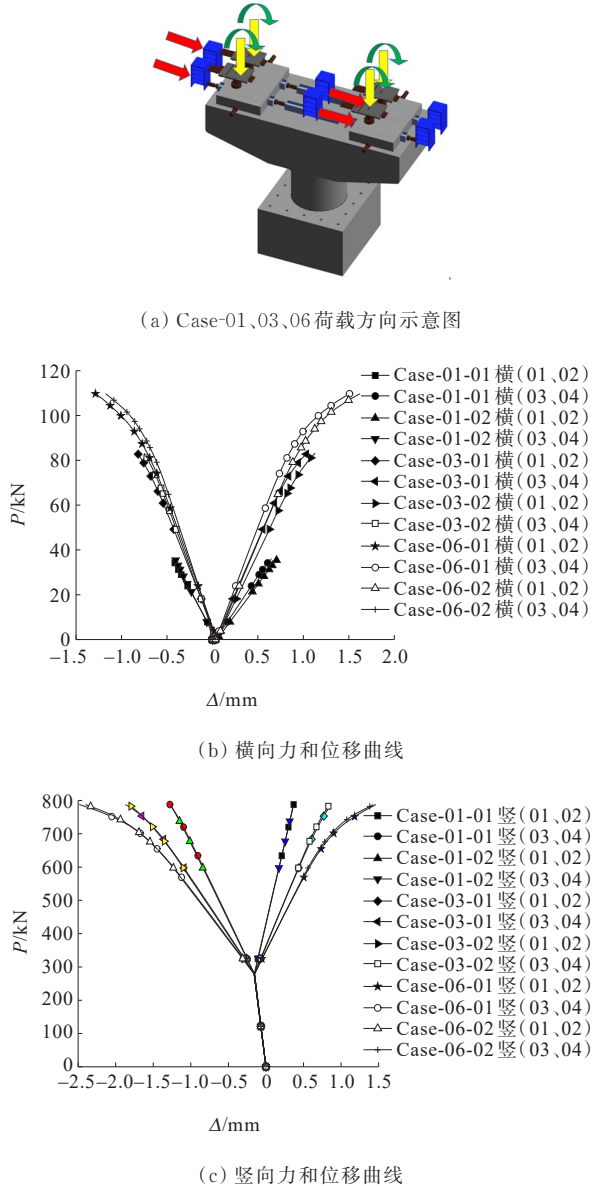


图10 Case-01、03、06工况力和位移曲线示意图

观察图10~12可知:Case-04中插筋的竖向挠度比抗剪键竖向挠度增加了0.058 mm,其余工况中两种连接方式的竖向力和位移曲线大致重合,进而说明两种不同连接方式对盖梁的竖向抗弯能力影响相对较小。

横向位移曲线斜率下降,随着荷载增加,正、背立面上盖梁外壳与后浇混凝土之间发生相对滑移;竖向位移发生刚度退化主要是由于盖梁顶面和立面的部分混凝土开裂所致,而钢筋并未发生屈服。

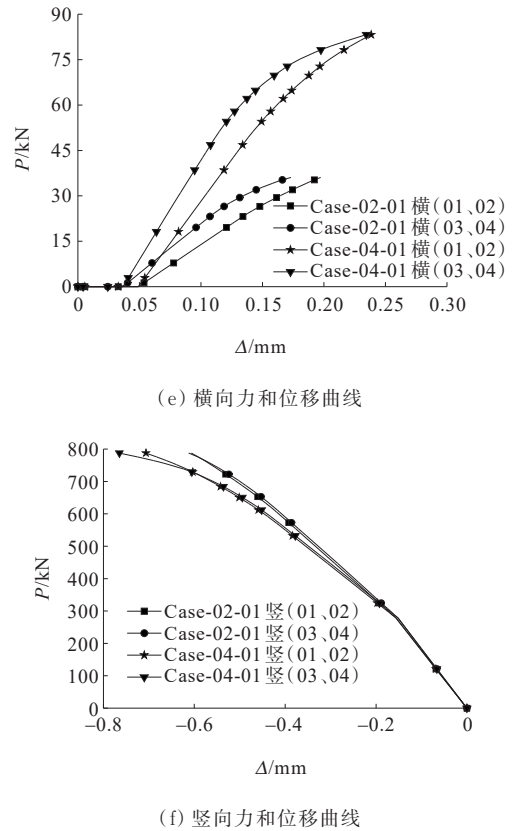
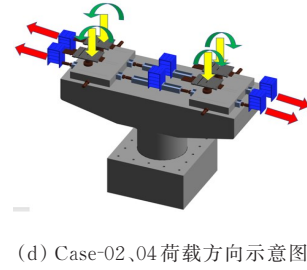


图11 Case-02、04工况力和位移曲线示意图

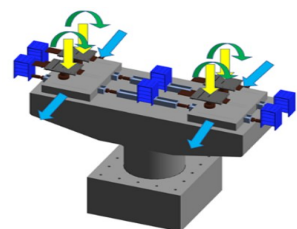
4.1.2 应力分析

装配式盖梁钢筋和混凝土应力值如表3所示。

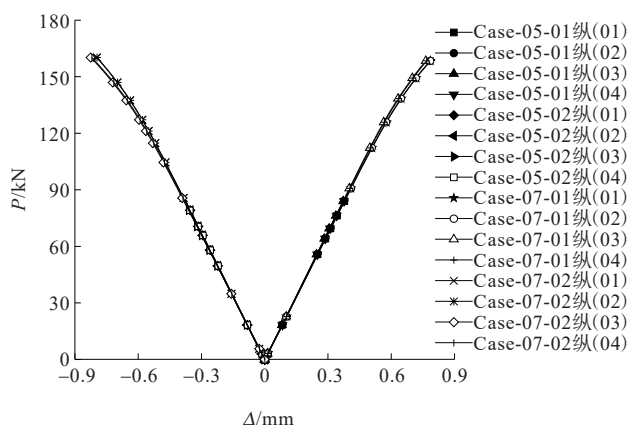
对比Case-01、03、06中墩柱纵筋和牛腿钢筋的拉应力数值变化情况可知:当Case-01中施加较小的横向力和扭矩时,牛腿部分的钢筋和混凝土先进入抗拉和抗压工作状态,随着横向荷载和扭矩逐步增加,墩柱底部钢筋的拉应力增加幅度比较大,Case-06中墩柱和牛腿钢筋最大拉应力为116.7 MPa和117 MPa,均未发生屈服,满足承载力要求,说明在设计地震力作用下墩柱与牛腿连接可靠,二者能够协同工作。

在所述工况中,Case-06中盖梁外壳的立面和盖梁顶面钢筋拉应力较大,最大拉应力分别为283.6 MPa和91.8 MPa,与Case-03相比较增幅为68%和

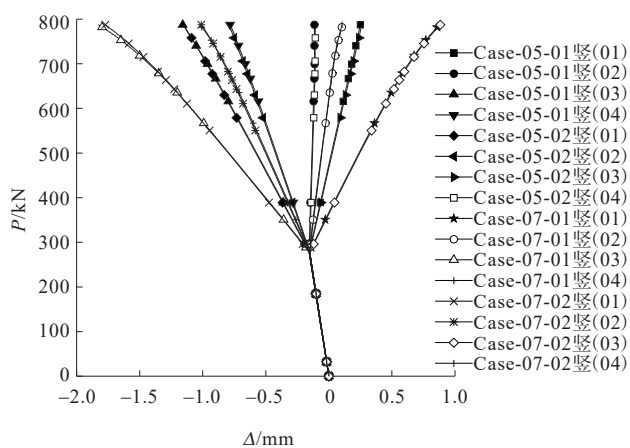
3.3%,其正背立面局部混凝土达到极限抗拉强度而发生开裂。盖梁方位示意图如图13所示。



(g) Case-05、07荷载方向示意图



(h) 纵向力和位移曲线



(i) 竖向力和位移曲线

图12 Case-05、07工况力和位移曲线示意图

表3 装配式盖梁钢筋和混凝土应力值

工况	支座 编号	墩柱钢筋/MPa			抗剪 钢筋	受拉钢筋拉应力/MPa			
		纵筋	牛腿	(斜面)/ MPa		立面	顶面	斜面	插筋
Case-01	01、02	37.5	79.1	1.5	32.2	107.9	25.4	18.4	—
	03、04	37.0	73.5	1.3	273.5	151.4	39.1	18.6	273.5
Case-02	01、02	17.4	52.5	1.7	50.3	228.1	53.4	19.6	—
	03、04	17.4	49.9	1.1	314.4	—	—	19.7	293.1
Case-03	01、02	77.6	102.4	1.8	33.1	235.1	68.1	20.9	—
	03、04	77.2	105.2	1.4	300.0	168.6	88.9	21.2	265.0

续表3

工况	支座 编号	墩柱钢筋/MPa			抗剪 钢筋	受拉钢筋拉应力/MPa			
		纵筋	牛腿	(斜面)/ MPa		立面	顶面	斜面	插筋
Case-04	01、02	18.7	65.0	1.9	50.8	219.0	99.4	22.6	—
	03、04	18.9	65.0	1.1	344.0	—	—	23.1	315.7
Case-05	01、02	31.9	66.2	1.5	51.7	176.0	18.4	17.6	—
	03、04	31.6	61.9	1.5	273.6	170.4	24.7	17.8	259.0
Case-06	01、02	116.7	117.0	1.9	31.1	269.5	74.1	23.2	—
	03、04	114.0	117.0	1.4	313.0	283.6	91.8	23.2	270.0
Case-07	01、02	99.5	93.4	1.8	69.5	216.5	44.0	20.4	—
	03、04	99.5	91.4	1.6	301.3	226.0	69.6	20.8	317.8

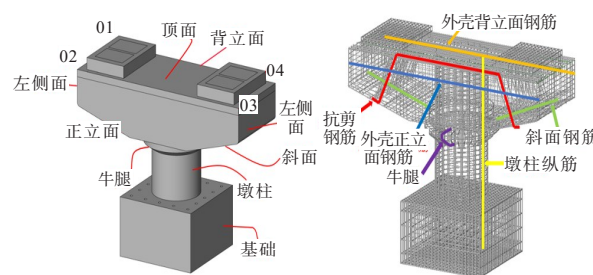


图13 混凝土和钢筋的位置示意图

Case-02和Case-04为一组轴对称工况,如表3和图14所示,在该组荷载作用下,盖梁顶面和外壳立面钢筋的应力最大为228.1 MPa和99.4 MPa,二者混凝土最大拉应力为2.98 MPa(图15、16),大于混凝土抗拉强度设计值1.7 MPa,属于易开裂状态。

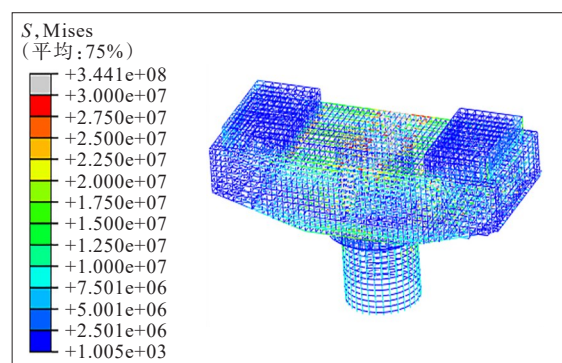


图14 Case-04钢筋应力云图(单位:Pa)

观察盖梁斜面的混凝土切应力和插筋的拉应力,以及两种构造形式中的抗剪钢筋的应力变化可知:盖梁斜面的混凝土切应力为1.9 MPa,该处的抗剪钢筋应力为50.8 MPa;插筋的拉应力为315.7 MPa,该处的抗剪钢筋为344 MPa,抗剪钢筋在混凝土抗剪键和插筋处的最大应力值相差85.2%,一方面

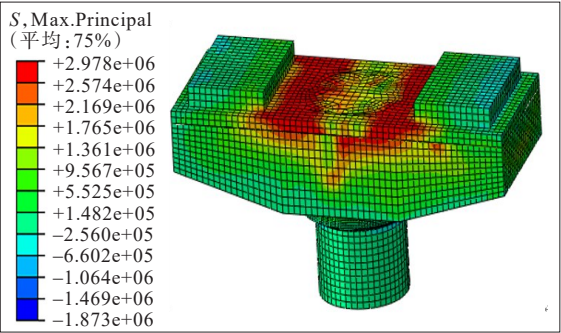


图15 Case-04混凝土应力云图(单位:Pa)

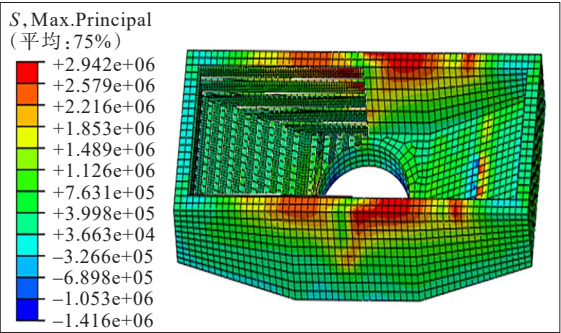


图16 盖梁外壳混凝土最大拉应力(单位:Pa)

可得混凝土抗剪键和插筋均能发挥良好的抗剪作用,另一方面抗剪钢筋在一定程度上能够协助两种构造进行抗剪。

预埋在盖梁外壳斜面左右两侧钢筋的应力云图左右对称,如图17所示,盖梁两侧钢筋的最大拉应力差值最大为2.1%,说明混凝土抗剪键和插筋两种不同连接方式的抗弯性能基本相同。

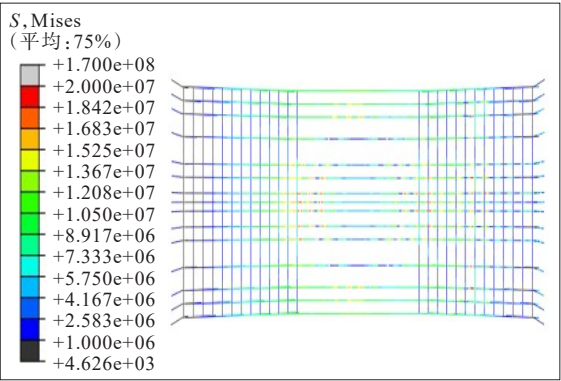


图17 盖梁外壳斜面和底面预埋钢筋最大拉应力云图(单位:Pa)

在Case-05和Case-07中,随着荷载的增大,正立面或背立面一侧墩柱底部的钢筋拉应力和左立面或右立面的牛腿上表面钢筋拉应力增大,且牛腿上表面钢筋拉应力比墩柱底部钢筋拉应力大。钢筋拉应

力值均未超过屈服强度,说明采用墩柱牛腿与盖梁的连接方式安全可靠。

提取Case-04中两个混凝土抗剪键和两根插筋之间的混凝土表面切应力见图18、19。

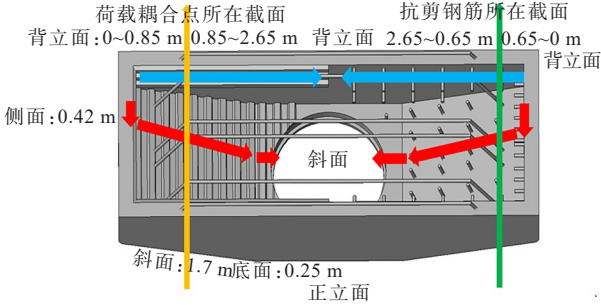
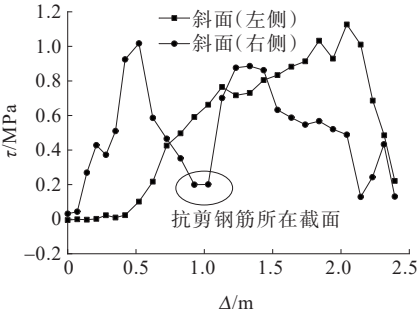
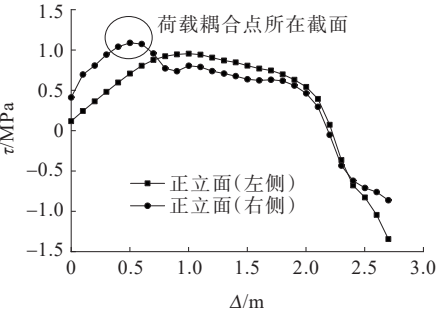


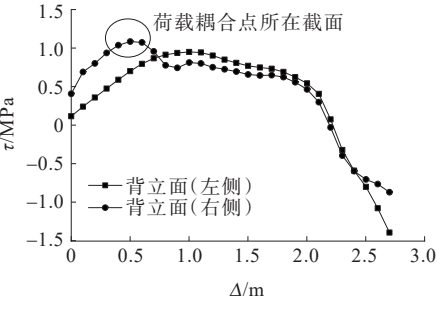
图18 盖梁混凝土外壳提取切应力示意图



(a) 盖梁斜面



(b) 正立面



(c) 背立面

图19 盖梁混凝土切应力曲线

图19(a)中左侧的混凝土抗剪键能够发挥较好的抗剪作用,抗剪键接触面的受力均匀。右侧的抗

剪钢筋所在的位置能发挥良好的抗剪作用,该处的混凝土切应力急剧下降,证明抗剪钢筋能发挥较好的抗剪作用。插筋所在的位置也能使切应力曲线发生一定程度的下降,即减少周围混凝土的切应力。观察图 19(b)、(c)可以看出,在荷载作用点所在的截面切应力相对比较大,该处的插筋的抗剪性能相比混凝土抗剪键略差一些,而其余部分的混凝土切应力基本比较接近。

4.2 装配式盖梁与现浇盖梁对比

为了验证装配式盖梁连接的可行性,采用有限元软件 Abaqus 建立现浇盖梁与装配式盖梁有限元模型,进行拟静力低周往复位移分析。

计算中,装配式盖梁外壳与后浇混凝土采用插筋连接方式;现浇盖梁与装配式盖梁的截面尺寸完全一致,仅去除了牛腿、插筋,盖梁采用整体现浇。现浇盖梁的混凝土和钢筋的本构模型、单元选取、网格大小、边界条件和加载制度均与装配式盖梁保持一致。装配式盖梁和现浇式盖梁横向滞回曲线及位移骨架曲线见图 20、21。

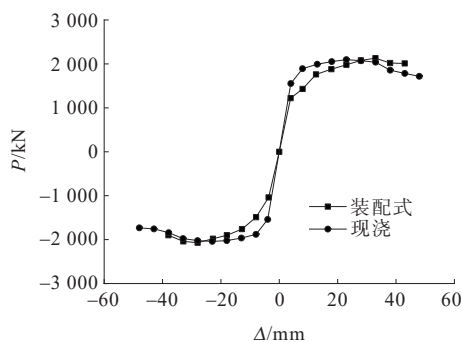


图 20 横向滞回曲线

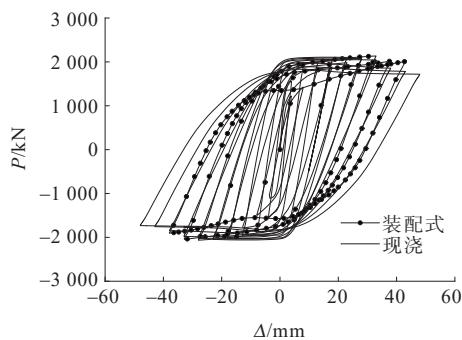


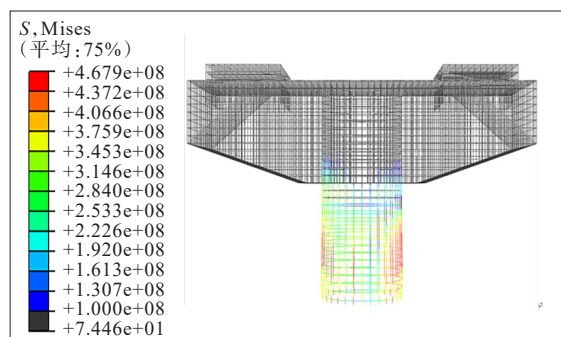
图 21 横向位移骨架曲线

由图 20、21 可知:二者滞回曲线呈现梭形,装配式盖梁相比现浇盖梁承载力稍有提高,而延性系数稍有降低,其余骨架曲线特征点参数如表 4 所示。

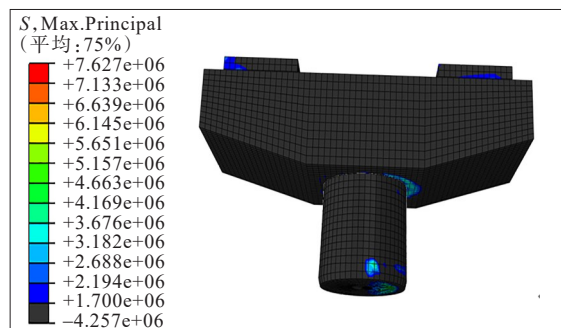
观察二者的钢筋应力云图(图 22)可知:现浇盖

表 4 装配式盖梁与现浇盖梁骨架曲线特征点参数

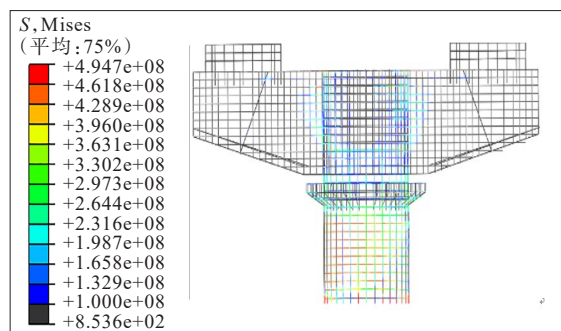
类型	屈服点		峰值点		极限点		位移延性系数
	Δ/mm	P/kN	Δ/mm	P/kN	Δ/mm	P/kN	
装配式盖梁	7.99	1 430.00	32.95	2 130.00	42.97	1 960.95	5.38
现浇盖梁	7.97	1 891.42	22.98	2 098.25	43.00	1 782.53	5.39



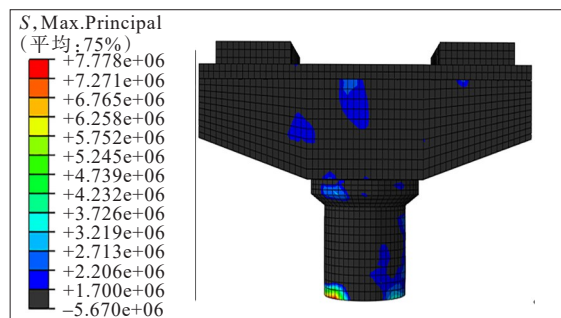
(a) 现浇盖梁钢筋应力云图



(b) 现浇盖梁混凝土最大拉应力云图



(c) 装配式盖梁钢筋应力云图



(d) 装配式盖梁混凝土应力云图

图 22 装配式盖梁与现浇盖梁应力云图对比(单位:Pa)

梁的拉应力主要集中在墩柱底部,其钢筋最大拉应力为 467.9 MPa,而盖梁整体钢筋小于 100 MPa,墩柱和盖梁底面的混凝土拉应力相对较大,属于易开裂区域。破坏形式主要集中在墩柱底面,表现为混凝土开裂和纵筋屈服,牛腿加强装配式盖梁与墩柱之间节点连接,装配式盖梁的应力分布相对均匀,盖梁与墩柱和牛腿整体受力,盖梁外壳内预埋钢筋、顶面钢筋、牛腿钢筋应力值在 230 MPa 内,墩柱钢筋拉应力为 494.7 MPa,墩柱牛腿和盖梁的混凝土拉应力超过抗拉强度而发生开裂。破坏形式主要集中在墩柱,表现为混凝土开裂和纵筋屈服。

5 结论

(1) 有限元分析和静载试验表明,装配式盖梁竖向挠度最大值为 2.48 mm,小于规范限值 7 mm;装配式盖梁在横桥和顺桥向的挠度最大值为 1.6 mm 和 0.82 mm,均满足规范限值要求,装配式盖梁采用预制外壳内部现浇方案可行。

(2) 桥墩与牛腿整浇成型,在同类工况“较小”荷载作用下牛腿钢筋混凝土应力大于墩柱。随着同类工况荷载增大,桥墩纵筋和牛腿钢筋最大拉应力为 116.7 MPa 和 117 MPa,二者协同受力,整体性较好。桥墩上部设置牛腿可作为临时固定盖梁和加强墩柱与盖梁节点的连接构件。

(3) 两种不同构造连接形式在相同荷载作用下钢筋与混凝土应力云图基本对称,二者性能差距较小。装配式盖梁采用插筋或混凝土抗剪键连接可靠,结构安全,二者都能较好地实现连接构造需求,为方便施工可优先选取插筋形式。

(4) 装配式盖梁等同现浇盖梁,二者的破坏形式均为墩柱纵筋钢筋屈服和混凝土开裂为主,而牛腿加强装配式盖梁与墩柱之间节点连接性能,使装配式盖梁整体受力更加均匀,装配式盖梁外壳的钢筋应力相比现浇盖梁稍微偏大。装配式盖梁与现浇盖梁相比,峰值承载力提高,而延性系数降低。

参考文献:

- [1] KHALEIGHI B, SCHULTZ E, SEGUIRANT S, et al. Accelerated bridge construction in Washington State: From research to practice[J]. PCI Journal, 2012, 57(4): 34-49.
- [2] KIM, Y. A study of pipe splice sleeves for use in precast beam-column connections[D]. Austin: University of Texas, 2000.
- [3] 宋浩. 预制拼装桩柱式基础抗震性能研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [4] 刘丰. 节段拼装预应力混凝土桥墩拟静力试验和分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [5] 徐升桥, 任为东, 张崇斌, 等. 预制装配化桥墩的盖梁、桥墩、桥梁及桥梁装配施工方法: CN108677687A[P]. 2018-10-19.
- [6] 葛继平, 梅德磊, 闫兴非, 等. 预制拼装盖梁施工方式对比分析[J]. 应用技术学报, 2018, 18(1): 56-62.
- [7] 闫兴非, 葛继平, 王志强, 等. 装配式大悬臂分段预应力混凝土盖梁抗弯性能研究[J]. 中国市政工程, 2019(4): 72-76.
- [8] 闫兴非, 周良, 朱敏, 等. 大跨径盖梁预制拼装方法及其大跨径盖梁: CN105780663A[P]. 2017-09-12.
- [9] 王鹏, 唐达昆, 张旭东, 等. 利用钢筋混凝土薄壁作永久性模板的巨型盖梁施工方法: CN102767141A[P]. 2012-11-07.
- [10] 陈怀军. 新旧混凝土粘结性能影响因素综述[J]. 中国建材科技, 2014, 23(5): 47-49, 140.
- [11] HIBBIT, KARLSSON, SORENSEN. ABAQUS theory manual. Version 6.7[M]. ABAQUS Inc. USA, 2007.
- [12] HIBBIT, KARLSSON, SORENSEN. ABAQUS user's manual. Version 6.7[M]. ABAQUS Inc. USA, 2007.
- [13] 张战廷, 刘宇锋. ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构, 2011(S2): 229-231.
- [14] 丁发兴, 余志武. 混凝土受拉力学性能统一计算方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(3): 29-34.
- [15] 余志武, 丁发兴. 混凝土受压力学性能统一计算方法[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 41-46.
- [16] ESMAEILI A, XIAO Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: Analysis[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.