

体内-体外混合配束节段预制拼装箱梁 足尺模型试验研究

郑开启¹, 卜红旗², 刘 钊¹, 惠 卓¹, 吕志涛¹

(1. 东南大学国家预应力工程技术研究中心, 南京 210096; 2. 南京重大路桥建设指挥部, 南京 210033)

[摘要] 以南京长江第四大桥引桥为背景, 开展了一孔 48 m 跨径体内-体外混合配束节段预制拼装箱梁的足尺模型试验, 以研究该类箱梁在正常使用阶段和施工状态下的结构行为。根据试验箱梁的尺寸参数以及实际约束条件确定了拼装与加载方案。本文重点研究正常使用荷载和梁上运梁两种工况下梁体应力状况与位移变化等结构静力性能, 并与试验梁实体有限元模型进行对比分析。研究表明: 在正常使用阶段, 加、卸载后拼装梁体残余变形较小, 基本处于弹性工作状态, 整体性较好; 键齿接缝两侧基本无相对滑移, 接缝截面纵向应变沿梁高大致呈线性变化, 力学行为基本符合平截面假定; 体外预应力束在转向处基本无滑移, 体内外预应力增量随跨中弯矩基本呈线性变化; 在梁上运梁工况下, 实测梁体下缘压应力储备充足, 满足运梁安全性要求。

[关键词] 节段预制拼装; 模型试验; 体外预应力; 足尺试验

[中图分类号] U448.21*3; U446.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0089-06

1 前言

节段预制拼装及体外预应力技术始于欧美, 在我国工程界正处于推广应用的初期, 在南京长江第四大桥的引桥建设中采用了这两项新技术。这些技术中, 设计者最关注的问题是接缝对预制拼装结构的整体性影响和体外预应力的工作特性等^[1]。对此, 国内外学者进行了一系列理论研究和数值计算分析, 并开展了少量试验研究, 但多数为小比例的缩尺试验^[2-10]。与缩尺模型相比, 足尺模型试验能够在真实结构的规模上, 更加准确地反映结构的力学行为。但由于足尺模型规模大、试验经济技术投入较高, 因此开展数量受到了限制, 比较有代表性的如泰国曼谷二期快速路高架桥项目开展的 45 m 节段预制拼装箱梁的足尺模型静力破坏性试验^[11]。

南京长江第四大桥南、北引桥中, 采用节段预制拼装梁桥的总长度大约有 5.6 km, 在同类桥梁的

规模和长度上都为国内之最。为真实、直接、全面地了解桥梁的整体受力性能, 开展了一跨 48 m 的节段预制拼装体内-体外混合配束简支箱梁桥的足尺模型试验。试验梁为南京长江第四大桥北引桥 35 号墩与 36 号墩之间的简支梁, 采用干接缝拼装, 预应力管道不灌浆, 试验后梁段可继续在工程中使用。该足尺模型试验是目前国内规模最大的节段预制拼装桥梁的模型试验。

2 试验设计

2.1 试验梁参数

试验梁采用强度等级为 C55 的混凝土节段预制。结构为单箱单室截面简支梁, 跨径 48 m, 宽度 15.8 m, 箱梁底板宽度 6.2 m, 梁高 3 m。翼缘悬臂 4 m, 悬臂端厚 18 cm, 根部厚 50 cm。顶板全跨等厚, 为 27 cm。箱梁跨中截面腹板厚 38 cm, 底板厚 25 cm; 支座处腹板厚 60 cm, 底板厚 55 cm。箱梁在

[收稿日期] 2013-05-22

[基金项目] 江苏省交通科学研究计划(09Y11)

[作者简介] 吕志涛(1937—), 男, 浙江新昌县人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混凝土及预应力混凝土结构;

E-mail: luzhitao@seu.edu.cn

体外预应力钢束转向位置设置转向块,高40 cm,顺桥向宽120 cm,转向块肋板厚30 cm,如图1所示。箱梁体内束共14束,其中10束为22- ϕ 15.2钢绞线,2束由19- ϕ 15.2钢绞线组成,另外2束顶板束由5- ϕ 15.2钢绞线组成。体外束采用无粘结聚乙烯高强低松弛光面钢绞线,每束为22- ϕ 15.2钢绞线,共8束。

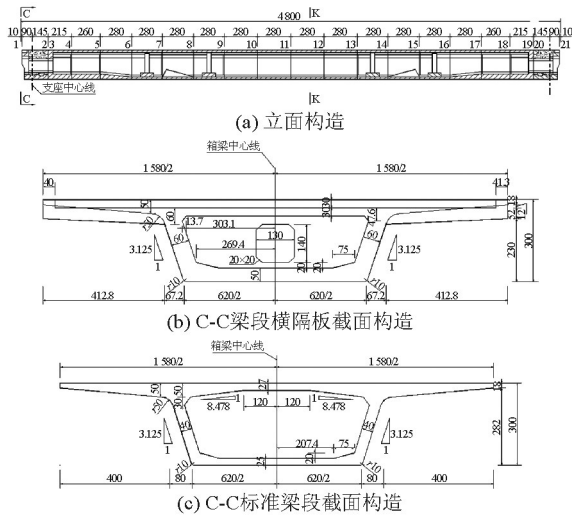


图1 箱梁构造图(单位:cm)
Fig.1 Girder detail(unit: cm)

2.2 测点布置

2.2.1 混凝土纵向应力

箱梁混凝土纵向应变测点布置在节段5、6、9和14处共4个截面。截面Y0为跨中截面,该截面在加载过程中弯矩最大;截面Y1、Y2、Y3位于大约四分点截面处,这些截面的剪力和弯矩均较大。在每个截面的顶板、底板及腹板共布置10个钢弦式应变传感器,见图2。

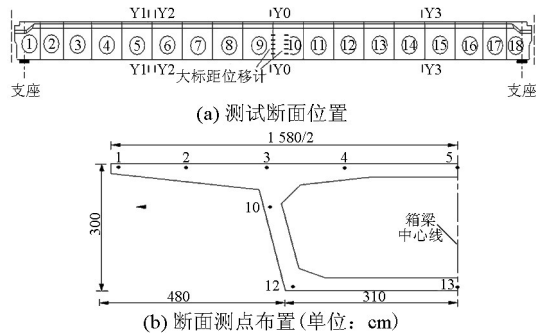


图2 钢弦式应变传感器布置
Fig.2 Layout of steel wire strain sensors

2.2.2 截面应变测试

在混凝土外表面布置大标距位移计,跨中跨接缝处左右腹板各布置5个测点,节段9中间左腹板布置5个测点,总计布置15个测点,测点布置见图2。

2.2.3 挠度测点布置

为了测出箱梁的挠曲线,在跨中、支墩及1/4跨处布设挠度测点,每个断面底板对称布置2个测点,图3为位移计布置方案。

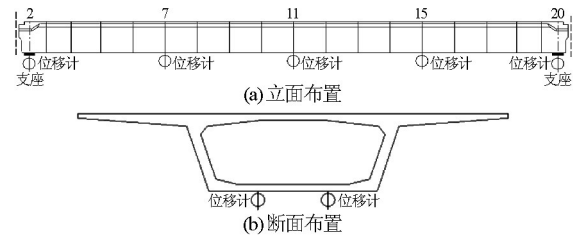


图3 位移测点布置方案
Fig.3 Layout of displacement sensors

2.2.4 索力测点

体内束索力测试布置在18号节段锚固端B1和B5钢束上,每根钢束布置3个单根锚索计,共6个。其中B1在最上端,B5在最下端(见图4a);体外束索力测试在右腹板布置一个600 t的穿心式压力传感器(E4钢束),同时在左腹板钢束E1、E2和E4布置单根锚索计,每束布置3根,共9根(见图4b)。索力计分为单根锚索计(见图5a)和整束锚索计(见图5b)。

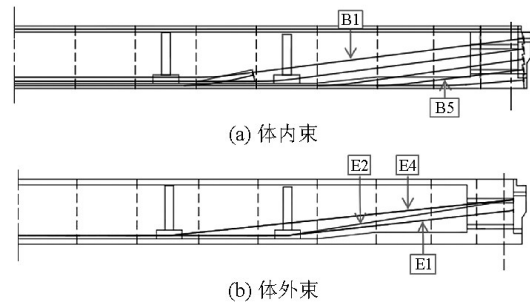


图4 预应力束索力测点
Fig.4 Layout of tendon force sensors

2.2.5 体外束滑移测点

体外束滑移布置在转向块D1和D2处,选取最小转角E4钢束布置两根,最小转角E1钢束布置一根。通过在预应力筋上焊接固定夹片(实际工程中不应采用),为千分表提供撑脚,来测量体外预应力束的滑移,见图5c和图5d。

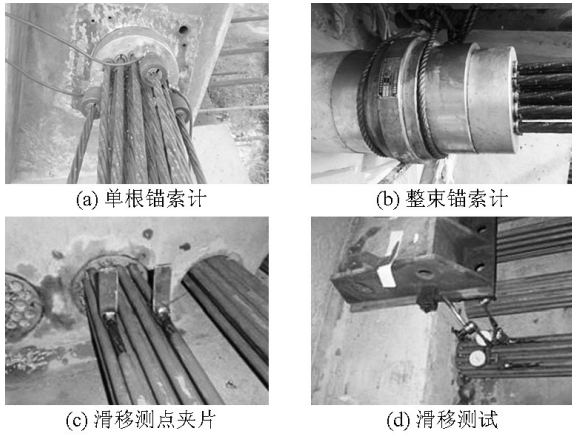


图5 预应力束测试仪器
Fig.5 Gauges for prestress tendons

2.3 拼装加载方案

根据预制厂与现场施工条件的不同,确定采用满堂支架进行拼装。试验节段梁采用100 t龙门吊在支架上进行拼装,拼装顺序从一端向另一端进行,拼装实施过程如图6a和图6b所示。试验加载荷载以跨中弯矩与实桥二期恒载和活载下的跨中弯矩基本相当的等效原则确定。根据试验现场的实际条件,使用预制梁节段堆载的方式来施加荷载,经过计算,采用8片标准箱梁节段进行实际加载,如图6c所示。梁段加载结束后,卸除加载梁段和预应力,进行梁上运梁试验(见图6d)。

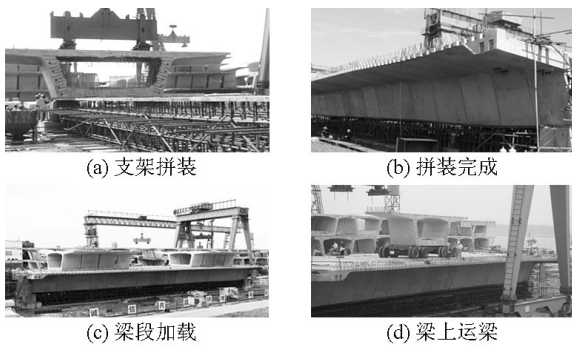


图6 试验箱梁拼装加载方案
Fig.6 Girder assembly and loading scheme

2.4 试验工况

试验工况主要分为9种,包含体内、体外预应力张拉,箱梁节段加卸载,体外预应力退锚以及梁上运梁等(见表1)。预应力施加历时3 d,箱梁节段加载历时4 d,每天对称加载2片,加载顺序由梁端向跨中,加载梁段位置分别距支座中心线6 m、9 m、12 m

和15 m,如图7所示。加载在每天清晨6:30~7:30进行,以减少温度变化对试验结果的影响。梁段加载完后,卸载梁段,拆除体外预应力,在仅保留体内预应力的情况下进行梁上运梁试验(见图6d)。

表1 试验工况
Table 1 Load cases

试验工况	试验状态
1	张拉体内预应力(未落架)
2	张拉体外预应力(落架后)
3	加载2个梁段(2×681.2 kN)
4	再加载2个梁段(2×681.2 kN)
5	再加载2个梁段(2×681.2 kN)
6	再加载2个梁段(2×613.6 kN)
7	卸载全部8片梁
8	卸除全部体外束
9	梁上运梁,100 kN运梁车载重787.8 kN梁段



图7 节段加载工况
Fig.7 Segment loading cases

3 实体有限元模型

为了与试验结果进行对比,采用ANSYS有限元软件进行实体建模分析,混凝土单元采用SOLID45单元进行模拟,体内外预应力钢束采用LINK8单元进行模拟。体内预应力束采用约束方程与混凝土单元连接,体外预应力束采用节点耦合与转向块和锚固块进行连接。为了减少计算量,利用对称性,只建立横向半边模型,如图8所示。材料特性取值如表2所示。

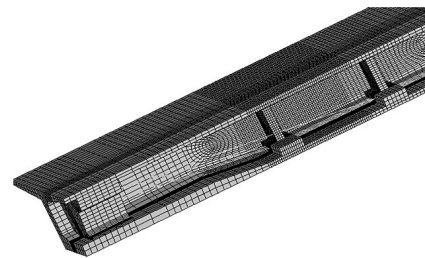


图8 实体有限元模型
Fig.8 Solid finite element method model

表2 材料特性

Table 2 Material properties

材料	弹性模量 /MPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
混凝土	3.55×10^4	35.5	2.74	0.2	26
钢绞线	1.95×10^5	—	1 860	0.3	78.5

4 试验结果分析

4.1 正常使用加载工况分析

加载过程中,梁体在四级荷载作用下挠度变化如图9所示。实测表明,跨中挠度最大增量为14.3 mm,跨中挠度、四分点挠度均基本与跨中弯矩呈线性关系。

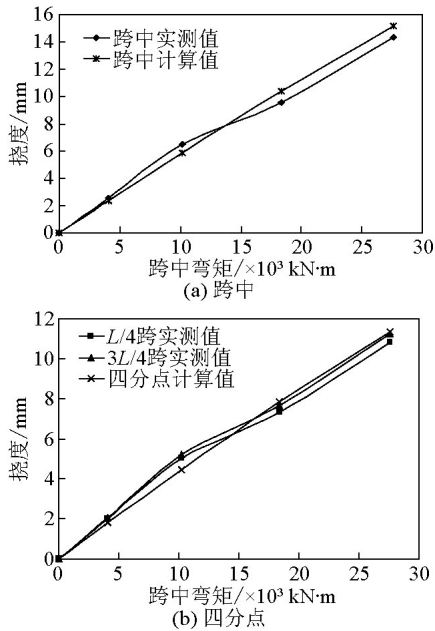


图9 挠度随跨中弯矩变化情况

Fig.9 Variation of measured deflection with mid-span moment

梁体实测应力变化情况见图10。实测表明,跨中截面上缘最大压应力增量为1.17 MPa,下缘最大拉应力增量为3 MPa,各截面应力与跨中弯矩基本呈线性关系。四分点截面梁顶应力基本与计算值吻合,其梁底应力和跨中截面应力实测值都较计算值小。

通过布置于跨中接缝截面和节段内部截面的大标距位移计,实测应变沿梁高的变化如图11所示。

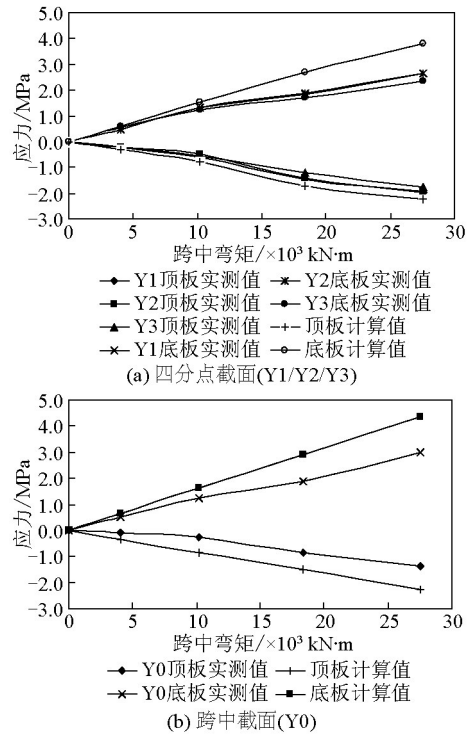


图10 典型截面应力随跨中弯矩变化情况

Fig.10 Variation of typical cross-section stress with mid-span moment

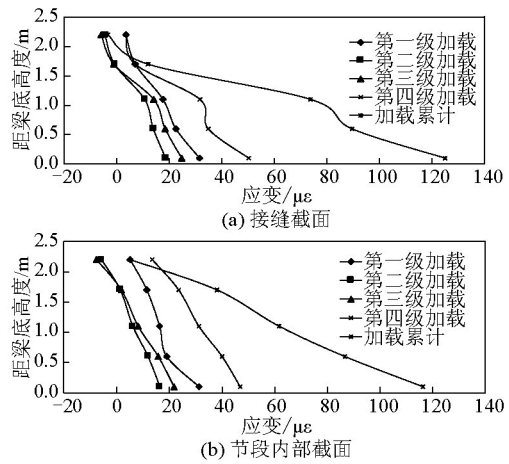


图11 实测应变随梁高变化

Fig.11 Strain distribution along box girder depth

从图11中可以看出,在加载工况下,接缝截面和节段内部截面的应变沿梁高均表现为较明显的线性变化,同时可见,节段内部截面的应变分布与平截面假定符合更好。

4.2 梁上运梁加载工况分析

梁段加载测试完成后,卸载8片加载梁段,卸除体外预应力束,进行梁上运梁工况测试。首先,将

运梁小车吊装到试验梁的顶面,运梁小车上堆放北引桥最重梁段(787.8 kN),见图6d。运梁车在梁上载重行驶时,测量梁底部的应力变化。

第2轴位于21.4 m和23 m处,梁的上下缘应力最大,上缘最大压应力增量为1.18 MPa,下缘最大拉应力增量为1.29 MPa。在运梁最不利工况下,跨中梁底下缘还有5~7 MPa的压应力,梁底不致出现拉应力。在加载最不利状态下,接缝截面沿梁高方向应变分布仍然符合平截面假定,且与节段中间截面的应力分布接近,说明运梁状态下梁体中的应变即应力传递保持了连续性。

5 结语

1)在设计荷载组合下,梁体下缘实测应力在四分点处大约为10 MPa,在跨中为11.4 MPa,梁体全截面处于受压状态,表明实际工作应力状态良好。

2)在各级荷载作用下,梁体挠度和应力增量与跨中挠度基本呈线性变化,卸载残余变形小,梁体基本处于弹性工作状态。

3)在加载工况下,各截面纵向应变沿梁高大致呈线性变化,节段接缝截面应变分布仍能很好地符合平截面假定。

4)梁上运梁阶段,梁底最大拉应力增量远小于预应力产生的预压应力,实测跨中梁底压应力约为6 MPa,表明梁上运梁阶段压应力储备充足,不会出现消压。

参考文献

[1] 南京长江第四大桥建设协调指挥部,东南大学,中交公路规划

设计院有限公司. 体内-体外混合配束节段预制拼装连续刚构桥关键技术研究大纲[R]. 南京:南京重大路桥建设指挥部,2009.

- [2] 南京长江第四大桥建设协调指挥部,东南大学,中交公路规划设计院有限公司,等. 南京长江第四大桥48 m跨体内-体外混合配束节段预制拼装箱梁足尺模型试验研究报告[R]. 南京:南京重大路桥建设指挥部,2010.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. GSCB-2-UL Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges (second edition) [S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
- [4] Aparicio Angel C, Ramos Gonzalo, Casas Juan R. Testing of externally prestressed concrete beams [J]. Engineering Structures, 2002, 24 (1): 73-84.
- [5] Rabbat B G, Sowlat K. Behavior of 1:5-scale segmental concrete girders with external and internal tendons [J]. ACI External Prestressing in Bridges, 1990, SP-120: 305-314.
- [6] MacGregor R J F, Kreger M E, Breen J E. Strength and ductility of a three-span externally post-tensioned segmental box girder bridge model [J]. ACI External Prestressing in Bridges, 1990, SP-120: 315-338.
- [7] Naaman A E, Alkhairi F M. Stress at ultimate in unbonded post-tensioning tendons: Part 2—Proposed methodology [J]. ACI Structural Journal, 1992, 88(6): 683-692.
- [8] Roberts-Wollmann C L, Kreger M E, Rogowsky D M. Stresses in external tendons at ultimate [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(2): 206-213.
- [9] He Zhiqi, Liu Zhao. Stresses in external and internal unbonded tendons: Unified methodology and design equations [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(9): 1055-1065.
- [10] Au F T K, Du J S. Prediction of ultimate stress in unbonded prestressed tendons [J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56 (1): 1-11.
- [11] Takebayashi T, Deeprasertwong M, Leung Y W. A full-scale destructive test of a precast segmental box girder bridge with dry joints and external tendons [C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 1994: 297-315.

Full scale model test of segmental precast concrete box girder with external and internal tendons

Zheng Kaiqi¹, Bu Hongqi², Liu Zhao¹, Hui Zhuo¹, Lv Zhitao¹

(1. National Engineering Research Center for Prestressing, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Major Road & Bridge Construction Commanding Department, Nanjing 210033, China)

[Abstract] To investigate the structural behavior of segmental precast prestressed concrete box girder under the regular service stage and the construction state, a span of 48 m full scale box girder model of this type was tested for the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge approach. The assembling and loading plans were determined according to the geometric parameters as well as the actual constraints of the girder. This paper focuses on the static performance, such as stress and displacement changes of the girder during segment loading and transporting. Comparative finite element method analysis was also performed for checking. The model test results show that at the regular service stage, the residual deformation of the girder after unloading is small, which demonstrates that the girder keeps in elastic during loading. The tooth joints of segments work well with each other and have no relative slip; the global performance of the girder is good as monotonous. The vertical distribution of longitudinal strain at joint and between joints basically accords with hypothesis of plane section. Also, the stress increment of prestress tendons is linear to the mid-span moment change. Finally, during the segment transport stage, it shows that there is sufficient compressive stress of the lower flange of the girder to meet the security requirements of transporting girder.

[Key words] segmental precast; model test; external prestress; full scale test