

单/多根锚固缓粘结预应力箱梁承载特性研究

汪鑫鑫

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要: 通过制作缓粘结预应力混凝土箱梁试验模型,并对其进行加载试验,得出缓粘结预应力筋在不同位置时对混凝土梁受力性能的影响规律;再进行同步仿真模拟,并将试验数据与模拟数据进行对比,验证模拟数据的正确性;结合FLAC 3D有限差分方法,对比分析单根锚固和多根锚固缓粘结预应力箱梁承载性能。研究成果可为日后桥梁的箱梁设计提供参考。

关键词: 缓粘结预应力;加载试验;数值模拟;承载特性

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0270-06

Study on Load Bearing Characteristics of Single/Multiple Anchored Slow-bonded Prestressed Box Girder

WANG Xinxin

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: By making the test model of the slow-bonded prestressed concrete box girder and carrying out the loading test, the influence rule of slow-bonded prestressed tendons on the mechanical properties of concrete beams at different positions is obtained. Synchronous simulation is carried out, and the test data is compared with the simulation data to verify the correctness of the simulation data. Combined with FLAC 3D finite difference method, the load-bearing performances of single-anchored and multi-anchored slow-bonded prestressed box girder are compared and analyzed, which provides the reference for the design of bridge box girder in the future.

Keywords: slow-bonded prestressing; loading test; numerical simulation; bearing characteristic

0 引言

缓粘结预应力混凝土施工技术无需前期张拉,也无需穿索和压浆,且在缓粘剂完全固化后可达到与正常粘结相同的预应力锚固效果。根据目前缓粘结技术的应用情况,其具备施工便捷、施工质量可靠等优点,因而具有良好的推广应用前景^[1]。

相关文献表明,缓粘结预应力技术能够达到工程所需的锚固效果,已在多个工程中都取得了良好的应用^[2],但鲜有报道缓粘结预应力箱梁的研究和实际应用情况。虽然行业内已形成了完善的预应力箱梁设计理论和施工技术方法,然而随着新材料、新技术的研发和推广应用,仍需要对预应力箱梁的承载性能进行研究^[3]。本文拟通过开展缓粘结预应力小箱梁极限承载能力试验,并结合FLAC 3D有限差分法,分析荷载变化对箱梁跨中位移及裂缝发展的

影响,对缓粘结预应力箱梁的受力特性及极限承载性能进行系统性研究,以为日后缓粘结预应力技术广泛应用于市政桥梁工程提供可靠的科学依据。

1 试验模型

1.1 预应力箱梁

试验以一30 m跨标准小箱梁为原型,按照1:3的比例缩尺得到试验梁,梁长1 020 cm,计算跨径为1 000 cm,梁高55 cm,截面顶部宽度为90 cm,底部宽度为51 cm。单根(8孔8根)锚固预应力和多根(4孔12根)锚固预应力箱梁的截面情况如图1所示,预应力箱梁试样锚具布置情况如图2所示。

1.2 缓粘结预应力筋

试验采用的缓粘结预应力筋如图3所示,其外表由带肋的高强PE护套包裹,中间填充缓粘结剂,预应力筋在中心。钢绞线参照国家标准《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014)^[4]采用1×7-15.2-1 860,缓粘结高强PE护套的直径为24 mm,肋高1.5 mm。钢绞线的公称抗拉强度 $R_m=1\ 860\text{ MPa}$,弹性模量

收稿日期: 2024-07-24

作者简介: 汪鑫鑫(1992—),男,硕士,工程师,从事市政工程施工工作。

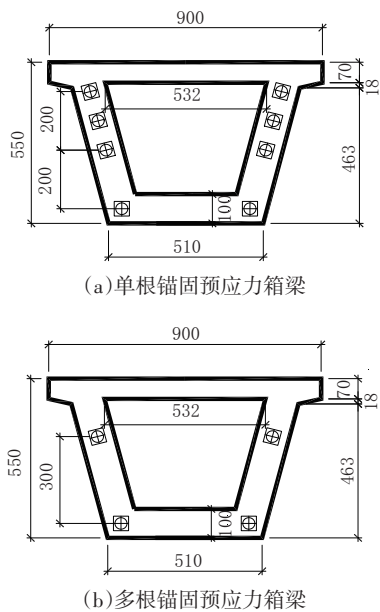


图 1 缓粘结预应力箱梁截面(单位:mm)

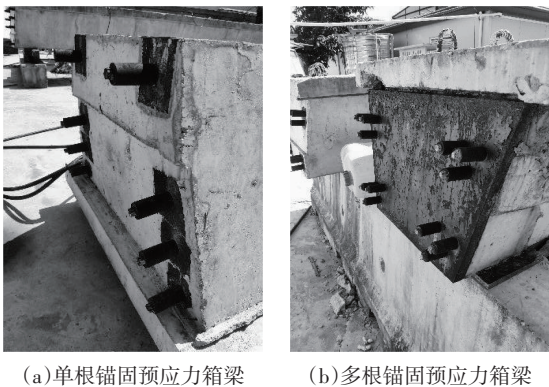


图 2 预应力试验箱梁锚具布置

$E=1.95\times 105\text{ MPa}$,张拉时控制张拉应力 $\sigma=0.75R_m$ 。试验所采用的缓粘结预应力筋的标准张拉适用期为120 d,标准固化时间为360 d。为确保缓粘结预应力钢绞线可发挥出全部的锚固性能,箱梁承载力试验在张拉完成近1 a后再组织加载。

2 加载试验

2.1 加载方法

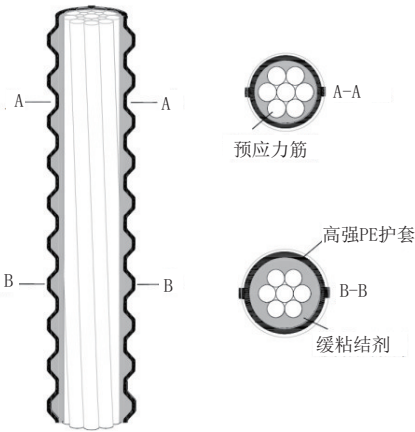
承载力破坏试验是揭示预应力箱梁的结构力学性能、极限承载力和裂缝发展规律的重要方法,然而为了满足试验加载要求,通常需要搭建反力架,必要时还需要新建基础,因此面临试验周期长、费用高等问题。如何降低加载成本,是试验研究过程中亟待解决的技术问题。

本文提出了一种简易的预应力箱梁承载力破坏试验加载方法,其现场布置的步骤如下所列。

(1)将下部试验梁的两端搁置在木垫块上。



(a)外观照片



(b)截面示意图

图 3 缓粘结预应力筋

(2)在下部试验梁两端的梁面上放置铁垫块,中间的梁面上放置两块液压千斤顶;铁垫块每片厚8 cm,在两端各垫7片,以确保铁垫块的顶面高程稍高于千斤顶的顶面高程。

(3)采用吊索与吊车相配合的方法将另一片试验梁先在地面进行翻转,使梁面朝下,然后再将翻转后的试验梁吊至下部试验梁两端的铁垫块上。

(4)对两片梁、铁垫块和中间液压千斤顶的位置进行调整,以确保两片梁的重心均在两个千斤顶的正中间。

(5)用专用锁具将两片梁的两端固定住。

(6)将压力表与液压千斤顶相连接并进行调试,在梁面和梁底安装表面应变计。

试验梁加载布置过程如图4所示,加载布置完毕结果如图5所示。

液压千斤顶在两块预应力箱梁间需起重加载至预应力箱梁发生破坏,因此要求采用的液压千斤顶的量程要大于破坏预应力箱梁时的压力。

压力传感器为柱式压力传感器,安装在液压千斤顶的顶盖,柱式压力传感器是在空间有限的情况下安装的理想选择,具有出色的长期稳定性。压力传感器电连接于采集仪,检测顶升过程中预应力箱梁受到的压力,采集仪实时获取压力传感器的力学数据并传输到分析单元,因此,压力传感器、采集仪和分析单元构成了压力检测系统;采集仪为DH3819无线静态应变采集仪;分析单元为具有数据处理功

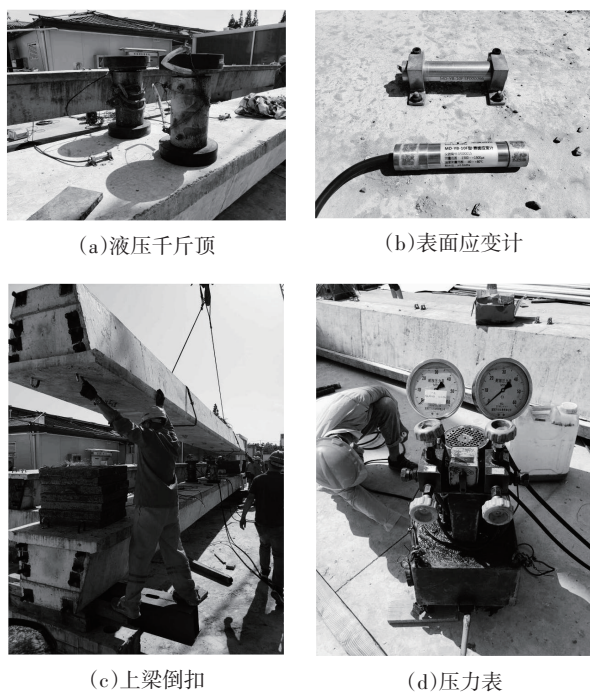


图4 试验梁加载布置过程



能的电脑、计算设备等,利用分析单元对采集仪所收集到的力学数据进行分析处理,以此为依据研究预应力箱梁的力学性能;其中,电连接的方式包括通过导线连接,也包括通过无线通讯在内的其他信号连接方式进行连接,以实现力学数据的传输。

在常规的方法中,开展箱梁承载力破坏试验时,需要架设支撑柱,并在两支撑柱上安装反力架,从而承担千斤顶加载时所产生的后坐力;此外,还需要对地基进行加固,防止地基被破坏,存在试验周期长、费用高等问题。与以往技术相比较,本方法是一种费用低、用时短、操作简便的预应力箱梁承载力破坏试验加载方法,但其也存在实际受力情况会受到箱梁自身重力影响的缺点;而随着千斤顶荷载的不断加大,箱梁自身重力对试验结果的影响将逐渐减小。

2.2 试验加载

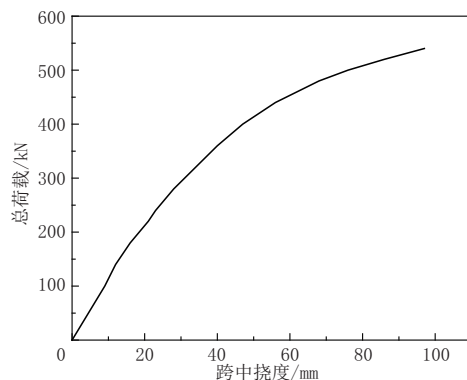
在试验现场整体布置完成后,开始进行加载试验。加载试验所用的液压千斤顶量程为100 t,试验过程中采用分级加载的方式,在预估开裂和破坏前

适当增加分级,以确保试验数据的有效性。为了确保试验过程中人员安全,需通过水准仪无接触地测量箱梁的挠度变化。

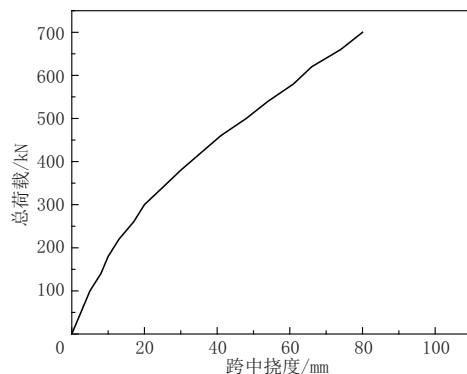
3 模型试验结果

3.1 跨中挠度-荷载曲线

单根锚固预应力箱梁挠度荷载曲线如图6(a)所示,试样加载至100 kN时挠度为9 mm,混凝土未出现开裂的情况;加载至400 kN时挠度为47 mm,在混凝土表面已发现了裂缝,此时挠度-荷载曲线已出现拐点;加载至500 kN时挠度为76 mm,在混凝土表面出现大量裂缝;荷载从500 kN加载至540 kN时,跨中挠度迅速增加至97 mm,且此时箱梁底部出现超过1 mm宽度的大裂缝。



(a) 单根锚固预应力箱梁的挠度-荷载曲线



(b) 多根锚固预应力箱梁的挠度-荷载曲线

图6 挠度-荷载曲线

多根锚固预应力箱梁挠度荷载曲线如图6(b)所示,试样加载至100 kN时挠度为5 mm,混凝土未出现开裂的情况;加载至500 kN时挠度为48 mm,在混凝土表面已发现了裂缝,此时挠度-荷载曲线已出现拐点;加载至660 kN时挠度为76 mm,在混凝土表面出现大量裂缝;荷载加载至700 kN时跨中挠度增加至80 mm,此时箱梁中间部分的裂缝较大,裂缝宽度不足1 mm。

3.2 预应力箱梁裂缝分布情况

单根锚固预应力箱梁在加载后的裂缝分布情况如图 7 所示,梁上共发现明显裂缝 15 条,跨中区域为竖向裂缝,左右两端为斜向裂缝。相对而言,单根锚固预应力箱梁裂缝分布范围相对较小,且基本集中在跨中区域。试验过程中出现的最大裂缝如图 7(c)所示,位于箱梁底部、靠近跨中的位置,裂缝大小超过 1 mm。

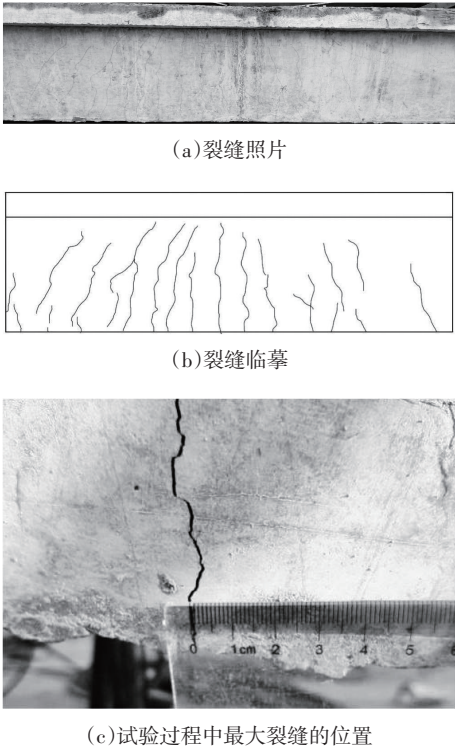


图 7 单根锚固预应力箱梁裂缝分布情况

多根锚固预应力箱梁在加载后的裂缝分布情况如图 8 所示,梁上共发现明显裂缝 20 条,跨中区域为竖向裂缝,左右两端为斜向裂缝。可见与单根锚固预应力箱梁的裂缝相比,多根锚固预应力箱梁裂缝的分布范围相对较大,且从跨中向外扩散。根据试验过程中裂缝宽度的分布情况,最大的裂缝宽度出现在箱梁中间区域,而非箱梁底部,如图 8(c)所示。这主要是因为多根锚固预应力锚筋集中布置在箱梁的顶部和底部,中间区域未布置锚筋,因此中间区域的抗裂性能相对较弱。

4 数值模拟建模

4.1 箱梁建模

对箱梁进行建模如图 9(a)所示,箱梁主体采用实体网格单元进行模拟,模型大小与实体模型保持一致,单元纵向长度为 62.5 mm;横断面网格划分情况如图 9(b)所示,共建立 9 660 个网格节点,6 720 个

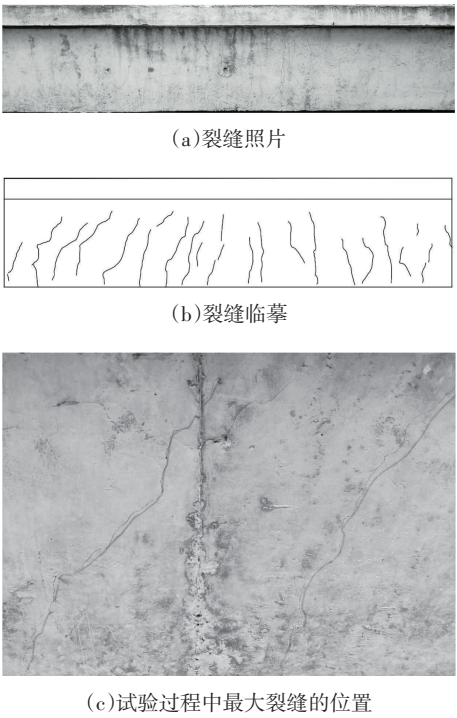


图 8 多根锚固预应力箱梁裂缝分布情况

实体网格单元;箱梁实体模型为 C50 混凝土,故在进行数值模拟分析时,采用线弹性模型对箱梁的力学性能进行模拟。

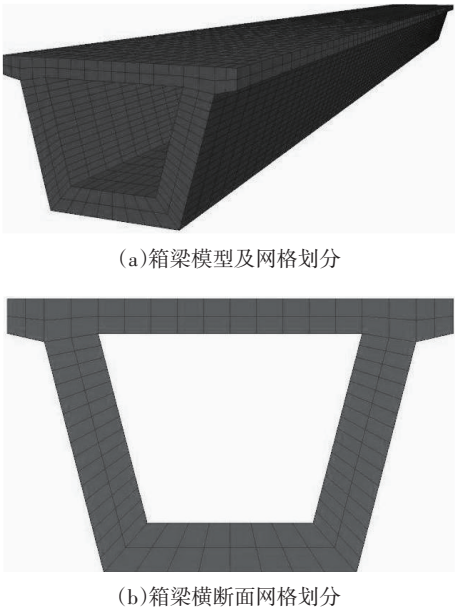


图 9 箱梁建模

模型的边界条件应与实体模型试验条件保持一致,梁体四周不设置任何约束,仅在箱梁两端底部约 10 cm 的两处位置对竖向方向(即 Z 轴方向)的位移和速度进行约束。

4.2 预应力锚筋模拟

预应力锚筋采用 FLAC 3D 平台内置的结构单

元-锚索单元(Cable)进行模拟,锚索单元可以模拟拉伸和压缩下屈服,但不能抵抗弯矩。锚索周围可以添加灌浆单元如图10所示,用以模拟锚索与实体网格之间的接触力。单根锚固预应力箱梁和多根锚固预应力箱梁的锚固模型如图11所示,实体模型中曲线预应力钢绞线由数根直线段锚索单元进行模拟。在FLAC 3D中,一旦建立了结构单元,便自动与周围的网格单元建立了界面接触关系,因此无需再额外建立界面接触单元。

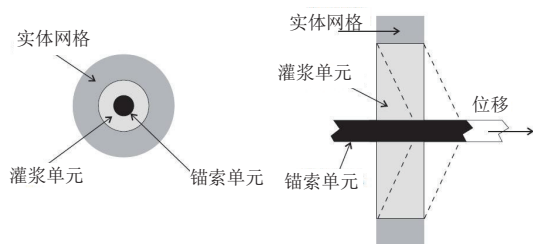
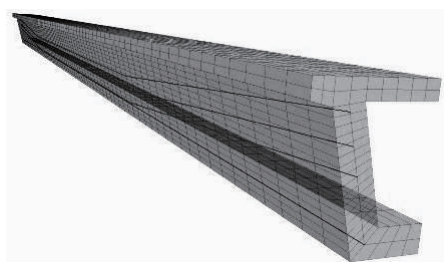
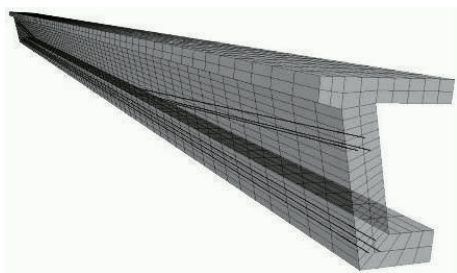


图10 锚索单元力学机理



(a)单根锚固模型



(b)多根锚固模型

图11 锚索单元模型

4.3 计算参数及加载工况

(1)箱梁实体网格线弹性模型的计算参数如下:

(2)C50混凝土的弹性模量为34.5 GPa,泊松比为0.2;

(3)锚筋为钢绞线,弹性模量为195 GPa,泊松比为0.2,屈服应力1 860 MPa;

锚筋预应力设为1 395 MPa,但由于混凝土箱梁的预拱收缩变形,锚筋的实际预应力应约为1 250 MPa。

加载前,需对锚筋施加预应力来模拟现场缓粘结钢绞线的张拉,再对预应力箱梁进行分级加载。荷载分级与实体模型试验保持一致,第一级荷载为

100 kN,随后每一级荷载增加100 kN。荷载达到500 kN后,每一级荷载增加40 kN,直至箱梁出现明显破坏。

5 数值模拟结果分析

5.1 缓粘结预应力张拉分析

缓粘结预应力在张拉时缓粘结剂具有良好的流动性,因此施加预应力时将灌浆单元的黏聚力、摩擦角和剪切刚度设置为0,模拟锚筋的自由张拉。

5.1.1 锚筋应力分析

由于在张拉时未赋予灌浆单元界面参数,仅将两侧端部与箱梁连接绑定在一起,因此张拉时,灌浆单元仅端部受力,中间部分为应力分布。单根锚固和多根锚固缓粘结预应力箱梁张拉后的灌浆单元整体应力分布如图12所示,可见两者灌浆单元的应力分布基本保持一致,且均体现出了缓粘结预应力张拉的特征。

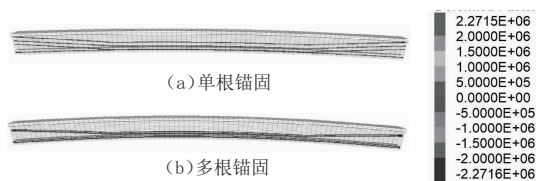


图12 灌浆单元应力分布

张拉平衡后,预应力锚筋的应力分布如图13所示,由于灌浆单元的锚固作用,锚筋两端的应力相对较小,中间区域的应力较大且不沿长度方向变化。对比分析单根锚固和多根锚固预应力锚筋的应力分布,单根锚固预应力锚筋的应力大小沿箱梁高度方向变化较小,应力均维持在1 280 MPa以上;多根锚固预应力锚筋的应力大小沿箱梁高度方向有明显变化,越靠近箱梁顶部的锚筋应力越大,箱梁底部的锚筋应力最小,约为1 200 MPa。

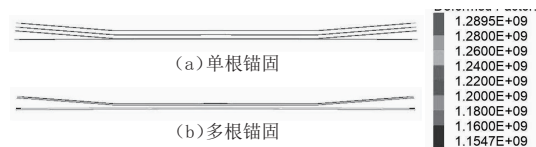


图13 锚筋应力分布

张拉前的锚筋预应力均设置为1 395 MPa,张拉后不同工况和不同位置的锚筋应力均出现衰减,这是由于箱梁收缩变形所引起的。多根锚固预应力箱梁底部的变形较大,因此应力衰减更为明显。

5.1.2 箱梁应力分析

张拉后单根锚固和多根锚固预应力箱梁的应力分布如图14所示,在预应力锚筋端部附近均出现不同程度的应力集中现象。多根锚固预应力箱梁由于

锚筋相对集中,箱梁端部的应力集中现象更为显著,且应力大小也比单根锚固预应力箱梁更大。单根锚固和多根锚固预应力箱梁底板应力均大于顶板应力。

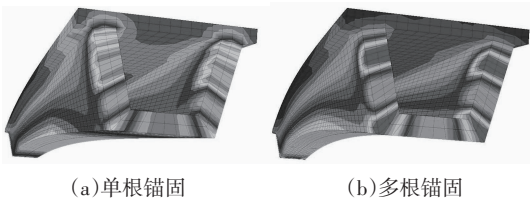


图 14 箱梁应力分布

5.1.3 箱梁预拱度分析

张拉后单根锚固和多根锚固预应力箱梁的竖向位移分布如图 15 所示,反映出张拉后箱梁的预拱度。在张拉完成后,单根锚固和多根锚固预应力箱梁变形为拱形,符合实际箱梁的变形特征。单根锚固预应力箱梁的最大竖向位移为 11.1 mm,多根锚固预应力箱梁的最大竖向位移约为 17.6 mm;张拉后,多根锚固预应力箱梁的变形更大,这解释了前文中多根锚固预应力锚筋应力衰减更明显的现象。

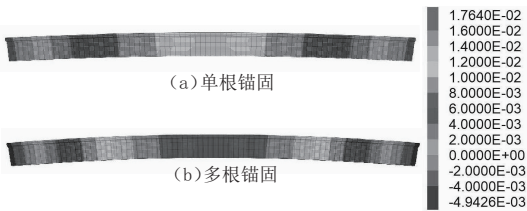


图 15 箱梁预拱度

5.2 箱梁承载性能分析

5.2.1 箱梁应变分析

基于模型试验数据,单根锚固预应力箱梁加载至 540 kN 后停止加载,多根锚固预应力箱梁加载至 700 kN 后停止加载。单根锚固和多根锚固预应力箱梁加载后的应变分布情况如图 16 所示,两类箱梁的应变分布特征相似,最大应变均出现在跨中,并逐渐向两端扩散。相较而言,多根锚固预应力箱梁的应变更小,表现出了更好的承载性能。

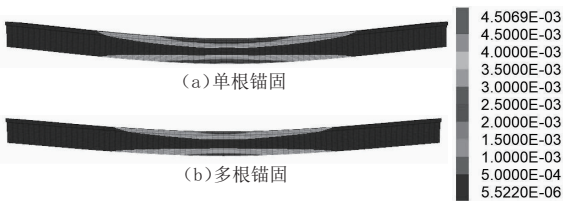


图 16 箱梁应变分布

5.2.2 箱梁挠度分析

单根锚固和多根锚固预应力箱梁在加载后的竖向位移分布情况如图 17 所示,最大竖向位移出现

在跨中,箱梁两端则呈现出一定程度的上翘,整体变形特征与模型试验相符。单根锚固预应力箱梁的最大挠度为 80.8 mm,多根锚固预应力箱梁的最大挠度为 64.2 mm,均小于模型试验的结果(单根锚固 97 mm,多根锚固 80 mm),其主要原因是数值模型无法模拟混凝土的开裂。总体而言,多根锚固预应力箱梁在更大的荷载作用下,却表现出较小的变形,抗弯性能明显优于单根锚固预应力箱梁。

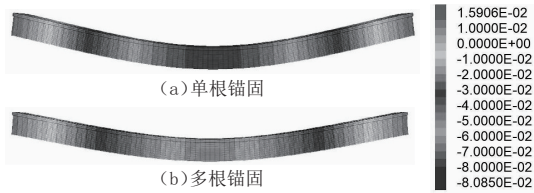


图 17 箱梁竖向位移分布

6 结 语

通过开展单根锚固和多根锚固缓粘结预应力箱梁模型的承载力试验,对比研究了两种类型箱梁的承载力和变形特征,并基于 FLAC 3D 有限差分方法,建立了单根锚固和多根锚固缓粘结预应力箱梁的数值模型,对比分析了箱梁张拉后和加载后的应力、应变和位移分布特征,研究了单根锚固和多根锚固缓粘结预应力箱梁的承载性能,得出主要结论如下所列。

(1)缓黏结预应力箱梁模型试验结果表明,跨径为 10 m 的单根锚固预应力箱梁承载力可达 540 kN,对应挠度为 97 mm;多根锚固可达 700 kN,对应挠度为 80 mm,两种类型箱梁的承载力均能满足工程建设需求;单根锚固预应力箱梁的裂缝发展较快,最大裂缝超过 1 mm,而多根锚固预应力箱梁的裂缝相对较小,因此整体而言,多根锚固预应力箱梁承载性能优于单根锚固预应力箱梁。

(2)由于多根锚固预应力箱梁的预应力筋数量更多,且布置更为集中,张拉完成后多根锚固预应力箱梁两端的应力集中现象更为明显,预拱度更大;且由于张拉后,多根锚固预应力箱梁的挠度大,布置在箱梁底部的锚筋应力衰减现象更为明显。

(3)模型加载试验和数值模拟分析的结果基本一致,均表明多根锚固预应力箱梁的承载性能优于单根锚固预应力箱梁;多根锚固预应力箱梁的性能提升,一方面得益于锚筋数量的增加,另一方面则是因为锚筋集中布置在箱梁的底部,不仅增加了张拉后的预拱度,而且加强了箱梁受拉区域的性能。

(下转第 283 页)