

文章编号:1673-2049(2013)01-0049-06

重复荷载下高速铁路 32 m 箱梁模型 受力全过程试验

葛继平¹, 王志强², 张旭³, 彭大文¹

(1. 上海应用技术学院 城市建设与安全工程学院, 上海 200235; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092;
3. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要:采用三分点重复加载,对高速铁路中广泛应用的 32 m 预应力混凝土简支箱梁进行了多级重复荷载下的模型试验,其测试内容主要包括箱梁的裂缝分布及裂缝宽度、荷载-跨中挠度曲线、混凝土应变和钢筋应变的分布等。结果表明:简支箱梁首先在跨中底板出现裂缝,然后缓慢向腹板扩展;在纯弯段,裂缝间距分布比较均匀;在施加荷载超过开裂荷载不多的情况下卸载,裂缝在预应力的作用下能够闭合;加载结束时箱梁已经达到承载力极限状态(破坏)的标志是弯曲挠度达到跨度的 1/30,受拉主筋处最大裂缝宽度达到 1.8 mm;重复加载下的荷载-跨中挠度曲线的包络线有 3 个拐点,分别对应于混凝土开裂、钢筋屈服、预应力筋屈服;跨中截面钢筋应变和混凝土应变沿腹板基本符合平截面假定,跨中顶板和底板截面钢筋应变和混凝土应变沿截面横向分布呈现箱梁剪力滞的分布规律。

关键词:高速铁路;预应力混凝土;简支箱梁;重复荷载;跨中挠度;承载力

中图分类号:TU317.1 **文献标志码:**A

Experiment on Full-range Static Performance of Model of 32 m High-speed Railway Box Girder Under Repeated Loading

GE Ji-ping¹, WANG Zhi-qiang², ZHANG Xu³, PENG Da-wen¹

(1. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China; 2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A simply supported prestressed concrete box model with span of 32 m which was widely applied in high-speed railway girder under repeated loading was tested, and the experiment was the three-point repeated loading. The experiment focused on the distribution and width of cracks, the load-mid-span deflection relation curve, and strain distributions of concrete and steel bars. The results show that the concrete cracks first appear in the bottom plate of the simply supported box girder, and then slowly extend to the web. In the area of pure bending, spacing distribution of cracks is relatively uniform. When the load is little bigger than the cracking load, cracks can be closed under the action of the prestressed tendons. The final damage phenomenon of box girder is the ratio of bending deflection to span is 1/30, and the maximum width of crack in the reinforced

收稿日期:2012-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51178350);铁道部科技研究开发计划项目(2010G007-J);上海市教委重点学科建设项目(J51502)

作者简介:葛继平(1979-),男,江苏海安人,副教授,工学博士,E-mail:bridgejiping@126.com.

bar area is 1.8 mm. Under the repeated loading, the envelope of load-deflection curve has three-inflection points, respectively corresponding to the cracking of concrete, the yield of steel bar, and the yield of prestressed strand wires. The strains of steel bars and concrete in the mid-span section along the web are basically consistent with plane section assumption. Strains of steel bars and concrete in the top plate and bottom plate along the transverse distribution show the shear lag phenomena.

Key words: high-speed railway; prestressed concrete; simply supported box girder; repeated loading; mid-span deflection; bearing capacity

0 引言

高速铁路中的桥梁所占比例较大,有的高达 80%~90%,其中,有很多都是标准跨度的简支梁桥。这些标准跨度的桥梁结构构件数量巨大,有利于工厂预制施工,可采用架桥机组织快速铺设,这对保证全线工期有着至关重要的作用。根据中国高速铁路建设规模、工期要求和技术特点,通过深入的研究,确定以 32 m 简支箱梁作为标准跨度,整孔预制架设施工^[1]。重复荷载下箱梁的全过程受力分析是一个非常复杂的问题。对于工程实践中的成批原型箱梁,可以按照《预应力混凝土铁路桥简支梁静载弯曲试验方法及评定标准》进行检查,验证箱梁是否能够满足现行铁路设计规范对结构变形和静力使用性能的要求^[2-3],但是对极限状态下的箱梁行为缺乏研究。武凤远^[4]对高速铁路、客运专线中应用广泛的预应力混凝土简支箱梁进行了从设计、施工、科研试验多角度的分析,详细总结了我国高速铁路大规模采用的预应力混凝土简支箱梁设计施工中的成熟经验;侯建军^[5]对时速 250 km 城际铁路单箱单室整孔箱梁开展了箱梁跨中弯曲静载试验和梁端受力性能试验研究;李晗之^[6]对施工完毕的 32 m 后张法预应力混凝土简支箱梁进行静载试验,判断箱梁的工程质量是否符合规范设计要求;方志等^[7]利用足尺箱梁模型研究了预应力损失问题;其他学者也进行了一些相关研究^[8-13]。这些研究对使用状态下箱梁各个方面的行为做了全面的总结,为本文的研究打下坚实的基础。

作为“基于动测法的高速铁路桥梁损伤识别研究”的一部分,本文中主要对 32 m 跨度单线简支箱梁模型进行重复荷载试验研究,其目的是全面探究预应力简支箱梁在加载全过程中的受力性能,包括正常使用极限状态下的挠度、裂缝宽度及裂缝分布和跨中截面剪力滞效应与承载力极限状态下的破坏模式、挠度和跨中截面剪力滞效应,为后续的结构损

伤识别研究提供基准数据。

1 箱梁设计

1.1 原型箱梁的选择

选取合蚌客运专线 32 m 预应力混凝土简支箱梁为研究对象,适用范围是客运列车最高行车速度 250~350 km·h⁻¹,适用于场地集中预制、架桥机架设。梁体采用高性能混凝土,强度等级为 C50,截面类型为单箱单室箱梁,梁端顶板、底板及腹板局部向内侧加厚。原型箱梁长 32.6 m,计算跨度 31.5 m,梁高 3.05 m,截面如图 1 所示。箱梁结构重心位于跨中截面梁体中心线,距跨中、梁底均为 1.78 m。支座自重反力为 2 584 kN,静活载最大反力为 1 436 kN,竖向自振频率为 6.74 Hz。

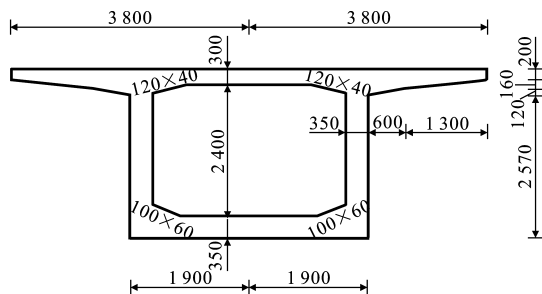


图 1 箱梁跨中截面(单位:mm)

Fig. 1 Mid-span Cross Section of Box Girder (Unit:mm)

1.2 箱梁模型概况

根据相似理论的 3 个相似定理、试验精度要求以及试验条件的可能性,本试验箱梁模型采用 1:5 的比例缩尺模型,其物理量相似关系见表 1。箱梁模型长 6.52 m,梁高 0.61 m,梁宽 1.52 m。混凝土强度等级采用 C50,钢筋采用 HRB400 级钢筋,预应力钢绞线采用 1*7-15.2-1860。箱梁模型设计尺寸如图 2 所示,其中 P 为荷载。

2 试验加载

本试验目的是设计制作预应力简支箱梁模型,

表 1 物理量相似关系

Tab. 1 Physical Quantity Similar Relations

参数	比例系数
长度	1/5
宽度	1/5
高度	1/5
截面面积	1/25
配筋面积	1/25
正应力	1
挠度	1/5
频率	5
截面惯性矩	1/625
受弯承载力	1/125

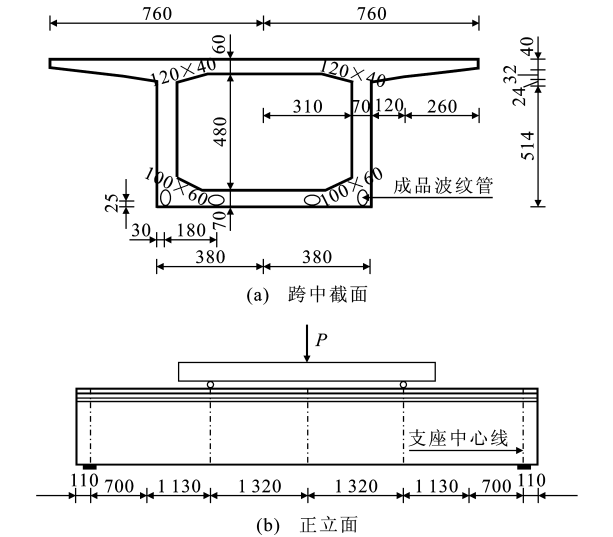


图 2 箱梁模型设计尺寸 (单位: mm)

Fig. 2 Design Dimensions of Box Girder Model (Unit: mm)

对该梁进行不同荷载等级的加载,不同荷载等级对应的状态为后续研究中需要的不同损伤程度的损伤状态,根据该梁的不同加载方式来模拟不同位置的损伤。静载试验主要测试加载全过程中的裂缝出现和开展情况、梁的跨中荷载、梁各点处的挠度、混凝土应变和普通钢筋应变等。

开始加载时,预应力混凝土简支箱梁模型静载加载采用三分点二级分配梁对称集中力加载。试验简支箱梁模型加载受力及加载装置如图 3 所示。

简支箱梁模型整个试验过程包括 10 个工况,每个工况均按照先静力加载,后卸载,再振动的顺序进行。简支箱梁模型破坏性试验研究加载程序严格按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)执行,在正式试验前实行预加载,使试件进入正常工作状态,并检查加载设备和仪表工作是否正常;在正式试验时将简支箱梁模型极限荷载作为试验极限荷载,静力加载的增量为 25 kN,每级持荷

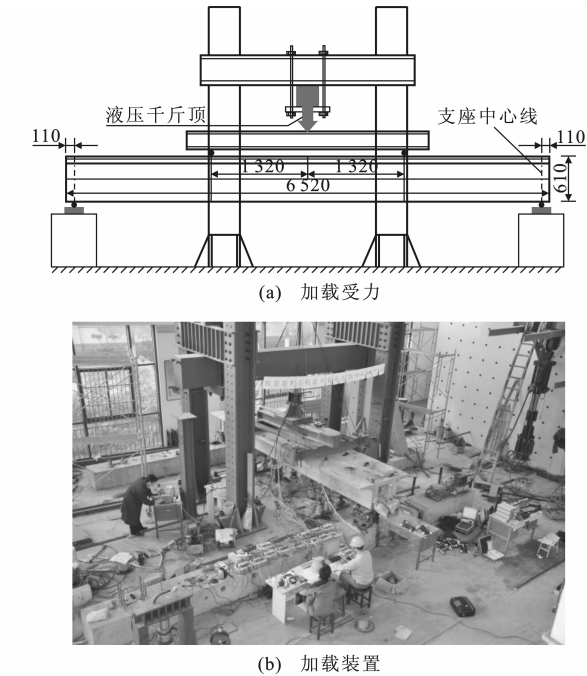


图 3 简支箱梁模型加载受力及加载装置 (单位: mm)

Fig. 3 Loading Force of Simply Supported Box Girder Model and Loading Equipment (Unit: mm)

2~5 min后进行裂缝观测并绘制裂缝,当接近开裂荷载和极限荷载时,减小荷载增量,以便准确地测得简支箱梁模型的开裂荷载和极限承载力。由于试验后期在荷载增加不多的情况下试件变形会急剧加大,因此加载改用跨中截面位移控制为主,缓慢加载直至试件最终破坏。当加载按照力控制时,加载的荷载等级最大值依次为 100, 250, 400, 500, 700, 900, 1 100, 1 200 kN;当加载按照跨中最大位移控制时,重复加载的位移等级最大值(不计残余位移)依次为 95, 120 mm。每级荷载达到最大值后卸载,再进行下一等级的加载。

3 试验结果分析

3.1 破坏现象

在混凝土桥梁诊断中遇到最多的损伤是裂缝,甚至在全预应力钢筋混凝土桥梁结构中都经常会出现裂缝,降低结构的刚度,影响结构的正常使用。与普通混凝土梁桥相比,预应力钢筋混凝土梁桥的裂缝问题更为复杂,其裂缝形式主要包括跨中附近的横向裂缝、支座附近腹板的斜裂缝以及顶板和底板的纵向裂缝等。各级荷载作用下实测的裂缝分布及裂缝宽度,经统计得到简支箱梁模型在不同加载等级下的平均裂缝间距和最大裂缝宽度,见表 2。

从表2和图4可以看出,在三分点对称集中荷

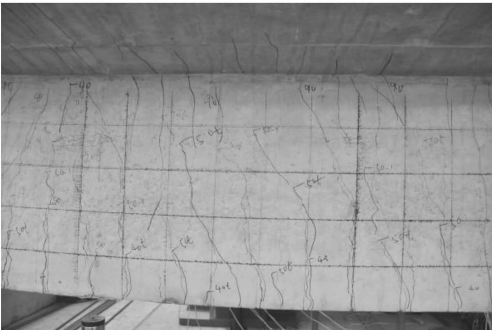
表 2 不同加载等级下的平均裂缝间距和最大裂缝宽度

Tab. 2 Average Distances and Maximum Widths of Crack Under Different Loading Cases

加载等级	力/kN						位移/mm	
	400	500	700	900	1 100	1 200	95	120
平均裂缝间距/mm	357	111	89	76	70	69	69	69
最大裂缝宽度/mm	0.02	0.06	0.20	0.40	0.50	0.80	1.40	1.80
残余裂缝/mm				0.02	0.10	0.20	0.30	0.40



(a) 总体变形和破坏形态



(b) 顶板混凝土开裂



(c) 底板混凝土残余开裂

图 4 简支模箱型梁破坏形式

Fig. 4 Failure Modes of Simply Supported Box Girder Model

载 $P=400$ kN 作用下跨中截面底板两边开始出现裂缝,此时最大裂缝宽度为 0.02 mm。随着荷载的增加,裂缝继续发展变宽,当 $P=700$ kN 时,支座附近腹板开始出现斜裂缝,最大裂缝宽度达 0.2 mm。卸载后,由于预应力效应使箱梁底板出现的大部分

裂缝基本闭合,说明预应力钢筋远未达到极限荷载,施加的预应力对混凝土裂缝开展起到了有效的抑制作用。在箱梁的纯弯区段,裂缝分布均匀,当加载至 900 kN 时,纯弯区段内的平均裂缝间距为 76 mm,且在以后更大荷载作用下,其平均裂缝间距变化很小。重复加载的位移达到 120 mm 时,简支箱梁模型的最大裂缝宽度为 1.8 mm,达到破坏承载力标志之一的最大裂缝宽度规定的 1.5 mm 限值。此后,结构的裂缝、跨中挠度随着加载急剧发展,说明简支箱梁模型进入破坏阶段,加载停止。

3.2 荷载-跨中挠度曲线

图 5 为简支箱梁模型在跨中荷载作用下,各工况跨中截面的荷载-跨中挠度曲线。从图 5 可以看出,随着荷载的增加,滞回环包围的面积明显增加,说明结构内部损伤程度较大,残余位移也明显增大。当总跨中挠度达到 210 mm 时,弯曲挠度达到跨度的 $1/30$,大于 $1/50$,说明箱梁已经彻底丧失承载能力。从图 5 还可以看出:整个骨架曲线明显分为 3 个阶段,简支箱梁模型底板受拉区混凝土开裂前,荷载与跨中挠度呈线性关系,结构基本处于线弹性工作状态,刚度基本维持不变,此阶段称为线弹性阶段(第 I 阶段);简支箱梁模型底板受拉区混凝土开裂后远未达到极限荷载前,随着荷载的增加,结构变形增快,箱梁刚度较开裂前有所降低,裂缝开裂的程度继续增大,到普通钢筋屈服时,结构刚度基本维持不变,拐点对应钢筋屈服阶段(第 II 阶段);简支箱梁模型跨中截面底板普通受拉钢筋屈服后,随着荷载的增加,结构变形明显增快,结构的刚度大为降低,但简支箱梁模型底板受拉预应力钢筋屈服前,跨中挠度与荷载仍基本呈线性关系,刚度基本维持在同一水平,近似呈水平段,对应的拐点称为结构破坏,近似认为是预应力筋屈服(第 III 阶段)。

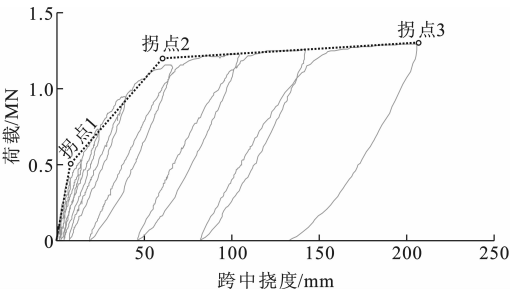


图 5 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Load-mid-span Deflection Curves

图 6 为简支箱梁模型各工况的竖向挠度分布曲线。从图 6 可以看出:在对称荷载作用下箱梁挠度

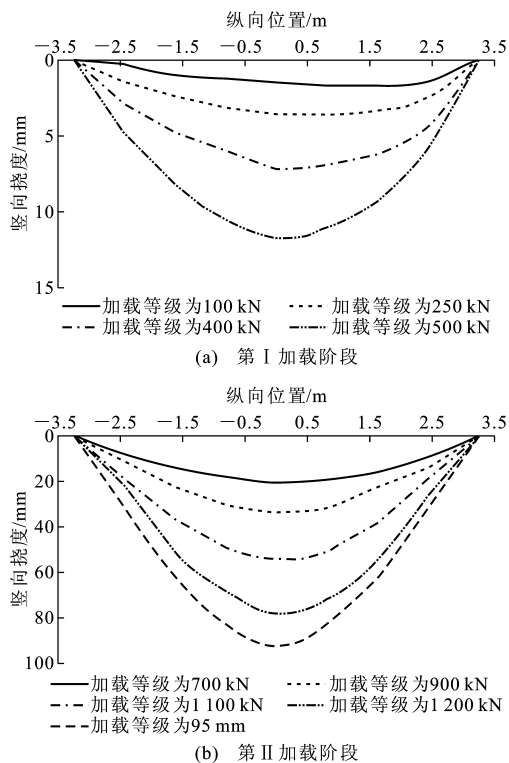


图 6 简支箱梁模型竖向挠度分布曲线

Fig. 6 Vertical Deflection Distribution Curves of Simply Supported Box Girder Model

基本对称,随着荷载的增加,挠度缓慢增加,两端支座转角也不断增大。综合来看,箱梁模型整体变形能力较好,变形纵向左对称。

图 7 为简支箱梁模型在三分点对称荷载作用下跨中挠度沿横向分布曲线。从图 7 可以看出,在不同荷载作用下截面跨中挠度横向分布基本呈一水平线,说明简支箱梁模型在不同荷载作用下跨中截面各处的挠度大致均匀,基本不存在扭转变形。

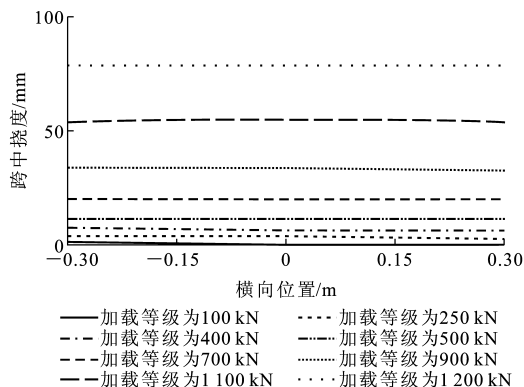


Fig. 7 Mid-span Deflection Distribution Curves Along Transverse

3.3 混凝土应变

图 8 为箱梁跨中截面混凝土应变分布曲线。

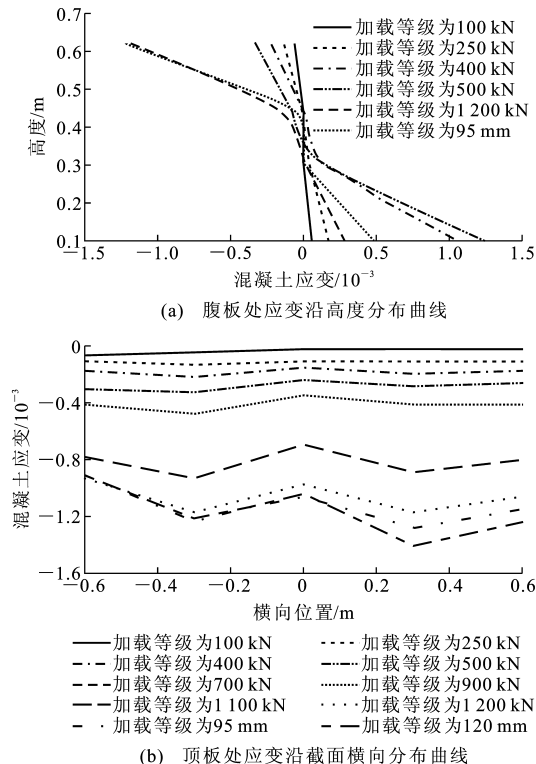


图 8 跨中截面混凝土应变分布曲线

Fig. 8 Strain Distribution Curves of Concrete in Mid-span Section

图 8(a)为典型荷载工况加载过程中箱梁跨中截面腹板处应变沿高度的分布。从图 8(a)可以看出,简支箱梁模型跨中腹板处应变沿高度分布基本符合平截面假定。随着荷载的增加,箱梁的中和轴位置不断上移,受拉区和受压区混凝土应变随之增大,当加载至 95 mm 时,箱梁顶板最大压应变为 1.21×10^{-3} ,对应的弹性混凝土压应力为 41.7 MPa,该值小于 C50 混凝土轴心抗压强度试验值 45.6 MPa,说明简支箱梁模型顶板受压区混凝土接近压溃。图 8(b)为典型荷载工况加载过程中箱梁跨中截面顶板处应变分布。从图 8(b)可以看出,在整个加载阶段,沿截面横向的腹板两侧受力较小,腹板处混凝土应变稍大,呈现箱梁剪力滞的分布规律。

3.4 钢筋应变

图 9 为各级荷载作用下,箱梁钢筋腹板沿跨中截面高度方向、顶板和底板沿跨中截面横向的应变分布曲线。从图 9(a)可以看出:随着荷载的增加,截面中性轴高度不断上升,开始上升的速度较快,后面上升的速度较慢,主要是混凝土和钢筋受力缓慢达到平衡;但达到平衡状态时,近似认为受压区稳定,中性轴高度不变;各级荷载作用下,钢筋的应变分布基本上满足平截面假定。从图 9(b),(c)可以

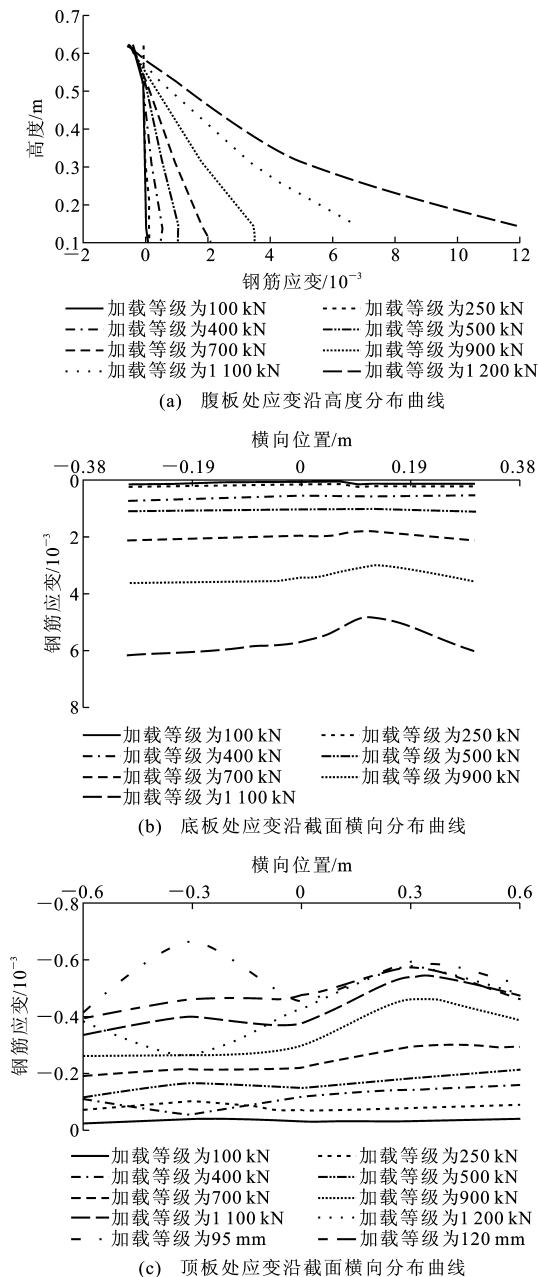


图9 跨中截面钢筋应变分布曲线

Fig. 9 Strain Distribution Curves of Steel Bars in Mid-span Section

看出:在加载初期,沿截面横向的各钢筋均匀受力,随着荷载的增加,各钢筋受力不均匀,部分呈现箱梁剪力滞的分布规律。

4 结 语

(1)混凝土首先在跨中底板出现裂缝,然后缓慢向腹板扩展。纯弯区,裂缝间距分布均匀。当开裂后荷载较小时,裂缝在预应力筋的作用下能够闭合。箱梁的破坏现象是弯曲挠度超过跨度的 $1/50$,受拉主筋处最大裂缝宽度达到 1.8 mm 。

(2)重复加载下的荷载-跨中挠度曲线的包络线有3个拐点,分别对应于混凝土开裂、钢筋屈服、预应力筋屈服。各拐点对应于结构整体刚度降低的关键点,为了保证列车安全运营,保证使用过程中箱梁不开裂非常重要。

(3)跨中截面钢筋应变和混凝土应变沿腹板基本符合平截面假定,当顶板和底板的混凝土荷载较小时,应变沿横向均匀分布,随着荷载的增大,应变不均匀分布明显,呈现剪力滞的分布规律。

参考文献:

References:

- [1] 孙树礼. 高速铁路桥梁设计与实践[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
SUN Shu-li. Bridge Design and Application of High-speed Railway[M]. Beijing:China Railway Publishing House,2011.
- [2] TB/T 2092—2003,预应力混凝土铁路桥简支梁静载弯曲试验方法及评定标准[S].
TB/T 2092—2003, Post-tensioned Pre-cast Concrete Simple-supported Girder for Railway Bridge Pre-stress[S].
- [3] GB/T 50152—2012,混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [4] 武凤远. 高速铁路,客运专线预应力混凝土简支箱梁分析试验研究[D]. 上海:同济大学,2009.
WU Feng-yuan. Experimental Research and Analysis of Prestressed Concrete Simply Supported Box Girders in High-speed Railway and Passenger Line[D]. Shanghai:Tongji University,2009.
- [5] 侯建军. 时速250 km城际铁路跨度31.5 m简支箱梁试验研究[J]. 铁道标准设计,2010(11):47-50.
HOU Jian-jun. Experimental Research of Simple-supported Girder with Span 31.5 m for Railway Bridge on the Speed 250 km Passenger Dedicated Line[J]. Railway Standard Design,2010(11):47-50.
- [6] 李晗之. 预应力混凝土桥简支箱梁静载弯曲抗裂试验研究[J]. 湖南交通科技,2010,36(1):74-76.
LI Han-zhi. Study on the Bending and Cracking Tests of Static Load of Simple Support Box Beam of Prestressed Concrete Bridge[J]. Hunan Communication Science and Technology,2010,36(1):74-76.
- [7] 方志,汪建群,何鑫,等. 预应力混凝土简支箱梁受力性能足尺模型试验[J]. 中国公路学报,2011,24(6):49-56.

