

文章编号:1671-1637(2015)05-0015-11

结合面底部带门式钢筋的铰接空心板破坏模式分析

吴庆雄,陈悦驰,陈康明

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116)

摘要:以在空心板与铰缝构造结合面底部布设门式钢筋的深铰缝构造为研究对象,参照2007年交通运输部颁布的装配式空心板桥标准图,设计了一跨8 m足尺模型,通过试验和非线性有限元法分析了车辆荷载作用下铰接空心板破坏类型、破坏位置与开裂荷载等破坏模式。分析结果表明:试验验证了铰接空心板非线性有限元模型能较好地模拟铰接空心板在车辆荷载作用下的受力性能;在空心板与铰缝结合面的三个方向的黏结滑移关系中,应以竖向相对滑移量作为结合面黏结破坏失效的指标;在车辆荷载作用下,空心板与铰缝结合面是最薄弱的受力部位,当荷载达到69 kN(0.99倍车辆荷载)时,空心板与铰缝结合面底部开裂,但当荷载达到85 kN(1.21倍车辆荷载)时,空心板跨中截面底部才出现横向裂缝;与在结合面底部不设门式钢筋的空心板相比,在结合面底部设置门式钢筋后虽不能明显提高铰缝构造的开裂荷载,但可以将铰缝通缝荷载从140 kN(2.00倍车辆荷载)提高至199 kN(2.84倍车辆荷载),且不会出现贯通的纵桥向裂缝。

关键词:桥梁工程;铰接空心板;铰缝构造;门式钢筋;受力性能;足尺模型试验;非线性有限元
中图分类号:U443.3 **文献标志码:**A

Failure mode analysis of hinged voided slab with gate-type steel rebars at bottom of junction surface

WU Qing-xiong, CHEN Yue-chi, CHEN Kang-ming

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China)

Abstract: Focused on the full-depth hinged joint with gate-type steel rebars at the bottom of junction surface between voided slab and hinged joint, a full-scale model with one span of 8 m according to the standard drawings of hinged voided slab bridge issued by Ministry of Transportation in 2007 was designed. With experiment and nonlinear finite element method, the failure modes of hinged voided slab under vehicle load were studied, including failure type, failure position and cracking load. Analysis result indicates that the nonlinear finite element model can properly simulate the mechanical properties of hinged voided slab under vehicle load by comparing with experimental result. The vertical relative slip is regarded as the index of cohesion failure of junction surface in three directions of bonding-slip relationship. Under vehicle load, the weakest position is the junction surface between voided slab and hinged joint. The surface starts to crack when the load reaches 69 kN (0.99 times of vehicle load), but the crack appears at the middle of voided slab when the load reaches 85 kN (1.21 times of vehicle load). Compared with the experiment on hinged voided slab with full-depth joint without gate-type steel rebars, when the gate-type steel rebars are laid at the bottom of junction surface, the cracking load increases

收稿日期:2015-06-16

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0737);河北省交通科技项目(Y-2011023)

作者简介:吴庆雄(1973-),男,福建南靖人,福州大学研究员,工学博士,从事桥梁工程研究。

unobvious, but the load that through cracks appear along the intersection between slab and hinged joint increases from 140 kN (2.00 times of vehicle load) to 199 kN (2.84 times of vehicle load), and through crack along longitudinal direction can be prevented. 4 tabs, 29 figs, 21 refs.

Key words: bridge engineering; hinged voided slab; hinged joint structure; gate-type steel rebar; mechanical property; full-scale model test; nonlinear finite element

Author resume: WU Qing-xiong (1973-), male, researcher, PhD, +86-591-83358433, wuqingx@fzu.edu.cn.

0 引言

铰接空心板桥因其自重轻、施工简便、适合预制生产与经济性好等优点在国内外中小跨径桥梁中得到了广泛应用。对于铰接空心板桥,铰缝是空心板桥横向传力的关键构造,然而在重载交通和其他一些因素的影响下,铰缝病害成为这类桥梁最主要的病害形式,进而使得桥梁整体受力性能不断降低,最终导致“单板受力”现象,威胁桥梁的使用寿命和行车安全^[1-2]。

国外学者针对铰接板桥已进行了大量的研究,并取得了一定的成果。Hanna 等进行了 2 座预制空心板桥模型试验,研究空心板桥在美国桥规设计车辆 HS-20 轮载作用下的受力性能^[3];Huckelbridge 等测试了 5 座实桥轮载作用下铰缝两侧相邻空心板的竖向相对位移^[4],研究表明即使是刚刚修复过的铰缝在车辆荷载作用下也会发生开裂;El-Remaily 等认为解决铰缝开裂最好的方法就是效仿日本,设计施加横向预应力的空心板梁桥^[5];Hanna 等提出了一种新的横向联系形式^[3,6];Annamalai 等研究了不同侧压力作用下剪力键的传力性能^[7],试验表明侧压力能有效地提高剪力键的抗剪强度;Miller 等对足尺寸的空心板梁桥的剪力键的受力性能进行了研究^[8];Dong 建立数值模型对文献^[8]中模型进行了分析,认为温度梯度效应可能导致铰缝较早开裂,车辆荷载将使铰缝裂缝发展^[9];Gulyas 等进行了铰缝材料室内试验^[10],结果表明 Mg-HH4-PO4 砂浆试件破坏荷载比标准无收缩砂浆试件大得多。

目前,国外对铰接空心板的研究主要针对本国空心板桥的实际情况,进行铰缝破坏现象与产生原因的定性分析,通过室内试验研究本国空心板铰缝的构造,以预防铰缝病害产生。然而,中国的空心板和铰缝有其自身的发展过程和结构形式,与国外的有所差异^[3,11],不能直接采用国外的研究成果。

中国从 20 世纪 60 年代开始广泛采用了铰接空心板桥,随着经济发展和技术水平不断提高,铰接空

心板桥的构造也在不断改进。早期的铰接空心板普遍采用小(浅)铰缝构造,有的甚至不设置铰缝钢筋或仅设置拉筋^[12]。实际运营后发现,小(浅)铰缝构造寿命短,破坏严重。从 80 年代起,中国逐步摒弃小(浅)铰缝构造,转而采用深铰缝构造。

1989 年和 1985 年交通运输部分别颁布了《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85),并依据这些规范出版了桥涵标准图。参考这个时期的空心板桥标准图^[13-14],将铰缝构造示于图 1,称为深铰缝构造 I。为了保证铰缝构造的使用性能,统一采用深铰缝构造,在空心板顶部预埋连接钢筋(①号钢筋),在铰缝构造内配置剪刀钢筋(②号钢筋)和纵向受力钢筋(③号钢筋)。

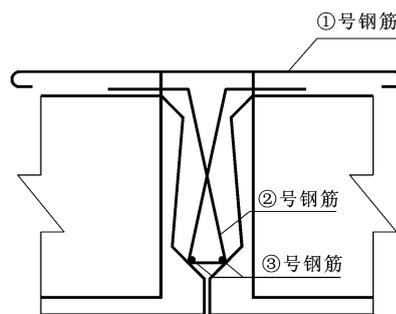


图 1 深铰缝构造 I

Fig. 1 Deep hinged joint structure I

经过多年实际运营发现,采用深铰缝构造 I 的空心板桥比小(浅)铰缝构造的空心板桥使用寿命长,减少了空心板本身的病害。但是,通过对某高速公路上大量使用该类铰缝构造的空心板桥的现场病害调查^[15-16]、足尺试验和有限元分析^[1-2]可知,在不断增大的车辆荷载作用下,空心板与铰缝构造的结合面先于空心板开裂,结合面裂缝在竖向从底部向上开展,在纵桥向从跨中向两侧开展,最终形成竖向和纵桥向的通缝,导致桥梁横桥向传力性能下降,产生“单板受力”现象,因此,采用深铰缝构造 I 的空心板薄弱部位为空心板与铰缝结合面。

2004 年交通运输部颁布《公路桥涵设计通用规

范》(JTG D60—2004)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004),相应的桥涵标准图于 2007 年出版^[17]。参照此时的空心板桥标准图,将铰缝构造示于图 2,称为深铰缝构造 II。可以看出,在保持原来深铰缝的构造和钢筋构造的基础上,为了增强空心板与铰缝构造连接的有效性,在空心板底部增设了④号钢筋。参照标准图和其他设计院的设计图纸,将④号钢筋的形式分为单肢钢筋和门式钢筋。

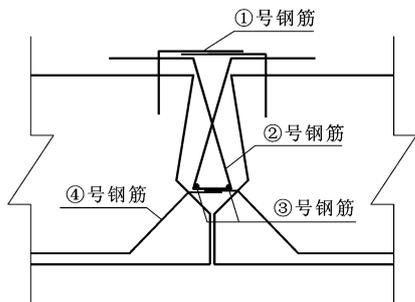


图 2 深铰缝构造 II

Fig. 2 Deep hinged joint structure II

针对底部带单肢钢筋的深铰缝构造 II,叶见曙等进行的铰缝构造局部试验^[18]结果表明,布设单肢钢筋后的铰缝构造破坏位置仍为空心板与铰缝构造的结合面,设置单肢钢筋不会提高铰缝构造的抗剪强度,但可以提高铰缝构造抗剪承载力与延性;种永峰进行的 3 块 6 m 跨径的空心板模型试验^[19]和刘沛林采用 ABAQUS 软件进行的有限元分析^[20]均表明,结合面底部带单肢钢筋的空心板桥的荷载横向分布比底部没有构造钢筋的空心板桥更加均匀。

本文以带深铰缝构造 II 的铰接空心板桥为研究对象(④号钢筋采用门式钢筋,见图 3),参照 2007 年交通运输部颁布的铰接空心板桥标准图^[17],开展一跨 8 m 足尺模型试验和非线性有限元分析,研究了车辆荷载作用下铰接空心板破坏类型、破坏位置与

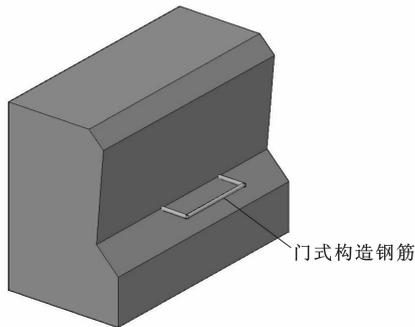


图 3 结合面底部带门式钢筋的空心板

Fig. 3 Voided slab with gate-type rebars at bottom of junction surface

开裂荷载等破坏模式。

1 足尺模型试验

1.1 试验模型设计

以一跨 8 m 装配式空心板桥为研究对象,见图 4,足尺试验模型由 3 块空心板、2 道铰缝构造和桥面铺装层组成,总宽度为 3.72 m,空心板预制长度为 7.96 m,计算跨径为 7.60 m。各空心板沿纵桥向为等截面,空心板宽度为 1.24 m,高度为 0.45 m,桥面铺装厚度为 10 cm,横截面的具体构造尺寸见图 5。空心板混凝土强度等级为 C30,采用 HRB335 级钢筋。

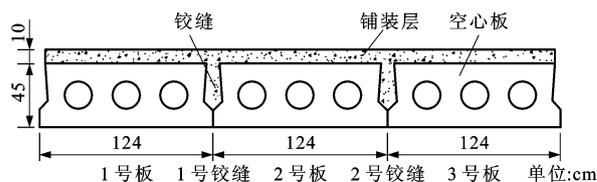


图 4 铰接空心板桥模型横截面

Fig. 4 Cross section of voided slab bridge model with hinged joint

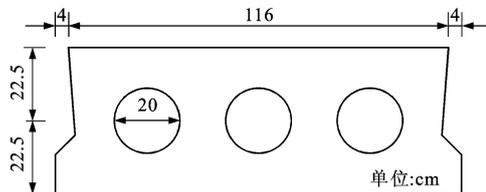


图 5 空心板横截面

Fig. 5 Cross section of voided slab

如图 6 所示,深铰缝构造内的钢筋有:在空心板顶部布置连接钢筋(①号钢筋);在铰缝构造内配置剪刀钢筋(②号钢筋)和纵向受力钢筋(③号钢筋);空心板与铰缝结合面底部布置门式钢筋(④号钢筋)。铰缝构造的混凝土强度等级为 C40,采用 HRB335 级钢筋。

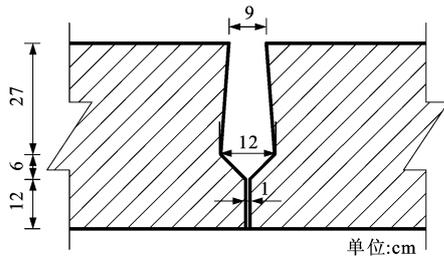
桥面铺装厚度为 10 cm,中间配一层 $\Phi 10$ 钢筋网,间距为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$,详细配筋见图 7。桥面铺装的混凝土强度等级为 C40,采用 HRB335 级钢筋。

1.2 试验模型制作

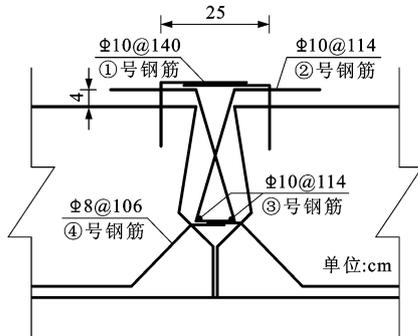
先预制如图 8 所示的空心板 3 块,养护 14 d 后吊装置于支座上,再布置铰缝构造内的②号和③号钢筋,然后布置桥面铺装的钢筋网,最后浇筑铰缝和桥面铺装混凝土。待养护 28 d 后,进行室内模型试验。试验模型和加载装置见图 9。

1.3 试验加载

采用等效的车辆荷载进行加载。公路-I 级标准车辆的前轴和后轴之间的距离是 12.8 m,根据试



(a) 铰缝



(b) 钢筋布置

图6 铰缝构造

Fig. 6 Structure of hinged joint

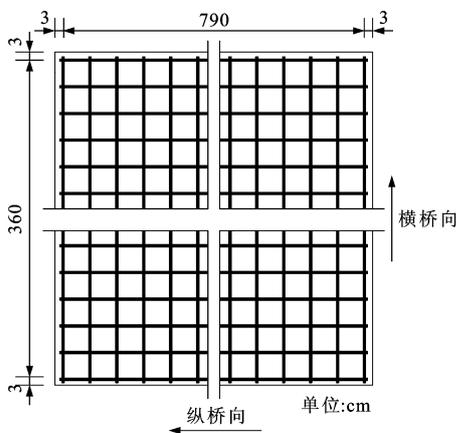


图7 桥面铺装配筋

Fig. 7 Reinforcing rebars of deck pavement



图8 预制空心板

Fig. 8 Precast voided slab

验模型跨径和最不利原则,选取标准车辆的后两轴(荷载为280 kN)进行加载。将车辆后轴荷载转换为均布荷载(F),施加于标准车辆后轴轮胎着地面上,着地面横桥向长度为0.6 m,纵桥向长度为0.2 m。

采用四点加载,纵桥向合力加载点在跨中,横桥向合力加载点在板中心线,见图10。公路-I级对

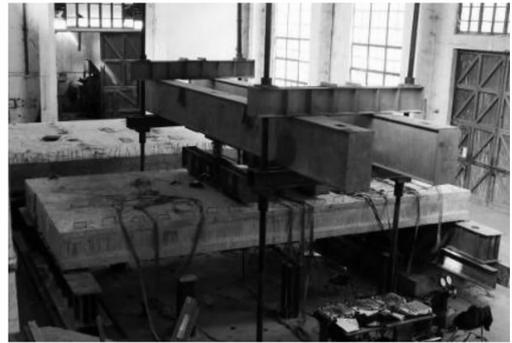
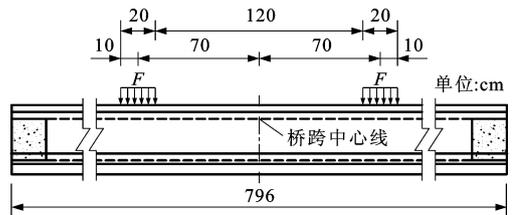
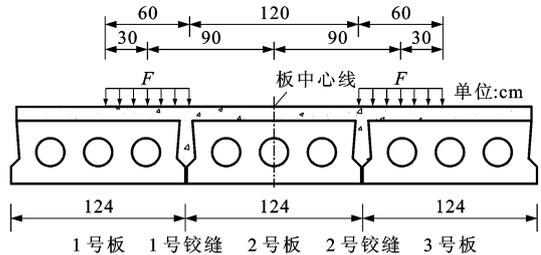


图9 足尺试验模型

Fig. 9 Full-scale experimental model



(a) 纵向荷载布置



(b) 横桥向荷载布置

图10 车辆荷载布置

Fig. 10 Layout of vehicle load

应的单点加载荷载为 $280 \text{ kN}/4 = 70 \text{ kN}$,即单点加载70 kN相当于1.00倍车辆荷载。

加载原则为初期按每级5 kN加载,当构件进入稳定阶段后按每级10 kN加载。在弹性阶段,在各级荷载加载持续2 min后进行测量;进入弹塑性阶段后,待应变和位移稳定后再读取数据。

1.4 测点布置

关于空心板,在纵桥向1/4截面和1/2截面的每块板底面中心放置一个百分表,测量空心板的竖向挠度。在纵桥向1/4截面、1/2截面和3/4截面底部布置纵桥向混凝土应变片,在顶部受压钢筋和底部受力主筋布置钢筋应变片。

关于铰缝构造,在纵桥向1/4截面和1/2截面底部布置百分表,以测量铰缝的横向张开量,每个断面的测点布置见图11。

对于空心板与铰缝结合面底部的门式钢筋,在1、2号铰缝的1/4截面、1/2截面和3/4截面处的门式钢筋上粘贴应变片,见图12。

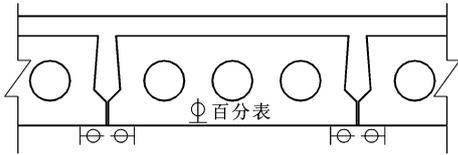


图 11 测点布置

Fig. 11 Measuring point layout

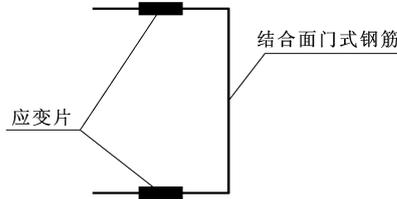


图 12 门式钢筋应变片布置

Fig. 12 Strain gauge layout of gate-type rebar

2 非线性有限元计算模型

本文采用通用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型,进行非线性计算分析。

2.1 有限元计算模型

本文采用八节点三维线性六面体单元(C3D8)模拟空心板和铰缝构造混凝土,在建模时没有考虑铰缝构造底部的砂浆层。划分后的截面网格见图 13。

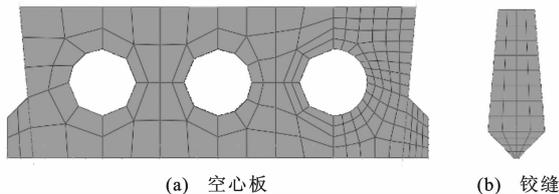


图 13 有限元模型网格划分

Fig. 13 Meshing of finite element model

在建模时考虑 2 种钢筋:空心板底部的纵向受力主筋和空心板与铰缝结合面底部门式钢筋,采用三维二节点桁架单元(T3D2)来模拟这 2 种钢筋,利用 Embedded 功能来考虑空心板的钢筋和混凝土之间的黏结。

对于边界条件,在空心板顶面与桥面铺装层底面之间、铰缝顶面和桥面铺装层底面之间的约束均采用 Tie 类型的约束;在模型两侧支座对应位置分别约束纵桥向位移和竖向位移来模拟铰支座,通过约束竖向位移来模拟滑动支座。

对于有限元模型的加载,通过建立一块弹性模量很大的刚性块体来模拟试验加载时使用的橡胶垫块,并在刚性块体表面施加均布力。铰接空心板有限元模型见图 14,共计 46 792 个单元。



图 14 铰接空心板有限元模型

Fig. 14 Finite element model of hinged voided slab

2.2 混凝土和钢筋的本构

本文采用混凝土塑性损伤模型、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的受压应力-应变关系与受拉断裂能-开裂位移关系模型,参数见表 1,受压应力-应变关系与受拉强度分别为

$$\frac{\sigma}{f_c^*} = \begin{cases} \alpha_a \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + (3-2\alpha_a) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^2 + (\alpha_a-2) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^3 & x \leq 1 \\ \frac{\epsilon/\epsilon_c}{\alpha_d (\epsilon/\epsilon_c - 1)^2 + \epsilon/\epsilon_c} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_t = 0.3017 f_c^{2/3} \quad (2)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为混凝土压应力和压应变; f_c^* 为混凝土单轴受压标准轴心抗压强度; ϵ_c 为混凝土峰值压应变; α_a 、 α_d 分别为单轴应力-应变曲线上升段和下降段的参数; σ_t 为混凝土受拉强度; f_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

表 1 混凝土本构关系参数

Tab. 1 Constitutive relation parameters of concretes

参数	ϵ_c	α_a	α_d	σ_t/MPa
空心板	0.001 6	2.043	1.294	3.37
铰缝	0.001 7	2.009	1.447	3.29

钢筋采用理想弹塑性模型,弹性模量 E_s 取 200 GPa,屈服应力 σ_s 取 335 MPa,屈服应变 μ_s 为 1.675×10^{-3} 。

2.3 空心板与铰缝构造的结合面模拟

空心板与铰缝的结合面属于新老混凝土结合面,参照相关文献论述空心板与铰缝构造的结合面的有限元模拟方法。

如图 15 所示,空心板与铰缝结合面的黏结强度包括:法向轴拉黏结强度 f_t 、平行于结合面并沿纵桥向(x 向)的剪切强度 τ_x 和平行于结合面并沿着梁高方向(y 向)的剪切强度 τ_y , O 为坐标原点。

2.3.1 法向轴拉黏结强度

刘健提出法向轴拉黏结强度^[21]为

$$f_t = (3.581 \times 10^{-3} H + 4.361 \times 10^{-2}) f_m \quad (3)$$

式中: H 为旧混凝土表面灌砂平均深度; f_m 为新旧混凝土立方体平均抗压强度。

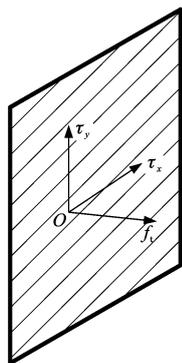


图 15 结合面

Fig. 15 Junction surface

本文研究发现在常见的灌砂平均深度范围内,法向轴拉黏结强度为新混凝土试件轴拉强度的 67.4%~84.2%,因此,在有限元计算中取新、旧混凝土中较小的轴拉强度的 70%作为结合面法向轴拉黏结强度^[20]。本文选取轴拉强度标准值较低的空心板侧 C30 混凝土轴拉强度标准值 2.01 MPa,得到 $f_t = 0.7 \times 2.01 \approx 1.40$ MPa。

2.3.2 黏结剪切强度

叶见曙等通过对铰缝试件进行的抗剪试验^[18],结合国内外其他叠合面抗剪强度试件试验结果,经过统计分析得到普通混凝土铰缝黏结剪切强度为

$$\tau_x = \tau_y = 0.01f_s \quad (4)$$

式中: f_s 为铰缝和空心板混凝土中强度较小的混凝土轴心抗压强度。

本文根据材性试验结果选取轴心抗压强度较低的空心板侧混凝土轴心抗压强度 28.9 MPa 得到 $\tau_x = \tau_y = 0.01 \times 28.9 \approx 0.29$ MPa = 290 kPa。

2.3.3 黏结滑移关系

刘沛林结合已有的试验研究成果,提出采用双折线模型来模拟空心板与铰缝构造的结合面的黏结滑移关系,并结合相关资料得到了空心板与铰缝构造的结合面黏结滑移曲线的相关假定和参数取值^[20]。由于缺乏针对黏结强度之间耦合关系的研究,故在有限元模拟中认为 3 个方向之间彼此非耦合;法向轴拉黏结滑移曲线类型与沿结合面 x 、 y 向的黏结剪切滑移曲线类型相同;2 个方向的黏结滑移关系是相同的;结合面的黏结滑移刚度 K 取值范围为 $5 \sim 15$ MPa·mm⁻¹;最终滑移值 S_u 和峰值应力对应的滑移值 S_p 之比 S_u/S_p 的取值范围为 1.5~3.0。

本文确定的法向轴拉黏结强度 f_t 为 1.4 MPa,黏结剪切强度 τ_x 、 τ_y 为 290 kPa,法向峰值应力对应的滑移值为 0.140 mm,切向峰值应力对应的滑移

值为 0.029 mm,并取 $K = 10$ MPa·mm⁻¹, $S_u/S_p = 2.0$,得到的黏结滑移曲线见图 16, S 为滑移值。

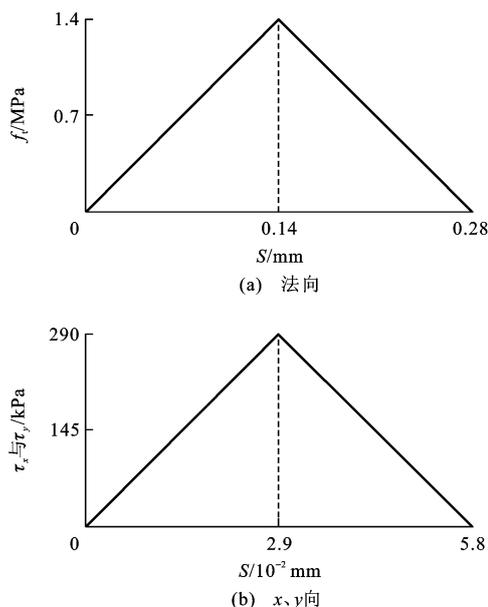


图 16 结合面黏结滑移曲线

Fig. 16 Bonding-slipping curves of junction surface

3 试验结果分析

3.1 试验加载全过程描述

在试验加载初期,属于弹性工作阶段,铰缝完好,能均匀传递荷载,空心板共同受力。

当单点加载至 70 kN 时,试验模型的 1、2 号铰缝跨中截面底部砂浆层开裂,即进入铰缝开裂阶段。随荷载的逐步增大,裂缝沿纵桥向两侧扩展。

当单点加载至 80 kN 时,试验模型的 3 块空心板跨中截面底部出现横桥向裂缝。随着荷载的进一步增大,从跨中向两侧不断出现新裂缝,既有裂缝沿着横桥向拓展并逐步形成横桥向通缝。

当单点加载到 300 kN 时,空心板在 1/4 截面至 3/4 截面的底部出现大量的横桥向通缝,且在 1、3 号空心板的外侧腹板出现了竖向裂缝,停止加载。铰缝构造底部裂缝分布见图 17。

试验完成后将桥面铺装凿除,发现在空心板与铰缝结合面处的顶、底部均有沿纵桥向分布的裂缝,分布长度见图 18。王渠等介绍了空心板与铰缝结合面底部没有布设门式钢筋的空心板足尺模型的破坏模式,在铰缝顶部沿结合面出现贯通的纵桥向裂缝^[1]。但是,当空心板与铰缝结合面底部布设门式钢筋后,铰缝顶部沿结合面没有出现贯通的纵桥向裂缝。

本文以 3 块空心板跨中处的挠度差来判断结合

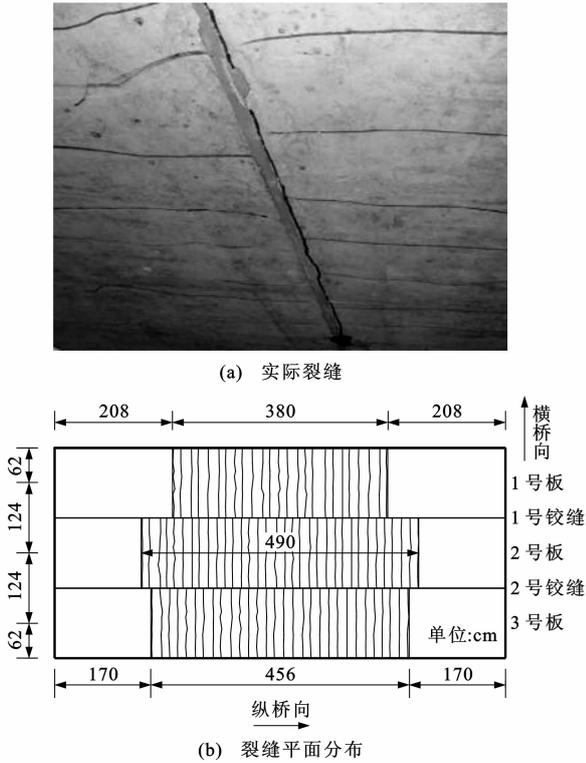


图 17 空心板底部裂缝分布

Fig. 17 Crack distribution at bottom of voided slab

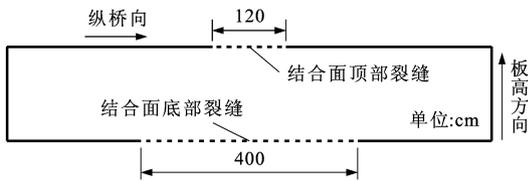


图 18 结合面顶、底部纵桥向裂缝

Fig. 18 Longitudinal cracks at top and bottom of junction surface

面竖向通缝, 挠度差所占百分比 η_{ij} 为

$$\eta_{ij} = \frac{100 |D_i - D_j|}{\min(D_i - D_j)} \quad (5)$$

式中: D_i 为空心板 i 的挠度。

单点荷载为 0~70 kN(铰缝开裂前)和 75~300 kN(铰缝开裂后)时跨中截面的挠度差所占比例的最大值见表 2。在弹性阶段, 各块板之间的 η_{ij} 较小, 由于铰缝和空心板构造基本保持完好, 各块板的受力状况较一致; 在弹塑性阶段, 由于铰缝和空心板构造产生裂缝, 导致铰缝传力性能下降, 且空心板本身的

表 2 η_{ij} 计算结果

Tab. 2 Computation result of η_{ij} %

阶段	$\max(\eta_{1-2})$	$\max(\eta_{1-3})$	$\max(\eta_{2-3})$
铰缝开裂前	1.5	5.5	4.5
铰缝开裂后	6.8	7.0	9.3

刚度也下降, 使得各块板的受力状况出现了差异, 因此, η_{ij} 变大。

3.2 铰缝构造

铰缝横向张开量的试验与有限元计算结果见图 19, 可以看出, 在加载初期, 由于铰接空心板整体结构完好, 铰缝横向张开量较小; 当单点加载到约 70 kN 时铰缝开裂; 随着荷载的不断增大, 铰缝底部裂缝不断从跨中向两支承端拓展, 横向张开量不断增大; 有限元计算结果与试验值趋势相同, 吻合较好。

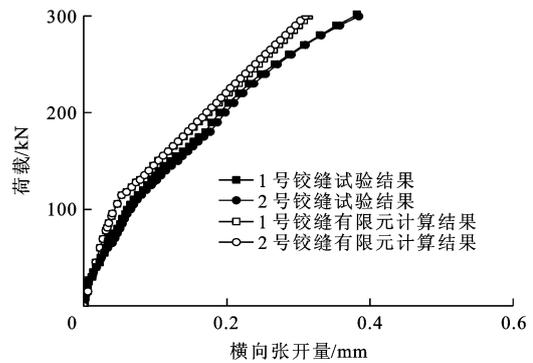


图 19 铰缝荷载-横向张开量曲线

Fig. 19 Load-transverse opening value curves of hinged joint

空心板与铰缝构造的结合面底部的门式钢筋的应变曲线见图 20, 可以看出, 荷载作用下底部门式钢筋受拉; 在铰缝开裂前, 随着荷载的增大应变保持线性增长; 在铰缝开裂后, 随着荷载的增加应变呈一定的非线性增长; 有限元计算结果与试验值趋势相同, 吻合较好。

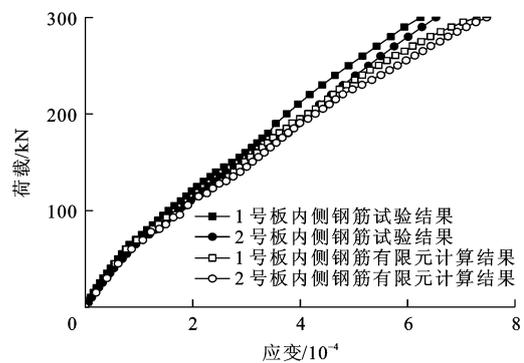


图 20 门式钢筋的荷载-应变曲线

Fig. 20 Load-strain curves of gate-type rebar

有限元计算结果与试验值的对比结果说明采用有限元计算模型可以正确地模拟足尺模型中铰缝构造的加载过程。

结合面有法向、竖向和纵向的黏结滑移, 在 3 个方向黏结滑移关系非耦合的情况下, 当结合面上某

测点3个方向中有一个达到峰值应力的滑移值时,可认为该处发生破坏失效。

模型中有3块空心板和2道铰缝,故有4个结合面,编号见图21。图22为单点加载300kN时2号结合面半跨范围内3个方向达到峰值应力时的外荷载和滑移量云图。其中,针对3个滑移量,将3个方向滑移量超过限值(法向滑移限值为0.140mm,切向滑移限值为0.029mm)的部分设置为灰色显示。可以看出,在法向、竖向和纵向,使竖向发生滑移开裂的外荷载最小且超限分布范围最广,故应以竖向滑移量作为空心板与铰缝构造的结合面破坏失效的指标。

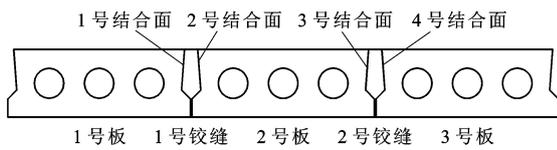


图21 结合面分布 Fig. 21 Distribution of junction surfaces

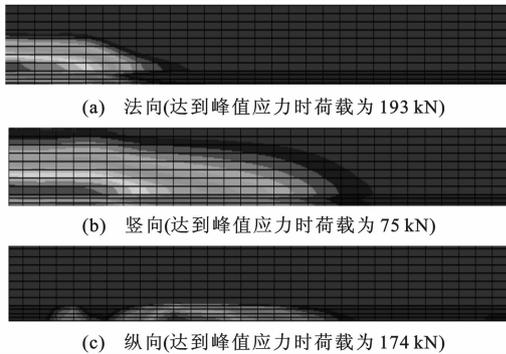


图22 结合面滑移应力形状 Fig. 22 Slipping stress shapes of junction surface

为了研究铰缝构造的结合面沿竖向(截面高度方向)开裂的竖向开裂与外荷载之间的关系,以2号铰缝跨中截面为对象,按图23提取不同荷载作用下的竖向滑移量,见图24。

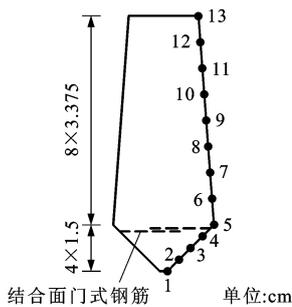


图23 铰缝竖向测点分布 Fig. 23 Vertical measuring point distribution of hinged joint 结合面点1~6属于受拉区,且点1~4在门式

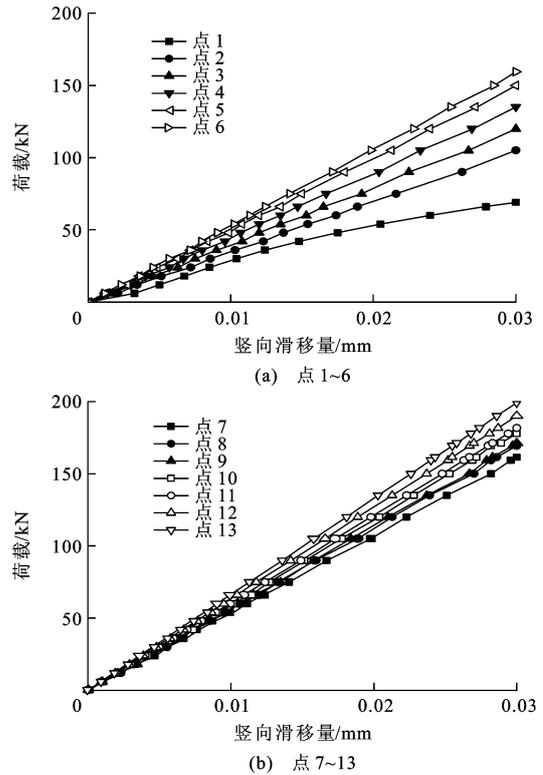


图24 结合面跨中截面竖向滑移量曲线 Fig. 24 Vertical slipping curves of mid-span section of junction surface

钢筋下面。当加载到69kN时,铰缝结合面底部点1竖向滑移量达到限值,发生开裂;随后,铰缝结合面点2、3相继超过容许应力发生断裂,当加载至120kN时,铰缝结合面点4发生断裂;当加载至159kN时,铰缝结合面点6发生断裂,即铰缝结合面裂缝贯通至原受拉区。

结合面点7~13原属受压区,随着荷载的增大逐渐转为受拉区,当荷载为199kN时,铰缝结合面顶部点13发生断裂,说明此时铰缝跨中截面结合面裂缝竖向贯穿到截面顶面,形成通缝。

最后,讨论铰缝构造的结合面沿纵桥向开裂与外荷载之间的关系。根据对称性原则取半跨,按照图25,每隔0.4m定义一个截面,编号从跨中至端部分别为1-1~11-11。

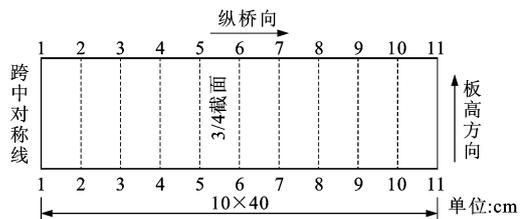


图25 铰缝纵向截面 Fig. 25 Longitudinal sections of hinged joint 图26为2号结合面点1(底部)沿纵桥向竖向

滑移量,图 27 为 2 号结合面裂缝沿纵桥向的长度曲线。结合面底部开裂到截面 2-2 时的荷载为 105 kN,开裂到截面 6-6 (1/4 截面) 时的荷载为 232 kN,开裂到截面 8-8 时的荷载为 279 kN,接近最终加载值 300 kN。

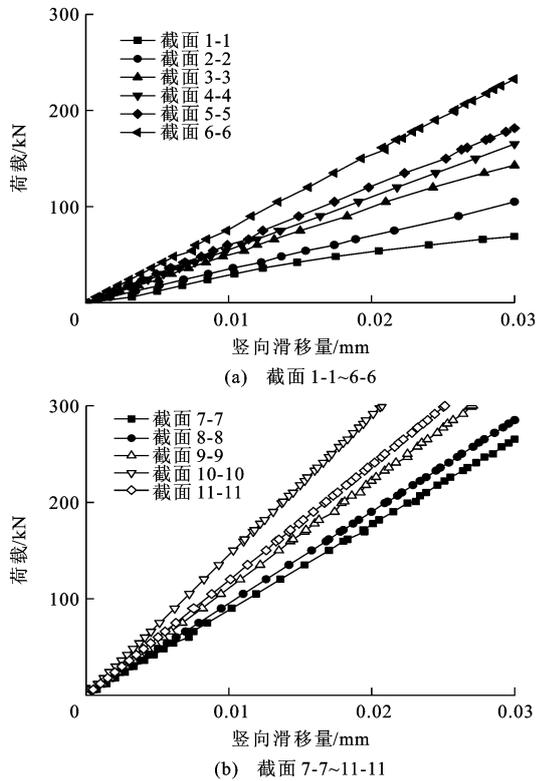


图 26 点 1 竖向滑移量曲线

Fig. 26 Vertical slipping curves at point 1

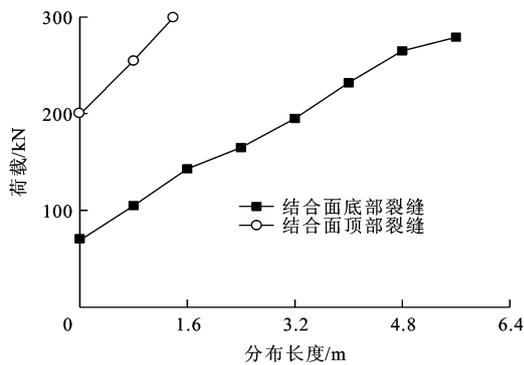


图 27 顶、底部裂缝沿纵桥向长度曲线

Fig. 27 Length curves of longitudinal cracks at top and bottom of hinged joint

基于试验和有限元结果,铰缝构造的破坏现象、破坏荷载与荷载对应的设计车辆荷载(公路-I级)的倍率见表 3。

3.3 空心板

由足尺试验模型和有限元模型得到的空心板跨中截面荷载-挠度曲线见图 28,可以看出,在空心板

表 3 铰缝构造破坏模式

Tab. 3 Failure modes of hinged joint

荷载/kN	对应车辆荷载(公路-I级)的倍数	跨中截面竖向裂缝分布规律	纵桥向裂缝分布规律
69	0.99	结合面底部开裂	
120	1.71	开裂至门式钢筋下	底部沿纵桥向裂缝长度约为 1.1 m
159	2.27	开裂至门式钢筋上	底部沿纵桥向裂缝长度约为 2.2 m
199	2.84	结合面裂缝贯穿到截面顶部,形成通缝	底部沿纵桥向裂缝长度约为 3.5 m
300	4.29		底部沿纵桥向裂缝长度约为 5.6 m;竖向通缝沿纵桥向分布范围约为 1.4 m

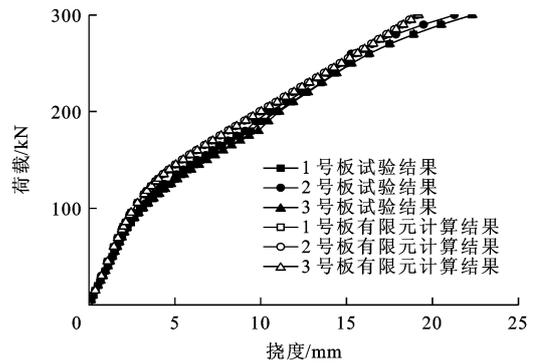


图 28 荷载-挠度曲线

Fig. 28 Load-deflection curves

开裂前,试验值和有限元值吻合良好,挠度随荷载线性增长;在空心板开裂后,挠度呈非线性增长,且空心板之间的挠度不同步;有限元结果与试验结果趋势一致。

图 29(a)为空心板跨中截面底部纵向应变,可以看出,在荷载为 0~60 kN 范围内试验值和有限元值趋势一致,吻合良好;在荷载为 60~85 kN 范围内,试验值和有限元值有一定的偏差。根据开裂应变(1.1×10^{-4})可以得到空心板开裂荷载的有限元值为 85 kN,与试验值 80 kN 仅相差约 6%。

图 29(b)为空心板跨中截面底部受力主筋纵向应变。在空心板发生开裂前,有限元值与试验值吻合良好,开裂后有一定偏差,但变化趋势一致。当荷载达到 300 kN 时,1 号空心板受力主筋应变为 1.397×10^{-3} ,对应应力为 279 MPa,小于屈服应力 335 MPa。可见,有限元求得空心板荷载-位移曲线和荷载-应变曲线与试验值较接近,进一步说明该有限元模型可以较好地模拟足尺模型中空心板的荷载试验过程。

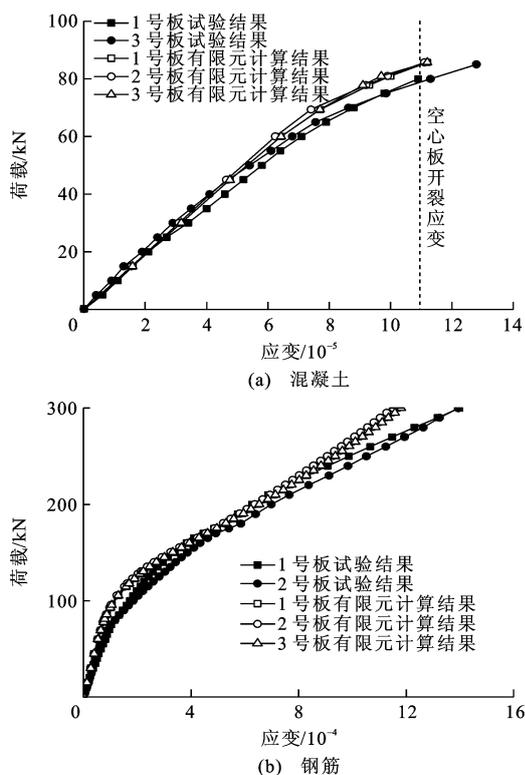


图29 空心板跨中截面荷载-纵向应变曲线

Fig. 29 Load-longitudinal strain curves on mid-span sections of voided slabs

基于试验和有限元结果,空心板的破坏现象、破坏荷载与荷载对应的设计车辆荷载(公路-I级)的倍率见表4。对比表3、4可以看出,当荷载达到69 kN(0.99倍车辆荷载)时空心板与铰缝结合面底部开裂,然而当荷载达到85 kN(1.21倍车辆荷载)时空心板跨中截面底部才出现横向裂缝,因此,在车辆荷载作用下最先发生开裂的部位是空心板与铰缝结合面,是铰接空心板最薄弱的受力部位。

表4 空心板破坏模式

Tab. 4 Failure mode of voided slab

荷载/kN	对应车辆荷载(公路-I级)的倍数	现象描述
85	1.21	空心板跨中截面底部横向开裂
300	4.29	在空心板1/4截面至3/4截面间的底部分布横向裂缝,1、3号空心板的外侧腹板出现了竖向裂缝

3.4 铰接空心板试验对比

研究结果^[1-2]表明:当荷载达到70 kN(1.0倍车辆荷载)时,铰缝构造首先在底部砂浆层出现裂缝;随着荷载的逐步增大,铰缝构造底部裂缝沿着结合面不断向上(竖向)开展,且从跨中向两侧不断(纵桥向)开展;当荷载达到140 kN(2.0倍车辆荷载)时,

铰缝构造在空心板与铰缝结合面处形成竖向通缝;试验完成后将桥面铺装凿除,发现在铰缝顶部沿结合面出现贯通的纵桥向裂缝。

对比2种深铰缝构造发现:铰缝构造均先于空心板开裂,铰缝开裂荷载均约为70 kN(1.0倍车辆荷载),说明在空心板与铰缝结合面底部布设门式钢筋并不能明显提高铰缝构造的开裂荷载。

不带门式钢筋的深铰缝构造I在荷载140 kN(2.0倍车辆荷载)作用下形成竖向通缝,然而带门式钢筋的深铰缝构造II在荷载199 kN(2.84倍车辆荷载)作用下才形成竖向通缝,且没有出现贯通的纵桥向裂缝,从而说明在空心板与铰缝结合面底部布设门式钢筋可以有效地限制结合面裂缝沿竖向和纵桥向的开展。

4 结语

(1)本文建立的非线性有限元模型能较好地模拟铰接空心板在车辆荷载作用下的受力性能。

(2)在空心板与铰缝结合面法向、竖向与纵向黏结滑移关系中,应以竖向相对滑移量作为结合面黏结破坏失效的指标。

(3)在车辆荷载作用下最先发生开裂的部位是空心板与铰缝结合面,该部位是铰接空心板最薄弱的受力部位。

(4)在结合面底部设置门式钢筋后虽不能明显提高铰缝构造的开裂荷载,但可提高铰缝通缝荷载,且不出现贯通的纵桥向裂缝,因此,在空心板与铰缝结合面底部布设门式钢筋可以有效地限制结合面裂缝沿竖向和纵桥向的开展。

参考文献:

References:

- [1] 王渠,吴庆雄,陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(增): 115-120.
WANG Qu, WU Qing-xiong, CHEN Bao-chun. Test study on the failure mode of hinged joint in assembly voided slab bridge[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S): 115-120. (in Chinese)
- [2] 陈悦驰,吴庆雄,陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式有限元分析[J]. 工程力学, 2014, 31(增): 51-58.
CHEN Yue-chi, WU Qing-xiong, CHEN Bao-chun. Failure mode of hinged joint in assembly voided slab bridge by finite element analysis[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S): 51-58. (in Chinese)
- [3] HANNA K E, MORCOUS G, TADROS M K. Transverse post-tensioning design and detailing of precast prestressed concrete adjacent-box-girder bridges[J]. PCI Journal, 2009.

- 54(4): 160-174.
- [4] HUCKELBRIDGE A A, EL-ESNAWI H, MOSES F. Shear key performance in multibeam box girder bridges[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1995, 9(4): 271-285.
- [5] EL-REMAILY A, TADROS M K, YAMANE T, et al. Transverse design of adjacent precast prestressed concrete box girder bridge[J]. *PCI Journal*, 1996, 41(4): 96-113.
- [6] HANNA K E. Behavior of adjacent precast prestressed concrete box girder bridges[D]. Lincoln: University of Nebraska, 2008.
- [7] ANNAMALAI G, BROWN R C. Shear strength of post-tensioned grouted keyed connections [J]. *PCI Journal*, 1990, 35(3): 64-73.
- [8] MILLER R A, HLAVACS G M, LONG T, et al. Full-scale testing of shear keys for adjacent box girder bridges[J]. *PCI Journal*, 1999, 44(6): 80-90.
- [9] DONG Xu-hua. Traffic forces and temperature effects on shear key connections for adjacent box girder bridge[D]. Ohio: University of Cincinnati, 2002.
- [10] GULYAS R J, WIRTHLIN G J, CHAMPA J T. Evaluation of keyway grout test methods for precast concrete bridges[J]. *PCI Journal*, 1995, 40(1): 44-57.
- [11] YAMANE T, TADROS M K, ARUMUGASAAMY P. Short to medium span precast prestressed concrete bridge in Japan[J]. *PCI Journal*, 1994, 39(2): 74-100.
- [12] 姜云霞,柴金义,伍必庆,等. 不中断交通实施铰接板桥加固的研究[J]. *内蒙古公路与运输*, 2002(2): 1-3.
JIANG Yun-xia, CAI Jin-yi, WU Bi-qing, et al. Research on strengthening hinged slab bridge under uninterrupted traffic[J]. *Highways and Transportation in Inner Mongolia*, 2002(2): 1-3. (in Chinese)
- [13] JT/GQB 002—93,公路桥涵标准图:装配式钢筋混凝土斜空心板桥上部构造[S].
JT/GQB 002—93, standard drawings for highway bridges and culverts: superstructure of reinforced skew hinged voided slab bridges[S]. (in Chinese)
- [14] JT/GQB 001—93,公路桥涵标准图:装配式预应力混凝土斜空心板桥上部构造[S].
JT/GQB 001—93, standard drawings for highway bridges and culverts: superstructure of prestressed skew hinged voided slab bridges[S]. (in Chinese)
- [15] 刘龄嘉,贺拴海,赵小星. 在役混凝土筒支梁有效预应力计算[J]. *交通运输工程学报*, 2005, 5(3): 47-51
LIU Ling-jia, HE Shuan-hai, ZHAO Xiao-xing. Effective prestress computation of existing PC simply-supported beam[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(3): 47-51. (in Chinese)
- [16] 杨继新. 装配式空心板桥铰缝受力性能研究[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2009.
YANG Ji-xin. Study on mechanical properties of fabricated hollow slab bridge hinge joint under the load[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] 交通运输部. 公路桥涵通用图[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Ministry of Transport. Standard Drawings of Highway Bridge and Culverts [M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 叶见曙,刘九生,俞博,等. 空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(6): 33-39.
YE Jian-shu, LIU Jiu-sheng, YU bo, et al. Experiment on shear property of hinge joints of concrete hollow slab[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(6): 33-39. (in Chinese)
- [19] 种永峰. 空心板梁铰接缝模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
ZHONG Yong-feng. Study on the hinge joint model experiment of hollow slab beam bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [20] 刘沛林. 装配式钢筋混凝土筒支板梁桥铰缝受力性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
LIU Pei-lin. Study on behaviors of hinge joints for fabricated reinforced concrete simply-supported plate girder bridges[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [21] 刘健. 新老混凝土黏结的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
LIU Jian. Study on the mechanics performance of adherence of young on old concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000. (in Chinese)