

文章编号:1673-2049(2011)02-0100-06

装配式空心板桥荷载横向分布计算方法比较分析

刘其伟¹, 王成明¹, 李捷²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏宁沪高速公路股份有限公司, 江苏 南京 210004)

摘要:以铰接板理论为基础, 结合空间梁格法和实体有限元法, 对装配式空心板桥荷载横向分布计算方法进行了分析。比较了各计算方法的计算结果之间的差异, 阐述了误差产生的原因, 探讨了各计算方法的准确性和适用性, 并给出了合理的建议。研究表明: 不考虑边板、中板截面几何特性的差异会导致边板荷载横向分布系数减小而偏不安全; 实体有限元法计算结果准确, 与之相比, 铰接板(梁)法和空间梁格法均存在误差。

关键词:装配式空心板桥; 荷载横向分布; 铰接板(梁)法; 空间梁格法; 实体有限元法
中图分类号: U448.21 **文献标志码:** A

Comparison and Analysis of Calculation Method of Transverse Load Distribution for Fabricated Hollow Slab Bridges

LIU Qi-wei¹, WANG Cheng-ming¹, LI Jie²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;
2. Jiangsu Expressway Company Limited, Nanjing 210004, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the hinge-jointed plate theory, combined with space grillage method and solid finite element method, authors analyzed the transverse load distribution calculating methods for the fabricated hollow slab bridges. Also, authors analyzed the differences between the calculation results of transverse load distribution, explained the causes of error, discussed the accuracy and applicability of each calculation method, then proposed reasonable suggestions. The study results show that the transverse load distribution factor of side plate is decreased and unsafe, without considering the sectional geometrical properties' differences between the side and medium plate; the calculation result of solid finite element method is accurate, compared with that, both of the hinge-jointed plate (girder) method and space grillage method are existing errors.

Key words: fabricated hollow slab bridge; transverse load distribution; hinge-jointed plate (girder) method; space grillage method; solid finite element method

0 引言

众所周知, 当车辆荷载作用于桥梁结构时, 结构横向刚度的存在必然会使车辆荷载沿桥梁的纵、横向同时传递, 并使各片主梁都不同程度地参与工作, 因此桥梁结构的受力属于复杂的空间问题。

荷载横向分布在梁桥设计中是一个非常重要的概念, 它相当于结构设计原理与广义结构力学的结合部。荷载横向分布理论可以有效地将梁桥设计中的空间问题简化成平面问题而不作复杂的空间计算, 通过简化建立各梁挠度和受力状态之间的联系, 为梁桥设计提供了方便。

荷载横向分布方法是一种近似的计算方法,在理论推导时作了某些物理和数学意义上的假设。因此采用荷载横向分布系数反映整个桥梁结构中某单梁的受力情况,往往会与其实际空间受力状况存在一定误差^[1-2]。

在高等级公路中,装配式空心板桥因其有结构体系简单、受力明确、自重较轻、用材经济、施工方便快捷、可大批量工厂化集中预制等诸多优点而被广泛应用。对于装配式空心板桥,采用不同的荷载横向分布计算方法,其所得的荷载横向分布计算结果往往不惟一旦误差大。

随着有限元理论的发展和计算机技术的不断进步,有限元计算方法在桥梁工程中已经得到广泛的应用。本文中笔者以铰接板理论为基础,采用不同方法对装配式空心板桥进行有限元模拟并计算其荷载横向分布系数,对各计算方法的计算结果进行分析和比较,阐述误差产生的原因,讨论各计算方法的准确性及适用性并提出合理建议,供装配式空心板桥设计时参考。

1 荷载横向分布计算方法

本文的计算分析对象为跨径 $l = 10\text{ m}$ 的装配式简支空心板桥,其边板、中板截面尺寸以及横断面布置分别如图 1、2 所示。

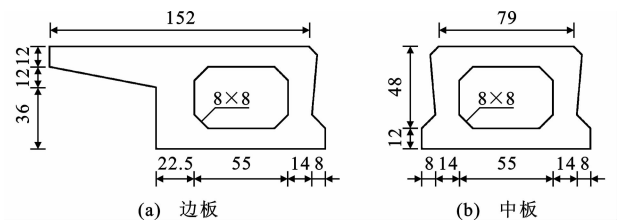


图 1 边板、中板截面尺寸(单位:cm)

Fig. 1 Section Sizes of Side and Medium Plates (Unit:cm)

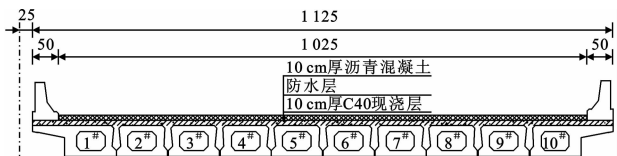


图 2 装配式空心板桥横断面布置(单位:cm)

Fig. 2 Cross-sectional Arrangement of Fabricated Hollow Slab Bridge (Unit:cm)

对于由梁、板组成的桥梁结构,计算荷载横向分布的方法主要分为以下 3 类^[3-4]:

(1)梁格法

假定桥梁结构为主梁、横梁处于弹性支撑梁上

的格构,由节点的挠度和扭角关系求解节点力,如刚性横梁法。

(2)梁系法

把桥跨结构在纵向沿主梁连接处切开,分割成一片片主梁,切口处以赘余力取代,把整个结构看作是用这些赘余力连接起来的超静定结构,然后用力法求解,如铰接板(梁)法。

(3)板系法

把桥梁结构的主梁和横梁的刚度均沿着桥的纵、横向近似地连续分摊,从而形成各向刚度不同的异性板,以此作为桥梁的力学模型进行分析,如 G-M 法。

1.1 铰接板(梁)法

对于现浇混凝土纵向企口缝连接的装配式板桥以及仅在翼板间用钢板焊接或伸出交叉钢筋连接的无中间横隔梁的装配式梁桥,其受力类似于数根并列而相互间横向铰接的狭长板(梁),因此可采用铰接板(梁)法进行荷载横向分布计算。

铰接板(梁)法的优点在于其计算过程简单,易于手算,但也存在局限性,主要表现为^[5]:①对斜交桥梁不适用;②横向连接只考虑各板之间的铰接作用,忽略铰缝的实际刚度,且不能考虑桥面铺装的共同作用。

1.1.1 基本假定

采用铰接板(梁)法计算荷载横向分布时应遵循以下基本假定:

(1)在竖向荷载作用下,铰缝只传递竖向剪力,而忽略纵向剪力、法向力和横向弯矩。

(2)对于作用在桥跨上的集中荷载,近似地用理想半波正弦荷载来代替。

(3)忽略材料泊松比的影响。

1.1.2 计算步骤

(1)将每片板梁视作铰接板,计算板梁截面的刚度系数。

板梁截面的刚度系数 γ 的计算公式为

$$\gamma = \frac{\pi^2 EI}{4 G I_T} \left(\frac{b}{l}\right)^2 \approx 5.8 \frac{I}{I_T} \left(\frac{b}{l}\right)^2 \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; G 为剪切模量; b 为单板宽度; I 为抗弯惯性矩; I_T 为抗扭惯性矩。

(2)根据刚度系数计算值查询或计算各板梁荷载横向分布影响线竖标值,得到荷载横向分布影响线,从而求得各片板梁的荷载横向分布系数。

装配式空心板桥边板、中板的几何特性通常存

在差别,但设计时为了简化计算,往往只取中板的几何特性计算刚度系数 γ ,并依板块数 n 及所计算板号,按此刚度系数 γ 查询铰接板(梁)桥荷载横向分布影响线竖标表^[6]来计算各板梁的荷载横向分布系数。这种简化对边板、中板截面几何特性差异不大时是可行的,但目前交通部颁布的公路桥涵通用图中装配式空心板桥边板、中板几何尺寸差异较大,采用上述简化计算显然存在不合理性。

以本文的装配式空心板桥为例,边板、中板的刚度系数计算值分别为 $\gamma_{sp}=0.127\ 7$ 、 $\gamma_{mp}=0.048\ 9$ 。由此可见,边板和中板的刚度系数计算值相差接近 3 倍,若采用中板的刚度系数查表计算,虽然方便了计算,但势必会对荷载横向分布的计算结果产生影响,从而造成误差的出现。

为了分析这种简化对荷载横向分布计算结果造成的影响及其程度大小,将采用根据不同边板、中板刚度系数计算值,建立并求解铰接力正则方程的方法和仅按中板刚度系数计算值查询铰接板(梁)桥荷载横向分布影响线竖标表的简便方法,分别计算装配式空心板桥的荷载横向分布系数。

1.2 空间梁格法

梁格法是分析桥梁上部结构比较实用有效的空间分析方法,它具有基本概念清晰、易于理解和使用等特点,因此在桥梁结构分析中得到了广泛的应用。梁格法的特点是用等效梁格来代替桥梁上部结构,分析梁格的受力状态就可得到实桥受力状态。它不仅适用板式、梁板式及箱梁截面的上部结构,而且对分析弯、斜梁桥特别有效^[7-10]。

1.2.1 基本假定

梁格法是一种介于平面和实体有限元法之间的设计方法,因此利用空间梁格法对桥梁结构进行分析时,需要对结构进行简化,用梁单元来模拟主梁、横梁等构件及其之间的连接状态。

采用空间梁格法计算时应作如下假定:

- (1)梁横截面各项尺寸与跨长相比很小,即可将实际结构视为集中在梁轴线上的弹性杆件。
- (2)平截面假定,即梁变形后横截面仍保持为平面。
- (3)刚性截面假定,即梁变形后横截面无畸变。
- (4)与基本弯曲和纯扭转的应力相比,梁截面翘曲扭转所引起的正应力和剪应力很小,可忽略不计,只计纯扭转的影响。
- (5)不考虑桥面铺装层混凝土参与结构受力。

1.2.2 空间梁格有限元模型

采用梁格法对装配式空心板桥进行建模分析时,梁梁的纵向刚度集中于纵向梁格内,而板梁间的铰缝构造通过横向梁格构件来模拟。

根据铰接板理论,铰缝只传递剪力而不传递弯矩,所以建立空间梁格有限元模型的关键之处在于对铰缝的正确模拟。铰缝的模拟一般可采用以下 2 种方法:

方法 1:把板与板之间的转动放松,可采用通用有限元分析软件 ANSYS 单元库中 Beam44 单元,通过设置 KEYOPT 值来对单元的节点自由度进行释放,建立梁格模型。

方法 2:采用刚性链杆模拟铰缝,为实现铰接,可在链杆铰接处设置坐标相同而编号不同的节点,使其平动位移一致,即耦合其平动自由度,建立梁格模型。

本文中采用方法 2 建立了装配式空心板桥空间梁格法有限元模型,如图 3 所示。

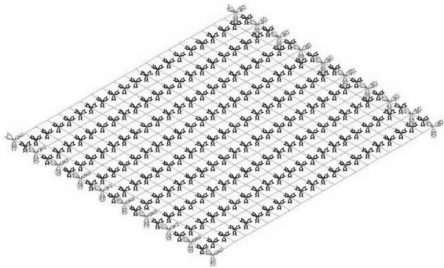


图 3 空间梁格法有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Space Grillage Method

用 Beam44 单元模拟铰缝,将其定义为特殊的刚性链杆单元且刚度巨大。刚性链杆的实常数取值要适当,否则算出的数据不可信。这是由于刚性链杆不但传递剪力还会传递轴向力,而由于是刚性链杆,则梁极小的变形均会引起极大的轴向力,轴向力的存在会带动其他梁产生与实际不符的变形值,从而使计算结果失真。图 4 为全桥梁单元局部消隐。

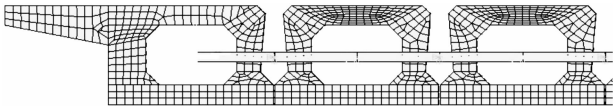


图 4 梁单元局部消隐

Fig. 4 Partial Blanking of Beam Element

1.3 实体有限元法

实体有限元法^[11]将结构离散为三维实体单元,能够真实模拟各种复杂截面构件及各构件之间的连

接,可以方便地对受力复杂部分的局部应力状态进行分析,充分计入翘曲、畸变、剪力滞等影响,能准确地反映结构实际的抗弯、抗扭性能。因此三维实体有限元方法能准确模拟桥梁结构实际状况(包括边界条件、荷载等),计算结果也更加真实可信。

采用 ANSYS 单元库中 Solid45 单元来模拟混凝土,该单元用于模拟三维实体结构,单元通过 8 个节点来形成六面体单元,每个节点有 3 个沿着 x 、 y 、 z 方向平移的自由度,单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。

装配式空心板桥空间实体有限元模型如图 5 所示。

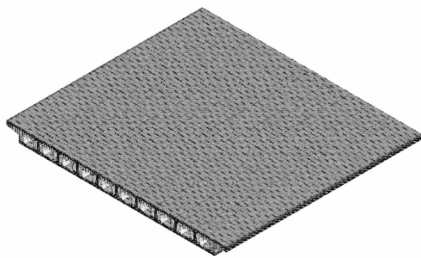


图 5 装配式空心板桥空间实体有限元模型

Fig. 5 Spatial Solid Finite Element Model of Fabricated Hollow Slab Bridge

2 荷载横向分布计算结果与误差分析

2.1 计算结果

由于横向分布系数与横向分布影响线是对等的,因此横向分布影响线能真实反映桥梁的荷载横向分布规律。采用第 1 节中的计算方法所得的空心板桥的横向分布影响线见图 6~8。由于结构具有对称性,图 6~8 中只绘出 1[#] 板(边板)~5[#] 板(中板)的影响线。装配式空心板桥板梁编号见图 2。

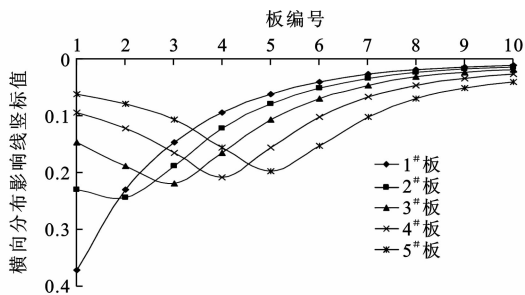
采用不同计算方法所得的各板梁荷载横向分布系数如表 1 所示。

由以上计算分析结果可得:

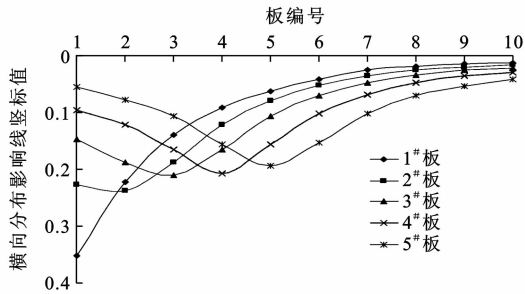
(1)上述各荷载横向分布计算方法所得的荷载横向分布影响线变化规律相同,表明所采用的计算理论正确,计算结果真实。

(2)实体有限元法严格按照装配式空心板桥实际结构建立模型,基本未作简化,能够真实反映结构的实际受力状况,计算结果真实可信,其荷载横向分布影响线过渡平缓、峰值较小,因此荷载横向分布系数计算值也最小。

(3)与实体有限元法相比,铰接板(梁)法和空间



(a) 理论计算结果



(b) 查表计算结果

图 6 铰接板(梁)法荷载横向分布影响线

Fig. 6 Transverse Load Distribution Influence Lines of Hinge-jointed Plate (Girder) Method

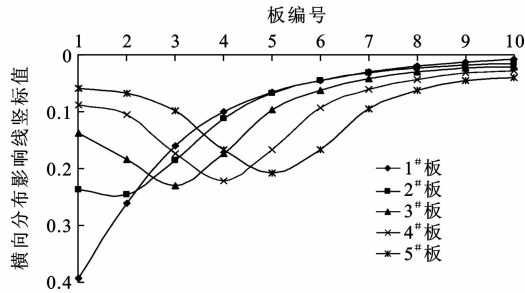


图 7 空间梁格法荷载横向分布影响线

Fig. 7 Transverse Load Distribution Influence Lines of Space Grillage Method

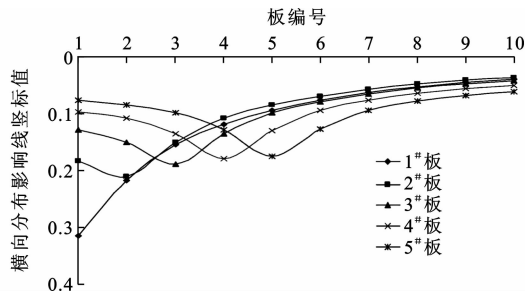


图 8 实体有限元法荷载横向分布影响线

Fig. 8 Transverse Load Distribution Influence Lines of Solid Finite Element Method

梁格法的计算结果均偏大,趋于保守,同时,两者计算结果较为接近,其中按空间梁格法计算所得的各板梁荷载横向分布影响线较为陡峭、峰值最大,因此,所得的荷载横向分布系数计算值最大且以边板

表 1 荷载横向分布系数计算结果

Tab. 1 Calculating Results of Transverse Load Distribution Coefficients

板编号	不同方法计算的荷载横向分布系数				相对误差/%		
	铰接板(梁)法		空间梁格法	实体有限元法	理论计算	查表计算	空间梁格法
	理论计算	查表计算					
1#	0.378	0.357	0.387	0.345	9.6	3.5	12.2
2#	0.302	0.301	0.306	0.260	16.2	15.8	17.7
3#	0.294	0.292	0.295	0.255	15.3	14.5	15.7
4#	0.274	0.275	0.279	0.246	11.4	11.8	13.4
5#	0.258	0.258	0.260	0.233	10.7	10.7	11.6

注:相对误差为各方法计算结果与实体有限元计算结果的差除以实体有限元计算结果所得的值。

最为显著。

(4)铰接板(梁)法的理论计算和查表计算结果存在差异:与理论计算结果相比,忽略边板、中板几何特性差异,按中板刚度系数查表计算造成边板的荷载横向分布系数计算结果偏小,而且对次边板(2#板)~中板(5#板)的计算结果影响不大。因此从设计角度来看,对于边板而言,查表计算结果偏不安全。

2.2 误差分析

从表 1 的误差计算结果可以看出:与实体有限元法计算结果相比,铰接板(梁)法和空间梁格法均存在不同程度的差异。由于实体有限元法严格按照装配式空心板桥实际设计几何尺寸和材料特性建立空间有限元模型,因此计算结果能反映出荷载在各板梁间横向分布的状态和特征,计算结果真实有效。与之相比,铰接板(梁)法和空间梁格法计算的相对误差大都集中在 10.0%~15.0%,相对而言,边板和中板的相对误差较小,而次边板的相对误差最大,分别达到了 16.2%、15.8%、17.7%。

此外,按铰接板(梁)法的查表计算,由于边板刚度系数计算值的减小导致边板荷载横向分布系数减小,而相对于实体有限元法的计算误差降低 3.5%,其他位置板梁计算误差与铰接板(梁)法的理论计算结果基本保持一致。

造成上述计算误差的主要原因在于^[12-14]:

(1)计算理论与实际受力不符。铰接板(梁)法的假定与简化认为:铰缝的高度不大、刚性甚弱(即“小铰缝”构造),通常可近似视为理想“铰”。这种不考虑横向弯矩对传递荷载影响的做法对于单梁而言是偏安全的,但同时将这种较为薄弱的横向连接用理想“铰”进行力学简化却是不安全的。从铰缝的实

际构造(尤其是某些企口式混凝土铰接构造)来看,并不能保证铰缝边缘的桥面板截面位移协调。

(2)装配式空心板桥荷载横向分布计算时,假定只考虑铰接力以保证板梁间不产生错动是主要的,略去赘余力不保证板间扭转角的连续性虽然是次要的,但实体有限元法的计算结果表明,略去赘余力对荷载横向分布的计算结果存在显著影响,会引起较大的误差。

(3)铰接板(梁)法和空间梁格法均未考虑桥面铺装,而实体有限元法计入了铺装层混凝土的共同受力效应,这也是铰接板(梁)法、空间梁格法与实体有限元法计算结果存在较大误差的影响因素之一。

3 结 语

(1)在装配式空心板桥设计阶段,建议将边板、中板的几何特性区分开来建立和求解铰接力正则方程,从而计算边板和中板的荷载横向分布系数,否则易造成边板计算结果偏低而偏于不安全。若计算时不予以区分,为安全起见应对边板荷载横向分布计算结果进行必要的修正。

(2)从实际出发,在计算荷载横向分布时,考虑装配式空心板桥铰缝构造的横向刚度以及铺装层混凝土的共同受力是合理的,实体有限元法的荷载横向分布影响线的平缓过渡恰好证实了这一点。因此采用实体有限元模型计算荷载横向分布更加切合实际,具有合理性和有效性。在条件允许的情况下,推荐采用实体有限元法计算荷载横向分布系数,亦可参考文献[5]中建议的方法,在空间梁格模型的基础上,将桥面铺装考虑为板单元建于梁格上,并与梁格共用节点,保证 2 种单元共同受力,以降低计算误差,达到同样效果。

(3)该研究成果可供装配式空心板桥在设计时参考。

参考文献:

References:

[1] 李国豪,石 洞.公路桥梁荷载横向分布计算[M].北京:人民交通出版社,1987.

LI Guo-hao,SHI Dong. Calculation of the Transverse Load Distribution of Highway Bridges[M]. Beijing: China Communications Press,1987.

[2] 胡肇滋. 桥跨结构简化分析:荷载横向分布[M]. 北京:人民交通出版社,1996.

HU Zhao-zi. Simplification Analysis of the Bridge

- Structure; Transverse Load Distribution[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [3] 范立础. 桥梁工程:上册[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
- FAN Li-chu. Bridge Engineering: Vol. 1[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [4] 李淑芬. 带翼小箱梁桥荷载横向分布计算分析及其试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- LI Shu-fen. Analysis of Transverse Load Distribution of Multi-box Girder Bridge and Its Experimental Study[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [5] 刘亚敏. 铰接板梁桥荷载横向分布计算方法应用研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(20): 334-335.
- LIU Ya-min. Applied Study on Method of Calculation of Transverse Load Distribution for Articulated Slab Girder Bridges [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(20): 334-335.
- [6] 徐光辉, 胡明义. 公路桥涵设计手册——梁桥[M]. 北京:人民交通出版社, 1996.
- XU Guang-hui, HU Ming-yi. Design Manual of Highway Bridges and Culverts—Beam Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [7] 戴公连, 李德建. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
- DAI Gong-lian, LI De-jian. The Design Method and Its Application of Spatial Analysis of Bridge Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [8] 王卿, 胡卫平, 杨沪湘. 板式桥梁设计计算分析方法[J]. 公路, 2009(11): 17-19.
- WANG Qing, HU Wei-ping, YANG Hu-xiang. The Design and Calculating Method for Slab Bridges[J]. Highway, 2009(11): 17-19.
- [9] 李颀劲, 黄新赞, 严定坤. 梁格法在空心板桥横向分布系数计算中的应用[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2008(11): 112-113.
- LI Jie-jin, HUANG Xin-zan, YAN Ding-kun. The Application of Grillage Method for Transverse Distribution Factor Calculating in Hollow Slab Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application and Technology Edition, 2008(11): 112-113.
- [10] 许峰伟. 简支板梁桥车桥振动的横向分布特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- XU Feng-wei. Study on Transverse Distribution of Bridge-vehicle Interaction of Simply Supported Plate Girder Bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [11] 韩清海. 中小跨径桥梁荷载横向分布系数计算方法的研究及其应用[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- HAN Qing-hai. Research and Application of Lateral Load Distribution Factor Calculating Method for Small and Medium-span Bridges[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [12] 林阳子, 黄侨, 任远, 等. 再议梁板桥横向分布及其在加固中的问题[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 82-86.
- LIN Yang-zi, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Reconsidering of Transverse Distribution of Beam-slab Bridge and Problems in Reinforcement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 82-86.
- [13] 窦祖融, 王怡, 薛伟辰. 低周反复荷载下装配整体式混凝土框架边节点的抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 61-66.
- DOU Zu-rong, WANG Yi, XUE Wei-chen. Seismic Performance of Precast Monolithic Concrete Frame Exterior Connections Under Low Cyclic Loading [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 61-66.
- [14] 郭彦林, 江磊鑫. 双矩管带肋约束型装配式防屈曲支撑的设计方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 67-74.
- GUO Yan-lin, JIANG Lei-xin. Design Method of Buckling-restrained Braces Assembled with Dual Ribbed Rectangular Hollow [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 67-74.