

文章编号:1673-2049(2008)02-0096-05

剪力钉刚度对曲线钢-混凝土箱形结合梁桥 结构性能的影响

雷自学¹, 晏兴威¹, 高 林²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春 130021)

摘要:采用有限元软件 ANSYS 对剪力钉推出试验进行了仿真分析, 得出了与真实试验结果非常接近的荷载-滑移曲线, 因而可用于实桥分析; 在 SAP2000 软件中用弹簧单元模拟剪力钉, 其刚度采用仿真推出试验所得值, 对一实桥结构进行三维空间建模分析, 得出在一些荷载作用下的结构响应, 以比较考虑混凝土与钢箱界面滑移与否对曲线钢-混凝土箱形结合梁桥部分结构性能的影响。结果表明: 剪力钉刚度变化对于桥面板纵向应力影响较大, 但对钢箱底板纵向应力、挠度及桥梁横向位移影响较小; 曲线钢-混凝土结合梁桥剪力钉内力分布非常复杂, 远非能用解析式或简化方法得出; 必须采用有限元分析法或其他严密的方法对曲线钢-混凝土结合梁桥进行研究。

关键词:钢-混凝土箱形结合梁桥; 剪力钉; 推出试验; 滑移; 仿真分析

中图分类号: TU318 文献标志码: A

Effect of Stiffness of Shear Studs on Structural Behavior of Curved Steel-concrete Composite Box Girder Bridges

LEI Zi-xue¹, YAN Xing-wei¹, GAO Lin²

(1. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Jilin Provincial High Class Highway Construction Bureau, Changchun 130021, Jilin, China)

Abstract: The simulation analysis was carried out for shear stud push-out test by using ANSYS software. The load and slip curve that was quite close to that of real tests was obtained. Hence, it could be used directly in real bridges analysis. In SAP2000 software, spring elements were adopted to simulate the shear studs with shear stiffness obtained in the simulation analysis, and a 3-D model for a real bridge structure was built and analyzed. The structural responses under some loads were obtained to compare the effect of slip between the concrete deck and steel box on the structural behavior of the bridge. The results indicate that the stiffness of shear studs has relatively strong influence on the longitudinal stress of concrete deck, but has slight influence on the longitudinal stresses of the bottoms of steel box girders, deflections and transverse displacement of bridges; the distribution of the internal forces of shear studs of a curved steel-concrete composite box girder bridge is very complicated, far from being calculated by analytical formulae or simplified methods. Therefore, the finite element analysis method or other rigorous methods are needed for the analysis of curved steel-concrete composite box girder bridges.

Key words: steel-concrete composite box girder bridge; shear stud; push-out test; slip; simulation analysis

收稿日期: 2008-02-20

基金项目: 云南省交通科技项目(TST2002204A)

作者简介: 雷自学(1959-), 男, 陕西大荔人, 副教授, E-mail: thunderleizixue@126.com.

0 引言

钢-混凝土结合箱形梁桥一般由一个或多个通过剪力键与上部混凝土桥面板相连的 U 形或矩形钢箱梁组成,多个箱梁间在横向通过有一定规律相间的横隔梁相互连接以保证桥梁结构的整体性^[1-3]。这种桥型的主要特点在于它综合了钢和混凝土的主要优点:自重轻、抗弯、抗扭刚度大,可建造既轻柔又美观的大跨径桥梁;特别适用于曲线桥梁、立交桥和匝道桥等。

钢-混凝土结合箱形梁桥建造的关键构件之一就是剪力键,尽管其形式多种多样,但最常用的仍数剪力钉,而其主要力学性能一般由推出试验确定,其中包括极限抗剪强度以及荷载-滑移曲线的数学模型。对此,各国学者已经进行了大量的研究工作,20 世纪 60 年代,Viess 等对剪力钉的抗剪承载力开展了试验工作^[4-6]。此后,许多学者都做了大量成功的试验研究,其中 Ollgaard 等^[7]的试验最广为人引用,它也是 AISC 和 AASHTO 规范条文的基础。然而,迄今为止,还很少有学者对推出试验进行仿真分析,文献^[8]中所做的剪力钉推出试验模型,采用梁单元模拟剪力钉,此模型因容易产生应力集中而难于收敛,结果不够理想。为了得到某实桥所用剪力钉的荷载-滑移曲线,本文中笔者采用 ANSYS 建模,对剪力钉推出试验进行了计算机仿真模拟。但如何将所得结果用于实际结构分析,现今仍存在一定困难,虽然文献^[9]中在合理假定的基础上,以圆弧形曲梁为例,给出了曲梁上由扭转和弯曲引起的连接件剪力计算公式和由扭转引起的内力计算公式,但是由于其结构形式为简支梁,所得结论并不能直接应用于复杂的曲线钢-混凝土结合箱梁。为此,笔者借助于 SAP2000 软件,采用仿真推出试验结果,对一实桥结构进行了空间建模分析。

1 推出试验仿真分析

剪力钉传统推出试验如图 1 所示,根据文献^[4],典型的荷载-滑移模型为

$$Q=Q_u(1-e^{-18\Delta})^{2/5} \quad (1)$$

式中: Q 为荷载; Q_u 为极限荷载; Δ 为相对滑移。

为了比较准确得到剪力钉的力学性能,本文中采用 ANSYS 软件对推出试验进行仿真。其中混凝土桥面板用 Solid65 单元模拟^[10],以考虑混凝土的开裂和压碎性能,剪力钉用 Solid45 单元模拟,混凝土桥面板与钢箱的接触面用 Target170 和 Contal174

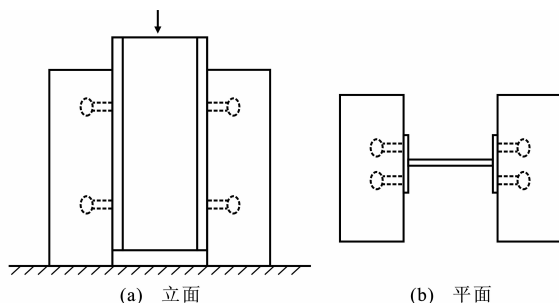


图 1 传统的推出试验装置

Fig. 1 Conventional Push-out Test Equipment

接触对模拟,钢材的本构关系采用双线性理想弹塑性模型,混凝土本构关系采用多线形随动强化模型,破坏准则采用 ANSYS 默认的 Willam Warnke 五参数破坏准则,实体模型如图 2 所示。模型中的钢材和混凝土强度为实桥所用材料强度,剪力钉尺寸为实际尺寸。通过计算分析得出荷载-滑移曲线,如图 3 所示。由于桥梁结构的工作荷载并不能使剪力钉产生像推出试验那样大的滑移,因此取荷载-滑移曲线的前半部分,作为全桥建模时的滑移曲线,得到的抗滑移刚度为 $9\,500\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

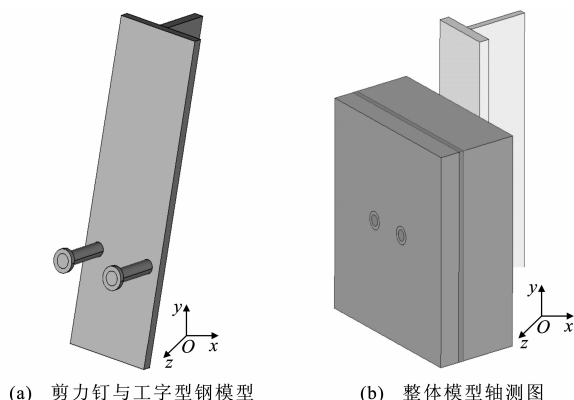


图 2 推出试验模型

Fig. 2 Model of Push-out Test

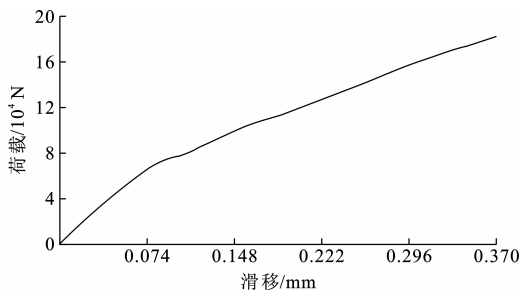


图 3 荷载-滑移曲线

Fig. 3 Curve of Load and Slip

图 4 为模拟曲线与式(1)曲线的对比。由图 4 可以看出,本文中仿真试验所得到的荷载-滑移曲线

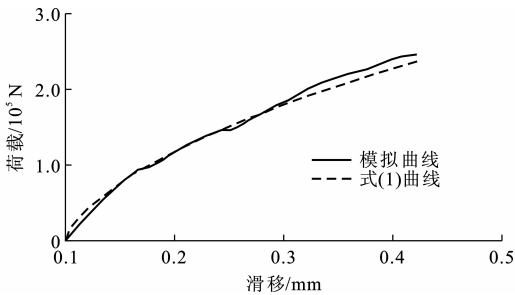


图4 模拟曲线与式(1)曲线的对比

Fig. 4 Comparison Between Simulation Curve and Equation (1) Curve

与式(1)结果非常接近,因而可以直接用于整桥建模分析。

2 剪力钉刚度对曲线结合梁桥内力的影响

2.1 工程概况

某匝道桥上部结构为钢箱-混凝土结合梁,主梁截面由预制开口钢箱梁和现浇预应力混凝土桥面板通过抗剪连接器组成,钢箱梁宽 3.5 m,结构中line处梁高 1.4 m,桥面板厚 0.3 m,主梁结构中line处全高 1.7 m;横桥向 2 个钢箱,中距 7.0 m,桥面板宽 13.0 m。主桥跨径为 30 m+40 m+30 m,全桥预制钢梁共分 5 个制作段,10 个钢梁制作段。每片主梁分成 5 段在工厂或专用场地进行焊接制作,然后在接口处搭设临时支架安装钢梁,采用高强螺栓连接,形成纯钢断面的 5 孔连续梁,联结箱间横梁后,再安装二期恒载(桥面铺装、防撞护栏等),即可成桥。该桥位于半径 $R=165$ m 的圆曲线上,墩台中心线沿半径 R 方向设置,内外两梁长度不相等,梁长等于同心角所对应的弧长。

2.2 空间模型

由于所研究的桥梁结构在形式上具有特殊性,整个结构很难用常规的空间杆系来模拟。为了考虑普通钢筋的影响,依据文献[11],将混凝土板视为 2 层以钢筋为中心面的外层和 1 层无开裂混凝土核心层组成的板单元。本文中用弹簧单元模拟混凝土桥面板和钢板之间的剪力钉^[12],剪力钉刚度采用第 1 节仿真推出试验所得值,对每个上翼缘,沿梁长每隔一定距离放置弹簧(即使实际上并不存在剪力钉),使横桥向的 3 个节点通过弹簧与混凝土板的 3 个节点相连,全桥三维空间模型见图 5。通过对每个弹簧单元的刚度进行修正来考虑弹簧的实际分布,即对每根弹簧乘以一个修正系数,该修正系数通过其

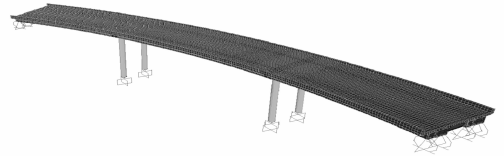


图5 全桥三维空间模型

Fig. 5 3-D Space Model of Bridge

实际间距除以模型间距而得到。当每排剪力钉少于或多于 3 个时,进一步将修正系数乘以每排的实际剪力钉数再除以 3;如果一些地方没有剪力钉,采用一个非常小的修正系数。钢箱、内横隔梁和加劲肋均采用薄壳元模拟,外横隔梁用梁单元模拟,混凝土桥面板及防撞墙采用厚壳元模拟^[13-14],齿板用实体单元模拟,以充分考虑结构的实际受力情况。分析模型共计节点数 24 341,杆元 1 042,壳元 20 682,实体单元 720,弹簧 3 090,未知数高达 120 724。为了揭示曲线梁桥的一些特性,以下仅分析二期恒载作用下的一些结构效应。

2.3 分析结果及讨论

在二期恒载作用下,中跨跨中纵向应力沿桥面板板宽方向的变化如图 6 所示。由图 6 可以看出,不论是否考虑相对滑移,纵向应力沿桥面板板宽方向变化趋势是一致的。由于扭矩的作用,外箱纵向压应力大于内箱纵向压应力,这反映了弯桥的受力性能不同于一般直桥;考虑相对滑移时桥面板纵向应力均大于不考虑相对滑移时桥面板纵向应力,内箱最大比率为 10%,外箱最大比率为 15%,由此可见,相对滑移对于桥面板纵向应力影响较大,这是因为桥面板与剪力钉直接相连,影响也最为直接。

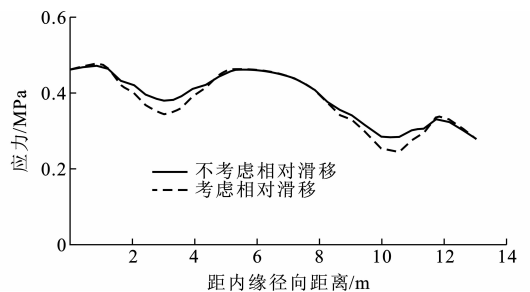


图6 中跨跨中桥面板纵向应力沿板宽方向的变化
Fig. 6 Variation of Longitudinal Stress Along Width of Deck of Bridge Slab at Center of Mid-span

图 7 为中跨跨中内钢箱底板顶面纵向应力沿底板板宽方向的变化曲线。从图 7 可以看出,考虑内钢箱底板相对滑移与否对于桥底板纵向应力的影响极小,2 条曲线几乎重合。对于外箱,钢箱底板纵向应力变化也有类似结论,这是因为钢箱底板不与剪力钉直接相连,即相距较远,因而影响也较小。

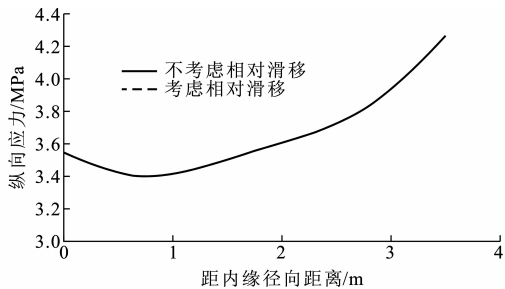


图 7 中跨跨中内箱底板纵向应力沿板宽方向的变化

Fig. 7 Variation of Longitudinal Stress of Inner Box Along Width of Bottom Flange at Center of Mid-span

在二期恒载作用下,中跨跨中挠度沿桥面板板宽方向的分布如图 8 所示。由图 8 可以看出,考虑相对滑移时内外箱的挠度比不考虑相对滑移时分别约大 0.5% 和 0.7%,这说明剪力钉刚度对于外箱桥面板挠度的影响要略大于内箱桥面板。类似地,从图 9 可以看出,剪力钉刚度对内箱底板竖向位移的影响也不超过 0.7%。因此,剪力钉刚度对挠度影响很小,这是因为混凝土桥面板的刚度大大小于钢箱的刚度,而剪力钉对总体刚度的贡献就更小。

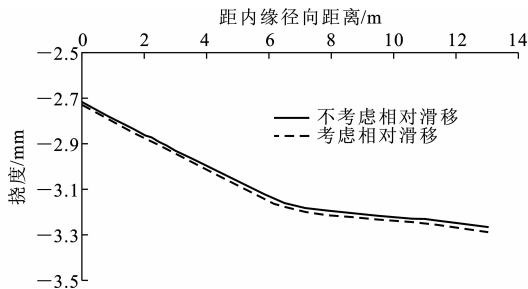


图 8 中跨跨中挠度沿桥面板板宽方向的分布

Fig. 8 Distribution of Deflection Along Width of Bridge Slab at Center of Mid-span

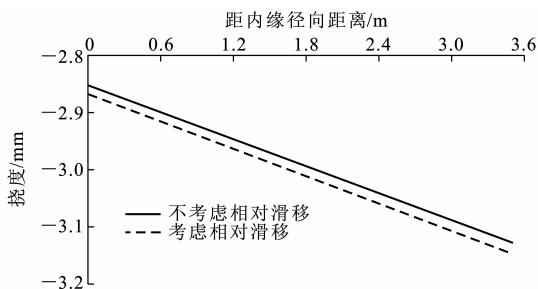


图 9 中跨跨中挠度沿桥内箱底板板宽方向的分布

Fig. 9 Distribution of Deflection Along Width of Bottom Flange of Bridge at Center of Mid-span

为了研究相对滑移对于横向位移的影响,笔者分析了在二期恒载作用下桥面板的径向位移,其中中跨跨中处的径向位移如图 10 所示。由图 10 可以看出,由 2 种弹簧刚度得出的桥面板径向位移变化

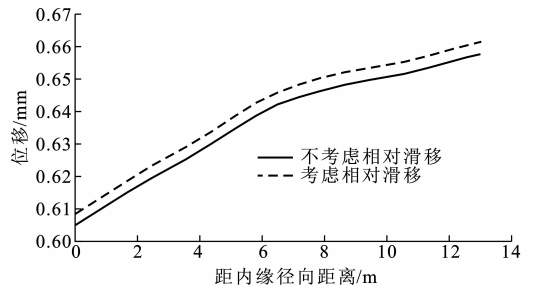


图 10 中跨跨中桥面板径向位移的分布

Fig. 10 Radial Displacement Distribution Along Bridge Slab at Center of Mid-span

趋势基本一致,且外箱径向位移比内箱径向位移约大 8%,可见扭转效应对于曲线结合梁桥的影响较大,但相对滑移存在与否,对于桥面板的径向位移影响不大,此处仅增大 0.6%。

中跨跨中外箱底板径向位移的分布如图 11 所示。从图 11 可以看出,在二期恒载作用下,考虑相对滑移比不考虑相对滑移时中跨跨中外箱底板的径向位移大 0.5% 左右,因此可忽略不计。研究其他位置的位移结果也可得出类似的结论,这些都说明该例中剪力钉对结合梁总体刚度影响不大。

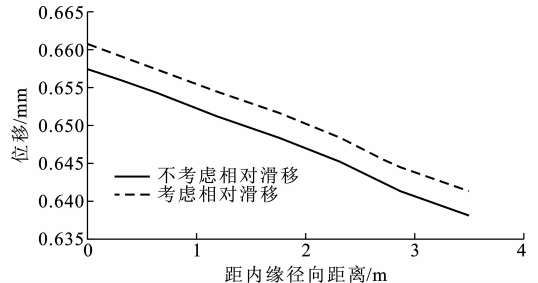


图 11 中跨跨中外箱底板径向位移的分布

Fig. 11 Radial Displacement Distribution Along Bottom Flange of Outer Box at Center of Mid-span

本文中选取结合梁桥右边跨内缘剪力钉与外缘剪力钉,得出其剪力变化趋势如图 12 所示。由图 12 可以看出,外缘剪力钉剪力要大于内缘剪力钉剪力,桥台及墩顶处剪力钉剪力最大,且有突然增大现象,零剪力出现在距桥台约 1/3 跨度处。尽管仅有简单的均布二期恒载荷载作用,但曲线钢-混凝土结合梁桥剪力钉内力变化已非常复杂。因此在其他工况下,如在收缩徐变、预应力荷载和车道荷载等作用下内力变化将更为复杂,限于篇幅,本文中未给出相应结果。这说明剪力钉的内力远非能用一般参考文献中的公式或简化方法计算,采用有限元分析方法或其他严密的分析方法很有必要。

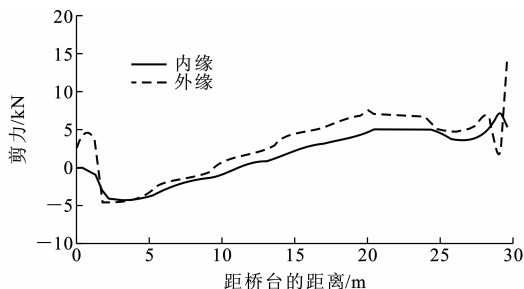


图 12 内外缘剪力钉周向剪力变化趋势

Fig. 12 Variation Tendency of Shear Forces in Shear Studs Along Inner and Outer Edges

3 结 语

(1)相对滑移对与之相连的桥面板纵向应力影响较大,但对钢箱底板纵向应力、挠度及桥梁横向位移影响较小。

(2)曲线钢-混凝土结合梁桥剪力钉内力变化非常复杂,远非能用一般公式或简化方法得出,本文方法是分析复杂曲线钢-混凝土结合箱形桥梁行之有效的方法之一。

(3)在简单的均布二期恒载作用下,尽管内外箱的结构效应分布规律是一致的,但其值有较大的差别,这说明在分析曲线结合梁桥时,不可忽略其扭转效应。

(4)本文实桥的剪力钉布置很密,刚度已经很大,因而,讨论中发现考虑相对滑移对结构反应的影响并不大;但当剪力钉布置较少时,或单个剪力钉刚度较小时,可能会使结构刚度降低较大,从而可能对结构内力和位移有较大的影响,对此还需做进一步的研究。

参考文献:

References:

[1] 周绪红,戴鹏,狄谨. 钢箱梁斜拉桥成桥索力优化分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 19-23.
ZHOU Xu-hong, DAI Peng, DI Jin. Optimization Analysis of Cable Tensions of Dead Load State for Cable-stayed Bridge with Steel Box Girder[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 19-23.

[2] 狄谨,周绪红,游金兰,等. 钢箱梁斜拉桥索塔锚固区的受力性能[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 48-52.
DI Jin, ZHOU Xu-hong, YOU Jin-lan, et al. Mechanical Property of Cable-pylon Anchorage Zone of Cable-stayed Bridge with Steel Box Girder[J]. China

Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 48-52.

[3] 华旭刚,陈政清. 基于 ANSYS 的桥梁全模态颤振频域分析方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 41-47.
HUA Xu-gang, CHEN Zheng-qing. Full-mode Flutter Frequency Domain Analysis Method of Bridge Based on ANSYS[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 41-47.

[4] VIEST I M. Investigation of Stud Shear Connectors for Composite Concrete and Steel T-beams[J]. Journal of ACI, 1956, 27(8): 875-891.

[5] SLUTTER R G, DISCOLL G C. Flexural Strength of Steel Concrete Composite Beams[J]. Journal of the Structural Division, 1965, 91(S1): 71-99.

[6] CHAPMAN J C, BALAKRISHMAN S. Experiments on Composite Beams[J]. The Structural Engineering, 1964, 42(11): 369-383.

[7] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal Weight Concrete[J]. Engineering Journal of AISC, 1971, 8(2): 55-64.

[8] ISSA M A, PATTON T A, ABDALLA H A, et al. Composite Behavior of Shear Connections in Full-depth Precast Concrete Bridge Deck Panels on Steel Stringers[J]. PCI Journal, 2003, 48(5): 76-89.

[9] 胡少伟. 组合梁抗扭分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
HU Shao-wei. Analysis and Design of Composite Beams in Torsion[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.

[10] 何春林,那静忠. ANSYS 对钢筋混凝土结构弹塑性问题的仿真研究[J]. 煤炭工程, 2007(4): 80-82.
HE Chun-lin, XING Jing-zhong. Simulation Research on Elastic and Plastic Issues of Reinforced Concrete with ANSYS[J]. Coal Engineering, 2007(4): 80-82.

[11] BRONDUM-NIELSEN T. Optimum Design of Reinforced Concrete Shells and Slabs[R]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1974.

[12] TARHINI K M, FREDERICK G R. Wheel Load Distribution in I-girder Highway Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(5): 1285-1294.

[13] BROCKENBROUGH R L. Distribution Factors for Curved I-girder Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(10): 2200-2215.

[14] TABSH S W, SAHAJWANI K. Approximate Analysis of Irregular Slab-on-girder Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 1997, 2(1): 11-17.