

考虑双向碰撞的斜交桥抗震性能分析

顾晓燕¹, 游新², 吴刚³

(1.青海交通职业技术学院, 青海 西宁 810000; 2.青海省公路科研勘测设计院; 3.东南大学 交通学院)

摘要:地震作用下,采用板式橡胶支座的斜交桥易产生滑移,导致主梁发生较大的位移,并与桥台和横桥向挡块发生碰撞。为分析公路斜交桥碰撞作用机理及其影响因素,对一座三跨连续斜交桥进行非线性时程分析,考虑了不同斜交角(取值 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$)和横向挡块间距等因素,分析了纵、横桥向不同碰撞模型及其设计参数对桥梁地震响应的影响。结果表明:斜交桥在纵、横桥向的碰撞作用是主梁发生转动的主要因素;该文采用的弹塑性碰撞模型能较好地反映斜交桥地震响应的不规则性;挡块间距的改变会增加桥台处不均匀碰撞现象,显著影响斜交桥碰撞效应,可通过选择合理挡块初始间距来降低地震损伤。

关键词:斜交桥;地震响应;碰撞作用;挡块;有限元分析

1 引言

斜交桥桥轴线与支承线存在一定夹角,可表现出较好的地形适应性,能很好满足中国“桥随路走”的线路设计原则,在一些高速公路中,斜交桥数量甚至占到整条线路桥梁的 $40\%\sim 50\%$ 。但也正是由于斜交角的存在,增加了斜交桥地震响应的复杂性,各国规范对于斜交桥抗震设计和分析方法没有作出规定,仅给出了其抗震措施建议。

以往地震灾害表明:斜交桥表现出较高易损性。1971年San Fernando地震中,Foothill Boulevard跨线立交桥发生主梁较大横向移位和墩柱剪切破坏;1994年Northridge地震中,Gavin Canyon跨线桥因发生过大位移而导致落梁;汶川、玉树地震中,斜交桥表现出大量的主梁转动,横向挡块发生破坏,纵桥向伸缩缝拉裂或挤压破坏。这些震害均表明斜交桥主梁存在明显的纵、横桥向位移耦合现象,并在伸缩缝和横桥向挡块处易发生碰撞。Abdel-Mohtiet等分析了不同几何参数下的连续斜交桥地震响应,并考虑了桥台与主梁纵向碰撞作用和主梁与挡块的横向碰撞作用,其分析模型均为墩梁固结体系,与中国中小跨径桥梁采用无锚固板式橡胶支座作为连接构件的结构体系不同;何健等研究了碰撞单元布置形式和碰撞刚度对连

续斜交桥地震响应的影响,其仅考虑了桥台处纵桥向碰撞,采用的是线弹碰撞模型;王军文(2014)对简支梁桥的主梁旋转机理进行研究,并采用双折线模型来考虑纵、横桥向的碰撞关系,但没有考虑挡块失效的影响。

结构几何参数及纵、横桥向的碰撞作用增加了斜交桥地震响应的复杂性。为研究中国普遍采用板式橡胶支座的斜交桥地震响应,采用SAP2000对一座3跨连续斜交桥(45°)建立有限元模型。考虑斜交角、桥台—土相互作用、挡块碰撞模型等参数,分析纵、横桥向碰撞模型及设计参数对斜交桥主梁转动特性、主梁纵、横桥向碰撞作用效应及桥墩地震响应的影响规律。

2 有限元分析

2.1 工程背景

选取四川山区一座三跨斜交连续梁桥进行分析,跨径布置为 $3\times 25\text{ m}$ 。主梁由4片预制箱梁组成,梁高 1.4 m ,梁轴线与支承线夹角为 45° 。桥墩采用三柱式桥墩,墩柱直径 1.3 m ,墩高 5 m ,纵筋配筋率为 1.25% ,配箍率为 0.87% 。全桥支座采用板式橡胶支座。桥址场地属II类场地。

采用SAP2000程序建立桥梁结构的有限元模型。地震作用下,主梁基本处于弹性状态,采用线弹性梁柱单元进行模拟。桥墩可能进入塑性状态,墩顶和墩底

收稿日期:2018-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408084)

作者简介:顾晓燕,女,讲师.E-mail:31882961@qq.com

为潜在塑性铰区域,采用 P—M2—M3(PMM)纤维铰来定义塑性铰的特性,并确定合理的塑性铰长度和塑性铰位置。采用 GAP 单元的合并/张开来激活/钝化

主梁与挡块和桥台的碰撞作用,通过不同属性的弹簧单元串联或并联来模拟主梁与横向挡块和桥台的碰撞响应。不考虑桩—土相互作用。有限元模型见图 1。

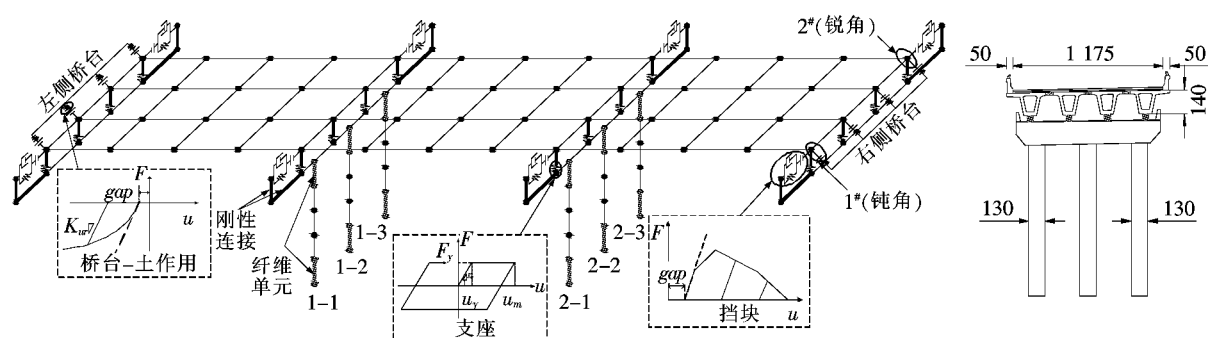


图 1 斜交桥有限元模型(单位:cm)

2.2 混凝土挡块

桥梁横向挡块限制了主梁横向位移,但会增加下部结构地震力,对桥梁结构地震响应有重要影响,常用线弹性模型和弹塑性模型来模拟挡块:① 线弹性模型。假设横向挡块力—位移关系表现为线弹性特性,如图 2 所示线弹性准则;② 弹塑性模型。Silva 等对横向挡块的非线性特性进行试验研究,将混凝土部分和钢筋部分贡献分离,提出两弹簧滞回模型。徐略勤等结合中国钢筋混凝土挡块的构造特点,对其模型进行修改和改进,建立图 2 所示滞回准则,计算模型相关参数定义参见文献[15]。

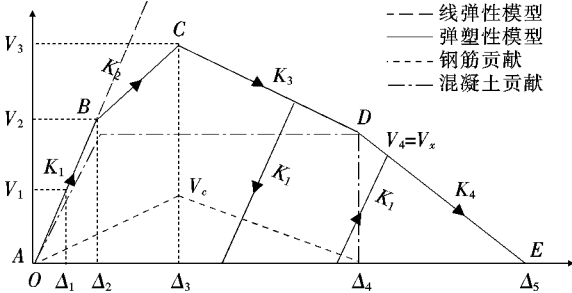


图 2 挡块力学模型

2.3 桥台—土相互作用

该文将采用线弹性模型和弹塑性模型来考虑桥台—土的作用,并与缝单元串联来模拟上部结构与桥台碰撞作用。其中,弹塑性模型采用 Duncan 等的试验研究成果,计算模型如图 3 所示。线弹性模型刚度则采用该弹性模型的切线刚度。

2.4 地震动选择与输入

根据场地条件和规范,建立目标谱,生成 3 条人工地震动,并从 PEER 数据库选取 4 条实际地震动,7

条地震反应谱平均谱值与目标谱匹配如图 4 所示。将所有地震动峰值加速度放大至 0.4g,沿桥轴线和其垂线方向进行双向地震动输入。

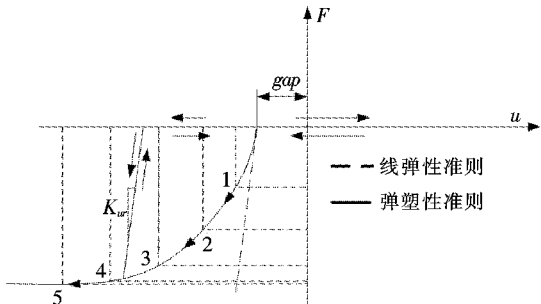


图 3 桥台—土相互作用机理

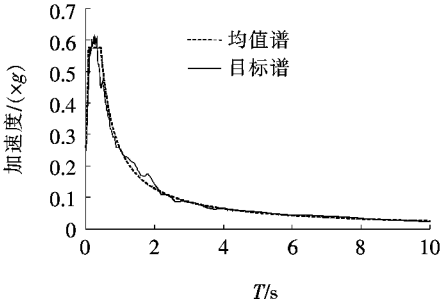


图 4 目标谱与分析谱均值

3 斜交桥地震响应分析

3.1 碰撞效应对斜交桥地震响应影响分析

碰撞作用是影响斜交桥地震响应的主要因素,为分析不同碰撞模型对斜交桥地震响应的影响,以确立合理碰撞分析模型,建立了考虑纵横桥向碰撞的 3 种分析工况:

① 模型 1:假设间隙足够大,主梁与桥台和横向挡块不发生碰撞。

② 模型 2:非线性碰撞模型。假设碰撞作用发生后,考虑桥台—土作用的非线性和横向挡块力学性能的退化,如图 2、3 中力学滞回模型。其中,弹塑性挡块模型中控制点参数分别为: $B(9.87\text{ mm}, 633.47\text{ kN})$ 、 $C(20.92\text{ mm}, 821.36\text{ kN})$ 、 $D(48.62\text{ mm}, 466.34\text{ kN})$ 及 $E(86.21\text{ mm}, 0\text{ kN})$ 。而桥台分析模型控制点参数如表 1 所示。

表 1 桥台分析模型控制点参数

控制点	位移/mm	力/kN
1	20	693.01
2	40	945.61
3	60	1 076.39
4	80	1 156.35
5	100	1 210.29

③ 模型 3:线弹性碰撞模型。假设碰撞作用发生后,桥台和横向挡块的响应均为线弹性,如图 2、3 中线弹性模型,其刚度值取模型 2 中弹塑性模型的初始刚度。

(1) 横向挡块碰撞响应及梁体转角

图 5 为斜交角 45° 的斜交桥右侧桥台 2[#](锐角)处横桥向挡块碰撞响应。

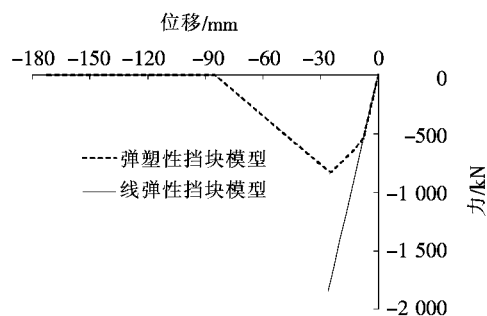


图 5 2[#](锐角)处挡块响应

由图 5 可以看出:弹塑性挡块模型在位移为 24 mm 时达到最大承载力,此时挡块已发生严重破坏,在 83 mm 时完全失去限位能力。而采用弹性模型的挡块最大变形值仅 26.14 mm,但最大碰撞力为弹塑性碰撞模型的 3.16 倍,其导致的结果是明显增大了下部结构的地震响应。

图 6 为考虑不同碰撞模型的斜交桥主梁转角随斜交角的变化。地震作用下,直桥主梁不发生转动,转角几乎为 0。对于斜交桥,在不考虑碰撞作用下,主梁也

只有很小的转动值,考虑碰撞作用后,斜交桥主梁存在不同程度的转动,且不同碰撞模型下主梁旋转角相差较大,模型 2 主梁转角要显著大于模型 3, 30° 斜交角时,两种碰撞模型下斜交桥主梁转角差值达 3.02 倍,说明碰撞作用是斜交桥主梁发生转动的主要影响因素。这也解释了汶川地震中,斜交桥主梁发生移位时常伴随的伸缩缝及挡块损伤的现象。从图 6 中也可看出,不同碰撞模型作用下,斜交桥主梁旋转角随斜交角的增加而增大,但并不呈线性增加,斜交桥地震响应随斜交角增加表现复杂。

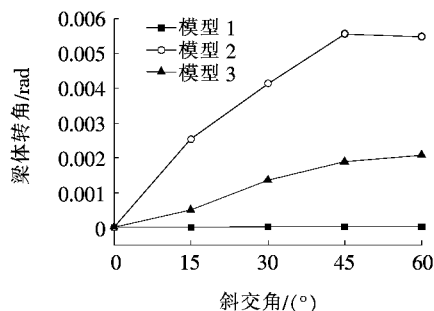


图 6 梁体转角

(2) 桥台处不均匀碰撞

图 7 为斜交桥右侧桥台钝角和锐角处的碰撞值。

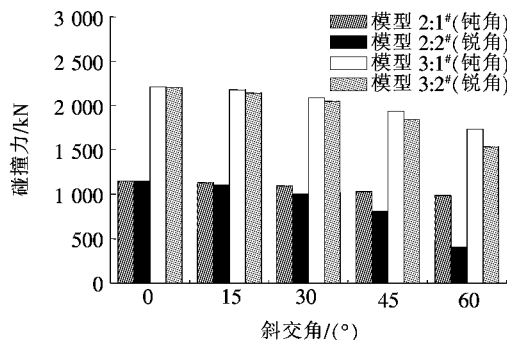
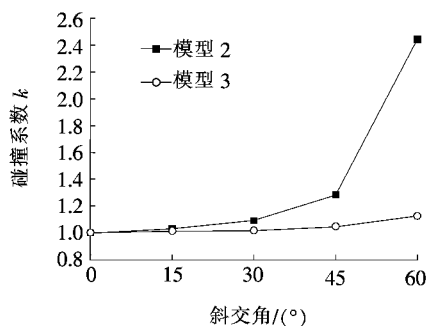


图 7 桥台处碰撞力(1[#]和 2[#])

由图 7 可以看出:斜交角较小时,钝角和锐角处的碰撞值相近,斜交角达到 45° 后,钝角与锐角处碰撞值相差逐渐增大,且模型 2 中桥台碰撞值相差更大,不均匀碰撞现象明显,斜交桥地震响应比直线桥梁更复杂。为描述桥台的不均匀碰撞现象,定义碰撞系数 k 为取桥台钝角处碰撞值与锐角处碰撞值的比值。

图 8 为考虑不同碰撞模型的斜交桥左右两侧桥台处碰撞系数 k 随斜交角变化。由图 8 可知:随着斜交角的增加,碰撞系数迅速增加,如弹塑性碰撞模型下,斜交角为 0° (直桥)时,桥梁右侧碰撞系数约为 1.0,而斜交角为 60° 的桥梁右侧碰撞系数达到 2.44,主梁与桥台不均匀碰撞显著。同时,相同斜交角时,不同碰撞

模型产生的桥台碰撞作用不一样,采用弹塑性碰撞模型的斜交桥桥台处不均匀碰撞程度要大于采用弹性碰撞模型的斜交桥,且随斜交角越大,其差值越大。综上所述,弹性碰撞模型明显高估了桥台处碰撞值,而弱化了桥台处不均匀碰撞,不能准确反映斜交桥主梁转动特性。

图 8 右侧桥台不均匀碰撞系数 k

(3) 墩底响应

图 9 为不同斜交桥模型 1—1# 墩墩底弯矩响应。

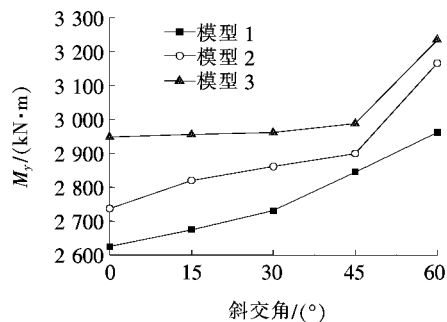
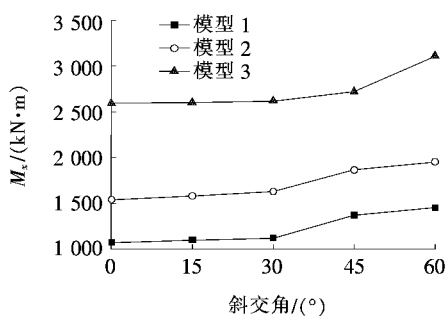
(a) 纵桥向 M_y (b) 横桥向 M_x

图 9 1—1# 墩底弯矩

由图 9 可以看出:在所有工况下,斜交桥 1—1# 桥墩墩底弯矩 M_x 、 M_y 随斜交角的增加而增大。相同斜交角时,考虑主梁与桥台和挡块的碰撞作用后,墩底弯矩 M_x 、 M_y 明显大于不考虑碰撞作用模型计算结果,说明碰撞作用的发生加剧了斜交桥地震响应。且采用弹性碰撞模型对斜交桥的地震响应影响更显著,图 9

(b)中模型 3 墩底弯矩 M_x 是模型 1 的 2.2 倍以上,明显高估了斜交桥下部结构地震响应。

3.2 挡块间距对斜交连续梁桥地震响应的影响

挡块间距大小作为影响碰撞作用的重要参数,对挡块限位功能发挥及桥梁结构地震响应有重要影响。基于前面分析结果,采用考虑了弹塑性碰撞的模型 2,进一步改变挡块初始间距,分析挡块设计参数对斜交桥地震响应的影响。

图 10 为斜交桥主梁转角随挡块间距的变化。

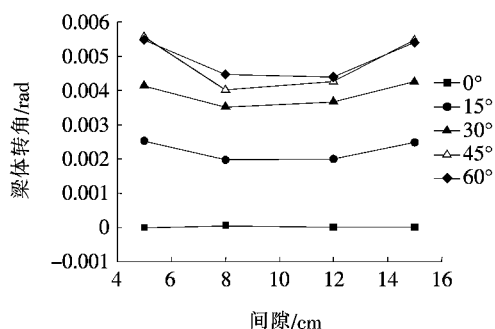


图 10 梁体转角

由图 10 可以看出:主梁转角随挡块初始间距有先减小后增大的趋势,特别是斜交角达到 45° 后,这种趋势更明显。对于初始间距为 5 cm 时,主梁与挡块的碰撞力足以使挡块失效,主梁的转动得不到有效约束,而当挡块间距太大,取 15 cm,主梁有足够的位移空间,同时,由于支座的滑移等使桥梁系统地震能量得到耗散,当挡块与主梁发生碰撞时,挡块的工作状态处于屈服阶段,尚未达到极限承载力,其限位作用得不到有效发挥,但此时主梁的旋转角已经很大。因此,通过调整挡块初始间隙,可使挡块的限位作用得到有效发挥。

图 11、12 分别为斜交桥右侧桥台钝角和锐角处的碰撞力数值。

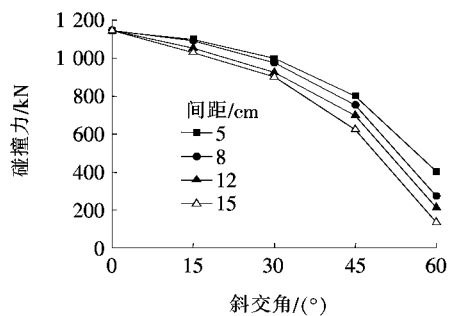


图 11 2# (锐角)处碰撞力

由图 11、12 可知:① 随着斜交角增加,桥台处碰撞值逐渐减小,锐角处碰撞值下降更明显;② 相同斜交角时,随挡块初始间距的增加,桥台钝角处碰撞值基

本不变,而锐角处碰撞值随挡块初始间距增加而明显减小。根据前面分析主梁旋转的原因,首先是纵桥向桥台钝角处的碰撞促进了主梁的转动,使主梁发生逆时针旋转(对于该文分析模型),而横桥向挡块又对主梁的旋转起到约束作用,使主梁有向顺时针旋转趋势,这一趋势增加了纵向桥台锐角处碰撞作用,说明斜交桥的纵横桥向的碰撞作用是相互影响的。当增加挡块初始间距时,这种相互作用会减弱,锐角处碰撞力不断减小,导致相同斜交角下的斜交桥碰撞系数增大,且斜交角越大,碰撞系数增加越明显,如图 13 所示,说明斜交桥地震响应的不规则性增加。

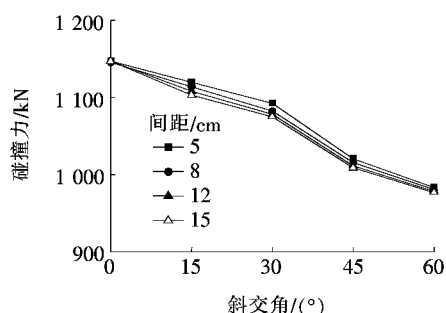


图 12 1#(钝角)处碰撞力

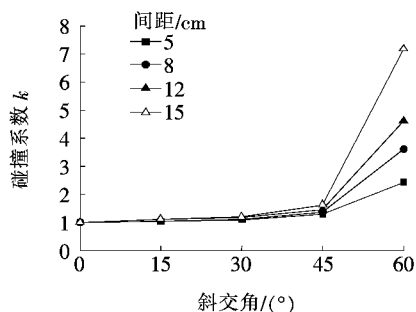


图 13 右侧桥台不均匀碰撞系数

4 结论

(1) 斜交桥地震响应随斜交角的增加而变得复杂。主梁与桥台间存在不均匀碰撞,随斜交角增加,不均匀碰撞作用越明显;主梁与桥台和挡块间的碰撞作用随斜交角增加更紧密,也增大了斜交桥地震响应的不规则性。

(2) 不同碰撞模型对斜交桥地震响应影响很大。弹性碰撞模型可较好地限制主梁位移,但会高估斜交桥桥台碰撞力及下部结构的地震力,特别是大斜交角情况。而弹塑性碰撞模型能较好反映斜交桥地震响应的不规则性,在斜交桥抗震设计和分析中建议使用弹

塑性碰撞模型。

(3) 挡块初始间距的设置对斜交桥地震响应影响较大。主梁转角随挡块初始间距先减小后增大,挡块间距的改变会增加桥台处不均匀碰撞现象,通过合理设置挡块间距可达到较好限位效果。

(4) 土—结构相互作用会改变桥梁结构自振特性,增大桥梁结构阻尼,进而影响结构地震响应。对土—结构相互作用的影响进行研究是下一步工作要点。

参考文献:

- [1] 王军文,吴天宇,李少华,等.斜交简支梁桥纵向地震碰撞反应精细化研究[J].振动与冲击,2016(8)
- [2] AASHTO—2011 Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd Edition[S].American Association of State Highway and Transportation Official, Washington, D.C., 2011.
- [3] JTG/T B02—01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S].
- [4] JRA 2012 Design Specifications of Highway Bridges, Part V: Seismic Design[S].
- [5] Ghobarah, A. A., Seismic Analysis of Skewed Highway Bridges with Intermediate Supports[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 2(3): 235—240.
- [6] Basoz, K., Risk Assessment of Bridge and Highway Systems from the Northridge Earthquake[C].In Proc. The Second National Seismic Conference on Bridge and Highways, Sacramento, California, 1997: 65—79.
- [7] 陈乐生,庄卫林.汶川地震公路震害调查——桥梁[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [8] Zhang, H., Li, J. Z., & Saïidi, M., Evaluation of Performance of a Skew Bridge in Wenchuan 2008 Earthquake [C].In Proc. The International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, 2012: 1 439—1 450.
- [9] Abdel—Mohti, A. & Pekcan, G., Assessment of Seismic Performance of Skew Reinforced Concrete Box Girder Bridges[J].International Journal of Advanced Structural Engineering, 2013, 5: 1—18.
- [10] Abdel—Mohti, A. & Pekcan, G., Seismic Response of Skewed RC Box—Girder Bridges[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 415—426.
- [11] Kaviani, P., Zareian, F., & Taciroglu, E., Performance—Based Seismic Assessment of Skewed Bridges[C].Report PEER 2014/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 2014.

现浇 STC 铺装体系施工方案对悬索桥 成桥状态影响研究

沈锐利¹, 蒋雨骥¹, 张晋瑞²

(1.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司)

摘要:为解决钢桥面铺装层破损和桥面钢结构疲劳开裂两大病害难题,拟将超高韧性混凝土(STC)铺装体系运用于大跨度悬索桥。由于大跨度悬索桥桥面铺装面积大,施工时通常选择分块浇筑的方式,然而 STC 层自身刚度比沥青铺装大,分块现浇施工时,依次形成强度的各块 STC 将逐步提高桥面系刚度,与钢桥面形成组合结构协同受力,导致结构在 STC 浇筑、硬化过程中的受力状态不断发生变化,这种施工过程中的内力重分配,最终会影响设计成桥状态的实现。为了确定 STC 刚性铺装体系分块现浇施工方案对双跨连续悬索桥成桥状态的具体影响,以杭瑞高速公路上的岳阳洞庭湖大桥主桥为工程背景,利用 Ansys 软件对 STC 铺装体系现浇方案进行有限元模拟,基于计算结果比选最优施工方案。结果表明:不同的 STC 浇筑顺序、分块方式和配重方案对钢梁成桥线形有一定影响,对 STC 成桥内力影响较大。

关键词:双跨悬索桥; STC 刚性铺装; 现浇方案; 成桥状态

1 引言

正交异性钢桥面板具有自重轻、承载能力大等诸多优点,但工程实践发现沥青混凝土铺装层在反复车载作用下病害严重,钢桥面板也常出现疲劳裂缝,常规混凝土铺装层亦是抗拉强度不足,常出现开裂现象,因此,相关单位提出了超高性能轻型组合桥面:以 45 mm 厚的超高韧性混凝土(Super Toughness Concrete, STC)代替传统桥面铺装层,将常规的正交异性钢桥面板转化为钢—超高韧性混凝土组合桥面系,并在其上铺设 40 mm 厚沥青混凝土层,STC 与钢梁之间通过栓钉连接。面板上 STC 层的设置相当于增厚了钢面板的厚度,不仅能有效参与正交异性钢桥面的

局部受力,提高其截面刚度,大幅度降低钢结构应力水平,减少钢结构疲劳开裂和铺装层病害风险,同时又能参与钢桥面的整体受力,减小钢板厚度。目前,该组合桥面结构已在一座自锚式悬索桥——株洲枫溪大桥得到实现,实际应用表明该结构具有很好的经济性。

在大跨度悬索桥中运用该超高性能轻型组合桥面,STC 浇筑规模巨大,受施工设备浇筑能力限制,必须进行分幅、分块浇筑。然而 STC 自身刚度相比沥青铺装要大,如不采取配重措施,依次形成强度的 STC 将逐步提高桥面系刚度,与钢桥面形成组合结构协同受力,使结构在 STC 浇筑过程中的受力状态不断变化,即施工过程的结构内力重分配,这种内力重分配最终会影响设计成桥状态(内力、线形)的实现,其影响性大小尚无相关资料可供参考。因此,该文以杭瑞高速

- *****
- [12] 何健,叶爱君.连续斜交梁桥地震下碰撞效应分析[J].中南大学学报:自然科学版,2012(4).
- [13] 王军文,沈贤,李建中.地震作用下斜交简支梁桥旋转机理及斜度影响研究[J].桥梁建设,2014(3).
- [14] Silva, P.F., Megally, S., & Seible, F.. Seismic Performance of Sacrificial Exterior Shear Keys in Bridge Abut-

- ment, Earthquake Spectra, 2009, 25(3):643—664.
- [15] 徐略勤,李建中.新型滑移挡块的设计、试验及防震效果研究[J].工程力学,2016(2).
- [16] Duncan, J. M. & Mokwa, R. L.. Passive Earth Pressure: Theories and Test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3):248—257.

收稿日期:2018—10—26(修改稿)

作者简介:沈锐利,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:rlshen@163.com