

箱梁整孔预制吊装工法起吊应力及控制措施研究

吕宇超

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310031)

[摘要] 箱梁整孔预制吊装的施工方法中,关键要对吊装过程中箱梁受力的安全和稳定进行检验计算。文章基于实际工程背景,对某一40m跨箱梁整孔吊装时的受力情况进行了有限元分析,得出起吊时箱梁受力最不利的位置为顶板和腹板连接处。进而研究了两种应力控制措施的效果:增加箱室倒角可以一定程度上减小应力集中现象;合理的临时预应力钢筋配置可以很大程度上减小最不利拉应力的值。

[关键词] 预制箱梁;整孔吊装;有限元计算;临时预应力

0 引言

近年来,预制混凝土结构由于其施工质量易于控制、缩短建设周期等方面的优势,在实际工程中使用越来越普遍。随着国家对装配式建筑技术推进的深入,可以预见各类结构物的预制技术还将得到更广泛的应用。在公路工程建设中,当桥梁跨径达到一定值(通常大于35m)或对抗扭有较大需求时,会选择采用箱梁的截面形式。箱梁的施工方法常见的有现场浇筑、分段预制拼装和整孔预制吊装等。当由于场地限制,难以搭设支架,或者对箱梁施工质量和建设速度有较高要求时,整孔预制吊装工法就成为优先级最高的选择^[1]。在许多跨海大桥的建设中使用了整孔预制吊装的方法,例如东海大桥70m跨径整孔预制箱梁^[2]等。

整孔预制吊装工法中关键在于架设机具的设计和梁体吊装过程的受力和安全控制。王金枝等^[3]曾以某60m简支变连续预应力混凝土箱形梁桥为例,研究整体预制箱梁的吊装控制方法。向南^[4]则对预制节段箱梁吊点附近的应力进行了研究。在南京长江四桥的建设过程中,还对工程中的预制节段箱梁的起吊和安装过程进行了足尺实验^{[5][6]},以确保施工过程的安全和可靠性。

以上的研究多是根据某一实际工程,对特定的工况进行了应力的验算。本文拟以某实际工程为背景,探究构造措施和施工临时措施(箱梁箱室倒角、临时预应力钢筋等)对箱梁整孔起吊过程中最不利状态的影响,给以后相似工程提供设计施工的参考和依据。

1 研究对象及模型

1.1 研究对象

本文研究的工程背景为一高速公路中40m标准跨径预应力混凝土整孔预制箱梁。梁端顶板厚度60cm,底板厚度50cm,腹板厚100cm,桥面宽1630cm,挑臂长度400cm。顶板横向预应力采用3-15.2高强度低松弛钢绞线,纵桥向间隔50cm一道,管道中心线距离顶板10cm,无竖弯。箱梁的结构和起吊方案设计如图1.1至1.4所示。

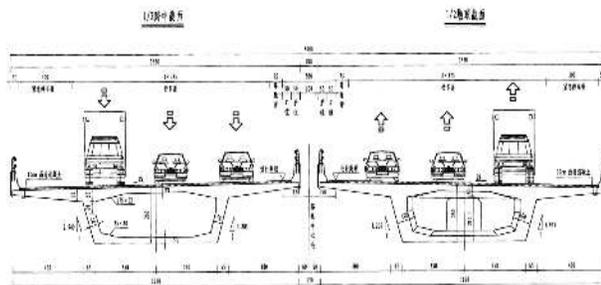


图 1.1 箱梁标准断面

收稿日期: 2020-11-18

作者简介: 吕宇超(1994-),男,助理工程师,主要从事公路桥梁设计工作。

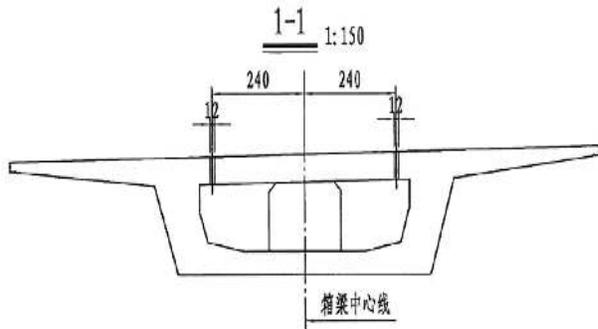


图 1.2 起吊位置

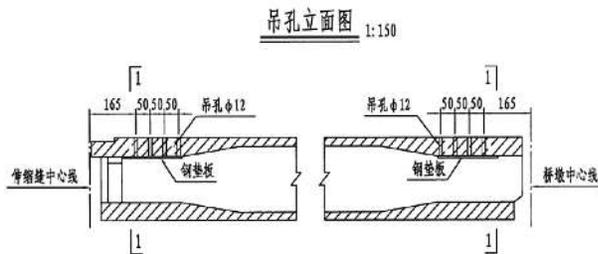


图 1.3 吊孔构造

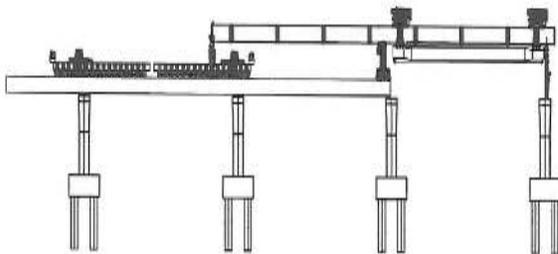


图 1.4 架设方式

吊环采用高强钢棒，起吊时要求缓慢提梁，减少冲击力，在箱梁的吊装和运输过程中保证冲击系数小于 1.3。吊装梁体时，在顶板下缘吊孔处垫合适大小的钢垫板，垫板厚度不小于 40mm。在吊点附近设置了加强钢筋。

1.2 计算模型

本文采用 ANSYS 有限元计算软件，基本模型根据施工图图纸建立，在 CAD 中建立几何模型后导入。模型建立的要点有：

- (1) 根据吊装的受力情况，内力沿跨中对称，取半结构进行计算，跨中截面进行固结，在吊孔处施加反力；
- (2) 对吊孔所在的梁端单元进行网格加密；

(3) 主梁模型中四面体单元采用 SOLID187 高阶单元，六面体单元采用 SOLID185 八节点单元；

(4) 荷载施加情况：梁段单元总重量为 11980KN，分配到每边吊孔的反力应为 2995KN，考虑钢垫板的作用，并且考虑 1.3 倍的冲击系数，通过均匀的表面压力施加到结构上（压力面积 180CM×40CM）；

(5) 预应力：钢筋预应力通过降温模拟，仅考虑局部竖向预应力作用而未计入整桥纵、横向预应力；

(6) 材料特性：混凝土弹性模量 3.45E4MPa，泊松比 0.2，密度 26kN/m³；钢材弹性模量 2.06E5MPa，泊松比 0.31。

单元网格划分情况如图 1.5 和图 1.6 所示。

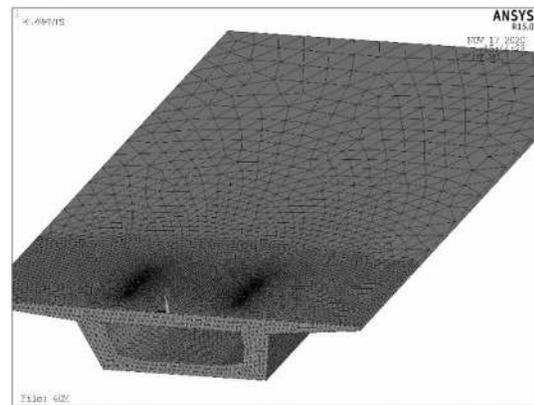


图 1.5 四面体网格划分

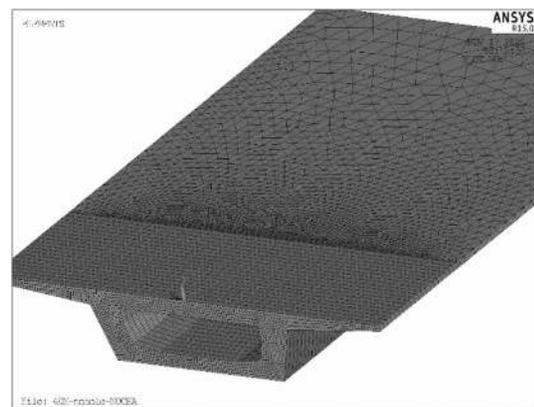
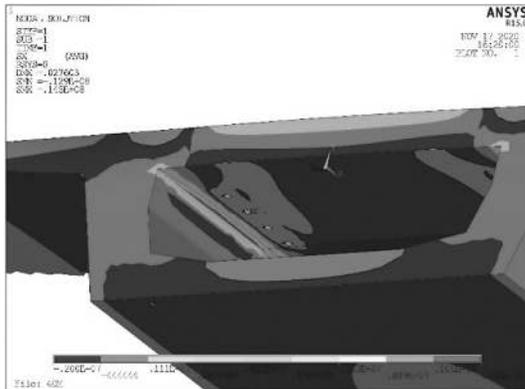


图 1.6 六面体网格划分

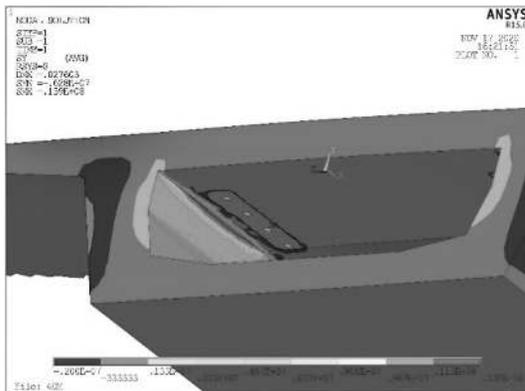
2 计算结果及分析

2.1 原型计算结果

根据前述的计算条件，原型为 40m 跨径箱梁，箱室不设倒角，不使用施工临时预应力钢筋。梁端的应力情况如图 2.1 所示，应力方向以拉为正。以下计算结果均以四面体网格的计算结果为例。



(a) 横向应力 (最大值 12MPa)

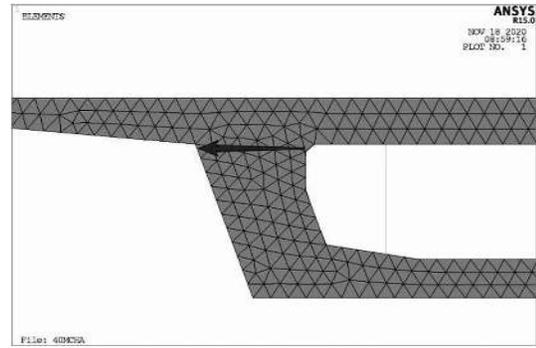


(b) 竖向应力 (最大值 13MPa)

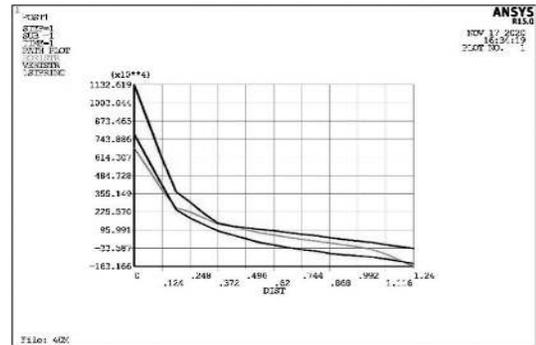
图 2.1 原型起吊应力

可见将吊点设置在顶板时，箱梁顶板和腹板连接处会产生严重的应力集中现象。这与工程实践中的认识也是一致的，实际中常有遇到吊装时该处产生裂缝的情况，即使已经对该区域采用了局部加强配筋的措施。

为了直观地表达该处应力集中的程度，设置从顶腹板交点分别到腹板外侧、顶板上缘的应力路径，并以图表的形式给出应力沿路径的变化，如图 2.2 和图 2.3 所示。图中给出了横向应力、竖向应力和第一主应力的结果。

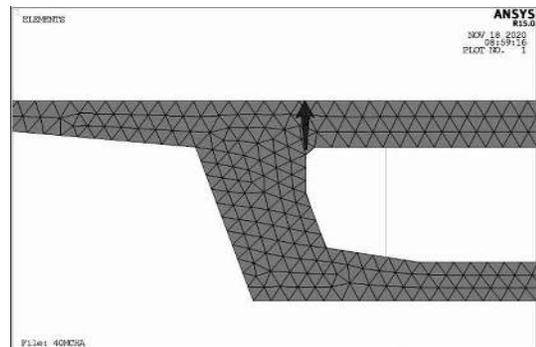


(a) 路径方向

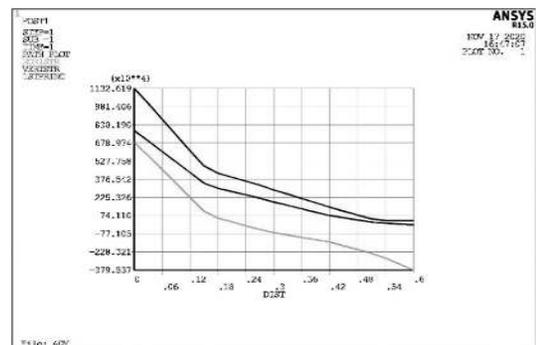


(b) 应力沿路径变化

图 2.2 各项应力沿横向路径变化



(a) 路径方向



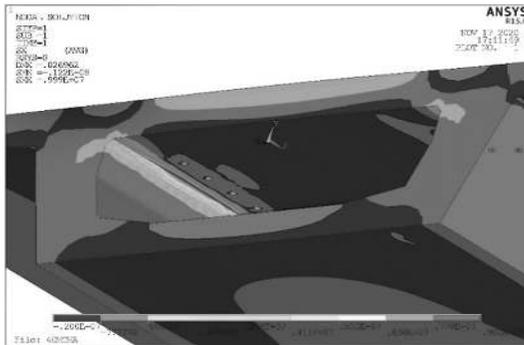
(b) 应力沿路径变化

图 2.3 各项应力沿竖向路径变化

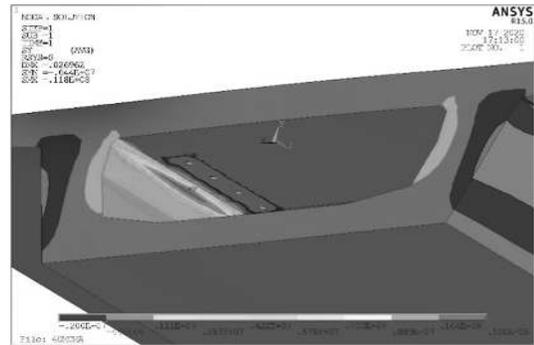
可见各项应力水平是随着远离应力集中处迅速衰减的。因此应当通过一些构造措施或是施工技术来消减起吊时顶腹板交接处的应力。下面采用结构倒角和临时预应力钢筋这两种措施，分析其对起吊应力的影响。

2.2 增加箱室倒角

通过在箱室顶腹板连接处增加倒角的方式，观察应力的变化情况，倒角尺寸 10cm×10cm。横向和竖向最大应力如图 2.4 所示。



(a) 横向应力 (最大值 9MPa)



(b) 竖向应力 (最大值 12MPa)

图 2.4 增加倒角后的起吊应力

从图中可见，增加倒角后由于根部截面增大，应力有所减小，特别是横向应力减小的幅度更为明显。增加倒角有效地缓和了起吊时的应力集中状况。

2.3 增加临时预应力

在箱室增加倒角的基础上，进一步使用施工临时预应力钢筋，观察其能否进一步减小局

部应力。预应力钢筋的增加方式有两种：每侧 3Φ32 的钢筋和每侧 4Φ32 的钢筋。临时预应力钢筋布置在吊孔偏箱室内侧 40cm 的位置，纵向间隔 50cm，如图 2.5 所示。张拉应力均为 800MPa，预应力通过降温的方式模拟。计算结果如图 2.6 和图 2.7 所示。

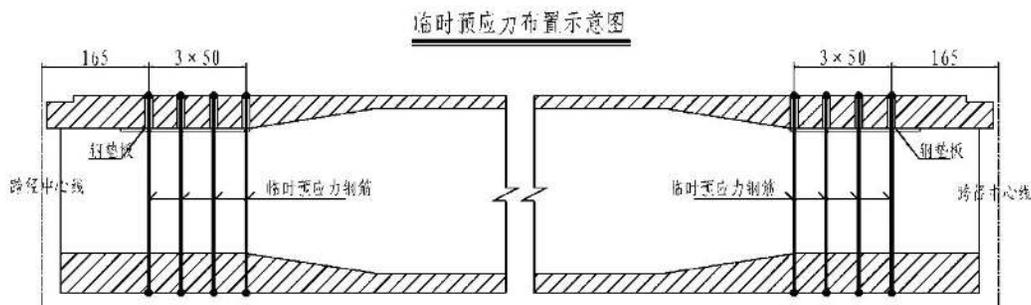
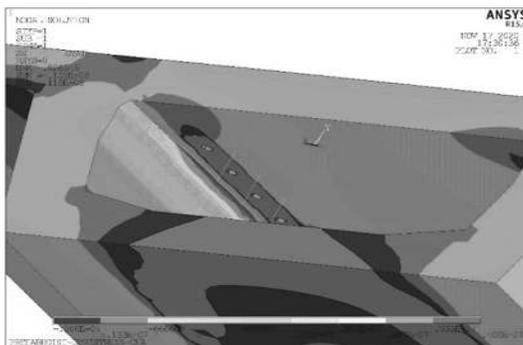
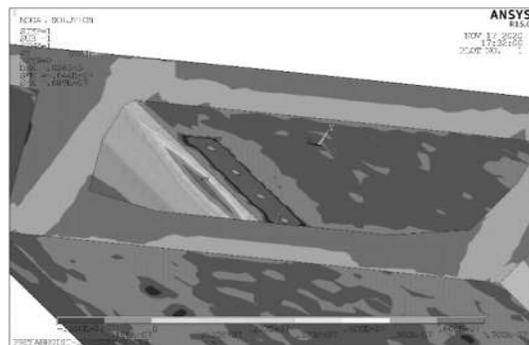


图 2.5 临时预应力钢筋布置示意

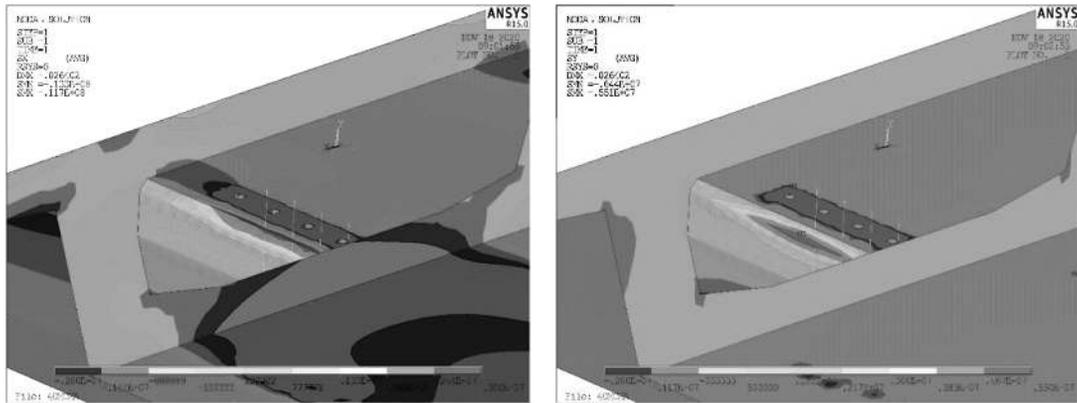


(a) 横向应力 (最大值 4MPa)



(b) 竖向应力 (最大值 7MPa)

图 2.6 增加倒角和临时预应力 (3Φ32) 后的起吊应力



(a) 横向应力 (最大值 3MPa)

(b) 竖向应力 (最大值 5.5MPa)

图 2.7 增加倒角和临时预应力 (4Φ32) 后的起吊应力

由结果可见增加施工临时预应力大幅地减小了顶腹板交点处的集中应力。竖向预应力的作用相当于将一部分起吊的力转移到了箱梁的底板上,由此箱梁的顶底板共同承担起吊力,顶板“根部”也即顶腹板交接处的应力得以缓解。虽然在算例中增大临时预应力后仅将横向和竖向应力减小到 3MPa 和 5.5MPa,但此时箱梁底板的应力依然较小,可以认为通过精心设计预应力钢筋的排布方式和预应力水平,能够使底板分担更多的恒载,从而进一步减小顶板的应力。表 2.1 总结了本章中算例的各项应力结果以及其他额外的工况结果。

表 2.1 不同工况箱梁应力计算结果

| 单元类型 | 工况 | 横向应力 MPa | 竖向应力 MPa |
|-------|------------------|-------------|-------------|
| 四面体单元 | 原型 | 12.0 | 13.0 |
| | 原型+倒角 | 9.0 | 12.0 |
| | 原型+预应力 (4Φ32) | 4.5 | 7.0 |
| | 原型+倒角+预应力 (3Φ32) | 4.0 | 7.0 |
| | 原型+倒角+预应力 (4Φ32) | 3.0 | 5.5 |
| 六面体单元 | 原型+倒角+预应力 (4Φ40) | 1.2 | 3.0 |
| | 原型 | 7.4 | 10.6 |
| | 原型+倒角 | 6.9 | 10.4 |
| | 原型+预应力 (4Φ32) | 2.0 | 5.2 |
| | 原型+倒角+预应力 (3Φ32) | 3.0 | 6.2 |
| 六面体单元 | 原型+倒角+预应力 (4Φ32) | 2.0 | 5.0 |
| | 原型+倒角+预应力 (4Φ40) | 1.0 | 2.9 |

注:表中应力位置均为顶腹板交接处

由表中结果可见加倒角和使用临时预应力均是有效减小起吊时顶板应力的方法。同时,

从六面体单元和四面体单元的结果对比来看,应力随着各项措施的增加变化趋势是一致的。尽管六面体单元是八节点的低阶单元而四面体单元使用了 10 节点的高阶单元,且四面体单元划分密度更大,但在高应力水平下四面体单元模型的计算结果仍然存在较大的畸变(前三个工况),其余情况下结果则相差不大。虽然四面体网格对各类形状的适应性更好,方便了前处理的过程,但为了取得更高的计算效率和计算精度,仍建议在几何形状不甚复杂时采用六面体网格划分方式。

3 结论

本文通过有限元计算探究了整孔预制箱梁起吊时的应力情况,并据此针对局部应力集中的问题采取了构造措施和施工临时措施的控制方法,得出了如下结论:

(1) 箱梁整孔起吊时若吊点施力位置放在顶板处,则在顶板和腹板连接处会产生较大的集中拉应力,需要通过一定的措施来保证吊装过程的安全;

(2) 在箱室角点增加倒角可以增大顶板横向受力的根部截面,从而有效的减小应力水平;

(3) 合理的施工临时预应力设计将一部分起吊力转移到箱梁底板上,可以很大程度上减小顶板的应力;

(4) 六面体单元划分的模型计算效率更高,计算结果也更为可靠。

除了采取这些控制措施外,(下转第 30 页)

大,并且增加速率加快,部分构件进入非线性状态,结构整体刚度减弱加速,位移增加加快。当 $S_a(T_4) = 3.0g$ 时,塔顶最大位移为 1.541m,此时桥塔主要由一阶侧向振型控制。其中在 NO.1 地震波 $S_a(T_4) = 3.0g$ 强度作用下,塔顶最大位移为 1.747m,上横梁位置处塔柱最大位移达到 1.827m,此时上塔柱段发生与中塔柱相反位移的趋势,说明 NO.1 地震波激发出桥塔更多高阶振型成分,使得桥塔的侧向位移包络曲线出现与低阶振型形状不同的情况。因此,对于高塔需要考虑高阶振型的影响,结构的易损部位不明确,需要额外考虑其他可能出现塑性铰的部位。

4 结论

本文对一斜拉桥横桥向 H 形桥塔损伤破坏过程进行了研究。依据既定桥塔截面强度损伤状态以及损伤指标,以 OpenSees 数值模拟为研究手段,采用 IDA 方法研究了 H 形桥塔结构的损伤破坏过程,主要得出以下结论:

(1) 根据截面外侧纵筋及非约束/约束混凝土的材料应变水平,确定桥塔截面曲率,并对应 4 个损伤状态:轻微损伤、中等损伤(可修复)、严重损伤(倒塌控制)及完全损伤,可以用于评估桥塔在横向地震作用下的损伤程度。

(2) 通过对传统混凝土横梁 H 形桥塔截面易损性研究,确定各关键截面曲率发展顺序为:下横梁端部>中塔柱顶>下塔柱底>下塔柱顶>上横梁端部>中塔柱底。

参考文献

- [1] JTG/T 2231-01-2020, 公路桥梁抗震设计规范 [S].
- [2] LeeGC. Traveling wave effect on the seismic response of a steel arch bridge subjected to near fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 6 (3): 245-257. [J].
- [3] GoelRK, Chopra AK. Nonlinear analysis of ordinary bridges crossing fault-rupture zones [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14 (3): 216-224. [J].
- [4] 焦驰宇. 基于性能的大跨斜拉桥地震易损性分析 [D]. 上海: 同济大学, 2008 [J].
- [5] 李建中, 彭天波. 塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响 [J]. 振动与冲击, 2009, 28 (10): 179-184.
- [6] Tasaki K, Kosa K, Abe H, et al. Detailed investigation of Ji-Lu Bridge (PC cable-stayed bridge) damaged to the Taiwan Chi-Chi earthquake [J]. プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 2003, 12.
- [7] Chang H Y, Kuwamura H. 7 Investigation of Building Damage in Taiwan Earthquake 1999.9.21. : Part 2: Cause and Effect (STRUCTURES) [J]. 日本建築学会関東支部研究報告集, 2000: 25-28.

(上接第 22 页) 仍应在此类结构受力复杂的区域加强配筋, 达到防止箱梁开裂或控制裂缝宽度的效果。

参考文献

- [1] 雷文斌. 节段预制拼装与整孔预制吊装工法比较研究 [J]. 交通科技与经济, 2015, 17 (06): 106-110.
- [2] 颜爱华, 邵长宇, 邓青儿, 卫俊. 东海大桥 70m 跨整孔预制吊装混凝土箱梁设计 [J]. 预应力技术, 2004 (04): 32-35.

- [3] 陆珍君, 王金枝, 白思华. 整体预制箱梁吊装过程控制分析 [J]. 交通科技, 2012 (04): 20-23.
- [4] 向南. 箱梁预制节段吊装过程吊点应力研究 [J]. 公路交通技术, 2014 (03): 50-53.
- [5] Zhao L, Huan-Ling W U, Ai-Xiu C, et al. Full-Scale Model Test for Precast and Assembled Segmental Box Girder of the Fourth Nanjing Changjiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2011.
- [6] KaiqiZ, Hongqi B, Zhao L, et al. Full scale model test of segmental precast concrete box girder with external and internal tendons [J]. Engineering encs, 2013.