

某特大简支梁桥墩身开裂的事故排查

吴波^{a,b}, 张亮亮^{a,b}, 高永^{a,b}, 苏春雷^a, 原野^a

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设安全与防灾协同创新中心, 重庆 400045)

摘要:桥梁裂缝严重影响结构安全性和耐久性, 不符合“绿色建造”和“可持续发展”的相关理念。文章对某特大简支梁桥桥墩开裂现象进行事故排查, 为裂缝修复工作提供依据, 以促进桥梁施工各个环节的规范化。考虑支座中未拆除的临时连接螺栓对墩、梁的约束作用, 首先以 Abaqus 分析未拆除的临时连接螺栓对支座水平剪切变形的约束作用, 然后以 Midas 计算了 3 种最不利工况下桥墩墩顶处的支座反力, 最后以 ANSYS 分析 3 种最不利荷载组合时墩身应力。结果表明, 即使按墩顶的 4 个纵向活动支座临时连接被同时破坏的最不利情况考虑, 墩身在 3 种最不利工况下的最大主拉应力也仅为 0.08 MPa, 远未达到 C30 混凝土的拉应力容许值 0.73 MPa。因此, 架梁完成后未及时拆除支座临时连接的限位螺栓并不是导致该桥墩身开裂的主要原因, 事故调查需从其他方面入手。但该疏忽会在桥墩中引起拉应力, 应尽量避免, 确保桥梁建造的各个环节更为规范。

关键词:桥墩开裂; 临时连接螺栓; 事故排查; 简支梁; 绿色建造

中图分类号: U216.4; U24; TU378 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0110-07

Accident investigation of a large bridge pier cracking

Wu Bo^{a,b}, Zhang Liangliang^{a,b}, Gao Yong^{a,b}, Su Chunlei^a, Yuan Ye^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Bridge cracks seriously affect the structural safety and durability, which don't conform to the concepts of "green construction" and "sustainable development". In consideration of the cracks of a large beam bridge pier, an accident investigation is performed to provide the basis for the reconditioning works and to promote the standardization of the bridge construction. Taking into account these temporary connection bolts which had not been dismantled in time, their constraint effect on bearing horizontal shear deformation was calculated by ABAQUS code, then, the bearing reaction forces at pier top on three kinds of most unfavorable conditions were figured out by Midas code. After that, the pier stress were analyzed by ANSYS code. It showed that, in the case of the four temporary connection bolts are all destroyed at the same time, the maximum principal tensile stress of the three kinds of most unfavorable conditions is just 0.08 MPa, which is far from allowable value 0.73 MPa. Therefore, the pier cracks were not attributed to the fact that these temporary connection bolts had not been removed in time, others should be taken account into the investigation.

Key words: pier cracking; temporary connecting bolts; accident investigation; simple beam; green construction

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51578098); 重庆科委项目(20130844)

作者简介: 吴波(1991-), 男, 主要从事桥梁抗风设计、桥梁检测研究, (E-mail) wuswjtu@yeah.net.

张亮亮(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) zll200510@126.com.

某特大简支梁桥在施工过程中发现桥墩出现多条裂缝,许多裂缝的宽度都超过了规范容许值。裂缝不仅使桥墩外观受损,影响其受力性能,还会加速渗透,使钢筋锈蚀,严重影响结构的安全性和耐久性^[1-3]。

针对桥梁裂缝所开展的事故调查、加固修复、返工重建等势必造成建筑资源和人力、物力的极大浪费,不符合 21 世纪“绿色建造”和“可持续发展”的相关理念^[4-5]。事故排查的目的在于:对可能造成开裂的原因进行逐项排查,界定事故原因,以便对症下药,为裂缝的修复提供关键性依据。此举避免了事故补救时的盲目性,有助于提高工程效率,同时也是对同类工程的警醒,为今后工程的设计、施工、养护等提供参考^[6-7],以便从根本上促进桥梁施工各个环节的规范化,呼应“绿色建造”的相关要求。

在简支梁施工过程中,支座临时连接的作用在于保证梁体在施工过程中的稳定,即通过地脚螺栓将支座顶板的外伸耳板与支座底板连接^[8]。梁部混凝土灌注完成后,在拆除脚手架之前,应先拆除支座临时连接,避免连接螺栓影响支座滑移。

文章主要针对该桥施工过程中支座临时连接螺栓未及时拆除的情况,分析其对支座和下部桥墩结构的影响,排查其是否是造成桥墩开裂的主要原因。

1 工程概况

某简支梁桥设计时速 160 km,结构类型为有砟轨道后张法预应力混凝土 T 形梁,单线由 2 片梁组成,双线由 4 片梁组成。T 梁采用预制法,每跨 32 m,运至施工现场进行架设。上、下部结构之间采用 KTYZM 系列圆柱面钢支座进行传递竖向荷载。墩顶共设置 8 个支座,其中支座 1、2、1'、2' 为固定支座,3、4、3'、4' 为纵向活动支座,支座反力关于桥墩中心线对称,如图 1 所示。

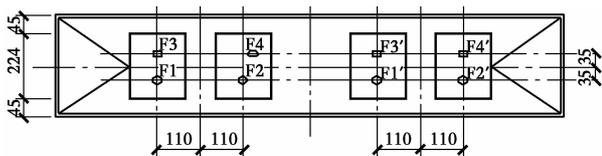


图 1 墩顶支座布置示意图

上部梁体架设完成后,工作人员发现部分桥墩及承台存在混凝土开裂的现象,如图 2 所示。

在进行桥墩开裂问题的协调处理时,有关单位指出,在上部结构梁体架设完成后,部分支座顶板、底板之间的临时连接螺栓未及时拆除,如图 3 所示。



图 2 几处典型的桥墩裂缝图



图 3 临时连接支座未及时拆除

本研究旨在对桥墩开裂的事故原因进行排查,重点分析上部支座临时连接螺栓未及时拆除对桥墩墩受力性能的影响。

2 临时连接螺栓对支座的约束作用

2.1 耳板-螺栓接触模型

支座临时连接的限位螺栓为 4.8 级的大六角头 M10 螺栓,每个支座共设 4 根,通过支座顶板的外伸耳板与支座底板连接。螺栓公称抗拉强度 400 MPa,屈服强度 320 MPa,弹性模量 200 GPa,现场测量显示其外露长度均大于 25 mm。

耳板采用 Q235 钢,屈服强度 235 MPa,弹性模量 200 GPa,尺寸:55 mm(纵向)×30 mm(横向)×5 mm(厚度),内挖 15 mm×15 mm 的螺栓定位孔。耳板与支座顶板焊接,垫片直径 30 mm,厚度 5 mm。支座出厂前施加预压力,通过拧紧临时连接的螺栓实现顶板、底板的临时固定约束。

为分析支座临时连接未拆除的限位螺栓对支座变形的约束作用,采用 Abaqus 建立了支座一侧外伸耳板与两根螺栓的接触分析模型,如图 4 所示。

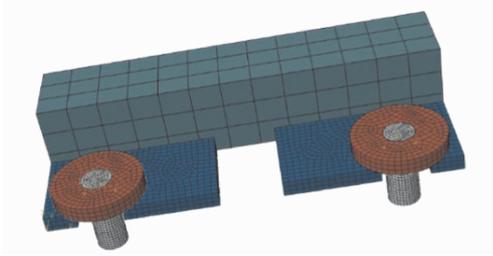


图 4 支座临时连接接触分析的有限元模型

螺栓和耳板的材料模型采用双线性随动强化本构模型,螺杆底面约束 U_x 、 U_y 、 U_z 3 个方向的平动自由度。支座的变形通过一块 $130\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的钢板施加到耳板上,耳板与该钢板在相交平面采用面位移约束,钢板背面施加 U_y 方向的平动自由度。耳板顶面与螺栓垫片底面定义接触面约束,螺杆表面与定位孔内侧表面定义接触面约束^[9-10]。采用显式算法对钢板施加 U_x 向的水平位移,分析耳板与限位螺栓接触至螺栓和耳板中材料屈服、破坏的全过程。

2.2 临时连接螺栓对支座纵向滑动的约束

耳板与螺栓接触后的变形情况如图 5 所示,耳板与螺栓的应力分布如图 6 所示。

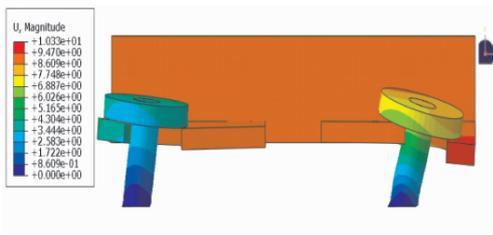


图 5 支座滑动变形时耳板与螺栓的位移分布图(mm)

由图 5 和图 6(a)可以看出,当支座发生滑动变形时,限位耳板与左侧螺栓接触部分的宽度小于与右侧螺栓接触的部分,因此图 7 中左侧螺栓的水平抗力比右侧螺栓的要小。由图 6(b)可以看出,在限位螺栓屈服后,耳板与左侧螺栓接触部分也发生了屈服。

根据图 7 所示螺栓水平抗力与支座纵向滑动变形量之间的关系曲线,可以计算出支座中一侧 2 根限位螺栓在支座滑动时提供的弹性刚度为 29.15 kN/mm ,螺栓和耳板破坏时的最大水平抗力为 19.62 kN 。因此,一个支座中 4 根限位螺栓对支

座活动起到约束作用时,弹性变形阶段提供的水平刚度为 58.30 kN/mm ,最大水平抗力为 39.24 kN 。

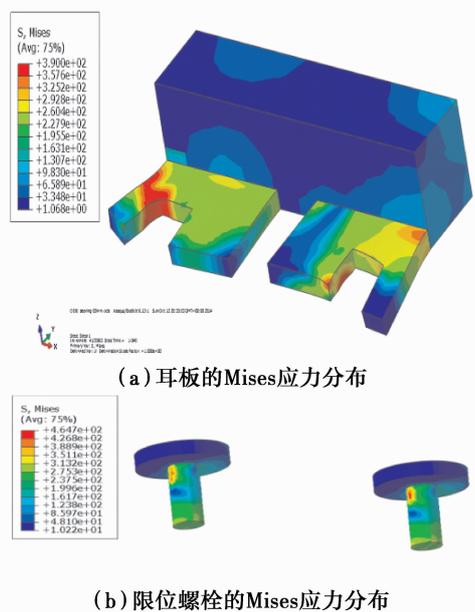


图 6 支座滑动变形时支座临时连接的 Mises 应力分布(MPa)

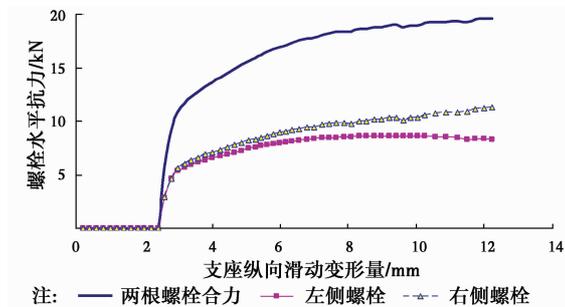


图 7 螺栓水平抗力与支座纵向滑动变形量的关系

3 上部结构对支座的荷载计算

3.1 上部结构荷载

考虑以下荷载:

1)桥梁结构自重荷载:保守起见,取放大系数 1.05。

2)桥梁结构二期恒载:根据设计图,二期恒载共计 74.68 kN/m 。

3)列车活载:按照《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002.1—2005)^[11]中的“中-活载”进行加载,动力系数的大小为

$$1 + \mu = 1 + \alpha \times 6 / (30 + L) = 1 + 2 \times 6 / (30 + 32.8) = 1.191。$$

4) 列车摇摆力: 100 kN, 作用点位于最不利的跨中位置的钢轨顶面。

5) 制动力: 制动力按 TB10002.1—2005 第 4.3.7 条计算, 对于 32.0 m 跨度的连续梁桥, 活载的布置情况为

$$220 \times 5 + 92 \times (32.8 - 1.5 \times 5),$$

制动力取

$$(220 \times 5 + 92 \times (32.8 - 1.5 \times 5)) \times 10\% = 342.76 \text{ kN}.$$

6) 摩阻力: 纵向活动支座的设计静摩擦系数为 0.03, 上部结构恒载作用下每个活动支座上的竖向压力为 1 415 kN, 活动支座上静摩阻力值为 $1 415 \times 0.03 = 42.45 \text{ kN}$ 。

7) 风荷载: 风荷载按 TB10002.1—2005^[11] 第 4.4.1 条计算:

a) 作用在梁上的风荷载强度为

$$W = 1.3 \times 1.1 \times 1.30 \times 0.5 = 0.929 5 \text{ kN/m}.$$

当桥上有车时, 风荷载按 80% 计算, 即 0.743 6 kN/m。

b) 桥墩风荷载强度

横向风荷载

$$W = 1.2 \times 1.1 \times 1.30 \times 500 = 858 \text{ Pa};$$

风荷载

$$W = 1.4 \times 1.1 \times 1.30 \times 500 = 1 001 \text{ Pa}.$$

按设计文件, 桥上有车时取 1 200 Pa, 无车时取 2 100 Pa, 均大于规范取值。保守起见, 以下荷载组合时取设计风荷载强度值。

8) 支座临时连接的水平约束力: 由第 2.2 节, 一个支座中 4 根限位螺栓对支座活动起到约束作用时最大水平抗力为 39.24 kN。墩顶共设有 4 个纵向活动支座, 按最不利情况考虑, 4 个纵向活动支座均产生了滑动并达到了临时连接的最大抗力。

3.2 支座反力计算

根据设计图纸, 采用 Midas 软件建立了全桥的梁格法分析模型, 如图 8 所示。

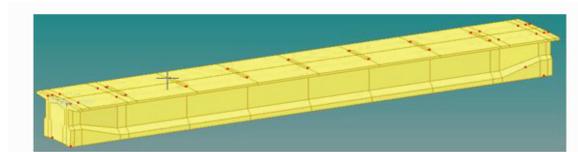


图 8 单线桥计算模型

该模型由两片 T 梁组成, 跨度 32 m, 一端设置 4 个固定支座约束, 另一端设置 4 个活动支座约束。

根据 TB10002.1—2005^[11], 中国铁路桥梁设计基于容许应力法, 其各类荷载的代表值相当于标准值, 即荷载组合系数均为 1.0。考虑上部支座中临时连接未拆除的情况, 表 1 为桥墩受力分析中的 3 种最不利验算荷载的组合工况。

表 1 3 种最不利验算工况

工况	荷载组合
工况一	主力(双孔重载)+制动力+摩阻力+临时连接
工况二	主力(双孔轻载)+制动力+摩阻力+临时连接
工况三	主力(单孔重载)+制动力+摩阻力+临时连接

根据表 1 的荷载组合, 基于上部结构的分析模型及各分项荷载值, 计算得到不同工况下桥墩墩顶处的支座反力如表 2 所示。

表 2 3 种最不利验算工况的墩顶支座反力

支座号	荷载	工况一	工况二	工况三
支座 1	F_z	2 365	1 414	1 415
	F_y	171	171	0
	F_x	50	50	0
支座 2	F_z	2 365	1 414	1 415
	F_y	171	171	0
	F_x	0	0	0
支座 3	F_z	2 365	1 414	1 415
	F_y	85	85	0
	F_x	50	50	50
支座 4	F_z	2 365	1 414	1 415
	F_y	85	85	0
	F_x	0	0	0
支座 1'	F_z	2 365	1 414	1 415
	F_y	0	0	171
	F_x	0	0	50
支座 2'	F_z	2 365	1 414	1 415
	F_y	0	0	171
	F_x	0	0	0
支座 3'	F_z	2 365	1 414	2 365
	F_y	85	85	85
	F_x	0	0	50
支座 4'	F_z	2 365	1 414	2 365
	F_y	85	85	85
	F_x	0	0	50

注: F_z 为竖向压力, F_y 为纵桥向反力, F_x 为横桥向反力。

4 桥墩受力分析

4.1 桥墩有限元模型

按设计图,墩身采用 C30 混凝土,弹性模量 32 GPa,泊松比 0.2,容重 25 kN/m³。墩高 23.5 m,墩身横截面为矩形;墩顶尺寸:9.092(横桥向)m×3.14 m(纵桥向);墩底尺寸:9.78(横桥向)m×3.58 m(纵桥向)。承台尺寸:12.50(横桥向)m×8.20(纵桥向)m×2.50 m。

ANSYS 中以 Solid45 单元模拟混凝土,承台底面采用固结约束,有限元模型如图 9 所示。

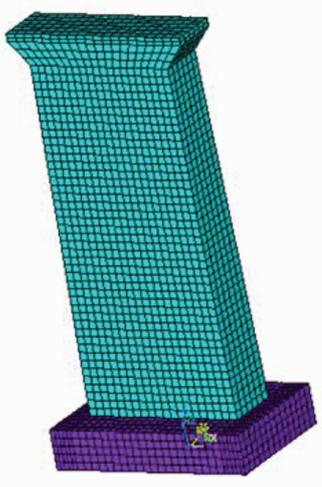


图 9 桥墩和承台的有限元模型

在桥墩顶部的支座垫石高度处的截面中心位置设置一个加载控制点,将表 2 中 8 个支座的竖、纵、横向均荷载换算至该控制点处进行加载^[12]。该控制点与桥墩顶面的各单元节点之间采用刚体约束,如图 10 所示。

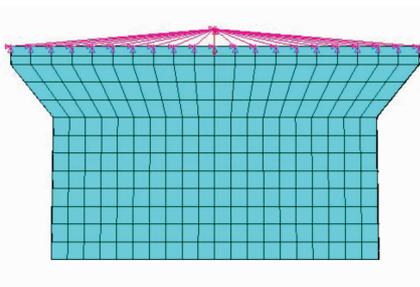


图 10 墩顶加载参考点的刚体约束

4.2 荷载组合下的墩顶加载情况

根据表 2,将各组合下 8 个支座的荷载全部换算至等效加载控制点处,该点在 3 种最不利工况下的荷载输入如表 3 所示。

表 3 等效加载控制点在 3 种最不利工况下的荷载输入

荷载工况	工况一	工况二	工况三
F_z/kN	18 920	11 312	13 220
F_y/kN	682	682	512
F_x/kN	100	100	100
$M_y/\text{kN} \cdot \text{m}$	0	0	4 418
$M_x/\text{kN} \cdot \text{m}$	0	0	665
$T_z/\text{kN} \cdot \text{m}$	0	791	398

4.3 桥墩受力情况

由 3.1 节,桥墩的纵向设计风荷载取 1 200 Pa,将桥墩墩身自重、纵向风荷载与表 3 中上部结构通过支座传递到墩顶的集中荷载进行组合,计算运营阶段考虑临时连接未拆除时墩身的各项应力分布情况。

4.3.1 工况一与纵向风压和桥墩自重组合

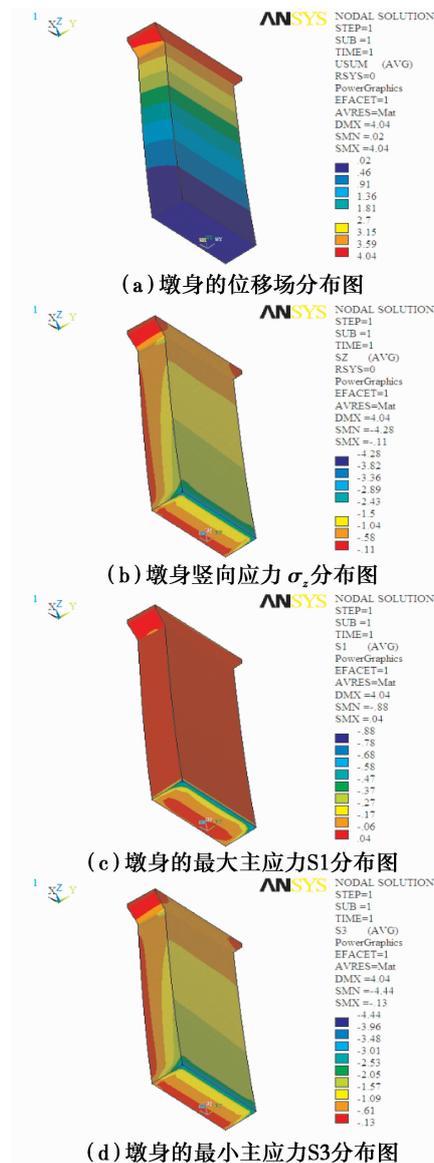


图 11 工况一与纵向风压及桥墩自重组合下的墩身位移及应力分布图

由图 11,墩顶的最大位移为 4.04 mm,墩身最大竖向压应力为 4.28 MPa,最小竖向压应力为 0.11 MPa,墩身在竖向处于全部受压状态;最大主拉应力为 0.04 MPa,最大主压应力为 4.44 MPa。

4.3.2 工况二与纵向风压和桥墩自重组合

由图 12,桥墩顶面的最大位移为 4.05 mm,墩身的最大竖向压应力为 3.81 MPa,最大竖向拉应力为 0.08 MPa,最大主拉应力为 0.08 MPa,最大主压应力为 3.95 MPa。

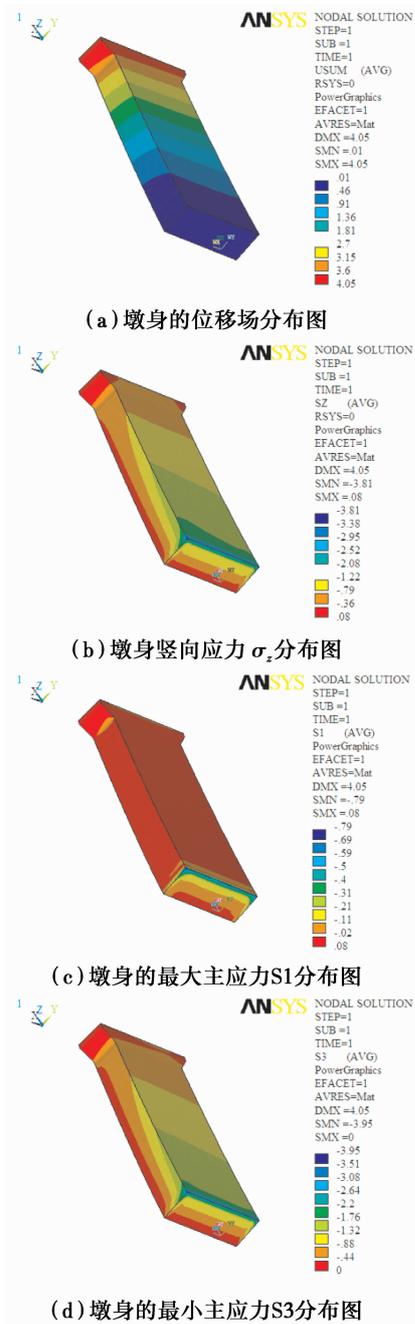


图 12 工况二与纵向风压及桥墩自重组合下的墩身位移及应力分布图

4.3.3 工况三与纵向风压和桥墩自重组合

由图 13,桥墩顶面最大位移为 3.00 mm,墩身的最大竖向压应力为 3.67 MPa,最小竖向压应力为 0.07 MPa,即墩身处于竖向全部受压的状态。墩身最大主拉应力为 0.03 MPa,最大主压应力为 3.81 MPa。

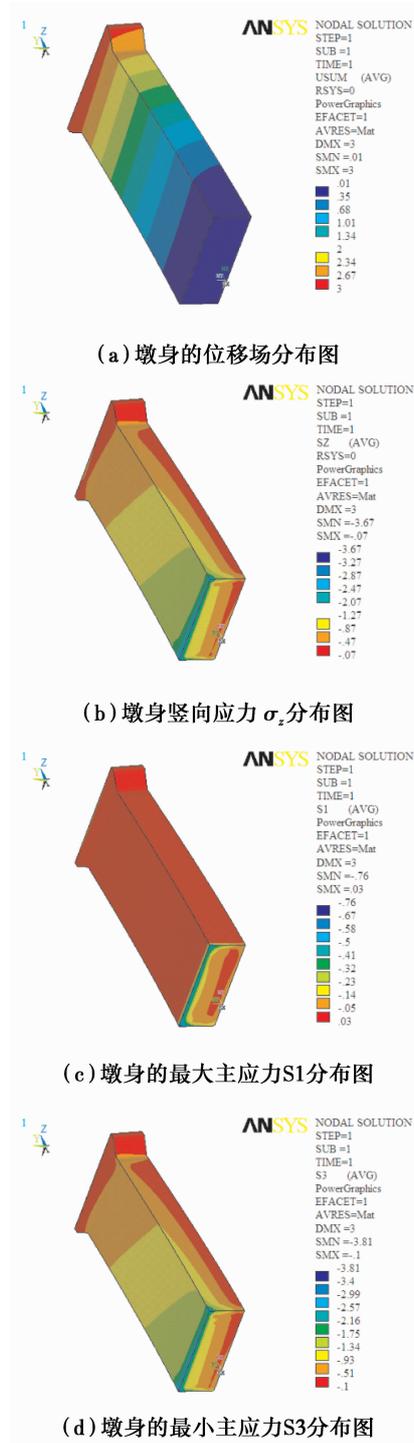


图 13 工况三与纵向风压及桥墩自重组合下的墩身位移及应力分布图

5 结 论

为调查支座临时连接螺栓未及时拆除是否为桥墩墩身开裂的主要原因,文章以 Abaqus 分析了未拆除的临时连接螺栓对支座水平剪切变形的约束作用,考虑支座中未拆除的临时连接对墩、梁的约束作用,以 Midas 计算了 3 种最不利荷载工况组合下桥墩墩顶处的支座反力,然后以 ANSYS 建立桥墩实体有限元线弹性分析模型,分析了考虑支座临时连接未拆除情况下 3 种最不利荷载组合时墩身的应力。

结果发现,即使按墩顶的 4 个纵向活动支座临时连接同时破坏的最不利情况考虑,在考虑支座临时连接未拆除的 3 种最不利工况组合下,墩身的最大主拉应力也仅为 0.08 MPa,未达到 C30 混凝土的拉应力容许值 0.73 MPa。因此,对于当前桥墩出现分布裂缝的问题,架梁完成后未及时拆除支座临时连接的限位螺栓并不是导致墩身开裂的主要原因,事故调查需从其他可能的方面入手。

值得注意的是,虽然支座临时连接未拆除不会造成桥墩开裂,但仍在桥墩中引起了拉应力,因此工程中应尽量避免类似的错误,使桥梁建造的各个环节更为规范。

参考文献:

- [1] 傅理文,汪劲丰,程伟平,等. 方形混凝土桥墩裂缝成因分析及对策[J]. 浙江大学学报:工学版,2010,44(09): 1738-1745.
- [2] 龚辉忠. 温福线Ⅲ标桥墩混凝土开裂预防技术[J]. 桥梁建设,2007,37(S1):121-124.
- [3] 吴迅,刘仕龙. 实体混凝土桥墩水化热和施工开裂分析[J]. 结构工程师,2012,28(6):156-160.
- [4] 张立雄. 怀柔区公路桥梁混凝土裂缝原因及防治[D]. 北京:北京工业大学,2012.
- [5] 刘松平. 钢筋混凝土桥梁裂缝成因分析与加固措施研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [6] 刘斐. 近期桥梁安全事故深度调查与分析[D]. 长沙:中南大学,2014.
- [7] 刘美铭. 桥梁事故分析[D]. 重庆:西南交通大学,2013.
- [8] 赵智慧. 简支变连续梁桥结构体系分析[D]. 重庆:西南交通大学,2010.
- [9] 林晓龙. 高强度螺栓的应力分析及结构疲劳强度优化[D]. 沈阳:东北大学,2012.
- [10] 刘东. 汽油机连杆及连杆螺栓分析[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [11] TB 10002.1-2005. 铁路桥涵设计基本规范[S].
- [12] 颜燕祥. 大型桥梁结构基于 ANSYS 的优化分析与数值模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2013.

(编辑 詹燕平)