

# 正交异性钢桥面板栓焊接头疲劳性能

顾萍<sup>1</sup>, 颜兆福<sup>2</sup>, 盛博<sup>1</sup>, 陈世鸣<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中铁大桥勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 针对正交异性钢桥面板栓焊连接细节, 设计制作两个足尺试验构件, 进行了静载、疲劳试验, 并建立了有限元计算模型. 计算分析发现: 纵肋螺栓接头中面外弯矩影响明显, 内侧拼接板受力大于外侧; 拼接板中纵向应力呈鞍状分布, 两个试验构件的疲劳裂纹均在内侧拼接板的中间区域首先出现. 建议栓焊接头按 Eurocode 中的 71 级或铁路桥梁钢结构设计规范中 IX 细节进行疲劳设计. 通过有限元模拟计算, 对拼接板进行优化设计, 改善了栓焊接头的疲劳性能.

**关键词:** 正交异性钢桥面板; 栓焊连接; 疲劳试验; 有限元分析

**中图分类号:** U443.32

**文献标志码:** A

## Fatigue Behaviour of Bolt-welded Joints for U-ribs in Orthotropic Steel Bridge Decks

GU Ping<sup>1</sup>, YAN Zhaofu<sup>2</sup>, SHENG Bo<sup>1</sup>, CHEN Shiming<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:** Two orthotropic steel decks with on-site bolt-welded U-rib connection detailing were designed and fabricated. Static and fatigue tests were then conducted. A finite element (FE) model of the bolt-welded joints was proposed. The FE analysis showed that the longitudinal stresses on the inner connection plate were larger than those on the outer plate, and the stresses were influenced by the out plane bending in the joints. Stress distributed along the connection plate in saddle-like shape. The stresses in the middle-region were larger than those in the end, and fatigue cracks appeared earlier in the middle-region of the inner connection plate in the both specimens. The fatigue strength of bolted U-ribs joint is proposed based on the design curve of category 71 in Eurocode or the design curve of category IX in the Design Code of Steel Railway Bridges. A parameter study was developed to optimize and improve the fatigue performance.

**Key words:** orthotropic steel bridge deck; bolt-welding connection; fatigue test; finite element (FE) analysis

由于制作、运输、安装的需要, 正交异性钢桥面板一般会在工厂中分节段预制, 在工地安装就位后, 再进行连接. 现场连接主要有全部螺栓连接、全焊连接、栓焊结合连接<sup>[1]</sup>. 全部螺栓连接, 桥面铺装容易受到螺栓的削弱而出现裂纹; 全焊连接, 纵肋嵌补段对接焊缝需要现场手工仰焊, 施工困难且不易保证焊接质量<sup>[2]</sup>; 栓焊结合连接, 桥面盖板使用焊接(陶瓷衬垫单面焊双面成型工艺)以保证桥面平顺, 纵肋使用高强螺栓连接, 易于现场施工. 近年来, 美国及日本在正交异性钢桥面板的现场连接中大量采用栓焊连接<sup>[3-4]</sup>, 并对其受力性能进行了研究.

美国的 Tsakopoulos 与 Fisher 在纽约 Williamsburg 和 Bronx-Whitestone 桥的桥面替换项目中, 对栓焊连接盖板对接焊缝进行试验研究, 结果表明盖板对接焊缝的疲劳性能满足要求<sup>[5]</sup>. 日本针对本四联络桥钢桥面板的栓焊连接进行了疲劳试验、疲劳理论分析、实桥疲劳裂纹调查和连接细节的改进<sup>[6-7]</sup>. 我国在南京长江二桥中首次采用栓焊结合连接<sup>[8-9]</sup>, 对于栓焊结合连接螺栓接头疲劳性能的研究尚不充分, 并且我国铁路桥梁钢结构设计规范对于正交异性钢桥面板中螺栓接头的疲劳性能也没有专门的规定<sup>[10]</sup>. 为此, 本文结合铁路钢桁梁柔性拱桥的钢桥面板, 对栓焊接头进行有限元分析及静力、疲劳试验研究.

## 1 试验概述

试验根据实桥构造细节设计、制作了二个相同的足尺试件 (LS1 和 LS2). 每个试件包含两根纵肋, 跨度为 2 m, 两端支撑于横梁上. 桥面板宽 1.2 m, 厚 16 mm; 拼接板长 620 mm, 宽 160 mm, 厚度与 U 肋

相同,为 8 mm. 纵肋与横梁、纵肋与桥面板、纵肋纵向的连接细节与实桥相同(见图 1). 为便于记录和说

明,螺栓接头中八块拼接板从北到南依次编号为 P1~P8,纵肋腹板编号为 F1~F4.

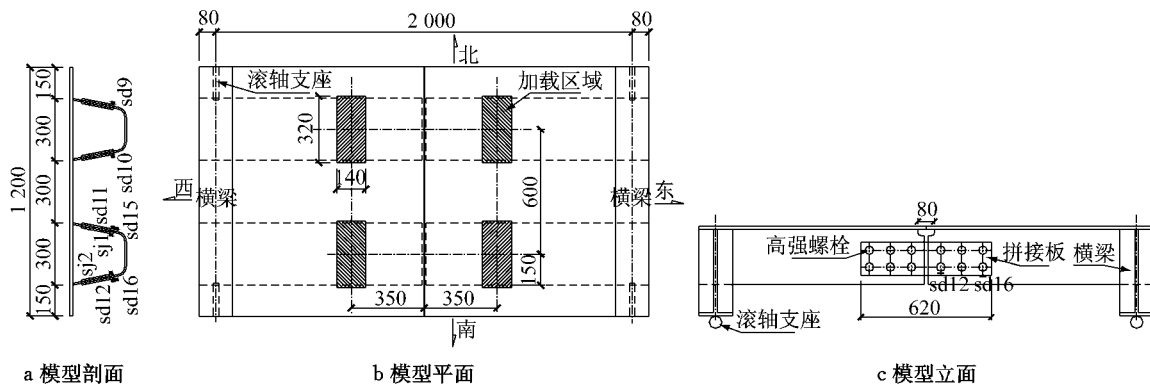


图 1 试件尺寸布置图(单位:mm)

Fig.1 Structural parameters of the specimens

试件材质为 Q345qD 钢材,其化学成分检测结果及力学特性检测结果符合《桥梁用结构钢》<sup>[11]</sup>(GB/T714—2008)标准. 桥面盖板对接采用不带钝边的 V 型坡口焊,背面贴陶瓷衬垫,单面焊双面成型. 试件所有焊缝按照《铁路钢桥制造规范》<sup>[12]</sup>(TB10212—2009)进行检测,均符合 I 级要求. 纵肋螺栓接头采用 M22 摩擦型高强度螺栓,性能等级为 10.9S.

试件由液压脉动试验机通过分配梁进行四点加载,每一加载点处采用钢板作为垫板. 试件为横梁两端简支支承,采用横梁下翼缘的滚轴支座施加约束,见图 1. 试验包括静载试验和疲劳试验:静载试验中荷载分级加载至 400 kN 再卸载至 0 kN;疲劳试验荷载  $P_{\min} = 100$  kN,  $P_{\max} = 230$  kN,加载频率为 4 Hz,以控制拼接板的最大应力幅值在 100 MPa 左右. 纵肋螺栓接头的外侧拼接板上都布置测点(sd9~sd12),位于最内侧螺栓的底部;与 sd11, sd12 对应的内侧拼接板上也布置测点 sj1, sj2;在纵肋腹板布置测点 sd15, sd16,见图 1. 疲劳试验中,由 sd9~sd12, sd15, sd16 监测试件的应力变化情况.

## 2 静载试验

疲劳试验前、中、后分别进行了静力加载试验. 表 1 和 2 分别为试件 LS2 疲劳试验前和疲劳试验后在 400 kN 荷载下的静载试验实测值及理论计算值,理论计算方法见第 5 节有限元计算分析.

表 1 和 2 结果表明:试件 LS2 在疲劳试验前的测点应力计算值与实测值基本吻合;疲劳试验后纵肋内拼接板上应力比纵肋外拼接板对应点应力大,其中测点 sj1 和 sj2 的实测应力分别比测点 sd11 和

sd12 大 140% 和 132%,计算应力平均大 140%;由于疲劳试验后试件 LS2 的 F2 两侧拼接板出现裂纹,使 F3 的测点应力升大.

表 1 测点应力实测值与计算值(疲劳试验前)

Tab.1 Static loading test results and calculation

results(before the fatigue test)		MPa
测点	实测值	计算值
测点 sd9	119.9	107.0
测点 sd10	112.4	103.7
测点 sd15	99.3	91.8
测点 sd16	94.4	97.9

表 2 测点应力实测值与计算值(疲劳试验后)

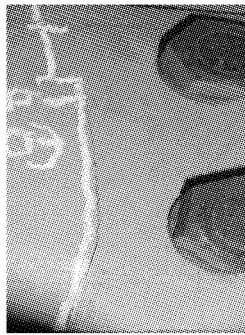
Tab.2 Static loading test results and calculation

results(after the fatigue test)		MPa
测点	实测值	计算值
测点 sd11	143.8	124.1
测点 sj1	201.1	178.4
测点 sj2	161.3	173.6
测点 sd12	122.0	128.0

## 3 疲劳试验

两试件疲劳失效过程相近,疲劳裂纹都是从纵肋内侧拼接板的中间区域开始;当裂纹扩展至内侧拼接板宽度的 60% 后,同一螺栓接头的外侧拼接板也出现疲劳裂纹,位于最内侧螺栓底部;最后内外侧拼接板相继断裂,见图 2 和 3.

LS1 在疲劳加载到 150.44 万次时观测到疲劳裂纹,位于 P7 的底部中间区域偏东侧,竖向长 120 mm 且已经贯穿板厚;当加载到 188.16 万次时,在 P8 的最内侧螺栓底部观测到裂纹,已扩展至螺栓孔中;当疲劳加载到 200.00 万次左右时,P7 和 P8 先后断裂.

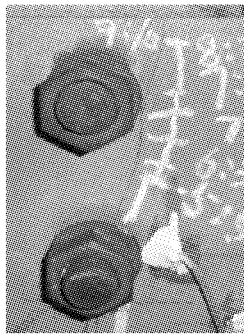


a 试验裂纹



b 断裂形式

图 2 内侧拼接板裂纹  
Fig.2 The crack on the inner plate



a 试验裂纹



b 断裂形式

图 3 外侧拼接板裂纹  
Fig.3 The crack on the outer plate

LS2 在疲劳加载至 78.72 万次时观测到疲劳裂纹,位于 P3 底部中间区域;当加载到 112.32 万次时,在 P2 底部观测到 45 mm 长竖向裂纹;当加载至 165.12 万次时,在 P4 最内侧螺栓底部观测到裂纹,

并已扩展至螺栓孔中;当疲劳加载到 200.00 万次左右时,P3 和 P4 先后断裂,此时 P2 上裂纹约扩展为板宽的 3/4.

表 3 汇总了两试件的疲劳损伤情况,每个腹板对应一个应力测点,两试件共有八个测点.由于观测到疲劳裂纹与裂纹附近测点出现应力突变的加载次数很相近,疲劳寿命取为观测到裂纹时的疲劳加载次数,若没有发现裂纹,则取为总的试验加载次数.表中名义应力幅为内侧拼接板底部的最大应力幅,由外侧拼接板上测点所测的应力幅乘以系数 1.4 确定,系数 1.4 为表 2 中内外侧拼接板计算应力比的平均值.对于疲劳加载中应力幅值显著变化的测点,采用线性累计损伤准则

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

式中: $n_i$  是应力幅  $\Delta\sigma_i$  的作用次数, $N_i$  是应力幅  $\Delta\sigma_i$  为常量时疲劳破坏的循环次数.结合疲劳强度曲线公式

$$\Delta\sigma^m N = C, \quad m = 3, C \text{ 为常数} \quad (2)$$

将名义应力幅用等效应力幅  $\Delta\sigma_e$  代替.

表 3 栓焊接头疲劳试验结果

Tab.3 Results of the experimental fatigue test on the bolt-welded joints

试件	拼接板	疲劳寿命/万次	测点	测点应力幅/MPa	名义应力幅/MPa	螺栓接头开裂情况
LS1	P2	201	sd9	90.0	126.0	未断裂,停机
	P3	201	sd10	93.0	130.2	未断裂,停机
	P6	201	sd11	75.4	105.5	未断裂,停机
	P7	150	sd12	109.3	153.0	拼接板中间区域断裂
LS2	P2	112	sd9	84.1	117.7	拼接板中间区域断裂
	P3	78	sd10	84.0	117.6	拼接板中间区域断裂
	P6	200	sd11	95.0	133.0	未断裂,停机
	P7	200	sd12	96.0	134.4	未断裂,停机

## 4 疲劳性能分析

美国 AASHTO LRFD<sup>[13]</sup>、欧洲 Eurocode<sup>[14]</sup> 及我国铁路桥梁钢结构设计规范<sup>[10]</sup> 对于纵肋间螺栓连接的疲劳性能均没有明确设计规定.参考 AASHTO LRFD 和 Eurocode 关于纵肋嵌补段对接焊缝的疲劳强度曲线(见图 4),其细节分级分别为 D 类和 71 级. AASHTO 中 D 类细节 200 万次时的疲劳强度为 71.2 MPa,故图中 AASHTO 的疲劳强度曲线与 Eurocode 的近乎重合.通过双对数回归分析得到表 3 中名义应力幅的标准差为 1.13 MPa,将各名义应力幅减去 2 倍的标准差,即得到具有 95% 置信水平的疲劳试验数据点,见图 4.图 4 结果表明:各测点具有 95% 置信水平的疲劳试验数据点均位于

AASHTO 及 Eurocode 的疲劳强度曲线上方.由此建议栓焊连接中纵肋螺栓接头的疲劳强度取为

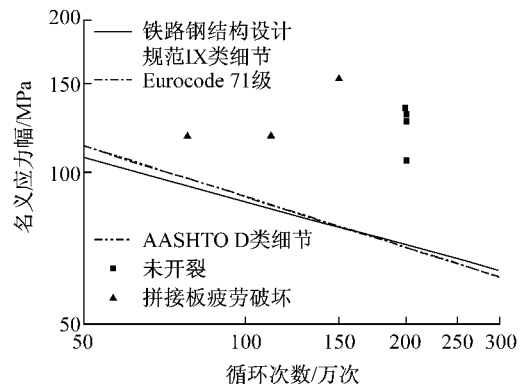


图 4 纵肋螺栓接头疲劳强度曲线

Fig.4 Relationship between loading counts and stress range at the target

Eurocode 中的 71 级,或按我国铁路桥梁钢结构设计规范的 IX 类,200 万次时的疲劳强度取为 71.9 MPa.

### 5 有限元计算分析

采用有限元块单元建立了试件的整体计算模型,其尺寸、边界条件及加载方式与试验中相同. 整体计算模型中螺栓连接采用拼接板与腹板节点耦合来模拟,模型包含 222 337 个节点,133 680 个单元,计算总荷载为 400 kN.

针对拼接板处高强螺栓连接,又采用 ANSYS 中 solid45 单元、接触单元 170,173 及预拉截面建立了精细子模型. 子模型采用整体模型中相应位置处的节点位移为输入边界条件;通过螺杆中的预拉截面作用预紧力为 190 kN;在螺帽与拼接板、拼接板与腹板的接触面间使用接触单元 170 和 173 模拟各组件间的摩擦连接,摩擦系数取为 0.4. 整体计算模型及子模型如图 5 所示.

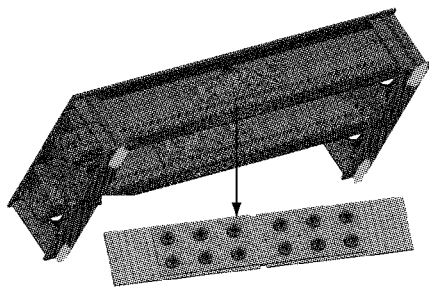


图 5 试件有限元计算模型  
Fig.5 FEM analysis model

图 6 为有限元模型计算的 P1~P4 底缘的纵向应力分布. 图中横坐标为拼接板底缘的纵向位置:0, 620 mm 表示拼接板的西侧、东侧底端点;40, 140, 240, 370, 470, 570 mm 分别对应六个高强螺栓轴心

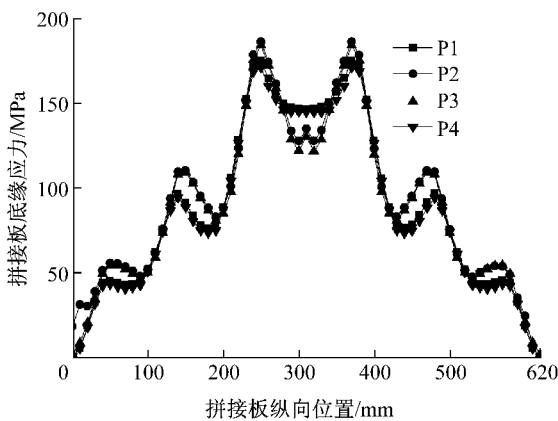


图 6 P1~P4 底缘纵向应力分布  
Fig.6 Longitudinal stress on the connection plate at the bottom of P1~P4

位置;310 mm 表示拼接板底边的中点. 四块拼接板底缘的纵向应力在各螺栓附近都会出现极大值,在最内侧螺栓底部达到最大值,整体上拼接板纵向应力由中间向两边递减,呈鞍状分布. 螺栓接头面外弯矩影响明显,位于纵肋内侧的 P2 和 P3 上的纵向应力在各螺栓附近比 P1 和 P4 大,而在跨中比 P1 和 P4 小.

### 6 疲劳性能的改善

针对栓焊连接螺栓接头的疲劳性能,设计了六种改进方案:方案 A 仅增大内侧拼接板板厚至 10 mm;方案 B 仅增大外侧拼接板板厚至 10 mm;方案 C 为内、外侧拼接板板厚都增大为 10 mm;方案 D 将内、外侧拼接板宽度从 160 mm 增至 180 mm;方案 E 综合方案 A 和方案 D,内、外侧拼接板板宽都增大至 180 mm,同时内侧拼接板板厚增大为 10 mm,外侧板厚不变;方案 F 将内、外侧拼接板底缘都加宽 20 mm. 由于纵肋内部空间限制,方案 F 中内侧拼接板可根据实际情况进行一定角度的弯折,如与腹板平行. 弯折角度对计算结果影响不大,为方便计算,取为 90°.

图 7 和 8 表示各方案中 P1 和 P2 底缘纵向应力沿底边的分布. 各方案中 P1 和 P2 的纵向应力略大于 P4 和 P3;由于面外应力的影响,内侧拼接板的纵向应力都大于外侧拼接板. 故本文只比较各方案中 P1 和 P2 的纵向应力,并重点关注 P2 的应力. 拼接板底缘纵向应力纵向对称,总体上从中间向两侧递减,图中横坐标是拼接板底缘各处距纵向中点的距离:0 mm 为拼接板的底边中点,70 mm 对应最内侧螺栓中心;120 mm 对应最内侧螺栓与第二个螺栓的中线.

由图 7 和 8 可知:方案 A 在 P1 和 P2 中最大纵向应力为原方案相应位置处的 90%;方案 B 在 P1

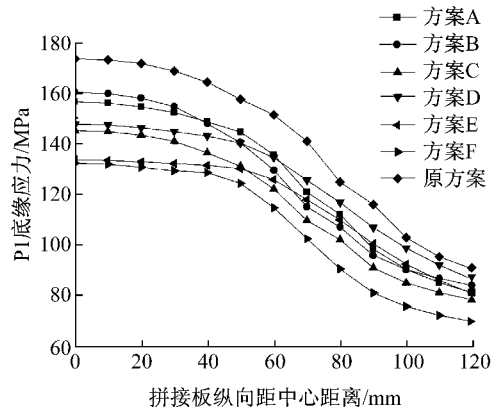


图 7 P1 底缘纵向应力  
Fig.7 Longitudinal stress at the bottom of P1

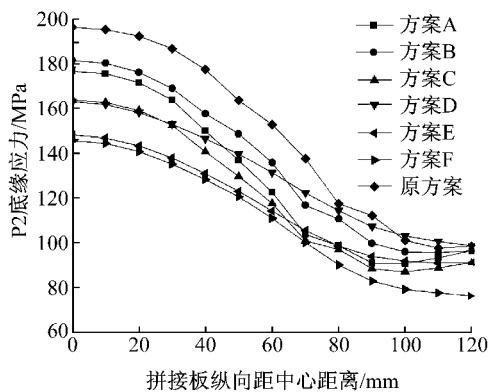


图8 P2底缘纵向应力

Fig.8 Longitudinal stress at bottom of P2

和P2中最大纵向应力为原方案的92%，略高于方案A，即增大内侧拼接板板厚对改善螺栓接头的疲劳性能更为有效；方案C在P1和P2中最大纵向应力为原方案相应位置处的84%，小于方案A和B，与方案D的近似，但用料上方案C为方案D的111%；方案E在P1和P2中最大纵向应力为原方案相应位置处的77%，与方案F的75%相近，在改善拼接板中间区域应力上要优于其他方案；方案F中拼接板的材料用量与方案D相等。因此，在栓焊结合连接中推荐使用方案E和F，可有效提高螺栓接头处的疲劳强度。

## 7 结论

(1) 现场栓焊连接中，拼接板中间区域应力较大，面外应力影响明显，在名义应力幅计算时需计入面外应力。疲劳设计时要充分关注拼接板，特别是纵肋内侧拼接板的疲劳性能。

(2) 对于正交异性钢桥面板现场栓焊连接中纵肋螺栓接头的疲劳验算，建议采用Eurocode中的71级或我国铁路桥梁钢结构设计规范IX类细节的疲劳强度曲线。

(3) 为改善栓焊连接细节的疲劳性能，提出六种改进方案，其中方案E和F都会使螺栓接头的拼接板应力降为原方案的75%左右，显著提高了螺栓接头的疲劳强度。

## 参考文献:

[1] 李淦泉,万珊珊,史永吉,等.大型公路钢箱梁正交异性桥面板工地接头的研究[C]//第14届全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2000:91-99.  
LI Songquan, WAN Shanshan, SHI Yongji, et al. Research of on-site orthotropic bridge decks joints in large steel box girder

for highway [C]//Proceedings of 14<sup>th</sup> National Academic Conference Symposium on Bridge. Beijing: China Communications Press, 2000: 91-99.

[2] Bruls A. Measurement and interpretation of dynamic loads in bridges (phase 3) [R]. Commission of the European Communities, 1990.

[3] Connor J R. A comparison of the in-service response of an orthotropic steel deck with laboratory studies and design assumptions[D]. Bethlehem: University of Lehigh, 2002.

[4] Takada Y, Aoki Y. Examination and review of fatigue cracks in orthotropic steel decks in Hanshin Expressway [C/CD]//Proceedings of the 7th Japanese-German Joint Symposium on Steel and Composite Bridges, Osaka: [s. n.], 2007.

[5] Tsakopoulos A P, Fisher W J. Fatigue performance and design refinements of steel orthotropic deck panels based on full-scale laboratory tests[J]. Steel Structures, 2005, 5: 211.

[6] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, et al. Measurement of truck axle weights by instrumenting longitudinal ribs of orthotropic bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 8(5): 526.

[7] Koichiro Fumoto, Ikuo Yamada, Akira Moriyama. Fatigue design, evaluation and inspection for orthotropic steel decks on long-span bridges[C/OL]. [2012-04-02]. <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/pdf/23/23-2-zfumoto.pdf>.

[8] 侯天林. 摩擦型高强度螺栓在南京长江二桥中的应用[J]. 钢结构, 2003, 18(1): 35.  
HOU Tianlin. Application of the friction high strength bolts to the Second Nanjing Yangtze River Bridge [J]. Steel Construction, 2003, 18(1): 35.

[9] 曾志斌. 南京长江二桥钢箱梁关键技术的研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2007.  
ZENG Zhibin. Research of key technology for steel box girder in Nanjing No. 2 Yangtze River Bridge [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2007.

[10] 中华人民共和国铁道部. TB10002. 2—2005 铁路桥梁钢结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.  
Ministry of Railways of People's Republic of China. TB10002. 2—2005 Code for design on steel structure of railway bridge [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T714—2008 桥梁用结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 714-2008 Structural steel for bridge [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[12] 中华人民共和国铁道部. TB10212—2009 铁路钢桥制造规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.  
Ministry of Railways of People's Republic of China. Fabrication code for railway steel bridges [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.

[13] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD Bridge design specifications [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.

[14] European Committee for Standardisation. prEN 1993-2: 2004 Eurocode 3: design of steel structures [S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2004.