

基于实测温差模式的顶推钢箱梁拼装时机研究

侯亚辉¹, 宋涛², 邵伟¹, 崔立恒¹, 张成明¹

1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250021; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为解决顶推钢箱梁拼装施工中由温差变化引起钢箱梁线形变化的问题,根据桥梁所处位置的实测钢箱梁竖向温差变化规律,拟合竖向温度梯度曲线,研究温差模式对梁体拼装梁端夹角的影响。研究表明:梁体顶底板竖向温度梯度对待拼梁体的梁端夹角有显著影响,不同梁段应选择合理的顶底板温差及不同时间段进行拼装。

关键词:桥梁工程;拼装时机;温差模式;钢箱梁;顶推施工

中图分类号:U445.462

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)03-0115-06

引用格式:侯亚辉,宋涛,邵伟,等.基于实测温差模式的顶推钢箱梁拼装时机研究[J].山东交通学院学报,2023,31(3):115-120.

HOU Yahui, SONG Tao, SHAO Wei, et al. Assembly time for incremental launching steel girder on measured temperature difference model [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(3): 115-120.

0 引言

钢箱梁的抗扭和抗弯性能较好,适用于大跨度桥梁,钢箱梁的顶推施工方法在国内外应用广泛。施工过程中钢箱梁受力复杂,焊接残余应力和大气温度变化等因素使得梁体的线形控制难度增大。钢箱梁的导热性能较好。在大气环境中,年温度变化和日照局部温差变化显著,梁体截面非线性温差变化较大,对施工过程中梁体的受力和线形影响较大。温度作用较复杂,现多采用半理论、半经验的计算方法对基于温差模式的钢箱梁拼装进行受力分析^[1-3]。

郝超^[4]研究非线性温度对大跨度钢箱梁斜拉桥施工阶段的影响,认为应考虑温度对钢箱梁架设的影响,并根据场地实测温差修正梁体架设高程;邓小伟等^[5]从梁体温差、主塔温差、索梁塔温差及体系温差等方面分别讨论大跨径钢箱梁斜拉桥的温差效应及温度参数敏感性;潘文礼等^[6]研究横桥向和竖向温差对钢箱梁斜拉桥的影响,发现二者对梁体位移和索力均有影响;丁幼亮等^[7-9]认为钢箱梁截面温度对称,且钢箱梁顶底板间存在正温差梯度;孙君等^[10]、周广东等^[11]研究发现钢箱梁顶板的横桥向温度差异明显;王高新等^[12-13]、Wang等^[14]认为可用正态分布函数的加权和描述扁平钢箱梁的温度概率密度分布;钱鲲等^[15]认为各国规范的温度梯度与场地实测温度梯度差异较大,应制定更贴近实际情况的温度梯度模式;郭棋武等^[16]、何畏等^[17]、黄涛^[18]研究表明,结构整体升降温差对结构竖向位移影响较小,但对纵向位移影响较大;当胎架温度与设计温度不一致时,梁体局部温差形成的非线性温差对梁体的竖向位移产生较大影响。因此,梁体竖向非线性温差对梁体线形有较大影响,但研究成果多集中于悬臂拼装或成桥阶段,对顶推施工钢箱梁拼装线形的影响研究较少。

针对钢箱梁拼装受温差影响较大的问题,本文基于场地实测温差数据,拟合适合场地现场的温差模

收稿日期:2022-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50908017);山东省交通运输厅科技计划项目(2021B119)

第一作者简介:侯亚辉(1981—),男,石家庄人,高级工程师,主要研究方向为大跨度桥梁结构分析,E-mail:22831671@qq.com。

式,研究温差对钢箱梁拼装的影响,确定最佳钢箱梁拼装时机,以期合理指导钢梁拼装。

1 温差模式的选取

某矮塔斜拉桥主桥结构为 145 m+240 m+145 m,主梁为单箱三室钢箱梁,钢箱梁高 4.8 m,全宽 28.5 m。钢箱梁全长 530 m,共划分为 56 个节段,标准节段长 9.6 m,最长梁段长 13.0 m。主梁采用顶推法施工,梁体顶推作业需跨夏、秋、冬等季节。

为研究钢梁拼装过程中温差对梁体的影响,采用空间梁单元进行分析,以横隔板、节段分隔线等划分单元,按结构实际建立截面尺寸。分析中仅考虑梁体竖向温差,未考虑横桥向温差效应及负温差效应。以典型断面处为温度测试断面,布设 30 个温度测点,如图 1 所示。

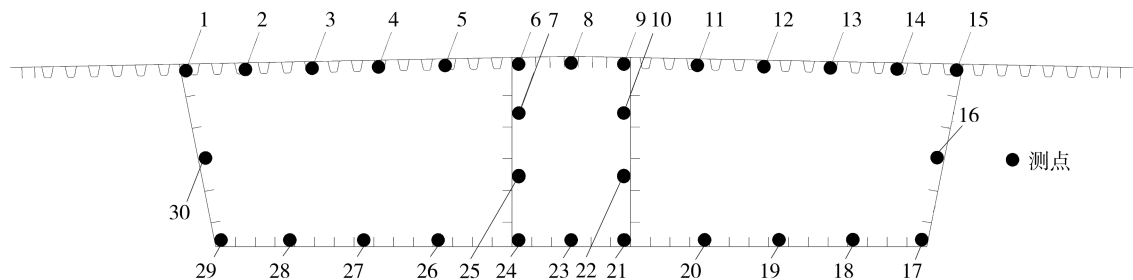


图 1 典型断面温度测点布置示意图

根据现场实测温度,研究 7 月中旬某典型时间段典型断面的温度变化,不同测点钢箱梁中腹板沿高度方向 48 h 的温度变化如图 2 所示。由图 2 可知,不同测点在 48 h 内的温度变化具有明显的周期性。

根据桥位的大气温度,取 7 月中旬 48 h 内温度变化,每 2 h 为时间节点拟合温度梯度曲线为^[13]:

$$T_y = T_0 e^{-ay},$$

式中: T_y 为距箱梁顶板 y 处的温差, y 为测点到箱梁顶板的距离, T_0 为箱梁沿高度方向的最大温差, a 为指数参数。

将最大温差的温度荷载作为温度控制荷载,对实测温度数据进行拟合,并与文献[19-20]比较,如图 3 所示。由图 3 可知,拟合温度曲线与文献[20]较接近。

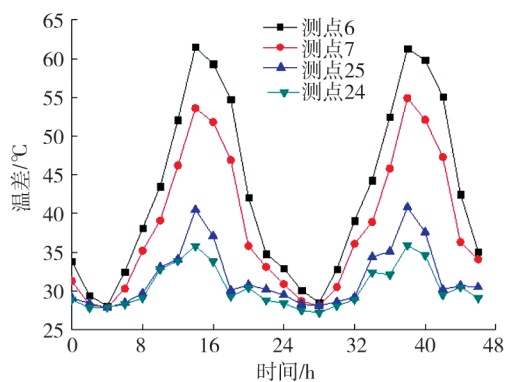


图 2 不同测点钢箱梁中腹板沿高度方向的温度变化曲线

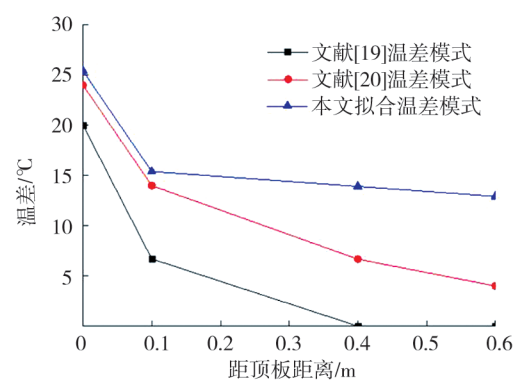


图 3 拟合温差模式与不同规范温差模式对比

2 基于场地实测温差模式梁端夹角分析

梁段间夹角 β_i 如图 4 所示,通过控制 β_i 完成钢箱梁在胎架上的拼装,可保证实现梁体的无应力线形。采用传递矩阵计算待拼梁端的安装高程,需确定 β_i 。

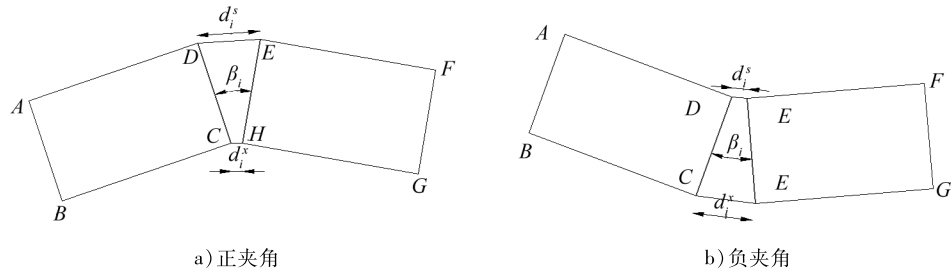


图4 梁段间夹角示意图

若已知梁段 $ABCD$ 和梁段 $EFGH$ 的制造线形及截面尺寸,拼装角

$$\beta_i = \arccos(l_{CD}^2 + l_{HE}^2 - l_{DE}^2) / 2l_{CD}l_{CE}, \quad (2)$$

式中: l_{CD} 、 l_{HE} 、 l_{DE} 分别为线段 CD 、 HE 、 DE 的长。

箱梁顶底板焊缝宽度差

$$\Delta d_i = d_i^u - d_i^l = h_i \tan \beta_i, \quad (3)$$

式中: d_i^u 、 d_i^l 分别为梁端上、下缘焊缝宽度, h_i 为第 i 段梁高。

箱梁顶底板的焊缝宽度差与 h_i 间的关系如表 1 所示。由表 1 可知:随梁高增大,两相邻箱梁间的焊缝宽度增大。梁高 5 m,箱梁顶板焊缝宽度为 5 mm 时,对应的 $\beta_i = 0.0573^\circ$ 。

表 1 不同 β_i 和 h_i 下的箱梁顶底板焊缝宽度差

$\beta_i / (^\circ)$	焊缝宽度差/mm						
	$h_1 = 2.0 \text{ m}$	$h_2 = 2.5 \text{ m}$	$h_3 = 3.0 \text{ m}$	$h_4 = 3.5 \text{ m}$	$h_5 = 4.0 \text{ m}$	$h_6 = 4.5 \text{ m}$	$h_7 = 5.0 \text{ m}$
0.02	0.70	0.87	1.05	1.22	1.40	1.57	1.75
0.04	1.40	1.75	2.09	2.44	2.79	3.14	3.49
0.06	2.09	2.62	3.14	3.67	4.19	4.71	5.24
0.08	2.79	3.49	4.19	4.89	5.58	6.28	6.98
0.10	3.49	4.36	5.24	6.11	6.98	7.85	8.73
0.12	4.19	5.24	6.28	7.33	8.38	9.42	10.47

通过控制箱梁顶底板焊缝宽度差实现控制 β_i , 保证梁体间平顺过渡。在梁体拼装过程中,制造误差、安装误差及大气温度等因素均影响 β_i , 可采取调整千斤顶的高程、焊缝间宽度或压重等措施消除其他因素对 β_i 的影响。

一般选择在夜间根据场地实际情况进行梁体拼装,夜间箱梁顶底板的温差较小。根据图 3 所示曲线,选取代表性温度梯度分析梁体变形。根据代表性温度,采用文献[20]的三折线模式进行分析,不同的距顶板距离 y_i 和温差模式下,基于场地实测温差模式的温度如表 2 所示。

不同温差模式下的梁体夹角

$$\beta_i = \arctan(\Delta l_i / h_i),$$

式中 Δl_i 为温差引起的顶(底)板纵向变形。

不同温差模式下的 β_i 计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知:不同温差模式下 β_i 都存在,按 β_i 从小到大的顺序排列依次为 M-1、M-2、M-3、M-4、M-5, 因此只需控制 M-1、M-5 模式下的 β_i 。温差模式 M-1 下的 SB11 端口的 $\Delta l_i = 31.63 \text{ mm}$, 已超过 5 mm, 应在拼装梁体时采取一定措施限制 β_i 。

表 2 基于场地实测温差模式的温度

温差模式	温度/ $^\circ\text{C}$			
	$y_1 = 0$	$y_2 = 100 \text{ mm}$	$y_3 = 300 \text{ mm}$	$y_4 = 600 \text{ mm}$
M-1	25.7	15.6	12.8	6.2
M-2	18.2	16.0	13.1	7.9
M-3	11.7	7.1	2.6	1.6
M-4	6.0	3.6	1.4	0.3
M-5	2.6	1.6	1.5	1.2

注:M- i ($i=1,2,3,4,5$)为不同时刻的温差模式。

表3 不同温差模式下的 β_i

温差模式	$\beta_i/(^\circ)$					
	SB6 端口	SB7 端口	SB8 端口	SB9 端口	SB10 端口	SB11 端口
M-1	-0.028 1	0.050 3	0.128 8	0.207 2	0.285 1	0.362 5
M-2	-0.023 0	0.041 0	0.105 1	0.169 1	0.232 7	0.296 0
M-3	-0.012 6	0.022 1	0.056 8	0.091 5	0.125 9	0.160 2
M-4	-0.006 4	0.011 3	0.029 0	0.046 8	0.064 4	0.081 9
M-5	-0.002 8	0.005 0	0.012 9	0.020 7	0.028 5	0.036 2

注:SB6~SB11 为边跨第6[#]~11[#]梁的编号。

3 最佳拼装时机的确定

选择最佳拼装作业时机,使顶底板温差对梁体 β_i 的影响最小或可忽略不计。若不考虑温度梯度的影响,在其他作用下 β_i 为正;若考虑温度作用, β_i 为负。

基于现场实时温度指导梁体拼装时机有一定难度,假定温差变化与箱梁顶底板温差变化等效,选择冬、夏季典型时刻的箱梁顶底板温差变化,确定梁体最佳拼装时机。2021年7月中旬和12月中旬的箱梁顶底板温差变化如图5所示。由图5可知:冬、夏季梁体顶底板温差变化规律基本一致,每天15:00—17:00温差较大。

在拼装台上进行梁体拼装,拼装梁体满足拼装精度后,可在梁体顶底板及腹板处用临时构件固定,控制梁体间的焊缝宽度,形成拼装线形,然后焊接成形,完成两梁体间的连接。匹配构件与已拼装梁体间采用码板临时固结,其焊缝宽度差一般控制在8~12 mm。如顶底板温差过大, β_i 过大,梁体间的相对变形过大,焊缝宽度可能不满足上述限制。控制梁体间的相对变形约为10 mm,对应的梁体端部最大转角为 0.1194° ,超过此范围将影响梁体拼装作业。

梁体最佳拼装时间段的温度变化范围为 $0\sim 10^\circ\text{C}$,不同梁体端口的最佳拼装时间段如表4所示。由表4可知:不同梁段的最佳拼装时间段不同,适合的顶底板温差不同,同一天拼装时间也不同。夏季不适合较长时间拼装作业,早上9:00前梁体未受到太阳直射,梁体顶底板温差未达限值,20:00后适宜作业;冬季适合作业时间较长,甚至可全天候作业。应根据表4确定的温差及作业时间,结合当天温度变化等因素确定箱梁拼装作业时间。

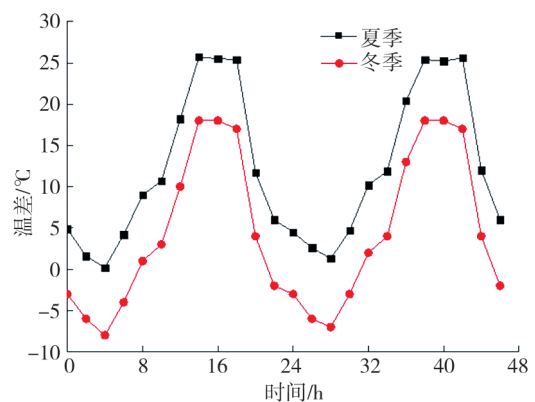


图5 冬、夏季典型时刻顶底板温差变化曲线

表4 不同梁体端口的最佳拼装时间段

梁体端口	最佳拼装时间段	
	7月中旬	12月中旬
SB6 端口	0:00—9:30, 20:00—24:00	全天
SB7 端口	0:00—9:30, 20:00—24:00	全天
SB8 端口	0:00—9:00, 20:30—24:00	0:00—11:30, 18:00—24:00
SB9 端口	0:00—9:00, 20:30—24:00	0:00—11:30, 18:00—24:00
SB10 端口	0:00—8:30, 20:50—24:00	0:00—11:45, 18:30—24:00
SB11 端口	0:00—8:00, 21:00—24:00	0:00—10:30, 19:00—24:00

4 结束语

温差对钢箱梁梁体间的夹角有显著影响,不同的温差模式作用下梁体间的夹角均可能超过

0.119 4°,一旦超过此限值,将无法进行钢箱梁拼装作业,影响正常施工,实际施工应考虑温差因素。

应合理选择梁体顶底板温差及不同时间段进行不同节段的梁体拼装作业,合理选择梁体顶底板温差限值及作业时间,保证梁体拼装顺利进行。

本研究仅考虑沿梁体高度上的正温差,下一步可考虑梁体横桥向温差及负温差对拼装作业的影响。

参考文献:

- [1] TONG M, THAM L G, AU F T K. Extreme thermal loading on steel bridges in tropical region [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(6): 357-366.
- [2] LEE J H. Investigation of extreme environmental conditions and design thermal gradients during construction for prestressed concrete bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(3): 547-556.
- [3] 贺拴海. 桥梁结构理论与计算方法 [M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2018.
- [4] 郝超. 大跨度钢斜拉桥施工阶段非线性温度影响研究 [J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 63-66.
HAO Chao. Study on the nonlinear influence of temperature on long-span steel cable-stayed bridge during construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 63-66.
- [5] 邓小伟, 石雪飞, 阮欣. 超大跨径钢斜拉桥的温度荷载调研与温度效应分析 [J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2010, 23(3): 57-62.
DENG Xiaowei, SHI Xuefei, RUAN Xin. Investigation and analysis of temperature acts on long-span steel cable-stayed bridges [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2010, 23(3): 57-62.
- [6] 潘文礼, 蔡仕强. 钢箱梁温度梯度对斜拉桥施工控制的影响 [J]. 山东交通科技, 2011(3): 37-39.
PAN Wenli, CAI Shiqiang. Study on the influence of steel box girder temperature gradient on the cable-stayed bridge construction control [J]. Shandong Jiaotong Keji, 2011(3): 37-39.
- [7] 丁幼亮, 王晓晶, 王高新, 等. 珠江黄埔大桥钢箱梁温度长期监测与分析 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 945-949.
DING Youliang, WANG Xiaojing, WANG Gaoxin, et al. Long-term temperature monitoring and analysis of steel box girders of Pearl River Huangpu Bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 945-949.
- [8] 丁幼亮, 王高新, 周广东, 等. 基于现场监测数据的润扬大桥斜拉桥钢箱梁温度场全寿命模拟方法 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 129-136.
DING Youliang, WANG Gaoxin, ZHOU Guangdong, et al. Life-cycle simulation method of temperature field of steel box girder for Runyang Cable-stayed Bridge based on field monitoring data [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 129-136.
- [9] 丁幼亮, 王高新, 周广东, 等. 基于长期监测数据的润扬大桥扁平钢箱梁温度分布特性 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 94-101.
DING Youliang, WANG Gaoxin, ZHOU Guangdong, et al. Temperature distribution on flat steel girders of Runyang Bridges based on long-term measurement data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 94-101.
- [10] 孙君, 李爱群, 丁幼亮. 润扬长江大桥钢箱梁的温度分布监测与分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(8): 94-98.
SUN Jun, LI Aiqun, DING Youliang. Observation and research on temperature distribution in steel box girders of Runyang Yangtse River Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(8): 94-98.
- [11] 周广东, 丁幼亮, 李爱群, 等. 基于长期实测数据的大跨悬索桥扁平钢箱梁温差特性研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 114-125.
ZHOU Guangdong, DING Youliang, LI Aiqun, et al. Thermal difference characteristic analysis of a flat steel box girder in long-span suspension bridge based on long-term field measurement data [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 114-125.
- [12] 王高新, 丁幼亮, 李爱群, 等. 基于长期监测数据的润扬大桥斜拉桥钢箱梁横向温差特性研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(1): 163-167.
WANG Gaoxin, DING Youliang, LI Aiqun, et al. Characteristics of transverse temperature differences of steel box girder in Runyang Cable-stayed Bridge using long-term monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 163-167.
- [13] 王高新, 丁幼亮, 王晓晶, 等. 苏通大桥扁平钢箱梁温度场长期监测与统计分析 [J]. 公路交通科技, 2014, 31(2):

- 69-73.
WANG Gaoxin, DING Youliang, WANG Xiaojing, et al. Long-term monitoring and statistical analysis of temperature field of flat steel-box girder of Sutong Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2): 69-73.
- [14] WANG Gaoxin, DING Youliang, WANG Xiaojing. Long-term temperature monitoring and statistical analysis on the flat steel-box girder of Sutong Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 8(4): 63-68.
- [15] 钱鲲, 陆永强, 黄应彬, 等. 多塔斜拉桥钢箱梁结构温度梯度实测与分析[J]. 公路, 2016, 61(10): 129-133.
- [16] 郭棋武, 方志, 裴炳志, 等. 混凝土斜拉桥的温度效应分析[J]. 中国公路学报, 2002, 15(2): 48-51.
GUO Qiwu, FANG Zhi, PEI Bingzhi, et al. Temperature effect analysis of concrete cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 48-51.
- [17] 何畏, 唐亮, 强士中, 等. 大跨度焊接钢箱梁斜拉桥施工控制技术的研究及应用[J]. 桥梁建设, 2002(5): 14-18.
HE Wei, TANG Liang, QIANG Shizhong, et al. Research and application of the construction control technology in large span cable-stayed bridges with welded steel box girder[J]. Bridge Construction, 2002(5): 14-18.
- [18] 黄涛. 大跨径钢筋混凝土箱形梁桥温度场效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
HUANG Tao. The research on temperature effect of long span reinforced concrete box-beam bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [19] 中交公路规划设计院有限公司, 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [20] British Standard Institution. Steel, concrete and composite bridges[S]. [S. l.]: [s. n.], 1990.

Assembly time for incremental launching steel girder on measured temperature difference model

*HOU Yahui*¹, *SONG Tao*², *SHAO Wei*¹, *CUI Liheng*¹, *ZHANG Chengming*¹

1. Shandong Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250021, China;

2. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To provide technical basis for assembly steel girder in incremental launching method, aimed at the problem of assembling steel girder leaded erection line change which is influenced by temperature variation. According to the vertical temperature variation of steel girder measures in situation, temperature gradient model is fitted, and the influence of angle for assembly steel girder end under different temperature gradient model is investigated. The results show that angle of assembly steel girder end caused by temperature gradient of top and bottom plane is remarkable. Different assembly temperature scope for top and bottom plane of steel girder is suitable to different segments.

Keywords: bridge engineering; assembly time; temperature gradient difference model; steel box girder; incremental launched girder

(责任编辑:王惠)