

文章编号:1671-6833(2019)03-0068-05

陕西省连续箱梁桥底板实测竖向温度梯度研究

邬晓光, 贺攀, 何启龙, 冯宇

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为建立陕西省不同地区连续箱梁桥实测温度梯度场,选取陕北、关中和陕南地区具有代表性的三座连续箱梁桥进行了连续一年的观测,通过对实测数据的拟合,建立了三个地区实测温度梯度模型.研究表明,陕西省三个地区连续刚构箱梁实测竖向最大温差各不相同,按规范中计集混凝土铺装层后计算得到,陕北地区 18.6℃、关中地区 21.2℃、陕南地区 22.9℃,但均小于规范值 25℃;与规范规定不同,实测数据显示:箱梁底板存在竖向温差,三个地区底板实测正(负)最大温差分别为 3.5℃(-3.1℃)、2.8℃(-2.9℃)、1.5℃(-1.5℃).基于实测温度梯度,建立箱梁合龙段有限元模型,进行实测温度效应分析,结果表明:在负温度梯度中,不考虑底板竖向温度梯度的作用,对于底板的受力将产生不利的影响,偏不安全.建议在进行连续(刚构)箱梁桥设计验算时应综合考虑底板竖向温度梯度的影响.

关键词:桥梁工程;连续箱梁桥;有限元模型;底板温度梯度;温度效应

中图分类号: U443 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.006

0 引言

通过对陕西省运营的 86 座连续刚构桥调研看出,47 座桥底板出现纵向裂缝,其中,14 座位于陕北,24 座位于关中,9 座位于陕南,分别占该地区在役连续刚构桥总数的 82.35%、72.73%、37.5%.可见,陕西省连续刚构桥梁底板纵向开裂普遍程度呈现地域分化的特征.

尽管很多学者^[1-4]认为底板钢束张拉形成的径向力是导致连续刚构桥底板纵向开裂的主要原因,但不同地区环境差异较大,温度梯度作用对箱梁底板的影响不可忽视,对比各国规范可以发现,英国^[5]、新西兰^[6]等国规范对竖向温度梯度规定时,都考虑了底板竖向温度梯度;而《中国铁路桥涵设计基本规范》^[7]以及《公路桥涵设计通用规范》(2015)^[8]都未计入底板竖向温度梯度.因此,忽略底板温度梯度的考虑方式是否合理值得探讨.人们往往认为,底板基本不受太阳辐射的作用,故不需考虑底板温度梯度.但通过调研发现,连续刚构桥箱梁底板纵向开裂情况呈现出地域差异的特点,同时文献^[9-11]也都通过大量实测数据证明,箱梁底板存在竖向温差,虽然数值不大,但不容忽视.

因此,有必要通过实测来分析陕西省不同地区混凝土箱梁的温度梯度模式以及底板温度梯度作用对底板受力产生的影响.故分别选取陕北、关中和陕南地区具有代表性的三座连续箱梁桥,研究混凝土箱梁在日照作用下的温度梯度分布规律,分析实测温度梯度下箱梁底板受力.

1 依托工程特点

依托工程分别位于陕北(桥 A)、关中(桥 B)及陕南(桥 C):(1)桥 A 为 88+4×160+88 m 预应力混凝土连续刚构,根部梁高 9.5 m,跨中梁高 3.5 m,梁高按 1.8 次抛物线变化.(2)桥 B 为 47+5×80+47 m 预应力混凝土连续箱梁桥,根部梁高 5.2 m,跨中梁高 2.4 m,梁高按照 1.6 次抛物线变化.(3)桥 C 为 72+120+72 m 预应力混凝土连续刚构,根部梁高 6.5 m,跨中梁高 2.8 m,梁高按 1.8 次抛物线变化.

对照规范[8]中的全国气温分布图可知:桥 A 位于寒冷地区,靠近寒冷-严寒地区分界线;桥 B 位于寒冷地区;桥 C 靠近温寒分界线,位于温热地区,可见依托工程桥梁的地理位置分布极具代表性.

收稿日期:2018-02-07;修订日期:2018-06-10

基金项目:陕西省交通运输厅科技项目(13-25K)

作者简介:邬晓光(1961—),男,湖北英山人,长安大学教授,博士,博士生导师,主要从事大跨径桥梁结构分析、桥梁维修与加固、桥梁施工安全控制等方向的研究,E-mail:wsgwst.cn@126.com.

2 箱梁温度传感器布设

根据文献[12-14]的结论:平行设置的上下幅箱梁桥,混凝土温度分布可按单幅箱梁考虑;沿桥梁纵向,日照作用下不同截面处的温度分布基本相同,这三座桥梁测试断面的选择提供了理论依据.综合考虑各种影响因素选定桥 A 的 8#断面(距最大悬臂 43 m),桥 B 的 6#断面(距最大悬臂 32 m)以及桥 C 的 12#断面(距最大悬臂 55 m)为测试截面,温度测量采用 JMT-36C 智能型温度传感器,传感器编号如图 1~3 所示.

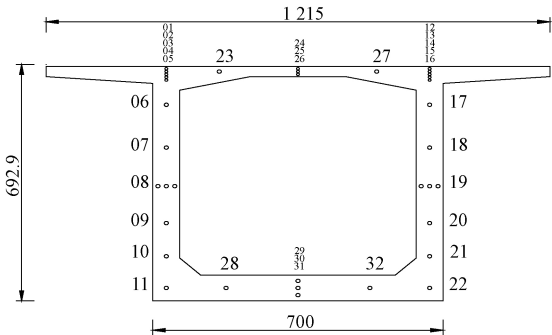


图 1 桥 A 传感器布设图 (cm)
Fig.1 Sensor layout of bridge A (cm)

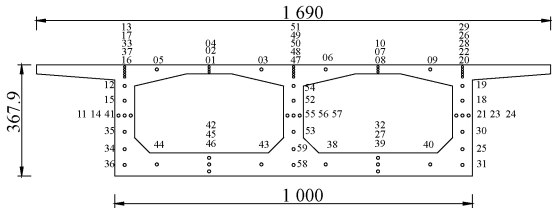


图 2 桥 B 传感器布设图 (cm)
Fig.2 Sensor layout of bridge B (cm)

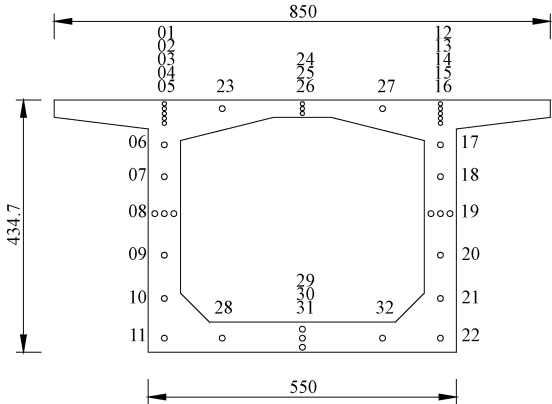


图 3 桥 C 传感器布设图 (cm)
Fig.3 Sensor layout of bridge C (cm)

采用自动综合测试系统进行数据采集.根据文献[14]可知,箱梁顶板、底板、腹板和箱内综合大气温度和换热系数每 2 h 变化一次,故设定测试系统测试频率为 2 h/次.

3 箱梁实测温度场的建立

3.1 箱梁实测正温度梯度

笔者重点对夏季(7—10月)和冬季时段(12月—次年2月)温度传感器传回的数据进行处理,以研究在升温 and 降温作用下的正、负温差对底板受力的影响,由于温度样本数据繁多,故本文只对桥 A 部分试验数据进行展示.

图 4 是桥 A 箱梁 8#截面 8 月 16 日—8 月 22 日腹板实测温度变化曲线(每 2 h 采集一次).

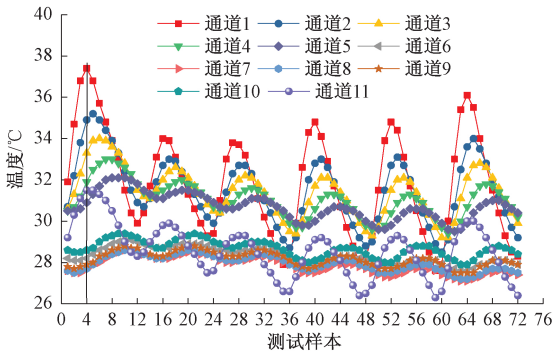


图 4 桥 A 箱梁 8#截面右腹板竖向实测温度变化曲线
Fig.4 Vertical measured temperature variation curve of the right web of bridge A

根据相关数据绘制裸梁左、右侧腹板最不利竖向温度梯度分布曲线.以左腹板竖向温度梯度为例,如图 5,结合图 4 分析发现,这段时间内桥 A 沿左、右腹板竖向最大温差出现在 16 日 14 时左右,分别为 9.3、9.0℃;桥 B 沿左、中、右腹板竖向最大温差分别为 10.4、5.7、8.4℃;桥 C 沿左、右腹板竖向最大温差分别为 11.8、12.8℃.

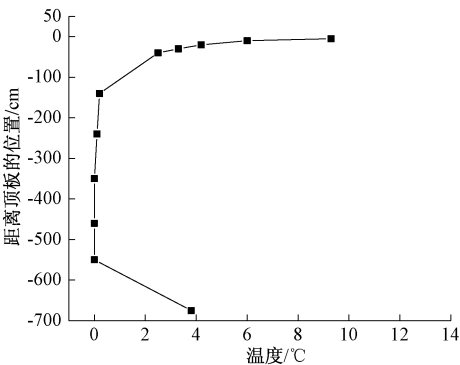


图 5 桥 A 左腹板实测竖向温度梯度曲线
Fig.5 Left web measured vertical temperature gradient of bridge A

实测数据显示:距离顶板 0~40 cm 温度梯度模式与我国现行桥梁设计规范基本一致,计集混凝土铺装层后,最大温差分别为 14、16、18℃,不及规范值.与规范不同,现场实测值显示在腹板与底板角隅位置,存在接近 2.5~4℃的温差.

为研究底板范围内是否也存在竖向温差,对埋设在箱梁底板上 28~32 通道温度传感器上的数据进行分析,图 6 是 8 月 9 日—8 月 13 日(每 2 h 采集一次)测试到的其温度变化曲线。

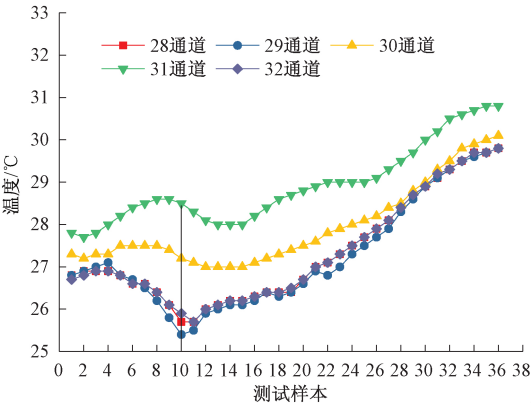


图 6 实测底板温度变化曲线(夏季)
Fig.6 Measure temperature curve of bottom plate (in summer)

分析发现,这段时间内沿底板厚度范围竖向最大正温差出现在 8 月 11 日 16 时左右.从图 6 看出,28、29 和 32 测点的数据受环境温度影响变化趋势基本一致,表明底板沿横向上温度变化很小,而 29、30、31 通道在竖向上呈现出明显的温度梯度,最大正温差为 3.5 ℃.同理分析得到,桥 B、桥 C 底板竖向最大正温差分别是 2.8、1.5 ℃.

3.2 箱梁实测负温度梯度

根据规范,混凝土上部结构的竖向日照负温差按正温差的-0.5 倍取值,通过上文分析可知,三座桥顶板位置竖向正温差小于规范规定值,又因本文主要讨论温度梯度作用下箱梁底板受力的问题,故对于竖向负温度梯度,只分析底板位置上的数据,而顶板 0~40 cm 位置处的竖向负温差参考规范取值.因此,选择冬季(11 月—次年 2 月)寒流期间,又对埋设在桥 A 箱梁底板上 28~32 通道温度传感器数据进行了对比,图 7 是测试到的其温度变化曲线。

分析发现:这段时间内沿底板厚度范围竖向最大竖向负温差出现在 1 月 16 日 2 时左右.从图 7 可看出,当外界气温降幅较大时,底板外侧的 31 通道测点温度变化最敏感,导致底板厚度范围内呈现明显的负温差,最大温差为-3.1 ℃.同理,分析得到,桥 B、桥 C 底板竖向最大负温差分别是-2.9、-1.5 ℃.

3.3 箱梁截面温度梯度修正取值

本研究在对陕西不同地区箱梁顶板位置处竖向梯度温度模型修正时,采用与现行规范相同的

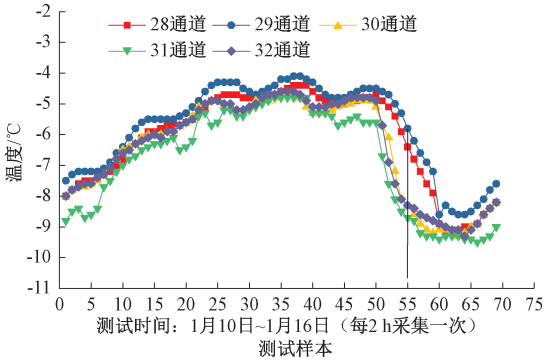


图 7 实测底板温度变化曲线(冬季)
Fig.7 Measure temperature curve of bottom plate (in winter)

温度梯度模型,除此之外,增加实测底板竖向温差,修正后的竖向温度梯度模型如图 8 所示。

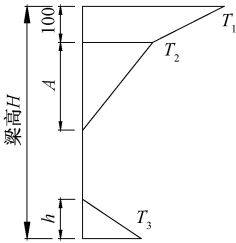


图 8 修正的竖向温度梯度模型
Fig.8 Corrected vertical temperature gradient model

对于 T_1 和 T_2 的取值,根据拟合后的三个地区竖向梯度温度分布曲线发现,三个地区实测温度梯度模型基本一致,只是温差取值不同,最大温差 T_1 从陕南到陕北约 2~3 ℃ 逐级递减,内部温差 T_2 从按 1 ℃ 左右递减。

对于 T_3 和 h 的取值,通过对比新西兰(NZBM—2003)、英国(BS5400)、美国(AASHTO—2004)等规范关于温度梯度的规定,发现新西兰、美国等两国规范中底板竖向温度梯度的取值均为 200 mm,英国规范的取值较为麻烦,适用性不强.故取 $h=200$ mm, T_3 取三座桥梁底板厚度范围的温差实测值.由于测试时未出现极端天气情况,故在实测竖向梯度温度基础上,考虑极端天气对其修正,在原 T_1 基础上增加 5 ℃,得到采用混凝土铺装层箱梁顶面温差 T_1 和内部温差 T_2 、 T_3 ,各参数取值见表 1。

4 实测温度场箱梁温度效应分析

对比我国现行设计规范,对于使用混凝土铺装层的箱梁桥, T_1 为 25 ℃,大于实测温差,使用规范设计时偏安全.又因研究重点是箱梁底板,故在进行底板受力分析时,温差 T_1 和 T_2 采用规范值, T_3 采用实测值.选择桥 A 合龙段进行温度

表 1 桥梁底板竖向温差取值

区域	$T_1/^\circ\text{C}$		$T_2/^\circ\text{C}$		$T_3/^\circ\text{C}$	
	正温差	负温差	正温差	负温差	正温差	负温差
陕北地区	18.6	-9.3	5.1	-2.6	3.5	-3.1
关中地区	21.2	-10.6	5.7	-2.9	2.8	-2.9
陕南地区	22.9	-11.5	6.5	-3.3	1.5	-1.5

荷载作用下的受力研究,应用有限元软件 ANSYS 建立有限元模型.

桥 A 跨中梁高 3.5 m,箱梁顶板宽度为 12.15 m,底板宽 7 m,顶板厚 0.3 m,底板厚 0.32 m,腹板厚 0.65 m.取合龙段纵向 1 m 的长度,选用 20 节点热单元 SOLID279 和与此对应的结构单元 SOLID186 进行分析,先将实际测得的温度梯度荷载施加在热单元 SOLID279 之上,进行温度场分析,之后提取温度场荷载分析文件,将热单元转化至结构单元 SOLID186,进行结构受力分析.划分实体单元 3 983 个,受力分析如图 9 所示.

为研究底板在不同温度梯度作用下的受力情况,设置下列工况.工况 1:正温度梯度中,不考虑底板竖向温度梯度;工况 2:正温度梯度中,考虑

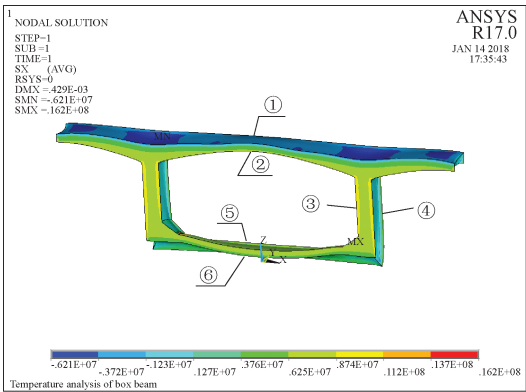


图 9 混凝土箱梁实体温度场分析

Fig.9 Analysis of physical temperature field of concrete box girder bridge

底板竖向温差, T_3 分别为 1.5、2.5、3.0、3.5 $^\circ\text{C}$; 工况 3:负温度梯度中,不考虑底板竖向温度梯度;工况 4:负温度梯度中,考虑底板竖向温差, T_3) 分别为 -1.5、-2.5、-3.0、-3.5 $^\circ\text{C}$;

计算点主要是箱梁顶板上下缘、腹板内外侧以及底板上下缘,对应计算点位置如图 9 所示.

表 2 中为 4 种工况下箱梁不同计算点处温度应力值.

表 2 不同竖向温度梯度作用下底板横向温度应力

Tab.2 Lateral temperature stress of the bottom plate under different temperature gradients							MPa
工况类型	底板竖向温度/ $^\circ\text{C}$	位置①	位置②	位置③	位置④	位置⑤	位置⑥
工况 1	—	-5.218	3.776	0.083	-0.041	-0.416	0.253
	1.5	-5.219	3.770	0.085	-0.043	-0.303	-0.106
	2.5	-5.218	3.765	0.085	-0.045	-0.193	-0.275
	3.0	-5.222	3.763	0.086	-0.047	-0.153	-0.349
工况 2	3.5	-5.225	3.758	0.086	-0.047	-0.079	-0.408
工况 3	—	3.195	-2.018	0.022	-0.019	0.125	-0.108
	-1.5	3.194	-2.013	0.025	-0.021	0.098	0.147
	-2.5	3.192	-2.008	0.030	-0.030	-0.054	0.398
工况 4	-3.0	3.191	-2.005	0.031	-0.039	-0.088	0.503
	-3.5	3.191	-2.005	0.032	-0.043	-0.094	0.529

从表 2 可知:在正温度梯度作用下,顶板上缘出现横向压应力,下缘出现横向拉应力;腹板处应力较小;底板上缘出现横向压应力,下缘出现横向拉应力;是否考虑底板竖向温度梯度主要影响集中在底板上,当考虑底板竖向温度梯度作用, T_3 的值由 1.5~3.5 $^\circ\text{C}$ 变化时,底板上缘横向压应力逐渐减小,底板下缘由横向拉应力逐渐变化为压应力.故设计时,不考虑底板竖向温度梯度,对底板的受力是偏安全的.

同样可以发现,当考虑底板竖向温度梯度作用, T_3 的值由 -1.5~-3.5 $^\circ\text{C}$ 变化时,底板上缘横向拉应力逐渐减小,并变为压应力,而下缘则由横向压应力变化为拉应力.当底板负温度梯度 T_3 的

值为 -3.5 $^\circ\text{C}$ 时,最大横向拉应力增量为 0.637 MPa,可知,底板负温度梯度对底板受力的影响是不可忽略的.故不考虑底板竖向负温度梯度的作用,对底板的受力偏不安全.

5 结论

(1)实测数据显示:箱梁顶板 0 到 40 cm 范围内实测最大温差均小于规范值.与规范规定不同,现场实测值显示沿底板竖向存在竖向温度梯度.

(2)通过对比各国规范的温度梯度模型,采用“三折线”形式建立陕西省三个地区的温度梯度模型,各参数见表 1,顶面最大负温差的取值,可参考规范[8]中取实测值的-0.5 倍.

(3)进行连续箱梁桥设计时,不考虑底板竖向负温度梯度的作用,偏不安全;但不考虑底板竖向正温度梯度的作用,对于底板受力则是偏安全.

(4)底板竖向温度梯度对箱梁底板纵向裂缝的“贡献”不容忽视.我国现有规范未对底板竖向温度梯度进行规定,为保证结构温度应力计算结果准确可靠,建议对陕西省连续(箱梁)刚构桥进行设计时,综合考虑底板竖向温度梯度的影响.

参考文献:

- [1] MOON D Y, SIM J, OH H. Practical crack control during the construction of precast segmental box girder bridges [J]. Computers & structures, 2005, 83 (31/32): 2584-2593.
- [2] 项贻强,唐国斌,朱汉华,等. 预应力混凝土箱梁桥施工过程中底板崩裂破坏机理分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 70-75.
- [3] 杨俊,曹一山. 大跨连续刚构桥底板纵向裂缝成因分析与处治措施[J]. 公路, 2017, 62(8): 156-157.
- [4] 钟新谷,林小雄,舒小娟. 预应力混凝土变截面箱梁桥底板预应力束的等效径向力研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 103-109.
- [5] British Standards Institute. Steel, Concrete and Composite Bridge (Part2): Specification for Loads; BS5400[S]. London: British Standards Institute, 1990.
- [6] Transit New Zealand. Bridge Manua. 2nd Ed. Section 3: Design Loading; NZB M—2003 [S]. Wellington: Transit New Zealand, 2003.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥涵设计基本规范: TB 10002. 1—2005 [S]. 天津: 铁道第三勘察设计院, 2005.
- [8] 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.
- [9] 叶见曙,贾琳,钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 788-793.
- [10] 聂利英,刘明坡,朱倩,等. 基于实测的混凝土箱梁底板温度梯度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(10): 8-14.
- [11] 顾斌,陈志坚,陈欣迪. 大尺寸混凝土箱梁日照温度场的实测与仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1252-1261.
- [12] 方志,汪剑. 大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 62-67.
- [13] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [14] 王永宝,赵人达. 混凝土箱梁温度梯度取值研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 43-47.
- [15] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Study on Bottom Plate Measured Vertical Temperature Gradient of Continuous Box Beam Bridge in Shaanxi Province

WU Xiaoguang, HE Pan, HE Qilong, FENG Yu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to establish the measured temperature gradient field of continuous box girder bridges in different areas of Shaanxi Province, three representative continuous girder bridges in northern Shaanxi, central Shaanxi and southern Shaanxi were selected for one year continuous observation. By fitting the measured temperature data, three temperature gradient models were established. The results showed that the vertical maximum temperature difference of continuous box girder bridge in three areas in Shaanxi Province was different. According to the specifications set concrete pavement, the maximum temperature of northern region was 18.6℃; the maximum temperature of central Shaanxi was 21.2℃; the maximum temperature of southern Shaanxi was 22.9℃, but were less than the standard value of 25℃. Different from the normative provisions, the measured data show that there was vertical temperature difference in the bottom plate of the box girder, the maximum positive and negative temperature differences of the bottom plate in the three regions were 3.5℃ (-3.1℃), 2.8℃ (-2.9℃) and 1.5℃ (-1.5℃). Based on the measured temperature gradient, the finite element model of the box girder closure section was established, and the measured temperature effect was analysed. The results showed that in the negative temperature gradient, not taking into account the effect of vertical temperature gradient of the bottom plate, the force would have a negative impact for bottom plate, impartial security. It was suggested that the vertical temperature gradient of the bottom plate should be considered comprehensively in the design checking of continuous (rigid frame) box girder bridge.

Key words: bridge engineering; continuous box girder bridge; finite element model; bottom plate temperature gradient; temperature effect