

常规桥梁搭板内力计算方法在 SIAB 中的适用性

庄一舟¹, 任卫岗¹, 陈小琴², 韩裕添¹, 王胜智¹, 田伟¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 义乌工商职业技术学院 建筑与艺术分院, 浙江 义乌 322000)

摘要: 探讨了常规有缝桥梁搭板内力计算方法在半整体式桥台桥梁(SIAB)中的适用性. 首先, 介绍常规有缝桥梁搭板的内力计算方法, 根据 SIAB 的构造特点, 分析搭板近台端受到结构温变变形和收缩徐变引起的水平力、弯矩和剪力的影响; 然后, 建立 SIAB 搭板的有限元法(FEM)模型, 并分析这些内力对 SIAB 搭板内力计算的影响程度. 分析结果表明: 剪力、弯矩的影响很小, 可以忽略不计, 但水平力的影响很大, 搭板在进行内力计算时需加以考虑. 最后, 提出了简支梁修正法, 并与既有有缝桥梁搭板内力计算方法做了对比. 结果表明: 有缝桥梁搭板内力计算方法不适用于 SIAB 搭板内力计算的结论.

关键词: 有缝桥梁; 桥梁搭板; 半整体式桥台桥梁; 内力计算

中图分类号: U 442.5

文献标志码: A

桥头跳车通常不会引起较大的安全问题, 但会对路面铺装层与伸缩缝造成损害. 据统计, 我国约有 20%~30% 以上的桥梁存在不同程度的桥台背路基沉陷现象, 造成桥头跳车, 导致的经济损失也是非常之巨大^[1-2]. 世界各国通常在交通运输系统中设置桥头搭板来解决桥头损害问题^[3], 而桥头搭板的设计过程需要对其进行内力计算, 所以, 使用合适的搭板内力计算方法是解决这一问题的关键. 常规的有缝桥梁, 搭板受竖向的铺装层及搭板自质量提供的均布荷载和车辆轮压提供的集中荷载作用, 其内力计算方法是将搭板横桥方向划分成单位板宽的搭板条, 等效成弹性地基梁进行计算. 半整体式桥台无缝桥梁^[4]的主梁与桥头搭板通过联接钢筋连在一起^[5], 在温降荷载作用下, 主梁产生的伸缩、膨胀变形带动桥头搭板纵向平移或水平面内转动(对斜交桥), 从而在搭板端部产生额外内力, 特别是在温降荷载产生的拉力作用下, 会使搭板端部增加额外的拉应力^[6], 并在受拉区与搭板受弯产生的拉应力相叠加形成高拉应力区, 这与既有有缝桥梁搭板的受力情况明显不同. 但是, 目前 SIAB 搭板的内力是按既有有缝桥梁的搭板内力计算方法进行计算. 因此, 为了验证既有有缝桥梁的搭板内力计算方法在 SIAB 搭板中是否适用, 本文采用了既有有缝桥梁搭板设计方法对 SIAB 搭板设计计算的适用性分析.

1 常规有缝桥梁搭板的内力计算方法

1.1 弹性地基梁的温克尔法

温克尔地基模型的基本假定是^[7-8]: 地基表面上任何一点的沉降量 y 与该点的应力值 p 成正比, 即 $p = k \cdot y$. 其中: k 为基床系数($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$). 平面曲线的曲率关系式为

$$\kappa(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \pm \frac{w'''}{(1 + w'^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

式(1)中: $\rho(x)$ 为梁体的曲率半径(m).

弹性地基梁的受力模式图, 如图 1 所示. 图 1 中: y 为沉降位移; M 为弯矩; Q 为剪力的正方向. 曲率与弯矩 M 的物理关系为

收稿日期: 2015-06-28

通信作者: 庄一舟(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事无缝桥梁的研究. E-mail: 478372092@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278126); 福建省自然科学基金资助项目(2013J01187)

$$M_q(x) - M_p(x) = EI\kappa(x), \tag{2}$$

式(2)中: $M_q(x)$ 为荷载 q 引起梁体的弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); $M_p(x)$ 为地基反力 p 引起梁体的弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); EI 为梁体的弯曲刚度($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$).

从而有

$$\frac{\omega''}{(1 + \omega'^2)^{3/2}} = -\frac{M_p(x) - M_q(x)}{EI}. \tag{3}$$

式(3)中: ω 为梁体的挠度(m).

由于梁发生的变形是微小变形, 因此有

$$\omega'' = -\frac{M_p(x) - M_q(x)}{EI}. \tag{4}$$

将式(4)两边同时对 x 求二次导, 可得

$$\omega^{(4)}EI = EI \frac{d^4y}{dx^4} = q(x) - p(x). \tag{5}$$

将温克尔假定的 $p(x) = k \cdot y$ 代入式(5), 有

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + ky = q(x). \tag{6}$$

令 $\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$, 则有

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + 4\beta^4 y = \frac{q(x)}{EI}. \tag{7}$$

解微分方程式(7)^[9], 得

$$y = C^{\lambda x} (A \cdot \cos \lambda x + B \cdot \sin \lambda x) + C \cdot e^{-\lambda x} (C \cdot \cos \lambda x + D \cdot \sin \lambda x). \tag{8}$$

根据不同的荷载情况及其边界条件, 即可得到相应不同情况下的内力解.

1.2 简支梁法

在集中荷载 p 和均布荷载 q 作用下, 有

$$M = M_p + M_q = P(\frac{l}{2} - 0.7) + \frac{1}{8}ql^2. \tag{9}$$

2 SIAB 搭板的有限元法(FEM)模型

SIAB 搭板与主梁通过滑动支座支承在桥台上, 搭板近台端支承在桥台背墙上, 且两者之间铺设油毛毡, 使搭板能够在背墙端面滑动. 将搭板与主梁界面(相当于固定端)截开, 可知搭板端部有弯矩、剪力和水平力. 弯矩和剪力主要由于边跨主梁和搭板所受竖向荷载产生, 水平力主要由主梁受温降荷载发生伸缩所产生. 其中, 半整体桥梁的搭板是跨越桥台背墙, 近台端搭板可视作简支背墙端面上, 又桥台相对于主梁搭板更为刚性, 故搭板端部剪力完全由桥台背墙承担, 与其承受弯矩和水平力的影响相比可以忽略不计.

2.1 有限元模型

搭板端部的正弯矩是由自桥台计偶数跨主梁受竖向荷载而产生的, 负弯矩是由自桥台计奇数跨主梁受竖向荷载而产生的. 搭板近台端所受水平力主要是由主梁在温降荷载作用下的伸缩变形而产生的, 并通过联接钢筋和主梁搭板界面传递至搭板^[9].

为判别端部负弯矩的影响, 建立 3 跨连续梁模型, 且自桥台端计第 1, 3 跨按照 JTG D60-2004《公路桥涵设计通用规范》满布竖向荷载; 为判别端部正弯矩的影响, 建立 4 跨连续梁模型, 自桥台端计第 2, 4 跨满布竖向荷载. 为判别端部水平力的影响, 建立 4 跨连续梁模型, 全桥受 30 °C 范围的温降荷载. 主梁、搭板、软木条和主梁搭板界面采用 C3D8R 实体单元, 联接钢筋采用 T3D2 单元, 搭板底部的地基作用采用弹簧单元进行模拟. 3 跨连续梁模型的主梁支座采用滑动支座模拟, 4 跨连续梁模型桥梁中心处支座采用固定支座, 其他处采用滑动支座. 搭板近台端采用滑动支座, 远台端采用滑动支座进行模拟.

ABAQUS 建立单位宽度的主梁-搭板节点模型的基本参数假定为: 主梁采用 16 m 空心板, 梁宽 1

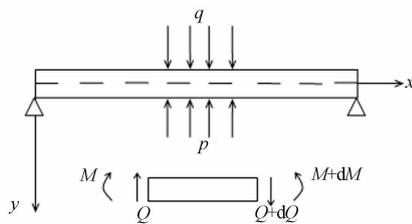


图 1 桥头搭板受力模型

Fig. 1 Mechanical model of approach slab

m, 梁高 0.85 m. 搭板长、宽、高分别为 8.0, 1.0, 0.3 m. 主梁和搭板均采用 C30 混凝土, 主梁搭板联接钢筋采用直径为 $\Phi 32$ 的 HRB 335 钢筋, 横向间距为 10 cm. 搭板下部地基土竖向、横向基床系数分别取 10, 12 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$. 对搭板模型施加汽车荷载及搭板自质量, 得到台端搭板受正负弯矩及水平力作用时的有限元模型, 如图 2~7 所示.

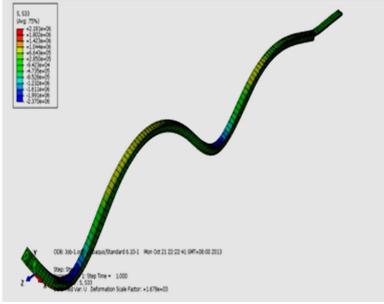


图 2 奇数跨受荷载时挠曲变形

Fig. 2 Deflection under odd-span loading

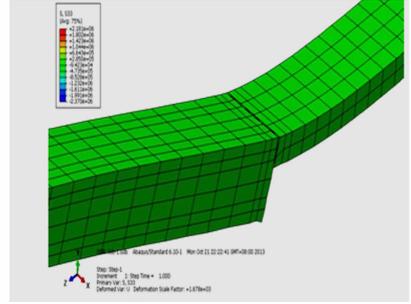


图 3 负弯矩作用下桥头区域云纹图

Fig. 3 Principal stress pattern under negative bending moment

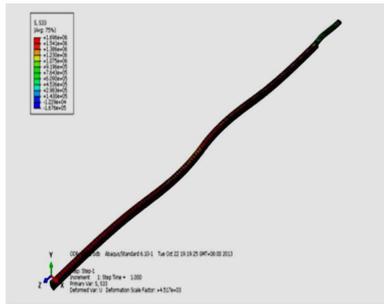


图 4 偶数跨受荷载时挠曲变形

Fig. 4 Deflection under even-span loadings

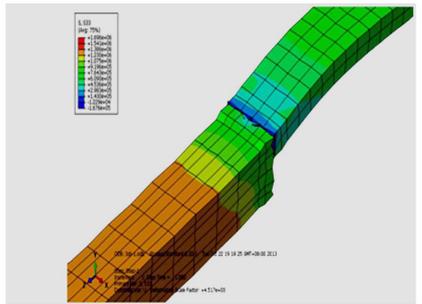


图 5 正弯矩作用下桥头节点云纹图

Fig. 5 Principal stress pattern under positive bending moment

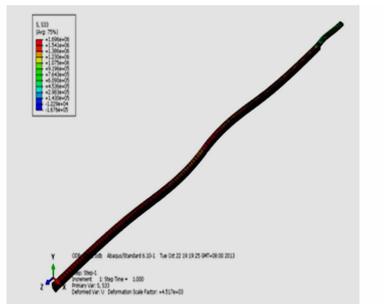


图 6 温降荷载时挠曲变形

Fig. 6 Deflection under temperature decrease

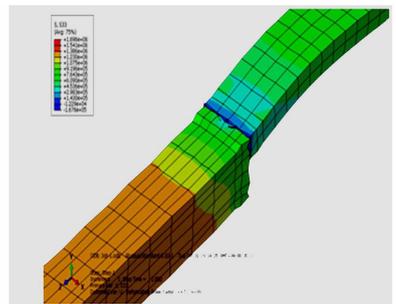


图 7 水平力作用下桥头节点云纹图

Fig. 7 Principal stress pattern under horizontal loading

2.2 内力分析

自近台端开始, 在搭板截面 1/16, 2/16, 3/16, 4/16, 3/8, 4/8, 5/8, 6/8, 7/8 处标记. 运算 FEM 模型, 并提取以上截面处搭板上表面各点应力状况. 计算各截面负弯矩作用产生的最大拉应力与 C30 混凝土抗拉强度 (1.39 MPa) 的比值 (η), 结果如表 1 所示.

计算各截面正弯矩作用产生的最大拉应力与竖向荷载作用产生的应力的比值结果, 如表 2 所示.

计算各截面由温降荷载产生的水平力作用下的最大拉应力与竖向荷载产生的应力的比值, 结果如表 3 所示.

由表 1 可知: 在搭板端部负弯矩作用下, 搭板近台端上表面拉应力与 C30 混凝土抗拉强度相比 (搭板截面中和轴以上拉应力由混凝土承担), 最大达到 76%,

表 1 负弯矩作用下比值

Tab. 1 Ratio under negative bending moment

截面位置	σ (负弯矩)/MPa	η /%
1/16	1.063	76
2/16	0.857	61
3/16	0.651	47
4/16	0.414	30
3/8	0.228	16
4/8	0.124	9
5/8	0.073	5
6/8	0.041	3
7/8	0.021	1

最小只有 1%, 都未达到 C30 混凝土抗拉强度. 远离台端搭板的负弯矩作用下的应力越来越小, 有的甚至可以忽略.

表 2 正弯矩作用下比值

表 3 水平力作用下比值

截面位置	σ (正弯矩)/MPa	σ (竖向荷载)/MPa	$\eta/\%$
1/16	0.165	0.438	37.7
2/16	0.131	0.853	15.4
3/16	0.108	1.680	6.4
4/16	0.074	2.514	2.9
3/8	0.026	3.759	0.7
4/8	0.012	4.425	0.3
5/8	0.008	3.716	0.2
6/8	0.003	2.543	0.1
7/8	0.001	0.873	0.1

截面位置	σ (水平力)/MPa	σ (竖向荷载)/MPa	$\eta/\%$
1/16	2.527	0.438	577
2/16	2.373	0.853	278
3/16	2.102	1.680	125
4/16	1.857	2.514	74
3/8	1.521	3.759	41
4/8	1.210	4.425	27
5/8	0.914	3.776	25
6/8	0.692	2.523	28
7/8	0.325	0.873	37

由表 2 可知: 在端部正弯矩作用下, 搭板下表面的应力均较小, 搭板近台端应力最大值为 0.165 MPa, 远台端应力最小值为 0.001 MPa; 自搭板近台端 1/16 和 2/16 截面处, 由正弯矩作用产生的搭板底面应力与竖向荷载产生的底面应力百分比分别为 37.7% 和 15.4%, 其他各截面百分比均未达到 10%. 且正弯矩产生的搭板底面应力是搭板自近台端向远台端逐渐减小的, 而竖向荷载产生的应力是呈两头小、中间大状态, 符合实际情况.

由表 3 可知: 在温降荷载产生的端部水平力作用下, 搭板下表面的应力水平较高. 搭板自近台端应力逐渐减小, 在搭板近台端应力大于 2 MPa, 远台端应力小于 0.1 MPa, 影响水平明显大于表 1 和表 2 所述.

结合上述 3 种情况, 搭板端部水平力作用下搭板下表面产生的应力水平较高, 对搭板内力计算影响很大, 是最主要的因素.

3 简支梁修正法

常规有缝桥梁搭板的内力计算方法有简支梁法和弹性地基梁法, 由弹性地基理论, 将搭板视为单位板宽的简支梁来分析计算^[10]. 在 SIAB 搭板的内力计算中, 两种计算方法都忽略了搭板由温变引起的水平拉应力的作用, 其中, 简支梁法除了未考虑由温变引起的水平拉应力作用外, 也忽略了弹性地基的支撑作用. 所以, 对于 SIAB 搭板, 不能将其简单地视为弹性地基上的简支板.

简支梁修正法在简支梁法的基础上做出修正, 提出两个修正搭板长度的系数 α 和 β 分别用来修正搭板下面弹性地基对搭板的支撑作用和由温变引起的水平拉应力的作用. 然后, 用 α 和 β 的乘积 γ 作为综合修正系数, 用 γ 乘以搭板长度, 由式(9)得到搭板的控制弯矩, 有

$$\frac{1}{8}q(\gamma l)^2 + P\left(\frac{\gamma l}{2} - 0.7\right) = M, \quad (10)$$

式(10)中: 通过统计大量 α 和 β 的数据可得到 γ .

3.1 SIAB 桥梁搭板钢筋应力

3.1.1 计算假定 1) 搭板参数. 搭板长度为 8 m, 厚度为 0.3 m, 采用 C30 混凝土, HRB335 钢筋, 其强度设计值为 300 MPa.

2) 地基参数. 地基的水平向、竖向基床系数分别为 $6, 10 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$.

3) 荷载作用. 假定混凝土铺装层为 100 mm, 计入 300 mm 搭板自质量, 作为分布在搭板上的均布荷载. 汽车荷载是公路-I 级, 按 JTG D60-2004《公路桥涵设计通用规范》规定布置汽车荷载, 取后轴重力. 搭板端部水平力选取一般温降情况 ($\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), 由 MIDAS 软件计算得出的搭板端部水平力作为 ABAQUS 软件的搭板模型端部水平力作用.

3.1.2 配筋计算 在一般温降荷载状态下, 分别用 3 种搭板内力计算方法计算出相应的控制弯矩、受拉区纵筋面积, 并据此对各个情况进行配筋设计. 48 m 长桥梁计算得到的搭板配筋量, 如表 4 所示.

表4 48 m长桥梁的设计配筋

Tab. 4 Reinforcement design of a 48 m long bridge

搭板设计方法	$M/N \cdot m \cdot m^{-1}$	A/mm^2	受拉区钢筋		受压区钢筋	
			纵向	横向	纵向	横向
简支梁修正法	180 880	4 150	$\Phi 22@90$	$\Phi 16@200$	$\Phi 14@90$	$\Phi 14@200$
弹性地基梁法	154 140	3 780	$\Phi 22@100$	$\Phi 16@200$	$\Phi 14@100$	$\Phi 14@200$
简支梁法	128 800	3 430	$\Phi 25@140$	$\Phi 18@200$	$\Phi 14@140$	$\Phi 14@200$

3.2 有限元计算结果比较

分别运算各计算方法设计的搭板模型,得出各模型顺桥方向各截面处受的拉区钢筋应力、搭板底缘应力和搭板挠度,比较简支梁修正法、简支梁法和弹性地基梁法的计算结果,分析简支梁修正法在SIAB搭板设计中的适用性。

各计算方法中,设计的搭板模型顺桥方向各截面处的受拉区钢筋应力大小、底缘应力大小、挠度大小如图8~10所示。

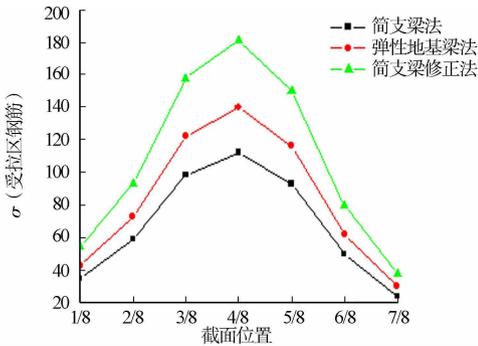


图8 搭板模型顺桥向各截面处受拉区钢筋应力

Fig. 8 Rebar tensile stress distribution along an approach slab

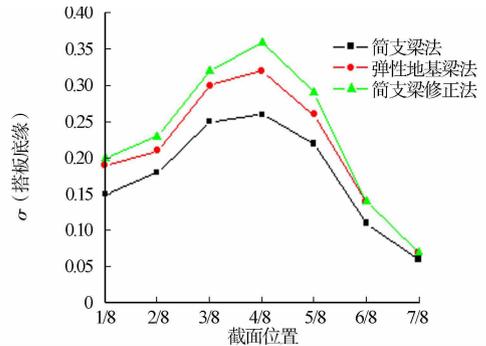


图9 搭板模型顺桥向各截面处底缘应力

Fig. 9 Bottom stress distribution along an approach slab

由图8可知:3种计算方法计算的搭板受拉区钢筋的应力中,简支梁法计算值最小,简支梁修正法计算值最大。由图9可知:用简支梁修正法计算得到的搭板底缘应力也是最大,弹性地基梁法次之,简支梁法最小。由图10可知:简支梁修正法设计的搭板挠度最大,弹性地基梁法次之,简支梁法最小。这是因为SIAB搭板在温降荷载的作用下,主梁产生的伸缩、膨胀变形,通过连接钢筋带动桥头搭板纵向平移,从而在搭板端部产生额外内力,并在受拉区与搭板受弯产生的拉应力相叠加,形成高拉应力区,增加了搭板的受力。相比弹性地基梁法和简支梁法,用简支梁修正法计算搭板的内力时,得到的搭板顺桥向各截面处受拉区钢筋应力、底缘拉应力以及挠度值都最大。在SIAB搭板的内力计算当中,通过对比提出的简支梁修正法和常规有缝桥梁搭板内力计算方法之后,发现常规有缝桥梁搭板内力计算方法是不合理的,由主梁传递给搭板的额外内力不能忽略。

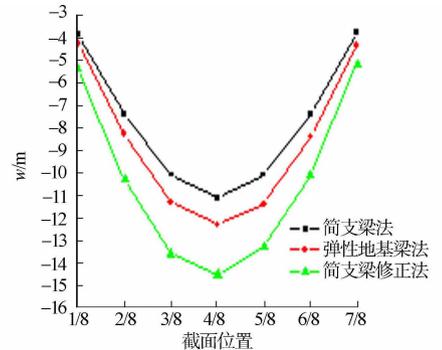


图10 搭板模型顺桥向各截面处搭板挠度

Fig. 10 Deflections distribution along an approach slab

4 结论

1) 在主梁传递至搭板端部的正、负弯矩作用下产生的应力,相对于竖向荷载产生的应力,对搭板内力计算影响很小,可以忽略。

2) 在搭板端部,主梁受温度效应的影响,发生伸缩移动,产生端部水平力,其对搭板产生的应力相对竖向荷载产生的应力,水平较高,对搭板内力计算的影响很大,不能忽略。

3) 在搭板端部受到的剪力、弯矩和端部水平力当中,剪力对搭板内力计算的影响最小,其影响可以

忽略。

4) 与常规有缝桥梁搭板的简单受力相比,SIAB搭板的受力更为复杂。常规有缝桥梁搭板的基准内力计算方法在SIAB搭板中不适用。用于SIAB搭板的内力计算方法应该考虑搭板由温变引起的水平拉应力的作用和弹性地基的支撑作用。

参考文献:

- [1] PHARES B M, FARIS A S, GREIMANN L, et al. Integral bridge abutment to approach slab connection[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(2): 179-181.
- [2] 乔华. 桥头搭板设计方法及技术参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2011: 1-2.
- [3] RANDY D, MARTIN M, ASCE T H. Structural design and construction issues of approach slabs [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2013, 18(1): 12-20.
- [4] WANG Tianli, LI Qingning, HU Dalin. The review about a new type of bridge structure-semi-integral abutment jointless bridge[C]//Proceedings of the International Conference of Architecture and Technology (I). Xi'an: Trans Tech Publications LTD, 2011: 72-75.
- [5] 金晓勤, 邵旭东. 半整体式无缝桥梁研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 68-73.
- [6] 占雪芳, 邵旭东. 半整体式无缝桥中带预压缝的配筋接线路面温降效应[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 74-78.
- [7] 张荣. 弹性地基梁计算模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007: 1-2.
- [8] 吴艳红, 郭春霞, 梁志刚. 考虑纵向摩阻时弹性地基梁的弯曲[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 6(3): 379-382.
- [9] 王智德. 搭板设计参数优化解决桥头跳车的研究及应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 10-11.
- [10] 宋娃丽, 史文革, 王凤岐. 桥头搭板的受力计算[J]. 河北工业大学学报(自然科学版), 1999, 28(4): 95-98.

Adaptability Analysis of Conventional Internal Force Calculation Method for Approach Slab of SIAB

ZHUANG Yizhou¹, REN Weigang¹, CHEN Xiaoqin²,
HAN Yutian¹, WANG Shengzhi¹, TIAN Wei¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Architecture and Art College, Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, China)

Abstract: The adaptability of calculation method for internal forces of approach slab in semi-integral abutment bridge (SIAB) was discussed. Firstly, the conventional bridge internal forces calculation method of approach slab was introduced. According to the structural characteristics of SIAB, the influence on approach slab near the abutment, due to horizontal force, bending moment and shear force caused by structural thermal deformation and shrinkage and creep, was analyzed. Then, FEM model of approach slab of SIAB was established, and the influence of the internal forces on the approach slab of SIAB was analyzed. The results show that the influence of the shear force and the bending moment is negligible; however, the influence of the horizontal force is significant, which would be considered in the calculation of internal force. Finally, a correction method for simply-supported beam is put forward, and a comparison of calculation methods for approach slabs between conventional bridge and SIAB is conducted, which concludes that the calculation method for calculating the internal force of approach slab in conventional jointed bridge is not suitable for SIAB.

Keywords: jointed bridges; approach slab; semi-integral abutment bridge; internal force calculation

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)