

单箱多室宽箱梁偏载增大系数经验公式探讨

高庆飞¹,王仁智¹,李钧²,郭斌强³,秦卫军⁴

(1.哈尔滨工业大学,黑龙江 哈尔滨 150090;2.黑龙江建筑职业技术学院,黑龙江 哈尔滨 150025;3.浙江省交通规划设计研究院,浙江 杭州 310000;4.吉林省交通科学研究所,吉林 长春 130012)

摘要:单箱多室宽箱梁具有整体性良好、宽度较大等诸多优点,在交通量日益增大的公路桥梁与城市桥梁中得到了广泛应用。现有单箱多室宽箱梁偏载增大系数计算方法均存在过程复杂或结果不能满足工程需求等问题,无法在初步设计中快速使用。该文探讨8个偏载增大系数的影响因素,利用横向框架法计算偏载系数,提出偏载增大系数经验公式;并运用吉林市秀水街宽箱梁桥验证。

关键词:桥梁工程;宽箱梁;单箱多室;偏载增大系数;经验公式

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

0 引言

由于现代化道路桥梁建设的飞速发展,单室多箱宽箱梁以其良好的整体性、较大的结构刚度与有效满足现代交通需求的优势,在城市桥梁设计中被广泛应用^[1]。在单箱多室混凝土宽箱梁设计中,其空间效应分析是箱梁分析的重点和难点。现有箱梁的偏载空间效应计算方法有3种:经验系数法、有限元模型计算法和结构分析法。但现有方法存在数值偏大或需要数据过多,分析过程较为麻烦等问题^[2-3],不适合初步设计单箱多室宽箱梁使用,需要一种较为精确同时兼顾方便性的计算方法。本文就单箱多室宽箱梁偏载空间效应的本质、影响因素与理论计算数值进行讨论,提炼出一种计算单箱多室宽箱梁偏载增大系数的经验公式,并运用于实际桥梁中。

1 影响因素的确定

1.1 现有偏载系数计算方法

(1) 经验系数法

在截面为单箱单室且腹板间距较小的箱梁或设

计院技术力量较弱时,常采用经验系数法计算偏载增大系数。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)推荐的偏载增大经验系数仅适用于单箱单室箱梁中,且比其他方法结果小。单箱多室宽箱梁偏载增大经验系数一般依照过往图纸或类似工程的偏载增大系数确定,精确度并不可靠。

(2) 有限元模型计算法

许多学者采用有限元模型计算偏载增大系数。然而,其建模过程复杂烦琐,需要所有截面的详细数据导致其不够简便,并不适合初步设计单箱多室宽箱梁中空间效应的计算。

(3) 结构分析法

结构分析方法是从小应力关系计算偏载增大系数。这种方法较经验系数更精确,较有限元分析更能接近偏载增大系数的力学本质。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)应用指南中第4.3.3条说明,单箱多室薄壁宽箱梁可以简化为薄壁杆件结构中的薄壁箱梁进行分析。该薄壁箱梁分析需要分别计算纵向弯曲、扭转、畸变与横向弯曲,并将各种应力进行叠加。

1.2 偏载增大系数影响因素分析

偏载增大系数影响因素分析需要使用结构分析

收稿日期:2023-03-02(修改稿)

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2017M621282);哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(编号:2019056);吉林省交通运输科技计划项目(编号:2015-1-14)

作者简介:高庆飞,男,博士,副教授.E-mail:gaoqingfei_1986@163.com

法确定。箱梁偏载增大系数分为剪应力偏载增大系数^[4-5]和正应力偏载增大系数,需要考虑纵向弯曲、刚性扭转、箱梁畸变与横向挠曲4种作用引起的剪应力和正应力。程翔云^[4]认为,混凝土箱梁一般具有较大抗扭刚度,故可以忽略其畸变变形。但钟新谷等^[6]在采用微分方程通解式为单元形函数分析畸变剪应力后认为,不能忽略畸变剪应力,在宽箱梁中畸变剪应力和扭转剪应力大小相近,影响相当,需要考虑。

箱梁偏载效应空间分析主要考虑纵向弯曲应力与扭转应力,忽略畸变与横向弯曲影响。纵向弯曲正应力与剪应力可以使用结构力学中中等梁公式,扭转作用采用文献[7]的改进实用乌氏第二理论。由此认为,单箱多室宽箱梁偏载增大系数可能的影响因素为:箱室数量、直腹板与斜腹板、悬臂宽度、桥面宽度、箱梁梁高与顶底板厚度、桥梁跨径与支座形式。

1.3 截面数据选取

选取齐齐哈尔嫩江大桥的单箱单室变截面箱

梁^[8]、广州全胜大桥的单箱单室箱梁^[9]、某立交桥的单箱双室箱梁^[10]、10 m 简支梁的单箱三室模型梁^[11]、吉林市秀水街单箱四室连续宽箱梁桥等截面数据,收集数据见表1。

表1 截面数据选取

截面类型	腹板数量	主梁宽度/m	腹板间距/m	悬臂宽度/m
单箱单室 ^[8]	2	17.0	15.0	1.0
单箱单室 ^[9]	2	15.0	7.8	3.6
单箱双室 ^[10]	3	12.0	4.0	2.0
单箱三室 ^[11]	4	18.6	5.0	1.8
单箱四室(吉林市秀水街)	5	25.5	4.5	2.9

上述偏载增大系数影响因素中,选取两大组共7个影响因素进行分析。第一组为主梁高度、顶板厚度、底板厚度与腹板厚度,属于截面板厚与梁高组的影响因素;第二组为箱室数量、腹板间距、悬臂板宽度,属于桥面宽度组的影响因素。各影响因素取值范围见表2。

表2 各影响因素取值范围

项目	箱室数量	主梁宽度/m	腹板间距/m	悬臂宽度/m	主梁高度/m	底板厚度/m	顶板厚度/m	腹板厚度/m
选取截面	4	20	4	2	1.6	0.24	0.24	0.40
变化范围	1~4	16~24	3~5	0~4	1.6~2.4	0.24~0.40	0.24~0.40	0.32~0.48

2 平面框架法计算偏载增大系数

2.1 平面框架法

通过 Midas/Civil 软件,采用单梁杆系模型与横向框架模型进行计算。以单箱四室箱梁为例,首先利用六自由度空间梁单元建立 4×30 m 连续箱梁单梁模型^[12],每个单元长 2 m,共 61 个单元。在中跨跨中施加单位荷载,计算由此产生的挠度*f*,通过该挠度可以反算跨中处截面的等效竖向约束刚度。将该截面所在的单位长度梁段取为计算桥段,利用六自由度空间梁单元建立横向平面框架计算模型(图1)进行分析。

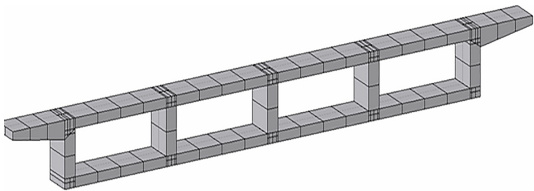


图1 单箱多室横向框架法模型图

通过分析各片箱梁连接处的变形协调以及力的

传递,求解相应各箱室平面框架的截面内力影响线,并将其转换成各片单梁的横向分布影响线。最后分析得各箱室的荷载横向分布情况,可以计算对应偏载增大系数。平面框架法计算偏载增大系数*m*如式(1)所示:

$$m = \frac{R_{\max}}{(\sum P)/n} = R_{\max} \times \frac{n}{\sum P} \tag{1}$$

式中:*R*为弹性支承的反力作用值,*R*_{max}为最不利布置情况下,腹板中最大内力数值;*n*为腹板数; $\sum P$ 为施加在该桥上的最大对称汽车荷载数值。

2.2 偏载增大系数计算结果

(1) 截面板厚与梁高对偏载增大系数的影响

主梁高度为 1.6~2.4 m,顶板与底板厚度为 0.24~0.40 m,腹板厚度为 0.32~0.48 m,偏载增大系数变化计算结果见表3。4组试验截面中,除各组自变量外,其他控制变量均为表2中标准截面。

由表3可知:梁高、顶(底)板厚度、腹板厚度在合适区间变化时,偏载系数变化不超过0.013,仅占平均偏载系数1.223的1.06%,其变化量完全可以忽略不

表 3 截面板厚与梁高对偏载增大系数的影响

变量	偏载增大系数		
	平均值	最大值	最小值
主梁高度	1.217	1.217	1.217
顶板厚度	1.240	1.250	1.227
腹板厚度	1.218	1.229	1.208
底板厚度	1.216	1.216	1.215

计。因此,不考虑箱梁截面板厚与梁高变化对偏载系数的影响。

(2) 桥梁宽度变化对偏载增大系数的影响

控制腹板间距均为 4 m,悬臂板宽度均为 2 m,选择单箱 2~4 室箱梁进行偏载增大系数平面框架法计算,结果如表 4 所示。

表 4 单箱 n 室截面的偏载系数

箱室数量	桥梁宽度/m	车道数	偏载系数	支反力/kN
2	12	4	1.131	211.2
3	16	5	1.172	205.1
4	20	6	1.217	204.4

由表 4 可以看出:在箱室数量增多、桥宽明显增大的同时,偏载系数并没有随之明显增大。偏载系数变化范围在 0.1 以内,为平均偏载系数的 0.80%,可以忽略不计。

控制箱室数为单箱四室,悬臂板宽度均为 2 m,选择腹板间距为 3~5 m 时进行偏载增大系数平面框架法计算,腹板间距与偏载系数的关系如图 2 所示。

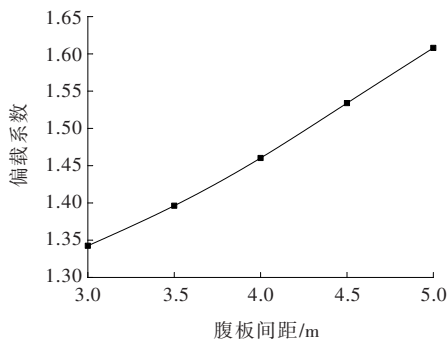
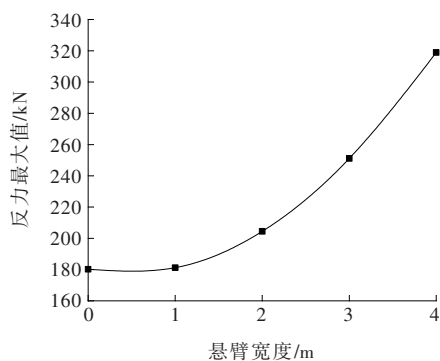


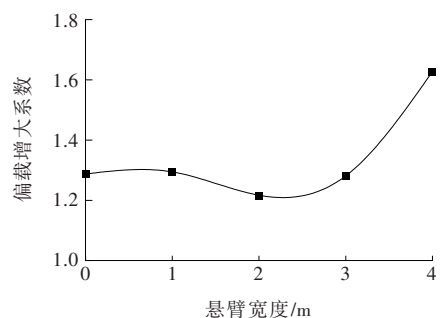
图 2 偏载增大系数与腹板间距之间的关系

由图 2 可知:腹板间距为 3~5 m 时,偏载增大系数从 1.34 增加至 1.60,变化量约为 0.3,超过了最低偏载增大系数(1.3)的 23% 以上,这种变化不可忽略,需要考虑。同时,当腹板间距为 3~5 m 时,偏载增大系数与腹板间距呈明显的正线性关系。

控制箱室数为单箱四室,腹板间距为 4 m,选择悬臂板宽度为 0~4 m 进行偏载增大系数平面框架法计算,其反力最大值与悬臂板宽度的关系如图 3 所示。



(a) 反力最大值



(b) 偏载增大系数

图 3 反力最大值、偏载增大系数与悬臂板宽度的关系

由图 3 可知:箱梁悬臂宽度为 2~3 m 时,偏载增大系数存在最低值,此后,箱梁的悬臂宽度增加时,其偏载增大系数显著增大,最大时可以达到 1.62,较原计算单箱四室宽箱梁偏载系数的均值 1.22 增大了 33%,为规范推荐数值 1.05 的 1.54 倍,说明宽悬臂板箱梁偏载系数必须经过更为详细的计算。

因偏载增大系数数值会受到桥梁宽度改变带来的车道布置等其他因素影响,无法与悬臂宽度变化直接拟合成为函数;相对地,悬臂板宽度与反力最大值大小可以形成较为明显的二次函数关系,悬臂板宽度为 0~4 m 时,反力大小随悬臂板宽度增加而持续快速增加。

3 偏载增大系数经验公式

3.1 经验公式建立

针对腹板间距为 3~5 m,悬臂宽度为 0~4 m 的常见单箱多室宽箱梁,可以包络地近似认为其每一片腹板上受力均约为 220 kN,其偏载系数 m 计算经验公式如下:

$$m = 1.57\eta_1\eta_2\frac{n}{k} \quad (2)$$

$$\eta_1 = 0.1 \times b_1 + 0.6 \tag{3}$$

$$\eta_2 = 0.05 \times (b_2^2 - b_2) + 0.9 \tag{4}$$

式中: η_1 为箱梁腹板间距修正系数; η_2 为箱梁悬臂板宽修正系数; k 为加载在箱梁上的车道数; n 为腹板数; b_1 为箱梁腹板间距,取值范围为3~5 m; b_2 为箱梁悬臂板宽度,取值范围为0~4 m;当 $b_2 < 1$ m时, η_2 取0.9。

3.2 实际桥例验证

将上述公式用于吉林市秀水街连续宽箱梁桥中,将该桥的斜腹板简化为直腹板,其跨径布置为4×30 m,主梁采用单箱四室箱形截面,梁高2 m,顶宽25.3 m,腹板厚400 mm,顶板220 mm,底板250 mm,悬臂宽度3.05 m,腹板间距为4.8 m,布置六车道。

使用平面框架法计算其腹板所受内力与偏载系数,经Midas/Civil计算得到其对应每块腹板受力为269 kN,偏载增大系数为1.606,共5块腹板,布置六车道。将上述参数代入经验公式,计算偏载系数为1.70,与Midas计算值误差在6%以内,说明该经验公式在平常设计中可以使用,满足初步设计要求。

3.3 相关文献对比

各科研人员与设计院计算偏载增大系数的方法与数值各不相同,表5为现有偏载增大系数推荐值,由表5可以看出:现有单箱多室箱梁偏载增大系数的推荐值较规范中经验数值1.15与1.05大。推荐偏载系数1.15~1.78范围与本文中计算得到的偏载系数1.13~1.62范围基本相符。

表5 现有单箱多室箱梁偏载增大系数计算方法与推荐值

学者	计算方法	推荐偏载系数
程观奇等 ^[13]	梁格法分析实际桥例	1.33
孙恒等 ^[14]	刚接板法计算常见桥型	1.15~1.32
郭兴等 ^[15]	有限元法计算挠度与应力	1.30~1.78
各设计院	工程经验	1.30~1.60

4 结论

(1) 通过对3种偏载增大系数计算方法进行对比,从力学上采用结构分析法分析单箱多室宽箱梁偏载增大系数的影响因素,并通过对其他文献进行总结,提炼出标准截面数据。

(2) 据对照组与试验组截面数据,利用Midas/Civil建立横向框架法模型,计算偏载增大系数,最后

按不同影响因素组进行分析。箱梁截面的板厚与梁高对偏载增大系数影响较小,可以忽略不计;箱梁截面宽度组中,箱室数对偏载增大系数影响较小,腹板间距和悬臂板间距对偏载增大系数影响较大。

(3) 根据上述分析影响因素构造经验公式,通过腹板最大包络支反力包络常规偏载系数,同时考虑腹板宽度和悬臂板宽度两个修正系数。经过吉林市秀水街连续宽箱梁桥实际桥例验证该公式,能够满足初步设计要求。与相关文献偏载系数进行对比,偏载增大系数数值范围基本符合现有方法推荐范围。

参考文献:

[1] 董爱平,郭增伟,李龙景.混凝土宽箱梁汽车偏载效应分析[J].土木工程与管理学报,2018,35(6):117-122,156.

[2] 彭德运,丁敬,李正.城市高架桥连续宽箱梁空间效应研究[J].公路,2012,57(8):134-138.

[3] 马兆锐,秦道标,黄正荣,等.基于实体单元的等截面宽箱梁有限元分析[J].公路,2017,62(12):134-139.

[4] 程翔云.连续箱梁桥内力增大系数的计算模型[J].重庆交通大学学报,2006,25(2):8-11,15.

[5] 苏红军.混凝土箱梁桥剪应力偏载系数简化计算方法[J].中外公路,2020,40(1):155-159.

[6] 钟新谷,舒小娟,张昊宇.预应力混凝土箱梁横向框架效应有限元分析[J].计算力学学报,2013,30(4):549-553.

[7] 朱怡,徐栋.箱梁活载正应力和剪应力放大系数讨论[J].结构工程师,2006,22(4):29-33,40.

[8] 丛欣建.箱梁的扭转畸变分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2005.

[9] 赵超.箱梁扭转和畸变的有限元分析[D].湘潭:湖南科技大学,2013.

[10] 彭静,谢涛,钱由胜.连续箱梁桥荷载试验中梁格模型与单梁模型计算对比研究[J].施工技术,2018,47(14):52-54,76.

[11] 张珂苑.正对称荷载作用下单箱三室箱梁弯曲的空间力学行为理论与试验研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.

[12] 黄运林,杨聪,万和安,等.石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J].中外公路,2019,39(1):101-104.

[13] 程观奇,王博.基于梁格法的单箱多室宽箱梁偏载系数研究[J].四川建筑,2019,39(1):164-166.

[14] 孙恒.单箱多室宽箱梁偏载系数敏感性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(5):199-200.

[15] 郭兴,何川.宽箱梁桥偏载增大系数的讨论[J].建设科技,2016(14):152-153.