

梁格法求转体曲线桥预偏心的方法研究

薛 达

(广东省铁路规划设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要: 转体曲线桥预偏心值的计算精度要求比一般弯梁桥要求更高,是转体成功的重要因素之一,而理论公式推导难度大,实体建模耗时久,影响设计时效。以 2×68 m 转体曲线桥为背景,对梁格法求预偏心进行方法研究,先由矩形曲线梁入手,理论推导预偏心公式,再辅以大量梁格模型进行结果对比,得出一般规律,并提出梁格收敛法求预偏心,并将方法逐步推广至箱梁结构。研究成果可对转体曲线桥的预偏心准确设置提供指导作用。

关键词: 桥梁工程;预偏心计算;数值计算;转体曲线桥;梁格法

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)09-0222-06

0 引 言

随着我国基础设施建设和城镇化的大力发展,出现了很多桥梁上跨铁路或重要公路的情况,往往桥梁转体成为首选方案。与传统施工工艺相比,转体施工工艺具有不干扰交通、不间断通航、可跨深沟、河流、交通频繁的道路的特点,同时也具有施工快速、经济高效、对既有线运营安全威胁小等优点,被越来越广泛地采用。而由于地形、征地拆迁或既有交通设施的影响,在某些情况下不得不采用曲线桥转体跨越。对于曲线桥转体,球铰预偏心准确设置是转体成功的重要因素之一。

陈爱荣^[3]阐述了大跨径小半径曲线桥梁转体结构的设计要点和设置恒载横向偏心的处理方法,但并未讲述横向偏心计算方法。田山坡^[4]对小半径曲线转体桥调偏心进行研究,讲述上转盘永久配重、临时配重技术等施工方法。王博妮^[5]对小曲线半径转体桥梁不平衡力矩进行研究,提出构造纠偏、桥面配载、不平衡力矩称重等方法,主要研究纠偏措施。曾明辉^[6]提出用最小扭转应变能设置连续弯梁桥支座预偏心,理论抽象,工程设计普遍性不强,且研究对象不是曲线桥转体。鲍志旺等^[7]采用 ANSYS 实体建模,对独柱小半径匝道弯桥的预偏心设置进行分析。郑超等^[8]建立单梁和梁格模型,对小半径连续弯箱梁桥的支座预偏心设置进行分析对比,发现单梁法得到的支座反力与实际受力状态不符,而用梁格法

得到的结果与实际情况较接近,但都是定性的分析,缺少对梁格法解与准确解的误差比较。

与预偏心计算有关的文献多以连续弯梁桥为研究对象,而与转体有关的文献均未讲述预偏心如何准确计算,相比常规曲线桥,转体曲线桥的预偏心精度要求更高。若用单梁法,工程精度得不到保证,而用实体建模时间则较长,复杂桥梁建实体有可能布尔操作失败。用梁格法是可行的方法,且市面上多数桥梁专业软件均有快速建立单梁建立梁格模型的功能模块,能够满足设计效率,但对于不同曲线半径、桥宽、桥长的转体结构,梁格法是否均适用,以及需划分几片子纵梁才能满足转体曲线桥精度要求,未有类似研究的文献。

本文以东莞塘厦镇环市南路上跨广深铁路 2×68 m 转体桥梁为背景,对梁格法求转体曲线桥预偏心进行研究,可对转体曲线桥的预偏心准确设置提供指导作用。

1 工程概况

环市南路上跨广深铁路工程位于东莞市塘厦镇,由于广深铁路繁忙,且工程附近存在密集房屋,受多个客观因素制约,上跨桥梁位于半径 400 m 的曲线上,采用 2×68 m 预应力混凝土 T 构逆时针转体 70.5° 跨越广深铁路四股道以及塘天中路,转体重量约 15 000 t。桥宽 25.5~29.55 m,采用单箱三室斜腹板箱形截面,中支点中心梁高 6.5 m,端部中心梁高 3.0 m,梁底线形按 1.8 次抛物线变化。顶板宽 29.55 m,底板宽度为 19.525 m。箱梁两侧悬臂板长 3.5 m,悬臂板

收稿日期: 2021-12-01

作者简介: 薛达(1987—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

端部厚 20 cm,根部厚 60 cm。悬臂板与外腹板加腋处采用半径 $R=0.2$ m 圆弧过渡。主桥采用墩梁固结,桥墩高 9.0 m,设上下承台,承台下设置 24 根 1.8 m 钻孔灌注桩。桥型布置图、转体墩处横断面见图 1、2。

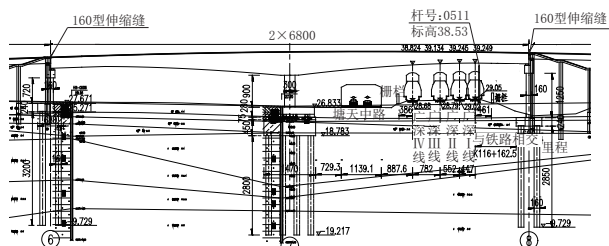


图1 桥型布置图

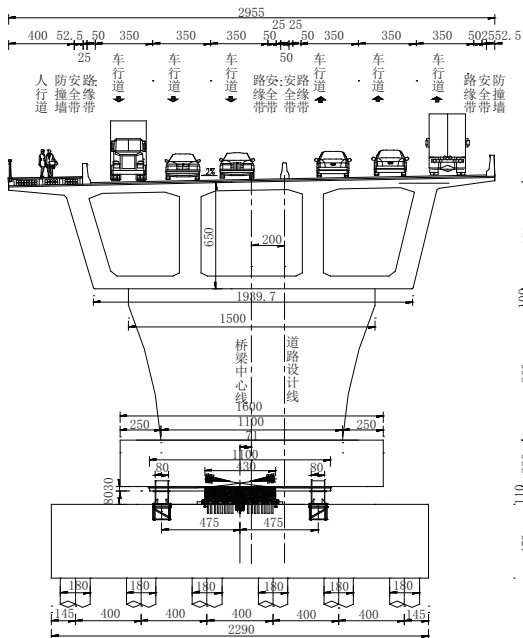


图2 转体墩处横断面图

本项目的结构特点:空间关系复杂,主梁平面曲线半径小、顶板单向横坡、内外斜腹板不等高、变梁高和变腹板厚等。若建立实体模型求预偏心不仅难度很大且花费时间久,往往没有充足的设计时间,而预偏心的准确设置对桥梁的成功转体至关重要。

2 单梁法求曲线桥预偏心的弊端

单梁法是应用最广泛的有限元计算方法,其计算的内力、变形等在多数时候均能满足工程精度需求,但对于小半径曲线转体桥梁,预偏心的偏差较大,其根本原因是现行的杆系有限元软件,都是以直代曲来进行力学求解,如图 3 所示。由于内移区、重叠区和外空区 1、2 的影响,截面重心较实际重心有所内移,曲线半径越小内移越多。对于外空区 1 和内移区的影响可通过减小单元长度来减小,而对于重叠区和外空区 2,减小单元长度只是将重叠区面积匀给其他单元,无法消除重叠区的影响。

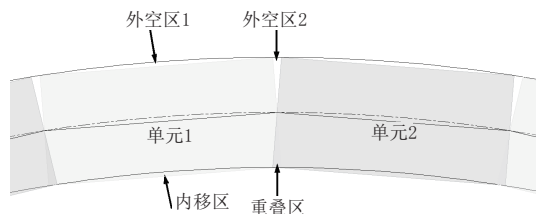


图3 单梁模型以直代曲示意图

3 矩形等截面转体曲线桥

由于箱梁截面可近似看作外矩形减内矩形,故箱梁与矩形梁可能有类似的规律,因此先从矩形截面梁入手,进行梁格法求预偏心的方法研究,对箱梁结构有一定指导意义。研究思路为先进行预偏心理论公式推导,再进行梁格模型计算,最后对梁格结果与理论值进行对比,分析误差找出规律。

3.1 预偏心理论公式推导

假设矩形截面曲梁的外径为 R ,内径为 r ,单位梁高,建立平面极坐标系 $\rho-\theta$,如图 4,微元体的面积为 $\rho \cdot d\rho \cdot d\theta$,到 A-A 轴的距离为 $\rho \cdot \cos\theta$ 。偏心距的公式推导如下:

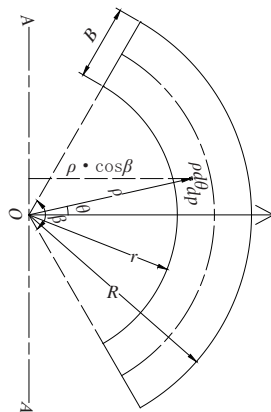


图4 矩形曲梁偏心距公式推导图

到 A-A 轴的面积矩:

$$\int_{-\beta/2}^{\beta/2} \int_r^R \rho^2 \cos\theta d\rho d\theta = \int_{-\beta/2}^{\beta/2} \cos\theta d\theta \int_r^R \rho^2 d\rho$$

$$= \int_{-\beta/2}^{\beta/2} \cos\theta d\theta \int_r^R \rho^2 d\rho = \frac{2}{3} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot (R^3 - r^3)$$
(1)

曲梁平面面积:

$$S = \frac{1}{2} \beta (R^2 - r^2)$$
(2)

曲梁形心到 A-A 轴的距离:

$$\text{式(1)、式(2)} = \frac{4 \sin(\frac{\beta}{2}) \cdot (R^2 + Rr + r^2)}{3\beta(R+r)}$$
(3)

曲梁形心到 B-B 轴的距离:

$$e = \frac{4 \sin(\frac{\beta}{2}) \cdot (R^2 + Rr + r^2)}{3\beta(R+r)} - \frac{R+r}{2}$$
(4)

曲梁支反力 F 、反力矩 M :

$$F = S \cdot 1 \cdot \gamma_{\text{混凝土}} = \frac{1}{2} \beta \cdot (R^2 - r^2) \cdot 26 = 13 \beta (R^2 - r^2)$$

$$M = F \cdot e = \frac{52}{3} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot (R^3 - r^3) - \frac{13}{2} \beta (R+r)^2 (R-r)$$

3.2 梁格模型的参数选取

为保证规律研究的通用性,梁格模型尽量包括工程上可能遇到的曲线半径、桥长、桥宽等情况。曲线半径根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)表 7.3.2 确定,可以看出曲线半径在 15~1 000 m,详见表 1。转体单侧悬臂长取 30~100 m,桥宽取 5~50 m,梁格划分子纵梁片数取 2~50 片。梁格参数见表 2,共需建立 3 840 个梁格模型。

表 1 《公路路线设计规范》圆曲线最小半径表

设计速度 V /(km·h ⁻¹)		120	100	80	60	40	30	20
圆曲线最小半径(一般值)/m		1 000	700	400	200	100	65	30
圆曲线	$I_{\max} = 4\%$	810	500	300	150	65	40	20
最小半径	$I_{\max} = 6\%$	710	440	270	135	60	35	15
(极限值)	$I_{\max} = 8\%$	650	400	250	125	60	30	15
/m	$I_{\max} = 10\%$	570	360	220	115	—	—	—

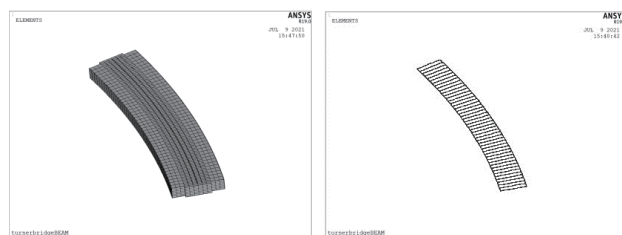
表 2 各梁格模型参数表

模型参数	曲线半径 /m	桥长 /m	桥宽 /m	子纵梁片数
参数值	15	60	5	2
	30	80	10	3
	65	100	15	4
	100	120	20	5
	200	140	25	10
	400	160	30	50
	700	180	35	
	1 000	200	40	
各参数数量	8 个	8 个	10 个	6 个
	3 840			

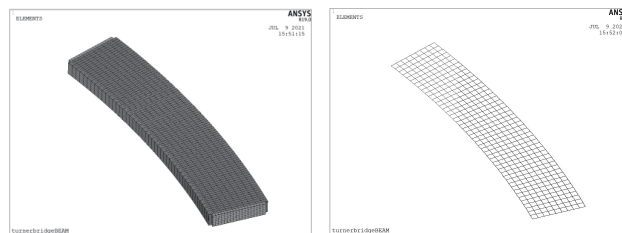
由于模型数量庞大,故采用 ANSYS 的 APDL 参数化编程语言进行编程计算。具体方法如下:首先通过 4 层循环嵌套将表 2 的参数进行一一组合,得到 3 840 行×4 列的二维数组,即每个梁格模型的参数;然后编写基于表 2 中 4 个参数的梁格模型宏命令;最后写循环调用语句,逐行调取二维数组的数据进行梁格计算,得到支反力结果。

表 2 可以看出存在桥宽大于曲线半径的情况,显然不符合实际,故编程中添加了判断语句进行剔除,最终有效模型数为 3 600 个。

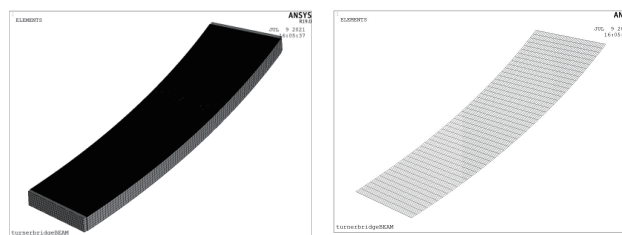
由于研究的是曲梁,故梁格单元采用 BEAM189 单元,该单元为 3D 二次有限应变梁单元,可很好地模拟曲线梁。图 5 为 2、10、50 片子纵梁的梁格模型。



(a)截面消隐前后的划分成 2 片子纵梁的梁格模型



(b)截面消隐前后的划分成 10 片子纵梁的梁格模型



(c)截面消隐前后的划分成 50 片子纵梁的梁格模型

图 5 梁格模型图

3.3 梁格模型计算结果分析

将梁格模型的反力与理论值进行比较,误差对比如图 6 所示,反力误差在 0.000 02%,与理论反力值几乎相等,而部分模型的反力矩误差较大(最大达 5 237%),且误差较大的多为 2 片子纵梁的模型。可见稀疏梁格的误差较大,现对划分子纵梁片数与预偏心误差的关系进行研究,关系图示于图 7。

由图 7 可以看出以下规律:

(1)当为稀疏梁格,预偏心误差值分布发散,有些模型误差最大,有些模型误差较小。

(2)子纵梁片数的增加可以极快地减小误差值,说明只要适当地划分就可得到很好的误差收敛效果。

(3)当达到致密梁格时,误差均趋于 0,即等于理论值。

3.4 求预偏心的推荐方法—梁格收敛法

通过 3.3 节分析,说明用梁格法求预偏心是可行的,但子纵梁的合理划分片数却不能得到确切的答案,划分太疏无法满足工程要求,划分太密则带来时间成本的开销。显然准确算出预偏心的代价太大,工程上常采用配重来调整转体桥的偏心值,因此只要得到满足工程精度要求的预偏心值即可。如图 8 所示,只要能证明梁格求得的预偏心值与精确值的误

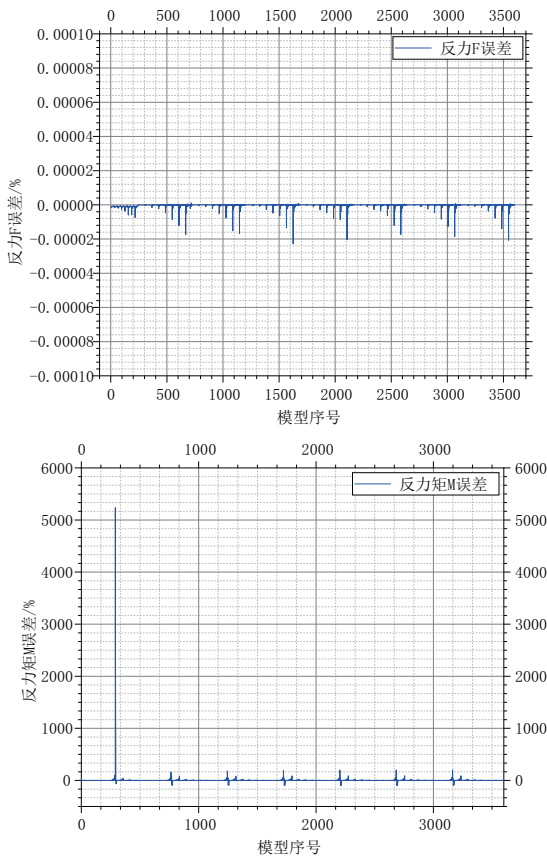


图6 梁格模型的支反力结果与理论值的误差比较图

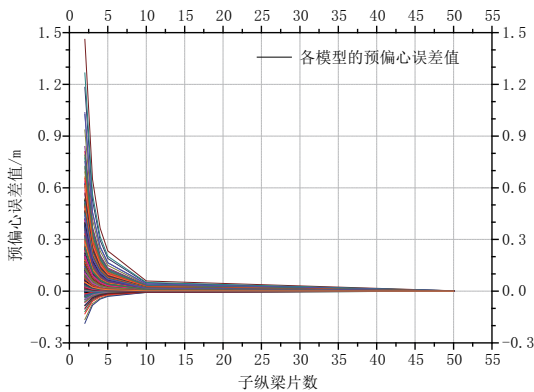


图7 预偏心误差与划分子纵梁片数的关系图

差小于配重可调值 δ ,则该预偏心值即可满足工程要求。

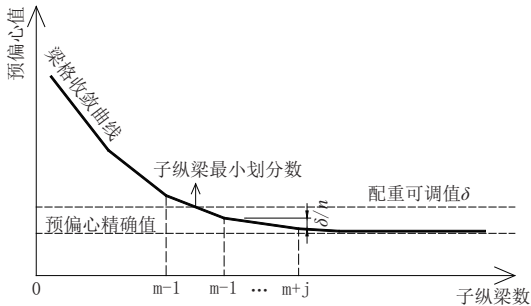


图8 梁格收敛曲线分析图

由图7可以看出,梁格误差收敛曲线与指数曲线 $y=ka^x$, ($0 < a < 1, k > 0$)相似,采用指数曲线对误差最大的梁格收敛曲线进行拟合,如图9所示,可以

看出拟合较好,对应的指数方程为 $y=3.8 \times 0.67^x$ 。

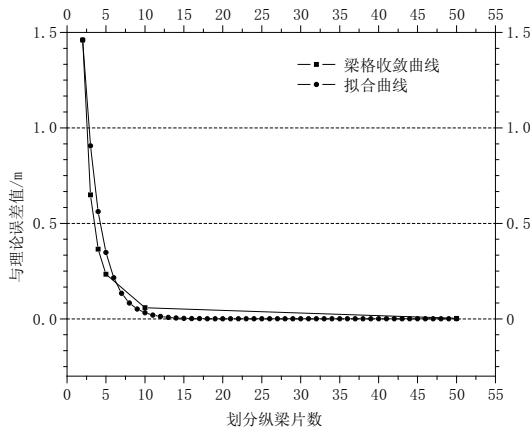


图9 指数函数拟合曲线

鉴于梁格误差曲线的收敛性,引入 δ 与有关的参数 δ/n (δ 为配重可调值, n 为待求的调整系数)作为收敛标准,假设子纵梁片数为 m 时开始满足收敛标准 δ/n ,即满足公式 $ka^m - ka^{m+j} = ka^m(1-a^j) \leq \delta/n$,经化简,得 $ka^m \leq \delta/[n(1-a^j)]$,显然只有 $n(1-a^j) \geq 1$,预偏心才能满足 $ka^m \leq \delta$,即梁格预偏心值与精确值的误差 ka^m 小于 δ 配重可调值。

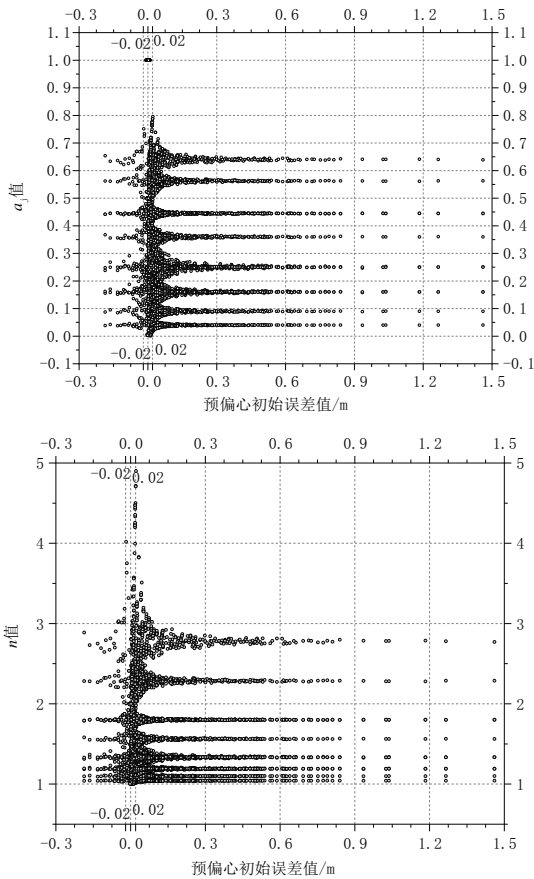


图10 a' 值和 n 值散点图

因 n 、 a' 值的准确确定是困难的,为得到普遍性规律,基于统计学思想,对图7的所有曲线(即第3.2节所述的3600个模型)进行 a' 和 n 值计算,见图10。

由于配重可调值 δ 一般为 0.02~0.1 m, 故可剔除初始值小于 0.02 m 的曲线, 可以看出, a_j 值范围为 0.018~0.796, n 值范围为 1.02~4.90, 可以看出初始误差越小 n 值离散性越大, 而初始误差大时, n 值小于 3, 为便于设计应用, 偏安全取 $n=5$ 。

综上提出梁格收敛法, 具体方法如下:

(1) 先按单梁法进行力学计算, 并结合实际转体桥梁, 计算最大平衡配重比时能调整的偏心值 δ , 取 $\delta/5$ 作为两次梁格模型的收敛标准。以背景工程为例, 外侧斜腹板最大配重 1 200 kN, 转体自重加配重共 145 296.9 kN, 距球铰中心 10 m, 则 $\delta/5=1\ 200 \times 10/145\ 296.9/5 \approx 0.017$ m, 则收敛标准定为 0.017 m。

(2) 建立子纵梁数等于腹板数的常规梁格模型进行预偏心计算, 然后继续增加子纵梁片数进行梁格划分, 比较前后两个预偏心值的差值是否小于 $\delta/5$, 若不满足则继续划分梁格直到满足为止。注意对所有模型的反力进行前后模型的误差对比, 误差往往小于 0.1%, 其目的是通过反力这一指标来发现梁格建模的人为失误。

(3) 按最终梁格模型的计算结果作为预偏心值。特别地, 当预偏心值小于 0.02 m 时, 因偏心小, 易实现配重调平, 为方便设计和施工, 建议可不设预偏心。

虽然收敛标准 $n=5$ 是基于矩形截面推导出的, 但在实际运用过程中发现, 箱形截面更容易满足该收敛标准, 这是由于箱梁结构的梁格往往以腹板为子纵梁, 而腹板重量占总重量比重较大, 因此收敛速度比矩形截面更快, 也更易满足收敛标准, 在第 4 节、第 5 节可以明显看出。

4 等截面斜腹板箱形转体曲线桥

工程中用得最多是箱梁桥, 现以本工程 0 块号

支点截面为原型, 构建等截面曲线箱梁桥。首先建立单梁模型计算收敛标准采用两次梁格划分法求得预偏心, 再建立实体模型, 将单支反力和偏心距进行比较。

梁顶面可设置配重 1 200 kN, 转体自重加配重 220 276.7 kN, 则收敛标准 $\delta/5=1\ 200 \times 10/220\ 276.7/5 \approx 0.011$ m。采用桥博 V4.3 分别建立 4 纵梁和 10 纵梁的梁格模型来分别计算预偏心, 用 ANSYS 建立实体模型进行结果校核。模型如图 11 到 13 所示, 计算结果见表 3。

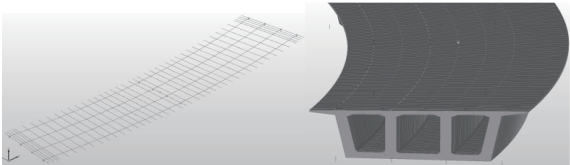


图 11 划分成 4 片子纵梁的梁格模型图

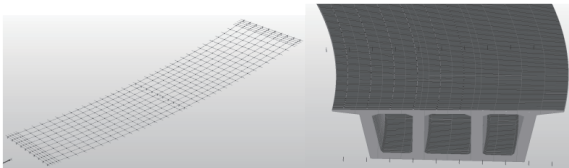


图 12 划分成 10 片子纵梁的梁格模型图



图 13 ANSYS 实体模型图

可以看出, 所有模型的反力 F 几乎相等, 且预偏心结果呈收敛趋势, 与第 3.3 节分析的规律一样。10 纵梁与 4 纵梁的梁格偏心距相差 0.005 2 m, 显著小

表 3 单梁、梁格、实体模型计算结果对比表

分类		单梁	4 纵梁梁格	10 纵梁梁格	实体模型
反力	模型值 /kN	220 276.7	220 542.5	220 537.9	220 540.3
	与实体误差百分比	-0.119 52%	0.001 00%	-0.001 09%	—
	前后模型对比	—	0.120 67%	-0.002 09%	—
反力矩	模型值 /(kN·m)	396 515.3	366 674.0	367 801.2	368 240.0
	与实体误差百分比	7.678 50%	-0.425 27%	-0.119 16%	—
偏心距	模型值	1.800 08	1.662 60	1.667 75	1.669 72
	与实体误差百分比	7.807 35%	-0.426 26%	-0.118 07%	—
	与实体误差值 /m	0.130 36	-0.007 12	-0.001 97	—
	前后模型差值 /m	—	0.137 48	-0.005 15	—
	收敛标准 /m		0.011		—

于 0.011 m,故预偏心值为 1.668 m。经计算,此次案例中的 α 值为 0.055, n 值为 $1.06 < 5$,说明基于大量模型统计得到的 $n=5$ 的收敛标准是偏于安全的,能满足工程精度要求。

5 本工程的预偏心求解

经过上述的规律总结和方法应用,现计算本工程斜腹板变高曲线箱梁桥的预偏心值。梁顶面可设置配重 1 200 kN,收敛标准 $\delta/5=1\ 200 \times 10/145\ 296.9/5 \approx 0.017\text{ m}$ 。4 纵梁和 10 纵梁的梁格模型如图 14 所示。计算结果见表 4。

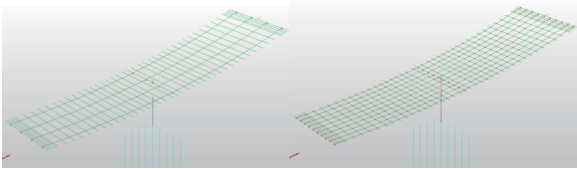


图 14 梁格模型图

表 4 单梁、梁格模型计算结果对比表

分类	单梁	4 纵梁梁格	10 纵梁梁格
反力	模型值 /kN	145 296.9	145 356.9
	前后差值百分比	0.041 29%	-0.009 43%
反力矩	模型值 /(kN·m)	121 038.7	104 663.6
	模型值	0.833 04	0.720 05
偏心距	前后模型差值 /m	0.113 00	-0.001 81
	收敛标准 /m	0.017	

可以看出,所有模型的反力 F 几乎相等,且预偏心结果呈快速收敛趋势。10 纵梁与 4 纵梁的梁格偏心距相差 0.001 8 m,显著小于 0.017 m,满足工程实际应用。最终本工程的预偏心设置为偏向曲线内侧

72 cm。

6 结 语

本文以环市南路上跨广深铁路 $2 \times 68\text{ m}$ 转体桥梁为背景,通过对矩形等截面曲线桥预偏心的理论公式推导,对不同曲线半径、桥宽、桥长和划分子纵梁数的 3 600 个梁格模型进行计算和对比,得出所有模型的反力几乎相等,子纵梁片数的增加可以极快地减小梁格预偏心误差,且呈绝对收敛趋势的规律。提出梁格收敛法求预偏心,并用该方法对等截面曲线箱梁桥进行计算,同时用实体模型进行验证,结果和规律曲线均十分吻合,最后计算出背景工程的预偏心值。本文的方法可应用于所有转体曲线桥预偏心的计算。

参考文献:

[1] E.C.汉勃利.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.05.
[2] 徐栋,赵瑜,刘超.混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M].北京:人民交通出版社,2013.12
[3] 陈爱荣.大跨径小半径曲线桥梁转体结构设计[J].城市道桥与防洪,2021(6):105-108.
[4] 田山坡.小半径曲线转体桥调偏心研究[J].城市道桥与防洪,2018(4):116-118.
[5] 王博妮.小曲线半径转体桥梁不平衡力矩研究[J].科技与创新,2016(10):125-126.
[6] 曾明辉.连续弯梁桥支座预偏心设置研究[D].陕西:长安大学,2005.
[7] 鲍志旺,王晓芳,刘双喜.独柱小半径匝道弯桥的预偏心设置分析[J].桥隧工程,2017(9):182-183.
[8] 郑超,张永军.小半径连续弯箱梁桥结构分析与支座预偏心设置[J].工程技术,2015(3):135-136.

(上接第 221 页)

响阻尼器可靠性,建议计算取值范围为 0.3~1.0。

(4)虽然较大的阻尼系数 C 有利于提高结构减震性能,但大型阻尼器布置不便,且过大阻尼力对桥塔有不利影响。在同类工程中,建议沿横桥向设置多个小型阻尼器,在参数合理范围内选择较大阻尼常数 C 并配置较小速度指数 α 。

参考文献:

[1] 陈威.粘滞阻尼器的理论和实验研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
[2] 王志强,胡世德,范立础.东海大桥粘滞阻尼器参数研究[J].中国公路学报,2005,18(3):37-42.
[3] 巫生平,张超,房贞政.斜拉桥粘滞阻尼器设计方案及参数回归分析[J].桥梁建设,2014,44(5):21-26.

[4] 张文学,黄荐,王景景.斜拉桥面相对高度对粘滞阻尼器减震效果影响研究[J].振动与冲击,2015,34(16):43-47.
[5] 聂利英,郭其远,李建中.设置纵向大型液体粘滞阻尼器的大跨斜拉桥主梁纵向运动阻尼水平研究[J].工程力学,2015,32(9):141-148.
[6] 胡可,汪正兴,王胜斌,等.全飘浮体系斜拉桥斜置阻尼约束体系研究[J].桥梁建设,2018,48(4):22-26.
[7] 陈百奔,冯仲仁,王雄江.长周期地震动作用下斜拉桥粘滞阻尼器减震分析[J].桥梁建设,2018,48(5):75-80.
[8] 叶爱君,胡世德,范立础.超大跨度斜拉桥的地震位移控制[J].土木工程学报,2004(12):38-43.
[9] 亢兴军,李小军.大跨飘浮体系斜拉桥减震控制研究[J].振动与冲击,2007,26(3):79-82.