

钢箱格子梁桥的荷载横向分配与格子刚度的 量化关系

杨 春^{1,2}

(1. 上海顶新工程规划设计有限公司, 上海市 201315; 2. 中土大地国际建筑设计有限公司上海分公司, 上海市 201315)

摘 要: 为建立钢箱格子梁桥设置横梁的理论依据, 提出一种由目标荷载横向分配系数来确定横梁设置的方法。首先推导抗弯扭格子刚度的无量纲表达式, 然后通过计算绘制出荷载横向分配系数与抗弯扭格子刚度的关系曲线, 再计算多根横梁的格子刚度换算系数, 最后选定目标荷载横向分配系数反算所需横梁根数和横梁抗弯刚度。以交通部颁布的标准箱形钢混组合梁桥为例, 运用这个方法优化了横梁的数量和梁高。研究结果表明: 荷载横向分配系数与格子刚度之间具有一一对应关系; 箱形主梁有利于荷载横向分配, 协同工作能力比工字形主梁更好; 简支箱形钢混组合格子梁桥设置3~5根横梁即可, 跨径越小需要的横梁越多。

关键词: 格子梁桥; 格子刚度; 荷载横向分配系数; 荷载分配横梁; 钢混组合梁

中图分类号: U441; U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0096-05

Quantitative Relationship between Load Transverse Distribution and Grid Stiffness of Steel Box Grid-beam Bridges

YANG Chun^{1,2}

(1. Shanghai Dinxin Engineering Planning and Design Co., Ltd., Shanghai 201315, China; 2. Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai 201315, China)

Abstract: In order to establish the theoretical basis for setting up the crossbeam of steel box grid-beam bridge, a method to determine the crossbeam setting by the transverse distribution coefficient of target load is proposed. Firstly, the dimensionless expression of flexural and torsional grid stiffness is derived. Then, the relationship curves between load transverse distribution coefficient and bending torsional grid stiffness are drawn by the calculation. And the grid stiffness conversion coefficient for multiple crossbeams are calculated. Finally, the required number of crossbeams and bending stiffness of crossbeams are back calculated by the selected target load transverse distribution coefficient. The proposed method is used to optimize the number and height of crossbeams by the example of the standard box steel-concrete composite beam bridges issued by the Ministry of Communications. The research result shows that there is a one-to-one correspondence between the load transverse distribution coefficient and the grid stiffness. The box girder is beneficial for load transverse distribution and the collaborative working ability is better than I-shaped girder. 3~5 crossbeams are only set up for the simple-supported box steel-concrete composite grid-beam bridge. The smaller the span, the more crossbeams are required.

Keywords: grid-beam bridge; grid stiffness; load transverse distribution coefficient; load distribution crossbeams; steel-concrete composite beam

0 引 言

格子梁是一种由并列的独立主梁和具有抗弯刚度的横梁连接形成的空间结构体系, 也常称作梁格体系。格子梁桥在预制、运输、安装方面具有显著的优势, 因此在城市桥梁、公路桥梁中得到广泛使用。

格子梁桥出现于20世纪30年代, 由于受当时的计算能力限制, 这种结构并未得到广泛应用。到了20世纪50年代, Leonhardt^[1]和Homberg^[2]分别提出了格子梁的简化计算方法, 促进了格子梁桥的工程应用。

格子梁桥之所以是空间结构体系, 是因为有横梁参与受力, 将桥面上非均匀分布的荷载在横桥向进行分配, 让各片主梁协同承担。众所周知, 格子梁桥对荷载的横向分配能力与横梁刚度有关, 刚性横梁能取得最充分的横向分配效果, 但实际工程中, 横

收稿日期: 2024-06-24

作者简介: 杨春(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

梁不可能做到绝对刚性。荷载的横向分配程度与横梁刚度有何定量关系这个问题,在我国的桥梁设计规范中没有条文规定,相关研究也鲜见报道。桥梁设计师只能采用凭经验设置横梁、再做结构分析这种被动的设计方法。有些桥梁设计师担心荷载横向分配不够充分,往往过量地设置横梁,造成不必要的浪费。这种现象在实际工程中比比皆是,就连桥梁标准图集^[3-10]中也存在。

日本小西一郎发现,横梁刚度只是影响格子梁桥荷载横向分配的因素之一,控制荷载横向分配的是格子刚度^[11],但他只对钢结构工字形主梁格子梁桥的荷载横向分配作了研究。

本文将在格子刚度概念的基础上,推导出适用于钢结构箱形主梁格子梁桥的格子刚度,并对箱形主梁格子梁桥的荷载横向分配能力进行研究。

1 格子刚度的概念

格子刚度是反映横梁抗弯刚度、主梁抗弯以及抗扭刚度比值的力学参量。格子刚度分为抗弯格子刚度和抗弯扭格子刚度。如果主梁为工字形截面,抗扭刚度可忽略不计,则称之为抗弯格子刚度;如果主梁为箱形截面,抗扭刚度不可忽略,则称之为抗弯扭格子刚度。

如图1所示,由3片有抗扭刚度的主梁和1片跨中横梁构成的格子梁,主梁跨径为 L 、间距为 a 、截面抗弯刚度 EI 、抗扭刚度 GJ ,横梁截面抗弯刚度 EI_Q ,在中间主梁跨中作用一个集中力荷载 P 。

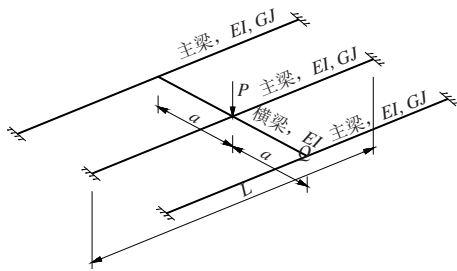


图1 抗弯扭格子刚度的计算简图

将直接受载主梁和横梁分配到的荷载分别记为 P_H 和 P_Q ,根据主梁和横梁相交处挠度相等的变形协调条件,可推导出:

$$\frac{P_Q}{P_H} = \frac{I_Q}{I} \cdot \left(\frac{L}{2a} \right)^3 \cdot \left[1 + \frac{3}{1 + \frac{EI_Q}{GJ} \cdot \frac{L}{a}} \right] \quad (1)$$

将 P_Q/P_H 定义为抗弯扭格子刚度,用符号 Z_{MT} 表示;它也表示横梁和直接受载主梁分配到的荷载比

例。式(1)可简写成 $Z_{MT} = \eta \cdot Z_M$,其中, Z_M 在文献[11]中被定义为抗弯格子刚度:

$$Z_M = \frac{I_Q}{I} \cdot \left(\frac{L}{2a} \right)^3 \quad (2)$$

η 为主梁抗扭刚度影响因子:

$$\eta = 1 + \frac{3}{1 + \frac{EI_Q}{GJ} \cdot \frac{L}{a}} \quad (3)$$

当主梁截面抗扭惯性矩 $J \rightarrow 0$ 时, $\eta \rightarrow 1$,式(1)即简化为抗弯格子刚度。当主梁截面抗扭惯性矩 $J \rightarrow \infty$ 时, $\eta \rightarrow 4$,横梁分配到的荷载增大到原来的4倍,直接受载主梁分配到的荷载减小到原来的1/4,说明箱形主梁有利于荷载的横向分配。

2 荷载横向分配系数与格子刚度的关系

根据格子刚度的力学概念,格子刚度越大,横梁分配荷载的能力越强,直接受载主梁分配的荷载越小,非直接受载主梁分配的荷载越大。本文采用荷载横向分配系数来反映格子梁桥对荷载的横向分配能力,用符号 k 表示。注意,这里所说的荷载横向分配系数与教科书中横向分布系数的概念不同,横向分布系数是多个集中力荷载合成作用的等效系数,并且荷载作用位置不一定在主梁上,而荷载横向分配系数是单个集中力荷载在各片主梁的分配比例。

很显然,荷载横向分配系数与格子刚度之间的关系是非线性的,因为即便是绝对刚性的横梁也不可能将直接受载主梁的荷载完全分配出去。经研究发现,荷载横向分配系数与格子刚度之间具有一一对应关系,主梁数量相同的同类型格子梁桥,不论几何尺寸如何变化,只要格子刚度值不变,荷载在各片主梁的分配比例就是恒定的。

当主梁仅有2片时,横梁只起到杠杆的作用,荷载横向分配系数与格子刚度无关。本文仅研究3片及以上主梁的情况。图2至图4分别给出了3、4、5片箱形主梁的主要荷载横向分配系数 k_{ij} 与抗弯扭格子刚度 Z_{MT} 的关系曲线。图中,主梁从左往右依次编号为1,2,3,..., k_{11} 和 k_{21} 分别表示集中力荷载作用于1号主梁时,1号主梁和2号主梁的荷载分配系数,其余类同。

由图2至图4的 k 与 Z_{MT} 关系曲线可以看出,一是当 $Z_{MT} \rightarrow 0$ 时,直接受载主梁的荷载分配系数 $k_{ii} \rightarrow 1$,其余主梁的荷载分配系数 $k_{ij} \rightarrow 0$,相当于单梁受力;二是当 Z_{MT} 增大到某个值后,所有 k_{ij} 都渐近恒定。

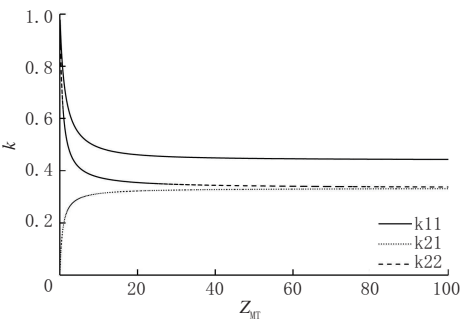


图2 三箱主梁的k与Z_{MT}关系曲线

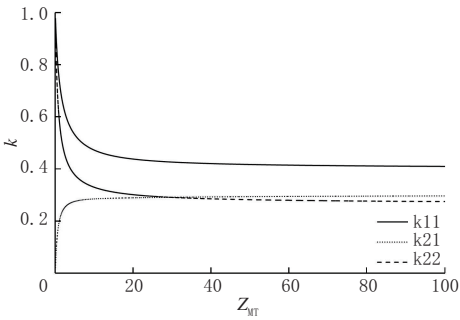


图3 四箱主梁的k与Z_{MT}关系曲线

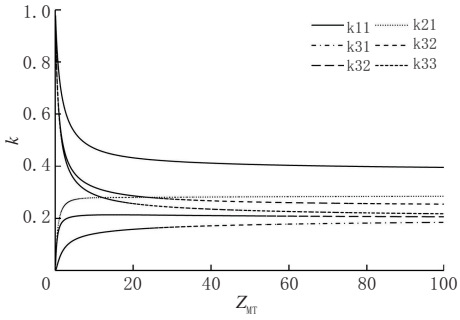


图4 五箱主梁的k与Z_{MT}关系曲线

3 半刚性抗弯扭格子刚度

从以上研究结论可知,当 $Z_{MT} \rightarrow \infty$ 时,横梁近乎刚性,可以得到最优的荷载分配效果,但是要做到这一点,就必须使横梁的截面惯性矩 I_Q 无限大,这在实际工程中是不可能做到的。由图2至图4可以看出,当 Z_{MT} 超过30后,荷载横向分配系数 k 趋于某个常数值,这说明要取得良好的荷载横向分配效果并不需要非常大的抗弯扭格子刚度。

取第*i*片主梁来研究,由于对其设计影响最大的荷载分配系数为 k_{ii} ,故研究 k_{ii} 与 Z_{MT} 的关系,以确定合适的格子刚度。将 $Z_{MT}=\infty$ 时的 k_{ii} 用 $k_{ii,\infty}$ 表示,相当于 $k_{ii,\infty}$ 的*x*%的荷载横向分配系数用 $k_{ii,x}$ 表示, $Z_{MT}=0$ 时 $k_{ii}=1$ 。于是, $k_{ii,x}$ 用线性插值得得:

$$k_{ii,x} = \frac{100-x}{100} + \frac{x}{100} \cdot k_{ii,\infty} \tag{4}$$

可以把这样的格子梁称为*x*%横向分配格子梁,所需的格子刚度称为*x*%横向分配格子刚度。

表1所列为80%和90%荷载横向分配系数及所需的抗弯扭格子刚度。

表1 箱形主梁的半刚性抗弯扭格子刚度

刚度	三主梁		四主梁		五主梁		
	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3
$k_{ii,\infty}$	0.440	0.333	0.402	0.267	0.380	0.245	0.200
$k_{ii,80}$	0.552	0.467	0.521	0.414	0.504	0.396	0.360
$Z_{MT,80}$	4.5	2.7	5.5	3.4	6.5	3.9	4.4
$k_{ii,90}$	0.496	0.400	0.462	0.340	0.442	0.320	0.280
$Z_{MT,90}$	8.9	6.0	11.9	8.3	16.1	9.9	12.1

从表1可知,一是随着主梁数量增多,达到相同的*x*%横向分配所需的抗弯扭格子刚度越大,这是因为主梁增多时,横梁长度增大、抗弯刚度减小,荷载传递到远端的能力减弱;二是边梁所需的抗弯扭格子刚度最大,桥梁中心线处的中梁次之。

如果以边梁所需的抗弯扭格子刚度来设计横梁是偏于安全的,但很不经济,特别是主梁数量超过4片时。在实际工程中,采用次边梁所需的抗弯扭格子刚度来设计即可,因为没必要将荷载在横向传递得过远。通常可以用次边梁的90%荷载横向分配格子刚度来设计横梁,即3片主梁时 Z_{MT} 取6.0,4片主梁时 Z_{MT} 取8.3,5片主梁时 Z_{MT} 取9.9,这样即便是边梁荷载也可达到85%横向分配。图5为五箱主梁按三种格子刚度计算得到的荷载横向分配系数曲线,其中格子刚度 $Z_{MT}=9.9$ 已很接近刚性横梁的效果,说明按次边梁的90%荷载横向分配原则来确定格子刚度是合适的。

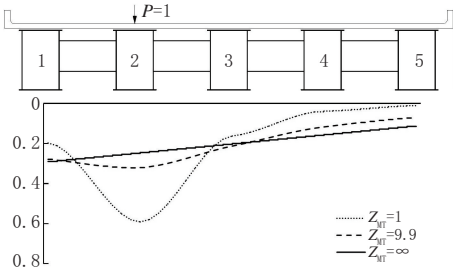


图5 五箱主梁的荷载横向分配系数曲线

4 多根横梁的等效抗弯扭格子刚度

以上研究结论是基于一根跨中横梁的格子梁桥模型。在实际工程中,若要使荷载达到90%横向分配,单靠一根跨中横梁是很难实现的,因为所需的横梁截面高度远大于主梁截面高度,在小跨径格子梁桥中这种矛盾尤为突出。为了解决这个问题,可以设置多根横梁来协同分配荷载。研究发现,跨中横梁的荷载横向分配能力最强,离跨中越远的横梁其

荷载横向分配能力越差。可见,多根横梁的格子刚度不是简单的线性叠加关系。本节将探讨多根横梁的等效抗弯扭格子刚度,同样以次边梁的 90% 荷载横向分配系数相等作为等效原则。抗弯扭格子刚度的等效表达式为:

$$Z_{MT}^{eq} = \beta \cdot Z_{MT}$$
 (5)

式中: Z_{MT} 为设一道跨中横梁的抗弯扭格子刚度; Z_{MT}^{eq} 为设 n 根横梁的等效抗弯扭格子刚度; β 为 n 根横梁的抗弯扭格子刚度换算系数。

需要说明的是,本节所说的多根横梁不包含主梁支点处的端横梁,且这些横梁沿桥梁纵向等间距布置。

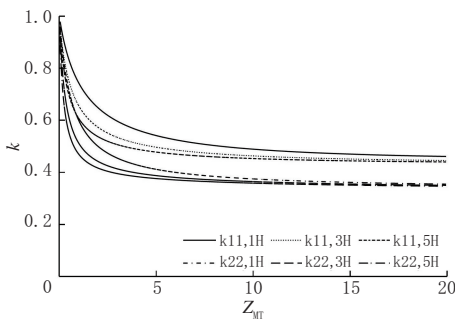


图6 多根横梁的 k 与 Z_{MT} 关系曲线

以三箱主梁的格子梁桥为例,设置 1、3、5 根横梁情况下的荷载横向分配系数与抗弯扭格子刚度的关系曲线如图 6 所示,可知,一是随着横梁数量增加,荷载横向分配能力逐渐增长,但增长效率逐渐减弱,这说明没必要过多地设置横梁;二是随着格子刚度增大,各荷载横向分配系数渐近收敛,说明横梁数量不会改变荷载横向分配系数的极限值。

按照上述等效原则,箱形主梁设置不同数量横梁情况下的抗弯扭格子刚度换算系数 β 汇总于表 2。可以看出,换算系数 β 只与横梁数量有关,与主梁的数量无关,当横梁数量为 3、5 时, β 分别为 1.6、2.2。

表2 箱形主梁的抗弯扭格子刚度换算系数

刚度	换算系数	横梁根数	
		$n=3$	$n=5$
三主梁 $Z_{MT}^{eq} = 6.0$	Z_{MT}	3.83	2.72
	β	1.6	2.2
四主梁 $Z_{MT}^{eq} = 8.3$	Z_{MT}	5.32	3.83
	β	1.6	2.2
五主梁 $Z_{MT}^{eq} = 9.9$	Z_{MT}	6.32	4.58
	β	1.6	2.2

5 工程应用算例

根据以上研究成果,本节以交通部颁布的箱形钢混组合梁桥图集为算例,对横梁设置进行优化。

主梁截面尺寸和横梁截面宽度均延用图集集中的数据,如图 7 所示,主梁的可变尺寸适用的桥梁跨径依次为 30、40、50、60 m。主梁的横向间距 5.55 m,横梁沿桥跨等间距布置。按次边梁达到 90% 荷载横向分配作为控制目标,优化后的横梁数量和横梁高度见表 3,优化前后的横梁对比见表 4。

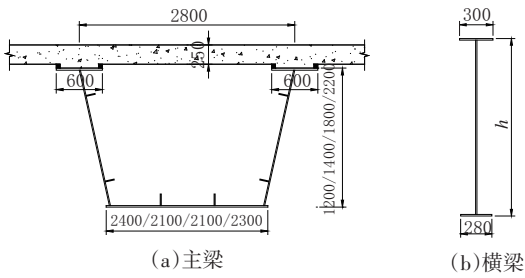


图7 交通部箱形钢混组合梁的构件截面尺寸(单位:mm)

表3 交通部箱形钢混组合梁的横梁优化结果

优化项	主梁跨径/m			
	30	40	50	60
目标等效格子刚度 Z_{MT}^{eq}	6.0	6.0	6.0	6.0
所需横梁数量/根	5	1*	1*	1*
所需格子刚度 Z_{MT}	2.99	6.0	6.0	6.0
横梁高度 h /m	1.1	1.2	1.2	1.25

表4 优化前后横梁数量及梁高对比

对比项	主梁跨径/m			
	30	40	50	60
优化前横梁数量/根	2	3	4	5
优化后横梁数量/根	5	1*	1*	1*
优化前横梁高度 h /m	1.1	1.25	1.6	1.6
优化后横梁高度 h /m	1.1	1.2	1.2	1.25

可以看出,一是跨径 30 m 的组合梁桥,优化后的横梁数量增多,说明图集集中的设计没有达到 90% 荷载横向分配;二是跨径 40 m 及以上的组合梁桥,优化后的横梁数量和梁高明显减少。小跨径组合梁桥需要的横梁数量多,大跨径组合梁桥需要的反而更少,这是因为主梁跨径 L 增大,横向间距 a 未变,格子刚度 Z_{MT} 呈指数级增大,一根横梁就能起到良好的荷载横向分配效果。需要说明的是,表 3 和表 4 中标注“*”的横梁数量在理论上是可行的,在日本《道路桥示方书·钢桥篇》^[12]中有规定,横梁的间距不得超过 20 m,因此,实际工程中加“*”的横梁数量宜按 3 根来取用,即便如此也比图集更为简化。

6 结 语

本文延展了格子刚度概念的涵盖范围,提出了适用于钢结构箱形主梁的抗弯扭格子刚度及其计算

公式,首次给出了钢结构箱形主梁格子梁桥的荷载横向分配与抗弯扭格子刚度的量化关系,并对我国交通部钢混组合梁桥的横梁设置提出了优化建议。通过本文系统性的研究,得到了以下主要结论。

(1)主梁数量相同的同类型格子梁桥,荷载横向分配系数与格子刚度之间具有一一对应关系,只要格子刚度值不变,荷载在各片主梁的分配比例就是恒定的。

(2)以次边梁的90%荷载横向分配为控制目标,3~5片箱形主梁所需的抗弯扭格子刚度 Z_{MT} 分别为6.0、8.3和9.9。

(3)多根横梁的格子刚度换算系数 β 只与横梁数量有关,对于箱形主梁,当横梁数量为3、5时, β 分别为1.6、2.2。

(4)跨径30、40、50、60 m的简支箱形钢混组合格子梁桥,不含支点处的跨内横梁可分别按5、3、3、3根设置。

参考文献:

- [1] Leonhardt F. and Andrä W. Die vereinfachte Trägerrostberechnung [M]. Stuttgart: Verlag Julius Hoffmann, 1950.
- [2] Homberg H. Kreuzwerke. Statik der Trägerroste und Platten [M]. Berlin: Springer, 1951.
- [3] JTG/T 3911—2021, 装配化工字组合梁钢桥通用图[S].
- [4] JTG/T 3912—2022, 装配化箱形组合梁钢桥通用图[S].
- [5] 广东省交通运输厅. 广东省桥涵标准图—装配式钢板组合梁上部结构[Z]. 武汉: 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 2023.
- [6] 广东省交通运输厅. 广东省桥涵标准图—装配式箱型组合梁上部结构[Z]. 武汉: 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 2023.
- [7] 22MR806, 装配式桥梁设计与施工—钢板组合梁[S].
- [8] CQJTG/T D08—2022, 中小跨径钢板组合梁通用图[S].
- [9] CQJTG/T D11—2021, 中小跨径钢箱组合梁通用图[S].
- [10] 江苏省交通运输厅. 钢混组合板梁通用图[Z]. 南京: 华设设计集团股份有限公司, 2021.
- [11] 小西一郎. 钢桥(第2分册) [M]. 宋慕兰, 董其震, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1980.
- [12] 日本道路协会. 道路桥示方书(钢桥篇) [Z]. 东京: 日本道路协会, 2017.

(上接第72页)

6 结 语

崇明环岛景观道一期工程鸽龙港闸外桥主桥是一座跨径布置为(75+150+75)m的S形曲线双斜塔斜拉桥。本文首先介绍了主桥的总体设计方案,计算结果表明结构安全,然后分析了其受力特点,最后介绍了主桥设计的关键技术,对于类似的斜拉桥设计具有一定的参考及借鉴意义。

参考文献:

- [1] 黄晓彬. 空间倾斜塔柱曲线人行斜拉桥设计关键技术[J]. 空间结构, 2023, 29(3): 76–80.
- [2] 刘蓬风. 一座S形曲线斜拉桥的抗风抗震分析和设计[J]. 国外桥梁, 1990(1): 46–54.
- [3] 杨吉新, 张朝, 吴爱平, 等. 基于影响矩阵法的S形曲线斜拉桥索力优化[J]. 工程与建设, 2020, 34(2): 234–236.
- [4] 张文伟, 丁志凯. S形曲线曲率半径对斜拉桥弯扭耦合效应影响的研究[J]. 公路, 2020, 65(11): 178–182.