

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.09.034

小半径曲线“双窄箱”钢-混组合连续梁偏载效应分析

杨洋¹,石放明¹,石国庆²,于振华²

[1.深汕深高速基建环保开发有限公司,广东 深圳 518000; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:为研究车道荷载对小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥的偏载效应,以实际工程为背景,对该结构的弯曲、扭转和畸变效应进行了理论分析。建立了曲线半径外侧偏心活荷载、内侧偏心活荷载和对称活荷载三种荷载工况,结合 ANSYS 软件建立三维有限元实体模型进行分析,引入了应力放大系数的概念研究了该结构的偏载系数规律。结果表明:组合梁曲线半径外侧产生的翘曲正应力和剪应力大于组合梁内侧;组合梁的正应力放大系数近似为 1.3~1.4 之间,正应力的偏载效应在中支点处最为明显;剪应力放大系数近似介于 1.5~1.6 之间,剪应力的偏载效应在中跨 1/4 处最为明显。与直线梁桥相比,小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥在偏心车道荷载下的应力放大系数较大,对该类结构而言,由活载引起的偏载效应不容忽视。

关键词:小半径曲线;双窄箱;钢-混组合连续梁;应力放大系数;有限元

中图分类号:U441+.5

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)09-0145-04

0 引言

钢-混组合梁桥是将混凝土桥面板与钢梁通过剪力连接件连接,使二者能共同抵抗外力作用的结构。与传统混凝土箱梁相比,该结构具有自重轻、有效避免腹板开裂、承载力高、跨越能力强和施工简便等优点。与钢箱梁相比,该结构具有造价低、抗震性能更强等优点,因此在现代社会得到了广泛的应用。

在 1993 年,我国在城市桥梁中自主设计了首座钢-混组合梁桥——北京国贸桥建成通车。目前已有国内学者对普通曲线钢-混凝土组合箱梁结构进行了相关的扭转性能研究,如 Thevendran 等^[1]以曲线半径为参数,对工字形筒支曲线组合梁进行了试验研究和非线性分析;聂建国等^[2]基于试验对钢-混组合组合箱梁的扭转性能进行了研究,分析了该结构的抗扭机理,建立了弯矩与扭矩的相关公式;Tan 等^[3]对工字形筒支直线和曲线组合梁进行了弯扭试验研究;林诗枫等^[4]基于 Bredt 扭转方程推导了钢-混凝土组合箱梁的抗扭刚度计算公式;张彦玲等^[5]基于试验分析了钢-混凝土曲线组合梁的弯扭性能及横隔板对曲线组合梁的抗扭刚度影响;袁晓静等^[6]制作了连续曲线双箱钢-混组合梁的缩尺模型,研究了横隔板的连接方式对扭转应力的影响,以及跨中截面的荷载-挠度曲线、横向挠度分布和钢

梁与混凝土板间的相对滑移规律。但目前针对小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁的研究仍较少,故本文结合实际工程,对小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁的偏载效应进行分析。

1 工程实例概况

深汕生态环境科技产业园基础设施及配套项目一园区配套市政道路工程中,望鹏立交为全互通立交,全立交包括小转弯半径匝道均采用大横梁体系“双窄箱”钢混组合梁,本文选取跨径 3×36 m、曲线半径为 50 m 的匝道为例进行偏载效应分析。本立交采用城市主干路标准,设计荷载为城-A 级。匝道桥面宽度 10 m,主梁钢梁均为闭口箱形截面,主梁总高度为 2.2 m,钢箱高度为 1.95 m,混凝土桥面板高度为 0.25 m。钢梁与混凝土板之间采用剪力钉连接,布置在钢梁顶板上方。支座采用对称布置,无偏心设置。沿梁轴纵向每沿 4 m 布置一道工字型横梁,普通横梁高 0.7 m,支点横梁高 1.95 m,钢材采用 Q345qC 钢。桥型布置图及标准横断面布置见图 1~图 3。

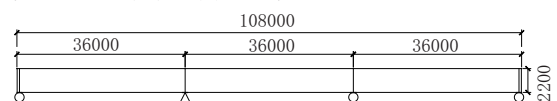


图 1 立面布置图(单位:mm)

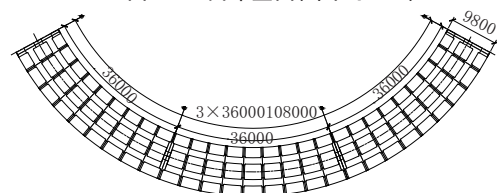


图 2 平面布置图(单位:mm)

收稿日期:2022-11-04

作者简介:杨洋(1989—),男,硕士,工程师,从事工程建设管理工作。

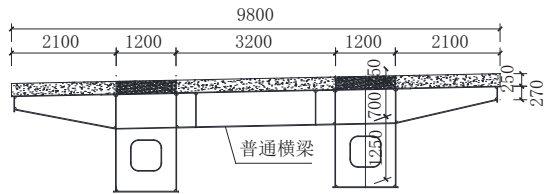


图3 普通横梁横断面图(单位:mm)

2 荷载工况布置

组合梁横断面荷载布置及模型计算简图见图4,本文只考虑活载对结构偏载效应的影响,根据《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)对车道荷载的规定,汽车活载取值如下:集中荷载,均布荷载。竖向偏心荷载布置在混凝土顶板与钢梁外侧腹板交界处。纵向布置按桥梁影响线最不利位置加载,荷载布置工况分为三种:工况一:车道荷载作用于1点(曲线半径外侧腹板与顶板交点);工况二:车道荷载作用于2点(曲线半径内侧腹板与顶板交点);工况三:车道荷载作用于0点(桥面板中点)。

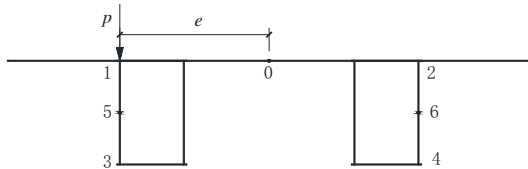


图4 组合梁横断面荷载布置及模型计算简图

3 偏载效应分析

3.1 荷载分解

在任意偏心荷载作用下,组合梁将会产生弯曲、刚性扭转和畸变效应,故将偏心荷载分解为对称荷载(弯曲荷载)和反对称荷载(扭转荷载),反对称荷载可等效为刚性扭转荷载和畸变荷载,分解过程见图5。本文研究的是扭转荷载和畸变荷载共同产生的翘曲应力进行分析,可得。

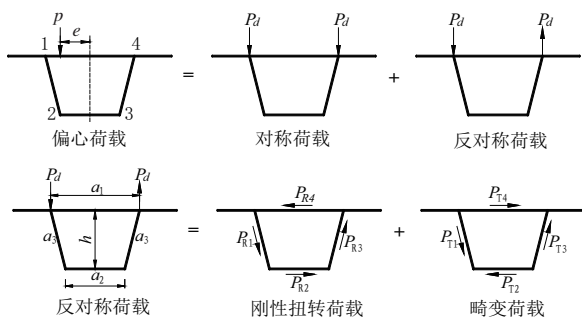


图5 偏心荷载分解图

根据薄壁箱梁理论可知^[11],则产生的翘曲正应力有约束扭转翘曲正应力 σ_ω 和畸变翘曲正应力 σ_D ,表达式分别为:

$$\sigma_\omega = \frac{B_\omega^-}{I_\omega^-} \bar{\omega}(s) \quad (1)$$

$$\sigma_D = \frac{B_D^-}{I_{\omega D}^-} \bar{\omega}_D \quad (2)$$

式中: B_ω^- 、 I_ω^- 、 $\bar{\omega}(s)$ 分别表示约束扭转双力矩、主扇形惯性矩和主扇性坐标; B_D^- 、 $I_{\omega D}^-$ 、 $\bar{\omega}_D$ 分别表示畸变双力矩、畸变翘曲惯性矩和畸变主扇性坐标。

由翘曲正应力产生的扭转翘曲剪应力 τ_ω 和畸变翘曲剪应力为 τ_D 的表达式为:

$$\tau_\omega = \frac{M_s}{\Omega t} - \frac{M_\omega^-}{I_\omega^-} \bar{S}_\omega \quad (3)$$

$$\tau_D = -\frac{B_D^-}{t I_{\omega D}^-} \bar{S}_{D\omega} \quad (4)$$

式中: M_s 、 M_ω^- 分别为自由扭矩和二次扭矩; Ω 为闭口截面面积的2倍; \bar{S}_ω 为闭口截面广义主扇性静矩; $\bar{S}_{D\omega}$ 为闭口截面畸变广义主扇性静矩。

在这里引入应力放大系数的概念,通过应力放大系数来考虑偏心荷载作用下,扭转和畸变效应对组合箱梁桥的实际影响。其计算式如下:

$$\zeta = \frac{\sigma_m + \sigma_\omega + \sigma_D}{\sigma_m} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\tau_m + \tau_\omega + \tau_D}{\tau_m} \quad (6)$$

式中: ζ 为正应力放大系数; η 为剪应力放大系数; σ_m 为弯曲正应力; τ_m 为弯曲剪应力。

3.2 有限元分析

为了能够准确全面的模拟其结构特性,本文采用ANSYS软件建立空间有限元实体模型进行分析。混凝土桥面板采用三维实体SOLID65单元、钢箱主梁及横隔板采用壳单元SHELL181。

不考虑钢梁与混凝土桥面板的相对滑移,钢梁与混凝土板采用共节点连接。网格划分大小为0.2 m,全桥108 m共划分单元数为147 064,节点数为147 502。对于三跨连续梁的边界条件为:一个固定铰支座约束UX、UY、UZ、ROTY、ROTZ,三个活动铰支座约束UX、UY、ROTY、ROTZ。将三个工况的车道荷载进行分解,分别加载与有限元模型中求解即可。有限元模型见图6。



图6 有限元模型

通过理论经验可知^[11],钢-混组合箱梁在横断面上的腹板与底板交点处的翘曲正应力最大,腹板中点剪应力最大,故本文提取偏载侧腹板与底板交点处的正应力计算其正应力放大系数,提取偏载侧腹板中点的剪应力计算其剪应力放大系数,由于该结构及荷载关于中跨跨中截面对称,故取一半进行分析,横断面分别取边跨 0.25l 截面、边跨 0.5l 截面、边跨 0.75l 截面、中支点截面、中跨 0.25l 截面和中跨 0.5l 截面。计算结果见表 1、表 2。

由表 1、表 2 可知,对于小半径曲线双窄箱钢-混组合三跨连续梁桥结构而言,在偏心荷载作用下的扭转、畸变效应比较明显。其全桥的翘曲正应力在边跨跨中截面最大,其中边跨跨中的翘曲正应力近似为中支点处的 2 倍;翘曲剪应力在中支点处最大,远离中支点逐渐减小,在跨中截面翘曲剪应力最小。当偏心荷载作用于曲边半径外侧时产生的翘曲正应力和剪应力较内侧大。

计算结果表明:当偏心荷载作用于小半径曲线

表 1 曲线组合梁外侧偏载作用下的应力放大系数

控制截面	正应力 /MPa				剪应力 /MPa			
	计算点	工况 1 $\sigma_\omega+\sigma_D$	工况 3 σ_m	放大系数 ξ_1	计算点	工况 1 $\tau_\omega+\tau_D$	工况 3 τ_m	放大系数 ξ_1
边跨 0.25l	3	11.043	28.391	1.389	5	1.759	2.78	1.633
边跨 0.5l	3	11.125	35.565	1.313	5	0.483	0.926	1.522
边跨 0.75l	3	8.731	25.184	1.347	5	1.903	3.138	1.606
中支点	3	-10.152	-17.732	1.573	5	2.67	4.62	1.578
中跨 0.25l	3	6.096	15.059	1.405	5	-1.671	-2.98	1.561
中跨 0.5l	3	9.525	28.957	1.329	5	-0.044	-0.083	1.530

表 2 曲线组合梁内侧偏载作用下的应力放大系数

控制截面	正应力 /MPa				剪应力 /MPa			
	计算点	工况 2 $\sigma_\omega+\sigma_D$	工况 3 σ_m	放大系数 ξ_2	计算点	工况 2 $\tau_\omega+\tau_D$	工况 3 τ_m	放大系数 ξ_2
边跨 0.25l	4	10.117	26.269	1.385	6	-0.814	-1.453	1.560
边跨 0.5l	4	10.409	32.454	1.321	6	-0.152	-0.288	1.528
边跨 0.75l	4	8.302	21.859	1.380	6	-0.892	-1.545	1.577
中支点	4	-6.658	-16.595	1.401	6	-1.875	-2.93	1.640
中跨 0.25l	4	6.004	14.502	1.414	6	0.967	1.504	1.643
中跨 0.5l	4	9.396	27.189	1.346	6	0.011	0.019	1.579

双窄箱钢-混组合三跨连续梁桥时,该结构的正应力和剪应力放大系数并非是一个常量。正应力放大系数在中支点处最大为 1.573,其余截面的正应力放大系数近似接近于 1.3~1.4 之间,剪应力放大系数在中跨四分之一截面最大为 1.643,其余截面的剪应力放大系数近似接近于 1.5~1.6 之间;正应力放大系数最大横截面为中支点处,分析其原因由于支座处受到横隔板的约束作用较强,导致翘曲变形较大。剪应力放大系数最大在中跨四分之一截面附近。传统的经验数值法可知,偏载系数为 1.15 左右^[11],从结果中可以看出,无论是正应力放大系数还是剪应力放大系数,均要比传统的经验数值法和偏心压力法计算得出的偏载系数大,故对于此类结构桥梁不能用传统方法进行分析,在工程设计中应该对车道荷载作用下该结构的产生的偏载效应引起重视。

对比分析可知,小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥在偏心车道荷载下,翘曲剪应力大于翘曲正应力对该结构的受力影响。与直线梁桥相比,该结构在偏心车道荷载下的应力放大系数较大,分析其原因有两点:一是由于曲线梁在产生扭转效应时伴有弯扭耦合效应导致翘曲应力较普通直线梁大,二是由于组合梁截面的纵向刚度偏小,导致翘曲应变增大,故组合梁产生的翘曲应力较普通箱梁大。

4 结论

本文通过理论分析小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥的受力特点,结合有限元研究了该结构在偏心车道荷载作用下的应力放大系数。主要得出如下结论:

- (1)传统计算偏载系数的经验数值法和偏心压力

法并不适用于小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁结构,本文采用 ANSYS 软件准确模拟了组合梁的扭转与畸变效应,引入了应力放大系数的概念准确计算了偏载系数,采用此方法可提高一定的安全储备。

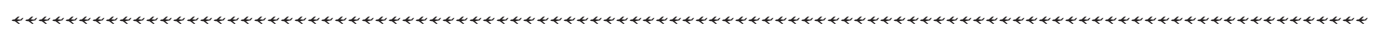
(2)小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥在偏心车道荷载作用下,正应力放大系数近似接近于 1.3~1.4 之间,其曲线半径外侧的偏载效应较内侧明显;对于剪应力放大系数而言,其数值近似接近于 1.5~1.6 之间,正应力放大系数在中支点附近处较为明显,剪应力放大系数在中跨四分之一截面附近处较为明显。

(3)与直线梁桥相比,小半径曲线双窄箱钢-混组合连续梁桥在偏心车道荷载下的应力放大系数较大,对该类结构而言,由活载引起的偏载效应不容忽视。

参考文献:

[1] THEVENDRANV,CHEN S,SHANMUGAM N E,et al.Nonlinear analysis of steel-concrete composite girders curved in plan[J].Finite Elements in Analysis and Design,1999,32(3):125-139.

[2] THEVENDRANV,SHANMUGAM N E,CHEN S,et al.Experimental study on steel-concrete composite girders curved in plan[J].Engineering Structures,2000,22(8):877-889.
 [3] 聂建国,熊辉,胡少伟.开口截面钢-混凝土组合梁弯扭性能的理论分析与试验研究[J].土木工程学报,2004(11):6-10,66.
 [4] 聂建国,唐亮,胡少伟,等.钢-混凝土组合箱梁的抗扭强度[J].土木工程学报,2008(1):1-11.
 [5] TAN E L,UY B.Experimental study on straight composite girders subjected to combined flexure and torsion[J].Journal of Constructional Steel Research,2009,65(4):784-793.
 [6] TAN E L,UY B.Experimental study on curved composite girders subjected to combined flexure and torsion [J].Journal of Constructional Steel Research,2009,65(8/9):1855-1863.
 [7] 林诗枫,黄侨,任远,等.钢-混凝土组合简支箱梁桥活载效应计算方法[J].公路交通科技,2012,29(6):75-80.
 [8] 张彦玲,孙瞳,侯忠明,等.隔板式钢-混凝土曲线组合梁弯扭性能[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(4):1107-1114.
 [9] 袁晓静,奚兵,赵伟,等.双箱钢-混凝土连续曲线组合梁受力性能试验研究[J].工业建筑,2020,50(8):154-159.
 [10] 袁晓静,刘凡,赵伟,等.连续曲线双箱钢-混组合梁弯扭性能试验研究[J].建筑结构,2022,52(3):124-129.
 [11] 郭金琼,房贞政,郑振.箱形梁设计理论[M].北京:人民交通出版社,2008.



(上接第 144 页)

[J].公路工程,2012,37(2):45-49.
 [8] 邹锦华,姜海波,欧阳仕武.大跨连续刚构桥跨中下挠成因及加固效果分析[J].公路,2010(7):72-74.
 [9] 肖金军,何伟能,李纯,等.基于配束和材料优化的连续刚构桥下挠控制技术[J].桥梁建设,2021,51(6):31-38.
 [10] 马振栋,刘安双.控制大跨连续刚构桥梁过度下挠的技术措施[J].桥梁建设,2015,45(2):71-76.
 [11] 张阳,张楠,姚学昌.预防大跨 PC 连续刚构桥开裂和下挠技术[J].

沈阳工业大学学报,2013,35(5):594-600.
 [12] 朱德祥,李睿,杨晶晶,等.基于病害检测的连续刚构桥震害预测方法研究[J].科学技术与工程,2012,12(34):9420-9424.
 [13] 吴冲.汽车荷载作用下三跨度变截面连续梁桥的挠度响应及冲击系数[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第九届年会论文集.[出版者不详],1990:727-731.
 [14] 刘晓梅.温度变化对连续刚构桥线形与受力的影响分析[J].科技风,2015(5):199-201.