

交通科技丛书
JTKJCS

组合梁 抗扭分析与设计

Torsional Analysis and Design of
Composite Steel-Concrete Beams

胡少伟 著



人民交通出版社

China Communications Press

交通科技丛书

ZUHELIANG KANGNIU FENXI YU SHEJI

组合梁抗扭分析与设计

胡少伟 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分十二章:绪论,开口截面组合梁的纯扭与复合弯扭试验研究,箱形组合梁的纯扭与复合弯扭试验研究,开、闭口组合梁的开裂扭矩和极限扭矩计算,开、闭口组合梁抗扭极限状态分析,钢—混凝土组合梁受扭性能全过程分析,扭矩作用下连接件的受力分析和设计方法,组合梁弯剪扭强度的相关性分析,组合梁的抗扭刚度分析,开、闭口组合梁复合受扭的薄壁理论分析,抗扭组合梁的构造要求和设计过程,组合梁抗扭研究总结与研究展望等。

本书可供桥梁设计、施工及相关研究人员的阅读,也可供高等学校相关专业的研究生和高年级本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

组合梁抗扭分析与设计 / 胡少伟著. —北京:人民交通出版社, 2004.10

ISBN 7-114-05305-3

I. 组... II. 胡... III. ①组合梁-抗扭刚度-分析 ②组合梁-设计 IV. U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 106267 号

交通科技丛书

书 名: 组合梁抗扭分析与设计

著 作 者: 胡少伟

责任编辑: 刘永超

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)85285656, 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787×980 1/16

印 张: 18.5

字 数: 294 千

版 次: 2005 年 1 月第 1 版

印 次: 2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05305-3

印 数: 0001~5000 册

定 价: 38.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

众所周知,任何成功的构件设计,往往都需要充分利用材料的性能,使所用材料各尽所能、协同工作。由钢梁、钢筋混凝土板和抗剪连接件所组成的组合梁,具有使材料各尽其用、节省材料这一显著特点,同时兼有方便施工、刚度大、抗震(振)性好等优点。以钢—混凝土组合梁为最基本构件的钢—混凝土组合结构,是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的经济、合理的新型结构,同混凝土结构相比,可以减轻自重、减少截面尺寸、增加有效使用空间、增加结构的延性等;同钢结构相比,可以减少用钢量、增加刚度、增加稳定性和整体性、增加结构耐久性等。工程实践证明,组合结构兼有钢结构和钢筋混凝土结构的优点,非常适合我国的国情,已经成为 21 世纪土木、水利和交通工程中的重要结构体系。

近十年来,各类大型桥梁和高层建筑正在大量使用混凝土组合梁结构,在国外已经成为主要的结构形式。工程中的钢—混凝土组合梁如组合桥梁、框架边梁、托梁、超高层建筑转换层大梁等等,往往处于弯剪、弯扭、弯剪扭压(拉)等复合受力状态,在动力荷载或地震荷载作用下,结构的破坏大都是弯、剪、扭、压(拉)的不同复合组合引起的。而随着钢—混凝土组合梁形式、种类的不断增多,工程的抗震要求和级别不断提高,出现了大量有待研究解决的问题,特别是在复合受扭下的性能及其工程应用问题。在我国,混凝土构件的复合受力研究是一个发展较晚的课题,对复合受力性能的掌握程度尚不成熟,投入的时间、人力、物力有限,许多问题有待进一步的研究,对组合梁的复合抗扭分析与设计的研究,到目前为止国内外尚未对其系统进行过。本书是以我的博士论文课题“钢—混凝土组合梁抗扭性能研究”为主要内容,以大量使用的组合桥梁为工程背景,以试验研究为基础,对开、闭口组合梁的复合受力基本性能和设计计算方法进行了研究,力争满足工程设计和施工的实际需要,确保设计的安全、经济、可靠,填补目前有关规范或规程中关于钢—混凝土组合梁设计计算和构造要求的空白,从而有利于钢—混凝土组合结构的进一步发展。因此,对钢—混凝土组合梁在复合受力

下的性能进行试验研究和设计分析有着重要的现实意义和广阔的工程应用前景,不仅是对组合梁工程设计应用的实际要求,也是完善组合梁分析理论的迫切需要,无疑具有理论与实践的双重意义。

本人于1996年4月开始历时四年在清华大学土木系聂建国教授的指导下,进行组合梁抗扭性能的研究工作。书中的许多理论观点得到了我的导师[沈聚敏]教授和聂建国教授的把关和指导。1999年底到2003年中我在美国西北大学留学期间,又对组合梁的复合受扭分析进行了总结和归纳,在美国西北大学土木系 Brian Moran 教授和清华大学土木系袁驷教授帮助下,运用薄壁理论和常微分方程求解器(COLSYS)对组合梁的复合受扭进行了分析计算。2003年来南京水利科学研究院材料结构研究所工作后,在南京水利科学研究院科学研究基金的资助下,又对组合梁复合受扭的弯剪扭相关性和极限承载能力进行了分析计算,特别是对构造措施进行了总结分析。

本书的主要工作内容包括:自行设计了组合梁纯扭和复合弯扭的加载装置,分别对组合梁纯扭破坏和弯扭、弯剪扭破坏的裂缝形态和受力性能作了详细的描述;分别推导了纯扭和弯扭下开、闭口组合梁的开裂扭矩和极限扭矩计算公式;利用变角桁架模型理论和平衡、变形协调和混凝土软化本构关系,推出了进行组合梁受扭极限状态分析的一系列方程和提出了相应的简化算法;编制了组合梁受扭极限状态分析程序,并把计算和试验值作了对比;提出了连接件复合受力下的级数分析法,可以方便地求解出组合梁在复合受力下的挠度、滑移和纵向翘曲等;把受复合弯扭的直梁等效为复合弯扭的圆弧形曲梁,建立了复合弯扭下由扭矩引起连接件的剪力和轴力计算公式,并提出了复合受扭下连接件的设计方法,并对曲线组合梁连接件的受力机理进行了研究;对受扭组合梁进行了全过程分析,利用平衡、变形和协调条件,推出了适用于组合梁受扭全过程分析的一系列方程,并提出了全过程分析的简化算法,编制了受扭全过程分析程序,把试验和理论分析的结果进行了对比,精度满足要求;进行了组合梁弯扭、弯剪扭作用下的相关性分析,分别给出了开、闭口组合梁在大弯扭比、小弯扭比以及在弯剪扭作用下的相关方程;对开、闭口组合梁的抗扭刚度进行了研究,分别建立了开、闭口组合梁在开裂前阶段、从开裂到极限阶段、极限破坏三阶段各自的抗扭刚度计算公式;在合理假定的基础上,用广义坐标法分别对开、闭口组合梁进行了薄壁受扭分析,编制了相关主程序,调用有限元线法的COLSYS求解软件,对其进行处理分析;提出了抗扭组合梁的实用设计方法,并对其构造要求作了说明,后进行了总结和研究展望。

本书中详述了 21 根组合梁的抗扭试验分析结果,试验过程中得到了清华大学工程结构实验室的王凤涛、黄勇、杜世强等老师的帮助,硕士生熊辉、朱林森和博士生樊建生参与了开口截面组合梁的部分试验工作。本书的试验课题也得到了北京市政工程设计研究总院总工、设计大师罗玲教授、冯昌茂教授等人的指导和关心,从试验方案的制订到具体的试验过程,得到了他们的不少帮助。博士论文完成后,中国建筑科学研究院总工蔡绍怀教授认真进行了审阅,并提出了大量的宝贵意见,作者都一一进行了修改和补充。书稿完成后,南京水利科学研究院王承强博士、周惠工程师帮助进行了校核,并对部分插图进行了绘制,对书中编制使用的计算程序进行了校验。对上述人员在此表示衷心感谢。

最后,感谢南京水利科学研究院出版基金的资助。

胡少伟

2004 年 9 月 10 日

主要符号表

α_n	剪应变的影响系数
A_0	剪力流中心线所围横截面面积
A_c	混凝土板的面积
A_{cor}	截面核心部分面积
A''_{cor}	箍筋中心线所围横截面面积
A'''_{cor}	剪力流所围面积
A_{sj}	钢梁的面积
A_{st}	纵筋的截面面积
A_{svl}	单肢箍筋面积
A_{svt}	箍筋的截面面积
A_{smin}	抗扭钢筋最小用筋量
A_{us}	连接件截面面积
b	构件宽度
b_c	混凝土板的宽度
b''_{cor}	板角部长肢箍筋中心连线宽度
b_s	工字钢翼缘宽度
b_{s1}	工字钢上翼缘宽度
b_{s2}	工字钢下翼缘宽度
C_F	连接件破坏荷载
d_{ef}	截面短边角部纵筋中到中距离
d_n	组合截面的弹性中和轴高度
e	偏心距
E_c	混凝土弹性模量
E_s	钢筋弹性模量
E	弹性模量

- $k f_c$ ——混凝土斜压杆的有效抗压强度
 f_c ——混凝土抗压强度
 f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值
 f_t ——混凝土抗拉强度
 f_{tk} ——混凝土抗拉强度标准值
 f_{sy} ——钢筋(梁)屈服强度
 f_{su} ——钢筋(梁)极限强度
 f_{us} ——栓钉极限抗拉强度
 f_{yv} ——箍筋的屈服强度
 f_{ly} ——钢梁实测屈服强度
 f_{cm} ——由弯矩引起的正应力
 $f_{cu,100}$ ——混凝土立方体(100mm × 100mm × 100mm)抗压强度
 f_{cu} ——混凝土立方体(150mm × 150mm × 150mm)抗压强度
 f_p ——塑性设计的抗剪设计强度
 f_x —— x 方向的应力
 f_y —— y 方向的应力
 GJ ——钢梁的抗扭刚度
 G_c ——混凝土剪切模量
 G_s ——钢的剪切模量
 h ——构件的高度
 H ——连接件受到的总剪力
 h''_{cor} ——钢筋混凝土板角部短肢箍筋中心连线的厚度
 h_s ——钢梁高度
 h_c ——混凝土板厚度
 I_{tc} ——混凝土板截面抗扭模量
 I'_c ——混凝土翼板的扭转惯性矩修正值)
 J_d ——组合截面的抗扭模量
 J_s ——钢梁的扭转惯性矩
 k ——连接件的剪切刚度
 k_0 ——有效抗压强度折减系数
 k_{00} ——受扭影响系数

- k_1 ——轴向抗拉刚度
 k_c ——混凝土板的扭转常数
 k_N ——混凝土板受到的钢梁约束轴力系数
 k_M ——混凝土板受到的钢梁约束弯矩系数
 K_c ——考虑轴力影响的组合梁抗扭刚度
 K_1 ——抗扭刚度
 K_{t0} ——组合梁的弹性抗扭刚度
 K_0 ——开口组合梁的弹性抗扭刚度
 K'_0 ——闭口组合梁弹性抗扭刚度
 K''_{t0} ——从开裂到破坏阶段的抗扭刚度
 K'''_{t0} ——钢筋混凝土板破坏时的纯扭刚度
 K_1 ——开口组合梁从开裂到破坏阶段的抗扭刚度
 K'_1 ——闭口组合梁从开裂到破坏阶段的抗扭刚度
 K_2 ——开口组合梁极限破坏时的抗扭刚度
 K'_2 ——闭口组合梁极限破坏时的抗扭刚度
 L ——构件跨度(长度)
 L_{us} ——连接件的高度(长度)
 L_0 ——薄壁剪力流区中心线的周长
 M ——弯矩
 M_{cr} ——混凝土板出现裂缝时弯矩
 M_u ——极限弯矩
 M_{u0} ——纯弯极限弯矩
 M_y ——屈服弯矩
 N ——轴力
 N_c ——混凝土翼板受到的压力
 n ——实际剪力连接件的数量
 n_f ——按完全剪力连接所需剪力连接件的数量
 N_v^c ——单个连接件抗剪承载力设计值
 $p(x)$ ——横向荷载
 p_0 ——剪力流中心线的周长
 p_c ——构件外部尺寸的周长

- P ——集中荷载
 q ——剪力流强度(P112)
 q_x ——纵向荷载
 Q ——剪力连接件上的剪力
 Q_1 ——单个剪力连接件上的剪力
 R ——圆弧曲梁的半径
 s ——箍筋间距
 t ——等效壁厚
 T ——扭矩
 T_{cr} ——混凝土翼板开裂扭矩
 T_{cr0} ——梁式构件的抗扭扭矩
 T' ——单排连接件上所承担的扭矩
 T_{cr0}^p ——素混凝土构件抗扭开裂扭矩
 T_{cu} ——混凝土板的抗扭贡献
 T_{tr} ——钢筋的抗扭贡献
 T_{lj} ——钢梁的抗扭贡献
 T_s ——箱形钢梁的抗扭贡献
 T_{lc} ——箱形组合梁中混凝土板开裂扭矩
 T_{2s} ——混凝土板开裂时,钢梁所承受的扭矩
 T_p ——复合弯扭下的极限扭矩
 T_u ——极限扭矩
 T_y ——构件在钢筋或钢梁屈服时的扭矩
 t_w ——钢梁腹板厚度
 $u(x, s)$ ——纵向翘曲位移
 u_{cor} ——箍筋中心线的周长
 u''_{cor} ——钢筋混凝土板角部纵筋中心连线的周长
 u'''_{cor} ——剪力流路线的周长
 $v(x, s)$ ——沿薄壁周边切向位移
 V ——剪力
 V_i ——由扭矩引起的连接件上的横向剪力
 V_u ——极限剪力

- V_{us} ——单个栓钉连接件的设计承载力
 V_{u0} ——纯剪强度
 $w_{(x,s)}$ ——薄壁截面上各点垂直挠度位移
 W ——组合梁截面的抗弯模量
 W_t ——混凝土翼板截面抗扭抵抗矩
 W_{tp} ——截面扭转塑性抵抗矩
 x ——构件的短边尺寸
 y ——构件的长边尺寸
 Z_t ——超配筋板式构件长宽比对极限扭矩的影响系数
 Z ——抗弯力臂
 ϵ ——正应变
 ϵ_{ds} ——混凝土板表面的最大主压应变
 ϵ'_{ds} ——混凝土板表面的最大主拉应变
 ϵ_0 ——混凝土未软化的最大压应变
 ϵ_d ——斜裂缝间的混凝土压应变
 ϵ_r ——斜裂缝间的混凝土拉应变
 ϵ_s ——纵筋应变
 ϵ_v ——箍筋应变
 ϵ_p ——中心受压最大压应变
 ϵ_{tp} ——中心受拉最大拉应变
 ϵ_{lp} ——纯剪状态的最大主拉应变
 ϵ_x ——单元的 x 向应变
 ϵ_y ——单元的 y 向应变
 ϵ_{ys} ——钢筋的屈服应变
 ρ_x ——在 x 方向的配筋率
 ρ_y ——在 y 方向的配筋率
 ρ_{vt}^v ——抗扭箍筋的体积配箍率
 ρ_{st}^v ——抗扭纵筋的体积配筋率
 ρ^v ——抗扭钢筋的总体积配筋率
 δ ——跨中挠度
 δ_{cr} ——跨中开裂挠度

- δ_y ——跨中屈服挠度
 δ_u ——跨中极限挠度
 $\delta(S)$ ——沿截面轮廓坐标 s 的厚度
 δ_a ——箱形钢梁的底板厚度
 δ_b ——箱形钢梁的腹板厚度
 σ_{cy} ——混凝土极限破坏的主压应力
 σ_s ——纵筋的平均应力
 σ_v ——箍筋的平均应力
 σ_v ——箍筋的平均应力
 σ_{st} ——纵筋的应力
 σ_{svt} ——箍筋的应力
 σ_{tp} ——扭矩所产生的主拉应力
 σ_d ——斜裂缝间的混凝土平均压应力
 σ ——应力梯度
 ω ——塑性系数(抗扭截面的限制条件)
 ξ ——配筋强度比
 ξ_1 ——考虑混凝土软化的折减系数
 λ_t ——抗扭刚度附加系数
 λ_1 ——全过程分析中混凝土软化的应力修正系数
 λ ——滑移量
 η ——板式构件 b_c/h_c 影响的提高系数
 η_c ——混凝土翼板极限扭矩增大系数
 α_t ——截面抗扭抵抗矩的影响系数
 α ——混凝土斜压杆主应力方向与纵轴的夹角(斜裂缝与纵轴的夹角)
 α_k ——开裂扭矩混凝土板折减系数
 α_1 ——由应力梯度产生的提高系数
 α_2 ——由应力塑性重分布程度的提高系数
 γ ——剪应变
 γ_{max} ——最大剪应变
 γ_t ——受拉混凝土塑性影响系数
 τ ——剪应力

$\tau_{\max}$ ——最大扭转剪应力

ϕ ——横截面弯曲倾角

Ψ ——曲率

θ ——扭转角

θ' ——扭率

θ'_{cr} ——开裂扭率

θ'_y ——屈服扭率

θ'_u ——极限扭率

θ'_c ——混凝土的扭率

θ'_s ——钢梁的扭率

ν ——材料泊松比

Ω ——剪力流中心线所围面积的 2 倍

Δ ——复合受扭下滑移量

(在文中出现的其他符号,已在文中已标明其相应的含义)

目 录

主要符号表	1
第 1 章 绪论	1
§ 1.1 钢—混凝土组合梁的起源、应用和发展	1
§ 1.2 组合梁的受力性能研究概况	7
§ 1.3 钢—混凝土组合梁的抗扭研究概况	14
§ 1.4 钢—混凝土组合梁抗扭研究中有待解决的问题	15
§ 1.5 工程背景及实际意义	17
§ 1.6 本书所做的工作	17
参考文献	20
第 2 章 开口截面组合梁的纯扭与复合弯扭试验研究	23
§ 2.1 概述	23
§ 2.2 试验测试要点	24
§ 2.3 试件和试验装置设计	24
§ 2.4 试验加载过程	34
§ 2.5 纯扭试验结果及其分析	38
§ 2.6 复合弯扭试验现象与结果分析	64
§ 2.7 不同扭矩作用方式下的受扭试验分析	84
参考文献	90
第 3 章 箱形组合梁的纯扭与复合弯扭试验研究	92
§ 3.1 概述	92
§ 3.2 试件与试验方案	93
§ 3.3 纯扭试验结果	98
§ 3.4 弯扭试验主要现象描述	111
§ 3.5 开、闭口截面组合梁抗扭试验对比	138
参考文献	139
第 4 章 开、闭口组合梁的开裂扭矩和极限扭矩计算	140
§ 4.1 纯扭下开口组合梁的开裂扭矩和极限扭矩计算	140

§ 4.2 混凝土翼缘板和钢梁作为整体复合弯扭下开口组合梁的 开裂扭矩和极限扭矩	146
§ 4.3 扭矩作用于钢梁时组合梁的极限扭矩公式和弯扭分析	149
§ 4.4 两种扭矩作用情况的比较	151
§ 4.5 箱形组合梁开裂扭矩和极限扭矩计算	152
参考文献	162
第 5 章 开、闭口组合梁抗扭极限状态分析	164
§ 5.1 理论分析	164
§ 5.2 组合梁抗扭极限状态简化计算方法与程序	167
§ 5.3 计算结果及分析说明	170
参考文献	172
第 6 章 钢—混凝土组合梁受扭性能全过程分析	173
§ 6.1 理论推导	173
§ 6.2 全过程分析的简化算法	180
§ 6.3 全过程分析的程序编制	181
§ 6.4 全过程分析的计算结果	186
§ 6.5 全过程分析结论	188
参考文献	189
第 7 章 扭矩作用下连接件的受力分析和设计方法	190
§ 7.1 剪力连接件的受力分析模型	190
§ 7.2 组合梁受力分析一级数法	192
§ 7.3 受扭钢—混凝土组合梁连接件的设计方法	197
§ 7.4 曲线钢—混凝土组合梁连接件的设计方法	206
参考文献	209
第 8 章 组合梁弯剪扭强度的相关性分析	210
§ 8.1 概述	210
§ 8.2 开口截面组合梁弯扭作用下的理论分析	211
§ 8.3 开口截面组合梁弯剪扭相关曲线分析	215
§ 8.4 闭口组合梁弯剪扭相关性分析	219
参考文献	221
第 9 章 组合梁的抗扭刚度分析	222
§ 9.1 组合梁抗扭刚度的变化过程	222
§ 9.2 组合梁开裂前的弹性抗扭刚度	223

§ 9.3 组合梁开裂到极限状态的抗扭刚度	226
§ 9.4 组合梁在极限状态时的抗扭刚度	228
§ 9.5 弯矩和剪力对抗扭刚度的影响	229
§ 9.6 用扭矩—扭率曲线几何关系表示抗扭刚度	230
§ 9.7 混凝土翼板受扭分析时等效壁厚的取值方法	230
参考文献	232
第 10 章 开、闭口组合梁复合受扭的薄壁理论分析	233
§ 10.1 概述	233
§ 10.2 开口组合梁在复合受扭下约束扭转的非线性分析	234
§ 10.3 组合梁的扭转极限分析方法	245
§ 10.4 箱形组合梁的约束扭转分析	251
参考文献	258
第 11 章 抗扭组合梁的构造要求和设计过程	259
§ 11.1 概述	259
§ 11.2 影响组合梁抗扭极限强度的主要因素	259
§ 11.3 组合梁的一般设计要求	263
§ 11.4 组合梁抗扭设计的一般过程	266
参考文献	269
第 12 章 组合梁抗扭研究总结与研究展望	271
§ 12.1 研究结论	271
§ 12.2 值得进一步研究的问题	276
参考文献	278

第1章 绪 论

§ 1.1 钢—混凝土组合梁的起源、应用和发展

1.1.1 钢—混凝土组合梁的起源和发展

众所周知,任何成功的构件设计,往往都需要合理选择材料,充分利用材料的性能,使所用材料各尽所能、协同工作、充分发挥结构的整体作用。钢—混凝土组合构件正是基于这一思想创造出来的一种构件形式。1926年,J. Kahn 依据上述思想,在钢梁上外包混凝土,并在它们之间加入各式各样的连接件,获得了组合构件的专利权^{[1][2]},标志着钢—混凝土组合构件的出现。

随着组合构件应用范围的不断扩大,产生了众多的钢—混凝土组合构件形式:

- (1)钢—混凝土组合梁、柱;
- (2)钢—混凝土组合板、叠合板;
- (3)钢管混凝土组合柱;
- (4)预应力钢—混凝土组合构件等。

一般组合梁截面由四部分组成:

(1)钢筋混凝土翼板:形式有现浇钢筋混凝土板、压型钢板混凝土组合楼板、钢筋混凝土叠合板等。

(2)板托:是在混凝土翼板与钢梁上翼缘之间的承托部分。

(3)剪力连接件:是钢筋混凝土翼板与钢梁共同工作的基础,主要用来承受钢筋混凝土翼板与钢梁交界面之间的纵向剪力,且抵抗二者之间的相对滑移,还可抵抗钢筋混凝土翼板与钢梁之间的掀起作用。

(4)钢梁:一般的形式有工字形钢梁、焊接钢板梁、箱形钢梁、蜂窝梁、短桅梁。

可见,组合梁的形式、种类很多,本书仅研究用工字型钢梁(开口截面)