

钢筋混凝土结构设计理论丛书

抗 扭

殷芝霖 张 誉 王振东

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

筋的设置范围和其它构造要求。

本书由殷芝霖（国家机械工业委员会设计研究院）、张誉（同济大学）、王振东（哈尔滨建筑工程学院）共同编写，分工如下：第一、二、六、七、九、十章由殷芝霖编写，第三、四、八章由张誉编写，第五章由王振东编写；各章文字中的作者系指该章的编写者。康谷贻教授（天津大学）对本书作了全面审阅，提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。本书中引用了一些高等院校和科研单位的试验资料，在此一并表示感谢。本书可能有不少缺点或错误，热情欢迎读者提出批评指正。

作 者

一九九〇年四月

内 容 提 要

本书是钢筋混凝土结构设计理论丛书之一，主要介绍了：钢筋混凝土结构扭转的内力分析方法（包括开口薄壁构件的翘曲约束扭转），构件开裂前弹性阶段和塑性阶段的自由扭转理论，钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土构件在纯扭、拉扭、压扭、弯扭以及弯剪扭的复合受力情况下抗裂强度、极限强度、扭转刚度的计算方法以及配筋构造原理，本书着重对我国新规范中抗扭设计方法的依据进行了剖析和推导，为了加深对受扭机理的认识，同时介绍了构件在纯扭和复合受扭情况下内力和变形的全过程分析。

钢筋混凝土结构设计理论丛书

抗 扭

殷芝霖 张 誉 王振东 著
责任编辑 翁大厚 封面设计 刘景山

*

中国铁道出版社出版
(北京市东单三条14号)
中国铁道出版社发行 各地新华书店经售
中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092mm 1/32 印张：16.25 字数：374 千
1990年11月 第1版 第1次印刷
印数：1—2000册

ISBN 7-113-00839-9/TU·192 定价：7.85元

前 言

钢筋混凝土结构抗扭研究是一个发展较晚的课题，在国外研究的历史不长，在我国也只是近十年来才开始进行较系统的研究工作。在国内，目前还没有一本系统地阐述钢筋混凝土结构抗扭的专著，本书主要根据钢筋混凝土结构扭转设计与研究工作的需要，使读者阅读后，既能较为系统地掌握扭转理论及其设计方法，又能清楚地剖析当前国内外有关规范对扭转设计规定的依据。因此本书可作为设计、科研以及高等院校有关专业的参考用书。本书从下面六个方面作了论述。

一、从概念上分清结构的扭转类型入手，阐明如何合理地确定作用扭矩以及结构扭转的内力分析方法。这些内容在第一章中作了详细叙述。

二、经结构内力分析，确定构件承受的自由扭矩、翘曲约束扭矩、轴向力、弯矩和剪力后，需要计算构件的抗裂强度和极限强度。在第二章中，首先阐述了构件开裂前弹性阶段和塑性阶段的自由扭转理论，而后结合国内外的试验研究成果，推导了钢筋混凝土和预应力混凝土构件的纯扭、拉扭、压扭、弯扭以及弯剪扭抗裂强度的计算公式。为了限制构件的裂缝宽度，给出了验算裂缝宽度以及限制横向钢筋强度和纵筋强度比值的方法。在第三、四、五、六章中，从构件的破坏形态和机理入手，详细阐述了钢筋混凝土和预应力混凝土构件纯扭、拉扭、压扭、弯剪扭、拉弯扭以及压弯扭极限强度的各种计算理论；结合国内外大量试验研究成果，推导

了各种构件的极限强度计算方法。为了使读者对各种计算理论的概念更为清晰,还对不同计算理论导得的计算公式作了分析比较,结合国内外规范中的抗扭设计方法进行了评述。同时着重对我国规范中的抗扭设计方法的依据进行了分析。为了防止构件的脆性破坏,分析和研究了截面的最小配筋率、最大配筋率以及截面的限制条件。在第二章至第六章中所述及的作用扭矩都是指内力分析所得的自由扭矩。

三、不论是结构的弹性分析还是塑性分析,都需要掌握不同受力阶段的构件扭转刚度以及扭矩对构件弯曲刚度和剪变刚度的影响。在第七章中详细地阐述了钢筋混凝土和预应力混凝土纯扭、拉扭、压扭、弯扭以及弯剪扭构件的扭转刚度的理论分析方法,并结合大量试验研究成果给出了适用于工程设计的扭转刚度简化计算公式。同时从理论上分析了扭矩对弯曲刚度和剪变刚度的影响,给出了具体的实用计算方法。

四、为了加深对受扭机理的认识,在第八章中,介绍了采用逐步递增混凝土表面应变的非线性分析方法,并对国内外有关纯扭和复合受扭构件的试验数据,分析了从开始受荷到构件破坏全过程的内力与变形关系。

五、在扭矩作用下的开口薄壁构件,如工形、[形截面等构件除承受自由扭矩外,由于截面的翘曲约束作用,尚承受翘曲约束扭矩。在第九章中详细地推导了开口薄壁构件翘曲约束扭转的分析方法,并结合我国大量试验研究成果给出了工形截面梁和槽形墙板翘曲约束扭转的实用计算方法。

六、合理的配筋是抗扭设计的重要组成部分。在第十章中,从受扭构件的配筋原理入手,详细地分析了纵筋和箍筋的作用,结合大量试验研究成果以及国内外有关规范的规定,论述了箍筋的构造形式,纵筋和箍筋的间距以及抗扭钢

目 录

基本符号	1
第一章 绪 论	9
第一节 结构的扭转类型	10
第二节 结构的扭转分析	13
第三节 框架边梁协调扭转的简化设计方法	15
第二章 受扭构件的抗裂强度和裂缝宽度的限制	29
第一节 构件开裂前的扭转理论	29
第二节 构件的纯扭抗裂强度	43
第三节 构件的拉扭和压扭抗裂强度	51
第四节 构件的复合扭抗裂强度	56
第五节 构件裂缝宽度的限制	69
第三章 构件的纯扭强度	74
第一节 概 述	74
第二节 纯扭构件的破坏形态及其抗扭机理	76
第三节 空间桁架计算理论	83
第四节 斜弯破坏计算理论	96
第五节 协调压力场计算理论	105
第六节 对国内外规范有关纯扭强度 计算的述评	123
第七节 截面的最小配筋率	132
第八节 截面的限制条件和截面的 最大配筋率	137
第九节 钢筋混凝土构件纯扭强度 及配筋计算	144

第四章 有轴向压力作用的钢筋混凝土

构件的抗扭强度	153
第一节 压扭构件和预应力混凝土纯扭构件的 破坏形态及其影响因素	153
第二节 无腹筋预应力混凝土纯扭构件 和混凝土压扭构件的破坏机理 及其强度计算	160
第三节 有腹筋预应力混凝土纯扭构件 和钢筋混凝土压扭构件的工作机理 及其强度计算	170
第四节 对国内外规范有关压扭构件 及预应力混凝土纯扭构件 强度计算的述评	179
第五节 截面最小配筋率和截面限制条件	183
第五章 构件的弯剪扭强度	188
第一节 弯剪扭构件的破坏形态及机理	188
第二节 空间桁架计算理论	196
第三节 斜弯破坏计算理论	208
第四节 构件的弯剪扭强度及配筋计算	227
第五节 截面的构造配筋界限及最小配筋率	245
第六节 截面的限制条件	252
第七节 对国内外规范有关弯剪扭强度 计算的述评	257
第六章 构件的拉弯扭和压弯扭强度	281
第一节 钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土 构件的拉弯扭强度	282
第二节 钢筋混凝土构件的压弯扭强度	297
第七章 构件的扭转刚度	319

第一节	钢筋混凝土构件的纯扭刚度	320
第二节	轴向力对纯扭刚度的影响	336
第三节	长期荷载对纯扭刚度的影响	344
第四节	在弯矩和扭矩共同作用下的 扭转刚度和弯曲刚度	347
第五节	在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的 扭转刚度、弯曲刚度和剪变刚度	358
第六节	国外规范和研究论述中有关扭转刚度 计算的规定	362
第八章	钢筋混凝土受扭构件全过程分析	365
第一节	受扭构件全过程分析	365
第二节	有限元法的应用	387
第九章	开口薄壁构件的抗扭计算	407
第一节	翘曲约束扭转的弹性分析方法	409
第二节	上翼缘受扭时的工形梁分析方法	428
第三节	工形梁的扭转试验研究	439
第四节	槽形构件的扭转试验研究	454
第十章	构件的抗扭配筋构造	464
第一节	国外对构件抗扭配筋构造的研究论述	464
第二节	国内对构件抗扭配筋构造的试验情况	477
第三节	国内外规范对构件抗扭配筋构造的 规定	485
第四节	抗扭配筋构造	489
参考文献		496

基 本 符 号

材 料 性 能

- E —— 混凝土弹性模量;
 G —— 混凝土剪变模量;
 ν —— 混凝土泊松比;
 E_s —— 钢筋弹性模量;
 f —— 混凝土轴心抗压强度;
 f_{cm} —— 混凝土弯曲抗压强度;
 f_t —— 混凝土轴心抗拉强度;
 f_{tm} —— 混凝土弯曲抗拉强度;
 f_{cu} —— 混凝土立方强度;
 f'_c —— 混凝土圆柱体的抗压强度;
 f'_v —— 受压钢筋的屈服强度;
 f_v —— 受拉钢筋的屈服强度;
 f_{py} —— 预应力筋的屈服强度;
 f_{pe} —— 预应力筋的抗拉强度;
 f_{vo} —— 箍筋的屈服强度。

荷载效应和构件抗力

- N —— 轴向力;
 N_{trc} —— 构件的纯拉抗裂强度;
 N_{uo} —— 构件的轴心抗拉强度或轴心抗压强度;
 N_{po} —— 混凝土法向预压应力为零时预应力筋的合力;
 N_u —— 复合受力构件的轴心抗拉强度或轴心抗

压强度；

M ——弯矩；

$M_{c,ro}$ ——构件的纯弯抗裂强度；

$M_{c,rs}$ ——偏拉或偏压构件的抗裂强度；

$M_{c,rp}$ ——预应力混凝土构件的纯弯抗裂强度；

M_{cr} ——复合受力构件的受弯抗裂强度；

M_{uo} ——构件的纯弯强度；

M_{us} ——偏拉或偏压构件的抗弯强度；

M_{up} ——预应力混凝土构件的抗弯强度；

M_u ——复合受力构件的抗弯强度；

V ——剪力；

$V_{c,ro}$ ——构件的弯剪抗裂强度；

V_{cr} ——复合受力构件的弯剪抗裂强度；

V_{uo} ——构件的弯剪强度；

V_{us} ——偏拉或偏压构件的抗剪强度；

V_{up} ——预应力混凝土构件的抗剪强度；

V_u ——复合受力构件的抗剪强度；

V_{cs} ——钢筋混凝土受弯构件斜截面上受压区混凝土和箍筋的抗剪强度；

T ——扭矩；

T_s ——自由扭转力矩；纵筋承受的抗扭强度；

T_w ——弯曲扭转力矩；

T_t ——扭矩的扭转分量；

T_m ——扭矩的弯曲分量；

$T_{c,ro}$ ——构件的纯扭抗裂强度；

$T_{c,rs}$ ——拉扭或压扭构件的纯扭抗裂强度；

$T_{c,rp}$ ——预应力混凝土构件的纯扭抗裂强度；

T_{cr} ——复合受力构件的受扭抗裂强度；

- T_{uo} ——构件的纯扭强度；
 T_{uo}^p ——素混凝土构件的纯扭强度；
 T_{us} ——拉扭或压扭构件的抗扭强度；
 T_{up} ——预应力混凝土构件的抗扭强度；
 T_u ——复合受力构件的抗扭强度；
 T_c ——混凝土承受的抗扭强度；
 T_s ——箍筋承受的抗扭强度；
 T_{ss} ——钢筋骨架承受的抗扭强度；
 B ——双弯矩。

应 力 与 变 形

- σ ——由荷载产生的混凝土法向应力；
 σ_c ——由预加应力产生的混凝土法向应力；
 σ_s, σ'_s ——受拉区纵筋 A_s 及受压区纵筋 A'_s 的应力；
 $\sigma_{sp}, \sigma'_{sp}$ ——受拉区预应力筋 A_p 及受压区预应力筋 A'_p 在各受力阶段的应力；
 σ_{tp}, σ_p ——混凝土中的主拉应力及主压应力；
 σ_w ——开口薄壁构件翘曲约束扭转时产生的正应力；
 τ ——构件在剪力作用下混凝土剪应力；
 τ_t ——构件在扭矩作用下混凝土扭剪应力；
 τ_w ——开口薄壁构件翘曲约束扭转时产生的剪应力；
 q ——剪力流；
 ϵ_c ——混凝土的压应变；
 ϵ_{cu} ——混凝土的极限压应变；
 ϵ_s ——纵筋的拉应变；

ε_s ——钢筋的拉应变；

γ ——剪应变；

ϕ ——构件在扭矩作用下的扭转角；

$\frac{d\phi}{dz}$ ——构件在扭矩作用下，单位长度的扭转

角，可简写为 $\frac{d\phi}{dz} = \phi'(z)$ 或 ϕ' ；

θ ——构件在弯矩作用下的转角；

$\frac{d\theta}{dz}$ ——构件在弯矩作用下，单位长度的转角；

B ——构件的弯曲刚度；

K_t ——构件的扭转刚度；

K'_{t0} ——构件的弹性纯扭刚度；

K'_t ——构件开裂时的纯扭刚度；

K''_{t0} ——构件钢筋屈服时的纯扭刚度；

K''_t ——构件开裂后到钢筋屈服时的纯扭刚度；

K'''_{t0} ——构件在极限扭矩时的纯扭刚度；

f ——构件的挠度；

w_{max} ——最大裂缝宽度。

几 何 参 数

b ——矩形截面的短边尺寸，T形和工形截面的腹板宽度；

b_f 、 b'_f ——T形、工形截面受拉区及受压区的翼缘宽度；

c ——混凝土保护层厚度；

d ——圆截面的直径或钢筋直径；

h ——矩形截面的长边尺寸；

- h_0 ——截面有效高度；
 h_f, h'_f ——T形、工形截面受拉区及受压区的翼缘高度；
 a ——剪跨；
 d_s ——角部纵筋中心线连线的周边相切的内切圆直径；
 e_0 ——轴向力作用点至截面重心的距离；
 l_a ——受拉钢筋的锚固长度；
 s ——箍筋的间距；
 t ——箱形或筒形截面的壁厚；
 t_e ——箱形或筒形截面的有效壁厚或折算壁厚；
 u ——构件的截面周长， $u = 2(b + h)$ ；
 x ——混凝土受压区高度；
 z ——受拉纵筋合力点至混凝土受压区合力点的距离；
 A ——构件截面面积；
 A_0 ——构件换算截面面积；
 A_n ——构件净截面面积（扣除预应力筋及孔洞面积）；
 A_s, A'_s ——受拉区及受压区非预应力纵筋的截面面积；
 A_{ps}, A'_{ps} ——受拉区及受压区预应力纵筋的截面面积；
 A_{st}, A_{pt} ——全部非预应力及预应力抗扭纵筋的截面面积；
 A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

- A_{sv} ——抗扭箍筋的单肢截面面积；
 A_{cor} ——截面核芯部分的面积， $A_{cor} = b_{cor} \cdot h_{cor}$
 b_{cor} 和 h_{cor} 分别为从箍筋内表面计算的截面核芯部分的短边和长边的尺寸；
 u_{cor} ——截面核芯部分的周长， $u_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$ ；
 A'_{cor} ——箍筋中心线包围的截面面积， $A'_{cor} = b'_{cor} \cdot h'_{cor}$ ， b'_{cor} 和 h'_{cor} 分别为箍筋中心线的短边和长边尺寸；
 u'_{cor} ——箍筋中心线的周长， $u'_{cor} = 2(b'_{cor} + h'_{cor})$ ；
 A''_{cor} ——角部纵筋中心连线包围的截面面积， $A''_{cor} = b''_{cor} \cdot h''_{cor}$ ， b''_{cor} 和 h''_{cor} 分别为角部纵筋中心连线的短边和长边尺寸；
 u''_{cor} ——角部纵筋中心连线的周长， $u''_{cor} = 2(b''_{cor} + h''_{cor})$ ；
 $A^{\#}_{cor}$ ——剪力流路线包围的截面面积， $A^{\#}_{cor} = b^{\#}_{cor} \cdot h^{\#}_{cor}$ ， $b^{\#}_{cor}$ 和 $h^{\#}_{cor}$ 分别为剪力流路线的短边和长边尺寸；
 $u^{\#}_{cor}$ ——剪力流路线的周长， $u^{\#}_{cor} = 2(b^{\#}_{cor} + h^{\#}_{cor})$ ；
 ω ——扇性面积；
 W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩；
 W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；
 W_t ——截面抗扭塑性抵抗矩；
 W_{te} ——截面抗扭弹性抵抗矩；
 S_0 ——计算纤维以上部分的换算截面面积对构件换算截面重心的面积矩；

- S_0 ——扇性静矩；
 I ——截面的惯性矩；
 I_0 ——换算截面的惯性矩；
 I_p ——截面的极惯性矩；
 I_{ts} ——截面抗扭弹性惯性矩；
 α ——倾斜钢筋与构件纵轴的夹角；
 θ ——斜裂缝的倾角；空间桁架中斜压杆与构件纵轴的夹角。

计 算 系 数

- α ——考虑翘曲约束扭转影响的扭矩折减系数；
 α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值， $\alpha_E = E_s / E_c$ ；
 β ——横向钢筋强度与纵筋强度的比值；
 γ ——截面抵抗矩塑性系数；截面的宽高比， $\gamma = b/h$ ；受压区纵筋强度与受拉区纵筋强度的比值， $\gamma = A'_s f'_s / A_s f_s$ ，内力偶臂系数；
 ξ ——纵筋有效系数；相对坐标；
 η ——扭剪比， $\eta = T / v b$ ；
 ζ ——受扭构件纵筋与箍筋的配筋强度比，

$$\zeta = \frac{(f_y \cdot A_{st} + f_{yv} \cdot A_{pt})s}{f_{yv} \cdot A_{svt} \cdot u_{cor}}；$$
 ζ' ——受扭构件纵筋与箍筋的配筋体积比，

$$\zeta' = \frac{(A_{st} + A_{pt})s}{A_{svt} \cdot u_{cor}}；$$
 k ——弯曲扭转特性， $k = \sqrt{\frac{GI_{ts}}{EI_c}}$ ；

λ ——计算截面的剪跨比, $\lambda = \frac{M}{Vh_0} = \frac{a}{h_0}$;

ρ ——纵向受拉钢筋配筋率;

ρ_{vt} ——抗扭箍筋的配筋率;

ρ_{vt}^v ——抗扭箍筋的体积配筋率;

ρ_{lt}^v ——抗扭纵筋的体积配筋率;

ρ^v ——抗扭钢筋总体积配筋率;

φ ——长期荷载作用下混凝土的徐变系数; 槽形墙板的荷载调正系数;

ψ ——扭矩与弯矩的比值;

ψ_1 ——构件开裂时, 纯扭刚度的降低系数;

ω ——对于纯扭构件的抗裂强度, 由于轴向拉应力作用而降低的系数, 由于轴向压应力作用而提高的系数。

计 量 单 位

长度	m;
时间	s;
平面角	rad;
单位长度转角	rad/m;
力、重力	kN;
线分布力	kN/m;
弯矩、扭矩;	kN · m;
双弯矩;	kN · m ² ;
应力、材料强度;	MPa; (N/mm ²)。

第一章 绪 论

在建筑结构中,结构处于受扭的情况是不少的,但是处于扭矩单独作用下的情况则不多,大多都是复合受扭。例如桥梁、吊车梁、框架边梁、筒壳边梁、托梁、各种环梁、支承悬臂板或阳台的梁、螺旋楼梯、槽形墙板、侧转放置的马鞍形壳板、电杆…等都是处于弯矩、剪力和扭矩共同作用的复合受扭。对于托架结构,上弦处于轴压力、弯矩和扭矩的共同作用下工作,下弦则处于轴拉力、弯矩和扭矩的共同作用下工作。过去,在结构设计中,由于采用现浇钢筋混凝土结构,或截面尺寸较大的预制构件,相对于弯矩、轴向力和剪力而言,扭转属于次要因素,往往可忽略其影响或者采用保守的计算和构造措施来处理。随着高强材料的发展,在各种工程结构中广泛采用钢筋混凝土和预应力混凝土薄壁构件,结构跨度也不断扩大,以及抗震要求的提高,都使扭转的作用突出起来。七十年代以来,我国对钢筋混凝土和预应力混凝土结构扭转问题给予了明显重视。为了修订我国钢筋混凝土结构设计规范,成立了钢筋混凝土受扭科研专题组,开展了纯扭、压扭、弯扭、弯剪扭以及低周反复荷载下抗扭性能的试验研究,并对纯扭、压扭和剪扭构件进行了全过程分析。有关设计研究院、科研单位以及高等院校等结合工程实践进行了许多吊车梁、托梁、托架、箱形桥梁、雨蓬梁、槽形墙板、马鞍形壳板、电杆以及拉扭性能的试验研究。上述研究取得的大量科研成果,为修订具有我国自己特色的规范条文以及改进工程设计提供了科学依据。近凡年来,国际上对扭