

弯-剪-扭复合作用下考虑扭转翘曲的 U 形薄壁混凝土梁设计方法*

许见超^{1,2} 郭全全^{2* *} 陈圣刚^{2,3} 刁波² 班新林¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 100081, 北京; 2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 100083, 北京; 3. 济南大学土木建筑学院, 250022, 济南//第一作者, 助理研究员)

摘 要 基于弯-剪-扭复合作用下 U 形薄壁混凝土梁的试验和数值模拟参数分析研究成果, 提出 U 形梁约束扭转内力翘曲弯矩 M_w 和翘曲扭矩 T_w 的等效方法, 进而提出弯-剪-扭复合作用下考虑扭转翘曲的 U 形薄壁混凝土梁设计方法。对考虑扭转翘曲、不考虑扭转翘曲 2 种情况下的设计内力和计算极限荷载的结果进行对比分析。结果表明: 2 种情况下所得到的设计内力在内力类别和数值上均差异显著; 当扭弯比较小(约小于 1:8)时, 忽略扭转翘曲时得到的极限荷载计算值偏大; 当扭弯比较大(约大于 1:8)时, 忽略扭转翘曲时得到的极限荷载计算值偏小。

关键词 U 形薄壁混凝土梁; 弯-剪-扭复合作用; 扭转翘曲
中图分类号 TU375.102

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.009

Design Method of U-shaped Thin-walled Concrete Girders under Combined Effect of Bending-Shear-Torsion Considering Torsional Warping Effect

XU Jianchao, GUO Quanquan, CHEN Shenggang, DIAO Bo, BAN Xinlin

Abstract Based on the experimental and numerical simulation results of U-shaped thin-walled concrete girders under combined actions of bending, shear and torsion, an equivalent method of warping moment M_w and warping torque T_w is proposed, and then a design method of U-shaped thin-walled concrete girders under effect of combined bending-shear-torsion considering torsional warping is proposed. The differences on internal forces and calculated ultimate loads are analyzed between cases of considering and non-considering torsional warping respectively. The results show that there are significant differences both on the types and values of internal forces;

when the torque-bending moment ratio is small (about $<1:8$), the non-warping calculated ultimate load is relatively larger, and when the torque-bending moment ratio is large (about $>1:8$), the non-warping calculated ultimate load is relatively smaller.

Key words U-shaped thin-walled concrete girder; effect of combined bending-shear-torsion; torsional warping

First-author's address Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China

U 形薄壁混凝土梁可大幅降低建筑物的高度, 并具有隔声效果良好、造型美观等优点, 在城市轨道交通工程中得到广泛应用^[1]。在列车荷载横向偏心力、摇摆力、离心力以及横向风力的作用下, U 形梁会受到附加扭矩的影响。U 形梁为典型薄壁开口构件, 在扭矩作用下会发生约束扭转(同时发生圣维南扭转和翘曲扭转, 故又称复合扭转)^[2], 此时截面上不仅存在引起扭转剪应力的圣维南扭矩 T_c 和翘曲扭矩 T_w , 还存在引起翘曲正应力 σ_w 的翘曲弯矩 M_w 。

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》基于变角空间桁架模型给出了矩形截面、箱型截面和 T 型截面等闭口截面混凝土构件的圣维南扭转承载力计算公式, 但这些公式并未涉及开口截面的计算。GB/T 51234—2017《城市轨道交通桥梁设计规范》给出了 U 形梁的圣维南扭转承载力计算方法, 但未涉及 U 形梁的扭转翘曲效应。

* 中国国家铁路集团有限公司科研课题(K2019G005); 中国铁道科学研究院集团有限公司科研课题(2019YJ031); 国家自然科学基金项目(51778032)

* * 通信作者

TB 10092—2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》对此无相关规定。综上,现行的混凝土桥涵设计规范针对圣维南扭转给出了构件设计方法,但并未包含考虑扭转翘曲的 U 形薄壁混凝土梁的扭转设计。

本文基于 U 形薄壁混凝土梁在弯-剪-扭复合作用下的力学性能研究成果,提出 U 形薄壁混凝土梁计算 M_{ω} 和 T_{ω} 的等效方法,进而提出弯-剪-扭复合作用下 U 形薄壁混凝土梁考虑扭转翘曲效应的设计方法。

1 U 形薄壁混凝土梁的力学性能

1.1 U 形薄壁混凝土梁的约束扭转内力和应力

根据 Vlasov 薄壁开口构件约束扭转弹性理论(以下简称“Vlasov 理论”),梁端固支或简支的 U 形梁的约束扭转内力图如图 1 所示。梁截面上的内扭矩 T_{in} 等于 T_c 和 T_{ω} 之和,梁端固支和简支时 T_c 分别在 1/4 跨度处和支座截面处取得最大值。同时截面上还存在 M_{ω} ,梁端固支时 M_{ω} 在跨中和支座截面达到最大值(符号相反),梁端简支时 M_{ω} 在跨中达到最大值。

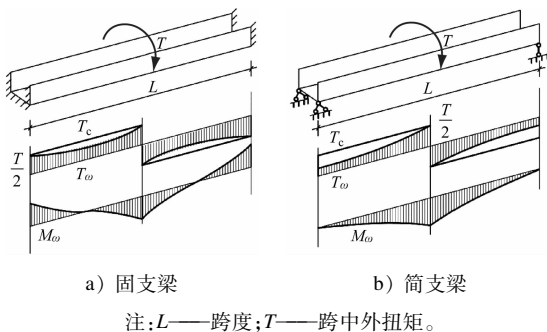


图 1 U 形薄壁混凝土梁约束扭转内力分布图

梁端固支时的翘曲弯矩最大值 $M_{\omega 1}$ 、梁端简支时的翘曲弯矩最大值 $M_{\omega 2}$ 的计算式分别为:

$$M_{\omega 1} = 0.5Tk[\cosh(0.5L/k) - 1]/\sinh(0.5L/k) \quad (1)$$

$$M_{\omega 2} = 0.5Tksinh(0.5L/k)/\cosh(0.5L/k) \quad (2)$$

式中:

k ——约束扭转特征长度。

约束扭转应力分布如图 2 所示。圣维南扭转剪应力 τ_c 沿 U 形截面环向流动,翘曲扭矩剪应力 τ_{ω} 在两腹板与 T_{ω} 同向,在底板部分区段与 T_{ω} 反向;翘曲正应力 σ_{ω} 沿 U 形截面反对称分布。

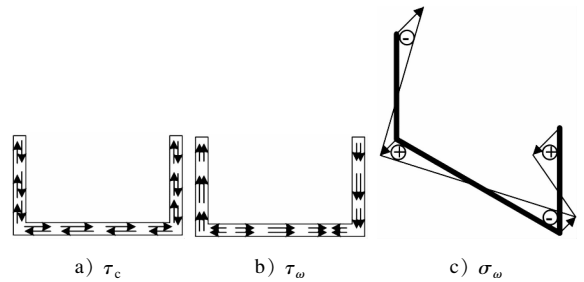


图 2 U 形薄壁混凝土梁约束扭转应力分布图

1.2 试验研究

本文选取 5 根 1:4 缩尺 U 形薄壁混凝土梁,编号分别为试件 1#、试件 2#、试件 3#、试件 4#、试件 5#。梁试件平面图见图 3 a),其 1-1 截面的配筋情况见图 3 b)。其中,试件 1#~试件 4# 的纵筋直径为 8 mm,试件 5# 的纵筋直径为 10 mm。所有试件的混凝土等级均为 C40。

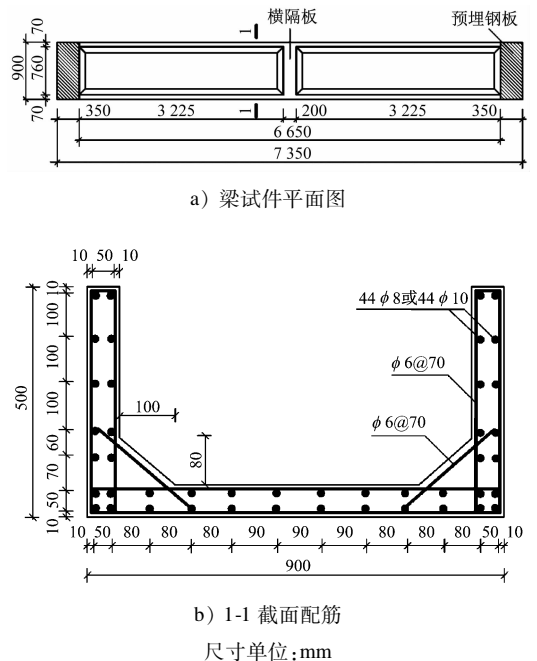


图 3 梁试件的几何尺寸与配筋

分别对这 5 个试件进行纯扭试验和弯-剪-扭复合加载试验^[3-5]。梁试件端部固支,通过 2 个千斤顶在跨中施加等大反向力实现扭矩加载,通过跨中荷载横向偏心实现弯-剪-扭复合加载。试件在跨中处的 T 与 M_b (弯矩)之比(以下简称“扭转比”)分别为 1:5、1:1 和 1:0 (即纯扭试件)。试件在不同扭转比下的极限荷载如表 1 所示。

表 1 U 形梁试件的极限荷载

试件	扭转比	$M_b/(kN \cdot m)$	$T/(kN \cdot m)$
试件 1 [#]	1:5	174.0	34.8
试件 2 [#]	1:1	92.0	92.0
试件 3 [#]	1:0	0	147.0
试件 4 [#]	1:0	0	151.0
试件 5 [#]	1:0	0	199.7

试验结果表明,不同扭转比作用下的 U 形薄壁混凝土梁试件均发生了适筋弯曲破坏。当扭转比为 1:5 时,弯曲破坏由 M_b 主导,两腹板同向弯曲,弯曲应力 σ_b 和较小的 σ_w 在加载侧(距荷载较近)腹板处叠加,致使加载侧腹板跨中截面发生底部受拉、顶部受压的适筋弯曲破坏。当扭转比为 1:1 时,弯曲破坏由 M_b 和 M_w 共同主导, M_b 和 M_w 产生的正应力大小相当,二者在加载侧腹板处叠加产生弯曲破坏,在非加载(距荷载较远)侧腹板处则相互抵消、处于低应力状态。当扭转比为 1:0 时,破坏由 M_w 主导,两腹板反向弯曲,此时跨中和支座截面处的 M_w 大小相等,跨中截面和支座截面均发生弯曲破坏。

1.3 数值模拟分析

基于试验研究结果^[6-7],本文利用有限元数值模型,选取了边界条件、跨高比以及纵筋-箍筋配筋强度比 3 个关键参数,对 U 形薄壁混凝土梁的受力性能进行系统研究,取得以下主要结论:

1) 纯扭矩作用下,在跨高比逐渐增加的过程中,梁端固支 U 形梁的破坏模式由 T_w 主导的剪切型破坏(跨高比为 8~10 时)演变为由 M_w 主导的弯曲破坏(跨高比为 12~16 时),再演变为弯曲-剪切破坏(跨高比为 18~20 时 M_w 主导的弯曲破坏和 T_c 主导的剪切型破坏同时发生)。当梁端简支时,随着跨高比变化,上述破坏过程的演变速度更快。

2) 在弯-剪-扭复合作用下,随着扭转比的增加,U 形梁破坏模式的变化趋势为由弯曲破坏向剪切型破坏转变。在已有工程应用中,连续 U 形梁的跨高比一般为 13~15,此时任意扭转比作用下均会发生弯曲破坏;简支 U 形梁的跨高比一般为 10~12,此时扭转比小于 1:2 时会发生弯曲破坏,扭转比大于 1:2 时会发生弯曲-剪切破坏。

1.4 极限状态内力分析和承载力计算

基于弯-剪-扭复合作用下 U 形薄壁混凝土梁的试验研究和有限元参数分析结果,本文进一步进行

极限状态内力分析和承载力计算,设 V 为截面剪力。如图 4 a) 所示,将半 U 截面上的 σ_w 积分为等效弯矩 M_{eq} 和轴力 N_{eq} ,即将 M_w 等效为作用在半 U 截面上的 M_{eq} 和 N_{eq} ;如图 4 b) 所示,将 T_w 等效为作用在两腹板上的剪力 V_w 。在弯-剪-扭复合作用下,弯曲破坏发生在 M_b 和 M_w 取最大值跨度位置的加载侧半 U 截面处,其相应的内力为 N_{eq} 、合成弯矩 $(M_{eq} + M_b/2)$ 以及合成剪力 $(V/2 + V_w)$ 。剪切型破坏发生在 T_c 取最大值跨度位置的加载侧腹板处,其相应的内力为 $(W_{tw}/W_t) T_c$ (W_{tw} 为腹板受扭塑性抵抗矩, W_t 为 U 形截面受扭塑性抵抗矩),以及合成剪力 $(V/2 + V_w)$ 。

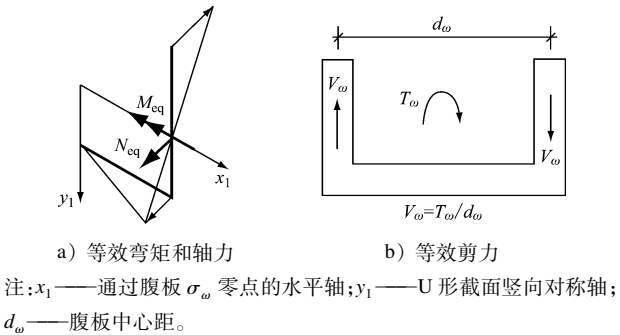


图 4 M_w 和 T_w 的等效计算方法

考虑到 U 形梁腹板上分布纵筋较多,加载侧半 U 截面的正截面轴力-弯矩承载力计算可根据剪力墙正截面承载力计算方法进行,具体可见文献[3]。加载侧腹板的抗剪和扭-剪承载力根据变角空间塑性桁架理论进行计算。对于任意特定扭转比加载工况,其截面内力扭矩-弯矩-剪力比例一定,分别在弯曲破坏危险截面处和剪切型破坏危险截面处令截面内力等于截面承载力,可计算得到发生弯曲破坏和剪切型破坏的外荷载 P_f 和 P_s ,这 2 种破坏外荷载的较小值即为真实极限荷载计算值,相应的破坏模式为真实破坏模式。经与试验及数值模拟分析结果对比,三者相互吻合良好。

2 U 形薄壁混凝土梁设计方法

2.1 内力分析

内力分析的关键为约束扭转内力分析,采用上文所述的内力等效方法。具体步骤为根据 U 形梁支撑条件和外荷载分布,采用 Vlasov 理论进行约束扭转内力计算,再将 M_w 在弯曲破坏危险加载侧半 U 截面上等效为弯矩 M_{eq} 和轴力 N_{eq} ,在剪切破坏危险加载侧腹板上将 T_w 等效为剪力 V_w 。叠加截面上

的弯矩和剪力后即得设计内力。

2.2 承载力设计

基于内力分析结果进行承载力设计,对于加载侧半 U 截面,其正截面承载力计算采用上文 1.4 节的计算方法。对于加载侧腹板的抗剪和扭-剪承载力计算,采用现行《城市轨道交通桥梁设计规范》方法。

相比现行规范,本文设计方法的关键点在于采用 U 形薄壁梁的约束扭转内力并进行等效,而不是忽略 U 形薄壁梁的翘曲扭转效应。

3 是否考虑扭转翘曲的设计内力和极限荷载计算值差异分析

3.1 设计内力对比

本文以在试验梁试件跨中作用 1 kN·m 的外扭矩为例进行分析。跨中加载侧半 U 截面以及 1/4 跨度处加载侧腹板的设计内力如表 2~3 所示。由表 2~3 可以看出,是否考虑扭转翘曲所得到的设计内力在内力类别和数值上均有差异显著。

表 2 U 形梁加载侧半 U 截面的设计内力计算结果				
边界条件	考虑扭转翘曲时			不考虑扭转翘曲时
	$M_{eq}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	N_{eq}/kN	V_{ω}/kN	$T_c/(\text{kN}\cdot\text{m})$
梁端固支	0.96	0.72	0.60	0.25
梁端简支	1.33	1.01	0.60	0.25

表 3 U 形梁加载侧腹板的设计内力计算结果			
边界条件	考虑扭转翘曲时		不考虑扭转翘曲时
	$T_c/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_{ω}/kN	$T_c/(\text{kN}\cdot\text{m})$
梁端固支	0.036	0.45	0.141
梁端简支	0.087	0.23	0.141

3.2 极限荷载计算值对比

以试件 2# 的几何、材料和边界参数为例,分别计算考虑扭转翘曲、忽略扭转翘曲 2 种情况下试件的极限荷载。如图 5 所示, V 与 M_b 的关系为: $M_b = VL/4$ 。从图 5 可知,当扭弯比较小(约小于 1:8)时,忽略扭转翘曲的极限荷载计算值偏高,即偏于危险;当扭弯比较大(约大于 1:8)时,忽略扭转翘曲的极限荷载计算值偏小;纯扭转(扭弯比为 1:0)时,考虑扭转翘曲的极限扭矩计算值为 133.4 kN·m,而忽略翘曲的极限扭矩计算值为 53.4 kN·m,二者差异巨大。

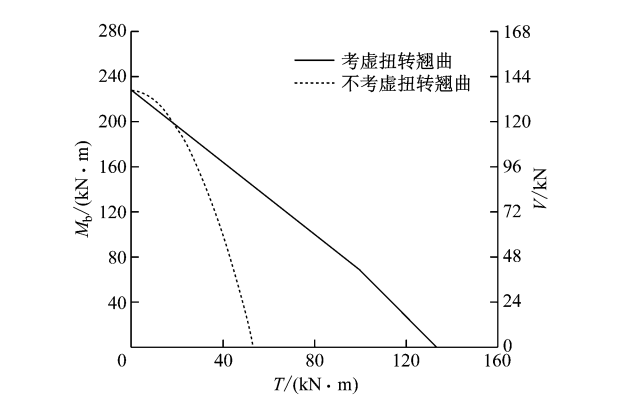


图 5 U 形梁极限荷载的计算结果

4 结论

1) 扭转翘曲所得到的设计内力结果在内力类别和数值上均差异显著,U 形薄壁混凝土梁的设计应考虑扭转翘曲的影响。

2) 当扭弯比较小(约小于 1:8)时,忽略扭转翘曲时得到的极限荷载计算值偏大;当扭弯比较大(约大于 1:8)时,不考虑扭转翘曲时得到的极限荷载计算值偏小。

参考文献

[1] 贺恩怀. 槽形梁在城市轨道交通工程中的应用 [J]. 铁道工程学报, 2003(2):13.

[2] VLASOV V. Thin-walled elastic beams [M]. Washington: Office of Technical Services, 1961: 33.

[3] XU J C, CHEN S G, GUO Q Q, et al. Experimental and analytical studies of U-shaped thin-walled RC Beams under combined actions of torsion, flexure and shear [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018(1):1.

[4] 许见超, 陈圣刚, 郭全全, 等. 钢筋混凝土 U 形薄壁梁弯-剪-扭复合受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018(增刊 1):279.

[5] CHEN S G, DIAO B, GUO Q Q, et al. Experiments and calculation of U-shaped thin-walled RC members under pure torsion [J]. Engineering Structures. 2016, 106:1.

[6] XU J C, DIAO B, GUO Q Q, et al. Parametric study on mixed torsional behavior of U-shaped thin-walled RC girders [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018:1.

[7] XU J C, DIAO B, GUO Q Q, et al. Interaction of bending, shear and torsion in U-shaped thin-walled RC girders [J]. Engineering Structures, 2019, 179:655.

(收稿日期:2020-09-06)