

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.06.037

中欧混凝土结构设计规范有关受扭承载力计算的比较

董官炯, 商开卫, 王树平

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 欧洲规范在国际工程建设领域应用较多,通过对《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)和《混凝土结构设计》(EN 1992—1—1)有关构件受扭承载力计算进行比较研究,并结合吊车梁计算实例,分析中欧规范在混凝土受扭构件结构计算中的差异。结果表明采用欧洲规范进行受扭构件结构计算的安全度要高于中国规范,计算所需钢筋截面面积也更大。

关键词: 受扭承载力计算;中欧混凝土结构设计规范;吊车梁;比较

中图分类号: TV331;TV314

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0219—04

Comparison of Torsional Capacity Calculation Between Chinese and European Concrete Structure Design Codes

DONG Guanjiong, SHANG Kaiwei, WANG Shuping

(Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: European standards have been widely applied in the field of international engineering construction. The torsional capacity calculation between DL/T 5057—2009 Design Specification for Hydraulic Concrete Structures and EN 1992—1—1 Design of Concrete Structures is compared in this paper, and differences of structural calculation of concrete torsion member are analyzed combined with the crane beam calculation. The results show that the safety degree of the torsion structure calculated by the European standards is higher and the reinforcement area is larger.

Keywords: torsional capacity calculation; Chinese and European concrete structure design standards; crane beam; comparing

近年来,越来越多的中国企业走出国门,响应国家“一带一路”和“走出去”的战略号召,承包国外各种各样的工程建设项目,因此了解国际常用规范和国内规范的差异很有必要。而目前在国际工程建设领域较为通用的欧洲 EN 标准,虽然混凝土结构设计的基本原理和中国标准相同,都是采用概率论为基础的极限状态设计方法,但在计算公式和实际应用上跟国内规范还是存在一些差异^[1-10]。本文主要就国标《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)^[11]和欧标《混凝土结构设计》^[12](EN 1992—1—1)有关混凝土构件受扭承载力计算进行对比,希望能为相关工程设计人员提供参考。

1 纯扭构件的承载力计算

对于承受纯扭作用的钢筋混凝土构件,中国规范采用变角空间桁架模型,假定薄壁上的混凝土为斜压腹杆、箍筋为受拉腹杆、纵筋为受拉弦杆组成一变角空间桁架。而欧洲规范采用的是以封闭薄壁空间桁架模型,纵向钢筋和箍筋作为拉杆承受拉力,裂缝间混凝土作为压杆承受压力。

中国规范的矩形截面纯扭构件的受扭承载力计算公式如下:

$$T \leq \frac{1}{\gamma_d}(T_c + T_s) \quad (1)$$

$$T_c = 0.35f_t W_t \quad (2)$$

$$T_s = 1.2\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (3)$$

欧洲规范受扭承载力计算公式如下:

$$\frac{\sum A_{si} f_{yd}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \cot\theta \quad (4)$$

$$\frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} = \frac{\sum A_{si} f_{yd}}{u_k} \tan^2\theta \quad (5)$$

式中: T 、 T_{Ed} 为扭矩设计值; T_c 为混凝土受扭承载力; T_s 为箍筋受扭承载力; W_t 为受扭构件的截面受扭塑性抵抗矩; ζ 为抗扭纵筋和箍筋的配筋强度比; A_{stl} 、 A_{sw} 为抗扭箍筋面积; A_{si} 为抗扭纵筋截面面积。

从以上公式可以看出, 欧洲规范没有考虑混凝土参与抗扭, 而中国规范按混凝土和钢筋共同承担扭矩作用。

2 复杂受力构件的承载力计算

在受弯矩、剪力和扭矩共同作用下的钢筋混凝土构件, 其受力状态十分复杂。构件的破坏特征及其承载力, 与荷载条件及构件的内在因素有关。

2.1 构件在剪、扭作用下的承载力计算

对于承受剪力、扭矩作用的钢筋混凝土构件, 中国规范按四分之一圆规律考虑受剪承载力和受扭承载力的相互影响, 通过引入剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数 β_t ($0.5 \leq \beta_t \leq 1$) 来计算抗剪和抗扭钢筋面积, 计算公式如下:

$$V \leq \frac{1}{\gamma_d} [0.7(1.5 - \beta_t) f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0] \quad (6)$$

$$T \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.35\beta_t f_t W_t + 1.2\sqrt{\zeta} \frac{f_{yv} A_{stl} A_{cor}}{s}) \quad (7)$$

式中: V 为剪力设计值; A_{sv} 为受剪承载力所需的箍筋截面面积; A_{stl} 为受扭承载力所需的箍筋截面面积。

而欧洲规范对于剪、扭共同作用的构件, 承载力仍按桁架模型进行计算, 压杆和构件轴线夹角 θ 的取值相同, 需要的箍筋面积为剪力和扭矩单独计算的钢筋面积之和, 没有考虑受剪承载力和受扭承载力的相互影响。

2.2 构件在弯、剪、扭作用下的承载力计算

构件在弯、扭作用或者弯、剪、扭作用下, 中欧规范的计算方法基本相同。在弯矩、扭矩共同作用下的钢筋混凝土构件, 可分别计算接受弯构件的正截面受弯承载力和纯扭构件的受扭承载力进行计算配筋, 位于相同部位处的钢筋可将所需钢筋截面面积叠加后统一配置; 在弯矩、剪力和扭矩共同作用下的

承载力, 按照受弯和受剪扭分别计算, 然后进行叠加的近似计算方法, 即纵向钢筋截面钢筋分别按正截面受弯承载力和剪扭构件受扭承载力计算, 箍筋截面面积分别按剪扭构件的受剪和受扭承载力计算确定, 然后叠加后统一配置在相应位置上。

3 受扭构件的构造要求

中欧规范对受扭构件的截面尺寸和构造配筋的要求及条件分别进行了规定。

3.1 截面控制条件

当截面尺寸过小而配筋过多时, 混凝土构件将由于混凝土先被压碎而破坏。因此, 必须对截面的最小尺寸进行限制, 以防止这种破坏的发生。中国规范认为, 剪扭构件截面控制条件基本上符合剪、扭叠加的线性关系, 截面尺寸按下式确定:

$$\text{当 } h_w/b \leq 4 \text{ 时, } \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.25f_c) \quad (8)$$

$$\text{当 } h_w/b = 6 \text{ 时, } \frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.2f_c) \quad (9)$$

当 $4 < h_w/b < 6$ 时, 按线性内插法确定。

欧洲规范认为, 剪力和扭矩共同作用下混凝土构件的最大承载力取决于混凝土压杆的承载力。为不超过最大承载力, 欧洲规范规定实心截面构件的截面应满足下列条件:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1 \quad (10)$$

式中: $T_{Rd,max}$ 为设计抵抗扭矩; $V_{Rd,max}$ 为最大受剪承载力设计值。

3.2 构造配筋

对承受弯、剪、扭的构件, 为防止发生少筋破坏, 抗扭纵筋和箍筋应满足最小配筋率要求。中欧规范对弯剪扭构件的抗扭纵筋和箍筋的最小配筋率见表 1。

表 1 混凝土梁抗扭纵筋和抗扭箍筋的最小配筋率

规范类别	抗扭纵筋 类型	抗扭纵筋 最小配筋 率/%	抗扭箍筋 类型	抗扭箍筋 最小配筋 率/%
中国规范 DL/T 5057—2009	HPB235 级钢筋	0.30	HPB235 级钢筋	0.20
	HPB300 级钢筋	0.24	HPB300 级钢筋	0.17
	HRB335 级钢筋	0.20	HRB335 级钢筋	0.15
欧洲规范 EN 1992—1—1		$0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \geq 0.0013$		$\frac{0.08}{f_{yk}} \sqrt{f_{ck}}$

需要注意的是, 中国规范规定, 配置在截面弯曲受拉边的纵向受力钢筋, 其截面面积不应小于受弯

钢筋最小配筋率计算出的钢筋面积和按表 1 受扭纵向钢筋最小配筋率计算并分配到弯曲受拉边的纵向钢筋截面面积之和,而欧洲规范纵向受拉钢筋最小截面面积即为表 1 的最小配筋率计算的钢筋截面面积。对于箍筋的最小截面面积,中欧规范都是按照表 1 所示的最小配筋率直接进行计算。

为了防止脆性破坏,中欧规范规定,当满足下列条件时,不需要进行剪扭承载力计算,仅需按构造要求配置钢筋。

中国规范规定按构造配筋的条件:

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq \frac{1}{\gamma_d}(0.7f_t) \quad (11)$$

欧洲规范规定按构造配筋的条件:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} \leq 1 \quad (12)$$

式中: $T_{Rd,c}$ 为开裂扭矩; $V_{Rd,c}$ 为无抗剪钢筋构件的受剪承载力设计值。

4 厂房吊车梁结构计算实例

吊车梁属于水电站厂房上部的重要结构之一,同时承受弯、剪、扭共同作用,受力比较复杂,有利于比较中欧规范对受扭承载力计算的差异。现采用科特迪瓦苏布雷水电站主厂房的吊车梁进行举例计算。该水电站位于科特迪瓦西南部,是萨德拉河上的第二个梯级,目前是科特迪瓦境内最大的水电站。电站主厂房为地面式,厂内安装三台单机容量为 90 MW 的混流式水轮发电机组,设置一台 200 t + 200 t/40 t/10 t 双小车电动双梁桥式起重机,跨度为 19.4 m。

4.1 计算基本资料

吊车梁跨度为 8 m,其截面尺寸见图 1。桥机共 16 个轮子,单侧 8 个轮子,双轨横向刹车力 49 kN,单轨大车水平侧向力 191 kN,单轨大车纵向刹车力 152 kN。吊车梁所用材料参数见表 2。

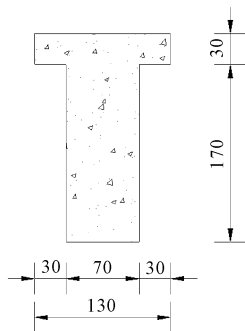


图 1 吊车梁截面(单位:cm)

表 2 材料物理力学参数表

材料类型	特性	强度标准值/MPa	强度设计值/MPa	对应中国规范
混凝土 C25/30	抗压强度	25	16.7	C30
钢筋 B500	抗拉强度	500	435.0	HRB500

4.2 计算工况及荷载

吊车梁计算工况分为桥机正常运行工况和吊车梁起吊安装两种工况,承受的荷载主要有桥机荷载和结构及附件重^[13]。荷载组合见表 3。

表 3 吊车梁计算工况及荷载组合表

工况	荷载组合	
	中国规范	欧洲规范
桥机正常运行工况	$S = 1.05S_{Gk} + 1.1S_{Qk}$	$S = 1.35G_k + 1.35Q_k$
起吊安装工况	$S = 1.5SG_k$	$S = 1.5G_k$

注:欧洲规范规定桥机荷载分项系数取 1.35^[14]。

吊车梁主要是承受吊车荷载的承重结构,故桥机正常运行工况为吊车梁的控制性工况。从表 3 中可以看出,在该工况下欧洲规范的荷载分项系数大于中国规范,但需要说明的是,在结构设计中,欧洲规范只有荷载分项系数 γ_f 、材料分项系数 γ_m ,中国规范中除以上两个系数外,还有结构系数 γ_d 、结构重要性系数 γ_0 、设计状况系数 ψ 。为比较吊车梁结构分别采用中、欧规范进行计算的安全度,令 $K_0 = \gamma_f\gamma_m\gamma_d\gamma_0\psi$, $K_1 = \gamma_f\gamma_m$ (注:在计算桥机竖向荷载时,需计入动力系数 u ,中国规范取 1.05^[15],欧洲规范取 1.1^[14])。吊车梁结构在桥机正常运行工况下分别按照欧洲中国规范和欧洲规范其安全度对比见表 4。

表 4 吊车梁结构计算中欧规范安全度对比表

工况	国标 K_0 (I 级结构)				欧标 K_1			
	恒载/混凝土	恒载/钢筋	活载/混凝土	活载/钢筋	恒载/混凝土	恒载/钢筋	活载/混凝土	活载/钢筋
桥机正常运行工况	1.94	1.52	2.13	1.68	2.03	1.55	2.23	1.71

从表 4 可以看出,在桥机正常运行工况下 $K_1 > K_0$,故采用欧洲规范进行吊车梁结构设计的安全度要高于中国规范。

4.3 计算结果

分别按照中国规范和欧洲规范对吊车梁结构进行配筋计算,计算结果见表 5。

表 5 吊车梁计算成果对比表

标准类型	计算 跨度 /m	最小保 护层厚 度/mm	竖向最 大弯矩 /(kN·m)	竖向最 大剪力 /kN	横向最 大弯矩 /(kN·m)	横向最 大剪力 /kN	最大 扭矩 /(kN·m)	计算抗 弯纵筋 A_s/mm^2	计算抗 扭纵筋 A_{st}/mm^2	计算抗 剪扭箍 筋 $A_{sw}/s/mm$	裂缝 宽度 /mm
中国规范	8.40	30	4398.13	2697.31	184.25	114.63	181.0	7680	1291	3.14	0.22
欧洲规范	8.39	30	6115.45	3494.38	241.35	140.68	202.4	8385	1887	3.93	0.21
备注							腹板 + 翼缘	腹板 + 翼缘	腹板 + 翼缘		

从表 5 可以看出,吊车梁在相同荷载情况下,采用中国规范计算出的所需钢筋面积比采用欧洲规范计算的小,这和 4.2 节得出的安全度对比结论是相吻合的。

5 结 论

中欧混凝土结构设计规范有关受扭构件承载力计算的基本原理是相同的,都是采用以概率论为基础的极限状态设计方法,同样采用分项系数法,但两种规范的计算公式和要求存在较大差异,分项系数取值也不相同。通过对比和实例分析,采用欧洲规范进行受扭构件结构计算的安全度要高于中国规范,计算所需钢筋截面面积也更大。因此,在国际项目上的受扭构件结构计算,合理选择计算标准是很重要的,但需要先征得业主或者监理工程师的同意。

参考文献:

- [1] 贡金鑫,车 秩,李荣庆. 混凝土结构设计(按欧洲规范)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:5-24.
- [2] 李先顺,李 刚. 中、欧标准中混凝土结构基本要求的对比研究[J]. 建筑结构,2020,50(5):99-103,92.
- [3] 蒋国栋,张建鑫. 中欧混凝土结构设计规范的差异[J]. 水运工程,2017(9):53-57.
- [4] 袁 博. 国内外混凝土简支梁受弯设计比较[J]. 铁道勘测与设计,2012(4):40-43.
- [5] 丁少凌,周国玲,易 蓓,等. 中欧规范混凝土构件承

载力对比[J]. 中外公路,2017,37(2):276-280.

- [6] 王新洋. 中欧混凝土结构设计规范中材料特性对比[J]. 四川建材,2017,43(1):60-61,68.
- [7] 李 旭,段世明. 中欧规范混凝土梁受剪承载力公式对比[J]. 低温建筑技术,2015,37(1):85-87.
- [8] 夏 进. 中欧混凝土结构设计规范对比研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2014.
- [9] 祝振兴. 中欧美标钢筋混凝土梁设计对比分析[J]. 水泥工程,2018(2):8-12,16.
- [10] 石程程,马 颖,罗国杰,等. 国内外不同规范对弯剪破坏钢筋混凝土墩柱的受剪承载力计算比较[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(5):20-25.
- [11] 水工混凝土结构设计规范:DL/T 5057—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode 2 – Design of concrete structures – part 1 – 1: General rules and rules for buildings: EN 1992—1—1[S]. BSI: Brussels,2004.
- [13] 张晓昕,王 涛,谷金操,等. 考虑围岩开挖响应的岩壁吊车梁受力分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):56-60.
- [14] European Committee for Standardization. Eurocode 1 – Actions on structures part3: Actions induced by cranes and machinery: EN 1991—3[S]. BSI: Brussels,2006.
- [15] 水工建筑物荷载设计规范:DL 5077—1997[S]. 北京:中国电力出版社,1997.

(上接第 201 页)

- [8] 张亚洲,温竹茵,由广明,等. 上软下硬复合地层盾构隧道设计施工难点及对策研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(4):669-676.
- [9] 杨才千,刘 强,瞿 冯,等. 砒砂岩风化特性试验[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):10-15.
- [10] 王 含,周征宇,郭恺鹏,等. 昌化地开石次生矿风化层矿物学特征[J]. 岩石矿物学杂志,2019,38(3):410-416.
- [11] 金 旭,熊传祥,钟富林. 酸污染条件下花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):194-198.

- [12] 柴肇云,张亚涛,张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(5):1188-1193.
- [13] 蒲 诚,陈蕴生,周 冲,等. 岩石室内单轴压缩试验位移加载速率的研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):161-164.
- [14] 夏 磊,姚劲松,蒋 磊. 层状类岩体室内制样方法及单轴压缩力学机理研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):70-76,98.
- [15] 周恩革. 闪长岩强风化带做高层建筑天然地基的可行性研究[J]. 智能城市,2018,4(4):44-45.