

中美欧规范浅基础抗冲切承载力对比研究

任新建¹, 彭翔^{2*}

(1. 长沙市规划勘测设计研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司)

摘要:浅基础结构冲切的受力机理复杂,世界各国规范中基础冲切验算的临界边界、影响因素、计算方法等都有较大差异。针对浅基础抗冲切的设计要求,该文对比研究中美欧3种规范,并结合简化算例对3种规范的冲切承载力进行了量化对比。结果表明:各国均认为混凝土抗拉强度是基础抗冲切承载力的主要控制因素,但在临界截面的位置和纵筋的贡献等方面存在差异。

关键词:中美欧规范;浅基础;钢筋混凝土;冲切

随着中国“一带一路”倡议的推进,越来越多中国工程企业赴海外进行基础设施建设。而海外工程大多采用欧美标准进行设计、建造,这就要求中国工程师不仅需要熟悉中国规范,也亟需了解相关欧美规范。

在路桥结构中,地基基础作为重要的组成部分,承担起将其上部荷载传递至土壤或者岩石基础的作用,是上部结构的“稳定器”。地基基础的合理设计关系整个结构体系安全,同时需满足经济、适用基本原则。在浅基础结构设计中,抗冲切承载力是必要的验算环节,一般由其控制基础的有效厚度。世界各国规范中基础冲切验算的临界边界、影响因素、计算方法等都有较大差异。该文对比研究中美欧3种规范在浅基础中抗冲切验算中的异同,并以浅基础中的柱下独立基础作为示例进行具体对比计算。

1 中美欧浅基础冲切计算公式

1.1 中国规范公式

中国 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》采用极限状态设计方法,规定验算地基承载力时,传递到基础上的荷载应按照正常使用极限状态下的标准组合进行计算;而验算基础抗冲切承载力时,传递到基础上的荷载应按照承载能力极限状态下的标准组合进行计算。规范同时明确“对柱下独立基础,当冲切破坏锥体落在基础底面以内时,应

验算柱与基础交接处以及基础变阶处的受冲切承载力”,基础的抗冲切承载力计算如图1所示,其计算公式如下:

$$\begin{cases} \gamma_0 F_{ld} \leq 0.7\beta_h f_{td} b_m h_0 \\ F_{ld} = p_s A \\ b_m = (b_t + b_b) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; β_h 为截面高度 h 尺寸效应系数,当 $h \leq 300$ mm时, β_h 取1.0;当 $h \geq 800$ mm时, β_h 取0.85,其间按直线插入取值; f_{td} 为混凝土轴心抗拉强度设计值; b_m 为冲切破坏锥体最不利一侧计算长度,由冲切破坏锥体的上边长 b_t 和下边长 b_b 计算得到; h_0 为基础的有效高度; p_s 为在荷载设计值作用下基底单位面积上的反力。

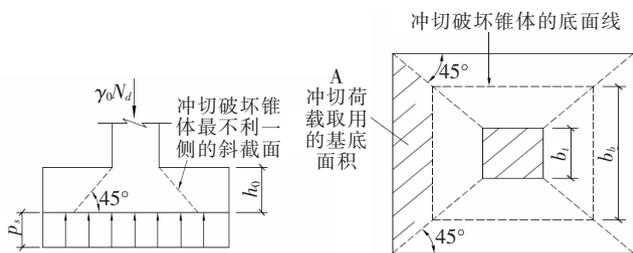


图1 中国规范冲切验算截面

1.2 美国规范公式

美国国家公路与运输协会(AASHTO)和美国混凝土学会(ACI)规范同样采用了极限状态设计方法,规定构件的设计承载力不低于所需承载力。即:

收稿日期:2021-03-12(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078486)

作者简介:任新建,男,硕士,高级工程师。E-mail:1461759987@qq.com

* 通信作者:彭翔,男,硕士,工程师。E-mail:lunwen0330@163.com

$$\phi S_n \geq U_r \quad (2)$$

式中: S_n 为名义承载力; U_r 为承载能力极限状态效应组合值; ϕ 为承载力折减系数。

与中国和欧洲规范不同的是,美国规范没有材料折减系数,而是直接对构件承载能力进行折减。构件处于不同的受力状态, ϕ 的取值也有所差异;对于剪扭构件,承载力折减系数 ϕ 的取值为0.85。

对于无抗剪钢筋的双向剪切作用的基础,其名义冲切承载力 V_c 的计算公式如下:

$$V_c = \min \left\{ 0.17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \right. \\ \left. 0.083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_w} + 2 \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \right. \\ \left. 0.333 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \right. \quad (3)$$

式中: β_c 为柱截面的长短边之比; λ 为混凝土强度修改系数,对常态混凝土取1; f'_c 为圆柱体混凝土试件抗压强度; α_s 为条件影响系数,内柱为40,边柱为30,角柱为20; b_w 为冲切临界截面周长,如图2中虚线所示; d 为基础有效高度。临界截面应位于周边长度 b_w 最小值处,但对于柱集中荷载的边或角和厚度有变化的板,距离不应小于 $d/2$ 。

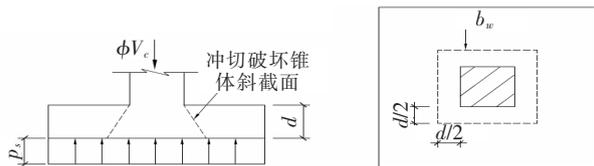


图2 美国规范冲切验算截面

1.3 欧洲规范公式

欧洲规范 EN 1992 对无抗剪钢筋的钢筋混凝土浅基础,其冲切承载力验算应选择临界界面处,如图3所示。欧洲规范认为冲切边界存在圆角,截面与基础的水平夹角 θ 应大于或等于 26.6° ,即临界截面应控制在柱边到 $2d$ 范围内,临界周长 u_1 应反复核算。构件受冲切承载力与构件冲切破坏的特征有关。对于柱下基础,其冲切破坏受其下土反力影响,与板相比,冲切破坏面周边向柱内移,即破坏面变得比较陡。

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \times u_1 \times 2d/a \geq v_{\min} \times u_1 \times 2d/a \quad (4)$$

式中: k 为与厚度相关的系数, $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$; $\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0.02$, ρ_{ly} 、 ρ_{lz} 分别为 y 、 z 方向临界截面受拉钢筋配筋率;无腹筋抗剪公式系数 C 的设计值:

$C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$, γ_c 为材料分项系数; a 为柱周边到验算周长的距离; d 为基础有效厚度; $v_{\min} = 0.035 k_1^{3/2} f_{ck}^{1/2}$,此处建议 $k_1 = 0.1$, f_{ck} 为混凝土强度特征值; u_1 为冲切临界截面周长。

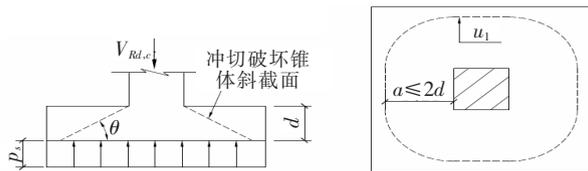


图3 欧洲规范冲切验算截面

2 中美欧规范计算方法对比分析

2.1 中美欧规范异同点

在中国规范中,对于钢筋混凝土结构剪切破坏和冲切破坏是有所区分的。剪切破坏属于平面问题,其破坏面为一平面;冲切破坏是一个空间问题,体现了剪切作用的双向特征。但剪切破坏和冲切破坏在破坏机理上是类似的,欧美规范对于冲切破坏称为“冲切”或“双向剪切”,在理论上仍理解为剪切。各国规范对于钢筋混凝土冲剪的计算有着不同的公式,体现了内在设计原理、考虑因素、破坏面形状等方面的差异。

(1) 设计原理方面。中美欧规范采用的都是极限状态设计法。但是中美欧规范之间又有所差异,中国和美国规范都是采用基于可靠度的设计方法,而在欧洲规范中,由于欧盟各成员国之间存在经济与技术发展的不平衡,其分项系数主要是根据经验确定。

(2) 破坏面形状方面。美国在有关基础设计规范中明确临界冲切截面为距柱边 $d/2$ 的截面,其中 d 为冲切破坏锥体的有效厚度,如图2所示。欧洲规范中明确冲切临界截面边界存在圆角,临界截面周长应当取距柱边 $d \sim 2d$ 的范围,如图3所示。中国规范 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》以及 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》中明确基础冲切临界截面与底板夹角为 45° ,即临界截面周长取距柱边 d ,如图1所示。

(3) 考虑因素方面。混凝土的强度对抗冲切承载力起到关键作用,但如何表述其作用各个国家却均不相同。从计算公式上看,中国规范采用混凝土抗拉强度作为计算依据,而美国规范采用混凝土抗压强度的平方根作为计算依据,欧洲规范采用混凝土抗压强度的立方根作为计算依据。但在美国规范和欧洲规范均认为混凝土抗压强度对抗拉强度有密切联系,并分别

规定混凝土抗拉强度与抗压强度的平方根和立方根成正比。因此,无论是欧洲规范还是美国规范,虽然从计算公式的表述上看是与混凝土抗压强度有关,但实质上均采用的是混凝土抗拉强度。在这一点上,中美欧规范是相同的。另外,欧洲规范认为纵筋配筋率对基础抗冲切承载力有所贡献,贡献大小与配筋率的立方根成正比,并对纵筋配筋率的影响范围作出约束,当配筋率大于 2% 时,纵筋对抗冲切承载力影响大小显著降低。

2.2 计算方法简化对比分析

为方便对比中美欧规范钢筋混凝土抗冲切承载力计算公式的差异,将三者之间的差异变量尽可能统一,考虑统一用混凝土抗拉强度指标来表述抗冲切承载力。

美国规范中不直接使用混凝土轴心抗拉强度或劈裂强度,但在与混凝土开裂有关的计算中,需考虑压应力的影响,将混凝土的抗拉强度定义为:

$$f_t' = 0.333 \sqrt{f_c'} \quad (5)$$

式中: f_t' 为混凝土抗拉强度规定值; f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度。

欧洲规范将混凝土抗拉强度平均值与抗压强度特

征值或平均值的关系定义为:

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0.3 f_{ck}^{2/3} & \leq C50/60 \\ 2.12 \times \ln(1 + f_{cm}/10) & > C50/60 \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_{ctm} 为混凝土抗拉强度平均值; f_{ck} 为混凝土抗压强度特征值; f_{cm} 为混凝土抗压强度平均值。

欧洲规范 EN 1992 将轴心抗拉强度作为混凝土抗拉强度的设计指标,其值取劈裂强度的 0.9 倍,即 $f_{ct} = 0.9 f_{ct,sp}$,在混凝土抗拉强度起重要作用的情况,如抗裂验算、梁的抗剪或板的抗冲切验算等,采用混凝土抗拉强度概率分布的 0.05 分位值 $f_{ctk,0.05}$,其具有 95% 的保证率。欧洲规范 EN 1992 将抗拉强度 $f_{ctk,0.05}$ 与抗拉强度平均值 f_{ctm} 的关系定义为:

$$f_{ctk,0.05} = 0.7 f_{ctm} \quad (7)$$

美国规范的规定值和欧洲规范的特征值是直接根据混凝土试件试验确定的,为混凝土试件的强度值,未考虑混凝土试件与混凝土构件的差别。而中国规范的抗压强度标准值考虑了混凝土试件与混凝土构件的差别(系数为 0.88)。对于不同混凝土强度等级(立方体)时中国、美国和欧洲规范混凝土抗拉强度的标准值、规定值和特征值,可由式(5)~(7)计算得到结果。如表 1 所示。

表 1 各国混凝土轴心抗拉强度标准值(中国规范)、规定值(美国规范)和特征值(欧洲规范)

| 规范 | 不同混凝土等级(立方体)时混凝土抗拉强度值/MPa | | | | | | | |
|------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | C20 | C25 | C30 | C35 | C37 | C40 | C45 | C50 |
| 中国规范 | 1.54 | 1.78 | 2.01 | 2.20 | | 2.39 | 2.51 | 2.64 |
| 美国规范 | — | 1.53 | 1.67 | 1.81 | | 1.93 | 2.05 | 2.16 |
| 欧洲规范 | 1.30 | 1.50 | 1.80 | | 2.00 | | 2.20 | 2.50 |

为消除差异,简化对比,不考虑地基反力、荷载组合的影响,同时简化为只有方形柱和方形基础底板,将式(5)~(7)代入到中美欧规范的公式中可以得到抗冲切承载力计算公式,如表 2 所示。

从表 2 可以看到:经过简化后的中美两国混凝土抗冲切承载力计算公式非常类似,公式中系数不同体现了两国规范在材料强度试验、荷载分项系数等因素上的差异。而欧洲规范采用了不同的混凝土抗拉强度的计算方法,以及考虑了纵筋配筋率等因素的影响,因此其计算公式与中美规范存在较大差异。

3 算例

由于影响基础冲切的因素众多,中美欧规范在荷

载分项系数、材料分项系数、混凝土材料强度、临界截面、计算截面、配筋率等都存在差异。为了便于比较,该文仅考虑混凝土材料强度、冲切临界截面、材料分项系数的差异,进行算例分析。

算例:为简化计算仅考虑中心荷载作用,取柱下独立基础,上部柱截面尺寸为 0.4 m × 0.4 m,基础底面尺寸为 1.5 m × 1.5 m × 0.3 m(宽 × 长 × 厚),混凝土强度等级为 C30,基础底板配筋率取 0.4% 和 1.0% 分别计算,计算结果见表 3。

从表 3 可以看到:在中心荷载作用下,中美欧规范基础抗冲切承载力存在一定差异,即使考虑到混凝土材料强度的差异,总体而言中国规范计算得到的抗冲切承载力较低。而欧洲规范混凝土抗冲切承载力受配筋率影响较大。中国 GB 50010—2010《混凝土结构设

表2 中美欧混凝土抗冲切承载力计算公式简化对比

| 规范 | 计算公式 | 备注 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 中国规范 | $0.5f_{tk} \cdot 4(b+d)d$ | 考虑基础厚度 $d \leq 300$ mm 的情况, 混凝土材料分项系数 1.4 |
| 美国规范 | $0.85f_{tk} \cdot 4(b+d)d$ | $\phi=0.85$ 为扭转构件的承载力折减系数 |
| 欧洲规范 | $0.24 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) (100\rho_l)^{1/3} \left(\frac{f_{tk}}{0.3 \times 0.7}\right)^{1/2} (4b+2\pi d)d$ | 混凝土材料分项系数 $\gamma_c=1.5$ |

表3 中心荷载作用下基础抗冲切承载力计算结果对比

| 规范 | 配筋率 $\rho_l/\%$ | 计算过程 | 抗冲切承载力/kN |
|------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 中国规范 | | $0.5 \times 2.01/1.4 \times 4 \times (0.4+0.3) \times 0.3 \times 1\ 000$ | 840.8 |
| 美国规范 | | $0.85 \times 1.67 \times 4 \times (0.4+0.3) \times 0.3 \times 1\ 000$ | 1 192.4 |
| 欧洲规范 | 0.4 | $0.24 \times 1.816 \times 0.737 \times (1.8/0.3/0.7)^{1/2} \times (4 \times 0.4 + 2\pi \times 0.3) \times 0.3$ | 982.9 |
| | 1.0 | $0.24 \times 1.816 \times 1 \times (1.8/0.3/0.7)^{1/2} \times (4 \times 0.4 + 2\pi \times 0.3) \times 0.3$ | 1 333.7 |

计规范》条文说明也提及剪力对梁纵筋的影响:“当梁端作用剪力较大时,在支座负弯矩钢筋的延伸区段范围内将形成由负弯矩引起的垂直裂缝和斜裂缝,并可能在斜裂缝区前端沿该钢筋形成劈裂裂缝,使纵筋拉应力由于斜弯作用和黏结退化而增大,并使钢筋受拉范围相应向跨中扩展。”但仅对纵筋的影响作为一种研究性的探讨,并未体现于计算公式中。

4 结论

(1) 对于无腹筋混凝土浅基础,在进行基础冲切验算时,中美欧3种规范考虑的因素如冲切临界截面的形状、冲切角度、纵筋配筋率、截面的尺寸效应等方面存在差异,但是三者都认为基础抗冲切承载力的主要控制因素仍然为混凝土抗拉强度。这主要是由于纵向钢筋的销栓作用相对较小,冲切承载力主要由混凝土提供。

(2) 从简化的算例对比可以看到:在中心荷载作用下,即使考虑到混凝土材料强度的差异,总体而言中国规范计算得到的抗冲切承载力较低。

(3) 欧洲规范中混凝土抗冲切承载力受纵筋配筋率影响较大,而中美两国基础设计规范并未考虑配筋率的贡献。虽然在混凝土梁中剪力对纵筋有一定影

响,但基础结构的边界条件较梁更加复杂,其内力与变形影响因素众多,纵筋对浅基础抗冲切承载力的影响有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] The AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sixth Edition[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [3] ACI 318—14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S]. USA: American Concrete Institute, 2014.
- [4] EN 1990:2002 Design of Concrete Structures[S]. England: The Authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2004.
- [5] 李荣年,滕延京. 国内外规范关于扩展基础冲剪计算的对比分析[J]. 岩土力学, 2012(S1).
- [6] 严亚林. 欧洲混凝土规范构件设计及其与中国规范的比较研究[D]. 中国建筑科学研究院硕士学位论文, 2010.
- [7] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [8] 贡金鑫,魏巍巍,胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
- [9] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].