

# 柱下独立基础冲切与剪切破坏概念辨析

梁发云, 贾承岳, 姚笑青

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:**在基础工程设计原理课程教学中, 学生经常对柱下独立基础冲切与剪切概念产生困惑。文章针对这一问题, 从破坏机理、破坏面形式以及破坏性质等方面对冲切和剪切的概念进行分析, 通过分析比较国家以及地方相关规范规定, 并结合具体算例阐明了冲切和剪切的基本概念, 有利于教学中学生对相关概念的理解。

**关键词:**独立基础; 冲切; 剪切; 破坏特征

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 1005-2909(2011)05-0069-05

作为土木工程学科一门重要的专业基础课, 基础工程设计原理课程中有不少概念是比较难以理解的, 甚至在国家相关规范中也没有做出明确的规定, 其中柱下独立基础冲切与剪切破坏的概念就是一个容易让学生产生困惑的问题。以文献[1]的教材为例(国内其他常用教材与之基本类似), 在墙下条形基础设计时, 按抗剪验算确定基础截面高度; 在柱下独立基础设计时, 按抗冲切验算确定基础截面高度, 没有要求进行抗剪验算。对何时需要进行抗剪验算, 何时需要进行抗冲切验算, 剪切破坏和冲切破坏有何区别和联系, 在课程教学中发现学生容易对此产生混淆和误解<sup>[2]</sup>。

冲切和剪切破坏是基础工程中比较危险的破坏形式, 对此国内外都进行了大量的理论和实验研究, 积累了丰富的研究资料<sup>[3-6]</sup>。文章旨在结合教学实践阐明这两个概念的异同, 而不是从学术层面上去探讨机理性的研究。文章结合国内相关规范的具体条款, 对柱下独立基础的冲切与剪切问题进行对比分析, 并结合具体算例详加阐明。

## 一、冲切与剪切概念辨析

### (一) 基本概念

冲切和剪切是斜截面破坏的两种形式, 两者破坏机理类似, 其承载力均受混凝土的抗拉强度所控制。有些国外资料对冲切与剪切不加区分, 统称为剪切(shear), 在需强调两者之间的区别时, 才将冲切称为“冲切(punching shear)”或“双向剪切(two-way shear)”。中国设计人员是分别采用“冲切”和“剪切”两个术语, 在概念上是明确区分的<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2011-08-05

基金项目: 同济大学教学改革研究与建设项目“创新性、国际化卓越隧道、岩土与地质工程师培养体系与课程建设”的资助

作者简介: 梁发云(1976-), 男, 同济大学地下建筑与工程系副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土力学与基础工程研究, (E-mail) fyliang@tongji.edu.cn。

冲切是在集中反力作用下,在板内产生正应力和剪应力,尤其在柱头四周合成较大的主拉应力,当主拉应力超过混凝土抗拉强度时,沿柱头四周出现斜裂缝,在板内形成锥体斜截面破坏,破坏形状像是从板中冲切而成,故称“冲切破坏”,其破坏形态如图1所示。板的抗冲切能力与板的厚度、混凝土强度等级、集中荷载或集中反力分布面积以及腹筋配置的多少有关。

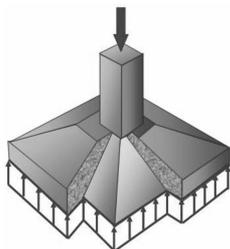


图1 冲切破坏示意图

剪切是相对于拉伸、弯曲、扭转而言的。从混凝土构件受剪机理来分析剪切破坏,混凝土构件斜截面受剪的计算模型为桁架,上部混凝土(上弦杆)受压,下部钢筋(下弦杆)受拉,斜裂缝间混凝土(斜腹杆)受压或受拉,混凝土斜截面破坏(也就是剪切破坏)是由于斜腹杆被压坏或拉坏引起的<sup>[8]</sup>。对于比较特殊的纯剪破坏则如同使用剪刀将物体“一剪为二”,其破坏面贯通在整个物体的全部宽度上,断裂面接近于一个平面<sup>[7]</sup>。因此,纯剪又称单向剪切(One way shear),其破坏形态如图2所示。

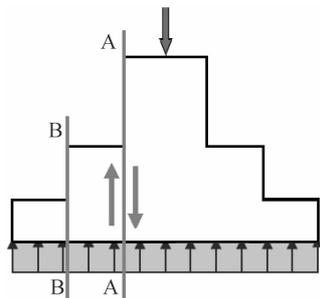


图2 纯剪破坏示意图

## (二) 发生机理

对具体的构件来说,在外荷载作用下,只能发生一种形态的破坏,不是冲切破坏就是剪切破坏。对梁来说,只可能产生剪切破坏;对板来说,随着板的尺寸、支承方式、荷载的形式和位置等不同,产生冲切破坏或剪切破坏均有可能<sup>[7]</sup>。文献[9]给出了如图3所示的双向对称方板受剪破坏面随荷载和支承条件而变化的情况,图3(a)和(b)接近于单向受剪,其力学行为及破坏特征与单向板或梁相似,属于剪切破坏;随着双向受剪量值的接近,破坏面逐渐显现

出双向的性质,即如图3(c)所示属于冲剪过度破坏;当周边或对边支承方板受到在中心处受到方形柱轴压作用时,板的破坏面成为如图3(d)和(e)所示的轴心冲切破坏形式。因此,在设计中,对于墙下条形基础,只需验算剪切强度;而对于柱下独立基础,则需要根据具体情况计算冲切承载力。

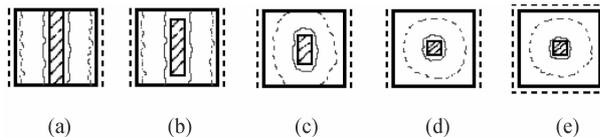


图3 破坏形态随荷载和支承条件的变化

(图中阴影区为荷载作用面,直虚线为板底支承线,手绘虚线和手绘实线分别为板底和板顶处斜裂缝)

## (三) 对比分析

为阐明冲切与剪切的区别,下面从破坏面形式、破坏性质、验算要求等方面进行对比。

(1)破坏面形式:剪切破坏面可视为平面,而冲切破坏面则视为空间曲面,如截圆锥、截角锥或棱台及其它不规则曲面等,具有三维的特点,不属于平面问题,一般发生在双向板一类的构件中。

(2)验算要求:剪切破坏计算的是剪应力,冲切破坏计算的则是按45度角延伸的计算面上的正应力。冲切破坏是斜裂面上垂直斜裂缝角度的主拉应力过大造成的破坏,工程中一般控制住45度角的应力,就可以确保基础在各个角度下的主拉应力不超过混凝土的抗拉强度。

(3)破坏性质:剪切破坏通常表现为延性破坏,冲切破坏则表现为脆性破坏。

## 二、相关设计规范的对比

对于基础冲切和剪切的计算,在国家和地方有关规范中均有规定,但具体的条款有所不同。文章在文献[8]的基础上,专门针对柱下独立基础的抗剪和抗冲切的计算要求,结合相关的国家和地方规范对此进行讨论。

(1)国家标准《建筑地基基础设计规范》<sup>[10]</sup>在第8.2.7条关于扩展基础的计算中,仅要求对矩形截面柱的矩形基础验算柱与基础交接处以及基础变阶处的受冲切承载力,并在第8.2.7条的条文说明中提到了柱下独立基础斜截面受剪折算宽度的确定方法,但未明确提出是否应对柱下独立基础进行抗剪验算以及如何进行验算。

(2)上海市地方标准《地基基础设计规范》<sup>[11]</sup>是中国比较具有代表性的地方规范,在第6.4.5条关于独立基础的计算中,明确要求对基础变阶处和柱与基础交界处的基础厚度按国家标准《混凝土结构

设计规范》<sup>[12]</sup>进行抗冲切验算和抗剪验算,但没有给出具体的计算公式,也就是说上海市地方规范对于柱下独立基础的抗冲切和抗剪验算是按照国家标准《混凝土结构设计规范》来执行的。

(3)国家标准《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup>分别在第7.5.3条和第7.7.4条中规定了矩形截面柱阶形基础的抗剪和抗冲切验算要求,给出了相应的计算公式,这两个计算公式实际是其它各种规范计算公式的出处和基本依据。但实际上在有些情况下同时进行抗冲切和抗剪验算是没有必要的,该规范中没有对此进行必要的说明。

(4)广东省地方标准《建筑地基基础规范》<sup>[13]</sup>在条文说明中对基础抗冲切和抗剪问题进行了较为详细的说明。明确提出对于双向受力的柱下单独基础应验算控制截面的受冲切承载力,必要时应验算抗剪承载力;而对于单向受力的墙下条形基础则只需验算控制截面的受剪承载力。并指出国家标准《建筑地基基础设计规范》中仅要求验算柱下独立基础的抗冲切承载力对于双向受力的基础底板,一般情况下是安全的。但为稳妥起见,广东省地方标准还给出了只需验算抗冲切承载力的界限条件,不满足这个界限条件,则需要验算基础柱边或变阶处的抗剪承载力。对于实际工程,当柱下独立基础长边与短边之比大于2,基础底板近似于单向受力,此时应验算基础的抗剪承载力。

### 三、算例分析

#### (一)冲切与剪切的计算公式

本算例所采用的抗冲切和抗剪切承载力的计算公式均来源于国家标准《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup>。

#### (1)抗冲切承载力公式:

$$F_1 \leq 0.7\beta_h f_t b_m h_0 \quad (1)$$

$$F_1 = p_s A \quad (2)$$

$$b_m = \frac{b_1 + b_b}{2} \quad (3)$$

式中:  $F_1$ —集中反力设计值;

$h_0$ —截面有效高度;

$\beta_h$ —截面高度影响系数:当  $h_0 \leq 800$  mm 时,取  $\beta_h = 1.0$ ;当  $h_0 \geq 2000$  mm 时,取  $\beta_h = 0.9$ ,其间按线性内插法取用;

$f_t$ —混凝土轴心抗拉强度设计值;

$p_s$ —基底地基反力设计值;

$A$ —考虑冲切荷载时取用的多边形面积,如图4左侧阴影部分所示;

$b_1, b_b$ —分别为冲切破坏锥体最不利一侧斜截面

的上边长和下边长。

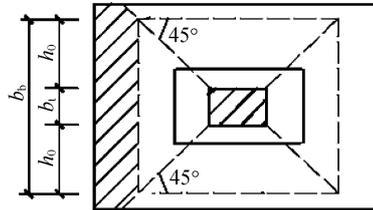


图4 柱下独立基础受冲切面积(左侧阴影部分)

#### (2)抗剪切承载力公式:

$$V_s \leq 0.7\beta_{hs} f_t b h_0 \quad (4)$$

$$\beta_{hs} = \left(\frac{800}{h_0}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中:  $V_s$ —构件斜截面上的最大剪应力设计值,即为作用在图5左侧阴影部分面积上的地基土平均净反力设计值;

$\beta_{hs}$ —截面高度影响系数:当  $h_0 < 800$  mm 时,取  $h_0 = 800$  mm;当  $h_0 > 2000$  mm 时,取  $h_0 = 2000$  mm。

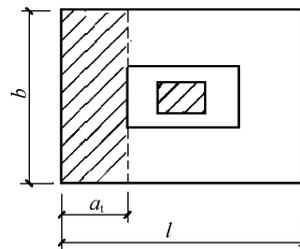


图5 柱下独立基础受剪切面积(左侧阴影部分)

对比式(1)和式(4),在同样的荷载作用下,冲切作用面积要小于剪切作用面积,所产生的冲切力一般小于剪切力,即  $F_1 < V_s$ 。而式(1)和式(4)的右端项分别为基础所能提供的抗冲切承载力和抗剪切承载力,比较  $\beta_h$  与  $\beta_{hs}$ ,两者都只是与基础有效高度  $h_0$  有关,当  $h_0 < 800$  mm,  $\beta_h = \beta_{hs} = 1$ ,此时基础的抗冲切力和抗剪切力分别取决于  $b_m h_0$  和  $b h_0$  的大小。

当冲切破坏锥体落在基础底面内时,  $b_m = b_1 + h_0$ ,若  $b_m > b$ ,基础提供的抗冲切力大于抗剪切力,即有效高度相对较大时,只需验算剪切破坏即可,例如无筋扩展基础,有效高度相对较大,一般只验算剪切。若  $b_m < b$ ,即基础的有效高度较小,抗冲切力会小于抗剪切力,基础形式类似于筏板基础,需同时验算两者。

当冲切破坏锥体落在基础底面外时,  $b_m = 0.5 \times (b_1 + b)$ ,使得抗冲切力小于抗剪切力,在对同样型式尺寸的基础产生的冲切力也小于剪切力,理论上应验算两者,但由于  $b_m$  减小的相对较快,基础产生的冲切力与抗冲切力之间差值比剪切力和抗剪切

力的差值要小,也就是说此种情况下基础抗冲切的能力通常小于其抵抗剪切的能力,所以抗冲切是控制因素,一般只进行抗冲切验算。

## (二)算例分析

[算例1]:某柱的平面投影如图6所示,剖面如图7所示。某柱截面尺寸为 $a_c \times b_c = 600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,上部结构传至基础顶面的竖向荷载设计值 $F = 2850 \text{ kN}$ ,弯矩设计值 $M = 160 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,水平荷载设计值 $V = 45 \text{ kN}$ ,室内外高差为 $0.60 \text{ m}$ ,基础埋深为 $1.6 \text{ m}$ ,修正后的地基承载力设计值 $f_a = 215 \text{ kPa}$ ,基础材料:混凝土强度等级C20 ( $f_c = 9.6 \text{ N/mm}^2, f_t = 1.1 \text{ N/mm}^2$ ),HRB335钢筋 ( $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$ )。验算此柱基础的抗冲切与抗剪承载力。

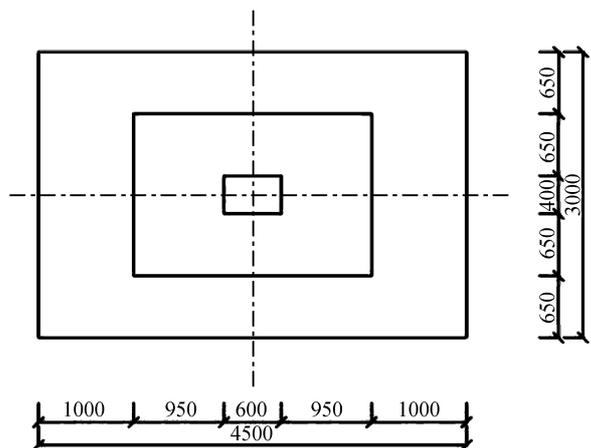


图6 平面投影(单位: mm)

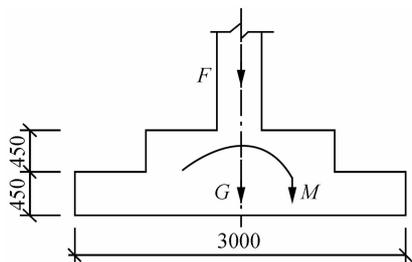


图7 A-A剖面(单位: mm)

解:设基础高度为 $900 \text{ mm}$ ,分为两阶,每阶高 $450 \text{ mm}$ 。

### (1) 地基土净反力计算。

$$\text{偏心距: } e_j = \frac{M}{F} = \frac{160 + 45 \times 0.9}{2850} = 0.07 \text{ m}$$

基础边缘处的最大和最小净反力:

$$p_{j\max} = \frac{F}{bl} \left( 1 + \frac{6e_j}{l} \right) = \frac{2850}{4.5 \times 30} \left( 1 + \frac{6 \times 0.07}{4.5} \right) = 230.81 \text{ kPa}$$

$$p_{j\min} = \frac{F}{bl} \left( 1 - \frac{6e_j}{l} \right) = \frac{2850}{4.5 \times 30} \left( 1 - \frac{6 \times 0.07}{4.5} \right) = 191.40 \text{ kPa}$$

### (2) 柱与基础交界处抗冲切计算

$$b = 3.0 > b_c + 2h_0 = 0.4 + 2 \times 0.86 = 2.12 \text{ m}$$

$$b_m = \frac{b_1 + b_b}{2} = \frac{0.4 + 2.12}{2} = 1.26 \text{ m}$$

$$A_1 = \left( \frac{l}{2} - \frac{a_c}{2} - h_0 \right) \cdot b - \left( \frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0 \right)^2 = \left( \frac{4.5}{2} - \frac{0.6}{2} - 0.86 \right) \cdot 3.0 - \left( \frac{3.0}{2} - \frac{0.4}{2} - 0.86 \right)^2 = 3.08 \text{ m}^2$$

冲切力:

$$F_1 = p_{j\max} A_1 = 230.81 \times 3.08 = 710.9 \text{ kN}$$

基础高度:

$$h = 0.9 \text{ m}, \beta_{h_1} = 0.99, \beta_{h_2} = 0.982$$

抗冲切力:

$$0.7\beta_{h_1}f_t b_m h_0 = 0.7 \times 0.99 \times 1.1 \times 10^3 \times 1.26 \times 0.86 = 826.0 \text{ kN} > 710.9 \text{ kN}$$

满足基础抗冲切要求。

### (3) 柱与基础交界处抗剪切计算。

剪切力:

$$V_s = \frac{l - a_c}{2} b \times p_{j\max} = 1350.24 \text{ kN}$$

抗剪切力:

$$0.7\beta_{h_2}f_t l h_0 = 0.7 \times 0.86 \times 4.5 \times 0.982 \times 1.1 = 2926.26 \text{ kN} > 1350.24 \text{ kN}$$

满足基础抗剪切要求。

因此,基础抗冲切和抗剪切均可满足。

[算例2]:将算例1中的基础高度取为 $500 \text{ mm}$ ,验算此时柱基础的抗冲切与抗剪承载力。

### 解:(1) 柱与基础交界处抗冲切计算。

$$b = 3.0 > b_c + 2h_0 = 0.4 + 2 \times 0.46 = 1.32 \text{ m}$$

$$b_m = \frac{b_1 + b_b}{2} = \frac{0.4 + 1.32}{2} = 1.26 \text{ m}$$

$$A_1 = \left( \frac{l}{2} - \frac{a_c}{2} - h_0 \right) b - \left( \frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0 \right)^2 = \left( \frac{4.5}{2} - \frac{0.6}{2} - 0.46 \right) 3.0 - \left( \frac{3.0}{2} - \frac{0.4}{2} - 0.46 \right)^2 = 3.76 \text{ m}^2$$

冲切力

$$F_1 = p_{j\max} A_1 = 230.81 \times 3.7644 = 868.9 \text{ kN}$$

基础高度:

$$h = 0.5 \text{ m}, \beta_{h_1} = 1, \beta_{h_2} = 1$$

抗冲切力:

$$0.7\beta_{h_1}f_t b_m h_0 = 0.7 \times 1 \times 1.1 \times 10^3 \times 0.86 \times 0.46 = 304.6 \text{ kN} < 868.9 \text{ kN}$$

基础抗冲切不满足。

(2) 柱与基础交界处抗剪切计算。

剪切力:

$$V_s = \frac{l - a_c}{2} b \times p_{j\max} = 1\,350.24 \text{ kN}$$

抗剪切力:

$$0.7\beta_{hs}f_t h_0 = 0.7 \times 0.46 \times 4.5 \times 0.982 \times 1.1 = 1\,565.3 \text{ kN} > 1\,350.2 \text{ kN}$$

满足基础抗剪切要求。

因此,在这种情况下基础抗冲切不满足,但是基础抗剪切是满足的。

由以上两个算例可以看出,随着柱下独立基础有效高度的减少,基础抗冲切承载力迅速降低,而抗剪切承载力相对降低得较慢。因此,一般情况下,对于柱下独立基础,满足抗冲切即可满足抗剪切。

#### 四、结语

在基础工程设计原理课程的教学过程中,柱下独立基础的冲切与抗剪的概念容易引起学生的困惑,文章的概念分析有利于学生深入理解相关问题。一般说来,柱下单独基础是双向受力的,墙下条形基础则是以单向受力为主。

对于双向受力的柱下单独基础应验算其控制截面的抗冲切承载力,在基础高度较小时通常只需验证抗冲切承载力,基础高度较大时则需要同时验证抗冲切和抗剪切承载力;而对于单向受力为主的墙下条形基础则只需验算控制截面的抗剪承载力。

#### 参考文献:

- [1] 袁聚云,李镜培,楼晓明,等. 基础工程设计原理[M]. 上海:同济大学出版社,2007.
- [2] 杨雪强,刘勇健,张建龙. 对冲切与剪切问题的思考[J]. 广东工业大学学报(社会科学版),2009,9(Sup.1):170-175.
- [3] 楼板及基础冲切强度专题组. 钢筋砼板和基础冲切强度的试验研究[J]. 建筑结构学报,1987,8(4):12-22.
- [4] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 清华大学出版社,2003.
- [5] GHALIA A, MEGALLY S. Design for punching shear with ACI 318-95[J]. ACI Structure Journal, 1999, 96(4):539-548.
- [6] NILSON AH, DARWIN D, DOLAN CW. Design of Concrete Structures [M]. 13th ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [7] 顾怡荪. 桩基承台抗冲切及抗剪承载力计算公式的建议[J]. 钢铁厂设计,1995(2):51-59.
- [8] 李剑群. 混凝土结构冲切破坏和剪切破坏的理解与辨析[J]. 四川建材,2009,35(2):120-123.
- [9] 周朝阳. 冲切与弯曲和剪切的比较分析[J]. 工程力学,1997,14(Sup.2):391-394.
- [10] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范(GB 50010)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [11] 上海市工程建设规范. 地基基础设计规范(DGJ 08-11)[S]. 上海:上海市城乡建设与交通委员会,2010.
- [12] 中华人民共和国建设部. 地基基础设计规范(GB 50007)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [13] 广东省地方标准. 建筑地基基础设计规范(DBJ 15-31)[S]. 广州:广东省建设厅,2003.

## Conceptions of punching and shearing failure of independent foundations under columns

LIANG Fa-yun, JIA Cheng-yue, YAO Xiao-qing

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** In the course of design principles of foundation engineering, students are often confused by the concept of punching and shearing of independent foundations under columns. To clarify this problem, we analyzed the failure mechanism, forms of failure surface and failure characteristics. The provisions of relevant codes were compared together. Two specific examples were also introduced to clarify conceptions of punching and shearing. The analysis in this paper will be helpful to students to understand some basic concepts in the teaching process.

**Keywords:** independent foundation; punching; shearing; failure characteristic

(编辑 詹燕平)