

Checking Method Study of Punching Shear Capacity on the Flexural Crack Section in Concrete Slab-Column Joints

Li Pan

Institute of Building Structures, China Academy of Building Research, Beijing
Email: Panlicabr@163.com

Received: May 15th, 2020; accepted: Jun. 8th, 2020; published: Jun. 15th, 2020

Abstract

In concrete slab-column structures, sections of slab connected with column are always acted with larger moment and punching shear simultaneously, where are main control positions in the structure design. According to *Code for design of concrete structures (GB 50010-2010)* which does not relate to adverse effect of the checking section reduced by bending crack, joint checking results for punching shear capacity may lead to unsafe design. Combined with the actual destroy example owing to damage of slab-column joints forced by moment & punching shear, and based on GB 50010-2010 code, the modified checking method for punching shear capacity of concrete slab-column joints is proposed, that includes the bending crack influence on checking sections. Then by means of checking examples, the calculation process is explained on comparison between the code method and the modified method, later relative design suggestions are offered with shown technical analysis, which can be taken as useful references for structure design in order to avoid brittle punching failure on cracked joints in concrete slab-column structures.

Keywords

Concrete Slab-Column Structure, Slab-Column Joint, Punching Shear Capacity, Bending Crack, Height of Compressed Area on Cracked Section, Brittle Failure in Bending-Shear

混凝土板柱节点弯曲裂缝截面冲切承载力验算方法研究

潘立

中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 北京
Email: Panlicabr@163.com

摘要

混凝土板柱结构中,板柱相连截面同时作用较大弯矩和冲切剪力,为主要设计控制部位。《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)中板的冲切承载力验算方法,未考虑弯曲裂缝减小验算截面的不利影响,可能导致验算结果偏于不安全。结合混凝土板柱结构中节点弯剪破坏工程实例,基于GB 50010-2010规范相应公式,提出了混凝土板柱节点开裂截面冲切承载力验算方法,通过算例说明了相应验算过程且与规范验算结果进行了比较,并配合技术分析给出了相关设计建议,由此初步探索了如何避免裂损促使板柱节点发生脆性冲切破坏,结果可作为规范方法的补充供结构设计参考。

关键词

混凝土板柱结构,板柱节点,冲切承载力,弯曲裂缝,开裂截面受压区高度,弯剪脆性破坏

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 前言

多层建筑设计经常选用混凝土板柱结构,尤其地下多层单体建筑,因承受设防地震作用相对较小,为尽量增加层间净高与相应层高的比值,以减少场地土方开挖量和工程投资,设计常首选此类结构。

混凝土板柱结构的板(含柱帽或托板)柱相连截面同时作用较大弯矩与剪力,同为弯曲抗裂与抗冲切验算控制部位。通常情况下,设计虽可控制该部位裂缝宽度不大于《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010) [1] (以下简称规范)相应限值,但如果板截面无相应预压应力则难以阻止出现弯曲裂缝。目前结构设计按规范方法验算板柱节点冲切承载力时,不考虑弯曲裂缝削弱验算截面的不利影响,也未组合弯曲受压截面应力的有利作用,与常见大多数实际情况不符,可能使验算结果偏于不安全。

结合某混凝土板柱结构局部坍塌破坏实例[2],研究了板柱节点弯曲开裂截面冲切承载力验算方法,基于规范公式相应提出了解决方案,通过算例对比进行了技术分析,进而给出了相关设计建议,可供混凝土板柱结构设计参考。

2. 板柱节点弯剪破坏实例

北京市石景山区西黄村某地下2层车库为混凝土板柱结构,2017年6月结构施工验收后,8月顶面覆土施工时局部坍塌,负二层顶板对应部位随之连带破坏,涉及范围大致同覆土区域,见图1。

该地下车库结构设计概况如下:建筑面积 $10,589\text{ m}^2$,柱网区格 $8.1\text{ m} \times 8.1\text{ m}$,天然地基,混凝土独立基础,负一、二层层高为 3.45 m 、 3.25 m ,顶板上皮标高 -2.10 m ,覆土厚度 1.80 m 。顶板厚 350 mm ,平托板 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 、厚 350 mm ,顶板与平托板混凝土强度等级C30。顶板内双层双向通长配筋:上层 $\Phi 16@200$,下层 $\Phi 18@200$;柱顶部截面上部附加单层双向短筋 $\Phi 20/25@200$;平托板截面下部单层双向配筋 $\Phi 12@200$,抗冲切验算斜截面无横穿箍筋与弯起钢筋。柱截面 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$,柱混凝土强度等级C40,局部坍塌区域的负一层柱外露上端外观见图2。



Figure 1. Partial collapse appearance of the 2 story underground garage
图 1. 地下 2 层车库局部坍塌外观



Figure 2. Top end of B1 story column after roof punching failure of the underground garage
图 2. 顶板冲切破坏后的负一层柱外露上端

现场调查表明，结构坍塌区域实际覆土厚 1.0~1.5 m，覆土作业时顶板实际作用荷载组合小于设计最不利工况相应值。由图 2 可见，负一层各柱的外露上端截面基本同柱截面、未形成冲切破坏锥体，即顶板冲切破坏截面均呈竖向且位于柱截面四周边沿，未出现抗冲切设计验算 45°斜截面。

西黄村地下车库原设计允许顶板的各峰值弯矩部位(板柱相连截面)存在宽度小于规范限值的弯曲裂缝。验算复核[3]表明，施工期间这些部位已受弯开裂，并导致裂损截面的受压区(高度明显小于顶板与平托板厚度之和 700 mm)承受冲切剪力，这是该车库顶板覆土区域节点冲切破坏致使局部坍塌的主要原因。

3. 冲切承载力规范验算方法

在局部荷载或集中反力作用下，无箍筋或弯起钢筋的混凝土板的冲切承载力应满足式(3-1)，

$$F_l \leq (0.7\beta_h f_t + 0.25\sigma_{pc,m})\eta u_m h_0 \quad (3-1)$$

式中系数 η 取 η_1 与 η_2 的较小值，

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \quad (3-2)$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \quad (3-3)$$

混凝土板冲切承载力验算值不满足式(3-1)且增加板厚受限时,可增配箍筋或弯起钢筋。此时,混凝土板受冲切截面和冲切承载力应分别满足式(3-4)、(3-5),

$$F_l \leq 1.2 f_t \eta u_m h_0 \quad (3-4)$$

$$F_l \leq (0.5 f_t + 0.25 \sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0 + 0.8 f_{yv} A_{svu} + 0.8 f_y A_{sbu} \sin \alpha \quad (3-5)$$

式中 F_l 为局部荷载或集中反力设计值; β_h 为截面高度影响系数; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; $\sigma_{pc,m}$ 为计算截面周长上两个方向混凝土有效预压应力按长度的加权平均值; u_m 为计算截面的周长; h_0 为截面有效高度; η_1 为局部荷载或集中反力作用面积形状的影响系数; η_2 为计算截面周长与板截面有效高度之比的影响系数; β_s 为 F_l 作用矩形面积的长短边比值, $2 \leq \beta_s \leq 4$, 圆形冲切面取 $\beta_s = 4$; α_s 为柱位置影响系数, 中柱取 40, 边柱取 30, 角柱取 20; f_{yv} 、 f_y 分别为箍筋与纵筋的抗拉强度设计值; A_{svu} 、 A_{sbu} 分别为与 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋、全部纵筋的截面面积; α 为弯起钢筋与板底面的夹角, 详见文献[1]。

分析可知, 式(3-1)、(3-4)、(3-5)基于以下条件: 1) 混凝土板冲切破坏截面呈 45° 斜向; 2) 混凝土板冲切验算部位无竖向弯曲裂缝; 3) 忽略冲切验算截面弯曲压应力的有利作用。

4. 弯曲裂缝截面冲切承载力验算方法

混凝土板柱结构设计中, 板柱相连截面同为弯曲抗裂与冲切破坏控制部位, 如允许该部位带裂缝工作, 鉴于现有相关试验均表明受弯开裂总先于冲切破坏, 弯曲裂缝呈竖向、沿柱截面周边分布, 并可能使规范假定的 45° 斜截面冲切破坏转变为裂损截面弯剪破坏。

板柱节点冲切承载力验算时, 如验算截面弯曲开裂, 式(3-1)、(3-4)、(3-5)中 h_0 应代换为开裂截面受压区三角形应力分布高度 x_c , 限 $x_c < h_0$, 并组合 x_c 范围内平均压应力 $0.5\sigma'_c$ 的有利作用, σ'_c 为开裂截面受压区外边缘最大应力, 限 $\sigma'_c \leq f_c$, f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, 式(3-1)改记为

$$F_l \leq [0.7 \beta_h f_t + 0.25 (\sigma_{pc,m} + 0.5 \sigma'_c)] \eta u_m x_c \quad (4-1)$$

式中系数 η 仍取 η_1 与 η_2 两者较小值, η_1 仍由式(3-2)确定, η_2 改由式(4-2)解出,

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s x_c}{4u_m} \quad (4-2)$$

混凝土板冲切承载力验算值不满足式(4-1)且增加板厚受限时,可增配弯起钢筋。此时基于式(3-4)、(3-5), 混凝土板的受冲切截面和冲切承载力应分别满足式(4-3)、(4-4)和规范 9.1.11 条构造要求,

$$F_l \leq 1.2 f_t \eta u_m x_c \quad (4-3)$$

$$F_l \leq [0.5 f_t + 0.25 (\sigma_{pc,m} + 0.5 \sigma'_c)] \eta u_m x_c + 0.8 f_y A_{sbu} \sin \alpha \quad (4-4)$$

由于箍筋平行于弯曲裂缝, 不再考虑其抗冲切作用, 取 $A_{svu} = 0$ 。对于矩形柱, σ'_c 、 x_c 分别取柱截面周长的相应平均值; 对于圆形柱, 可按截面周长代换为方柱后再确定 σ'_c 和 x_c 。

5. 计算变量 x_c 与 σ'_c

基于板验算截面的受力平衡、变形协调条件及平截面假定, 在弹性范围内, 可推导出变量 x_c 与 σ'_c 的计算式。

5.1. 预应力混凝土板

矩形验算截面弯曲开裂后, 受压区高度 x_c 由以下三次方程计算确定[3],

$$x_c^3 + Ax_c^2 + Bx_c + C = 0 \quad (5-1)$$

式中

$$A = 3(e_N - h_p) \quad (5-2)$$

$$B = \frac{6}{b_c} [\alpha_p A_p e_N + \alpha_E A_s (e_N - h_p + h_s)] \quad (5-3)$$

$$C = -\frac{6}{b_c} [\alpha_p A_p h_p e_N + \alpha_E A_s h_s (e_N - h_p + h_s)] \quad (5-4)$$

式(5-1)的简化二次方程如下[3],

$$(A + h_p)x_c^2 + (B - 0.215h_p^2)x_c + C = 0 \quad (5-5)$$

在 $0.27 \leq x_c/h_p \leq 0.90$ 范围内, 相对式(5-1), 用式(5-5)解出 x_c 的计算误差小于 $\pm 5\%$, 相关分析见文献[3]。

式中 $e_N = M_c/N_p$, M_c 、 N_p 分别为板柱相连截面的弯矩、预压力, M_c 需根据整体结构内力分析确定, $N_p = A_p \sigma_p \approx A_p \sigma_{pe}$ (忽略裂缝截面预应力筋的微小应力增量), σ_{pe} 为预应力筋有效预应力; A_p 、 A_s 分别为受拉区预应力筋、普通钢筋的截面面积; b_c 为验算截面宽度(同相连柱截面边长); h_p 、 h_s 分别为预应力筋、普通钢筋的截面形心与受压区外边缘间距; $\alpha_p = E_p/E_c$ 、 $\alpha_E = E_s/E_c$, E_p 、 E_s 、 E_c 分别为预应力筋、普通钢筋、混凝土的弹性模量。

取 $\sigma_p \approx \sigma_{pe}$, 由式(5-1)或(5-5)先分别求出矩形柱四周验算截面的 x_c , 取其均值后代入式(5-6)解出 σ_s , 限 $\sigma_s \leq f_y$, f_y 为钢筋抗拉强度设计值, 再将 σ_s 代入式(5-7)解出 σ'_c , 然后将 x_c 和 σ'_c 代入式(4-1)或(4-4), 可求出混凝土板弯曲裂缝截面的冲切承载力。

$$M_c = A_p \sigma_p \left(h_p - \frac{2}{3} x_c \right) + A_s \sigma_s \left(h_s - \frac{2}{3} x_c \right) \quad (5-6)$$

$$0.5 \sigma'_c b_c x_c = A_p \sigma_p + A_s \sigma_s \quad (5-7)$$

式中 σ_p 、 σ_s 分别为验算截面宽度 b_c 内预应力筋、普通纵向钢筋的拉应力。

5.2. 钢筋混凝土板

矩形验算截面出现弯曲裂缝后, 受压区高度 x_c 由以下二次方程计算确定[3][4],

$$0.5 b_c x_c^2 - \alpha_E A_s (h_s - x_c) = 0 \quad (5-8)$$

由式(5-8)先分别求出矩形柱四周验算截面的 x_c , 取其均值后代入式(5-9)求出 σ_s , 再将 σ_s 代入式(5-10)求出 σ'_c , 然后将 x_c 和 σ'_c 代入式(4-1)或(4-4), 可解出混凝土板弯曲裂缝截面的冲切承载力。

$$M_c = A_s \sigma_s \left(h_s - \frac{2}{3} x_c \right) \quad (5-9)$$

$$0.5 \sigma'_c b_c x_c = A_s \sigma_s \quad (5-10)$$

6. 算例比较

以前述西黄村地下 2 层车库混凝土板柱结构为例, 取柱网轴线 3-11/3-J 处中柱与顶板连接部位的板

柱节点,按规范方法与改进方法分别验算冲切承载力。

6.1. 按规范方法验算

用式(3-1)验算顶板的冲切承载力。取 $\beta_s = 2.0$, $\alpha_s = 40$, $\beta_h = 1.0$; $h_0 = 2 \times 350 - 32 = 668 \text{ mm}$; 解出 $u_m = (600 + 668) \times 4 = 5072 \text{ mm}$; $\eta_1 = 1.0$, $\eta_2 = 1.82$, 取 $\eta = 1.0$; C30 混凝土, $f_t = 1.43 \text{ MPa}$, $f_c = 14.3 \text{ MPa}$; $\sigma_{pc,m} = 0$, 由式(3-1)可解出无弯曲裂损的板柱节点的冲切承载力为 3391.5 kN。

6.2. 按本文方法验算

按式(4-1)验算顶板的冲切承载力。 $b_c = 600 \text{ mm}$, $\alpha_E = 6.667$, $A_s = 1545 \text{ mm}^2$ (3 Φ 16 + 3 Φ 20), $h_s = h_0 = 668 \text{ mm}$, 由式(5-8)解出 $x_c = 135.2 \text{ mm}$, h_s 、 x_c 均为柱截面四周相应均值。依据整体结构模型计算分析,标准荷载(含板面覆土 30 kN/m²)组合作用下,柱四周各验算截面平均弯矩 $M_c = 437.067 \text{ kN} \cdot \text{m}$ [2], 其它变量值同前。由式(5-9)解出 $\sigma_s = 489.5 \text{ MPa} > f_y = 360 \text{ MPa}$, 取 $\sigma_s = 360 \text{ MPa}$; 由式(5-10)解出 $\sigma'_c = 13.7 \text{ MPa} < f_c$, 由式(4-1)可解出板柱节点弯曲裂损截面的冲切承载力为 1861.1 kN。

6.3. 验算结果比较

比较规范式(3-1)与相应改进式(4-1)的同节点冲切承载力验算结果,前者不考虑、后者考虑弯曲裂缝减小验算截面高度的不利影响、及受弯截面压区应力的有利作用,两式验算值分别为 3391.5 kN 与 1861.1 kN, 分别为冲切荷载设计值 4915.7 kN [2]的 69.0%及 37.9%。式(3-1)与式(4-1)的验算值之比为 1.82, 即前者更偏于不安全,此结果也佐证了算例结构局部坍塌破坏的主要原因。

7. 板柱节点冲切破坏形态

混凝土板柱节点冲切破坏截面呈斜向、柱端形成倒锥体,为其无弯曲裂缝时的典型冲切破坏特征,主要缘于垂直于破坏截面的主拉应力大于混凝土实际抗拉强度。

随作用板柱节点冲切验算截面的弯矩逐渐增大,且未出现弯曲裂缝时,验算截面主拉应力方向与板底面的夹角随之增加,但此时验算截面高度未变化。

如果板柱节点的冲切验算截面受弯开裂,验算截面高度则近似减小至裂缝截面受压区高度,冲切承载力随之降低,此时冲切破坏截面与先期裂损截面趋于重合,柱端倒锥体可能不再出现,见图 2。

板柱节点的相邻结构跨度 l 增大时,节点部位的 M_c 与 F_l 虽同时随之增加,但 M_c 产生的板截面主拉应力增量显著大于 F_l 的相应值,前者与 l^2 成正比,后者仅与 l 成正比。由此可认为,板柱节点的冲切破坏锥体仅出现于 l 相对较小、板抗裂度相对较高时,或弯曲裂缝减小冲切验算截面高度不明显的情况。

板柱节点冲切破坏锥体斜面的角度,取决于作用于斜面的主拉应力的方向,通常由板截面的预压应力、弯矩、冲切剪力三者的效应组合确定,规范验算统一取 45°仅为简化或假定。

8. 分析与说明

混凝土板柱节点同时作用弯矩与冲切剪力时,设计如允许冲切验算截面出现宽度不超限裂缝,通常受弯开裂总是先于脆性冲切破坏,且裂缝截面受压区应力大致呈三角形分布。

验算板柱节点冲切承载力时,板受弯开裂减小验算截面高度的不利影响相对较大,且不应忽略开裂截面受压区应力的有利作用。

板柱结构的板中混配预应力筋与普通钢筋,适度提高控制部位的抗裂设计标准,可有效阻止节点冲切验算截面在张拉施工后开裂,但结构用钢量有所增加。

无法或无意阻止板柱节点开裂时,增大平托板厚度,或改用截面较高的倒锥形柱帽,或在节点内配

置型钢剪力架,可有效提高板柱节点的冲切承载力。

板柱节点的冲切验算截面作用弯矩时,基于弹性计算分析,如板截面上边缘混凝土拉应力大于相应标准抗拉强度,则认为受弯开裂,否则可判定不开裂。

与规范验算板柱节点时假定冲切破坏截面为 45° 锥面不同,板柱节点弯曲开裂后的弯剪破坏截面呈竖向,此时增配竖向箍筋不能相应增加冲切承载力。

正常使用状态下的板柱结构,节点裂损主要源于重力荷载产生的弯矩,开裂截面存在受压区。当该部位自动组合混凝土成型与降温收缩拉应力后,可能导致 x_c 进一步减小,甚至形成贯通板截面的裂缝,上述分析未涉及此不利组合情况。

如果板柱节点抗冲切验算截面出现竖向贯通裂缝,且未设横穿这些裂缝的型钢剪力架或弯起钢筋,可认为这些截面无冲切承载力,为此设计验算时应对 u_m 进行相应折减。

改进后的混凝土板柱节点冲切承载力验算式(4-1)、(4-3)、(4-4)虽源于规范,但引入 x_c 替代 h_0 以考虑验算截面高度因受弯开裂而减小的不利影响,更符合设计允许开裂(裂宽小于限值)的板柱节点的实际情况,有利于阻止板柱节点因裂损减小抗冲切截面而发生脆性冲切破坏。

9. 结论与建议

- 1) 设计如允许或无法阻止混凝土板柱节点抗冲切验算部位受弯开裂,验算截面高度 h_0 应减小至 x_c 。
- 2) 板柱节点抗冲切验算部位作用弯矩时,可根据最大弯曲拉应力是否大于混凝土标准抗拉强度判断验算截面是否开裂。
- 3) 所述改进后的验算方法源于规范,适用于验算复核混凝土板柱节点受弯开裂后的冲切承载力。
- 4) 如果整体结构组合应力验算表明板柱节点局部存在贯通裂缝,其冲切承载力验算截面周长 u_m 应予相应折减。
- 5) 规范今后修订时宜补充说明,如何计入板柱节点裂损对冲切承载力的不利影响,及相关构造要求和限制条件。

参考文献

- [1] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 潘立, 惠怡. 北京市石景山区西黄村改造安置房工程地下车库顶板验算复核与技术分析[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2017年9月7日.
- [3] 部分预应力混凝土结构设计建议[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985.
- [4] 潘立. 无粘结预应力混凝土受弯构件开裂截面受压区高度的计算[J]. 建筑结构, 1989(4): 23-27.