

双向偏压钢筋混凝土 L 形构件正截面承载力研究*

焦俊婷 叶英华 刁波

北京航空航天大学土木工程系, 北京 100083

摘要 为便于双向偏压作用下钢筋混凝土构件任意截面非线性分析, 提出了新的简便的截面积分方法, 编制了截面极限承载力计算程序. 并对 L 形截面在双向偏压作用下进行了全过程分析, 对双向偏压构件的影响因素进行了分析, 给出了 $(N-M)$ 相关曲线和 (M_y-M_z) 相关曲线. 计算结果与试验数据及其他文献结果吻合很好.

关键词 非线性分析 L 形截面 双向偏压 正截面承载力

异形截面钢筋混凝土构件在双向偏压作用下正截面承载力的计算是目前工程设计中一个亟待解决的问题, 原因是在双向偏压作用下, 截面中和轴一般不垂直于弯矩作用平面, 也不与截面边缘平行, 它的位置随截面尺寸、配筋、加荷形式、混凝土强度等诸多因素的变化而变化. 由于确定中和轴位置的计算复杂, 需用计算机来完成. 过去主要采用分条法和分块法^[1-3]计算, 即将构件截面分成若干条带或方块进行数值计算. 这两种方法均能精确计算构件的承载能力, 但所费工时较多.

本文提出直接对截面内取若干 Gauss 点进行数值积分的方法, 计算构件的正截面承载力, 分析了 L 形截面钢筋混凝土构件在双向偏压作用下的 $(N-M)$ 相关曲线和 (M_y-M_z) 相关曲线. 该法计算精确度较高, 计算时间较少. 且本法不仅适用于任意截面形式构件的正截面承载力计算, 也可应用于钢筋-混凝土组合结构、叠和结构等正截面承载力的计算.

1 理论分析

1.1 基本假定

- (1) 平截面假定. 即认为变形前后均为平截面.
- (2) 钢筋与混凝土充分粘结, 无相对滑移.
- (3) 不考虑受拉区混凝土的作用.

1.2 材料本构模型

(1) 混凝土本构模型 混凝土本构关系采用我国国家规范, 应力应变满足下述关系:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & (\epsilon_c < \epsilon_0) \\ f_c & (\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \\ 0 & (\epsilon_c \geq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 ϵ_c , σ_c 分别为混凝土应变和应力, f_c 为混凝土棱柱体抗压强度, 峰值应变为 $\epsilon_0 = 0.002$, 极限应变取 $\epsilon_{cu} = 0.0033$.

(2) 钢筋本构模型 受拉、受压钢筋应力应变关系取双直线理想弹塑性模型, 极限应变取 $\epsilon_{su} = 0.01$.

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon & (|\epsilon_s| \leq f_y/E_s) \\ f_y & (f_y/E_s < |\epsilon_s| \leq \epsilon_{su}) \\ 0 & (|\epsilon_s| > \epsilon_{su}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 ϵ_s , σ_s 分别为钢筋应变和应力, E_s 为钢筋的弹性模量, f_y 为钢筋的屈服强度.

1.3 基本计算公式及计算过程

(1) 截面内任意点的应变 假定轴力 N 沿 x 轴, 弯矩 M_y , M_z 分别绕 y , z 轴, 据上述平截面假定得截面内任意点的应变为:

$$\epsilon = \epsilon_0 + z\theta_y - y\theta_z = \mathbf{y}^T \bar{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (3)$$

式中 ϵ_0 , θ_y , θ_z 分别为坐标原点沿 x 轴应变、截面绕 y 轴曲率、截面绕 z 轴曲率;

2003-02-26 收稿, 2003-03-24 修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50178008, 59978004)

E-mail: ylc@jyu.edu.cn.

$$\mathbf{y}^T = [1 \quad z \quad -y], \quad \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = [\varepsilon_0 \quad \theta_y \quad \theta_z]^T.$$

(2) 截面力方程 据截面力平衡方程可得

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \mathbf{D}_s \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \theta_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} = \mathbf{D}_s \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}. \quad (4)$$

式中 N, M_y, M_z 分别为截面沿 x 轴向力、绕 y 和 z 轴的弯矩, $\mathbf{D}_s = \mathbf{D}_{s(c)} + \mathbf{D}_{s(s)}$ 为截面的割线刚度矩阵, $\mathbf{D}_{s(c)}$ 代表混凝土对截面割线刚度的贡献, $\mathbf{D}_{s(s)}$ 代表钢筋对截面割线刚度的贡献^[4~9].

截面力的增量方程为

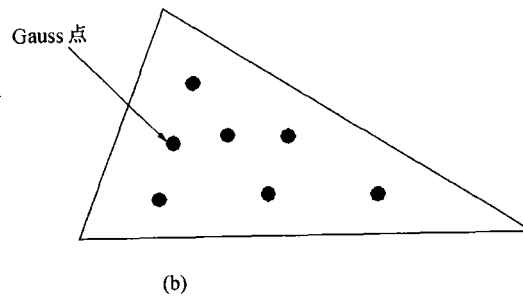
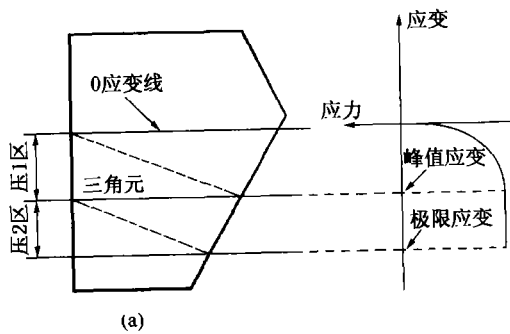


图1 截面刚度计算三角元划分
(a) 截面三角元划分; (b) 三角元高斯点

式中 $\Delta N, \Delta M_y, \Delta M_z$ 分别为截面沿 x 轴向力、绕 y 和 z 轴的弯矩的增量, $\mathbf{D}_t = \mathbf{D}_{t(c)} + \mathbf{D}_{t(s)}$ 为截面的切线刚度矩阵, $\mathbf{D}_{t(c)}$ 代表混凝土对截面切线刚度的贡献, $\mathbf{D}_{t(s)}$ 代表钢筋对截面切线刚度的贡献.

(3) 截面力计算 在混凝土和钢筋应变、应力的计算中规定以受拉为正, 受压为负. 混凝土刚度矩阵的计算方法: 将截面压区划分为若干三角元 (见图1(a)), 对每个三角元取7个 Gauss 点 (见图1(b)) 计算三角元的刚度系数, 再将所有三角元刚度系数相加得到压区混凝土的刚度.

2 计算结果比较

用本文方法对文献[6]的试件进行了计算, 并与试验结果进行了比较, 其结果见图2和表1, 数据吻合较好, 说明本文计算程序可行.

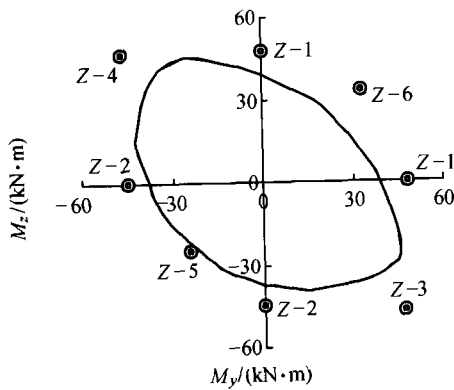


图2 (M_y-M_z) 相关曲线 ($N = 220 \text{ kN}$)
- 本文计算结果 ● 文献[6]的实验结果

表1 本文计算结果与文献[6]计算值和试验结果的比较

试件	轴压力 /kN	极限弯矩/(kN·m)		
		文献[6]实验值	文献[6]计算值	本文计算值
Z-1	220	47.96	38.33	38.51
Z-2	220	44.85	37.45	36.00
Z-3	220	62.10	48.06	48.63
Z-4	370	72.45	52.38	55.69
Z-5	220	34.50	33.47	33.98
Z-6	220	46.58	35.03	34.35

3 L形钢筋混凝土双向偏压构件正截面极限承载力分析

本文对多个等肢 L 形截面进行计算分析, 以图3所示的截面讨论等肢 L 形截面的 ($N-M$) 相关曲线 (图4) 和在等轴力作用下 (M_y-M_z) 相关曲线 (图5) 的变化规律.

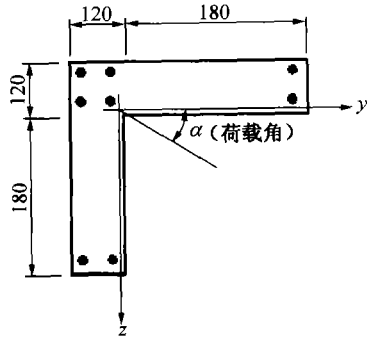


图3 构件截面尺寸

3.1 (N-M)相关曲线的变化规律

(1) 荷载角 $\alpha = \arctan(M_y/M_z)$ 的影响 图4(a)所示为截面配筋率 $\rho = 1\%$ 、选用混凝土 C20 时, 相应于不同荷载角的(N-M) ($M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$) 相关曲线. 由图可见, 不同荷载角情况下的(N-M)相关曲线与一般偏心受压构件的类似, 有两种情况: 当为大偏心破坏时, 轴力增大, 抗弯能力增大; 当为小偏心破坏时, 轴力增大, 抗弯能力减小. 随荷

载角不同, 界限偏心点也发生变化, 可以看出, 荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 和 $\alpha = 225^\circ$ 时的(N-M)相关曲线几乎相同, 曲线所包络的面积最小, 而当 $\alpha = 135^\circ$ 时曲线所包络的面积最大. 因受压面积不同, 45° 受压时混凝土面积最小, 承载能力较低; 135° 受压时混凝土面积最大, 包络线处于最外面, 承载能力最大.

(2) 配筋率 $\rho = A_s/A$ 的影响 图4(b)所示为荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 、混凝土为 C20 时, 不同配筋率的(N-M)相关曲线. 可以看出, 随着配筋率的增大, 极限承载能力增大, 几乎呈线性变化; 界限偏心点几乎不受配筋率的影响.

(3) 混凝土强度的影响 图4(c)所示为截面在荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 、配筋率 $\rho = 1.57\%$ 时, 不同混凝土强度的(N-M)相关曲线. 可以看出, 随着混凝土强度的增大, 极限承载能力增大, 当为小偏心破坏时, 混凝土强度小于或等于 C40 时, 几乎呈线性变化; 当为大偏心破坏, 且随着轴压力增大, 极限承载能力增大. 混凝土强度越大, 界限偏心点越靠上.

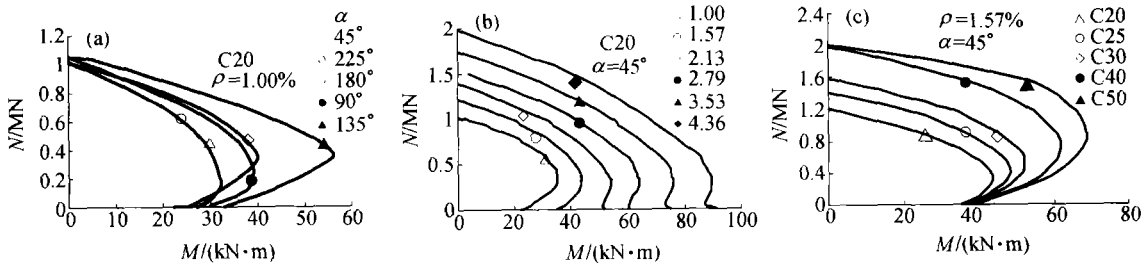


图4 (N-M) 相关曲线的变化规律

(a) 不同荷载角下的(N-M)相关曲线; (b) 不同配筋率下的(N-M)相关曲线; (c) 不同强度混凝土下的(N-M)相关曲线

3.2 (M_y-M_z)相关曲线的变化规律

(1) 轴压比 $\lambda = N/Af_c$ 的影响 图5(a)所示为截面 $\rho = 1\%$ 、混凝土 C20、荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 时, 几种轴压比情况下的(M_y - M_z)相关曲线. 由图可见, 当构件破坏为大偏心破坏, 且轴压比 $\lambda = 0$ 或很小 ($\lambda = 0.1286$) 时, (M_y - M_z)相关曲线近似呈三角形; 随着轴压比增大, 该相关曲线逐渐变为椭圆形 ($\lambda = 0.4501$), 接近界限破坏时, 截面极限抗弯能力值 ($M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$) 为最大, 所包络的面积逐渐增大. 构件破坏为小偏心破坏, 且轴压比继续增加时, 该相关曲线由椭圆形逐渐变为三角形, 且包络的面积逐渐减小, 而该三角形与初始三角形反向.

(2) 荷载角 $\alpha = \arctan(M_y/M_z)$ 的影响 由图5(a)还可以看出, 随着荷载角 $\alpha = \arctan(M_y/M_z)$ 的变化, 截面极限抗弯能力 ($M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$) 也发生变化, 但抗弯能力最大值所对应的荷载角是随轴压比的变化而变化.

(3) 配筋率 $\rho = A_s/A$ 的影响 图5(b)所示为截面在轴压比 $\lambda = 0.2572$ 、混凝土 C20、荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 时, 几种配筋率情况下的(M_y - M_z)相关曲线. 由图可见, 随着配筋率的增大, 极限承载能力增大, 几乎呈线性变化; 配筋率对抗弯能力最大值所对应的荷载角几乎没有影响.

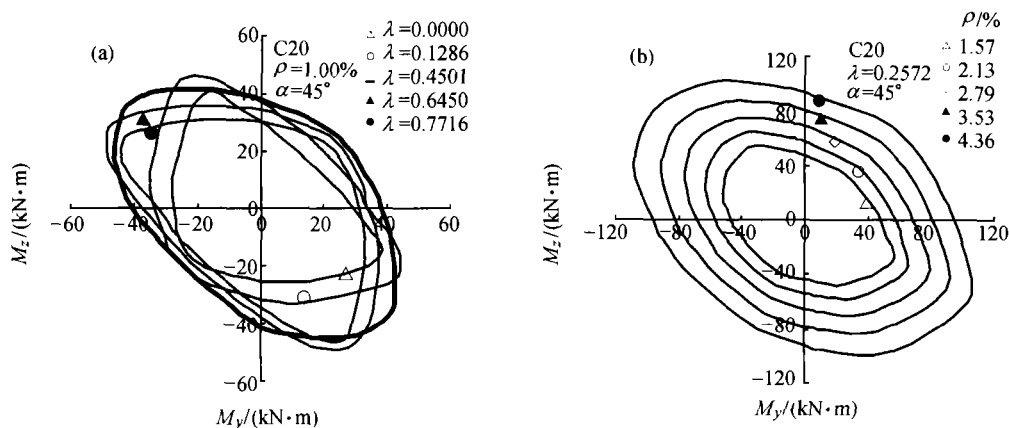


图5 (M_y - M_z)相关曲线的变化规律

(a) 不同轴压比(M_y - M_z)_z 相关曲线; (b) 不同配筋率(M_y - M_z)_z 相关曲线

4 结论

(1) 本文针对以双向偏压钢筋混凝土任意截面形状构件进行了截面非线性分析, 编制了构件正截面承载力的计算程序, 计算结果与实验结果及其他文献的计算结果吻合较好, 表明所提出的方法和程序正确可行。

(2) L形偏心受压构件的破坏形式与一般偏心受压构件的破坏形式类似, 分为大偏心受压破坏和小偏心受压破坏两类。

(3) L形偏心受压构件截面中和轴一般不垂直于弯矩作用平面, 也不与截面边缘平行, 它的位置随截面尺寸、配筋、加荷角度、混凝土强度等诸多因素的变化而变化。

(4) (N - M)相关曲线显示, 荷载角的变化对L形偏心受压构件截面的承载力的影响较大, 其中荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 和 $\alpha = 225^\circ$ 承载力最小, 荷载角 $\alpha = 135^\circ$ 时承载力最大。建议设计时, 必须保证荷载角 $\alpha = 45^\circ$ 和 $\alpha = 225^\circ$ 的承载力。

(5) (M_y - M_z)相关曲线显示, 大偏心破坏时, 随轴压比增加, L形偏心受压构件截面的抗弯承载力增加; 小偏心破坏时, 随轴压比增加, L形偏心受压构件截面的抗弯承载力减小; 界限破坏时, L

形偏心受压构件截面的抗弯承载力最大。

(6) 本文提出的计算方法, 计算精确, 计算速度快。适用于任意截面、任意复杂材料本构关系的构件。也适用于钢筋-混凝土组合结构、叠和结构等正截面承载力的计算。

参 考 文 献

- 1 刘超, 等. L形截面钢筋混凝土双向压弯构件正截面承载能力的实验及理论研究. 工程力学(增刊), 1995: 0822
- 2 王丹, 等. 异形柱双向偏压构件正截面承载能力实验及设计方法研究. 建筑结构学报, 2001, (5): 37
- 3 Hsu T C. T-shaped reinforced concrete members subject to bending and axial compression. ACI Structural Journal, 1989, 86(4): 460
- 4 叶英华, 等. 钢筋混凝土结构非线性理论综述. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995, (1): 127
- 5 叶英华, 等. 钢筋混凝土构件在压弯见剪作用下的截面非线性刚度矩阵. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1996, (2): 20
- 6 Ye Y H, et al. Nonlinear Analysis of Concrete Structures. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996
- 7 叶英华, 等. 任意形状钢筋混凝土弯压构件截面非线性全过程分析. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995, (5): 12
- 8 Diao B, et al. Strength analysis of reinforced concrete columns with arbitrary cross-section under bieccentric loadings. Progress in Natural Science, 2001, 11(4): 309
- 9 刁波, 等. 钢-混凝土组合结构非线性分析. 工业建筑, 2002, (2): 44