

钢筋混凝土梁柱节点核心区 拉-压杆模型化方法研究

韩风霞, 王志军, 宋孟超, 黄宗明

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: OPENSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 中的节点“宏模型”是一种模拟钢筋混凝土梁柱节点较为理想的高效单元模式, 但目前该模型中确定节点核心区剪切应力应变关系的两种常用方法: 修正斜压场理论 (MCFT) 和斜压杆模型, 均存在不足; 本文提出了能全面反映节点三种传力机理的拉-压杆模型方法来确定剪切应力-应变关系, 并推导了该模型的变形协调条件、平衡方程。通过分析比较, 拉-压杆模型方法的计算结果与相应的梁柱节点试验结果吻合较好, 能在节点配箍率变化较大的范围, 更好地反映核心区的剪切应力应变关系。

关键词: 钢筋混凝土梁柱节点; 节点核心区; 拉-压杆模型; 模型检验; 模拟; 剪切应力应变关系

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0061-05

Strut-and-Tie Model Method of Reinforced Concrete Beam-Column Joint Core

HAN Feng-xia, WANG Zhi-jun, SONG Meng-chao, HUANG Zong-ming

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: “Macro model” in OPENSEES is an ideal and effective method for simulating RC beam-column joint. Some disadvantages, however, exist in both the modified compression field theory (MCFT) and diagonal compression strut model, with which they are commonly used to obtain the shear stress-strain relation of joint core. A new method by means of strut-and-tie model (STM), which reflected three mechanisms in joint well, was proposed to simulate the shear stress-strain response of joint core. The deformation compatibility and equilibrium condition of the model were deduced thereafter. It was indicated that the result of STM method was in good agreement with that of test data. And it could simulate more accurately the shear stress-strain response of joint core with a wide range of stirrup ratio.

Key words: RC beam-column joint; joint core; strut-and-tie model; model checking; simulation; shear stress-strain relationship

在地震作用下, 钢筋混凝土框架梁柱节点核心区的受力比较复杂^[1], 长期以来都是很多学者研究的课题。对于节点的模型化研究, 许多学者都提出过多种分析模型, 其中, 美国学者 Lowes 等人提出的宏单元模型^[2-5] 是进行非线性时程分析较为理想

的模型, 它兼顾准确和计算高效, 已被纳入 OPENSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 非线性分析平台中^[6]。该宏模型通过核心区剪切块分量、钢筋滑移分量和交界面剪切分量的组合来分析节点在地震作用下的二维非弹

收稿日期: 2009-07-31

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (90715002); 重庆市科委自然科学基金 (2006BB0019)

作者简介: 韩风霞 (1978-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为钢筋混凝土结构分析, (E-mail) csjjj02@sina.com。

王志军 (联系人), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) zjwang@cqu.edu.cn。

性性能,其中剪切块分量的参数确定对节点反应的模拟精度有很大的影响。该节点宏单元模型中用捏缩材料的本构来反映核心区剪切块的受力和变形特征,关键是获取核心区的剪切应力应变关系骨架曲线。目前,Lowes 等人提出了 2 种确定核心区剪切应力应变关系的方法:一种是采用修正斜压场理论(MCFT)^[2],另一种是采用斜压杆模型^[7],但这 2 种方法均存在不足。MCFT 理论是建立在纯剪切状态下的^[8],只考虑节点周边梁、柱纵筋通过粘结力以剪力流的形式传入节点的剪力,即只考虑了节点区 3 种主要宏观传力模型中的“桁架机构”。而斜压杆模型,主要考虑节点传力的“斜压杆机构”,虽然考虑了节点区箍筋对斜压杆侧向约束作用,但忽略了箍筋的直接抗剪作用,特别是节点区出现裂缝以后,随着箍筋传递部分剪力的比重增加,斜压杆模型的模拟结果与实际受力的误差将随之增大。

为了全面地反映节点核心区的 3 种传力机理,提出了采用拉-压杆模型来确定节点核心区剪切应力应变关系曲线的新方法,并用文献^[9]中的 J-2、J-13、J-15、J-16 试件进行了验证分析。

1 节点核心区拉-压杆模型的建立和分析

1.1 拉-压杆模型概述

按照 Bernoulli 的平截面假定是否符合,钢筋混凝土结构可划分为 B 区和 D 区。拉-压杆模型是一种类似桁架的模型,包括压杆、拉杆和结点^[10],可以通过分析结构的弹性主应力迹线来建立,体现了结构受力的本质,传力明确,计算简便。研究表明,拉-压杆模型(简称 STM)用于 D 区的计算精度比较高。目前许多国家的规范中在承载力计算时都包含了采用拉-压杆模型的方法,如美国 ACI318-08、加拿大国家建筑规范 NBC-2005 等。

钢筋混凝土梁柱节点的受力复杂,应力分布紊乱,不符合平截面假定,属于 D 区,从而可以用拉-压杆模型来进行分析研究^[11-12]。常规的拉-压杆模型方法只考虑受力平衡,不考虑变形协调条件,只能用于承载力计算,不能建立力和变形的相互关系。文献^[13]同时考虑受力平衡和变形协调,尝试性地对小跨高比的剪力墙连梁进行了非线性分析。

1.2 节点核心区拉-压杆模型的建立

1.2.1 模型机理分析和计算简图 节点核心区存在 3 种宏观传力机构^[9],即斜压杆机构、桁架机构和约束机构。如图 1 所示,将节点核心区离散为主斜

压杆 ad 、次压杆(粗虚线,如 ac)和拉杆(代表箍筋的粗水平线,如 bc)^[14]。主压杆类似于斜压杆机构(图 2(a)),直接传递部分剪力;另一部分水平剪力通过次压杆的水平分量传至拉杆结点,由拉杆拉力来平衡,类似桁架机构(图 2(b))传力。

而节点传力的约束机构则是通过在混凝土材料本构关系中考虑箍筋的约束作用来体现。

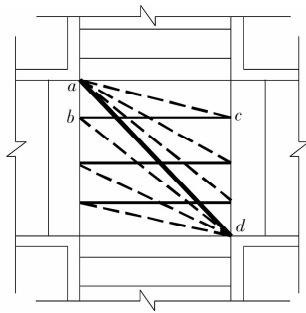


图 1 核心区拉-压杆模型

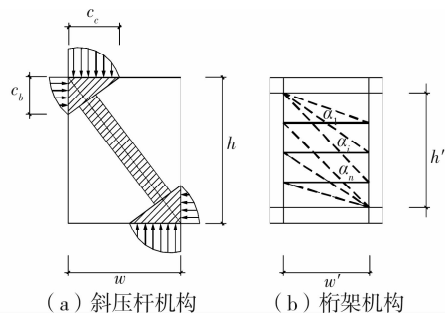


图 2 拉-压杆模型计算简图

针对图 2 所示该计算简图做如下假定:

1) 在节点核心区拉-压杆模型中,水平剪力等于各压杆力的水平分量之和,垂直剪力等于各压杆力的垂直分量之和。剪切块的平均水平剪应力为:

$$\tau = \frac{F_{\text{main}} \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^n F_{\text{sub}_i} \cdot \cos \alpha_i}{\omega \cdot b_j} \quad (1)$$

式中: F_{main} 为主压杆力; α 为节点对角线与水平方向的夹角; n 为箍筋根数; F_{sub_i} 为第 i 根次压杆力; α_i 为第 i 根次压杆与水平方向的夹角。

2) 主压杆宽度和次压杆宽度需满足下列条件:

$$\omega_{\text{main}} + \sum_{i=1}^n \omega_{\text{sub}_i} = \sqrt{c_b^2 + c_c^2} \quad (2)$$

式中: c_b 、 c_c 为梁柱截面受压区高度,当梁采用非对称配筋时,梁受压区高度取正反两方向受弯下的平均值, ω_{main} 为主压杆宽度, ω_{sub_i} 为第 i 根次压杆的宽度。

3) 次压杆倾斜角 α_i 为:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{s_i}{\omega'} \right) \quad (3)$$

式中: ω' 为柱两侧纵筋的中心距离; s_i 为第 i 根箍筋至梁上部纵筋中心距离。

4) 在进行各杆件变形分析时, 将拉、压杆结点视为一个铰节点, 忽略其尺寸效应。

5) 近似认为箍筋处于理想受拉状态, 沿长度方向应力应变均匀分布。

6) 箍筋平衡次压杆力的水平分量, 柱纵筋平衡各次压杆力的垂直分量。

1.2.2 变形协调条件 对于次压杆 ac 和拉杆 bc , 根据拉-压杆模型的计算简图, 可以得到图 3 所示的变形图, 当第 i 根拉杆 bc 、次压杆 ac 分别发生微小变形 $\Delta\theta_i$ 、 $\Delta\theta_i'$ 时, 利用全微分可推导出如下的简化关系:

$$l_{ac} \cdot \Delta\theta_i = l_{bc} \cdot \Delta\theta_i + l_{ab} \cdot l_{bc} \cdot \Delta\theta_i \quad (4)$$

次压杆 ac 和拉杆 bc 的应变分别为:

$$\epsilon_{ac} = \frac{\Delta\theta_i}{l_{ac}}, \epsilon_{bc} = \frac{\Delta\theta_i}{l_{bc}} \quad (5)$$

式中: $\Delta\theta_i$ 、 $\Delta\theta_i'$ 及 $\Delta\theta_i$ 的含义见图 3, l_{ab} 、 l_{ac} 、 l_{bc} 分别为纵筋 ab 、次压杆 ac 、拉杆 bc 的长度。联立方程(4)、(5)并简化可得:

$$\epsilon_{ac} = \epsilon_{bc} \cdot \cos^2 \alpha_i + \Delta\theta_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \quad (6)$$

同理可以得到次压杆 bd 的应变:

$$\epsilon_{bd} = \epsilon_{bc} \cdot \cos^2 \alpha_i' + \Delta\theta_i' \cdot \sin \alpha_i' \cdot \cos \alpha_i' \quad (7)$$

式(6)和式(7)揭示了拉杆应变和与其相联结的两根次压杆应变之间的定量关系。但还需将拉压杆应变和整个剪切块剪应变对应起来, 才能建立起完备的变形协调条件。如图 4 所示, 当核心区发生水平方向相对位移 Δx 时, 剪应变可计算为:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h'} = \frac{s_i \cdot \tan(\Delta\theta_i) + s_i' \cdot \tan(\Delta\theta_i')}{h'} \quad (8)$$

在 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\theta_i'$ 很小的情况下, 可简化为:

$$\gamma = \frac{s_i \cdot \Delta\theta_i + s_i' \cdot \Delta\theta_i'}{h'} \quad (9)$$

联立方程(6)、(7)、(9)就能得到拉杆应变、次压杆应变和核心区剪切块剪应变之间的关系。

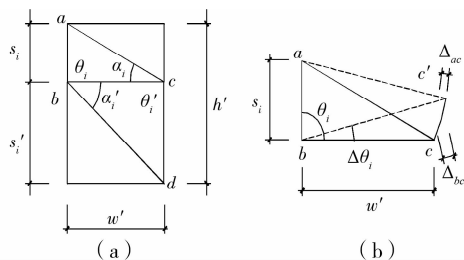


图 3 箍筋和次压杆变形图

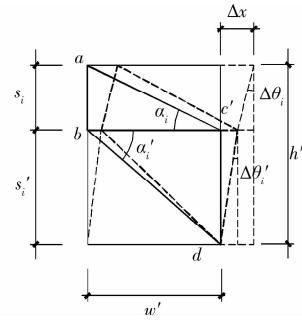


图 4 拉-压杆模型的剪切变形

1.2.3 平衡方程 通过图 5 可以得到以下平衡方程:

$$F_i \cdot \cos \alpha_i = F_i' \cdot \cos \alpha_i' \quad (10)$$

式中:

$$F_i = 0.85\beta_s \cdot \sigma_{s_i} \cdot A_{sub} \quad (10a)$$

$$F_i' = 0.85\beta_s \cdot \sigma'_{s_i} \cdot A_{sub} \quad (10b)$$

根据 ACI-318R 的规定, 此处考虑了次压杆的应力不均匀, β_s 为次压杆力折减系数^[15], A_{sub} 为次压杆截面积, σ_{s_i} 、 σ'_{s_i} 分别为次压杆 ac 、 db 的压杆混凝土应力。

对于拉杆 bc 的拉力计算, 要根据节点核心区的实际配箍进行考虑:

$$T_i = \beta_n \cdot \sigma_{t_i} \cdot A_t \quad (11)$$

式中: β_n 为拉杆力折减系数, 根据 ACI-318R 的规定进行取值, σ_{t_i} 箍筋应力, A_t 为该层箍筋在弯矩作用平面的总面积。

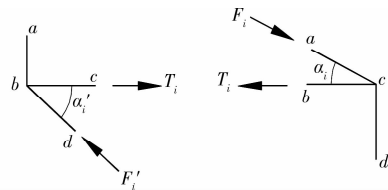


图 5 拉-压杆模型受力平衡图

1.2.4 本构关系

1) 混凝土本构关系 主压杆和次压杆都只计算箍筋内混凝土, 确定压杆力必须选取合适的约束混凝土的本构模型。Mander 模型^[16]对箍筋的约束作用考虑的比较细致, 参与计算的每一个参数物理意义明确, 对下降段的延性体现较理想, 故采用了 Mander 模型。

2) 钢筋本构关系 钢筋采用最常用的双折线箍筋应力应变关系:

$$\begin{cases} \sigma = E_s \cdot \epsilon & \epsilon < \epsilon_y \\ \sigma = f_y + 0.01E_s \cdot (\epsilon - \epsilon_y) & \epsilon \geq \epsilon_y \end{cases} \quad (12)$$

1.2.5 程序编制 以拉-压杆模型为基础, 整合以上的变形协调条件、受力平衡条件和本构关系, 对节

点核心区的单调受力进行全过程分析模拟,从而可得到剪切块的剪应力-剪应变关系曲线。图 6 是程序的主框图。

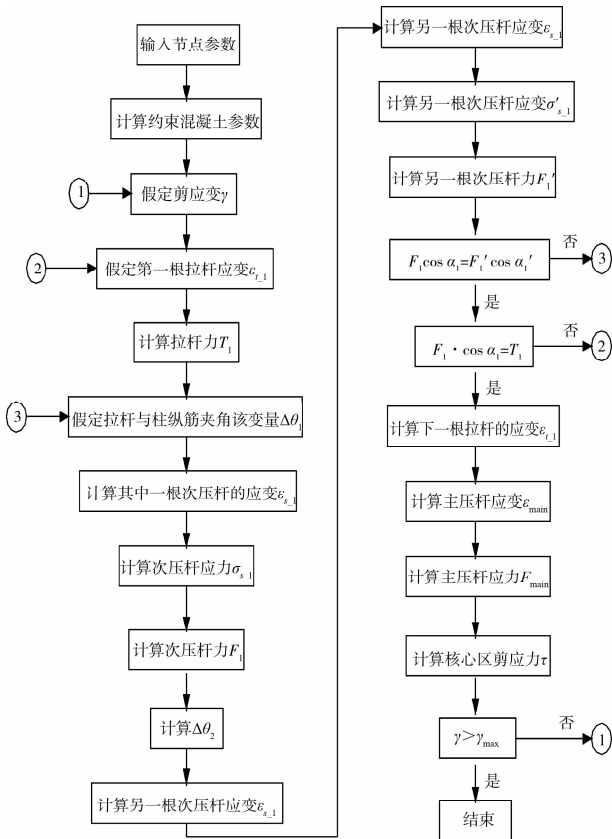


图 6 程序主框图

1.3 拉-压杆模型方法的验证

J-2、J-13、J-15、J-16 试件^[8]的几何尺寸见图 7,配筋数据见表 1。以下分别采用拉-压杆模型、修正斜压场理论、斜压杆模型来确定节点核心区的剪切应力应变关系,在此只取了剪切应力应变关系骨架包络曲线进行比较,比较结果见图 8。

表 1 J-2、J-13、J-15、J-16 试件配筋

试件名称	立方体强度 f_{cu150}	轴压比 $N/f_c b h_c$	剪压比 $V_{jh}/f_c b_j h_j$	箍筋量及实测屈服强度/MPa	配箍特征值 $\rho_{sv} f_{yv}/f_c$
J-2	38.5	0.36	0.161	8 ϕ 8 298	0.056
J-13	34.7	0.15	0.267	6 ϕ 12 370	0.143
J-15	29.6	0.15	0.310	7 ϕ 12 370	0.213
J-16	30.7	0.45	0.310	6 ϕ 12 370	0.180

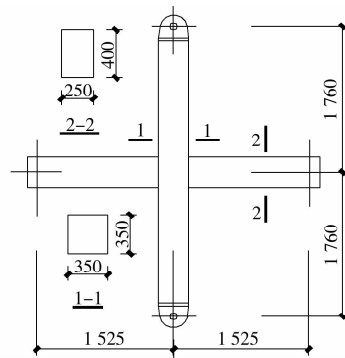


图 7 J 系列试件的几何尺寸

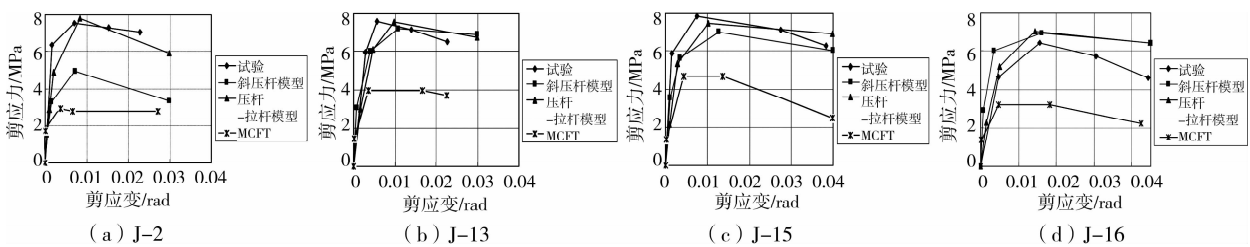


图 8 试件核心区剪切应力-应变骨架包络线

从 J 系列的模拟结果来看,在相同的剪切变形下,MCFT 理论的模拟曲线对应的剪切应力基本上都只有试验值的 1/3~1/2 左右。这是因为采用 MCFT 理论计算节点区剪切应力-剪切应变关系的前提是基于节点核心区受纯剪的假设,即传力模型中的“桁架机构”。而事实上在试验加载的后期,随着梁筋出现粘结退化,“桁架机构”在传递节点剪力中起的作用越来越小,而由“斜压杆机构”传递的剪力则有大幅度增长。

当核心区配箍特征值较小时,如 J-2,斜压杆模型的模拟值误差比较大,最大剪应力的误差达到 34%。配箍适中的 J-13、J-16 误差较小,与试验结果

较接近,随着配箍特征值的增加(J-15),误差又有所增加。

从 4 个试件的模拟结果来看,该文利用拉-压杆模型方法模拟结果与试验结果最接近,这主要是拉-压杆模型充分考虑了节点核心区所有的抗剪机制,包括斜压杆的抗剪作用、箍筋的直接抗剪和箍筋约束机构。同时建立了完整的变形协调方程和受力平衡方程,因而可以在各层次的配箍条件下,模拟出比较准确的剪应力-剪应变关系骨架包络线。

2 结 论

针对修正斜压场理论、斜压杆模型的不足,提出

了确定节点核心区剪切应力-应变关系的拉-压杆模型方法,并推导了该模型的变形协调条件、力平衡方程。在此基础上,采用 Mander 约束混凝土应力应变曲线关系,编制了计算剪切块的剪应力-剪应变关系曲线的计算程序。与试验结果对比表明,该模型充分考虑了节点核心区斜压杆抗剪、箍筋的直接抗剪和箍筋约束作用,具有很好的模拟精度。

参考文献:

- [1] PAULAY T, PARK R, PRIESTLEY M J N. Reinforced concrete beam-column joints under seismic actions[J]. ACI Structural Journal, 1978, 75: 585-593.
- [2] LOWES L N, ALTOONTASH A. Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading [J]. Structure Engineering, 2003, 129 (12): 1686-1697.
- [3] MITRA N. An analytical study of reinforced concrete beam-column joint behavior under seismic loading[D]. Washington: Department of Civil & Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, 2007.
- [4] LOWES L N, MITRA N, ALTOONTASH A. A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames [R]. PEER, 2003/10, Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley, February 2004.
- [5] THEISS A G. Modeling the earthquake response of older reinforced concrete beam-column building joints [D]. Washington: Department of Civil & Environmental Engineering, University of Washington, 2005.
- [6] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. Opensees users manual [R]. PEER University of California, Berkeley. 2004.
- [7] MITRA N, LOWES L N. Evaluation, calibration and verification of a reinforced concrete beam-column joint model[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007, 133: 105-120.
- [8] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified-compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI Structural Journal, 1986, 83 (2): 219-231.
- [9] 傅剑平. 钢筋混凝土框架节点抗震性能与设计方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2002.
- [10] HSU T T C. Unified theory of reinforced concrete[M]. Florida: CRC Press, Inc. 1993.
- [11] 王田友, 苏小卒, 方江生. 拉-压杆模型方法在钢筋混凝土框架节点计算中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 36-40.
WANG TIAN-YOU, SU XIAO-ZU, FANG JIANG-SHENG. Application of stms for calculation of reinforced concrete frame joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(11): 36-40.
- [12] CHUN S C, HONG S G. Strut-and-tie models for headed bar development in C-C-T nodes [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 123-131.
- [13] 皮天祥. 钢筋混凝土剪力墙小跨高比连梁抗震性能试验和设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2008.
- [14] 宋孟超. 钢筋混凝土梁柱节点核心区模型化方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2009.
- [15] ACI 318-08. Building code requirements for structural concret(ACI 318-08) and commentary[S]. Farminton Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2007.
- [16] MANDER JB, FRIESTLEY MJN, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Division, ASCE. 1988, 114 (8): 1804-1826.

(编辑 王秀玲)