

# 用外包钢筋混凝土法加固 RC 柱的非线性有限元分析

张子沐<sup>1</sup>, 薛松涛<sup>1</sup>, 苏三庆<sup>2</sup>

(1. 同济大学工程力学与技术系, 上海 200092; 2. 西安建筑科技大学建工系, 西安 710055)

**摘要:** 当今国内外建筑物加固改造业发展非常迅速, 建筑业重心也正发生着转变。外包钢筋混凝土加固法是一种广泛应用且经济有效的加固方法。本文结合试验手段, 利用非线性有限元方法对用外包钢筋混凝土加固柱正截面承载力进行了分析。分析过程中, 采用混凝土 Chen-Chen 三参数模型和均匀硬化法则; 采用了八节点等参混凝土单元、三节点等参钢筋单元; 引入了双弹簧联结单元模拟钢筋和混凝土之间的粘结滑移; 基于大量试验资料, 认为新旧混凝土之间具有有效粘结, 可以共同工作。编制了加固柱分析有限元程序, 计算结果与试验结果符合较好。并初步探讨了加固时核心柱应力水平、外包混凝土的强度比和厚度比等因素对加固柱承载力的影响, 为加固柱研究提供了参考。

**关键词:** RC 柱; 外包钢筋混凝土法; 加固; 非线性有限元; 应力水平

**中图分类号:** TU375

## Non-linear Finite Element Analysis of RC Columns Strengthened with Enclosed Reinforced Concrete

ZHANG Zi-mu<sup>1</sup>, XUE Song-tao<sup>1</sup>, SU San-qing<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics & Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Department of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** At present, the reinforcement and reconstruction industry is being developed rapidly in the world and the focus of building industry is being transferred gradually. Strengthened with enclosed reinforcement concrete is an economical and efficient method that is being widely used. In this paper, combined with experiment, an analysis was applied on the carrying capacity of strengthened RC columns by non-linear finite element. During the process, the Chen-Chen three-parameter model and the uniform-harden rules were used. Moreover, eight node isoparametric element for concrete and three node isoparametric element for bars were introduced as well as double-spring joint-element was selected to imitateds the bond-slip relation between bars and concrete. Many experimental results show that the new and the formal concrete columns can consider to have sufficient cohesive ability and could be able to work jointly. An analytical program of the strengthened columns is compiled and the calculation results are closed with the test ones. A preliminary discussion on the influences of factors such as initial stress level, strength ratio and thickness ratio is provided.

**Key words:** RC columns; enclosed reinforced concrete; strengthen; non-linear finite element; stress level

随着我国建筑业逐渐向以“旧建筑物维修改造为重点”的转变, 加固研究已成为一个新的热点。外包钢筋混凝土加固法在实际工程中广泛应用且经济有效的加固方法。加固结构与普通结构有着本质的差

收稿日期: 1999-11-17

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目

作者简介: 张子沐(1972-), 男, 北京市人, 博士研究生。

异,属于二次受力结构,存在着应变滞后和应力超前现象。传统的基于试验的研究手段,在经费、时间、人力及试验效果等方面都容易受到限制,而有限元方法的出现和计算机的应用给解决结构受力问题提供了一条可行、经济的途径。本文结合西安建筑科技大学所做的外包钢筋混凝土加固 RC 柱轴心和小偏心受压试验,利用有限元法模拟了加固柱受力过程,并初步探讨了核心柱的应力水平、外包混凝土厚度比及强度比对加固柱承载力的影响,为加深对外包钢筋混凝土加固柱构件的认识提供了参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件构造及材料性能

考虑到设备的尺寸限制,试件按 1/4 模型比设计。加固前试件的设计截面尺寸为 150mm×150mm,混凝土设计强度 C20,加固后试件截面尺寸为 250mm×250mm,加固混凝土设计强度 C25,并掺有适量微膨胀剂,加固前后模型试件的截面及配筋如图 1 所示:

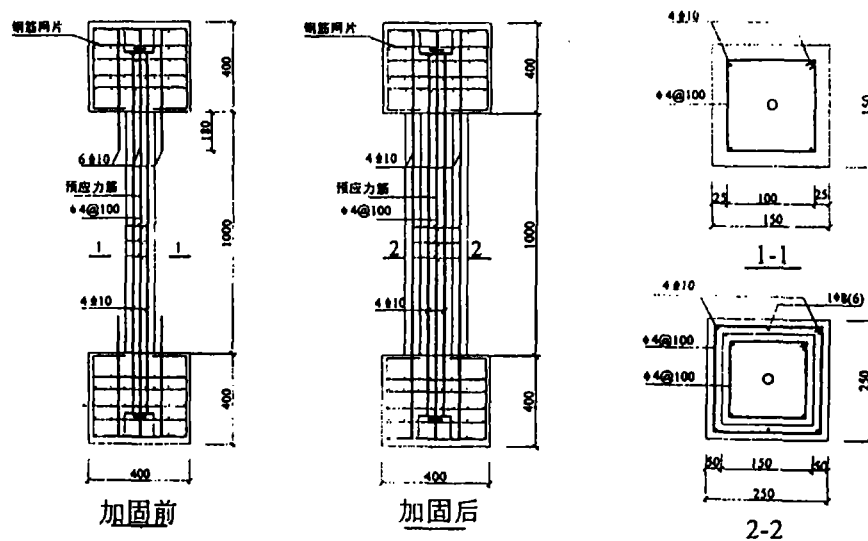


图 1 轴心、小偏心受压加固柱构件配筋制作图

Fig.1 Drawings of steel bars for strengthened columns of axially & minor-eccentrically compressed

试件于 98 年分两批浇筑,木模具自然养护,试件材料的力学性能在本校 30T 万能试验机上进行,实测值见下表 1:

表 1 钢筋和混凝土材料参数

Tab. 1 Material parameters of steel and concrete

组别	钢筋		混凝土抗压强度	
	平均弹性模量 $E_s$ (MPa)	屈服强度 (MPa)	核心混凝土 ( $N/mm^2$ )	外包混凝土 ( $N/mm^2$ )
A 柱	$1.51 \times 10^5$	373	28.89	9.4
B 柱	$1.71 \times 10^5$	373	26.2	24.9

### 1.2 加荷方案及加荷装置

试验时主要考虑核心柱的应力水平指标  $\beta$  对加固柱的承载力影响。核心柱应力水平指标  $\beta = N_1 / [N_0]$ , 其中  $N_1$  为加固时作用在核心构件的纵向力,  $[N_0]$  为核心构件在某一固定偏心距下的极限承载力。因试件制作和加荷问题, 实际应力水平指标  $\beta$  偏小。

试件分为 A、B 两组, 其中 A-1、A-2 构件模拟轴心受压加固柱情况, B-1、B-2、B-3 构件模拟小偏心受压加固柱情况。实验模拟采用两阶段受力的加荷试验方案: 第一阶段采用后张拉无粘结预应力模拟作用

在核心柱上的荷载,达到预定张拉吨位后锚固,支模竖筋浇注外包混凝土并养护直到设计强度;第二阶段模拟加固柱的受力在 3000kN 实验机上进行,采用均速分级加载。试验同步量测预应力钢丝的应变以求预应力的损失值和有效值。上下柱端均采用单向刀铰垫板,模拟静定铰支座的约束条件。

## 2 计算模型

### 2.1 基本假定

- (1) 外包钢筋混凝土加固柱在其平面内承受沿厚度均匀分布的压弯剪作用时,认为是平面应力问题;
- (2) 外包钢筋混凝土加固柱遵循小变形位移假定;
- (3) 混凝土认为是各向异性材料;
- (4) 忽略钢筋与混凝土之间的销栓作用;
- (5) 新旧两部分混凝土界面经适当处理后,认为可靠联结共同工作。

### 2.2 材料本构关系及屈服(破坏)准则

(1) 钢筋的本构关系和屈服准则钢筋采用理想弹塑性应力应变关系,用 Von Mises 屈服准则作为屈服判断,即当钢筋的等效应力  $\sigma_e$  满足:  $|\sigma_e| \geq f_y$  时,钢筋屈服,进入塑性区。 $f_y$  表示钢筋屈服应力。

(2) 混凝土本构关系及破坏准则

单轴应力状态下,单轴受压时,上升段采用 Saenz 建议的公式,当应变超过  $\epsilon_0$  后,曲线简化为水平线。破坏准则为混凝土达到极限压应变  $\epsilon_u$ ;单轴受拉时,取理想弹塑性应力应变曲线。破坏准则为拉应力达到抗拉设计强度  $f_t$ 。

双轴应力状态下,本构关系采用增量型弹塑性硬化 Chen-Chen 模型。Chen-Chen 模型在  $(\sigma_1, \sigma_2)$  空间中的形状如图 2 所示。破坏准则采用 Kupfer 等人在试验基础上得到的结果。

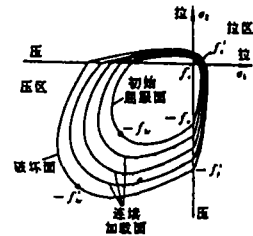


图 2 Chen-Chen 模型在  $(\sigma_1, \sigma_2)$  空间中的形状

Fig. 2 Shapes of Chen-Chen model in  $(\sigma_1, \sigma_2)$  space

## 3 单元类型的选择及刚度矩阵

### 3.1 混凝土单元

为了较好地反映混凝土的受力变形,混凝土单元采用了八节点等参单元。这种单元采用高次位移模式并有一定柔度,适用于不规则的单元边界,可避免四边形四结点等参单元产生寄生剪切的问题,且在给定精度下可以用较少的单元数目来求解实际问题。八节点等参单元的位移模式和坐标变化模式采用同一形函数,最后利用“高斯-勒让得”积分法得出数值形式的刚度矩阵表达式为

$$[K] = t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j [B_j(\xi_i, \eta_j)]^T [D] [B(\xi_i, \eta_j)] |J(\xi_i, \eta_j)| \quad (1)$$

其中  $t$  为单元厚度,  $W_i, W_j$  为积分权因子,  $n$  为数值积分的阶,  $[B]$  为应变矩阵,  $[D]$  为弹性矩阵,  $(\xi_i, \eta_j)$  为高斯点的自然坐标值。

### 3.2 钢筋单元

考虑到与混凝土单元在几何上和精度上配合一致,并保证位移协调,钢筋单元采用三结点一维等参单元,利用虚功原理,可得单元在 XOY 坐标系中的刚度矩阵:

$$[K] = [T]^{-1} [K'] [T] \quad (2)$$

其中,  $[T]$  为转换矩阵,  $[K']$  为局部坐标下刚度矩阵,注意到  $[T]$  为正交矩阵,因而有  $[T]^{-1} = [T]^T$ 。由于钢筋的应力应变关系取理想弹塑性关系,当钢筋单元应力大于或等于屈服强度时,取  $E_s = 0$ ,则单元刚度降为零,即  $[K] = [0]$ 。

### 3.3 联结单元

大量资料表明新旧混凝土界面之间经适当处理后能够粘结良好,协调变形共同受力,故据此不考虑其

间的粘结问题。而钢筋和混凝土之间在高应力下存在不可忽视的滑移量,且加固构件多因承载力不足或已服役多年,故有必要在其间设置模拟粘结滑移的联结单元。采用应用广泛、理论较为成熟的双弹簧联结单元。这种弹簧单元可不计算弹簧中的应力而直接建立结点力与结构位移之间的关系,利用虚功原理可得:

$$\{F\} = [B]^T [D] [B] \{\delta\} = [K] \{\delta\} \quad (3)$$

确定弹簧单元刚度矩阵 $[K]$ 所需用到的“平行于钢筋纵向的刚度系数 $K_H$ ”可由 Houde 和 Mirza<sup>[3][4]</sup>公式得出;而“垂直于钢筋方向的刚度系数 $K_v$ ”的情况较复杂,研究资料很少,但其实际上是一个很大的值,本文假定钢筋在垂直方向的滑移很小,甚至可以忽略不计,故在程序中可取 $K_v$ 为 $1.0 \times 10^{30}$  N/mm。

## 4 单元裂缝及压坏(屈服)后的处理

### 4.1 裂缝模式

采用弥散式裂缝模式,即一旦混凝土单元主拉应力 $\sigma_1 \geq f_t$ ,则认为该单元沿 $\sigma_2$ 方向全部开裂,无数微小裂缝平行连续分布于整个单元内部的。

### 4.2 混凝土开裂、压坏后的处理

假定混凝土开裂后垂直于裂缝方向不再传递拉力,压坏后单元不能承受任何方向的力。这样就要调整单元刚度矩阵和单元应力,并将开裂、压坏单元的超额应力进行释放,作为外荷载转移到其余单元上去。具体做法可参见文献[3][4]。

### 4.3 钢筋单元屈服后的处理

钢筋单元的本构关系为理性弹塑性,当 $\sigma_y \geq f_t$ 时,认为单元屈服,需将超额应力转换为等效结点力,调整后的单元应力 $\sigma_{s,新} = f_y$ ,且 $\sigma_{s,新}$ 在后继荷载增量作用下,保持不变。具体做法可参见文献[3][4]。

### 4.4 联结单元屈服后的处理

考虑到工程计算中事先很难确定内外弹簧的具体位置,为简便计算,均视为内部弹簧处理。内部弹簧在粘结力达到最大值后不会发生破坏,若进一步滑移,粘结力将继续保持原来的峰值。如联结单元在平行于钢筋方向的弹簧应变 $|\epsilon_h| < \epsilon_{h,max} = 0.003$ 时,不需作处理;当 $|\epsilon_h| \geq \epsilon_{h,max}$ 时,其超额应力 $\sigma_{s,ex} = K_h \cdot (\epsilon_h - 0.003)$ ,将超额应力转换为等效结点力具体做法可参见文献[3][4]。

## 5 非线性有限元计算方法和过程

用有限元方法进行结构非线性分析时,归结为求解方程组 $\{R\} = [K] \{\delta\}$ ,式中 $\{R\}$ 为结点荷载列阵, $[K]$ 为总刚度矩阵, $\{\delta\}$ 为结点位移列阵。通过比较,程序计算中选用增量迭代法(混合法)求解,其计算过程如图3所示。混合法吸收了增量法和迭代法的优点,减小了两者的缺点,虽然迭代次数增加了,但计算精度和稳定性比前两者都要好。迭代中取收敛标准为位移收敛标准和残余结点力收敛标准。

计算过程可简要分为第一阶段核心柱加载和第二阶段加固柱加载两部分。两阶段中均采用增量分级加载,在各级荷载增量中采用迭代法求解,直至增量位移或残余结点力满足收敛标准为止,将本级计算中最后调整的刚度矩阵作为第 $i+1$ 级荷载增量的刚度矩阵,进入下一级增量荷载循环。当第一阶段加载达到预计的应力水平后,根据加固后的结构生成新的外包有限元单元,继续进行第二阶段加载,直到总刚度矩阵奇异或位移大幅度增加为止,计算结束。

由于本试验中轴心、小偏心加固柱配筋对称,加载对称或反对称,故根据结构力学原理可进行简化处理,程序中对两者均取了半柱简化,这样大大减少了有限元的计算量和输入工作量。

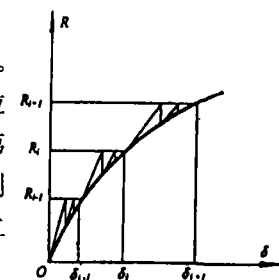


图3 混合法示意图  
Fig.3 Schematic drawing for combined method

## 6 计算结果分析

根据前述原理,本文编制了有限元计算程序 ZZMSCA,对试验中五个加固柱进行了计算。计算机模拟的加固柱构件破坏特征与试验结果一致,均观察到“新加部分应力应变滞后现象”。轴心加固柱核心部分钢筋屈服时,新增部分钢筋仍未屈服,直到外荷接近极限荷载,核心部分混凝土压碎,新加钢筋才达到屈服。小偏心加固柱,外包部分中距轴心力较近一侧的混凝土的应变增量与核心柱内侧混凝土相差不大,但始终滞后于核心柱混凝土。两种情况破坏都是首先从核心柱开始,最后发生“各个击破”,破坏形态均为脆性破坏。计算结果和试验结果列于表 2,二者比较符合,可见本文提供的模型和分析方法具有一定的精度。

表 2 计算结果与实测结果比较  
Tab. 2 Comparison of results between calculation and experiment

试 件		应力水平 $\beta$	屈服荷载 (kN)			极限荷载 (kN)		
组 别	编 号		实测值 $N_y$	计算值 $N'_y$	$\frac{N'_y - N_y}{N_y} \%$	实测值 $N_u$	计算值 $N'_u$	$\frac{N'_u - N_u}{N_u} \%$
A 柱	a-1	0.367	1013.4	1146.5	13.1	1217.2	1359.6	11.7
	a-2	0.260	1095.2	1256.2	14.7	1242.2	1393.7	12.2
B 柱	b-1	0.395	630.3	706.6	12.1	699.3	788.8	12.8
	b-2	0.339	660.4	768.7	16.4	761.4	893.9	17.4
	b-3	0.280	664.2	778.4	17.2	802.5	947.8	18.1

计算结果的误差主要是由于在分析过程中忽略了一些不利因素(如粘结滑移本构模型的不成熟)以及有利因素(如钢筋的暗梢作用等)的影响,容易导致模型的总体刚度增大,故程序计算值一般都高于相应的试验值,这也是可以理解的。

为了探究原柱应力水平指标  $\beta$ 、新旧部分混凝土强度比  $f_c/f_{c0}$  和厚度比  $b/d$  三参数对加固柱承载能力的影响,特选取了轴心受压加固 A 柱进行了分析。三参数对加固柱的影响的计算结果与规范值的对比见如下各表:

由计算结果可见,随着应力水平  $\beta$  的增高,加固柱承载力有随之下降的现象。这是由于在较低应力水平情况下( $\beta \leq 0.3$ ),外包部分的应力应变滞后可以得到一定削弱甚至消除,但在高应力水平情况下( $\beta \geq 0.7$ ),外包部分应力应变滞后始终不能消除,材料的性能未能得到充分发挥。故应力水平  $\beta$  越高,则承载力下降越多。表中,当  $\beta = 0.9$  时计算值小于规范值,而考虑到有限元计算本身即存在单元刚度偏硬计算值偏高的计算误差,这一情况就更值得注意。现行《混凝土结构加固技术规范》中对新加部分的钢筋和混凝土均取用相同的材料利用系数  $\alpha_s = \alpha_c = 0.8$ ,而未考虑到应力水平  $\beta$  影响,可见这是偏于不安全的。在制定新规范时有必要对此加以特别重视。

通过改变外包混凝土与核心混凝土的强度比  $f_c/f_{c0}$  和厚度比  $b/d$ ,均可达到相近的承载力提高水平,但后者对原结构受力体系和外观净空均有所改变,且施工不便,相比之下前者更为方便经济。总之,考虑到充分利用新加部分的强度,更有效地提高加固后结构承载力,对被加固构件事先进行消压卸荷以降低其应力水平  $\beta$  仍是实施加固时应首先选择的必要且最有效的手段。

表 3 原柱应力水平指标  $\beta$  变化对加固柱的影响Tab. 3 Influence of stress level  $\beta$  of formal column

应力水平 $\beta$	极限承载力(kN)			应力水平 $\beta$	极限承载力(kN)		
	计算值 $N_u$	与规范值 $N_g$ 差值	$\frac{N_u - N_g}{N_g} \%$		计算值 $N_u$	与规范值 $N_g$ 差值	$\frac{N_u - N_g}{N_g} \%$
0.1	2021.3	249.1	14.1	0.6	1876.1	103.9	5.8
0.2	1990.2	218.1	12.3	0.7	1836.4	64.2	3.6
0.3	1965.3	193.1	10.9	0.8	1783.3	11.1	0.6
0.4	1945.6	173.4	9.8	0.9	1709.8	-62.4	-3.5
0.5	1913.8	141.6	8.0				

注:  $b/d = 50/150, f_c/f_{c0} = 1.0$ , 规范值  $N_g = 1772.2\text{kN}$ .

表 4 新旧混凝土强度比  $f_c/f_{c0}$  对加固柱的影响Tab. 4 Influence of strength ratio  $f_c/f_{c0}$  between new and formal concrete

混凝土 强度比 $f_c/f_{c0}$	外包混凝土 强度 $f_c$ N/mm <sup>2</sup>	极限承载力(kN)			混凝土 强度比 $f_c/f_{c0}$	外包混凝土 强度 $f_c$ N/mm <sup>2</sup>	极限承载力(kN)		
		规范值 $N_g$	计算值 $N_u$	$\frac{N_u - N_g}{N_g} \%$			规范值 $N_g$	计算值 $N_u$	$\frac{N_u - N_g}{N_g} \%$
1.2	34.668	1956.1	2141.9	9.5	1.7	49.113	2416.0	2669.7	10.5
1.3	37.557	2048.2	2248.9	9.8	1.8	52.002	2508.1	2786.5	11.1
1.4	40.446	2140.1	2356.2	10.1	1.9	54.891	2599.9	2883.3	10.9
1.5	43.335	2232.1	2450.8	9.9	2.0	57.780	2692.0	2996.2	11.3
1.6	46.224	2324.1	2563.5	10.3					

注:  $b/d = 50/150, f_{c0} = 28.89, \beta = 0.4$ .

表 5 新旧混凝土厚度比  $b/d$  对加固柱的影响Tab. 5 Influence of thickness ratio  $b/d$  between new and formal concrete

厚度比 $b/d$	外包混凝土 厚度 $b$ mm	极限承载力(kN)			厚度比 $b/d$	外包混凝土 厚度 $b$ mm	极限承载力(kN)		
		规范值 $N_g$	计算值 $N_u$	$\frac{N_u - N_g}{N_g} \%$			规范值 $N_g$	计算值 $N_u$	$\frac{N_u - N_g}{N_g} \%$
0.2	30	1110.6	1175.0	5.8	0.7	105	2098.6	2354.6	12.2
0.3	45	1266.6	1355.3	7.0	0.8	120	2358.6	2662.8	12.9
0.4	60	1443.4	1576.2	9.2	0.9	135	2639.4	2985.2	13.1
0.5	75	1641.0	1806.7	10.1	1.0	150	2931.0	3320.8	13.3
0.6	90	1859.4	2069.5	11.3					

注: $f_c/f_{c0} = 14.45/28.89, \beta = 0.4$ 。

## 7 结论

有限元分析方法与试验研究手段相结合有着极大的发展前途,本文就是利用在外包钢筋混凝土加固柱方面作的一次有益的尝试并得出如下结论:

(1) 本文中选取的各种材料的本构关系和破坏准则在分析中是可行的,所编制的计算程序 ZZMSCA 较好地模拟加固柱的受力全过程,计算结果与试验结果符合较好。

(2) 加固柱承载力与核心柱应力水平指标  $\beta$  有紧密联系, $\beta$  越大,新旧两部分应力和应变超前或滞后程度越大,导致新加材料的潜力不能充分发挥。《混凝土结构加固技术规范》中取材料强度利用系数  $\alpha_s = \alpha_c = 0.8$  是不甚合理的,也是偏不安全的。

(3) 为充分利用新加部分的材料强度,建议加固前应尽量采取消压缺陷的措施以降低应力水平  $\beta$ ,这是提高加固后结构承载力必要而有效的方法。

### 参考文献:

- [1] 季强,苏三庆. 用增大截面法加固钢筋混凝土柱的试验研究. 西安:西安建筑科技大学,[硕士论文],1999
- [2] 江建华,赵鸿铁. 型钢混凝土 SRC 构件抗剪性能非线性分析. 西安:西安建筑科技大学,[硕士论文],1998
- [3] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析. 西安:陕西科学技术出版社,1994
- [4] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论及应用. 上海:同济大学出版社,1996
- [5] 混凝土结构加固技术规范(CECS25:90),中国计划出版社,1991
- [6] 万墨林,韩继云. 混凝土结构的加固. 北京:中国建筑工业出版社,1998