

# 施工缝模型及在钢筋混凝土柱非线性分析中的应用

李英民<sup>a,b</sup>, 于 婧<sup>a</sup>, 夏洪流<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**提出用零长度截面单元模拟施工缝,并基于纤维模型推导了单元刚度矩阵,给出完整的单元描述。在此基础上,进一步提出用以模拟带缝柱的纤维杆元模型,即由一个非线性梁柱子单元端部附加零长截面子单元组成。通过 OPENSEES 非线性分析软件平台,建模分析了钢筋混凝土带缝柱在拟静力试验下的非线性反应行为,计算结果与试验结果吻合较好,验证了该模型的有效性,为以后在混凝土结构或构件的非线性分析中考虑施工缝的影响提供依据。

**关键词:**施工缝;零长度截面单元;钢筋混凝土带缝柱;纤维杆元模型;非线性分析

**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0001-06

## Construction Joint Modeling and its Application in Nonlinear Analysis of RC Columns

LI Ying-min<sup>a,b</sup>, YU Jing<sup>a</sup>, XIA Hong-liu<sup>a,b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** A zero-length-section element is proposed to model the construction joint. Based on fiber model theory, the qualitative description and the stiffness matrix of zero-length-section element are listed. Furthermore, a fiber line element model is derived which is constructed by a zero-length-section element at the end of a nonlinear beam-column element. Investigation of the static nonlinear responses of a cantilever column with construction joint by finite element procedure OPENSEES is played. It is shown that the model proposed here is reasonable and efficient in the nonlinear numerical analysis of reinforced concrete members with construction joint.

**Key words:** construction joints; zero-length-section element; RC column with construction joint; fiber line element model; nonlinear analysis

施工缝作为混凝土浇筑不连续部位,试验表明其抗拉和抗剪强度均远低于整浇混凝土<sup>[1-3]</sup>。已有震害现象和试验表明<sup>[4]</sup>,由于施工缝留设的位置一般在柱底部或梁柱交界面,属于结构中受力较大且复杂的部位,在地震过程中一旦出现较大的竖向和水平地震分量,极有可能因施工缝的存在而导致控制截面的受力状态与按整浇设计时预想的不同,甚至处于拉剪的不利受力状态而在该部位造成提前破坏,使构件达不到预期的承载力、延性和耗能能力。

课题组曾对整浇柱和在底部设施工缝的带缝柱 2 种类型构件进行拟静力试验<sup>[5]</sup>,结果表明,同等条件下带缝柱与整浇柱的裂缝发展过程和破坏机理明显不同;施工缝对柱抗震性能的影响与轴压比和剪跨比有很大的关系;混凝土接缝面之间的摩擦力和抗剪能力均与轴向荷载的大小有关;施工缝有割裂力在上下混凝土间的传递和利用缝面摩擦力增大耗能能力 2 种效应,具体哪种效应起控制作用主要取决于接缝面法向应力和切向剪力的相对大小。

收稿日期:2011-03-02

基金项目:重庆市科技攻关项目(CSTC,2010AB0007);国家自然科学基金资助项目(90815011)

作者简介:李英民(1968-),男,教授,博士生导师,从事地震工程及结构抗震等研究,(E-mail)liyiming@cqu.edu.cn。

鉴于施工缝的受力特点及存在的问题,应该在现浇钢筋混凝土结构建模时予以体现。但是目前关于施工缝的研究仅限于试验层面,有关施工缝模型的研究则鲜见报道。如果要在混凝土结构整体建模分析中考虑其影响,就必须给出合理的数值模型。

张卫东等人<sup>[6]</sup>运用 ANSYS 软件对 2 榀施工缝位置不同的 2 层 2 跨框架进行计算分析,比较了施工缝所处位置对混凝土结构骨架曲线、刚度退化等抗震性能的影响,分析结果表明施工缝所处位置对结构的抗震性能影响是比较明显的。文中仅提到采用 Combin39 弹簧单元组合模拟施工缝,但是并没有给出具体说明。段云岭等<sup>[7]</sup>提出一种材料非线性的接缝数值模型,用以模拟新旧混凝土及岩体与混凝土的界面。而施工缝处有钢筋穿过截面,与文中的界面明显不同。

为了在混凝土结构或构件的非线性分析中考虑施工缝的影响,该文在总结施工缝处力的传递机理基础上,推导建立了施工缝模型,并在此基础上进一步推导建立了可以用来模拟带缝柱的纤维杆元模型,最后通过 OPENSEES 非线性分析软件平台验证了新建模型的有效性。

## 1 施工缝的模型化

### 1.1 施工缝模型的基本描述

施工缝是不连续浇筑在新旧混凝土交接处形成的界面,严格按照规范要求施工形成的施工缝沿轴向没有长度,是存在于混凝土内部的一个受力相对薄弱面,可以用一个沿轴向没有尺寸的零长度截面

单元来模拟,如图 1(a)所示。

由施工缝处的传力特点可知<sup>[4]</sup>,接缝面处的受力是由混凝土和纵向钢筋 2 部分来承担,混凝土法向不能承受拉应力,只能传递压力和剪力;纵筋在此处连续,参与拉、压、剪应力的传递;箍筋由于其所处的方向与缝平行,一般对施工缝的力学性能影响不大,可忽略不计。

轴力变化对施工缝力学性能的影响至关重要,在建立施工缝模型时必须能准确体现这一点。轴力的影响主要表现在以下几个方面:如果轴向受较大压力,缝面的法向应力足以弥补新旧混凝土粘结差的弱点,则施工缝的不利影响较轻微;如果轴向压力较小或者转为轴向受拉,则施工缝处表现为明显的薄弱部位;施工缝处抗剪机理与整浇部分不同,主要由界面骨料咬合力和纵筋销栓力提供,而界面骨料咬合力又与轴力有关;另外,在循环荷载作用下,施工缝处纵筋滑移较大,而轴力变化对纵筋滑移规律有明显影响。

考虑到纤维模型是根据沿截面离散的各纤维材料的单轴应力应变关系来确定整个截面的力与变形关系,能更为客观、真实地模拟截面的实际受力性能,并且能模拟变化轴力的影响以及轴力与弯矩的耦合作用。在选用研究相对比较成熟的钢筋和混凝土材料本构关系的基础上,纤维模型是目前在精度与效率之间平衡最好的方法。因此,本文提出的施工缝模型以纤维模型为基础,同时考虑剪力和纵筋滑移的影响,示意图见图 1。

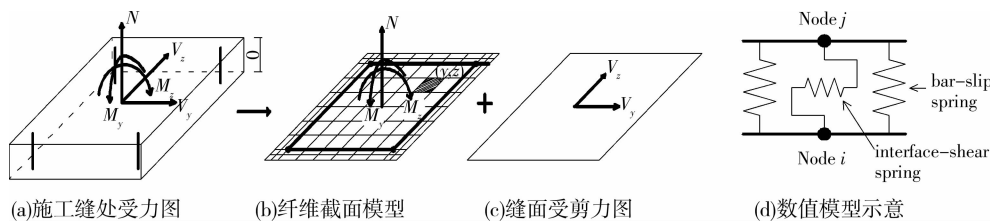


图 1 施工缝模型示意图

### 1.2 施工缝模型的单元刚度矩阵推导

一个界面完整的力学状态能够由力向量、变形向量和刚度矩阵确定。设施工缝面的力向量为  $\{p\} = \{N \ M_y \ M_z \ V_y \ V_z\}^T$ , 变形向量为  $\{d\} = \{\epsilon \ \varphi_y \ \varphi_z \ \gamma_y \ \gamma_z\}^T$ , 暂不考虑扭矩的作用,则有如下关系式成立:

$$\{p\} = [k_s] \{d\} \quad (1)$$

其中  $[k_s]$  为施工缝面刚度矩阵。由上述基本描述可知,缝面的轴力和弯矩是相互耦合的,而剪力与轴力

和弯矩互不耦合。则可以认为刚度矩阵的形式如下:

$$[k_s] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & 0 & 0 \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & 0 & 0 \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (2)$$

只要求出子矩阵  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{S}$ , 即可得到施工缝面完

整的刚度矩阵。子矩阵  $\mathbf{G}$  可以由传统的纤维模型集成方法得到<sup>[8]</sup>;子矩阵  $\mathbf{S}$  为解耦的剪切刚度矩阵,可以由基于截面的剪切滞回曲线<sup>[5]</sup>的斜率计算得到。

设坐标系  $x$  轴沿构件的长度方向,局部  $yz$  坐标系的原点位于截面形心处,如图 1 所示。设纤维截面的变形向量为  $\{d^*\} = \{\varepsilon_0 \quad \varphi_y \quad \varphi_z\}^T$ ,分别对应为轴向应变和绕  $y$ 、 $z$  轴的曲率。根据平截面假定,截面上坐标为  $(y, z)$  处纤维的应变为

$$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 - z \cdot \varphi_y + y \cdot \varphi_z = [\mathbf{H}]\{d^*\} \quad (3)$$

其中  $[\mathbf{H}] = [1 \quad -z \quad y]$ 。则相应的应力为

$$\sigma(y, z) = E(y, z)\varepsilon(y, z) \quad (4)$$

其中  $E(y, z)$  可由纤维材料应力-应变本构曲线确定。沿整个截面积分即可得到截面力

$$\{p^*\} = \int_A [\mathbf{H}]^T E(y, z) [\mathbf{H}] dA * \{d^*\} \quad (5)$$

其中  $\{p^*\} = \{N \quad M_y \quad M_z\}^T$  为纤维截面力向量。则纤维截面刚度矩阵为

$$\mathbf{G} = \int_A [\mathbf{H}]^T E(y, z) [\mathbf{H}] dA = \begin{bmatrix} \int_A E(y, z) dA & -\int_A E(y, z) z dA & \int_A E(y, z) y dA \\ \int_A E(y, z) z dA & -\int_A E(y, z) z^2 dA & \int_A E(y, z) y z dA \\ \int_A E(y, z) y dA & -\int_A E(y, z) y z dA & \int_A E(y, z) y^2 dA \end{bmatrix} \quad (6)$$

子矩阵  $\mathbf{S}$  可以由基于截面的剪切滞回曲线计算得到

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{dV_y(\gamma)}{d\gamma} & 0 \\ 0 & \frac{dV_z(\gamma)}{d\gamma} \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 2 带缝柱模型

### 2.1 带缝柱模型的基本描述

底部设施工缝的带缝柱可以用一个新建的纤维杆元模型来模拟。纤维杆元模型由 2 个子单元组合而成,一个是位于柱根部用来模拟施工缝的零长度截面子单元,另一个是用来模拟构件长度内弯曲效应的非线性梁柱子单元,如图 2 所示。

### 2.2 带缝柱模型的刚度矩阵推导

根据带缝柱模型的特点,可以先确定 2 个子单元的刚度矩阵,然后按照静力凝聚的方法组合形成纤维杆元模型的刚度矩阵。零长度截面子单元的刚度矩阵及单元状态确定方法如前所述。下面针对非线性梁柱子单元,基于柔度法推导它的单元刚度矩阵。

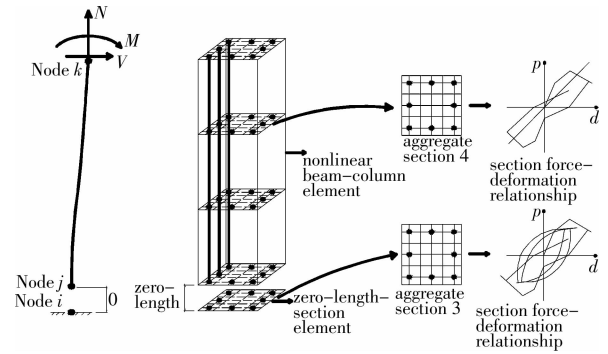


图 2 带缝柱模型示意图

#### 1) 非线性梁柱子单元

沿单元长度上设置多个积分控制截面,在分别确定了各控制截面的截面抗力和截面刚度矩阵以后,按照一定的数值积分方法(如 Gauss-Legendre 积分方法和 Gauss-Lobatto 方法)沿杆长积分即可得到非线性梁柱子单元的抗力和刚度矩阵的。具体步骤如下:

设第  $i$  个积分点处的截面刚度为  $[k(x)]$ ,推导方法与上述零长度截面刚度矩阵  $[k_s]$  相同,但是计算时所选用的材料本构关系有所不同,主要是因为施工缝和整浇部分的截面两者受力特点不同。具体表现在混凝土和钢筋纤维材料本构不同,并且基于截面的剪切本构也不相同。施工缝处混凝土受拉强度为零,而此处积分截面要考虑混凝土受拉强化效应;施工缝处的钢筋考虑滑移的影响,而此处无需考虑;施工缝的剪切滞回曲线是试验中得到的实测数据,而此处积分控制截面由于所属非线性梁柱子单元的主要功能是用来模拟构件长度内弯曲效应的,可以不考虑剪切的影响,或者取剪切本构为理想弹性。

设非线性梁柱子单元的力向量为  $\{p_i\} = \{N \quad M_y \quad M_z \quad V_y \quad V_z\}^T$ ,位移向量为  $\{d_i\} = \{u \quad w_y \quad w_z \quad v_y \quad v_z\}^T$ ,则有如下关系式成立

$$\{d_i\} = [f_i]\{p_i\} \quad (8)$$

其中  $[f_i]$  为非线性梁柱子单元的柔度矩阵。

下面讨论单元力学描述时,把单元消除刚体位移后的状态简化为一根悬臂梁来分析。利用结构力学上常用的截面法,即可得到杆端力和截面力的关系,如图 3 所示。轴向坐标为  $x$  的第  $i$  个截面的力向量与杆端力有下面的关系

$$\{p(x)\} = [b(x)]\{p_i\} \quad (9)$$

其中  $\{p(x)\}$  为截面  $i$  的力向量,  $[b(x)]$  为力的形函数,表达式如下

$$\{p(x)\} = \{N(x) \quad M_y(x) \quad M_z(x) \quad V_y(x) \quad V_z(x)\}^T \quad (10)$$

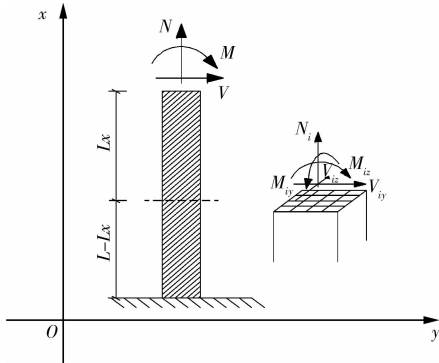


图 3 杆端力和截面力的关系

$$[b(x)] = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & L_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

其中  $L_x$  为截面  $i$  在  $x$  轴上的位置, 见图 3。这里的形函数是建立在小变形的假定上, 在理论上是足够精确的, 与位移形函数不同, 进入强非线性以后仍可严格满足。

根据最小余能原理, 整个杆件的余能的一阶变分与位移量无关, 即

$$\delta \Pi^* = \int_0^L \{d(x)\}^T \delta \{p(x)\} dx - \{d_i\}^T \delta \{p_i\} = \left( \int_0^L \{d(x)\}^T [b(x)] dx - \{d_i\}^T \right) \delta \{p_i\} \quad (12)$$

由最小余能原理有  $\delta \Pi^* = 0$ , 而  $\delta \{p_i\}$  是任意的力增量, 不会恒为零, 则有

$$\{d_i\} = \int_0^L [b(x)]^T \{d(x)\} dx \quad (13)$$

其中  $\{d(x)\}$  为截面  $i$  的变形向量。

设  $[f(x)]$  为截面  $i$  的柔度矩阵,  $[f(x)] = [k(x)]^{-1}$ , 则有

$$\{d(x)\} = [f(x)] \{p(x)\} \quad (14)$$

结合公式(8)、(9)和(13), 可以得到

$$\begin{aligned} \{d_i\} &= [f_i] \times \{p_i\} = \int_0^L [b(x)]^T \{d(x)\} dx \\ &= \int_0^L [b(x)]^T [f(x)] \{p(x)\} dx \\ &= \int_0^L [b(x)]^T [f(x)] [b(x)] \{p_i\} dx \\ &= \int_0^L [b(x)]^T [f(x)] [b(x)] dx * \{p_i\} \end{aligned} \quad (15)$$

首尾两式相减, 得到

$$\left( [f_i] - \int_0^L [b(x)]^T [f(x)] [b(x)] dx \right) \cdot$$

$$\{p_i\} = \{0\} \quad (16)$$

由于力向量  $\{p_i\}$  是任意的, 则

$$[f_i] = \int_0^L [b(x)]^T [f(x)] [b(x)] dx \quad (17)$$

上式求逆即可得非线性梁柱子单元的刚度矩阵。

$$[k_i] = [f_i]^{-1} \quad (18)$$

经分析可知非线性梁柱子单元的柔度矩阵  $[f_i]$  和刚度矩阵  $[k_i]$  均为  $5 \times 5$  阶。

### 2) 纤维杆元模型

新建的纤维杆元模型由端部的零长度截面子单元和上部的非线性梁柱子单元组成, 如图 2 所示。自下往上共有 3 个结点  $i, j$  和  $k$ , 其中结点  $i$  和  $j$  的坐标相同,  $ij$  段组成零长度截面子单元 1,  $jk$  段组成非线性梁柱子单元 2。纤维杆元的刚度矩阵可以由 2 个子单元的刚度矩阵利用矩阵位移法中单刚组装总刚的方法求得<sup>[12]</sup>。

$\{F\}$  和  $\{\delta\}$  分别表示结点力向量和位移向量, 取 2 个子单元为隔离体, 可以建立结点力和结点位移的关系式

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_i^1 \\ \Delta F_j^1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii}^1 & k_{ij}^1 \\ k_{ji}^1 & k_{jj}^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta_i^1 \\ \Delta \delta_j^1 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_j^2 \\ \Delta F_k^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{jj}^2 & k_{jk}^2 \\ k_{kj}^2 & k_{kk}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta_j^2 \\ \Delta \delta_k^2 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

由变形协调条件  $\{\Delta \delta_j^1\} = \{\Delta \delta_j^2\}$ , 可得

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_i^1 \\ \Delta F_k^2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F_i^1 \\ \Delta F_k^2 \\ \{\Delta F_j^1\} + \{\Delta F_j^2\} \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} [k_{ii}^1] & 0 & [k_{ij}^1] \\ 0 & [k_{kk}^2] & [k_{kj}^2] \\ [k_{ji}^1] & [k_{jk}^2] & [k_{jj}^1] + [k_{jj}^2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta_i^1 \\ \Delta \delta_k^2 \\ \Delta \delta_j^1 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

令柔度矩阵  $[f_{jj}] = [[k_{jj}^1] + [k_{jj}^2]]^{-1}$ , 则有

$$\{\Delta \delta_j\} = -[f_{jj}] \cdot \left( [k_{ji}^1] \quad [k_{jk}^2] \right) \cdot \begin{Bmatrix} \Delta \delta_i^1 \\ \Delta \delta_k^2 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

于是有

$$\begin{aligned} &\begin{Bmatrix} \Delta F_i^1 \\ \Delta F_j^2 \end{Bmatrix} = \\ &\left( \begin{bmatrix} [k_{ii}^1] & 0 \\ 0 & [k_{kk}^2] \end{bmatrix} - \begin{Bmatrix} [k_{ij}^1] \\ [k_{jk}^2] \end{Bmatrix} \cdot [f_{jj}] \cdot \begin{bmatrix} [k_{ji}^1] & [k_{jk}^2] \end{bmatrix} \right) \cdot \\ &\begin{Bmatrix} \Delta \delta_i^1 \\ \Delta \delta_k^2 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

由此得纤维杆元模型的刚度矩阵为

$$[K]=\begin{bmatrix} [k_{ii}^1]-[k_{ij}^1][f_{jj}][k_{ji}^1] & -[k_{ij}^1][f_{jj}][k_{jk}^2] \\ -[k_{ij}^2][f_{jj}][k_{ji}^1] & [k_{kk}^2]-[k_{kj}^2][f_{jj}][k_{jk}^2] \end{bmatrix} \quad (24)$$

可见,在求出 2 个子单元的刚度矩阵的基础上,即可通过上式凝聚形成纤维杆元的刚度矩阵。值得说明的是,上述 2 个子单元的刚度矩阵推导时,均是假定在基于消除刚体位移后的状态,2 个子刚度矩阵的阶数均为考虑两端结点自由度时的一半,静力凝聚时要注意到这一点。

### 3 基于 OPENSEES 的非线性数值分析及与拟静力试验的对比

#### 3.1 材料本构关系

上述模型的建立是基于纤维截面模型,因此钢筋和混凝土 2 种纤维材料本构关系的选取对整个数值分析的结果至关重要。混凝土的本构关系选用修正的 Kent-Park 模型<sup>[9-10]</sup>,该模型受压骨架曲线分 3 段进行描述,可以通过修改混凝土受压骨架曲线的峰值应力应变以及软化段斜率来考虑横向箍筋的约束影响,是简化与精确之间一种很好的平衡。

钢筋的应力应变关系采用最初由 Menegotto 和 Pinto 所建议后经 Filippou 等人修正以考虑等向应变硬化影响的本构模型<sup>[11]</sup>。此本构模型由于采用了应变的显函数表达形式因而在计算上非常有效率,同时又保持了与钢筋反复加载试验结果的非常好的一致性,可以反映 Bauschinger 效应。钢筋的滑移本构和定参方法参照文献<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 基于 OPENSEES 的非线性数值分析

应用上述纤维杆元模型,对一根悬臂带缝柱进行非线性数值分析。该带缝柱模型取自课题组已完成拟静力系列试验中的试件 DF-4,施工缝设在柱根部距底梁 3 cm 处,构件截面 300 mm×300 mm,混凝土强度等级 C30,柱顶轴向荷载 216 kN。

数值计算软件选用美国加州大学伯克利分校研发的 OPENSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 程序<sup>[9,13]</sup>。该程序内部源码完全开放并具有面向对象编程的特点,用户可以根据实际情况,自主加入新的单元类型、改进材料的本构关系、实现更高效的迭代方法等。核心代码按功能可分为 3 大模块,即建立有限元模型、进行(非)线性分析和控制输出计算结果。下面按照 OPENSEES 中建模的流程说明如何应用该文新建模型进行非线性分析。

1) 定义结点  $i$ 、 $j$  和  $k$ , 其中结点  $i$  和  $j$  的坐标完全相同(见图 2); 2) 定义 5 种不同类型的材料: 混凝土材料 Concrete01 和 Concrete02, 钢筋材料 Steel02, 钢筋滑移材料 uniaxialMaterial Bond\_SP01, 剪切滞回材料 Hysteretic Material, 理想弹性材料 Uniaxial Elastic Material; 3) 定义 2 种截面 AggregateSection1 和 AggregateSection2; 4) 定义 2 个单元: 结点  $i$  和  $j$  组成单元 ZeroLengthSection Element, 赋予它截面 AggregateSection1。结点  $j$  和  $k$  组成单元 NonLinear Beam-Column Element, 赋予它截面 AggregateSection2; 5) 分析类型定义 Static; 6) 积分类型定义 Displacement Control; 7) 算法定义 Newton-Raphson Algorithm 和 Modified Newton Algorithm; 8) 收敛准则选择 Norm Displacement Increment。

#### 3.3 数值分析与拟静力试验的对比

控制输出结点  $k$  在加载方向上的力与位移, 即可得到滞回曲线。对试件 DF-4 按照提出的方法和传统的不考虑施工缝影响的方法分别建模计算, 数值计算结果与试验结果的对比见下图 4。

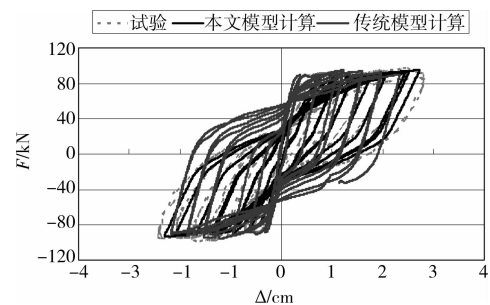


图 4 试件 DF-4 滞回曲线的试验与数值计算对比

按照提出的模型计算的构件正反向(即推和拉)最大荷载分别是 95 kN 和 -96 kN; 按照传统模型(即不考虑施工缝)计算的构件正反向最大荷载分别是 94 kN 和 -95 kN; 而试验值分别是 100 kN 和 -103 kN。可见,就最大荷载而言,2 种模型的计算值很接近,均与试验结果相差不大。

但是,2 种模型在模拟滞回曲线的走势规律上差别较大,其中该文提出的模型与试验结果吻合较好。主要原因在于传统模型忽略施工缝的影响,无法考虑沿施工缝的剪切错动以及缝面开裂后钢筋较大滑移所造起的捏缩现象。滞回环所包括的面积可以用来衡量构件的耗能性能,因此,有理由认为,应用传统模型进行数值计算会高估构件的耗能能力。

## 4 结论

提出用零长度截面单元来模拟施工缝,在深入

分析施工缝受力特点的基础上,基于纤维截面模型推导建立了零长度截面单元的刚度矩阵,并给出完整的单元描述。在此基础上,进一步建立了可以用来模拟带缝柱的纤维杆元模型,即由位于柱根部用来模拟施工缝的零长度截面单元和用来模拟构件长度内弯曲效应的非线性梁柱子单元组合而成,并推导了纤维杆元的刚度矩阵。最后通过 OPENSEES 非线性分析软件平台验证了新建模型的有效性,为以后在混凝土结构或构件的非线性分析中考虑施工缝的影响提供依据。

#### 参考文献:

- [1] WATERS T. A study of the tensile strength of concrete across construction joints [J]. Magazine of Concrete Research, 1954, 6(18):151-153.
- [2] MONKS W L. Treatment of construction joints[J]. Concrete, 1974, 8(2):28-30.
- [3] 宋玉普,魏春明. 混凝土施工缝接缝面劈拉强度试验研究[J]. 混凝土, 2006, 200(6): 22-25.  
SONG YU-PU, WEI CHUN-MING. Experimental research on the splitting tensile strength for joint surface of concrete construction joint[J]. Concrete, 2006(6): 22-25.
- [4] 李英民,于婧,刘建伟. 现浇钢筋混凝土结构中施工缝的模型化研究初探[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(2): 196-200.  
LI YING-MIN, YU JING, LIU JIAN-WEI. Simulative analysis of construction joints on RC structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(2): 196-200.
- [5] 于婧,李英民,夏洪流. 带施工缝钢筋混凝土柱剪切恢复力模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 52-59.  
YU JING, LI YING-MIN, XIA HONG-LIU. Hysteretic shear model for RC columns with construction joint [J]. Journal of Building Structure, 2011, 32(9): 52-59.
- [6] 张卫东,王振波,朱方之. 施工缝位置对框架结构抗震性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2007, 118(4): 46-48.  
ZHANG WEI-DONG, WANG ZHEN-BO, ZHU FANG-ZHI. Influence of position of construction joint on seismic-resistance behavior of reinforced concrete frame [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2007, 118(4): 46-48.
- [7] 段云岭,刘华北. 材料非线性接缝模型[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2000, 40(8): 98-101.  
DUAN YUN-LING, LIU HUA-BEI. Material nonlinear joint model [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(8): 98-101.
- [8] 秦从律,张爱晖. 基于截面纤维模型的弹塑性时程分析方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(7): 1003-1008.  
QIN CONG-LV, ZHANG AI-HUI. Nonlinear time history analysis based on section fiber model [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(7): 1003-1008.
- [9] SILVIA M, FRANK M K, MICHAEL H. Opensees Users Manual [R]. PEER, University of California, Berkeley, 2004.
- [10] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79: 13-27.
- [11] TAUCER F F, SPACONE E, FILIPPOU F C. A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structure [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1991.
- [12] 吕西林,卢文生. 纤维杆元模型在框架结构非线性分析中的应用[J]. 力学季刊, 2006, 27(1): 14-22.  
LV XI-LIN, LU WEN-SHENG. Application of fiber line element model in nonlinear analysis of frame structures [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(1): 14-22.
- [13] 齐虎,孙景江,林淋. OPENSEES 中纤维模型的研究 [J]. 世界地震工程, 2007, 23(4): 48-54.  
QI HU, SUN JING-JIANG, LIN LIN. Research on fiber model of OPENSEES [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 48-54.
- [14] MARINI A, SPACONE E. Analysis of reinforced concrete elements including shear effects [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(5): 645-655.
- [15] ZHAO JIAN, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2): 133-141.