

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201701037

## 基于能量的钢筋混凝土框架节点塑性铰长度的计算方法

冯波,熊峰\*,陈江,陈文

(四川大学建筑与环境学院,四川成都610065)

**摘要:**塑性铰长度是进行结构弹塑性分析时的重要参数,对于分析结果有着重要影响。目前,对塑性铰长度的计算方法主要为等效塑性铰计算方法,该方法主要从变形的角度来计算塑性铰长度,而结构的塑性铰长度应当与耗能有着密切关系,但是这种方法并未考虑耗能的影响。并且,塑性铰长度在整个加载过程中并非为一个常数,应当随着加载水平的变化而变化,而目前用于计算塑性铰长度的经验公式,仅给出了塑性铰的最终长度,并未给出其与结构的加载水平的关系,采用这样的塑性铰长度必定会造成分析精度的降低。因此,作者从能量的角度出发,建立了基于能量的钢筋混凝土梁柱节点塑性铰长度计算方法,并考虑了梁端的加载水平对梁端节点塑性铰长度的影响。通过与数值结果对比可以发现,采用该方法得到的塑性铰长度与梁端塑性发展范围吻合较好。最后,通过对18个一级框架节点的参数分析,建立起了塑性铰长度与梁端转角、配筋率和截面有效高度的关系。

**关键词:**塑性铰长度;耗能;框架节点;有限元

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0077-10

### Calculation Method of the Plastic Hinge Length for the Reinforced Concrete Frame Joint Based on Energy Dissipation

FENG Bo, XIONG Feng\*, CHEN Jiang, CHEN Wen

(College of Architecture & Environment, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Plastic hinge length is an important parameter when the elastic-plastic analysis is carried out on a structure and it has an important influence on the analysis result. The calculation method for the plastic hinge length is mainly the equivalent plastic length method at present and the plastic hinge length is calculated based on the deformation of a structure. While the plastic hinge length has a close relationship with the energy dissipation of a structure, but it is not considered in the equivalent plastic hinge length method. And the plastic hinge length should not be a constant and it should vary with the loading level of a structure. However, the empirical equation used to calculate the plastic hinge length only give the final length of the plastic hinge at present, and do not provide the relationship between the plastic hinge length and the loading level. Thus, it will lead to the reduction of analysis accuracy when this kind of plastic hinge length is adopted. Hence, a plastic hinge length calculation method based on energy dissipation for the reinforced concrete beam-column joint was established, and the influence of the loading level at the beam end on the plastic hinge length was taken into account. Comparison with the analysis result, it was found that the plastic hinge length calculated by the method proposed in this paper agrees well with the range of the plastic development. At last, the relationship between the plastic hinge length and the rotation at the beam end, the reinforcement ratio as well as the effective depth of the cross section was established by means of analysis of the 18 first-grade frame joints.

**Key words:** plastic hinge length; energy dissipation; frame joint; finite element

结构在荷载作用下,截面发生屈服,在弯矩增加较小的情况下,截面曲率迅速增加,如同形成一个“铰”,称之为塑性铰<sup>[1]</sup>。与理想铰不同的是,塑性铰

能够承受一定的弯矩,并且具有一定的长度。其中,塑性铰长度是进行结构弹塑性分析的一个重要参数<sup>[2]</sup>。Inel等<sup>[3]</sup>的研究结果也表明,塑性铰长度对结构变形

收稿日期:2017-12-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701400)

作者简介:冯波(1991—),男,博士。研究方向:装配式框架结构抗震性能, E-mail: bo\_feng91@yahoo.com

\*通信联系人 E-mail: fxiong@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-08-29 23:42:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180829.2342.005.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

能力的计算结果有着不可忽略的影响。

为了能够有效的估计结构的塑性铰长度,很多学者都对塑性铰长度进行了大量的研究。Mattock<sup>[4-5]</sup>以混凝土强度、弯矩梯度、有效截面高度、钢筋屈服强度为参数,对钢筋混凝土梁进行了试验研究,根据试验结果建立起了塑性铰长度的计算公式,随后又对所建立的计算公式进行了简化。Corley<sup>[6]</sup>在Mattock的工作的基础上进一步开展试验研究,根据试验结果发现Mattock最初建立的计算公式中部分参数的影响可以忽略,从而建立起了更加简化的计算公式。Sheikh等<sup>[7]</sup>根据拟静力试验的结果,利用等效塑性铰长度的计算方法,计算得到了钢筋混凝土柱的塑性铰长度,发现钢筋混凝土柱的塑性铰长度基本等于柱的截面高度。同样,李贵乾等<sup>[8]</sup>也采用了等效塑性铰长度的计算方法,但是考虑了剪切变形和钢筋滑移的影响,最终利用拟合的方式建立起了桥墩的塑性铰长度计算公式。王振民<sup>[9]</sup>在考虑了混凝土强度影响的情况下,通过对50组钢筋混凝土柱的试验结果进行拟合建立了塑性铰长度的计算公式,并对所提出的计算公式进行了验证。表1给出了部分学者提出的塑性铰长度计算公式。从表中可以看出,目前大部分的公式都只给出了塑性铰的最终长度。但是,塑性铰的形成与发展应当是一个从无到有,长度由短到长的过程,塑性铰长度应当与结构承受的荷载以及发生的变形有关。采用这样的塑性铰长度进行结构分析势必会对分析结果造成影响,降低结构分析的精度。

表 1 部分现有塑性铰长度计算公式

Tab. 1 Some existing equations for the plastic hinge length

提出者	公式
Mattock <sup>[4]</sup>	$l_p = \frac{d}{2} \left\{ 1 + \left( 1.14 \sqrt{\frac{z}{d}} - 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{q-q'}{q_b} \right) \sqrt{\frac{d}{16.2}} \right] \right\}$
Mattock <sup>[5]</sup>	$l_p = \frac{d}{2} + 0.05z$
Corley <sup>[6]</sup>	$l_p = \frac{d}{2} + 0.2 \frac{z}{\sqrt{d}}$
Sheikh等 <sup>[7]</sup>	$l_p = h$
李贵乾等 <sup>[8]</sup>	$l_p = 5.65\rho_1 L + 0.325D + 0.09 \frac{f_y d_b}{\sqrt{f_c}}$
王振民 <sup>[9]</sup>	$l_p = 0.14L + 0.3 \frac{d_b f_y}{f_c}$
Park等 <sup>[10]</sup>	$l_p = 0.08L + 6d_b$
Bae等 <sup>[11]</sup>	$\frac{l_p}{h} = \left[ 0.3 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + 3 \left( \frac{A_s}{A_g} \right) - 0.1 \right] \frac{L}{h} + 0.25 \geq 0.25$

在地震作用下,结构的塑性变形主要集中在塑性铰长度范围内,意味着结构的耗能也是集中在这个区域内,也就表明塑性铰长度与结构的耗能有着密切的关系。目前,对塑性铰长度的计算主要采用的

是等效塑性铰长度计算方法<sup>[7-8,12]</sup>。这种计算方法主要是从变形的角度来计算塑性铰长度,认为结构的塑性变形全部集中在塑性铰区域内,并且塑性铰内的塑性曲率相等,并未考虑结构耗能的影响,这种方法难以考虑地震作用下加载历程的影响以及损伤累积。

作者从能量的角度出发,提出了基于能量的塑性铰长度计算方法。这种方法能够计算出塑性铰长度随加载水平的发展过程。为验证方法的合理性,对梁柱节点进行了有限元分析,并与试验结果进行比较,建立了梁柱节点的有限元模型。通过与节点塑性发展范围比较可以发现,采用基于能量的计算方法得到的塑性铰长度与梁端塑性发展范围吻合较好。最后,通过对18个梁柱节点进行有限元分析,利用拟合的方式建立起了塑性铰长度与有效截面高度、配筋率和梁端转角的关系,为钢筋混凝土框架结构进行更加精确的弹塑性分析提供了依据。

## 1 塑性铰长度计算方法

目前,对于塑性铰长度的计算主要采用的是等效塑性铰长度计算方法。这种计算方法主要基于3个假定<sup>[11-12]</sup>:

- 1) 结构的塑性变形均发生在塑性铰范围内;
- 2) 塑性铰内截面塑性曲率相等;
- 3) 不考虑结构的剪切变形和钢筋滑移的影响,仅考虑弯曲变形。基于以上3个假设,可以建立起加载端位移与塑性铰长度的关系,如式(1)所示:

$$\Delta_p = \Delta_{\max} - \Delta_e = (\varphi_u - \varphi_e) L_p \left( L - \frac{1}{2} L_p \right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta_p$ ,  $\Delta_{\max}$  和  $\Delta_e$  分别为加载端的塑性位移, 极限位移和弹性位移;  $\varphi_u$  和  $\varphi_e$  分别为截面的极限曲率和弹性曲率; 这5个参数可以根据试验所得的骨架曲线得到<sup>[12]</sup>。  $L_p$  为塑性铰长度;  $L$  为混凝土构件的长度。

从式(1)可以看出采用等效塑性铰长度计算方法主要是从变形角度来计算塑性铰长度,而塑性铰的长度应当与结构的耗能有着密切的关系,采用上述方法计算不能反映塑性铰长度与耗能间的联系,且难以考虑加载历程以及损伤累积的作用。因此作者提出了基于能量的塑性铰长度计算方法,采取的计算方法同样也是基于3个假定:

- 1) 结构的能量耗散只发生在塑性铰长度内;
- 2) 塑性铰范围内各个截面耗散的能量相等;
- 3) 不考虑结构的剪切变形和钢筋滑移的影响,仅考虑弯曲变形。通过与等效塑性铰计算方法比较可以发现,两种方法的假定3)完全相同。虽然两种方法的假定1)表述上略有不同,但是由于只有结构的

塑性变形才能耗散能量,因此两种方法的假定1)是等价的。对于假定2),两种方法在大剪跨比情况下差异不大,因为截面的耗能情况主要与弯矩和塑性曲率有关,在大剪跨比情况下塑性铰的长度相对于梁或柱的跨度较短,因此在塑性铰内弯矩的变化不大,如果塑性铰内的塑性曲率相等,则在塑性铰内的耗能也就基本相当。通过比较可以认为,采用的3个假定是合理的。

根据假定1),结构的耗能只发生在塑性铰范围内,故可以建立等式:

$$E = \int F(\Delta)d\Delta = E_{ip} \quad (2)$$

式中: $E$ 为混凝土构件的耗能,其值等于单个滞回环的包络面积; $E_{ip}$ 为塑性铰内耗散的能量; $F$ 分配到柱端的层间剪力; $\Delta$ 为层间位移。根据假定3),只考虑混凝土构件的弯曲变形,塑性铰内耗散的能量为:

$$E_{ip} = \iint M(\varphi, l)d\varphi dl \quad (3)$$

式中: $M$ 为塑性铰内截面弯矩; $l$ 的积分范围为整个塑性铰长度; $\varphi$ 为截面曲率,可以根据平截面假定,利用混凝土的应变计算得到,如下所示:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h} \quad (4)$$

式中, $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 分别为截面上下表面混凝土纤维的应变, $h$ 为截面高度。

将式(3)带入式(2)可得:

$$\int F(\Delta)d\Delta = \iint M(\varphi, l)d\varphi dl \quad (5)$$

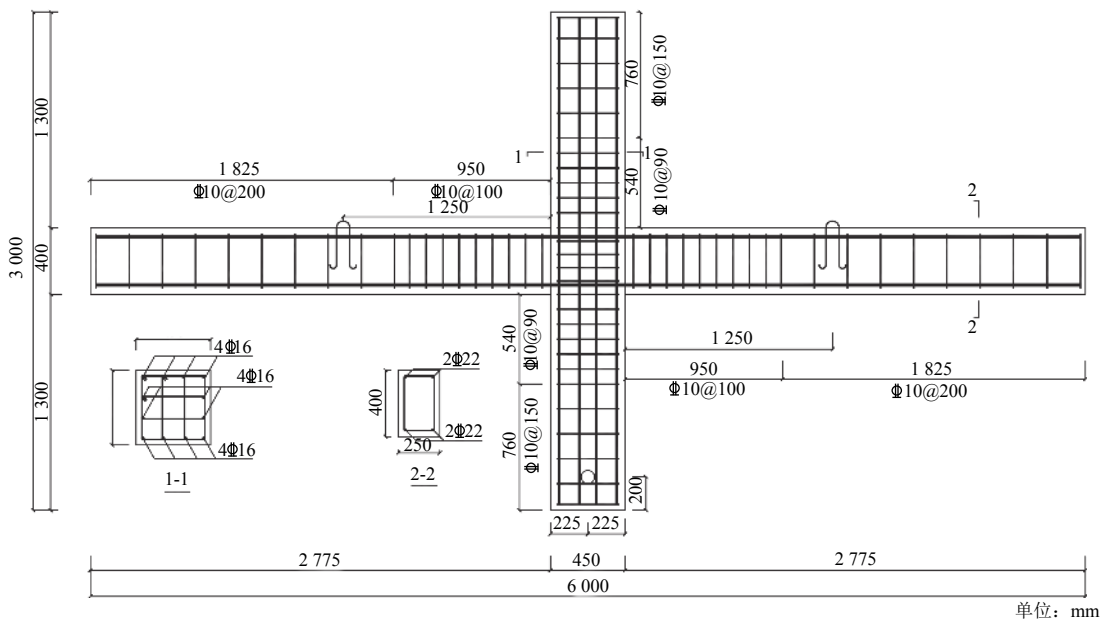


图1 试件基本信息

Fig. 1 Basic information of the specimen

根据假定2),塑性铰内各个截面耗能相同,因此可采用梁端或者柱端截面耗能代表塑性铰内各个截面的耗能情况,故式(5)可以变形为:

$$\int F(\Delta)d\Delta = l_p \int \overline{M}(\overline{\varphi})d\overline{\varphi} \quad (6)$$

式中, $l_p$ 为塑性铰长度, $\overline{M}$ 和 $\overline{\varphi}$ 为梁端的弯矩和曲率。最终塑性铰长度可以表示为:

$$l_p = \frac{\int F(\Delta)d\Delta}{\int \overline{M}(\overline{\varphi})d\overline{\varphi}} \quad (7)$$

当混凝土构件承受低周往复荷载时,通过计算在不同的加载水平下滞回环的包络面积以及梁端或者柱端截面的耗能,利用式(7),从而得到混凝土构件在不同加载水平下的塑性铰长度,了解塑性铰长度的发展过程。为验证该计算模型的合理性,对梁柱节点分别进行了试验研究和数值研究。

## 2 试验概况

对足尺框架结构内节点进行了低周往复试验。为了反映一般情况,试件中梁的配筋率采用经济配筋率,其配筋率为0.76%,并按照《建筑抗震设计规范》(GB5011—2010)<sup>[13]</sup>中一级框架的要求进行了强柱弱梁设计。试件的钢筋等级为HRB400,混凝土的强度等级为C30。试件的基本信息如图1所示。节点的设计轴压比为0.65,试验轴压比为0.263,对应的试验轴力为1 070 kN。节点从结构的梁和柱的反弯点处截开,为了能够模拟这样的边界条件,因此在试验时柱端采用铰接的方式与基础连接。

图2为试件的加载装置。加载时,先在柱端施加轴力到预定值,并在整个加载过程中保持恒定。此后,在两侧梁的端部施加反对称的荷载或者位移,用以模拟节点在地震作用下的横向荷载。在试件屈服前,施加在梁端的荷载采用荷载控制,屈服后改用位移控制。荷载控制时,梁端荷载只加载1次,位移控制时每级荷载循环1次。



图 2 加载装置

Fig. 2 View of the set up

### 3 有限元模型的建立与验证

#### 3.1 模型建立

采用有限元分析软件ABAQUS对梁柱节点进行分析,并采用分离式的建模方式进行建模。梁和柱都采用3维8节点缩减积分实体单元C3D8R单元进行模拟,钢筋采用3维两节点桁架单元T3D2进行模拟。钢筋采用ABAQUS中提供的Embedded技术将钢筋与混凝土的自由度耦合,通过这种方式能够有效保证钢筋与混凝土的变形协调,但是这种建模方式难以模拟钢筋与混凝土间的滑移。为了简化分析模型,基础在建模过程中并未考虑。柱上下两端的边界条件与试验相同,均为铰接。加载制度与试验完全相同,首先在柱端施加轴力,并保持恒定,之后在两侧梁的端部施加低周往复荷载。数值模型如图3所示。

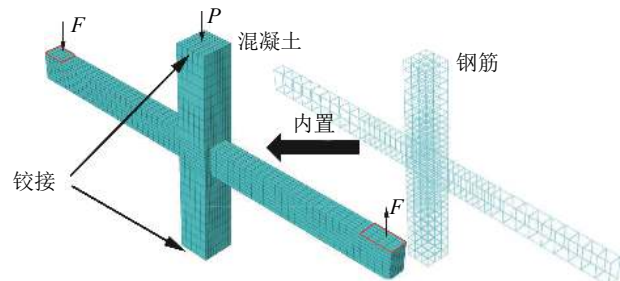


图 3 数值模型

Fig. 3 FE model

#### 3.2 材料本构

混凝土的本构模型采用ABAQUS提供的混凝土损伤塑性模型(CDP模型),这种模型常用与模拟混凝土在往复荷载作用下的力学行为。CDP模型能够模拟混凝土在往复荷载作用下的损伤、裂缝闭合和刚度恢复,同时还考虑混凝土材料拉压性能的差异,并利用损伤变量来量化材料的损伤程度。损伤变量的定义根据能量等效假设,认为损伤材料的弹性余能与虚拟无损材料的弹性余能相等<sup>[14]</sup>,则材料的损伤变量可按下式计算:

$$D_d = E_0(1 - D_k)^2, k = t, c \quad (8)$$

式中,  $E_d$ 和 $E_0$ 分别为损伤材料和无损材料的弹性模量,  $D_t$ 和 $D_c$ 分别为材料在单轴受拉和单轴受压时的损伤变量。混凝土在单轴受拉和单轴受压的应力应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[15]</sup>中给出的应力应变关系,结合式(1),混凝土的损伤变量最终表示为:

$$D_k = 1 - (1 - d_k)^{1/2}, k = t, c \quad (9)$$

式中,  $d_c$ 和 $d_t$ 为损伤演化参数,具体算法参照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[15]</sup>。

为了能够更好的模拟钢筋在往复荷载作用下的力学行为,钢筋的本构模型采用清华大学编写的pq-fiber程序中的Usteel02模型,该模型的再加载刚度按照Clough本构退化的随动硬化单轴本构模型。模型材料参数如表2所示,其中钢筋与混凝土的强度为实测值,其余相关参数按照规范规定选取。

表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameter

材料种类	强度/MPa	弹性模量/MPa
混凝土(C30)	17.9	28 606
C22钢筋	468.4	200 000
C16钢筋	466.8	200 000
C10钢筋	403.8	200 000

#### 3.3 模型验证

混凝土为脆性材料,混凝土的开裂主要是由于拉应变超过了混凝土的极限拉应变。因此,ABAQUS中的等效塑性拉应变(PEEQT)常被用于描述混凝土的开裂情况。图4为分析模型的等效塑性拉应变与试验得到的裂缝开展情况的比较。从图4中可以看出,分析模型的破坏状态与试件的破坏状态相同,均为梁端的弯曲破坏,塑性铰都形成于梁端。试件的主裂缝位置与分析模型的最大等效塑性拉应变的位置十分接近,且裂缝的开展范围与等效塑性拉应变的范围也比较接近。因此,可以认为分析模型能够比较准确的预测试件的裂缝开展情况和破坏模式。

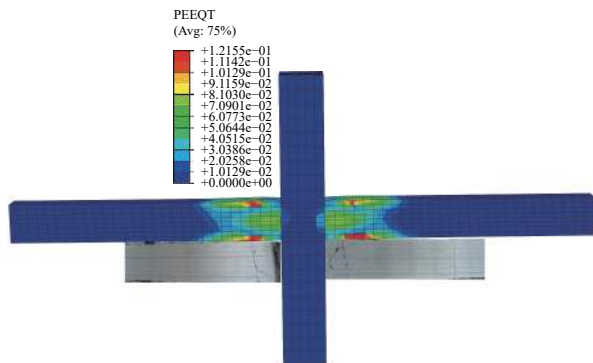


图4 等效塑性拉应变云图

Fig. 4 Contours of the PEEQT

图5列出了计算得到的滞回曲线和试验得到的滞回曲线。通过比较可以看出,在荷载控制阶段,计算得到的滞回曲线刚度更大,这可能是因为试验的前期试验装置还存在着部分间隙,而在数值模型中边界条件为理想边界,难以模拟出上述情况,最终表现为数值模型刚度偏大。当进入位移控制阶段后,随着加载位移的增大,试验装置中的间隙逐渐闭合,更加接近理想情况,计算得到的滞回曲线与试验得到的滞回曲线吻合较好。这表明作者采用的数值模型能够良好的反映框架节点在低周往复作用下的响应。

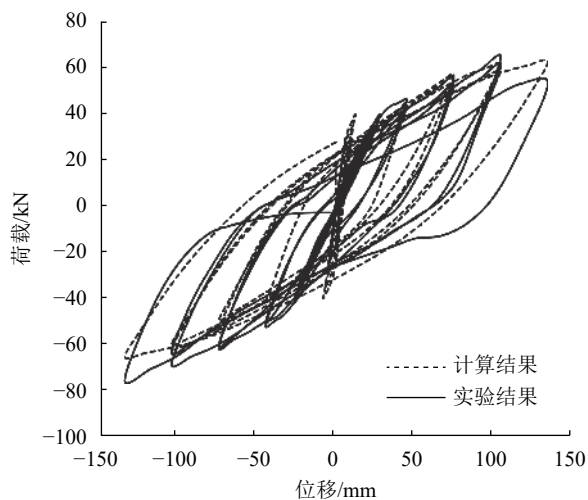


图5 滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of the hysteretic curves

表3列出了计算得到的承载能力和试验得到的承载能力。从表中可以看出,计算得到的承载能力与试验结果非常接近,计算结果略小,误差只有5.3%,可见所采用的数值模型能够良好的预测梁柱节点的承载能力。

综上所述,采用所建立的数值模型计算得到的裂缝开展情况,破坏模式,滞回曲线和承载能力均与

表3 承载能力

Tab. 3 Bearing capacity

来源	正向承载力/ kN	负向承载力/ kN	正负承载力 均值/kN	误差/%
试验	65.0	75.6	70.3	—
计算	66.0	67.2	66.6	-5.3

试验所得结果接近,因此所建立的数值模型能够有效的模拟梁柱节点在低周往复荷载作用下的力学行为,可以用于参数分析。

## 4 塑性铰长度计算结果

本节依据数值分析结果,利用本文提出的基于能量的塑性铰长度计算方法,计算得到了梁柱节点在不同加载水平下的塑性铰长度,如图6所示。图6中梁柱节点的加载水平采用梁端转角进行衡量,其值等于梁端位移与梁跨度的比值。为了验证所提出的塑性铰长度计算方法的合理性,图7给出了梁柱节点在不同的加载水平下的等效塑性应变云图(PEEQ),图中用于模拟梁混凝土的单元沿梁轴线方向的尺寸为100 mm。

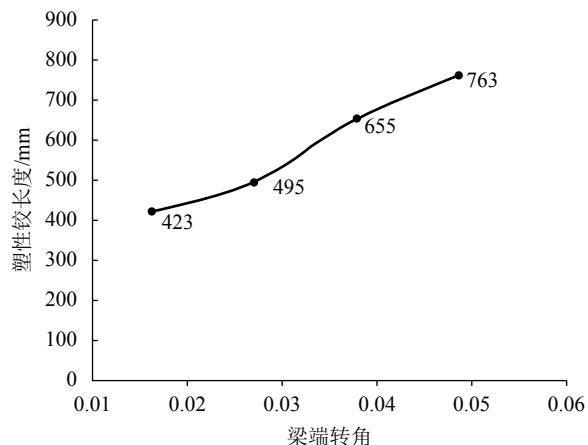


图6 塑性铰长度随梁端转角的变化

Fig. 6 Change of the plastic hinge length with the ratio at the beam end

从图7中可以看出,数值模型的塑性铰形成于梁端,满足了强柱弱梁的设计理念,通过比较采用基于能量的塑性铰长度计算方法得到的塑性铰长度与梁端塑性发展范围,发现二者吻合较好。由此可见,提出的塑性铰长度计算方法得到的塑性铰长度能够比较准确地反映梁柱节点的塑性发展,具有良好的适用性。

从图6中可以看出,随着梁端转角的增加,塑性铰长度几乎呈线性增加,当梁端转角达到4.9%时,塑性铰长度增加了80%,由此可见,考虑加载水平对于塑性铰长度的影响很有必要。

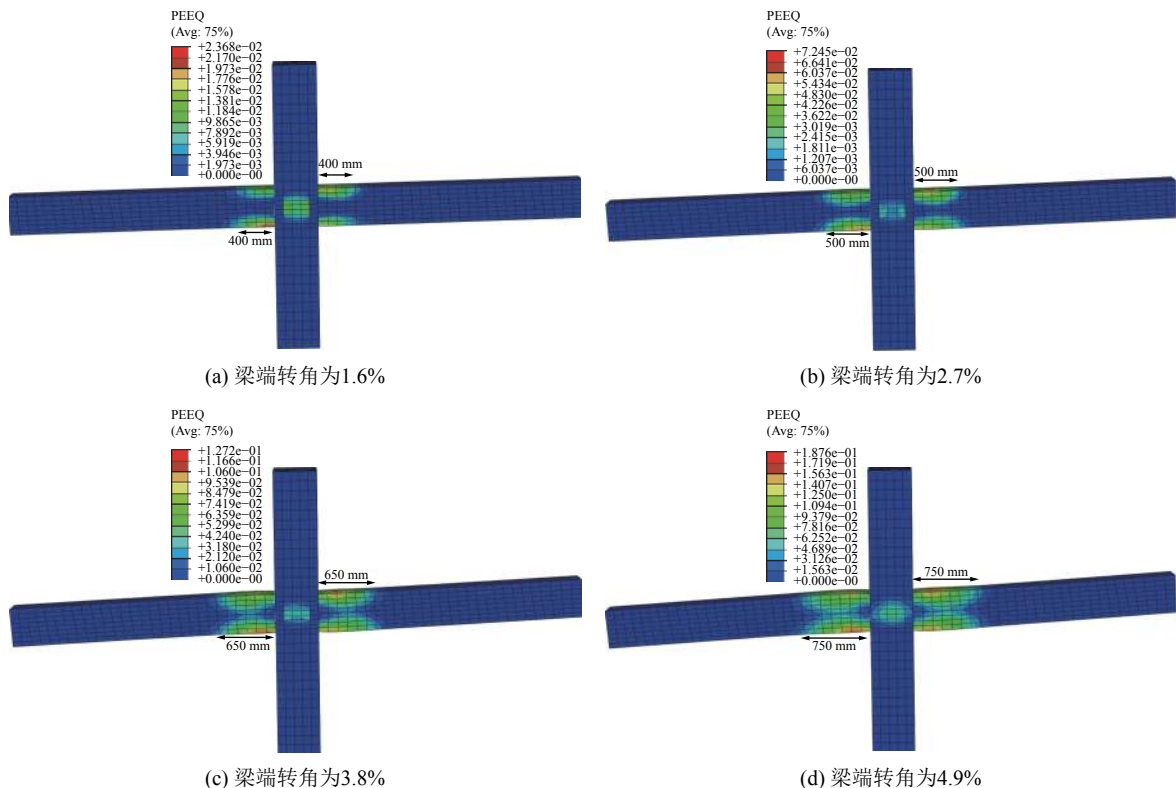


图 7 不同加载水平下的等效塑性应变云图

Fig. 7 Contours of the PEEQ under different loading level

## 5 参数分析

为了进一步研究梁端塑性铰长度的变化规律,本节对18个梁柱节点进行了分析,并利用基于能量的塑性铰长度计算方法,计算了各个节点在不同的加载水平下的塑性铰长度。本节选取的分析参数为梁的配筋率和截面高度。为了能够反映一般情况,参与分析的各个梁柱节点的梁配筋率同样选择为经济配筋率,配筋率范围为0.63%到1.23%,梁的截面高度范围为400到600 mm。为了保证每个梁柱节点的塑性铰首先在梁端形成,满足强柱弱梁的设计理念,对参与分析的18个节点均按照一级框架的要求进行了强柱弱梁设计,框架柱端弯矩增大系数为1.7<sup>[13]</sup>,各个节点的基本信息如表4所示。

### 5.1 单参数对塑性铰长度的影响

图8~10分别给出了梁的截面高度、配筋率以及加载水平对塑性铰长度的影响,图例中的 $r$ 代表配筋率, $\theta$ 代表梁端转角, $h$ 代表梁的截面高度。从图8中可以看出,节点的塑性铰长度与梁的截面高度基本上呈线性关系,在加载水平较低时,截面高度的影响较小,塑性铰长度随着截面高度增长的幅度并不是很大;当梁端转角达到2.7%后,塑性铰长度增

长幅度提高且增长率基本相同,在图中表现为趋势线基本平行。当截面高度从400 mm增加到600 mm时,截面高度增加了50%,塑性铰长度则平均增加了60%,表明截面高度对塑性铰长度有着显著的影响。

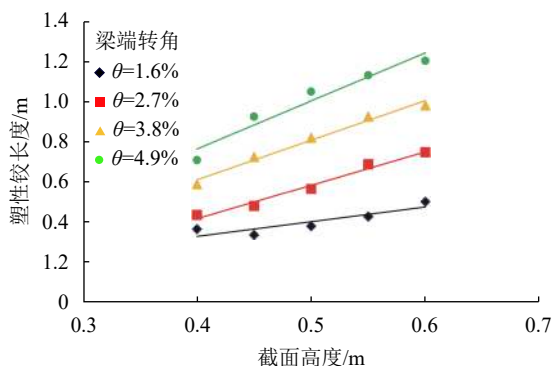
图9给出了塑性铰长度与梁配筋率的关系。从图中可以发现,塑性铰长度与梁配筋率同样表现出较明显的线性关系,塑性铰长度随着配筋率的增大而增大。但是,随着加载水平的提高,趋势线的斜率逐渐降低,表明配筋率的影响也在逐渐的降低。当配筋率从0.63%增加到1.23%时,配筋率增长了约一倍,塑性铰长度平均增加了约40%。

从图10可以看出,塑性铰长度与梁端转角表现出明显的线性相关,塑性铰长度随着梁端转角的增大而增大。从图中还可以看出,在相同的配筋率的情况下,趋势线基本平行,表明其塑性铰长度随着梁端转角的增长速率基本相当。当梁端转角从1.6%增长到4.9%时,梁端转角增加了两倍,塑性铰长度大约平均增长了80%,表明在建立塑性铰长度计算模型时,加载水平这个因素应当加以考虑。通过比较可以发现,截面高度对塑性铰长度的影响最明显,而梁端转角和梁配筋率对塑性铰长度的影响则基本相当。

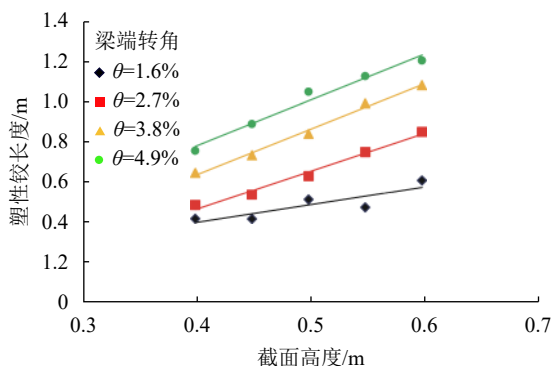
表 4 梁柱节点基本信息

Tab. 4 The Basic information of the beam-column joint

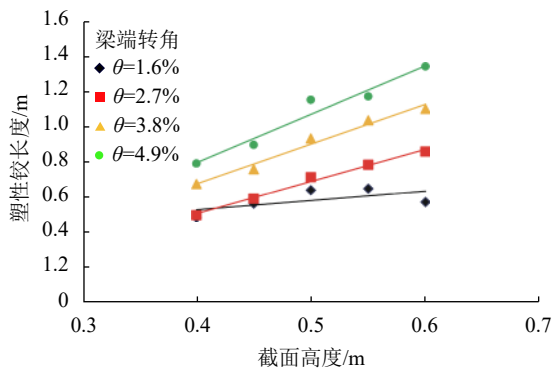
编号	梁配筋/mm <sup>2</sup>	梁配筋率/%	柱配筋/mm <sup>2</sup>	混凝土等级	截面尺寸/(mm×mm)
<i>h</i> 400- <i>r</i> 0.63	630	0.63	804	C30	250×400
<i>h</i> 450- <i>r</i> 0.63	709	0.63	804	C30	250×450
<i>h</i> 500- <i>r</i> 0.63	788	0.63	804	C30	250×500
<i>h</i> 550- <i>r</i> 0.63	866	0.63	936	C30	250×550
<i>h</i> 600- <i>r</i> 0.63	945	0.63	1 322	C30	250×600
<i>h</i> 400- <i>r</i> 0.76	760	0.76	804	C30	250×400
<i>h</i> 450- <i>r</i> 0.76	855	0.76	804	C30	250×450
<i>h</i> 500- <i>r</i> 0.76	960	0.76	916	C30	250×500
<i>h</i> 550- <i>r</i> 0.76	1 045	0.76	1 319	C30	250×550
<i>h</i> 600- <i>r</i> 0.76	1 140	0.76	1 789	C30	250×600
<i>h</i> 400- <i>r</i> 0.98	980	0.98	804	C30	250×400
<i>h</i> 450- <i>r</i> 0.98	1 103	0.98	938	C30	250×450
<i>h</i> 500- <i>r</i> 0.98	1 225	0.98	1 427	C30	250×500
<i>h</i> 550- <i>r</i> 0.98	1 348	0.98	1 974	C30	250×550
<i>h</i> 600- <i>r</i> 0.98	1 470	0.98	2 393	C30	250×600
<i>h</i> 400- <i>r</i> 1.23	1 230	1.23	868	C30	250×400
<i>h</i> 450- <i>r</i> 1.23	1 384	1.23	1 418	C30	250×450
<i>h</i> 500- <i>r</i> 1.23	1 538	1.23	2 030	C30	250×500



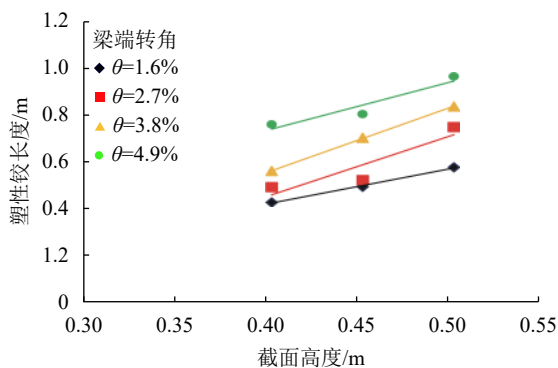
(a) 配筋率  $r$  为 0.63%



(b) 配筋率  $r$  为 0.76%



(c) 配筋率  $r$  为 0.98%



(d) 配筋率  $r$  为 1.23%

图 8 截面高度对塑性铰长度的影响

Fig. 8 Influence of the section height on the plastic hinge length

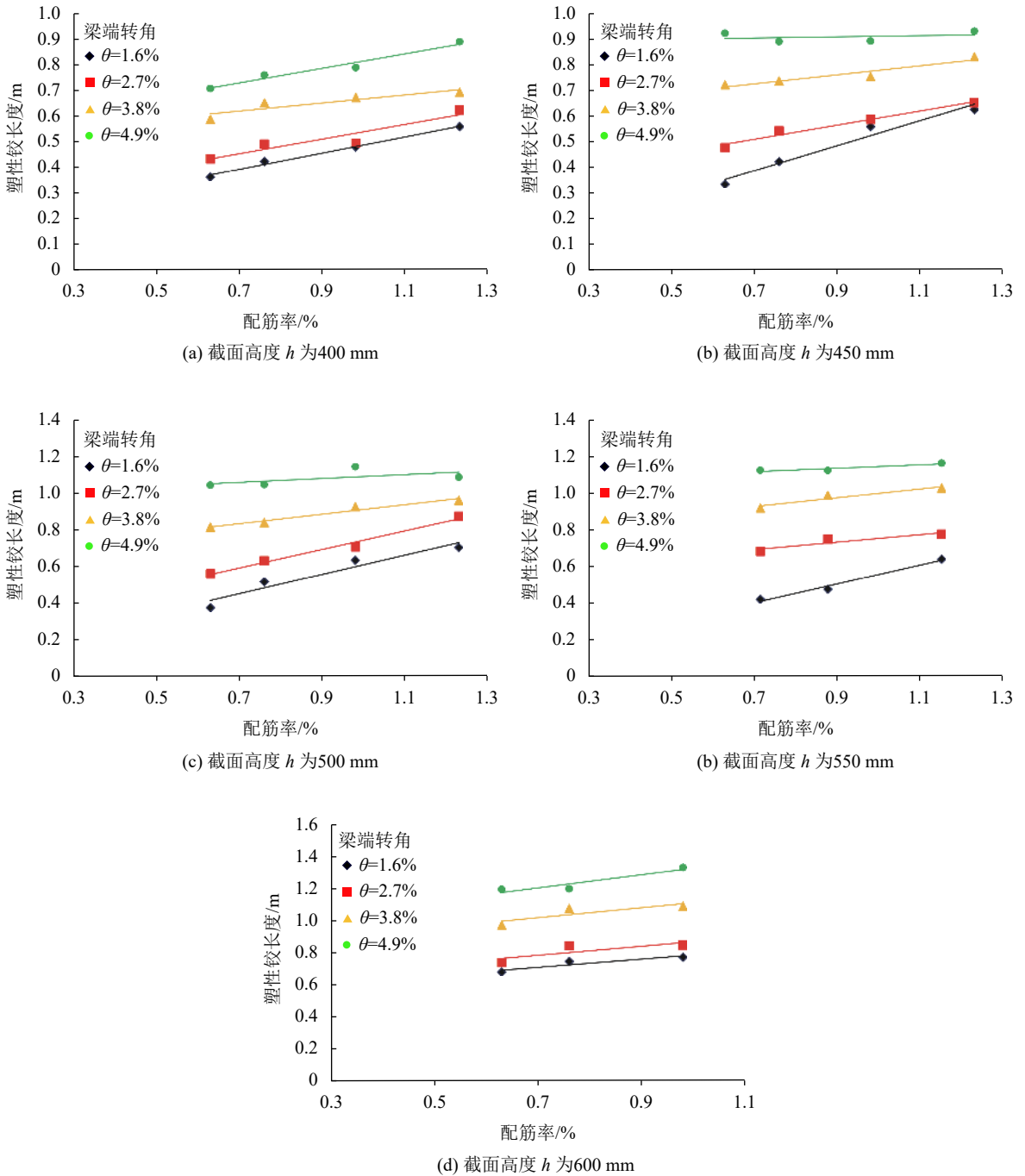


图 9 配筋率对塑性铰长度的影响

Fig. 9 Influence of the reinforcement ratio on the plastic hinge length

## 5.2 塑性铰长度计算模型

图 11 展示了计算得到的塑性铰长度与梁端转角和配筋率乘积的关系, 图中的塑性铰长度通过与梁有效截面高度作商的方法进行了无量纲化处理。可以看出, 经过无量纲化处理的塑性铰长度随着梁端转角和配筋率的乘积的增加而增加, 且二者呈现出比较明显的幂函数关系, 因此采用幂函数对二者进行拟合, 通过拟合得到了无量纲化处理的塑性铰长度与梁端转角、梁配筋率的关系, 如式 (10) 所

示, 并且  $R^2$  达到了 0.872 7, 表明有着较好的相关性。

$$\frac{l_p}{h_0} = 13.349(\theta\rho)^{0.5722} \quad (10)$$

式中,  $l_p$  为塑性铰长度,  $h_0$  为梁截面的有效高度,  $\theta$  为梁端转角,  $\rho$  为梁配筋率。但需要说明的是, 由于所计算的模型有限, 所有节点均按照一级框架进行设计, 且梁的配筋率范围为 0.63% 到 1.23%, 因此式 (9) 仅适用于梁配筋率在 0.63% 到 1.23% 之间的一级框架节点, 且塑性铰首先出现在梁端。



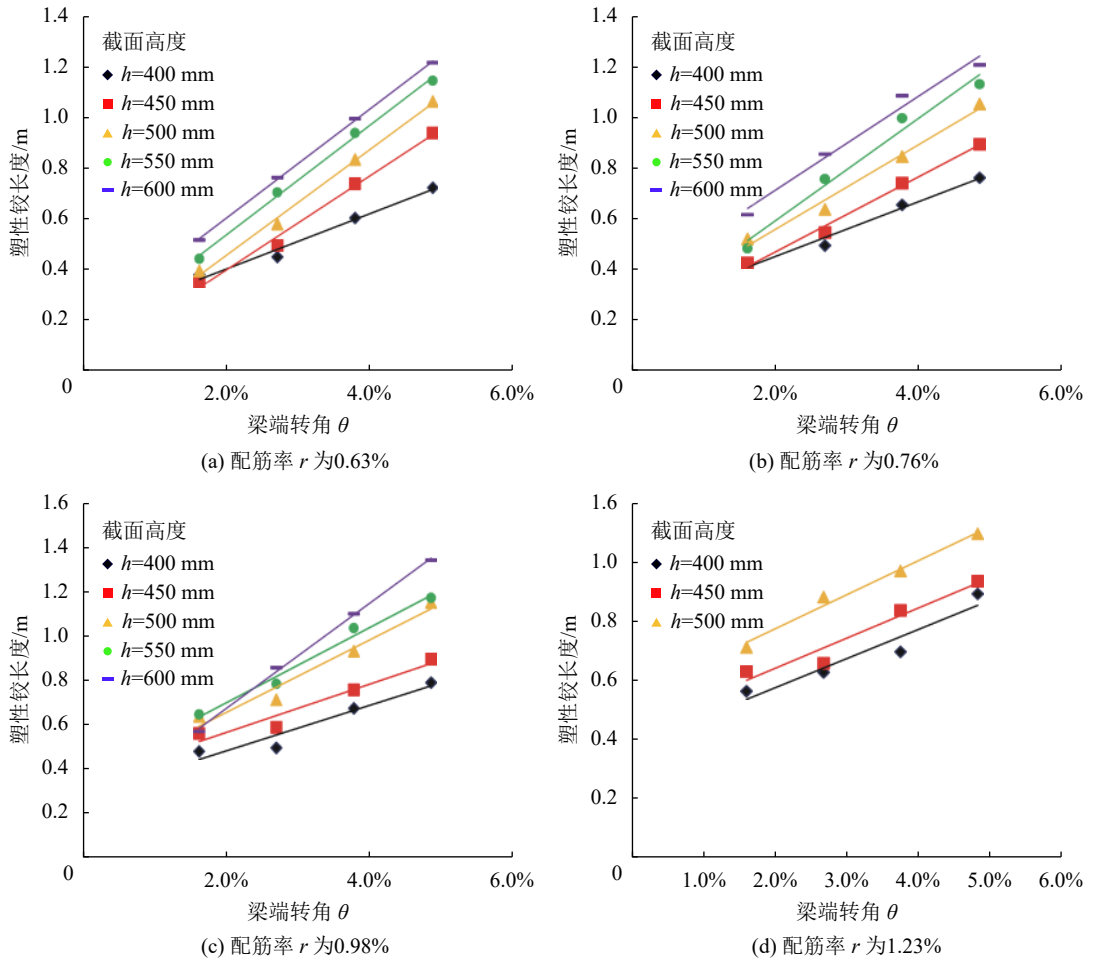


图 10 加载水平对塑性铰长度的影响

Fig. 10 Influence of the loading level on the plastic hinge length

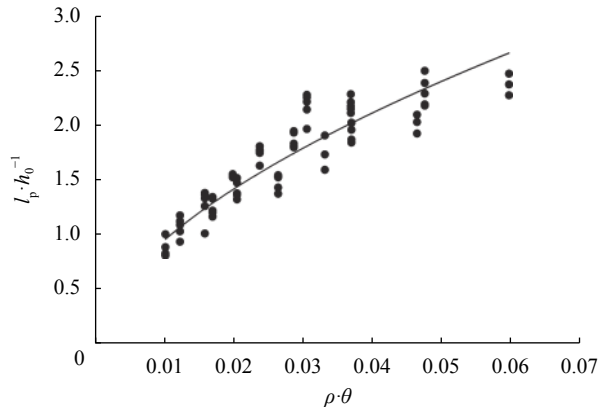


图 11 塑性铰长度变化规律

Fig. 11 Change rule of the plastic hinge length

## 6 结论

塑性铰长度是结构在进行弹塑性分析时的重要参数,反映了结构在地震作用下的塑性发展情况,与结构的耗能和加载水平有着密切的联系,因此提出了基于能量的塑性铰长度计算方法。该方法从能量

的角度出发计算塑性铰长度,并且可以考虑塑性铰长度受梁端加载水平的影响。为了验证所提出的计算方法的合理性,依据数值分析结果,计算了在不同加载水平下的梁柱节点梁端的塑性铰长度,并将结果与计算得到的等效塑性应变云图比较,发现采用基于能量的塑性铰长度计算方法得到的塑性铰长度与梁端塑性发展范围吻合较好,说明该方法对于框架节点有着良好的适用性。

为了建立起梁柱节点梁端塑性铰长度的计算模型,对18个一级框架节点进行了参数分析,所选参数为截面高度和配筋率,并计算了各个节点在不同加载水平下的塑性铰长度。由计算结果可以发现,截面高度对塑性铰长度的影响最明显,加载水平和配筋率对塑性铰长度的影响基本相当且十分显著,在塑性铰长度的计算模型中应当加以考虑。最后,利用拟合的方式建立起了塑性铰长度与有效截面高度、梁端转角和配筋率的关系。但是由于分析的节点数量有限,该模型仅适用于梁配筋率在0.63%到1.23%之间的一级框架节点,且塑性铰应首先出现在梁端。

## 参考文献:

- [1] 李碧雄. 建筑结构设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] Cai Xiaoning, Meng Shaoping, Sun Weiwei, et al. Numerical analysis for low-cyclic loading test of post-tensioned coupled wall based on OpenSEES[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Editor)*, 2010, 42(Supp1): 147-153. [蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍, 等. 基于OpenSEES的预应力装配双肢墙低周往复试验数值分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(增刊1): 147-153.]
- [3] Inel M, Ozmen H B. Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(11): 1494-1502.
- [4] Mattock A H. Rotational capacity of hinging regions in reinforced concrete beams[J]. *ACI Special Publication*, 1965, 12: 143-181.
- [5] Mattock A H. Discussion of "Rotational capacity of reinforced concrete beams"[J]. *Journal of the Structural Division*, 1967, 93(2): 519-522.
- [6] Corley W. Rotational capacity of reinforced concrete beams[J]. *Journal of the Structural Division*, 1966, 92(5): 121-146.
- [7] Sheikh S A, Khoury S S. Confined concrete columns with stubs[J]. *ACI Structural Journal*, 1993, 90: 414-431.
- [8] Li Guiqian, Tang Guangwu, Zheng Gang. Equivalent plastic hinge length of circular reinforced concrete bridge column[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(2): 87-97. [李贵乾, 唐光武, 郑罡. 圆形钢筋混凝土桥墩等效塑性铰长度[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(2): 87-97.]
- [9] Wang Zhenmin. Study on plastic hinge length of reinforced concrete column[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. [王振民. 钢筋混凝土柱塑性铰长度的计算分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.]
- [10] Park R, Priestley M J, Gill W D. Ductility of square-confined concrete columns[J]. *Journal of the Structural Division*, 1982, 108(4): 929-950.
- [11] Bae S, Bayrak O. Plastic hinge length of reinforced concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2008, 105(3): 290.
- [12] Sheikh S A, Shah D V, Khoury S S. Confinement of high-strength concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(1): 100-111.
- [13] 中国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2010.
- [14] 沈为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- [15] 中国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(编辑 黄小川)

引用格式: Feng Bo, Xiong Feng, Chen Jiang, et al. Study on calculation method of the plastic hinge length for the reinforced concrete frame joint based on energy dissipation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 77-86. [冯波, 熊峰, 陈江, 等. 基于能量的钢筋混凝土框架节点塑性铰长度的计算方法[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 77-86.]