

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.001

机械铰的量化准则及其在倒塌分析中的应用

王初翀^{1,3}, 魏智辉², 陈侠辉¹, 潘毅¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中国建筑西南设计研究院

有限公司, 成都 610041; 3. 四川省建筑设计研究院, 成都 610000)

摘要:为了评估建筑结构的抗倒塌能力,在机械铰理论的基础上,提出了机械铰的量化准则,进行了框架节点的数值模拟,并与节点的试验结果进行对比和验证,最后建立了基于机械铰的结构倒塌判定准则,并对某二层钢筋混凝土框架结构进行了倒塌分析。研究表明,相比于塑性铰的倒塌判定准则,基于机械铰的倒塌判定准则更接近于结构的真实倒塌极限,可以更真实地模拟结构的抗倒塌能力。

关键词:机械铰;量化准则;倒塌判定准则;倒塌分析;RC框架结构

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0001-05

A quantitative criterion for mechanical hinge and its application on collapse analysis of reinforced concrete structures

Wang Chuchong^{1,3}, Wei Zhihui², Chen Xiahui¹, Pan Yi¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;

2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp., Ltd, Chengdu 610041, P. R. China;

3. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute, Chengdu 610000, P. R. China)

Abstract: To evaluate the collapse-resistant capacity of reinforced concrete (RC) frame structures, a quantitative criterion for mechanical hinge formation is proposed. Numerical simulation of RC frame joints is performed and verified using experimental results. A mechanical-hinge-based collapse criterion of structures is established. The criterion is used for the collapse analysis of a two-story reinforced concrete frame structure. The analysis results show that compared to the plastic-hinge-based criterion, the mechanical-hinge-based criterion works better for simulating the structural collapse and predicting the collapse resistance of RC frame structures.

Key words: mechanical hinge; quantitative criterion; collapse criterion; collapse analysis; RC frame structure

地震作用下,结构抗倒塌能力是抗震性能设计的主要目标。但结构的抗倒塌能力难以通过大量试验系统地进行研究,主要还是采用数值模拟的方法进行分析^[1]。由于结构倒塌过程的复杂性,通常借助倒塌判定准则来预测结构是否发生倒塌。准确定义结构的倒塌临界点是结构倒塌判定准则的关

键^[2]。目前,倒塌判定准则通常采用基于变形的准则^[3-4]、基于刚度的准则^[5]和基于损伤的准则^[6]等。这些判定准则主要基于塑性铰理论,而塑性铰仍可以承担一定弯矩,卸载后可部分恢复变形。这就导致基于塑性铰理论的判定准则给出的倒塌临界点距离真正的倒塌还有一定距离,即结构仍有一定的安

收稿日期:2016-11-28

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2014SZ0110)

作者简介:王初翀(1989-),女,助理工程师,硕士生,主要从事建筑结构抗震设计研究,(E-mail)1641694650@qq.com。

潘毅(通信作者),男,副教授,博士生导师,(E-mail)panyi@home.swjtu.edu.cn。

全储备,倒塌试验与数值模拟的对比中也证实了这一点^[7]。

机械铰则是一个不可逆的单向铰,且不能承受弯矩。由机械铰形成的机构具有运动不可逆性。刘西拉^[8]以塑性铰发展到完全丧失承载力而形成机械铰来定义节点破坏。在此基础上,刘春明^[9]、宣纲^[10]等人采用机械铰分析了钢筋混凝土框架结构的倒塌机制。相比塑性铰而言,采用机械铰的倒塌判定准则更逼近结构的真实倒塌极限。而目前,基于机械铰的倒塌判定准则还鲜有研究。

笔者尝试建立机械铰的量化准则,并采用有限元模拟和节点试验来进行对比和验证,然后建立基于机械铰的倒塌判定准则,最后将该准则应用于一个二层钢筋混凝土框架结构的倒塌过程分析。

1 机械铰量化准则的建立

机械铰由塑性铰发展而来,接近理想铰。塑性转角 θ 是塑性铰理论的重要参数之一。笔者采用塑性转角 θ 对机械铰进行量化。理论上, θ 可通过积分塑性曲率来计算,但因曲率曲线不光滑,按照折算曲率分布将塑性曲率分布简化为矩形区段进行计算^[11],见式(1)。

$$\theta = (\varphi_u - \varphi_y)l_p \quad (1)$$

式中: φ_y 为截面屈服曲率; φ_u 为极限曲率; l_p 为塑性铰计算长度, mm。 l_p 采用 Priestley 和 Paulay 的公式^[12]计算

$$l_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \quad (2)$$

式中: L 为节点长度,整体结构分析中 L 取梁柱轴线交点至反弯点处的长度, mm; f_y 为钢筋屈服强度, MPa; d_b 为钢筋直径, mm。

而 φ_y 和 φ_u 则分别采用采用文献[13]和[14]中的计算公式

$$\varphi_y h = 1.957\epsilon_y \quad (3)$$

$$\varphi_u h = \frac{1.587\epsilon_{cu}}{(0.2+n)} \quad (4)$$

式中: ϵ_y 为纵筋的屈服应变, mm; h 为矩形截面计算方向截面高度, mm; ϵ_{cu} 为混凝土的极限压应变。

定义一个机械铰的判定系数 ζ , 其计算公式为

$$\zeta = \begin{cases} 0 & \theta \leq \theta_y \\ \frac{\theta - \theta_y}{\theta_u - \theta_y} & \theta_y < \theta < \theta_u \\ 1 & \theta \geq \theta_u \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为框架梁端或柱端的转角; θ_y 为框架梁端或

柱端的屈服转角, $\theta_y = \varphi_y l_p$; θ_u 为框架梁端或柱端的极限转角, $\theta_u = \varphi_u l_p$ 。

故机械铰量的化准则可表述为:当 ζ 为 1 的时候,框架结构的节点出现机械铰;否则,则节点尚未屈服或仍处于塑性铰阶段。

2 机械铰量化准则的验证

2.1 节点模型的建立与验证

为验证提出的机械铰量化准则,根据文献[15]中现浇梁柱节点的试验数据,采用 ABAQUS 软件建立节点模型,进行有限元模拟。混凝土强度等级为 C40,实测抗压强度为 35.1 MPa,实测抗拉强度为 2.41 MPa,弹性模量为 3.41×10^4 MPa;主筋和箍筋均采用 HRB400,弹性模量取 2.0×10^5 MPa。混凝土采用过镇海的本构模型^[16],钢筋则采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的二折线强化模型^[17]。

钢筋混凝土节点有限元模型及网格划分,如图 1 所示。其中,混凝土采用实体单元 C3D8R,钢筋采用桁架单元 T3D2。

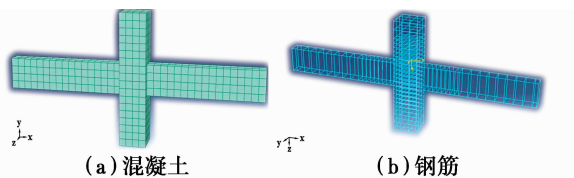


图 1 节点有限元模型

边界条件和加载如图 2 所示。柱顶施加竖向恒载,并保持固定的轴压比 0.4;柱底完全固结。在梁的两端加载点处,施加低周反复竖向荷载。位移加载曲线如图 3 所示。

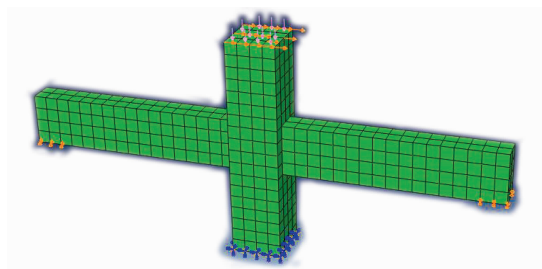


图 2 节点模型边界条件与荷载模拟

节点模型的计算结果如图 4 所示。在水平荷载作用下,核心区附近的梁端部变形较大,梁端的混凝土压应力较大,受拉钢筋均受拉屈服。这和文献[15]的试验现象基本一致。

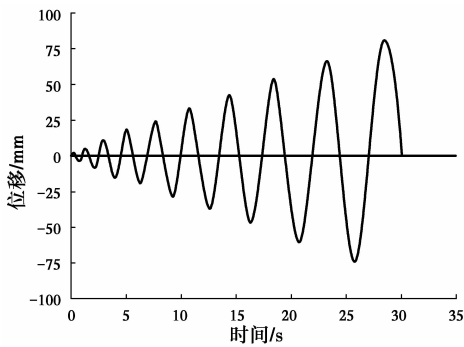
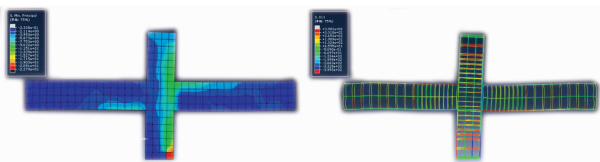


图 3 节点模型的位移加载曲线



(a) 混凝土的最小主应力云图 (b) 钢筋的应力云图

图 4 节点模型的计算结果

将节点模型的模拟骨架曲线与试验骨架曲线进行了对比,如图 5 所示。由图 5 可知,模拟结果与试

验结果吻合较好,节点模型基本可以反映试验的实际情况。

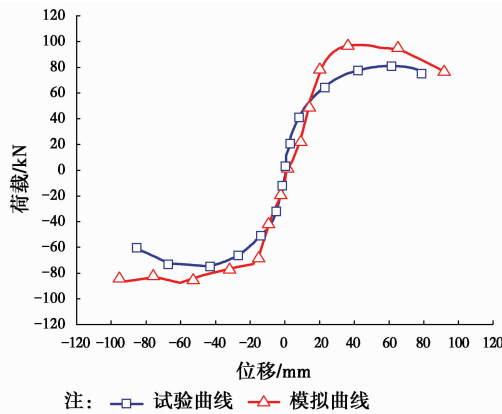


图 5 节点模型骨架曲线

2.2 机械铰的出铰情况与验证

根据提出的机械铰量化准则,由节点模型的计算结果可得梁端和柱端的机械铰出铰情况,如表 1 所示。

表 1 节点模型出铰情况

构件部位	φ_u/rad	φ_v/rad	l_p/rad	θ_u/rad	θ_v/rad	ζ	是否出现机械铰
梁端	0.030 52	0.006 67	0.454 4	0.010 84	0.620 36	1	是
柱端	0.027 47	0.006 67	0.454 4	0.009 23	0.528 58	1	是

表 1 中的 θ 为梁端、柱端塑性铰长度内的极限转角,可见加载结束,梁端、柱端均出现了机械铰,与试验结果基本一致。将防止倒塌点的转角计算结果与 FEMA356 的规定^[18]进行了对比,如表 2 所示。由于 FEMA356 的防止倒塌点作用是防止建筑物倒塌,有一定的可靠度,其数值比本文的计算结果小。所以,整体上而言,计算结果和机械铰理论量化准则还是基本合理可信的。

表 2 防止倒塌点的转角对比

构件部位	本文计算结果/rad	FEMA356 规定/rad	误差/%
梁端	0.030 52	0.025 00	22.08
柱端	0.027 47	0.020 00	37.35

3 基于机械铰的结构倒塌判定准则及其应用

3.1 基于机械铰的结构倒塌判定准则

若两个体系的几何构成(包括几何形状、支座约

束情况等)相同,则称这两个体系几何相似。而在响应分析过程中,判断结构是否形成机构,只需判断其几何相似的弹性体系在静力作用下是否形成机构即可。静力弹性体系的平衡方程为

$$\mathbf{KD} = \mathbf{R} \quad (7)$$

式中: \mathbf{K} 为体系的刚度矩阵; \mathbf{D} 为位移向量, \mathbf{R} 为荷载向量。

结构形成机构的充要条件是,其几何相似的弹性体系刚度矩阵 \mathbf{K} 为零。但在实际的有限元模拟中,刚度矩阵并非唯一的方法。笔者通过机械铰量化准则计算每个节点的 ζ ,来判断节点是否出现机械铰,如果有足够多的机械铰,则结构变为机构。为简化计算,对框架结构做如下假设:框架结构为规则的矩形;组成结构的杆件简化为线单元;机械铰形成于杆端,长度为零。

3.2 结构模型的建立

计算实例来源于 2008 年汶川地震中濒临倒塌的一栋村民自建的两层钢筋混凝土框架结构房屋^[19]。取该建筑的一榀框架结构剖面图及梁柱配筋,如图 6 所示。钢筋为 HRB335 钢,混凝土强度等

级为 C35。

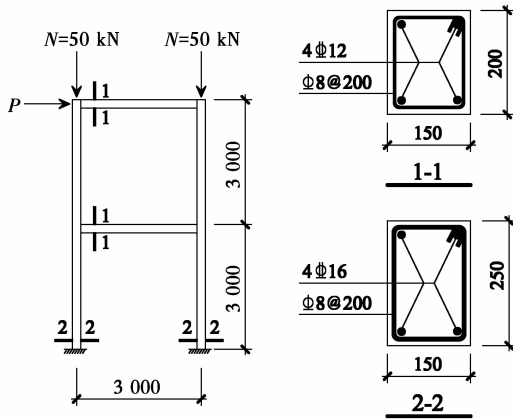


图 6 框架结构的剖面 and 配筋

框架结构采用水平位移加载进行静力推覆分析,考虑到房屋顶部还有屋盖和堆放的杂物等的重量,对柱子施加 50kN 的轴压。框架结构的有限元模型如图 7 所示。

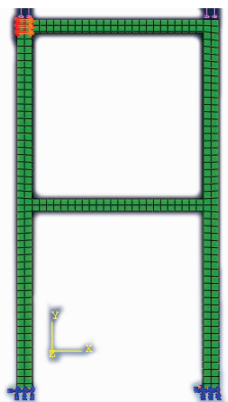


图 7 框架结构的有限元模型

3.3 计算结果与分析

根据机械铰量化准则,可得出不同时刻,框架结构不同节点位置的出铰情况,如表 3 所示。

表 3 框架不同位置的出铰情况

序号	帧数	时刻/s	单元号	出铰位置	转角/rad	层数
1	27	5.4	52	梁左端	0.032 341	1
2	28	5.6	5	梁右端	0.037 636	1
3	37	7.4	257	梁右端	0.031 602	2
4	46	9.2	161	左柱上端	0.022 973	2
5	48	9.6	304	梁左端	0.030 088	2
6	66	13.2	77	右柱上端	0.032 652	2
7	145	29	202	左柱上端	0.029 305	1
8	261	52.2	147	右柱下端	0.027 211	1

根据结构倒塌判定准则,按照不同时刻,框架结构的最小主应力云图和机械铰出铰示意,如图 8 所示。可见,随着水平位移的加大,结构开始出现机械铰(图 8(a));体系的自由度随之发生变化,结构趋于不稳定(图 8(b)、(c));当结构产生不可逆的机构时,才结构就真正地发生倒塌(图 8(d))。

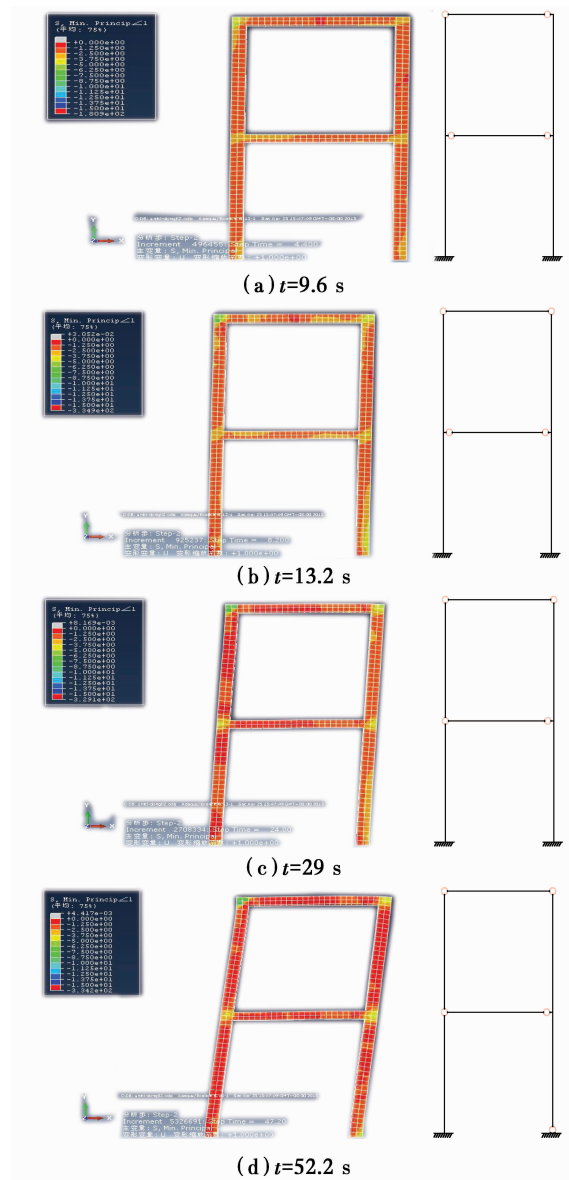


图 8 框架结构的最小主应力云图和出铰情况

4 结论

提出了机械铰的量化准则,采用有限元软件对节点模型进行了分析,并与节点的试验结果进行了对比和验证,最后建立了基于机械铰的结构倒塌判定准则,并采用推覆分析的方法,将该倒塌判定准则应用于一个二层框架结构的倒塌分析。但应该看到,本文中的框架模型还只是一榀两层单跨结构,可

直观的由结构力学判定机构,但对于比较复杂的建筑结构,应思考一种更高效、更简便的方法。

参考文献:

- [1] 王亚勇,高孟潭,叶列平,等.基于大震和特大震下倒塌率目标的建筑抗震设计方法研究方案[J].土木建筑与环境工程,2010,32(Sup2):291-297.
- [2] 潘毅,王初翀,卢立恒,等.建筑结构防连续倒塌分析与设计方法研究进展[J].工程抗震与加固改造,2014,36(1):52-56.
- [3] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] ASCE 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures[S].USA,American Society of Civil Engineers,2005.
- [5] BANON H, IRVINE H M, BIGGS J M. Seismic damage in reinforced concrete frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1981, 107(9): 1713-1729.
- [6] PARK Y J, ANGA H S, WEN Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. Journal of the Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [7] 陆新征,叶列平,潘鹏,等.钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 I:框架试验[J].建筑结构,2012,42(11):19-26.
- [8] LIU C M, LIU X L. Collapse analysis of reinforced concrete frames under earthquake [C]// Petroshimi Cultural Complex, 1st International Conference on Concrete Technology, Tabriz, 1992: 594-604.
- [9] 刘春明.钢筋混凝土框架结构倒塌分析[D].北京:清华大学,1991:1-19.
- [10] 宣纲,顾祥林,吕西林.强震作用下混凝土框架结构倒塌过程的数值分析[J].地震工程与工程振动,2003,23(6):24-30.
- [11] 叶列平,赵作周.混凝土结构[M].2版.北京:清华大学出版社,2006.
- [12] 鲍雷,普利斯特利.钢筋混凝土和砌体结构[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [13] 公路桥梁抗震设计细则:JTG/TB 02—01—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [14] 付国.钢筋混凝土框架结构地震倒塌破坏研究[D].西安:长安大学,2014:71.
- [15] 杨旭.装配整体式混凝土框架节点抗震性能试验研究[D].北京:北京建筑大学,2014:8-68.
- [16] 过镇海.钢筋混凝土原理[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [17] 混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [18] Prestandard and commentary for the Seismic rehabilitation of buildings:FEMA356[S].United State of Ameircian,2000:6-22.
- [19] 赵世春,潘毅,高永昭,等.《四川省建筑抗震鉴定与加固技术规程》编制要点[C]//第八届全国地震工程学术会议论文集(第2卷).重庆:重庆大学出版社,2010:310-312.

(编辑 胡英奎)