

# 钢筋混凝土摩擦耗能支撑框架节点强度——理论篇

袁苏跃<sup>1</sup>, 古松<sup>2</sup>

(1. 昆明大学 艺术建筑系, 云南 昆明 650031; 2. 昆明理工大学 抗震所, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 耗能支撑框架体系作为一种有效的被动控制技术在工程界得到了广泛的应用, 其中, 低造价摩擦耗能钢筋混凝土支撑体系具有良好的应用推广价值. 在对钢筋混凝土摩擦耗能支撑框架的应用和特点作分析的同时, 指出了这种结构体系应用中应注意的一个重要问题, 即节点的强度. 文中针对这一问题, 进行了理论上的分析.

**关键词:** 钢筋混凝土; 摩擦耗能支撑框架; 节点强度理论; 结构静力分析

**中图分类号:** TU 352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2004)03-0063-03

## Joint Strength of Friction Energy Dissipation Braced-Frame of Reinforced Concrete——Principle

YUAN Su-yue<sup>1</sup>, GU Song<sup>2</sup>

(1. Art and Architecture Department of Kunming University, Kunming 650031, China;

2. Institute of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The braced frame system of energy dissipation, which is an effective and passive control technique, has been widely applied in the civil engineering. The low-cost braced RC frame with friction device is one of the valuable system from engineering practice. The joint strength of the frame is mainly analyzed in terms of theory, and meanwhile the applications and characteristics of the friction energy dissipation braced frame of reinforced concrete are discussed. An emphasis is put on the joint strength, which is a key problem in applying this system.

**Key words:** reinforced concrete; friction energy dissipation braced frame; the theory of joint strength; static structural analysis

### 0 引言

与传统抗震技术相比, 结构减震控制技术主要有安全可靠、有效减震经济, 节省工程造价、建筑结构设计不受限制、使用范围广及检修维护方便等优点.

近几年, 摩擦耗能支撑被广泛应用于商业建筑领域, 目的是加强新结构或加固已建结构的抗震能力. 在加拿大, 共有 13 个建筑物安装了 Pall 摩擦装置, 其中, 6 个用于加固. 蒙特利尔附近的 Ecole Polyvalante 的三个学校在 1988 年的沙格奈河地震中受损, 应用摩擦耗能支撑的方法可以减少 40% 的加固费用和 60% 的修建时间. 基于非线性时域动力分析结果, 共需要 64 个摩擦耗能器、388 个摩擦板连接器. 这一项目于 1990 年夏季未完工. 另一个工程是由法国政府为在蒙特利尔举行的 67 届博览会建成的 8 层钢结构建筑, 因为原先建筑设计早已过时, 初步分析表明结构不再满足抗震规范要求. 最终采用摩擦耗能支撑加固的方法, 用 32 个摩擦耗能器贯穿于整个建筑. 另外, 美国洛杉矶的 Trans World Bank 建于 20 世纪 60 年代, 属非延性钢混结构, 在加固中采用了横向层间安装摩擦耗能支撑的方案.

在我国, 复合摩擦型耗能支撑首次应用于广州市 28 层中房大厦工程; 1997 年沈阳市政府大楼因超过使用年限, 其受力构件有不同程度的损伤, 且框架梁柱不符合七度区抗震构造规定, 经研究讨论, 最终选定摩擦耗能支撑的加固方案. 云南省丽江市丽江物资大厦是主体结构为 8 层的纯框架结构, 在 1996 年丽江地震中遭到破坏, 文献[1]提出了使用钢筋砼支撑钢板—橡胶摩擦耗能装置的加固方案, 实验证明使用剪

收稿日期: 2004-02-23.

第一作者简介: 袁苏跃(1960~), 男, 讲师. 主要研究方向: 工程结构. E-mail: suyue\_yuan@yahoo.com.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力墙来代替耗能支撑进行加固,效果要好一些,层间位移减小比较多,但使用耗能支撑也可以满足《规范》要求( $h/550$ ),且可大大降低造价。

论文仅从理论上阐述摩擦耗能支撑框架节点的强度,其设计部分将在续篇中论述。

## 1 摩擦耗能支撑框架的特点

摩擦耗能支撑框架是在普通框架体系的适当部位安装带摩擦耗能装置的斜支撑,在较小地震作用下,水平地震作用力小于耗能器的启动力,由框架与支撑构成的框—桁架体系(支撑框架)抵抗所有地震作用。当受到中震或大震作用时,耗能器被启动,水平地震力通过连接在框架节点上的斜撑传递到耗能器上,利用耗能器的良好滞回特性有效地消耗地震作用在结构上的能量,从而达到保护主体结构的目的。有对比试验<sup>[2]</sup>显示:普通钢筋混凝土框架、钢支撑钢筋混凝土框架和摩擦耗能支撑钢筋混凝土框架在相同的地震波激振下,摩擦耗能支撑框架在振动过程中支撑体系保持完好,加速度反应和位移反应最小,裂缝出现最晚。且一旦支撑内力达到滑移荷载,摩擦耗能器将产生滑移,使结构自振周期随之加长,自动避免了共振效应;同时依靠摩擦耗能,大大提高了结构阻尼,从而明显地降低了结构的地震反应,有效地增强了结构的抗倒塌能力,具有明显的减震效果。

但是,注意到水平地震作用力一般需要通过框架节点传递到耗能器上,因此摩擦耗能支撑框架节点区域的剪应力比普通框架节点更高,且应力状态更为复杂。为了保证摩擦耗能支撑能够在地震作用下可靠工作,防止框架节点提前破坏导致整个结构的危险,有必要对摩擦耗能支撑框架节点的构造形式、破坏特征、加强方式和极限承载力等进行深入地研究。

## 2 框架节点强度理论

### 2.1 节点传力机构分析

节点作为梁、柱接头区的主要组成部分,在平面框架中承受由左、右梁端和上、下柱端传来的弯矩、剪力和轴力。当竖向荷载较大而地震水平反应较小时,左、右梁端截面中的内力所引起的节点剪力较小,节点的受力较为有利。而当水平地震反应较大,使左、右梁端分别受正、负弯矩作用时,节点剪力就比较大,对节点受力不利。

早在20世纪70年代,新西兰的T. Paulay和R. Park就已经指出梁柱节点中存在两种传力机构,即“斜压杆机构”和“桁架机构”<sup>[3]</sup>。如图1所示,其中由梁、柱端受压力区混凝土的压力在分别抵消了柱、梁截面剪力中的相应部分之后,在核心区混凝土中形成斜压应力场,即所谓的“斜压杆机构”。与此同时,贯穿节点

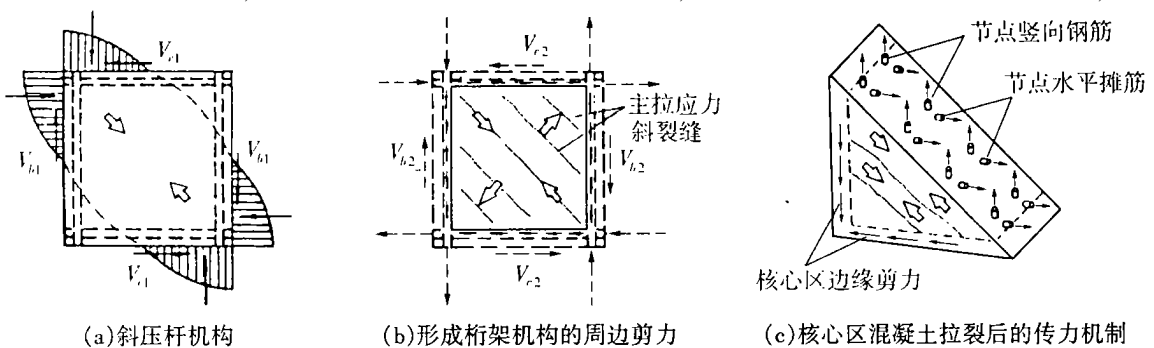


图1 节点传力模式

的梁柱筋一端的拉力和另一端的压力将通过贯穿段的粘结效应传入其周围的混凝土中,在分别抵消了相应的另一部分柱、梁截面剪力之后,将以边缘剪力形式传入核心区,并在核心区形成剪应力场。该剪应力场的主压应力与斜压杆机构的主压应力叠加,由核心区混凝土承担。在核心区斜向开裂前,桁架机构引起的主拉应力也主要由混凝土承担;当拉应力大到导致混凝土斜向开裂后,主拉力将由水平箍筋和竖向钢筋分担。对比节点的主拉力和主压力,因前者源于一种机构而后者源于两种机构,故前者总是小于后者。

对于核心区混凝土受剪破坏、水平箍筋屈服而柱筋未发生粘结破坏的情况,核心区剪切破坏的临界裂缝常沿对角线发生,将核心区混凝土分成两大块,在两块体之间产生滑动摩擦,假定与斜裂缝相交的水平

箍筋受拉屈服. 以上两种节点传力机构已为大家认同, 另外一些学者在大量试验的基础上又提出了一些其他的节点传力和破坏模型<sup>[4, 5]</sup>. 在 20 世纪 80 年代后期, 日本东京大学北山和宏、小谷俊介和青山博之通过试验对节点中箍筋应变在组合体反复受力且层间位移角不断增大过程中的变化规律作了细致的测定后提出了节点约束机构模型. 他们认为, 平行于加载方向的箍筋既要承受桁架机构引起的拉力, 又要承受由于节点混凝土在斜向受压后的横向膨胀所引起的被动约束拉力. 同时还进一步认为, 在平行于加载方向和垂直于加载方向的箍筋中的被动约束拉力是基本上相等的(这相当于假定这两个方向的横向膨胀相同).

另外, 日本东京大学的 Hitoshi Shiohara 在对钢筋混凝土框架中节点的破坏试验总结的基础上<sup>[6]</sup>提出传统的节点破坏模型并不能真正反映节点的实际承载能力. 他认为节点的剪切变形不是单一分布的, 而是与节点四个边上的混凝土的转动和裂缝开展有关. 梁柱在节点处的转动导致节点沿对角线方向产生弯曲裂缝. 梁柱纵筋和箍筋象弹簧一样防止裂缝贯通破碎. 因此, 通过这种模型可以使梁柱节点具有更高的抗弯承载力和抗剪承载力. 但同时, 这种模型的剪切变形也会随着抗剪承载力的提高而增大. 因此假定的抗剪能力可以由两部分组成, 即穿过裂缝的箍筋受拉屈服时所承担的剪力以及斜裂缝处在弯曲压力作用下所产生的混凝土摩擦力. 这两者共同作用组成的抵抗力即为节点的抗剪承载力.

## 2.2 节点受力特征分类<sup>[6]</sup>

在模拟抗震框架梁柱接头区受力的平面梁柱组合体或二维梁柱组合体的低周交变加载试验中, 通常是通过加强梁端和柱端的箍筋来防止梁端和柱端发生延性很差、因而对框架抗震非常不利的剪切破坏. 在这个前提下, 根据梁、柱端正截面承载力和节点抗剪承载力的强弱, 组合体将可能出现下列三种典型失效方式:

- 1) 在梁端或柱端受拉钢筋屈服前节点发生剪切失效或剪切破坏;
- 2) 在梁端或柱端受拉钢筋屈服到丧失截面承载力(受压区混凝土压碎)之间, 随着组合体交替变形逐步增大, 节点发生剪切破坏或剪切失效;
- 3) 在梁端或柱端受拉钢筋屈服后, 随着组合体交替变形的逐步增大, 梁端或柱端塑性较充分转动, 直至梁端或柱端丧失正截面承载力. 在此过程中节点未发生剪切破坏或剪切失效.

在上述第一种失效方式下, 框架达不到预期的抗水平地震反应的承载力, 且发生剪切破坏的节点不论剪切破坏的形态如何, 其延性均很差, 故这类失效方式不符合抗震框架要求, 应尽量避免出现. 第二种失效方式属于等强度状况, 节点的强度等级与结构其他构件相同, 在地震作用下可能出现由于节点失效而导致的结构破坏. 第三种失效方式节点强度要高于梁柱的屈服强度, 在结构受荷载作用发生破坏过程中, 节点只发生弹性变形或少量的塑性变形, 节点的强度不会发生明显下降. 这种失效方式将是本文讨论的基于“强节点”的设计准则.

## 3 结语

叶燎原教授等立足于我国实际情况, 提出的钢筋砼支撑钢板—橡胶摩擦耗能装置, 是以混凝土为主要材料、部分采用钢材和其他材料的低造价耗能支撑装置<sup>[7]</sup>, 并已在云南省大理州洱源县振戎民族中学的两栋教学楼工程中得到运用. 以上仅仅从理论方面阐述了摩擦耗能支撑框架节点的强度, 有关设计方面的问题, 我们将在续篇中继续讨论.

## 参考文献:

- [1] 叶燎原, 肖梅玲. 丽江物资大厦的震害机理及加固分析[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 237~ 240.
- [2] 刘伟庆, 魏琰, 丁大均, 等. 摩擦耗能支撑钢筋混凝土框架结构的振台试验研究[J]. 建筑结构学报, 1997, (3): 29~ 37.
- [3] 鲍雷 T, 普里斯特利 M J N 著. 钢筋混凝土和砌体结构的抗震设计[J]. 戴瑞同, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 139~ 162.
- [4] 傅剑平, 游渊, 白绍良. 钢筋混凝土抗震框架节点传力机构分析[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, (3): 43~ 49.
- [5] Hitoshi Shiohara. New Model for Shear Failure of RC Interior Beam-Column Connection[J]. Journal of Structure Engineering, 2001, (2): 152~ 160.
- [6] 傅剑平, 游渊, 白绍良. 钢筋混凝土抗震框架节点的受力特征分类[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, (6): 85~ 91.
- [7] 古松. 钢筋混凝土摩擦耗能支撑节点有限元分析: 硕士学位论文[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003. 6~ 9.
- [8] 费维水, 潘文, 叶燎原, 等. 摩擦耗能机构及其竖向紧固力[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2002, 27(5): 109~ 112.