

文章编号:1671-6833(2010)01-0016-04

## 钢筋混凝土深梁填充钢框架协同工作分析

胡立黎,郑宏,宋晓强,肖峰

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘 要:** 为了实现钢结构房屋的刚度可在一定范围内渐变调幅,并提高钢结构房屋在震区的使用范围,介绍一种新型的高层钢结构房屋抗震加固体系—钢筋混凝土深梁.通过对填充了钢筋混凝土深梁的钢框架和纯框架进行水平低周反复荷载作用下的对比试验研究,结果证明:内填钢筋混凝土深梁可以大幅度提高纯钢结构的初始刚度、屈服荷载和极限承载力;它能够作为钢结构房屋的抗震设防第一道防线.通过对结构的适当简化,提出有效的计算钢筋混凝土深梁与钢框架协同分析模型,可用于分析深梁承担的水平荷载.

**关键词:** 钢筋混凝土深梁;钢框架;协同工作

**中图分类号:** TU392.4 **文献标识码:** A

### 0 引言

钢框架和剪力墙填充钢框架是两种常用的抗侧力体系,纯框架的刚度较弱而剪力墙的刚度过强.二者反映了框架结构刚度变化的两个端点值,刚度增幅是突变性质的.为了满足两个端点刚度值之间的要求,实现一定范围内刚度渐变调幅,可把深梁作为一种新型抗侧力结构形式. Kahn 和 Hanson<sup>[1]</sup> 于 1979 年最早提出内填钢筋混凝土深梁的框架结构形式. Kesner<sup>[2-3]</sup> 将纤维混凝土深梁用于钢框架抗震加固.

《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)规定:深梁是指跨高比  $l_0/h_0 \leq 2$  的简支梁或跨高比  $l_0/h_0 \leq 2.5$  的连续梁.钢筋混凝土深梁填充钢框架结构(如图 1)是将跨高比  $l_0/h_0 \leq 2$  的钢筋混凝土板内置于框架结构中,混凝土板上下两端与上下层框架梁通过高强螺栓连接.

此种结构由两种不同的子结构组成且受力性能又不尽相同,因而在水平荷载作用下,存在深梁与钢框架之间如何协同工作的问题.

### 1 试验研究

为了研究钢筋混凝土深梁填充钢框架的协同工作和抗震性能,设计了结构在水平低周反复荷载作用下的试验,如图 1,2 所示.并通过改变深梁

高度考察对结构性能的影响.



图 1 深梁示意图

Fig. 1 Diagram of reinforced plate deep beam

试验试件分为两类:钢框架和两个深梁填充钢框架结构(编号依次为 PF、RDBF-A、RDBF-B).高强螺栓采用等间距配置,间距均为 135 mm.框架钢材采用 Q235B, HW200 × 200 × 8 × 12 型钢,柱轴线距离为 1 800 mm.

采用位移加载方式.在水平低周反复荷载作用下,PF 试件由于框架柱柱脚屈曲,且加载端节点区被拉裂而破坏如图 3 所示.

RDBF 系列的框架破坏与 PF 破坏相同,两种填充的深梁均是由于底部螺栓孔处水平裂缝贯通破坏如图 4 所示.

收稿日期:2009-08-30;修订日期:2009-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678025),陕西省外国专家局择优资助项目(SLZ2008008)

作者简介:胡立黎(1981-),男,江苏泗洪人,长安大学助教,博士,E-mail:chinahulili@163.com

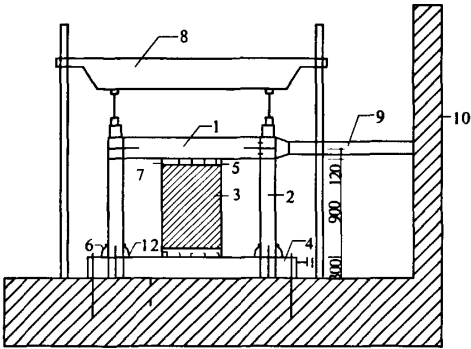


图2 加载装置示意图

Fig. 2 Diagram of experimental apparatus

注:1—框架梁;2—框架柱;3—深梁;4—地梁;5—角钢;6—加劲肋;7—高强螺栓;8—竖向加载;9—作动器;10—反力墙;11—锚固件;12—端板

表1 试件主要参数

Tab. 1 Parameters of tests

构件名称	加载方式	深梁高度	深梁跨度	深梁厚度	深梁螺栓数 × 直径
RDBF-A	反复	450	900	60	6 × 20
RDBF-B	反复	1 200	900	60	16 × 20
PF	反复	—	—	—	—

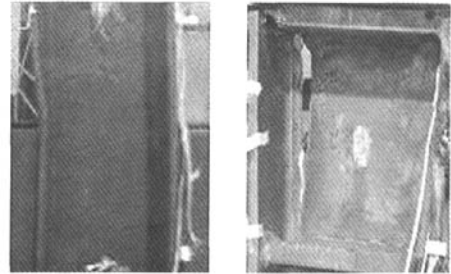


图3 框架的破坏模式

Fig. 3 Damage model of steel frame

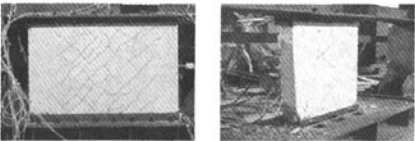


图4 1 200 × 900 混凝土深梁破坏模式

Fig. 4 Damage model of RC deep beam

2 试验分析与比较

通过试验可以得到深梁的破坏机理:深梁在水平荷载作用下,承受弯矩和剪力。弯矩产生的受拉作用导致在深梁底部两角边最先出现裂缝;随

后由于剪力作用在深梁中部出现斜裂缝。随着荷载增加,深梁角部厚度方向的裂缝与正面裂缝相交,使边缘螺栓外的混凝土脱落,率先退出工作,导致混凝土截面受到削弱,抗弯能力进一步减弱。同时,深梁中部因剪力产生的斜裂缝继续发展。最后,深梁沿着底部螺栓孔处的水平裂缝贯通破坏。深梁填充后钢框架的最后破坏模式仍与纯框架破坏模式相同。

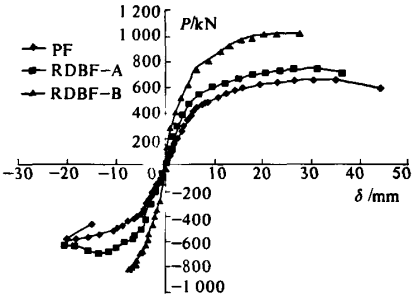


图5 试件骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of tests

由于负方向加载到塑性阶段时,加载点变形较大导致负方向结构位移没达到预定的位移,所以骨架曲线在弹性阶段对称,塑性阶段不对称。不过,从3种试件的骨架曲线(图5)的对比中仍可以看出:初始刚度、屈服荷载和极限承载力均为RDBF-B > RDBF-A > PF。可见内填钢筋混凝土深梁对提高钢框架初始刚度、屈服荷载和极限承载力均有显著效果。结构受力过程中,深梁有效约束了钢框架的水平位移,改善了钢框架受力和变形。因此它既可作为围护墙体又能充当结构的抗侧力构件,可以作为抗震设防的第一道防线。

3 协同工作计算

3.1 深梁和钢框架抗侧刚度

假设深梁不承受竖向荷载作用,利用单位荷载法,可得:

$$EI_{eq} = EI / \left( 1 + \frac{3 \times 1.2 \times EI}{GAL^2} \right) \quad (1)$$

式中: $h$ 为深梁的高度; $t$ 为深梁厚度; $A = ht$ 为深梁的截面面积; $L$ 为深梁跨度; $I = h^3 t / 12$ 为惯性矩。

对本试验钢框架做如下假设:不考虑梁柱的轴向变形影响;同层各梁柱节点转角相同,各层柱的水平位移相同;不考虑节点的剪切变形。框架变形如图6所示。

利用转角位移方程,推导出钢框架柱的侧移

刚度  $D$ ,

$$D = \frac{12i_c}{H^2}(1-K), K = \frac{3}{4+6i_b/i_c} \quad (2)$$

式中:  $i_c$  为柱线刚度;  $i_b$  为梁线刚度;  $H$  为框架柱高度。

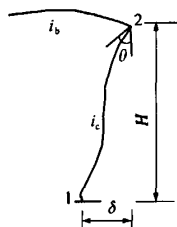


图6 钢框架的侧移与节点转角

Fig.6 Displacement and rotor angle of steel frame

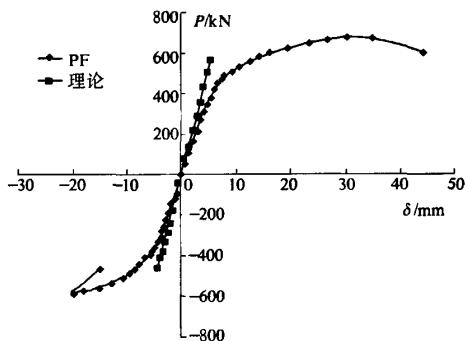


图7 钢架刚度比较

Fig.7 Skeleton curves of steel frame

从图7可知理论框架初始刚度与试验值较为符合。

### 3.2 协同工作计算

深梁和钢框架在连接处的水平位移相同;深梁与框架的位移转角相同;深梁是在钢框架制作好后安装上去,且竖向荷载只加载在柱的顶端,所以认为深梁不承担竖向荷载;忽略深梁顶部的弯矩约束。同时,深梁两侧与框架柱并不相连,两者相互没有约束。综上所述,将深梁与框架简化为通过顶部铰接连杆相连的铰接体系。

设深梁承受水平集中荷载为  $P$ , 水平向右为正, 如图8所示。  $Y(x)$  为深梁受力变形曲线, 深梁承受的弯矩为  $M_d$ , 深梁承受的剪力为  $V_d$ 。

由材料力学的内力与荷载关系可得:

$$M_d = EI_{eq} \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3)$$

$$V_d = -EI_{eq} \frac{d^3 y}{dx^3} \quad (4)$$

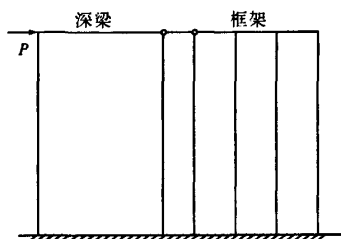


图8 深梁填充钢框架协同的计算简图

Fig.8 Calculation diagram of the structure

设  $V_i$  为框架承受的剪力,  $C_i$  为框架抗剪刚度, 即是产生单位层间变形所需的剪力, 由  $C_i = H \sum_{i=1}^n D_i$ ,  $n$  为同层框架柱的总数,  $D_i$  为第  $i$  个框架柱的侧移刚度。可得:

$$V_i = \theta C_i = C_i \times \frac{dy}{dx}$$

框架承受的荷载为

$$P_i = \frac{dV_i}{dx} = C_i \times \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (5)$$

对深深顶点处列平衡方程:

$$P_i + V_d = P \quad (6)$$

把式(5)和(4)代入式(6), 可得:

$$-EI_{eq} \frac{d^3 y}{dx^3} + C_i \times \frac{d^2 y}{dx^2} = P$$

设,  $\lambda^2 = \frac{L^2 C_i}{EI_{eq}}$ ,  $\varepsilon = \frac{x}{L}$ , 得

$$\frac{d^3 y}{d\varepsilon^3} - \lambda^2 \times \frac{d^2 y}{d\varepsilon^2} + \frac{\lambda^2 LP}{C_i} = 0$$

由边界条件得: ①当  $x=0$  时, 深梁底部转角为0 即  $\theta = dy/dx = 0$ 。②当  $x=0$  时, 深梁底部位移为0, 即  $y(0) = 0$ 。③当  $x=L$  时, 深梁顶部弯矩为0, 即  $M_d(H) = d^2 y/dx^2 = 0$

则方程通解为

$$y(\varepsilon) = \frac{LP(e^{2\lambda} - 1)}{\lambda C_i(e^{2\lambda} + 1)} + \frac{LP}{C_i} \varepsilon \frac{LP}{\lambda C_i(e^{2\lambda} + 1)} e^{\lambda \varepsilon} + \frac{LPe^{2\lambda}}{\lambda C_i(e^{2\lambda} + 1)} e^{-\lambda \varepsilon} \quad (7)$$

把式(7)代入式(4), 可得:

$$V_d = \frac{P}{1 + e^{2\lambda}} (e^{\lambda \varepsilon} + e^{\lambda(2-\varepsilon)})$$

则当  $\varepsilon=1$  时,

$$\frac{V_d}{P} = \frac{2e^\lambda}{1 + e^{2\lambda}} \quad (8)$$

式(8)即为深梁顶部承受水平荷载曲线, 如图9所示。

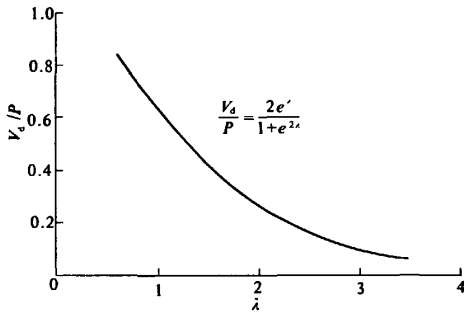


图9 深梁顶部的承受水平荷载曲线

Fig.9 Horizontal load curve of the deep beam

### 3.3 试验验证

根据以上的协同计算分析,RDBF-A试件(跨度为450 mm)的 $\lambda$ 为2.85,则 $V_d/P$ 为11.5%;RDBF-B试件(跨度为1200 mm)的 $\lambda$ 为1.1,则 $V_d/P$ 为59.9%。选取试验试件推方向弹性阶段的数据,进行一元线性回归分析,得到3条直线如图10。从图中可以看出在弹性阶段,相同位移条件下,RDBF-A试件比PF试件承受荷载能力提高了23.6%;RDBF-A试件比PF试件承受荷载能力提高了53%。将计算结果与试验结果比较发现,由于计算结果使用了较多假设导致不能与试验结果完全一致,但两者相差并不很大。

## 4. 结论

(1)内填钢筋混凝土深梁钢框架的抗侧刚度、屈服荷载和极限承载力均优于普通钢框架。深梁有效的约束了框架结构的水平位移,改善了框架受力和变形,因此它可以作为高层结构的加固

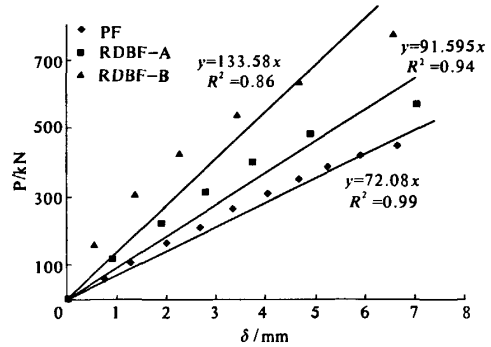


图10 试件弹性阶段回归分析

Fig.10 Regression analysis of data in flexibility phase

体系,成为抗震设防的第一道防线。

(2)通过混凝土深梁与钢框架的协同分析计算,提出分析钢筋混凝土深梁承受水平荷载的模型。

### 参考文献:

- [1] KAHN L F, HANSON R D. Infilled walls for earthquake strengthening[J]. J. Struct. Div. ASCE, 1979, 105(2):283-296.
- [2] KESNER K F. Development of seismic strengthening and retrofit strategies for critical facilities using engineered cementitious composite materials[D]. Cornell University, Ithaca, N Y. 2003.
- [3] KESNER K F. Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit[J]. Journal of Structural Engineering. 2005, 131(11):1712-1720.

## Interactive Analysis Between Reinforced Concrete Deep Beam and STEEL Frame

HU Li-li, ZHENG Hong, SONG Xiao-qiang, XIAO Feng

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Reinforced concrete deep beam, as a retrofit frame concrete reinforced system, is introduced. By comparative test between the frame which is filled with reinforced the deep beam and the pure frame, the deep beam can improve effectively primary stiffness, yield load and ultimate capacity of structure. Therefore, it can be used as the first seismic defense. The calculation model is proposed for interactive analysis.

**Key words:** reinforced concrete deep beam; steel frame; interactive analysis