

不均匀沉降下内嵌墙板钢框架协同工作试验研究

谢伟¹, 夏军武^{2,3*}, 郑玉莹¹

(1. 中国矿业大学 徐海学院, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221008;

3. 中国矿业大学 徐圩新区高新技术研究院, 江苏 连云港 222065)

摘 要:为研究填充墙体对钢框架抗地表变形性能的影响, 针对开放式、封闭式和内嵌墙板 3 类钢框架, 分别进行地表不均匀沉降作用的物理试验, 对柱顶侧移、梁柱应变等响应规律展开分析研究, 得出底梁和内嵌墙板对框架性能的影响规律及内嵌墙板-底梁-钢框架的协同工作性能。结果表明: 开放式框架构件变形最大, 封闭式框架次之, 内嵌墙板框架最小, 而框架整体倾斜变形的顺序则恰好相反; 框架梁柱构件各部位变形对柱顶侧移贡献大小顺序为柱底 > 柱顶 > 梁边柱端 > 梁中柱端 > 梁跨中; 框架柱底增设底梁, 能一定程度地减小框架构件变形量, 但同时其框架整体倾斜变形增大, 并不能有效降低框架柱顶侧移的增大速率; 内嵌墙板能较大幅度改变框架梁柱内力分布, 并有效降低框架柱顶侧移的增大速率。

关键词: 钢结构; 框架; 内嵌墙板; 地表不均匀沉降; 试验; 协同工作

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

Experimental Study on Cooperation of Infilled Wallboard Steel Frame Under Differential Settling

XIE Wei¹, XIA Junwu^{2,3*}, ZHENG Yuying¹

(1. Xuhai College, China Univ. of Mining and Technol., Xuzhou 221008, China;

2. Jiangsu Key Lab. of Environmental Impact and Structural Safety in Eng., China Univ. of Mining and Technol., Xuzhou 221008, China;

3. Xuwei New District Hi-Tech Research Inst., China Univ. of Mining and Technol., Lianyungang 222065, China)

Abstract: In order to research the influence of infilled wall to the steel frame performance of anti-ground deformation, the column-top-swing and beam-column-strain were analyzed via the physical experiment for three types of frame (open-frame, close-frame and wallboard-infilled-frame) under differential settling. The effect of frame performance by sill beam and infilled wallboard, furthermore, the cooperation of infilled wallboard-sill beam-steel frame were analyzed. The results showed that the member distortion of open-frame was maximum, close-frame took second place, and the member distortion of wallboard-infilled-frame was minimal, by contrast, the measure sequence of integral-incline of the frames was just reverse. The measure sequence caused the column-top-swing by different position of beam-column members was column base > column top > girder side-column-end > girder middle-column-end > girder midspan. The sill beam added to the bottom of frame-column could decrease amount of deformation of framing members, but the integral-incline of the frames increased at the same time, therefor the sill beam could not reduce the gathering speed of frame-column-top-swing. The infilled wallboard could modify the distribution of internal force on frame girder and column obviously and reduce the gathering speed of frame-column-top-wing effectively.

Key words: steel structure; frames; infilled wallboard; differential settling; experiments; cooperation

由于地表变形的广泛存在, 尤其是现代社会对 能源的高度依赖, 中国许多新建矿区或老矿区的开

收稿日期: 2014-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274192); 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室开放基金资助项目(JSKL2014K08)

作者简介: 谢伟(1983—), 男, 讲师, 硕士. 研究方向: 钢结构、特种结构及地表变形区建筑结构的加固与保护. E-mail: greax@163.com

* 通信联系人 E-mail: xjunw@163.com

采范围均已延伸到密集城市、村庄、道路和桥梁下。随着钢框架结构建筑在地表变形区的应用和发展,对钢结构抗地表变形性能的研究^[1-2]已逐渐得到重视。同时,填充墙体构件对于框架结构性能的影响是框架结构研究方向之一,国内外学者已针对其抗震性能展开研究并取得了一定的成就。文献[3]的试验结果表明在相同条件下,填充墙框架有更大的抗侧刚度、抗侧强度及更好的耗能能力和延性,其抗侧能力大于填充墙和框架各自的抗侧能力之和,结构性能远优于空腹框架。Amanat 等^[4]利用 3 维有限元模型及模态特征值分析方法对确定内填充墙钢筋混凝土框架自振周期的基本原理进行了研究。管克俭等^[5]完成钢框架-复合填充墙拟静力试验及相关连接节点试验,研究了这一体系的抗侧力性能。Moghadam 等^[6]通过试验及有限元建模对填充墙钢框架开裂强度进行了分析研究。刘玉姝等^[7]通过砌块填充墙钢框架结构与空框架结构的单调加载试验表明填充墙对钢框架结构的刚度与承载力有较大影响。Mohebkah 等^[8]采用 2 维 DEM 模型模拟单调荷载作用下单片开洞和不开洞填充墙的破坏仿真,研究了中心开洞对填充墙钢框架强度和刚度的影响。Perera^[9]基于对角线方向加载试件破坏机理的分析,认为填充墙的作用如同桁架系统中的对角压杆,在侧向水平力作用下,框架与填充墙之间的应力只在填充墙受压区边界互相传递,建议将填充墙的影响等效成斜撑,与框架共同抵抗侧向力。Smith^[10]在集中荷载作用下简支梁接触长度方程的基础上,推导出斜撑宽度与框架接触长度的关系,给出了填充墙对框架的相对刚度系数;许多学者在这一基础上,对等效斜撑的有效宽度进行大量的研究,给出不同等效斜撑有效宽度的计算表达式,等效斜撑有效宽度取决于填充墙与框架的相对刚度,并随相对刚度的减小而增大。Paulay 等^[11]建议相对刚度系数小于 4。Mondal 等^[12]基于单层、单跨 2 层及单跨 3 层有限元模型分析结果,提出不同开洞面积的等效斜撑宽度折减系数公式。杨红等^[13]在 OpenSees 平台上,采用基于柔度法的纤维模型模拟柱的双偏压非线性特征,采用等效对角斜支撑压杆模拟填充墙,对规则、对称钢筋混凝土典型空间框架在不同填充墙布置方式情况下进行罕遇地震下的非线性反应分析,研究了不同填充墙布置方式对框架非线性地震反应的影响。李建辉等^[14]结合填充墙震害,分析填充墙框架的失效机制,总结了国内外关于填充墙对框架结构承载力、变形、刚度等性能影响的最新研究成果,重点探讨了填充墙框架结构的计算模型,结合文献[15],给出

了框架填充墙抗震设计的相关建议。文献[16]通过对空腹和内嵌墙板的钢筋混凝土框架进行低周往复试验,分析了柔性连接的内嵌蜂巢夹芯墙板对框架结构抗震性能的影响规律。

关于填充墙对框架结构性能影响的研究仍以其结构抗侧刚度及其抗震性能等方面为主,但对结构抗地表变形性能影响的研究尚未深入开展。另外,涉及内嵌式墙板及墙-框刚性连接方式的研究也较少。因此,针对采用刚性点式连接的内嵌墙板钢框架展开抗地表变形性能研究,对完善和丰富钢结构性能理论研究方面具有重要意义,同时对地表变形区钢框架结构建筑物的新建、加固与保护也具有现实意义。

作者对是否带有墙板和底梁的 3 类钢框架结构试件进行地表不均匀沉降作用物理模拟试验,对比分析 3 类钢框架结构试件的结构响应,研究地表不均匀沉降作用下墙板及底梁对钢框架结构响应的影响规律,进而分析不均匀沉降下内嵌墙板-底梁-钢框架的协同工作性能。

1 试件设计

研究对象选择典型单层 2 跨钢框架结构,按照 1:3 缩比并适当调整试件梁柱截面,钢材等级 Q235,相关参数如表 1 所示。

表 1 框架试件参数

Tab. 1 Parameters of frame specimen

跨度/ mm	高度/ mm	柱截面/ (mm×mm× mm×mm)	梁截面/ (mm×mm× mm×mm)	基础尺寸/ (mm×mm×mm)
2 000	1 100	100×100×6×8	100×100×6×8	400×400×300

内嵌墙板采用新型蜂巢夹芯墙板,由面板(蒸汽加气混凝土-NALC 材料,厚 5 mm)和蜂窝状芯板(加工成蜂窝状的纸质材料,厚 90 mm)构成;面板和芯板之间通过特殊粘结剂连接形成复合整体,总厚度为 100 mm,如图 1 所示,墙板相关参数见表 2。焊接于框架梁柱上的卡板和夹板用以固定墙板,从而实现墙板与框架的连接^[17],墙板与框架之间的间隙控制在 1 mm,方便墙板安装的同时保证墙板与框架的连接可靠;从传力特性来讲,这是一种刚性点式连接的方式,如图 2 所示。

表 2 墙板参数

Tab. 2 Mechanics parameter of wallboard

面板厚 度/mm	芯板厚 度/mm	总厚度/ mm	极限应力 $\sigma_{\max}$ /kPa	极限应变 $\varepsilon_{\max}$	弹性模量 E/kPa
5	90	100	619.85	8.37	74.06

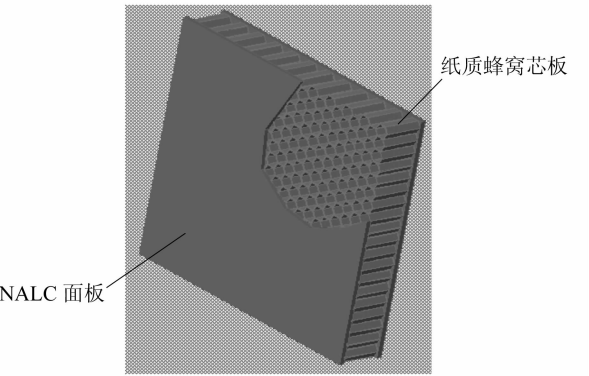


图1 蜂巢夹芯墙板

Fig.1 Honeycomb-sandwich wallboard

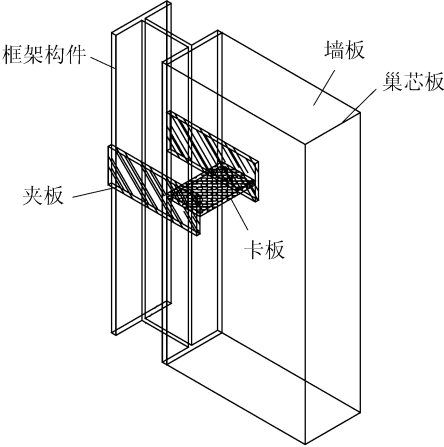


图2 墙板-框架构件的连接

Fig.2 Attachment of wallboard-frame

框架试件根据是否布置有底梁和墙板而分为3类,即开放式框架(编号 KFKj,无底梁未内嵌墙板)、封闭式框架(编号 FBKj,布置底梁未内嵌墙板)、内嵌墙板框架(编号 WAKj,布置底梁且内嵌墙板)。相较于钢框架的其他填充墙形式(如外挂式墙板、砌体填充墙),作者研究涉及的内嵌墙板及其连接方式具有整体性好、与框架协同工作程度高等特点。

2 试验装置及加载方案

试验在江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室地表变形试验台上进行,试验加载主要由固定荷载和地表变形作用2部分组成,加载装置示意图及试验现场照片见图3和4。其中,固定荷载包括梁上荷载及通过框架梁四分点二集中力加载的方式模拟楼板传递至梁上的荷载。另外,针对3类框架柱脚布置不同的集中荷载,用以消除3类框架因自重差异对试验结果带来的影响。地表不均匀沉降变形的加载方案为B柱基础固定,通过千斤顶使A柱基础向上升、C柱基础向下降,每级加载1mm。

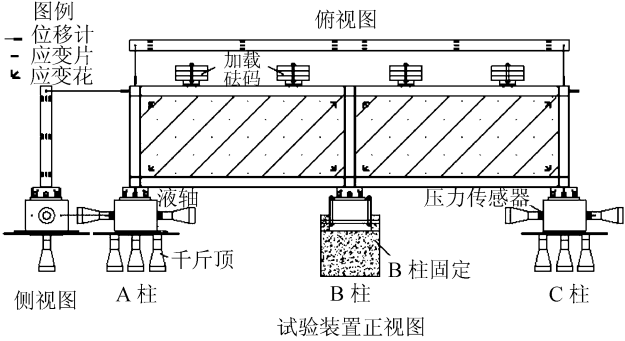


图3 抗变形试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of anti-deformation experiment equipment



图4 抗变形试验现场照片

Fig.4 Photograph of anti-deformation experiment

3 试验结果及分析

不均匀沉降变形的加载由位移控制,即对框架柱底基础施加的位移增量速率相同,但由于3类框架刚度的差异,每级位移变形量对应的框架实际作用力改变量不同。显然,相同位移增量下,上部框架刚度越大,框架上的每级作用力改变量越大。因此,不均匀沉降变形试验结果虽然是对应于相同位移加载速率下的结构响应,但对应于柱底基础作用力的变化情况,内嵌墙板框架柱底基础作用力变化速率最大,封闭式框架次之,开放式框架最小。因此,竖向变形试验下3类框架间响应随位移量变化速率的差异一定程度上受到基底作用力变化速率影响。

通过对3类框架分别进行试验加载,获得重要的结构响应随2个边柱间沉降差的变化规律,进而

对 3 类框架进行对比分析。

3.1 框架柱顶附加侧移分析

随着不均匀沉降变形的逐级加载,3 类框架均出现明显的倾斜现象,柱顶发生水平侧移。变形加载后期 3 类框架均出现 C 柱基底(沉降端)与加载板相互脱离的现象,这也与工程实际中因地表不均匀沉降导致建筑物在沉降量大的一侧出现基础与地基分离而悬空的现象一致,此时试验变形加载终止。当 C 柱基底与加载板脱离时,开放式框架、封闭式框架及内嵌墙板框架的边柱间最终沉降差分别为 24.22、17.06 和 10.65 mm。根据试验现象,地表不均匀沉降作用下,内嵌墙板框架更易出现大沉降端基础与地基分离悬空的现象,开放式框架则会随着地表变形出现更大柱底沉降差,封闭式框架则介于 2 者之间。当 C 柱基底与加载板脱离时,试验变形加载终止,试验得出框架柱顶的附加侧移随边柱间不均匀沉降差的变化规律如图 5 所示。

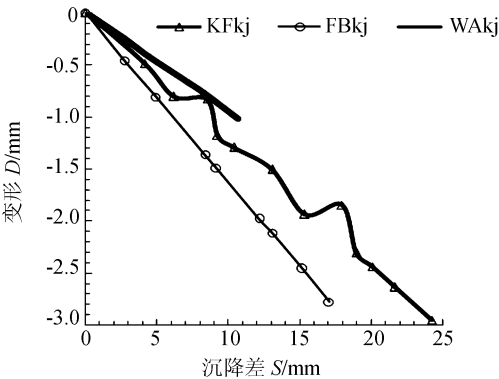


图 5 不均匀沉降变形 - 柱顶顶附加侧移
Fig. 5 Non-uniform settlement-additional deformation of column top

由图 5 可知,3 类框架柱顶附加侧移随不均匀沉降的变化基本呈线性增大的规律,将 3 条曲线作线性回归,结果见表 3。封闭式框架柱顶侧移随不均匀沉降变形的变化速率最大,开放式框架侧移变化速率次之,较前者减小 26%,内嵌墙板框架变化速率最小,较开放式框架减小 21%,较封闭式框架减小 41%。

表 3 边柱顶水平附加变形 D 随不均匀沉降差 S 线性回归公式
Tab. 3 Linear regression of column top additional deformation D-non-uniform settlement S

框架类型	开放式框架 (KFkj)	封闭式框架 (FBkj)	内嵌墙板框架 (WAKj)
回归公式	$D = -0.120\,2S + 0.014\,3$	$D = -0.161\,7S - 0.009\,4$	$D = -0.094\,7S + 0.005\,9$

3.2 框架柱附加应变分析

通过试验得到 3 类框架边柱底外侧翼缘、边柱

顶外侧翼缘附加应变随不均匀沉降变形的变化规律,见图 6。由图 6 可知,边柱外侧翼缘应变基本随不均匀沉降变形呈线性变化,得出其线性回归公式,见表 4。

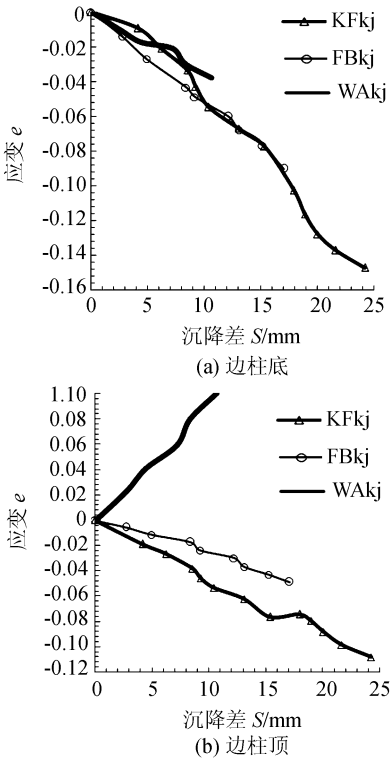


图 6 不均匀沉降 - 边柱外侧翼缘附加应变

Fig. 6 Non-uniform settlement-additional strain of side column outer-flank

表 4 边柱外侧翼缘附加应变 e 随不均匀沉降差 S 线性回归公式
Tab. 4 Linear regression of side column outer-flank additional strain e-non-uniform settlement S

应变位置	边柱底	边柱顶
开放式框架	$e = -0.006\,8S + 0.016\,2$	$e = -0.004\,4S - 0.002\,2$
封闭式框架	$e = -0.005\,6S + 0.002\,9$	$e = -0.002\,9S + 0.002\,5$
内嵌墙板框架	$e = -0.003\,5S + 0.000\,9$	$e = 0.009\,4S - 0.001\,6$

由图 6 和表 4 可知,不均匀沉降下,3 类框架柱底外侧翼缘附加应变变化规律差异不大,开放式框架柱底外侧翼缘附加应变变化速率最大,封闭式框架次之,较前者减小 18%,内嵌墙板框架最小,较封闭式框架减小 38%,较开放式框架减小 49%。3 类框架柱顶外侧翼缘附加应变随不均匀沉降的变化规律差异巨大,其中,开放式框架和封闭式框架的附加应变变化规律方向一致,后者变化速率较前者减小 34%,内嵌墙板框架柱顶外侧应变的变化规律与前 2 类框架相比,呈反方向的变化规律。根据试验结果,在不均匀沉降变形作用下,底梁和内嵌墙板对于边柱柱顶应变的影响较对边柱柱底的影响显著,且墙板的存在甚至

使柱顶外侧应变往反方向变化。

将边柱顶和边柱底 2 个部位的应变变化情况作横向对比可以发现,开放式框架和封闭式框架的规律一致,边柱底应变变化率略高于边柱顶应变变化率。内嵌墙板框架则较大幅度改变了边柱应变在不均匀沉降下的响应规律。

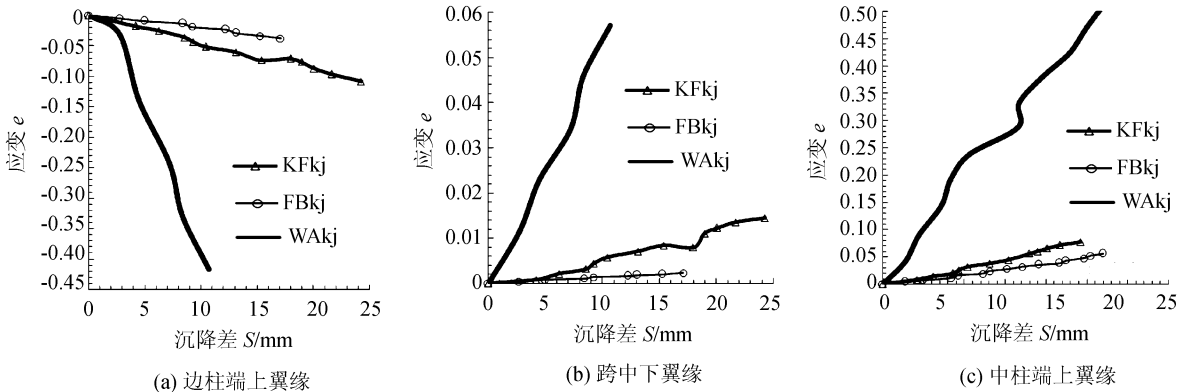


图 7 不均匀沉降 - 框架梁附加应变

Fig. 7 Non-uniform settlement-additional strain of frame girder

表 5 框架梁附加应变 e 随不均匀沉降差 S 线性回归公式

Tab. 5 Linear regression of frame girder additional strain e -non-uniform settlement S

应变位置	边柱端上翼缘	跨中下翼缘	中柱端上翼缘
开放式框架	$e = -0.0043S - 0.0009$	$e = 0.0006S - 0.0014$	$e = 0.0034S - 0.0056$
封闭式框架	$e = -0.0025S + 0.0039$	$e = 0.0001S + 0.0004$	$e = 0.0021S - 0.0033$
内嵌墙板框架	$e = -0.0338S + 0.0011$	$e = 0.0044S + 0.0038$	$e = 0.018S + 0.0158$

由图 7 和表 5 可知,内嵌墙板框架框架梁 3 个部位的附加应变随不均匀沉降的变化速率均明显大于另外 2 类框架,开放式框架梁应变变化速率略大于封闭式框架。其中,开放式框架和封闭式框架较内嵌墙板框架的减小率及封闭式框架较开放式框架的减小率情况见表 6。

表 6 框架梁附加应变变化率对比分析
Tab. 6 Contrastive analysis on rate of change of frame girder additional strain

应变位置	开放式框架	封闭式框架	封闭式框架
	较内嵌墙板 框架减小率/%	较开放式框 架减小率/%	较内嵌墙板 框架减小率/%
边柱端上翼缘	87	72	93
跨中下翼缘	86	83	98
中柱端上翼缘	81	38	88

从表 6 中框架梁 3 个部位的比较来看,框架梁跨中下翼缘附加应变变化率的改变率略大于梁端上翼缘附加应变变化率,这表明底梁和内嵌墙板的存在对框架梁跨中下翼缘附加应变的影响较对梁端上翼缘的影响略为显著。从框架梁附加应变变化率改

3.3 框架梁附加应变分析

试验得出 3 类框架框架梁边柱端上翼缘、框架梁跨中下翼缘及框架梁中柱端上翼缘附加应变随不均匀沉降变形的变化规律如图 7 所示。由图 7 可知,框架梁附加应变基本随不均匀沉降变形呈线性变化,由此得出相应规律曲线的线性回归公式如表 5 所示。

变的趋势来看,在不均匀沉降作用下,底梁的存在和内嵌墙板对于框架梁附加应变的影响趋势是相反的,其中,内嵌墙板的影响更为显著。

将框架梁 3 个部位的应变变化情况作横向对比可知,开放式框架和封闭式框架规律一致,梁端应变变化率远高于跨中应变变化率。内嵌墙板则较大幅度地改变了框架梁应变在不均匀沉降下的响应规律。

4 协同工作分析

如前所述,试验采用速率相同、由位移控制的加载方式,各级地表变形量相同的情况下,刚度最大的内嵌墙板框架受到的实际作用力最大,封闭框架次之,开放式框架则最小,因此,对应于相同的位移加载速率,框架试件柱底作用力变化速率随刚度的增大而增大。综上,试验反映了 3 类框架随位移变化速率的试验结果,也反映了基底作用力变化速率差异对构件的影响。

不均匀沉降作用下,框架柱顶发生附加侧移,该柱顶侧移主要由梁柱构件的变形和框架整体倾斜变形 2 部分构成,是 2 者叠加的结果。由开放式框架

构件应变变化规律知, 框架梁柱构件不同部位的变形对柱顶侧移贡献的大小排序为框架柱柱底 > 框架柱柱顶 > 框架梁边柱端 > 框架梁中柱端 > 框架梁跨中。增设底梁形成封闭式框架后, 虽一定程度降低梁柱构件的变形量, 但仍然呈现出其柱顶侧移变化率略高于开放式框架的试验现象, 这是由于增设底梁后加大了框架整体倾斜变形量, 从试验现象亦有展现。对于内嵌墙板框架, 一方面, 框架梁及底梁 3 个部位的应变随不均匀沉降的变化速率均有较大程度的提高, 这在一定程度上会增大柱顶侧移, 但贡献不大; 另一方面, 框架柱柱底应变减小, 同时柱顶应变方向改变, 则能较大程度地减小柱顶附加侧移。因此, 框架增设内嵌墙板后, 较大程度地改变了柱和梁内力分布情况, 使内嵌墙板框架由梁柱变形造成的柱顶附加侧移较封闭式框架和开放式框架有较大幅度的降低, 从而在叠加较大的整体倾斜变形量后, 其总的柱顶附加侧移变化率在 3 类框架中最小。概括来讲, 不均匀沉降作用下开放式框架构件变形最大, 封闭式框架次之, 内嵌墙板框架最小, 而框架整体倾斜变形的顺序则恰好相反, 构件变形和框架整体倾斜变形 2 个方面叠加后, 导致框架柱柱顶附加侧移变化率结果为封闭式框架略高于开放式框架, 内嵌墙板框架最小。

5 结 论

1) 地表不均匀沉降作用下, 框架柱顶侧移主要由梁柱构件的变形和框架整体倾斜变形 2 部分构成, 是 2 者叠加的结果。其中, 开放式框架构件变形最大, 封闭式框架次之, 内嵌墙板框架最小, 而框架整体倾斜变形的顺序则恰好相反; 2 方面叠加后, 最终封闭式框架的柱顶附加侧移变化速率略高于开放式框架, 内嵌墙板框架则最小, 但由于刚度差异, 最终的柱顶侧移量大小为开放式框架 > 封闭式框架 > 内嵌墙板框架。

2) 地表不均匀沉降作用下, 框架梁柱构件不同部位变形对柱顶侧移贡献的大小顺序为框架柱柱底 > 框架柱柱顶 > 框架梁边柱端 > 框架梁中柱端 > 框架梁跨中。

3) 地表不均匀沉降作用下, 框架柱底增设底梁, 能一定程度地减小框架构件变形量, 但同时其框架整体倾斜变形增大, 并不能有效降低框架柱顶侧移的增大速率, 甚至会使柱顶侧移增大速率有小幅增加。

4) 地表不均匀沉降作用下, 框架内嵌墙板后,

较大幅度改变了框架柱与框架梁的内力分布, 减小框架柱变形, 增大梁构件变形, 由于框架柱变形对柱顶侧移的影响显著, 能有效降低框架柱顶侧移的增大速率。

参考文献:

- [1] Xie Wei, Xia Junwu. Experimental study on co-operation of infilled wallboard-steel frame under ground deformation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(3): 169 - 171. [谢伟, 夏军武. 内嵌墙板 - 钢框架抗地表变形试验研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(3): 169 - 171.]
- [2] Xie Wei, Xia Junwu, Luo Zexin, et al. Influences of filler wall on effects of steel frame under surface deformation[J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2008, 8(1): 15 - 18. [谢伟, 夏军武, 骆泽新, 等. 填充墙对钢框架在地表变形下作用效应的影响[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2008, 8(1): 15 - 18.]
- [3] Shing P B, Mehrabi A B. Behavior and analysis of masonry-infilled frames[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, 4(3): 320 - 331.
- [4] Amanat K M, Hoque E. A rationale for determining the natural period of RC building frames having infill[J]. Engineering Structures, 2006, 28(4): 495 - 502.
- [5] Guan Kejian, Li Hanwu, Peng Shaomin. Experimental research on lateral resistant behavior of steel frame with cavity sandwich wall infill[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(3): 73 - 77. [管克俭, 李捍无, 彭少民. 空腔结构复合填充墙 - 钢框架抗侧力性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 73 - 77.]
- [6] Moghadam H A, Mohammadi M G, Ghaemian M. Experimental and analytical investigation into crack strength determination of infilled steel frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1341 - 1352.
- [7] Liu Yushu, Li Guoqiang. Experimental and theoretical research on lateral load resistance of steel frames with infilled walls[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 78 - 84. [刘玉姝, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 78 - 84.]

- [8] Mohebkah A, Tasnimi A A, Moghaddam H A. Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames using discrete element method[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(12): 1463–1472.
- [9] Perera R. Performance evaluation of masonry-infilled RC frames under cyclic loading based on damage mechanics [J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1278–1288.
- [10] Smith B S. Behavior of square infilled frames[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1966, 92(STI): 56–70.
- [11] Paulay T, Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2009.
- [12] Mondal G, Sudhir K J, Eeri M. Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(3): 701–723.
- [13] Yang Hong, Chen Jinke, Chen Yinsong, et al. Effects of infill walls on nonlinear seismic response characteristics of spatial frames[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(5): 38–46. [杨红, 陈进可, 陈银松. 填充墙对空间框架非线性地震反应特征的影响[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(5): 38–46.]
- [14] Li Jianhui, Xue Yantao, Wang Cuikun, et al. Research and development in seismic performance of infilled walls for frame structures[J]. Building Structure, 2011, 41(Sup 1): 12–17. [李建辉, 薛彦涛, 王翠坤, 等. 框架填充墙抗震性能的研究现状与发展[J]. 建筑结构学报, 2011, 41(增 1): 12–17.]
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] Xia Junwu, Xie Wei, Luo Zexin. Experimental study on frame seismic performance impacted by infilled wallboard [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(5): 89–92. [夏军武, 谢伟, 骆泽新. 内嵌墙板对框架抗震性能影响的试验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 89–92.]
- [17] 中国矿业大学. 钢结构建筑物抗震抗变形双重保护方法及结构: 中国, ZL200710020273. 2[P]. 2009.

(编辑 李铁楠)