

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.004

# 干砌填充墙框架结构抗侧性能及简化计算

林 坤<sup>1</sup>, 刘红军<sup>1</sup>, Totoev Yuri<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 深圳市城市与土木工程防灾减灾重点实验室, 深圳 518055;  
2. 纽卡斯尔大学 基础设施性能与可靠度中心, 澳大利亚纽卡斯尔 2308)

**摘要:**利用拟静力试验结果和有限元结果对干砌填充墙框架结构的受力机理进行分析。在充分考虑并联模型和等效斜支撑模型后,把钢筋混凝土框架及干砌填充墙抗侧力贡献单独分析,研究填充墙内砌块密度、摩擦系数及砌块层数等对结构抗侧力的影响。研究表明:1)平面应力单元及界面单元能够模拟干砌填充墙的受力性能。根据该模型,试验对应工况下,无浆填充墙框架最终失效由框架破坏产生;2)无浆填充墙抗侧力贡献主要源于内部砌块之间的相互摩擦力,且该抗侧力分为恒定段、加强段以及极限承载力3段;3)提出了无浆填充墙抗侧力分段公式并得到了试验及有限元结果的验证。

**关键词:**无浆填充墙框架结构;有限元分析;并联模型;等效斜撑模型;抗侧力

**中图分类号:**TU398.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0021-07

## Lateral Bearing Capacity and Simplified Equations of Dry-Stack In-filled Reinforcement Concrete Frame Structure

Lin Kun<sup>1</sup>, Liu Hongjun<sup>1</sup>, Totoev Yuri<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Key Lab of Urban & Civil Engineering Disaster Prevention & Reduction, Shenzhen 518055, P. R. China;  
2. Centre for Infrastructure Performance and Reliability, University of Newcastle, Callaghan NSW 2308, Australia)

**Abstract:** The mechanism and lateral bearing capacity of reinforcement concrete (RC) frame with dry-stack in-filled panel (DSIP) were investigated using quasi-static experiments and finite element models. According to the parallel model and equivalent strut model, the lateral bearing capacity of RC frame and DSIP were researched separately. Results show that: 1) The plain stress element and interface element are applicable in finite element (FE) model analysis. According to the FE model, the failure of RC frame with DSIP is caused by the damage of frame; 2) Lateral bearing capacity of DSIP is mainly from the friction between bricks in the panel, which can be divided into 3 stages: constant stage, increasing stage and ultimate stage; 3) Equations for lateral bearing capacity of DSIP were proposed and verified by FE model results.

**Key words:** dry-stack in-filled reinforcement concrete frame structure; finite element analysis; parallel model; equivalent strut model; bearing capacity

填充墙框架结构是中国常用的结构形式。该类  
型结构设计时通常采用框架承担全部结构荷载,填

充墙构件并不作为结构的一部分参与工作。历次震  
害调查表明,填充墙与框架结构之间相互作用,不但

收稿日期:2012-08-10

基金项目:国家自然科学基金(51178153);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0160)

作者简介:林坤(1984-),男,博士,主要从事结构振动与控制研究,(E-mail)linkun.hit@gmail.com。

刘红军(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)liuhongjun@hit.edu.cn。

改变了结构体系的强度以及设计时的刚度分布,使结构发生薄弱层破坏和扭转破坏;同时,填充墙的约束效应使框架发生短柱破坏,导致结构严重受损甚至出现倒塌<sup>[1-4]</sup>。文献[5-7]研究表明填充墙对框架具有明显的刚度增强作用,即使采用轻质材料如加气混凝土等砌筑填充墙,其结构刚度仍比纯框架结构高出 4~9 倍<sup>[8]</sup>。这表明了填充墙框架结构的刚度与填充墙材料无关,而主要受填充墙与框架之间的复杂相互作用以及填充墙内部受力机理的影响。

近年来,为提高框架结构内部填充墙的耗能能力,研究人员提出了新型的干砌填充墙框架结构<sup>[9]</sup>。该结构采用砌块无浆堆砌填充墙,利用砌块之间的相互摩擦作用消耗能量。为加强对该结构受力性能的分析,作者在澳大利亚纽卡斯尔大学基础设施性能与可靠度中心进行了一系列的拟静力面内荷载试验。试验得到了不同填充墙形式对应的力-位移滞回曲线、骨架曲线以及各自的破坏模式。试验结果表明,不同于传统砌体填充墙框架,新型结构中填充墙对框架整体结构的刚度增强作用很小。新型结构中填充墙抗侧能力主要源自砌块间的相互摩擦力,该摩擦力与框架对填充墙的约束状态有关。笔者利用纯框架及干砌填充墙面内拟静力试验得到填充墙对应的力-位移曲线,结合有限元数值仿真,从受力机理层面对干砌填充墙抗侧能力进行分析。探讨了影响抗侧能力及结构刚度的因素,提出结构整体水平抗侧能力计算方法并提出简化公式,为该类型结构的设计及分析提供参考。

## 1 试验研究和有限元分析

### 1.1 试验简介

为了考察填充墙对框架的影响,分别建立了纯框架、干砌填充框架进行拟静力试验。试验装置如图 1 所示,具体试验过程及结果见参考文献[9]。填充墙上端与连梁之间初始状态下有 1 mm 的非均匀缝隙。首先对结构施加 0.3 MPa 的恒定竖向压力<sup>[10]</sup>,然后采用位移控制进行反复加载。为保证钢筋混凝土框架始终处于弹性工作阶段,在对纯框架进行加载时,加载位移最大值为 10 mm;对于填充墙框架,加载位移最大值为 16 mm。试验得到测点 P1 的力-位移滞回曲线如图 2 所示。可以发现纯框架的滞回曲线具有良好的对称性;干砌填充墙框架的滞回曲线具有明显的非对称性,这是由于填充墙上端与连梁之间初始缝隙不均匀造成的。利用力-位移滞回曲线,得到各自对应的骨架曲线(图 3)并结合有限元仿真进行分析。

	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
底梁	2 370	32 000	21.8	2.93
柱	2 280	25 000	23.6	2.34
顶梁-楼板	2 350	33 000	24.1	3.30
砌块	2 250	26 365	28.5	3.25

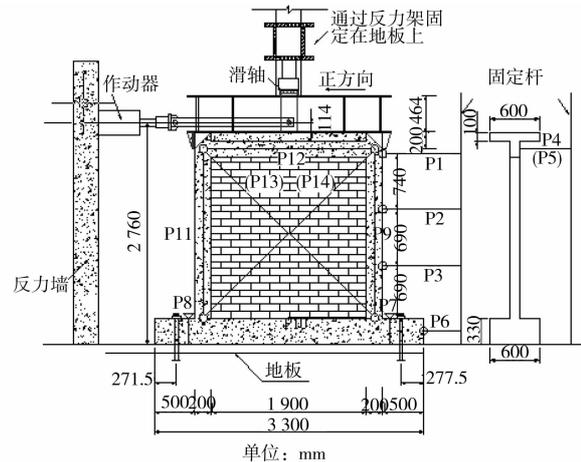


图 1 拟静力试验加载装置

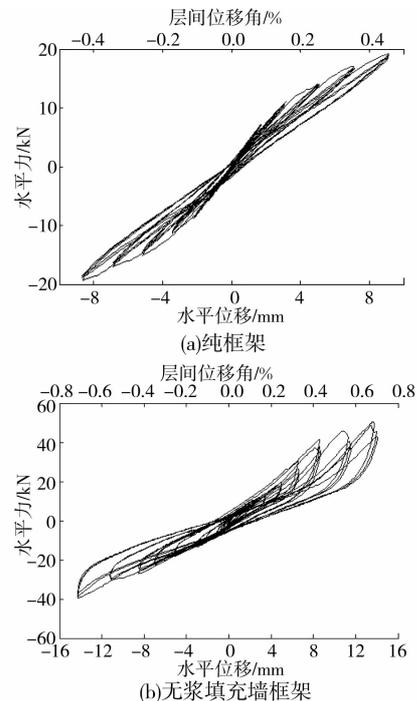


图 2 试验滞回曲线

### 1.2 有限元仿真及对比

采用 DIANA 有限元软件对试验建立细观模型。混凝土框架和砌块都采用平面应力单元,砌块之间的连接以及框架及填充墙之间的连接采用界面单元,如图 4(a)所示。采用 8 节点连续单元 CQ16M 模拟砌块,6 节点零厚度界面单元 CL12I 模拟接缝。

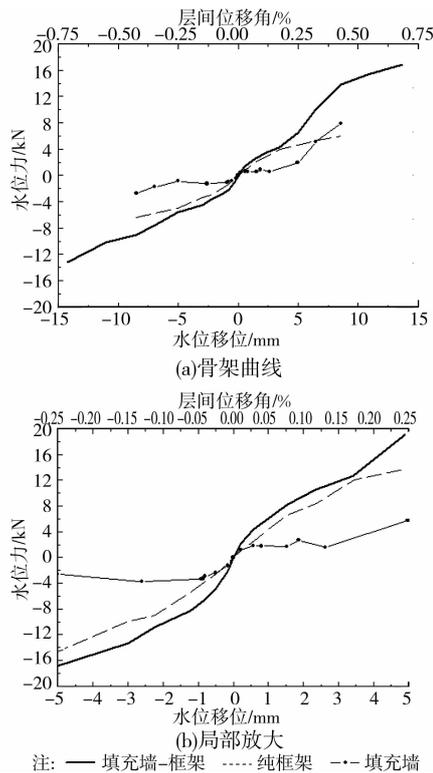
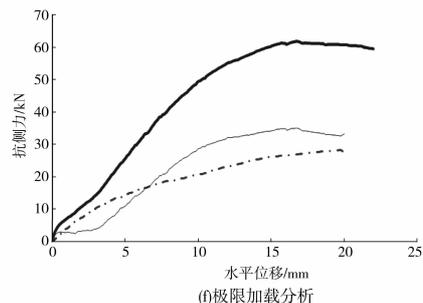
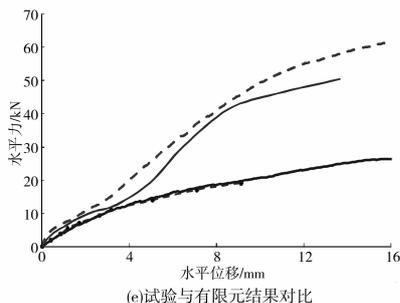
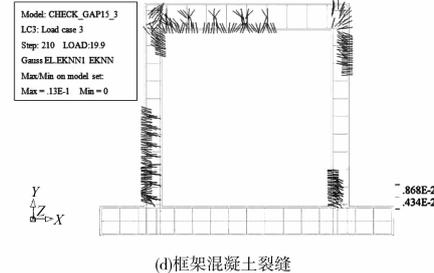
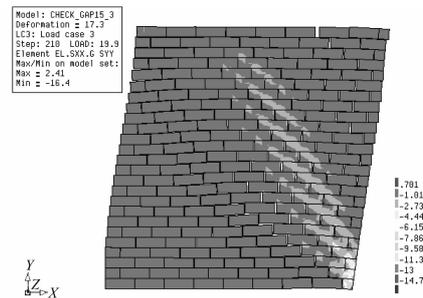
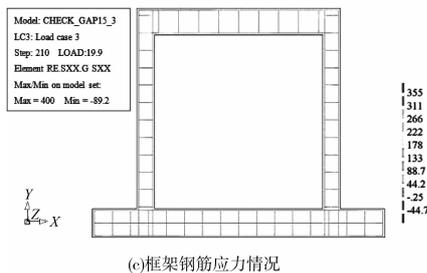
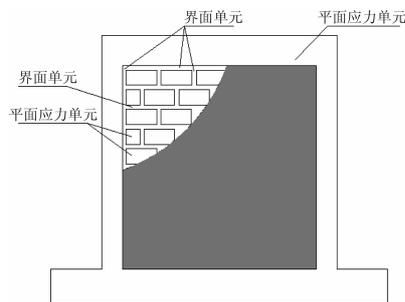


图 3 干砌体填充墙骨架曲线



注: ●-● 纯框架试验结果    — 干砌填充墙框架试验结果  
 — 纯框架有限元结果    - - - 干砌填充墙框架有限元结果  
 — 填充墙抗侧力贡献

图 4 有限元模型分析

因为试验过程中,砌块几乎未发生破坏,因此材料特性采用弹性,弹性模量 26 365 MPa,密度为 2 250 kg · m<sup>-3</sup>,泊松比为 0.2。界面单元材料特性采用理想塑性摩尔-库仑摩擦准则,初始粘结力为 0,摩擦系数为 0.5。图 4(e)所示为有限元模型计算的测点 1 的水平位移和试验结果的对比。结果表明,该有限元模型能够准确地模拟纯框架及干砌填充墙框架的受力特性。在对干砌填充墙框架进行加载时,结构最大侧向位移仅为 14 mm(图 2(b)),此时试验框架并未发生最终破坏。因此,为全面考察无浆填充墙框架的力学性能,有必要采用有限元模型对其进行极限承载力分析。

根据有限元模型结果,无浆填充墙框架极限承载力为 62 kN,对应的水平位移为 17 mm。图 4(b)所示为水平位移 20 mm 时无浆填充墙内部压应力分布情况。此时填充墙内部压应力最大值为 16.4 MPa,远低于砌块抗压强度;而框架中钢筋进入塑性阶段以及混凝土表面出现的大量裂缝是结构整体刚度降低的根本原因,如图 4(c)、4(d)所示。因此该结构的最终承载力取决于框架,而非填充墙砌块。

对比观察骨架曲线(图 3),可以发现无浆填充墙对于框架初始割线刚度影响不大,仅为纯框架状态时的 2 倍多;同时,在规范<sup>[11]</sup>规定的框架结构弹性工作阶段( $\alpha \leq 0.18\%$ ),无浆填充墙与纯框架的割线刚度几乎相同;结合有限元结果进行分析(图 4(f)),即使结构达到极限荷载,填充墙框架的刚度也仅为纯框架的 2 倍左右。无浆填充墙对框架刚度的增强作用之小,是由于其自身结构的受力特性引起的。

## 2 干砌填充墙结构抗侧理论分析

研究人员通过大量试验及理论分析,得到了填充墙框架结构 5 种不同的破坏模式及其所对应的受力机理<sup>[7, 12-15]</sup>。其中,弱砂浆和强框架的组合结构容易发生填充墙内部剪切滑移破坏,该类型填充墙框架的整体抗侧能力可以通过纯框架与填充墙的抗侧力线性相加得到,下文称之为并联模型。试验中填充墙内部砌块之间仅依靠摩擦力相互联系,适合采用并联模型对其抗侧能力进行分析。

### 2.1 纯框架抗侧

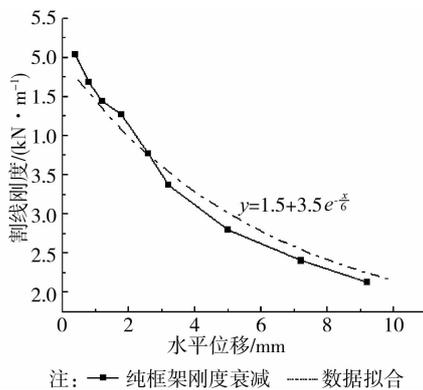


图 5 纯框架刚度衰减

试验表明,纯框架的抗侧刚度随加载幅值的增大而逐渐衰减,利用试验和有限元结果对该衰减刚度进行拟合可得:

$$K_b(d) = 1.5 + 3.5e^{-\frac{d}{6}}$$

其中, $d$ 为纯框架的实时侧向位移,单位 mm。则纯框架的抗侧能力  $F_s = K_b(d) \cdot \Delta_d$ 。

根据该拟合公式得到的纯框架初始刚度为 5 kN/mm。纯框架结构的初始刚度可以采用  $D$  值法求得  $K_0 = 5.183$  kN/mm,与拟合公式得到的值吻合。

由图 4(e)、4(f)可以看到,随着加载的不断增大,纯框架刚度逐渐衰减,根据有限元结果当  $d > d_{peak}$  时,纯框架进入塑性,承载力几乎保持不变。

### 2.2 填充墙抗侧

采用试验得到的结果,在位移相同的情况下,将

结构整体的承载力减去纯框架的承载力,即可得到干砌填充墙在拟静力试验中的抗侧能力贡献,如图 3 所示。结合图 4(f)可以看出:在小角位移阶段内,填充墙抗侧力贡献几乎保持恒定;随侧向位移的增加,填充墙抗侧力贡献呈加大的趋势,但增长趋于平缓。因此,填充墙抗侧贡献可以分为 3 个部分:初始恒定抗侧力阶段、抗侧力加强阶段和抗侧力极限阶段。干砌填充墙的抗侧受力模型如图 6 所示。

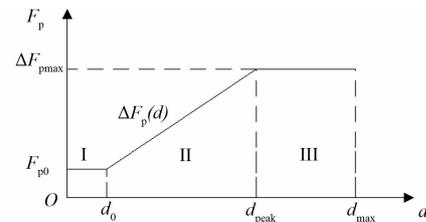


图 6 干砌填充墙抗侧力模型

将干砌填充墙对于框架的抗侧力贡献用式(1)表示:

$$F_p = \begin{cases} F_{p0} & d \leq d_0 \\ F_{p0} + \Delta F_p(d) & d_0 \leq d \leq d_{peak} \\ F_{p0} + \Delta F_{pmax} & d_{peak} < d \end{cases} \quad (1)$$

其中: $F_{p0}$ 为填充墙第 1 阶段抗侧力,初始恒定抗侧力; $\Delta F_p(d)$ 为填充墙第 2 阶段抗侧力增量,即抗侧力加强段增量; $\Delta F_{pmax}$ 为填充墙第 3 阶段抗侧力增量,即抗侧力极限段增量。

在第 1 阶段,填充墙上端与框架无接触,填充墙内部压应力全部由砌块自重引起。为定量分析填充墙抗侧能力与干砌块摩擦力之间的关系,做如下假定:1)砌块全部发生滑动;2)砌体各层之间的摩擦系数  $\mu$  相等。实际工程中,由于施工工艺及砌块质量等因素的影响,理想情况很难存在,因此引入参数  $\alpha$ ,考虑这些因素引起的“摩擦力损失”,称之为摩擦力折减系数。

将最上层砌块滑动时产生的摩擦力看做  $f_1$ ,因为砌块叠加堆砌,各层受到的正压力自上而下递增,从顶层算起,第  $i$  层砌块产生的摩擦力为  $f_i$ ,填充墙与框架之间力的相互作用可以简化为图 7(a)。则填充墙的抗侧能力  $F_{p0}$  等于 A 端的杆端剪力  $Q_{A0}$ ,即:

$$F_{p0} = Q_{A0} = -\frac{3}{10}\alpha \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

式中, $F_{p0}$ 为填充墙初始抗侧力; $n$ 为填充墙砌块层数; $f_i$ 为第  $i$  层砌块受到的摩擦力, $f_i = i \cdot f_1$ ; $\alpha$ 为填充墙内部摩擦力折减系数。

$$|F_{p0}| = \frac{3}{10}\alpha \frac{n(n+1)}{2} f_1 = \frac{3}{20} \alpha n(n+1) f_1 \quad (3)$$

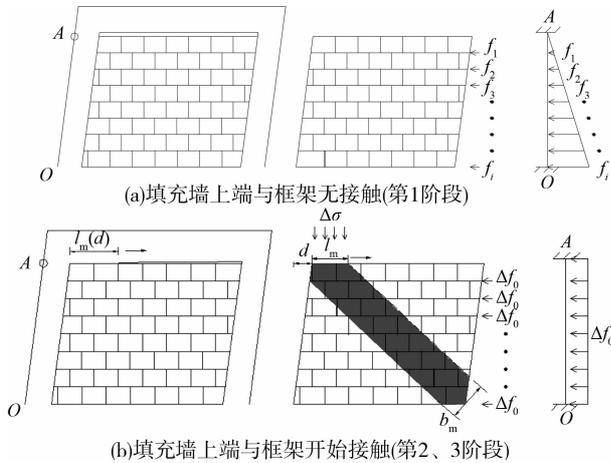


图 7 干砌填充墙抗侧力机理示意图

第 2 阶段随着侧向位移的增加,填充墙与框架逐渐接触,框架的套箍作用使得填充墙内部压应力增加,一方面在填充墙内部形成等效斜支撑(如图 7(b));另一方面使填充墙发生竖向变形(如图 8)。

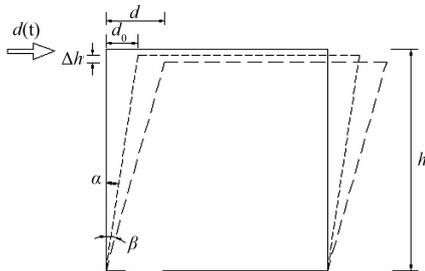


图 8 无浆填充墙受压示意图

填充墙与框架之间的接触,使得填充墙内部产生对角受压区,该受压区宽度可以按照斜支撑模型<sup>[16]</sup>进行求解。

$$b_m = \begin{cases} 0.175(\lambda h)^{-0.4} d_m & \lambda h < 5 \\ 0.16(\lambda h)^{-0.3} d_m & \lambda h > 5 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\lambda = \left[ \frac{E_{mas} t \sin 2\theta}{4E_c I_c h} \right]^{\frac{1}{4}}$ ,  $l_m = b_m \cos \theta$ ,  $b_m$  为对角受压区宽度,如图 7(b)所示;  $h$  为填充墙高度;  $d_m$  为填充墙对角长度;  $t$  为填充墙厚度;  $l_m$  为填充墙与框架接触的线长度;  $\theta$  为填充墙对角线与水平方向的夹角;  $E_{mas}$  为填充墙弹性模量;  $E_c$  为框架柱的弹性模量;  $I_c$  为框架柱的转动惯量。

填充墙内部竖向压应力的增量可以由填充墙墙体受压计算得到。如图 8 所示。侧向加载使得框架柱发生旋转,从而引起的填充墙竖向位移:

$$\Delta h(d) = h \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  是框架和填充墙初始接触时框架的转角,  $\alpha_0 = (d_0/h)$ ;  $\beta$  是框架实时转角,  $\beta = (d/h)$ 。

填充墙内部竖向压应变

$$\Delta \epsilon(d) = \frac{\Delta h(d)}{h} = \cos \frac{d_0}{h} - \cos \frac{d}{h} \quad (6)$$

竖向压应力

$$\Delta \sigma(d) = E_{mas} \cdot (\cos \frac{d_0}{h} - \cos \frac{d}{h}) \quad (7)$$

此时框架和填充墙相互作用的受力机理如图 7(b)所示。

单层砌块抗侧力增量

$$\Delta f_0(d) = \mu \cdot \Delta N = \mu \cdot \Delta \sigma(d) \cdot t \cdot l_m \quad (8)$$

式中,  $\Delta \sigma(d)$  为填充墙受到的压力增量,随侧向加载的增加而变化。

填充墙整体抗侧能力:

$$\Delta F_p(d) = \Delta Q'_{AO} = - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta f_i}{2} = \frac{n \cdot \Delta f_0(d)}{2} \quad (9)$$

将式(7)、式(8)代入(9),得到

$$|\Delta F_p(d)| = \frac{\eta \mu t E_{mas} b_m}{2} (\cos \frac{d_0}{h} - \cos \frac{d}{h}) \cos \theta \quad (10)$$

第 3 阶段随着侧向位移的进一步加大,混凝土框架不断发生破坏,最终在梁柱结合处首先出现塑性铰。该塑性铰的出现使得应力重分布,填充墙内部压应力不再随侧向荷载的增加而变大,填充墙保持其恒定抗侧能力贡献。即填充墙框架的极限抗侧能力由钢筋混凝土框架的特性决定。此时填充墙的抗侧力可以参照式(11)计算:

$$|\Delta F_{pmax}| = \frac{\eta \mu t E_{mas} b_m}{2} (\cos \frac{d_0}{h} - \cos \frac{d_{peak}}{h}) \cos \theta \quad (11)$$

### 3 分段公式验证

利用试验工况中的各项材料参数,确定式(1)所需要的各项参数,并进行验证。

在第 1 阶段,由图 3 可以看到,试验中墙体实际表现出的抗侧力  $F_{p0}$  约为 2.2 kN。试验中单个砌块的平均质量为 4.622 kg,而每层砌块由 8.25 块砌块组成,共有 25 层,砌块间摩擦系数  $\mu = 0.66$ ,则单层砌块重力  $G_{layer} = 4.622 \times 8.25 \times 9.8 = 373.69$  N;

顶层砌块产生的摩擦力  $f_1 = \mu G_{layer} = 0.25$  kN。

将上面各参数代入式(3)可以得到

$$\alpha = \frac{20 |F_{p0}|}{3n(n+1)f_1} = \frac{20 \times 2.2}{3 \times 25 \times 26 \times 0.25} = 0.09$$

可以看出,在对于砌填充墙利用砌块间摩擦力进行计算分析时需要考虑折减系数,试验工况下,摩擦力折减系数  $\alpha$  为 9%。分析该折减系数产生的原因主要有:

1) 在框架受力过程中,仅有部分砌块层发生了相对滑动;

2) 由于填充墙左右两侧都有框架的约束,当受到侧向位移时,砌块难免发生平面内的转动,从而减小了砌块间接触面积。

第 2 阶段,将表 1 中各参数代入式(10),得到

$$|\Delta F_p(d)| = 1\,421.6 \times \left( \cos \frac{3}{2\,100} - \cos \frac{d}{2\,100} \right) \times$$

$10^3 \text{ kN}$

第 3 阶段,通过数值仿真结果可以看到,最大抗

侧力对应的侧向加载  $d_{\text{peak}} = 15 \text{ mm}$ 。在该侧向加载下,钢筋混凝土框架发生了破坏,顶角位置出现了裂缝,并出现塑性铰。此时继续加载框架承载力不发生变化。将该最大侧向位移  $d = 0.015 \text{ m}$  代入式(11),可以得到第 3 阶段填充墙的抗侧力贡献:

$$|\Delta F_{p\text{max}}| = 1\,421.6 \times \left( \cos \frac{3}{2\,100} - \cos \frac{15}{2\,100} \right) \times 10^3 = 34.8 \text{ kN}$$

与数值仿真得到的结果 35 kN 吻合度高。

将上述利用分段公式得到的无浆填充墙抗侧力与纯框架抗侧力进行相加,得到无浆填充墙框架力-位移曲线如图 9 所示,该曲线与有限元结果吻合良好,表明该分段计算公式能有效地对干砌填充墙框架结构抗侧力进行求解。

表 2 试验各项参数

柱				梁				填充墙				等效支撑			
$h_c/$ m	$E_c/$ MPa	$I_c/$ $\text{m}^4$	$i_c/$ $(\text{MPa} \cdot \text{m}^3)$	$l_b/$ m	$E_b/$ MPa	$I_b/$ $\text{m}^4$	$i_b/$ $(\text{MPa} \cdot \text{m}^3)$	$d_m/$ m	$t/$ m	$E_m/$ MPa	$I_m/$ $(\text{MPa} \cdot \text{m}^3)$	$\lambda$	$\lambda h_c$	$b_m$	$\mu$
2.1	250 00	0.00 008	0.95	2.1	330 00	0.001 83	28.74	2.97	0.113	7702	0.31	2.68	5.634	0.28	0.66

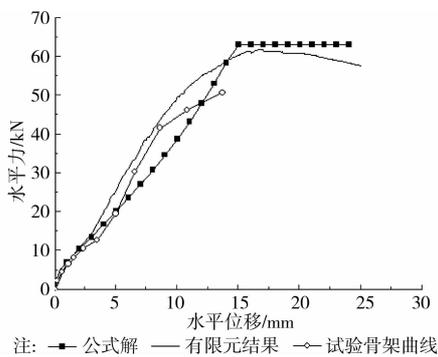


图 9 分段公式解与试验、有限元结果对比

## 4 结 论

利用干砌填充墙框架拟静力试验结果,结合填充墙框架斜支撑模型及并联模型,对干砌填充墙框架结构的受力机理进行分析,研究了填充墙的抗侧贡献,给出了试验对应下填充墙框架抗侧力简化计算公式。

1) 采用并联模型的方法对干砌填充墙框架进行了抗侧力分析。分别考虑框架及填充墙的抗侧贡献,着重分析了填充墙的抗侧力产生机理,将填充墙的抗侧力贡献分为 3 个部分,指出填充墙与框架之间的相互作用对于结构的整体性能以及受力具有重要影响。

2) 对试验进行了有限元分析,结果表明平面应

力单元及界面单元能够有效模拟干砌填充墙框架分段受力特性,所得到的力-位移滞回曲线与试验骨架曲线吻合良好;利用该模型进行了极限加载分析,在试验对应的工况下结构最终失效的原因是由混凝土框架的破坏造成的。

3) 提出干砌填充墙框架抗侧力简化计算公式,并利用试验结果进行算例分析。公式计算结果与有限元结果吻合良好,验证了该计算公式在框架弹性工作阶段的准确性。

## 参考文献:

- [1] Zhao B, Taucer F, Rossetto T. Field investigation on the performance of building structures during the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake in China [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(8): 1707-1723.
- [2] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 等. 框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(6): 67-76.  
Ye L P, Lu X Z, Zhao S C, et al. Seismic collapse resistance of RC frame structures; Case studies on seismic damages of several RC frame structures under extreme ground motion in Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(6): 67-76.
- [3] 张敏政. 从汶川地震看抗震设防和抗震设计[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(5): 21-24.  
Zhang M Z. Reflection on the seismic fortification and

- design in light of the Wenchuan Earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 21-24.
- [4] 清华大学土木工程结构专家组, 西南交通大学土木工程结构专家组, 北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.  
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on building seismic damage in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [5] Hashemi A, Mosalam K M. Shake table experiment on one-story rc structure with and without masonry infill [J]. Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, 2006, 66: 411-426.
- [6] 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.  
Liu Y S, Li G Q. Experimental and theoretical research on lateral load resistance of steel frames with in-filled walls [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 78-84.
- [7] Madan A, Reinhorn A M, Mander J B, et al. Modeling of masonry infill panels for structural analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(10): 1295-1302.
- [8] 万超. 填充墙对 RC 框架结构抗震性能的影响及对策研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [9] 林坤, 刘红军, TOTOEV Y. 无浆填充墙框架拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 119-127.  
Lin K, Liu H J, Totoev Y. Quasi-static experimental research on dry-stack masonry infill panel frame [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 119-127.
- [10] 中国建筑标准设计研究院. 06G112 建筑结构设计常用数据[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [11] 住房和城乡建设部. 建筑结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] Mosalam K M, White R N, Gergely P. Static response of in-filled frames using quasi-static experimentation [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(11): 1462-1469.
- [13] El-dakhkhni W W, Elgaaly M, Hamid A A. Three-strut model for concrete masonry-in-filled steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 177-185.
- [14] Shing P B, Mehrabi A B. Behaviour and analysis of masonry-in-filled frames [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, 4(3): 320-331.
- [15] 张富文, 吕西林. 框架结构不同倒塌模式的数值模拟与分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 119-125.  
Zhang F W, Lyu X L. Numerical simulation and analysis of different collapse patterns for RC frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 119-125.
- [16] ASCE. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [DB/OL]. Federal emergency management agency. Nov 2000 [2011-05-12]. <http://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>

(编辑 郭 飞)