

具有不同构造措施的砌体填充墙框架 结构性能的非线性有限元模拟

杨亮,唐兴荣

(苏州科技学院 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要:采用 ABAQUS 软件中非线性分析常用实体单元 C3D8R 模拟混凝土框架和砌体填充墙、杆单元 T3D2 模拟钢筋、弹簧单元 SPRING4 模拟框架和填充墙体的连接,建立了有限元非线性分析模型。对 1 榀裸框架结构模型和 4 榀具有不同构造措施的砌体填充墙框架结构模型的性能进行了非线性有限元模拟,并与试验结果进行了比较。分析表明,理论值与试验值符合较好,说明建立的有限元分析模型可以较好地模拟砌体填充墙框架结构的性能,为进一步分析这种结构的性能提供基础。

关键词:砌体填充墙;框架结构;有限元模拟;非线性;构造措施

中图分类号:TU375.4 TU398.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2010)02-0055-06

填充墙框架结构具有良好的经济性和适应性,并且建筑平面布置灵活。因此,填充墙框架结构今后仍将是我国应用最广泛的一种建筑结构形式。填充墙框架作为一种组合结构体系,框架与填充墙在水平地震作用下共同承担地震作用。填充墙对框架结构的刚度、承载力和变形性能等有较大的影响。为了探讨侧向荷载作用下填充墙框架结构的刚度效应和约束效应、刚度和强度退化规律等性能,国内外开展了有关的试验研究工作。但国内外大都对实心黏土砖填充墙框架结构整体抗震性能进行研究,而对新型砌体(如:混凝土空心砌块、粉煤灰砌块、加气混凝土砌块等)填充墙框架抗震性能的研究相对较少,仅有的研究也主要集中于砌体填充墙异型柱框架和砌体填充墙钢筋框架方面。本课题组进行了 4 榀具有不同构造措施的砌体填充墙框架结构模型和 1 榀裸框架结构模型的对比试验,以探索设置拉结钢筋、构造柱、水平系梁等构造措施下砌体填充墙框架结构的抗震性能和刚度退化规律的研究。

目前国内外对砌体填充墙钢筋混凝土框架结构的有限元分析不多,主要是采用 ANSYS 有限元技术对填充墙钢筋框架结构进行分析。ABAQUS 是

大型通用的有限元分析软件,在结构分析领域的应用趋于广泛。本文探索采用 ABAQUS 大型通用有限元分析软件,建立分析砌体填充墙钢筋混凝土框架结构的有限元非线性分析模型。对 4 榀各种不同构造措施的砌体填充墙框架结构模型的性能进行了非线性有限元分析,并与试验结果进行了比较。分析表明,理论值与试验值符合较好,说明本文建立的有限元分析模型可以较好地模拟砌体填充墙框架结构的性能。

1 填充墙框架结构有限元模型参数确定方法

1.1 ABAQUS 混凝土本构模型理论与参数的选取

在混凝土结构的数值分析中,本构模型的选取对其非线性分析有重大的影响。ABAQUS 中自带的描述混凝土材料的本构模型共有 3 种^[1]:混凝土弥散裂缝模型(Concrete smeared cracking)、混凝土脆性开裂模型(Cracking model for concrete)和混凝土损伤塑性模型(Concrete damaged plasticity)。其中,弥散模型和损伤塑性模型可用于隐式分析,开裂模型和损伤塑性模型可用于显式分析。

收稿日期:2010-04-30

作者简介:杨亮(1984-),男,河南焦作人,硕士生,主要研究方向为混凝土与组合结构理论及其应用。

本文采用的混凝土本构模型采用两者均适用的损伤塑性模型。该模型采用各向同性弹性损伤结合各向同性拉伸和压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性行为,能够模拟混凝土在各种荷载类型下的拉伸开裂和压缩破碎形态,并且可以考虑拉压损伤,在这一方面损伤塑性模型优于弥散模型。

混凝土塑性损伤模型中,首先需要确定如下的一些参数^[2]: (1) Dilation angle: $p - q$ 平面上高围压下的剪胀角,缺省值为 38° 。(2) Eccentricity: 偏移量参数 ϵ , 缺省值为 0.1。它表明材料在很大的围压范围内,材料几乎具有相同的剪胀角,增加 ϵ 值,流动势曲率更大,这意味着随着围压的降低,膨胀角迅速增加。在低围压作用下,若 ϵ 值小很多,可能导致计算收敛困难。

(3) f_{bo}/f_{co} 混凝土双轴受压与单轴受压极限强度比,缺省值为 1.16。

(4) K : 拉伸子午面和压缩子午面上的第二应力不变量之比,该值在 $[0.5, 1.0]$ 之间,缺省值为 $2/3$ 。实验结果表明,对于混凝土 K_c 可以近似为一常数^[3]。

(5) Viscosity parameter: 粘滞系数 μ 。在混凝土隐式积分计算中,材料模型的软化与刚度退化会导致严重的收敛困难,通常的处理方法是对材料本构方程进行粘性修正,使材料软化段的连续切线刚度在足够小的增量步内为正值。 μ 越大,结构越刚硬; μ 越小,计算效率很低,容易出现收敛问题^[3]。

混凝土损伤塑性模型采用非相关联塑性流动法则,第一、二个参数为流动势函数的参数,本文采用缺省值。第三、四个参数由于缺乏试验数据,本文均采用系统缺省值。最后一个参数,本文经过反复试算,取 0.009。

1.2 混凝土本构关系的选取

本文中选用的混凝土本构关系是《混凝土结构设计规范》所建议的曲线,其应力应变关系可由下面函数表达式定义^[4]。

受压时:

$$\begin{cases} y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x}, x > 1 \\ x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}, y = \frac{\sigma}{f_{ck}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, α_a, α_d 分别为单轴受压应力应变曲线上上升段、下降段的参数值,本文为 C30 混凝土,分别取

$$\alpha_a = 2.15, \alpha_d = 0.74$$

受拉时:

$$\begin{cases} y = 1.2x - 0.2x^6, x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}, x > 1 \\ x = \frac{\epsilon}{\epsilon_t}, y = \frac{\sigma}{f_{tk}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_t 为单轴受拉应力应变曲线上上升段、下降段的参数值,本文为 C30 混凝土,取 $\alpha_t = 0.25$ 。

由于混凝土损伤塑性模型采用的是等向强化模型,混凝土弹性阶段的 E_0 取受拉开裂时的割线模量作为混凝土的初始弹性模量,本文取为 $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比根据规范推荐值,取 0.2。

1.3 混凝土损伤因子 d_c, d_t 的选取

由于混凝土损伤塑性模型是依据 Lubliner, Lee 和 Fenves 提出的损伤塑性模型确定的,它假定混凝土材料主要因拉伸开裂和压缩破碎而破坏。当混凝土从应力应变关系曲线的软化段上卸载时,曲线曲率减小,表明材料的弹性刚度发生了损伤。弹性刚度的损伤可通过两个损伤变量 d_c 和 d_t 来进行考虑。

在规范提供的混凝土应力应变关系的基础上,可按下列式求得损伤因子的数值^[5]:

$$d_k = \frac{(1 - \beta) \bar{\epsilon}^{-in} E_0}{\alpha_k + (1 + \beta) \bar{\epsilon}^{-in} E_0}, (k = t, c) \quad (3)$$

式中, t, c 分别为拉伸和压缩; β 为塑性应变与非弹性应变的比例系数,受压时取 0.35 ~ 0.7; 受拉时取 0.5 ~ 0.95; $\bar{\epsilon}^{-in}$ 为混凝土拉压情况下的非弹性应变, $\bar{\epsilon}^{-in} = \epsilon - \epsilon_0^e = \epsilon - \sigma_c/E_0$ 。

1.4 钢筋本构关系的选取

本文钢筋本构关系采用强化的二折线模型,无刚度退化。折线第一上升段的斜率,为钢筋本身的弹性模量 E_s , 第二上升段钢筋强化段,此段弹性模量取为 $0.01 E_s$ 。

1.5 砌块本构关系的选取

Turnsek 和 Cacovic 根据试验结果,提出了抛物线型的砌体本构关系表达式,此本构为光滑曲线,具有上升段和下降段,适用于非线性有限元分析。故本文采用 Turnsek 提出的多项式型本构^[6]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = 6.4 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 5.4 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1.17} \quad (4)$$

式中, ϵ_0 为混凝土砌体峰值应变,同济大学获得

砖的峰值应变 ε_0 在 0.001 ~ 0.0015 之间,极限应变在 0.0011 ~ 0.0023 范围内,此处取混凝土砌块的 $\varepsilon_0 = 0.001$; σ_{max} 为混凝土砌体的峰值应力,由混凝土砌体的材性试验确定。

2 砌体填充墙框架结构有限元模型的建立

2.1 选择单元类型与划分网格

混凝土单元类型采用八节点减缩积分三维实体单元 (C3D8R)。采用该单元对位移的求解结果较精确,在网格发生扭曲变形时分析精度不会受到大的影响,并且在弯曲荷载下不容易发生剪切自锁^[1]。钢筋单元采用三维桁架线性单元 (T3D2)。网格划分时,本文中所有的部件均划分为尺寸为 0.05 m 的单元。

2.2 钢筋与混凝土界面

对于钢筋混凝土,ABAQUS 中混凝土的加强筋可以用两种方法施加:

- (1) 在混凝土单元中定义 Rebar 材料性质;
- (2) 采用一维应变杆单元,用 Embedded 命令将钢筋层嵌入到混凝土单元中,类似钢筋混凝土组合式有限元模型,这样可在后处理中看到钢

筋的受力情况^[7]。本文采用后者,将钢筋单元嵌入到混凝土单元中去,不考虑钢筋和混凝土之间的滑移。

2.3 砌体墙和框架的连接

砌体墙和框架的连接采用特殊设置中的弹簧 (Spring) 来模拟。砌体墙与框架梁、柱之间采用非线性弹簧,与地面采用接地弹簧来模拟。其中,砌体墙与框架采用非线性弹簧 (Spring A),并假设弹簧的主要承受压力,受压刚度为 1.0×10^4 N/mm; 接地弹簧 (Spring 1) 的受压刚度为 5.0×10^3 N/mm。

3 填充墙框架结构的有限元分析

3.1 试件概况

为了验证按上述方法建立的非线性有限元模型对砌体填充墙框架结构进行非线性有限元分析的可行性,采用 5 个试验试件 (GPF-0、GPF-1、GPF-2、GPF-3、GPF-4) 作为验证对象。其中,GPF-0 为裸框架模型,GPF-1 为整体砌体填充墙框架模型、GPF-2、GPF-3 和 GPF-4 分别为带构造柱、水平系梁以及同时设置构造柱和水平系梁的砌体填充墙框架结构模型,如图 1 所示。

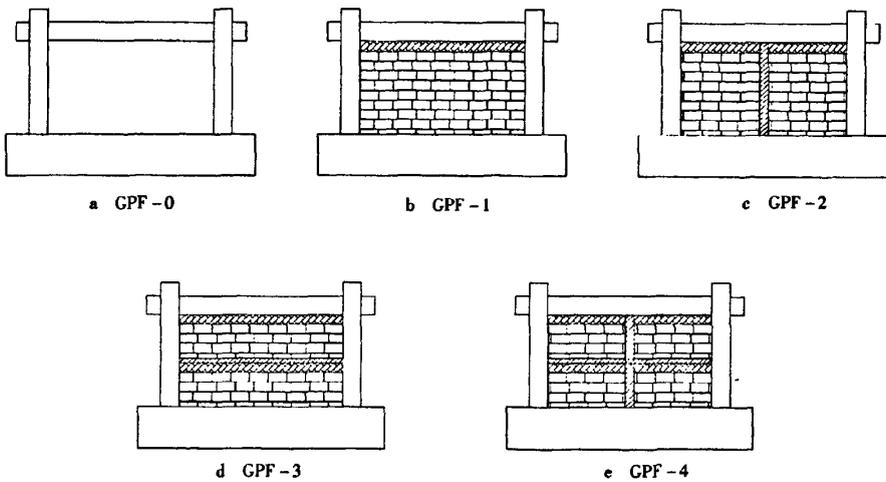


图 1 试件示意图

Fig.1 Sketch of specimens

砌块采用蒸压轻质加气混凝土砌块 (ALC 砌块),另外搭配部分配砖共同砌筑。ALC 砌块切割后规格为 200 mm × 100 mm × 100 mm,配砖规格为 190 mm × 100 mm × 50 mm。实测砌体抗压强度平均值为 1.928 N/mm²。

框架的混凝土设计强度等级 C30,实测混凝土立方体抗压强度 33.38 N/mm²。框架梁柱纵向受力钢筋采用 HRB400 级,箍筋采用 HPB235 级,实测钢筋材料性能见表 1。

表 1 实测钢筋材料性能

Table 1 Measured properties of reinforcement

类型	型号	屈服强度 f_y	极限强度 f_u
		N/mm ²	N/mm ²
HPB235	A6	566.2	744.9
HRB400	C10	380.0	590.0
HRB400	C12	420.0	573.0

钢筋混凝土框架试件的截面尺寸及配筋见图 2, 框架柱的轴压比取 0.21。

3.2 有限元模型与边界条件及荷载

边界条件: 将框架柱底部完全固结, 约束底面所有节点的自由度, 然后在柱的顶面施加均布面压力, 梁端施加水平荷载。

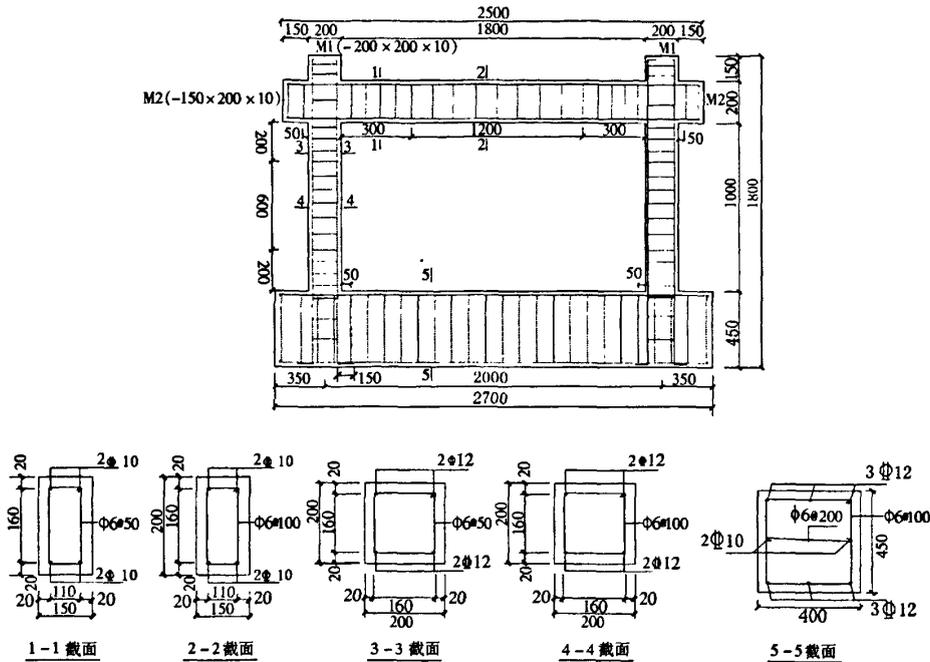


图 2 框架截面尺寸和配筋

Fig. 2 Sketch of section dimension and reinforcement

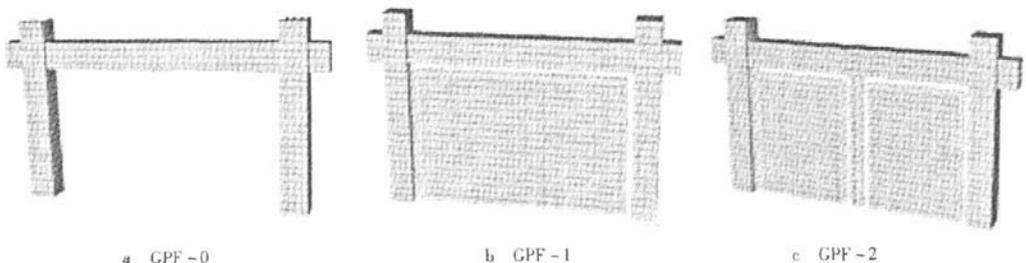
施加荷载: 荷载分两步施加: 第一步, 施加竖向力。将竖向均布荷载平均分布到柱顶表面, 当荷载达到设计的轴压比值时, 保持荷载值不变。第二步, 施加水平荷载。采用位移加载的方式, 对框架梁侧面施加水平位移荷载。为了防止局部破坏以及更方便的提取计算结果, 将框架梁的侧面耦合到轴心点上, 然后将水平位移荷载施加到这

个关键点上。

采用前述的建模方法, 最终得到填充墙框架的有限元模型, 如图 3 所示。

3.3 有限元分析结果

采用上述建立的非线性有限元模型, 分析 5 个试件的荷载 - 位移曲线。图 4 分别给出了各个试件荷载 - 位移曲线与试验实测的荷载 - 位移曲



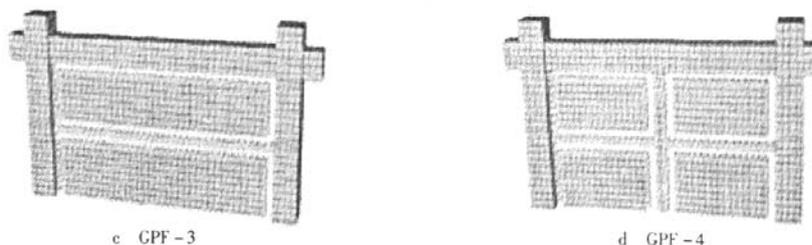


图3 各个试件的有限元模型
Fig.3 Finite element model of specimens

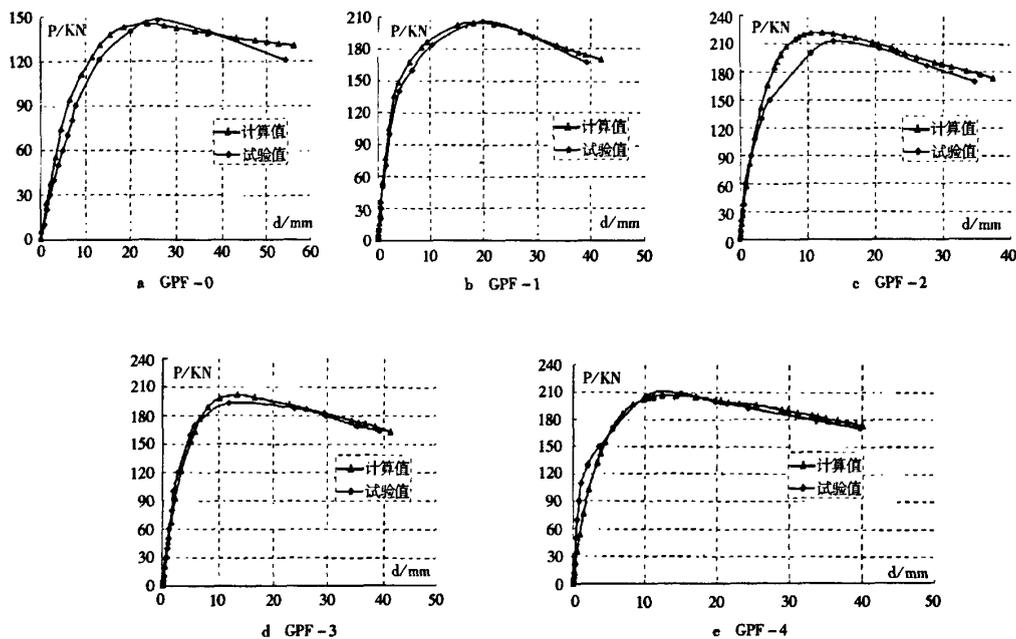


图4 各个试件荷载-位移曲线的计算值与试验值
Fig.4 Computed results and test results of load-displacement curve

线的比较。各试件各个阶段的荷载与位移计算值与试验值进行列表比较见表2。

由图4和表2可以看出:

(1) 采用 ABAQUS 有限元模拟的荷载-位移曲线整体趋势与试验所得曲线基本一致,且各阶段吻合较好。因此,基于 ABAQUS 软件,本文建立的有限元分析模型可较好地模拟砌体填充墙框架结构的性能。

(2) 各试件的峰值荷载计算值与试验值比值的平均值 1.011, 均方差 0.019, 这表明采用非线性有限元分析得到的峰值荷载的计算值与试验值吻合较好。

4 结论

通过有限元非线性分析可以得到以下结论:

(1) 采用 ABAQUS 的混凝土塑性损伤模型计算得到的荷载-位移曲线整体趋势与试验所得曲线基本一致,总体吻合较好,说明采用本文的有限元计算值和实际试验值吻合较好,能够为进一步分析提供依据。

(2) 采用 ABAQUS 软件计算得到的试件各阶段的承载力及对应位移计算值与试验值比较接近,且误差较小。

表 2 各试件计算值与试验值比较
Table 2 Comparison of computed results with test results

试件编号	屈服荷载点		峰值荷载点		极限荷载点		
	P_y/kN	δ_y/mm	P_m/kN	δ_m/mm	P_u/kN	δ_u/mm	
GPF-0	计算值	123.92	11.85	145.17	23.66	131.04	56.20
	试验值	127.69	15.58	148.00	25.86	125.80	50.02
	误差值	3.04%	31.48%	1.95%	9.23%	4.00%	11.00%
GPF-1	计算值	172.27	6.76	204.94	18.21	174.20	39.61
	试验值	172.28	8.48	206.24	19.85	175.30	33.97
	误差值	0.006%	25.44%	0.63%	9.01%	0.63%	14.24%
GPF-2	计算值	190.80	5.44	221.95	12.15	188.66	29.62
	试验值	171.84	7.02	213.00	13.80	181.05	29.20
	误差值	9.94%	29.04%	4.03%	13.58%	4.03%	1.42%
GPF-3	计算值	174.48	6.49	201.56	13.39	171.33	36.83
	试验值	169.79	5.73	193.00	11.82	164.05	36.99
	误差值	2.69%	11.71%	4.25%	11.73%	4.25%	0.43%
GPF-4	计算值	176.82	6.06	206.89	12.44	175.86	38.78
	试验值	169.07	5.09	209.00	14.98	177.65	34.70
	误差值	4.38%	16.01%	1.02%	20.42%	1.02%	10.52%

参考文献:

- [1] 庄茁,张帆. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] ABAQUS Analysis User's Manual[M]. ABAQUS, Inc, 2006.
- [3] 雷拓,钱江,刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. 结构工程师. 2008, 24(2): 22-27.
- [4] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [5] 张劲,王庆扬,胡守营,等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构. 2008, 38(8): 127-128.
- [6] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2005.
- [7] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.

Nonlinear Finite Element Simulation of Masonry - Infilled RC Frame Structure with Different Measures

YANG Liang, TANG Xing-rong

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Jiangsu Suzhou 215011, China)

Abstract: Non-linear finite element analysis model is established by using ABAQUS software, reinforced concrete frame and masonry infill panels are simulated by solid element C3D8R, reinforcement is simulated by truss element T3D2, the connection of reinforced concrete frame and masonry infill walls is simulated by spring element SPRINGA. Behavior of 1 reinforced concrete frame and 4 masonry filled reinforced concrete frames with different measures are simulated by using nonlinear finite element analysis, besides the analytical results were compared with the experimental results. Analysis showed that the theoretical values are in good agreement with experimental values, behavior of reinforced concrete frame with masonry infill panels can be simulated by using finite element analysis model proposed in this paper. The basis is provided for further analysis the performance of this structure.

Keywords: masonry filler wall; frame structure; finite element simulation; nonlinear; construction measures

(责任编辑:沈建新;校对:张英健)