

构造柱混凝土免拆模板的力学及应用性能研究

马新伟,李 胜,郭泽琛,段建平

(哈尔滨工业大学(威海)土木工程系,山东 威海 264209)

摘要 目的 对于构造柱中的混凝土免拆模板进行力学性能研究,分析其与传统施工方式下构造柱在抗震性能方面的区别,为免拆模板的工程应用提供理论依据. 方法 先制备自密实细石混凝土,制备出混凝土试件,通过试验测得其各项力学性能;通过 ABAQUS 有限元模拟的方式,对两种施工方式所形成的构造柱在水平地震作用下的应力云图、层间位移及危险点处的应力应变曲线等指标进行对比分析. 结果 对两种有限元模型施加水平方向的地震动作用时,新型施工方式构造柱的应力分布与传统构造柱非常相似,其差值可控制在 10% 以内;层间位移均满足规范要求,差距可控制在 12% 以内;危险点处的应力及应变曲线也非常接近,两者抗震性能相似. 结论 新型构造柱通过提高免拆模板表面粗糙度进而提高与后浇混凝土的粘结性能后,其抗震性能有望与传统构造柱相当,满足安全要求.

关键词 免拆模板;有限元模拟;混凝土构造柱;自密实混凝土

中图分类号 TU745.5 文献标志码 A

Mechanical Properties and Application of Permanent Formwork for Concrete Constructional Columns

MA Xinwei, LI Sheng, GUO Zechen, DUAN Jianping

(Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, China, 264209)

Abstract: In this paper, the mechanical properties of the permanent used in structural columns are studied, and the difference in seismic performance between the formwork and the traditional construction method is analyzed, which provides a theoretical basis for the engineering application of the permanent formwork. Firstly, the self-compacted concrete is prepared, and the mechanical properties of the concrete are measured by experiments. Based on the finite element software of ABAQUS, the stress contour plot, interlayer displacements and stress-strain curves of the two constructional columns were analyzed when they bear the same horizontal seismic action. The stress distribution of the new type of constructional column is very similar to that of the traditional construction column, and the difference can be controlled within 10%. The interlayer displacement meets the requirements of the code, and the difference can be controlled within 12%. The curves of

收稿日期:2018-11-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51378158);山东省自然科学基金面上项目(ZR2016EEM24)

作者简介:马新伟(1969—),男,副教授,博士,主要从事无机非金属材料及施工技术等方面研究.

stress and strain at danger point are very close. All of those can prove that their seismic performance is similar. The anti-seismic behavior of the new type of constructional column is expected to be comparable to that of the traditional ones by improving the surface roughness and then improving the bonding performance with concrete, which can meet the safety requirements.

Key words: permanent formwork; finite element analysis; constructional column; self-compacted concrete

构造柱是指为了提高建筑物的整体性和墙体的稳定性,在建筑物墙体中设置的并且与上下主体结构连接的构造性附加柱,是砌体结构的一部分。目前,构造柱在高层及多层民用建筑中被普遍采用。构造柱不用于承受竖向荷载,而是承受由地震引起的水平荷载,可有效提高砌体建筑的抗震性能。现行工艺施工时,先留出构造柱的空间,待墙体稳定后在墙体两侧支设模板,浇筑混凝土,然后拆除模板。模板的支设、拆除操作需要花费较多的人工、材料费用。同时,由于需要待墙体稳定方能进行构造柱施工,工期相对较长。

自20世纪50年代起,国内外对免拆模板进行了一定的研究。德国首先提出采用钢筋混凝土材料来制作免拆模板^[1]。1960年前后,日本采用高强水泥砂浆和高强钢丝网研发出一种预制永久性模板^[2],模板内侧被加工成凹凸面,进而增大新老混凝土间的粘结^[3],此类模板广泛应用于实际工程中。20世纪80年代,北美及欧洲地区,开始把压型薄壁钢板材料作为永久免拆模板^[4]。1990年,德国学者 Hinman 和 Murray 提出利用纤维增强复合材料(FRP)制作永久性模板材料^[5-6]。2016年,加拿大学者 Havez A A 和 Wahab N 对聚氯乙烯(PVC)塑料制作的免拆模板性能进行了研究,该类模板面与面间设置了抗剪连接件,在PVC永久模板内插入钢筋笼并浇筑混凝土^[7]。我国对免拆模板的研究起步较晚,1999年吴文清等^[8]提出钢丝网混凝土模板,钢丝网细粒混凝土是一种广义意义上的纤维混凝土。2000年张巨松^[9]对纤维增强复合材料(FRP)免拆模板进行了试验研究,研究表明FRP免拆模板可与后浇混

凝土共同受力。2012年王彤^[10]通过对玻璃纤维增强混凝土(GRC)制成的免拆模板叠合梁的试验,对模板与后浇混凝土之间的粘结性能以及GRC免拆模板梁的力学性能进行了研究,并对所用水泥基复合材料配合比进行了优选,王浩宇等^[11]也对该类模板进行了一定的研究。2005年钟咏梅提出了一种钢丝网活性粉末混凝土(RPC)免拆模板,2014年王钧^[12]等对钢纤维RPC免拆柱模板进行了进一步的研究。

纵观国内外关于免拆模板的研究状况,永久性免拆模板的研究相比之前有了很大进步,尤其适合用在一些外形复杂、不易支模的结构中。但免拆模板的施工工艺仍处于研究、试验阶段,并没有相关的规范。基于此,笔者提出一种用于构造柱施工的“免拆模板”,从免拆模板的制备入手,分析模拟免拆模板用于构造柱时对墙体抗震性能所造成的影响,以期对该免拆模板用于实际工程奠定基础。

1 自密实混凝土配合比设计

1.1 配合比设计及适配调整

试验采用P.O42.5普通硅酸盐水泥;细石骨料,最大粒径10mm;普通河砂,细度模数2.7;矿渣粉为S95级,性能满足规范要求;外加剂1为高效减水剂,外加剂2为羧甲基纤维素钠。参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)及《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T283—2012)推荐的方法进行配合比设计,结合实际试配情况进行微调,确定C30大流态混凝土的配合比(见表1)。

表1 混凝土配合比

Table 1 Mixture proportion of self-compacted concrete

材料	体积质量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
粗骨料	800.0
细骨料	789.5
水泥	276.5
粉煤灰	138.3
矿粉	46.1
水	198.2
外加剂1	4.6
外加剂2	2.3

1.2 免拆模板的制备

试验检测指标主要为现浇混凝土的立方体抗压强度、流动性指标及泌水指标,检测混凝土是否满足安全性及使用要求.其中流动性指标主要由坍落扩展度表示.为检测材料性能,按上述配合比进行了3组平行试验,试件所测得数据根据《混凝土强度检验评定标准》(GB50107—2010)进行处理.新拌混凝土的坍落扩展度平均值为560 mm,立方体抗压强度平均值38 MPa,泌水情况略有.强度及和易性等方面均已达标,能够满足施工要求,各项工作性能均表现良好.

免拆模板采用平法成型.将制备好的混凝土分两次浇筑到模具中,第一层浇筑厚度5 mm,充分捣实并摊平后,放入尺寸相当的耐碱玻璃纤维网以增强够拆模板的抗弯曲性能.第二层浇筑厚度15 mm,充分捣实后用木抹子抹平.抹平面为未来与后浇混凝土的接触面.

2 材料粘结力学性能测试

2.1 材料粘结试验

免拆模板与后浇混凝土间的粘结性能是决定免拆模板能否用于工程的关键因素.制备免拆模板的混凝土强度等级不低于构造柱本身,只要二者充分结合,最终形成的构造柱性能将与传统一次成型的构造柱相当.为了利用有限元软件分析对比两者的抗震性能,

需要首先通过试验测得免拆模板与后浇入的混凝土间的粘结性能.

为方便试验测试与强度计算,将试件做成两种尺寸的工字型构件,分别测试新旧混凝土间的粘结抗拉强度与粘结抗剪强度,试件如图1所示.

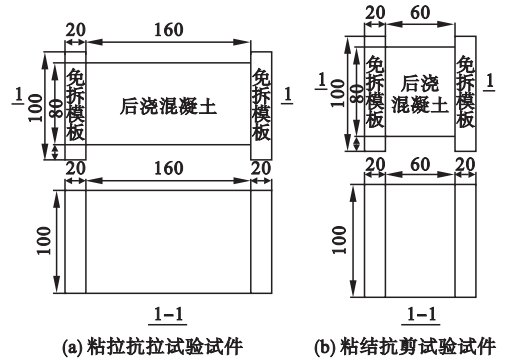


图1 用于粘结性能试验的试件示意图

Fig. 1 Specimens for bond performance test

把预制好的免拆模板按图1所示的尺寸锯切成方块,得到工字型构件两端的正方形端板,端板内表面的状态直接影响粘结性能.选择三种表面状态,分别为原始表面、钢刷刷毛表面和人工凿毛表面.之后在以免拆模板为端板的模具中浇筑混凝土,充分振捣完成后养护.为了减小试验误差,每测一个指标制备3个试件,试验结果取平均值.分别测试免拆模板与混凝土之间的粘结抗剪强度和粘结抗拉强度.破坏后的试件如图2所示.

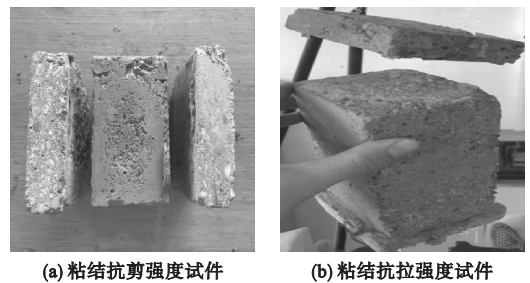


图2 破坏后的粘结性能试件

Fig. 2 The broken specimens for bond performance test

试验采用分级加载的方式,分为预加载-卸荷-连续加载三个步骤.预加载是为了使夹具与试件充分接触.在有一定示值后,

即停止加载,并通过卸载使示值归零.最后连续加载时,缓慢加载直到试件粘结破坏.无论是抗剪还是抗拉试验中,初期荷载与变形均近似呈线性关系.抗拉试件破坏时,破坏面即为后浇混凝土与端板的接触面;抗剪试件破坏时,会有后浇混凝土粘结在端板上.接触面粗糙度对其粘结性尤其是粘结抗剪强度有一定影响.

2.2 粘结试验结果及分析对比

试验检测指标主要为试件的粘结抗拉及粘结抗剪强度,通过比较不同表面处理方式下新旧混凝土的粘结性能以得到较好的处理方式.并将较好处理方式的粘结性能结果经过处理后带入软件中进行有限元分析.试验结果显示,免拆模板为原始表面和钢刷刷毛表面时,与混凝土的粘结性能相近,粘结强度略高于人工凿毛法处理的表面.三种表面与混凝土的粘结抗拉强度均不低于 0.9 MPa,是同强度混凝土抗拉强度的 45% ~ 50%;粘结抗剪强度均不低于 2.6 MPa,约为整体现浇混凝土抗剪强度的 80%.

试验结果表明,免拆模板与后浇混凝土之间的粘结强度相对较小,在实际应用时应采取一定措施提高免拆模板表面粗糙度,提高粘结强度.依据本次试验结果,在计算分析

中,免拆模板与后浇混凝土的粘结抗剪强度取 2.5 MPa,粘结抗拉强度取 0.9 MPa.

3 ABAQUS 有限元软件模拟及结果分析

3.1 有限元建模

3.1.1 模型创建及装配

笔者采用 ABAQUS 自带的建模功能进行建模^[13].为还原建筑物遭遇地震时构造柱起到的抗震作用,取一含构造柱的完整墙体作为结构模型,由左右结构柱,上下结构梁,中部构造柱及两个砌体墙片组成,均采用三维实体模型,钢筋骨架采用 wire 模型.建立两个有限元模型:一为传统施工方式下整体现浇构造柱的墙体模型(模型一);二为新型施工方式免拆模板构造柱的墙体模型(模型二).

两种模型的主要差异为构造柱的组成不同,模型一的构造柱为混凝土泵送现浇而成的整体;模型二的构造柱两侧为免拆模板,中部为现浇混凝土,两者粘结形成整体免拆模板成为构造柱的一部分.此外模型各部件中均含有钢筋笼,参考国家规范予以设置,钢筋保护层均为 20 mm.模型参数见表 2,根据表中参数将各构件依据结构的实际情况进行合理组装.

表 2 模型参数

Table 2 Modeling parameters

构件名称	长 × 宽 × 高/mm	材料	配筋
构造柱	320 × 200 × 3 000	C30 混凝土	纵筋 4Φ12 箍筋 Φ8@400 柱端箍筋加密
结构柱	400 × 400 × 3 000	C30 混凝土	纵筋 4Φ25 箍筋 Φ8@150
结构梁	400 × 400 × 6 000	C30 混凝土	纵筋 6Φ25 箍筋 Φ8@150
砌体墙片	3 000 × 200 × 3 000	MU5 砌块	无配筋
		M(b)5 砂浆	无配筋
免拆模板	320 × 25 × 200	C30 混凝土	无配筋
	200 × 25 × 200	含纤维加强层	无配筋

3.1.2 混凝土本构关系

混凝土是由多种材料共同组成的一种复合材料,具有很强的材料非线性,其本构关系难以被明确确定.笔者采用 ABAQUS 自带的

损伤塑性模型^[14].混凝土在受力变形过程中会产生自身损伤,使得在到达塑性段时仅仅考虑塑性理论已不能真实反映材料的本构特性,因此选择塑性损伤模型,尽可能地还原混

混凝土受力时的情况. 笔者采用的本构关系与文献[15]中的损伤因子计算方法相近, 应力-应变曲线存在曲线下降段, 应力超过峰值后, 卸载存在刚度退化现象, 这是由于混凝土材料内部存在微小裂缝(损伤)造成.

采用 ABAQUS 损伤塑性模型建立材料

属性进行计算时, 需要输入材料的相关塑性指标、受压、受拉应力-应变曲线, 以及损伤因子-非弹性应变曲线. 可以结合《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)提供的应力-应变曲线(见图3), 并根据能量等效原理计算所需参数. 其本构方程按规范确定.

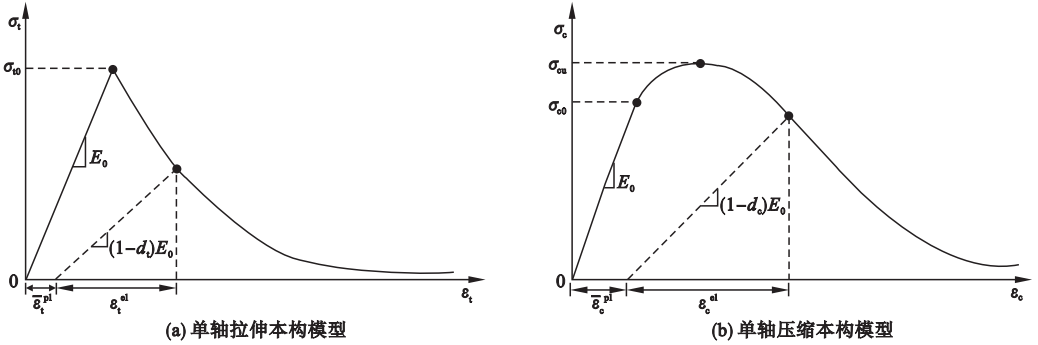


图3 混凝土单轴拉伸和压缩本构模型

Fig. 3 Single-axis tensile and compressing constitutive model of concrete

应力作用在损伤材料产生的弹性余能与作用在无损伤材料上的弹性余能形式相同, 用等效应力替代应力, 可推导出损伤因子表达式^[15].

单轴受压时:

当 $x \leq 1$ 时:

$$d = 1 - \sqrt{k_c [\alpha_a + (3 - 2\alpha_a)x + (\alpha_a - 2)x^2]}. \quad (1)$$

当 $x > 1$ 时:

$$d = 1 - \sqrt{\frac{k_c}{[\alpha_d(x - 1)^2 + x]}}. \quad (2)$$

单轴受拉时:

当 $x \leq 1$ 时:

$$d = 1 - \sqrt{k_t (1.2 - 0.2x^5)}. \quad (3)$$

当 $x > 1$ 时:

$$d = 1 - \sqrt{\frac{k_t}{[\alpha_t(x - 1)^{1.7} + x]}}. \quad (4)$$

式中: k_c 、 k_t 为无量纲参数, $k_c = f_c^* / (\epsilon_c E_0)$, $k_t = f_t^* / (\epsilon_t E_0)$; 参数 α_a 、 α_d 、 α_t 参见《混凝土结构设计规范》(GB500010—2010); α_a 、 α_d 分别为单轴受压应力-应变上升段、下降段的参数值; f_c^* 为混凝土的单轴抗压强度,

MPa; ϵ_c 为与 f_c^* 相应的混凝土峰值压应变; α_t 为单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值; f_t^* 为混凝土的单轴抗拉强度, MPa; ϵ_t 为与 f_t^* 相应的混凝土峰值拉应变.

3.1.3 钢筋本构关系

钢筋在受力过程中会经历弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和下降段五个阶段, 本次研究采用的 Q235 普通碳素结构钢有明显的屈服平台和强化段. 有限元模拟钢材的本构模型时将钢筋视为一种理想的弹塑性模型, 应力-应变关系如图4所示.

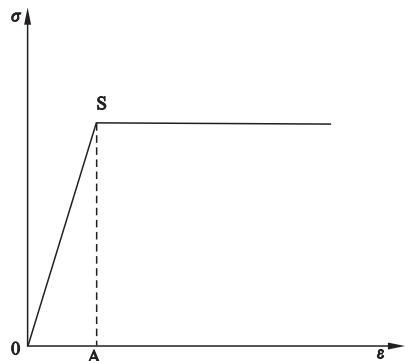


图4 钢材理想弹塑性应力-应变关系

Fig. 4 Ideal elastic-plastic stress-strain relationship for steel

图中 S 点对应材料的屈服强度值,曲线终点对应极限抗拉强度值。S 点之前材料未达到屈服,钢筋为线弹性材料,S 点后认为钢筋完全塑性。本次计算取材料弹性模量为 2.1×10^5 MPa,屈服强度为 235 MPa,屈服塑性应变为 0,密度为 $7\ 800$ kg/m³。

3.1.4 砌体本构关系

砌体是由砂浆和砌块共同组成的复合材料,其受力性能与均质弹性材料的受力性质差别很大。在 ABAQUS 非线性分析中,还没有专门体现砌体材料的模型。本次研究考虑到砌体材料与混凝土材料均为脆性材料,且受力性能较为相似,故依然采用塑性损伤模型对砌体材料进行整体建模。材料抗压本构关系采用杨卫忠模型^[16],根据砌体破坏强度分布特点确定损伤演化表达式:

$$y = \frac{\eta x}{1 + (\eta - 1)x^{\eta/(\eta-1)}}, \quad (5)$$

$$x = \varepsilon / \varepsilon_{cm}, \quad (6)$$

$$y = \sigma / f_{cm}. \quad (7)$$

式中: η 为模型参数,取 1.633; f_{cm} 为砌体受压峰值应力,MPa; ε_{cm} 为砌体受压峰值应变。

砌体材料的轴心抗拉强度很低,并且其强度在开裂前可达到峰值,开裂后迅速下降,表现为明显的脆性破坏。砌体材料受拉性质与混凝土基本一致,故取用《混凝土结构设计规范》(GB500010—2010)中提供的混凝土受拉应力-应变曲线近似代替砌体材料的受拉本构。受拉本构计算过程中,砌体本身极低的抗拉强度使得参数 α_1 取值很小,导致其下降段几乎为水平直线,与实际不符。根据经验简化,取上升段为直线,下降段参数 $\alpha_1 = 2$,所得本构关系与实际情况吻合良好。

3.1.5 分析步及网格划分

在进行构件边界条件设置时,将底梁设置为完全固定,以模拟实际墙体构件的约束情况。然后建立两个分析步:在静力分析步,施加自重荷载;在隐式动力分析步,施加动力荷载。由于计算模型非线性程度较强,将动力分

析步的最小允许增量调整为 10^{-6} ,增量步最大数量调整为 2 000,其他参数使用默认值。

为了使模型能够收敛,并尽可能接近实际情况,以得到相对准确的结果,对构件模型不规则部位进行分割,合理布置种子密度,采用结构优化网格技术将模型划分为六面体网格。三维实体构件的单元属性定义为 C3D8R,一次缩减积分实体单元;钢筋模型的单元属性定义为 T3D2, truss 单元。

3.1.6 约束及相互作用定义

文中设置了多种部件间的相互作用关系。钢筋骨架与混凝土部件之间的接触滑移关系采用 ABAQUS 中特有的 embedded 约束,能够较好表现钢筋与混凝土承受外荷载时的共同受力情况;构造柱、结构柱、结构梁与砌体墙片间接触紧密,并且有构造拉结筋进行加固,在实际受力时一般不会出现破坏,为简化模型将其设置为 tie 约束。

在模型二中,免拆模板与现浇构造柱之间的粘结设置至关重要。通过实际尝试发现,直接通过相互作用模块中的接触参数对新旧混凝土相互关系进行设置时,由于非线性过强会导致模型不收敛,故创造性的借鉴 rebar layer 的做法,在免拆模板与现浇构造柱之间设置一层极薄的膜作为粘结层,将试验所得的粘结性能通过材料属性的方式赋予薄膜,以此降低模型的接触非线性。当薄膜达到材料强度破坏时,表示预制免拆模板与后浇混凝土构造柱之间发生粘结破坏。粘结层与两侧构件表面接触均为 tie 约束。

3.1.7 荷载定义

在静力分析步中,将自重荷载施加到结构上,并在整个模拟过程中始终保持恒定。在动力分析步中,改变边界条件,使模型沿一定方向按照给定加速度进行振动,从而达到施加动力荷载的目的^[17-18]。

登录 PEER 数据库,选取地震动,使用 SeisSignal 软件进行滤波、调幅,处理后的地震动峰值加速度为 0.1 g。受计算机性能限

制,仅取调幅后地震动荷载振动最激烈的部分区段作为待施加荷载^[19-21].考虑现实情况下地震来临时可能会与建筑物成各种角度,故分别考虑地震动与墙体垂直、平行、斜交的情况(见图5).施加动力荷载具体操作如下:先解除地震动荷载方向的水平约束,再使结构在该方向上按照地震波加速度变化曲线进行振动,进行有限元模型数据检查与计算,并将后处理结果与实际情况进行对比,验证模型合理性.

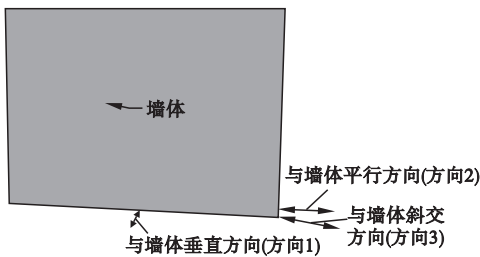


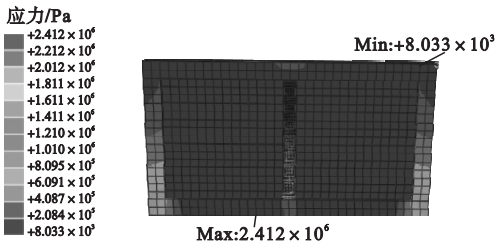
图5 荷载施加方向示意

Fig. 5 Direction of load application

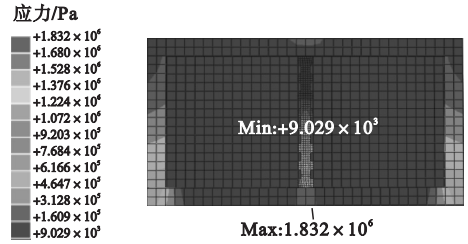
3.2 有限元结果分析及性能对比

3.2.1 地震动与墙体垂直时有限元分析

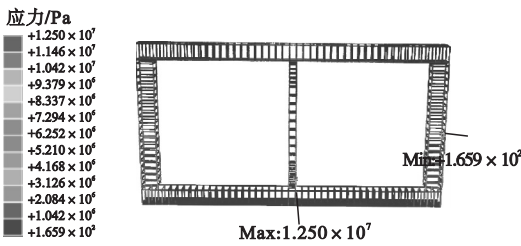
两种施工方式条件下,在墙体模型的垂直方向施加相同的动力荷载,动力荷载取前文中经处理后的地震动区段.通过有限元分析得到 Mises 云图(见图6).从图中可以看出,模型一的危险点出现在构造柱底,混凝土材料最大应力达到 2.41 MPa,钢材最大应力达到 12.5 MPa;模型二危险点出现在构造柱底,混凝土材料最大应力达到 1.83 MPa,钢材最大应力达到 10.9 MPa;两模型的 Mises 云图分布基本一致,各项误差在合理范围内.模型二安全性要略好于模型一,究其原因在于新型施工方式下主要薄弱部位在于新旧混凝土的粘结部位,在特意对薄弱环节构造加强后,其抗震力学性能表现良好. Mises 云图显示的地震反应结果与工程中实际情况符合,证明了有限元分析的合理性.



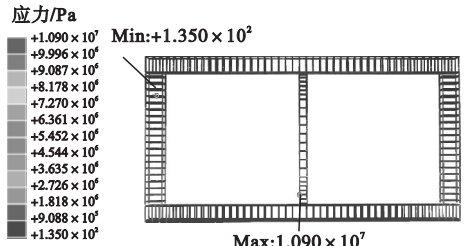
(a) 传统施工方式混凝土模型Mises云图



(b) 新型施工方式混凝土模型Mises云图



(c) 传统施工方式钢筋模型Mises云图



(d) 新型施工方式钢筋模型Mises云图

图6 模型 Mises 云图

Fig. 6 Mises plot of the model

在结构变形性能方面,笔者通过层间位移指标进行表征.从 ABAQUS 中将结构变形时程曲线数据导出,利用 matlab 进行处理,得到两模型在水平方向的层间位移值.在方向 1 上,模型一层间位移为 1.39×10^{-3} m,模型二为 1.16×10^{-3} m,相差 15%;在方向 2

上,模型一层间位移为 1.27×10^{-4} m,模型二为 1.14×10^{-4} m,相差 10%,两模型均满足层间位移限值要求.可以看出新型施工方式下结构变形性能及刚度提高,其原因在于薄弱环节得到构造加强.

考虑结构地震反应随时间的变化,自

ABAQUS 中导出模型同一危险点处的数据,以加载时间为 x 轴,结构反应值为 y 轴,得到两模型危险点处的应力沿荷载方向应变时程对比如图 7 所示.由于突加动荷载时结构反应可能存在异常,故从 2 s 开始对比.

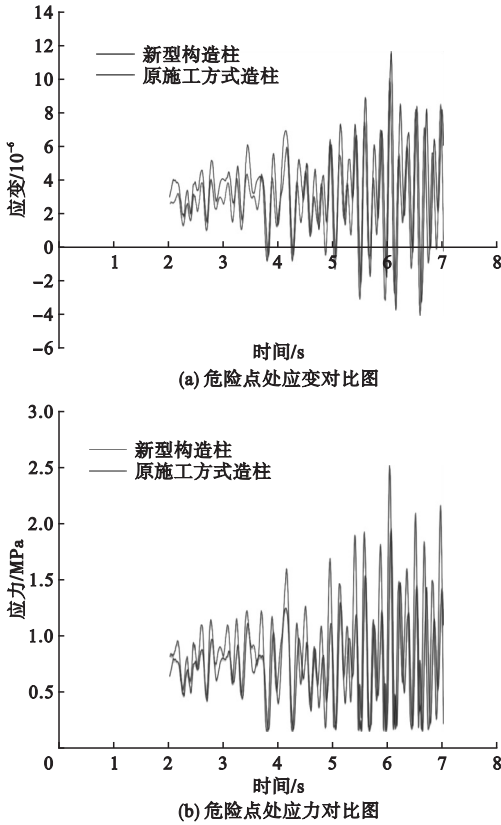


图 7 危险点处应力应变对比图

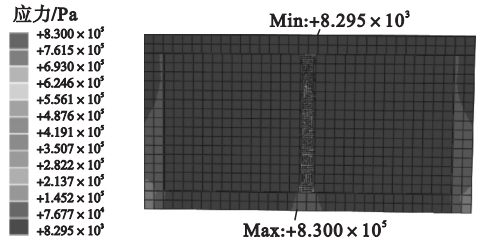
Fig. 7 Contrast diagram of stress and strain at the danger point

从图中可以看出,地震动与墙体垂直时,危险点处反应时程变化相似,模型二危险应力略小,危险应变较大,但均符合规范安全性要求.新型构造柱中钢筋与混凝土的协同工作效果较好,两种施工方式的抗震能力大体相当.

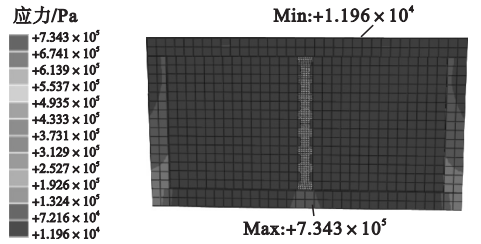
3.2.2 地震动与墙体平行时有限元分析

在两种施工方式下墙体模型的平行方向上施加相同的动力荷载,有限元分析得到任意时刻下的 Mises 云图(见图 8).从图中可以看出,模型一危险点出现在构造柱底,混凝土材料最大应力达到 0.83 MPa,钢材最大应力达到 2.89 MPa;模型二危险点出现在构造

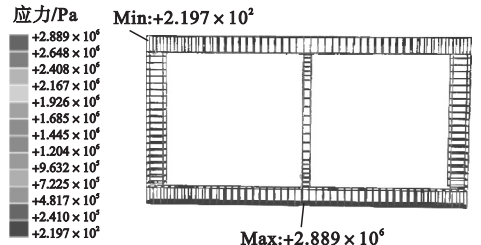
柱底,混凝土材料最大应力达到 0.73 MPa,钢材最大应力达到 3.51 MPa;模型二砌体及混凝土最大应力较之前减小了约 10%,钢筋最大应力则减小了约 15%.两模型 Mises 云图分布基本一致,满足安全性要求.



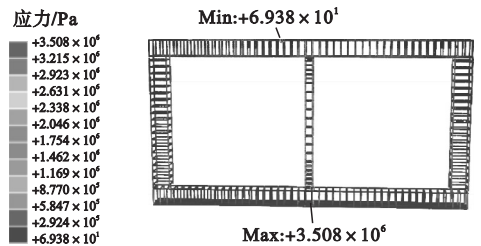
(a) 传统施工方式混凝土模型 Mises 云图



(b) 新型施工方式混凝土模型 Mises 云图



(c) 传统施工方式钢筋模型 Mises 云图



(d) 新型施工方式钢筋模型 Mises 云图

图 8 模型 Mises 云图

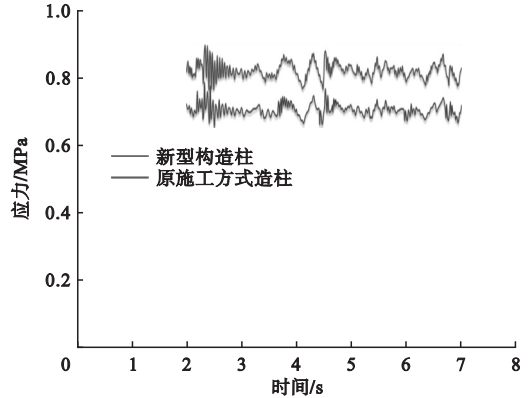
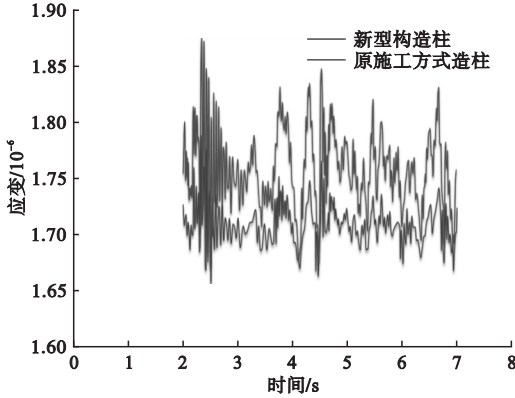
Fig. 8 Mises plot of the model

在结构变形性能方面,利用 Matlab 对结构变形时程曲线数据进行处理,得到两模型在水平方向的层间位移值.在方向 1 上,模型一层间位移为 6.5×10^{-6} m,模型二为 7.6×10^{-6} m,相差 14%;在方向 2 上,模型一层间位移为 3.03×10^{-5} m,模型二为 3.2×10^{-5} m,相

差5%,两模型均满足层间位移限值要求.可以看出在平行墙体方向动荷载作用下,由于墙体刚度较大,故其层间位移很小,新型施工方式结构变形性能虽略有下降,但仍然满足安全性要求.究其原因可能在于新旧混凝土粘结薄弱环节对方向2上的抗侧刚度影响较大,使得其刚度略有下降.

考虑时程影响,导出模型同一危险点处

的结果,以加载时间为 x 轴,结构反应值为 y 轴,得到两模型危险点处的应力沿荷载方向应变时程曲线(见图9).从图中可以看出,该方向抗震性能评估中,虽然新型施工结构的变形性能略有下降,但其危险点处的应力及应变时程曲线基本处于模型一曲线下方,更利于结构的安全性.



(a) 危险点处应变对比图

(b) 危险点处应力对比图

图9 危险点处应力应变对比图

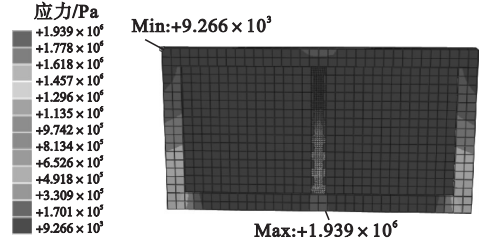
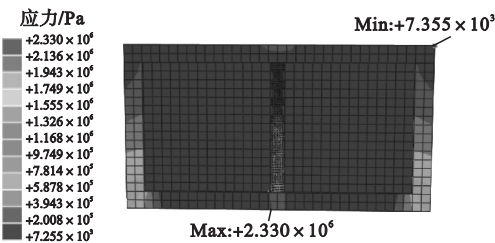
Fig. 9 Contrast diagram of stress and strain at the danger point

3.2.3 地震动与墙体斜交时有限元分析

当考虑地震动与墙体斜交时,将斜向地震动分解成方向1、方向2上的两个分量,分别施加在墙体模型上,有限元分析得到任意时刻下的 Mises 云图(见图10).与上述情况分析相似,模型一砌体混凝土部分最大应力约为 2.33 MPa,模型二约为 1.94 MPa,相差15%;钢筋部分模型一最大应力为 12.1 MPa,模型二为 11.5 MPa,相差5%.模型二由于构造加强,其抗震性能略有提升.整体来看两模型 Mises 云图分布基本一致,满

足安全性要求.

结构变形方面,对变形时程曲线数据处理后,得到两模型在水平方向的层间位移值.在方向1上,模型一层间位移为 $1.4 \times 10^{-3} \text{m}$,模型二为 $1.1 \times 10^{-3} \text{m}$;在方向2上,模型一层间位移为 $2.5 \times 10^{-5} \text{m}$,模型二为 $1.33 \times 10^{-5} \text{m}$,两模型均满足层间位移限值要求.两个方向上模型二变形能力和刚度均优于模型一,在有限元模拟的误差范围内,新型构造柱的抗震性能与传统构造柱相当,甚至略有提升,能够很好地满足工程安全需要.



(a) 传统施工方式混凝土模型Mises云图

(b) 新型施工方式混凝土模型Mises云图

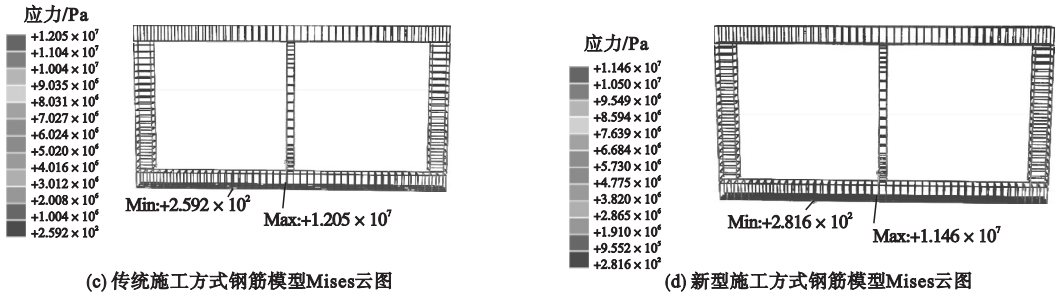
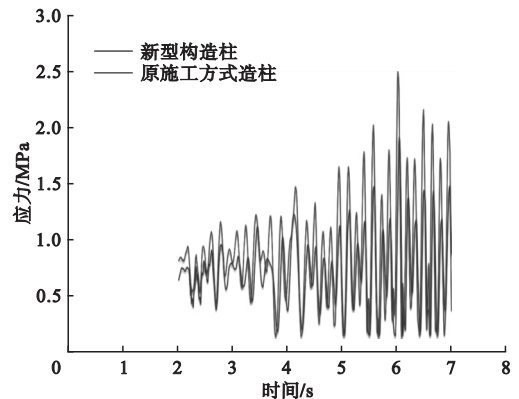


图10 模型 Mises 云图

Fig. 10 Mises plot of the model

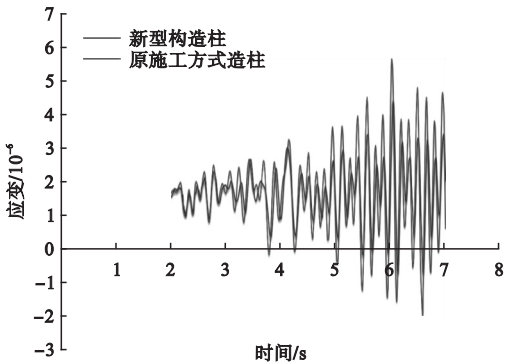
考虑时程影响,以加载时间为 x 轴,结构反应值为 y 轴,得到两模型危险点处的应力沿荷载方向应变时程曲线(见图 11). 通过对比可知,当斜向施加地震动时,两模型的应力及应变时程曲线基本一致,两曲线最大值相差在 5% ~ 10%,可预见两模型在遭受地震动作用时,其薄弱处损伤程度和破坏时间差距不大,免拆模板构造柱的性能能满足要求.



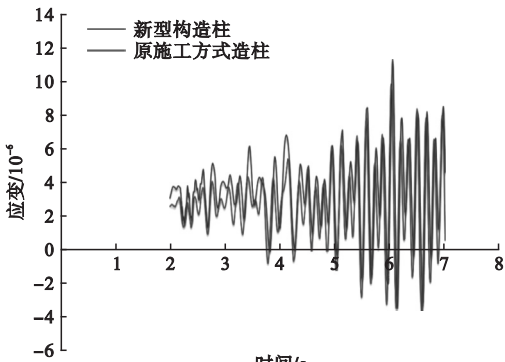
(c) 危险点处应力对比图

图 11 危险点处应力应变对比图

Fig. 11 Contrast diagram of stress and strain at the danger point



(a) 方向1应变对比图



(b) 方向2应变对比图

4 结 论

(1) 免拆模板与混凝土之间的粘结强度低于混凝土本身的抗拉强度和抗剪强度.

(2) 对两种施工方式下的墙体模型分别施加水平各向不同角度的地震动荷载,对应力云图、层间位移及危险点处的应力应变时程曲线等指标进行对比分析,各因素差异均可控制在 10%,证明了新型构造柱抗震性能可以满足安全性要求.

(3) 新型构造柱由于免拆模板与混凝土的粘结对结构整体性能会造成一定的不利影响,但通过提高免拆模板表面粗糙度,提高与混凝土之间的粘结强度,其抗震性能有望与传统构造柱相当,满足安全要求.

参考文献

- [1] VINEY T. Precast permanent formwork in the 21st century[J]. Concrete, 2005, 39(5): 10 - 11.
- [2] HAMERLINCK R, TWILT L. Fire resistance of composite slabs[J]. Journal of constructional steel research, 1995, 33(1/2): 71 - 85.
- [3] RALPH H, LEEN T. Fire resistance of composite slabs[J]. Journal of constructional steel research, 1995(33): 71 - 85.
- [4] WONG H T, TENG J G. Buckling behavior of model steel base shells of the comshell roof system[J]. Journal of constructional steel research, 2006, 62(1/2): 4 - 19.
- [5] DEMERS C E. Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites[J]. Construction and building materials, 1998, 12(5): 311 - 318.
- [6] HALL J E, MOTTRAM J T. Combined FRP reinforcement and permanent formwork for concrete members[J]. Journal of composites for construction, 1998, 2(2): 7886.
- [7] KUDER K G, GUPTA R, HARRIS-JONES C. Effect of PVC stay-in-place formwork on mechanical performance of concrete[J]. Journal of materials in civil engineering, 2009, 21(7): 309 - 315.
- [8] 吴文清, 崔千祥, 施耀辉, 等. 用钢丝网混凝土模板作免拆模板的新尝试[J]. 建筑技术开发, 1999(2): 22 - 24.
(WU Wenqing, CUI Qianxiang, SHI Yaohui, et al. A new attempt to use wire mesh concrete formwork[J]. Building technique development, 1999(2): 22 - 24.)
- [9] 张巨松, 曾龙, 王振兴. FRP 作为混凝土工程永久性模板的试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000(5): 32 - 34.
(ZHANG Jusong, ZENG Long, WANG Zhenxing. Experimental research on FRP as permanent mould of concrete engineering[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2000(5): 32 - 34.)
- [10] 王彤. 永久模板与现浇混凝土叠合梁的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
(WANG Tong. The experimental study of cast-in-situ concrete composite beam with permanent formwork[D]. Changchun: Jilin University, 2012.)
- [11] 王浩宇, 田稳苓, 卿龙邦, 等. 玻璃纤维编织网增强混凝土免拆模板抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(6): 37 - 42, 109.
(WANG Haoyu, TIAN Wenling, QIN Longbang, et al. Study of stay-in-place formwork bending test of class textile reinforced concrete[J]. Industrial construction, 2015, 45(6): 37 - 42, 109.)
- [12] 王钧, 李论, 李行, 等. 碳纤维 RPC 永久柱模设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(6): 999 - 1005.
(WANG Jun, LI Lun, LI Xing, et al. Research on the design method for the steel fiber RPC column-permanent template[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6): 999 - 1005.)
- [13] 王玉镗. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(WANG Yuzhuo. ABAQUS structural engineering analysis and explanation of examples[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [14] LI Z H, TENG J, HE X F. Seismic damage analysis model for RC structures based on concrete plastic damage model[J]. Structures congress, 2011(4): 2768 - 2779.
- [15] CAO Ming. Research on damage plastic calculation method of ABAQUS concrete damaged plasticity model[J]. Highway engineering, 2012, 2: 51 - 54.
- [16] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008(10): 80 - 82.
(YANG Weizhong. Constitutive relationship model for masonry materials in compression[J]. Building structure, 2008(10): 80 - 82.)
- [17] LOTFOLLAHI-YAGHIN M A. Dynamic analysis of the arch concrete dam under earthquake force with ABAQUS[J]. Journal of applied sciences, 2008(15): 2648.
- [18] LI Jian. Based on ABQUS of concrete structure nonlinear finite element analysis[J]. Advanced materials research, 2013, 2534(1515): 186 - 189.
- [19] 刘杰. 基于 ABAQUS 整体式模型下砌体结构抗震性能影响因素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
(LIU Jie. Research on factors influencing seismic performance of masonry structure based on the integral model of ABAQUS[D]. Changsha: Hunan University, 2014.)
- [20] 牛汶岐. 带构造柱窗间墙抗震试验的有限元分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
(NIU Wenqi. Finite element analysis of masonry wall's experimental on seismic test for masonry piers with structural columns[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.)
- [21] 李旭. 基于 ABAQUS 的配筋构造柱式砌体墙的有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
(LI Xu. Finite element analysis of reinforced masonry walls with constructed column based on ABAQUS[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)