



混凝土密柱石膏复合墙板结构性能及简化分析模型

尹越^{a,b}, 车鑫宇^a, 曹宇^c, 黄一哲^a

(天津大学 a. 建筑工程学院; b. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室;

c. 建筑设计研究院, 天津 300072)

摘要:对混凝土密柱石膏复合墙板的水平剪力传递机理进行分析,发现石膏板肋能有效地在混凝土芯柱间传递水平剪力,对复合墙板结构性能有较大影响。在此基础上,提出混凝土密柱石膏复合墙板的等效带缝剪力墙简化分析模型,剪力墙竖缝布置以保证等效带缝剪力墙与复合墙板具有相同弹性抗侧刚度为原则确定。对混凝土密柱石膏复合墙板及等效带缝剪力墙的结构性能进行比较分析表明,混凝土密柱石膏复合墙板与带缝剪力墙受力机理相似,等效带缝剪力墙弹性及塑性阶段都能很好地反映混凝土密柱石膏复合墙板的结构性能。

关键词:混凝土密柱石膏复合墙板;等效带缝剪力墙;弹塑性性能

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)05-0018-08

Structural behavior and simplified model of plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns

Yin Yue^{a,b}, Che Xinyu^a, Cao Yu^c, Huang Yizhe^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety Ministry of Education;

c. Architectural Design and Research Institute, Tianjin University, Tianjing 300072, P. R. China

Abstract: Shear transferring mechanism of the plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns was studied. It is found that plasterboard ribs can transfer shear between in-filled RC columns effectively and have great effects on the behaviour of the composite wall. Equivalent slitted shear wall model is then presented. Slits are arranged on the equivalent shear wall to ensure it has same elastic lateral stiffness as the composite wall. Comparative analysis shows that plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns has similar load bearing mechanism as the slitted shear wall and can be simulated by the proposed equivalent slitted shear wall for both elastic and plastic states.

Key words: plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns; equivalent slitted shear wall; elasto-plastic behaviour

收稿日期:2014-11-18

作者简介:尹越(1971-),男,博士,副教授,主要从事大跨空间结构、钢结构及组合结构研究,(E-mail)yinyue@tju.edu.cn.

Received:2014-11-18

Author brief: Yin Yue (1971-), PhD, associate professor, main research interests: large-span spatial structures, steel structures and composite structures, (E-mail)yinyue@tju.edu.cn.

混凝土密柱石膏复合墙板,又称填充混凝土石膏墙板,即采用石膏板作为墙体,在石膏板的孔腔中插入钢筋、浇筑混凝土形成钢筋混凝土密柱的墙体结构,石膏板与钢筋混凝土密柱协同工作,共同承受竖向荷载和水平荷载。石膏板一般采用玻璃纤维和轻质石膏制成,加工时在两层薄板中间由板肋分隔出多个相邻的孔腔,孔腔内可填充混凝土以提高墙体承载能力,也可填充岩棉、聚苯乙烯泡沫等材料,满足墙体保温、隔热、隔音等性能的技术要求。

作为一种新型墙体结构,混凝土密柱石膏复合墙板具有性能优越、施工方便、经济环保等优点。混凝土密柱石膏复合墙板体系最早起源于澳大利亚,为了采用混凝土密柱石膏复合墙板替代传统砖混结构,并在抗震设防地区推广应用,学者们对其受力机理及抗震性能进行了大量数值分析和试验研究^[1-6],数值分析与试验结果比较表明,有限元分析可以准确地确定混凝土密柱石膏复合墙板的力学性能。在这些分析研究的基础上,提出可以采用 RVE 等效模型^[7]、宏观计算模型^[8]、框架-剪切单元简化模型^[9]及刚度等效模型^[10]等混凝土密柱石膏复合墙板简化分析模型,前 3 种模型在应用时或需要编写材料子程序或单元子程序,或建模较为复杂,在实际工程设计中应用较为困难。刚度等效简化模型是将一定宽度的混凝土密柱石膏复合墙板用同样宽度的钢筋混凝土墙体等效,保证等效前后墙体的抗侧移刚度相同,混凝土密柱石膏复合墙板的刚度等效模型简单、实用,能够保证折算墙板和复合墙板在弹性阶段刚度一致,但是两者的塑性性能相差较大。在分析复合墙板中石膏板肋传递剪力的作用时,发现仅去掉板壁的复合墙板在弹性及塑性阶段的性能与复合墙板均很接近,而仅去掉板壁的复合墙板与带缝剪力墙的工作机理十分相似,因而为复合墙板的简化模型提供了新的选择。

1 混凝土密柱石膏复合墙板剪力传递机理分析

为了讨论混凝土密柱石膏复合墙板剪力传递机理及石膏板肋在剪力传递中的作用,分别建立复合墙板及仅去掉石膏板壁的复合墙板有限元模型,对水平剪力作用下复合墙板的结构性能进行对比分析。分析采用的混凝土密柱石膏复合墙板厚

172 mm、高 2 700 mm、宽 2 000 mm,石膏板板肋间距、孔腔形状及尺寸如图 1 所示。孔腔内钢筋混凝土密柱采用 C20 混凝土,钢筋为 HRB335,纵向配筋为 6Φ16,水平箍筋为 Φ8@100。

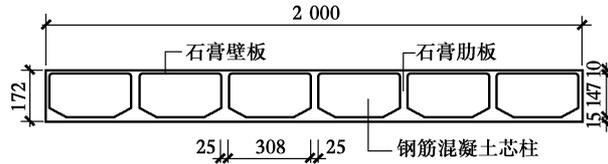


图 1 复合墙板截面尺寸图

Fig. 1 Cross section of plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns

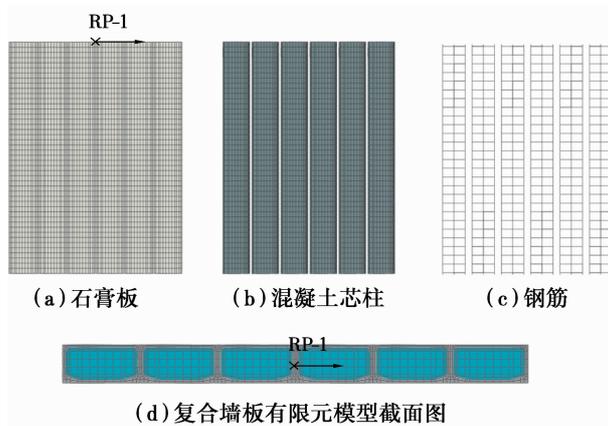


图 2 复合墙板有限元模型 FHB 示意图

Fig. 2 Finite element model of FHB

1.1 有限元模型建立

采用通用有限元分析软件 ABAQUS^[11]建立复合墙板有限元模型 FHB 如图 2 所示。钢筋本构关系采用理想弹塑性模型,弹性模量 2.06×10^5 MPa,泊松比 0.3,屈服强度 315 MPa。混凝土本构关系采用塑性损伤模型,弹性模量为 2.55×10^4 MPa,泊松比为 0.2。混凝土受拉、受压应力-应变关系如图 3、图 4 所示^[11],根据文献[13-16]中有关损伤模型参数计算的建议,计算得到 C20 混凝土损伤模型参数如表 1 所示。石膏本构关系也选用塑性损伤模型,添加适量水泥可改善石膏板性能,相关材料参数根据文献[17]中石膏材料性能试验结果确定,试验表明,石膏基体受拉开裂后,将由横跨在裂纹间的玻璃纤维承受拉力,发生较大变形,直至玻璃纤维被拉断,因此,石膏受拉应力-应变曲线没有明显下降段。石膏弹性模量 4.35×10^3 MPa,泊松比 0.18,石膏受拉、受压应力-应变关系如图 3、图 4 所示。

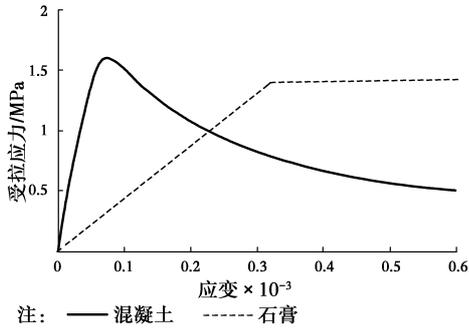


图 3 混凝土、石膏受拉应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain relationship of concrete and plasterboard in tension

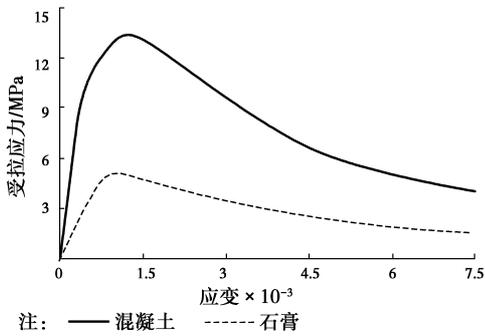


图 4 混凝土、石膏受压应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain relationship of concrete and plasterboard in compression

表 1 混凝土损伤模型计算参数

Table 1 Parameters of concrete damaged plasticity

受压应力/MPa	非弹性应变 $\times 10^{-3}$	损伤因子 d_c	受拉应力/MPa	非弹性应变 $\times 10^{-3}$	损伤因子 d_t
8.68	0	0	1.54	0	0
12.01	0.4	0.36	1.35	0.07	0.38
13.40	0.9	0.48	1.14	0.12	0.57
11.93	1.7	0.64	0.88	0.21	0.69
9.78	2.6	0.73	0.72	0.30	0.77
6.74	4.1	0.81	0.62	0.38	0.80
5.03	5.7	0.85	0.55	0.46	0.82
3.98	7.2	0.88	0.50	0.55	0.85

有限元模型中混凝土芯柱和石膏板均选用八节点缩减积分实体单元(C3D8R)建模,钢筋采用三维桁架线性单元(T3D2)建模。混凝土单元网格大小适宜即可,不宜过细,因为,混凝土开裂、软化和损伤在单元划分越密集时越严重,计算结果越不容易收敛。经试算,混凝土网格尺寸取为 30 mm。

在掺加膨胀剂的情况下,混凝土芯柱与石膏板

之间连接良好,所以,建立分析模型时不考虑混凝土芯柱与石膏板间的滑移问题,混凝土芯柱与石膏板对应结点间采用绑定连接方式(Tie),钢筋单独建模后嵌入(Embed)混凝土芯柱中。

类似地,建立仅去掉石膏板壁的复合墙板有限元模型 FHB-F 如图 5 所示。有限元分析中复合墙板下端固接约束,上端顶面所有节点与参考节点 RP-1 耦合,如图 2 所示,然后对参考点进行水平位移加载,与力加载相比位移加载计算更容易收敛。

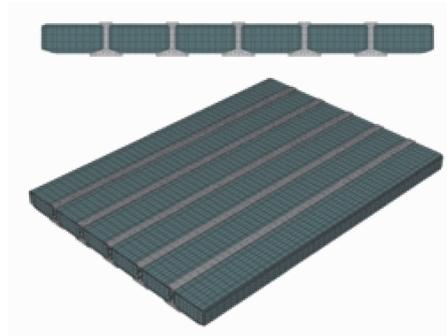


图 5 有限元模型 FHB-F 示意图
Fig. 5 Finite element model of FHB-F

1.2 复合墙板极限承载力及损伤特征分析

采用非线性有限元分析得到复合墙板 FHB 及 FHB-F 荷载-位移曲线对比如图 6 所示。可以看出,两条荷载-位移曲线在弹性阶段基本重合,而随着荷载的增大,两条曲线开始分离,FHB-F 的开裂荷载及极限承载力较复合墙板 FHB 略低。复合墙板 FHB 及 FHB-F 的混凝土芯柱在极限荷载作用下的损伤云图分别如图 7 及图 8 所示,可以看出,FHB 和 FHB-F 混凝土芯柱损伤状况基本相同,混凝土芯柱损伤云图连续,与整块墙体受弯损伤模式相同。

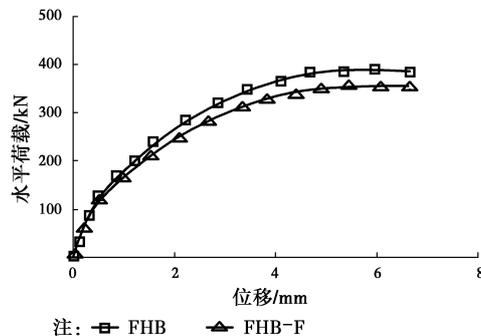


图 6 荷载-位移曲线对比图
Fig. 6 Comparison of load-displacement curves of FHB and FHB-F

可见,石膏板肋能有效地在各混凝土芯柱间传递水平剪力,协调各芯柱侧向变形,使混凝土芯柱石

石膏复合墙板成为整体受力的整块墙体,因此,对复合墙板的承载能力、损伤模式有较大影响。而石膏板壁虽能对混凝土芯柱起到一定约束作用,但对复合墙板的承载能力、损伤模式等影响很小。

墙,这为建立复合墙板的简化分析模型提供了新的选择。

2 混凝土密柱石膏复合墙板简化分析模型

混凝土密柱石膏复合墙板是一种由钢筋混凝土和石膏板构成的组合构件,为了方便地进行采用混凝土密柱石膏复合墙板的多、高层结构的整体分析,必须在对复合墙板结构性能研究的基础上,建立准确、实用的复合墙板简化分析模型。

2.1 复合墙板简化分析模型

刚度等效简化模型将一定宽度的混凝土密柱石膏复合墙板用同样宽度的钢筋混凝土墙体等效,保证等效前后墙体的弹性抗侧刚度相同,如图 9 所示,折算钢筋混凝土墙体厚度可由式(1)确定。

$$b_0 = \mu[\eta b + b_1\beta(1 - \eta)] \quad (1)$$

式中: b_0 为折算钢筋混凝土墙体厚度; b 为混凝土密柱石膏复合墙板厚度; b_1 为混凝土芯柱厚度; μ 为折减系数,可取为 0.9, $\eta = E_p/E_c$, $\beta = l_1/l$, E_p 及 E_c 分别为石膏及混凝土的弹性模量。刚度等效模型是混凝土密柱石膏复合墙板最简单、最实用的简化分析模型。

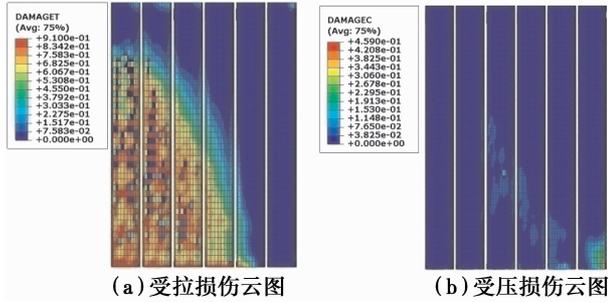


图 7 复合墙板 FHB 混凝土芯柱损伤云图

Fig. 7 Damage nephogram of in-filled RC columns in FHB

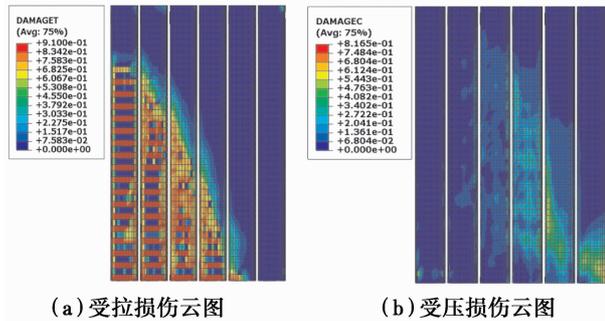


图 8 复合墙板 FHB-F 混凝土芯柱损伤云图

Fig. 8 Damage nephogram of in-filled RC columns in FHB-F

通过对混凝土密柱石膏复合墙板 FHB 及 FHB-F 有限元分析结果的进一步研究表明,在水平荷载作用下,钢筋混凝土芯柱和石膏板作为一个整体共同受力,随着荷载的增大,其受力特点分为弹性工作及塑性工作两个阶段。在弹性工作阶段,由于复合墙板各部分都处于弹性状态且石膏板和混凝土芯柱连接良好,复合墙板呈现出明显的整体受力特点,整块复合墙板作为一个整体承担水平荷载。进入塑性阶段后,随着石膏板的开裂,石膏板对混凝土芯柱的约束作用减小,但石膏和混凝土之间的粘结并未完全丧失,尤其是挤压在混凝土芯柱之间的石膏板肋仍然能够起到传递剪力、使各芯柱协同工作的作用。分析可知,在整个受力过程中石膏板肋一直是抗剪连接的关键部件,其作用与带缝剪力墙^[18]的剪力连接键十分相似,混凝土密柱石膏复合墙板因此具有与带缝剪力墙相似的抗侧结构性能。另一方面,也可以将混凝土密柱石膏复合墙板看作是抗剪连接键沿高度连续化为连续剪切介质的带缝剪力

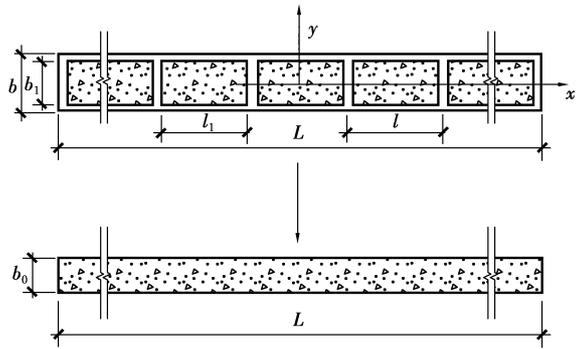


图 9 混凝土密柱石膏复合墙板刚度等效模型

Fig. 9 Stiffness equivalent shear wall model for plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns

根据对混凝土密柱石膏复合墙板抗侧性能的研究,可以将混凝土密柱石膏复合墙板等效为带缝剪力墙进行结构分析,等效带缝剪力墙的厚度取为复合墙板中混凝土芯柱的厚度,等效带缝剪力墙的竖缝间距和宽度等于石膏板肋间距和板肋厚度,竖缝沿高度方向均匀分布,竖缝数量和长度以保证等效带缝剪力墙与复合墙板弹性阶段具有相同刚度为原则确定。等效带缝剪力墙几何参数计算流程如图 10 所示,其中,等效带缝剪力墙弹性抗侧刚度可按

文献[19]中的方法计算。根据该等效方法得到的等效带缝剪力墙如图 11 所示,缝间的混凝土部分相当于复合墙板中的混凝土芯柱,连接键相当于石膏板肋,完全符合混凝土密柱石膏复合墙板的受力特点。通过对复合墙板、刚度等效混凝土墙板及等效带缝剪力墙在竖向和水平荷载作用下进行有限元分析,可以确定两种复合墙板简化分析模型的适用性。

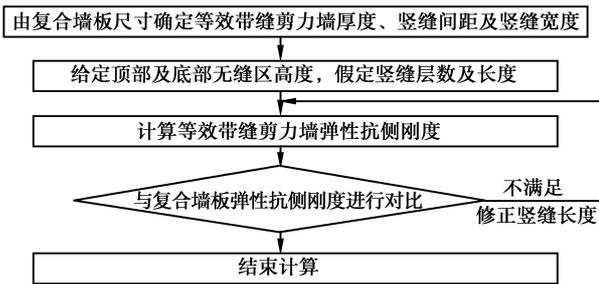


图 10 等效带缝剪力墙几何参数计算流程

Fig. 10 Flowchart for geometry determination of equivalent slitted shear wall

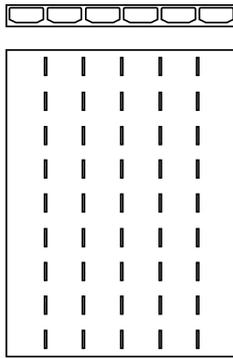


图 11 等效带缝剪力墙

Fig. 11 Equivalent slitted shear wall

2.2 有限元模型建立

仍以图 1 所示复合墙板为例进行分析比较,刚度等效混凝土墙板及等效带缝剪力墙均采用与复合墙板混凝土芯柱相同标号混凝土、并配置相同的钢筋。按刚度等效由式(1)计算可得折算混凝土墙板厚 $b_0 = 125 \text{ mm}$ 。根据 2.1 节的简化原则确定等效带缝剪力墙尺寸为墙厚 147 mm,竖缝宽 25 mm、长 120 mm,竖缝竖向间距 180 mm。按 1.1 节的方法及材料模型分别建立复合墙板 FHB、刚度等效折算混凝土墙板及等效带缝剪力墙有限元模型,等效带缝剪力墙有限元分析模型如图 12 所示。

分析中,复合墙板、刚度等效折算混凝土墙板及等效带缝剪力墙均同时承受竖向荷载和水平荷载。竖向荷载 $N_0 = 405 \text{ kN/m}$ 在第一个分析步中沿板宽一次加载到位,水平荷载采用位移加载,在第二及后

续分析步中逐步加载完成。

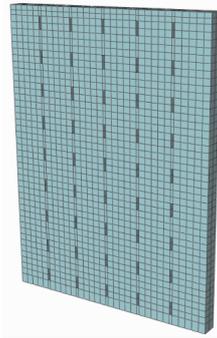
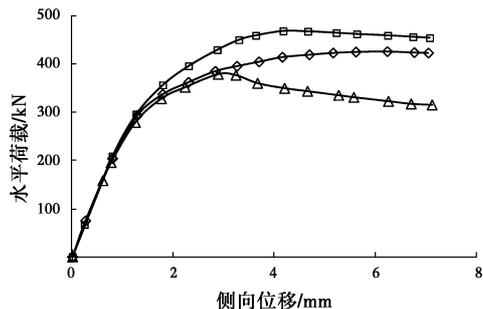


图 12 等效带缝剪力墙有限元模型

Fig. 12 Finite element model for equivalent slitted shear wall

2.3 有限元分析结果

有限元分析得到的复合墙板、刚度等效折算混凝土墙板及等效带缝剪力墙在水平荷载作用下的荷载-位移曲线如图 13 所示,可以看出,在水平荷载小于 200 kN 的范围内,3 条荷载-位移曲线均为直线,且基本重合,说明在弹性阶段,刚度等效折算混凝土墙板和等效带缝剪力墙均能较好地反应复合墙板的受力性能。随着水平荷载增加,3 条荷载-位移曲线均开始弯折,斜率不断减小,进入弹塑性阶段,复合墙板、刚度等效折算混凝土墙板及等效带缝剪力墙的极限承载力分别达到 465、375 及 425 kN,等效带缝剪力墙的极限承载力明显高于刚度等效折算混凝土墙板,而与复合墙板更为接近。达到极限承载力后,刚度等效折算混凝土墙板的荷载-位移曲线下降明显,而等效带缝剪力墙和复合墙板的荷载-位移曲线形状相似,进入弹塑性阶段后曲线变化平缓,两者的塑性性能更为接近。另外,由于复合墙板主要在受拉一侧发生破坏,同时承受竖向和水平荷载时复合墙板的极限承载力比仅承受水平荷载时略有提高。



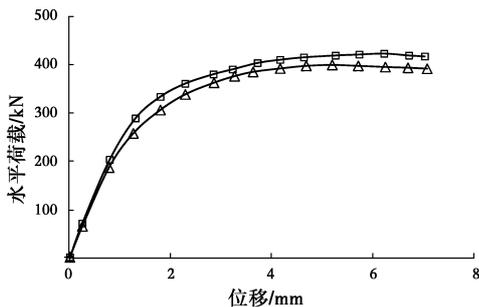
注: □ FHB ◇ 等效带缝剪力墙 △ 刚度等效折算板

图 13 不同分析模型荷载-位移曲线对比

Fig. 13 Comparison of load-displacement curves of different analysis models

等效带缝剪力墙和复合墙板中混凝土芯柱的荷载-位移曲线比较如图 14 所示。可以看出,两条荷载-位移曲线十分接近,复合墙板主要由混凝土芯柱承担水平荷载,而等效带缝剪力墙竖缝间混凝土与复合墙板混凝土芯柱作用相同,是主要的受力部件。由于未考虑石膏板壁传递的剪力,复合墙板混凝土芯柱的荷载-位移曲线略低于等效带缝剪力墙。

复合墙板混凝土芯柱和等效带缝剪力墙在极限荷载作用下的损伤云图比较如图 15、图 16 所示。可以看出,极限状态时复合墙板受拉侧混凝土芯柱受拉损伤较大,混凝土开裂严重,受压损伤主要集中在受压侧芯柱底部。等效带缝剪力墙在受拉侧和受压侧的损伤与复合墙板混凝土芯柱的损伤十分相似,同时剪力连接键处也有一定的损伤。复合墙板混凝土芯柱与等效带缝剪力墙竖缝间混凝土拉、压损伤都与整块墙体受弯时的损伤分布相同。



注: □ 等效带缝剪力墙 △ FHB 中混凝土芯柱
图 14 带缝剪力墙与混凝土芯柱荷载-位移曲线
Fig. 14 Load-displacement curves of equivalent slitted shear wall and in-filled RC columns

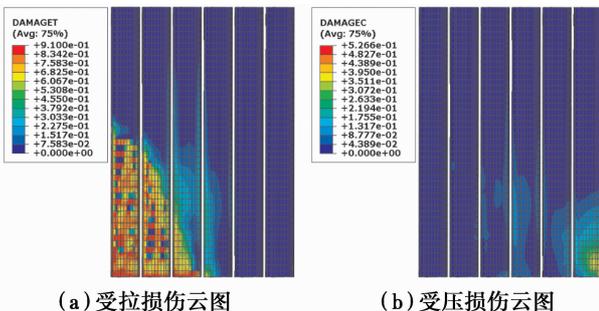


图 15 复合墙板混凝土芯柱损伤云图
Fig. 15 Damage nephogram of in-filled RC columns

3 等效带缝剪力墙简化分析模型验证

为了验证等效带缝剪力墙简化模型的可靠性和适用性,选取不同剪跨比和轴压比的混凝土密柱石膏复合墙板进行对比分析,混凝土密柱石膏复合墙

板几何参数及剪跨比、轴压比如表 2 所示。根据前文所述的简化原则分别建立刚度等效简化模型和等效带缝剪力墙简化模型,进行水平单调加载的有限元数值分析。

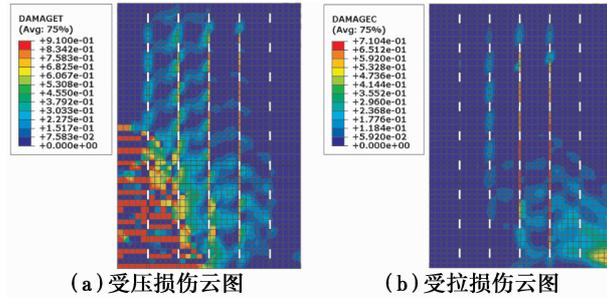


图 16 等效带缝剪力墙损伤云图

Fig. 16 Damage nephogram of equivalent slitted shear wall

表 2 混凝土密柱石膏复合墙板几何参数及剪跨比、轴压比
Table 2 Geometric parameters, shear span ratio and axial compression ratio of plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns

编号	长度/ mm	高度/ mm	厚度/ mm	剪跨比	轴向压 力/kN	轴压比
FHB1	2 000	2 700	172	1.35	810	0.245
FHB2	2 000	2 700	172	1.35	330	0.1
FHB3	1 334	2 700	172	2.0	540	0.245
FHB4	2 667	2 700	172	1.0	1 085	0.245

分析得到不同剪跨比和轴压比的复合墙板及相应简化模型的荷载位移曲线对比如图 17~20 所示,可以看出,复合墙板与相应等效模型的荷载-位移曲线具有类似的关系,即弹性阶段复合墙板和两种等效模型的荷载-位移曲线基本重合,但进入弹塑性阶段后,等效带缝剪力墙的荷载-位移曲线及极限荷载与复合墙板均更为接近。因此,对于不同剪跨比和轴压比的混凝土密柱石膏复合墙板,等效带缝剪力墙均能更好地模拟其受力性能。

需要指出的是等效带缝剪力墙是以保证其与复合墙板弹性阶段刚度相同为原则而建立的,由于受力机理相似,其弹塑性性能自然与复合墙板较为接近,但无法保证其弹塑性性能与复合墙板完全一致,由图 13、图 17~20 可以看出,对不同剪跨比和轴压比的算例,等效带缝剪力墙的后后期承载力均略低于混凝土密柱石膏复合墙板,这正好能满足结构设计的安全性要求。同时,由于带缝剪力墙已有一定工程应用,混凝土密柱石膏复合墙板的等效带缝剪力墙模型较容易为工程技术人员接受和采用。

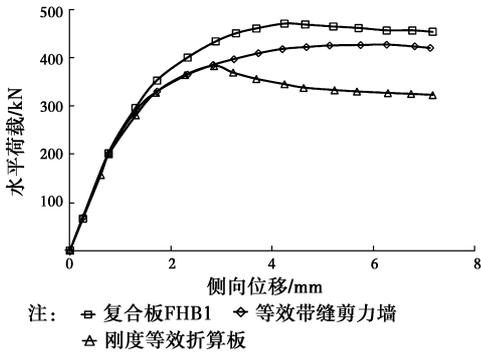


图 17 FHB1 荷载-位移曲线对比

Fig. 17 Comparison of load-displacement curves of FHB1

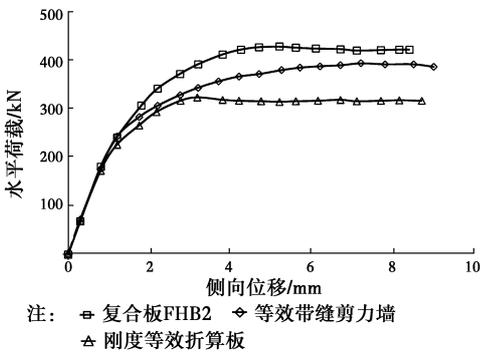


图 18 FHB2 荷载-位移曲线对比

Fig. 18 Comparison of load-displacement curves of FHB2

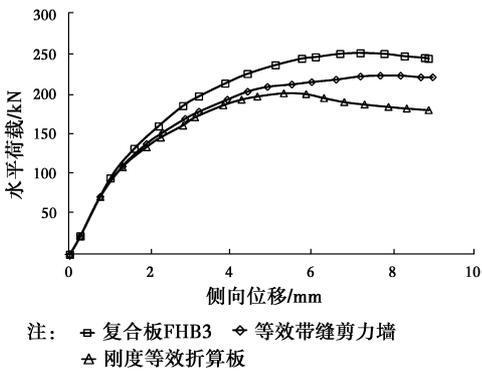


图 19 FHB3 荷载-位移曲线对比

Fig. 19 Comparison of load-displacement curves of FHB3

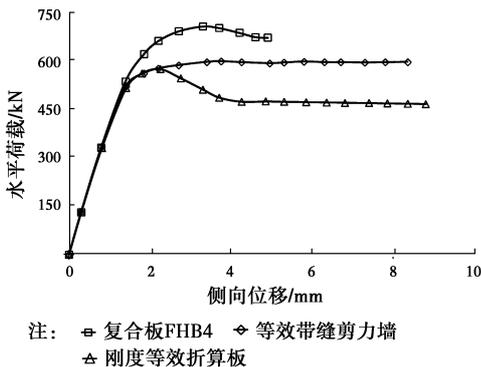


图 20 FHB4 荷载-位移曲线对比

Fig. 20 Comparison of load-displacement curves of FHB4

4 结 论

混凝土密柱石膏复合墙板是一种由钢筋混凝土和石膏板构成的复合墙体,本文采用有限单元法对其水平剪力传递机理进行了研究,并在此基础上,提出了混凝土密柱石膏复合墙板的等效带缝剪力墙简化分析模型。具体结论如下:

1)混凝土密柱石膏复合墙板的石膏板肋能有效地在混凝土芯柱间传递水平剪力,协调各芯柱侧向变形,使混凝土密柱石膏复合墙板成为整体受力的整块墙体,因此,对复合墙板的结构性能有较大影响,而混凝土密柱石膏复合墙板的石膏板壁虽能对混凝土芯柱起到一定约束作用,但对复合墙板的结构性能影响很小。

2)混凝土密柱石膏复合墙板与带缝剪力墙受力机理相似,石膏板肋能起到带缝剪力墙的剪力连接键的作用,采用等效带缝剪力墙作为混凝土密柱石膏复合墙板的简化分析模型,在弹性和塑性阶段均能较好地反应混凝土密柱石膏复合墙板的结构性能。

3)等效带缝剪力墙的高度和厚度可取为复合墙板中混凝土芯柱的高度和厚度,等效带缝剪力墙的竖缝宽度可取为石膏板肋厚度,竖缝沿高度方向均匀分布,竖缝长度以保证等效带缝剪力墙与复合墙板弹性阶段具有相同刚度为原则确定。

(致谢:论文相关研究工作得到了天津开发区福林发展有限公司的大力支持,作者表示感谢!)

参考文献:

- [1] Wu Y F, Dare M P. Axial and shear behavior of glass fiber reinforced gypsum wall panels; tests [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2004, 8 (6): 569-578.
- [2] Liu K, Wu Y F, Jiang X L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls [J]. Materials and Structures, 2008, 41: 649-662.
- [3] Wu Y F. The structural behavior and design methodology for a new building system consisting of glass fiber reinforced gypsum panels [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 2509-2913.
- [4] 赵考重,袁长波,王莉. 灌芯玻璃纤维石膏墙板轴心受压构件试验研究[J]. 建筑结构,2010,40(1):116-119. Zhao K Z, Yuan C B, Wang L. Experimental study on concrete filled glass fiber reinforced gypsum panel axial

- compressive members[J]. Building Structures, 2010, 40(1): 116-119. (in Chinese)
- [5] Janardhana M, Davis P R, Ravichandran S S. Calibration of a hysteretic model for glass fiber reinforced gypsum wall panels [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(2): 347-355.
- [6] Keerthan P, Mahendran M. Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions [J]. Fire Safety Journal, 2012, 53: 105-119.
- [7] 岳建伟,姜忻良. 混凝土灌芯纤维石膏板的宏观计算模型[J]. 四川大学学报, 2007, 39(6): 55-60.
Yue J W, Jiang X L. Macro model of fiber plasterboard filled with reinforced concrete[J]. Journal of Sichuan University, 2007, 39(6): 55-60. (in Chinese)
- [8] 姜忻良,姜振海. 灌芯混凝土石膏墙板的简化计算模型[J]. 华中科技大学学报, 2008, 25(2): 1-4.
Jiang X L, Jiang Z H. Simplified computational model for plasterboard filled with concrete [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 25(2): 1-4. (in Chinese)
- [9] 马清珍,姜忻良,张宝魁. 一种分析混凝土灌芯石膏墙板的简化计算模型[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(2): 119-124.
Ma Q Z, Jiang X L, Zhang B K. A simplified calculation model for analyzing concrete-filled gypsum wall panels [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(2): 119-124. (in Chinese)
- [10] 姜南,张宇,许岩,等. 混凝土石膏复合墙板实用性计算方法[J]. 天津大学学报, 2008, 41(4): 471-475.
Jiang N, Zhang Y, Xu Y, et al. Practical calculation method for gypsum concrete compositive wall plate [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(4): 471-475. (in Chinese)
- [11] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [12] ABAQUS. Theory Manual Version 6. 10[M]. H. K. S. 2012.
- [13] 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): 127-130.
Zhang J, Wang Q Y, Hu S Y, et al. Parameters verif
- ication of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. Building Structures, 2008, 38(8): 127-130. (in Chinese)
- [14] 孟闻远,王俊锋,张蕊. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土结构本构模型对比分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(1): 40-42.
Meng W Y, Wang J F, Zhang R. Comparison analysis of constitutive models of reinforced concrete structures based on ABAQUS [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(1): 40-42. (in Chinese)
- [15] 聂建国,王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67.
Nie J G, Wang Y H. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structure [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-67. (in Chinese)
- [16] 苑立森,寇文飞,刘和亮,等. ABAQUS 中混凝土材料损伤参数的研究[J]. 湖北工业大学学报, 2013, 28(5): 99-101.
Yuan L S, Kou W F, Liu H L, et al. Study of concrete material damage parameter in ABAQUS [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2013, 28(5): 99-101. (in Chinese)
- [17] 谷岩,姜忻良,张海. 纤维石膏速成板的力学性能试验研究[J]. 山东农业大学学报, 2009, 40(1): 107-111.
Gu Y, Jiang X L, Zhan H. Experimental research on mechanical properties of fiber-reinforced gypsum panel [J]. Journal of Shangdong Agricultural University, 2009, 40(1): 107-111. (in Chinese)
- [18] Kwan A K H, Dai H, Cheung Y K. Non-linear seismic response of reinforced concrete slit shear walls [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(4): 701-718.
- [19] 蒋路,陈以一,王伟栋. 带缝钢板剪力墙弹性抗侧刚度及简化模型研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010(3): 115-120.
Jiang L, Cheng Y Y, Wang W D. Research on elastic lateral stiffness and simplified model of steel plate shear wall with slits [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010(3): 115-120. (in Chinese)