

不同内填材料的生态复合墙结构地震反应分析

黄 炜¹, 李 斌¹, 张 巍¹, 张程华^{1,2}, 王冬冬¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:生态复合墙体作为一种新型的生态环保住宅结构体系,其内填材料要满足因地制宜、就地取材的原则,本文在课题组已研发和应用的五种生态复合墙体材料的基础上,采用经过验证的刚架-复合弹性板力学模型,对结构进行弹性阶段的动力反应对比分析,并模拟原型结构在弹性阶段的动力特性.利用该模型对某工程实例分析研究,计算分析结果表明:在多种地震波作用下,内填石膏砌块墙体频率最大,其余四种材料频率较为接近,内填草砖时频率最小;当内填草砖时,侧移及层间位移最大,内填陶粒块和发泡块时,侧移及层间位移较为接近,而内填石膏时最小;五种不同内填材料的楼层加速度曲线趋势大体趋于一致.

关键词:生态复合墙结构;内填材料;刚架-复合弹性板力学模型;地震反应

中图分类号: TU313;TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0479-05

随着我国经济快速发展,城市化进程加快,能源环境问题突出.虽然新型建材的应用得到了较好的发展,但应用量较发达国家还有很大差距,粘土砖的使用量更是占墙体材料 70%左右,导致每年大量农田被挖毁.为适应我国国情,满足墙体材料革新及建筑节能要求,课题组研发的生态复合墙结构是一种生态环保、施工方便、经济实用、具有多道抗震防线的新型住宅结构体系,其内填材料可根据当地生态材料的要求按因地制宜、就地取材原则选用,研究和应用适用于不同地区的生态复合墙结构,对加速传统建筑业技术进步和产业化升级将产生重要作用.课题组前期已根据不同地域特色及环境类别,研发并应用了几种复合墙体生态内填材料^[1].本文结合课题组前期的研究成果,采用 SAP2000 有限元软件建立生态复合墙结构刚架-复合弹性板力学模型,对不同内填生态材料的墙体结构在弹性阶段的地震反应进行对比分析.

1 生态复合墙体内填材料研究

在生态复合墙结构体系中,墙体不仅起着围护、分隔作用,同时还起着承重的作用,因此所选的内填材料在力学性能上应能与外框架共同受力,协同工作,充分发挥生态复合墙结构的力学性能.由于生态复合墙结构构造的特殊性,其内填生态材料还应满足轻质、抗压强度大、保温性能好、材料经济等性能要求.本文在课题组前期研发及试验的基础上,对五种生态复合墙体内填材料进行了相关研究.

1.1 不同生态内填材料

1) 加气混凝土

加气混凝土是含硅材料(如砂、粉煤灰、尾矿粉等)和钙质材料(如水泥、石灰等)加水并加入适量发气剂和其它附加材料,经混合搅拌、浇注发泡、坯体静停与切割后,再经蒸压或常压蒸汽养护制成的一种具有多孔结构的人造材料,而且废弃的轻质加气混凝土砌块经改性后可作为晶种加入掺有水泥的轻质加气混凝土中生产新的制品,并用以改善轻质加气混凝土的性能.

根据课题组前期试验^[2],选取容重为 580 kg/m³ 的加气块作为研究对象,其配合比为水泥 7.5%,砂 75%,外加剂 2%,其受压区应力-应变关系数学表达式:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1.3(\varepsilon/\varepsilon_0) - 0.3(\varepsilon/\varepsilon_0)^3 \right] \quad 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - 1.2(\varepsilon/\varepsilon_0) \right] / \left[3.5 - 3.7(\varepsilon/\varepsilon_0) \right] \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (2)$$

基本参数可按式确定: $\sigma_0 = 0.85f_{ck}$, $\varepsilon_0 = 0.0025$, $\varepsilon_u = 0.004$. 其中: σ_0 为轻质加气混凝土的峰值应力,取其轴心抗压强度设计值; f_{ck} 为加气混凝土的抗压强度标准值; ε_0 和 ε_u 分别为混凝土的峰值应变以及极限压应变.

2) 陶粒

陶粒是以粘土、页岩等为主要原料,掺加少量粘结物和固体燃料,经混合成球、高温焙烧而制成的一

种人造轻骨料,以它为骨料制成的轻骨料混凝土空心砌块,已经成为我国代替实心黏土砖的主导产品。

根据文献[3],对于强度等级不高于 CL50 的轻骨料混凝土,其应力-应变关系的表达式:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1.5 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - 0.5 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$\sigma = f_c \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (4)$$

3) 发泡混凝土

发泡混凝土是用物理机械方法将泡沫剂水溶液制备成泡沫,再将泡沫加入含硅材料(砂、粉煤灰等)、钙质材料(石灰、水泥)、水及附加剂组成的料浆中,经混合搅拌、浇注成型、蒸养或蒸压养护而成的轻质多孔建筑材料^[4]。

利用文献[5]给出 B07 级泡沫砌块应力应变曲线采用两段式,采用上升段曲线宜采用高次抛物线;实测下降段曲线较离散,采用有理分式:

$$\text{上升段: } \sigma = \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - 1.1 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 - 1.7 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^3 + 3.8 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^4 - 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^5 \right] \quad 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\text{下降段: } \sigma = \sigma_0 \left[5.2 + 3.7 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right] / \left[1 + 7.9 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right] \quad \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (6)$$

4) 石膏

石膏砌块是以建筑石膏为主要原料,经加水搅拌、浇注成型和干燥而制成的轻质块状石膏制品,在制作过程中可加入膨胀珍珠岩、轻陶粒等轻集料、植物纤维、玻璃纤维增强材料、泡剂等辅助材料来提高或改变其性能。

根据文献[6-7],得到比较合理的石膏本构数学表达式。

$$\sigma = \sigma_0 \left[3.04 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^4 - 8.33 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^3 + 7.31 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 + 2.79 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right] \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (7)$$

5) 草砖

草砖是利用麦秸秆或棉花秸秆为主要原料,经草砖机打压成型的一种新型绿色建材,具有自重轻、隔热性好、隔音效果佳等优点,同时能够满足抗燃烧能力和耐久性要求。

在课题组前期试验基础上,选取小麦秸秆与黄土混合制成松散体积比 1:2,容重为 540 kg/m³ 麦秸秆纤维生土基砌块作为研究对象,其受压区应力-应变关系数学表达式:

$$\sigma = \sigma_b \left[1.29 \left(\varepsilon / \varepsilon_b \right) - 0.0004 \right] \quad 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_b \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma_c \left[0.25 \left(\varepsilon / \varepsilon_c \right)^3 - 1.42 \left(\varepsilon / \varepsilon_c \right)^2 + 2.21 \left(\varepsilon / \varepsilon_c \right) \right] \quad \varepsilon_b < \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (9)$$

1.2 不同生态内填材料性能指标

对于不同的内填材料,其物理性能有较大的差异。由表1可以看出,发泡砌块和石膏砌块的容重较大,而加气块、陶粒块和草砖的容重相对较小,且相差不大;除石膏砌块外,其余四种材料的弹性模量都较小,且远小于混凝土材料的弹性模量,其中加气块、陶粒块和发泡砌块三者的弹性模量值比较接近,而草砖由于其材料特性,弹性模量最小。草砖的泊松比较大,其余四种的泊松比均接近。

表1 不同材料砌块物理性能指标
Tab.1 Physical performance indicators of different material block

砌块类别	加气块	陶粒块	发泡砌块	石膏砌块	草砖
容重/kN·m ⁻³	5.8	5.65	7.0	6.5	5.4
弹性模量/N·mm ⁻²	1 680	1 336	1 130	8 404	41
泊松比	0.22	0.20	0.20	0.20	0.35

2 生态复合墙结构简化数值模型研究

由于生态复合墙结构体系独特的构造(多种材料的使用,多种构件的嵌套),使其实体计算模型单元种类多、数量大、计算异常复杂,故对于整体结构的计算分析,需提出简化的刚架-复合弹性板力学模型,用于计算整体结构在弹性阶段的内力和变形情况,其模型如图1所示。

在弹性阶段,生态复合墙作为一个整体受力构

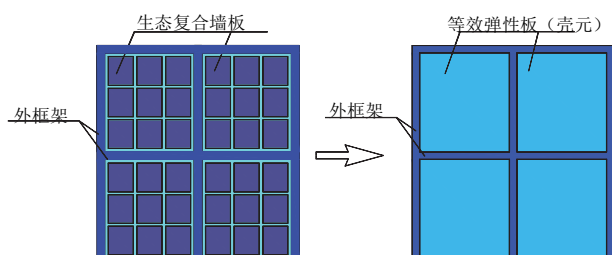


图1 刚架-复合弹性板模型示意图

Fig.1 The model of frame-composite elastic plate

件, 内填砌块与混凝土肋格协同工作, 可将其近似的看作一整块等效弹性板内嵌于外框架中. 结合课题组前期提出的刚架-复合弹性板模型及相关的研究成果, 在刚架-复合弹性板等效模型中, 采用 SAP2000 程序提供的框架单元来模拟外框架梁和柱, 肋梁、肋柱为增强纤维的复合材料等效弹性板, 采用程序提供的板壳对象. 通过试验及有限元模型进行对比分析, 刚架-复合弹性板等效模型能够较为真实地模拟实体结构的受力情况, 可用于确定生态复合墙结构在弹性阶段内力计算和弹性时程反应分析^[8].

3 内填不同生态材料复合墙结构弹性反应对比分析

3.1 工程概况及计算模型

本算例模型为已建成的一栋 7 层生态复合墙结构住宅楼, 主体结构高度为 21.150 m, 当地抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 0.20 g, 场地类别为 II 类, 设计地震分组为第一组, 特征周期为 0.35 s, 结构阻尼比为 0.05, ±0.000 m 以上的混凝土等级均为 C30, 层高均为 3.00 m, 墙板厚度均为 200 mm, 楼板均为 100 mm, 结构中的梁柱采用混凝土杆单元, 生态复合墙体与楼板采用壳单元. 有限元计算模型见图 2.

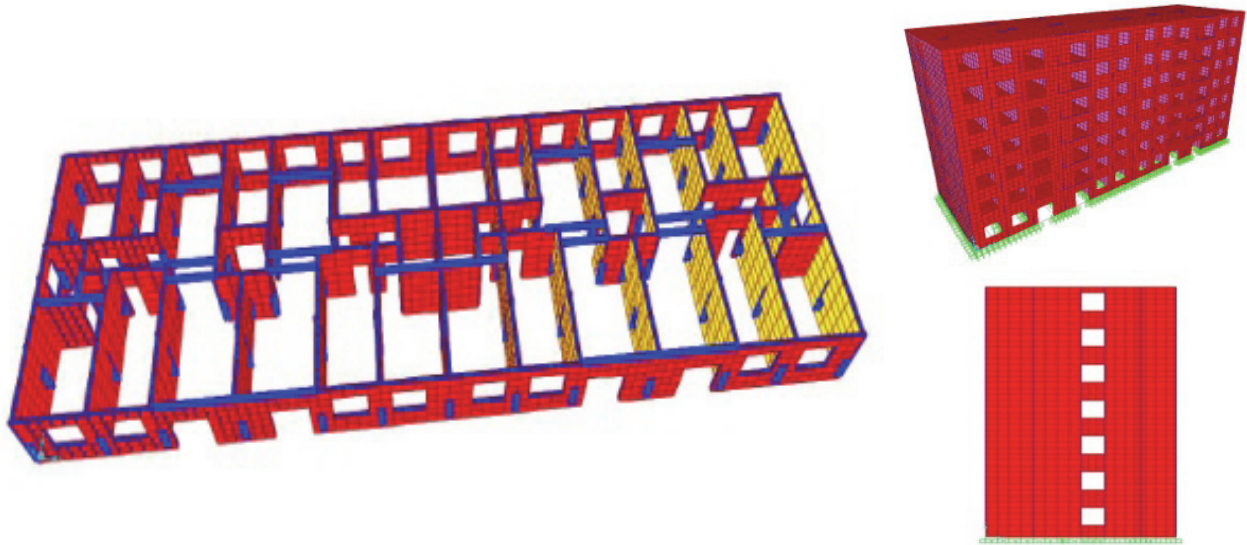


图 2 模型的内部空间及整体模型
Fig.2 The internal space of the model and whole model

3.2 时程反应对比分析

我国现行《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) 规定, 当采用时程分析法时, 应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线, 其中实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3, 其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符.

在选取地震波输入时, 所选取的波形特征与建筑物所在场地的具体条件尽量相符^[9]. 目前抗震设计中, 应用最多的是 El-Centro 波, 其加速度较大, 频带较宽, 持续时间适中, 适合于中软场地土, 且在加速度值相同时, 它的波形能产生更大的地震作用; 其次, Taft 波用的也比较多, 适合于中硬场地土. 本文选取以上两种强震波和一条兰州人工波进行时程分析.

3.2.1 内填砌块的频率对比分析

频率是结构的固有特性, 是描述振动物体往复运动频繁程度的量, 与结构的质量和刚度有关. 当改变生态复合墙结构内部填充材料时, 生态复合墙结构的质量与刚度都会发生变化. 利用有限元软件对变换不同材料生态复合墙结构做时程反应分析, 得到它们各自的频率.

由表 2 可以看出, 取出前三阶振型分析, 当墙体内填石膏砌块时频率最大, 其余四种材料的频率较为接近, 内填草砖时频率最小; 这是因为内填石膏块的抗侧刚度最大, 从而使墙体结构的周期最小, 频率最大.

表 2 不同内填材料频率数值解对比
Tab.2 Contrast of fill material within different frequency solution

振型	加气块	陶粒砌块	发泡砌块	石膏砌块	草砖
F1	2.969 7	2.257 0	2.240 3	6.195 2	2.022 5
F2	3.409 3	2.592 6	2.572 3	7.315 3	2.303 4
F3	3.742 1	2.810 0	2.877 7	8.023 8	2.485 2

3.2.2 不同地震波下不同内填材料各楼层位移对比

图3~5给出了不同地震波下不同内填材料的生态复合墙结构各层侧移、层间位移及加速度反应的对比图。

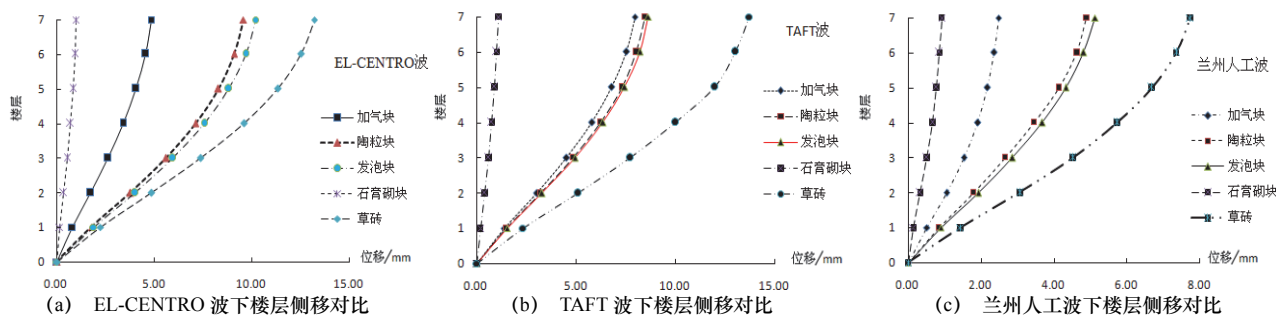


图3 各地震波作用下楼层侧移对比

Fig.3 The floor sideways comparison under the action of shock waves

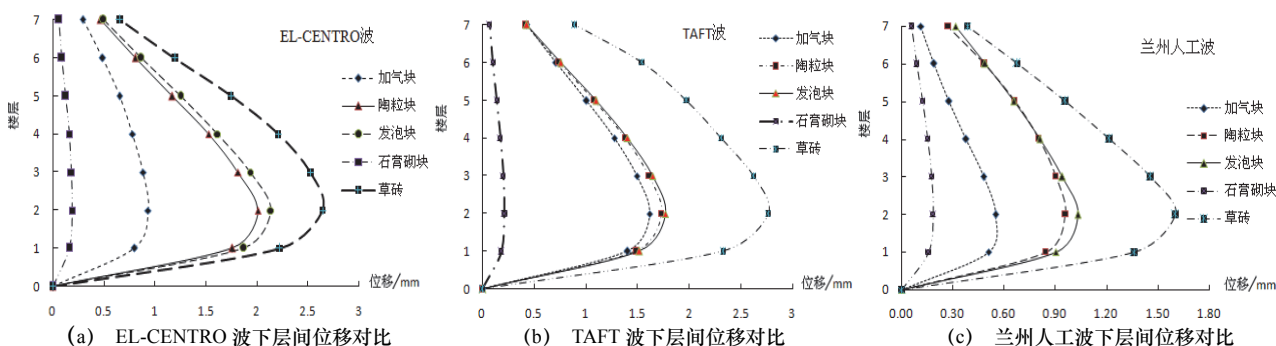


图4 各地震波作用下层间位移对比

Fig.4 The storey drift comparison under the action of shock waves

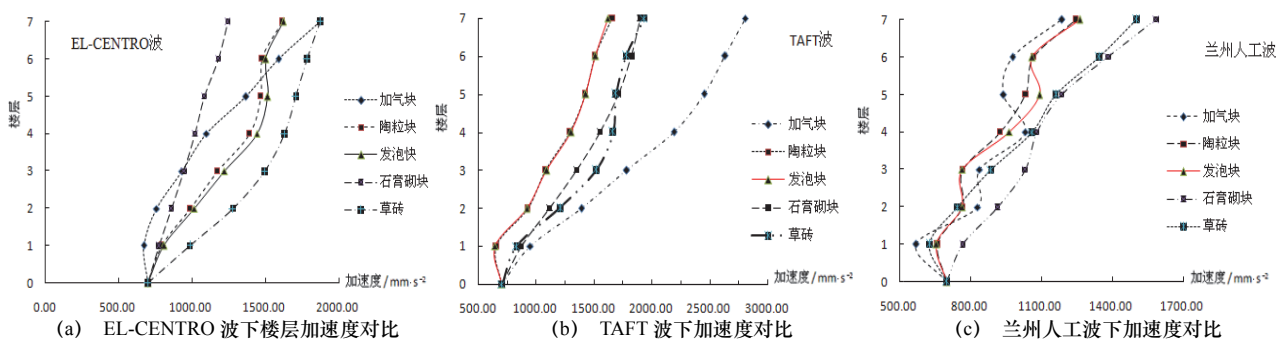


图5 各地震波作用下加速度对比

Fig.5 Comparison of acceleration under the action of shock waves

从上图可以看出,当内填草砖时,生态复合墙结构的侧移及层间位移最大,侧移量为最小的石膏砌块的13倍,这是由于内填草砖的强度和弹性模量较小所致.当内填材料为陶粒块和发泡块时,由于两者具有较为接近的容重及弹性模量,因此在侧移及层间位移对比图上曲线较为接近,说明其结构侧移及层间位移相差不大.在三种不同的地震波作用下,五种不同内填材料的楼层加速度趋势大体趋于一致.内填加气块时,在TAFT波作用下的顶层加速度最大,其它材料相差较小.

4 结语

结合课题组前期的研究成果及相关理论,采用SAP2000有限元分析软件对内填不同生态材料的复合墙结构在弹性阶段的地震反应进行对比分析,得到以下结论:

采用课题组前期验证的刚架-复合弹性板力学模型,对某工程实例作分析研究,对比分析不同内填材料的生态复合墙结构在弹性地震反应作用下的侧移、层间位移及加速度等性能指标,分析结果表明:在多种地震波作用下,内填石膏砌块墙体的频率最大,其余四种材料的频率较为接近,且草砖的频率最小;当

内填草砖时, 侧移及层间位移最大, 内填陶粒块和发泡块时, 侧移及层间位移较为接近, 而内填石膏时最小; 五种不同内填材料的楼层加速度曲线趋势大体趋于一致。

参考文献 References

- [1] 陈国新, 黄炜, 张荫. 内填不同材料填充砌块生态复合墙体抗震性能对比[J]. 中南大学学报, 2012, 43(11):4491-4500.
CHEN Guoxin, HUANG Wei, ZHANG Yin. Comparison on seismic behavior of ecological composite walls filled with different materials block[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(11):4491-4500.
- [2] 陈国新. 基于统一强度理论的生态复合墙体计算模型与承载力分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
CHEN Guoxin. Analysis on calculation model and bearing capacity of ecological composite-wall based on the twin shear unified strength theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [3] 邵永健, 朱聘儒. 轻骨料混凝土的应力-应变曲线的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2005(1):19-21.
SHAO Yongjian, ZHU Pinru. The study of the stress-strain curve of lightweight aggregate concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2005(1):19-21.
- [4] 张福占. 发泡混凝土的特点及应用[J]. 建筑与工程, 2008(23):144-145.
ZHANG Fuzhan. The characteristics and applications of the foamed concrete[J]. Architecture and engineering, 2008(23):144-145.
- [5] 颜雪洲. 泡沫混凝土力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2007(S1):962-964.
YAN Xuezhou. Experimental study on the mechanical property of foamed concrete[J]. Industrial Construction, 2007(S1):962-964.
- [6] WANG C M, KITIPORNCHAI S, LIM C W, et al. Beam bending solutions based on nonlocal Timoshenko beam theory[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(6):475-481.
- [7] 左仲存. 混凝土灌芯石膏板简化计算模型及受力性能分析[D]. 天津:天津大学, 2007. 01.
ZUO Zhongcun. Concrete pouring core plasterboard simplified calculation model and mechanical performance analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. 01.
- [8] 黄炜, 张程华. 密肋壁板结构简化计算模型对比分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7):187-191.
HUANG Wei, ZHANG Chenghua. Comparative analysis of simplified computation models of a multi-ribbed slab structure[J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(7):187-191.
- [9] CHOPRA A K, RAKESH X, GOEL K. Direct displacement based design: use of inelastic vs. elastic design spectra[J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(1):47-64.

Seismic response analysis on the eco-composite analysis wall structure in-filled with different materials

HUANG Wei¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Chenghua^{1,2}, WANG Dongdong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Composite wall is a new type of ecological environmental protection residential structure system, and its fill material can meet the principle of adjust measures to local conditions. This paper is based on five kinds of ecological composite wall material which the group had researched and developed, using proven frame - composite elastic plate mechanics model to contrast analysis of the structure of elastic stage dynamic response and simulate the dynamic performance of the prototype structure in elastic stage. Analysis by using the model of a certain engineering example, calculation and results show that under many kinds of seismic wave, the filling of gypsum block wall peak frequency, frequency of the rest of the four kinds of material is close, frequency is the minimum when filled with the grass brick. When filled with the grass in brick, the lateral displacement and displacement between the layers is the largest. When the wall is filled with ceramsite block and foam block, the lateral displacement and displacement between the layers is relatively close, and it is minimum when filled with gypsum. The wall is filled with material within the five different material floor acceleration curve trend generally tend to be more consistent.

Key words: ecological composite wall structure; fill material; framework-composite elastic shaking table model; seismic response

(本文编辑 桂智刚)