

郭卫松. 反复荷载下的腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性能建模分析[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 175-182. [GUO Weisong. Modeling Analysis of Impact Resistance of Light Steel Keel Masonry Retaining Wall with Web Openings Under Repeated Loads[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 175-182]

# 反复荷载下的腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体 抗冲击性能建模分析

郭卫松

(西安工程大学, 西安 710048)

**摘要:** 针对现有围护墙体抗冲击性能分析模型存在的分析效果差的问题, 在考虑反复荷载的前提下, 设计腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性能模型。根据围护墙体的组成结构、材料性能, 构建相应的有限元模型。根据地震数据生成反复荷载, 模拟反复荷载的加载过程。设置位移、变形、位移延性和刚度退化量作为抗冲击性能的量化测试指标, 通过有限元模型数据的提取与计算, 得出最终的抗冲击性能分析结果。经过实验分析, 发现设计模型的输出结果与实测结果基本一致, 能够将数据偏差控制在0.1以下, 即设计围护墙体抗冲击性能模型具有良好的分析效果。

**关键词:** 反复荷载; 腹板开孔轻钢龙骨; 砌体围护墙体; 抗冲击性能;

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0175-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.20

## Modeling Analysis of Impact Resistance of Light Steel Keel Masonry Retaining Wall with Web Openings Under Repeated Loads

GUO Weisong

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In view of the poor analysis effect of the existing analysis model of impact resistance of retaining wall, the impact resistance model of light steel keel masonry retaining wall with web opening is designed under the premise of considering repeated load. According to the composition, structure and material properties of the retaining wall, the corresponding finite element model is constructed. According to the seismic data, the repeated load is generated to simulate the loading process of the repeated load. The displacement, deformation, displacement ductility and stiffness degradation are set as the quantitative test indexes of impact resistance. The final analysis results of impact resistance are obtained through the extraction and calculation of finite element model data. Through experimental analysis, it is found that the output results of the design model are basically consistent

收稿日期: 2023-03-13

作者简介: 郭卫松(1986-), 男, 硕士, 注册建造师, 研究方向为土木工程与工程管理。

E-mail: kuilaidunqyo@163.com

with the measured results, and the data deviation can be controlled below 0.1, that is, the design of the impact resistance model of the retaining wall has a good analysis effect.

**Keywords:** Repeated load; Light steel keel with web opening; Masonry retaining wall; Impact resistance

## 0 引言

砌体围护墙体是在建筑四周外侧的墙, 主要起到维护、保温的作用, 为了保证保温效果以及稳定性大多使用轻钢龙骨形式的砌体围护墙体。轻钢龙骨墙体是以冷弯薄壁型构件与石膏板为主要骨架, 内填充岩棉等保温材料构成的一种保温墙体, 由于轻钢龙骨墙体具有装配化程度高、节能环保等特点, 有利于建筑工业化, 因此在建筑行业中得到广泛应用。常规轻钢龙骨墙体保温性能较差, 在内部和外部热量传递过程中会出现“冷(热)桥效应”, 从而影响墙体的整体传热性能, 也难以满足严寒地区对保温性能的要求<sup>[1]</sup>。为此提出了腹板开孔轻钢龙骨墙, 即在靠近墙板中轴处设置通长细孔, 这种类型的墙体可以大大提高保温效果, 但这种类型的墙体不可避免地会对构件的力学性能产生影响, 其中包括在影响构件抗冲击能力的情况下, 需要对其抗冲击性能进行研究。

从当前的研究情况来看, 对围护墙体抗冲击性能的分析主要使用建模分析方式, 并得到了诸多较为成熟的研究成果。例如张国伟等<sup>[2]</sup>为考察预制围护结构对框架结构抗震性能的影响, 对刚度较强的两种混凝土墙板开展模拟静力试验, 研究新型外挂墙板的抗冲击性能。预制围护墙体的新

型连接节点设计较为合理, 可以有效实现震动情况下围护结构的可靠连接, 但在开展试验的过程中, 仅侧重分析实验所得结果, 真实性有待提高; AHMED等<sup>[3]</sup>提出通过添加黄麻纤维来提高混凝土墙的抗冲击性。在原型墙中加入黄麻纤维, 并对其进行冲击试验, 分析黄麻纤维占水泥质量的最优比例。应用最优比例建造的混凝土墙具有较强的防震防爆能力, 可以避免混凝土碎片在爆炸冲击下出现扩散的可能, 但由于通过开展冲击试验分析最优比例, 投入成本较高, 且实验结果分析精度较低。

针对现有抗冲击性能分析模型得出的分析结果与墙体真实性能之间存在较大差异, 即现有模型存在分析精度低的问题, 本文在现有建模结果的基础上, 考虑反复荷载作用机理对腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性能模型进行优化设计, 最大程度的还原墙体的实际抗冲击性能。

## 1 腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性模型设计

优化设计的腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性模型以墙体结构以及反复荷载数据作为输入值, 经过受力分析与推导运算, 将抗冲击性分析结果以数据的形式输出。

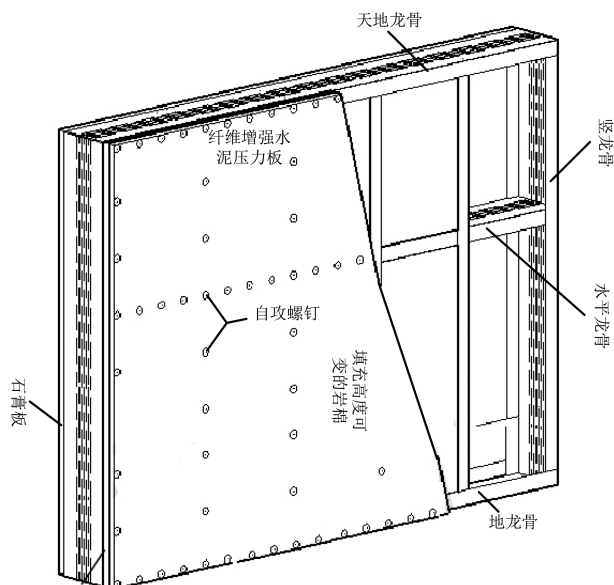


图1 腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体组成结构图

Fig.1 Composition structure of light steel keel masonry retaining wall with web openings

### 1.1 建立轻钢龙骨砌体围护墙体有限元结构模型

此次轻钢龙骨砌体围护墙体有限元结构模型的构建选择 ABAQUS 作为有限元分析软件, 该软件具有良好的模拟计算能力和庞大的求解功能。

在装配过程中, 通常竖龙骨设计间距区间为 [450 mm, 600 mm]。用自攻螺钉连接龙骨与覆板之间, 自攻螺钉间距 260 mm, 天、龙、门边的龙骨间距为 180 mm。

设置开孔排数、钢板厚度、腹板高度、开孔端距等腹板开孔参数, 通过相关数据分析发现开

孔排数越多、腹板高度和钢板厚度越大, 对应围护墙体的力学性能越优, 因此设置开孔排数为 9 排, 腹板高度和钢板厚度分别为 180 mm 和 1.5 mm。另外龙骨开孔区域与龙骨端部的距离是端距端距的大小, 反映龙骨未开孔区域所占比重<sup>[4]</sup>, 直接影响龙骨的保温性能。为了保证连接处能较好地传递轴力和剪力, 保证连接的可靠性, 承重墙的端距不得小于 250 mm, 最后开孔端距为 270 mm, 最后得出腹板开孔结构如图 2 所示。

按照图 2 表示的腹板开孔方式对初始墙体进行结构调整。

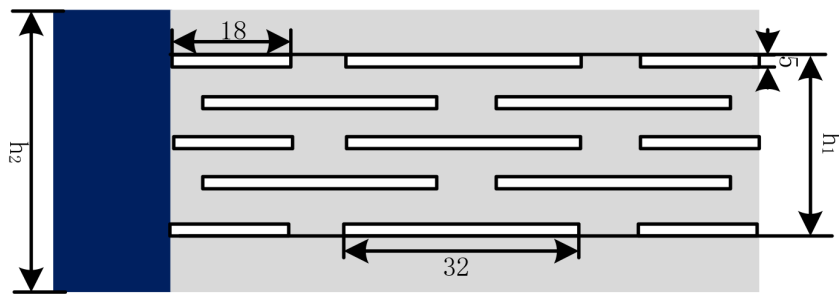


图2 轻钢龙骨砌体围护墙体腹板开孔布置图

Fig.2 Layout diagram of light steel keel masonry retaining wall web openings

#### 1.1.1 材料本构模型

根据腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体组成结构分析结果构建其材料本构模型, 从材质方面来看, 围护墙体组成元件包括钢材和混凝土两个部分。钢筋本构关系的数学表达式如下:

$$\sigma_{\text{steel}} = \begin{cases} E_{\text{modulus}} \varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_e \\ -A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C, \varepsilon_e < \varepsilon \leq \varepsilon_{e1} \\ f_1, \varepsilon_{e1} < \varepsilon \leq \varepsilon_{e2} \\ f_1 \left[ 1 + 0.6 \frac{\varepsilon - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right], \varepsilon_{e2} < \varepsilon \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_1, \varepsilon > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $\varepsilon$  为应变变量,  $\varepsilon_i$  表示的是各个阶段的应变门限值,  $E_{\text{modulus}}$  为材料的弹性模量,  $f_1$  代表钢材的屈服极限,  $A$ 、 $B$  和  $C$  均为常数系数<sup>[5]</sup>。而混凝土本构模型中的等效受压应力-应变关系可以表示为:

$$\sigma_{\text{concrete}} = \begin{cases} \sigma_0 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{peak}}} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{peak}}} \right)^2 \right], \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{peak}} \\ \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{peak}}}{\varepsilon_{\text{cu}} - \varepsilon_{\text{peak}}} \right], \varepsilon_{\text{peak}} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{u}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $\sigma_0$  为初始应力,  $\varepsilon_{\text{cu}}$  和  $\varepsilon_{\text{peak}}$  分别表示极限应变和峰值应力时的应变变量。然而混凝土在受拉和受压两种工况下形变规律存在明显差异, 如图 3

所示。

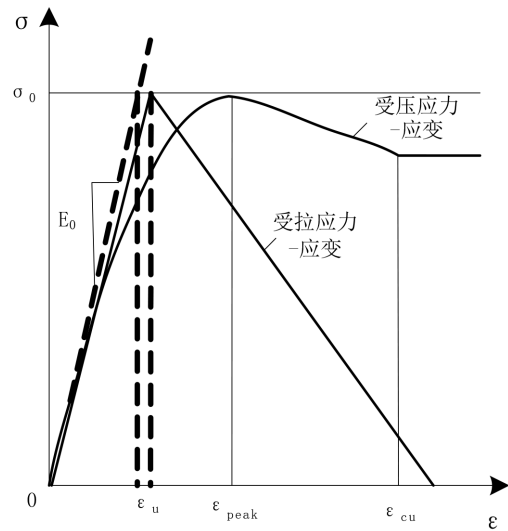


图3 混凝土受压/拉的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of concrete under compression or tension

由图 3 可知, 在实际的轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性分析中需要考虑有限元结构模型的应力方向。

在进行网格划分时要考虑多个方面的问题, 如果网格划分得太密, 虽然可以保证其计算精度, 但会产生较长时延<sup>[6]</sup>, 而且其精度的提高不会很大, 因此很不经济; 但是网格划分过大, 会导致

计算结果的不精确,使有限元模拟失去意义。实践中,为了选择适当的网格划分精度,前后两次网格划分的计算结果相差较小,可以证明当前网格划分精度合理,否则需要进一步增加网格数量<sup>[7]</sup>。考虑到模型精细化和计算效率,确定该龙骨网格的最小尺寸为开孔的最小尺寸,即2 mm×2 mm,覆盖板与岩棉建立表面接触,故其网格的最小尺寸为45 mm×45 mm。

经过上述步骤最终得出的围护墙体有限元结构模型构建结果如图4所示。

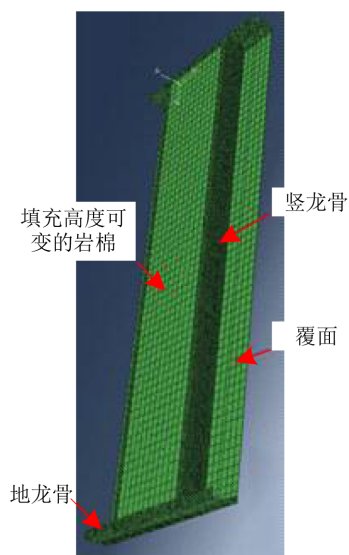


图4 围护墙体有限元结构模型

Fig.4 Finite element structure model of the retaining wall

由此完成实现围护墙体实物与有限元模型之间的转换。

### 1.1.2 模拟反复荷载加载过程

反复荷载是指方向不定的荷载作用,一般会呈现出周期性变化,造成构件拉压区周期性更迭。地震波是反复荷载的典型代表,在模型分析中收集地震数据并利用公式3计算地震波的实时加速度。

$$a'(t) = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} a(t) \quad (3)$$

式(3)中变量 $a(t)$ 为原始地震加速度数据, $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda$ 分别表示加速度最大峰值和实时加速度数据。根据公式3的实时计算结果生成模型的反复荷载,如图5所示。

为了防止反复荷载应力集中产生的计算模型不收敛现象,将反复荷载均匀分布在轻钢龙骨砌体围护墙体与地面的接触面上,实现反复荷载的均匀施加。

## 1.2 输出抗冲击性能分析结果

设置墙体位移量、变形量、位移延性和刚度退化量作为抗冲击性能的量化测试指标,并根据位移/变形量确定对应墙体的极限冲击力和屈服冲击力<sup>[8]</sup>,最终将上述所有性能指标以可视化的方式输出,得出墙体抗冲击性能分析结果。

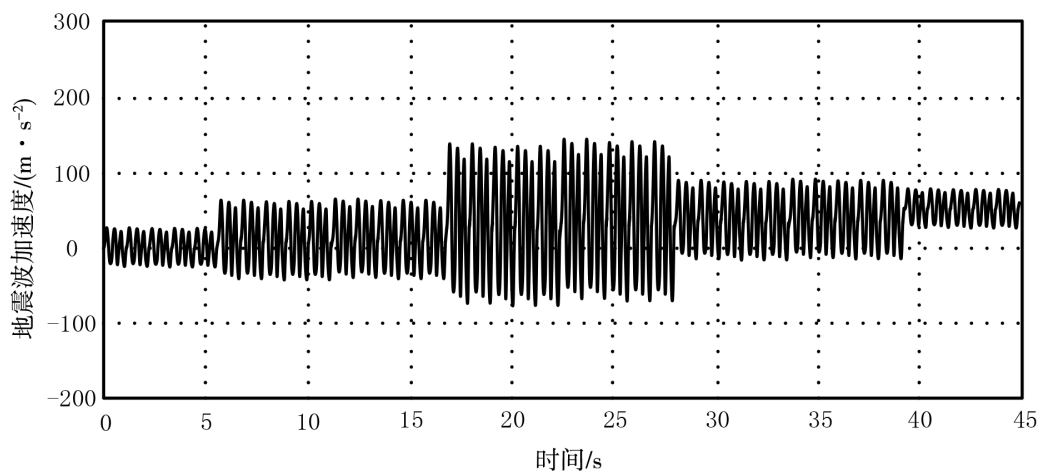


图5 反复荷载时程波形图

Fig.5 Time history waveform diagram of repeated load

### 1.2.1 位移与位移延性

测试的位移指标包括屈服位移和极限位移,屈服位移是材料达到屈服强度时所对应的位移,极限位移是指受压区墙体达到极限应变时所对应的位

移<sup>[9]</sup>。保存初始构建的腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体有限元模型参数,在反复荷载施加完成后读取当前墙体数据,经过对比便可以得出反复荷载加载前后的位移<sup>[10]</sup>。而变形主要指的是腹板开孔轻钢龙



骨砌体围护墙体本身骨架的位置变化, 可以表示为:

$$s_{\text{deform}} = \sum_{i=1}^n |x_i - x'_i| \quad (4)$$

式(4)中 $x_i$ 和 $x'_i$ 表示反复荷载前后围护墙体上 $i$ 点的位置坐标,  $n$ 为墙体上设置的测点数量。记录围护墙体发生位移和变形的起始位置, 该位置对应的应力即为屈服冲击力和极限冲击力。

位移延性是指结构从屈服到破坏这一过程中的塑性变形能力, 延性越高, 结构吸收能量的能力越强, 承受地震荷载的能力越强。位移延性的数值结果为:

$$\chi = \frac{\Delta D}{\Delta Y} \quad (5)$$

式(5)中 $\Delta D$ 和 $\Delta Y$ 分别表示的是墙体极限位移和屈服位移。可以将位移测定结果代入到公式5中, 得出量化的位移延性测试结果。

### 1.2.2 刚度退化

由于加载过程中塑性变形的出现和发展, 导致墙体刚度的退化, 为充分反映往复荷载过程中刚度随顶点位移增加而减小的变化规律<sup>[11]</sup>, 要求连接各阶段刚度和顶点位移, 即一条刚度退化曲线。刚度退化量的计算公式如下:

$$\begin{cases} \eta = K_i - K_0 \\ K_i = \frac{|F_i| + |-F_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 $K_i$ 和 $K_0$ 分别表示第 $i$ 次反复循环加载后的墙体等效刚度和初始刚度,  $F_i$ 、 $-F_i$ 、 $\Delta_i$ 和 $-\Delta_i$ 分别对应的是第 $i$ 次循环中正负方向峰值点处对应的水平荷载值和位移值<sup>[12]</sup>, 进而得出最终的刚度退化量测定结果。

通过相关数据的记录与计算, 得出反映抗冲击性能的量化测定指标, 并以此作为腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性能模型的最终输出结果。

## 2 实证分析

此次实证分析主要是通过对比模型分析结果与真实性能之间的一致性, 测试设计围护墙体抗冲击性能模型的分析效果。

### 2.1 制作腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体试件

所制墙体试件由三块 1200 mm×1400 mm 外挂板组成, 每块间距 400 mm。外挂板中间采用 Q235

钢制作的钢龙骨, 其两侧均为水泥纤维板, 同时用岩棉填充钢龙骨与两侧水泥纤维板之间的空隙, 钢龙骨与水泥纤维板之间用自攻螺钉连接, 水泥纤维板与保温岩棉通过胶凝材料连接。综合考虑实验条件, 共制作 4 个高宽比相同但水平钢筋和竖向钢筋间距不同的试件作为实验的研究对象。

### 2.2 实验反复荷载加载装置

试验采用的垂直荷载装置有反力横梁、竖向液压千斤顶等, 千斤顶的中心和墙的中心在竖直方向上对正, 保证加载装置施加的应力能够全部作用在墙体表面中心, 使墙顶部加载梁上表面的中心分布梁与加载梁间的受力均匀。水平加载装置有匀载钢板、拉杆等, 在墙顶单点加载时, 通过额定输出 1 200 kN 的水平液压千斤顶加上水平荷载。在水平推力作用下, 剪力墙在垂直方向上能发生微小移动, 保证墙体始终受竖向轴压<sup>[12]</sup>。另外图 6 表示的是墙体试件的水平荷载施加方式。

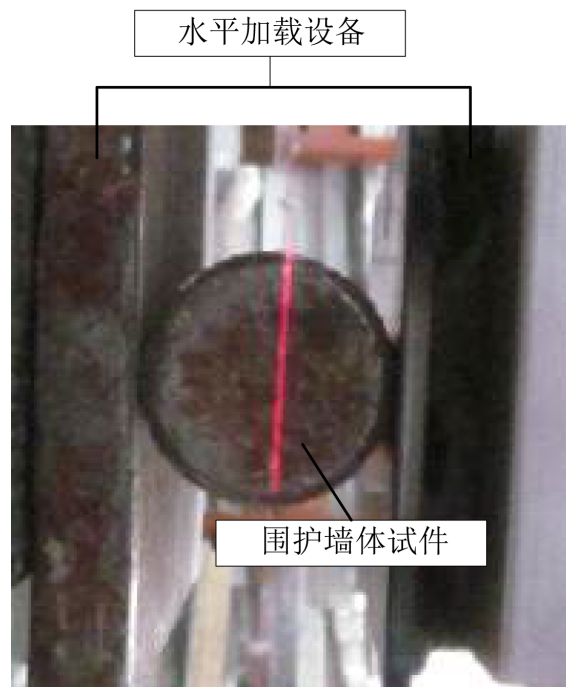


图6 围护墙体试件横向荷载施加示意图

Fig.6 Schematic diagram of lateral load application on the specimen of the retaining wall

设置横向荷载的额定输出为 800 kN, 水平液压千斤顶施加水平方向, 形成反复荷载。

### 2.3 设置墙体抗冲击性能测点

测试期间, 需要监测腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体试件的应变变化, 在每个试件距跨中 5

cm 及中距跨中四分之一纯弯段长截面布置应变片：对于开腹板的试件，在上、下三个试件上布置应变片，每根试件上布置应变片，每根试件上布置应变片数共 20 枚。

2.4 描述试件抗冲击性测试过程

此次实验分为抗冲击性实测和模型输出两个部分，在制作的腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体试件上利用准备的加载装置实现反复荷载的添加，并记录反复荷载施加数据。经过多次循环后得出观察墙体表面的变形和位移情况，利用刻度尺等工具得出得出抗冲击性指标的测试结果。图 7 表示的是试件表面形变的测量结果。

同理可以得出其他抗冲击性指标的量化测试数据，并以此作为实测实验数据。模型输出部分就是按照围护墙体试件结构生成对应的有限元模型，并将记录的反复荷载数据输入到设计的分析模型中，得出围护墙体抗冲击性能分析模型的输出结果，如图 8 所示。

由此可以得出实验中其他 3 个墙体试件的实测与模型分析结果。

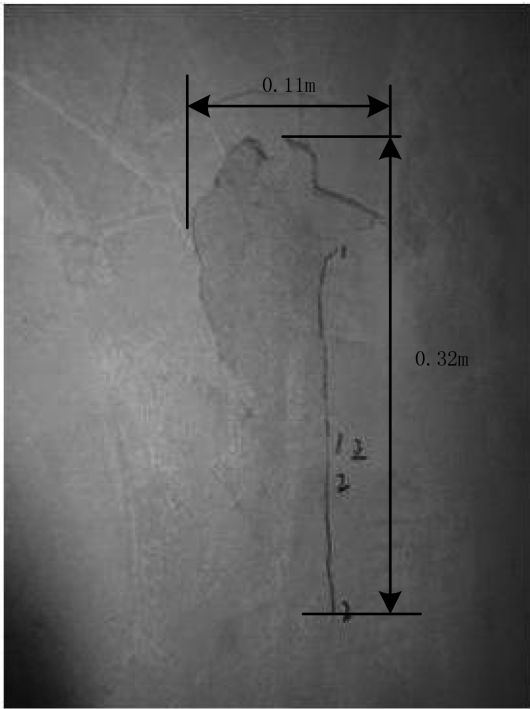


图7 围护墙体试件表面形变示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of surface deformation of specimen of retaining wall

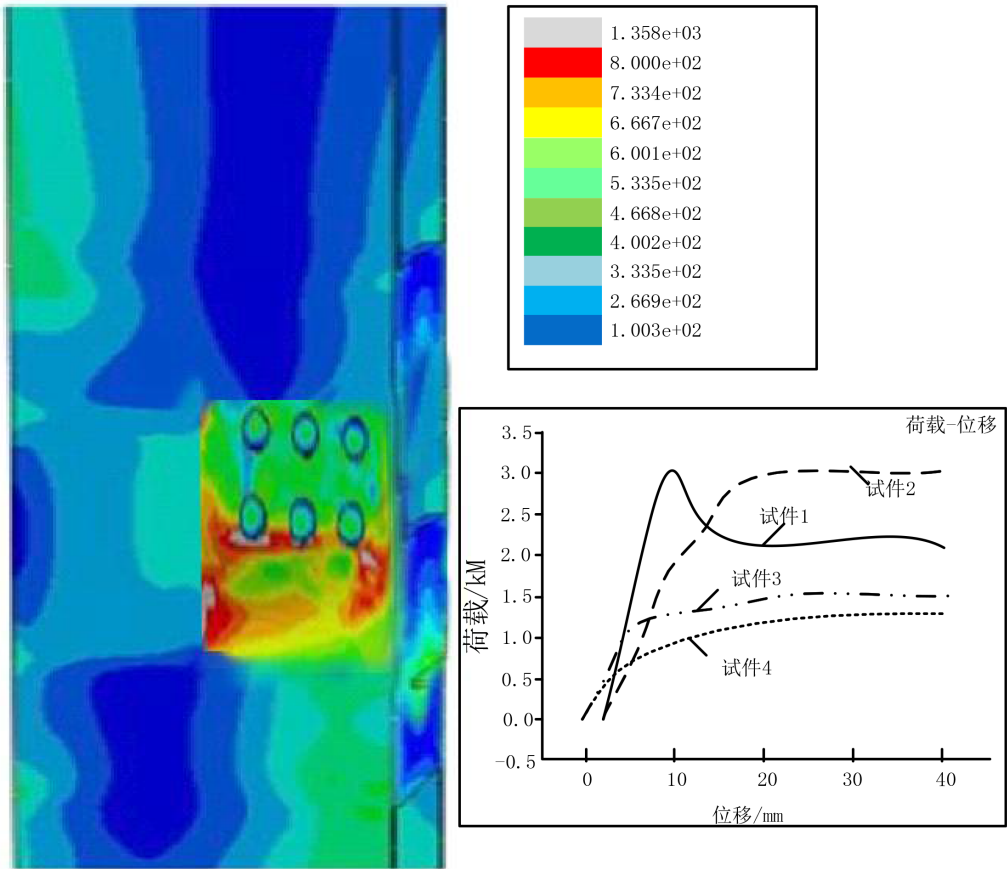


图8 围护墙体抗冲击性能分析模型输出结果  
Fig.8 Output results of impact resistance analysis model of the retaining wall

2.5 设定模型性能测试指标

实验设置的量化测试指标为 $\delta$ ，用来表示分析模型输出数据与实测数据之间的偏差，其数值结果可以表示为：

$$\delta = |d - d'| + |s_{\text{defor}} - s'_{\text{defor}}| + |\chi - \chi'| + |\eta - \eta'| \quad (7)$$

式(7)中 $d$ 、 $s_{\text{defor}}$ 、 $\chi$ 和 $\eta$ 均为设计模型的输出数据， $i'$ 为实测数据。为了保证设计腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性能分析模型的应用价值，要求模型输出数据与真实实验数据之间的偏差不得高于0.1。

2.6 实验现象描述与对比结果分析

经过相关数据的统计，得出位移量、变形量

以及位移延性指标的模型输出值与实测值，如表1所示。

表1中的位移量和变形量测试结果综合考虑了水平和竖直两个方向，将表1中的数据代入到公式7中，可以得出模型输出与实测结果在位移、变形以及位移延性三个方面的偏差平均值分别为0.007 5 m、0.01 m和0.005，均小于0.1，满足分析模型对精度的要求。同理可以得出抗冲击性能中刚性退化指标的测试对比结果，如图9所示。

从图9中可知，模型输出的刚度退化曲线与实测结果无明显差异，将图9中的数据代入到公式7中得出刚度退化量的偏差值为0.025，低于0.1。

表1 位移量、变形量与位移延性指标的对比数据表

Table 1 Comparison data table of displacement, deformation and displacement ductility index

试件编号	实测结果			抗冲击性能模型输出结果		
	位移量/m	变形量/m	位移延性	位移量/m	变形量/m	位移延性
1	0.79	1.75	1.33	0.80	1.77	1.33
2	1.12	1.56	1.48	1.12	1.58	1.49
3	0.85	1.62	1.50	0.85	1.62	1.51
4	1.23	1.75	1.37	1.21	1.75	1.37

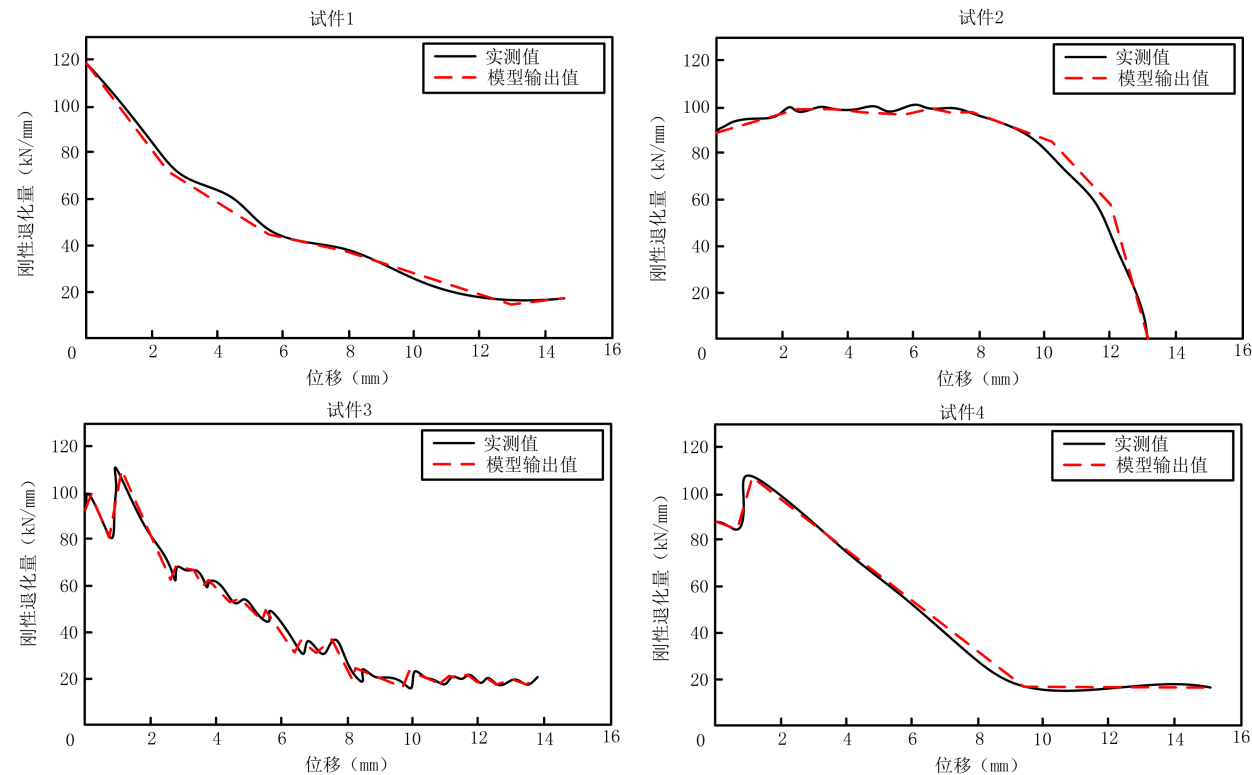


图9 各试件刚度退化指标对比曲线

Fig.9 Comparison curve of stiffness degradation index of each specimen

### 3 结束语

在考虑反复荷载的前提下,设计腹板开孔轻钢龙骨砌体围护墙体抗冲击性能模型对当前建筑工程领域的发展具有重要意义。本文设置位移、变形、位移延性和刚度退化量作为抗冲击性能的量化测试指标,通过有限元模型数据的提取与计算,得出最终的抗冲击性能分析结果,分析结果与实际墙体的抗冲击性能基本一致,具有良好的分析精度与应用价值。在实际的围护墙体建设与管理工作中,通过构建模型的应用能够降低外力对墙体实物的破坏,有效提升建筑墙体的抗冲击性能。

### 参考文献

- [1] 聂少锋,武杨凡,王继琴,等. 钢管加强梁腹板开孔型梁柱弱轴连接节点的抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019,41(6):22-30.
- [2] 张国伟,高海智,汪浩强,等. 新型预制围护墙体-两层足尺钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2022, 52(6):61-70.
- [3] Ahmed S, Ali M. Use of agriculture waste as short discrete fibers and glass-fiber-reinforced-polymer rebars in concrete walls for enhancing impact resistance[J/OL]. Journal of cleaner production, 2020[2023-09-10]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122211>.
- [4] 王小平,何德才,王肖雄. 外包发泡混凝土角钢龙骨组合墙体抗侧力试验及分析[J]. 工业建筑,2019,49(3):167-173.
- [5] 葛俊,赵宝成. 设置开孔腹板耗能连梁的连柱钢支撑结构抗震性能分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2020,33(2):1-8.
- [6] 周晓洁,寇晓媛,崔金涛,等. 空心砌块墙体抗震性能试验及非线性有限元分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019,27(2):341-358.
- [7] 陈伟,应湛梦云,张明亮,等. 再生混凝土横孔空心砌块墙体抗压性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2021,41(4):120-130.
- [8] 李爱影,张微敬. 预制双向孔剪力墙抗震性能有限元分析[J]. 土木工程与管理学报,2019,36(6):166-170+177.
- [9] 薛建阳,翟磊,李海博,等. 低周反复荷载下传统风格建筑钢筋混凝土-钢管混凝土组合框架抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(9):53-62.
- [10] 刘宽,马煜东,黄娇,等. 低周反复荷载下 Q460 钢材框架柱抗震性能分析[J]. 震灾防御技术,2019,14(3):535-554.
- [11] 邱文亮,田甜,张哲. 反复荷载作用下钢管混凝土组合桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(17):156-164+183.
- [12] 闫清峰,祝英杰,韩正伟. 底层框架-配筋砖墙墙体抗震性能研究分析[J]. 青岛理工大学学报,2019,40(4):19-26.