



基于改进 Pushover 方法的轻型木结构抗震性能分析

王中强¹, 廖亮东¹, 罗声远²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南泊富地产发展有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘要:随着轻型木结构房屋的大量普及,其抗震性能分析精度要求更为严苛。为精确反映出轻型木结构在地震作用下的位移需求和抗震能力,从而确保结构的安全性,文章采用理论推导和数值模拟的方法,介绍一种以性能抗震设计为基础,结合结构屈服点、荷载模式和形状向量等修正参数的改进 Pushover 分析方法,分析模态 Pushover 法和改进 Pushover 法对两层轻型木结构建筑抗震性能的差异性。结果表明:模态 Pushover 分析方法估算结构顶点位移需求的精度仍可以接受,但层间位移需求的估计结果严重偏低;改进的 Pushover 分析方法降低了顶点位移需求和层间位移需求的估计误差,其中对层间位移需求估计误差的降低幅度最为显著,误差可控制在 10% 左右。该方法具有较高的估算精度,可为轻型木结构的理论分析和实际工程应用提供参考。

关键词:结构工程; 地震; Pushover 分析方法; 地震需求估计

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)10-0053-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.10.125

Seismic performance analysis of light wood structures based on improved pushover methods

WANG Zhongqiang¹, LIAO Liangdong¹, LUO Shengyuan²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. Hunan Pofu Real Estate Development Co., Ltd., Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: With the popularization of light wood structure houses, the accuracy requirements of seismic performance analysis are more stringent. In order to accurately reflect the displacement demand and seismic capacity of light wood structure under earthquake action, so as to ensure the safety of the structure, this paper introduces an improved Pushover analysis method based on performance-based seismic design, combined with structural yield point, load mode and shape vector, and analyzes the difference between modal Pushover method and improved Pushover method in seismic performance of two-story light wood structure buildings. The results show that the accuracy of the modal Pushover analysis method to estimate the top displacement demand of the structure is still acceptable, but the estimation result of the inter-story displacement demand is seriously low. The improved Pushover analysis method reduces the estimation error of vertex displacement demand and interlayer displacement demand, among which the estimation error of interlayer displacement demand is the most significant, and the error can be controlled at about 10%. This method has high estimation accuracy and can provide reference for theoretical analysis and practical engineering application of light wood structure.

Key words: structural engineering; seismic; pushover analysis method; seismic demand estimation

轻型木结构建筑是北美地区低层住宅最普遍采用的一种建筑形式,该结构体系主要由木屋盖、

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(23A0248)

作者简介: 王中强(1974—),男,副教授、硕士生导师,从事混凝土结构抗火和结构防灾减灾方面的研究。

通信作者: 廖亮东(1998—),男,硕士研究生,从事结构抗震方面的研究。

木楼盖以及木剪力墙等核心部分所组成,这种建筑形式一般适用于 3 层及以下的房屋^[1-2]。现代轻型木结构建筑与传统古木建筑相比具有施工速度快、降低成本、保温隔热等优点,符合我国可持续发展的综合国策^[3-4]。轻型木结构建筑还表现出优良的抗震性能,在日本、北欧等地区大量的居民均采用该木结构进行建造^[5],而在我国的上海等一些城市也已建造轻型木结构房屋。

目前,众多学者对轻型木结构建筑的抗震设计研究一般都是采用极限状态或者按构造设计等基于力的抗震设计方法。尽管已有少数国外学者尝试将轻型木结构的抗震性能研究与 21 世纪国际地震工程界的核心研究方向——基于性能的抗震工程相结合,但缺乏系统性的分析与实用性的应用,未能充分融入 PBSE 的理论框架之中^[6-8]。李书进等^[9]通过对足尺木结构房屋进行抗震试验研究,试验结果表明:木结构最容易受到破坏的位置是墙面板与节点处,刚性屋面对木结构抗震有利,偏心布置对木结构抗震不利。ALOISLO 等^[10]对使用不同材料所组成的木结构剪力墙进行往复循环加载。处于弹性阶段时,木结构剪力墙的刚体转动优先于变形和刚体平移。结果表明:由于墙角锚固件的存在所以导致木结构剪力墙的抗剪强度预估值过大。陈松来等^[11]对两个木楼盖试件和 14 个剪力墙试件开展了单调加载试验,提出了剪力墙或楼盖刚度基于变形的取值方法,分析了石膏板覆面、剪力墙的长度、开洞尺寸等参数对其刚度和承载力的影响规律。FILIATRAULT 等^[12]通过大量非线性动力时程分析,验证了基于位移的设计方法(direct displacement design, DDD)直接应用于轻型木结构建筑的可行性,建议了一种预测木剪力墙滞回反应和耗能特性的简化数值模型。有研究者^[13]发现,常规 Pushover 分析方法(静力弹塑性分析方法)存在一定缺陷,该方法只能考虑一阶振型对结构造成的响应,且水平荷载的施加方式对结构能力曲线有较大的影响,相关研究成果中建议都是以某一种固定的水平荷载形式^[14-15]。进而有学者为提高 Pushover 分析方法的准确度及适用范围,对常规 Pushover 分析方法不断进行修正,但该修正行为针对的是混凝土结构,而对轻型木结构 Pushover 分析方法的改进研究尚欠缺。轻型木结构在遭受地震作用时,其位移反应模式往往与第一阶弹性振型存在显

著差异,同时,鉴于当前对结构抗震性能的要求越来越高,传统的 Pushover 分析方法已无法满足对轻型木结构进行精确抗震分析的需求。因此,需要对传统的 Pushover 分析方法进行修正,其修正后的 Pushover 分析方法能够更为精确地反映出轻型木结构在地震作用下的位移需求和抗震能力,从而确保结构的安全性^[16]。

本文将对轻型木结构建筑进行数值分析,同时与 21 世纪国际抗震工程领域最重要的研究方向相结合,根据轻型木结构建筑的动力特性提出一种改进的 Pushover 分析方法,着重解决该结构体系在地震作用下的水平位移需求,以期对轻型木结构建筑的理论分析和实际工程应用提供参考依据。

1 轻型木结构建筑 Pushover 分析方法

目前,国内外学者对 Pushover 分析方法进行创新与研究,在大量的改进方法中,普及程度较高的是以下两种改进方法:1) CHOPRA 等^[17]基于结构动力学理论所提出的模态 Pushover 分析方法(MPA 方法);2) GHOPRA 等^[18]学者提出的自适应 Pushover 分析方法(ASPA 方法)。MPA 方法在等效成若干个单自由度体系的同时并没有忽略高阶振型对结构的影响,得到各个单自由度体系的地震反应后,采用振型组合方法将结构的各阶振型位移进行组合分析。ASPA 方法改变了传统固定的侧向水平加载模式,每级加载过后都对建筑结构进行振型分析,进而可以时刻捕捉到建筑结构刚度矩阵的变动,即随时调节水平荷载形式^[19]。以上两种改进方法都克服了常规 Pushover 分析方法的缺陷,即不同程度上提高了其计算精度。基于对 MPA 方法和 ASPA 方法的理解,考虑了高阶振型对结构的影响以及侧向水平加载模式,对常规 Pushover 分析方法进行改进如下。

1.1 结构屈服点定义

相关研究表明采用不同振型荷载形式会对建筑结构的能力曲线有直接的影响,其根本原因在于屈服机制会由于水平侧向力分布模式的不同而不同。首先,对轻型木结构建筑的屈服点进行一个清晰的划分,以便于轻型木结构建筑形状向量的修正。一般情况下,轻型木结构建筑处于线性阶段时是以一阶振型为主,由于目前国内外对轻型木结构

屈服点尚没有明确的规定,故本文以一阶振型荷载形式所进行推覆分析,得到其基底剪力为80%所对应的顶点位移作为结构屈服点^[20],这是基于结构安全性与承载能力的评估、结构响应与变形的模拟以及经济性等多方面的综合考虑,如图1所示。

1.2 荷载模式修正

常规 Pushover 分析方法只采取第一阶振型,并且振型荷载形式固定不变。基于前文对轻型木结构屈服点的定义,可将振型荷载形式分为两段分别进行定义。由于一段未达到结构屈服点时,则振型荷载形式采用与前3阶弹性振型成比例的荷载形式;当通过结构顶点位移判断其结构已达到屈服点时,振型荷载形式选择与前3阶屈服振型成比例的荷载形式。此外,出于受 MPA 方法的启发,为了改善 MPA 方法的计算精度问题,故取前3阶振型对轻型木结构建筑进行推覆分析。

1.3 形状向量修正

ASPA 方法对结构的形状向量定义最为准确,但计算量极其繁琐,而常规 Pushover 分析方法将其弹性振型选作为形状向量。本文借鉴 ASPA 方法在任意时刻捕捉结构刚度矩阵变动的思想,同时为减轻其计算负担,建议以1.1小节定义的结构屈服点作为分界线,当结构未达到屈服点时,可将建筑结构的第3阶弹性振型作为结构的形状向量,当通过顶点位移判断结构已达到结构屈服点时,则选择建筑结构的第3阶屈服振型作为结构的形状向量。

2 多自由度体系等效成单自由度体系

借鉴 KRAWINKLER 等^[21]提出的多自由度体系(MDOFS)向单自由度体系(SDOFS)等效的推导过程及其计算公式。根据前文的相关修正内容,

提出一种多自由度体系向单自由度体系等效的方法。该方法与文献[21]提出的推导过程和步骤有相仿之处,但结构的形状向量有所不同。

通常多自由度体系(MDOFS)的振动方程如下所示:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Q = -M\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中: C 为瑞利阻尼矩阵; M 为质量矩阵; Q 表示楼层恢复力向量; I 为单位向量; \ddot{u}_g 为地面加速度时程, m/s^2 ; \dot{u} 为楼层速度向量; u 为楼层加速度向量。

当多自由度体系结构的楼层位移 u 与某个形状向量(通常为振型)成比例关系时,则结构沿其高度方向的位移反应可近似表示为

$$u = u_{jr}(\gamma_r/\psi_{1r}) \quad (2)$$

式中: u_{jr} 为结构的第 r 阶顶点位移反应; ψ_{1r} 为第 r 阶顶点振型位移; γ_r 为第 r 阶弹性振型或者屈服振型, $\gamma_r = \{\psi_{1r}, \psi_{2r}, \dots, \psi_{jr}, \dots, \psi_{nr}\}^T$;

采用瑞利形式的阻尼,并考虑振型、质量与刚度的正交性,将式(2)代入式(1)中,根据第 r 阶振型解耦可得:

$$\gamma_r^T M \gamma_r \frac{\ddot{u}_{jr}}{\psi_{1r}} + \gamma_r^T C \gamma_r \frac{\dot{u}_{jr}}{\psi_{1r}} + \gamma_r^T Q = -\gamma_r^T M \ddot{u}_g \quad (3)$$

定义参与系数 Π_r 以及计算参数 y_r :

$$\Pi_r = \frac{\gamma_r^T M I}{\gamma_r^T M \gamma_r} \quad (4)$$

$$y_r = \frac{\gamma_r^T M \gamma_r u_{jr}}{\gamma_r^T M I \psi_{1r}} = \frac{u_{jr}}{\psi_{1r} \Pi_r} \quad (5)$$

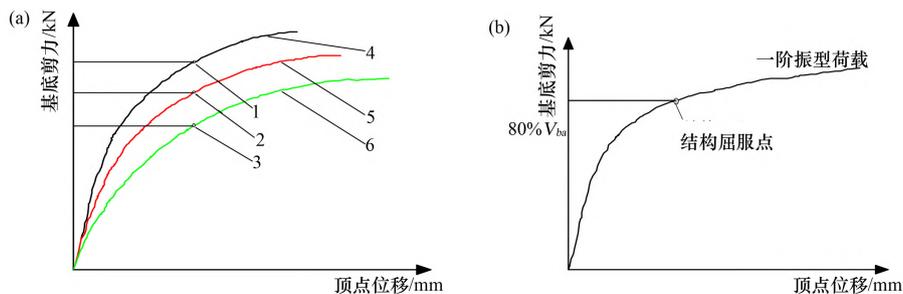
将式(4)和式(5)代入式(3)中,可得:

$$-\gamma_r^T M \ddot{u}_g = \gamma_r^T \Pi_r \ddot{y}_r + \gamma_r^T C \gamma_r \Pi_r \dot{y}_r + \gamma_r^T Q \quad (6)$$

继续定义相关参数如下:

$$M_r^* = \gamma_r^T M I; C_r^* = \gamma_r^T C I; Q_r^* = \gamma_r^T Q \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)既可得到等效单自由度体



(a) 不同阶振型下的屈服点; (b) 屈服点定义

1—1阶屈服点; 2—2阶屈服点; 3—3阶屈服点; 4—1阶振型荷载; 5—2阶振型荷载; 6—3阶振型荷载。

图1 轻型木结构屈服点的定义

系的运动方程:

$$M_r^* \ddot{y}_r + C_r^* \dot{y}_r + Q_r^* = -M_r^* \ddot{u}_g \quad (8)$$

式中: M_r^* 的物理意义为第 r 阶振型等效单自由度体系的质量, kg; C_r^* 的物理意义为第 r 阶振型等效单自由度体系的阻尼; Q_r^* 的物理意义为第 r 阶振型等效单自由度体系的恢复力, N; y_r 的物理意义为第 r 阶振型等效单自由度体系的位移, m。

根据第 r 阶振型荷载形式对建筑物进行加载, 建筑物的楼层恢复力向量 Q_r 可表示如下:

$$Q_r = \begin{Bmatrix} m_1 \psi_{1r} \\ \sum_{i=1}^n m_i \psi_{ir} \\ \vdots \\ m_n \psi_{nr} \\ \sum_{i=1}^n m_i \psi_{ia} \end{Bmatrix} V_{ba} = \frac{M \gamma_r}{\gamma_r^T M \gamma_r \Pi_r} \quad (9)$$

式中: V_{ba} 和 Q_r 分别是通过与第 r 阶振型荷载进行推覆分析所得的基底剪力和楼层恢复力, N。

将式(9)代入式(7)的第三个关系式中, 可得:

$$Q_r^* = \gamma_r^T Q = \frac{\gamma_r^T M \gamma_r}{\gamma_r^T M \gamma_r \Pi_r} V_{ba} = \frac{V_{ba}}{\Pi_r} \quad (10)$$

充分考虑到等效单自由度体系的恢复力 Q_r^* 是多自由度体系基底剪力 V_{ba} 的 $1/\Pi_r$ 倍, 同时等效单自由度体系的位移 y_r 是多自由度体系顶点位移 u_{jr} 的 $1/(\Pi_r \psi_{1r})$ 倍, 从而可推导出等效单自由度体系的初始刚度 K_{1r}^* 是结构 Pushover 能力曲线初始刚度 K_{1r} 的 $1/\psi_{1r}$ 倍。当求得 SDOFS 的第 r 阶位移需求 $S_{dr} = \max |y_r|$ 后, 则通过式(5)和下面的计算式可计算出 MDOFS 的第 r 阶顶点位移需求 M_{ur} 。

$$M_{ur} = \max |u_{ur}| = \Pi_r \psi_{1r} \max |y_r| = \Pi_r \psi_{1r} S_{dr} \quad (11)$$

3 修正 Pushover 方法的分析过程

(1) 建立起轻型木结构建筑的计算模型。

(2) 对结构模型进行弹性特征值分析, 得到结构的特征周期 T_1 和相应的弹性振型 φ_1 , 并计算出各阶振型的参与系数 Π_r 。

(3) 根据第一阶弹性振型荷载模式 $M\varphi_1$ 对结构依次施加侧向水平荷载, 并在任一次加载过后, 判断结构是否已达到上文定义的屈服点, 假设结构已经达到屈服点, 则修正轻型木结构建筑的刚度矩阵, 并需记录此次加载过后结构的基底剪力

V_{ba} 同顶点位移 u_{jr} 的变化情况, 直到轻型木结构建筑形成屈服机制。进而对轻型木结构建筑进行分析, 得出其屈服振型和振型参与系数。

(4) 对已达到屈服机制的轻型木结构建筑实施推覆分析, 一直到结构达到破坏的状况, 并完善其结构基底剪力以及顶点位移图。

(5) 为了对轻型木结构建筑进行推覆分析, 采用结构的第 r 阶修正振型荷载模式 $M\gamma_r$ 。首先要把 γ_r 取为该结构的第 r 阶弹性振型, 然后当轻型木结构的屈服点趋于上文所规定的值时, 将其修改为第 r 阶屈服振型。对轻型木结构建筑逐步施加荷载, 直至结构发生倒塌破坏, 需要绘制出结构的前 3 阶能力曲线。

(6) 轻型木结构的前 3 阶弹性振型由结构的形状向量初始值所确定, 然后根据式(8)和轻型木结构建筑前 3 阶 Pushover 能力曲线, 将多自由度体系等效为单自由度体系。

(7) 对前 3 阶等效单自由度体系进行动力时程分析, 并得到结构的位移需求 $S_{dr} = \max |y_r|$, 然后根据式(11)计算出 MDOFS 的第 r 阶顶点位移需求 M_{ur} , 最后得到轻型木结构建筑的第 r 阶振型层间位移以及楼层位移需求。采用振型组合方法得到结构的地震需求估计值, 其计算公式见式(12)。

$$S = \sqrt{\sum_{r=1}^n (S_r)^2} \quad (12)$$

式中: S 为结构前 3 阶地震效应的组合值; S_r 为结构第 r 阶地震效应。

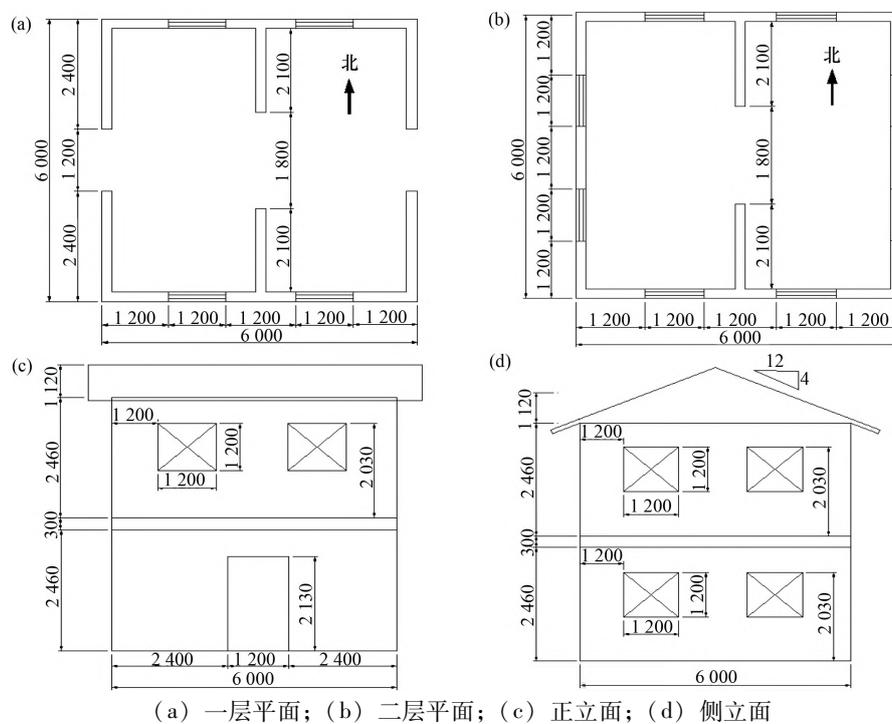
(8) 判断结构顶点位移需求的估计值是否低于上文规定的结构屈服点, 假如其估计值低于屈服点, 则能够充分证明其结构正位于弹性阶段; 假如结构顶点位移需求的估计值高于屈服点, 则需要将结构的形状向量 γ_r 改为轻型木结构建筑的屈服振型, 然后再由上述的第(6)步重新进行推算。

4 数值分析

为验证上述提出的计算方法在轻型木结构位移需求计算上的适用性, 本文以文献[22]中的一个两层足尺轻型木结构建筑作为验证对象, 该验证对象是由同济大学土木工程防灾国家重点实验室和加拿大工业技术研究院(Forintek Canada Corp.)合作进行的轻型木结构房屋振动台试验^[22]。

振动台试验模型的基本信息如下:尺寸为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$,层高等为 2.46 m ,总高度为 6.3 m ,一、二层平面中部均设置有一道带有 1.8 m 宽门洞的承重隔墙,一、二层的平面由两个 3.0 m 的房间所组成,算例的整体排布对称。该算例结构的平面图和立面图如图2所示。

该算例的结构自重约为 $4\ 400\text{ kg}$,屋面和楼面的附加质量分别为 $1\ 600\text{ kg}$ 和 $6\ 000\text{ kg}$,故算例结构的总重量为 $12\ 000\text{ kg}$ 。本文采用专业分析软件SAWS进行动力时程分析及Pushover分析,采用自行编写的Matlab程序完成Pushover分析,得到结构各阶能力曲线的理想化以及等效单自由度体系的动力时程分析。



(a) 一层平面; (b) 二层平面; (c) 正立面; (d) 侧立面

图2 算例结构的平面和立面

mm

表1 地面运动加速度记录

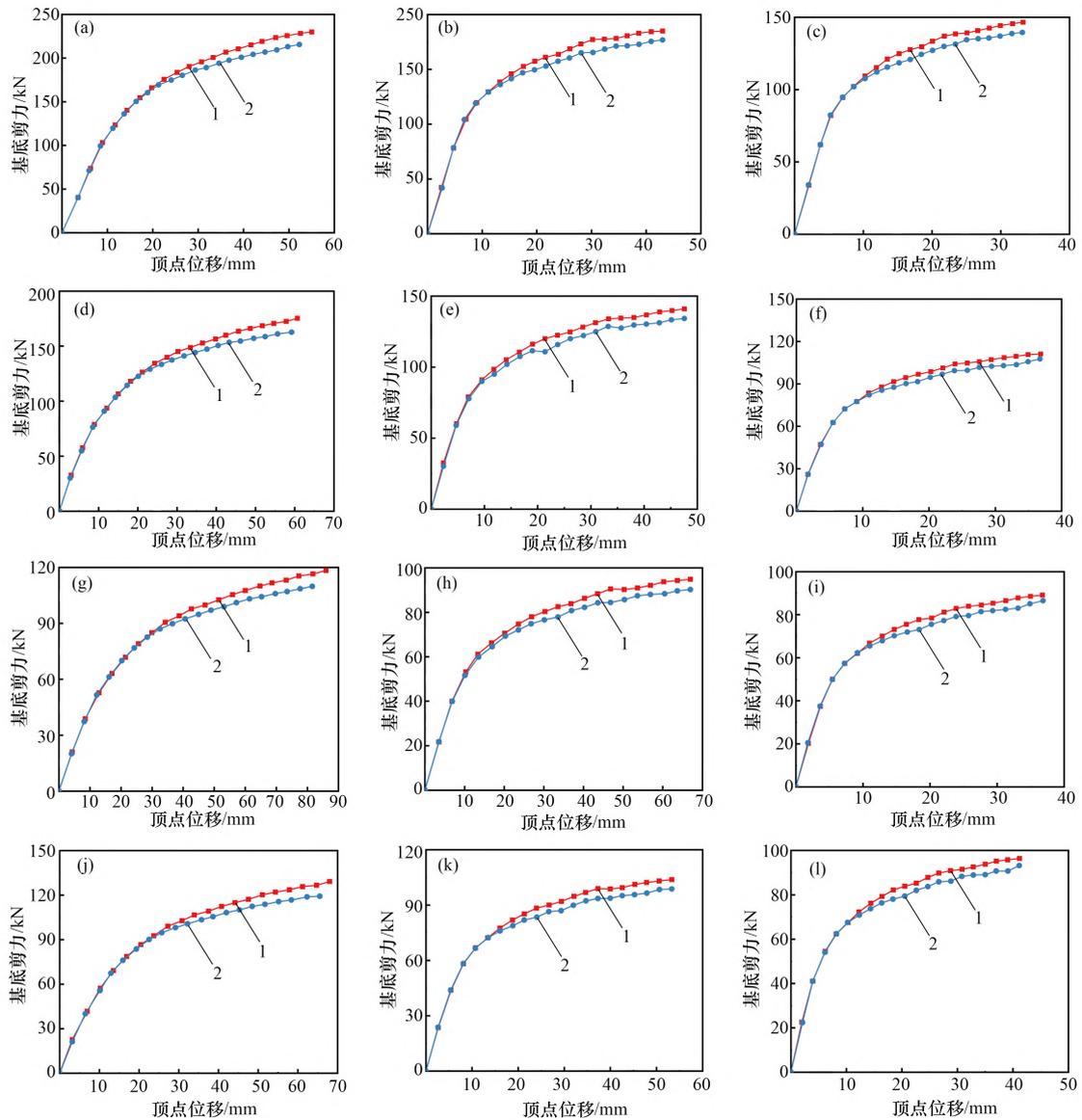
地震	震级	记录次数	平均峰值地面加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	平均剪切波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Chi - Chi, Taiwan 1999/09/20	7.6	7	0.217	445.9
Anza (Horse Canyon) 1980/02/25	4.9	1	0.099	329.2
Loma Prieta 1989/10/18	6.9	4	0.235	411.4
Northridge 1994/01/17	6.7	4	0.178	353.6
Coyote Lake 1979/08/06	5.7	3	0.098	370.9
Duzce, Turkey 1999/11/12	7.1	2	0.775	326.1
Kocaeli, Turkey 1999/08/17	7.4	1	0.135	346.3
Landers 1992/06/28	7.3	5	0.127	329.4
Imperial Valley -02 1940/05/19	7.0	1	0.259	313.5
Kern County 1952/07/21	7.4	4	0.097	387.2
San Fernando 1971/02/09	6.6	1	0.090	415.3

4.1 地面运动的选择

从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库下载十一次共33组地震动记录,选择地震动记录的平均剪切波速(V_{s30})为 $250 \sim 550\text{ m/s}$ 的场地,如表1所示。

4.2 轻型木结构建筑的能力曲线

为验证上述提出的改进Pushover分析方法对轻型木结构建筑的适用性,对上述轻型木结构算例取弹性振形荷载模式和本文提出的改进Pushover分析方法分别进行推覆分析,并将各分析阶段的前3阶能力曲线(基底剪力-顶点位移关系曲线)分别如图3所示。



(a) 一阶段 1 阶; (b) 一阶段 2 阶; (c) 一阶段 3 阶; (d) 二阶段 1 阶; (e) 二阶段 2 阶; (f) 二阶段 3 阶;
(g) 三阶段 1 阶; (h) 三阶段 2 阶; (i) 三阶段 3 阶; (j) 四阶段 1 阶; (k) 四阶段 2 阶; (l) 四阶段 3 阶
1—弹性振型荷载; 2—Pushover 改进方法。

图 3 各分析阶段前 3 阶能力曲线

从图 3 可以看出, 常规 Pushover 分析方法对轻型木结构建筑算例进行推覆分析所得到的基底剪力 - 顶点位移关系曲线与本文提出的改进 Pushover 分析方法所得到的基底剪力 - 顶点位移关系曲线存在一定的差异, 存在差异的主要原因在于改进的 Pushover 分析方法对轻型木结构建筑达到屈服阶段后的荷载形式作出了改进, 而常规 Pushover 分析方法只采取第一阶振型, 并且振型荷载形式是固定不变的。

4.3 轻型木结构建筑在地震作用下的位移需求

通过计算本文提出的改进 Pushover 分析方法以及传统意义上的 Pushover 分析方法对轻型木结构建筑在地震作用下的各位移需求, 以突出改进 Pushover 分析方法的优越性。为适用我国目前规范规定的 II 类场地, 故以 Kern County 1952 Earthquake-Pasadena California Institute of Technology (CIT) Athenaeum Station 和 Imperial Valley 1940 Earthquake (Event 02)-El Centro Array #9 Station 所采集加速度

记录为输入,采用本文提出的改进 Pushover 分析方法和模态 Pushover 分析方法对轻型木结构建筑在上述两条地震记录作用下的位移需求进行估计,其地震采用南北方向加载方式。具体结果如表 2、3 所示。

由表 2、3 可知,MPA 方法对轻型木结构建筑顶点位移需求的估计精度尚可,其平均估计误差为 11.2%,相对于结构最大层间位移比需求的估计误差明显偏大,平均误差达到 19.77%,且不能满足工程精度要求。相对于改进的 Pushover 分析方法来说,该方法对轻型木结构建筑算例的层间位移需求及顶点位移需求的估计误差均有所降低,其中对结构算例层间位移需求估计误差的降低幅

度最为明显,改进的 Pushover 分析方法将对结构顶点位移需求的估计误差均值提高到 8.8% 左右,对结构最大层间位移比需求的估计误差也提高到 9.3% 左右,且满足工程精度要求。

以上分析仅基于两组加速度记录对轻型木结构建筑的位移需求进行估计,其目的是为了验证改进 Pushover 分析方法的准确性和合理性。经验证,本文提出的改进 Pushover 分析方法显著提高了结构位移需求的估计精度。因此,采用本文提出的改进 Pushover 分析方法基于 33 组加速度记录对轻型木结构建筑的位移需求进行估计分析,并将估计结果与传统 MPA 方法的估计结果进行比较分析,如表 4~7 所示。

表 2 计算所得的顶点位移

地震	位移需求	MPA 方法		Pushover 改进方法		动力时程分析/mm
		估计值/mm	误差/%	估计值/mm	误差/%	
Imperial Valley - 02 1940 地震	分析阶段一	22.4	10.8	23.1	8.0	25.1
	分析阶段二	24.3	11.9	25.3	8.3	27.6
	分析阶段三	32.9	11.0	36.4	9.0	40.0
	分析阶段四	23.3	11.4	23.9	9.1	26.3
Kern County 1952 地震	分析阶段一	17.9	10.9	18.4	8.5	20.1
	分析阶段二	19.9	11.5	20.5	8.9	22.5
	分析阶段三	31.3	11.1	32.0	9.1	35.2
	分析阶段四	19.1	10.7	19.5	8.9	21.4

表 3 计算所得的最大层间位移比

地震	最大层间位移比	MPA 方法		Pushover 改进方法		动力时程分析/%
		估计值/%	误差/%	估计值/%	误差/%	
Imperial Valley - 02 1940 地震	分析阶段一	0.581	18.8	0.653	8.8	0.716
	分析阶段二	0.588	19.7	0.661	9.7	0.732
	分析阶段三	0.628	18.8	0.703	9.0	0.773
	分析阶段四	0.577	21.6	0.668	9.4	0.736
Kern County 1952 地震	分析阶段一	0.559	21.0	0.639	9.6	0.707
	分析阶段二	0.575	20.8	0.655	9.8	0.726
	分析阶段三	0.625	18.7	0.696	9.5	0.769
	分析阶段四	0.591	18.8	0.663	8.9	0.728

表 4 基于 33 组地震记录计算所得顶点位移需求均值

位移需求均值	MPA 方法/mm	Pushover 改进方法/mm
分析阶段一	20.1	21.9
分析阶段二	22.9	25.0
分析阶段三	33.9	37.0
分析阶段四	22.0	23.8

表 5 基于 33 组地震记录计算所得顶点位移需求标准差

位移需求均值	MPA 方法/mm	Pushover 改进方法/mm
分析阶段一	6.9	8.7
分析阶段二	7.6	9.4
分析阶段三	11.2	14.0
分析阶段四	7.1	8.9

表 6 基于 33 组地震记录计算所得一层层间位移需求均值

分析阶段	MPA 方法/%	Pushover 改进方法/%
一	0.610	0.754
二	0.632	0.756
三	0.673	0.789
四	0.628	0.751

表 7 基于 33 组地震记录计算所得一层层间位移需求标准差

分析阶段	MPA 方法/%	Pushover 改进方法/%
一	0.332	0.415
二	0.343	0.430
三	0.354	0.442
四	0.347	0.426

从上表可以看出,由于 MPA 方法未考虑结构屈服后形状向量的改变,故对结构层间位移需求的估计结果严重偏低。而本文提出的改进 Pushover 分析方法充分考虑了结构屈服对形状向量的影响,其估计结果比 MPA 方法的估计结果有所提高,层间位移需求均值提高幅度约为 20%,标准差提高幅度约为 25%。

5 结 论

(1) MPA 方法对结构顶点位移需求的估计精度尚可,平均估计误差为 11.2%,但 MPA 方法未考虑结构屈服后形状向量的改变,对结构层间位移比需求的估计结果严重偏低,平均误差达到 19.7%。

(2) 改进 Pushover 分析方法对轻型木结构建筑算例的顶点位移需求以及层间位移需求的估计误差均有所降低,其中对层间位移需求估计误差的降低幅度最为显著,可以控制误差在 10% 左右。

(3) 基于 33 组加速度记录对轻型木结构建筑的位移需求进行估计分析,得出改进的 Pushover 分析方法充分考虑了结构屈服对形状向量的影响,其估计结果比 MPA 方法的估计结果有所提高,层间位移需求均值提高幅度约为 20%,标准差提高幅度约为 25%。

参考文献:

- [1] 《木结构设计手册》编委会. 木结构设计手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 木结构设计标准:GB 50005—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 周大地. 中国可持续能源情景[M]. 北京:中国环境科学出版社,2003.
- [4] 樊承谋. 木结构在我国的发展前景[J]. 建筑技术, 2003(4):297-299.
- [5] NI C, SHIM K B, KARACABEYLI E. Performance of braced walls under various boundary conditions [C]// Proc, World Conf. on Timber Engineering. Trontino: WCTE 2010 Commitee 2010;2174-2181.
- [6] BAKER J W, CORNELL C A. Uncertainty propagation in probabilistic seismic loss estimation[J]. Structural Safety, 2008, 30(3):236-252.
- [7] PORTER K A, BECK J L, SHAIKHUTDINOV R V. Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables[J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(4):719-743.
- [8] MINGUEZ R, CASTILLO E, CASTILLO C, et al. Optimal cost design with sensitivity analysis using decomposition techniques. Application to composite breakwaters[J]. Structural Safety, 2006, 28(4):321-340.
- [9] 李书进, 铃木祥之. 足尺木结构房屋振动台试验及数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12):69-77.
- [10] ALOISIO A, BOGGIAN F, TOMASI R, et al. The role of the hold-down in the capacity model of LTF and CLT shear walls based on the experimental lateral response [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123046.
- [11] 陈松来, 樊承谋, 王焕定. 轻型木结构剪力墙和楼盖的抗侧刚度研究[J]. 中山大学学报, 2011, 50(4):42-49.
- [12] FILIATRAULT A, FOLZ B. Performance-based seismic design of wood framed buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1):39-47.
- [13] 马千里, 叶列平, 陆新征. MPA 法与 Pushover 法的准确性对比[J]. 华南理工大学学报, 2008, 36(11):121-128.
- [14] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation[J]. Engineering structures, 1998, 20(4-6):452-464.
- [15] GOEL R K, CHOPRA A K. Role of higher-“mode” pushover analyses in seismic analysis of buildings[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(4):1027-1041.
- [16] 罗声远. 轻型木结构地震需求估计方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2015.
- [17] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis

- procedure for estimating seismic demands for buildings [J]. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2002, 31(3): 561 – 582.
- [18] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings [J]. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2004, 33(8): 903 – 927.
- [19] GUPTA B, KUNNATH S K. Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures [J]. *Earthquake spectra*, 2000, 16(2): 367 – 391.
- [20] 李娜. 轻型木结构剪力墙受力性能有限元分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [21] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J]. *Engineering structures*, 1998, 20(4 – 6): 452 – 464.
- [22] 程海江. 轻型木结构房屋抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

(上接第 30 页)

通道注浆加固为研究背景, 在注浆工艺选择、注浆材料等开展现场试验与施工优化, 得到结论如下。

(1) 采用水平钻杆后退式注浆工艺, 在注浆孔周边打设泄压孔进行真空抽吸, 在注浆压力与排水压力的共同作用下能够实现定向诱导渗透注浆。

(2) 在超细水泥添加减水剂能够提升浆液的渗透能力、同等注浆压力条件下, 添加 0.4% 减水剂的单孔注浆量比未添加减水剂的单孔注浆量提升 4 倍。

(3) 现场施工监测结果表明, 采用“抽注法”注浆, 在不提高注浆压力的前提下, 可以有效控制周边地层变形, 地表和管线的隆起变形值均控制在 1 cm 以内。

参考文献:

- [1] 魏进, 王锦涛, 卞海丁, 等. 城市砂层隧道注浆参数优

化室内试验研究[J/OL]. *北京交通大学学报*, 1 – 13 [2025 – 05 – 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5258.U.20250106.1806.013.html>.

- [2] 雷亚军, 范钢伟, 杨建辉, 等. 煤矿斜井过动水砂层帷幕注浆扩散封堵机理及应用[J]. *中国矿业*, 2024, 33(5): 187 – 195.
- [3] 张小英, 翁贤杰, 杨旆, 等. 考虑空间变异性的隧道砂层注浆加固体稳定性分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(6): 968 – 979.
- [4] 何秋敏, 周冬辉, 魏琪. 浅埋暗挖全断面砂层隧道超前注浆加固技术研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(9): 166 – 171.
- [5] 邓洪亮, 王守凡, 李小鹏. 饱和承压水砂层排水诱导驱替注浆技术研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(2): 215 – 223.
- [6] 李志鹏, 张连震, 张庆松, 等. 砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(12): 3488 – 3497.