

适配于 LS-DYNA 程序的樟子松木支撑材料强度试验研究



许德峰^{1,*}, 杨永强², 呼天宇³

¹ 同济大学木工工程学院, 上海 200092

² 中国地震局工程力学研究所工程抗震研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001

³ 吉林农业大学工程技术学院, 吉林长春 130118

摘要: 应急救援木支撑 (ERWS) 在防止严重受损或坍塌建筑物二次倒塌中发挥着至关重要的作用。然而, 针对中国本地化 ERWS 材料的力学性能研究尚不充分。本文选取中国应急救援中常用的樟子松木材, 研究其在 LS-DYNA 程序中 MAT_WOOD_PINE 材料模型的力学参数。首先, 开展了樟子松木材的抗拉、抗压及抗剪强度力学性能试验, 获取了 MAT_WOOD_PINE 模型所需的基础力学参数。随后, 基于 LS-DYNA 建立了标准抗压试件模型, 获取其应力-应变曲线, 并与已有试验结果进行对比验证。然后, 构建了二维 ERWS 结构模型, 施加竖向均布荷载, 分析其最大竖向承载能力, 并与已有试验模型结果进行对比分析。研究表明, 所获取的樟子松木材强度参数能够有效验证 LS-DYNA 中 MAT_WOOD_PINE 模型的准确性, 具有较高的可靠性。同时, 二维 ERWS 结构模型的破坏模式与已有试验结果拟合度较高, 表明模拟结果合理可靠。所得 ERWS 的承载力峰值可为实际应急救援中 ERWS 的设计与应用提供科学的参考依据, 为工程救援实践提供有力的技术支持。

关键词: 应急救援木支撑; 樟子松; 材料力学强度试验; LS-DYNA 程序; MAT_WOOD_PIN 模型

DOI: [10.57237/j.cear.2024.04.002](https://doi.org/10.57237/j.cear.2024.04.002)

Research on Material Strength Test of Pinus Sylvestris var. Mongolica Wood Supporting Adapted to LS-DYNA Programme

Defeng Xu^{1,*}, Yongqiang Yang², Tianyu Hu³

¹ College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

² Engineering Seismic Research Center, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150010, China

³ College of Engineering Technology, Jilin Agriculture University, Changchun 131118, China

Abstract: Emergency Rescue Wooden Supports (ERWS) play a crucial role in preventing secondary collapse of severely damaged or partially collapsed structures. However, research on the mechanical properties of localized ERWS materials

基金项目: 吉林省教育厅-科学技术项目 (No. JJKH20240423KJ).

*通信作者: 许德峰, xudefeng_2008@126.com

收稿日期: 2024-11-26; 接受日期: 2024-12-20; 在线出版日期: 2025-01-09

<http://www.cearesearch.org>

in China remains insufficient. This study focuses on *Pinus sylvestris* wood, commonly used in emergency rescue operations in China, to determine the mechanical parameters for the MAT_WOOD_PINE material model in LS-DYNA. First, tensile, compressive, and shear strength tests were conducted to obtain the fundamental mechanical parameters required for the MAT_WOOD_PINE model. Subsequently, a standard compressive specimen model was established in LS-DYNA to derive its stress-strain curve, which was validated against existing experimental results. A two-dimensional ERWS structural model was then developed, subjected to a uniform vertical load, and its maximum vertical load-bearing capacity was analyzed and compared with test results. The findings indicate that the derived strength parameters of *Pinus sylvestris* wood effectively validate the accuracy and reliability of the MAT_WOOD_PINE model in LS-DYNA. Furthermore, the failure modes of the two-dimensional ERWS model closely align with existing experimental observations, confirming the reasonableness of the simulation results. The peak load-bearing capacity obtained provides a scientific reference for the design and application of ERWS in practical emergency rescue scenarios, offering strong technical support for engineering rescue operations.

Keywords: Emergency Rescue Wood Supports; *Pinus Sylvestris* var. *Mongolica*; Material Strength Test; LS-DYNA Program; MAT_WOOD_PINE Model

1 引言

应急救援支撑（Emergency Rescue Support, ERS）结构在防止建筑物二次坍塌、降低救援及被困人员伤亡风险方面发挥着关键作用。目前，常见的 ERS 类型包括木支撑、钢支撑和组合支撑，其中应急救援木支撑（Emergency Rescue Timber Support, ERTS）因其广泛应用、操作便捷和材料易得等优势尤为突出。例如，2022 年 4 月 29 日，长沙市一栋七层建筑发生坍塌，救援人员利用 ERTS 对建筑进行支撑，有效确保了救援工作的顺利开展[1]。1995 年 4 月 19 日，美国俄克拉荷马城一栋九层钢筋混凝土框架结构发生爆炸事故，救援人员在首层部署 ERTS，有效防止了建筑物发生二次坍塌[2]。

为实现 ERTS 的科学合理应用，各个国家已开展多项承载力相关试验研究。2005 年，英国考文垂大学系统研究了不同类型 ERTS 的力学性能[3]；2012 年，德克萨斯大学奥斯汀分校开展了多维度的 ERTS 承载力试验，进一步丰富了实验数据并优化了支撑设计[4]。然而，当前中国在 ERTS 领域的研究仍处于起步阶段，尤其在材料参数、力学性能及结构承载能力等方面尚存在明显不足。为进一步提高 ERTS 在实际应急救援中的应用水平和可靠性，亟需开展系统而深入的研究。

本研究选取樟子松木材作为 ERTS 的主要材料，主要基于其在中国的广泛分布、市场供应充足及成本较低等优势。已有研究[5-7]通过压缩试验和动态力学性能测试，探讨了樟子松的动态压缩曲线、破坏模式及抗压破坏机制。然而，针对废墟救援场景下 ERTS 的应

用研究仍存在较大空白。已有研究[8-10]成功采用 LS-DYNA 程序模拟建筑结构的地震倒塌场景，因此，进一步研究 LS-DYNA 中木材本构模型（*MAT_WOOD_PINE）所需的力学参数具有重要的理论与实际意义。

本文重点研究 LS-DYNA 中 MAT_WOOD_PINE 材料模型的力学参数。在第二章中，开展了 36 个试件的抗拉强度试验、30 个试件的抗压强度试验以及 24 个试件的抗剪强度试验；在第三章中，进行了樟子松标准构件的承压承载力数值模拟，以验证 MAT_WOOD_PINE 模型中材料强度参数的准确性。此外，本文利用 LS-DYNA 程序构建了 ERTS 结构的数值模拟模型。研究结果为在 LS-DYNA 中建立建筑废墟场景并嵌入 ERTS 支撑模型提供了基础的材料力学参数支持，同时，模拟结果中的承载力峰值可为实际应急救援场景中的 ERTS 应用提供科学依据和技术参考。

2 樟子松材料强度试验

2.1 含水率

木材的含水率对其力学性能有显著影响，尤其是木材平行纤维方向的抗压强度和抗弯强度。根据《木材含水率测定方法》[11]，木材含水率的试件尺寸为 20mm × 20mm × 20mm，每组试验包含 40 个试件。樟子松的含水率（W）按照公式(1)计算。

$$W=(m_1-m_2)/m_2\times100\%$$
(1)

其中, m_1 和 m_2 分别为试样干燥前后的质量(单位: 克)。

2.2 密度

木材密度试样的尺寸为 20mm × 20mm × 20mm, 每组测试试样数量为 40 个。樟子松木材的密度 ρ 可根据公式(2)计算得出。

$$\rho=m_w/V$$
(2)

其中, m_w 为试样的质量(单位: g), V 为试样的体积(单位: cm³)。

表 1 展示了樟子松水分含量及相应的密度数据。

表 1 樟子松水分含量与密度数据

品种	含水率 W (%)	密度 ρ (g/cm ³)
樟子松	13.3	0.56

2.3 樟子松抗拉强度试验

根据《木材抗拉强度试验方法》[12, 13], 制作了标准的樟子松拉伸试验试样, 试件数量为 36 个。试验加载装置采用中国地震局工程力学研究所的 MTS 材料试验机。试样的两端夹持在试验机的夹具中, 试件的两端暴露长度为 20-25mm, 近似弯曲处, 试样垂直安装于试验机上。加载速度为 1.8mm/min, 直至试样发生破坏。樟子松木材拉伸强度破坏试验现象如图 1 所示。



图 1 樟子松抗拉强度试验: (a)垂直于木纹方向拉伸试验的破坏现象; (b)平行于木纹方向拉伸试验的破坏现象

图 1 表明樟子松木材垂直于木纹方向的拉伸试验出现了沿试样 1/3 部分的对角裂纹, 最终表现为对角裂纹断裂失效。樟子松木材平行于木纹方向的拉伸试验则出现了沿试样 1/2 部分的对角裂纹, 最终表现为对角裂纹断裂失效。抗拉强度结果如表 2 所示。

表 2 樟子松试件抗拉强度

径向	L	W	FL	TS	平行向	L	W	FL	TS	弦向	L	W	FL	TS
1	29.84	7.03	1468.4	7	1	15.70	5.37	5708.5	67.7	1	29.52	6.46	1144.2	6
2	30.07	6.00	1262.9	7	2	15.65	5.42	6967.3	82.1	2	29.93	6.37	1145.9	6
3	30.09	6.34	1335.3	7	3	15.32	5.42	6318.9	80.6	3	29.92	7.35	879.6	4
4	29.68	6.09	1265.2	7	4	15.14	5.16	6887.3	88.1	4	29.77	6.45	1152.1	6
5	30.52	6.09	1301.0	7	5	15.23	4.89	6147.1	82.5	5	29.80	7.06	1262.3	6
6	30.25	6.31	1145.2	6	6	15.89	4.99	6267.9	79.1	6	29.65	6.87	1629.6	8
7	30.29	6.72	1424.8	7	7	15.05	4.88	5769.7	78.6	7	29.43	6.56	1158.3	6
8	30.16	6.36	1342.7	7	8	15.62	5.32	6841.5	82.3	8	29.70	6.37	1135.1	6
9	30.24	6.36	1153.9	6	9	15.23	5.12	6277.9	80.5	9	29.70	6.54	1165.4	6
10	30.27	6.26	1332.7	7	10	15.65	5.08	6350.6	79.9	10	30.25	6.25	986.2	5
11	29.99	6.25	1499.5	8	11	15.64	5.14	5259.1	65.4	11	29.79	6.44	1342.9	7
12	29.98	6.21	1303.2	7	12	15.19	5.66	5486.8	75.5	12	30.19	7.38	1336.8	6
MV				6.9					78.5					6

注: L—长度, W—宽度, FL—失效荷载, TS—抗拉强度, MV—平均值。

2.4 樟子松抗压强度试验

根据木材抗压强度试验标准方法[14, 15], 制做 30 个标准的樟子松木材抗压试件进行制作, 试件的抗压方

向包括平行与垂直于木纹方向。加载速度为 1.8mm/min，直至试件发生破坏。樟子松木材抗压强度破坏试验现象如图 2 所示。

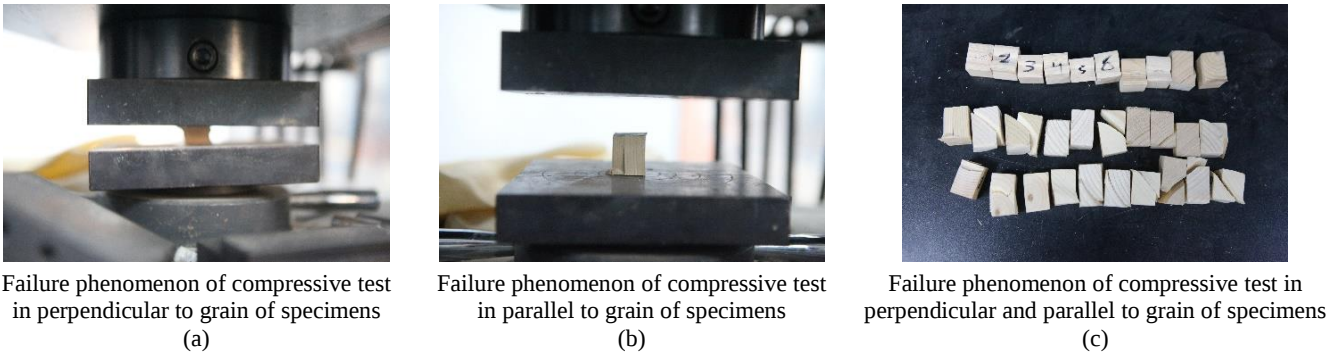


图 2 樟子松抗拉强度试验：(a)垂直于木纹方向抗压试验的破坏现象；(b)平行于木纹方向抗压试验的破坏现象；(c)全部抗压试件的破坏状态

图 2 表明樟子松木材垂直于木纹方向的抗压强度试验表现为压缩变形，最终失去承载能力。平行于木纹方向的抗压强度试验则表现为剪切变形，最终失去承载能力。抗压强度结果如表 3 所示。

表 3 樟子松试件抗压强度

径向	L	W	FL	TS	平行向	L	W	FL	TS	弦向	L	W	FL	TS
1	20.85	20.23	3281.6	7.8	1	20.14	20.22	28730.1	70.6	1	20.15	19.88	2315.4	5.8
2	20.68	20.13	3708.3	8.9	2	20.65	20.32	32108.4	76.5	2	20.35	19.75	2805.2	7.0
3	20.81	19.87	4314.8	8.9	3	20.14	20.36	32865.5	80.2	3	19.88	20.14	3419.3	8.5
4	20.75	20.22	5088.5	12	4	20.03	20.36	32865.5	80.2	4	20.34	20.16	4326.1	10.6
5	20.70	19.80	3664.6	8.9	5	20.23	20.18	33647.3	82.4	5	20.56	20.25	2906.1	7.0
6	20.76	20.17	3956.9	9.5	6	20.28	20.06	32691.8	80.4	6	20.14	19.87	3025.4	7.6
7	20.21	18.53	3254.3	8.7	7	19.89	20.31	28334.2	70.1	7	20.50	20.17	2757.9	6.7
8	20.43	20.76	4296.4	10.1	8	20.32	20.05	27101.3	66.5	8	20.65	20.55	3624.0	8.5
9	20.56	20.15	4010.3	9.7	9	19.66	20.17	30196.7	76.2	9	20.14	20.67	2722.6	6.5
10	20.13	20.16	4119.1	10.1	10	20.19	20.09	32388.5	79.9	10	20.13	20.13	3305.8	8.2
MV				9.5					76.3					7.6

2.5 樟子松剪切强度试验

根据木材剪切强度的标准测试方法[16]，本文制做 24 个樟子松木材的标准剪切试件。加载速度为 1.8mm/min，直至试件发生破坏。樟子松木材抗压强度

破坏试验现象如图 3 所示。樟子松木材在垂直与平行于纤维方向的剪切强度测试中，主要表现为试件中部出现对角裂纹，最终导致承载能力丧失。抗剪强度结果如表 4 所示。



图 3 樟子松抗拉强度试验：(a)垂直于木纹方向剪切试验的破坏现象；(b)平行于木纹方向剪切试验的破坏现象

表 4 樟子松试件抗剪强度

径向	L	W	FL	TS	平行向	L	W	FL	TS
1	11.25	11.25	880.8	7.0	1	11.32	11.23	620.4	4.9
2	11.26	11.25	870.3	6.9	2	11.37	11.13	639.1	5.1
3	11.52	11.24	1249.5	9.7	3	11.26	11.87	755.2	5.7
4	10.98	11.32	1086.3	8.7	4	10.98	11.22	835.3	6.8
5	12.03	11.56	1065.3	7.7	5	10.95	11.80	780.4	6.0
6	11.56	11.03	891.3	7.0	6	12.05	11.17	747.0	5.6
7	11.65	11.34	998.8	7.6	7	11.65	11.52	668.4	4.9
8	11.89	11.05	1108.9	8.4	8	11.43	11.76	661.3	4.9
9	11.05	11.99	847.6	6.9	9	11.56	11.15	716.7	5.6
10	12.06	11.65	1268.7	9.0	10	11.13	11.16	688.1	5.5
11	10.98	11.62	835.7	6.6	11	10.99	11.56	678.4	5.3
12	11.52	11.38	989.8	7.6	12	12.05	11.24	751.7	5.6
MV				7.8					5.5

3 樟子松材料在 LS-DYNA 程序中的应用

3.1 MAT_WOOD_PINE 材料模型

LS-DYNA 程序提供了木材本构模型 (MAT_WOOD_PINE) [17], 其中木材强度作为一个重要参数输入。关键参数如表 5 所示。其中 MID 为材料识别, RO 为质量密度, EL 为平行纤维方向正模量, ET 为垂直纤维方向正模量, GLT 为平行纤维方向剪切

模量 (GLT = GLR), GTR 为垂直纤维方向剪切模量, PR 为平行纤维方向主泊松比, XT 为平行纤维方向抗拉强度, XC 为平行纤维方向抗压强度, YT 为垂直纤维方向抗拉强度, YC 为垂直纤维方向抗压强度, SXY 为平行纤维方向剪切强度, SYZ 为垂直纤维方向剪切强度, GF1 为平行纤维方向拉伸断裂能, GF2 为平行纤维方向剪切断裂能, BFIT 为平行纤维方向软化参数, DMAX 为平行纤维方向最大损伤, GF1 为垂直纤维方向拉伸断裂能, GF2 为垂直纤维方向剪切断裂能, DMAX 为垂直纤维方向软化参数。

表 5 *MAT_WOOD_PINE 模型的主要材料参数 (单位: g/mm³ MPa)

Variable	MID	RO						
Type	1	6.71E-4						
Variable	EL	ET	GLT	GTR	PR			
Type	9230	175.3	538.6	63.4	0.124			
Variable	XT	XC	YT	YC	SXY	SYZ		
Type	78.5	76.2	6.0	7.6	7.8	5.5		
Variable	GF1	GF2	BFIT	DMAX	GF1	GF2	DFIT	DMAX
Type	32.6	77.5	24.7	0.9999	0.4	0.81	30	0.9999

3.2 樟子松木材试件承载力数值模拟

为了验证表 5 中樟子松木材参数的准确性, 本文参考了文献[18]中的樟子松抗压承载力试验。利用 ANSYS/LS-DYNA 程序建立了与试验相同尺寸的立方体试件数值模型, 试件尺寸为 30mm × 20mm × 20mm, 采用 Solid164 实体单元, 并选用 LS-DYNA 程序中的 MAT_WOOD_PINE 材料模型, 材料参数采用表 5。立

方体试件数值模型如图 4(a)所示。加载方式采用位移控制, 加载速度设定为 1mm/s, 结果输出为 1mm/s。最终得到的力-位移曲线如图 4(b)所示。结果表明, 数值模拟结果与文献[18]中的樟子松力-位移曲线拟合度较高, 验证了本文所开展的适用于 LS-DYNA 程序的木材材料承载力试验的准确性。

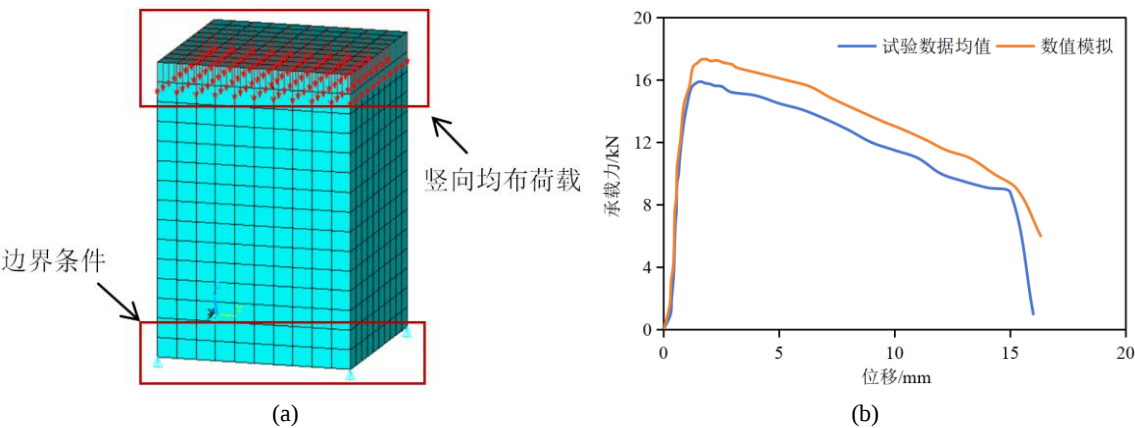


图 4 立方体试件数值模拟：(a)数值模型；(b)荷载-位移曲线

3.3 应急救援木支撑结构数值模拟

参考文献[19]关于地震应急救援木支撑的数值模拟方法，本文选取 2 维 ERWS 结构作为研究对象，采用与文献[19]相同的数值模拟策略。木支撑的上梁、下梁、立柱及斜撑均采用共节点连接形式，并忽略楔子与钉子对支撑承载力的影响。工字型木支撑结构的具体尺寸为：立柱尺寸 150mm × 300mm × 2500mm

(2700mm)，上、下梁尺寸 150mm × 300mm × 2300mm，斜撑截面尺寸 150mm × 1500mm。数值模型采用 Solid164 实体单元，并将 MAT_WOOD_PINE 设定为木材材料，材料参数参照表 5。数值模型如图 5(a)-(b)所示。在加载过程中，对数值模型施加竖向均布荷载，加载速度设定为 1mm/s，直至承载力下降至零停止加载。

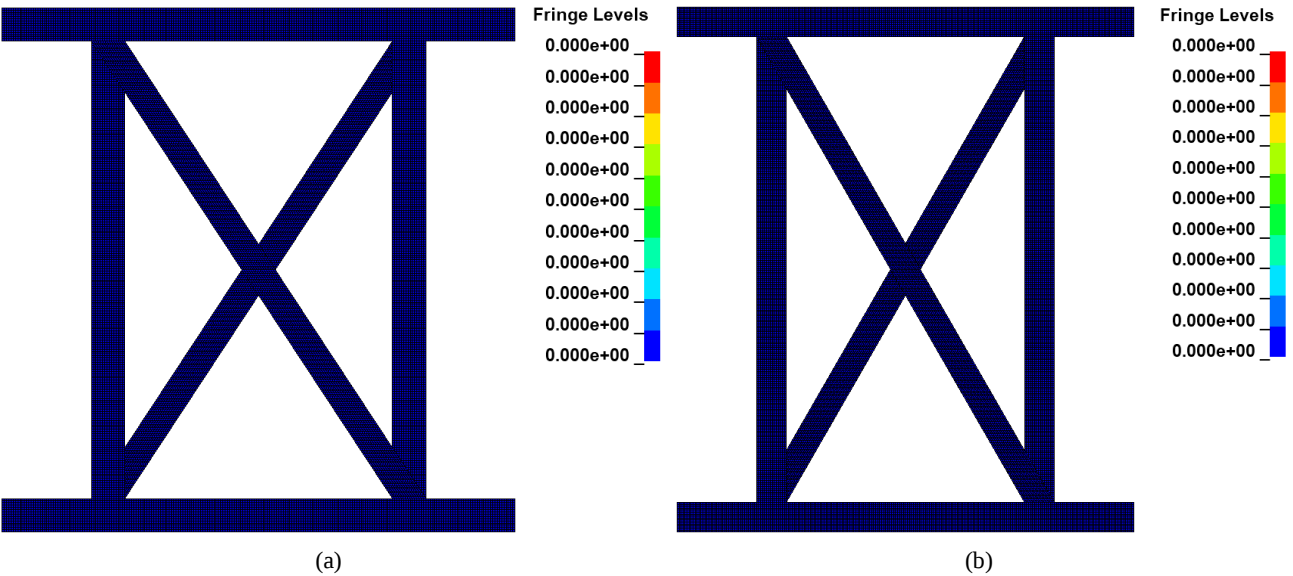


图 5 ERWS 数值模型：(a) 2500mm ERWS；(b) 2700mm ERWS

得到立柱高度为 2500mm 和 2700mm 的 ERWS 的应变云图如图 6(a)-(b)所示。结果表明最大应力出现在立柱与上下梁接触位置，与文献[19]所描述的结果相一致。另外，本文绘制了两种木支撑的竖向承载力-位移

曲线，如图 7 所示。所获得承载力峰值以及对象的位移。该值可为应急救援现场使用和选取木支撑提供重要的参考值。

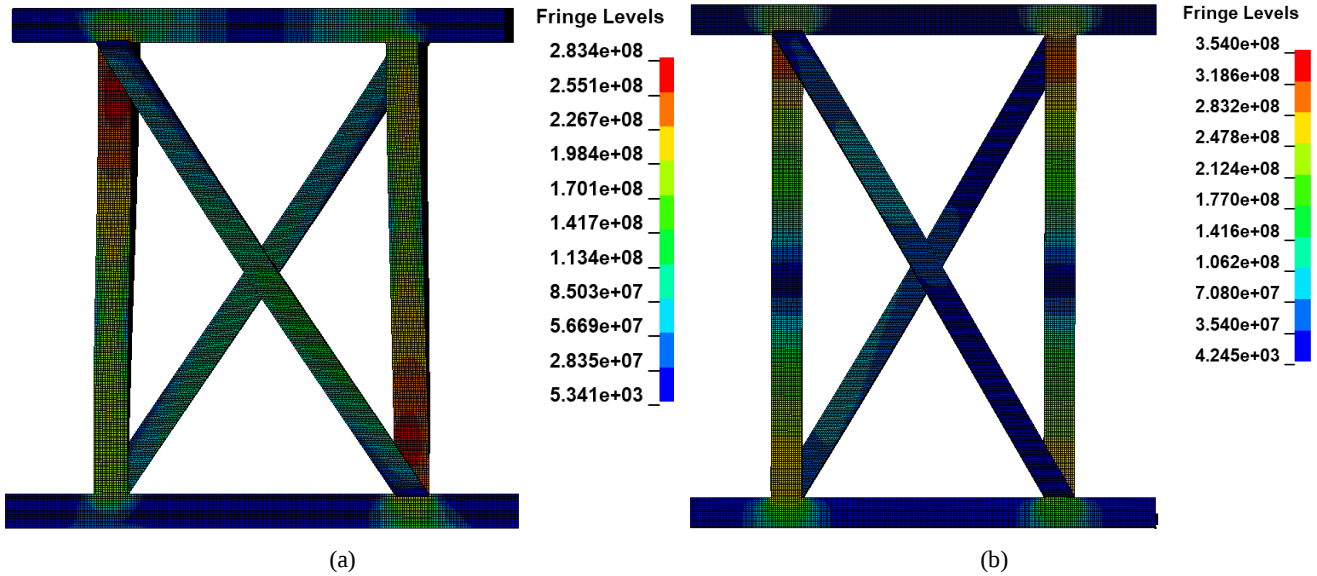


图 6 ERWS 数值模型应力云图: (a) 2500mm ERWS; (b) 2700mm ERWS

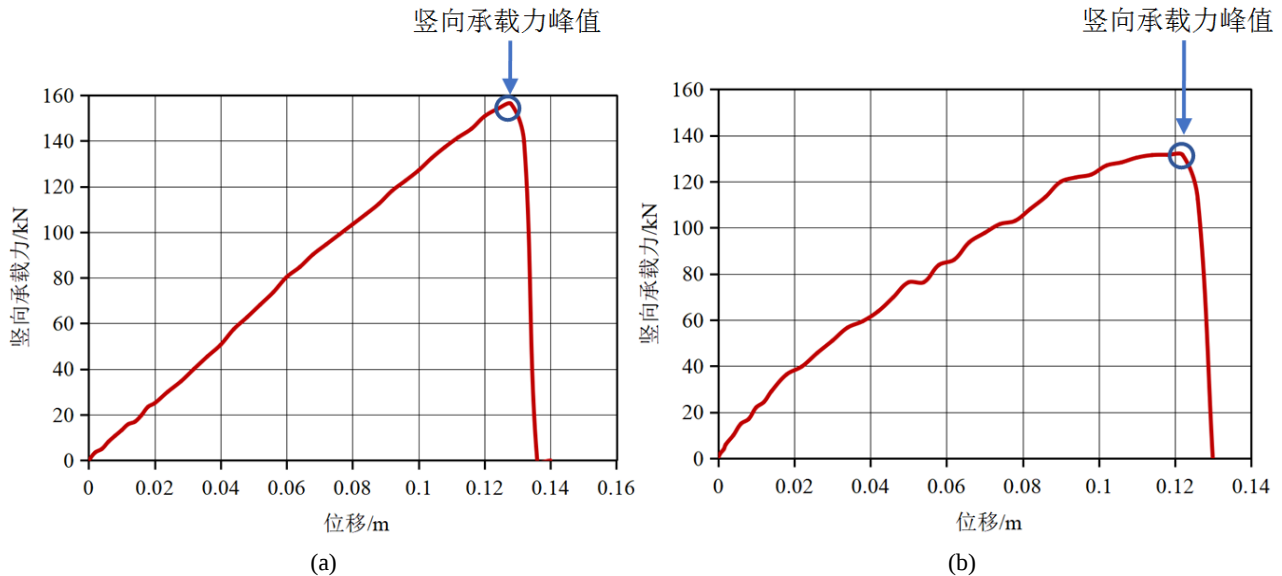


图 7 ERWS 竖向承载力-位移曲线: (a) 2500mm ERWS; (b) 2700mm ERWS

4 结论

本文针对中国 ERWS 中常用的樟子松木材,开展了 100 个标准试件的抗拉、抗压及抗剪强度试验,并分析了三种强度试验试件的破坏特征。基于 LS-DYNA 软件,构建了以 MAT_WOOD_PINE 为材料模型的樟子松立方体数值模型,同时建立了二维 ERWS 结构数值模型,并施加竖向均布荷载。主要结论如下:

MAT_WOOD_PINE 樟子松材料强度参数:在含水率为 13.3%的条件下,樟子松的力学强度参数为:平行纤维方向抗拉强度 7.9 MPa,抗压强度 9.5 MPa;垂直

纤维方向抗拉强度 78.5 MPa,抗压强度 76.3 MPa;平行剪切强度 7.8 MPa,垂直剪切强度 5.5 MPa。

数值模拟验证准确性: MAT_WOOD_PINE 材料模型下的樟子松立方体数值模型的应力-应变曲线与试验数据拟合度较高。这表明,本研究在 LS-DYNA 程序中所获取的 MAT_WOOD_PINE 模型强度参数具有较高的准确性和可靠性。

ERWS 结构数值模型验证:所建立的 ERWS 结构数值模型的应力云图和荷载-位移曲线与实际试验结果高度吻合。数值模拟所得的承载力峰值为应急救援中 ERWS 的实际应用提供了科学的参考依据,有助于提

升 ERWS 结构在灾后救援场景中的应用性。

参考文献

- [1] Wei Sijia. Self-built house collapse attracts attention to "illegal construction" as a key point of supervision—thoughts from the "April 29" particularly serious residential self-built house collapse accident in Changsha [J], Hunan Province, J. China Emergency Management, 2022(05): 90–93.
- [2] O'Connell, John P. "Supporting a Fractured Building." [J], Fire Engineering, 1995. 148(11): 64–71.
- [3] Alistair Swift. UK timber shoring for urban search and rescue [J], Fire journal, 2008. 12(6): 1-9.
- [4] Scott Jacob McCord, B. S. Testing of emergency wood shoring towers for use in urban search and rescue operations [J]. 2012.
- [5] Ma Wenlong Experimental study on dynamic mechanical properties of pinus sylvestris var. mongolica along and across grain [D]. Northeast Forestry University, 2013.
- [6] Niu Qingfang, Meng Xianjie, Li Tieying. Experimental study on the compression properties of wood in the protection of ancient buildings, J. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(05): 623–627.
- [7] Yang Gaojie Study on constitutive model of wood under uniaxial compression rate under low strain rate, D. Xian University of Architecture and Technology, 2019.
- [8] Defeng Xu, Junwu Dai, Yongqiang Yang, Xuran Weng, Gang Sun. Study on Numerical Simulation of Seismic Collapse of RC Frame Structure with Infilled Wall [J]. Advances in Civil Engineering. 2022, 1–24.
- [9] Xu Defeng, Dai Junwu, Chen Limei. Study on the Safety Evaluation Method of Life-Saving Passage in Building Ruins Under the Action of Aftershock, Shock and Vibration, 2023.
- [10] Xu Defeng, Dai Junwu, Chen Limei. Study on Construction and Optimization of the Life-saving Passage in Building Ruins Based on Numerical Simulation Method, Shock and Vibration, 2023.
- [11] GB/T 1931—2009. 木材含水率测定方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [12] GB/T 14017—2009. 木材垂直纹理方向抗拉强度试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] GB/T 1938—2009. 木材平行纹理方向抗拉强度试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] GB/T 1939—2009. 木材垂直纹理方向抗压强度试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] GB/T 1935—2009. 木材平行纹理方向抗压强度试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [16] GB/T 1939—2009. 木材垂直纹理方向抗剪强度试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's Manual (R11), 2018.
- [18] 孟宪杰. 古建筑保护中的木材受压性能试验研究 [D]. 山西: 太原理工大学.
- [19] 刘兆广. 地震应急救援支撑结构研究 [D]. 大连: 大连理工大学.