

预测砌体墙板开裂模式的支持向量机方法

朱 雷¹, 孙世钧², 阚绍德³, 周广春¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 150006 哈尔滨;
3. 广州地铁设计研究院有限公司, 510010 广州)

摘 要: 为探索一种简单易行、精度良好的砌体墙板开裂模式预测方法, 建立了一个预测面外均布荷载下砌体墙板开裂模式的支持向量机方法: 对砌体墙板试验开裂模式进行特征提取, 获取开裂模式先验知识; 对提取的开裂模式特征进行数值化定义, 得到描述开裂模式的特征值; 应用支持向量机学习这些试验墙板开裂模式的特征值; 应用学习/训练后的支持向量机模型, 对新墙板进行开裂模式的预测. 对该支持向量机方法的验证, 分别考察了3种情况: 三边支撑墙板、四边支撑墙板、混合两种支撑的墙板. 结果表明所建立的支持向量机方法, 能够基于试验墙板开裂模式, 较精确地预测新墙板开裂模式.

关键词: 支持向量机; 砌体墙板; 开裂模式; 预测; 特征值

中图分类号: TU312+.3; TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)06-0022-07

A SVM model for predicting cracking pattern of masonry wall panel

ZHU Lei¹, SUN Shijun², KAN Shaode³, ZHOU Guangchun¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, 150006 Harbin, China; 3. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010 Guangzhou, China)

Abstract: To predict the cracking pattern of masonry under uniformly and laterally load more simply and more accurately, a support vector machine (SVM) method was developed. Firstly, the feature of the cracking patterns of tested wall panels was extracted, and the priority knowledge of these panels was obtained. Secondly, the feature of these panels to form the characteristic data was quantitatively described and the SVM model to study the characteristic data was built. Finally, the cracking patterns of new panels were predicted using the SVM model above. To testify the SVM model, the panels with three simply-supported edges (hereinafter referred to as “the trilateral support”) and a top free edge, the panels with four simply-supported edges (hereinafter referred to as “support on four sides”), and all the panels above were studied. The result indicated that the developed SVM method could predict the cracking patterns of masonry wall panels in a better precision than traditional methods.

Key words: support vector machine (SVM); masonry wall panel; cracking pattern; predict; characteristic data

在对砌体墙板各种荷载工况下的破坏情况, 即开裂模式与承载能力的分析中, 由于砌体墙板材料性质以及制作等带来的高度变异性, 致使砌体墙板工作机理的精确分析十分困难^[1-4]. 目前, 砌体墙板分析广泛应用的是有限元法^[1,4-7], 但是近30年的研究表明: 无论砌体结构材料性质的本构关系多

么精细, 只要砌体结构全局材料性质参数一致, 有限元方法在许多情况下仍然难以精确预测砌体墙板开裂模式与破坏荷载. 因此, 研究人员尝试了在砌体墙板有限元分析中融入材料性质的变异性, 来改进分析的精度, 例如: 1991年, Lawrence等^[1]在砌体墙板上各个区域引入随机强度干扰系数来反映砌体性质的变异, 2003年, Rafiq等^[8]以砌体墙板试验数据为基础获取墙板区域刚度修正系数, 在一定程度上使有限元模拟结果更靠近了实际. 然而, 由于有限元理想化假设的限制, 其分析与砌体

收稿日期: 2012-08-24.

基金项目: 辽宁省(高校)重点实验室开放基金(YT-200903).

作者简介: 朱 雷(1990—), 男, 硕士研究生;

周广春(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 周广春, gzhou@hit.edu.cn.

墙板的试验结果相比仍然误差很大,甚至失效。

人工智能技术的发展为精确分析砌体墙板开辟了新途径。2006年,Zhou等^[9]发展了一种细胞自动机方法,即以标准试验墙板开裂模式为基础预测新墙板开裂模式的方法。2010年,Zhang等^[10]应用BP神经网络技术,建立了预测砌体小墙开裂模式的方法。

近年来,支持向量机在土木工程领域的应用越来越广泛,譬如在结构及构件损伤识别、结构可靠性分析、结构岩爆识别模型、结构健康监测等方面应用,发挥了其解决小样本、非线性及高位模式识别的特有优势。本文尝试应用支持向量机对砌体墙板开裂模式进行数值建模,并建立相应的预测方法,意在使支持向量机在砌体墙板开裂模式预测上得以应用,探索一种在一定程度上更为精确、简单易行的预测方法;同时,探索现有墙板试验记录的进一步应用,使之融入结构分析方法。

1 砌体墙板开裂模式特征提取

支持向量机建模最重要的环节是对研究对象的特征提取^[11]。对于砌体墙板的开裂模式,基于支持向量机的特征提取构成供机器学习的先验知识。对砌体墙板裂缝分布规律进行的特征归纳与提炼,应保证所提取的特征最具有代表性,信息量大,冗余量小,而且要求具有一定的普适性。

下面选择典型的面外均布荷载下砌体墙板试验开裂模式^[12-13],按约束分为三边支撑砌体墙板(三边简支、顶边自由砌体墙板)、四边支撑砌体墙板(四边简支砌体墙板)、混合三边与四边支撑墙板3种类别,再基于支持向量机建模的要求,分别进行开裂模式特征提取。这里选取的墙板开裂

模式是以往试验结果的集成,包括实际墙板裂缝的主裂缝,即使是不规整、呈复杂线状的主裂缝。

实际上墙板开裂模式,取决于长宽比、宽度、边界约束、荷载形式。本文方法应用时,分别考虑3种类别,这样对于其中一种类别,在所建立的支持向量机模型中会去掉相同因素,例如三边支撑墙板中,各样本边界约束与荷载形式相同,因此支持向量机模型中只有长宽比、宽度。

1.1 三边支撑砌体墙板

通过对图1所示三边支撑砌体墙板开裂模式的观察分析,可以用图示的数据描述裂缝方位和走向情况、裂缝特征类别等。对它们进一步概括,得到包括开裂模式特征值,裂缝特征类别,输入、输出数据在内的支持向量机学习的先验知识:1) 开裂模式特征值先验知识为 $a + b + c = 1, h + e = 1, d + g = 1$; 2) 裂缝特征类别先验知识为直线 $P_1 - P_2$ 表示的斜裂缝 I, 直线 $P_2 - P_5$ 表示的竖直裂缝 II, 直线 $P_2 - P_3$ 表示的水平裂缝 III, 直线 $P_3 - P_4$ 表示的斜裂缝 IV; 3) 输入、输出数据先验知识分别为板的几何尺寸(宽度,长宽比)和板的开裂模式特征值(a, b, d, e, f)。

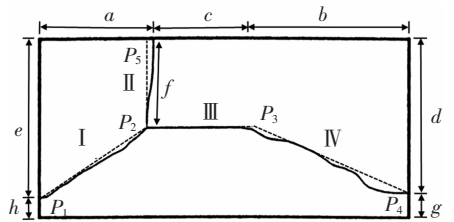


图1 三边支撑砌体墙板开裂模式上的先验知识

图2展示了5片均布面外荷载作用下三边支撑砌体墙板开裂模式特征值提取情况,相应的特征值(作为支持向量机输入输出数据)列于表1。

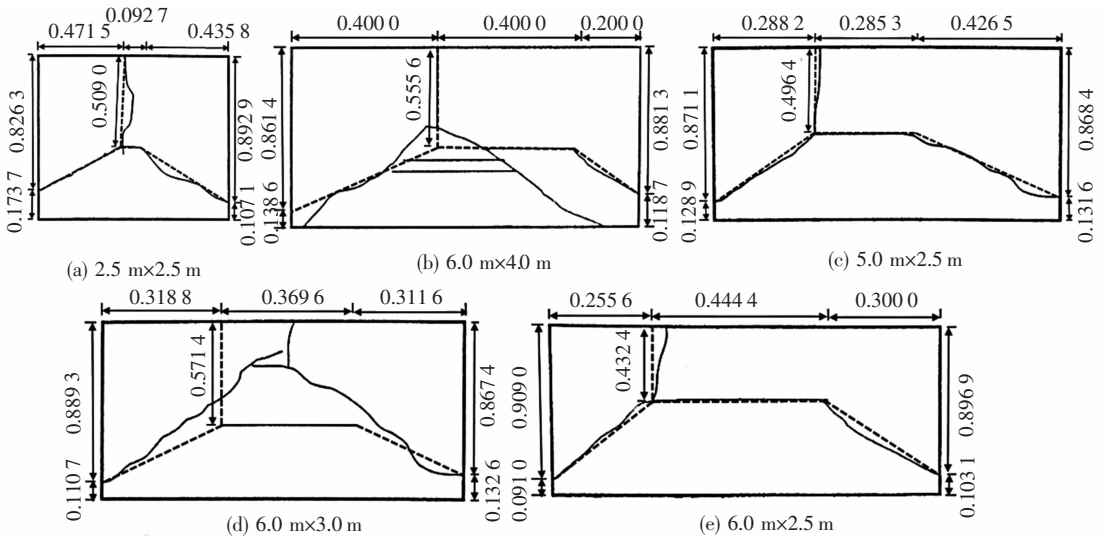


图2 三边支撑砌体墙板支持向量机模型

表1 三边支撑砌体墙板机器训练数据(输入/输出值)

序号	输入	a	b	d	e	f
1	(2.5,1)	0.471 5	0.435 8	0.892 9	0.826 3	0.509 0
2	(4,1.5)	0.400 0	0.200 0	0.881 3	0.861 4	0.555 6
3	(2.5,2)	0.288 2	0.426 5	0.868 4	0.871 1	0.496 4
4	(3,2)	0.318 8	0.311 6	0.867 4	0.889 3	0.571 4
5	(2.5,2.4)	0.255 6	0.300 0	0.896 9	0.909 0	0.432 4

1.2 四边支撑砌体墙板

按照三边支撑砌体墙板开裂模式特征值提取方法,对四边支撑砌体墙板开裂模式特征值进行提取,见图3.对图3进一步概括,得到支持向量机学习的先验知识:1) 开裂模式特征值先验知识为 $a + b + i = 1, c + d + j = 1, e + k + g = 1, h + f + l = 1$;2) 裂缝特征类别先验知识为直线 $P_1 - P_5$ 表示的斜裂缝 I,直线 $P_2 - P_6$ 表示的斜裂缝 II,直线 $P_4 - P_8$ 表示的斜裂缝 III,直线 $P_3 - P_7$ 表示的斜裂缝 IV,矩形 $P_5 - P_6 - P_8 - P_7$ 表示的裂缝 V;3) 输入、输出数据先验知识分别为板的几何尺寸(宽度,长宽比)和板的开裂模式特征(a, b, c, d, e, f, g, h).

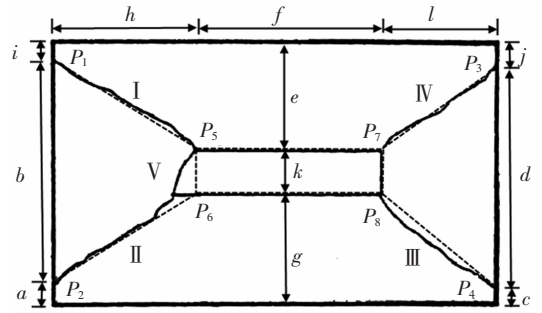


图3 四边支撑砌体墙板开裂模式上的先验知识

图4展示了5片均布面外荷载作用下四边支撑砌体墙板开裂模式特征值提取情况,相应的特征值(作为支持向量机输入输出数据)列于表2.

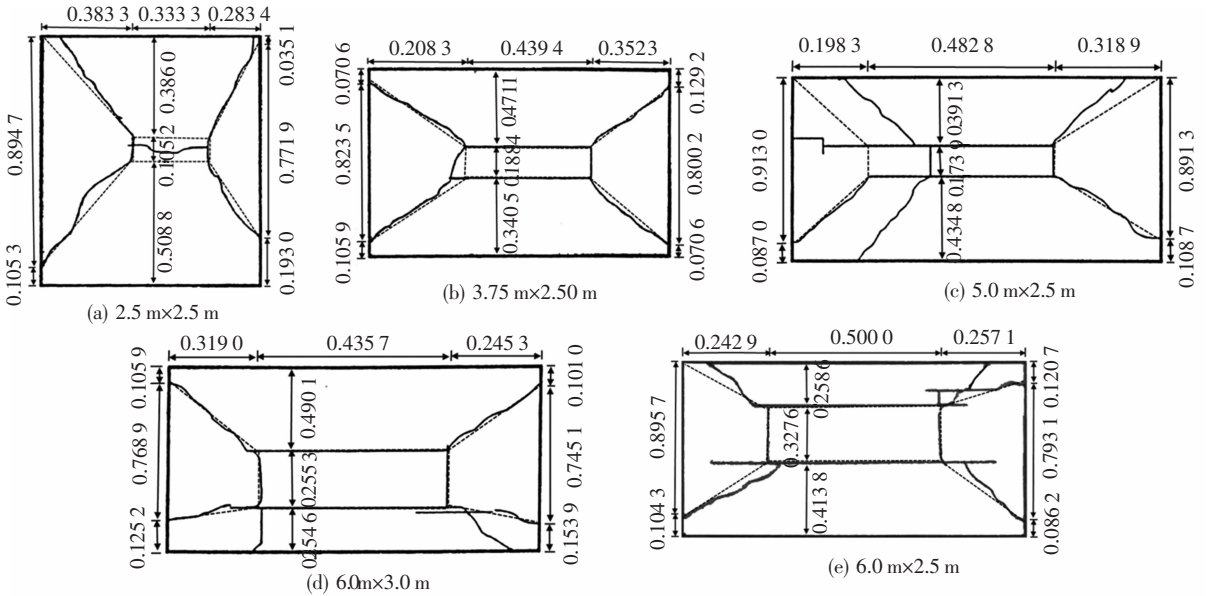


图4 四边支撑砌体墙板支持向量机模型

表2 四边支撑砌体墙板机器训练数据(输入/输出值)

序号	输入	a	b	c	d	e	f	g	h
1	(2.5,1)	0.105 3	0.894 7	0.193 0	0.771 9	0.386 0	0.333 3	0.508 8	0.383 3
2	(2.5,1.5)	0.150 9	0.823 5	0.070 6	0.800 2	0.477 1	0.439 4	0.340 5	0.208 3
3	(2.5,2)	0.087 0	0.913 0	0.108 7	0.891 3	0.391 3	0.482 8	0.434 8	0.198 3
4	(3,2)	0.125 2	0.768 9	0.153 9	0.745 1	0.490 1	0.435 7	0.254 6	0.319 0
5	(2.5,2.4)	0.104 3	0.895 7	0.086 2	0.793 1	0.258 6	0.500 0	0.413 8	0.242 9

1.3 混合三边与四边支撑的砌体墙板

按照前述方法对混合三边与四边支撑的砌体墙板开裂模式特征进行联合提取, 需要建立统一的开裂模式特征. 因两种墙板区别在于边界约束, 所以需要描述边界约束特征.

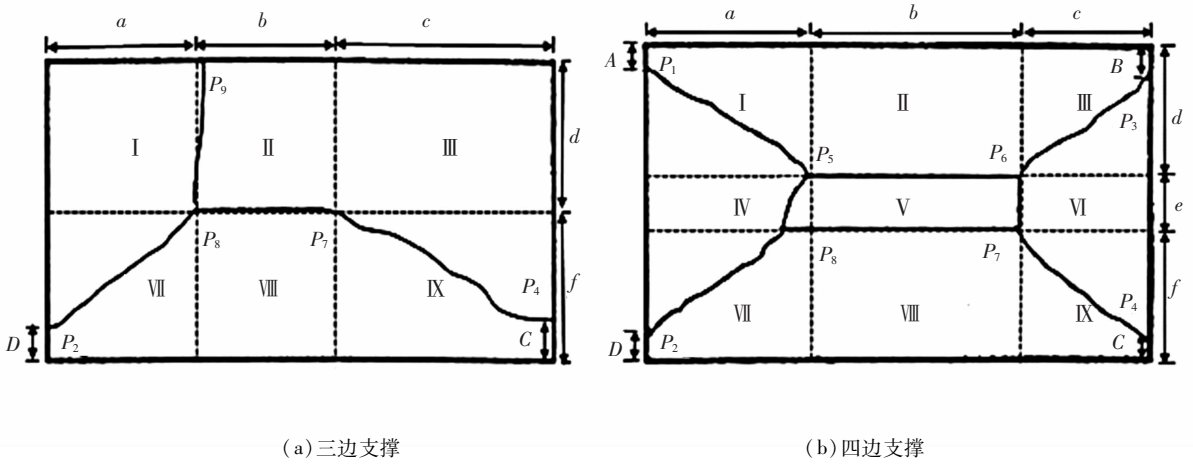
对于两种约束情况的砌体墙板, 考虑采用 3 根虚线将板划分为 9 个区域, 使砌体墙板开裂模式特征值提取具有相同的形式, 见图 5. 对图 5 中两幅图进行对比并概括得到如下所述支持向量机学习的先验知识.

1) 开裂模式特征值: $a + b + c = 1, d + e + f = 1$; 三边支撑墙板 $e = 0$, 四边支撑墙板 $e \neq 0$; $A = 0.0263$; $B = 0.0772$; $C = 0.1205$; $D = 0.1203$.

2) 裂缝特征类别: 三边支撑墙板中有 4 条裂缝, 分别为区域 I 与区域 II 的交界边 $P_8 - P_9$ 、区域 VII 中的 $P_8 - P_2$ 、区域 VIII 与区域 II 的交界边 $P_8 - P_7$ 、以及区域 IX 中的 $P_7 - P_4$; 四边支撑板中有 5 条裂缝, 分别为区域 I 中的 $P_5 - P_1$ 、区域 III 中的 $P_6 - P_3$ 、区域 VII 中的 $P_8 - P_2$ 、区域 IX 中的 $P_7 - P_4$ 、以及区域 V 的边界 $P_5 - P_6 - P_7 - P_8$.

3) 边界约束影响系数: 对于边界效应的影响, 参考文献[9]的研究, 取简支边 = 0.2, 自由边 = 0.0.

4) 输入、输出数据: 输入数据为板的几何尺寸特征(宽度, 长宽比, 4 个边界约束影响系数); 输出数据为板的开裂模式特征值(a, c, d, f).



(a) 三边支撑

(b) 四边支撑

图 5 混合三边与四边支撑的砌体墙板开裂模式上的先验知识

A, B, C, D 所赋数值是各板相应 A_i, B_i, C_i, D_i 的平均值, 例如

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (1)$$

式中 N 是板数. 实际计算中, 假若依据 N 块已知破坏模式的实验墙板, 来预测一块或多块未知的新墙板, 则可以对 N 块实验墙板进行统计以获得 A_i, B_i, C_i, D_i 等值. 文中 A_i, B_i, C_i, D_i 便是对 9 块墙板进行统计得来.

在三边支撑砌体墙板中, 由于 $e = 0$, 预测出的 d 与 f 的和大多是不等于 1 的, 但先验知识规定 d 与 f 的和等于 1, 因此有必要对预测出来的 d 和 f 进行调节. 调节方法为: 假设 $d + f = m$ (m 可以大于 1, 也可以小于 1).

当 $m > 1$ 时, 分别对 d 和 f 按它们计算出来值的比例关系进行缩小调节, 调节幅度为 $m - 1$.

$$\begin{aligned} d_1 &= d - \frac{(m - 1)d}{d + f}, \\ f_1 &= f - \frac{(m - 1)f}{d + f}. \end{aligned} \quad (2)$$

然后再将调节后的 d_1, f_1 作为新的 d 和 f 用于计算和绘图.

当 $m < 1$ 时, 对 d 和 f 按它们的比例关系进行增大调节, 调节幅度为 $1 - m$, 即将式(2)中 $m - 1$ 改写为 $1 - m$. 再将调节后的结果作为预测值来代替未经调节的 d 和 f 用于计算和绘图.

如下三边支撑砌体墙板, 若无特别说明, 预测的 d 和 f 均是调节后的值; 图 6 展示了按已有先验知识提取的, 均布面外荷载作用下 4 片三边支撑砌体墙板与 5 片四边支撑砌体墙板一致开裂模式特征值, 而相应的特征值(作为支持向量机输入输出数据)列于表 3.

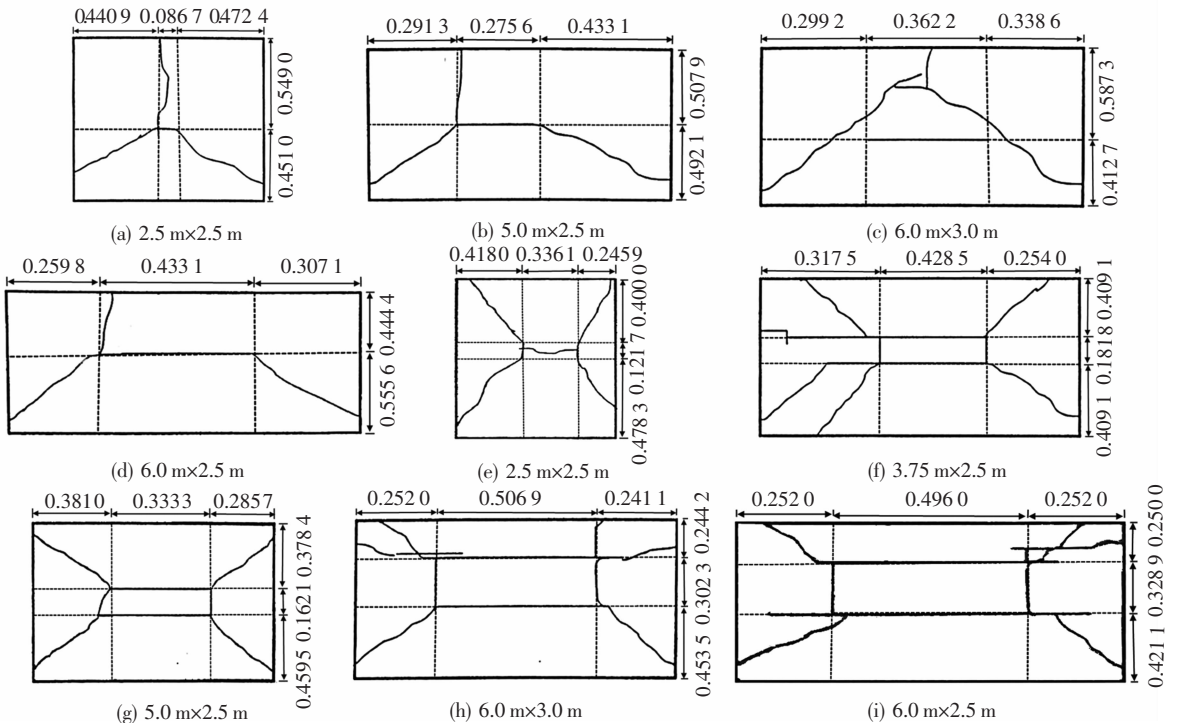


图 6 混合三边与四边支撑的砌体墙板支持向量机模型

表 3 混合三边与四边支撑的砌体墙板机器训练数据(输入/输出值)

序号	输入值						输出值			
	宽度	长宽比	边界 1	边界 2	边界 3	边界 4	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>f</i>
1	2.5	1.0	0.2	0.2	0.2	0	0.440 9	0.472 4	0.549 0	0.451 0
2	2.5	2.0	0.2	0.2	0.2	0	0.291 3	0.433 1	0.507 9	0.492 1
3	3.0	2.0	0.2	0.2	0.2	0	0.299 2	0.338 6	0.587 3	0.412 7
4	2.5	2.4	0.2	0.2	0.2	0	0.259 8	0.307 1	0.444 4	0.555 6
5	2.5	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.418 0	0.245 9	0.400 0	0.478 3
6	2.5	1.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.317 5	0.254 0	0.409 1	0.409 1
7	2.5	2.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.381 0	0.285 7	0.378 4	0.459 5
8	3.0	2.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.252 0	0.244 1	0.244 2	0.453 5
9	2.5	2.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.252 0	0.252 0	0.250 0	0.421 1

2 算 例

根据以上所提取的砌体墙板特征值,即以板的几何尺寸特征作为输入数据(在混合三边与四边支撑的砌体墙板中需加上板的边界效应影响值),以板的开裂模式特征值作为输出数据,对相应支持向量机模型进行了训练.下面展示了用训练后的支持向量机模型预测 3 种类别砌体墙板开裂模式的结果.以下所有计算均基于 MATLAB R2011b 平台,采用参数寻优的思想选取支持向量机训练时所需的参数 *c* 和 *g*; 其他参数设置为: $v = 3, s = 3, t = 0$.

2.1 三边支撑砌体墙板算例

对于表 1 的 5 片墙板数据,取其中 4 片墙板

为训练数据,预测第 5 片墙板开裂模式,这样就有 5 组工况,见表 4.图 7 展示了 3 片墙板预测和实际开裂模式的对比.

2.2 四边支撑砌体墙板算例

同理,对于表 2 的 5 片墙板数据,取其中 4 片墙板为训练数据,预测第 5 片墙板开裂模式,这样就有 5 组工况,见表 5.图 8 展示了 3 片墙板的预测和实际开裂模式的对比.

2.3 混合三边与四边砌体墙板算例

同理,对于表 3 的 9 片墙板数据,取其中 8 片墙板为训练数据,预测第 9 片墙板开裂模式,这样就有 9 组工况,见表 6.图 9 中展示了 4 片墙板的预测和实际开裂模式的对比.

表4 三边支撑砌体墙板算例结果

被测墙板	训练墙板	预测特征值				
		a'	b'	d'	e'	f'
1	2~5	0.313 6	0.441 2	0.868 7	0.866 9	0.545 1
2	1,3~5	0.419 1	0.259 0	0.865 7	0.873 4	0.614 7
3	1~2,4~5	0.336 8	0.331 2	0.883 8	0.877 3	0.499 8
4	1~3,5	0.317 8	0.353 8	0.880 5	0.875 2	0.496 9
5	1~4	0.290 5	0.386 5	0.878 0	0.872 3	0.509 8

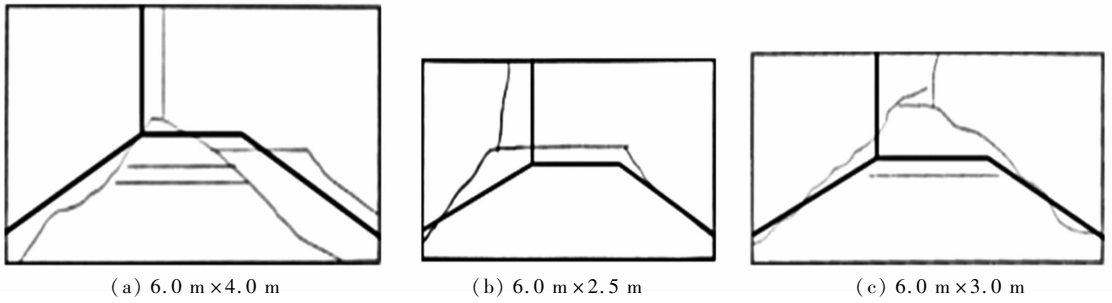


图7 三边支撑砌体墙板预测开裂模式和实际开裂模式对比

表5 四边支撑砌体墙板算例结果

被测墙板	训练墙板	预测特征值							
		a'	b'	c'	d'	e'	f'	g'	h'
1	2~5	0.114 8	0.859 6	0.097 5	0.796 7	0.434 2	0.461 1	0.377 2	0.225 6
2	1,3~5	0.105 7	0.894 3	0.131 3	0.782 5	0.388 7	0.459 3	0.424 3	0.281 0
3	1~2,4~5	0.115 3	0.859 1	0.120 0	0.782 5	0.431 6	0.437 6	0.377 2	0.281 0
4	1~3,5	0.105 7	0.894 3	0.097 5	0.796 7	0.388 7	0.461 1	0.424 3	0.225 6
5	1~4	0.115 3	0.859 1	0.131 3	0.786 1	0.434 2	0.437 6	0.387 7	0.263 7

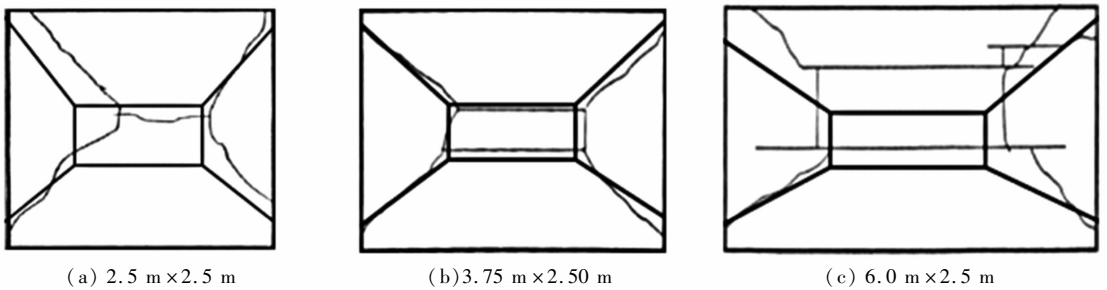


图8 四边支撑砌体墙板预测墙板开裂模式与实际开裂模式对比

表6 混合三边与四边砌体墙板算例结果

被测墙板	训练墙板	预测特征值			
		a'	c'	d'	f'
1	2~9	0.419 4	0.270 9	0.505 9	0.494 1
2	1,3~9	0.316 7	0.329 5	0.527 9	0.472 1
3	1~2,4~9	0.269 3	0.270 8	0.434 8	0.565 2
4	1~3,5~9	0.265 4	0.271 2	0.530 4	0.469 6
5	1~4,6~9	0.404 7	0.301 6	0.426 2	0.396 4
6	1~5,7~9	0.365 7	0.281 4	0.420 9	0.466 8
7	1~6,8~9	0.285 8	0.279 6	0.307 4	0.465 5
8	1~7,9	0.298 1	0.267 2	0.426 4	0.372 8
9	1~8	0.222 0	0.265 7	0.338 8	0.477 4

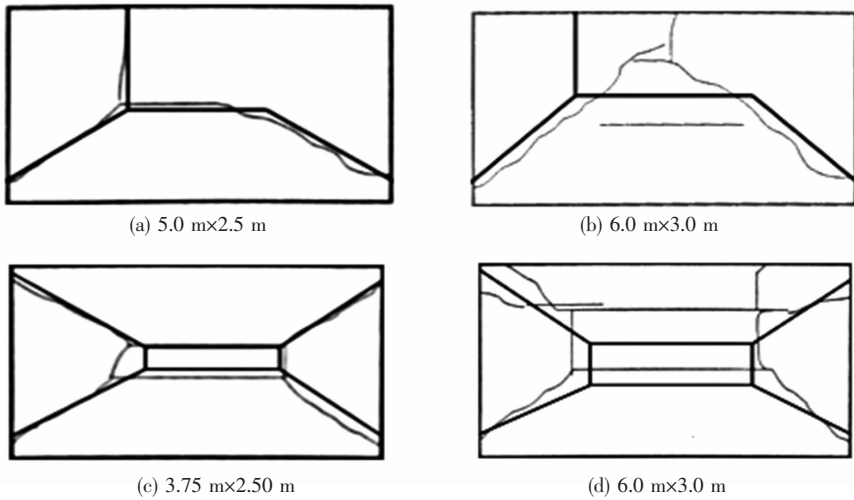


图9 混合三边与四边砌体墙板预测墙板开裂模式与实际开裂模式对比

以上算例可见,本文建立的支持向量机方法,能较精确地预测墙板的开裂模式。

3 结 语

本文通过对砌体墙板试验开裂模式与墙板几何特征进行特征提取及相应参数量化标定,并依据支持向量机学习要求,构建了以墙板约束类别划分的3组训练数据,涵盖了砌体墙板最典型的约束情况.进而,应用训练后的支持向量机模型对“新”墙板进行开裂模式预测,预测的开裂模式与试验破坏模式比较可见:本文进行的砌体墙板开裂模式特征提取,即砌体墙板开裂模式支持向量机建模是可行的;预测出的砌体墙板开裂模式能较精确地反映实际情况.这样,就实现了支持向量机在砌体结构研究领域的一个应用,并期待进一步的研究会发挥支持向量机特有的功能,来预测砌体墙板的破坏荷载以及其他高变异性问题。

参考文献

- [1] LAWRENCE S J, LU Jingping. An elastic analysis of laterally loaded masonry walls with openings [C]// International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry. Swansea, UK: [s. n.], 1991: 39-49.
- [2] MATHEW A, KUMAR B, SINHA B P, *et al.* Analysis of masonry panel under biaxial bending using ANNs and CBR[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(3): 170-177.
- [3] JAMES M Y. Behavior of masonry infilled frames subjected to out-of-plane pressure loads[D]. Cookeville; Tennessee Technological University, 2008.
- [4] BAKER L R. A principal stress failure criterion for brickwork in bi-axial bending[C]//Proc 6th IBMaC. Rome: [s. n.], 1982:121-130.

- [5] LEE G N, PANDE G N, MIDDLETON J, *et al.* Numerical modelling of brick masonry panels subject to lateral loadings[J]. Computer and Structures, 1996, 61(4): 735-745.
- [6] LOURENCO P B. Anisotropic softening model for masonry plates and shells[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(9): 1008-1016.
- [7] MOHAMMED S M. Finite element analysis of unreinforced masonry walls [J]. Al-Rafidain Engineering, 2010, 18(4): 55-68.
- [8] RAFIQ M Y, ZHOU Guangchun, EASTERBROOK D J. Analysis of brickwork wall panels subjected to lateral loading using correctors [J]. Journal of Masonry International, 2003, 16(2): 75-82.
- [9] ZHOU Guangchun, RAFIQ M Y, BUGMANN G, *et al.* Cellular automata model for predicting the cracking pattern of laterally loaded masonry wall panels [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006, 20(6): 400-409.
- [10] ZHANG Yu, ZHOU Guangchun, XIONG Yi, *et al.* Techniques for predicting cracking pattern of masonry wall using artificial neural networks and cellular automata [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(2): 161-172.
- [11] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995 (20): 273-297.
- [12] LAWRENCE S J. Behavior of brick masonry walls under lateral loading[D]. Sydney: University of South Wales, 1983.
- [13] CHONG V L. The behaviour of laterally loaded masonry panels with openings [D]. Plymouth: University of Plymouth, 1993.

(编辑 赵丽莹)