

钢结构梁柱加固节点框架损伤演化过程数值模拟分析

Numerical Simulation Analysis of Damage Evolution Process of Steel Structure Beam Column Reinforced Joint Frame

赵 峰

(江苏建筑职业技术学院 建筑建造学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为研究不同因素对钢结构梁柱加固节点框架演化过程损伤的影响, 选择 4 个钢结构梁柱加固节点框架试件作为实验对象, 在其他条件不变基础上, 改变试件轴压比、钢盖板厚度以及混凝土强度, 用 ABAQUS 软件对钢结构梁柱加固节点框架进行模拟, 观察损伤演化过程的应力云图情况, 并对屈服位移与峰值位移进行统计。结果表明: 轴压比以及钢盖板厚度对受力性能影响不大, 混凝土强度对受力性能影响较大, 并且随着混凝土强度的增加, 钢结构梁柱加固节点框架的承载力也在增加, 在节点框架设计时, 应适当增加混凝土强度, 提高节点框架承载力。

关键词: 钢结构梁柱; 加固节点框架; 损伤演化过程; 数值模拟分析; ABAQUS 软件; 钢盖板厚度

中图分类号: TU393

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0125-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.024

ZHAO Zheng

(School of Architecture and Construction, Jiangsu Vocational Institute of Architectural
Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To explore the effects of different factors on the damage evolution process of steel structure beam column reinforced joint frames. Four steel structure beam column strengthened joint frame specimens were selected as experimental objects. On the basis of Ceteris paribus, the axial compression ratio of the specimens, the thickness of the steel cover plate and the strength of the concrete were changed. ABAQUS software was used to simulate the steel structure beam column strengthened joint frame, observe the stress nephogram of the damage evolution process, and make statistics on the yield displacement and peak displacement. Conclusion: During the damage process of the steel structure beam column reinforced joint frame, the axial compression ratio and the thickness of the steel cover plate have little effect on the mechanical performance. The concrete strength has a significant impact on the mechanical performance. Moreover, as the concrete strength increases, the bearing capacity of the steel structure beam column reinforced joint frame also increases. In the design of the joint frame, the concrete strength should be appropriately increased to improve the bearing capacity of the joint frame.

Keywords: steel structure beams and columns; reinforced node frame; damage evolution process; numerical simulation analysis; ABAQUS software; thickness of steel cover plate

0 引言

钢结构作为性能优越的一类结构, 工厂制作程度较高, 被经常运用于高层建筑中。在钢结构的梁柱加固节点框架中, 随着受力时间的增长, 其构件容易达到屈服, 从而对整个结构的稳定性产生一定的影响, 严重甚至可导致结构整体倒塌^[1-2]。其损

作者简介: 赵 峰 (1972—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑结构和钢结构方面的研究。

收稿日期: 2023-07-20

建筑结构

伤演化过程中，影响较多，随着荷载的循环作用，形成损伤的动态演化过程，对该演化过程进行研究，有利于了解钢结构的损伤机理，对损伤程度作出判断，采取措施加强其结构的稳定性，减少带来的损失^[3-4]。

在钢结构的损失演化过程的研究上，文献 [5] 配置 3 个钢结构梁柱加固节点框架，对该框架进行实验，得出了剪压比会改变试件的破坏模式，应该适度增加节点框架抗剪能力，提高试件节点剪切变形所占总变形的比例，并对因素的主次关系进行分析，从而加强其抗剪性能。文献 [6] 提出基于正交试验方法，对混凝土强度等参数，进行研究与分析，得出当钢结构梁柱加固节点框架的直径增加，其承载力也将增加，并且其试件受力性能也在整个演化过程中达到较好。文献 [7] 提出一种加腋改进型节点，通过 ABAQUS 软件建立的节点模型分析钢梁柱节点的各项指标曲线，探讨加腋节点抗震性能的变化机理，结果表明加腋后节点的抗震性明显有所提升，与未加固试件相比，加腋加固试件的承载力和延性都有所提高。基于此，本文提出钢结构梁柱加固节点框架损伤演化过程数值模拟分析，以期为类似工程提供借鉴。

1 试件与方法

1.1 试件

选择 4 个钢结构梁柱加固节点框架试件，试件的主要参数见表 1。在钢结构梁柱加固节点框架试件中，柱中上部为连接缺口，预留 4 个竖向孔洞，用角钢及钢盖板，连接预埋螺栓及对拉螺栓，生成组件，实验对象是组件。其中，模拟组件 1 为不考虑连接螺栓轴压比对应试件，模拟组件 2 为不同等级混凝土强度对应带有对拉螺栓的试件，模拟组件 3 为不同的钢盖板厚度对应试件。设计参数如图 1 所示。节点

表 1 试件的主要参数
Table 1 Main parameters of the specimen

编号	柱截面尺寸 (h × h) /mm	角钢截面尺寸 /mm	梁截面尺寸 (h × h) /mm
SJ-1	L150 × 160 × 20	450 × 450	300 × 400
SJ-2	L150 × 160 × 10	450 × 450	300 × 400
SJ-3	L150 × 160 × 30	450 × 450	300 × 400
SJ-4	L150 × 160 × 40	450 × 450	300 × 400

框架的柱中上部，设置为连接缺口梁，其中包括 4 个高强螺栓，正梁的正视图如图 2 所示。

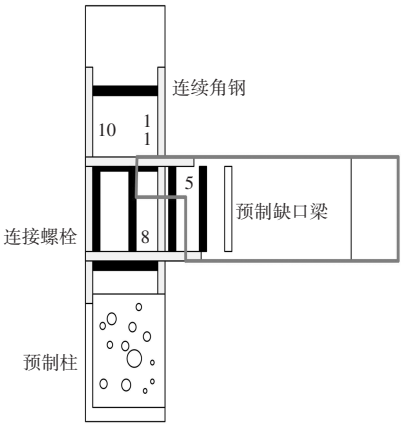


图 1 节点连接示意图
Fig. 1 Node connection diagram

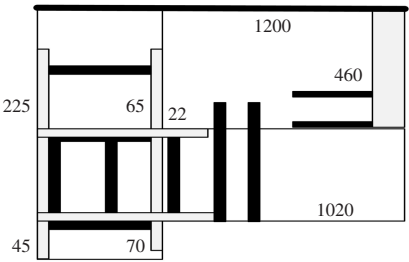


图 2 预制混凝土梁正视图
Fig. 2 Front view of precast concrete beam

在钢板与连接钢盖板处，预留螺栓孔洞，对材料的力学性能进行分析^[6]，材料中使用的钢材力学性能见表 2。混凝土强度分别为 C25、C35、C45、C55，钢筋为 HPB300 级钢筋。

表 2 试件使用钢材力学性能
Table 2 Mechanical properties of steel used in test pieces

钢材级别	厚度 /mm	弹性模量 E/ (× 10 ⁵ MPa)	屈服强度 f/MPa	抗拉强度 f/MPa
Q235	12	2. 01	426. 00	536. 21
Q235	14	2. 01	426. 13	521. 34
HPB300	10	2. 01	415. 62	586. 15
HRB400	12	2. 1	425. 89	594. 18
HRB400	10	2. 1	478. 29	574. 28
HRB400	16	2. 0	398. 15	568. 14
HRB400	14	2. 0	381. 45	547. 15

1.2 加载方案

加载方案为 850 kN 的定向荷载，轴压比为 0. 4，采用位移低周往复荷载方式，每级 1 mm，将加载 1 次，加载制度如图 3 所示。使用该加载制度进行实验，对峰值位移与屈服位移进行观察与统计。

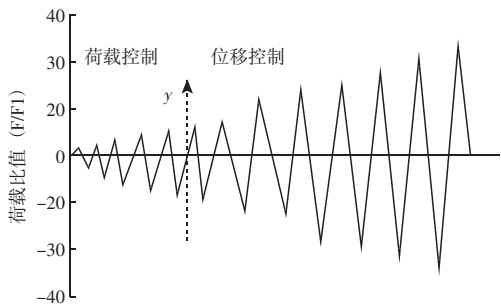


图3 加载制度
Fig. 3 Loading system

1.3 数值模拟

使用 ABAQUS 软件，对试件进行建模分析。钢结构梁柱加固节点框架中，使用混凝土本构关系，对模拟器状态，对混凝土应力应变关系曲线进行表达^[8]，公式表示为：

$$A = Az - \frac{Q}{E} \tag{1}$$

式中： Az 为任意点的应力参数； Q 为初始弹性刚度参数； E 为初始弹性刚度应力参数。压缩中单轴荷载响应如图 4 所示^[9]。

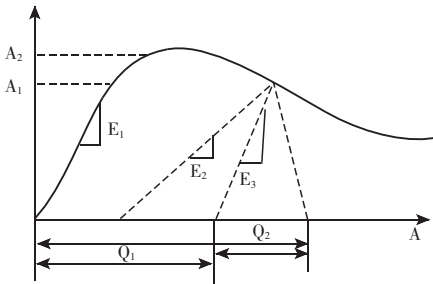


图4 压缩中单轴荷载响应图像
Fig. 4 Uniaxial load response image under compression

在进行单轴拉伸时，达到失效力时，开裂的应变表示为：

$$A_1 = A - \frac{Q_1}{E_1} \tag{2}$$

式中： E_1 为混凝土初始弹性刚度； Q_1 为应力和应变的关系。根据混凝土初始弹性刚度^[10]，将拉伸内聚应力进行定义，公式表示为：

$$A_2 = \frac{Q_2}{F - A_1} (1 - S) \tag{3}$$

式中： Q_2 为拉伸压缩参数； F 为拉伸压缩； S 为损伤因子，则可以用函数表示刚度恢复，公式为：

$$d = A_2 \left(1 - r \cdot e - \frac{1}{c} \right) \tag{4}$$

式中： r 为权重因子； e 为材料压缩参数； c 为恢复系数，则可以对受拉损伤因子进行计算，公式表示为：

$$f = \begin{cases} 1 - \sqrt{\frac{\rho n}{d - 1 + x}} & x \leq 1 \\ 1 - \sqrt{\frac{\rho n}{\partial (1 + x)^2 + x}} & x > 1 \end{cases} \tag{5}$$

式中： ρ 为横向变形系数； n 为膨胀角参数； x 为黏性参数； ∂ 为常数，文中取 0.671。对钢筋与钢材的本构模型进行设置，使用三折线模型运动强度对非线性行为进行表示，钢材本构模型如图 5 所示。根据钢材本构模型与公式进行计算，试件的数值参数见表 3。

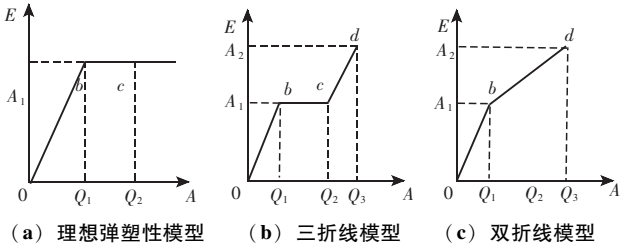


图5 钢材本构模型
Fig. 5 Constitutive model of steel

表3 混凝土参数
Table 3 Concrete parameters

压应力/MPa	受压损伤因子	拉应力/MPa	受压损伤因子
41.470	0.136	1.080	0.502
42.985	0.213	0.960	0.572
38.056	0.304	0.865	0.624
34.074	0.399	0.788	0.665
36.837	0.482	0.725	0.698
25.427	0.550	0.672	0.725
56.715	0.604	0.627	0.747

按照结构参数对边界条件进行定义，对构件进行划分，主要的构件如图 6 所示。

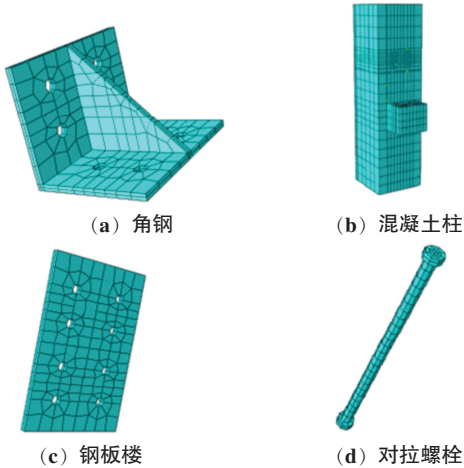


图6 试件模拟组件
Fig. 6 Specimen simulation assembly

建筑结构

柱混凝土部件单元尺寸为 40 mm,在此基础上,设置不同的轴压比参数与混凝土强度等参数,对各个参数下的应力云图进行统计。

2 分析与讨论

2.1 轴压比影响分析

当其他条件相同,轴压比分别为 0.4、0.6、0.8、1.0 时,对试件模拟组件 1 破坏程度应力云图进行分析,如图 7 所示。不同轴压比的峰值位移与屈服位移见表 4。

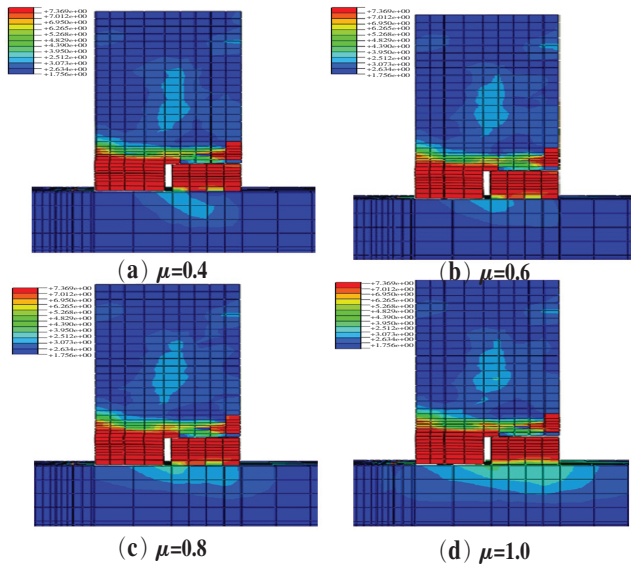


图 7 不同轴压比的受力云图

Fig. 7 Stress cloud image with different coaxial pressure ratio

表 4 不同轴压比的试件位移情况

Table 4 Displacement of specimens with different coaxial pressure ratios

轴压比	屈服位移/mm		峰值位移/mm	
	正	负	正	负
0.4	7.22	7.21	16.23	16.23
0.6	7.20	7.21	16.22	16.20
0.8	7.23	7.22	16.25	16.21
1.0	7.22	7.20	16.23	16.26

从实验结果可以看出,不同轴压比下试件的损失程度并未出现明显的增减趋势,这一结果在一定程度上验证了轴压比对试件损伤程度的直接影响较为有限。与此同时,试件的屈服位移和峰值位移在这一系列实验中几乎保持恒定,几乎没有因为轴压比的调整而发生明显的变化。这一稳定的表现表明,轴压比这一因素在钢结构梁柱加固节点框架的损伤演化过程中,并不占据主导或决定性的地位。因此,

我们可以得出结论,轴压比对钢结构梁柱加固节点框架的损伤演化过程影响较小。

从表中可以看出,随着轴压比的增加,试件的屈服位移与峰值位移几乎没有变化,说明轴压比对钢结构梁柱加固节点框架损伤演化过程中的影响几乎没有。

2.2 混凝土强度影响分析

对不同等级混凝土强度的试件模拟组件 2 进行分析,如图 8 所示。统计不同混凝土强度的峰值位移与屈服位移,情况见表 5。

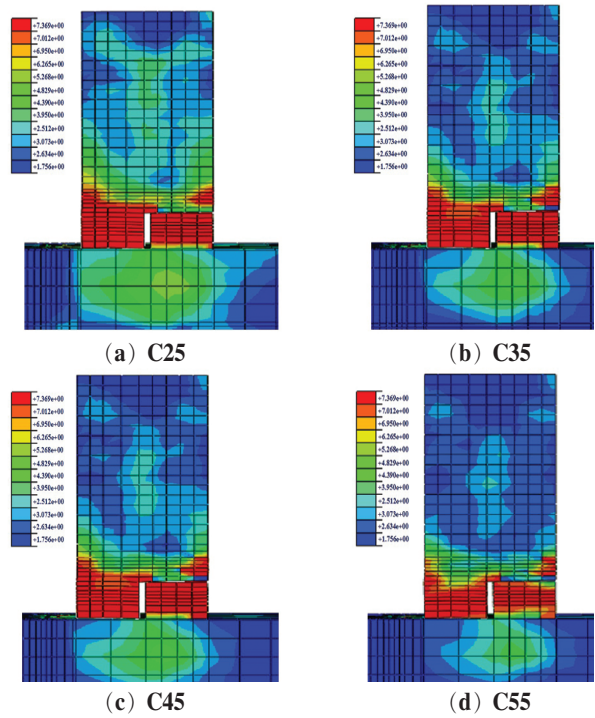


图 8 不同混凝土强度的受力云图

Fig. 8 Stress cloud diagram of concrete with different strength

表 5 不同混凝土强度的试件位移情况

Table 5 Displacement of specimens with different concrete strengths

混凝土强度	屈服位移/mm		峰值位移/mm	
	正	负	正	负
C25	14.23	15.32	40.12	42.09
C35	12.36	12.56	35.16	32.48
C45	10.26	11.26	33.29	30.27
C55	9.56	9.91	24.39	28.67

随着混凝土强度的逐步提升,其变形程度呈现出明显的下降趋势。这一变化不仅体现在试件在受到外力作用时的形变程度减少,还表现在屈服位移和峰值位移的逐渐减小上。这一规律揭示了混凝土强度在钢结构梁柱加固节点框架损伤演化过程中的重要性。

具体而言，混凝土强度的增加意味着其内部结构的紧密性和稳定性得到了提升，这使得试件在受到外力作用时，能够更好地抵抗变形和损伤。因此，当混凝土强度增大时，试件的屈服位移和峰值位移均会有所减小，显示出更高的受力和更强的稳定性。

进一步分析，混凝土强度的增加对钢结构梁柱加固节点框架的承载力产生了积极影响。这是因为，混凝土作为节点框架的重要组成部分，其强度的提高能够有效分担钢结构梁柱在受力过程中的负荷，从而减轻钢结构梁柱的受力负担，提高整个框架的承载能力和稳定性。

综上所述，混凝土强度对钢结构梁柱加固节点框架的损伤演化过程具有显著影响。通过提高混凝土强度，可以有效减小试件的变形程度，降低屈服位移和峰值位移，进而增强试件的受力和提高钢结构梁柱加固节点框架的承载力。

2.3 钢盖板厚度影响分析

在其他条件保持不变的基础上，使用不同的钢盖板厚度对试件模拟组件3的损伤演化过程承载力情况进行分析，如图9所示。统计不同钢盖板厚度的峰值位移与屈服位移，情况见表6。

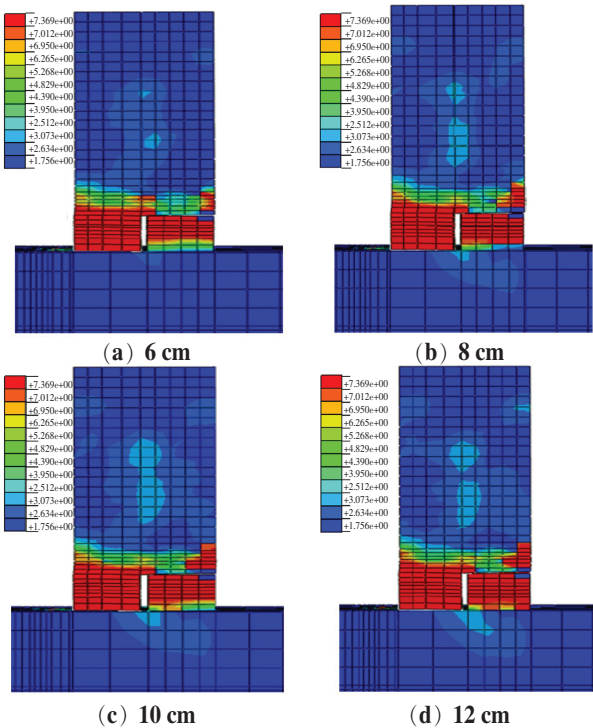


图9 不同钢盖板厚度的受力云图
Fig. 9 Stress cloud diagram of different steel cover thickness

表6 不同钢盖板厚度的试件位移情况
Table 6 Displacement of specimens with different

钢盖板厚度 /cm	屈服位移/mm		峰值位移/mm	
	正	负	正	负
6	7.69	7.68	21.23	21.22
8	7.68	7.89	22.31	23.15
10	7.67	7.78	21.69	21.85
12	7.29	7.58	21.34	23.21

从实验结果可以看出，随着钢盖板厚度的增加，试件的受压损失云图并未展现出显著的变化趋势。具体来说，无论是钢盖板厚度的轻微增加还是较为显著的调整，试件在受到压力作用时的损失分布和程度都保持了相对稳定的状态。这一结果反映了钢盖板厚度在试件受压性能上的影响并不明显。

进一步观察，屈服位移和峰值位移这两个关键的力学参数也几乎没有因为钢盖板厚度的变化而发生显著的改变。这两个参数的稳定性再次证实了钢盖板厚度对试件承载能力的影响微乎其微。

综上所述，钢盖板厚度的增加对试件的受压性能和承载能力的影响较小。

3 结束语

通过对钢结构梁柱加固节点框架损伤演化过程数值进行模拟分析，得出了如下结论：

(1) 在钢结构梁柱加固节点框架中，受压损伤主要发生在梁中，而柱的抗弯刚度相对较大，因此轴压比的变化对整体的受力性能影响有限。同样，钢盖板的厚度变化对框架的受力性能影响也不显著。

(2) 梁柱连接处梁端的强度和混凝土强度的提升。通过适当加强梁端的强度和增加混凝土强度，可以有效提高试件的承载力和受力性能。此外，在框架梁柱的节点设计上，也应适当加强节点核心区的刚度，并通过增加角钢附加肋来提升正向承载力，从而大幅度提高试件的负向承载力。

综上所述，钢结构梁柱加固节点框架的受力性能受多种因素影响，其中混凝土强度是最为关键的因素之一。通过合理的设计和加固措施，可以显著提升框架的承载力和稳定性，确保结构安全可靠。希望能够为钢结构梁柱加固节点框架设计提供部分借鉴意义。

建筑结构

参 考 文 献

- [1] 刘阳, 徐业鹏, 黄丹. 不同地应力条件下楔形掏槽爆破的岩石损伤演化过程研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (12): 2096-2104.
- [2] 刘彦生, 马智刚, 李青翔, 等. 浙江佛学院二期工程 (弥勒圣坛) 须弥山结构设计 [J]. 钢结构, 2021, 36 (5): 16-23.
- [3] 李祥龙, 李强, 王建国, 等. 胶结充填体冲击破坏及损伤演化数值模拟研究 [J]. 北京理工大学学报, 2022, 42 (7): 733-740.
- [4] 蔺鹏臻, 戚彦福, 李籽祺, 等. 动荷载作用下钢结构涂装的累积损伤机理与量化模型 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (6): 113-121.
- [5] 马永超, 肖合顺, 林育芳, 等. 采用钢套筒-耗能铰的装配式

梁柱节点受力机理及参数分析 [J]. 福建建筑, 2023 (4): 69-74.

- [6] 单奇峰, 许荔. 新型装配式混凝土梁柱节点抗震性能数值分析 [J]. 山西建筑, 2023, 49 (1): 6-9, 13.
- [7] 石若利, 潘志成, 李其伦, 等. 钢框架结构梁柱节点抗震加固有限元分析 [J]. 扬州大学学报 (自然科学版), 2021, 24 (6): 70-78.
- [8] 马康, 叶锡豪, 于海丰, 等. 装配式钢框架梁柱节点变形及数值模拟研究 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (12): 94-100.
- [9] 蒋金豆, 李伟, 卢亚婷. 基于 OpenSees 的 RC 柱的数值分析验证与对比 [J]. 江西建材, 2022 (6): 76-78.
- [10] 孙敏洁, 石柳. 基于 Citespace 的型钢混凝土梁柱节点研究文献计量可视化分析 [J]. 绿色科技, 2022, 24 (14): 256-258.

(上接第 53 页)

4 结论

以平均粒径、不均匀系数、地下水埋深、标准贯入击数、砂层埋深、剪应力与有效应力之比、烈度和震中距等 8 个参数作为影响因素, 建立了粒子群算法改进最小二乘支持向量机的黄河流域砂土液化判别模型, 得到以下结论:

(1) 采用 PSO 算法优化 LSSVM 模型关键参数得到核参数为 1.015 053 246 5, 正则化参数为 323.125 247 535。

(2) 对于 15 组训练样本, PSO-LSSVM 砂土液化判别模型, 对于 5 组测试样本, PSO-LSSVM 砂土液化判别模型预测准确率为 100%, 在黄河流域砂土液化预测中, PSO-LSSVM 砂土液化判别模型预测准确率为 90%。

(3) 对于 5 组测试样本, PSO-LSSVM 砂土液化判别模型预测准确率为 100%, 而 SVM 砂土液化判别模型和 BP 砂土液化判别模型预测准确率为 80%。

(4) 在黄河流域砂土液化预测中, PSO-LSSVM 砂土液化判别模型预测准确率为 90%, 而 SVM 砂土液化判别模型和 BP 砂土液化判别模型预测准确率为 80%。

(5) 综合分析, 相比 SVM 砂土液化判别模型和

BP 砂土液化判别模型, PSO-LSSVM 砂土液化判别模型具有更高的预测精度, 可指导工程技术人员预测砂土状态制定防治措施。

参 考 文 献

- [1] 胡记磊, 王璟, 沈文翔, 等. 基于应变能的砂土液化势 BP 神经网络模型评估 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (3): 56-61.
- [2] 孙小宸, 宿利平, 刘洋. 基于液化势指标的砂土抗液化评价方法及应用 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (2): 671-679.
- [3] 胡记磊, 吴文良, 王璟, 等. 基于自适应 LASSO 的逻辑回归砂土液化判别模型 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (2): 67-72.
- [4] 王维铭, 陈龙伟, 郭婷婷, 等. 基于中国砂土液化数据库的标准贯入试验液化判别方法研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (1): 279-288.
- [5] 左康乐, 顾晓强. 不同粒径比下含细颗粒砂土液化特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (7): 1461-1470.
- [6] 郝少雷, 张兵, 徐世光, 等. 基于 SPT-APD-DDA 的砂土液化评价方法研究 [J]. 地震工程学报, 2023, 45 (4): 877-886.
- [7] 姜礼涛, 周爱红, 袁颖, 等. 基于 NRS-ISSA-SVM 的砂土液化判别模型 [J]. 地震工程学报, 2022, 44 (3): 570-578.
- [8] 叶童, 李治广. 基于 ELM 原理的砂土液化判别模型及应用 [J]. 山西建筑, 2022, 48 (16): 7-10.