

· 地基与基础 ·



连云港海相固化软土抗拉强度特性及预测方法^{*}

张辉¹, 杨黎¹, 陈永辉², 钱镇华², 史江伟²

(1. 中交第三航务工程局有限公司江苏分公司, 江苏 连云港 200042;

2. 河海大学, 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 依托连云港徐圩港区二港池多用途泊位软基处理工程, 开展固化海相软土劈裂抗拉试验, 研究了水泥混掺石灰和粉煤灰的抗拉强度变化规律, 利用灰色关联理论明确各因素对固化海相软土劈裂抗拉强度影响。研究表明: 水泥和石灰混掺的固化效果优于水泥和粉煤灰, 水泥和石灰混掺的固化土各龄期抗拉强度是水泥和粉煤灰混掺工况的1.3~2.9倍。海相软土初始含水率从60%增至80%后, 7~28 d龄期固化土抗拉强度降幅为24%~75%。含水率和养护龄期是影响固化海相软土劈裂抗拉强度的主要因素; 固化剂掺量中, 水泥掺量对劈裂抗拉强度影响最为显著。基于人工神经网络的机器学习方法, 提出了海相固化软土抗拉强度的预测方法, 此方法能快速且准确预测不同初始含水率和固化剂掺量下固化土抗拉强度。

关键词: 海相软土; 固化; 劈裂抗拉强度; 灰色关联理论; 人工神经网络

中图分类号: U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0192-07

Tensile strength characteristics and prediction method of solidified marine soft soil in Lianyungang

ZHANG Hui¹, YANG Li¹, CHEN Yonghui², QIAN Zhenhua², SHI Jiangwei²

(1. Jiangsu Branch, CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Lianyungang 200042, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the soft foundation treatment project of the multi-purpose berths in the second harbor basin of Xuwei port area in Lianyungang, this study carries out splitting tensile tests of solidified marine soft soil and investigates the variation law of tensile strength of cement mixed with lime or fly ash. The study also uses the grey relation theory to determine the influence of various factors on the splitting tensile strength of solidified marine soft soil. The results show that the solidification effect of cement mixed with lime is better than that of cement mixed with fly ash. The tensile strength of solidified soil of cement mixed with lime is 1.3–2.9 times that of cement mixed with fly ash at different curing ages. When the initial water content of marine soft soil increases from 60% to 80%, the tensile strength of solidified soil decreases by 24%–75% at curing ages of 7–28 d. Water content and curing age are the main factors affecting the splitting tensile strength of solidified marine soft soil. Among the curing agent content, cement content has the most significant effect on the splitting tensile strength. Based on the machine learning method of an artificial neural network, this study proposes the prediction method of tensile strength of solidified marine soft soil. The method can predict the tensile strength of solidified soil with different initial water contents and curing agent contents quickly and accurately.

Keywords: marine soft soil; solidification; splitting tensile strength; grey relation theory; artificial neural network

收稿日期: 2022-08-07

^{*}基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178327)

作者简介: 张辉 (1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为软土地基处理。

我国东部沿海地区海相软土分布非常广泛,海相软土具有高含水率、低强度和高压缩性等特点^[1]。港口区需要建造大面积的堆场,集装箱、钢材等堆场货物导致地基附加应力增幅明显。高含水率海相软土地基堆场无法承受上覆堆载,需要采用化学固化等方式对海相软土进行改良^[2-3],提升海相软土地基的承载力和抗变形的能力。基于海相软土室内固化试验结果,发现化学固化能明显提升杭州^[4]、连云港^[5]和绍兴^[6]等地区海相软土的物理力学特性。

固化土具有干缩特性,脱水时导致土体产生裂缝^[7-8],进而降低固化土的抗压强度、抗渗和抗冻性能。劈裂抗拉强度是固化土的重要设计指标,对其的研究具有重要的工程应用价值。Consoli等^[9]开展了不同孔隙率 and 水泥掺量的固化土劈裂抗拉试验,发现孔隙率是水泥固化土抗拉强度的控制参数。Hejazi等^[10]发现掺入聚丙烯纤维能明显提升固化土的抗拉强度,且湿化后固化土的残余强度更高。基于固化土的抗拉试验,钱晓彤等^[11]发现固化土掺入自修复固化剂后,其抗拉强度和水稳性均显著提升。苏红军^[12]研究了玻璃纤维对水泥固化土抗拉强度的影响,发现固化土的劈裂抗拉强度与纤维掺量正相关,且固化土强度受水泥掺量影响最大,土样含水率和养护龄期次之,纤维掺量的影响最小。张国龙等^[13]研究了玄武岩纤维对水泥固化土的改良效果,发现掺入玄武岩纤维后水泥固化土抗拉强度提升明显,且抗拉强度受纤维长度影响最大。

相比于海相固化土抗压强度,对抗拉强度的研究较少。连云港港徐圩港区二港池多用途泊位转运区主要用于堆放钢材和集装箱,各转运区堆载高度、荷载差异大,因此,场地固化后对地基的抗拉强度要求较高。一旦场地产生过大的拉裂缝,地基抗破坏、抗变形的能力便会降低。通过开展连云港港徐圩港区二港池海相软土的劈裂抗压试验,分析水泥掺量、养护龄期和含水率对水泥固化土抗拉强度的影响规律,并利用灰色关联

理论分析各影响因素的相关性,为该地区软土工程固化提供相应的参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

海相软土取自连云港港徐圩港区二港池,此地区的海相软土的初始含水率 w_0 、初始孔隙比 e_0 、液限 w_L 和压缩系数 a_v 分别在 58.7%~78.7%、1.60~1.90、49%~56% 和 $1.2 \sim 1.6 \text{ MPa}^{-1}$ 。徐圩港区海相软土的初始含水率明显大于其液限,且压缩系数大于 0.5 MPa^{-1} 。因此,该海相软土具有高压缩性、高液限的特点,整体处于流塑-软塑状态。现场取土、烘干、破碎和筛分后开展固化试验(图1),测定不同固化剂掺量、含水率和养护龄期下固化土的劈裂抗拉强度。



图1 烘干、过筛后的海相软土

劈裂抗拉试验采用的固化材料为水泥、石灰和粉煤灰,其中水泥为主固化剂,石灰和粉煤灰为辅助固化剂。主固化剂采用杨春水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥(标号 42.5),基本参数见表1。辅助固化剂为生石灰粉和铂润耐火材料有限公司生产的粉煤灰。基于 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》^[14],试验采用 F 类粉煤灰。

表1 水泥基本参数

凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
172	234	5.5	7.4	27.2	45.1

1.2 试验设备

采用 WDW-100Y 型微机控制电子万能试验机测量固化抗拉强度, 见图 2。万能试验机的上、下压板刚度大且平整, 能模拟连续加载和卸载, 并且能够维持固定荷载。此设备能精准控制加载速率, 测量精度为 $\pm 1\%$, 最大轴力为 100 kN。采用无机结合料劈裂回弹模量夹具进行固化土的抗拉强度试验, 弧面压条的半径与试样半径相同, 但其长度应大于试样高度。固化土试样的高度和直径均为 50 mm, 压条宽度和弧面直径分别为 6.35、50 mm。开展固化土抗拉试验的附属设备包括粉碎机、筛网、塑料薄膜、电子天平、搅拌机、烘箱、铝盒、标准养护箱等。

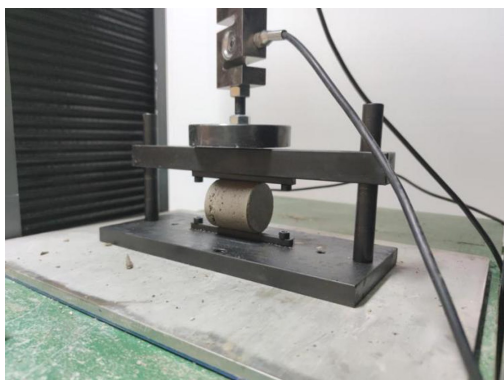


图 2 WDW-100Y 型微机控制电子万能试验机

1.3 试验方案及步骤

地勘报告显示海相软土的含水率在 58.7% ~ 78.7%。为了分析含水率对水泥固化土抗拉强度的影响, 选择现场含水率的上、下限开展固化试验, 即海相软土的含水率分别为 60% 和 80%。基于海相软土的抗压强度试验结果, 水泥混掺石灰和粉煤灰的固化效果良好, 且 28 d 龄期的无侧限抗压强度满足规范要求。因此, 固化土的抗拉试验的固化材料依然为水泥混掺石灰和粉煤灰, 固化剂掺比分别为 4% 水泥+2% 石灰、5% 水泥+3% 石灰、4% 水泥+2% 粉煤灰和 5% 水泥+3% 粉煤灰。试样养护 7、14、28 d 后, 测量固化土的抗拉强度。

基于 JTGE51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0806—1994 的规定, 开展固

化土的劈裂抗拉试验。主要试验步骤如下:

1) 配置含水率为 60% 和 80% 的海相软土, 均匀拌入水泥、石灰、粉煤灰、石膏等固化剂。

2) 将配置的固化土分 3 层装入直径和高度均为 5 cm 的模具中, 并振捣密实。制备的固化土放入恒温 (20 ± 2) °C、恒湿 (95 ± 2) % 的标准箱中, 养护至 7、14、28 d 后测量固化土抗拉强度。

3) 固化土养护结束后, 试样上下均摆放压条, 将其放于升降台上, 确保固化土与升降台之间保持垂直的状态。劈裂抗拉试验的加载速率为 1 mm/min, 记录固化土压力与位移的关系。基于固化土破坏时的最高压力 P , 计算固化土的劈裂强度 R_i :

$$R_i = \frac{2P}{\pi dh} \left(\sin 2\alpha - \frac{a}{d} \right) \quad (1)$$

式中: R_i 为固化土试样的劈裂强度, MPa; d 为试样直径, mm; a 为压条宽度, mm; α 为半压条宽对应的圆心角, ($^\circ$); P 为试样破坏时的最大压力, N; h 为试样浸水后的高度, mm。试验采用的固化土直径 d 和高度 h 均为 50 mm, 为小尺寸试样, 根据劈裂抗拉试验获取的最大压力和固化土试样高度, 采用式(2)可快速计算固化土的劈裂强度:

$$R_i = 0.012\ 526P/h \quad (2)$$

2 试验结果分析

2.1 固化土劈裂抗拉的破坏形式

不同配比、含水率和养护龄期下固化土的破坏特征类似。限于篇幅, 仅给出水泥、石灰混掺的固化土劈裂抗拉的压力-位移曲线, 见图 3。水泥和石灰的掺料分别为 5% 和 3%, 固化土的养护龄期为 28 d。随着竖向压力的增加, 固化土的竖向位移快速增加。2 种初始含水率下, 固化土试样均呈现出脆性破坏。竖向压力达到固化土的极限劈裂拉力时, 试样沿直径方向劈裂, 见图 4; 劈裂后固化土试样承受的竖向压力迅速下降。含水率为 60% 和 80% 时, 固化土劈裂破坏对应的最大压力分别为 790.3、378.5 N, 利用式(2)计算的固化土劈裂强度分别为 198、95 kPa。很明显, 固化土初始含水率越低, 固化后抗拉强度越高。

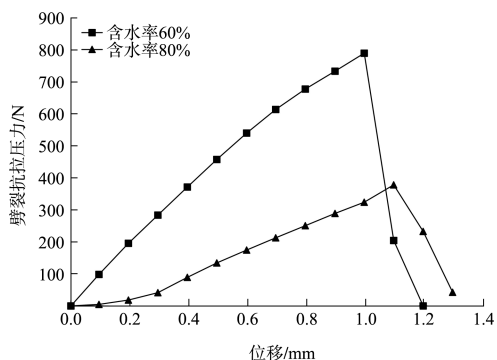


图3 固化土劈裂抗拉力-位移曲线



图4 固化土劈裂破坏面

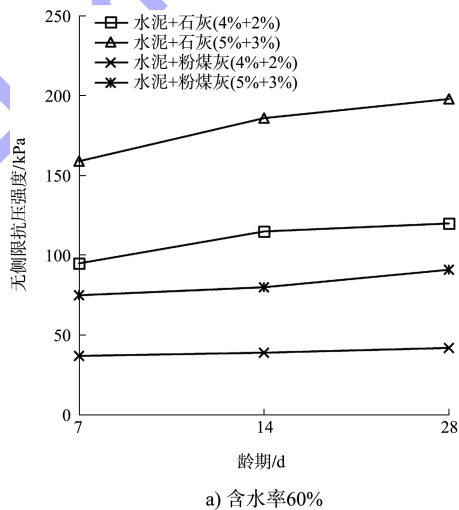
2.2 固化土抗拉强度分析

图5a)为含水率为60%时不同固化剂配合比的固化土抗拉强度。固化土抗拉强度主要取决于7 d养护龄期;随着养护龄期的增加,抗拉强度的增幅缓慢。4%水泥+2%石灰混掺固化土7 d龄期抗拉强度为95 kPa,经过28 d养护后抗拉强度为120 kPa,提升了24%;4%水泥+2%粉煤灰混掺固化土7 d龄期抗拉强度为37 kPa,经过28 d养护后抗拉强度为42 kPa,提升了14%。固化剂为5%水泥+3%石灰、5%水泥+3%粉煤灰时,龄期从7 d增至28 d后固化土的抗拉强度分别提升了27%和20%。相同的固化剂掺量和养护龄期下,水泥+石灰混掺的固化土抗拉强度是水泥+粉煤灰混掺工况的2.1~2.9倍,表明水泥+石灰的固化效果明显优于水泥+粉煤灰。

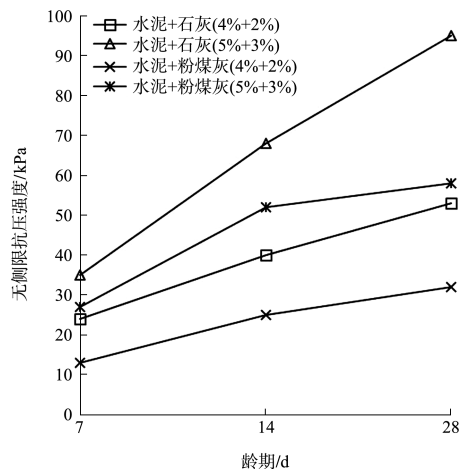
图5b)为含水率为80%时不同固化剂配合比的固化土抗拉强度。固化土的抗拉强度随着龄期的增长较为迅速。配比为4%水泥+2%水泥混掺的固化土,养护龄期7、14、28 d的抗拉强度分别为24、40、53 kPa;配比为4%水泥+2%水泥混掺的

固化土,养护龄期7、14、28 d的抗拉强度分别为13、25、32 kPa。养护龄期从7 d增至28 d后,不同配比的固化土抗拉强度增幅为120%~170%。相同的固化剂掺量和养护龄期下,采用水泥+石灰混掺的固化土抗拉强度是水泥+粉煤灰混掺工况的1.3~1.8倍,再次表明水泥+石灰是海相软土的适宜固化剂。

随着养护龄期的增长,80%初始含水率的固化土抗拉强度增速高于含水率为60%的工况,但其抗拉强度远远小于60%含水率的固化土。养护龄期为7、28 d时,80%含水率固化土的抗拉强度分别为60%含水率固化土抗拉强度的25%~36%和44%~76%。很明显,初始含水率是影响固化土抗拉强度的重要因素。固化土的初始含水率越高,固化土的抗拉强度越低,尤其是固化土的早期强度。



a) 含水率60%



b) 含水率80%

图5 不同含水率情况下养护龄期对固化土抗拉强度的影响

图 6 为不同固化剂总掺量下固化土的抗拉强度。固化剂掺量越大,水泥水化反应生成的水化硅酸钙凝胶越多,固化土的抗拉强度便越高。水泥和石灰的总掺量增加 2% 后,初始含水率为 60% 和 80% 固化土的抗拉强度增幅分别为 62%~67% 和 46%~79%。固化剂为水泥和粉煤灰时,固化剂总掺量增加 2% 后 60% 含水率的固化土抗拉强度增幅为 103%~117%; 80% 含水率的固化土抗拉强度增幅为 82%~108%。相较于水泥+石灰,当固化剂总掺量变化时,水泥+粉煤灰的配比强度变化更明显,但是强度一直低于水泥+石灰的配比。

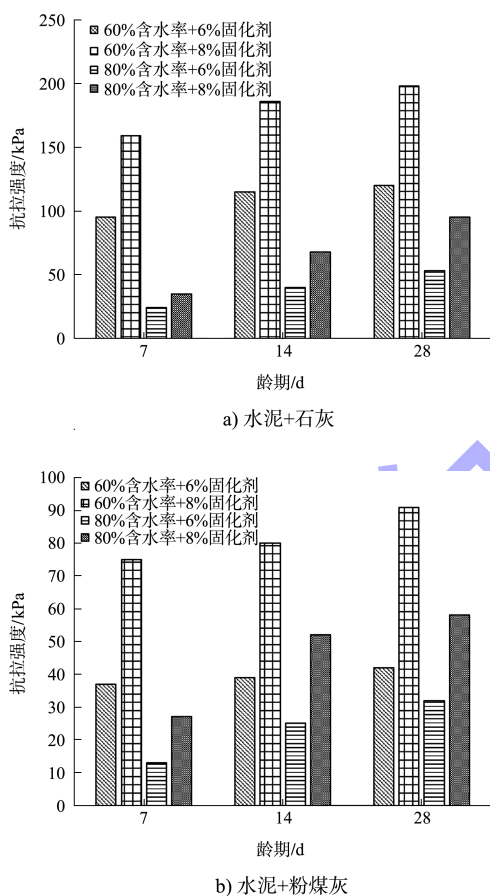


图 6 固化剂掺量对抗拉强度的影响

2.3 固化土抗拉强度的影响因素相关性分析

根据试验结果可知,不同种类固化剂(水泥、石灰、粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期等因素对固化海相软土的抗拉强度的发展都存在一定的影响,但各因素对强度增长的影响程度难以明确。因此,基于灰色关联理论探讨各因素对其抗拉强度的影响程度。

不同种类固化剂(水泥、石灰、粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期构成 6 个参考数列 $X_{1\sim6}$, 固化海相软土的抗拉强度为比较数列 Y 。由于系统中各因素的物理意义不同,导致数据的量纲不相同,为便于比较,采用初值化进行无量纲化的数据处理。按式(3)计算出 Y 与 $X_{1\sim6}$ 在 i 点的关联系数 $\gamma_j(k)$, 计算结果如图 7 所示。

$$\gamma_j(k) = \frac{\min_j \min_k |y(i) - x_j(i)| + \xi \max_j \max_k |y(i) - x_j(i)|}{|y(i) - x_j(i)| + \xi \max_j \max_k |y(i) - x_j(i)|} \quad (3)$$

式中: ξ 为分辨系数,通常 $\xi=0.5$ [15]。

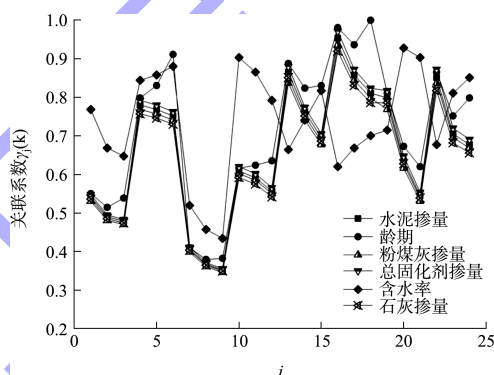


图 7 Y 与 $X_{1\sim6}$ 在 i 点的关联系数 $\gamma_j(k)$

每个 i 点对应一个工况,在 i 点关联系数的大小反映该工况下各影响因素与抗拉强度的关联性,数值越大,证明关联性越强,反之越弱。

按式(4)分别计算比较数列 Y 与参考数列 $X_{1\sim6}$ 关联系数的均值 γ_j , 即为两数列的关联度。

$$\gamma_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_j(k) \quad (4)$$

关联度是各工况下关联系数的均值,其大小可以综合反映各影响因素与抗拉强度的关联性。由式(4)计算可得 3 种固化剂(水泥、石灰和粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期对于抗拉强度的关联度并将其按降序排列,见表 2。根据相关性理论, $\xi=0.5$ 时,计算结果 $\gamma_j > 0.6$ 则表示参考数列与比较数列具有良好的相关性。各评价项的关联度均大于 0.6,表明 3 种固化剂(水泥、石灰和粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期与固化海相软土的抗拉强度之间存在良好的相关性。影响最明显的是含水率和养护龄期;

固化剂掺量中水泥掺量的影响最大, 粉煤灰掺量的关联度大于石灰掺量的关联度。因此, 实际工程中通过降低土体初始含水率, 保证充足的养护时间以及选择合适的水泥掺量可以提高固化土的抗拉强度, 保证施工质量。

表 2 不同影响因素关联系数计算结果

评价项	γ_j	排名
含水率	0.739	1
龄期	0.716	2
总固化剂掺量	0.672	3
水泥掺量	0.661	4
粉煤灰掺量	0.648	5
石灰掺量	0.646	6

3 海相固化土抗拉强度的预测方法

基于上述试验结果, 固化剂(水泥、石灰、粉煤灰)掺量、含水率和养护龄期对海相固化土抗拉强度的变化影响显著。实际工程中, 需要开展大量的试验来获取不同掺量和含水率下固化土的抗拉强度, 工作量巨大。因此, 本文基于人工神经网络的机器学习方法, 从少量多维数据中提取数据的非线性特征, 提出海相固化土抗拉强度的快速准确预测方法。利用人工神经网络算法, 将海相固化土的抗拉强度看作一个多维拟合函数 $f(X)$, 其中 X 是一个五维变量 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, 分别代表水泥掺量、石灰掺量、粉煤灰掺量、含水率和养护龄期。海相固化软土抗拉强度的预测值 y 为:

$$y=f(X) \quad (X \in R^5) \quad (5)$$

进行固化海相软土抗拉强度预测之前, 需要根据现有的测量数据对模型进行训练, 确定各个网络节点对应的权重系数。图 8 为人工神经网络结构, 总共有 4 层, 包括输入层、2 个隐藏层和 1 个输出层。Park 和 Sandberg^[16]指出具有 3 层结构的神经网络可以用于任何函数的拟合和优化。输入层的 5 个参数分别对应 5 个变量。隐藏层 1、2 分别采用了 32 和 16 个神经节点, 对应的激活函数是线性整流函数(ReLU)和逻辑函数(Sigmoid)。采用 ReLU 激活函数是为了增加非线性, 防止神经网络的系数在正向传递过程中的梯度衰减问题; 输出层采用 Sigmoid 函数, 确保输出变量位于 0~1。数据拟合常用的损失函数为均方根误差, 训练采

用的是反向传播网络算法。各个输入变量的阈值变化很大, 数据训练之前需要进行预处理, 即对输入数据进行标准化处理, 确保所有输入变量的均值为 0, 标准差为 1。海相固化土的抗拉强度作为预测目标值, 也需进行标准化处理, 确保处理后的数值位于 0~1。

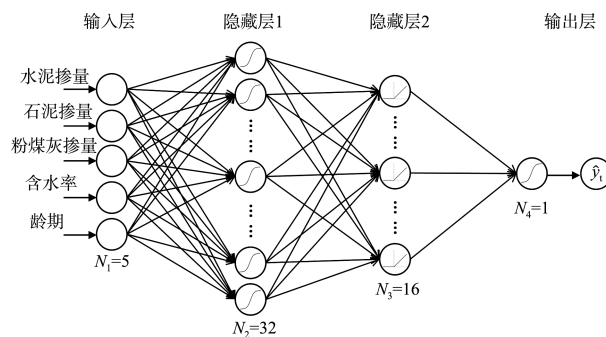


图 8 人工神经网络结构

利用所有测量的固化土抗拉强度验证模型的预测能力, 总共进行 24 次训练。每次训练时采用留一法交叉法验证模型的预测能力, 即每次交叉验证将一组数据作为验证数据, 剩余 23 组数据训练图 8 所示的人工神经网络结构。将预测得到的抗拉强度 \bar{y} 同测量值 y 进行对比, 采用平均绝对百分比误差 E 进行定量比较。

$$E = \sum_{i=1}^{24} \frac{|y_i - \bar{y}_i|}{y_i} \quad (6)$$

图 9 为留一法交叉验证的抗拉强度预测值和测量值对比。可以看到预测值和测量值基本集中在 45°等分线(虚线)附近, 由式(6)计算得到的平均绝对百分比误差为 20%, 表明神经网络结构具有很强的预测能力。同时随着训练数据的增加, 模型的预测能力会逐渐增强。

利用人工神经网络结构预测不同固化剂(水泥、石灰、粉煤灰)掺量、龄期和含水量组合的海相固化软土的抗拉强度。工程中重点关注的是养护 28 d 后固化土的强度特性, 且水泥+石灰的固化效果远强于水泥+粉煤灰。限于篇幅, 仅给出 28 d 龄期下固化土抗拉强度随水泥+石灰掺量和含水率的变化规律, 见图 10。当含水率从 60% 升高到 80%、掺入 5% 水泥+3% 石灰的固化土抗拉强度从 174.1 kPa 降低至 93.6 kPa, 降幅达到 46.2%。随

着石灰的掺量从 3.0% 降低至 2.5% 和 2.0%，海相固化软土的抗拉强度降幅分别变为 52.4% 和 56.8%；石灰的掺量每减少 0.5%，海相固化软土的抗拉强度额外减少约 5%。石灰掺量保持不变时，水泥的掺量从 5.0% 减少至 4.5% 和 4.0%，海相固化软土的抗拉强度降幅分别为 60.1% 和 65.7%；水泥的掺量每减少 0.5%，海相固化软土的抗拉强度降幅额外增加 13.9% 和 5.6%。可以看出，水泥掺量的变化对海相固化软土抗拉强度的影响大于石灰掺量的变化，同时也验证了表 2 灰度分析的结果。随着含水率和固化剂掺量的变化，固化土抗拉强度呈现出高度的非线性特性。利用室内试验获取的有限数据，采用此方法可预测各种含水率和固化剂掺量下的固化土抗拉强度。

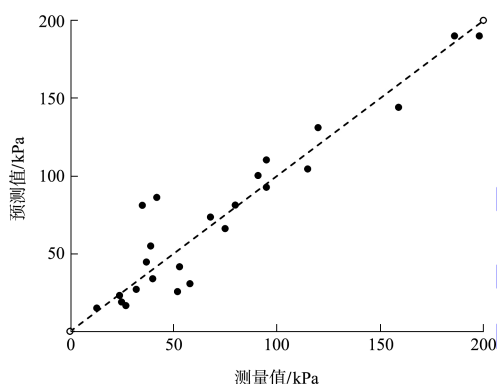


图 9 留一法交叉验证的预测值和测量值对比

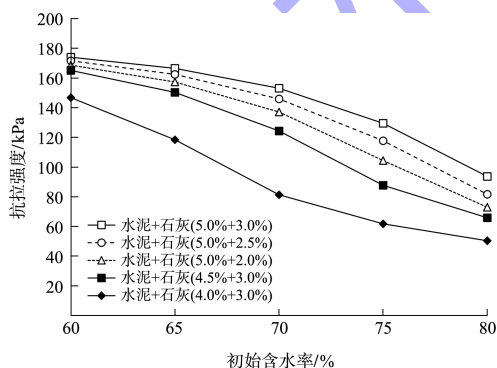


图 10 基于人工神经网络的抗拉强度值预测曲线

4 结论

1) 基于固化土劈裂抗拉强度，水泥+石灰混掺的固化效果明显优于水泥+粉煤灰混掺。水泥+石灰混掺的固化土各龄期抗拉强度均比水泥+粉煤灰混掺的工况高，前者是后者的 1.3~2.9 倍。

2) 海相软土的初始含水率为 60% 时，固化土抗拉强度随龄期增长缓慢，养护 28 d 后抗拉强度提升了 14%~27%。初始含水率增至 80% 后，固化土抗拉强度随龄期增长较快，养护 28 d 后抗拉强度提升了 120%~170%。

3) 相同固化剂掺量下，海相软土初始含水率对固化土抗拉强度影响显著。养护龄期为 7 d 和 28 d 时，80% 含水率固化土的抗拉强度分别为 60% 含水率固化土抗拉强度的 25%~36% 和 44%~76%。

4) 基于灰色关联理论，影响固化海相软土抗拉强度的因素依次为初始含水率、养护龄期、固化剂掺量。固化剂掺量中水泥掺量的影响最大，粉煤灰掺量次之，石灰掺量最小。实际工程中通过降低土体初始含水率、保证充足的养护时间以及选择合适的固化剂掺量能提高固化土的抗拉强度，满足港区堆场对固化土抗拉强度的要求。

5) 基于人工神经网络的机器学习方法，提出海相固化软土抗拉强度的预测方法，此方法能快速且准确预测不同初始含水率和固化剂掺量下固化土抗拉强度，为海相软土固化剂配比提供指导。

参考文献：

- [1] 章定文, 刘松玉, 于新豹. 连云港海相软土特性研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(4): 71-74.
- [2] 邓永锋, 吴燕开, 刘松玉, 等. 连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 29-33.
- [3] 刘勇文, 胡畔, 马力. 利用粉煤灰-矿渣地聚合物的软基淤泥改良[J]. 水运工程, 2022(4): 30-36.
- [4] 徐日庆, 李俊虎, 蔡承晟, 等. 用固化剂 GX08 加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1528-1533, 1554.
- [5] 邱浩. 新型固化剂加固海相软土的机理及影响因素研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [6] 刘雄. 宁波海相软土固化试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [7] 崔宏环, 刘卫涛, 张立群. 土凝岩新型固化剂稳定路基粉质黏土的干缩性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 320-328.

(下转第 225 页)