

# 生土基材料抗压强度取值方法研究

芦白茹<sup>1,2</sup>, 张坤<sup>3</sup>, 朱晶<sup>1</sup>, 花梦磊<sup>1</sup>

(1. 西安欧亚学院 人居与环境学院, 西安 710065; 2. 城市智慧建造陕西省高校工程研究中心, 西安 710065;  
3. 西安石油大学 基建处, 西安 710065)

**摘要:** 通过对标准生土立方体试件进行抗压强度试验, 研究材料破坏规律及抗压强度结果。以材料强度结果数据为基础, 引入统计理论和检验理论, 构建以 Gauss 分布和 Weibull 概率分布的数据模型。通过对模型参数的拟合, 分析概率函数、密度函数, 比较 Weibull 分布模型和 Gauss 分布模型的计算结果, 探究该计算方法的可行性。结果表明: 生土材料抗压强度试验破坏显示出立方体试件特有的破坏形貌, 为“沙漏型”破坏的特点。材料强度结果统计采用 Weibull 分布模型更为精确, 概率函数、密度函数与对应数据表现出较高一致性, 生土基材料强度标准值为 3.25 MPa。

**关键词:** 生土基材料; 抗压强度; Weibull 分布; 正态分布

中图分类号: TU361 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0127-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.023

## The Method of the Compressive Strength on Raw - soil Materials

LU Bairu<sup>1,2</sup>, ZHANG Kun<sup>3</sup>, ZHU Jing<sup>1</sup>, HUA Menglei<sup>1</sup>

(1. School of Human Settlements and Environment, Xi'an Eurasia University, Xi'an 710065, China;  
2. Engineering Research Center of Urban Intelligent Construction, Universities of Shaanxi Province,  
Xi'an 710065, China; 3. Postdoctoral Innovation Infrastructure Department, Xi'an  
Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Compression strength tests were conducted on 40 standard earthen cube specimens, studied the failure laws and compressive strength results of the materials. Based on the material strength result data, statistical theory and testing theory are introduced to construct a data model using Gauss distribution and Weibull probability distribution. By fitting the model parameters, analyzing the probability function and density function, comparing the calculation results of Weibull distribution model and Gauss distribution model, and exploring the feasibility of this calculation method. The results showed that the compressive strength test of the raw soil material exhibited a unique failure morphology of the cubic specimen, characterized by an hourglass shaped failure. The statistical analysis of material strength results is more accurate using the Weibull distribution model, and the probability function, density function, and corresponding data show high consistency. The standard value of

项目来源: 陕西省科技厅自然科学基金一般项目 (2202JQ-562); 陕西省大学生创新创业项目 (202412712003); 陕西省教育教  
学改革项目 (23BY178); 陕西省教育教学改革项目 (23BZ079)。

作者简介: 芦白茹 (1987—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 砌体结构和建筑材料。

收稿日期: 2023-07-31

## 研究与应用

strength for soil based materials is 3.25 MPa.

**Key words:** raw - soil materials; compressive strength; Weibull distribution; Guass distribution

### 0 引言

生土建筑是以生土基材料作为主体结构或围护结构的建筑。作为中国传统建筑的重要组成部分,它具有耗能低、热工性能好、吸音防辐射及绿色环保等优点,可作为“绿色建筑”的典范<sup>[1-2]</sup>。但是,在进行生土房屋结构设计之前,合理地选取生土基材料抗压强度标准值具有重要意义。

近年来,对材料标准值研究而言,国内外学者进行大量研究,其中混凝土、砂浆材料较多,生土材料较少,美国新墨西哥州政府制定实施了(《New Mexico Adobe and Rammed Earth Building - Code》),以及新西兰已出台三项关于生土建筑的建筑和设计标准,针对生土建筑工程的设计和材料标准 NZS4297、建筑工艺标准 NZS4298 和生土建筑构造设计标准 NZS4299 对承重生土墙土质进行了提取和选择,并对生土构件的制作要求和生土材料技术指标都做了详细规定<sup>[3-5]</sup>。“国际生土建筑研究和应用中心”编写《Earth Construction: A Comprehensive Guide》(《生土建造:综合指导》)和《Batirenterre》(《生土建造》)<sup>[6]</sup>中对不同改性生土基土坯材料的进行提取和选择、制作、养护做部分规定。

兰官奇等<sup>[7]</sup>运用神经网络系统对生土基砌体抗压强度进行计算,修正了现有砌体的计算方程,并对生土基材料有较好的适用性; Steve<sup>[8]</sup>对大量改性土做稳定性试验,试验中以 2 MPa 做为生土材料抗压强度标准值,以此为基础对添加水泥和石灰的土壤以及天然土的线性收缩等做量化;刘刚等<sup>[9]</sup>针对土坯的抗压强度和本构方程开展了研究,通过线性回归方法建立了土坯的本构方程及抗压强度标准值计算方法; Rogirs 等<sup>[10]</sup>对大量不同尺寸的土坯块材进行压缩试验,结果显示土料固有的不均匀性和随意性对土坯力学性能的影响,建立土坯材料抗压强度标准值计算方法;张福鹏等<sup>[11]</sup>采用系数法对新水泥标准混凝土强度的确定做出详细的计算模型,拟

用标准差作为系数求得强度代表值;Liu 等<sup>[12-14]</sup>对不同型号、不同规格、不同尺寸、不同强度的钢材进行拉拔试验、耐久性试验,研究数据的离散性、统计特征、分布特征及材料强度取值方法等。

综上所述,在材料强度试验中,采集的抗压强度数据作为随机变量,通常满足独立分布色的假设。准确表征其概率分布特性是进行可靠统计推断的依据。基于此,通过标准试验方法对生土基立方体抗压强度 40 个数据做统计分析,引入 Guass 及 Weibull 分布函数,计算试验数据函数分布及统计相关性,得到合理描述生土基材料抗压强度的分布函数。确定生土基立方体材料强度标准值的取值方法,为类似试验方法提供依据和参考。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 原材料

试验所用土样为西安市长安区的黄土,含水率为 18.2%,最大干密度为 2.04 g/cm<sup>3</sup>,塑限 15%,液限 26%,塑性指数 11。试验前将过筛的土拌和至最优含水率,制作 40 个 100 mm 的立方体试件。

#### 1.2 试验步骤

将成型试件放置在标准养护室养护,温度 25 ~ 30 ℃、湿度 55% ~ 60%,试件养护 28 d 后分 4 组(每组 10 个)。试验采用 MTS - 500 伺服作动器,进行抗压强度试验,加载速率控制在 1 ~ 3 mm/min,以试件荷载达到峰值后的 30% 为结束条件。

加载的初始阶段,试件表面并未立即产生裂缝,随着荷载增加,试件角部开裂并沿试件受力方向发展,开裂荷载为峰值荷载的 60% ~ 70%;随着试验继续加载至峰值荷载,试件表面出现较多竖向贯穿裂缝并且试件中部表面发生胀裂,部分表皮生土有脱落的现象;当荷载继续增大,裂缝继续发展,直至试件完全破坏,破坏形态表现为典型“沙漏型”。过程如图 1 所示,结果见表 1。



(a) 试件加载

(b) 试件开裂

(c) 试件破坏

(d) 完全破坏

图1 生土基材料立方体抗压强度试验现象

Fig. 1 Phenomenon of cubic compressive strength test of raw soil-based materials

表1 生土基材料立方体抗压强度结果

Table 1 Results of cubic compressive strength of raw soil-based materials

编组	峰值荷载/kN					抗压强度/MPa					平均值/MPa	标准差	变异系数
1	25.27	27.24	27.83	30.12	30.21	2.53	2.72	2.78	3.01	3.02	3.594	0.432	0.12
	31.19	31.68	31.84	31.77	33.75	3.12	3.17	3.18	3.18	3.38			
2	33.92	34.34	34.47	34.81	35.19	3.39	3.43	3.45	3.48	3.52			
	35.61	36.11	36.07	36.79	36.77	3.56	3.61	3.61	3.68	3.68			
3	36.88	36.91	37.12	37.37	37.68	3.69	3.69	3.71	3.74	3.77			
	38.13	38.29	38.41	38.37	38.47	3.81	3.83	3.84	3.84	3.85			
4	38.58	38.81	38.82	39.76	40.00	3.86	3.88	3.88	3.98	4.00			
	40.40	41.22	41.43	42.44	45.01	4.04	4.12	4.14	4.24	4.50			

## 2 数据初步统计分析

### 2.1 数据统计分析

表1中40个抗压强度样本,记为 $X_i$ ,其中 $X_{\max}=4.5$ , $X_{\min}=2.53$ , $\bar{X}_i=3.594$ ,极差 $R_i=1.97$ ,按照极差分配原则,将 $R_i$ 进行均分,记为 $R_i/11=0.179$ ,故样本被分为11个区间,根据数据出现的频率求出概率值并绘制概率直方图,计算结果见表2,直方图如图2所示。

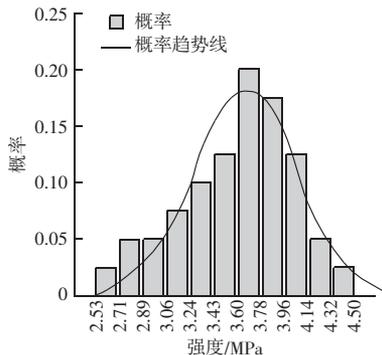


图2 抗压强度统计概率直方图

Fig. 2 Histogram of statistical probabilities

由图2可清晰得到各强度区间概率分布情况,概率分布趋势表现为随强度的增加先增后减,呈单峰形态,峰值概率为 $8/40$ ,强度区间为 $[3.61, 3.78]$ ;  $[2.53, 2.71]$ ,  $[4.32, 4.50]$ 区间内分布概率小,仅为 $1/40$ 。

依据概率密度的性质可知,若 $f(x)$ 在 $X$ 点处连续,则有

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\{x < X \leq x + \Delta x\}}{\Delta x} \quad (2)$$

如果 $\Delta x \rightarrow 0$ ,不计高阶无穷小,则概率密度计算方法为:

$$f(x) = \frac{P\{x < X \leq x + \Delta x\}}{\Delta x} \quad (3)$$

$\Delta x$ 为直方图的组距, $P\{x < X \leq x + \Delta x\}$ 为直方图在此区间内概率。根据图2, $\Delta x = R_i/11 = 0.179$ ,对图2采用Matlab数值计算软件进行归一化处理,以 $P_i/\Delta x$ 作为此区间的概率密度,计算结果见表2。

## 研究与应用

表2 生土抗压强度试验数据统计频率及概率密度表  
Table 2 Test intensity probability density calculation table

序号	强度区间	出现频率 $P_i$	概率密度 $f(x_i)$
1	[2.53, 2.71]	1/40	0.139 7
2	[2.71, 2.89]	2/40	0.279 3
3	[2.89, 3.06]	2/40	0.279 3
4	[3.06, 3.24]	3/40	0.419 0
5	[3.24, 3.43]	4/40	0.055 9
6	[3.43, 3.61]	5/40	0.698 3
7	[3.61, 3.78]	8/40	1.117 3
8	[3.78, 3.96]	7/40	0.977 7
9	[3.96, 4.14]	5/40	0.698 3
10	[4.14, 4.32]	2/40	0.279 3
11	[4.32, 4.50]	1/40	0.139 7

结合  $X_i$  中强度值结果及表 2 中区间点可以得出试验数据的概率密度分布点, 为使绘制概率密度曲线平滑, 运用 Matlab 数值计算软件对表 2 概率密度数据点内插值。

## 2.2 分布函数的检验

峰值检验法主要来检验一组数据是否可以采用假设分布曲线。设  $n$  个样本量为  $x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$ , 置信水平为  $\alpha$ , 记

$$s_1 = \left( \frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$s_2 = \left( \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$t_2 = 3 - \frac{6}{n+1} \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

设  $A_i$  为  $i$  阶样本矩  $1 \leq i \leq 4$ ,  $B_j$  为  $j$  阶样本矩  $2 \leq j \leq 4$ , 为方便计算,  $A_i$  与  $B_j$  关系如下:

$$A_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^i \quad (8)$$

$$B_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = A_2 - A_1^2 \quad (9)$$

$$B_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 = A_3 - 3A_1A_2 + 2A_1^3 \quad (10)$$

$$B_4 = A_4 - 4A_1A_3 + 6A_1^2A_2 - 3A_1^4 \quad (11)$$

设样本偏度值为  $g_1$ , 样本峰度为  $g_2$ ,  $\varphi(x)$  是  $N(0, 1)$  分部函数, 则

$$g_1 = \frac{B_3}{B_2^{3/2}}, g_2 = \frac{B_4}{B_2^2} \quad (12)$$

记  $\varphi(x) = 1 - \frac{\alpha}{4}$  所对应的值为  $\mu_0$ , 令:

$$\mu_1 = \frac{g_1}{s_1}, \mu_2 = \frac{g_2 - t_2}{s_2} \quad (13)$$

如果用正态分布来拟合, 必须满足不等式  $|\mu_1| < \mu_0, |\mu_2| < \mu_0$  成立。

## 2.3 分布函数相关系数

采用皮尔逊相关系数研究变量之间相关关系密切程度。按积差方法计算相关系数, 同样以两变量与各自平均值的离差为基础, 通过两个离差相乘来反映两变量之间相关程度, 着重研究线性的单相关系数。假设  $X, Y$  两种统计量, 相关系数计算公式为:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (14)$$

其中协方差

$$\begin{aligned} \text{Cov}(X, Y) &= E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} \\ &= E(XY) - E(X)E(Y) \end{aligned} \quad (15)$$

## 3 Gauss 分布统计强度分析

设  $n$  个生土试件抗压强度的测定值为  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 将这些数据看做生土基材料抗压强度的一个样本, 样本的均值为:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad 0 < i \leq n \quad (16)$$

样本方差为:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 \right) \quad (17)$$

则它正态分布 Gauss 的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(X-\mu)^2}{2s^2} \right] \quad X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (18)$$

式中:  $\mu$  为待测生土抗压强度平均值,  $\sigma^2$  为  $\mu$  的方差。  $\sigma^2$  是  $s^2$  的无偏估计, 则试验样本满足:

$$\frac{(\bar{X} - \mu)}{(\sigma/\sqrt{n})} \sim N(0, 1) \quad (19)$$

依据数据样本  $\mu = 3.594$ ,  $\sigma^2 = 0.432$  带入式 19 中, 概率分布函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 0.432}} e^{-\frac{(x-3.594)^2}{2 \cdot (0.432)}} \quad -\infty < x < +\infty$$

参照 2.2 对分布函数的假设检验, 假设  $H_0: X$

服从正态分布,  $H_1: X$  不服从正态分布, 则:  $s_1 = 0.3596, s_2 = 0.6442, t_2 = 2.8536, A_1 = 3.594, A_2 = 13.1048, A_3 = 48.3762, A_4 = 180.5992$ 。进一步计算可得:  $B_2 = 0.1826, B_3 = -0.0449, B_4 = 0.1053, g_1 = -0.5767, g_2 = 3.1594, \mu_1 = -1.6035, \mu_2 = 0.4748$ 。

表中  $\varphi(x) = 0.9875$  对应的  $\mu_0$  在  $[2.24, 2.25]$  之间, 显然满足不等式  $|\mu_1| < \mu_0$  和  $|\mu_2| < \mu_0$ , 分布接受正态分布。

将表 2 生土强度区间进行正态分布标准化, 设随

机变量  $U = \frac{X - \mu}{\sigma^2}$ ,  $\mu$  与  $\sigma^2$  分别为强度数据期望和方差, 概率密度为

$$\phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) \quad (21)$$

通过计算并查标准正态分布表得出上侧分位数及下侧分位数概率, 并求在此分布区间内概率值, 计算结果见表 3。

表 3 正态分布生土抗压强度概率计算表

Table 3 Calculation table of probability of compressive strength of raw soil with normal distribution

序号	强度区间	上侧分位数	下侧分位数	上侧概率差	下侧概率差	概率差
1	[2.53, 2.71]	-2.047	-2.46	0.9943	0.9793	(0.015) 0.021
2	[2.71, 2.89]	-1.633	-2.047	0.9793	0.9484	0.0309
3	[2.89, 3.06]	-1.219	-1.633	0.9484	0.8888	0.0596
4	[3.06, 3.24]	-0.805	-1.219	0.8888	0.7910	0.0978
5	[3.24, 3.43]	-0.391	-0.805	0.7910	0.6517	0.1393
6	[3.43, 3.61]	0.023	-0.391	0.5080	0.3483	0.1597
7	[3.61, 3.78]	0.436	0.023	0.6700	0.5080	0.1680
8	[3.78, 3.96]	0.850	0.436	0.8023	0.6700	0.1323
9	[3.96, 4.14]	1.260	0.850	0.8962	0.8023	0.0939
10	[4.14, 4.32]	1.678	1.260	0.9525	0.8962	0.0563
11	[4.32, 4.50]	2.092	1.678	0.9817	0.9525	0.0292

注: 1. 上下侧分位数除 6 组区间为双侧情形外, 其余均为单侧情形; 2. 单侧情形概率计算规则:  $P = P_{\text{上}} - P_{\text{下}}$ ; 3. 双侧情形概率计算规则:  $P = P_{\text{上}} - (1 - P_{\text{下}})$ 。

参照表 2 和表 3, 分别将分布函数计算概率与试验数据概率参照式 (14) ~ (15) 进行相关系数计算, 计算结果见表 4。采用 Matlab 数值分析软件绘制曲线, 如图 3 所示。

由表 4 可得相关系数为 0.8967, 表明生土抗压强度试验数据可以用正态分布描述, 生土抗压强度标准值若按正态分布计算, 有两个特征数, 平均值  $f_0$  和标准差  $\sigma$ 。国际标准化组织颁布的《抗压强度分级标准》规定正态分布 5% 分位值做为抗压强度标准值  $f_s$ , 所以抗压强度标准值为  $f_s = f_0 - 1.645\sigma$ , 强度等级就代表了正态分布  $N(f_0, \sigma)$ 。

表 4 生土抗压强度正态分布与数据概率对比计算表

Table 4 Normal distribution of compressive strength of raw soil compared with data probability calculation table

类型	概率区间										
	[2.53,2.71]	[2.71,2.89]	[2.89,3.06]	[3.06,3.24]	[3.24,3.43]	[3.43,3.61]	[3.61,3.78]	[3.78,3.96]	[3.96,4.14]	[4.14,4.32]	[4.32,4.50]
分布概率	0.0210	0.0309	0.0596	0.0978	0.1393	0.1597	0.1680	0.1323	0.0939	0.0563	0.0292
数据概率	0.0250	0.0500	0.0500	0.0750	0.1000	0.1250	0.2000	0.1750	0.1250	0.0500	0.0250

表 1 试验 40 个样本数据计算生土基材料的强度标准值, 假设数据结果  $X$  服从正态分布, 即  $X \sim N(f_0, \sigma)$  其中  $f_0 = 3.594 \text{ MPa}, \sigma = 0.432$ , 根据公式

$f_s = f_0 - 1.645\sigma = 2.88$ , 故认为生土材料抗压强度标准值为 2.88 MPa。

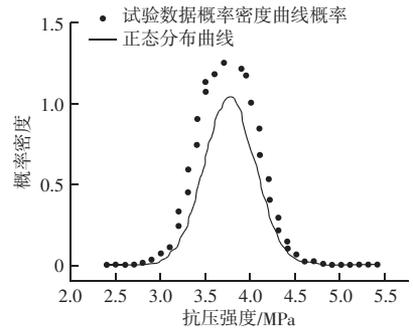


图 3 正态分布与数据概率密度拟合曲线图  
Fig. 3 Normal distribution and data probability density fitting curve graph

## 研究与应用

### 4 Weibull 分布统计强度分析

#### 4.1 Weibull 分布估计理论

根据图 2 直方图分布趋势引入 Weibull 分布函数。Weibull 分布适用于离散材料试验数据, 生土材料本身离散且试验数据结果具有一定的随机性, 研究因素对试验结果影响多采用包含指数项的分布函数, 并且大部分离散材料的强度均分以 Weibull 分布。Weibull 分布函数为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - a_0}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (22)$$

其中  $\alpha > 0$  为形状参数 (又称 Weibull 模数), 它决定了函数分布的基本形状, 当  $0 < \alpha < 1$  时, 函数近似变为指数分布; 当  $\alpha > 1$  时, 函数近似正态分布。并且 Weibull 模数  $\alpha$  是数据分散性指标,  $\alpha$  值越大分布越集中。对于材料强度的分布, 它是强度数据分散性的一个量度,  $\alpha$  值越大, 强度分布越集中, 材料性能重复性越好。 $\beta$  为尺度参数, 表征函数分布的范围, 对函数曲线范围起到放大缩小的作用, 类似正态分布的中线点。 $0 \leq a_0 \leq x_{\min}$  为位置参数, 表示分布的起始点, Weibull 分布起始点为 0, 除非考虑寿命计算, 赋予初始使用时间; 其次考虑数据为一维分布, 为计算简便, 假设  $a_0 = 0$ 。因此, 材料强度的分布简化为二参数 Weibull 分布, 并采用 Weibull 分布参数方法中的极大似然估计方法 (MLE) 拟合, 方法如下:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (23)$$

Weibull 分布的似然函数为:

$$\ln L = \sum \ln f(x_i, \alpha, \beta) =$$

$$\sum \left[ \ln \alpha - \ln \beta + (\alpha - 1) \ln x - (\alpha - 1) \ln \beta - \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \right] \quad (24)$$

参数  $\alpha$ 、 $\beta$  最大似然估计方程组为:

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \frac{n}{\alpha} - n \ln \beta + \sum \ln x_i - \frac{1}{\beta^\alpha} \sum x_i^\alpha [\ln x_i - \ln \beta] = 0 \\ \phi_2 = \frac{\partial \ln L}{\partial \beta} = -\frac{n\alpha}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta^{\alpha+1}} \sum x_i^\alpha = 0 \end{cases} \quad (25)$$

采用 Newton 迭代法求解  $\alpha$ 、 $\beta$  两参数方程组, 得出  $\alpha$ 、 $\beta$  的极大似然估计值为:

$$\begin{cases} \beta = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\alpha \right)^{1/\alpha} \\ \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i^\alpha \ln x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^\alpha} = 0 \end{cases} \quad (26)$$

用 Matlab 计算软件进行 Newton 迭代计算, 可以得出  $\alpha$ 、 $\beta$  的极大似然估计值  $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ ,  $\alpha$  的无偏极大似然估计值  $\alpha^*$  由下式计算:

$$\alpha^* = B(n) \cdot \hat{\alpha} \quad (27)$$

式中:  $B(n)$  为调偏系数。 $B(n)$  用经验公式计算:

$$B(n) = 1 - \frac{1.6}{n^{1.05}} + \frac{6.34 \times 10^6}{n^{11.8}} + V(n) \quad (28)$$

其中:

$$V(n) = \begin{cases} 0.014/n & 8 \leq n \leq 18 \\ 0 & n < 8 \end{cases} \quad (29)$$

#### 4.2 Weibull 分布估计

对表 1 的抗压强度结果进行 Weibull 参数估计。

将  $X_i$  值带入式 (26) ~ (29), 可得  $\hat{\alpha} = 10.0125$ ,  $\alpha^* = 9.6795$ ,  $\hat{\beta} = 3.77$ , 从而得到概率分布函数及密度函数为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{3.77}\right)^{9.6795}\right] \quad (30)$$

$$f(x) = \frac{9.6795}{3.77} \left(\frac{x}{3.77}\right)^{9.6795} \exp\left[-\left(\frac{x}{3.77}\right)^{9.6795}\right] \quad (31)$$

同理, 采用 2.2 假设检验发现 Weibull 分布可以

用来描述生土抗压强度分布。表 5 为 Weibull 分布生土抗压强度概率计算表，并与数据概率进行比较，计算统计分布相关系数，结果见表 6。

绘制生土基立方体抗压强度 Weibull 分布曲线概率密度图，如图 4 所示。

由表 6 可知 Weibull 分布函数概率与数据概率相关系数为 0.973 0，表明生土抗压强度数据可以用 Weibull 分布描述。生土基强度 Weibull 分布函数的保证率取为 95%，故令  $F(x) = 0.05$ ，求得抗压强度标准值，求得生土基抗压强度标准值为  $f_s = 3.25$ ，生土材料立方体强度标准值为 3.25 MPa。

表 5 Weibull 分布生土抗压强度概率计算表  
Table 5 Weibull distribution compressive strength probability calculation table for raw soils

序号	强度区间	上侧概率	下侧概率	概率
1	[2.53, 2.71]	0.039	0.020	0.019
2	[2.71, 2.89]	0.073	0.039	0.033
3	[2.89, 3.06]	0.126	0.073	0.053
4	[3.06, 3.24]	0.209	0.126	0.082
5	[3.24, 3.43]	0.326	0.209	0.117
6	[3.43, 3.61]	0.476	0.326	0.150
7	[3.61, 3.78]	0.644	0.476	0.193
8	[3.78, 3.96]	0.802	0.644	0.157
9	[3.96, 4.14]	0.916	0.802	0.114
10	[4.14, 4.32]	0.976	0.916	0.059
11	[4.32, 4.50]	0.996	0.976	0.025

表 6 生土抗压强度 Weibull 分布与数据概率对比计算表

Table 6 Weibull distribution of compressive strength of raw soil compared with data probability calculation table

类型	概率区间										
	[2.53,2.71]	[2.71,2.89]	[2.89,3.06]	[3.06,3.24]	[3.24,3.43]	[3.43,3.61]	[3.61,3.78]	[3.78,3.96]	[3.96,4.14]	[4.14,4.32]	[4.32,4.5]
分布概率	0.019	0.033	0.053	0.082	0.117	0.150	0.193	0.157	0.114	0.059	0.019
数据概率	0.025	0.050	0.050	0.075	0.100	0.125	0.200	0.175	0.125	0.050	0.025

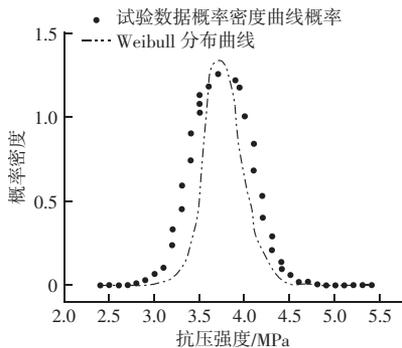


图 4 Weibull 分布与数据概率密度拟合曲线

Fig. 4 Weibull distribution and data probability density fitting curve

## 5 生土基立方体材料抗压强度标准值

绘制正态分布、Weibull 分布的相关系数曲线如图 5 所示，确定抗压强度取值方法。

由图 5 可知，采用不同分布形式表示生土基立方体试件抗压强度试验结果，其分布曲线平滑，趋势基本相同。Weibull 分布函数概率相关系数为 0.973 0，正态分布函数概率相关系数为 0.896 7，说明两种分布函数均可表示试验结果的概率密度分布，但 Weibull 分布更接近实际试验测量结果。在相同试件保证率下，正态分布函数的强度标准值较小，表明试验数据采用正态分布函数统计结果较保守，例如：采用 95% 保证率时，正态分布函数对应强度为 2.88

MPa，而 Weibull 分布函数对应强度为 3.25 MPa。Weibull 分布数据较正态分布更加集中，材料强度的重复性高，正态分布函数的分散性强于 Weibull 分布函数。

综上所述，如果样本数量大，采用 Weibull 分布函数表示的生土基立方体抗压强度分布特性比正态分布函数会更为精确，得出的生土抗压强度标准值更加科学合理。

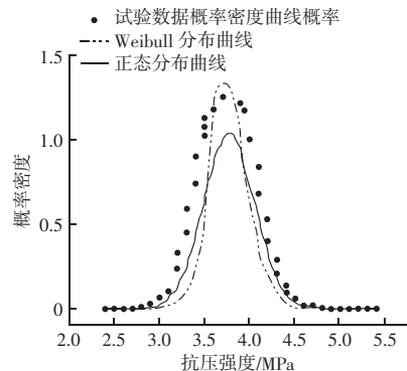


图 5 正态分布、Weibull 分布与数据拟合概率密度曲线

Fig. 5 Normal distribution, Weibull distribution and fitting probability density curves to data

## 6 结论

通过以上内容，得到以下结论：

(1) 生土基体抗压强度在试验结果均服从 Weibull 分布和正态分布，但试验样本数量较大时，

## 研究与应用

Weibull 分布能更贴近试验结果,可以得到材料强度极限值。

(2) 采用 Weibull 分布和 Guass 分布,通过对试验结果的统计进行分析,建立两种统计分布的计算方法,检验方法及相关性,分别得出相应的统计概率分布函数和密度函数。

(3) 通过数据的拟合,建立生土基材料标准强度值取值方法,采用 Weibull 分布函数保证率取 95%,定义生土基材料抗压强度为 3.25 MPa。为材料标准值选择提供依据。

## 参 考 文 献

- [1] LU B R, ZHANG K, WANG Y H, et al. Research n Compressive Tests Of Iron Tailing And Cement Modified Earth Materials From Northwest China, *Advances in Civil Engineering*, 2022, 3 (21) : 12-18.
- [2] 张坤, 邵鑫辉, 卫杨杨, 等. 掺油泥改性生土材料动态荷载下的损伤及裂缝形分特征 [J]. *西安石油大学学报 (自然科学版)*, 2024, 39 (3): 62-70.
- [3] Engineering design of earth buildings. (NZS 4297). [S]. Building Code Compliance Documents B1 (VM1), B2 (AS1). 2024. NEW ZEALAND.
- [4] Materials and workmanship for earth buildings . (NZS 4298). [S]. Building Code Compliance Document E2 (AS2); 2024. NEW ZEALAND.
- [5] Earth buildings not requiring specific design. (NZS 4299). [S]. Building Code Compliance Documents B1 (AS1), B2 (AS1), E2 (AS2); 2024 . NEW ZEALAND.
- [6] P. J. Walker. *New Mexico Adobe and Rammed Earth Building - Code*, 1991.
- [7] 兰官奇, 王毅红, 张建雄, 等. 基于人工神经网络的生土基础体抗压强度预测 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*. 2020, 47 (8): 50-54.
- [8] STEVE B. Recommendations for the Selection, Stabilization, and Compaction of soil for Rammed Earth Wall Construction [J]. *Journal of Green Building*, 2010, 5 (1): 101-114.
- [9] 刘刚, 封孝信, 胡晨光, 等. 利用铁尾矿制备陶粒研究 [J]. *华北理工大学学报 (自然科学版)*, 2021, 43 (3): 49-54.
- [10] ROGIRS Illampas, IOANNIS Ioannou, DIMOSC. Charnpis. Adobe bricks under compression; Experimental investigation and derivation of stress - strain equation [J]. *Construction and building Materials*, 2014 (53): 83-90.
- [11] 张福鹏, 石磊, 柳思勉, 等. 国内生土建筑材料改性进展研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19 (10): 20-24.
- [12] LIU B, MENG H N, PAN G H, et al. Properties and microstructure of blended cement containing activated iron tailings powder [J]. *Advances in Cement Research*, 2023, 35 (6): 258-275.
- [13] LI X Y, QIAO Y J, SHAO J H, et al. Sodium - based alkali - activated foams from self - ignition coal gangue by facile microwave foaming route [J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (22): 1-7.
- [14] 韩琳, 赵忠, 盖刘飞, 等. 结合贝叶斯优化与强化学习的序贯配方设计 [J]. *计算机工程*, 2025. 5 (19): 46-49.
- [10] 韩健勇, 赵文, 李天亮, 等. 深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52 (4): 149-156.
- [11] HAN Y, XU Q, CUI Y. (2024). Deformation of existing shield tunnel adjacent to deep excavations; simulation and monitoring analysis. *Applied Sciences*, 14 (10), 4153.
- [12] LUO L, ZHENG Y, WANG R, et al. Method for predicting deformation field of deep foundation pit considering spatial effect [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2024: 1-17.
- [13] 谭鑫, 金永乐, 黄明华, 等. 桩锚支护基坑对邻近建筑影响实测及三维数值分析 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56 (7): 126-136.
- [14] PAN Y, ZHOU X, CHEN J, et al. Temporal - spatial - fusion - based risk assessment on the adjacent building during deep excavation [J]. *Information Fusion*, 2025, 114: 102653.
- [15] ZHANG L, ZHU J. Numerical simulation and field monitoring analysis for deep foundation pit construction of subway station [J]. *Structural Durability & Health Monitoring (SDHM)*, 2022, 16 (4).
- [16] YE S, ZHAO Z, WANG D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit [J]. *Underground Space*, 2021, 6 (4): 421-431.

(上接第 117 页)