

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.165



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



胶凝砂砾石材料参数概率统计和相关距离分析

徐通¹, 杨洁², 孙伟^{3a,3b}, 何蕴龙⁴, 陈贤颖^{3a}, 林沛元^{3a,3b}

(1. 广东省建设工程质量安全检测总站有限公司, 广州 5106003; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 3. 中山大学 a. 土木工程学院; b. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519082; 4. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 胶凝砂砾石坝筑坝材料具有较大的变异性, 有必要研究其参数概率分布形式。通过对 3 座大坝工程现场试验资料的分析, 基于 χ^2 或 $K-S$ 有限比较法对胶凝砂砾石材料参数进行概率统计分析, 提出参数分布的推荐概型: 采用正态分布作为密度的分布概型; 采用对数正态分布作为弹性模量的分布概型; 采用对数正态分布作为强度的分布概型; 采用 β 分布作为泊松比 ν 的分布概型。对胶凝砂砾石坝相关距离问题进行探讨, 指出其竖直向相关距离可取 0.5~2.0 m, 水平向可取 5~30 m。

关键词: 胶凝砂砾石; 非均质性; 概率统计分析; 分布概型; 相关距离

中图分类号: TV649

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)03-0116-10

Parameter probability statistics and correlation distance analysis of hardfill

XU Tong¹, YANG Jie², SUN Wei^{3a,3b}, HE Yunlong⁴, CHEN Xianying^{3a},
LIN Peiyuan^{3a,3b}

(1. Guangdong Construction Engineering Quality and Safety Inspection Station Co., Ltd., Guangzhou 510600, P. R. China; 2. Changjiang Survey Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, P. R. China; 3a. School of Civil Engineering; 3b. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, P. R. China; 4. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: The heterogeneity of hardfill is obvious, so it is of necessity to study its parameter's statistical distribution. Take three hardfill projects with field tests' data as research objects, the probability and statistical analysis have been done based on χ^2 or $K-S$ finite contrast method, and the recommended probability distribution models have been put forward; recommend normal distribution to fit the probability of density;

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(52008408)

作者简介: 徐通(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程检测及风险评估研究, E-mail: tong4012002@foxmail.com。

孙伟(通信作者), 男, 助理教授, E-mail: sunw55@mail.sysu.edu.cn。

Received: 2021-03-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52008408)

Author brief: XU Tong (1984-), senior engineer, main research interests: geotechnical engineering testing and risk assessment, E-mail: tong4012002@foxmail.com.

SUN Wei (corresponding author), assistant professor, E-mail: sunw55@mail.sysu.edu.cn.

recommend lognormal distribution to fit the probability of modulus of elasticity; recommend lognormal distribution to fit the probability of strength parameters; recommend β distribution to fit the probability of poisson ratio. Moreover, the correlation distance of hardfill dam is also discussed. Results are that the vertical correlation distance and the horizontal correlation distance are 0.5~2.0 m and 5~30 m, respectively.

Keywords: hardfill; heterogeneity; probability statistical analysis; probability distribution model; correlation distance

胶凝砂砾石筑坝采用一种介于混凝土和堆石料之间的新材料——胶凝砂砾石材料,其理念是调整坝体结构来适应材料特性,可以达到就地取材、废物利用的目的,在生态、经济及施工等方面均具有一定优势。随着胶凝砂砾石筑坝在水利工程筑坝中的推广^[1-3],众多学者开展了胶凝砂砾石材料的相关研究。王竞^[4]探究了不同坝高、基岩、波比等条件对胶凝砂砾石坝强度安全性与剖面稳定性的影响;郭磊等^[5]通过对不同含泥量的胶砂试块进行强度试验和电镜扫描,研究了不同含泥量对胶凝砂砾石强度的影响;地震作用可能导致坝体的破坏,故在震源地区需要进行抗震评估^[6-7],Hurtado-Lopez等^[8]考虑了地震荷载对胶凝砂砾石筑坝的影响,对胶凝砂砾石坝进行了风险分析。此外,胶凝砂砾石的力学性能^[9-11]及胶凝砂砾石坝的温度应力分布^[12]、质量检验^[13]等方面均有学者进行研究。

由于来源、配合比设计方法及施工方式的特性,该材料表现出显著的非均质性。较强的非均质性是胶凝砂砾石材料的本质属性,有必要采用概率方法对这种属性的不确定性进行研究,同时,针对实际工程不确定性的研究也在很多领域得到应用。Yuan等^[14-15]基于可靠度理论,对两种中国规范中土钉墙轴力计算模型进行了准确性评估和校正及土钉墙位移的预测;Liu等^[16-17]通过可靠度分析进行了土钉墙面层拉力的相关研究;Mahmoodi等^[18]运用不确定分析进行了胶凝砂砾石坝抗震评估;Jia等^[19]将可靠度分析方法与强度破坏法相结合,对大坝进行了抗剪强度可靠度分析,发现大坝具有较高的抗剪可靠度。但Mahmoodi等^[18]和Jia等^[19]尚未对胶凝砂砾石材料非均质性进行专门研究。目前,有关该材料非均质性的研究相当匮乏,试验数据、刻画方法及其对坝体工作性态的影响研究都不足。贾金生等^[20]和Kitapcigil^[21]是较早关注胶凝砂砾石材料非均质性的学者,但他们并没有对参数概率分布和特征值的选取进行专门研究;Li等^[22]考虑了胶凝砂砾石材料具有较大的分散性,对胶凝砂砾石坝的稳定性进行了可靠分析,但同样缺少对参数概率分布的研究;

Chen等^[23]基于Hariri-Ardebili等^[24]提出的动力随机有限元法研究了胶凝砂砾石材料非均质性对坝体抗震性能的影响,但其材料非均质性输入仍基于一些假设进行。孙伟等^[25]在广泛搜集整理胶凝砂砾石材料力学性能指标的室内实验和实际工程资料数据的基础上,得到了材料力学性能指标的统计特征值和分布形式,但搜集到的数据很多来自室内配合比设计试验,统计结果可作为一般性参考,还不能很好地代表实际坝体结构中材料性能空间随机分布的实际情况。

笔者收集3座大坝工程现场实测数据,运用概率统计方法,分析其物理力学性能参数的概率统计特征值及分布形式,得到参数的推荐分布概型,并根据钻孔取芯芯样力学性能空间分布对胶凝砂砾石坝相关距离问题进行探讨。

1 概率统计和相关距离基本原理

1.1 K-S检验法

K-S检验法为小子样参数检验方法。是把子样得到的经验分布函数 $S_n(x)$ 与总体理论分布函数 $F(x)$ 之间偏差绝对值的最大值作为判别标准,设样本容量为 n ,子样 x_i 从小到大排列,子样经验分布为

$$S_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_i \\ i/n, & x_i \leq x < x_{i+1} \\ 1, & x \leq x_n \end{cases} \quad (1)$$

统计量 D_n 为

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |S_n(x) - F(x)| = \max_{-\infty < x < \infty} D_n(x) \quad (2)$$

取某一置信度 α (通常取0.05),对应的临界值为 $D_{\alpha,n}$,在 $D_n < D_{\alpha,n}$ 时,子样接受概型 $F(x)$ 。

1.2 χ^2 检验

χ^2 检验法为小子样参数检验方法。是指子样在某一区间的频率与预先假设的分布对应的该区间的理论频率两者之差的平方与理论频率之比,最后各个区间累加求和,得到的指标与临界值比较,作为判别标准。建立假设 H_0 ,假设分布函数 $F(x)$ 。计算 $F(x)$ 在区间 (α_{i-1}, α_i) 的概率 P_i 。

$$P_i = F(\alpha_i) - F(\alpha_{i-1}) \quad (3)$$

子样频率与假设分布 $F(x)$ 计算概率间的总偏差统计量 D 为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{(k_i/n - P_i)^2}{P_i} \quad (4)$$

根据显著性水平(一般取 0.05), 自由度为 $m - r - 1$ (r 为 $F(x)$ 分布中用子样估计的参数个数), 查 χ^2 分布表, 得到检验临界值 $\chi_{0.05}^2$ 。若 $D < \chi_{0.05}^2$, 则原假设成立。

1.3 有限比较法

当样本容量较少时, 进行参数概率分布形式的假设检验时容易出现可以同时接受几种不同假设分布的情况, 实际上此时存在着“取伪错误”的风险。为确定参数的最佳分布概型, 张博庭^[26]提出了“有限比较法”。

有限比较法即在所有满足分布的假设中寻找一个最小值, 令接受水平为检验统计量与标准临界值之比 K_{H_i} , 则

$$K_{\text{opt}} = \min \{ K_{H_i} \}, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

根据样本数量的多少, 选择不同的有限比较法。当样本数量大于 150 时, 可用传统的检验方法确定, 而不需要考虑方法之间的比较问题; 当样本数量在 50~150 时, 可采用大子样统计的 χ^2 比较法; 而小子样检验的 $K-S$ 比较法、 $C-M$ 比较法或 $A-D$ 比较法适用于样本数量在 5~50 之间的情况。

1.4 相关距离

胶凝砂砾石坝非均质性的刻画可通过随机场来实现^[25,27]。随机场理论的一个重要思想就是用方差折减函数沟通点变异性与结构空间平均性。而方差折减函数取决于结构体材料的相关距离, 所以, 分析问题之前首先需要确定相关距离。

设一维连续平稳随机场 $x(z)$ 均值为 μ , 方差为 σ^2 , 相关函数为 $\rho(\xi)$, 定义其在 $[z, z+h]$ 上的局部平均为

$$x_h(z) = \frac{1}{h} \int_z^{z+h} x(z) dz \quad (6)$$

式中: h 是局部平均单元的长度, $x_h(z)$ 称为局部平均随机场, 其均值为

$$E[x_h(z)] = E\left[\frac{1}{h} \int_z^{z+h} x(z) dz\right] = \frac{1}{h} \int_z^{z+h} E[x(z)] dz = \mu \quad (7)$$

可见, 局部平均随机场 $x_h(z)$ 的均值与原随机场

$x(z)$ 的均值一样。

$$\text{Var}(x_h(z)) \sigma_h^2 = \Gamma^2(h) \cdot \sigma^2 \quad (8)$$

式中: $\Gamma^2(h)$ 为方差折减函数, 表示在局部平均下的点方差 σ^2 的折减。 $\Gamma^2(h)$ 与 $\rho(\xi)$ 的关系为

$$\Gamma^2(h) = \frac{2}{h} \int_0^h \left(1 - \frac{\xi}{h}\right) \rho(\xi) d\xi \quad (9)$$

Van Marcke 指出, 如果存在

$$\lim_{h \rightarrow \infty} h \Gamma^2 = 2 \lim_{h \rightarrow \infty} \int_0^h \left(1 - \frac{\xi}{h}\right) \rho(\xi) d\xi = \delta_u \quad (10)$$

那么, 对于充分大的 h , 有近似公式

$$\lim_{h \rightarrow \infty} h \Gamma^2(h) \approx \delta_u \quad (11)$$

式中: δ_u 即为相关距离, 是体现结构体材料空间变异性的一种基本属性。在相关距离范围内, 结构体材料性质强烈相关, 大于该距离则认为随机场性质基本不相关。

2 概率统计分析

2.1 Marathia 和 Ano Mera 坝(希腊)

Marathia 和 Ano Mera 两座大坝^[28]材料来源于河床和坝基开挖的中等风化花岗岩砂砾石, 最大粒径为 60 mm, 单位胶材用量 70 kg/m^3 。在实验室对出机口胶凝混合物振捣密实, 获得大量样本, 得到材料的 7、28 d 强度。在大坝建成后, 从大坝顶部竖直钻孔取芯获得直径 84 mm 的芯样, 对 110 个芯样样本进行了同高程的单轴抗压强度试验。7、28 d 钻孔芯样单轴抗压强度条形分布如图 1 所示。

7、28 d 抗压强度值 R_{c7} 、 R_{c28} 及钻孔芯样单轴抗压强度 R_c 试验样本数量满足大样本数的条件, 采用 χ^2 检验有限比较法来确定最优概型, 取正态分布和对数正态分布为待检验分布概型。检验结果如表 1 所示。参数概率分布理论频数与试验频数对比如图 2 所示。从以上分析可以得到: R_{c7} 、 R_{c28} 和 R_c 最优概型分别为对数正态分布、正态分布和正态分布。

2.2 Takinosawa 地区 CSG 明渠工程(日本)

Takinosawa 地区明渠工程^[29]采用梯形断面, 宽度 7.0 m, 高度 9.0 m, 坡度 1:1.2, 纵向坡度 1/350, 总长度 1 040 m, 设计流量 $840 \text{ m}^3/\text{s}$ 。明渠工程母材主要来自 Takizawa 坝左右岸开挖石渣料。

钻孔取直径 20 cm、高度 40 cm 的芯样进行了密度 ρ 、单轴抗压强度 R_c 、弹性模量 E 、泊松比 ν 等相关试验, 具体试验数据可参考文献^[29]。试验结果显示, 即使在同一工期同一钻孔仍然有很大的变异

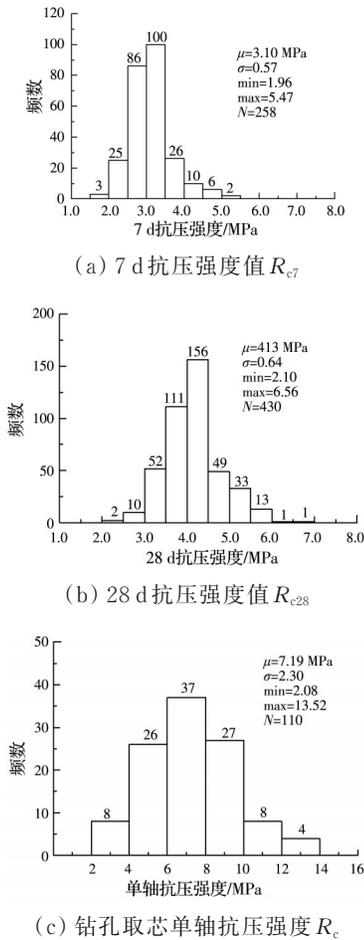


图 1 7、28 d 钻孔芯样抗压强度条形分布图
Fig. 1 Bar distribution charts of compressive strength of 7, 28 d drilling core samples

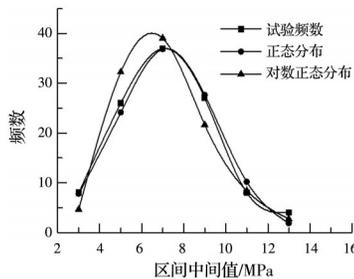


图 2 Marathia 和 Ano Mera 坝强度参数概率分布理论频数与试验频数的对比 (钻孔取芯单轴抗压强度 R_c)
Fig. 2 Comparison of theory frequency and test frequency of strength parameter probability distribution in Marathia and Ano Mera dam (Uniaxial compressive strength of drilled core R_c)

性,这也证明了胶凝砂砾石材料非均质性的客观存在。 ρ 、 R_c 、 E 、 ν 的样本数为 18~27,符合小样本数的条件,采用 K-S 检验有限比较法来确定最优概型。为分析得更加全面,取正态分布、对数正态分布、极

表 1 R_{c7} 概率分布的 χ^2 比较法假设检验

Table 1 Parametric hypothesis tests of the probability distribution of R_{c7} by χ^2 finite contrast method

| 区间编号 | 样本区间 | 试验频数 | H_{01} : 正态分布 $\mu_x = 3.10, \sigma_x = 0.57$ | | H_{02} : 对数正态分布 $\mu_{\ln x} = 1.11, \sigma_{\ln x} = 0.18$ | |
|------|---------|------|--|--------------------------------|--|-------|
| | | | 理论频数 | d_k | 理论频数 | d_k |
| 1 | 1.5~2.0 | 3 | 6.269 | 1.705 | 2.657 | 0.044 |
| 2 | 2.0~2.5 | 25 | 30.831 | 1.102 | 32.972 | 1.928 |
| 3 | 2.5~3.0 | 86 | 73.298 | 2.201 | 84.237 | 0.037 |
| 4 | 3.0~3.5 | 100 | 84.676 | 2.773 | 80.161 | 4.910 |
| 5 | 3.5~4.0 | 26 | 47.524 | 9.748 | 40.351 | 3.104 |
| 6 | 4.0~4.5 | 10 | 12.952 | 0.673 | 13.364 | 0.847 |
| 7 | 4.5~5.0 | 6 | 1.703 | 10.844 | 3.380 | 2.031 |
| 8 | 5.0~5.5 | 2 | 0.103 | 34.863 | 0.697 | 1.439 |
| | | | $\chi_{H_0}^2$ | 63.910 | 14.802 | |
| | | | K_{H_0} | $D > \chi_{0.01}^2(5)$, 不接受假设 | | 0.981 |
| 检验结果 | | | 7 d 抗压强度值 R_{c7} 在 0.01 显著性水平下接受对数正态分布假设。同样检验过程可以得到: R_{c28} 的最优概型为正态分布, R_c 的最优概型为正态分布。 | | | |

值 I 型分布、 β 分布为待检验的参数分布概型^[30]。最终得到 ρ 、 R_c 、 E 、 ν 的 K-S 有限比较法检验结果如表 2 所示,参数概率分布理论与试验分布函数值对比如图 3 所示。从以上分析可以得到: ρ 、 R_c 、 E 、 ν 最优分布概型分别为 β 分布、对数正态分布、对数正态分布和 β 分布。

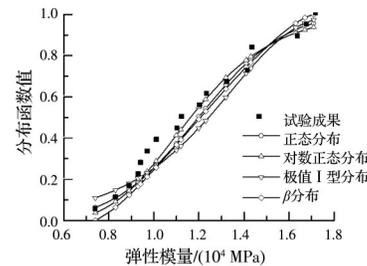


图 3 Takinosawa 地区 CSG 明渠工程参数概率分布理论与试验分布函数值的对比 (弹性模量 E)
Fig. 3 Contrasting of theoretical and experimental distribution function values of CSG open Channel engineering parameter probability distribution in Takinosawa are (elastic modulus E)

2.3 功果桥水电站上游 CSG 围堰工程

云南澜沧江功果桥水电站上游胶凝砂砾石围堰^[31]顶长度 130 m,最大高度 50 m,上下游不对称布置,上游坡比 1:0.4,下游坡比 1:0.7。实际施工中,

表 2 Takinosawa 地区 CSG 明渠工程参数概率分布 K-S 有限比较法的假设检验结果 ($\alpha=0.05$)Table 2 Results of parametric hypothesis tests in a CSG open channel in Takinosawa by K-S finite contrast method ($\alpha=0.05$)

| 项目 | 参数 | H_{01} :正态分布 | H_{02} :对数正态分布 | H_{03} :极值 I 型分布 | H_{04} : β 分布 | 最优概型 |
|--------------|------------------------|----------------|------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| 密度 ρ | D_n^i | 0.127 | 0.132 | 0.136 | 0.104 | β 分布 |
| | $D_{n,\alpha}^i$ | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | |
| | $D_n^i/D_{n,\alpha}^i$ | 0.488 | 0.508 | 0.523 | 0.400 | |
| 单轴抗压强度 R_c | D_n^i | 0.096 | 0.088 | 0.155 | 0.119 | 对数正态分布 |
| | $D_{n,\alpha}^i$ | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | |
| | $D_n^i/D_{n,\alpha}^i$ | 0.369 | 0.338 | 0.596 | 0.458 | |
| 弹性模量 E | D_n^i | 0.124 | 0.101 | 0.139 | 0.131 | 对数正态分布 |
| | $D_{n,\alpha}^i$ | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | |
| | $D_n^i/D_{n,\alpha}^i$ | 0.401 | 0.327 | 0.450 | 0.424 | |
| 泊松比 ν | D_n^i | 0.103 | 0.081 | 0.155 | 0.078 | β 分布 |
| | $D_{n,\alpha}^i$ | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | |
| | $D_n^i/D_{n,\alpha}^i$ | 0.333 | 0.262 | 0.502 | 0.252 | |

骨料最大粒径 250 mm, 水泥用量 100 kg/m^3 , 有效用水量 72 kg/m^3 , 水胶比 0.72, 砂率 20%。现场随施工进度分部位取样成型试件, 得到 28、90 d 抗压强度。试验表明, 抗压强度达到设计指标要求, 但离差较大。限于篇幅, 不再列出具体检验过程, 最终得到 R_{c28} 和 R_{c90} 最优概型分别为 β 分布和对数正态分布。

3 胶凝砂砾石材料参数分布概型讨论

3.1 密度

以往岩土材料的相关研究表明, 密度一般服从正态分布居多。在检验中, 密度以 β 分布为最优, 但实际上, 正态分布的接受程度也很高 (即 $D_n^i/D_{n,\alpha}^i$ 或 $\chi_{H_n}^2/\chi_{H_{n,\alpha}}^2$ 较小), 而且正态分布的处理要远远比 β 分布方便很多。因此, 推荐采用正态分布作为密度的分布概型。

3.2 弹性模量

以往的岩土材料相关研究表明, 材料的变形指标弹性模量一般服从正态分布或对数正态分布, 且对于类似弹性模量这样总是取正值的变量, 对数正态分布更为优越。

对于某些变异性较小的材料参数, 由于正态分布与对数正态分布差别不大, 而正态分布处理简单, 因此一般可直接采用正态分布, 但变异系数较大时, 正态分布与对数正态分布的差异不能忽略^[32]。

图 4 为正态分布与对数正态分布概率密度的差值, 二者具有相同均值和标准差, 均值取 10。由图 4

可知, 随着变异系数的增大, 差别越来越明显。胶凝砂砾石材料变异性较大, 弹性模量变异系数可达 0.1~0.3, 因此, 推荐采用对数正态分布作为弹性模量的分布概型。

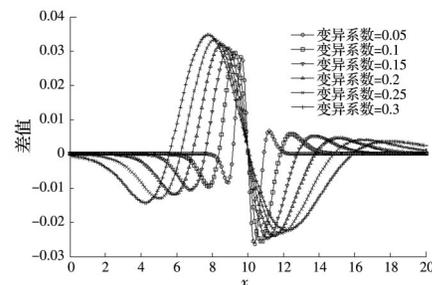


图 4 正态分布与对数正态分布的差值 (均值为 10)
Fig. 4 Difference between normal and lognormal distribution function (mean value is 10)

3.3 抗压强度

相关研究表明, 岩土材料的强度指标一般服从正态分布或对数正态分布。在参数检验中, 强度指标以对数正态分布居多, 但也有服从正态分布的。胶凝砂砾石配合比设计、结构设计及施工质量控制都以抗压强度为度量指标, 一般来说, 抗压强度的试验数据较丰富。因此建议, 对于具体工程分析时, 可对实验数据进行相应的参数检验, 从而确定适合该工程的强度分布最优概型。如果试验样本数据不足, 鉴于强度值总是取正值, 建议取对数正态分布作为分布概型。

3.4 泊松比

岩土材料的相关研究表明,对于泊松比这样具有明确上下限的物理量, β 分布是最好的选择^[7],检验中也证实了这一点。因此,推荐采用 β 分布作为泊松比的分布模型。

4 胶凝砂砾石坝相关距离探讨

在岩土工程领域,土体等散粒体的非均质性(常称之为空间变异性)通常采用 Vanmarcke 土性剖面随机场模型^[33]描述。胶凝砂砾石坝坝体按土石坝施工工艺进行薄层碾压填筑,不同部位取料、拌和、碾压等过程有粗放性的一面,也有相关性的一面。由于采用水平碾压施工方式,与土体的沉积风化相似,胶凝砂砾石材料也具有一定程度成层分布的性

质,因此,与土性剖面一样,胶凝砂砾石坝也存在相关距离这一概念,距离越近,相关性越大,而且水平相关距离应大于竖直相关距离。

4.1 竖直向相关距离计算

沙陀水电站是乌江干流开发方案中的第9级,为二等大(2)型工程^[34],下游围堰采用胶凝砂砾石筑坝形式。其采用上下游坝坡对称梯形形式,坡比取为1:0.6,总长132.5 m,顶宽10 m,EL287~EL293为水下混凝土,EL293~EL301为不同配比的胶凝砂砾石料。围堰浇筑完成后进行钻孔取芯试验,选取可利用的芯样试验数目相对较多的3#钻孔,结合其试验结果,采用递推平均法和空间平均法计算胶凝砂砾石竖直向相关距离。3#钻孔芯样试验结果如表3所示。

表3 沙陀围堰3#钻孔芯样试验结果

Table 3 Core sample test results of the 3# drill hole of Shatuo cofferdam

| 芯样编号 | 高程/m | 深度/m | 弹性模量/ 10^{-2} MPa | 极限拉伸值/ 10^{-4} | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa |
|------|--------|------|---------------------|------------------|----------|----------|
| 1 | 300.5 | 0.5 | 30.0 | 0.61 | 2.16 | 30.2 |
| 2 | 299.6 | 1.4 | 43.5 | 0.65 | 2.35 | 24.0 |
| 3 | 298.8 | 2.2 | 43.8 | 0.58 | 2.45 | 18.4 |
| 4 | 298.05 | 2.95 | 34.5 | 0.71 | 2.61 | 22.8 |
| 5 | 297.4 | 3.6 | 32.4 | 0.70 | 2.53 | 20.0 |
| 6 | 296.85 | 4.15 | 37.9 | 0.64 | 2.12 | 25.3 |
| 7 | 296.3 | 4.7 | 38.0 | 0.61 | 2.05 | 27.2 |
| 8 | 295.0 | 6.0 | 37.6 | 0.44 | 1.89 | 28.4 |
| 9 | 294.0 | 7.0 | 38.9 | 0.63 | 2.49 | 30.9 |

相关距离的计算方法通常有递推空间法、相关函数法、统计模拟法和平均零跨法,不同方法计算结果有所差异。闫澍旺等^[35]研究发现,统计模拟法的计算结果偏大,且变异性很大;递推空间法、相关函数法及平均零跨法计算结果相差不多,且比较稳定,可信度较高。笔者综合运用常见的递推空间法和相关函数法求解胶凝砂砾石竖直向的相关距离。

4.1.1 递推空间法求解相关距离 递推空间法是从相关距离的概念出发,在 $\Gamma(i)-i$ 曲线上寻找稳定点 n^* ,求解相关距离 $\delta = n^* \Delta z \Gamma^2(n^*)$ 。但在实际工作中,由于指标间的强烈变异性, $\Gamma(i)-i$ 曲线往往并不像理论上那么规则、光滑,并且随着 δ 值的增大,用于求解的 $\Gamma(i)$ 数据逐渐减少,求得的 $\Gamma(i)$ 可信度降低,曲线后部出现不规则摆动,很难找到稳定点 n^* 。采用一种改进的递推空间法求解相关距离 δ 。绘制 $\tau \Gamma^2(i)-\tau$ 曲线,其中 $\tau = (i-1)\Delta z$,此时可以认为 $\tau \Gamma^2(i)-\tau$ 曲线上出现的一小段平稳值或峰值

对应的距离即为相关距离。

根据3#钻孔芯样试验结果,取样间距为0.8 m。首先将其统计均匀化,并剔除数据的趋势分量,绘制弹性模量、抗压强度、抗拉强度、极限拉伸值的 $\tau \Gamma^2(i)-\tau$ 曲线,如图5所示。

根据图5可知,采用递推空间法,弹性模量、极限拉伸值、抗拉强度、抗压强度4个参数计算得到的随机场相关距离分别0.82、1.20、2.03、1.21 m。土性剖面随机场研究表明,相关距离是土体的基本属性,是一个固定值。但因为取样间距、扰动的影响,不同参数计算得到的相关距离可能会有一些差异^[36]。综合4个参数的计算结果,认为递推空间法得到的胶凝砂砾石竖直向相关距离在0.8~2.0 m之间。

4.1.2 相关函数法求解相关距离 相关函数法是利用相关函数 $\rho(\tau)$ 来计算 δ 。

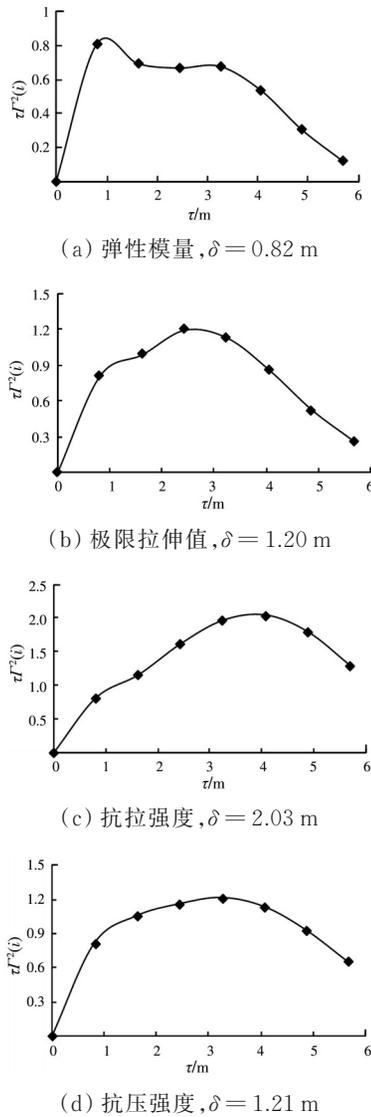


图 5 递推空间法计算相关距离

Fig. 5 Correlation distance based on the recurrence space average method

$$\delta = \lim_{\Delta z \rightarrow \infty} \Delta z \Gamma^2(\Delta z) = \lim_{\Delta z \rightarrow \infty} \Delta z \cdot \frac{2}{\Delta z} \cdot \left(1 - \frac{\tau}{\Delta z} \rho \right) (\tau) d\tau \quad (12)$$

确定相关函数后,即可计算相关距离的大小。

对 $\Delta z = i\Delta z_0$ 取不同的 i 值进行计算

$$\delta = \rho(\Delta z) = \rho(i\Delta z_0) = E [Y(z) Y(z + \Delta z)] = \frac{1}{n-i} \sum_{k=1}^{n-i} Y(z_k) Y(z_{k+i}) \quad (13)$$

绘制 $\rho(\Delta z) - \Delta z$ 曲线,确定相关函数的拟合形式,进行方程的回归,确定参数的值,根据相关函数参数与相关距离的关系即可确定相关距离。

根据绘制的 $\rho(\Delta z) - \Delta z$ 曲线,选用指数余弦 II 型 $(\rho(\tau) = \exp(-b|\tau|) \cos(\omega\tau), \delta_s = 2b/(b^2 + \omega^2))$ 相关函数时拟合效果较好,如图 6 所示。由指数余弦 II 型相关函数中参数与相关距离的关系,得到弹性模量、极限拉伸值、抗拉强度、抗压强度 4 个参数计算得到的随机场相关距离分别为 0.59、0.94、1.53、1.12 m。综合 4 个参数的计算结果,认为相关函数法所得到的胶凝砂砾石竖直向相关距离在 0.6~1.5 m 之间。

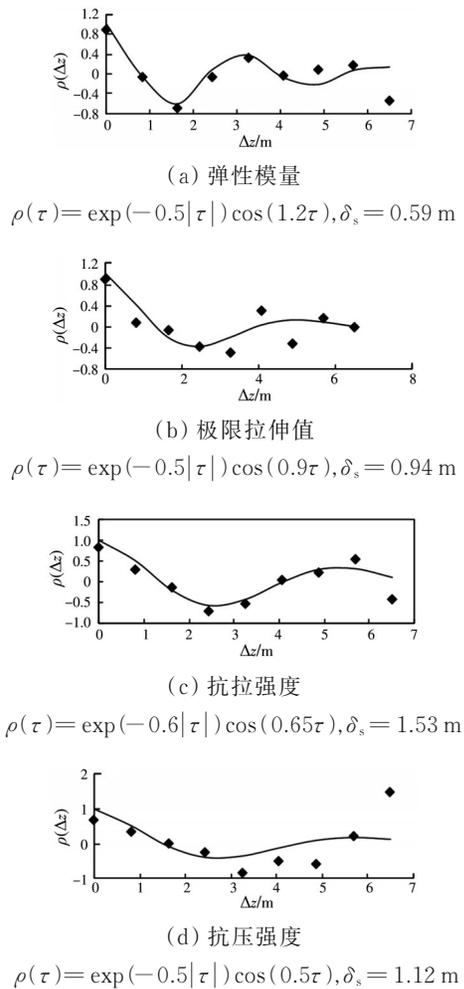


图 6 相关函数法计算相关距离 (指数余弦 II 型拟合曲线)

Fig. 6 Correlation distance based on the autocovariance function method (Fitting curve of exponential cosine type II)

4.2 胶凝砂砾石坝相关距离的讨论

由沙陀围堰钻孔取芯试验结果分析,递推空间法求得胶凝砂砾石竖直向相关距离在 0.8~2.0 m 之间,相关函数法求得胶凝砂砾石竖直向相关距离在 0.6~1.5 m 之间,两种方法之间的差异可能是由

于样本容量不足所致。

相关研究表明,岩土体力学参数水平向的相关距离一般大于竖直向,水平向相关距离范围一般为2~30 m,竖直向相关距离范围一般为0.1~5 m^[37];混凝土结构相关距离研究相对少一些,桥梁工程检测表明相关距离约0.7 m^[38]。

通过初步计算分析并参考岩土体和混凝土相关距离的研究,综合认为胶凝砂砾石坝竖直向相关距离可能在0.5~2.0 m之间。对于类似于沙陀围堰这样的围堰工程,施工工艺更加粗放,相关距离可向上限取值,而对于永久工程,相关距离则可向下限取值。而由于胶凝砂砾石坝坝体水平碾压施工方式具有一定程度成层分布的性质,水平相关距离应大于竖直相关距离。鉴于缺乏水平向相关距离试验数据,建议暂时参考土体取值,约5~30 m。

5 结论

1)通过3个大坝工程的现场取样及钻孔取芯试验,运用 χ^2 或K-S有限比较法进行概率统计分析,推荐的参数分布概型分别为:采用正态分布作为密度的分布概型;采用对数正态分布作为弹性模量的分布概型;对于具体工程,可对试验数据进行相应的参数检验,从而确定适合该工程的强度分布最优概型。如果试验样本数据不足,鉴于强度值总是取正值,建议取对数正态分布作为分布概型;推荐采用 β 分布作为泊松比 ν 的分布概型。

2)通过钻孔取芯芯样力学参数的空间分布,计算得到胶凝砂砾石坝竖直向相关距离。综合混凝土和土体研究,建议竖直向相关距离取0.5~2.0 m,水平向取5~30 m。

3)目前胶凝砂砾石材料现场试验数据严重不足,能用来计算相关距离的数据更少,笔者进行的统计和计算工作还是初步的,希望今后在更多的工程实践中积累更多、更丰富的胶凝砂砾石材料现场试验资料,进行全面系统的参数概率统计工作,像岩土体一样,按地区或按工程或按性质,都有较准确的概型分布、特征值及相关距离可供参考,从而为非均质性分析提供合理的输入参数。

参考文献

[1] 刘中伟,贾金生,冯炜,等.胶凝砂砾石坝在中小型水利工程中的最新应用与实践[J].水利水电技术,2018,49(5):44-49.
LIU Z W, JIA J S, FENG W, et al. Latest practice and

application of cemented sand and gravel dam to mid-small scale water conservancy project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5): 44-49. (in Chinese)

- [2] 白文斌.胶凝砂砾石筑坝施工关键技术浅析[J].四川水利,2019,40(4):97-99.
BAI W B. Brief analysis on key technologies of cement-sand-gravel dam construction [J]. Sichuan Water Resources, 2019, 40(4): 97-99. (in Chinese)
- [3] ZHANG G X, YI L, ZHANG L, et al. New Development of dam construction technology in China [C]//2018 International Conference on Computer, Communications and Mechatronics Engineering, 2018: 337-44.
- [4] 王竞.考虑多种影响因素的胶凝砂砾石坝强度安全性与剖面稳定性分析[D].武汉:武汉大学,2018.
WANG J. Study on strength safety and profile stability of hardfill dam considering various influence factors [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [5] 郭磊,王佳,郭利霞,等.胶凝砂砾石含泥量对其强度的影响[J].人民黄河,2020,42(3):136-139.
GUO L, WANG J, GUO L X, et al. Effect of mud content in cemented sand gravel based on its strength [J]. Yellow River, 2020, 42(3): 136-139. (in Chinese)
- [6] WANG J T, ZHANG M X, JIN A Y, et al. Seismic fragility of arch dams based on damage analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 109: 58-68.
- [7] XU B, PANG R, ZHOU Y. Verification of stochastic seismic analysis method and seismic performance evaluation based on multi-indices for high CFRDs [J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105412.
- [8] HURTADO-LÓPEZ G, MAYORAL-VILLA J M. Fragility curves for hardfill dams under seismic loading [J]. Tecnología y Ciencias Del Agua, 2020, 11(1): 132-168.
- [9] 王莎,贾金生,任权,等.胶凝砂砾石层面抗剪参数试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(1):32-38.
WANG S, JIA J S, REN Q, et al. Experimental study of shear parameters of CSGR layers [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(1): 32-38. (in Chinese)
- [10] 曹京京,王忠伟.不同冻融循环次数下胶凝砂砾石抗冻性能的试验研究[J].水电能源科学,2018,36(9):127-129,166.
CAO J J, WANG Z W. Experimental study on anti-freeze properties of cemented sand gravel [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(9): 127-129, 166. (in

- Chinese)
- [11] 赵鑫, 何蕴龙. 胶凝砂砾石坝渗流场对温度场的影响 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 283-292.
ZHAO X, HE Y L. Influence of seepage field of cemented sand and gravel dam on temperature field [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(4): 283-292. (in Chinese)
- [12] JIANG M M, CAI X, GUO X W, et al. Adiabatic temperature rise test of cemented sand and gravel (CSG) and its application to temperature stress prediction of CSG dam [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 1-12.
- [13] 王婧红, 王利英, 董卫, 等. 胶凝砂砾石质量控制方法 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 393-399.
WANG J H, WANG L Y, DONG W, et al. Quality control methods for cementitious gravel [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 393-399. (in Chinese)
- [14] YUAN J, LIN P Y, HUANG R, et al. Statistical evaluation and calibration of two methods for predicting nail loads of soil nail walls in China [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108: 269-279.
- [15] YUAN J, LIN P Y, MEI G X, et al. Statistical prediction of deformations of soil nail walls [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115: 103168.
- [16] LIU H F, TANG L S, LIN P Y, et al. Accuracy assessment of default and modified Federal Highway Administration (FHWA) simplified models for estimation of facing tensile forces of soil nail walls [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(8): 1104-1115.
- [17] LIU H F, MA H H, CHANG D, et al. Statistical calibration of federal highway administration simplified models for facing tensile forces of soil nail walls [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(5): 1509-1526.
- [18] MAHMOODI K, NOORZAD A, MAHBOUBI A. Seismic fragility analysis of a cemented sand-gravel dam considering two failure modes [J]. Computers and Concrete, 2020, 26(6):483-495.
- [19] JIA J S, WANG S, ZHENG C Y, et al. FOSM-Based shear reliability analysis of CSGR dams using strength theory [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 97: 52-61.
- [20] 贾金生, 马锋玲, 李新宇, 等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 578-582.
JIA J S, MA F L, LI X Y, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 578-582. (in Chinese)
- [21] KİTAPÇIGİL S N. A study on the reliability-Based safety analysis of hardfill dams [D]. Ankara: Middle East Technical University, 2010.
- [22] LI X W, ZHANG S F, WU H, et al. Study on stability and reliability of cement-sand-gravel dam [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 513: 012035.
- [23] CHEN J Y, LIU P F, XU Q, et al. Seismic analysis of hardfill dams considering spatial variability of material parameters [J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110439.
- [24] HARIRI-ARDEBILI M A, SEYED-KOLBADI S M, SAOUMA V E, et al. Random finite element method for the seismic analysis of gravity dams [J]. Engineering Structures, 2018, 171: 405-420.
- [25] 孙伟, 何蕴龙, 袁帅, 等. 考虑材料非均质性的胶凝砂砾石坝随机有限元分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 828-836.
SUN W, HE Y L, YUAN S, et al. Stochastic finite element analysis of hardfill dam with considering the material heterogeneity influence [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 828-836. (in Chinese)
- [26] 张博庭. 用有限比较法进行拟合优度检验[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 84-91.
ZHANG B T. Goodness of fit test by finite comparison method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 84-91. (in Chinese)
- [27] 孙伟. 胶凝砂砾石材料性能非均质性及其对坝体工作性态的影响分析研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
SUN W. Study on the heterogeneity of hardfill and its influence on working behavior of the dam [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- [28] COUMOULOS D G, KORYALOS T P. Lean RCC dams-Laboratory testing methods and quality control procedures during construction [C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, 17-19 November, 2003, Madrid, Spain, 2003: 233-238.
- [29] HANADA H, TAMEZAWA T, OYOYABU K, et al. CSG method using muck excavated from the dam foundation [C]//Proceedings 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, 2003: 447-456.
- [30] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(Sup2): 3526-3532.
ZHANG J Z, MIAO L C. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3526-3532. (in Chinese)

- [31] 张鹏飞, 张锦堂, 黄天润. 贫胶凝粗粒料在功果桥水电站过水围堰坡面防护中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 115-117, 52.
ZHANG P F, ZHANG J T, HUANG T R. Application of lean cemented aggregate in slope protection of overflow cofferdam for Gongguoqiao hydropower station [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(8): 115-117, 52. (in Chinese)
- [32] 陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 37-40, 45.
CHEN L H, CHEN Z Y, LIU J M. Probability distribution of soil strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 37-40, 45. (in Chinese)
- [33] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [34] 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院. 新型硬填料碾压坝设计技术研究成果总报告[R]. 贵阳, 2011.
Guiyang Research Institute of Survey and Design of China Hydropower Consultants Group. Report on the research of hardfill design technology [R]. Guiyang, 2011.
- [35] 闫澍旺, 朱红霞, 刘润. 关于随机场理论在土工可靠度计算中应用的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2053-2059.
YAN S W, ZHU H X, LIU R. Study on application of random field theory to reliability analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2053-2059. (in Chinese)
- [36] 闫澍旺, 朱红霞, 刘润. 天津港土性相关距离的计算研究和统计分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2179-2185.
YAN S W, ZHU H X, LIU R. Numerical studies and statistic analyses of correlation distances of soil properties in Tianjin Port [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2179-2185. (in Chinese)
- [37] 蒋水华. 水电工程边坡可靠度非侵入式随机分析方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
JIANG S H. A non-intrusive stochastic method for slope reliability in hydroelectricity engineering [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [38] 黄侨, 李莹, 郭宏斌. 混凝土桥梁结构随机场的相关距离分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11): 44-47.
HUANG Q, LI Y, GUO H B. Correlation distance calculation on random field of the concrete bridge structures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(11): 44-47. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)