

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.012

# 面板堆石坝水平位移监测统计模型

沈 扬<sup>1</sup>, 李明昊<sup>2</sup>, 任秋兵<sup>2</sup>, 李明超<sup>2</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 针对目前面板堆石坝的水平位移统计分析中缺少考虑温度分量的问题, 以 Boussinesq 解为假设基础推导了水压分量表达式, 得出坝体典型断面处的水平位移与库水位一次方成正比的结论。以 Merchant 流变模型为基础推导了时效分量表达式, 并建立了带有周期项非单调增加的时效关系, 加入了以实测温度表示的温度分量表达式, 建立了修正的面板堆石坝体内水平位移 MHTT 统计模型。工程实例验证结果表明, MHTT 模型解释数据的能力优于 HTT 模型和 HT-JU 模型, 对面板堆石坝水平位移的物理机制阐释能力较强。

**关键词:** 面板堆石坝; 安全监控; 统计模型; 水平位移; 偏最小二乘回归

**中图分类号:** TV641.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2022)05-0089-09

## Statistical model for horizontal displacement monitoring of concrete faced rockfill dam

SHEN Yang<sup>1</sup>, LI Minghao<sup>2</sup>, REN Qiubing<sup>2</sup>, LI Mingchao<sup>2</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** In view of the lack of considering the temperature component in the statistical analysis of the horizontal displacement of the concrete faced rockfill dam (CFRD), the water pressure component is derived from the Boussinesq solution and it has been proved that the horizontal displacement in the typical section of the dam is directly proportional to the reservoir water level. The expression of the aging component is derived based on the Merchant rheological model, the aging relationship of the periodic non-monotonic increase of rock fill is established and the temperature component is added by the form of measured temperature. Thereafter, a modified hydrostatic thermal time (MHTT) model is proposed as the statistical model of internal horizontal displacement of CFRDs. The results of a case study show that the MHTT model has not only a better data interpretation ability than the HTT model and HT-JU model, but also a strong ability to interpret the physical mechanism of horizontal displacement of CFRDs.

**Key words:** concrete faced rockfill dam; safety monitoring; statistical model; horizontal displacement; partial least squares regression

面板堆石坝运行过程中自身材料的特性和结构性态在不断变化。变形过大将会使面板接缝止水变形或面板应力过大而破碎, 危害坝体安全。目前大坝安全监控模型可概括为 4 类: 统计模型、确定性模型、混合模型、机器学习模型<sup>[1-2]</sup>。统计模型因为物理意义明确、表达式简洁、迁移运用灵活, 在大坝安全监控中应用最为广泛。

目前, 混凝土坝的监控统计模型发展历程完整, 成果丰富。经过了数十年的发展, 不仅有各类回归算法构建的 HST (hydrostatic-seasonal-time) 模型和 HTT (hydrostatic-thermal-time) 模型<sup>[3]</sup>、含有裂缝开度的 HTCT (hydrostatic-thermal crack-time) 模型<sup>[4]</sup>和将时效描述为状态向量的 HSS (hydrostatic-seasonal-state) 模型<sup>[5]</sup>, 而且对模型水压分量、温度分量、时效分量都有详细研究<sup>[6-8]</sup>。面板堆石坝监控统计模型的发展没有混凝土坝全面, 多数学者在建立坝体沉降、坝体水平位移的监控统计模型时, 均直接借鉴 HST 或 HTT 模型。例如: Gamse 等<sup>[9-10]</sup>直接将 HTT 模型运用于预测堆石坝坝顶中部沿上下游方向的位移、沿坝轴线方向位移和沉

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51879185, 52179139); 湖北省水电工程施工与管理重点实验室开放基金(2020KSD06)

**作者简介:** 沈扬(1984—), 男, 博士后, 主要从事智慧水工程研究。E-mail: tjusy1984@163.com

**通信作者:** 李明昊(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事大坝安全监测研究。E-mail: lmh@tju.edu.cn

**引用本文:** 沈扬, 李明昊, 任秋兵, 等. 面板堆石坝水平位移监测统计模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 89-97.

SHEN Yang, LI Minghao, REN Qiubing, et al. Statistical model for horizontal displacement monitoring of concrete faced rockfill dam [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 89-97.

降,提出了贝叶斯模型类选择方法,可以快速准确挑选有效自变量因子,但未对模型在堆石堤坝上的适用性做出解释,也未对模型在坝体内部测点的适用性做出验证分析;Sigtryggsdóttir 等<sup>[11]</sup>在未考虑温度分量的情况下,重新构建了模型水位因子,预测了面板堆石坝短期和长期沉降,揭示了大坝沉降响应的黏弹性规律,但没有解释水位分量的表达式是如何形成水压荷载的延迟效应,也没有对水压分量的表达式做出推理论证。

HST 模型或者 HTT 模型均是将混凝土坝的坝段看作一个固结在地基上的悬臂梁而推导建立的模型,而面板堆石坝筑坝材料来自于当地堆石料,经过碾压施工后,力学性质不同于浇筑成形后成为整体的混凝土<sup>[12]</sup>。面板堆石坝和混凝土坝存在三方面的不同:①针对混凝土坝的模型假设合理,理论完善,坝体响应物理机制明确,因而模型能够被广泛地使用,不断发展;而面板堆石坝在施工时一般采用全断面碾压,与混凝土坝相比,不存在单个坝段,因此坝体没有缝面设置。②分析受力时,面板堆石坝没有坝段概念,不能以单个坝段为受力对象。③面板堆石坝整体横断面上,材料分区比混凝土坝明显,力学性质突变程度比混凝土坝显著<sup>[13]</sup>。因此,面板堆石坝不同部位对环境量的响应机制与混凝土坝不同。对于面板堆石坝变形分析,大部分研究没有考虑温度分量的影响<sup>[14]</sup>,少部分学者虽然考虑了温度分量,但发现温度分量的影响占比远不及混凝土坝<sup>[15]</sup>。

实际上,温度带来的影响来源于材料的热胀冷缩效应,与研究测点在坝体内的相对位置有关。因此,本文基于传统的 HTT 模型,建立了考虑温度分量的、针对坝体断面特点与材料特性的面板堆石坝水平位移预测模型——MHTT (hydrostatic thermal time for rock fill) 模型,在工程案例中采用偏回归算法计算各测点 MHTT 模型的统计系数,讨论了温度分量对模型预测结果的贡献,并将 MHTT 模型解释数据和外延数据的效果与 HTT 模型和 HT-JU 模型进行了对比分析。

## 1 MHTT 模型

传统 HTT 模型是由 HST 模型改进而来,将温度分量改进为使用实测温度。水压分量、温度分量与时效分量通常有<sup>[16]</sup>:

$$y = f_{H_0} + f_T + f_\theta + \xi \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad f_{H_0} = \sum_{i=1}^n a_i H_0^i \quad f_T = \sum_{j=1}^m b_j T_j \quad f_\theta = c(1 - e^{-\theta}) \quad \theta = t/100$$

式中: $y$  为大坝水平位移, $y \in \mathbf{R}$ ;  $f_{H_0}$ 、 $f_T$ 、 $f_\theta$  分别为水压分量、温度分量、时效分量; $\xi$  为误差项,服从正态分布,即  $\xi \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $H_0$  为上游水位<sup>[15-17]</sup>或上下游相对水位差<sup>[18]</sup>;  $n$  为水压力分量多项式的最大值,对于重力坝一般为 3,拱坝一般为 4;  $m$  为温度因子数量,取决于测点附近温度计个数;  $T_j$  为测点实测温度;  $t$  为从监测初期到观测当天的天数;  $a_i$ 、 $b_j$ 、 $c$  为统计系数。

水压分量对坝体水平位移的影响主要有 3 个方面<sup>[19]</sup>:静水压力作用于坝体引起的变形  $f_{1H_0}$ 、静水压力作用于地基面引起的变形  $f_{2H_0}$ 、库水重力使得地基旋转所引起的变形  $f_{3H_0}$ 。 $f_{1H_0}$  与  $H_0$ 、 $H_0^2$ 、 $H_0^3$  (在拱坝中含包含  $H_0^4$ ) 相关,  $f_{2H_0}$  与  $H_0^2$ 、 $H_0^3$  (在拱坝中含包含  $H_0^4$ ) 相关,  $f_{3H_0}$  与  $H_0$  呈线性关系。

面板堆石坝水平位移同样也可以分为水压分量、温度分量和时效分量。对于靠近两岸岸坡和坝体内部材料分区的部分,影响变形的因素更为复杂<sup>[13, 20]</sup>。面板堆石坝和混凝土坝的三方面不同,使得面板堆石坝坝体内部水平位移 3 个分量表达式与式(1)不尽相同,同时  $f_{1H_0}$ 、 $f_{2H_0}$  和  $f_{3H_0}$  的表达式都会发生变化。 $f_{2H_0}$  和  $f_{3H_0}$  是将混凝土坝的坝段看作一个固结在地基上的悬臂梁而推导得到的,变形可以经由悬臂梁这一刚体传递到研究点,从而对位移造成影响。对于堆石坝,没有坝段只有材料分区,且坝体由散粒体材料构成不能看作刚体。因此  $f_{2H_0}$  和  $f_{3H_0}$  对坝体典型断面的研究点位移影响远小于  $f_{1H_0}$ 。基于此,本文建立只考虑  $f_{1H_0}$  对坝体内部测点影响的 MHTT 模型。

材料方面,面板堆石坝是堆石料堆积碾压而形成的固、液、气三相组合物,相较于混凝土坝,在细观上表现为不连续性,宏观上表现为一个整体,在水荷载作用方向上,类似于三角形荷载作用下的地基。断面特征方面,相同坝高时,面板堆石坝典型剖面面积比混凝土坝大,与地基接触的面积大。在研究坝体内部测点时,面板堆石坝可将坝体看作半无限空间弹性体。稳定运行期,堆石料大部分流变变形已经完成,监测数据的稳定性比蓄水期好<sup>[21-22]</sup>。大量监测分析实例显示,统计模型能够对这段时期的监测数据做出良好的解释,可以排除不稳定数据对模型的干扰,方便模型之间的对比。

### 1.1 水压分量

如图1所示,库水作用于上游坝坡将引起水压分量的静水压力作用变形 $f_{1H_0}$ ,不考虑上覆高度土层在水平方向变形。为消除地基约束作用和上游坝坡水温变化的影响,选择远离地基、下游坝坡和坝顶的坝体内部典型剖面三角形区域为研究区域(图1),并假设坝体材料单一均匀且各向同性,取研究区域点 $M$ 为研究对象。面板堆石坝一般建于河谷中央,因此考虑一定范围内的水压力荷载,即以研究点 $M$ 所在的典型剖面为起点,向左右岸分别延伸长度 $l$ 。

在坝体典型横剖面建立坐标系, $x$ 轴方向沿上游坝坡向下, $y$ 轴垂直于横断面方向, $z$ 轴垂直于上游坝坡,坐标原点在 $O$ 点。水荷载为三角形荷载,荷载起点为点 $O$ ,荷载最大点为点 $A$ ,最大值是 $p_1 = \gamma_w H$ ( $\gamma_w$ 为水的容重, $H$ 上游水位到库底的高度),作用长度为坝坡长度 $b$ 。水位变化会引起点 $O$ 在坝坡上移动,除水库上游水位骤降工况外,在稳定运行期点 $O$ 移动的距离相较于水荷载在整个上游坝坡的作用长度 $OA$ 可忽略不计,因此取 $b$ 为常数;荷载的作用宽度为 $2l$ 。点 $M$ 在坝坡上的投影为点 $M'$ ,如图1所示。 $MM'$ 的长度 $z = h_1 \sin \varphi$ , $h_1$ 为点 $M$ 到上游坝坡的水平距离, $\varphi$ 为上游坝坡角度。图1中 $h_2$ 为点 $M$ 到上游坝坡的竖直距离, $h_3$ 是点 $M$ 到地基面的距离。

为避免烦琐的积分表达式,根据空间半无限体受分布荷载时的应力计算公式和弹性理论叠加原理,点 $M$ 处的荷载可以分解为 $OM'C$ 三角形荷载和 $M'ABC$ 梯形荷载(图2),点 $C$ 是 $MM'$ 延长线与水平荷载线的交点(图1)。由图1和图2的几何关系,可以继续分解为,沿水压方向的 $OM'CE$ 矩形荷载集度值 $p_{rec1} = \gamma_w H_1 = \gamma_w (H - h_3 - h_1 \sin \varphi \cos \varphi)$ ;沿水压反方向的 $OCE$ 三角形荷载集度最大值 $p_{trg2} = -\gamma_w H_1 = -\gamma_w (H - h_3 - h_1 \sin \varphi \cos \varphi)$ ;沿水压方向的 $M'ADC$ 矩形荷载集度值 $p_{rec3} = p_{rec1}$ ;沿水压方向的 $CBD$ 三角形荷载集度最大值 $p_{trg4} = \gamma_w H_2 = \gamma_w (h_3 + h_1 \sin \varphi \cos \varphi)$ 。

利用 Boussinesq 解推导出三角形和矩形荷载下的角点应力表达式<sup>[23]</sup>, $\sigma_{recz} = K_{rec} p_{rec}$ , $\sigma_{trgz} = K_{trg} p_{trg}$ , $K_{rec}$ 为矩形均布荷载的应力表达式系数, $K_{trg}$ 为三角形荷载的应力表达式系数, $p_{rec}$ 为矩形均布荷载, $p_{trg}$ 为三角形荷载的最大值,即上游库水高度在坝基处的水压力。根据图1所示点 $M$ 的研究范围,点 $M$ 的应力可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma_z = & 2K_{rec} p_{rec1} + 2K_{trg} p_{trg2} + 2K_{rec} p_{rec3} + 2K_{trg} p_{trg4} = \\ & f_1(h, h_1) \gamma_w (H - h_3 - h_1 \sin \varphi \cos \varphi) + f_2(h, h_1) \gamma_w (H - h_3 - h_1 \sin \varphi \cos \varphi) + \\ & f_1(h, h_1) \gamma_w (H - h_3 - h_1 \sin \varphi \cos \varphi) + f_3(h, h_1) \gamma_w (h_3 + h_1 \sin \varphi \cos \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $h$ 为测点所在竖直方向上的坝体高度; $f_1, f_2, f_3$ 为与 $h$ 和 $h_1$ 有关的函数。

堆石坝上游不仅有面板,还有垫层和过渡层,因此在相同荷载条件下,堆石坝内部应力分布与单一均质土体不同。根据成层土体应力分布规律(应力扩散效应),在引入缩放系数 $K$ 时,满足角点应力表达式,即分层土体与单一均质土体应力表达式的系数不同,对固定的研究点 $M$ ,可以采用缩放系数 $K$ 表示。因此,在水平方向,点 $M$ 由水压力引起的变形为 $\delta_w = K \sigma_z h_3 \tan \varphi / E_t$ , $E_t$ 为土的切线变形模量,可认为 $E_t$ 不变。将式(2)代入 $\delta_w$ 的表达式,即得:

$$\delta_w = aH + A_0 \quad (3)$$

式中: $a$ 为水压分量的统计系数,与 $f_1, f_2, f_3, K$ 相关; $A_0$ 为常数。

面板堆石坝的堆石料受力非线性、分层土层、随深度变化的变形模量等会改变 $f_1, f_2, f_3$ 和 $E_t$ 的值<sup>[23]</sup>,使

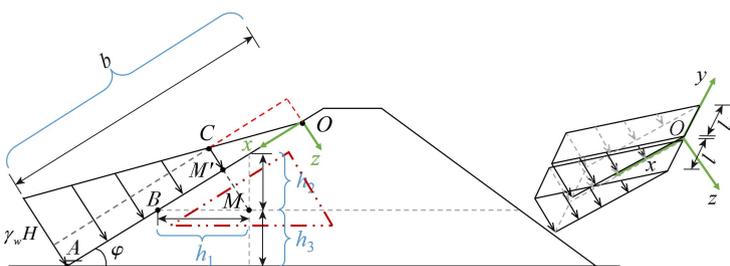


图1 典型剖面研究点的简化力学模型

Fig.1 Simplified mechanical model of a measuring point in typical profile

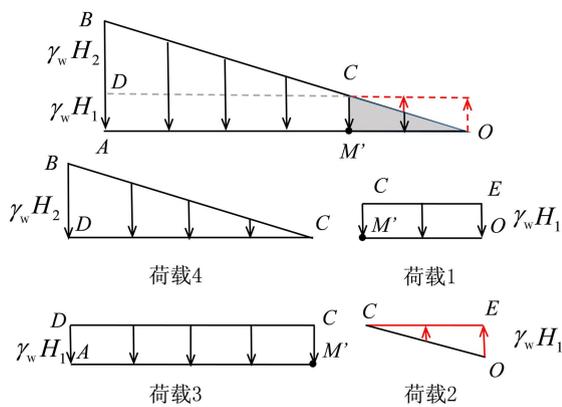


图2 M点荷载分解图

Fig.2 Decomposition of loads in point M

式(3)更复杂。但,MHTT模型并不直接使用 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 获得水压分量,而是将它作为相应的统计系数 $a$ 、 $A_0$ 包含在MHTT模型中。因此,结合该模型建立时所限定的范围,堆石料受力非线性、分层土层、随深度变化对模型造成的影响有限,可将式(3)表示为

$$f_{H_0} = aH + A_0 \quad (4)$$

由式(4)可知测点水平位移与库水位(上游水位到库底的高度)的一次方成正比。关于式(4)的合理性,可从以下方面证明:令式(2)中 $f_1(h, h_1)\gamma_w$ 、 $f_2(h, h_1)\gamma_w$ 、 $f_3(h, h_1)\gamma_w$ 与 $\tan\varphi$ 的乘积分别为 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ,式(4)则变为

$$f_{H_0} = A_1h_3^2 + A_2h_3 + A_0 + aH \quad (5)$$

由式(5)可知,当库水位为定值时,测点水平位移是测点高度的二次函数。在稳定运行期,面板堆石坝上游部分水平位移呈现坝体中部数值大、坝顶和坝底数值小的趋势,其位移云图如图3(a)所示,大部分面板堆石坝均具有此趋势,且云图上位移值将随大坝的形状和荷载而变化。在上游坝坡区域,任取一个截面,都会显示出图3(b)所示的二次函数曲线。因此,可以证明式(4)水压分量的合理性。

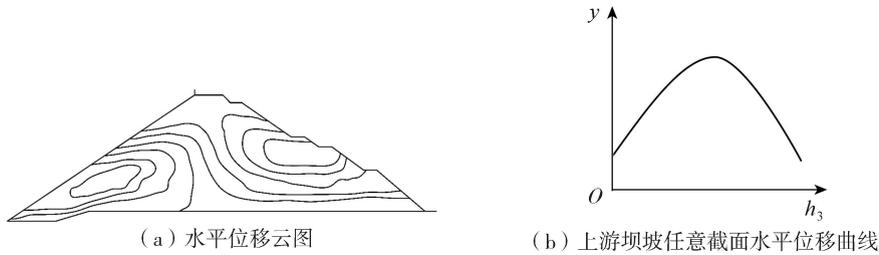


图3 面板堆石坝典型剖面水平位移

Fig.3 Measured horizontal displacements in typical profile of CFRD

## 1.2 温度分量与时效分量

目前相关研究很少考虑面板堆石坝统计模型温度分量的影响,但从定性角度分析,温度确实会对面板堆石坝水平位移造成影响。为了建立完备的面板堆石坝水平位移模型,需要在模型中考虑温度分量。根据热胀冷缩的基本原理,位移与各个测点的温度呈线性关系,有足够的实测温度时,模型温度分量可以直接由实测温度表示:

$$f_T = \sum_{k=1}^s B_k T_k \quad (6)$$

式中: $T_k$ 为实测温度; $B_k$ 为统计系数; $s$ 为测点周围温度计个数。

时效分量由堆石料流变特性产生,而堆石料流变与混凝土和岩石流变有一定的相似性,可以利用Merchant模型描述堆石料的流变性<sup>[24]</sup>,因此时效变形可以表示为

$$\delta_p = C(1 - e^{-Dt}) \quad (7)$$

式中: $C$ 为时效分量的统计系数; $D$ 为常数,取1/100。

式(7)是在假设库水位不变或者变化小时推导而得,而水库水位是随着时间变化的,每个水库的运行方式不同,水位变化可能会超出上述假设范围。当水压力减少时,堆石料时效变形有一定回弹恢复,受岩石和混凝土蠕变变形推导<sup>[25]</sup>启发,用函数 $g(H, \tau)$ 描述恢复的变形量,此函数与 $H$ 和时间 $\tau$ 有关系。因此,在库水位不断变化时,流变变形的总表达式为

$$\delta_p = C(1 - e^{-Dt}) + C' \int_{\tau}^t (g(H, t) - g(H, \tau)) [1 - e^{-D'(t-\tau)}] d\tau \quad (8)$$

为了避免直接积分的繁琐运算,根据函数逼近思想<sup>[25]</sup>,取一组如式(9)所示的三角函数作为基函数,利用它们线性组合逼近式(8)积分项函数。

$$g(H, \tau) \longleftrightarrow \sum_i (A_i \sin \frac{2\pi i \tau}{365} + B_i \cos \frac{2\pi i \tau}{365}) \quad (9)$$

式(8)中指数衰减项不影响被积函数的周期性。将式(9)代入式(8)并积分,得到仍然以三角函数表示的周期函数。因此,时效变形表达式可写为

$$\delta_p = C(1 - e^{-Dt}) + \sum_{i=1}^{m_2} (E_i \sin \frac{2\pi i\tau}{365} + F_i \cos \frac{2\pi i\tau}{365}) \quad (10)$$

式中： $E_i$ 、 $F_i$ 分别为时效分量中流变变形的统计系数； $m_2$ 取 2，即可达到工程精度要求。

时效分量包含三角函数表达式与传统 HST 模型中温度分量相差无几，但这仅仅只是数学上的相同。在模型物理意义上，此处三角函数是利用傅里叶变换思想，将描述堆石料流变性质复杂式(8)转换为简单的三角函数和，而传统 HST 模型温度分量中含有的三角函数则是为了描述温度周期变化。综上，可以汇总得到表 1 列举的模型假设和使用条件。

表 1 推导 MHTT 模型过程中的假设及其对模型适用性的影响

Table 1 Assumptions in derivation of MHTT model and influences on model applicability

假设	对模型适用性的影响
材料均一、各向同性	远离材料分区线附近测点
半无限空间弹性体	适用于河谷开阔、远离下游坝坡和地基的内部测点
仅考虑长度为 $2l$ 的范围内的水压力荷载	适用于河谷开阔、远离下游坝坡和地基的内部测点

## 2 工程验证

### 2.1 工程概况

为了验证 MHTT 模型解释和预测实际工程水平位移的能力，采用某混凝土面板堆石坝监测数据(钢丝水平位移计监测)进行计算分析。该混凝土面板堆石坝主要分区线如图 4 蓝色虚线所示。图 4 中三角形表示大致满足水压分量表达式原理的材料分区线附近、远离下游坝坡和地基内部测点的区域。选定区域与坝体结构、坝体尺寸和坝体材料性质相关。此区域中有 EX4-2、EX4-3、EX5-3、EX5-4 共 4 个测点，EX5-3 处于材料过渡区附近，可以作为验证假设条件的反例。

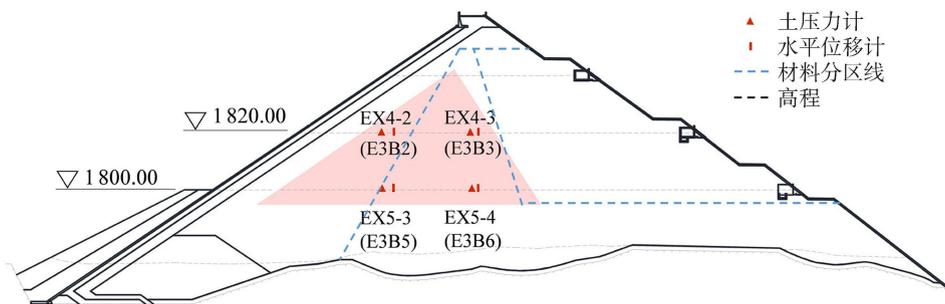


图 4 坝体主要分区设置与测点的相对位置(单位:m)

Fig. 4 Major partitions of dam and relative positions of displacement measuring points(units:m)

监测资料显示，在所选取 4 个测点的同一高程处，安装有相距 3 m 的土压力计，E3B2、E3B3、E3B5、E3B6，分别在 1820 m 高程处和 1800 m 高程处，如图 4 所示。这 4 个土压力计含有温度数据。温度数据为 2015 年 3 月 11 日至 2017 年 6 月 15 日的 822 个数据，如图 5 所示。同样，4 个测点也包含 2015 年 3 月 11 日至 2017 年 6 月 15 日的 822 个水平位移数据，如图 6 所示。

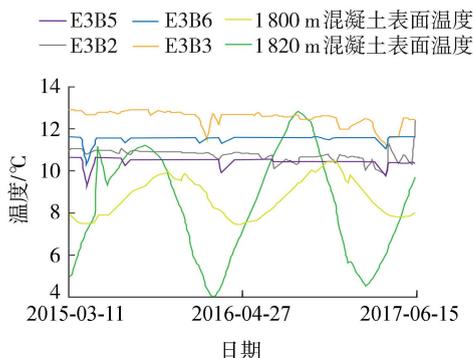


图 5 土压力计温度代替各水平位移测点温度与 1800 m 高程和 1820 m 高程处的混凝土温度

Fig. 5 Temperatures of horizontal displacement measuring points replaced by temperatures of earth pressure gauges, and concrete temperatures at 1800 m elevation and 1820 m elevation

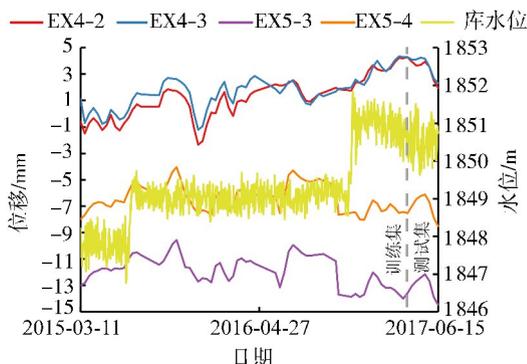


图 6 水平位移测点位移过程线与上游库水位过程线

Fig. 6 Displacement hydrograph of horizontal displacement measuring points and hydrograph of upstream reservoir water level

选取的面板堆石坝坝体监测数据时段是坝体稳定运行时期数据段,如图6所示。所有数据按时间顺序前90%作为训练集,剩余10%则作为测试集。各测点数据特征如表2所示。

为了使模型更加快速准确地分析数据和生成稳定的预测模型,对模型输入因子标准化。并利用统计学指标残差标准差、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)定量描述模型的表现能力。

2.2 预测结果分析

2.2.1 偏回归确定统计系数

在确定模型统计系数  $A_0$ 、 $A$ 、 $B_k$ 、 $C$ 、 $E_i$ 、 $F_i$  时,为减少因子间共线性问题<sup>[6, 26]</sup>,逐步回归算法在回归过程中会剔除对回归没有显著提升的因子,但这些因子含有有效信息<sup>[27]</sup>,而偏回归能最大可能保留因子中的有效信息<sup>[28]</sup>。交叉验证是合理选择主成分个数的统计学方法,本文采用10折交叉验证<sup>[29]</sup>确定主成分个数,并利用均方预测误差(mean square estimate error, MSEP)与主成分个数间的关系(图7)确定需要的最小主成分个数。曲线趋于稳定的最小主成分个数为模型需要的主成分个数,由图7可知,MHTT模型选取4个主成分,HTT模型选取5个主成分,HT-JU模型选取1个主成分。

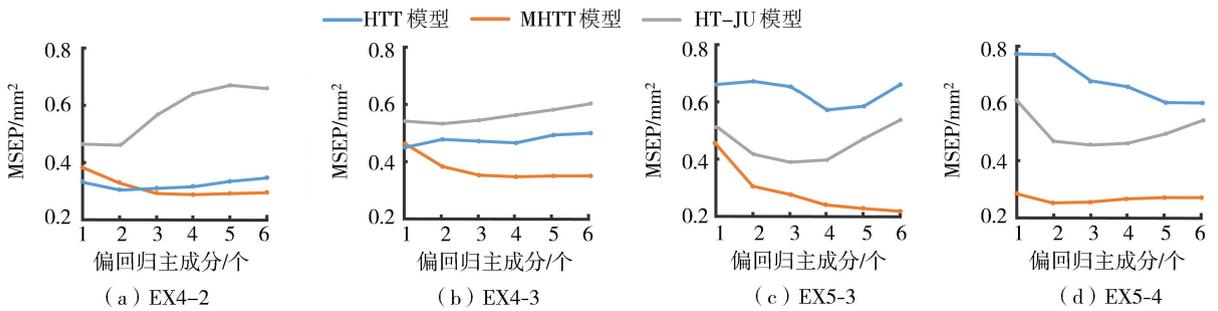


图7 均方预测误差与主成分的关系

Fig. 7 Relationship between mean square estimate error and principal components

2.2.2 预测结果

利用偏回归算法求得的4个测点对应的3个模型的统计系数见表3~5(表5中的三角函数是MHTT模型中时效分量的一部分)。这些取值是根据模型对数据解释和预测能力筛选进入模型的,偏回归算法求解后发现水位因子高次项统计系数都很小。

表3 HTT模型统计系数

Table 3 Statistical coefficients of HTT model

测点	常数项	$f_T$	时效分量 $1-e^{-t/100}$	水压分量			
				$H_0$	$H_0^2$	$H_0^3$	$H_0^4$
EX4-2	-5.93	-1.34	3.75	0.13	$8.66 \times 10^{-4}$	$7.71 \times 10^{-6}$	$7.73 \times 10^{-8}$
EX4-3	-18.52	-0.41	2.18	0.16	$1.05 \times 10^{-3}$	$8.87 \times 10^{-6}$	$8.45 \times 10^{-8}$
EX5-3	207.46	-19.12	-7.19	0.03	-53.5	-15.7	-23.9
EX5-4	-695.57	0	1.45	11.5	$2.47 \times 10^{-2}$	-27.4	-73.7

注:  $T$  为以实测温度表示的温度分量。

表4 MHTT模型统计系数

Table 4 Statistical coefficients of MHTT model

测点	常数项	$f_T$	时效分量					水压分量 $H_0$
			$1-e^{-t/100}$	$\sin 2\pi t/365$	$\sin 4\pi t/365$	$\cos 2\pi t/365$	$\cos 4\pi t/365$	
EX4-2	-61.59	-0.22	4.69	0.64	0.23	-0.25	0.35	0.85
EX4-3	-55.02	-0.62	1.42	0.35	0.22	-0.2	0.49	0.85
EX5-3	-218.91	19.21	5.72	0.50	-0.33	-1.07	0.67	-0.03
EX5-4	-2.30	$1.37 \times 10^{-11}$	0.31	0.41	-0.15	-0.96	0.48	-0.05

表 5 HT-JU 模型在 4 个水平位移测点的统计系数

Table 5 Statistical coefficients of HT-JU model

测点	常数项	时效分量			水压分量					
		$H^\alpha e^{-t/100}$	$e^{-t/100}$	$H^n$	$\bar{H}_i^{0.8}$				$(\frac{\Delta H}{\Delta t_j})^{0.8}$	
					7	9	11	13	5	6
EX4-2	-182.3	$4.29 \times 10^{-7}$	$1.94 \times 10^{-3}$	12.39	16.89	16.77	16.94	17.09	-0.12	-0.23
EX4-3	-145.94	$3.31 \times 10^{-7}$	$1.49 \times 10^{-3}$	10.34	13.45	13.43	13.61	13.76	-0.14	-0.26
EX5-3	89.51	-30.6	-13.5	-8.21	-8.72	-8.94	-9.04	-9.01	-0.1	-0.11
EX5-4	57.96	-20.6	-63.1	-5.81	-5.23	-5.53	-5.63	-5.57	-0.07	-0.17

测点	水压分量 $(\frac{\Delta H}{\Delta t_j})^{0.8}$									
	9	11	13	15	16	17	19	25	27	29
EX4-2	-0.34	-0.32	0.10	-0.11	-0.17	-0.14	-0.29	-0.31	-0.09	-0.13
EX4-3	-0.42	-0.30	0.09	-0.24	-0.23	-0.19	-0.21	-0.24	-0.27	-0.08
EX5-3	0.21	-0.15	0.09	-0.01	-0.07	-0.17	0.14	-0.02	-0.14	-0.04
EX5-4	0.13	-0.25	0.10	0.02	-0.07	-0.17	0.15	-0.18	-0.17	-0.07

注:  $H_i$  为前  $i$  天上游平均水头,  $i$  取值为 7、9、11、13;  $\Delta H/\Delta t_j$  为前  $j$  天上游库水位变化速率,  $j$  取值为 5、6、9、11、13、15、16、17、19、25、27、29。

求得模型统计系数后,水压分量、温度分量和时效分量对水平位移的贡献即可算出。利用变量投影重要性指标(variable importance in projection, VIP)提供衡量标准,以验证温度分量在模型中的贡献占比,具体的计算公式参见文献[30]。

对比图 8 实测温度表示的温度分量在模型中的贡献,可以发现,HTT 模型温度分量最大贡献占比达到了 28%,MHTT 模型中也可以达到 23%,2 个模型中最小贡献占比为 0%。结合测点相对位置(图 4)发现,测点越接近上游坝坡,例如 EX4-2 和 EX5-3 测点,温度分量的贡献占比越高;越接近于坝体内部,例如 EX4-3 和 EX5-4 测点,温度分量贡献占比越小,甚至是没有贡献,与温度幅值随深度增加逐渐减小的规律相符合。这说明部分测点不能简单地忽略温度分量的影响,需要进行综合考虑。

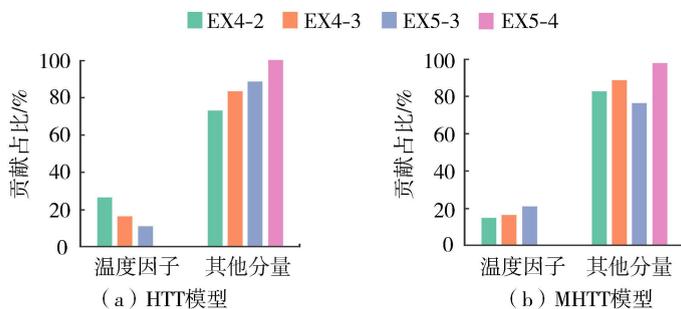


图 8 HTT 模型和 MHTT 模型中各个分量贡献占比

Fig. 8 Contribution ratios of each component in HTT model and MHTT model

残差标准差代表实测值与模型计算值差值的离散程度,它是从差值的角度衡量非线性预测模型好坏的指标。残差标准差越小,差值离散程度越小,计算值与实测值越接近,即模型的表现能力越好。由表 6 可知,除 EX5-4 测点外,4 个测点残差标准差指标值中 MHTT 模型最小、HTT 模型稍大、HT-JU 模型最大,说明 MHTT 模型能对数据做出较好的外延预测。训练集中,MHTT 模型在 4 个测点的 RMSE 均为最小,有最好的解释数据能力。但在测试集,不同的测点所对应的最优模型不同,MHTT 模型仅在 EX4-3 测点表现出了优势,在 EX5-3、EX5-4 测点 HT-JU 表现出了优势,这一点与残差标准差指标显示的模型优劣保持一致。因为 EX5-3、EX5-4 测点在坝体中的相对位置符合 HT-JU 模型中土体侧限压缩的假设条件<sup>[14]</sup>。平均绝对误差 MAE 表示模型计算的绝对误差的平均值,其值越小模型拟合效果越优。MAE 值清晰地显示出 MHTT 模型在训练集解释数据和测试集预测数据的 MAE 均为最小,表明 MHTT 模型最优。

综合不同方面评价指标,满足 MHTT 模型条件的测点,在训练集中残差标准差、RMSE 和 MAE 都是最小的且差距明显,说明 MHTT 模型在训练集中对数据的解释能力是 3 个模型中最优的,能够较好地解释面板堆石坝水平位移的物理机制。

### 3 结 语

本文建立的考虑温度分量的 MHTT 模型,在一定程度上阐明了面板堆石坝水平位移的物理响应机制,相比于传统 HTT 模型和 HT-JU 模型,MHTT 模型能够更加准确地对监测数据做出合理解释。工程实例验证结果表明,MHTT 模型解释数据的能力优于 HTT 模型和 HT-JU 模型,对面板堆石坝水平位移的物理机制阐释能力较强。

综合不同评价指标,在测试集中,MHTT 模型对 EX4-2、EX4-3 测点有相对准确的预测,而在 EX5-3 和 EX5-4 测点中 HT-JU 模型展示出了更好的数据预测能力,这与模型的适用条件有关系。HT-JU 模型更加适用于侧限压缩状态影响占比大的 EX5-3 和 EX5-4 测点的预测,MHTT 模型更适用于水压力荷载占比大的 EX4-2 和 EX4-3 测点。在以后的研究中,MHTT 模型需要进一步考虑测点的应力状态,以建立适用范围更大、更完备的水平位移分析物理模型。

#### 参考文献:

- [1] SALAZAR F, MORAN R, TOLEDO M A, et al. Data-based models for the prediction of dam behavior: a review and some methodological considerations [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017, 24(1): 1-21.
- [2] 谷艳昌, 吴云星, 黄海兵, 等. 基于遗传算法优化支持向量机的大坝安全性态预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 419-425. (GU Yanchang, WU Yunxing, HUANG Haibing, et al. Prediction model of dam safety behavior based on genetic algorithm optimized support vector machine [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 419-425. (in Chinese))
- [3] LI F, WANG Z, LIU G. Towards an error correction model for dam monitoring data analysis based on cointegration theory [J]. Structural Safety, 2013, 43: 12-20.
- [4] HU J, WU S. Statistical modeling for deformation analysis of concrete arch dams with influential horizontal cracks [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(2): 546-562.
- [5] LI F, WANG Z, LIU G, et al. Hydrostatic seasonal state model for monitoring data analysis of concrete dams [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11(12): 1616-1631.
- [6] 魏超, 田振华, 张博. 李家峡拱坝水平位移监测资料统计模型对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 651-654. (WEI Chao, TIAN Zhenhua, ZHANG Bo. Statistical model analysis of observed data of horizontal displacement of Lijiaxia Arch Dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(6): 651-654. (in Chinese))
- [7] 周兰庭, 柳志坤, 龚云柱. 基于多重分形的混凝土重力坝水平位移波动分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 76-84. (ZHOU Lanting, LIU Zhikun, GONG Yunzhu. Prediction model of dam safety behavior based on genetic algorithm optimized support vector machine [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 76-84. (in Chinese))
- [8] 胡江, 马福恒, 王春红. 特高拱坝变形监测的分区及其模型构建方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 148-154. (HU Jiang, MA Fuheng, WANG Chunhong. Zoned deformation monitoring and its model building method for super high arch dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 148-154. (in Chinese))
- [9] GAMSE S, ZHOU W, TAN F, et al. Hydrostatic-season-time model updating using Bayesian model class selection [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 169: 40-50.

表6 3个模型解释和预测数据的残差标准差、均方根误差、平均绝对误差

Table 6 Residual standard deviations of three prediction models for each horizontal displacement measurement

测点	残差标准差/mm					
	训练集			测试集		
	HTT	HT-JU	MHTT	HTT	HT-JU	MHTT
EX4-2	0.851	0.960	0.764	1.082	0.789	0.998
EX4-3	0.855	0.915	0.710	0.755	0.754	0.604
EX5-3	0.892	0.802	0.668	0.979	0.814	0.802
EX5-4	0.872	0.784	0.642	0.875	0.867	0.949
测点	均方根误差(RMSE)/mm					
	训练集			测试集		
	HTT	HT-JU	MHTT	HTT	HT-JU	MHTT
EX4-2	0.844	0.952	0.758	1.037	1.414	1.016
EX4-3	0.848	0.908	0.704	0.757	1.252	0.600
EX5-3	0.885	0.796	0.663	0.990	1.283	0.753
EX5-4	0.865	0.778	0.637	0.860	1.025	0.978
测点	平均绝对误差(MAE)/mm					
	训练集			测试集		
	HTT	HT-JU	MHTT	HTT	HT-JU	MHTT
EX4-2	0.618	0.705	0.600	0.924	1.241	0.756
EX4-3	0.670	0.693	0.577	0.696	1.036	0.522
EX5-3	0.728	0.622	0.525	0.760	1.033	0.652
EX5-4	0.680	0.617	0.499	0.827	0.841	0.743

- [10] GAMSE S, OBERGUG, GENBERGER M. Assessment of long-term coordinate time series using hydrostatic-season-time model for rock-fill embankment dam[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(1): e1859.
- [11] SIGTRYGGSDÓTTIR F, SNAEJJOERNSSON J, GRANDE L. Statistical model for dam-settlement prediction and structural-health assessment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(9): 04018059.
- [12] 朱安龙, 张胤, 廖洁, 等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(1): 48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(1): 48-55. (in Chinese))
- [13] 陆静, 高志永. 坝体材料分区对高面板堆石坝应力变形的影响[J]. *人民黄河*, 2016, 38(2): 90-94. (LU Jing, GAO Zhiyong. Influence of material partition on stress and deformation of high CFRD[J]. *Yellow River*, 2016, 38(2): 90-94. (in Chinese))
- [14] 鞠石泉. 面板堆石坝坝体变形监控模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [15] 华倩宇, 苏怀智, 杨立夫. 考虑水化热影响的混凝土坝位移监测统计分析模型及其解析[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(5): 62-70. (HUA Qianyu, SU Huaizhi, YANG Lifu. Qualification and statistical analysis of residual hydration heat influence on concrete dam displacement[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(5): 62-70. (in Chinese))
- [16] TAORMINA R, CHAU K. Data-driven input variable selection for rainfall-runoff modeling using binary-coded particle swarm optimization and extreme learning machines[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1617-1632.
- [17] SU H, WEN Z, SUN X, et al. Time-varying identification model for dam behavior considering structural reinforcement[J]. *Structural Safety*, 2015, 57: 1-7.
- [18] LI F, WANG Z, LIU G. Towards an error correction model for dam monitoring data analysis based on Cointegration Theory[J]. *Structural Safety*, 2013, 43: 12-20.
- [19] WEI B, YUAN D, LI H, et al. Combination forecast model for concrete dam displacement considering residual correction[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 18(1): 232-244.
- [20] 朱亚林, 孔宪京, 邹德高, 等. 河谷地形对高土石坝动力反应特性影响的分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1590-1597. (ZHU Yalin, KONG Xianjing, ZHOU Degao. Effect of valley topography on dynamic response properties of high earth-rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1590-1597. (in Chinese))
- [21] PRAKASH G, SADHU A, NARASIMHAN S, et al. Initial service life data towards structural health monitoring of a concrete arch dam[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(1): e2036.
- [22] SALAZAR F, TOLEDO M A, OÑATE E, et al. An empirical comparison of machine learning techniques for dam behaviour modelling[J]. *Structural Safety*, 2015, 56: 9-17.
- [23] MITCHELL J K, SOGA K. *Fundamentals of soil behavior*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. *水利水运科学研究*, 1994(4): 335-342. (SHEN Zhujiang. A creep model of rock-fill material and determination of its parameters by back analysis[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1994(4): 335-342. (in Chinese))
- [25] 吴中如. *水工建筑物安全监控理论及其应用*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [26] LOMBARDI G, AMBERG F, DARBRE G. Algorithm for the prediction of functional delays in the behaviour of concrete dams[J]. *Hydropower & Dams International Journal*, 2008, 15(3): 111.
- [27] KANG F, LIU J, LI J, et al. Concrete dam deformation prediction model for health monitoring based on extreme learning machine[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(10): e1997.
- [28] 杨杰. 大坝安全监控中若干不确定性问题的分析方法与应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [29] MCLACHLA N, GEOFFREY J, KIM-ANH D, et al. Analyzing microarray gene expression data[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [30] MEHMOOD T, LILAND K H, SNIPEN L, et al. A review of variable selection methods in Partial Least Squares Regression[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2012, 118: 62-69.

(收稿日期: 2021-10-15 编辑: 刘晓艳)