DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0440
文章编号:1671-8844(2026)09-1441-10

基于PPR无假定建模的湿化变形计算模型

何建新[1,2,3],耿旭[1],杨海华[1,2],高鹏展[1]

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 堤坝工程安全及灾害防治兵团重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为准确描述坡积碎石土湿化变形规律,选取3组典型级配的试样,采用固结仪开展了单线法固结湿化试验,采用投影寻踪回归(projection pursuit regression, PPR)无假定建模技术建立了湿化变形计算模型。结果表明:不同级配的试样在不同竖向应力作用下,湿化应变最大值为1.72%,最小值为0.04%,湿化变形量占总变形量的比例为11.07%~61.67%,湿化应变随竖向应力增大呈对数增长趋势。将PPR技术应用于模型的构建中,避免了传统建模方法中需预设模型形式的不足;采用统计学方法对比分析了所建立模型和双曲线模型对湿化变形时程曲线的拟合精度和预测能力,所建立的湿化变形PPR模型无论对于湿化稳定应变还是湿化变形时程曲线均表现出较高的拟合精度和预测精度,且可同时考虑多因素的影响,具有一定的工程应用价值。

关键词: 坡积碎石土;湿化变形;投影寻踪回归;计算模型
中图分类号: TV 41　**文献标志码:** A

Calculation model of wetting deformation based on PPR assumption-free modeling

HE Jianxin[1,2,3], GENG Xu[1], YANG Haihua[1,2], GAO Pengzhan[1]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Key Laboratory of Dam Construction Safety and Disaster Prevention of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to accurately describe the wetting deformation law of slope-deposit gravel soil, three groups of samples with typical gradations were selected, and single-line consolidation wetting tests were carried out with a consolidometer. An assumption-free calculation model of wetting deformation was established using the projection pursuit regression (PPR) method. The results showed that the maximum value of wetting strain is 1.72%, the minimum value is 0.04%, the ratio of wetting deformation to total deformation is 11.07%-61.67%, and wetting strain increases logarithmically with increasing vertical stress. PPR technology was applied to model construction, which avoided the limitation of requiring a predefined model form inherent in traditional modeling methods. Statistical methods were used to compare and analyze the fitting accuracy and prediction performance of the proposed model and the hyperbolic model for wetting deformation time-history curves. The proposed wetting deformation PPR model has high fitting accuracy and prediction accuracy for both

收稿日期:2023-10-12
作者简介:何建新(1973-),男,教授,硕士生导师,主要从事岩土材料防渗性能、力学特性研究,E-mall:xjauhjx1973@163.com。
基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金面上基金(编号:2022D01A200)。

本文引用格式:何建新,耿旭,杨海华,等.基于PPR无假定建模的湿化变形计算模型[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1441-1450.

Citation: HE Jianxin, GENG Xu, YANG Haihua, et al. Calculation model of wetting deformation based on PPR assumption-free modeling[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9):1441-1450.

the stable wetting strain and the wetting deformation time-history curves, and can consider the effects of multiple factors simultaneously, endowing it with favorable engineering application prospects.

Key words: slope-deposit gravel soil; wetting deformation; projection pursuit regression; calculation model

土石坝湿化变形是指在水库初次蓄水、降雨入渗或水位大幅变化等条件下,坝壳料因浸水软化发生颗粒破碎、滑移等现象而产生的变形[1-2]。土石坝的变形控制是其设计和安全稳定运行的重要内容,不均匀变形将引发坝体裂缝,坝体不同部位的裂缝对坝体安全性有不同影响。前人对相关工程资料的研究与总结表明,湿化变形轻则会在坝顶引起湿陷裂缝,重则会在坝肩等重要部位产生深层裂缝,甚至形成渗漏通道,威胁坝体的安全[3-6]。

材料的应力-应变关系是对材料在受力状态下的力学性状的定量描述,可采用本构方程或本构模型表示。目前,国内外学者对湿化变形的研究主要建立在土工试验成果的基础上:即先对试验数据的分布特征作出假定,据此构造力学表达式并建立模型,再结合试验数据,按照一定准则确定模型的计算参数。这种方法属于验证性数据分析方法,建模过程中不可避免地会引入人为假定,使得各本构模型在描述堆石料的湿化变形规律时存在拟合和预测精度较差的缺陷,且模型受筑坝料母岩岩性、风化程度、颗粒形状等因素影响,模型适用范围有限。其中具有代表性的有 C_w-D_w(C_w为湿化体积应变,D_w为线性拟合常数)模型[7]、改进 C_w-D_w模型[8-9]、湿化割线模型[10]、全量初应力法模型[11],以及在上述模型基础上引入应力比[12]、颗粒硬度[13]等参数的改进模型。湿化模型主要用于描述湿化轴向应变、湿化剪切应变或湿化体积变形与围压或应力水平的关系,其中湿化轴向应变与应力水平的关系与单轴固结湿化试验中轴向应变和竖向应力的关系较为接近[14],且采用固结仪进行湿化试验时,仅需控制竖向应力、测量竖向变形,试验操作较为简便,影响因素较少,成果较为可靠。

投影寻踪回归(projection pursuit regression, PPR)是一种通过对高维数据投影降维、提取可有效反映数据结构特征信息的无假定建模技术,属于探索性数据分析方法[15],能够避免传统建模方法中需对原始数据结构人为施加假定、进行人为分割与变换的局限,适用于描述高维线性及多参数非线性系统中自变量与因变量间的依存关系[16]。目前,该技术在沥青混凝土配合比优选[17]、偏应力预测[18]、砂砾石料应力-应变规律拟合[19]、综合热学性能优化[20]、三元低热水泥基砂浆热学与力学性能多目标配合比优化[21]等领域已得到成功推广与应用,这为试验数据内在规律的挖掘、描述提供了新途径。

1 湿化试验方法及方案

1.1 湿化试验

堆石料湿化试验方法分为单线法和双线法,前人认为单线法试验过程模拟的受力状况符合堆石料工程实际,本文采用单线法进行湿化试验研究,试验在大型固结仪上开展,试样尺寸为∅500 mm×262 mm,仪器最大竖向压力为2.4 MPa,采用位移测微计系统采集竖向位移。

本文试验过程划分为2个阶段:第1阶段对试样施加竖向应力 σ_1,并同步采集竖向位移;第2阶段待风干试样所受 σ_1 达到设计值且变形稳定后,保持该 σ_1 不变,使试样自下而上逐渐湿化饱和,直至湿化变形稳定。目前相关研究中,2个阶段的变形稳定判据尚未形成统一标准。参照规范[22],本文以轴向变形速率作为判稳依据,2个阶段的变形稳定判据均为轴向变形速率≤0.001 mm/min。

1.2 试验材料及方案

试验材料取自新疆博乐市保尔德水利枢纽工程现场,采样点位于保尔德水库大坝左岸岸坡坝体轮廓线内的山脚处,该处堆积有约26.7万 m^3 崩坡积物,大多为土石混合料,具有典型宽级配特征,最大可见粒径为1 000 mm。为研究此类填筑料在不同级配、不同 σ_1 条件下的湿化变形规律,本文试验选择3组代表性级配开展湿化试验。受试验仪器限制,本文按照相关土工试验规范对原级配进行等量替代处理。试验材料级配及相关物理性质指标见表1。针对3种级配试样,选取5级 σ_1,分别为400、800、1 200、1 600、2 000 kPa,共开展15个工况的固结湿化试验。

2 结果与分析

2.1 湿化试验结果

不同级配试样在各 σ_1 下的湿化应变 ε_w 时程曲线见图1。由图1可知:在湿化作用下,变形速率在湿化初期处于较高水平,随试验时间延长逐渐减小,直至变形稳定;级配与 σ_1 均对湿化变形规律具有显著影响。3组试样在各 σ_1 下的湿化变形量见表2。

表 1　试验材料级配及相关物理性质指标

Table 1　Gradation and related physical property indexes of test materials

试样编号	粒组含量/%					最大干密度/($g\cdot cm^{-3}$)	最小干密度/($g\cdot cm^{-3}$)	试验干密度/($g\cdot cm^{-3}$)
	40 mm≤粒径<60 mm	20 mm≤粒径<40 mm	10 mm≤粒径<20 mm	5 mm≤粒径<10 mm	粒径<5 mm			
1	18.4	23.9	16.9	12.0	28.9	2.19	1.66	2.09
2	21.6	26.7	17.6	11.6	22.5	2.23	1.68	2.13
3	27.7	30.8	17.7	10.2	13.7	2.14	1.64	2.05

表 2 中：湿化变形为试样在试验第 2 阶段产生的变形量；ε_w为湿化变形量与试样初始高度的比值；湿化变形占比定义为湿化变形量与试验过程总变形量的比值。结果表明：3 组不同级配试样在不同σ_1下，ε_w最大值为 1.72%，最小值为 0.04%，湿化变形占比为 11.07%～61.67%；总体呈现σ_1越大、级配越细，固结压缩量与湿化变形量越大的规律，可见，ε_w在各工况下均不可忽视，且其占总应变的比例较高。

2.2　湿化变形规律分析

湿化试验结果表明，σ_1对湿化变形量及其发展规律具有显著影响。本文将 3 组不同级配试样的ε_w与σ_1/P_a（P_a为标准大气压，取 101 kPa）的关系曲线绘制于图 2。可见，随σ_1增大，ε_w呈明显增长趋势，可较好地用对数曲线描述；对于各组试样，低σ_1区间内ε_w的增长幅度显著大于高σ_1区间。分析认为，σ_1增大会显著提高颗粒间的接触力，易引发颗粒破碎；破碎的颗粒相互填充，改变颗粒间的接触形式，形成强度更高的颗粒集合体，使变形趋于稳定，因此湿化作用产生的变形增量随之减小。

2.3　双曲线固结湿化模型参数整理

土的本构关系是岩土工程界备受关注的核心研究内容之一，应力-应变关系的准确描述是构建本构模型的关键。国内外学者基于不同试验设备，建立了多种堆石料湿化经验模型。本文采用张延亿等[12]提出的双曲线固结湿化变形模型进行分析。若以湿化变形时间t_w为横轴、ε_w为纵轴，则双曲线函数表达式为

$$\frac{t_w}{\varepsilon_w}=a+bt_w \tag{1}$$

式中：a、b为模型参数。

以t_w为横轴、t_w/ε_w为纵轴，本文将 3 组不同级配试样在各σ_1下的试验数据绘制于图 3，可见二者关系可较好地用线性函数表达。其中：a为拟合直线与纵轴的截距，对应试样初始湿化变形速率的倒数，a越大，则初始湿化变形速率越小；b为拟合直线的斜率，对应试样最终的$1/\varepsilon_w$，b越大，则最终ε_w越小。由图 3 可知：a、b受σ_1影响显著。本文分别以a、

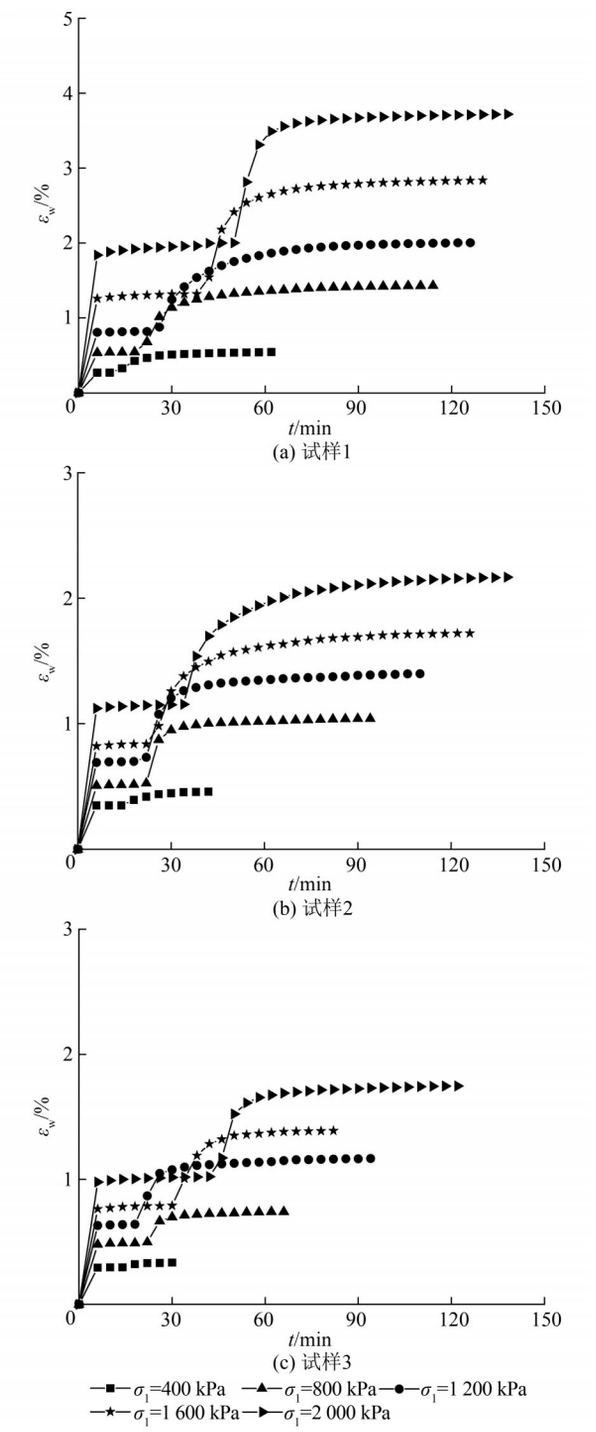


图 1　不同级配试样在各σ_1下的湿化变形试验结果

Fig.1　Results of wetting deformation test of specimens with different gradations under various σ_1

表2 单线法湿化变形试验结果

Table 2 Results of wetting deformation test by single-line method

试样编号	σ_1/kPa	湿化变形/mm	ε_w/%	总应变/%	湿化变形占比/%
1	400	0.72	0.27	0.54	50.23
	800	2.31	0.88	1.43	61.67
	1 200	3.10	1.18	2.00	59.11
	1 600	3.98	1.52	2.85	53.33
	2 000	4.50	1.72	3.72	46.19
2	400	0.29	0.11	0.46	24.03
	800	1.38	0.52	1.04	50.30
	1 200	1.83	0.70	1.40	50.00
	1 600	2.31	0.88	1.72	51.11
	2 000	2.65	1.01	2.17	46.71
3	400	0.10	0.04	0.33	11.07
	800	0.66	0.25	0.74	33.74
	1 200	1.38	0.53	1.17	45.03
	1 600	1.57	0.60	1.39	43.05
	2 000	1.90	0.73	1.75	41.51

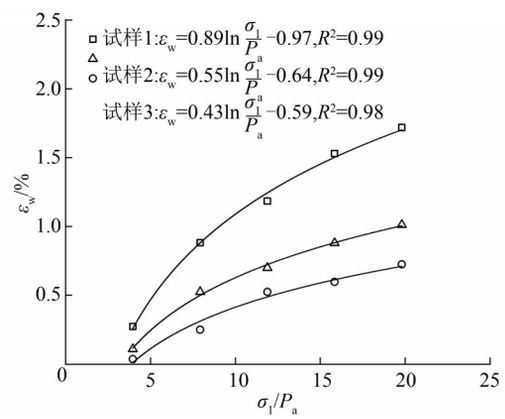


图2 ε_w与σ_1的关系

Fig.2 Relationship between ε_w and σ_1

b为因变量,以σ_1/P_a为自变量进行拟合(图4),可得a、b与σ_1/P_a均满足以下幂函数关系:

$$a=c\left(\frac{\sigma_1}{P_a}\right)^d \tag{2}$$

$$b=m\left(\frac{\sigma_1}{P_a}\right)^r \tag{3}$$

式中:c、d、m、r均为试验拟合参数。

将式(2)、(3)代入式(1),可得到固结湿化变形经验模型表达式:

$$\varepsilon_w=\frac{t_w}{c\left(\frac{\sigma_1}{P_a}\right)^d+m\left(\frac{\sigma_1}{P_a}\right)^r t_w} \tag{4}$$

将表3中的模型参数代入式(4),便可计算得到

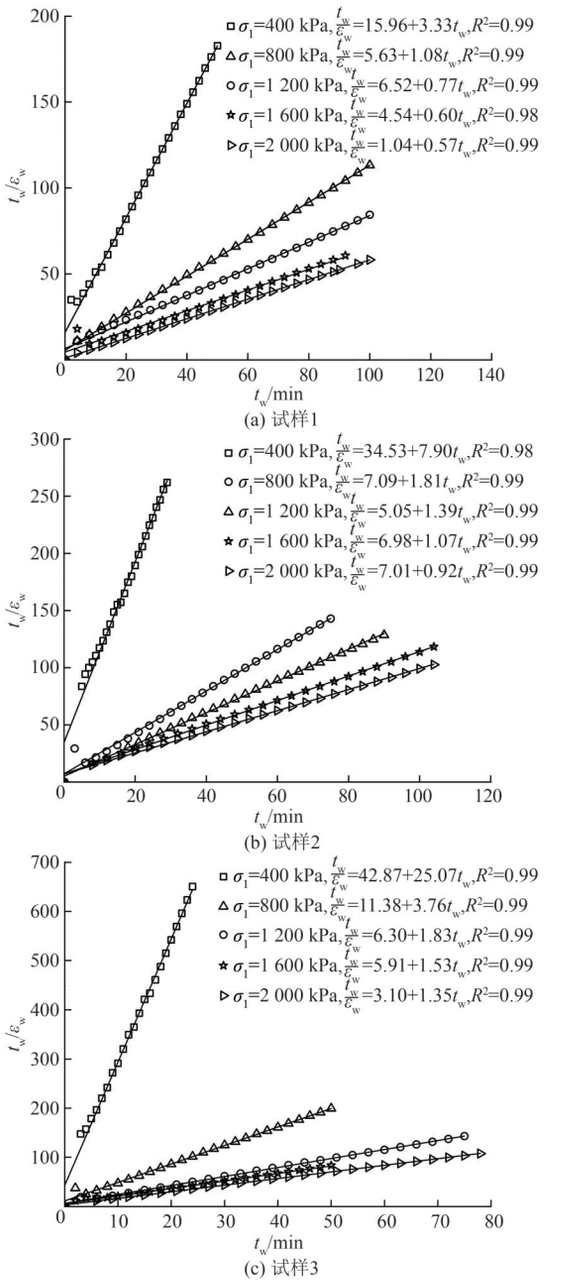


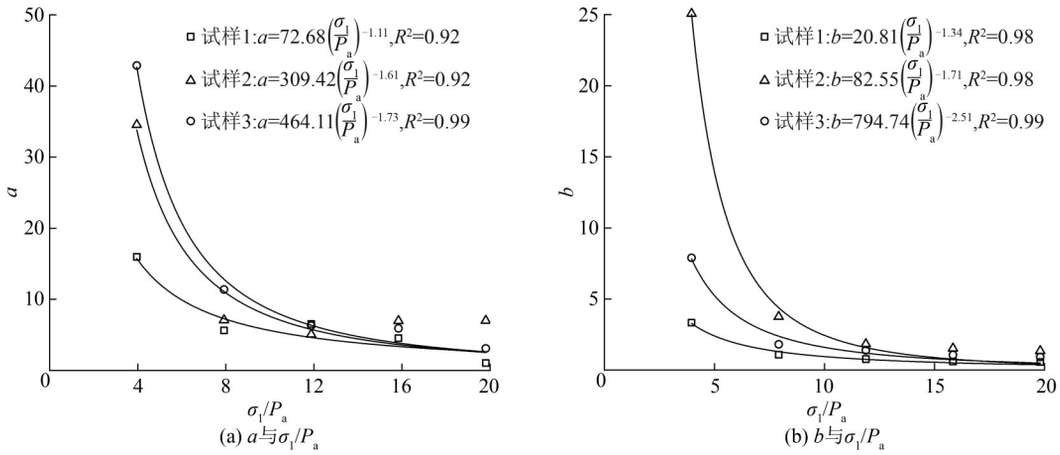
图3 不同试样在各σ_1下t_w/ε_w与t_w的关系

Fig.3 Relationships between t_w/ε_w and t_w for different specimens under various σ_1

湿化变形时程模型值。本文将试验数据与模型曲线一同绘于图5。

平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)是评价模型模拟效果的重要指标,本文以试验值为基准,采用MAPE定量评价模型对试验全过程的拟合效果,同时采用相对误差和绝对误差对比分析模型计算的湿化稳定应变与试验结果的差异。MAPE的计算方法为

$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{n}\sum_{s=1}^{n}\left|\frac{\varepsilon_{wt}^s-\varepsilon_{we}^s}{\varepsilon_{we}^s}\right|\times 100\% \tag{5}$$



(a) a与σ_1/P_a　　(b) b与σ_1/P_a

图 4　模型参数 a、b 与 σ_1/P_a 的关系

Fig.4　Relationships of model parameters a and b versus σ_1/P_a

表 3　湿化模型参数

Table 3　Parameters of wetting deformation model

试样编号	c	d	m	r
1	72.68	−1.11	20.81	−1.34
2	309.42	−1.61	82.55	−1.71
3	464.11	−1.73	794.74	−2.51

式中：ε_{we}^{s} 为第 s 个试验实测湿化应变，%；ε_{wt}^{i} 为第 s 个模型计算湿化应变，%；n 为试验数据点数量；$s=1,2,\cdots,n$。

本文将各工况下 ε_w 试验值、ε_w 双曲线模型值、绝对误差、相对误差及MAPE汇总于表4。对比可知，无论从绝对误差还是相对误差来看，3组试样的模型拟合值在 $\sigma_1\leqslant 1\,200$ kPa时精度较好，绝对误差在±0.13%范围内波动，相对误差范围为0～25.00%；但高 σ_1 条件下的预测效果较差，且试样级配越粗，高 σ_1 下的拟合偏差越大。从湿化变形时程曲线的整体拟合效果来看，MAPE离散性较大，无明显变化规律，表明该模型整体拟合精度有限，且不同级配的试样需分别率定模型参数。其原因为：低 σ_1 下，固结压缩阶段试样压缩程度较低、孔隙率较高，颗粒破碎现象不明显，颗粒间以棱角接触为主；浸水湿化后颗粒强度下降，破碎现象显著，因此湿化变形量大，占总变形的比例较高。高 σ_1 下，固结压缩阶段试样被进一步压实，孔隙率进一步降低，颗粒间仍以棱角接触为主，但由于 σ_1 超过部分软弱颗粒的强度，颗粒破碎现象明显，压缩变形量大，形成强度较高的颗粒集合体，颗粒棱角接触作用减弱；浸水湿化后颗粒破碎现象不显著，因此湿化变形量占总变形量的比例显著下降。试样级配越粗，粒径小于5 mm的颗粒含量越低，上述现象越显著，导致模型拟合的湿化变形值高于试验值。此外，模型参数 a、b 的拟合效果不佳，分析认为所采用的幂函数拟合形式不合理：当 σ_1 趋于无穷大时，试样在固结压缩阶段会形成强度极高、孔隙率近乎为0的理想集合体，湿化变形将趋近于0，而实际工程中 σ_1 存在上限，且湿化变形占比随应力增大逐渐降低，参数 a 存在极限值，采用幂函数拟合会导致其随 σ_1 增大无限趋近于0，与实际物理规律不符。

3　坡积碎石土湿化变形PPR模型

3.1　模型的构建

针对双曲线固结湿化模型拟合误差较大的问题，本文采用PPR无假定建模方法对试验材料的湿化变形规律进行分析，以期准确描述坡积碎石土在不同条件下的湿化变形规律。PPR的基本思想是将高维数据“投影降维”后，以极小化投影结果与实测结果的偏差为准则，对“投影”进行寻优，以达到对原数据进行分析和描述的目的。设 $(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})$ 为一组随机变量，其中 $\boldsymbol{Y}$ 为 Q 维随机变量，$\boldsymbol{X}$ 为 P 维随机变量，PPR根据 n 组观测样本 $(\boldsymbol{X}_s,\boldsymbol{Y}_s)$，采用一系列岭函数对投影方向上的 $\boldsymbol{X}$ 进行加权平均来逼近回归函数 $F(\boldsymbol{x})=\mathrm{E}(\boldsymbol{Y}|\boldsymbol{X})$。PPR模型表示为

$$F(\boldsymbol{x})=\mathrm{E}(y_i|x_1,x_2,\cdots,x_P)=\bar{y}_i+\sum_{j=1}^{M}\beta_j l_j\left(\sum_{k=1}^{P}\alpha_{jk}x_k\right) \tag{6}$$

式中：$\mathrm{E}(y_i|x_1,x_2,\cdots,x_P)$ 为给定 $x_1,x_2,\cdots,x_P$ 条件下第 i 维响应变量 y_i 的条件数学期望，$i=1,2,\cdots,Q$；x_k 为第 k 个自变量，$k=1,2,\cdots,P$；$\bar{y}_i$ 为第 i 维因变量的 n 次观测结果的样本均值；M 为探寻的岭函数数量上限；β_j 为第 j 个岭函数的权重系数；$l_j(\cdot)$ 为第 j

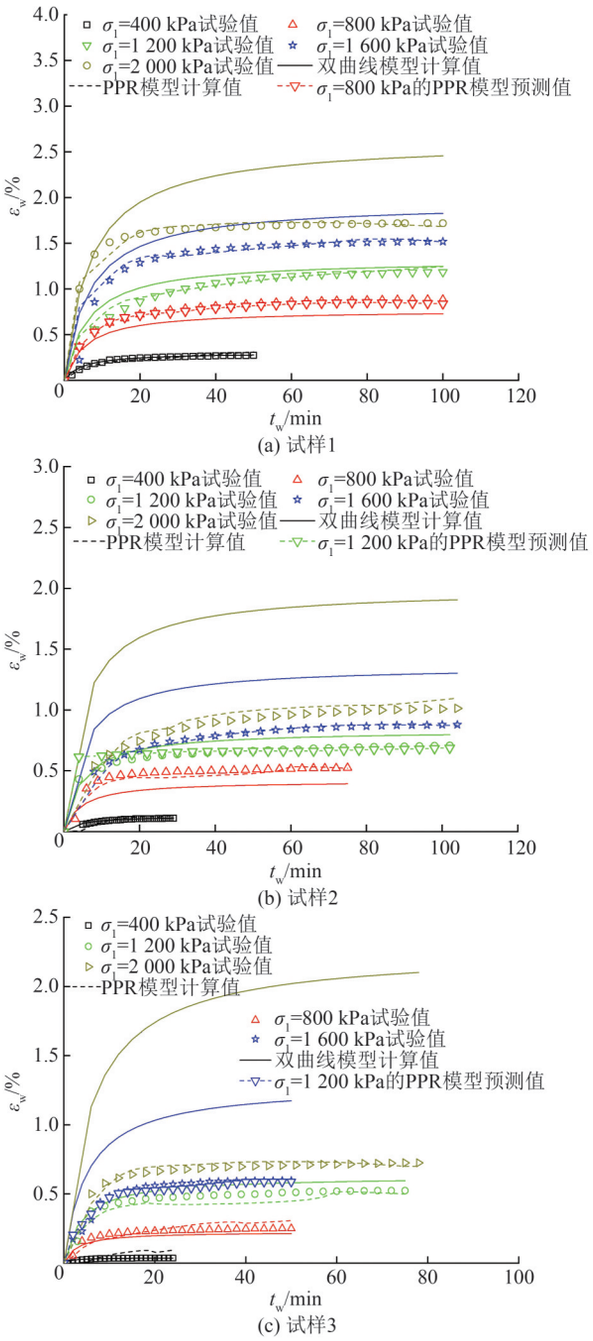


图 5 固结湿化变形试验结果与模型计算结果时程曲线

Fig.5 Time-history curves of test results and model-calculated results for consolidation-wetting deformation

个岭函数,且满足 $E(l_j)=0$、$E(l_j^2)=1$;α_{jk} 为第 j 个投影方向对应第 k 个自变量的分量,满足 $\sum_{k=1}^{P}\alpha_{jk}^2=1$。

在上述约束条件下,PPR 模型通过分层分组迭代交替优化,最终确定各 l_j 及最优个数 MU、β_j 和投影向量 $\boldsymbol{\alpha}_j$ 的最优组合。极小化目标函数可表示为

$$L_2=\min\sum_{i=1}^{Q}W_i\mathrm{E}\left[\left(y_i-\bar{y}_i\right)-\sum_{j=1}^{\mathrm{MU}}\beta_j l_j\left(\sum_{k=1}^{P}\alpha_{jk}x_k\right)\right]^2 \tag{7}$$

表 4 ε_w 的试验值与双曲线固结湿化模型计算值对比

Table 4 Comparison of experimental values and calculated values of ε_w from the hyperbolic consolidation-wetting model

试样编号	σ_1/kPa	ε_w 试验值/%	ε_w 双曲线模型计算值/%	绝对误差/%	相对误差/%	MAPE/%
1	400	0.27	0.28	0.01	3.70	4.18
	800	0.88	0.75	−0.13	−14.77	13.95
	1 200	1.18	1.31	0.13	11.02	18.35
	1 600	1.52	1.83	0.31	20.30	26.26
	2 000	1.72	2.64	0.92	53.49	44.71
2	400	0.11	0.11	0.00	0.00	3.47
	800	0.52	0.39	−0.13	−25.00	28.40
	1 200	0.71	0.80	0.09	12.68	13.31
	1 600	0.88	1.30	0.42	47.73	53.33
	2 000	1.01	1.91	0.90	89.11	97.89
3	400	0.04	0.04	0.00	0.00	59.82
	800	0.25	0.21	−0.04	−16.00	17.37
	1 200	0.52	0.60	0.08	15.38	14.39
	1 600	0.60	1.17	0.57	95.00	92.94
	2 000	0.73	2.10	1.37	187.67	174.60

式中:L_2 为 PPR 模型参数寻优时的极小化准则函数;MU 为最优岭函数个数;W_i 为因变量权重系数。

PPR 的具体实现步骤详见文献[15]。本文将试验材料级配分形维数 D[23]、σ_1、t_w 作为自变量,ε_w 作为因变量,则湿化变形 PPR 模型表示为

$$\varepsilon_w=\mathrm{E}\left(\varepsilon_w\middle|D,\sigma_1,t_w\right)=\bar{\varepsilon}_w+\sum_{j=1}^{M}\beta_j l_j\left(\alpha_{j1}D+\alpha_{j2}\sigma_1+\alpha_{j3}t_w\right) \tag{8}$$

式中:$\bar{\varepsilon}_w$ 为 ε_w 的样本均值;α_{j1}、α_{j2}、α_{j3} 分别为第 j 个投影方向上 D、σ_1、t_w 的投影权重分量。

模型参数求解时,极小化准则为

$$L_2=\min\mathrm{E}\left[\left(\varepsilon_w-\bar{\varepsilon}_w\right)-\sum_{j=1}^{\mathrm{MU}}\beta_j l_j\left(\alpha_{j1}D+\alpha_{j2}\sigma_1+\alpha_{j3}t_w\right)\right]^2 \tag{9}$$

3.2 模型的求解

本文根据 PPR 实现步骤及相关算法编制计算程序。选取试样 1 的 σ_1=800 kPa 工况、试样 2 的 σ_1=1 200 kPa 工况、试样 3 的 σ_1=1 600 kPa 工况下的试验结果作为模型预测样本,其余工况的试验结果用于建模计算。经过计算,模型投影参数分别为:P=3,Q=1,S=0.1,M=4,MU=3。其中:S 为光滑系数,用于控制模型的灵敏程度,取值范围为(0,1),取值越小模型灵敏度越高;M 和 MU 决定模型挖掘数据内部特征的精细程度。计算时以模型计算值

与试验值的相对误差$|\delta|\leqslant 20\%$作为合格率判定标准，在保证模型稳定性的前提下，通过试算确定参数的具体取值。

计算所得模型的投影系数矩阵为

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{\alpha}_1\\ \boldsymbol{\alpha}_2\\ \boldsymbol{\alpha}_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.960\,054 & 1.000\,000 & 0.000\,113 & 0.000\,282\\ 0.175\,964 & -0.998\,920 & -0.000\,310 & 0.046\,533\\ 0.291\,144 & -1.000\,000 & 0.000\,285 & 0.000\,006\end{pmatrix} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{\alpha}_1$、$\boldsymbol{\alpha}_2$、$\boldsymbol{\alpha}_3$分别为D、σ_1、t_w对应的投影系数行向量。

各岭函数如图6所示，对应的权重系数行向量β为

$$\beta=(3.000\,000 \quad 0.516\,652 \quad 0.696\,928) \tag{11}$$

将式(10)、图6的岭函数以及式(11)代入式(8)，即可得到试验材料的湿化变形PPR模型。

影响因素D、σ_1、t_w的相对贡献权重系数分别为1.000、0.739、0.338。

3.3　模型的拟合精度分析

本文根据上述模型及极小化准则计算得到ε_w的模型值，绘制其时程曲线(图5)，将不同试样在各工况下的ε_w试验值与PPR模型值绘制于图7进行对比，图中斜线为1∶1等值线，表示ε_w的PPR模型计算值与试验值相等。建模数据的300个数据点中，相对误差小于20.00%的合格率为87.2%；最大相对误差出现在级配最粗试样的浸水湿化初期，最大值为−4 519.19%。由于级配偏粗试样的$|\varepsilon_w|$较小，因此相对误差数值偏大，但整体来看数据离散程度较小。以试验值为基准，将各工况下湿化稳定后的ε_w试验值、ε_w PPR模型值、绝对误差、相对误差以及MAPE汇总于表5。由表5可知：绝对误差在±0.1%范围内波动，相对误差除个别工况外均可控制在±10%以内；且除试样3在σ_1=400 kPa下的MAPE较高外，其余试样的整体拟合平均绝对百分比误差均小于20.00%。上述结果表明：采用PPR无假定建模方法建立的模型能够准确描述坡积碎石土的湿化变形规律，具有较高的拟合精度，且该方法无需针对3种级配试样的试验结果分别率定模型参数，可统一描述不同级配试样的湿化变形规律，精度优于双曲线模型。

3.4　模型的预测精度分析

本文采用已建立的湿化变形PPR模型对预留验证工况下的ε_w试验数据进行预测，ε_w预测结果如

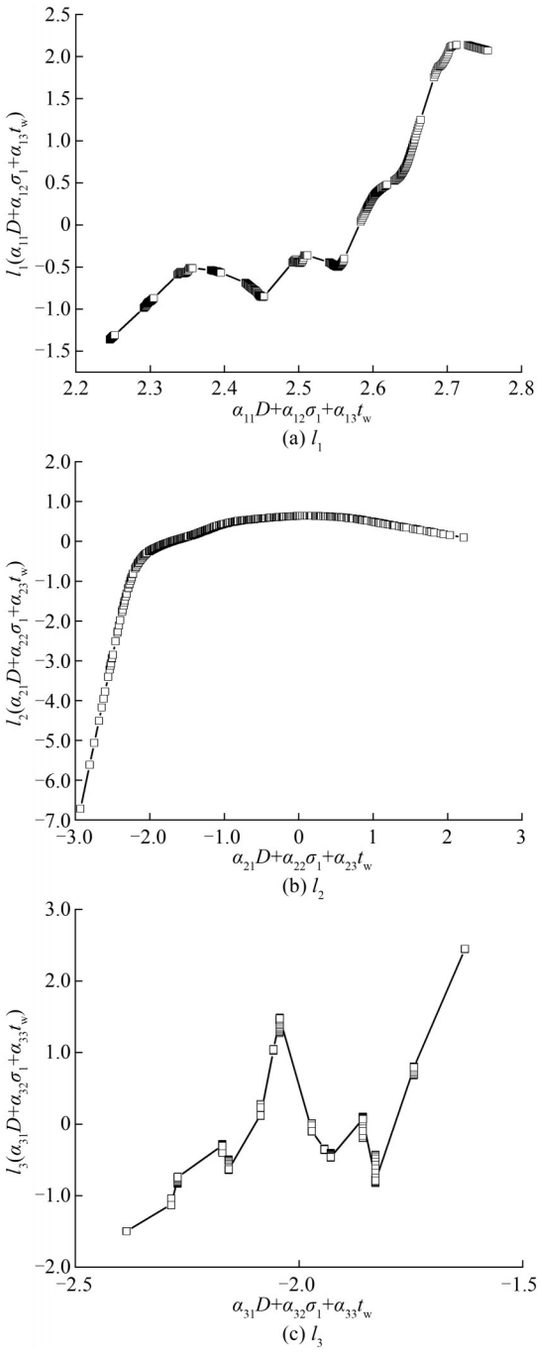


图6　湿化变形PPR模型岭函数曲线

Fig.6　Ridge function curves of the PPR wetting deformation model

图5所示，计算得到的绝对误差、相对误差、MAPE列于表6。

可以看出，ε_w预测结果的最大相对误差出现在级配最粗试样的浸水湿化初期，最大值为19.28%；但稳定状态下的ε_w绝对误差在±0.05%范围内，相对误差在±5.00%范围内；全过程ε_w预测的MAPE最大值仅为5.33%，表明该模型预测效果良好。综上可知，PPR模型对稳定ε_w和全过程湿化应变时程

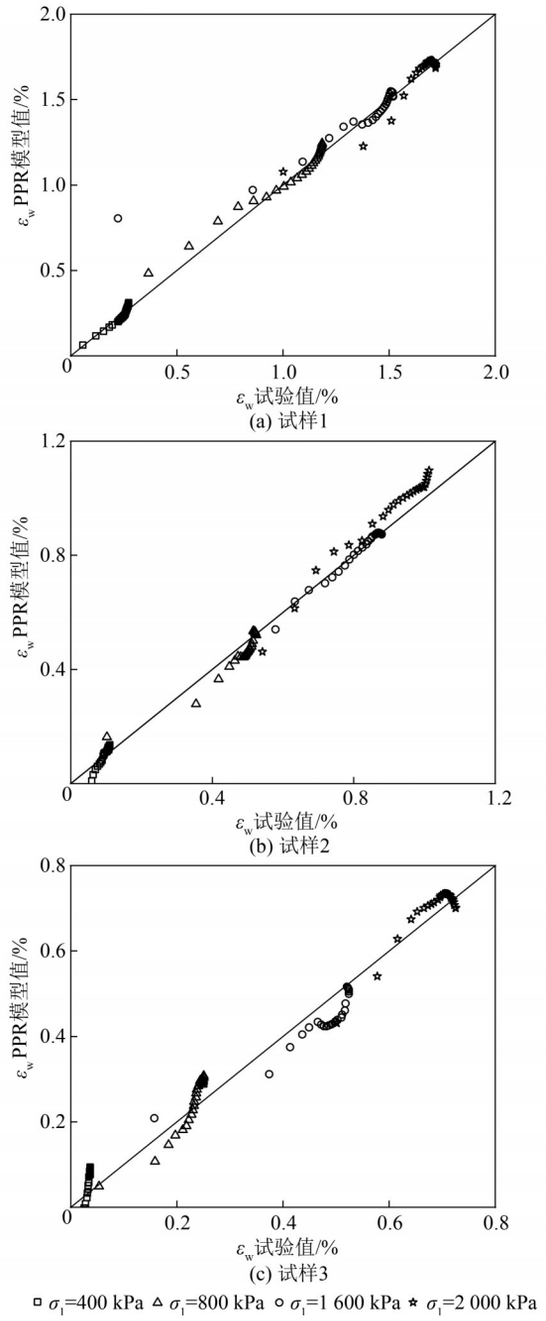


图 7 ε_w 的试验结果与 PPR 湿化模型计算结果对比

Fig.7 Comparison between experimental values of ε_w and calculated values of ε_w by the PPR wetting model

曲线的拟合精度与预测精度均优于双曲线模型;基于建模数据建立的湿化变形 PPR 模型,可实现对试验范围内不同 σ_1、不同级配试样湿化变形规律的精准拟合与预测。

4 结论

1)本文依托实际工程,以坡积碎石土(工程利用料)为研究对象,通过固结湿化试验研究其湿化变形特性,发现 σ_1 越高(模拟实际工程中的自重应力),材料级配越细,固结压缩量越大,ε_w 越大;但随着 σ_1 增大,湿化变形占总变形的比例呈先增大后减小的规律。

2)采用 PPR 无假定建模技术,通过挖掘坡积碎石土湿化试验数据的内在结构特征,建立了湿化变形计算模型;与前人提出的双曲线模型相比,无论是拟合阶段还是预测阶段,除个别工况外,稳定 ε_w 的绝对误差在±0.10%以内,相对误差与全过程应变时程曲线的 MAPE 均在±10.00%以内;结果表明,该计算模型对试验材料的稳定 ε_w 和全过程应变时程曲线均具有更高的拟合精度与更强的预测能力,能够有效反映试验材料的湿化变形规律,具有一定的工程应用价值。

3)采用 PPR 无假定建模技术时,无需对试验数据的分布规律作出人为假定,模型完全由数据驱动,且可同时纳入多类影响因素,避免了繁琐的参数率定过程。研究成果为粗粒料湿化变形的精准描述提供了一种新思路。

表 5 ε_w 的试验值与 PPR 湿化模型计算值对比

Table 5 Comparison between experimental values of ε_w and calculated values of ε_w by the PPR wetting model

试样编号	σ_1/kPa	ε_w 试验值/%	ε_w PPR 模型计算值/%	绝对误差/%	相对误差/%	MAPE/%
1	400	0.27	0.31	0.04	15.31	18.31
	1 200	1.18	1.24	0.06	5.43	4.60
	1 600	1.52	1.52	0.00	−0.05	2.73
	2 000	1.72	1.68	−0.04	−2.09	2.50
2	400	0.11	0.14	0.03	23.43	18.94
	800	0.52	0.52	0.00	0.07	8.78
	1 600	0.88	0.87	−0.01	−0.81	1.99
	2 000	1.01	1.10	0.09	8.63	6.37
3	400	0.04	0.09	0.05	135.53	316.68
	800	0.25	0.31	0.06	23.19	15.13
	1 200	0.52	0.50	−0.02	−3.89	9.84
	2 000	0.73	0.70	−0.03	−3.95	4.02

表 6 不同 σ_1 下 ε_w 的 PPR 湿化模型预测值与试验值对比

Table 6 Comparison between predicted values of ε_w by the PPR wetting model and experimental values of ε_w under different σ_1

试样编号	σ_1/kPa	ε_w 试验值/%	ε_w PPR 模型预测值/%	绝对误差/%	相对误差/%	MAPE/%
1	800	0.88	0.84	−0.04	−4.55	2.65
2	1 200	0.70	0.69	−0.01	−1.43	1.63
3	1 600	0.60	0.59	−0.01	−1.67	5.33

参考文献：

[1] 刘祖德 . 土石坝变形计算的若干问题[J]. 岩土工程学报，1983，5(1)：1-13.
LIU Zude. Some problems about the calculation of deformation of earth-rock dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1983，5(1)：1-13.

[2] 殷宗泽，赵航 . 土坝浸水变形分析[J]. 岩土工程学报，1990(2)：1-8.
YIN Zongze，ZHAO Hang. Deformation analysis of earth dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1990(2)：1-8.

[3] 郦能惠 . 密云水库走马庄副坝裂缝原因分析[R]. 北京：清华大学，1965：31-33.
LI Nenghui. Analysis on the causes of cracks in the secondary dam of Miyun Reservoir[R]. Beijing：Tsinghua University，1965：31-33.

[4] JIA Y F，XU B，CHI S C，et al. Joint back analysis of the creep deformation and wetting deformation parameters of soil used in the Guanyinyan composite dam[J]. Computers and Geotechnics，2018，96：167-177.

[5] ZHOU X X，CHI S C，JIA Y F. Wetting deformation of core-wall rockfill dams[J]. International Journal of Geomechanics，2019，19(8)：04019084.

[6] KARTAL M E，ÇAVUŞLI M，GENIŞ M. 3D nonlinear analysis of Atatürk clay core rockfill dam considering settlement monitoring[J]. International Journal of Geomechanics，2019，19(5)：04019034.

[7] 朱百里，沈珠江 . 计算土力学[M]. 上海：上海科学技术出版社，1990：32-37.
ZHU Baili，SHEN Zhujiang. Computational Soil Mechanics[M]. Shanghai：Shanghai Scientific & Technical Publishers，1990：32-37.

[8] 李国英，刘玉年 . 砂石料浸水变形三维有限元分析[C]// 第三届全国青年岩土力学与工程会议论文集 . 南京：1998.
LI Guoying，LIU Yunian. Three-dimensional finite element analysis of wetting deformation of sand-gravel materials[C]//Proceedings of the 3rd National Youth Conference on Rock and Soil Mechanics and Engineering. Nanjing：1998.

[9] 李全明，于玉贞，张丙印，等 . 黄河公伯峡面板堆石坝三维湿化变形分析[J]. 水力发电学报，2005，24(3)：24-29.
LI Quanming，YU Yuzhen，ZHANG Bingyin，et al. Three-dimensional analysis for the wetting deformation of Gongboxia concrete faced rock-fill dam on the Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2005，24(3)：24-29.

[10] 李广信 . 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报，1990，12(5)：58-64.
LI Guangxin. Wetting test and mathematical model of rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1990，12(5)：58-64.

[11] NOBARI E S，DUNCAN J M. Movements in dams due to reservoir filling[J]. Performance of Earth and Earth Supported Structures，1972，1(1)：58-64.

[12] 张延亿，徐泽平，邓刚，等 . 堆石材料湿化特性的三轴试验研究[J]. 水力发电学报，2018，37(8)：13-19.
ZHANG Yanyi，XU Zeping，DENG Gang，et al. Experimental study on wetting characteristics of rockfill materials by triaxial tests[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2018，37(8)：13-19.

[13] BAUER E. Constitutive modelling of wetting deformation of rockfill materials[J]. International Journal of Civil Engineering，2019，17(4)：481-486.

[14] 张延亿，邓刚，张茵琪，等 . 土石混合料固结湿化变形试验研究[J]. 水利学报，2020，51(11)：1393-1400.
ZHANG Yanyi，DENG Gang，ZHANG Yinqi，et al. Experimental study on the characteristics of consolidate-wetting deformation of soil-aggregate mixture materials [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2020，51(11)：1393-1400.

[15] 郑祖国，何建新，宫经伟，等 . 复杂系统的投影寻踪回归无假定建模技术及应用实例[M]. 北京：中国水利水电出版社，2020：42-43.
ZHENG Zuguo，HE Jianxin，GONG Jingwei，et al. Projection Pursuit Regression Assumption-Free Modeling Technology for Complex Systems and Its Application Examples[M]. Beijing：China Water & Power Press，2020：42-43.

[16] 宫经伟，陈瑞，曹国举，等 . 基于PPR无假定建模的混凝土导热系数计算模型[J]. 建筑材料学报，2020，23(4)：948-954.
GONG Jingwei，CHEN Rui，CAO Guoju，et al. Model of thermal conductivity for concrete based on projection pursuit regression non-hypothetical modeling technology[J]. Journal of Building Materials，2020，23(4)：948-954.

[17] 杨志豪，何建新，李志华，等 . 基于PPR-TOPSIS分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J]. 水利水电科技进展，2023，43(2)：82-88.
YANG Zhihao，HE Jianxin，LI Zhihua，et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2023，43(2)：82-88.

[18] 杨志豪, 何建新, 杨武, 等. 基于PPR无假定建模的水工沥青混凝土偏应力计算模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(11): 1551-1557.
YANG Zhihao, HE Jianxin, YANG Wu, et al. Calculation model of deviatoric stress of hydraulic asphalt concrete based on projection pursuit regression non-assumed modeling[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(11): 1551-1557.

[19] 杨海华, 杨武, 刘汉龙, 等. 基于PPR数据建模技术的砂砾石料应力应变规律拟合[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 137-142.
YANG Haihua, YANG Wu, LIU Hanlong, et al. Fitting of stress and strain law of sand and gravel based on PPR data modeling technology[J]. Materials Reports, 2023, 37(13): 137-142.

[20] 姜春萌, 宫经伟, 唐新军, 等. 基于PPR的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 333-340.
JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340.

[21] GONG J W, JIANG C M, TANG X J, et al. Optimization of mixture proportions in ternary low-heat Portland cement-based cementitious systems with mortar blends based on projection pursuit regression[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117666.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB/T 50123-2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

[23] 吴莹, 马刚, 周伟, 等. 基于分形理论的堆石料级配优化研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1977-1985.
WU Ying, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Optimization of gradation of rockfill materials based on the fractal theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1977-1985.

(编辑:陶佳音)