

# 富胶凝砂砾石材料抗压及抗冻性能研究

闫林, 何建新, 杨海华

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 采用三因素三水平正交试验、PPR分析法和PPR单因素仿真分析法,探究胶凝材料用量、水灰比及细料含量对富胶凝砂砾石抗压及抗冻性能影响的规律。研究结果表明:胶凝材料用量对富胶凝砂砾石影响程度最大,水灰比次之,细料含量最小。根据投影寻踪仿真单因素分析法得出,随着胶凝材料用量的增加,抗压强度先快速增大随后增幅逐渐平缓;相反,抗冻性能先平缓增大,当胶凝材料用量大于 $250\text{ kg/m}^3$ 时增幅变大。细料含量对富胶凝砂砾石抗冻性能与抗压强度的影响规律相似,随着细料含量的增加,抗压及抗冻性能都随之增大,且在细料含量大于27.5%时,增幅逐渐趋于平缓。富胶凝砂砾石抗压及抗冻性能随着水灰比增大而增强,当水灰比大于0.45时出现峰值后下降。

**关键词:** 富胶凝砂砾石; 抗压及抗冻性能; 投影回归(PPR)分析法; PPR单因素仿真分析

中图分类号:TV41

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)01-0197-06

## Research on the anti-compression and anti-freeze properties of the cemented sand and gravel material

YAN Lin, HE Jianxin, YANG Haihua

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** The three-factor three-level orthogonal test, projection pursuit regression (PPR) analysis and PPR single factor simulation analysis were used to study the impact of the dosage of cementitious materials, water gel ratio and fine material content on the anti-compression and anti-freeze properties of the cemented sand and gravel (CSG) materials. The results showed that the dosage of cementitious materials had the greatest influence on the CSG materials, and the influences of the water gel ratio was the second and that of the content was the lowest. According to the single factor analysis method of projection pursuit simulation, with the increase of the dosage of cementitious materials, the compressive strength increased quickly and then the increase was smooth. On the contrary, the anti-freeze increased firstly, and when the dosage of cementitious material was larger than  $250\text{ kg/m}^3$ , the increase accelerated. The effect of the fine materials content on the anti-compression and anti-freeze of the CSG materials was similar, with the increase of anti-compression and anti-freeze of the fine materials content, and the increase of the content is more moderate than 27.5%. The anti-compression and anti-freeze of the CSG materials increased with the increase of water to cement ratio, and decreased when the water gel ratio was greater than 0.45.

**Key words:** cemented sand and gravel; anti-compression and anti-freeze; projection pursuit regression analysis; PPR single factor simulation analysis

## 1 研究背景

胶凝砂砾石坝是我国发展较为缓慢的一种新坝型,其各项性能及施工工艺介于混凝土坝和土石坝

之间<sup>[1-2]</sup>。尽管胶凝砂砾石坝具有施工便捷、工艺简单、造价低廉、环境友好及安全可靠等特点<sup>[3-5]</sup>,但在实际永久性水利工程中却极少使用,使得该坝型难以发挥其应有的价值。一是天然砂砾石料级配

收稿日期:2018-06-19; 修回日期:2018-09-19

基金项目:新疆水利水电重点学科基金项目(XJXZ-2003-16)

作者简介:闫林(1992-),男,河南永城人,硕士研究生,研究方向:水利水电工程。

通讯作者:何建新(1973-),男,河南扶沟人,硕士,副教授,硕士生导师,研究方向:水利水电工程。

离散性过大,易造成胶凝砂砾石材料力学性能不稳定;二是胶凝砂砾石坝发展历程短,相关配套的施工工艺不够成熟,缺乏可靠的理论支撑<sup>[6]</sup>;三是对于胶凝砂砾石坝相适宜的保护层材料研究不够完善和系统化。以上诸多基础因素制约了该坝型的发展,因此,完善胶凝砂砾石坝基础理论对该坝型的应用具有重要价值及意义。

当前,相关学者对胶凝砂砾石材料的各项力学性能、耐久性能及施工工艺等已做了大量研究,并得出很多重要成果。然而对于胶凝砂砾石坝型相适应的保护层材料却鲜有涉及,常态混凝土、堆石混凝土、变态碾压混凝土、变态胶凝砂砾石等都可作为胶凝砂砾石坝的保护层材料,但需增加相应的施工设备及工序工艺,坝面易出现交叉作业施工,影响施工进度和成本控制。冯炜等<sup>[7]</sup>提出富胶凝砂砾石材料(简称 CSGR)作为胶凝砂砾石坝的保护层结构,并对 CSGR 材料各项性能做了初步研究,该材料在胶凝砂砾石填筑过程中与坝体同步施工,且不必增加额外的拌合系统和施工工序,大大简化了施工工艺。此外,国内外对该材料力学性能和耐久性能的深入探究较少。

为此,本研究针对 CSGR 材料设计正交试验,通

过投影寻踪回归分析法(简称 PPR)进一步探究胶凝材料用量、水灰比及细料含量 3 个因素对 CSGR 材料抗压及抗冻性能的影响规律,为改善胶凝砂砾石坝施工工艺,质量安全和造价经济提供理论及技术支持。

## 2 试验原材料及试验设计

### 2.1 试验原材料

砂砾石料为新疆某胶凝砂砾石坝河床天然砂砾石料,其中 5~80 mm 粒径的天然砂砾石料中的含泥量为 1.7%,砂砾石料级配组成见表 1,小于 5 mm 粒径的天然砂砾石料(细料)含泥量为 5.1%,细料级配组成见表 2,水泥采用新疆蒙鑫 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,粉煤灰采用准东东方希望电厂生产的 II 级粉煤灰,减水剂为新疆格辉牌蔡系 FDN 高效型减水剂,引气剂为新疆格辉牌 GH-AE 型引气剂,水为城市普通自来水。

表 1 大于 5 mm 的粒径级配组成 %

粒径/mm				
<80	<60	<40	<20	<10
100.0	89.6	73.3	54.6	33.9

表 2 小于 5 mm 的粒径级配组成 %

粒径/mm						
<5	<2	<1	<0.5	<0.25	<0.1	<0.075
100.0	65.4	48.7	36.5	21.3	10.9	5.1

### 2.2 配合比正交试验

正交试验方法参照《胶结颗粒料筑坝技术导则》、《水工混凝土试验规程》及已有工作经验进行设计<sup>[8-9]</sup>,选用三因素三水平  $L_9(3^3)$  正交试验表,正交设计方案见表 3,其中胶凝材料为水泥和粉煤灰(水泥:粉煤灰为 7:3),减水剂用量为 0.8%,引气剂用量根据实测含气量进行调整,控制含气量为 5.0%~7.0% 之间。

### 2.3 试件成型及养护

CSGR 材料抗压、抗冻试件成型均采用湿筛法,在加入胶凝材料和水充分搅拌均匀后,抗压试件为剔除大于 40 mm 粒径后的拌合物,分 3 层装入标准钢试模(15.0 cm×15.0 cm×15.0 cm)中置于振动台振实;抗冻试件为剔除 30mm 以上粒径的拌合物,亦分 3 层装入 PVC 抗冻标准试模(10.0 cm×10.0 cm×40.0 cm)中置于振动台振实。成型试件用棉

布覆盖 2 d 后脱模,置于恒温恒湿养护箱养护 28 d。

表 3 正交设计方案

编号	胶凝材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	细料含量/%	水灰比
1	220(1)	25(1)	0.40(1)
2	220(1)	30(2)	0.45(2)
3	220(1)	35(3)	0.50(3)
4	250(2)	25(1)	0.45(2)
5	250(2)	30(2)	0.50(3)
6	250(2)	35(3)	0.40(1)
7	280(3)	25(1)	0.50(3)
8	280(3)	30(2)	0.40(1)
9	280(3)	35(3)	0.45(2)

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验结果

CSGR 材料抗压强度和抗冻性能试验每组配合

比下各成型 3 个试件,将 3 个试件抗压强度或抗冻性能的均值作为试验结果,采用混凝土抗剪抗压试验机测定 CSGR 材料抗压强度,将加载速度控制为 8.0~10.0 kN/s,直至试件破坏,抗压试件 28 d 强度的试验平均值见表 4。采用 TDRF-2 型号混凝土快速冻融循环机进行抗冻循环试验,试件内部循环温度设置为  $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  和  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ;选用 DT-15 型动弹仪测定动态弹性模量,每 25 个循环周期测定一次质量损失量和动态弹性模量。直到试件的质量损失率达到 5.0%,亦或相对动态弹性模量降低到初始值的 60.0% 时停止试验(判定试件已破坏),抗冻试件 28 d 抗冻性能的试验平均值见表 5。

表 5 抗压及抗冻正交试验结果

试验编号	抗压强度/MPa	冻融循环/次数
1	19.9	75
2	21.6	125
3	21.2	100
4	23.9	125
5	21.5	100
6	24.4	150
7	23.7	150
8	25.0	175
9	27.3	200

### 3.2 投影寻踪回归分析

本研究采用投影寻踪(PPR)分析法研究胶凝材料用量、水灰比和细料含量对 CSGR 材料的抗压强度和抗冻性能的影响。PPR 分析法是建立在投影寻踪技术上的一种数值回归分析方法<sup>[10]</sup>,该方法的基本原理是进行无假定非参数建模,将高维的数据向低维子空间投影,再通过极小化投影指标来寻找高维数据的特征投影,以此为线索研究高维数据<sup>[11]</sup>。由于 PPR 分析法是通过“自主学习”数据结构规律,无需人为假定所建模型的种类,因此可以最大限度突破模型自身的局限性,规避建模假定和参数的不合理限制,从而使回归方程的精确度提高<sup>[12-13]</sup>。分别对表 5 中 9 组 CSGR 材料抗压强度和抗冻循环数据进行 PPR 分析,所建模型中光滑系数(反映投影灵敏度的指标) SPAN 取为 0.5,投影方向初始值  $M$  取为 5,最终投影方向值  $MU$  取为 3,其余模型参数  $N, P, Q$ , 分别为 9, 3, 1。

PPR 分析法所建模型的公式形式相同,不同的是模型参数  $\alpha$  和  $\beta$ , PPR 模型为:

$$E(y | x_1, \dots, x_p) = \bar{y} + \left( \sum_{i=1}^M \beta_i f_i \right) \left( \sum_{j=1}^p \alpha_{ij} x_j \right) \quad (1)$$

式中:  $M$  是数值函数的最佳数目;  $\beta_i$  是数值函数的影响权系数;  $f_i$  是数值函数;  $\alpha_{ij} x_j$  是  $i$  方向的投影值,其中  $\alpha_{ij} = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ip})$ ,  $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, p$ 。

对于 CSGR 材料抗压强度:

$$\beta = [1.3432 \quad 0.6780 \quad 0.4016]$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.0028 & 0.9840 & -0.1784 \\ 0.0008 & 0.6165 & -0.7873 \\ 0.0020 & -0.1217 & -0.9926 \end{bmatrix}$$

对于 CSGR 材料抗冻性能:

$$\beta = [0.9815 \quad 0.3650 \quad 0.2122]$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.0034 & 0.8939 & -0.4483 \\ -0.0001 & 0.1096 & 0.9940 \\ -0.0019 & 0.9921 & 0.1256 \end{bmatrix}$$

通过 PPR 分析得出仿真值和误差分析见表 6。由表 6 中数据可以看出,CSGR 抗压强度和抗冻性能的实际值与仿真值拟合结果吻合较好,9 组抗压强度及抗冻性能试验合格率都达到了 100%,相对误差均不超过 5%,抗压强度最大相对误差为 -3.85%,抗冻性能最大相对误差为 4%。对于抗压强度,其自变量的相对权重分别为:胶凝材料用量 1.00、水灰比 0.827、细料含量 0.660;对于抗冻性能,其自变量的相对权重分别为:胶凝材料用量 1.00、水灰比 0.885、细料含量 0.485。由此可以看出,无论是抗压强度还是抗冻性能,对于 CSGR 材料影响程度都是胶凝材料用量最大,水灰比次之,细料含量最小。

## 4 投影寻踪仿真单因素分析

PPR 仿真单因素分析是在投影寻踪回归的基础上对各项影响因素进行单因素分析,将一个影响因素作为考察指标时,其余影响因素取中位数进行仿真计算,结合表 6 模型分析结果,试验采用 PPR 仿真单因素分析法进一步研究不同水平下各影响因素对 CSGR 材料的抗压强度和抗冻性能的影响规律。为了便于绘图,每组水平值下增加两个仿真变量,分析结果见表 7。

### 4.1 胶凝材料用量的影响规律

根据 PPR 仿真单因素分析结果表 7,绘制出 CSGR 材料抗压及抗冻性能随胶凝材料用量的变化规律曲线,见图 1。由图 1 可知,CSGR 材料抗压强度和抗冻性能都是随着胶凝材料用量的增加而增

大,但两者曲线关系所呈现的规律趋势有所不同。抗压强度随胶凝材料用量的增加,先快速增大随后增幅逐渐平缓;相反,抗冻性能增幅先平缓后快速增大。此规律可通过胶浆包裹裕度理论<sup>[14-15]</sup>进行解释,胶浆包裹裕度公式为:

$$\alpha = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{F}{\rho_f}}{10V_s S} \quad (2)$$

$$\omega_s$$

式中: $\alpha$ 为胶浆体积与细料空隙体积比,即胶浆裕度; $W$ 为用水量,kg; $C$ 为水泥用量,kg; $F$ 为掺合料用量,kg; $S$ 为细料用量,kg; $\rho$ 为密度,g/cm<sup>3</sup>; $V_s$ 为细料空隙率,%; $\omega_s$ 为细料密实容重,kg/m<sup>3</sup>。

对于抗压强度,当CSGR材料中细料含量与水灰比不变时,系数 $\alpha$ 随着胶凝材料用量增加而增大,即细料胶结界面强度随胶凝材料用量的增加而增大。但随着胶凝材料逐渐将细料空隙填充,材料密实度增大,抗压强度增幅逐渐减小。对于抗冻性能,在浆体未将细料空隙充分填充前,材料内部存在空隙和毛细孔,抗冻性能增幅平缓,当胶凝材料用量大于250 kg/m<sup>3</sup>时,曲线斜率骤然变大,抗冻性能明显增强,此时说明胶浆已将细料基本裹附,其内部空隙基本填充,随胶凝材料用量增加,一部分胶凝材料起胶结作用,另一部分则起到填充砂砾石料空隙作用,使得抗冻性能提高。

表6 投影寻踪回归模型分析结果

试验 编号	抗压强度/MPa				抗冻性能/次			
	实测值	仿真值	绝对误差	相对误差/%	实测值	仿真值	绝对误差	相对误差/%
1	19.9	20.511	0.611	3.072	75	74	-1.0	-2.0
2	21.6	21.145	-0.455	-2.108	125	121	-4.0	-3.0
3	21.2	21.003	-0.197	-0.928	100	102	2.0	2.0
4	23.9	23.297	-0.603	-2.524	125	130	5.0	4.0
5	21.5	22.328	0.828	3.850	100	100	0.0	0.0
6	24.4	23.989	-0.411	-1.683	150	152	2.0	1.0
7	23.7	23.465	-0.235	-0.990	150	146	-4.0	-3.0
8	25.0	25.344	0.344	1.377	175	175	0.0	0.0
9	27.3	27.417	0.117	0.430	200	199	-1.0	0.0

表7 投影寻踪仿真单因素分析结果

胶凝材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )			细料含量/%			水灰比		
水平值	抗压强度/MPa	抗冻性能/次	水平值	抗压强度/MPa	抗冻性能/次	水平值	抗压强度/MPa	抗冻性能/次
220	21.1	121	25.0	23.3	125	0.400	23.6	121
235	23.0	125	27.5	24.4	141	0.425	24.3	133
250	24.7	136	30.0	24.8	153	0.450	24.9	136
265	26.0	169	32.5	25.0	161	0.475	24.5	123
280	26.9	191	35.0	25.1	166	0.500	22.8	100

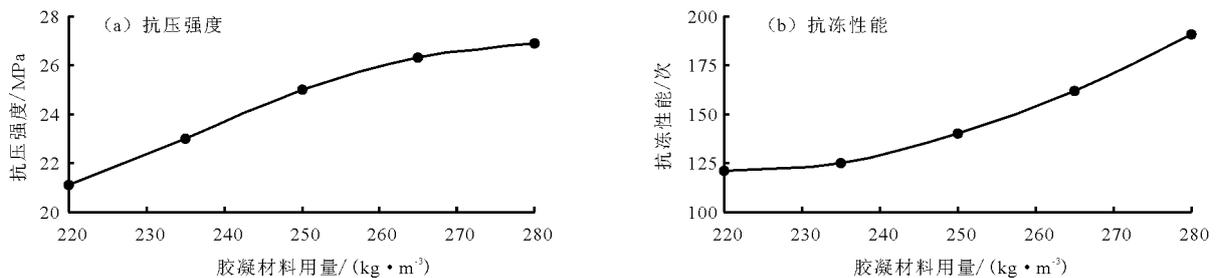


图1 胶凝材料用量与CSGR抗压强度、抗冻性能关系

此外,随着胶凝材料用量增加,其水化产物随之增多,并将材料内部毛细通道阻塞,加速毛细孔闭合,抗冻性能进一步提升<sup>[16]</sup>,这种提升不是无限制增大,最终抗冻性能会随胶凝材料用量增加逐渐趋于稳定。

### 4.2 水灰比的影响规律

水灰比对 CSGR 材料抗压及抗冻性能的影响与其对混凝土的影响规律十分相似,水灰比的大小不仅决定着 CSGR 材料的工作性质及施工工艺,并且对其力学性能起着重要影响。图 2 为水灰比与 CSGR 材料抗压强度及抗冻性能的关系。

由图 2 可以看出,材料抗压及抗冻性能随着水

灰比增大而增强,在水灰比大于 0.45 时出现峰值后下降。抗压强度这一规律表明,随着水灰比的增加,CSGR 材料工作性质由低流态塑性向流动态转变,拌合物流动性增加,振实密度增大,材料空隙率减小,使得抗压强度增大;当水灰比大于 0.45 时,用水量过多,振动密实时易产生泌水,形成毛细通道,降低抗压强度。对于抗冻性能,当水灰比小于 0.45 时,变化规律及内在机理与抗压性能相似;当水灰比大于 0.45 时,毛细孔增多,其内部孔隙率和水分扩散率会随之增大,同时在材料硬化以后,水分易进入内部,在冻融循环过程中更易发生冻融侵蚀,从而加剧劣化<sup>[17-18]</sup>。

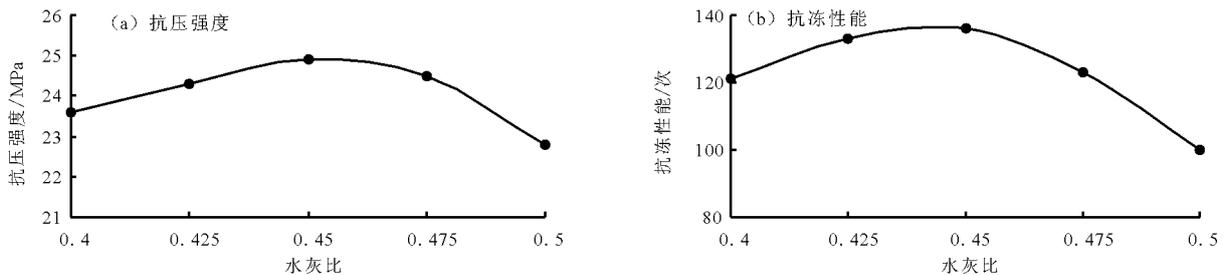


图 2 水灰比与 CSGR 材料抗压强度、抗冻性能关系

### 4.3 细料含量的影响规律

细料含量对工作性质属于低流态塑性的 CSGR 材料的密实度起着重要影响,适宜的细料含量对填充大粒径砂砾石料骨架空隙,降低空隙率,提高力学性能是较为有利的。图 3 为细料含量与 CSGR 材料抗压强度及抗冻性能的关系。由图 3 可知 CSGR 材料抗压及抗冻性能随细料含量的增大而增大,在细料含量大于 27.5% 时增幅趋于平缓。根据细料砂浆包裹裕度公式:

$$\beta = \frac{1000 - 10V_a - \frac{G}{\rho_g}}{\frac{10V_g G}{\omega_g}} \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为细料砂浆体积与砂砾石料空隙体积比,即细料砂浆裕度;  $V_a$  为含气量,%;  $G$  为砾石料用量,

kg;  $\rho_g$  为砾石料表观密度,  $g/cm^3$ ;  $V_g$  为砾石料空隙率,%;  $\omega_g$  为砾石料密实容重,  $kg/m^3$ 。

当砾石料用量一定时,其砾石料空隙率、密实容重和砾石料表观密度不变,随着细料含量的增加,砾石料空隙率下降,材料密实度增大,系数  $\beta$  增大,即抗压强度随着细料含量增加逐渐将砾石料空隙填充而增大,在细料含量大于 27.5% 时,砾石料内部空隙已基本被填充,抗压强度随细料含量增加增幅趋于平缓。

细料含量对 CSGR 材料抗冻性能与抗压强度的影响规律相似,随着细料含量增加,空隙率下降,有利于发挥引气剂均匀分散微细气泡、减少毛细孔的作用,使得抗冻性能提高。由于用水量一定,随着细料含量的进一步增加,比表面积增大,浆体裹附率下降,CSGR 材料抗压强度与抗冻性能逐渐降低。

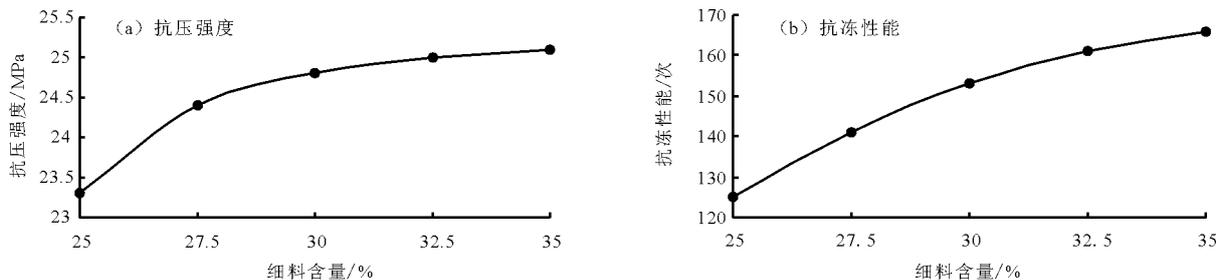


图 3 细料含量与 CSGR 材料抗压强度、抗冻性能关系

## 5 结 论

本研究通过配合比试验设计,探究胶凝材料用量、水灰比及细料含量对 CSGR 材料抗压和抗冻性能的影响,结合 PPR 分析法和 PPR 单因素仿真分析法对试验结果进行分析,得出如下结论:

(1) 投影寻踪回归分析表明其各项影响因素对 CSGR 材料抗压强度和抗冻性能指标的影响程度为胶凝材料用量最大,水灰比次之,细料含量最小。

(2) CSGR 材料抗压强度和抗冻性能都是随着胶凝材料用量的增加而增大,但两者曲线关系所呈现的规律趋势有所不同。抗压强度随胶凝材料用量的增加,先快速增大随后增幅逐渐平缓;相反,抗冻性能先平缓增大,当胶凝材料用量大于  $250 \text{ kg/m}^3$  时快速增大。

(3) CSGR 材料抗压及抗冻性能随着水灰比增大而增强,在水灰比大于 0.45 时出现峰值后下降。

(4) 细料含量对 CSGR 材料抗压强度与抗冻性能的影响规律相似,随细料含量的增大 CSGR 材料抗压及抗冻性能都随之增大,且在细料含量大于 27.5% 时增幅趋于平缓。

### 参考文献:

- [1] 贾金生,刘宁,郑瑾莹,等. 胶结颗粒料坝研究进展及工程应用[J]. 水利学报,2016,47(3):315-323.
- [2] 张傲齐,风炜,何建新. 胶凝砂砾石在阿拉沟水库溢洪道基础中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(3):217-220+226.
- [3] 刘录录. 胶凝砂砾石材料物理力学性能研究及有限元分析[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [4] 金小磊,何建新,杨海华. 葡萄糖酸钠对胶凝砂砾石材料凝结时间及强度的影响[J]. 科学技术与工程,2017,17(20):260-263.
- [5] HANADA H, OUYABU K, TAMEZAWA T, et al. CSG method using muck excavated from the dam foundation [C]//Proceedings of The Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Spain, 2003: 447-456.
- [6] 柴启辉,杨世锋,孙明权. 胶凝砂砾石材料抗压强度影响因素研究[J]. 人民黄河,2016,38(7):86-88.
- [7] 冯伟,贾金生,马锋玲. 胶凝砂砾石坝筑坝材料耐久性性能研究及新型防护材料的研发[J]. 水利学报,2013,44(4):500-504.
- [8] 中华人民共和国水利部. 胶结颗粒料筑坝技术导则:SL 678-2014 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [9] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程:SL352-2006 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [11] 胡完. 复杂资料综合投影寻踪回归分析法与综合传统回归分析法的比较研究[D]. 北京:中国人民解放军军事医学科学院,2017.
- [12] 李欣欣. 投影寻踪模型的研究与应用[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [13] 伦聚斌,何建新,王怀义. 粗骨料超径率对心墙沥青混凝土力学性能的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):169-173.
- [14] 谢旭剑. 水泥用量对混凝土强度及耐久性性能的影响规律研究[D]. 南昌:南昌大学,2016.
- [15] 赵洪,杨永民,李方贤,等. 骨料包裹层厚度的研究及其对多孔混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2014(2):29-32.
- [16] 徐亚丁,王玲,王振地. 混凝土冻融/盐冻破坏现象、机理和试验方法[J]. 硅酸盐通报,2017,36(2):491-496+514.
- [17] 张凯,陈亮亮,侍克斌. 不同取代率再生骨料混凝土在硫酸盐侵蚀和冻融循环共同作用下的力学性能研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(7):257-262.
- [18] 田威,田雪萍,裴志茹,等. 不同加载条件下混凝土冻融循环能量特征[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(3):595-603.