

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.022

纤维参数对自密实混凝土工作性能的影响研究^{*}顾维¹, 郭芳², 袁明³

(1.湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015; 2.湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 410132;

3.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究不同类型纤维长度、长径比及掺量对自密实混凝土工作性能的影响,对不同纤维参数自密实混凝土开展坍落扩展度试验、J环拓展度试验及离析率筛析试验,测试其工作性能指标,利用熵权法改进的TOPSIS法对其综合性能进行评价,结合灰色关联法分析不同纤维参数与工作性能之间的关联程度。结果表明,在自密实混凝土坍落拓展度、J环拓展度、扩展时间、离析率等工作性能指标中,离析率的权重最大;掺较短纤维的自密实混凝土的综合得分指数较高;随着纤维长度、长径比及掺量的增加,自密实混凝土的流动能力降低,稳定性增强;纤维长度对自密实混凝土工作性能的整体影响最大,长径比的影响最小。

关键词:桥梁;自密实混凝土;纤维;工作性能

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)01-0116-05

自密实混凝土无须额外振捣,它依靠自身质量即能充分密实地填充模板、包裹钢筋,在桥梁工程等复杂结构浇筑中得到广泛应用。然而自密实混凝土的水灰比较低,基体中存在较多不稳定的气泡,硬化后耐久性欠佳,干燥收缩现象也较严重^[1]。在自密实混凝土中掺入纤维材料有利于改善这一问题。Yehia S.、Frazão C.等的研究表明,纤维的掺入能抑制宏观裂纹的扩展和微裂纹的产生,纤维与自密实混凝土形成致密的结构,在干湿交替、氯化物侵蚀等条件下混凝土的耐久性得到提高^[2-3]。冯蒙、朱一丁等认为纤维的掺入能增强自密实混凝土的强度、延展性与韧性,改善自密实混凝土的干缩现象^[4-5]。工作性能是影响自密实混凝土施工效果的重要指标,而纤维的掺入可能对其工作性能产生不利影响。李超等研究了不同掺量玄武岩纤维对混凝土工作性能的影响^[6]。不同类型纤维具有不同的技术特征,其对混凝土工作性能的影响不同。同类型纤维的不同参数(长度、长径比、掺量等)也对混凝土的工作性能有不同影响。Zeyad A. M.、Gencel O.等通过测试坍落扩展度、坍落度等指标,研究了不同类型纤维对自密实混凝土工作性能的影响^[7-8]。王晨认为钢纤维、聚丙烯纤维可以提高自密实混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度,但聚丙烯纤维的效果没有钢纤维显著;掺加混杂纤维的自密实混凝土的力学性能优

于单掺纤维自密实混凝土^[9]。自密实混凝土的流变特性与普通混凝土有较大差异,自密实混凝土具有流动性与黏聚性较大、保水性高与剪切增稠的特点^[10-11]。测试不同纤维参数对自密实混凝土工作性能的影响,有利于推动掺纤维自密实混凝土的科学应用。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

选用南方水泥有限公司生产的P.O 42.5普通硅酸盐水泥;采用一级粉煤灰,其相对密度为2.40,比表面积为2 880 cm²/g;硅灰的相对密度为2.10,比表面积为23 360 cm²/g;选用武汉华轩高新技术有限公司生产的聚羧酸高效减水剂,它为白色粉末,减水率为32%;粗集料采用石灰岩碎石,最大粒径为16 mm,表观密度为2 680 kg/m³;细集料采用中砂,细度模数为2.55。集料的筛分结果见表1。

表1 集料的筛分结果

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16.000	100.0	1.180	22.1
9.500	66.7	0.600	13.0
4.750	44.6	0.300	9.4
2.360	30.3	0.150	4.2

^{*} 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30730);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(20B205)

选取工程中常用的钢纤维、聚丙烯纤维、耐碱玻璃纤维掺入自密实混凝土中,纤维的主要技术参数见表 2。

1.2 试验方案

1.2.1 配合比设计与试件成型

采用绝对体积法进行配合比设计,水泥、粉煤灰、

表 2 纤维的技术参数

纤维类型	长度/mm	长径比	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	断裂伸长率/%
钢纤维	6、12、24	40、60、80	7.80	1 100	200 000	3.2
玻璃纤维	6、12、24	600、1 200、1 600	2.70	980	5 124	8.0
聚丙烯纤维	6、12、24	190、660、780	0.93	950	4 245	4.1

硅灰用量分别为 360 kg/m³、95 kg/m³、25 kg/m³,水灰比为 0.40,减水剂用量为 1.85 kg/m³。纤维按体积分数计算掺入。为了使纤维拌和均匀,先将纤维、集料、水泥、粉煤灰和硅灰加入搅拌机中干拌 2 min,然后加入水和外加剂混合搅拌 2 min。在搅拌结束后 5 min 内对新拌混凝土进行试验。

1.2.2 试验方法

根据 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》,通过坍落拓展度试验与 J 环拓展度试验测试自密实混凝土的流动性,并在试验时观察混凝土拌和物是否出现泌水现象。测试从坍落度筒提起开始至坍落扩展开的混凝土外缘初触平板上所绘直径 500 mm 圆周时的扩展时间,评价自密实混凝土的充填能力和黏稠度。计算 J 环试验中坍落的混凝土在钢筋内外的高度差(以下简称高度差),评价混凝土通过钢筋的间隙通过性。通过离析率筛析试验测试拌和物的抗离析性能,自密实混凝土的离析率为试验中通过标准筛的砂浆质量与倒入标准筛中混凝土质量的比值。

2 试验结果与分析

2.1 纤维长度对自密实混凝土工作性能的影响

不同纤维长度下自密实混凝土的工作性能试验结果见图 1。

从图 1 可以看出:随着纤维长度的增加,坍落拓展度减小,自密实混凝土的流动性降低。纤维长度增加会增加纤维与骨料之间的碰撞,影响拌和物的流动性。纤维长度从 12 mm 变化为 24 mm 时,掺加聚丙烯纤维与玻璃纤维的自密实混凝土的扩展时间分别增加 1.7 s、2.1 s。纤维长度越大,纤维与骨架间的搭接作用越大,纤维间容易形成网状结构,阻碍拌和物的流动。根据相关试验结果,J 环坍落拓展度在 600 mm 以上时自密实混凝土会出现一定

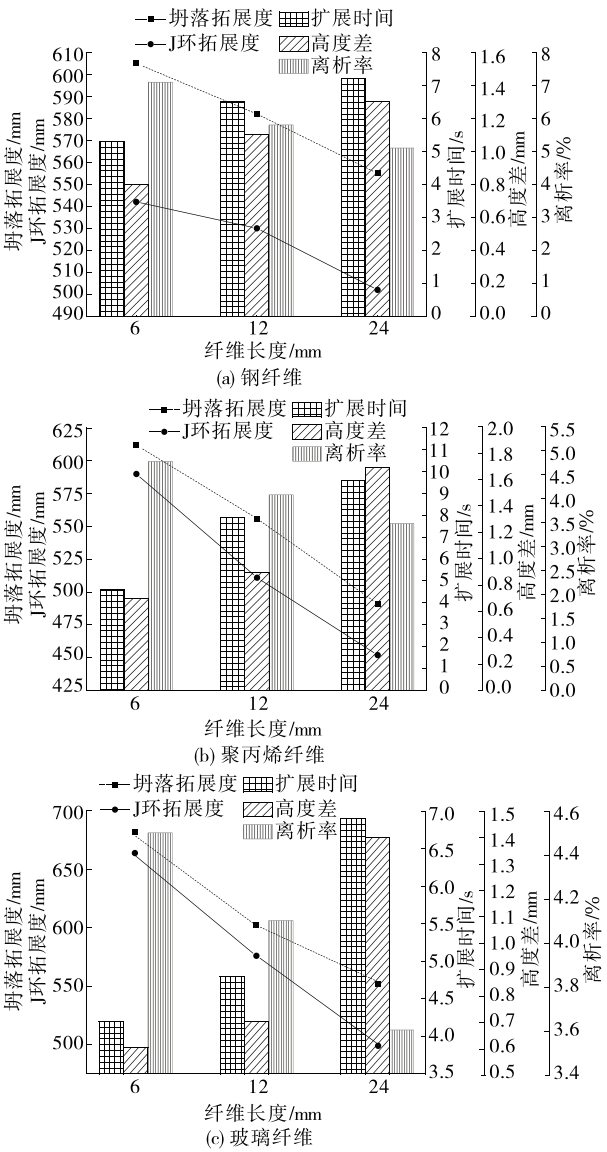


图 1 纤维长度对自密实混凝土工作性能的影响

泌水现象,而掺入纤维的自密实混凝土的泌水现象较少。聚丙烯纤维长度由 6 mm 增加到 24 mm 时,离析率下降 27%,纤维的掺入增强了自密实混凝土的稳定性。

2.2 纤维长径比对自密实混凝土工作性能的影响

不同纤维长径比下自密实混凝土的工作性能试验结果见图 2。

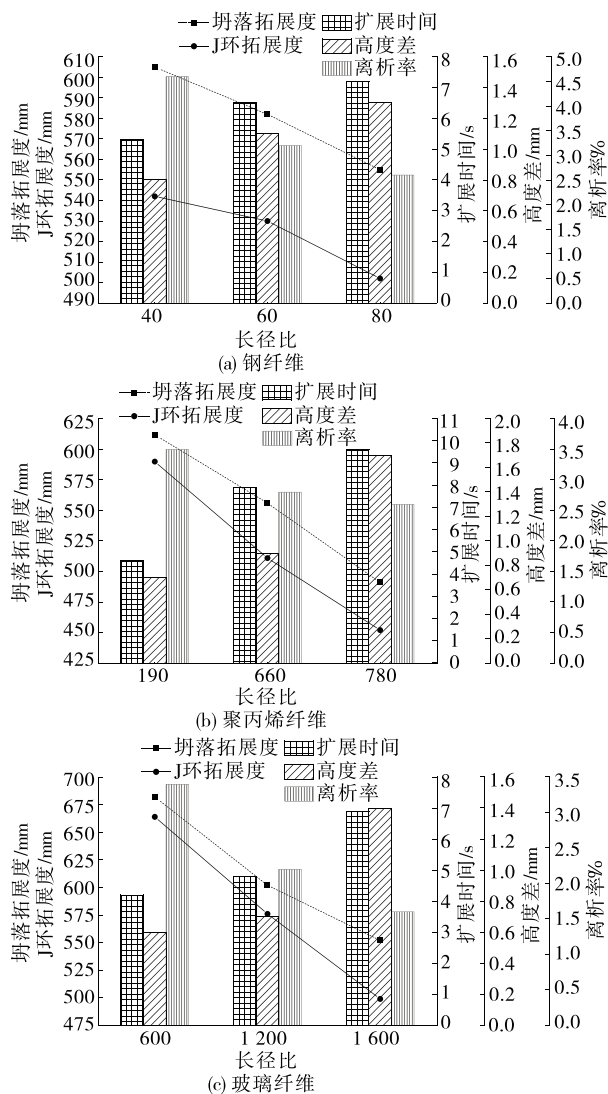


图 2 纤维长径比对自密实混凝土工作性能的影响

由图 2 可知:1) 纤维长径比越小,对自密实混凝土工作性能的影响越小。钢纤维长径比从 40 增大到 80 时,扩展时间增大 35.8%,高度差增大 62.5%;玻璃纤维长径比从 600 变化为 1 600 时,坍落拓展度下降 130 mm,J 环拓展度下降 165 mm。纤维长径比越大,混凝土的扰动体积越大,导致工作性能降低。纤维长径比影响纤维的比表面积,纤维的比表面积较大时,纤维表面会吸附较多的水泥浆体,集料间润滑浆液数量减少,混凝土的稠度增大,流动性降低。2) 长径比对自密实混凝土离析率的影响较小,与掺钢纤维的自密实混凝土相比,掺聚丙烯纤维及玻璃纤维的自密实混凝土的离析率更低。

2.3 纤维掺量对自密实混凝土工作性能的影响

不同纤维掺量下自密实混凝土的工作性能试验结果见图 3。

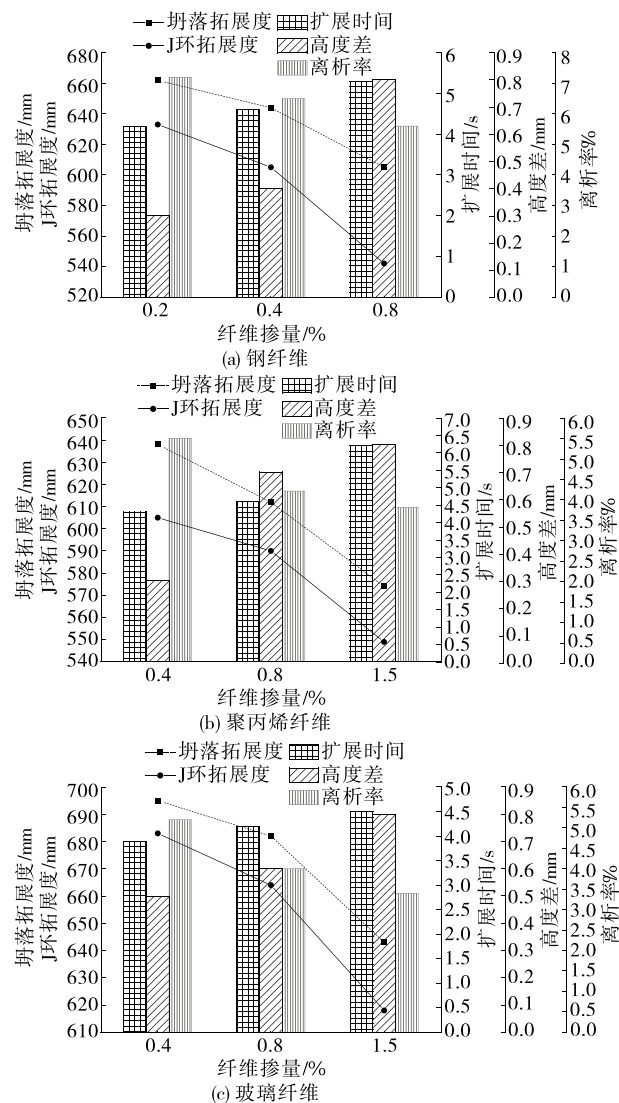


图 3 纤维掺量对自密实混凝土工作性能的影响

由图 3 可知:随着纤维掺量的增加,掺各类型纤维的自密实混凝土的工作性能均下降。当大量纤维乱向分布在混凝土中时,纤维间搭接形成网状结构,阻碍了混凝土的流动变形。低掺量与高掺量时自密实混凝土的坍落拓展度、J 环拓展度相差较大,高掺量下自密实混凝土可能无法有效包裹钢筋,密实度下降,对工程安全不利。新拌和浆体中,浆液包裹、润滑骨料,且部分骨料悬浮,形成稳定的结构以抵制离析。随着纤维掺量的增加,纤维表面包裹更多的水泥浆,集料间的润滑程度降低。大量纤维对混凝土的阻碍与摩擦作用增强,混凝土的流动性降低。由于玻璃纤维对水泥浆的亲水性比聚丙烯纤维差,

玻璃纤维对自密实混凝土工作性能的影响更大。

3 掺纤维自密实混凝土的工作性能分析

3.1 熵权法改进的 TOPSIS 法的正负理想序列求解

熵权法改进的 TOPSIS 法是一种多属性决策方法,它在传统 TOPSIS 方法的基础上引入熵权法,可更好地解决属性权重不确定问题。利用熵权法求取自密实混凝土工作性能的多个指标权重,通过信息熵获得坍落拓展度、J 环拓展度、扩展时间和高度差对工作性能的客观影响权重。计算步骤如下^[12-13]:

(1) 按式(1)对正向指标值进行归一化处理,按式(2)对负向指标值进行归一化处理,得到标准化矩阵 $B = x_{ij} (m \times n)$ 。

$$x_{ij} = \frac{k_{ij} - \min(k_{ij})}{\max(k_{ij}) - \min(k_{ij})} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \frac{\max(k_{ij}) - k_{ij}}{\max(k_{ij}) - \min(k_{ij})} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为标准化后指标值; k_{ij} 为评价指标的初始值; $\max(k_{ij})$ 、 $\min(k_{ij})$ 分别为 k_{ij} 的最大值和最小值。

(2) 按式(3)计算第 j 项指标下 i 个样本指标值的比例 f_{ij} , 得到矩阵 $F = f_{ij} (m \times n)$ 。

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (3)$$

(3) 采用熵权法计算指标权重。按式(4)计算信息熵值 e_j , 信息熵值 e_j 越大, 第 j 个指标的信息熵越大。按式(4)计算权重, 熵值法计算所得指标系数越大, 权重越大, 对结果的贡献越大。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (4)$$

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (5)$$

(4) 将熵权法求得的权重应用于 TOPSIS 法正负理想序列的求解。根据指标权重构建式(6)所示规范化决策矩阵 R , 分别按式(7)、式(8)确定最优方案 Z^+ 和最劣方案 Z^- , 分别按式(9)、式(10)计算正理想解距离 D_i^+ 和负理想解距离 D_i^- , 最后按式(11)计算第 i 组试验的得分 S_i 。

$$R = |r_{ij}|_{m \times n} = |\omega_j \times x_{ij}|_{m \times n} \quad (6)$$

$$Z^+ = \max\{r_{ij}\} \quad (7)$$

$$Z^- = \min\{r_{ij}\} \quad (8)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i^+ - r_{ij})^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i^- - r_{ij})^2} \quad (10)$$

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

熵权法计算结果如下: 坍落拓展度的权重为 16.6%; J 环拓展度的权重为 19.8%; 扩展时间的权重为 17.8%; 高度差的权重为 21.1%; 离析率的权重为 24.59%。熵权法改进的 TOPSIS 评价法计算结果见表 3。

表 3 熵权法改进的 TOPSIS 评价法计算结果

编号	正理想解 距离 D^+	负理想解 距离 D^-	综合得分	排序
G-6-600-8	0.075 34	0.249 07	0.767 74	1
P-6-190-8	0.103 36	0.207 12	0.667 06	2
S-24-80-4	0.105 09	0.200 48	0.656 07	3
S-6-40-8	0.139 79	0.175 80	0.557 06	4
G-24-1600-15	0.224 97	0.165 83	0.424 33	5
P-24-780-15	0.254 90	0.134 06	0.344 67	6

注: 编号中, G 表示玻璃纤维, P 表示聚丙烯纤维, S 表示钢纤维, 字母后数字分别为纤维长度、长径比、纤维掺量。例如 G-6-600-8 指掺入玻璃纤维, 纤维长度为 6 mm, 长径比为 600, 掺量为 0.8%。

根据熵权法计算结果, 自密实混凝土的坍落拓展度、J 环拓展度、扩展时间、离析率等工作性能指标中, 离析率的权重最大, 说明其相对重要性较高; 坍落拓展度的权重较小, 说明其相对重要性较低。

由表 3 可知: G-24-1600-15 试样的综合得分较低, 与 G-6-600-8 试样相比下降 44.7%, 其工作性能较差; 掺入 0.8% 长度为 6 mm 玻璃纤维的自密实混凝土的工作性能综合评价最佳, 掺入 1.5% 长度为 24 mm 聚丙烯纤维的自密实混凝土的工作性能综合评价最差。

3.2 基于灰色关联的掺纤维自密实混凝土工作性能分析

基于灰色关联分析方法^[14], 以坍落拓展度、J 环拓展度、扩展时间、高度差及离析率作为母序列, 影响系统行为的因素组成的 3 个纤维特征参数的数据序列作为子序列进行分析, 结果见表 4。

表 4 灰色关联法分析结果

纤维特 征参数	关联度				
	坍落拓展度	J 环拓展度	扩展时间	高度差	离析率
长径比	0.636	0.616	0.665	0.662	0.678
长度	0.537	0.535	0.996	0.990	0.975
掺量	0.533	0.531	0.993	0.990	0.871

在灰色关联分析中,关联度越大表示变量之间的关联程度越强,可根据关联度分析纤维特征参数与自密实混凝土工作性能的关联程度。由表 4 可知:1) 纤维长度与自密实混凝土工作性能的关联程度最高,其次为纤维掺量,纤维长径比的关联度较小。为保证自密实混凝土具有良好的工作性能,应控制纤维长度和纤维掺量。2) 坍落拓展度、J 环拓展度与纤维特征参数的关联度较小,对系统变化的响应较弱,不宜作为响应系统变化的敏感指标;扩展时间、高度差、离析率与纤维特征参数的关联度较高,表明纤维特征参数变化主要对自密实混凝土工作性能中充填性能和间隙通过性能产生影响,对流动性的影响较小。若要求自密实混凝土具有较好的充填能力与间隙通过能力,则应着重考虑纤维特征参数的影响。

4 结论

(1) 纤维的掺入会不同程度降低自密实混凝土的流动性、充填性能和通过性,但有助于提高自密实混凝土的稳定性。

(2) 纤维掺量增加会显著降低自密实混凝土的充填性能;随着纤维长径比的增大,自密实混凝土的工作性能降低;各类纤维中,掺玻璃纤维自密实混凝土的工作性能较好,掺钢纤维的自密实混凝土的抗离析性能较差。

(3) 纤维长度是影响自密实混凝土工作性能的主要因素,随着纤维长度的增加,自密实混凝土的各项工作性能指标降低;其他纤维参数的影响较小,其中纤维长径比与自密实混凝土工作性能的关联程度较低。在实际工程中,可通过控制纤维长度控制自密实混凝土的工作性能,同时根据需要适当调整纤维的其他特征参数,以获得工作性能更好的自密实混凝土。

参考文献:

- [1] 罗远彬,郑愚,周玲珠,等.超高聚丙烯纤维自密实混凝土的配制及其性能探讨[J].混凝土,2020(12):118-122+126.
- [2] YEHA S,DOUBA A,ABDULLAHI O,et al.Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete[J].Construction and Building Materials,2016,121:120-133.
- [3] FRAZÃO C,CAMÕES A,BARROS J,et al.Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete[J].Construction and Building Materials,2015,80:155-166.
- [4] 冯蒙,张天成,耿海彬,等.自密实钢纤维混凝土在透水框架中的应用研究[J].人民黄河,2021,43(6):50-54.
- [5] 朱一丁,宋牧原,苟慧艳,等.硅灰聚丙烯纤维改性自密实混凝土力学性能[J].中国科技论文,2020,15(12):1401-1404.
- [6] 李超,孙潇潇,宁向向.短切玄武岩纤维对贫混凝土工作性能影响研究[J].湖南交通科技,2012,38(4):44-46+179.
- [7] ZEYAD A M.Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete[J].Journal of Materials Research and Technology,2020,9(3):4147-4158.
- [8] GENCEL O,OZEL C,BROSTOW W,et al.Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres [J]. Materials Research Innovations,2011,15(3):216-225.
- [9] 王晨.纤维对自密实混凝土工作性能和力学性能的影响分析[D].哈尔滨:黑龙江大学,2021.
- [10] 许博,李传习,何颖.双掺粉煤灰和粉状高炉矿渣的自密实混凝土流变性能的研究[J].混凝土,2022(3):160-163.
- [11] 李靖祺,徐伟.基于 Herschel-Bulkley 流变模型的自密实混凝土流动的 CFD 模拟[J].工程力学,2013,30(1):373-377.
- [12] 胡庆国,刘斌,何忠明.基于熵权-密切值法的软土地基处理方案优选[J].公路与汽运,2021(2):52-55.
- [13] 高于程,曾超,白婧荣.城市快速路灯光照明动态信息感知研究[J].公路与汽运,2021(4):43-47+55.
- [14] 李官群,田庆.基于灰色关联分析法的山区隧道围岩稳定性分析[J].公路与汽运,2021(5):152-155.

收稿日期:2022-12-17