

碱激发混杂纤维海水海砂混凝土的力学性能研究

王治华, 商怀帅

(青岛理工大学, 山东 青岛 266520)

摘要: 为解决海洋工程中混凝土材料面临的高碳排放、河砂资源短缺及海水侵蚀等问题, 探索了低碳高性能的碱激发混杂纤维海水海砂混凝土的制备与性能优化。试验采用海水海砂替代传统原材料, 以不同掺量(0%~7%)的碱激发剂激发粉煤灰(25%~40%)活性, 并掺入不同长度(6~18 mm)及混杂聚丙烯纤维, 系统研究了多因素耦合作用下材料28 d内的抗压、劈裂抗拉、抗折性能。结果表明, 当碱激发剂掺量为5%、粉煤灰掺量为30%时, 混凝土抗压强度最优; 单掺6 mm聚丙烯纤维(0.9%)可使抗拉与抗折强度分别提升11.3%和9.1%, 并显著改善材料韧性与破坏模式, 通过纤维桥接作用有效抑制裂缝扩展。该配合比实现了工业固废与海砂资源的高效利用, 为低碳耐久的海洋工程混凝土设计提供了理论依据。

关键词: 碱激发混凝土; 海水海砂混凝土; 粉煤灰; 聚丙烯纤维混凝土; 力学性能; 韧性性能

中图分类号: TU526

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0093-05

Research on the Mechanical Properties of Alkali-Excited Mixed Fiber Seawater and Sea Sand Concrete

WANG Zhihua, SHANG Huaishuai

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: To address the issues of high carbon emissions, shortage of river sand resources and seawater erosion faced by concrete materials in marine engineering, the preparation and performance optimization of low-carbon high-performance alkali-activated mixed fiber seawater sea-sand concrete are explored. In the experiments, the seawater and sea-sand are used to replace traditional raw materials. The activity of fly ash (25%~40%) is activated with alkali activators of different dosages (0% to 7%), and the different lengths (6~18 mm) and mixed polypropylene fibers are added to systematically study the compressive, splitting tensile and flexural properties of the material within 28 d under the coupling effect of multiple factors. The results show that the compressive strength of concrete is optimal when the dosage of alkali activator is 5% and the dosage of fly ash is 30%. The addition of 6 mm polypropylene fiber (0.9%) alone can increase the tensile and flexural strengths by 11.3% and 9.1% respectively, significantly improving the toughness and failure mode of the material. The fiber bridging effect effectively inhibits crack propagation. This mix proportion enables the efficient utilization of industrial solid waste and sea sand resources, providing a theoretical basis for the design of low-carbon and durable marine engineering concrete.

Keywords: alkali-activated concrete; seawater sea sand concrete; fly ash; polypropylene fiber concrete; mechanical properties; toughness performance

0 引言

目前, 针对复杂海洋环境下碱激发海水海砂混凝土的研究仍较为有限, 且多集中于单一参数的影响, 缺乏对碱激发剂掺量、粉煤灰替代率及纤维参数等多因素耦合作用的系统考察。碱激发胶凝材料

(AAB)作为一种低碳替代品, 可通过NaOH或水玻璃激发工业固废(如粉煤灰)的活性^[1-3]。在国内, 周凌炜^[4]的研究表明粉煤灰掺量越高对混凝土的收缩变形抑制效果越佳。程云虹等^[5]利用冻融循环试验探讨了混凝土抗冻性与粉煤灰掺量之间的关系, 结果表明相同水胶比下粉煤灰可有效提高其抗冻性; 研究表明, 粉煤灰能抑制收缩变形并提升抗冻性, 但高掺量会导致早期强度低、凝结时间长等问题, 通过碱激发可有效改善其性能缺陷^[6-8]。此外, 混凝土抗拉

收稿日期: 2026-04-01

作者简介: 王治华(1999—), 男, 硕士, 从事混凝土结构方面研究工作。

性能不足的问题可通过掺入聚丙烯纤维解决,其能优化孔结构、增强韧性,并提升冻融耐久性^[9-11]。这一技术路径符合国家节能减排和可持续发展的战略需求。在国外,Rickard等^[12]在70℃下分别向不同粉煤灰中加入Na₂SiO₃,发现粒度越细的粉煤灰活性越大地聚物内部结构更加致密,且表现出更好的力学性能。Emin^[13]通过钠硅酸盐(Na₂SiO₃)引发的粉煤灰基混凝土展现出优异的力学性能。国内外学者研究得到,直接在混凝土中大量使用粉煤灰会导致出现前期强度低、凝结时间长等缺陷。大量研究发现,添加碱激发剂可有效激发粉煤灰活性,改善工作性能,弥补抗压强度不足等缺陷。

目前,针对复杂多变的海洋环境,碱激发混杂纤维海水海砂混凝土(AFSSC)的力学性能研究仍较为有限。本文系统研究了碱激发剂掺量(0%、3%、5%、7%)、聚丙烯纤维(PPF)长度(6、12、18 mm)及粉煤灰替代水泥比例(25%~40%)等多因素耦合作用对AFSSC力学性能的影响规律。通过宏观力学测试与破坏形态分析,揭示纤维桥联与碱激发协同增强机理,提出适用于海洋工程的高性能、低碳化配合比设计方案,以期为海洋工程绿色建造提供理论依据与技术支持。

1 试验部分

1.1 试验概况

本试验拟采用海水海砂替代自来水和普通河沙;采用某地一级粉煤灰替代部分普通硅酸盐水泥的同时,通过添加不同浓度的碱激发剂以形成胶凝材料,再与普通石子混合搅拌,而后试验研究掺入聚丙烯纤维提高其抗拉性能及其延性性能。通过以上材料配置出不同配合比的混凝土试件,研究碱激发剂掺量(0%、3%、5%、7%)、粉煤灰掺量(25%、30%、35%、40%)及单掺混掺聚丙烯纤维(单丝长度为6、12、18 mm)不同情况下,研究其基本力学性能。

1.2 原材料

试验选用P·O 52.5普通硅酸盐水泥,粉煤灰选用一级粉煤灰,本试验研究制备的碱性激发剂由硅酸钠溶液(Na₂SiO₃,也称作水玻璃,Waterglass)与氢氧化钠(NaOH)按照一定比例配制而成,二者的技术指标分别见表1和表2;海水取自青岛市唐岛湾;细骨料采用胶州湾天然海砂;粗骨料采用粒径5~20 mm花岗岩碎石;聚丙烯纤维采用长度为6、12、18 mm的单丝短纤维;外加剂采用聚羧酸高性能减水剂。

表1 水玻璃的物理化学指标

$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	波美度/Be	模数
8.3	26.2	38~40	3.2

表2 氢氧化钠分析纯的技术指标

NaOH	Na ₂ CO ₃	NaCl	Fe ₂ O ₃
99.2	0.5	0.05	0.008

单位:%

1.3 试件准备

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)制作不同配合比下的碱激发海水海砂混凝土立方体试棱柱体试块。试块制备时预先调配好所需的碱激发剂并晾置冷却备用;搅拌时先将胶凝材料和细骨料进行3 min搅拌,把碱激发剂、海水与外加剂搅拌2 min后加入搅拌2 min,再进行边搅拌边加PPF以便其可以均匀分布试块;加入粗骨料搅拌3 min后装入模具而后振捣2 min即可。在养护温度为(20±2)℃、相对湿度为95%以上的标准养护室养护28 d后,进行立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度测试。编号中的A为碱激发剂掺量,F为粉煤灰掺量,P为纤维长度,HP则是将纤维长度6、12、18 mm采用1:1:1的比例混杂其中,其配合比见表3。

2 结果与分析

2.1 试验破坏现象

为探究不同配合比下海水海砂混凝土强度变化,研究了碱激发剂掺量、粉煤灰掺量以及聚丙烯纤维单掺或混掺对混凝土3、7、28 d抗压强度的影响。每组制作3个100 mm×100 mm×100 mm试块,加载至极限破坏(见图1)。结果表明,未掺纤维的对照组呈脆性破坏,伴有爆裂声响和1~2条贯穿主裂缝;掺纤维试件呈延性破坏,破坏集中于周边区域,内部形成多条裂缝,纤维桥联作用抑制了裂缝扩展。

劈裂抗拉试验采用100 mm×100 mm×100 mm试块,每组3个,养护28 d后加载(见图2、图3)。所有试件均出现贯穿主裂缝,但纤维增强试件在主裂缝区域可见大量被拔出或拉断的纤维,如图2箭头所示。

抗折性能试验采用100 mm×100 mm×400 mm试块,每组3个,采用三分点加载,支座间距100 mm,位移加载速度为0.1 mm/min。纤维的桥接作用在裂缝扩展中显著,通过界面黏结力延缓裂缝贯通,改善断裂韧性,使破坏模式由脆性转向延性。

2.2 结果与分析

2.2.1 立方体抗压强度试验

本研究通过正交试验设计,系统研究了碱激发

编号	海砂	水泥	粉煤灰	粗骨料	减水剂	碱激发剂		海水	PPF
						NaOH	水玻璃		
A0-F30-P0	635	350	150	1099	4	—	—	150	—
A3-F30-P0	635	350	150	1099	4	1.6	13.4	150	—
A5-F30-P0	635	350	150	1099	4	2.7	22.3	150	—
A7-F30-P0	635	350	150	1099	4	3.8	31.2	150	—
A5-F25-P0	635	375	125	1099	4	2.7	22.3	150	—
A5-F35-P0	635	325	175	1099	4	2.7	22.3	150	—
A5-F40-P0	635	300	200	1099	4	2.7	22.3	150	—
A5-F30-P6	635	350	150	1099	4	2.7	22.3	300	4.5
A5-F30-P12	635	350	150	1099	4	2.7	22.3	300	4.5
A5-F30-P18	635	350	150	1099	4	2.7	22.3	300	4.5
A5-F30-HP	635	350	150	1099	4	2.7	22.3	300	4.5

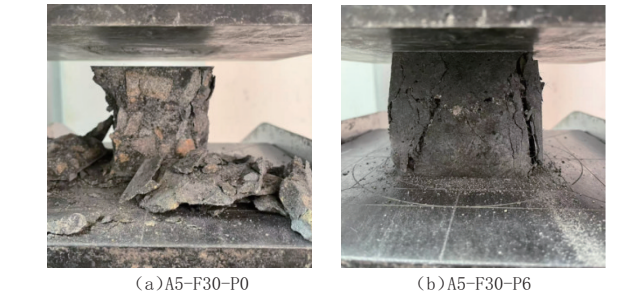


图 1 试块受压破坏照片

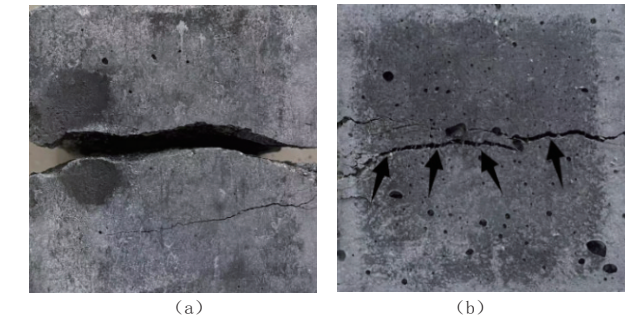


图 2 试块劈裂抗拉破坏照片(1)

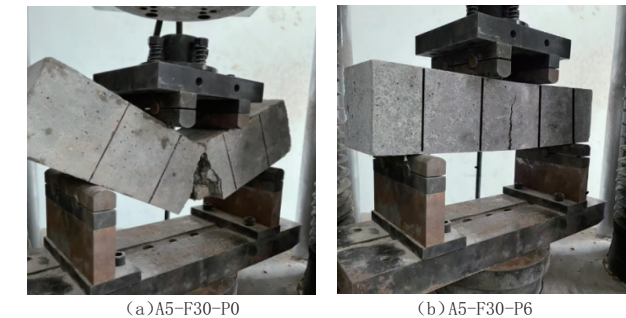


图 3 试块劈裂抗拉破坏照片(2)

剂掺量(0%、3%、5%、7%)、粉煤灰掺量(25%、30%、35%、40%)及聚丙烯纤维参数(单掺/混掺,长度6/12/18 mm)对混凝土3、7、28 d抗压强度的影响。试验测定了各组3个试块的抗压强度值并计算其平均值,以评价各因素对混凝土早期及长期力学性能的影响规律,结果见图4至图6。

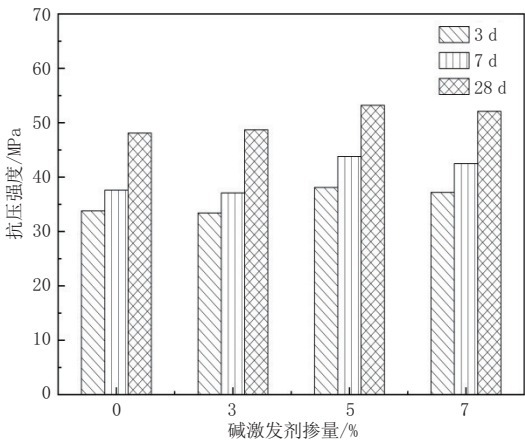


图 4 不同碱激发剂掺量下的抗压强度

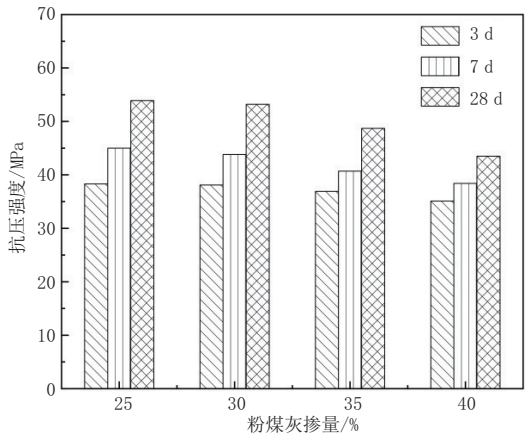


图 5 不同粉煤灰掺量下的抗压强度

2.2.1.1 碱激发剂对 AASSC 抗压强度的影响

固定水胶比0.3、粉煤灰掺量30%,考察碱激发剂掺量对抗压强度的影响。随碱激发剂掺量从0%增至7%,抗压强度均有所提高,升幅分别为1.2%、10.6%和8.3%。碱激发作用下粉煤灰中Si-O-Si和Si-O-Al键断裂,与Na⁺和OH⁻发生聚合反应生成N-A-S-H凝胶^[14]。当碱激发剂掺量为5%、粉煤灰掺量30%时,试件抗压性能最优(见图4)。

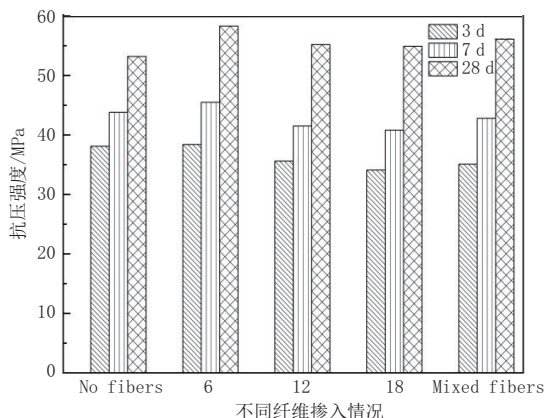


图6 不同纤维掺入情况下的抗压强度

2.2.1.2 粉煤灰对 AASSC 抗压强度的影响

固定碱激发剂掺量5%,研究粉煤灰掺量(25%~40%)对抗压强度的影响。如图5所示,随粉煤灰掺量增加,抗压强度显著下降,降幅分别为1.1%、9.1%和19.2%。适量粉煤灰(30%)可填充孔隙、提升密实度;过量(大于30%)时,Al-O和Si-O键增加,抑制C-A-S-H凝胶形成,限制强度发展。优化配比(碱激发剂5%、粉煤灰30%)下抗压强度达53.2 MPa。

2.2.1.3 PPF 对 AAFSSC 抗压强度的影响

粉煤灰可改善聚丙烯纤维与基体的界面黏结性能。研究表明^[15],聚丙烯纤维掺量0.9%时力学性能最佳。由图6可知,单掺聚丙烯纤维在掺量0.9%、长度6 mm时强度性能最优。纤维过长易在搅拌中分散不均,导致“团聚”,增大内部孔隙、降低密实度,进而降低力学性能^[16]。试验中得出纤维不易分散时会增大混凝土内部的孔隙,降低其密实度,进而造成其力学性能下降。

2.2.2 劈裂抗拉试验

试验组 A5-F30-P6 抗拉性能优于未掺纤维组,尤其单掺0.9%、长度6 mm纤维时抗拉强度提升11.3%,韧性良好,源于纤维分布均匀、性能充分发挥。其余试验组抗拉强度下降,因纤维分散不均增大孔隙、降低密实度(见图7)。

2.2.3 抗折强度测试

抗折强度反映混凝土在弯曲荷载下的抵抗能力,结果见图8。试验组 A5-F30-P6 抗折性能最优,较未掺纤维组提升9.1%。加载过程中,纤维被拔出或拉断,消耗外力做功,延缓裂缝扩展,增强混凝土韧性。掺12、18 mm纤维的试块因分布不均导致力学性能下降,抗折强度降低。

3 结 论

(1)固定粉煤灰掺量30%时,随碱激发剂掺量从

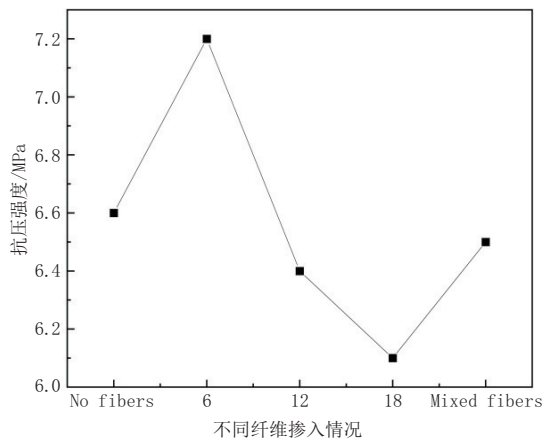


图7 不同纤维掺量下的抗拉强度

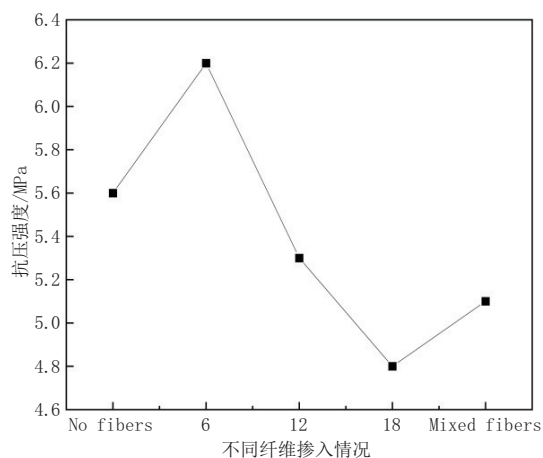


图8 不同纤维掺入情况下的抗折强度

0%增至7%,抗压强度升幅分别为1.2%、10.6%和8.3%;随粉煤灰掺量从25%增至40%,抗压强度分别下降1.1%、9.1%、19.2%。当碱激发剂掺量5%、粉煤灰掺量30%时效果最佳,单掺0.9%、长度6 mm的PPF时抗压强度提升更为突出。

(2)劈裂抗拉试验中,掺入纤维组抗拉强度均有所提高,试验组 A5-F30-P6 提升11.3%,性能最佳。

(3)抗折性能测试采用三分点加载,单掺6 mm纤维组抗折强度较未掺纤维组提升9.1%。PPF均匀分布于试块内部,起到桥接作用。依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测试,碱激发剂5%、粉煤灰30%时抗压强度达53.2 MPa,满足C50设计规范;掺入PPF后,延性破坏及抗折强度提升9.1%,符合《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)对海洋工程抗裂要求。

参考文献:

- [1] Provis J L, Palomo A, Shi C. Cement and Concrete Research[R].2015.
- [2] 延永东,王鑫,陆春华,等.干湿循环下机制砂粉煤灰混凝土的抗氯离子侵蚀性能[J].江苏大学学报(自然科学版),2023,44(6): 731-737.

- [3] 杨成,熊凌鑫,游俊杰,等.掺入普通硅酸盐水泥的粉煤灰地聚物混凝土力学性能与微观特征[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):207-215.
- [4] 周凌炜.粉煤灰掺量对混凝土收缩性能的影响试验研究[J].江西建材,2024(10):46-48.
- [5] 程云虹,陈东华,王元,混凝土抗冻性与水泥用量关系的试验研究[J].建筑材料学报,2011,14(4):536-540.
- [6] YIN B TIANHE K, JIANTING K, et al. Analysis of active ion-leaching behavior and the reaction mechanism during alkali activation of low- calcium fly ash[J].International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 1-13.
- [7] 万署,史才军,姜磊,等.碱激发胶凝材料中碱硅反应研究进展[J].硅酸盐通报,2015,34(11):3214-3221.
- [8] 姜乐乐,姜福香.碱激发胶凝材料的研究进展[J].上海涂料,2021,59(2):42-47.
- [9] 权长青,焦楚杰,杨云英,等.混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(3):363-370.
- [10] 霍俊芳,王聪,侯永利,等.纤维再生混凝土的抗冻性能及孔结构研究[J].硅酸盐通报,2018,37(7):2141-2145.
- [11] 孙传武,王学志,辛明,等.纤维增强海水海砂混凝土性能研究[J].2024,19(4):445-446.
- [12] Rickard W D A, Williams R, Temuujin J. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(9): 3390-3397.
- [13] Emin A, Kurtulu, Alzebaree R. Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete[J]. Advances in Concrete Construction, 2018(4): 6.
- [14] 王成启,郭玉林,梁远博.碳纤维对超高性能混凝土性能的影响[J].水运工程,2022(9):22-26;34.
- [15] 任大鹏.高强度聚丙烯纤维泡沫混凝土的制备及抗蚀性能分析[J].功能材料,2023,54(10):10200-10206.
- [16] 李九阳,范辛美,罗靖炜,等.聚丙烯纤维混凝土力学性能试验[J].辽宁师专学报(自然科学版),2024,26(1):106-107.
- [17] 何小兵,申强.PP纤维自密实混凝土早期强度特性与断裂性能[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(3):115-121.
- [18] 秦煜,吴华,易志坚,等.基于断裂力学能量理论的柔性纤维混凝土阻裂机理全过程分析[J].公路工程,2018,43(4):127-132.

(上接第 87 页)

- 工大学,2022.
- [9] 付军,黄豪杰,闵亦斌,等.装配式防撞护栏竖向连接设计与准静态加载分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(6):1016-1025.
- [10] 程鹏,王海渊,马永杰,等.桥梁装配式混凝土护栏纵向连接设计、分析与试验[J].公路,2025,70(2):284-289.
- [11] 卢健,贾宁.路面加铺后套筒加高护栏防护能力分析[J].公路交通科技,2022,39(增刊2):190-196.
- [12] Trujillo R M. New Mexico's 32-Day Bridge[C]/HPC: Build Fast, Build to Last. The 2006 Concrete Bridge Conference Portland Cement Association Federal Highway Administration Nevada Department of Transportation American Concrete Institute, 2006.
- [13] 高畅,胡学成,郑杰,等.预制混凝土桥梁护栏基础连接及安全性能研究[J].公路,2025,70(9):108-115.
- [14] 李环宇,王新,陈太福,等.装配式混凝土桥梁护栏嵌固基础设计与验证[J].公路交通科技,2024,41(增刊1):375-380.
- [15] 王怡祺,张霞,罗春晖,等.一种基于UHPC后浇连接的预制装配式防撞护栏设计[J].四川建筑,2024,44(4):34-38.
- [16] 王景全,张建东.装配式混凝土桥梁连接构造设计理论与工程实践[J].桥梁建设,2021,51(5):1-9.
- [17] 郝剑涛.高速公路事故隐患路段预应力防撞护栏优化设计[J].交通建设与管,2024(4):139-141.
- [18] Patel G. Development of a precast concrete barrier for bridge decks [D]. Toronto: Ryerson University, 2017.
- [19] JTG B05-01—2013 公路护栏安全性能评价标准 [S].
- [20] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- [21] JTG/T D81—2017 公路交通安全设施设计细则 [S].
- [22] 李环宇,王新,陈太福,等.装配式混凝土桥梁护栏嵌固基础设计与验证[J].公路交通科技,2024,41(增刊1):375-380.