

文章编号: 1674—8247(2023)02—0059—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.012

高石粉含量凝灰岩机制砂混凝土配制技术及性能研究

龙 行 杨清源

(中国路桥工程有限责任公司, 北京 10013)

摘 要:随着天然砂石的紧缺,机制砂成为我国建设用砂的主要来源。针对机制砂中石粉含量过高的问题,本文对石粉含量高达 15% 的凝灰岩机制砂进行了混凝土配合比优化研究,分析了凝灰岩机制砂与天然砂制备的混凝土的施工性能、力学性能和耐久性能,结果表明:在水泥用量更少的情况下,石粉含量为 15% 的凝灰岩机制砂混凝土的抗压强度、弹性模量和抗氯离子渗透性能优于天然砂混凝土,抗碳化性能与天然砂混凝土相当。

关键词:高石粉含量机制砂;混凝土配制技术;混凝土性能

中图分类号: U451⁺.2 **文献标识码:** A

A Study on Preparation Technology and Performance of Machine-made Tuff Sand Concrete with High Stone Powder Content

LONG Xing YANG Qingyuan

(China Road & Bridge Corporation, Beijing 100013, China)

Abstract: With the shortage of natural sand and gravel, machine-made sand has become the main source of sand for construction in China. In view of the high content of stone powder in machine-made sand, this paper studied the concrete mix ratio optimization of machine-made tuff sand with stone powder content up to 15%, and analyzed the workability, mechanical behavior, and durability of concrete made of machine-made tuff sand and natural sand. The results show that with less cement, the compressive strength, elastic modulus, and chloride ion permeability resistance of machine-made tuff sand concrete with 15% stone powder are better than those of natural sand concrete, and the carbonation resistance is equivalent to that of natural sand concrete.

Key words: machine-made sand with high stone powder content; concrete preparation technology; concrete performance

随着基础建设的稳定推进,我国年砂石用量超过了 150 亿 t,近两年甚至超过了 200 亿 t。砂石大量的消耗导致天然砂石资源逐渐匮乏^[1-2]。为实现混凝土行业的可持续发展,用机制砂替代天然砂已是大势所趋^[3-5]。

机制砂通过破碎岩石得到,具有表面粗糙、棱角

较多且形状不规则、级配较差和石粉含量高等特点。石粉是机制砂中小于 75 μm 的微粉颗粒,其化学组成和矿物组成和机制砂相同,具有填充效应和晶核作用。部分学者研究发现,一定含量的石粉可以改善混凝土拌合物流动性能、力学性能和耐久性^[6-9];石粉含量过高时,混凝土拌合物黏稠度大,和易性差,不利于

收稿日期:2022-02-22

作者简介:龙行(1990-),男,工程师。

引文格式:龙行,杨清源.高石粉含量凝灰岩机制砂混凝土配制技术及性能研究[J].高速铁路技术,2023,14(2):59-63.

LONG Xing, YANG Qingyuan. A Study on Preparation Technology and Performance of Machine-made Tuff Sand Concrete with High Stone Powder Content[J]. High Speed Railway Technology, 2023,14(2):59-63.

施工,混凝土的耐久性也会变差^[10]。因此,对机制砂混凝土配合比进行优化设计,可以使机制砂混凝土更好地应用于工程。

目前国内外关于机制砂石粉含量限值的研究较多,但缺乏关于高石粉含量机制砂的混凝土配制技术研究。为此,本文采用石粉含量高达 15%的凝灰岩机制砂取代天然砂,研究石粉含量高达 15%的凝灰岩机制砂混凝土配合比设计方法的可行性,对比分析了凝灰岩机制砂与天然砂制备混凝土的施工性能、力学性能和耐久性能。研究成果可为高石粉含量凝灰岩机制砂的配合比设计提供参考和指导。

1 试验

1.1 试验材料

(1)胶凝材料

①普通硅酸盐水泥 P. O42. 5 的基本性能如表 1 所示。

表 1 P.O42. 5 水泥物理性能表

标准稠度 用水量/ %	凝结时间/min		细度(m ² /kg)	抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28d
27. 6	170	320	340	25. 1	52. 3	4. 3	8. 0

②矿渣粉, S95 级, 比表面积 450 m²/kg, 流动度比 99%, 28d 活性指数 96%。

③粉煤灰, II 级, 需水量比 97%, 细度 18. 2%, 28 d 活性指数 75%。

(2)砂石

①碎石, 5 ~ 25 mm 连续级配, 吸水率 1. 1%, 松散堆积密度 1 480 kg/m³。

②天然砂为细度模数 2. 8 的天然砂, II 区中砂, 含泥量 1. 0%; 机制砂为凝灰岩机制砂, 基本性能如表 2 所示; 凝灰岩机制砂石粉按照 JGJ/T 318《石灰石粉在混凝土中应用技术规程》进行试验, 性能如表 3 所示, 粒径分布如表 4 所示, 主要化学成分如表 5 所示。

表 2 凝灰岩机制砂的基本性能表

表观密度/ (kg/m ³)	石粉含 量/%	MB 值	细度 模数	压碎值 /%	泥块含 量/%	吸水率 /%
2 680	15. 0	1. 3	3. 0	19	0	1. 2

表 3 凝灰岩机制砂石粉的性能表

石粉类型	MB 值	流动度比/%	活性指数/%	
			7 d	28 d
凝灰岩机制砂石粉	1. 0	97	70	67

表 4 凝灰岩机制砂石粉粒径分布表

粒径区间/μm	< 3	3 ~ 32	32 ~ 65	65 ~ 80	> 80
质量百分比/%	2. 15	39. 35	38. 94	19. 56	13. 24

表 5 凝灰岩机制砂石粉化学成分表

组分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
质量百分比/%	71. 26	13. 61	7. 35	1. 95	3. 06	2. 17

(3)减水剂: 聚羧酸系高性能减水剂, 含固量 23%, 减水率 28%。

(4)水: 试验室用水。

1.2 试验方法

混凝土坍落度和扩展度按照 GB/T 50080 - 2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行试验, 抗压强度和弹性模量按照 GB/T 50081 - 2019《普通混凝土物理力学性能试验方法标准》进行试验, 抗氯离子渗透性能和抗碳化性能按照 GB/T 50082 - 2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行试验。

2 结果与讨论

2.1 混凝土配合比设计方法

机制砂配合比设计研究主要包括机制砂石粉含量的限值和将石粉用作掺合料两个方向。部分学者将机制砂中的石粉全部作为机制砂设计配合比, 从而对机制砂石粉含量进行限定; 周明凯课题组^[11-12]认为机制砂中含有一定量的石粉对机制砂混凝土的力学性能有提高作用, 对于不同强度等级的混凝土, 石粉最佳含量不同, C30、C60 和 C80 机制砂混凝土的石粉最佳含量分别为 10% ~ 15%、7% ~ 10% 和 3% ~ 5%。李北星^[13]进行配合比设计时把石粉全部看作为掺合料, 并等质量替代粉煤灰, 在 C30、C60 和 C80 混凝土中, 石粉取代粉煤灰时, 取代率不超过 18. 75%、22. 5% 和 15%; 高超^[14]将石粉替代水泥进行研究, 石粉含量为 15% 石灰岩机制砂配制混凝土, 在性能与天然砂相近时, 混凝土可以节约水泥 40 kg/m³。

考虑到机制砂表面比较粗糙、棱角突出且较多, 需要更多的浆体包裹, 本文将机制砂中石粉超过 5% 的部分作为掺合料, 将其归为胶凝材料总量和水胶比中。计算砂率时砂包含 5% 的石粉, 把石粉超过 5% 的部分看作掺合料取代水泥。考虑到凝灰岩石粉活性极低, 取代水泥时, 每 2 kg 石粉等质量替代 1 kg 水泥, 水胶比较天然砂混凝土降低 0. 06。根据 JGJ 55 - 2011《普通混凝土配合比设计规程》分别进行了 C30、C50 混凝土的配合比设计, 相应的混凝土配合比如表

表 6 C30 和 C50 天然砂和凝灰岩机制砂混凝土配合比表(kg/m ³)											
编号	石粉含量	水胶比	胶材	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂中计入胶材的石粉	砂(含 5% 石粉)	砂	石	水
C30T	天然砂	0.48	370	280	50	40	0	810	810	1 030	177
C30J15	15%	0.42	410	236	50	40	88	792	890	1 020	174
C50T	天然砂	0.38	500	430	40	30	0	735	735	1 016	190
C50J15	15%	0.32	540	390	40	30	80	720	815	1 016	173

6 所示。

2.2 拌合物性能

采用石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂和天然砂分别配制 C30 和 C50 混凝土,减水剂用量和施工性能如表 7 所示。将机制砂中的石粉含量超过 5% 的部分作为掺合料替代水泥后,由于石粉按照按质量比 2 : 1 取代水泥,因此增加了胶材的总质量,降低了水胶比。在拌合物相近坍落度下, C30 和 C50 混凝土的减水剂用量都有少量增加。由于胶材总量的增加,机制砂混凝土拌合物中有更多的富余浆体包裹骨料和填充空隙,同坍落度下表现出更大的扩展度,具有同天然砂混凝土拌合物相近甚至更好的流动性能,解决了配制机制砂混凝土时拌合物和易性差、容易离析分层的问题。

表 7 C30 和 C55 天然砂和凝灰岩机制砂混凝土减水剂用量和拌合物性能表

编号	减水剂用量/(kg/m ³)	初始坍落度/mm	初始扩展度/mm	1 h 坍落度/mm	1 h 扩展度/mm
C30T	2.9	225	520×530	190	410×410
C30J15	3.1	220	540×560	175	380×390
C50T	4.7	230	570×580	205	480×480
C50J15	5.4	235	590×610	195	460×470

天然砂混凝土和机制砂混凝土拌合物 1 h 后坍落度和扩展度的经时损失率如图 1 所示。机制砂取代天然砂后,混凝土拌合物的坍落度和扩展度的经时损失率更大,即拌合物的保水性能和保塑性能有所降低,凝灰岩石粉的 SiO₂ 含量较高,其流动度比为 97%;凝灰岩石粉的添加显著增大了单方混凝土粉体颗粒的比表面积,对于水分子和减水剂分子具有一定的吸附性,拌合物中自由水数量损失更快,从而增加了坍落度和扩展度的经时损失率。

综合 C30 和 C50 混凝土拌合物性能可知:按照表 6 中的配合比设计的高石粉凝灰岩机制砂混凝土的拌合物具有较好的工作性能,但由于凝灰岩石粉具有一定的吸附性,相较于天然砂配制混凝土,高石粉凝灰岩机制砂混凝土会导致减水剂用量有所增加,拌合物坍落度和扩展度的经时损失率有所增加。

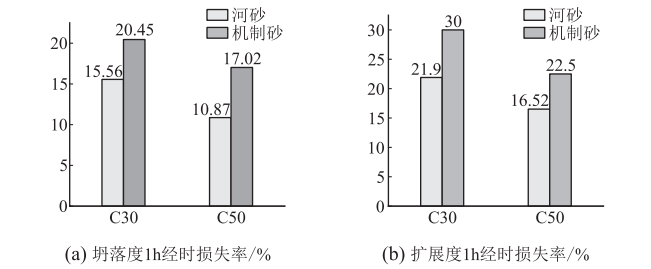


图 1 石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂对拌合物流动性能的影响图

2.3 力学性能

2.3.1 抗压强度

由天然砂和石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂配制的 C30 和 C50 混凝土各龄期的抗压强度如图 2 所示。无论是 C30 还是 C50 混凝土,机制砂混凝土各个龄期的抗压强度均高于天然砂混凝土。C30 机制砂混凝土 3 d、7 d、28 d、56 d 的抗压强度分别提高了 8.1%、8.7%、3.0%、4.9%, C50 混凝土机制砂混凝土 3 d、7 d、28 d、56 d 的抗压强度分别提高了 4.3%、9.5%、7.3%、8.5%。用机制砂中石粉含量超过 5% 的部分取代水泥,在降低水泥用量后,混凝土的抗压强度不仅没有下降,反而有所提高。一方面,石粉可以填充胶凝材料间的空隙,优化胶凝材料间颗粒堆积和尺寸分布,从而降低混凝土内部的孔隙率,减小孔隙孔径,提高混凝土的密实度^[15];另一方面,机制砂表面粗糙,与浆体啮合得更为紧密,提高了骨料与浆体间的粘结强度,从而增强了界面过渡区抑制裂缝发展的能力^[16]。因此,表 6 配合比下不同强度等级的机制砂混凝土各个龄期的抗压强度都大于天然砂混凝土。

2.3.2 弹性模量

由天然砂和石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂分别配制的 C30 和 C50 混凝土各龄期的弹性模量如图 3 所示。不同强度等级下,机制砂混凝土各个龄期弹性模量均稍大于天然砂混凝土,表现出和抗压强度相同的变化趋势。一方面,机制砂表面更为粗糙,棱角较多,增强了骨料与浆体间的咬合力,提高了混凝土的弹性模量,同时,石粉对混凝土强度的提高作用也有

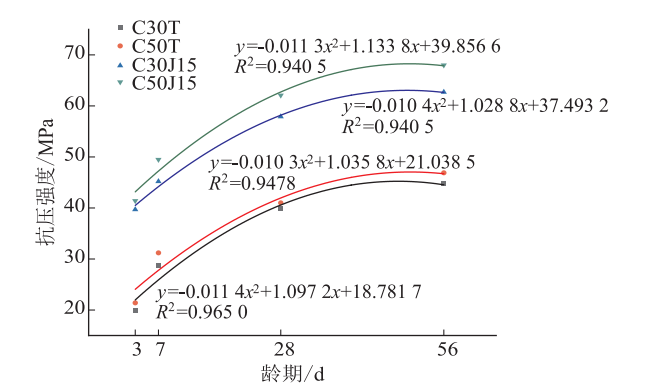


图 2 石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂对混凝土抗压强度的影响图

利于弹性模量的增加;另一方面,将含量超过 5% 部分的石粉以 2 : 1 的比例取代水泥后浆体体积增多,从而增加了浆骨比,对混凝土的弹性模量有不利影响^[17]。整体来看,机制砂混凝土的弹性模量稍有提高。

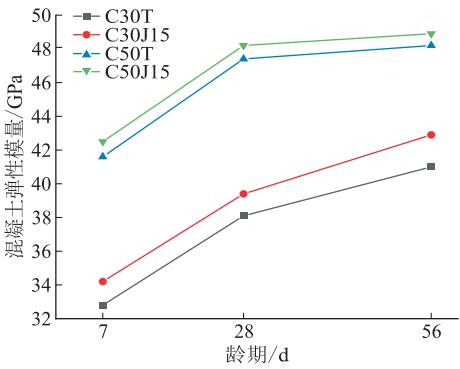


图 3 石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂对混凝土弹性模量的影响图

2.4 耐久性性能

2.4.1 抗氯离子渗透性能

由天然砂和石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂配制的 C30 和 C50 混凝土 28 d 和 56 d 电通量试验结果如图 4 所示。对于 C30 和 C50 混凝土,机制砂混凝土的 28 d 和 56 d 电通量均小于天然砂混凝土, C30 机制砂混凝土 28 d、56 d 的电通量分别降低了 11.92%、8.01%; C50 机制砂混凝土 28 d、56 d 的电通量分别降低了 8.26%、11.74%; 机制砂混凝土具有比天然砂混凝土更强的抗氯离子渗透能力。对于由高石粉含量凝灰岩机制砂制备的混凝土,石粉可以改善颗粒级配,填充水化产物浆体中的孔隙,提高浆体内部水化产物的密实度,减少有害离子在浆体中的扩散通道。同时,凝灰岩石粉对自由水有一定的吸附作用,可以降低混凝土的泌水率,对骨料表面的微区泌水效

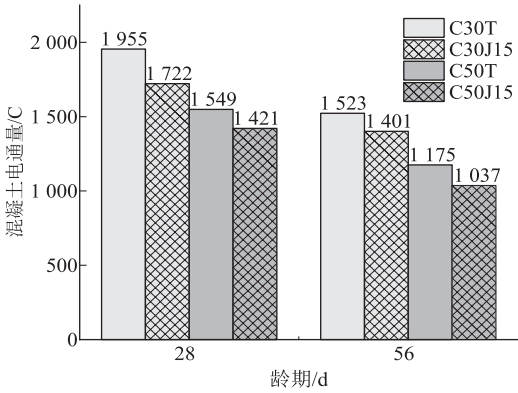


图 4 石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂对混凝土电通量的影响图

应有一定的抑制作用,优化了界面过渡区,从而提高了混凝土的抗氯离子渗透性能。

2.4.2 抗碳化性能

由天然砂和石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂分别配制的 C30 和 C50 混凝土的抗碳化性能试验结果如图 5 所示,机制砂混凝土的 3 d、7 d 碳化深度都大于天然砂混凝土,随着碳化的继续进行,机制砂混凝土的碳化深度增长速率小于天然砂混凝土,其 14 d 的碳化深度和天然砂混凝土相当,继续碳化至 28 d 时,其碳化深度已经小于天然砂混凝土。机制砂试验中石粉取代了部分水泥,水泥用量降低, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成数量减少,机制砂混凝土早期的抗碳化性能降低^[18]。随着龄期的增长,混凝土强度逐渐增加,内部越来越密实,石粉的填充作用抑制了 CO_2 在混凝土内部的扩散,混凝土表层也越来越密实,机制砂混凝土后期的抗碳化性能有所提高。

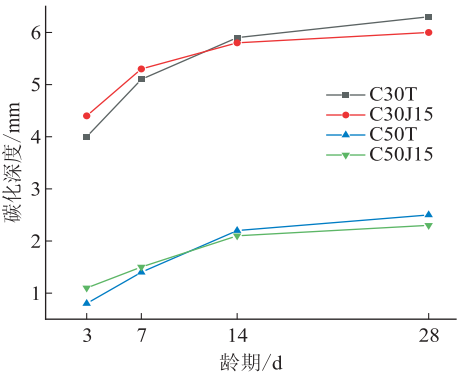


图 5 石粉含量 15% 的凝灰岩机制砂对混凝土抗碳化性能的影响图

3 结论

本文通过对石粉含量高达 15% 的凝灰岩机制砂

进行配合比优化设计,分析了凝灰岩机制砂与天然砂制备的混凝土的施工性能,力学性能和耐久性能,得出以下结论:

(1)通过优化配合比可以配制出拌合物工作性能良好,力学性能和耐久性不低于天然砂混凝土的凝灰岩机制砂混凝土,节约水泥用量近 40 kg/m^3 。

(2)凝灰岩机制砂具有一定的吸附性,高石粉含量凝灰岩机制砂混凝土的减水剂用量略大于天然砂混凝土。

(3)高石粉含量的凝灰岩配制 C30 和 C50 混凝土时,机制砂混凝土的抗压强度、弹性模量和抗氯离子渗透性能优于天然砂混凝土,抗碳化性能与天然砂混凝土相当。

参考文献:

- [1] 董藏龙,肖志敏,夏京亮. 两种生产工艺机制砂掺配混凝土性能的影响[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 65-69.
DONG Canglong, XIAO Zhimin, XIA Jingliang. Effects of Blending of Machine-made Sand Manufactured with Two Production Technologies on Concrete Performance [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 65-69.
- [2] 余韵,杨建锋. 全球砂石资源开发利用态势与治理对策研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(4): 6-10.
YU Yun, YANG Jianfeng. Research on the Development and Governances of Global Sand Resources [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(4): 6-10.
- [3] 刘战鳌. 机制砂中细粉对混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
LIU Zhan'ao. Research on the Effect and Mechanism of Microfines in Manufactured Sand on Concrete Properties [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [4] 刘战鳌,周明凯,李北星. 石粉对机制砂混凝土性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(19): 100-103.
LIU Zhan'ao, ZHOU Mingkai, LI Beixing. Research Progress on Influence of Microfines on Manufactured Sand Concrete's Performance [J]. Materials Review, 2014, 28(19): 100-103.
- [5] 李北星,王稷良,柯国炬,等. 机制砂亚甲基蓝值对混凝土性能的影响研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(4): 30-32, 35.
LI Beixing, WANG Jiliang, KE Guoju, et al. Study on Effect of Methylene Blue Value of Manufactured Sand on Performance of Concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(4): 30-32, 35.
- [6] 王稷良,周明凯,贺图升,等. 石粉对机制砂混凝土抗渗透性和抗冻融性能的影响(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 482-486.
WANG Jiliang, ZHOU Mingkai, HE Tusheng, et al. Effects of Stone Dust on Resistance to Chloride Ion Permeation and Resistance to Freezing of Manufactured Sand Concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 482-486.
- [7] TOPÇU İ B, UĞURLU A. Effect of the Use of Mineral Filler on the Properties of Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(7): 1071-1075.
- [8] 李北星,周明凯,蔡基伟,等. 机制砂中石粉对不同强度等级混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2008(7): 51-54, 57.
LI Beixing, ZHOU Mingkai, CAI Jiwei, et al. Effect of Microfines in Manufactured Sand on Properties of Various Strength Grade Concretes [J]. Concrete, 2008(7): 51-54, 57.
- [9] JOUDI-BAHRI I, LECOMTE A, BENOUEZDOU M, et al. Use of Limestone Sands and Fillers in Concrete without Superplasticizer [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(6): 771-780.
- [10] 李林,张学峰,徐斌,等. 花岗岩机制砂石粉含量对混凝土性能的影响[J]. 交通科技, 2021(3): 128-132.
LI Lin, ZHANG Xuefeng, XU Bin, et al. Influence of Stone Powder Content in Granite Manufactured Sand on Performance of Concrete [J]. Transportation Science & Technology, 2021(3): 128-132.
- [11] 王稷良. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
WANG Jiliang. Research of Effect sand Mechanism of Manufactured Sand Characteristics on Portland Cement Concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [12] 蔡基伟. 石粉对机制砂混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
CAI Jiwei. Research of Effects and Mechanism of Microfines on Manufactured Fine Aggregate Concretes [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [13] 李北星,周明凯. 石灰岩机制砂中石粉作掺合料对混凝土工作性和强度的影响[J]. 公路, 2007, 52(12): 141-145.
LI Beixing, ZHOU Mingkai. Effect of Quarry Waste Powder in Limestone Manufactured Sand as Mineral Admixture on Workability and Strength of Concretes [J]. Highway, 2007, 52(12): 141-145.
- [14] 李家和,张保生,王云东,等. 石灰岩高石粉含量机制砂混凝土配合比设计及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 3641-3645, 3651.
LI Jiahe, ZHANG Baosheng, WANG Yundong, et al. Study on Mixture Ratio Design and Performance of Manufactured Sand Concrete with High Content of Limestones [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11): 3641-3645, 3651.
- [15] 史才军,王德辉,贾煌飞,等. 石灰石粉在水泥基材料中的作用及其对耐久性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1582-1593.
SHI Caijun, WANG Dehui, JIA Huangfei, et al. Role of Limestone Powder and Its Effect on Durability of Cement-based Materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1582-1593.
- [16] 谢开仲,刘振威,盖炳州,等. 机制砂混凝土应力-应变试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3823-3831.

(下转第 80 页)

Railway Standard Design, 2022, 66(5): 95 – 99, 105.

[9] 洪开荣. 超长深埋高地应力TBM隧道修建关键技术[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 1 – 23.

HONG Kairong. Key Technology for Construction of Ultra-long and Deep-buried TBM Tunnels with High Geostress [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 1 – 23.

[10] 宋章,魏永幸,王朋,等. 复杂艰险山区地质灾害特征及减灾选线研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 8 – 12.

SONG Zhang, WEI Yongxing, WANG Peng, et al. Research on Geological Disaster Characteristics and Location for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 8 – 12.

[11] 汪珂. 深埋隧道岩爆预测及防治技术现状综述[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 212 – 224.

WANG Ke. Summary of Rock Burst Prediction and Prevention Technology in Deep-buried Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 212 – 224.

[12] 张镜剑,傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034 – 2042.

ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and Its Criteria and Control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 – 2042.

[13] 冯欢欢,洪开荣,杨延栋,等. 极端复杂地质条件下TBM隧道施工关键技术研究及应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 42 – 54.

FENG Huanhuan, HONG Kairong, YANG Yandong, et al. Research and Application of Key Construction Technologies for TBM-driven Tunnels under Extreme Complex Geological Conditions [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 42 – 54.

[14] 涂齐亮,闫苏涛,钟传江,等. 隧道岩爆预测及防治施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 83 – 86.

TU Qiliang, YAN Sutaο, ZHONG Chuanjiang, et al. Research on Rock Burst Prediction and Prevention Technology in Tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2019(4): 83 – 86.

[15] 李忠华,张永利,孙可明. 大台井深部岩巷岩爆发生机理与预防措施研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 630 – 632.

LI Zhonghua, ZHANG Yongli, SUN Keming. A Study of Mechanism and Prevention of Rockbursts in Deep Galleries of Datai Coal Mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 630 – 632.



(上接第63页)

XIE Kaizhong, LIU Zhenwei, GE Bingzhou, et al. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, et al. Stress-Strain Test of Manufactured Sand Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(12): 3823 – 3831.

[17] 蒋正武,潘峰,吴建林,等. 机制砂参数对混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2011(8): 66 – 70.

JIANG Zhengwu, PAN Feng, WU Jianlin, et al. Study on the Influence of Machine-made Sand Parameters on Concrete Performance [J]. China Concrete, 2011(8): 66 – 70.

[18] 赵井辉,刘福胜,周广发,等. 废弃矿物掺合料水工混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(12): 91 – 94.

ZHAO Jinghui, LIU Fusheng, ZHOU Guangfa, et al. Experimental Study on Carbonation Resistance of Hydraulic Concrete Adding Waste Mineral Admixtures [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(12): 91 – 94.