

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202305222024061989

文章编号: 1674-599X(2024)03-0009-08

引用格式: 田建国. 花岗岩洞渣在抗渗混凝土中的应用性能研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 9-16.

Citation: TIAN Jianguo. Study on the application performance of granite cavern slag in impermeable concrete[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 9-16.

花岗岩洞渣在抗渗混凝土中的应用性能研究

田建国

(中交一公局第一工程有限公司, 北京 102205)

摘要: 为对隧道开挖过程中产生的大量废弃洞渣进行固废利用, 以无岳高速 WYTJ-07 标段隧道施工项目为依托, 用其产生的变质花岗岩配制机制碎石、机制砂; 开展花岗岩抗渗混凝土配合比试验, 揭示花岗岩洞渣对抗渗混凝土性能的影响规律, 获得了 C30P10 花岗岩抗渗混凝土的最优配合比。试验结果表明: 通过分析花岗岩洞渣的力学性能及岩石成分, 判定该隧道花岗岩洞渣能满足要求, 可以用来配制抗渗混凝土; 根据不同配合比混凝土的坍落度、28 d 抗压强度、抗渗等级, 发现降低水胶比以及增大外加剂掺量能有效提高花岗岩抗渗混凝土的工作性能; 当水灰比为 0.43、外加剂掺量为 1.1% 时, C30P10 花岗岩抗渗混凝土的性能满足要求, 且最为经济。

关键词: 混凝土; 变质花岗岩; 配合比优化; 渗透性; 抗压强度

Study on the application performance of granite cavern slag in impermeable concrete

TIAN Jianguo

(No.1 Engineering Co., Ltd. of FHEC of CCCC, Beijing 102205, China)

Abstract: In order to make solid waste utilization of the large amount of waste cave slag produced during tunnel excavation, based on the engineering project of Wuyue high-speed WYTJ-07 bidding section, the produced metamorphic granite was adopted to prepare machine crushed gravel and machine crushed sand. The mix ratio experiment on the granite impermeable concrete was carried out, followed by revealing the influences of granite cave slag on the performance of impermeable concrete to determine the optimal mix ratio of C30P10 granite impermeable concrete. Experimental results show that, according to its mechanical properties and composition, the granite cave slag obtained from this tunnel site meets the requirement of preparing impermeable concrete. According to the slump degree, 28 d compressive strength and impermeability grade of different proportions of concrete, it was found that reducing the water-cement ratio and increasing the amount of admixture would effectively improve the working performance of granite impermeable concrete. When the water-cement ratio is 0.43 and admixture content is 1.1%, the performance of C30P10 granite impermeable concrete meets the requirements and it is the most cost-effective.

Key words: concrete; metamorphic granite; mix ratio optimization; permeability; compressive strength

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 中交一公局集团有限公司科技研发项目(143010100)

通信作者: 田建国(1989—), 男, 工程师, 主要从事混凝土研发和桥梁施工方面的研究工作。E-mail: 646785397@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

我国 75% 左右的国土面积是山地或丘陵,随着我国城镇化进程的加快,山区高速公路隧道里程逐年递增。截至 2022 年底,我国高速公路隧道共 24 850 座,总长约 2 678.43 万 m。其中,特长隧道 1 752 座,总长约 795.11 万 m;长隧道 6 715 座,总长约 1 172.82 万 m^[1]。隧道里程逐年增加,隧道洞渣的处理问题日益凸显。目前,仅有少数隧道洞渣被合理利用,成为道路的填充料,大部分洞渣则被运往弃渣厂进行堆放或就地掩埋^[2]。这种处理方式不仅占用了大量土地,而且破坏了当地的生态平衡,给当地生态系统带来了极大的压力和威胁。与此同时,花岗岩在全国范围内皆有分布,对隧道花岗岩洞渣进行固废处理是隧道开挖工程无法避免的一项难题。

当前,国内外的研究者已经开始探索将花岗岩作为混凝土骨料的可能性,并在花岗岩混凝土领域进行了初步的理论研究与实践应用。SHWETHA 等^[3]对花岗岩原材料进行加工,使用粒径为 12.5 ~ 20.0 mm 的花岗岩碎块和花岗岩石粉替代玄武岩骨料制备 M30、M40 混凝土,发现混凝土的强度随着花岗岩骨料替代率的增加呈先增加后降低的趋势,当花岗岩石粉的替代率为 4%、花岗岩碎块的替代率为 10% 时,混凝土各方面的性能有较为明显的提升。TANGARAMVONG 等^[4]用花岗岩替代混凝土细骨料配制低强度 (20 MPa) 混凝土和高强度 (50 MPa) 混凝土,发现混凝土坍落度与抗拉强度随着花岗岩替代率的增加而降低;NUAKLONG 等^[5]使用花岗岩配制无机聚合物混凝土,发现混凝土的 7 d 抗压强度明显增大;GUPTA 等^[6]使用花岗岩石粉取代细骨料配制混凝土,发现当花岗岩粉末的体积为原始细骨料的 40% 时,混凝土抗压强度、拉伸黏结强度和黏接强度分别比对照砂浆提高了 4%、23% 和 23%。赵更歧等^[7]使花岗岩破碎,并用其代替天然粗、细骨料生产混凝土,发现部分花岗岩颗粒可以填充骨料颗粒间的空隙,使混凝土更加密实,并进一步增强了混凝土的抗冻性能。杨海成等^[8]使用花岗岩机制砂配制 C80 高强高性能混凝土,发现花岗岩可以进一步提升高强混凝土的力学性能。赵井辉等^[9]将花岗岩石粉作为掺合料制备水工混凝土,发现适当的粒径为 0 ~ 150 μm 花岗岩石粉掺量有利于提高混凝土的抗渗性能。万永旺等^[10]使用机制砂配制了 C30、C50 混凝土,发现使用花岗岩机制砂充当细骨料可以提升混凝土的抗压强度和弹性模

量。管小明^[11]使用花岗岩配制 C60 高性能混凝土,发现当混凝土破裂时,大量碎石穿过了破裂面。范华峰等^[12]在水工混凝土中掺入花岗岩石粉,发现混凝土的抗渗性能可以提升 50%。

综上所述,现有研究主要是针对花岗岩废料 (小粒径花岗岩粉末) 进行试验研究的,而隧道花岗岩洞渣混凝土的研发目前仍处于初级阶段。目前,仅有少数高速公路和铁路工程尝试将隧道洞渣应用于混凝土中,进行了一些初步的应用探索^[13-17]。为了防止对花岗岩矿山资源的过度开采,促进道路交通行业“碳达峰、碳中和”目标的早日实现^[18],本文聚焦无岳高速 WYTJ-07 标段隧道工程 (以下简称无岳隧道) 中变质花岗岩洞渣的利用研究。首先,选取隧道洞渣中的优质花岗岩,经过加工制成机制碎石和机制砂作为 C30P10 抗渗混凝土的粗、细骨料,以全面替代传统的天然碎石和天然砂;随后,通过调整水胶比和外加剂,探究花岗岩骨料混凝土抗压强度和抗渗性能的变化规律,确定 C30P10 抗渗混凝土的最优配合比;最后,利用这一配合比配制花岗岩抗渗混凝土并应用于隧道工程中,为隧道工程建设的材料选择提供借鉴。

1 工程背景

无岳高速 WYTJ-07 标段工程总长 16 km,其关键部分包括老虎岩、双峰庵、驼岭 3 个大型隧道,总长 14 765 m。隧道洞身穿越的地层主要为变质花岗岩,其岩性复杂,预计在开挖过程中将产生 158 万 m³ 花岗岩洞渣。与此同时,这 3 个隧道在施工过程中会经过多处富水区段,因此需要用大量抗渗混凝土来达到隧道衬砌不渗、不漏、不裂的目的。

2 花岗岩洞渣性能分析与砂石加工

2.1 花岗岩洞渣成分组成

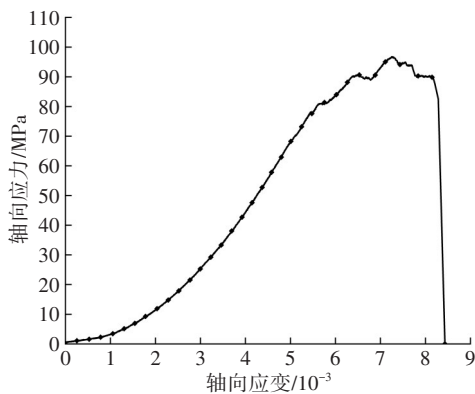
采用岩相法对无岳隧道变质花岗岩洞渣进行碱活性分析,发现该花岗岩洞渣主要由石英晶体、长石晶体、云母和角闪石组成,并含有少量绿泥石、透辉石、方解石、铁矿石和微晶石英,未见白云石。由于该花岗岩洞渣中含有微晶石英这一碱硅酸反应活性组分,需要进一步按照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006) 的规定进行碱活性测试。测试结果表明,该花岗岩洞渣试件 14 d

的膨胀率为0.04%,远小于0.10%,故判断该花岗岩洞渣无潜在危害。

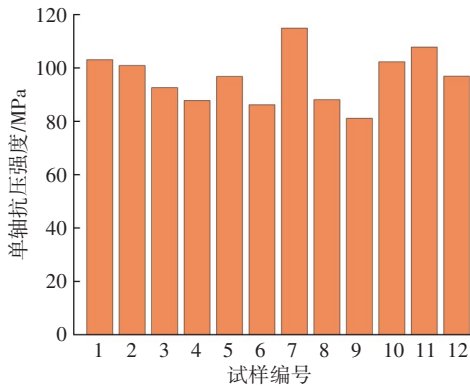
2.2 花岗岩洞渣的物理强度

为了全面评估饱和状态下无岳隧道花岗岩洞渣的力学性能,首先,选取来自不同位置的花岗岩试样,对其进行严格的水饱和处理。随后,利用先进的微机控制电液伺服钢绞线万能试验机(AHLQ-021601)开展单轴压缩试验。在试验过程中,严格遵循操作规程,确保数据的准确性和可靠性。

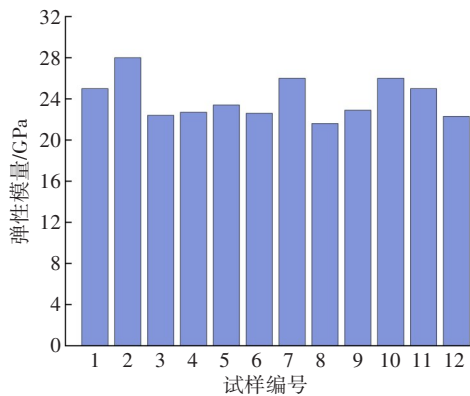
图1所示为饱和花岗岩单轴压缩试验结果。根据图1可以得出,试样的单轴抗压强度平均值为



(a) 变质花岗岩典型应力-应变曲线



(b) 单轴抗压强度



(c) 弹性模量

图1 饱和花岗岩单轴压缩试验结果

Fig. 1 Uniaxial compression test results of saturated granite

96.54 MPa(均方差为9.85 MPa)、弹性模量平均值为23.99 GPa(均方差为6.51 GPa),满足《建设用卵石、碎石标准》(GB/T 14685—2022)和《建设用砂标准》(GB/T 14684—2022)的要求。

2.3 花岗岩洞渣砂石联产工艺

基于无岳隧道花岗岩洞渣的力学性能参数,结合隧道施工的实际需求,选取优质花岗岩洞渣,借助先进的砂石联产工艺,将洞渣转化为机制碎石和机制砂,其主要指标见表1~2。

表1 花岗岩机制碎石的性能指标

Table 1 Performance index of machine crushed granite gravel

| 项目 | 堆积密度/ (g·cm ⁻³) | 表观密度/ (g·cm ⁻³) | 针片状颗 粒的质量 分数/% | 泥的质 量分 数/% | 泥块的质量分 数/% | 压碎 值/% | 颗粒 分析 |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------|---------------|-----------|----------|
| 实测 结果 | 1.473 | 2.706 | 7.9 | 0.3 | 0.1 | 16.8 | 符合 要求 |
| 技术 要求 | >1.350 | >2.500 | <15.0 | <1.0 | <0.5 | <20.0 | |

表2 花岗岩机制砂的性能指标

Table 2 Performance index of machine crushed granite sand

| 项目 | 堆积密度/ (g·cm ⁻³) | 表观密度/ (g·cm ⁻³) | 泥的质量 分数/% | 泥块的质量 分数/% | 颗粒 分析 |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|---------------|----------|
| 实测 结果 | 1.440 | 2.667 | 0.8 | 0.2 | 符合 要求 |
| 技术 要求 | >1.350 | >2.500 | <3.0 | <1.0 | |

3 C30P10 花岗岩抗渗混凝土配合比试验

3.1 原材料

水泥:P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

粉煤灰:F类Ⅱ级粉煤灰,细度为18.6%,需水量比为100%,烧失量为3.62%,比表面积为431 m²/kg。

细骨料:天然河砂,选取细度模数为2.66的中砂,堆积密度为1.524 g/cm³,表观密度为2.706 g/cm³;机制砂的参数见表2。

粗骨料:机制碎石,粒径分别为16.0~31.5 mm、10.0~20.0 mm、5.0~<10.0 mm,对应的掺量分别为20%、55%、25%。

水:地下水,符合《混凝土用水标准》(JGJ 63—2006)的规定。

外加剂:PCA-1(聚羧酸缓凝型减水剂),减水率为27%,含气量为2.1%,泌水率比为24%。

3.2 配合比试验设计

1) 基准配合比。

根据机制砂、机制碎石的颗粒级配、石粉含量,初步确定坍落度设计值为170~190 mm,砂率为44%,继而确定配制强度以及水胶比。具体公式如下:

$$\begin{cases} f_{cu,0} = f_{cu,k} + t\sigma \\ \frac{W}{B} = \frac{\alpha_a \gamma_f \gamma_c f_{ce,g}}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b \gamma_f \gamma_c f_{ce,g}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_{cu,0}$ 、 $f_{cu,k}$ 分别为混凝土的配制强度和设计强度,MPa; σ 为混凝土强度标准差,取5.0 MPa; t 为强度保证系数,取1.645; α_a 与 α_b 为回归系数,分别取

0.53、0.20; γ_f 为粉煤灰影响系数,取0.85; γ_c 为水泥强度等级富余系数,取1.16; $f_{ce,g}$ 为水泥的强度等级,MPa; W 为水的质量,kg; B 为胶结材料的质量,kg。

经计算,得到水泥、粉煤灰、细骨料、粗骨料、水和外加剂的基准配合比为332:58:811:1 031:168:3.9。

2) 配合比优化设计。

本次试验以花岗岩机制砂代替天然河砂,探究水灰比和外加剂对C30P10抗渗混凝土工作性能的影响,并得到C30P10抗渗混凝土的最优配合比。设计两因素三水平全面试验,具体配合比见表3。

表3 C30P10抗渗混凝土全面试验配合比方案

Table 3 The comprehensive program of the mix ratio experiment of C30P10 impermeable concrete

| 试验组 | 水胶比 | 外加剂 掺量/% | 材料用量/(kg·m ⁻³) | | | | | 单价/(元·m ⁻³) | 备注 |
|-----|------|-------------|----------------------------|-----|-----|--------|----------|-------------------------|------|
| | | | 水 | 水泥 | 粉煤灰 | 细骨料 | 粗骨料 | | |
| 1 | 0.44 | 1.1 | 168 | 325 | 57 | 814.00 | 1 036.00 | 435.87 | 机制砂 |
| 2 | 0.44 | 1.0 | 168 | 325 | 57 | 814.00 | 1 036.00 | 434.66 | 机制砂 |
| 3 | 0.44 | 0.9 | 168 | 325 | 57 | 814.00 | 1 036.00 | 433.46 | 机制砂 |
| 4 | 0.44 | 1.0 | 168 | 325 | 57 | 814.00 | 1 036.00 | 439.66 | 天然河砂 |
| 5 | 0.43 | 1.1 | 168 | 332 | 59 | 810.00 | 1 031.00 | 438.60 | 机制砂 |
| 6 | 0.43 | 1.0 | 168 | 332 | 59 | 810.00 | 1 031.00 | 437.36 | 机制砂 |
| 7 | 0.43 | 0.9 | 168 | 332 | 59 | 810.00 | 1 031.00 | 436.13 | 机制砂 |
| 8 | 0.43 | 1.0 | 168 | 332 | 59 | 810.00 | 1 031.00 | 452.36 | 天然河砂 |
| 9 | 0.42 | 1.1 | 168 | 340 | 60 | 806.08 | 1 025.92 | 441.45 | 机制砂 |
| 10 | 0.42 | 1.0 | 168 | 340 | 60 | 806.08 | 1 025.92 | 440.19 | 机制砂 |
| 11 | 0.42 | 0.9 | 168 | 340 | 60 | 806.08 | 1 025.92 | 438.92 | 机制砂 |
| 12 | 0.42 | 1.0 | 168 | 340 | 60 | 806.08 | 1 025.92 | 445.19 | 天然河砂 |

4 C30P10花岗岩抗渗混凝土试验

根据无岳高速WYTJ-07标段的施工需求,以洞渣花岗岩机制砂、机制碎石为骨料,开展两因素三水平全面试验,并与用天然砂石骨料制备的混凝土标准试件进行对比,得到机制砂石对C30P10混凝土性能的影响规律。

4.1 坍落度试验结果及分析

对不同配合比花岗岩抗渗混凝土的和易性进行测试,结果如图2所示。水胶比与外加剂掺量均会影响混凝土的坍落度,但前者对坍落度的影响更为明显。当水胶比从0.42增加为0.44时,不同外加剂掺量(0.9%、1.0%、1.1%)下混凝土的坍落度分别增加了20、20、30 mm;当外加剂掺量从0.9%增加为1.1%时,不同水胶比(0.42、0.43、0.44)下混凝土的坍落度分别增加了10、15、20 mm。在同等条件下,

天然河砂混凝土的坍落度大于机制砂混凝土的坍落度,这是因为机制砂的表面更粗糙,吸水率更高。

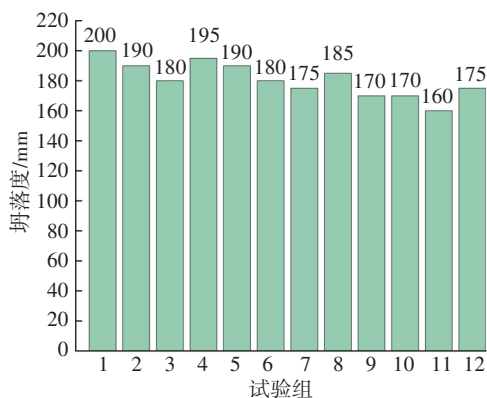


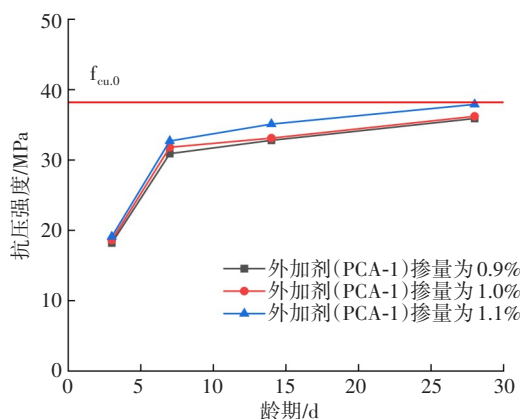
图2 坍落度测试结果

Fig. 2 Slump test results

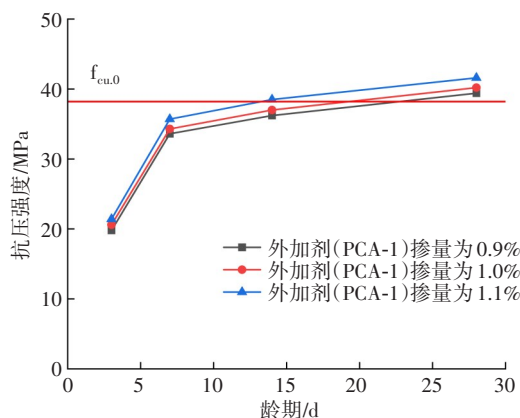
4.2 强度试验结果及分析

为测试不同配合比花岗岩抗渗混凝土的抗压

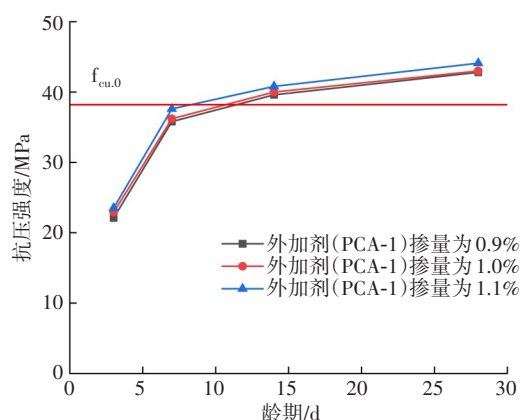
强度,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),制作尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的标准试件,并在标准养护条件下进行养护。然后,利用微机控制电液伺服钢绞线万能试验机(AHLQ-021601)进行单轴压缩试验(加载速率为0.5 MPa/s),测得不同试验组混凝土试样的抗压强度,结果如图3所示。



(a) 水胶比为0.44



(b) 水胶比为0.43



(c) 水胶比为0.42

图3 不同水胶比混凝土试件的抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of concrete specimens with different water-cement ratio

减小水胶比或增大外加剂掺量都会提升花岗岩混凝土的抗压强度,但二者的作用机理有所不同。从图3可以看出,当单位用水量保持不变时,减小水胶比会增加胶凝材料的使用量,此时混凝土凝结硬化时的胶结效果更好,混凝土具有更高的抗压强度;增加外加剂掺量,能有效降低水泥颗粒间的滑动阻力,使其更好地填充骨料缝隙,从而提升混凝土的密实度和抗压强度。水胶比变化对抗压强度的影响更为明显,分析混凝土试件的抗压强度后可以发现,当水胶比降低0.02后,外加剂掺量分别为0.9%、1.0%和1.1%的3组混凝土试件的28 d抗压强度分别提升了19.22%、17.78%、18.72%;当外加剂掺量增加0.2%时,水胶比分别为0.44、0.43和0.42的3组混凝土试件的28 d抗压强度分别提升了5.57%、5.58%、3.04%。

从图3还可以看出,相较于天然河砂混凝土,花岗岩混凝土的早期抗压强度相对偏低,但后期抗压强度增长较快,在龄期为28 d时抗压强度大多实现了反超。花岗岩混凝土早期抗压强度较低的原因主要有两个:一是花岗岩机制砂表面比较粗糙,具有较高的吸水性,降低了混凝土的和易性,使得胶结材料无法很好地填充缝隙、胶结骨料;二是花岗岩洞渣是酸性石材,含有微量云母、微晶石英,降低了胶结效果,也使混凝土硬化速度下降,强度增长较慢。随着时间的增长,花岗岩混凝土的28 d抗压强度逐渐接近于天然河砂混凝土的28 d抗压强度,与此同时增加外加剂掺量,花岗岩混凝土后期的抗压强度才实现了反超。

当水胶比为0.44时,花岗岩混凝土试样28 d抗压强度最大为37.4 MPa,不符合《混凝土强度检验评定标准》(GB/T 50107—2010)的强度要求。当水胶比为0.43时,试验组5、6、7花岗岩混凝土试样的28 d抗压强度分别为38.8、39.9、41.5 MPa,均大于 $f_{cu,0}$ (38.2 MPa),满足要求。当水胶比为0.42时,试验组9、10、11花岗岩混凝土试样的28 d抗压强度为42.8~44.4 MPa,大于 $f_{cu,0}$ (38.2 MPa),但对应的材料单价也相对较高。

4.3 抗渗试验结果及分析

为测试不同配合比花岗岩抗渗混凝土的抗压强度,对12组试验组试件(每组6个试件)进行抗渗试验。

在本次渗水试验中,采用特定规格的圆台试件,其顶面直径为175 mm,底面直径为185 mm,高

为150 mm,如图4所示。试件经过自然养护24 h后拆模,并用钢丝刷清除表面的泥浆,随后放入标准养护箱中继续养护。在试验的前一天,将试件表面擦干,在试件侧面涂上一层密封材料,并使试件底面与试膜底对齐,确保密封良好。然后,将处理好的试件装入HS-4型混凝土抗渗仪中进行渗水试验。在试验过程中,水压的初始值为0.1 MPa,每隔8 h增加0.1 MPa。当6个试件中有3个试件表面出现渗水时,终止试验并记录此时的水压。混凝土试件的抗渗试验结果如图5所示。

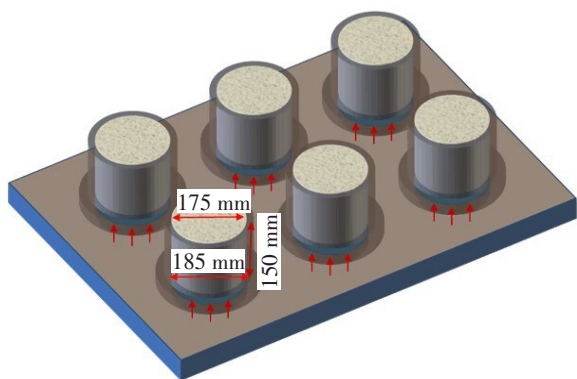


图4 混凝土抗渗试验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of impermeability test of concrete

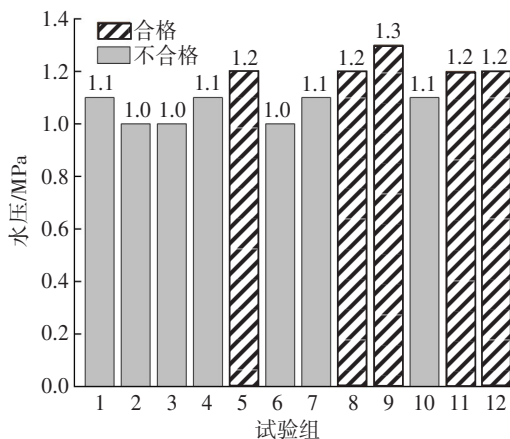


图5 不同配合比下混凝土抗渗试验结果

Fig. 5 The impermeability test results of concrete with different mix ratios

从图5可以看出,降低水胶比或增大外加剂掺量均能提升混凝土试件的抗渗性能;花岗岩混凝土的抗渗性能总体偏低。增加外加剂掺量、降低水胶比都可以增加混凝土的流动性,使得胶凝材料能更好地填充骨料缝隙,从而阻断空隙网络的形成,提升混凝土的抗渗性能。当保持水胶比、外加剂掺量不变时,天然河砂混凝土的抗渗性能普遍比花岗岩混凝土的好,这是因为机制砂、机制碎石含有的微

量云母、石英等酸性物质与胶凝材料发生了化学反应,进而使混凝土发生膨胀,加速了空隙网络的形成。对机制砂充当细骨料的试验组进行对比分析,可以发现当水胶比由0.44降低为0.42时,外加剂掺量为1.1%、1.0%、0.9%的花岗岩混凝土试件的抗渗水压分别增加了0.2、0.1、0.2 MPa;当水胶比为0.42时,外加剂掺量为0.9%、1.0%和1.1%的花岗岩混凝土试件的抗渗水压分别为1.2、1.1、1.3 MPa。

对于抗渗混凝土的抗渗水压要比设计值高0.2 MPa的要求,抗渗满足要求的试验组分别为试验组5、8、9、11和12。

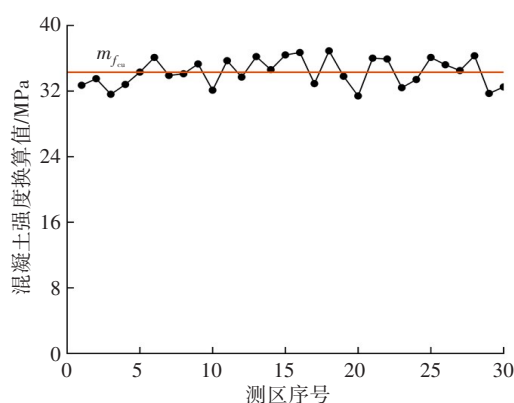
4.4 抗渗混凝土配合比优选

综上所述,使用机制砂、机制碎石充当骨料,且满足C30P10花岗岩抗渗混凝土力学性能与抗渗性能指标的试验组分别为试验组5、9和11。为控制施工成本,应选择最经济的配合比方案,故本文选取试验组5的配合比作为C30P10花岗岩抗渗混凝土的最优配合比,此时水胶比为0.43,外加剂掺量为1.1%。

5 工程应用

选用试验组5的配合比为最优配合比,利用37 581 m³花岗岩洞渣,成功配制了67 000 t的C30P10花岗岩抗渗混凝土。为确保施工质量达到标准,本文严格按照《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》(T/CECS 02—2020)中的测试步骤,对C30P10花岗岩混凝土的抗压强度进行测定。在隧道衬砌施工方向布置30个测区,每个测区的尺寸为200 mm×200 mm。为准确获取测试数据,采用单面平测法对隧道衬砌的拱顶、拱腰和墙角部位进行超声回弹综合法的原位测试,记录衬砌混凝土强度换算值,具体结果如图6(a)所示。从图6(a)可以看出,采用超声回弹综合法得到的混凝土强度换算值的平均值 m_{f_u} 为34.29 MPa,标准差为1.697 MPa,混凝土强度推定值为31.50 MPa,高于设计要求的C30P10花岗岩抗渗混凝土强度,说明无岳隧道衬砌强度符合要求。

为验证隧道衬砌的抗渗性能,在隧道衬砌施工后60 d观察富水区段隧道施工衬砌内壁,未观测到渗水点,如图6(b)所示。综上所述,C30P10花岗岩抗渗混凝土能较好地满足隧道衬砌的施工要求,保证工程主体质量。



(a) 超声回弹综合法检测结果



(b) 富水区段渗水检测

图6 隧道施工现场检测结果

Fig. 6 In-site test results of tunnel construction

6 结论

本研究在考虑无岳隧道变质花岗岩材料特性的基础上,探讨了水灰比、外加剂掺量对C30P10花岗岩抗渗混凝土抗压强度及抗渗性能的影响,将使用最优配合比制备的混凝土应用于隧道衬砌施工并进行现场检测,主要结论如下:

1) 无岳隧道洞渣花岗岩材料性能优良,使用三级破碎工艺对隧道花岗岩洞渣进行加工,得到了满足要求的机制碎石、机制砂,说明用变质花岗岩配制C30P10花岗岩抗渗混凝土是可行性的。

2) 降低水胶比、增大外加剂掺量均能提升混凝土的抗压强度与抗渗性能,使用两因素三水平全面试验方法,得到了C30P10花岗岩抗渗混凝土的最优配合比,水、水泥、粉煤灰、机制砂、机制碎石、外加剂的质量之比为1:1.98:0.35:4.82:6.14:0.026。

3) 通过超声回弹综合法对无岳隧道衬砌进行无损检测,发现衬砌混凝土强度换算值的平均值为34.29 MPa,标准差为1.697 MPa,混凝土强度推定值为31.50 MPa,满足设计强度要求,且施工后60 d衬砌表面无渗水点。

参考文献(References):

- [1] 交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2023(7): 29-33. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.07.009.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2022[J]. China Water Transport, 2023(7): 29-33. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.07.009.
- [2] 方俊杰, 冯明杰, 谢涛, 等. 基于XRD分析的钢渣填料沥青混合料水稳定性研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(1): 35-41. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907001.
FANG Junjie, FENG Mingjie, XIE Tao, et al. Research on water stability of steel slag filling asphalt mixture based on XRD[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(1): 35-41. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907001.
- [3] SHWETHA K, MAHESH KUMAR C, DALAWAI V N, et al. Comparative study on strengthening of concrete using granite waste[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 5317-5322. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.389.
- [4] TANGARAMVONG S, NUAKLONG P, KHINE M T, et al. The influences of granite industry waste on concrete properties with different strength grades[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00669. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00669.
- [5] NUAKLONG P, WORAWATNALUNART P, JONGVIVATSAKUL P, et al. Pre- and post-fire mechanical performances of high calcium fly ash geopolymer concrete containing granite waste[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103265. DOI: 10.1016/j.job.2021.103265.
- [6] GUPTA L K, VYAS A K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 155-164. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203.
- [7] 赵更歧, 张赞, 全江伟, 等. 花岗岩矿石废料混凝土砌块配合比试验研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(1): 15-17. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2014.01.004.
ZHAO Gengqi, ZHANG Yun, QUAN Jiangwei, et al. A mix proportion optimization design of granite ore waste concrete block[J]. New Building Materials, 2014, 41(1): 15-17. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2014.01.004.
- [8] 杨海成, 陈灿, 范志宏. 花岗岩机制砂石粉对C80高强高性能混凝土性能的影响及机理研究[J]. 水运工程, 2021(11): 13-20, 49. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20211101.033.

- YANG Haicheng, CHEN Can, FAN Zhihong. Influence and mechanism of granite powder of manufactured-sand on performance of mechanical sand C80-HSHPC [J]. Port & Waterway Engineering, 2021 (11): 13-20, 49. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20211101.033.
- [9] 赵井辉, 刘福胜, 韦梅, 等. 花岗岩石粉细度及掺量对混凝土微观孔隙的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016 (2): 39-45. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.006.
- ZHAO Jinghui, LIU Fusheng, WEI Mei, et al. Effects of granite powder fineness and addition on concrete microscopic pores [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016 (2): 39-45. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.006.
- [10] 万永旺, 潘延昇. 响岩与花岗岩机制砂混凝土性能对比研究 [J]. 建材世界, 2022, 43 (2): 43-47. DOI: 10.3963/j.issn.1674-6066.2022.02.011.
- WAN Yongwang, PAN Yansheng. Comparative study on properties of concrete prepared by phonolite and granite machine-made sand [J]. The World of Building Materials, 2022, 43 (2): 43-47. DOI: 10.3963/j.issn.1674-6066.2022.02.011.
- [11] 管小明. 脆性花岗岩碎石在 C60 高性能混凝土中的运用 [J]. 混凝土, 2008 (6): 80-81, 104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.06.025.
- GUAN Xiaoming. Brittle granite thick aggregate in C60 high performance concretes utilization [J]. Concrete, 2008 (6): 80-81, 104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.06.025.
- [12] 范华峰, 翟盛通, 张坤强, 等. 外掺花岗岩石粉对水工混凝土抗渗、抗冻性能的影响 [J]. 混凝土, 2021 (4): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.04.015.
- FAN Huafeng, ZHAI Shengtong, ZHANG Kunqiang, et al. Effect of the addition of granite powder on impermeability and frost resistance of hydraulic concrete [J]. Concrete, 2021 (4): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.04.015.
- [13] 刘敬, 余浩, 李北星. 矿物掺和料对 PC 箱梁混凝土耐久性影响研究 [J]. 交通科学与工程, 2018, 34 (3): 27-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.005.
- LIU Jing, YU Hao, LI Beixing. The influence of the mineral admixture on the durability of concrete for the PC box girder [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34 (3): 27-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.005.
- [14] 郑晓冬, 管志涛, 李超, 等. 隧道花岗岩洞渣骨料在 C50 混凝土预制 T 梁中的应用研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (12): 40-44, 49. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.12.040.06.
- ZHENG Xiaodong, GUAN Zhitao, LI Chao, et al. Research on application of tunnel granite cave slag aggregate in C50 concrete precast T-beam [J]. China Concrete and Cement Products, 2020 (12): 40-44, 49. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.12.040.06.
- [15] 张玉平, 曾旅中, 张亚昕, 等. 隧道锚锚塞体大体积混凝土温控特性研究 [J]. 交通科学与工程, 2020, 36 (3): 28-36. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.005.
- ZHANG Yuping, ZENG Lyuzhong, ZHANG Yaxin, et al. Study on temperature-control characteristics of anchor-plug mass concrete [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (3): 28-36. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.005.
- [16] 夏京亮. 桥用花岗岩高性能混凝土的配制与耐久性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- XIA Jingliang. Preparation and durability of bridge high performance concrete with crushed granite aggregate [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [17] 陈书平, 吴大鸿. 隧道洞渣加工机制砂在高速公路建设中的应用 [J]. 公路, 2017, 62 (4): 249-252.
- CHEN Shuping, WU Dahong. Application of machine-made sand in tunnel slag processing in expressway construction [J]. Highway, 2017, 62 (4): 249-252.
- [18] 张辉, 潘友强, 张志祥, 等. 玄武岩-页岩混杂增强的沥青混合料路用性能试验研究 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2021, 18 (4): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.04.003.
- ZHANG Hui, PAN Youqiang, ZHANG Zhixiang, et al. Experimental study on pavement performance of basalt-shale hybrid reinforced asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (4): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.04.003.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:杜明瑞)