

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022093024021992

文章编号: 1674-599X(2024)01-0036-09

引用格式: 孙小磊. 洞渣花岗岩混凝土配合比设计优化研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 36-44.

Citation: SUN Xiaolei. Study on optimization of concrete mix ratio of cavern slag and granite[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 36-44.

洞渣花岗岩混凝土配合比设计优化研究

孙小磊

(安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 公路交通节能环保技术交通运输行业研发中心, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 为研究隧道洞渣以不同强度等级花岗岩为骨料的混凝土最优配合比, 以无岳高速 WYTJ-07 标段的隧道为例, 研究其在开挖过程中产生的变质花岗岩洞渣, 并将其加工成机制碎石和机制砂。通过改变花岗岩混凝土的水胶比和减水剂的掺量, 进行两因素三水平的全面试验, 优化洞渣花岗岩混凝土配合比。研究表明: 无岳隧道洞渣中的变质花岗岩可以用于混凝土的配制; 对于 C15、C20、C25、C30、C40、C50 的花岗岩混凝土, 最优的水胶比分别为 0.54、0.50、0.47、0.43、0.39、0.33, 且减水剂掺量不低于 1.0%。

关键词: 变质花岗岩; 混凝土; 配合比优化; 骨料粒径; 外加剂

中图分类号: U454

文献标志码: A

Study on optimization of concrete mix ratio of cavern slag and granite

SUN Xiaolei

(Research and Development Center on Technology and Equipment for Energy Conservation and Environmental Protection of Highway Transport, Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In order to study the optimal mix ratio of different strength grades of slag granite concrete, the metamorphic granite slag produced during the tunnel excavation of WYTJ-07 section of Wuyue high-speed project was selected to make machine-made gravel and machine-made sand. Taking the tunnel of the WYTJ - 07 section of the Wuyue Expressway as an example, the metamorphic granite slag produced in the excavation process was processed into machine-made gravel and machine-made sand. By changing the water-binder ratio and water reducing agent of granite concrete, the mixture ratio of slag granite concrete was optimized through two-factor and three-level comprehensive experiment. The results show that the slag of metamorphic granite of Wuyue tunnel can be used for concrete composition. The optimal water-binder ratios of the C15, C20, C25, C30, C40 and C50 slag granite concrete are 0.54, 0.50, 0.47, 0.43, 0.39 and 0.33, respectively, and the dosage of water reducing agent should higher than 1.0%.

Key words: metamorphic granite; concrete; mix ratio optimization; aggregate size; admixtures

随着中国“交通强国”战略的推进, 公路不断向山区延伸^[1]。山区山脉纵横, 地形陡峻险要, 地质条件复杂^[2], 山区高速公路隧道需求与难度增加。

截止到 2021 年底, 中国公路隧道达到了 23 268 座, 总长度 $2\,469.89 \times 10^4$ m。其中, 包括特长隧道 1 599 座, 总长度 717.08×10^4 m; 长隧道 6 211 座, 总长度

收稿日期: 2022-09-30

作者简介: 孙小磊(1992—), 男, 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司中级工程师。E-mail: 1280328103@qq.com。

$1\ 084.43\times 10^4\text{ m}^{[3]}$ 。在隧道开挖过程中,隧道洞渣作为隧道施工的副产物,不仅产量巨大,而且岩石成分、结构也不统一。受施工工艺、施工组织、施工成本等因素影响,除了少量隧道洞渣被用作路基的填料,大部分隧道洞渣被送往弃渣场堆放或就地掩埋。这不仅占用了大量的土地资源,造成了资源浪费,还改变了原有地表环境,严重破坏了当地生态环境,这与公路建设“零弃方、少借方”的政策相悖^[4]。中国花岗岩资源丰富,且在各省、自治区、直辖市均有分布^[5]。洞渣花岗岩的固废利用是隧道开挖必须解决的一项难题。因此,将隧道洞渣花岗岩资源化,不仅具有良好的经济效益,而且对“双碳”目标、“两山”理念等具有十分重要的意义。

目前,国内外学者针对花岗岩混凝土开展了理论和应用研究,并取得了一些成果。TANGARAMVONG等^[6]用花岗岩废料配制混凝土,发现高达50%花岗岩颗粒的混凝土的抗压强度接近于常规混凝土的抗压强度,且混凝土的抗拉强度随着花岗岩颗粒的增加而降低,这在低强度混凝土中效果愈加显著。RIVIERA等^[7]将阿尔卑斯山脉隧道工程产生的隧道洞渣成功应用于路面基层,并展现了良好的路面性能。VIJAYALAKSHMI等^[8]将花岗岩废料替代细骨料配制混凝土,并证实15%的替代率会增强混凝土的物理特性和耐久性。GUPTA等^[9]研究表明:将水泥砂浆细骨料用花岗岩废料取代40%,与配合比为1:4的对照砂浆相比,抗压强度、拉伸黏结强度和黏结强度分别提高了4%、23%、23%。DONZA等^[10]将花岗岩碎石充当混凝土骨料,发现可以提升单轴抗压强度,相比于天然砂混凝土365 d单轴抗压强度增加了10%。管小明^[11]利用脆性花岗岩碎石成功配制出了抗压强度达到87.6 MPa的高性能混凝土。赵更歧等^[12]采用花岗岩废料生产混凝土,通过正交试验分析各因素水平与混凝土抗压强度及弹性模量之间的关系,并配制出了达到目标强度(C15~C30)的花岗岩矿石废料混凝土。张翼飞^[13]采用三级破碎和布袋除尘工艺将废弃洞渣制成机制砂骨料,成功配制出了C50混凝土,并在三峡翻

坝江北高速公路T梁施工中得到应用,取得了显著的经济效益。李林等^[14]改变混凝土中花岗岩机制砂石粉含量发现,随着石粉含量增加,低强度等级混凝土的抗压强度增大,而C40、C50混凝土的抗压强度则呈先增大后减小的趋势,且在石粉含量为10%时抗压强度最佳。刘闯等^[15]通过数值模拟与现场试验,确定了影响花岗岩残积土晾晒的敏感程度,从大到小分别是松铺厚度、土块粒径、太阳辐射强度、温度、风速。

现有研究主要是针对少量采石场花岗岩废料进行固体废物处理与利用,而针对超大量隧道开挖的花岗岩洞渣进行二次利用的研究较少。作者拟以无岳高速WYTJ-07标段隧道工程花岗岩洞渣为研究对象,将隧道洞渣中的优质花岗岩加工成机制碎石和机制砂,并充当混凝土的粗、细骨料。然后,通过两因素三水平全面试验,研究各配比下以花岗岩为骨料的混凝土(花岗岩混凝土)强度的变化规律,获得混凝土最优配合比。根据隧道施工需要,按照抗压强度,配置6种强度等级的花岗岩混凝土:C15、C20、C25、C30、C40、C50混凝土。

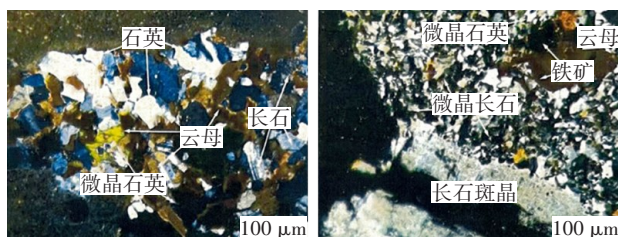
1 工程概况

以上海至武汉高速公路的无为至岳西段中的WYTJ-07标段为研究对象,该标段长约16 km,其中,涉及老虎岩、双峰庵、驼岭三座长大隧道,总长(单洞)达14 765 m。在无岳高速WYTJ-07标段建设过程中,由于桥隧比高,隧道在开挖过程中产生了大量洞渣。据统计,约有 $158\times 10^4\text{ m}^3$ 的洞渣需要处理。如果洞渣处理不及时,未采取必要的防护措施,将加剧水土流失。这不仅影响了工程的施工、安全运行和生产效益,而且加重了沿线河道淤积,降低了防洪抗汛能力。大量的洞渣,既占用了场地,又污染了环境,危及水资源和生命财产安全。同时,WYTJ-07标段沿线的变质花岗岩,岩性复杂,不同于玄武岩和石灰岩的化学混合材质。因此,分析洞渣花岗岩的力学性能和岩性,选择满足混凝土配置要求的优质变质花岗岩来充当骨料。

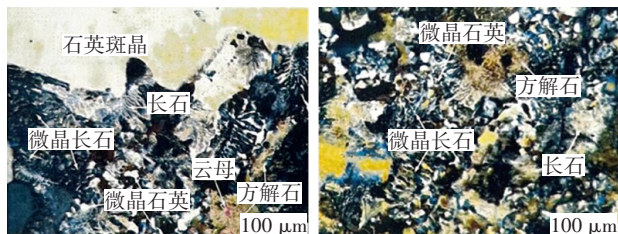
2 花岗岩性能分析与加工

2.1 花岗岩洞渣性能分析

通过岩相法检测花岗岩,其结果如图1所示。从图1可以看出,花岗岩洞渣呈斑状结构,斑晶为长石晶体和石英晶体,基质由微晶长石、云母、方解石、铁矿、小长石晶体和微晶石英组成。由于碎石碱硅酸反应中的活性组分为微晶石英(含量约3%),未见碱碳酸盐反应的活性组分,因此需要进一步对无岳隧道花岗岩洞渣进行碱活性(快速法)分析。试验结果表明,试件14 d膨胀率小于0.10%,判断为无潜在危害,其可以作为原材料加工成机制碎石和机制砂。根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005),判定为非碱活性集料。



(a) 碎石中的长石、石英、云母、铁矿、微晶石英和微晶长石



(b) 碎石中的微晶长石、长石、云母、方解石和微晶石英

图1 洞渣花岗典型岩结构

Fig. 1 Typical rock structure of slag granite

为获得花岗岩洞渣在饱和状态下的单轴抗压强度,对不同位置取样的花岗岩进行水饱和处理。再采用微机控制电液伺服钢绞线万能试验机(AHLQ-021601)进行了单轴压缩试验,试验结果如图2所示。从图2可以看出,无岳隧道WYTJ-07标段花岗岩洞渣的单轴压缩强度平均值为96.54 MPa,均方差为9.85 MPa。这表明:标段洞渣花岗岩力学性质接近,具有较好的均质性。因此,可以充当原材料,加工成机制碎石、机制砂。

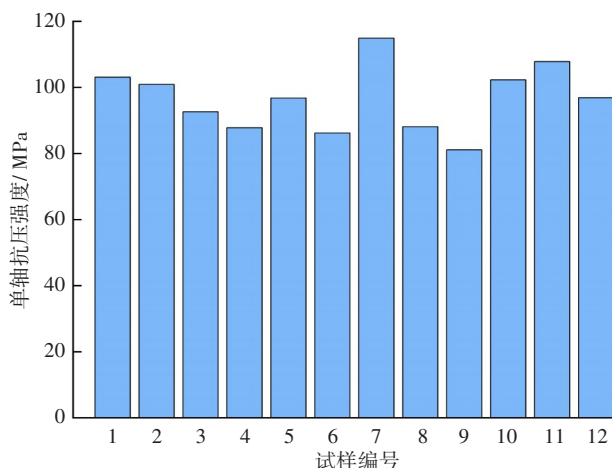


图2 饱和洞渣花岗岩测试结果

Fig. 2 Test results of saturated cave slag granite

2.2 机制碎石、机制砂

根据无岳高速WYTJ-07标段隧道工程施工实际需要,选择隧道施工过程中产生的优质花岗岩,采用三级破碎工艺,使其加工成机制碎石、机制砂。生产工艺如图3所示。

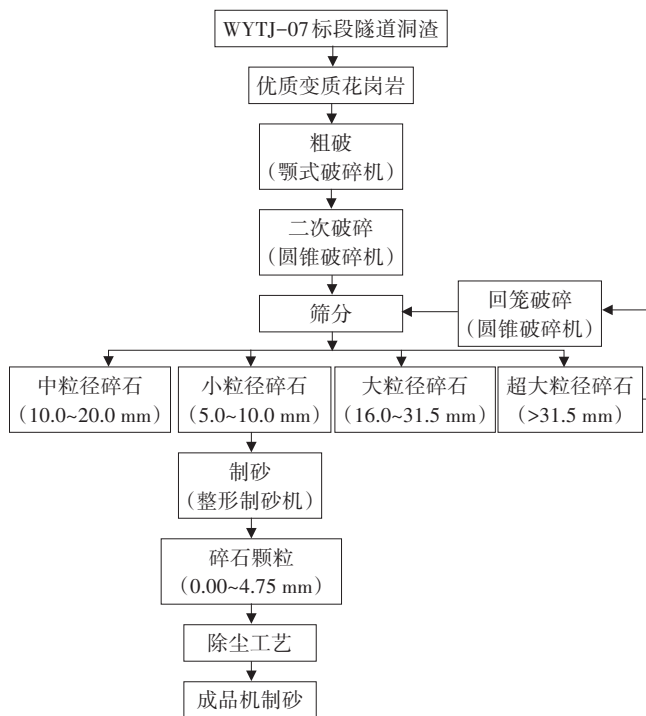


图3 机制砂石骨料生产工艺流程

Fig. 3 Production process flow of mechanized sand aggregate

3 花岗岩混凝土原材料

3.1 水泥

水泥是一种粉状水硬性无机胶凝材料,当其加

水搅拌成泥浆时,可以起到包裹骨料表面,填充颗粒间空隙,硬化前润滑,硬化后胶结的作用。本研究中,花岗岩混凝土的配制使用华新水泥有限公司

生产的 P·O 42.5 水泥以及安徽省怀宁海螺水泥有限公司生产的 P·Ⅱ 52.5 水泥。具体检测指标见表 1。

表 1 水泥性能指标

Table 1 Performance index of cement

检测项目	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	水泥密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	氯离子/ %	初凝时 间/min	终凝时 间/min	安定性 (沸煮法)	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
							3 d	28 d	3 d	28 d
P·O 42.5	372	3.10	—	210	240	1.0	31.2	48.9	5.5	8.1
技术要求	≥ 300	—	—	≥ 45	≤ 600	≤ 5.0	≥ 17.0	≥ 42.5	≥ 3.5	≥ 6.5
P·Ⅱ 52.5	361	—	0.034	164	209	0.8	37.2	61.4	6.9	8.9
技术要求	≥ 300	—	≤ 0.06	≥ 45	≤ 390	≤ 5.0	≥ 23.0	≥ 52.5	≥ 4.0	≥ 7.0

3.2 拌和及养护用水

花岗岩混凝土配制及养护用水,均来自符合《混凝土用水标准》(JGJ 63—2006)的搅拌站地下水,具体检测指标见表 2。

表 2 拌和及养护用水性能指标

Table 2 Performance index of water used in mixing and maintenance

检测项目	pH 值	不溶物/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	可溶物/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氯化物/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硫酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
地下水	7.1	75	297	62.61	182
技术要求	≥ 5.0	$\leq 2\ 000$	$\leq 2\ 000$	≤ 500.00	≤ 600

3.3 细骨料

细骨料在混凝土中起骨架或填充作用,其粒径小于 4.75 mm。花岗岩混凝土配置所使用的细骨料是以优质变质花岗岩为原材料,经过三级破碎后,加工成符合国家标准《建设用砂》(GB/T 14684—2022)的花岗岩机制砂(C50 普通混凝土使用天然河沙充当细骨料)。制备花岗岩混凝土的细骨料,其具体检测指标见表 3。

3.4 粗骨料

粗骨料是指粒径大于 4.75 mm 的碎石或卵石,在混凝土中起骨架作用。花岗岩混凝土配制所用到的碎石,以优质变质花岗岩为原材料,经过二级粉碎得到。在实际配置过程中,根据隧道施工需要,配置了两种粒径配合比的机制碎石。机制碎石

1 的掺配比为 16.0 ~ 31.5 mm: 10.0 ~ 20.0 mm: 5.0 ~ 10.0 mm=20: 55: 25,机制碎石 2 为 5 ~ 10 mm 碎石。机制碎石各项检测指标见表 4。

3.5 外加剂

在混凝土拌制过程中或拌制前加入外加剂。除胶凝材料、骨料、水和纤维组分之外,外加剂可以明显改变混凝土性能,是对环境无污染的安全材料。花岗岩混凝土在拌和时,根据实际工程需要,加入适量的减水剂(PCA-1),具体检测指标见表 5。

3.6 粉煤灰

粉煤灰是从煤燃烧后的烟尘中收集到的颗粒及细小的粉状颗粒物。在混凝土中加入粉煤灰,不仅可以减少水泥和细骨料的用量,改善混凝土的和易性,还可以减少混凝土的徐变、水化热,提高混凝土的抗渗能力。花岗岩混凝土在拌和过程中,使用了由安庆市皖江粉煤灰有限公司生产的 F 类Ⅱ级粉煤灰,具体检测指标见表 6。

表 3 机制砂性能指标

Table 3 Performance index of machine-made sand

检测项目	堆积密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	表观相对 密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含泥 量/%	泥块 含量/%	颗粒 分析
机制砂	1.440	2.667	0.8	0.2	符合 要求
技术 要求	>1.350	>2.500	<3.0	<1.0	—

表4 机制碎石性能指标

Table 4 Performance index of machine-made crushed stone

检测项目	堆积密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	表观密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	针片状 含量/ %	含泥 量/ %	泥块含 量/ %	压碎 值/ %	颗粒 分析
机制碎石1	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	<1.0	<0.5	<20.0	-
机制碎石2	1.415	2.701	7.7	0.5	0.0	-	符合 要求
技术要求	>1.350	>2.500	<15	<1.0	<0.5	-	-

表5 外加剂(PCA-1)性能指标

Table 5 Performance index of admixture (PCA-1)

检测项目	总碱 量/ %	减水 率/ %	含气 量/ %	泌水率 比/ %	凝结时间 差/ min	抗压强 度比/ %	
						7 d	28 d
PCA-1	0.18	27	2.1	24	110	147	139
技术要求	≤ 10.00	≥ 25	≤ 6.0	≤ 70	≥ 90	≥ 140	≥ 130

表6 粉煤灰性能指标

Table 6 Performance index of fly ash

检测项目	比细度/ %	需水量比/ %	烧失量/ %	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)
F类II级粉 煤灰	18.6	100	3.62	431
技术要求	≤ 30.0	≤ 105	≤ 8.00	-

4 多用途混凝土配合比优化

根据无岳高速 WYTJ-07 标段的施工需求,以花岗岩洞渣为骨料,配制了 8 种花岗岩混凝土,分别为: C15 普通混凝土、C15 普通混凝土(含有外加剂)、C20 普通混凝土、C20 普通混凝土(含有外加剂)、C25 普通混凝土、C30 普通混凝土、C40 普通混凝土、C50 普通混凝土。根据配制混凝土的类别及强度等级,确定花岗岩混凝土的配合比,并进行优化。

4.1 配合比优化步骤

1) 确定花岗岩混凝土强度。

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)中的规定,按照式(1)计算出各种混凝土的配置强度。

$$f_{\text{cu},0} = f_{\text{cu},k} + \tau\sigma \quad (1)$$

式中: $f_{\text{cu},0}$ 为混凝土的配置强度, MPa;

$f_{\text{cu},k}$ 为混凝土的设计强度等级, MPa;

τ 为强度保证系数,取 1.645;

σ 为混凝土强度标准差, MPa。

当强度等级小于 C20 时, σ 取 4.0; 当混凝土强度等级为 [C20, C35], σ 取 5.0; 混凝土强度等级大于 C35, σ 取 6.0。

2) 确定花岗岩混凝土水胶比。

当花岗岩混凝土强度等级小于 C60 时,水胶比可以采用式(2)来计算。

$$\frac{W}{B} = \frac{\alpha_a \gamma_c f_{\text{ce},g}}{f_{\text{cu},0} + \alpha_a \alpha_b \gamma_c f_{\text{ce},g}} \quad (2)$$

式中: α_a 取 0.53;

α_b 取 0.2;

$f_{\text{cu},0}$ 为混凝土的配置强度, MPa;

$f_{\text{ce},g}$ 为水泥强度等级;

γ_c 为水泥强度等级值的富余系数。

γ_c 的取值参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)与实际施工资料。

3) 确定基准配合比。

根据坍落度设计值和所用机制碎石最大粒径,以及原材料和施工情况,确定了各种混凝土的单位用水量。通过花岗岩混凝土掺配所使用的外加剂(聚羧酸高性能减水剂 PCA-1 的减水率为 27%)和粉煤灰掺量、外加剂量、砂率(根据掺配混凝土种类取经验值),得到花岗岩混凝土的基准配合比。

4) 试验验证。

通过调整水胶比,得到了水胶比-强度之间的关系曲线,进而得到对应 $f_{\text{cu},0}$ 的水胶比以及经验配合比。

5) 确定最优配合比。

由于步骤(2)~(3)的经验取值存在主观性,对最优配合比会产生影响。因此,改变由步骤(4)得到的水胶比与外加剂掺量,采用全面试验的方法,测试不同配合比的花岗岩混凝土,得到满足要求的

配合比。在此基础上,减小水胶比与外加剂掺量的变化幅度,重复步骤(4)~(5),最终得到满足无压隧道施工要求的花岗岩混凝土的最优配合比。采用两因素三水平全面试验,确定最优配合比,具体试验流程如图4所示。

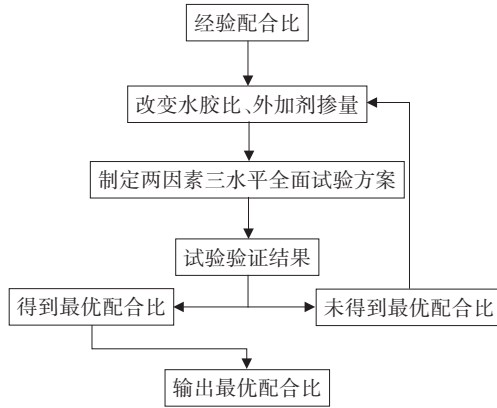


图4 配合比优化流程

Fig. 4 Flow chart of mix ratio optimization

4.2 C30变质花岗岩混凝土配制

以C30混凝土为例,制配花岗岩混凝土的经验配合比,其步骤如下:

1) 根据公式(1),计算C30混凝土的制配强度。

$$f_{cu,0} = 30 + 1.645 \times 5 = 38.225 \text{ MPa}$$

2) 结合公式(2)与施工经验,确定经验水胶比W/B为0.44。

3) 确定基准配合比。

坍落度设计值为140.0~180.0 mm,碎石的最大粒径为31.5 mm。根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),并结合原材料、施工情况,选取单位用水量 $m_{w,0}=223.0 \text{ kg/m}^3$ 。由于外加剂的减水率为27.0%,故实际混凝土用水量为: $m_w=163.0 \text{ kg/m}^3$,胶凝材料用量 m_j 为370.0 kg/m^3 。

配制时,粉煤灰材料掺量为胶凝材料的15%,由此计算出粉煤灰 m_f 、水泥 m_c 的用量分别为55.0、315.0 kg/m^3 。根据施工经验,外加剂掺量占胶凝材料的1.0%,外加剂 m_{wj} 用量为3.7 kg/m^3 。

采用假定容量法计算砂石用量。假定混凝土用量为2 380.0 kg/m^3 ,砂率为45%,由此计算得到机制砂 m_s 与机制碎石 m_g 的用量分别为831.0、1 016.0 kg/m^3 。

最终得到基准配合比为 $m_c:m_j:m_s:m_g:m_w:m_{wj}=$

1.00:0.17:2.64:3.23:0.52:0.01。

4) 试验验证。

调制水胶比分别为0.42、0.44、0.46的花岗岩混凝土,再配制成标准试样,并进行单轴压缩试验,得到水胶比-强度关系,如图5所示。从图5可以看出,C30花岗岩混凝土28 d强度满足配置强度 $f_{cu,0}$ 要求,对应的水胶比为0.43。经计算,经验配合比为 $m_c:m_j:m_s:m_g:m_w:m_{wj}=322.00:57.00:831.00:1016.00:163.00:3.79$ 。

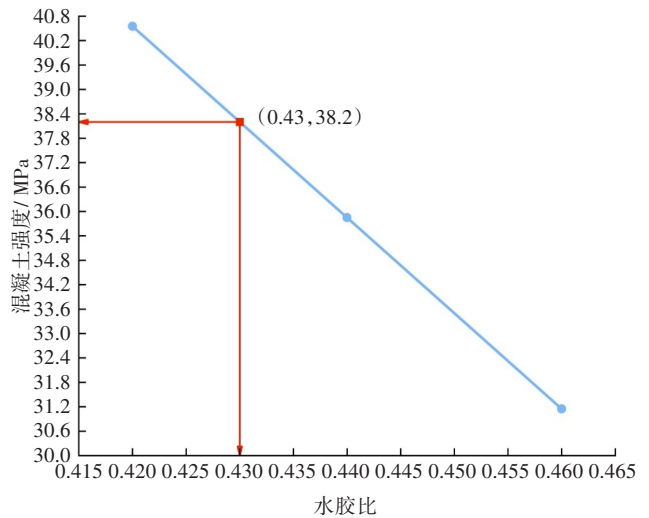


图5 水胶比-强度关系

Fig. 5 Relationship between water-binder ratio and strength

5) 确定最优配合比。

在经验配合比的基础上进行优化,改变水胶比,分别为0.42、0.43、0.44;改变外加剂掺量,分别为0.9%、1.0%、1.1%。采用全面试验方法,制配不同配合比的混凝土,并进行坍落度和强度测试,得到满足要求的最优配合比。

4.3 试验结果分析与优选

对比水胶比、减水剂梯度的变化,设计两因素三水平的全面试验,测试并记录混凝土7、28 d的抗压强度以及坍落度,具体测试结果见表7。由表7可知,1~3试验组花岗岩混凝土28 d的强度并未达到预期要求。这是因为水灰比过大时,新生成的胶体水泥浆浓度低,导致水化后混凝土体内存在大量多余的游离水分。这些水分往往先附着在骨料上,导致胶体与骨料黏结面积减少,黏结力下降。混凝土硬化时,产生细小的裂纹,从而降低混凝土强度。当水灰比降低为0.43、0.42时,花岗岩混凝土在28 d的抗压强度均满足要求。当水胶比相同时,

增大减水剂的掺量,可以改善花岗岩混凝土和易性。考虑到工程项目的施工成本,建议采用4号与5号试验组的花岗岩混凝土配合比。但由于4号试验

组的强度富余较少,认为5号试验组是最优选择。在5号试验组的配合比下,水胶比为0.43,外加剂掺量为1.0%。

表7 全面试验结果及评价

Table 7 Overall test results and evaluation

试验组	水胶比	减水剂/ %	坍落度/ mm	7 d强度/ MPa	28 d强度/ MPa	单价/ (元·t ⁻¹)	配合比评价
1	0.44	0.9	155	30.9	35.9	217.09	强度不满足要求
2	0.44	1.0	160	31.8	36.2	218.01	强度不满足要求
3	0.44	1.1	160	32.7	37.9	218.93	强度不满足要求
4	0.43	0.9	165	33.6	39.4	223.81	强度富余太少
5	0.43	1.0	175	34.3	40.2	224.76	和易性良好
6	0.43	1.1	175	35.7	41.6	225.70	和易性良好
7	0.42	0.9	170	35.8	42.8	231.20	和易性不好
8	0.42	1.0	175	36.2	43.0	232.19	成本较高
9	0.42	1.1	180	37.6	44.1	233.18	成本较高

5 工程案例分析

5.1 C30花岗岩混凝土工程应用

按照C30花岗岩混凝土的最优配合比配制混凝土,并将其应用在无岳隧道路基、桥涵及隧道工程施工中。为了确保施工的质量,参照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011)中的测试步骤,对C30花岗岩混凝土的抗压强度进行测试。具体的测试结果如图6所示。

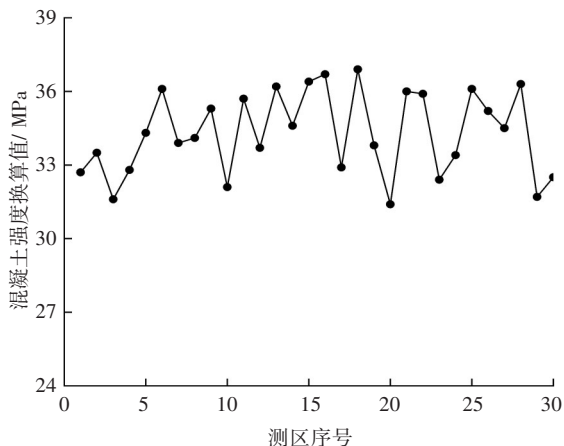


图6 混凝土构件检测结果

Fig. 6 Test results of concrete members

从图6可以看出,通过回弹法得到的测区混凝土强度平均值为34.290 MPa,强度标准差为1.697 MPa,混凝土强度为31.500 MPa。强度均高于设计要求的C30花岗岩混凝土强度。因此,无岳隧道强度符合要求。

对不同强度等级的花岗岩混凝土进行了配合比的设计和优化,得到最优配合比,将其应用于无岳隧道施工中,并进行抗压强度测试。具体结果见表8。

5.2 工程应用效益

将配置的花岗岩混凝土应用于岳高速WYTJ-07标段的隧道施工中。经检测,完全满足隧道开挖、支护、公路建设等施工工艺要求。根据隧道施工混凝土用量的数据显示,加工碎石共计 $98 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中,特殊路基、台背等回填碎石垫层利用 $32 \times 10^4 \text{ m}^3$,混凝土等原材料利用 $34 \times 10^4 \text{ m}^3$,库存 $19 \times 10^4 \text{ m}^3$,外运 $13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。不仅提高了洞渣的固废利用率,降低了施工成本,带来了巨大的经济效益,还减少了占地面积,保护了当地的生态环境,具有较大的经济和社会效益。

表 8 花岗岩混凝土配合比结果

Table 8 Results of granite concrete mix

最优 配合比	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	机制砂/ (kg·m ⁻³)	机制碎石/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	PCA-1/ (kg·m ⁻³)	水胶比	推定强度/ MPa	用途
C15	230	40	870	1 044	146	2.700	0.54	17.60	路基
C20	280	50	835	1 000	165	3.300	0.50	21.23	路基、桥涵
C25	289	51	833	107	160	3.400	0.47	27.41	路基、桥涵及隧道工程
C30	331	48	831	1 016	163	3.790	0.43	33.56	路基、桥涵及隧道工程
C40	423	—	855	967	165	4.230	0.39	42.7	墩柱混凝土施工
C50	470	—	766	1 059	155	4.700	0.33	54.6	预制箱梁、T梁

6 结论

1) 通过使用三级破碎工艺加工隧道花岗岩洞渣,得到满足要求的机制碎石和机制砂,验证变质花岗岩应用于混凝土制配的可行性。

2) 通过室内两因素三水平全面试验,确定了 6 种强度等级变质花岗岩混凝土的最优配合比,并在实际工程中得到应用。

3) 本研究所提出的花岗岩混凝土配合比的优化思路,为花岗岩混凝土的研发与应用提供了参考。

参考文献(References):

[1] 李倩. 基于贝叶斯网络的山区高速公路隧道交通事故概率研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020. DOI: 10.27776/d.cnki.gwhgy.2020.000337.

LI Qian. Study on traffic accident probability of highway tunnel in mountainous based on Bayesian network [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2020. DOI: 10.27776/d.cnki.gwhgy.2020.000337.

[2] 姜冰, 常树芳, 王方立, 等. 浅埋偏压隧道洞口联合支护变形监测及模拟[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 78-84, 107. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2021.04.012.

JIANG Bing, CHANG Shufang, WANG Fangli, et al. Deformation monitoring and numerical simulation of combined support at portal of shallow buried bias tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 78-84, 107. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-

1494/u.2021.04.012.

[3] 2021 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2022-05-25) [2022-08-25] <http://www.chinahighway.com/article/65393930.html>

Transportation Industry Development Statistical Bulletin 2021 [EB/OL]. (2022-05-25) [2022-08-25] <http://www.chinahighway.com/article/65393930.html>

[4] 侯正森. 高速公路隧道洞渣资源化利用合作机制与评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000846.

HOU Zhengsen. Cooperative mechanism and evaluation of the utilization of slag residues in expressway tunnels [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[5] 王海生. 花岗岩高性能混凝土配合比设计方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.

WANG Haisheng. Granite aggregate high performance concrete mix design method rearch [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[6] 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.

[7] RIVIERA P P, BELLOPEDE R, MARINI P, et al. Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for subgrade and sub-base formation in road construction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 160-173. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.002.

[8] VIJAYALAKSHMI M, SEKAR A S S, GANESH PRABHU G. Strength and durability properties of

- concrete made with granite industry waste [J]. Construction and Building Materials, 2013, 46: 1-7. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018.
- [9] 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.
- [10] DONZA H, CABRERA O, IRASSAR E F. High-strength concrete with different fine aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32 (11): 1755-1761. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00860-8.
- [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] 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.
- [13] 张翼飞. 洞渣机制砂混凝土配合比设计及性能研究[J]. 工程机械与维修, 2021(6): 51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2021.06.021.
- ZHANG Yifei. Mix proportion design and performance study of slag machine-made sand concrete [J]. Construction Machinery & Maintenance, 2021(6): 51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2021.06.021.
- [14] 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. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2021.03.029.
- 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. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2021.03.029.
- [15] 刘闯, 王欢. 花岗岩残积土填料晾晒数值模拟方法及应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16 (3): 25-33. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.03.004.
- LIU Chuang, WANG Huan. Drying numerical simulation and application of granite residual soil as highway embankment filler [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16 (3): 25-33. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.03.004.
- [16] 郝彤, 田文琴, 曹力强, 等. 大掺量废弃花岗岩石粉对砂浆力学性能影响[J]. 混凝土, 2021(3): 103-106, 111. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.03.025.
- HAO Tong, TIAN Wenqin, CAO Liqiang, et al. Large amount of waste granite stone powder on the mechanical properties of mortar [J]. Concrete, 2021 (3): 103-106, 111. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.03.025.

(责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)