

引用本文:徐志华,熊文勇,刘辉,等.片麻岩骨料混凝土基本力学性能及其换算关系研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):10-19.  
XU Zhihua, XIONG Wenyong, LIU Hui, et al. Study on basic mechanical properties and conversion relationship of gneiss aggregate concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 10-19.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11027

# 片麻岩骨料混凝土基本力学性能及其换算关系研究

徐志华<sup>1,2</sup>,熊文勇<sup>1,2</sup>,刘辉<sup>1,2</sup>,李北星<sup>3</sup>

(1. 江西省交通工程集团有限公司,江西 南昌 330000; 2. 江西省桥梁智能养护工程技术研究中心,江西 南昌 330000; 3. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室,湖北 武汉 430070)

**摘要:**为了研究片麻岩机制砂骨料混凝土的劈裂抗拉强度、轴心抗压强度和弹性模量与立方体抗压强度之间的关系,选取水胶比、机制砂砂率和机制砂石粉含量为配比参数,制备11组C50片麻岩骨料混凝土进行不同龄期的基本力学性能试验。根据试验结果,探讨了片麻岩骨料混凝土各力学性能受各配比参数变化的影响规律,采用数理统计回归的方法,对立方体抗压强度与其他力学性能指标之间的换算关系进行了分析。结果表明:片麻岩骨料混凝土力学性能中受配比参数变化影响最大的是劈裂抗拉强度,其次是立方体抗压强度和轴心抗压强度,最小的是弹性模量;拟合的片麻岩骨料混凝土劈裂抗拉强度、轴心抗压强度、弹性模量与立方体抗压强度之间换算关系式,较GB 50010—2010中相应的关系式能更准确地反映片麻岩骨料混凝土立方体抗压强度与其他力学性能指标之间的关系;片麻岩骨料混凝土试块回弹值与立方体抗压强度的相关性很小。

**关键词:**片麻岩骨料混凝土;力学性能;机制砂;配比参数;换算关系;回归分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)03-0010-10

## Study on basic mechanical properties and conversion relationship of gneiss aggregate concrete

XU Zhihua<sup>1,2</sup>, XIONG Wenyong<sup>1,2</sup>, LIU Hui<sup>1,2</sup>, LI Beixing<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Transportation Engineering Group Co., Ltd, Nanchang 330000, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Engineering Center for Bridge Intelligent Maintenance, Nanchang 330000, Jiangxi, China; 3. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between splitting tensile strength, axial compressive strength, elastic modulus and cubic compressive strength of gneiss machine-made aggregate concrete, the basic mechanical properties of 11 groups of C50 gneiss aggregate concrete were tested at different ages by selecting the water binder ratio, the rate of machine-made sand and the stone powder content in machine-made sand as the mixing parameter variables. Based on the test results, the influence of the mixing ratio parameters on the mechanical properties of gneiss aggregate concrete was discussed, and the conversion relationship between the cubic compressive strength and other mechanical properties was analyzed by using the mathematical statistics regression method. The results show that among the mechanical properties of gneiss aggregate

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1909904); 江西省交通运输厅科技计划项目(2020H0002)

作者简介: 徐志华(1962-), 男, 正高级工程师, E-mail: 1164485851@qq.com.

通信作者: 李北星(1970-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: libx0212@126.com.

concrete, the splitting tensile strength is the most affected by the change of proportioning parameters, the cubic compressive strength and axial compressive strength are the second, and the elastic modulus is the smallest. The fitted conversion relationship between splitting tensile strength, axial compressive strength, elastic modulus and cubic compressive strength of gneiss aggregate concrete can more accurately reflect the relationship between the cubic compressive strength of gneiss aggregate concrete and other mechanical performance indicators than the corresponding relationship in GB 50010—2010. The rebound value of gneiss aggregate concrete test block has little correlation with the cubic compressive strength.

**Key words:** gneiss aggregate concrete; mechanical property; machine-made sand; mix proportion parameter; conversion relationship; regression analysis

## 0 引言

近年来,为缓解山区高速公路、铁路工程建设中砂石资源严重短缺与大量隧道洞渣处理困难之间的矛盾,中国越来越多工程开展了将隧道洞渣加工成骨料用于制备隧道、桥梁工程中各强度等级混凝土的应用<sup>[1-5]</sup>。砂石骨料在混凝土整个体积中约占65%以上,骨料的特性包括岩性、强度、弹性模量、粒形、级配、最大粒径、表面织构及所含的有害成分等,会对新拌混凝土工作性和硬化混凝土力学性能、体积稳定性和耐久性产生重要影响。中国幅员辽阔,生产机制砂骨料的母岩种类繁多,其中以石灰岩分布最为广泛,其次是花岗岩、白云岩、玄武岩、石英岩和凝灰岩等。近年来,国内外围绕机制砂岩性对混凝土性能的影响进行了一定的研究<sup>[6-10]</sup>,结果表明,不同岩性的机制砂对混凝土的工作性及减水剂的适应性影响较大,对混凝土强度和耐久性也有一定的影响。

片麻岩是由长石和石英组成的,呈中粗粒变晶结构和片麻状构造的变质岩<sup>[11]</sup>。传统上,片麻岩是良好的建筑石材,但中国基础设施建设利用片麻岩骨料配制混凝土的应用很少<sup>[12-13]</sup>,仅有的少量研究主要集中于片麻岩碎石混凝土力学性能。李北星等<sup>[14]</sup>研究了片麻岩碎石压碎值在9%~24%范围对混凝土力学性能的影响,认为混凝土抗压强度与碎石压碎值的关系并不显著,而混凝土抗折、劈裂抗拉强度和弹性模量随碎石压碎值的增大而减小,且混凝土强度等级越高,受压碎值影响程度越大;高伟光等<sup>[15]</sup>对比研究了片麻岩与石灰岩碎石C60高强混凝土的力学与耐久性能,结果显示片麻岩碎石可以制备出抗压强度、耐久性能与石灰岩混凝土相当的C60混凝土,但片麻岩混凝土的抗折、劈裂抗拉强度和弹性模量均明显低于石灰岩混凝土;董芸等<sup>[16]</sup>对

比了花岗片麻岩天然砂砾石骨料与石灰岩、花岗岩和玄武岩人工砂石骨料配制的抗冲耐磨混凝土性能,结果表明花岗片麻岩天然骨料混凝土的强度和极限拉伸值较低,抗裂性和抗冲磨性较差,不适用于抗冲耐磨混凝土;宋少民等<sup>[6,17]</sup>在研究不同岩性的机制砂与聚羧酸减水剂适应性时均认为,片麻岩机制砂表面织构不平整,比表面积大,吸附性较强,适应性较差。

鉴于目前对片麻岩机制砂混凝土力学性能的研究甚少,对片麻岩机制砂石骨料混凝土不同力学性能指标之间的换算关系研究更未见报道,本研究以片麻岩机制砂为粗细骨料,配制了不同水胶比、不同砂率、不同机制砂石粉含量的C50片麻岩骨料混凝土,对其基本力学性能进行试验,分析水胶比、机制砂砂率和石粉含量等因素对混凝土不同力学性能指标的影响,通过回归分析,提出片麻岩骨料混凝土劈裂抗拉强度、轴心抗压强度、弹性模量与立方体抗压强度的换算公式,为片麻岩骨料在预应力T梁C50混凝土中的应用提供技术指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

(1)水泥:江西分宜海螺水泥有限公司P.O42.5水泥,3d和28d抗压强度分别为27.4、48.1MPa,3d和28d抗折强度分别为5.3、7.8MPa。

(2)矿渣粉:江西联达新科建材厂S95级粒化高炉矿渣粉,比表面积为 $434\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,流动度比为98%,7d和28d活性指数分别为85.1%、98.6%。

(3)碎石:江西省宜遂高速公路SSA-2标利用隧道开挖产生的片麻岩洞渣自加工的5~20mm连续级配碎石,由粒径5~10mm小石和10~20mm中石按质量比2:8级配而成,其主要物理力学性能见表1。该碎石母岩呈浅灰色,通过岩相分析可知

其岩石为粒状鳞片变晶结构,片麻状构造。矿物组成主要为石英(质量分数约35%)、斜长石(约30%)、微斜长石(约15%),还含有少量黑云母(约12%)、白云母(约7%)、石榴石(1%~2%)等,且不含碱活性矿物,不具有碱-硅酸反应活性。岩石典型显微结构如图1所示。

(4)机制砂:江西省宜遂高速公路SSA-2标采用楼站式单独干法制砂工艺生产的片麻岩机制砂,其细度模数为2.92,2区级配,主要物理力学性能指标见表1。由表2化学成分结果可知,片麻岩机制砂主要化学成分为 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,二者含量(质量

分数)超过86%,其次为 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 。

(5)外加剂:采用江西华建高新材料有限公司生产的聚羧酸高效减水剂,固含量为18.5%。

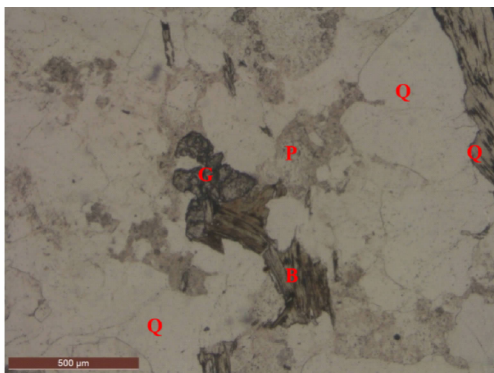
## 1.2 混凝土配合比

设计了A、B、C三个系列C50片麻岩骨料混凝土配合比(表3)来进行力学性能试验。A系列考察4个水胶比的影响,B系列考察5个砂率的影响,C系列考察片麻岩机制砂石粉含量的影响,石粉含量设计为3%、5.3%、7.5%和10%四个水平。其中,编号C1配比石粉含量3%的机制砂,采用0.075 mm方孔筛将石粉含量5.3%的原砂筛出部分石粉

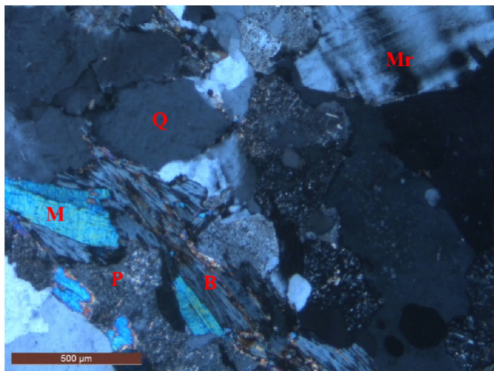
表1 片麻岩碎石与机制砂主要物理力学性能

Table 1 Main physical and mechanical properties of gneiss gravel and machine-made sand

材料	表观密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	松堆密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压碎值/%	针片状颗粒 含量/%	吸水率/%	含泥量/%	石粉含量/%	MB值/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	泥块含量/%	碱活性/%
碎石	2.676	1560	12.8	4.0	0.26	0.72			0	
机制砂	2.598	1636	19.0		0.29		5.3	0.51	0	0.025



(a) 显微结构1



(b) 显微结构2

Q—石英 P—斜长石 Mr—微斜长石 B—黑云母  
M—白云母 G—石榴石

图1 片麻岩碎石典型岩相结构

Fig. 1 Typical petrographic structure of gneiss gravel

制得,C3、C4配比石粉含量7.5%、10%的机制砂,通过在石粉含量5.3%的原砂中添加制砂楼收尘器回收的粒径小于0.075 mm石粉制得。本试验采用单因素变量法,每个系列配合比中除考察因素变化外,其他原材料和配合比参数均不变。水胶比、砂率和石粉含量参数改变引起混凝土工作性变化,通过调整外加剂掺量,使不同混凝土的工作性相同或相近,即坍落度达到190~210 mm或扩展度达到480~530 mm范围。

## 1.3 试验方法

硬化混凝土力学性能依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行试验。立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试块尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,轴心抗压强度和弹性模量试块尺寸为150 mm×150 mm×300 mm。立方体抗压强度和劈裂抗拉强度测试龄期为7、28、56 d,轴心抗压强度和弹性模量测试龄期为7 d和28 d。另外,立方体抗压强度试块养护达到28 d时,按《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011)的要求对每个试块先进行回弹测试,再进行抗压强度试验。回弹试验时,试块表面应保持干燥,以成型侧面的两个相对面置于压力机的上、下承压板之间,加压至60 kN并在保持恒载情况下进行回弹

表2 片麻岩机制砂的化学成分

Table 2 Chemical composition of gneiss machine-made sand

化学成分	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	烧失量
质量分数/%	71.23	15.53	1.63	1.44	0.40	0.15	3.57	4.73	0.08	0.06	1.41

表3 片麻岩骨料混凝土配合比

Table 3 Mix proportions of gneiss aggregate concrete

编号	影响因素	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )						减水剂含量/%	坍落度/mm	扩展度/mm
		水泥	矿粉	石粉	机制砂	碎石	水			
A1	水胶比(0.31)	424	58	0.0	715.0	1 118	149	1.20	220	550
A2/B3/C2	水胶比(0.33)	424	58	0.0	715.0	1 118	159	1.05	210	510
A3	水胶比(0.35)	424	58	0.0	715.0	1 118	169	1.00	200	510
A4	水胶比(0.37)	424	58	0.0	715.0	1 118	178	0.90	205	480
B1	砂率(35%)	424	58	0.0	641.0	1 192	159	0.80	205	505
B2	砂率(37%)	424	58	0.0	678.0	1 155	159	0.95	200	510
B3	砂率(39%)	424	58	0.0	715.0	1 118	159	1.05	210	510
B4	砂率(41%)	424	58	0.0	751.0	1 082	159	1.15	195	500
B5	砂率(43%)	424	58	0.0	788.0	1 045	159	1.35	200	495
C1	石粉含量(3%)	424	58	0.0	715.0	1 118	159	1.00	205	500
C2	石粉含量(5.3%)	424	58	0.0	715.0	1 118	159	1.05	210	510
C3	石粉含量(7.5%)	424	58	16.6	698.4	1 118	159	1.10	200	480
C4	石粉含量(10%)	424	58	35.5	679.5	1 118	159	1.15	190	505

测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水胶比对混凝土力学性能的影响

图2为水胶比对C50片麻岩骨料混凝土力学性能的影响。可以看出,随着养护龄期的增加,不同水胶比的4组混凝土立方体抗压、劈裂抗拉、轴心抗压强度及弹性模量均呈较显著的增长趋势,表明该片麻岩骨料混凝土力学性能随龄期发展正常。4组混凝土的7d抗压强度均大于50MPa,满足7d张拉强度要求,28d抗压强度均大于60MPa,满足C50混凝土28d配制强度要求。

随着水胶比的增大,混凝土立方体抗压、劈裂抗拉、轴心抗压强度和弹性模量均呈逐步下降趋势。相对于水胶比0.31的混凝土,水胶比0.37的混凝土28d龄期立方体抗压、劈裂抗拉和轴心抗压强度分别降低15.1%、20%和18%,28d弹性模量降低12%;水胶比0.33的混凝土28d龄期立方体抗压、劈裂抗拉和轴心抗压强度分别降低7.3%、15.6%和8.9%,弹性模量降低5%。在4个力学性能指标之中,水胶比变化对C50混凝土劈裂抗拉强度的影响最大,对轴心抗压和立方体抗压强度的影响次之,对弹性模量的影响最小。

### 2.2 砂率对混凝土力学性能的影响

图3为片麻岩机制砂砂率对C50混凝土力学性能的影响。可以看出,随着砂率增加,混凝土立方体抗压、劈裂抗拉和轴心抗压强度以及弹性模量均呈先增后降趋势,当砂率为39%时,混凝土的各项

力学性能最佳。相对于砂率最低为35%的混凝土,砂率39%的混凝土28d龄期立方体抗压、劈裂抗拉和轴心抗压强度分别增大8.1%、11.8%和7.0%,28d弹性模量增加3.8%;相对于砂率最高为43%的混凝土,砂率39%的混凝土28d龄期立方体抗压、劈裂抗拉和轴心抗压强度分别增大7.3%、8.6%和7.0%,28d弹性模量增加4.1%,结果显示C50混凝土的力学性能受砂率影响程度最大的是劈裂抗拉强度,立方体抗压和轴心抗压强度次之,弹性模量最小。

### 2.3 石粉含量对混凝土力学性能的影响

图4为片麻岩机制砂石粉含量对C50混凝土力学性能的影响。可以看出,随着石粉含量的增加,混凝土立方体抗压、劈裂抗拉和轴心抗压强度以及弹性模量均呈逐步增加趋势,且增长速率在石粉含量低于7.5%时增长较快,石粉含量超过7.5%后增长减缓。机制砂石粉含量10%的混凝土28d立方体抗压、劈裂抗拉、轴心抗压强度和弹性模量较机制砂石粉含量3%的混凝土分别提高了10%、13.5%、7.3%和5.1%。从受砂率影响程度来看,劈裂抗拉强度最大,其次是立方体抗压和轴心抗压强度,最小的是弹性模量。

机制砂石粉含量对混凝土强度的影响有正负两方面的作用:一是石粉含量的增加可以减少混凝土的内泌水<sup>[18]</sup>,且石粉的微集料填充效应<sup>[19-20]</sup>有助于降低毛细孔隙和致密混凝土微结构,从而增加混凝土强度,这是石粉的正作用;二是石粉含量的增加会引起机制砂中的中粗砂粒的减少而损害砂石骨料的

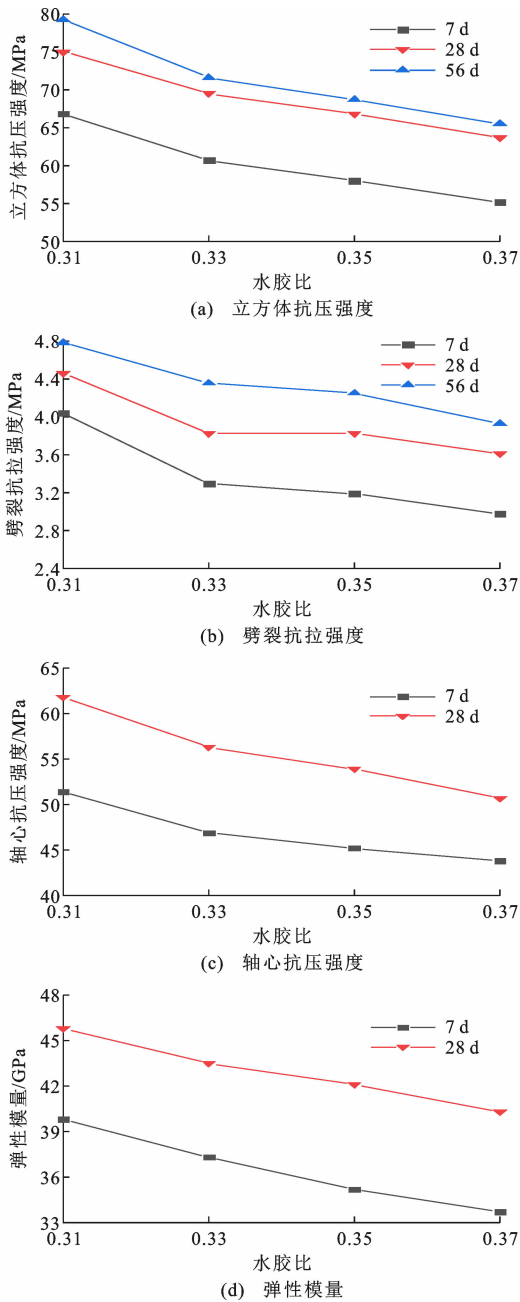


图2 水胶比对片麻岩骨料混凝土力学性能的影响

Fig. 2 Influence of water binder ratio on mechanical properties of gneiss aggregate concrete

紧密堆积并削弱中粗砂粒的骨架作用,当石粉含量过量后还可能在界面过渡区内出现游离态石粉<sup>[21-22]</sup>,后者将不利于骨料和水泥石的黏结,这些是石粉的负作用。在相同配合比参数下,石粉含量对混凝土弹性模量的影响也主要取决于两方面:一是石粉对混凝土的增强作用有助于增加其弹性模量;二是石粉含量的增加使得机制砂混凝土浆体体积增大,增大了浆骨体积比,将会降低混凝土的弹性模量<sup>[22]</sup>。本试验中,当石粉含量在10%以内变化时,混凝土强度和弹性模量随石粉含量的增加而增加,

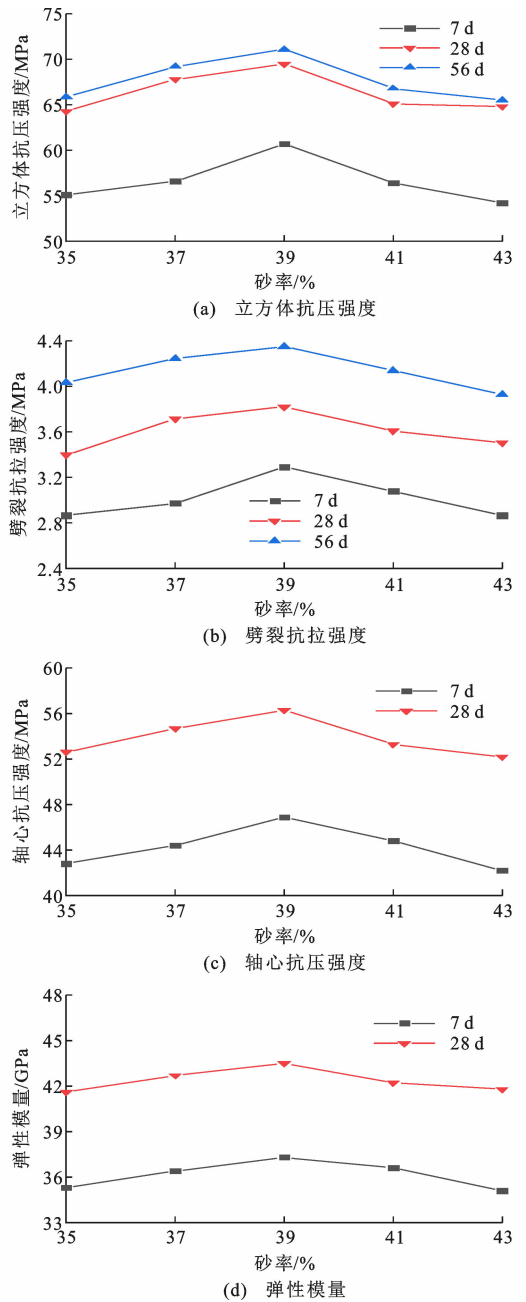


图3 砂率对片麻岩骨料混凝土力学性能的影响

Fig. 3 Influence of sand percent on mechanical properties of gneiss aggregate concrete

说明机制砂中10%以内的石粉含量对混凝土的强度和刚度的正作用大于负作用。

## 2.4 混凝土劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的关系

图5给出了试验测得的不同水胶比、砂率和石粉含量的片麻岩骨料混凝土在不同龄期的劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的分布情况。从图5可以看出,劈裂抗拉强度总体随着立方体抗压强度的增大而呈增大趋势。现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[23]</sup>给出了普通混凝土劈裂抗拉强度

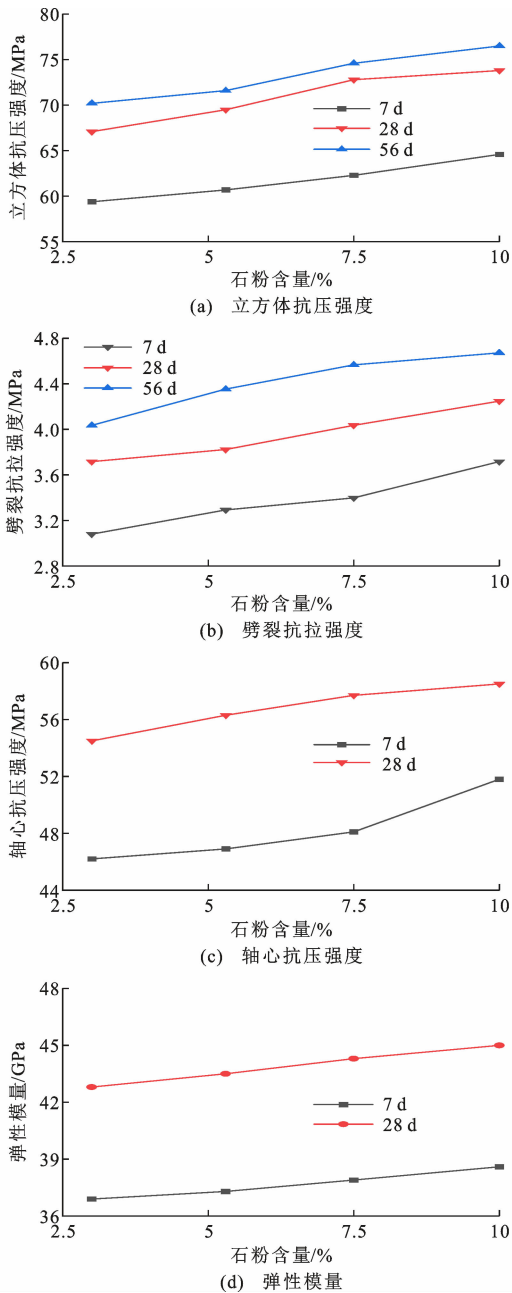


图4 机制砂石粉含量对片麻岩骨料混凝土力学性能的影响

Fig. 4 Influence of stone powder content in machine-made sand on mechanical properties of gneiss aggregate concrete with cubic compressive strength between the conversion relationship of

$$f_{ts} = 0.19 f_{cu}^{0.75} \quad (1)$$

式中:  $f_{ts}$  为劈裂抗拉强度;  $f_{cu}$  为立方体抗压强度。

按式(1)得到的混凝土劈裂抗拉强度计算值与试验值进行对比,结果见表4。从表4可以看出,式(1)高估了片麻岩机制砂混凝土的劈裂抗拉强度,尤其是7 d和28 d龄期的劈裂抗拉强度。

为此,利用本试验的数据结果,采用式(2)对片麻岩骨料混凝土的劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的关系进行回归分析。

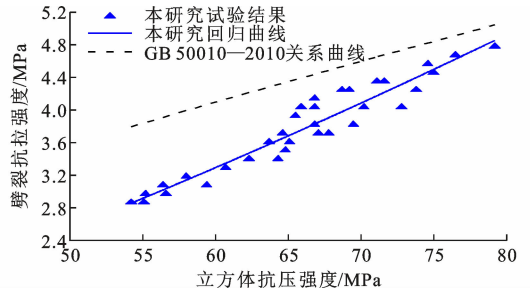


图5 片麻岩骨料混凝土劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的关系

Fig. 5 Relation between splitting tensile strength and cubic compressive strength of gneiss aggregate concrete

$$f_{ts} = \alpha f_{cu}^{\beta} \quad (2)$$

通过非线性回归,得到回归系数  $\alpha = 0.011$ ,  $\beta = 1.398$ ,其判定系数  $R^2 = 0.902$ ,即

$$f_{ts} = 0.011 f_{cu}^{1.398} \quad (3)$$

回归曲线见图5,图5同时也给出了按GB 50010—2010中的换算关系式(1)绘制的曲线。可以看出,在抗压强度相同的情况下,按GB 50010—2010关系曲线计算出来的片麻岩骨料混凝土劈裂抗拉强度明显偏高,而采用式(3)能更好地表示片麻岩骨料混凝土劈裂抗拉强度与抗压强度之间的关系。

## 2.5 混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

图6中散点数据是本试验片麻岩骨料混凝土轴心抗压强度和立方体抗压强度的分布情况。大体而言,随着片麻岩骨料混凝土立方体抗压强度增大,相应的轴心抗压强度是增大的。

根据GB 50010—2010中的规定,普通混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的换算关系为

$$f_{cp} = 0.76 f_{cu} \quad (4)$$

式中:  $f_{cp}$  为轴心抗压强度。

表5给出了按式(4)得到的轴心抗压强度计算结果与试验结果对比。可以看出,式(4)低估了片麻岩骨料混凝土的轴心抗压强度值,尤其是28 d的轴心抗压强度。

为此,基于本试验的数据结果,采用式(5)的线性回归模型对图6所示的数据进行统计回归。

$$f_{cp} = \alpha f_{cu} \quad (5)$$

通过线性回归,得到回归系数  $\alpha = 0.901$ ,判定系数  $R^2 = 0.971$ ,即

$$f_{cp} = 0.901 f_{cu} - 6.788 \quad (6)$$

由图6可以看出,与GB 50010—2010的关系曲线相比,本研究所得到的回归曲线式(6)与实际

表 4 片麻岩骨料混凝土劈裂抗拉强度计算结果与试验结果对比

Table 4 Comparison between calculated and experimental results of splitting tensile strength of gneiss aggregate concrete

编号	7 d 劈裂抗拉强度/MPa			28 d 劈裂抗拉强度			56 d 劈裂抗拉强度/MPa		
	试验值/ MPa	规范计算值/ MPa	相对误差/ %	试验值/ MPa	规范计算值/ MPa	相对误差/ %	试验值/ MPa	规范计算值/ MPa	相对误差/ %
A1	4.0	4.4	10.0	4.5	4.8	6.7	4.8	5.0	4.2
A2/B3/C2	3.3	4.1	24.2	3.8	4.6	21.1	4.4	4.7	6.8
A3	3.2	4.0	25.0	3.8	4.4	15.8	4.2	4.5	7.1
A4	3.0	3.8	26.7	3.6	4.2	16.7	3.9	4.4	12.8
B1	2.9	3.8	31.0	3.4	4.3	26.5	4.0	4.4	10.0
B2	3.0	3.9	30.0	3.7	4.5	21.6	4.2	4.6	9.5
B4	3.1	3.9	25.8	3.6	4.4	22.2	4.1	4.4	7.3
B5	2.9	3.8	31.0	3.5	4.3	22.9	3.9	4.4	12.8
C1	3.1	4.0	29.0	3.7	4.5	21.6	4.0	4.6	15.0
C3	3.4	4.2	23.5	4.0	4.7	17.5	4.6	4.8	4.3
C4	3.7	4.3	16.2	4.2	4.8	14.3	4.7	4.9	4.3

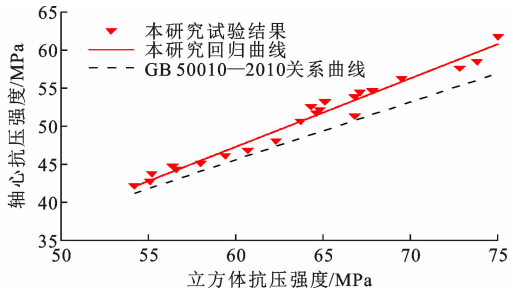


图 6 片麻岩骨料混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

Fig. 6 Relation between axial and cubic compressive strengths of gneiss aggregate concrete

试验数据拟合性更好。

## 2.6 混凝土弹性模量与立方体抗压强度的关系

根据片麻岩骨料混凝土弹性模量与立方体抗压强度分布情况(图 7 散点数据)可以发现,随着混

凝土立方体抗压强度的提高,弹性模量总体呈增大趋势。对于普通混凝土的弹性模量与立方体抗压强度,GB 50010—2010 采用式(7)表示二者之间的关系。

$$E_c = 10^5 / (2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}) \quad (7)$$

式中: $E_c$  为混凝土弹性模量。

表 6 为按式(7)计算的弹性模量结果与试验结果的对比。可以看出,在大多情况下式(7)过低估计了片麻岩骨料混凝土的弹性模量,尤其是 28 d 龄期的弹性模量误差较大。

为此,采用式(8)所示模型对片麻岩骨料混凝土的弹性模量与立方体抗压强度之间的关系进行回归。

$$E_c = 10^5 / (\alpha + \frac{\beta}{f_{cu}}) \quad (8)$$

表 5 片麻岩骨料混凝土轴心抗压强度计算结果与试验结果对比

Table 5 Comparison between calculated and experimental results of axial compressive strength of gneiss aggregate concrete

编号	7 d 轴心抗压强度			28 d 轴心抗压强度		
	试验值/MPa	规范计算值/MPa	相对误差/%	试验值/MPa	规范计算值/MPa	相对误差/%
A1	51.4	50.8	-1.2	61.8	57.0	-7.8
A2/B3/C2	46.9	46.1	-1.7	56.3	52.8	-6.2
A3	45.2	44.1	-2.4	53.9	50.8	-5.8
A4	43.8	42.0	-4.1	50.7	48.4	-4.5
B1	42.8	41.9	-2.1	52.6	48.9	-7.0
B2	44.4	43.0	-3.2	54.7	51.5	-5.9
B4	44.8	42.9	-4.2	53.3	47.5	-10.9
B5	42.2	41.2	-2.4	52.2	49.2	-5.7
C1	46.2	45.1	-2.4	54.5	51.0	-6.4
C3	48.1	47.3	-1.7	57.7	55.3	-4.2
C4	51.8	49.1	-5.2	58.5	56.1	-4.1

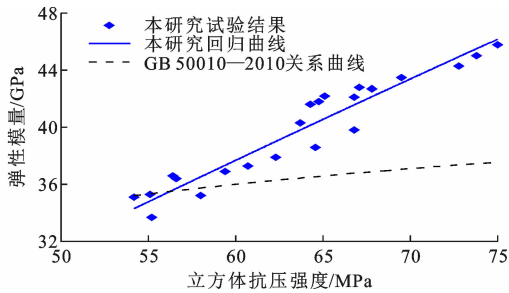


图7 片麻岩骨料混凝土弹性模量与立方体抗压强度的关系

Fig. 7 Relation between elastic modulus and cubic compressive strength of gneiss aggregate concrete

表6 片麻岩骨料混凝土弹性模量计算结果与试验结果对比

Table 6 Comparison between calculated and experimental results of elastic modulus of gneiss aggregate concrete

编号	7 d 弹性模量			28 d 弹性模量		
	试验值/GPa	规范计算值/GPa	相对误差/%	试验值/GPa	规范计算值/GPa	相对误差/%
A1	39.8	36.8	-7.5	45.8	37.6	-17.9
A2/B3/C2	37.3	36.1	-3.2	43.5	37.1	-14.7
A3	35.2	35.7	1.4	42.1	36.7	-12.8
A4	33.7	35.4	5.0	40.3	36.4	-9.6
B1	35.3	35.3	0.0	41.6	36.5	-12.3
B2	36.4	35.5	-2.5	42.7	36.8	-13.8
B4	36.6	35.5	-3.0	42.2	36.5	-13.5
B5	35.1	35.2	0.3	41.8	36.5	-12.7
C1	36.9	35.9	-2.7	42.8	36.8	-14.0
C3	37.9	36.3	-4.2	44.3	37.3	-15.8
C4	38.6	36.5	-5.4	45.0	37.4	-16.9

岩骨料混凝土试块进行了28 d回弹值测定,图8给出了其立方体抗压强度与回弹值的分布情况。大体而言,随着片麻岩骨料混凝土回弹值增大,相应的立方体抗压强度也增大,但具体变化规律不明显,离散性很大。

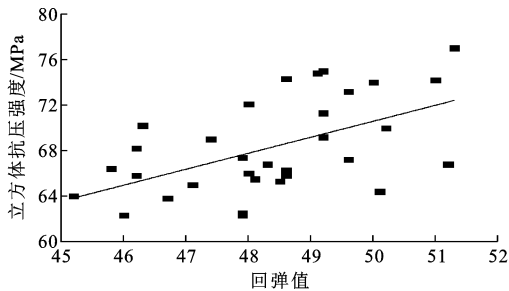


图8 片麻岩骨料混凝土回弹值与立方体抗压强度的关系

Fig. 8 Relation between rebound value and cubic compressive strength of gneiss aggregate concrete

现行《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011)给出了普通混凝土回弹值与抗压强度之间的换算关系为

$$f_{cu}^c = aR_m^b \times 10^{cd_m} \quad (10)$$

通过回归分析,得到回归系数  $\alpha = 0.207, \beta = 146.616$ , 判定系数  $R^2 = 0.918$ , 即

$$E_c = 10^5 / (0.207 + \frac{146.616}{f_{cu}}) \quad (9)$$

通过对本研究回归曲线和 GB 50010—2010 关系曲线与试验结果的比较(图7)可以看出,采用本研究回归得到的式(9)能较好地反映出片麻岩骨料混凝土弹性模量和立方体抗压强度之间的关系。

## 2.7 混凝土回弹值与立方体抗压强度的关系

为探讨回弹法评定片麻岩骨料混凝土立方体抗压强度的准确性,本试验对11组配合比、33个片麻

式中:  $f_{cu}^c$  为试块实测抗压强度值;  $R_m$  为试块的平均回弹值;  $d_m$  为试块的平均碳化深度值;  $a, b, c$  为回归系数。

因本试验试块龄期较短,且进行的是标准养护,可以忽略碳化深度对回弹值的影响,即  $d_m = 0$ 。采用式(10)所示回归模型对图8所示的试验数据进行统计回归,得到回归系数  $a = 1.438, b = 0.995$ , 判定系数  $R^2 = 0.267$ , 即

$$f_{cu}^c = 1.438R_m^{0.995} \quad (11)$$

如此低的判定系数说明片麻岩骨料混凝土试块抗压强度  $f_{cu}^c$  与平均回弹值  $R_m$  之间的相关性很低,因此采用回弹法检测片麻岩骨料混凝土的立方体抗压强度并不准确。

## 3 结语

(1)在本研究的试验参数范围内,水胶比越低和石粉含量越高,片麻岩骨料混凝土力学性能越好;机制砂石粉含量5.3%情况下,片麻岩骨料混凝土的合理砂率为39%。片麻岩骨料混凝土力学性能指

标受水胶比、石粉含量和砂率参数变化的影响程度不同,受影响最大的是劈裂抗拉强度,其次是立方体抗压和轴心抗压强度,最小的是弹性模量。

(2)基于实测试验数据,采用回归的方法拟合建立了片麻岩机制砂骨料混凝土劈裂抗拉强度与立方体抗压强度、轴心抗压强度与立方体抗压强度、弹性模量与立方体抗压强度之间的换算关系式。采用这些回归关系式较采用 GB 50010—2010 中相应的换算关系式能更准确地根据片麻岩骨料混凝土的立方体抗压强度计算出劈裂抗拉强度、轴心抗压强度、弹性模量等力学性能指标,这对以后片麻岩骨料混凝土的试验研究和强度预测有一定程度的借鉴作用。

(3)片麻岩骨料混凝土试块回弹值与立方体抗压强度之间的相关性很小,采用回弹法检测片麻岩骨料混凝土的立方体抗压强度并不准确。

### 参考文献:

### References:

[1] 王 东. 隧道弃渣在忻阜高速公路中的综合应用[J]. 山西交通科技, 2011(5): 68-69, 77.  
WANG Dong. The comprehensive application of tunnel spoil to Xinfu expressway[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2011(5): 68-69, 77.

[2] 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 tunnel slag machine-made sand in expressway construction [J]. Highway, 2017, 62(4): 249-252.

[3] 黄法礼, 李化建, 王 振, 等. 隧道洞渣建筑材料资源化应用研究现状与存在问题分析[J]. 中国铁路, 2019(8): 14-18.  
HUANG Fali, LI Huajian, WANG Zhen, et al. Research results and challenges of recycling tunneling mucks[J]. China Railway, 2019(8): 14-18.

[4] 袁政成, 黄法礼, 王 振, 等. 隧道洞渣在建筑材料中的资源化综合利用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2468-2475.  
YUAN Zhengcheng, HUANG Fali, WANG Zhen, et al. Review on resources comprehensive utilization of tunnel muck in building materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8): 2468-2475.

[5] 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.  
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.

[6] 宋少民, 程 成, 杨 楠. 机制砂岩性对胶砂和混凝土性能影响的研究[J]. 混凝土, 2019(9): 67-70.  
SONG Shaomin, CHENG Cheng, YANG Nan. Influence of manufactured sand lithology on mortar and concrete performance[J]. Concrete, 2019(9): 67-70.

[7] 唐凯靖, 刘来宝, 周 应. 岩性对机制砂特性及其混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2011(12): 62-63, 66.  
TANG Kaijing, LIU Laibao, ZHOU Ying. Effects of lithology on properties of manufactured sand and the performance of the concrete with manufactured sand [J]. Concrete, 2011(12): 62-63, 66.

[8] 谢开仲, 刘振威, 盖炳州, 等. 不同岩性的机制砂混凝土本构关系及力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(1): 99-106.  
XIE Kaizhong, LIU Zhenwei, GAI Bingzhou, et al. Constitutive relationship and mechanical properties of manufactured sand concrete with different rocks[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 99-106.

[9] 王立华, 刘 佳, 钟 华. 人工砂岩性和石粉含量对混凝土性能的影响[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 166-170.  
WANG Lihua, LIU Jia, ZHONG Hua. Influences of rock types and rock powder contents of manufactured sand on the properties of concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 166-170.

[10] LI H J, WANG Z, HUANG F L, et al. Impact of different lithological manufactured sands on high-speed railway box girder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116943.

[11] 刘崇熙, 文梓芸, 李 珍, 等. 混凝土骨料性能和制造工艺[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999.  
LIU Chongxi, WEN Ziyun, LI Zhen, et al. Performance and manufacturing process of concrete aggregates [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1999.

[12] 李道军, 汤荣平. 小湾电站双曲拱坝混凝土配合比试验及应用[J]. 云南水力发电, 2007(5): 29-34.  
LI Daojun, TANG Rongping. Test and application of concrete mix proportion of hyperbolic arch dam in Xiaowan hydropower station[J]. Yunnan Water Power, 2007(5): 29-34.

[13] 刘 豪. 片麻岩碎石配制 C60 桥梁混凝土的研究[J]. 铁道建筑技术, 2011(3): 7-10, 15.  
LIU Hao. On preparation of C60 bridge concrete with gneiss gravel[J]. Railway Construction Technology, 2011(3): 7-10, 15.

- [14] 李北星,房艳伟,高伟光,等. 片麻岩碎石压碎值对混凝土力学性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4):80-83.  
LI Beixing, FANG Yanwei, GAO Weiguang, et al. Influence of crushing value of granitic gneiss coarse aggregate on mechanical properties of concrete with different strengths[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(4):80-83.
- [15] 高伟光,周明凯,李北星,等. 桥用 C60 片麻岩碎石高强混凝土的力学性能与耐久性研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(2):239-243.  
GAO Weiguang, ZHOU Mingkai, LI Beixing, et al. Study on mechanical properties and durability of the C60 high strength concrete made from gneiss coarse aggregate in bridge[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2009, 28(2):239-243.
- [16] 董芸,杨华全,肖开涛,等. 不同骨料对抗冲耐磨混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2013(12):82-86.  
DONG Yun, YANG Huaquan, XIAO Kaitao, et al. Effect of aggregate on performance of abrasion resistance concrete[J]. Concrete, 2013(12):82-86.
- [17] 侯云芬,刘锦涛,郑东昊. 不同机制砂与聚羧酸减水剂的相容性及机理分析[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(3):74-78,117.  
HOU Yunfen, LIU Jintao, ZHENG Donghao. Analysis on the compatibility between different manufactured sand and polycarboxylate superplasticizer and its mechanism [J]. New Building Materials, 2019, 46(3):74-78,117.
- [18] QUIROGA P N, AHN N, FOWLER D W. Concrete mixtures with high microfines [J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(4):258-264.
- [19] 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 micro fines on manufactured fine aggregate concretes [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [20] EREN O, MARAR K. Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2):981-988.
- [21] 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 effects and mechanism of manufactured sand characteristics on portland cement concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [22] 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 properties[J]. China Concrete, 2011(8):66-70.
- [23] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.