

TBM 洞挖料作为中强混凝土粗骨料的试验研究

赵卫国¹, 史天聪¹, 张保胜², 王婧红¹, 杨海燕^{1*}

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 山西省水利建筑工程局有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 将隧道掘进机(TBM)洞挖料中的岩石作为混凝土粗骨料,设计两种骨料级配和0.55、0.60、0.65、0.70、0.75五种水胶比,对TBM混凝土的抗压强度进行研究。试验结果表明:在相同水胶比下TBM混凝土的抗压强度小于普通碎石混凝土的抗压强度,并且随着水胶比的增加TBM混凝土的抗压强度下降幅度大于普通混凝土;水胶比在0.55~0.75的范围内,TBM混凝土抗压强度和水胶比之间成一次线性函数关系且为负相关;合理使用Talbot公式对TBM混凝土的骨料级配具有指导意义。

关键词: TBM洞挖料;片状骨料;水胶比;抗压强度

中图分类号: TU528.014

文献标识码: A

Experimental Study on TBM Hole Excavated Material as Medium-strength Concrete Coarse Aggregate

ZHAO Weiguo¹, SHI Tiancong¹, ZHANG Baosheng², WANG Jinghong¹, YANG Haiyan^{1*}

(1.School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056000, China;
2.Water Conservancy Construction Engineering Bureau Co. LTD in Shanxi, Taiyuan, Shanxi 030006,China)

Abstract: The rocks of TBM hole excavated material were used as the source of coarse aggregate of concrete. Two kinds of aggregate gradations were designed and five water-cement ratios of 0.55, 0.60, 0.65, 0.70 and 0.75 were used to study the compression strength of TBM concrete. The experimental results show that the compression strength of TBM concrete is less than that of ordinary crushed stone concrete at the same water-cement ratio, And with the increase of water-binder ratio, the compression strength of TBM concrete decreases more than that of ordinary concrete. In addition, in the range of water-cement ratio of 0.55 to 0.75, the relationship between the compression strength of TBM concrete and the water-cement ratio is a linear function with negative correlation. Besides, the rational use of Talbot formula is instructive to aggregate gradation of TBM concrete.

Key words: TBM hole excavated material; flaky aggregate; water-cement ratio; compression strength

采用TBM开挖隧道在工作效率、安全、环保及综合效益等方面都有着巨大优势^[1-3]。多数工程中TBM洞挖料被当作废料进行处理,如果能将其利用起来,那将减少工程造价及对环境的影响^[4-5]。国外研究人员对TBM洞挖料回收利用方面的研究开始的较早,在实际工程上也有回收利用TBM洞挖料的实例^[4-7]。在国外,工程人员将TBM洞挖料掺加天然骨料或者碎石作为混凝土使用,但对材料的级配、形状、力学性能、处理方法等

缺少严格控制。这些方面都造成了混凝土在抗压强度方面存在较大的差异性。国内研究显示^[8-9],破碎加工可降低岩石中针片状颗粒含量。并对针片状骨料对混凝土性能的影响进行了相关研究^[10-12]。本文通过对施工现场收集的TBM开挖材料进行处理,并采用其中坚硬的岩石作为混凝土骨料制作混凝土。采用不同骨料级配以及五种不同的水胶比制作混凝土,研究不同情况下TBM混凝土的抗压强度。

收稿日期:2020-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11972144)

作者简介:赵卫国(1977-),男,河北威县人,博士,副教授,研究方向:智能优化与控制,水工结构可靠性。

* 通讯作者:杨海燕(1977-),女,辽宁通辽人,在读博士,实验师,研究方向为水利工程、计算机应用。

1 TBM 洞挖料

1.1 TBM 料源及筛分

TBM 洞挖料来源于山西省吕梁市临县地区 TBM 第二标段工程的开挖废料。由于 TBM 在挖掘隧道的同时需要不断地喷水降温降尘,并且施工现场缺乏对 TBM 洞挖料的管理,以及下雨等天气原因,TBM 材料含土量和含水量较高(图 1(a)),要对 TBM 洞挖料进行翻晒处理(图 1(b))。



图 1 TBM 洞挖料
Fig.1 TBM hole excavated material

为了将 TBM 洞挖料应用于制作混凝土,需要将 TBM 洞挖料进行筛分处理。使用筛具筛径为:5、10、20、40、60、80、100、120 mm,采用人工筛分方式进行筛分,并使用电子秤称量各粒径等级的重量。根据筛分的结果统计该次 TBM 洞挖料的各粒径的占比如表 1 所示。其中 TBM 粗骨料较多分布在 5~80 mm 区间内,其占比为 77.3%。5~40 mm 的 TBM 骨料占比为 38.8%,40~60 mm 占比为 24.8%。

1.2 TBM 颗粒形状

根据相关研究表明^[13],TBM 开挖料的尺寸由刀具对岩石的穿透程度和刀具轨迹之间的距

离所决定,而穿透程度取决于有效的 TBM 推力。TBM 洞挖料趋于片状,某些粗骨料的比例可达到 30 : 15 : 1,但大多数达不到这么高的比例。相对于粗骨料而言,细骨料的维度比例更加均匀^[4]。根据图 2 可以看出,TBM 洞挖料随粒径的增大趋向于片状结构,随粒径的减小趋向于立方体结构(普通颗粒形状)。

1.3 TBM 最大粒径选择及级配

骨料粒径越大比表面积越小,这将减少包裹骨料所需的水泥浆。所以采用较大的粒径骨料制作混凝土可以节约水泥的用量。但是混凝土骨料粒径并不是越大越好,其一骨料粒径越大其内部存在缺陷的概率越大;其二在拌制混凝土过程中粒径越大的骨料下沉速度越快,骨料粒径越大其拌制混凝土内部骨料分布越容易不均匀。这些不利因素都可能降低大粒径骨料成品混凝土的抗压强度^[14]。余红发等人^[15]将片状骨料于普通颗粒形状的骨料进行了对比,发现在相同重量的条件下,片状骨料的表面积和截面积较大。而较大的表面积和截面积会造成坍落度损失的增加及坍落度的下降。

为了减少 TBM 洞挖料在制作混凝土上颗粒形状的不利影响以及增加混凝土强度,在级配方面采用连续级配。同时考虑表 1 中 TBM 各粒径骨料的占比结果,为了尽可能使用 TBM 洞挖料,本次试验采用最大骨料粒径为 80 mm。采用试验的方法确定粗骨料级配,具体级配如表 2 所示。

表 1 TBM 洞挖料筛分结果

Tab.1 The Screening results of material in TBM hole

骨料粒径/mm	120~100	100~80	80~60	60~40	40~20	20~5	<5
分级筛余/kg	2.85	17.50	73.40	132.50	115.85	91.45	100.94
分级筛余/%	0.5	3.2	13.7	24.8	21.7	17.1	19
累计筛余/kg	534.49	531.64	514.14	440.74	308.24	192.39	100.94
累计筛余/%	100	99.5	96.3	82.6	57.8	36.1	19

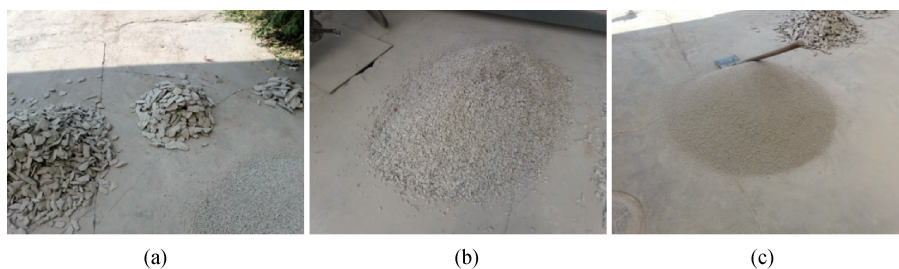


图 2 筛分处理的 TBM 洞挖料
Fig.2 The sieve treated TBM hole material

表 2 TBM 粗骨料级配

Tab.2 Gradation of TBM coarse aggregate

粒径/mm	80~60	60~40	40~20	20~5
分计/%	8.1	18	39.2	34.7
累计/%	100.0	91.9	73.9	34.7

1.4 TBM 洞控料性能分析

为了分析 TBM 洞控料对混凝土抗压强度的影响,需要分析 TBM 洞控料的岩性,以及压碎试验。此次 TBM 洞控料中的岩石属于片麻岩,不会引起碱-骨料反应,可以用于制作混凝土。其它测量信息如表 3 所示, TBM 洞控料粒径越大的骨料空隙率越大。这也从试验测量的角度反应了 TBM 洞控料中岩石颗粒的特征。

表 3 TBM 粗骨料表观密度及空隙率

Tab.3 Apparent density and void fraction of TBM coarse aggregate

粒径/mm	>40	40~20	20~10	10~5
表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 690	2 700	2 690	2 700
松散密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 100	1 200	1 300	1 410
紧密密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 270	1 360	1 460	1 560
松散空隙率/%	59	56	52	48
紧密空隙率/%	53	50	46	43

粗骨料的抗压强度应大于等于其成品混凝土抗压强度的 1.5 倍,工程上通常采用压碎指标来衡量粗骨料的强度。根据相关规范要求^[16],本次压碎试验取 TBM 洞控料粒径为 9.5~13.2 mm 的岩石进行压碎测试。每次取 3 000 g 岩石进行试验,共试验 3 次。试验结果显示 TBM 洞控料的压碎指标为 8.6%。本次 TBM 洞控料中的岩石为片麻岩,其压碎指标符合混凝土为 C35 以及 C40 到 C60 抗压强度等级使用的骨料要求。

2 试验设计

2.1 试验材料

(1)水泥:P·O 42.5。在标准养护条件下进行

养护,分别测试了该水泥 3 d 和 28 d 抗压强度和抗折强度。结果显示 3 d 标准养护条件下,抗折强度为 4.3 MPa,抗压强度为 22.2 MPa。28 d 标准养护下,抗折强度为 7.0 MPa,抗压强度为 50.6 MPa。

(2)水:试验室自来水,pH 值为 7 左右。

(3)粗骨料:经筛分处理的 TBM 洞控料,具体级配如表 2 所示。

(4)细骨料:天然砂,其相关数据如表 4 所示。

2.2 配合比设计及制作

TBM 出的岩石骨料趋于片状,在粒径及重量相同的条件下,TBM 骨料的颗粒数量远大于普通骨料颗粒的数量。根据相关研究^[14]证明,片状骨料的颗粒数项约为骨料颗粒数量的 1.85 倍左右。这就意味着在骨料最大粒径相同的条件下,TBM 骨料会更均匀地分布在混凝土中,使混凝土抗压强度大小更加稳定。少量超过 40 mm 的 TBM 骨料并不会破坏混凝土强度大小的稳定性,其抗压强度依然具有代表性。

基于上述考虑,本次试验中采用 150 mm×150 mm×150 mm 混凝土标准立方体试件,并将水胶比作为试验变量。混凝土抗压强度代表值以三个混凝土试件为一组进行测量,具体内容参照相关规范^[17]执行。采用试配方法确定水、水泥、砂、TBM 骨料的用量,采用目测的方法保证混凝土的和易性,具体 TBM 骨料混凝土配合比如表 5 所示。

2.3 抗压强度试验

为了缩短试验周期,不同配合比的混凝土一次制作 12 块,并将 TBM 混凝土试块随机分为 4 组,每组包括 3 个混凝土试块。同一批次混凝土抗压试块的抗压强度代表值由 4 组混凝土抗压强度代表值的均值表示。制作的 TBM 混凝土试块养护方法和混凝土抗压强度测试方法均按照相关规范^[18]来执行。

表 4 细骨料:砂

Tab.4 Fine aggregate: sand

粒径/mm	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	筛底
各级重量/g	14	41.5	30.5	146	188.5	58	21.5
分计/%	2.8	8.3	6.1	29.2	37.7	11.6	4.3
累计/%	100.0	97.2	88.9	82.8	53.6	15.9	4.3
细度模数				2.47			
含泥量/%				2.2			
坚固性/%				5			

表 5 TBM 混凝土配合比及抗压强度

Tab.5 Combination ratio and compression strength of TBM concrete

名称	水胶比	砂率 /%	设计容重 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	混凝土各组分含量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				抗压强度 /MPa
				水泥	水	砂	TBM 料	
试验组 1	0.55	31	2 440	336	185	595	1 324	29.2
	0.60	32	2 440	308	185	623	1 324	26.4
	0.65	33	2 440	285	185	650	1 320	24.1
	0.70	34	2 440	264	185	677	1 314	25.8
	0.75	35	2 440	247	185	703	1 305	18.4
试验组 2	0.55	33	2 420	309	170	641	1 300	29.3
	0.60	34	2 420	292	175	664	1 289	26.8
	0.65	35	2 420	269	175	692	1 284	24.2
	0.70	36	2 420	250	175	718	1 277	21.4
	0.75	37	2 420	233	175	744	1 268	19.2

3 试验结果及分析

3.1 TBM 混凝土抗压强度

标准养护条件下 28 d 龄期的试验组 1 和组 2 的 TBM 混凝土抗压强度试验结果如表 5 所示,其混凝土抗压强度随水胶比的变化如图 3 所示。除试验组 1 中 0.70 水胶的 TBM 混凝土抗压强度出现突增外,试验组 1 和组 2 中 TBM 混凝土抗压强度随水胶比的增大而减小。

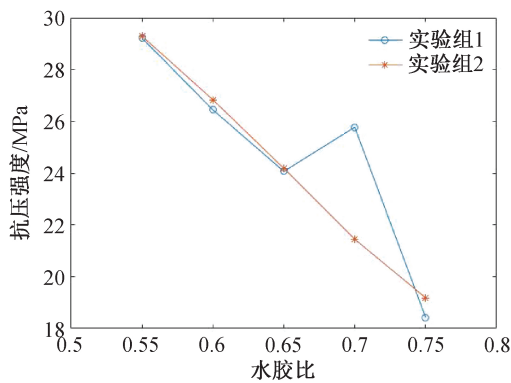


图 3 TBM 混凝土抗压强度

Fig.3 Compression strength of TBM concrete

引起试验组 1 中 0.70 水胶的 TBM 混凝土抗压强度突增的原因,可能是制作混凝土时造成 TBM 骨料在混凝土产生的不同空间分布。根据相关研究^[19],片状骨料在混凝土中趋向于水平排列,这种分布特点会导致混凝土各向异性的力学性能,并且当机械压力垂直于混凝土中片状骨料时测得的混凝土抗压强度较高。

测试混凝土抗压强度时,通常采用成型混凝土的侧面作为上下受压面。也就是说在混凝土抗压测试中 TBM 片状骨料在混凝土中于受压面易成

垂直状态和机械压力易成平行状态,见图 4(a)。此时骨料抵抗压力的作用较差,压力易绕过骨料形成断裂面。在小概率下片状骨料于受压面成平行状态和机械压力成垂直状态,见图 4(b)。评价 TBM 混凝土抗压强度时,采用较低的抗压强度值作为其混凝土抗压强度的代表值更为合理。

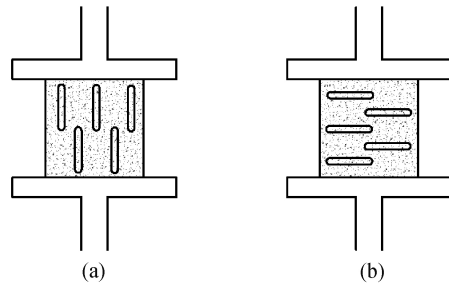


图 4 TBM 片状骨料在混凝土中的分布特点

Fig.4 Distribution characteristics of TBM flake aggregate in concrete

3.2 水胶比对 TBM 混凝土抗压强度的影响

根据规范^[17],当普通混凝土强度小于 C60 时,混凝土水胶比可按公式(1)进行计算:

$$W/B = \frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b} \quad (1)$$

式中:W/B 代表混凝土水胶比; α_a 、 α_b 代表回归系数,碎石可取 0.53、0.20,卵石可取 0.49、0.13; f_b 代表胶凝材料 28 d 胶砂抗压强度(MPa); $f_{cu,0}$ 代表混凝土配置强度。

以试验组 2 的 TBM 混凝土为例,根据式(1)计算在相同混凝土配置强度条件下,采用 TBM 骨料和采用碎石骨料相应的水胶比,结果如表 6 所示。可以看出在相同水胶比条件下,TBM 骨料降低了混凝土抗压强度。并且随着水胶比的增大,TBM 骨料对混凝土抗压强度的降低幅度影响越来越

表 6 不同骨料对应的水胶比

Tab.6 Water glue ratio corresponding to different aggregate

TBM 水胶比	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
碎石水胶比	0.91	1.00	1.10	1.25	1.40
水胶比差值	0.36	0.40	0.45	0.55	0.65

表 7 拟合函数信息

Tab.7 Information of fitting function

函数类型	多元相关系数 R^2	修正多元相关系数 R^2	A	B
$f(x) = A/x - B$	0.987 1	0.985 2	21.48	9.417
$f(x) = Ax + B$	0.997 0	0.996 6	-52.19	57.98

越大。这意味着配制相同强度的混凝土使用 TBM 骨料需要更小的水胶比,也就是需要更多的水泥。

将 TBM 混凝土的水胶比作为自变量 x , 并将其对应的抗压强度作为因变量 $f(x)$ 进行拟合具体函数关系为 $f(x) = A/x - B$ 。将试验组 1 和组 2 的数据作为整体进行拟合并排除异常点,其拟合结果如图 5 所示,具体参数如表 7 所示。

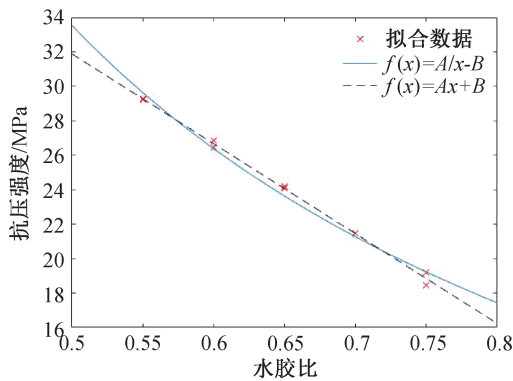


图 5 数据拟合结果

Fig.5 Data fitting results

图 5 中显示了两种拟合函数,其一是根据式(1)进行的函数拟合,其二是采用 Matlab 软件进行其它形式函数拟合时保留的最优拟合的函数。可以看出 TBM 混凝土的抗压强度及其水胶比之间的函数关系更符合 $f(x) = Ax + B$ 的函数形式。由此可知 TBM 混凝土的抗压强度及其水胶比之间成一次线性函数关系且为负相关。

3.3 级配对 TBM 混凝土抗压强度的影响

在相同水胶比条件下,尽管试验组 1 采用了更多的水泥,但是试验组 2 中 TBM 混凝土的抗压强度普遍大于试验组 1 中 TBM 混凝土的抗压强度。造成这一现象的原因很有可能是两组试验采用了不同的砂率造成的。根据相关研究^[4],Talbot 公式

可适用于不同骨料颗粒形状的最优级配,具体的 Talbot 级配公式如式(2)所示:

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \tag{2}$$

式中: P 代表通过筛径 d 的累计分数; D 代表级配的最大骨料粒径(必须于筛径 d 采用相同单位); n 代表骨料的形状系数。

根据相关研究^[4],对于完美的球形骨料,其形状系数宜取 $n = 0.5$ 。充分的试验显示,骨料的颗粒形状越不趋于球形,其骨料的形状系数 n 越小。工程上使用的普通碎石骨料,其骨料的形状系数 n 一般取 0.45。对于 TBM 骨料的片状结构,其骨料的形状系数 n 应取小于 0.45 的数值。分别采用 $n = 0.45$ 、 $n = 0.44$ 、 $n = 0.43$ 、……、 $n = 0.30$, 对比试验组 1、组 2 的级配以及 Talbot 最优级配曲线。可以发现当 $n \leq 0.40$ 时,试验组 2 更接近 Talbot 最优级配曲线,如图 6 所示。

4 结论

1) 在相同水胶比下, TBM 混凝土的抗压强度比普通碎石制作的普通混凝土的抗压强度低,并且随着水胶比的增大 TBM 混凝土的抗压强度下降幅度大于普通混凝土。也就是说使用 TBM 洞挖料制作混凝土时,需要减小水胶比(增加水泥用量)。

2) 在 0.55~0.75 的水胶比范围内,对 TBM 混凝土抗压强度和水胶比进行函数拟合。其结果显示 TBM 混凝土抗压强度和水胶比成一次函数关系且为负相关。

3) 良好的骨料级配可减少水泥用量,增加混凝土的抗压强度。当缺少骨料级配规范要求和相关经验时,可参考 Talbot 级配公式。依据试验组 1 和组 2 的 TBM 混凝土抗压强度进行分析, TBM 岩石作为混凝土骨料时 Talbot 公式中的骨料系数 n 应小于等于 0.4。

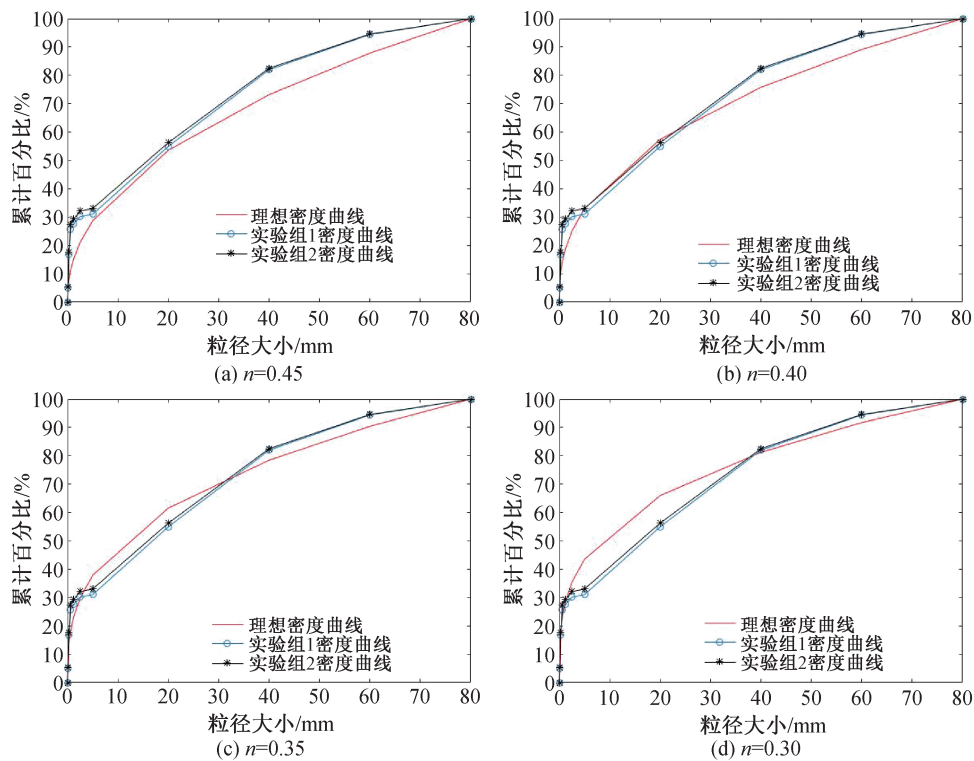


图6 骨料级配曲线

Fig.6 The curve of aggregate gradation

参考文献:

- [1]何小松.浅析 TBM 施工技术的优势[J].地质装备, 2010,11(2):35-37.
- [2]洪开荣.近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2017—2018 年)[J].隧道建设:中英文,2019,39(5):710-723.
- [3]郭陕云.我国隧道及地下工程的历史机遇、发展困局及若干建议[J].隧道建设:中英文,2019,39(10):1545-1552.
- [4]GERTSCH L, FJELD A, NILSEN B, et al. Use of TBM Muck as Construction Material[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000,15(4):379-402.
- [5]BURDIN J, MONIN N. The Management of Excavated Materials from the Lyon-Turin Rail Link Project[J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2009,2(5):652-662.
- [6]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.
- [7]TOKGÖZ N. Use of TBM Excavated Materials as Rock Filling Material in an Abandoned Quarry Pit Designed for Water Storage[J]. Engineering Geology, 2013,153:152-162.
- [8]唐毅,郑崇飞.以 TBM 掘进料为料源加工人工骨料的技术研究[J].四川水力发电,2010,29(S2):196-199,202.
- [9]赵志芳,吴晓东. TBM 开挖料用作混凝土骨料的试验研究及应用[J].云南水力发电,2013,29(3):9-11,46.
- [10]班克成.骨料中的针片状、石粉含量对自密实混凝土性能的影响[J].四川建材,2017,43(01):22-24.
- [11]王兆云.尼克水电站骨料针片状颗粒对混凝土性能的影响[J].资源环境与工程,2014,28(04):470-472.
- [12]宋彩娜.骨料针片状对水泥混凝土性能影响的试验研究[J].北方交通,2013(11):5-7.
- [13]HEYDARI S, HAMIDI J K, MONJEZI M, et al. An investigation of the Relationship between Muck Geometry, TBM Performance, and Operational Parameters: A Case study in Golab II Water Transfer Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,88:73-86.
- [14]王雨利,管学茂,潘启东,等.粗骨料颗粒级配混凝土强度的影响[J].焦作工学院学报:自然科学版,2004(03):213-215.
- [15]余红发.针片状骨料颗粒的特征[C]//中国硅酸盐学会.吴中伟院士从事科教工作六十年学术讨论会论文集.2004:229-231.
- [16]JGJ52-2006,普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S].
- [17]JGJ55-2011,普通混凝土配合比设计规程[S].
- [18]GB/T50081-2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [19]李良茂.针片状骨料对混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,1990(01):2-5.

(责任编辑 王利君)