

基于集料破碎面模型的母岩分档破碎

张宜洛,邵长柱,孟浩,孙运臣,杨玉晶

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:针对母岩破碎前的处理工艺现状,根据母岩破碎后新鲜破碎面的变化规律,并考虑不同颗粒形状的差异性,通过建立数学模型,从理论上证明对母岩材料进行分档破碎的可行性,并根据算例得出不良母岩分档筛分破碎的筛孔控制范围。研究表明:实际生产中,可据此建立相应的破碎控制系统,得出各档集料破碎前后的要求粒径和筛孔,从而有效提高路用集料生产质量,同时达到资源利用最大化、能源利用最小化的目的。

关键词:道路工程;集料;母岩;破碎面;分档破碎

中图分类号:U416.214

文献标志码:A

Grading-broken of parent rock based on aggregate broken surface model

ZHANG Yi-luo, SHAO Chang-zhu, MENG Hao, SUN Yun-chen, YANG Yu-jing

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: According to the treatment processing status of the parent rock before its broken in producing aggregates, the change rule of fresh broken surfaces after the parent rock broken, and the differences of the different particle shapes, a mathematical model method was adopted to prove the feasibility of grading-broken theoretically, the control scope of screen hole size for undesirable rocks in grading-broken was obtained by an example. The results show that the broken control system can be developed by the above model to get the needed particle size and screen hole size before and after the crushing in practice, so the production quality of the aggregates can be improved, and the purpose of resource utilization maximization and energy consumption minimum is achieved at the same time. 4 tabs, 2 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; aggregate; parent rock; broken surface; grading-broken

0 引言

在实际工程中,为降低工程成本及方便施工,集料一般就近、就地取材,从而导致母岩质量控制的难度加大,影响集料的生产质量。而用于路面各层次的石灰岩、卵砾石、玄武岩等母岩的力学强度一般较

好,较容易达到规范指标。因此,相对于集料的力学性能,其粘附性对路用性能的影响更突出。集料粘附性主要与集料含泥量、集料新鲜破碎面比例及母岩岩性等有关。一方面,碎石表面的含泥量对碎石与沥青的粘附性有显著影响,含泥量的增加会使混合料的水敏感性增加,降低混合料的抗车辙能力。

对于集料中含泥量的控制,虽然也采取了包括场地硬化等在内的一系列措施,但控制的根本在源头,即集料加工时控制碎石土的混入^[1-4]。另一方面,目前对于含有较多碎石土的母岩,解决办法一般是在破碎母岩之前给定一个建议数值的筛孔,对母岩进行“预筛分”,这样能在一定程度上降低母岩中碎石土含量,但效果欠佳。因为这种笼统的预筛分很难在 2 个方面达到平衡:一是保证工程质量,确保不良碎石土全部筛除;二是节约资源,确保良好碎石不被筛除。如果能在母岩破碎之前对其进行适当分档处理,使“大母岩产大集料,小母岩产小集料”,有效控制碎石土的混入,不但能够大幅提高母岩利用率,提高施工单位生产积极性,保证生产质量,而且能够提高集料的使用性能。目前,国内外对于母岩前期分档破碎方面的研究尚处空白。为此,本文通过建立数学理论模型,对破碎前母岩的规格进行规范,从而在理论上确定碎石场母岩预筛分的筛孔尺寸,并以集料新产生破碎面面积与总表面面积的比值为依据,对不同粒径要求的母岩规格进行分级处理,不再笼统的对母岩进行单一规格的预筛。

1 模型的建立

1.1 模型的基本框架

主要考虑母岩在破碎前后表面积的变化,包括新产生的破碎面面积和原表面面积 2 部分。由于新产生的破碎面与原表面相比具有更优越的路用性能,因此,理论上应使新产生的破碎面面积占母岩总面积的比值尽量大。

假设母岩破碎前的总表面积为 $A(\text{cm}^2)$,破碎后的总表面积增大为 $B(\text{cm}^2)$,那么新产生的破碎面面积 $C=B-A$ 。破碎后集料新鲜破碎面面积占总面积的比率 α 为

$$\alpha = \frac{C}{B} = \frac{B-A}{B} = (1 - \frac{A}{B}) \times 100\% \quad (1)$$

从式(1)可看出,在破碎前后石料体积(或质量)保持不变的条件下,破碎前母岩表面积越小,破碎后表面积越大,则 α 值越大,相应的石料加工质量越高。由比表面积 S_A (单位体积或单位质量颗粒的总表面积,为方便计算,本文中定义为面积与体积的比值,单位为 cm^{-1})的定义知,由 S_A 较小(颗粒较大)的母岩破碎成 S_A 相对较大(颗粒较小)的集料时,其工程性质较优越。

根据破碎前后体积一定而面积变化的规律,可以计算出各种不同形状、不同大小母岩破碎为不同

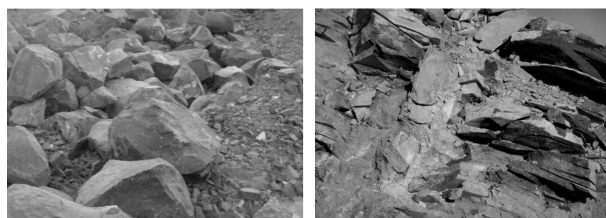
粒级集料后的 α 值,结合大量实地数据对该值进行系统研究,以此作为集料破碎控制的重要指标。

1.2 模型的建立步骤

1.2.1 确定母岩在一定块度范围内的形状特征

母岩块度范围,可以用确定的质量范围来衡量。参考集料筛孔划分方法,以 $0.5 \times 1.5^n \text{ kg}$ 的数量级划分该质量范围,比如可划分为 $0 \sim 0.15(0.5 \times 1.5^{-3})\text{kg}$, $0.15 \sim 0.22(0.5 \times 1.5^{-2})\text{kg}$, \dots , $8.5 \sim 12.8(0.5 \times 1.5^8)\text{kg}$ 等。其中, n 为系数。显然,对于某一确定粒级的集料,如某个质量范围的母岩满足要求,则该质量范围以上的各块度母岩均能满足要求。

母岩的颗粒形状与多方面因素有关,比如岩石岩性、拟开山体的地质构造、局部的气候特点等,如图 1 所示。这就导致其形状很难用单一标准来衡量,可以用某一块度范围的母岩 30 块(具体块数可根据实际情况确定,以能代表性地反应各块度范围的 S_A 值为准)进行计算机扫描,得出其 S_A 值。



(a) 近似正立方体的石灰岩

(b) 片状玄武岩

图 1 不同地质条件下的母岩形状

1.2.2 确定母岩破碎后的形状特征

破碎后各档集料的形状特征较天然母岩的规律性要好一些,它的影响因素除岩性外,很大程度上还受加工工艺的影响,合理、稳定的破碎工艺能生产出较高比例颗粒接近规格立方体的集料。因此,集料的 S_A 值可以用理想形状近似得出,当然,较为精确的方法还是用计算机扫描完成。考虑到集料生产破碎的变异性,建议一定时间重新测量一次。

面层所需集料粒级有多种,如 $0 \sim 3 \text{ mm}$ 、 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 、 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 、 $40 \sim 75 \text{ mm}$ 等。 $0 \sim 3 \text{ mm}$ 档集料,由于粒级较小,对所需母岩的规格控制无实际意义,本文未予考虑。建议以 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 及 $40 \sim 60 \text{ mm}$ 四档集料为特征粒径进行对比计算。

1.2.3 破碎前后表面积的变化

(1) 破碎前

$$V = \frac{m_0 \times 1.25}{\rho_a} \quad (2)$$

$$A=VS_{Ai}=\frac{m_0}{\rho_a}S_{Ai}\times1.25\tag{3}$$

式中: V 为单颗粒母岩平均体积(cm^3); m_0 为各母岩颗粒质量分级的前值,则各档母岩的平均质量为 $1.25m_0(\text{kg})$; ρ_a 为表观密度(g/cm^3); A 为母岩破碎前的总表面积(cm^2); S_{Ai} 为各质量分级母岩对应的比表面积(cm^{-1})。

(2) 破碎后

$$n_i=\frac{V'}{V'_i}=\frac{V}{V'_i}\tag{4}$$

$$B=\sum_{i=1}^nn_iS'_A\tag{5}$$

式中: n_i 为单颗粒母岩破碎后各形状或各粒径的平均粒料个数; V' 为破碎后各粒级单颗粒总体积(cm^3); V'_i 为破碎后各粒级单颗粒体积(cm^3); S'_A 为破碎后各形状或各粒径表面积(cm^2)。

2 模型的算例

根据以上模型进行试算,如事先已经建立起各块度母岩、各粒级集料的平均 S_{Ai} 值,则计算较为方便。本文由于条件所限,各粒级母岩及集料的比表面积暂由正多面体近似代替。

模型中以母岩的 m_0 为变量,计算其破碎后各档集料的 α 值。根据 α 值大小,可以得出满足相应规格集料要求的母岩的 m_0 值,进而得出进行母岩分档破碎的筛孔大小。

母岩颗粒形状分别假定为正六、正八面体 2 种形状,考虑到不同母岩颗粒形状对计算结果影响的差异性,2 种形状分别计算,并分析其差异性。设母岩的平均表观密度为 $2.70\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(1) 正六面体模型。母岩在 $m_0\sim1.5m_0\text{ kg}$ 质量分级的单颗粒平均体积 $V=462.96m_0$,相应的平均总表面积 $S=359.07\text{ }m_0^{2/3}$ 。

(2) 正八面体模型。母岩在 $m_0\sim1.5m_0\text{ kg}$ 质量分级的单颗粒平均体积 $V=462.96m_0$,相应的平均总表面积 $S=342.26\text{ }m_0^{2/3}$ 。

表 3 各档集料的破碎面比率 α 值与单块母岩颗粒平均质量 ($1.25m_0$) 的关系

集料粒径/mm	单颗粒母岩破碎后平均颗粒数/个	破碎后总表面积/ cm^2	α 值(正六面体母岩)/%	α 值(正八面体母岩)/%
5~10	$2\,004.76m_0$	$4\,320.13m_0^{-1/3}$	$(1-0.083m_0^{-1/3})\times100$	$(1-0.079m_0^{-1/3})\times100$
10~20	$250.59m_0$	$2\,160.07m_0^{-1/3}$	$(1-0.166m_0^{-1/3})\times100$	$(1-0.158m_0^{-1/3})\times100$
20~40	$31.32m_0$	$1\,080.03m_0^{-1/3}$	$(1-0.332m_0^{-1/3})\times100$	$(1-0.317m_0^{-1/3})\times100$
40~60	$6.77m_0$	$648.02m_0^{-1/3}$	$(1-0.554m_0^{-1/3})\times100$	$(1-0.528m_0^{-1/3})\times100$

对于集料,考虑 $5\sim10\text{ mm}$ 、 $10\sim20\text{ mm}$ 、 $20\sim40\text{ mm}$ 及 $40\sim60\text{ mm}$ 四档较为典型的集料,本文近似认为其颗粒形状大体以正四、六、八面体及球体 4 种多面体为主^[5-6]。4 种正多面体的性质见表 1。

表 1 4 种正多面体的部分性质

形状	长度与高度之比	面积	体积	面积与体积之比	比表面积 S_A
正四面体	$2.50:1$	$\sqrt{3}a^2$	$\frac{\sqrt{2}}{12}a^3$	$6\sqrt{6}a^{-1}$	7.206
正六面体	$1.73:1$	$6a^2$	a^3	$6a^{-1}$	6.000
正八面体	$1.41:1$	$2\sqrt{3}a^2$	$\frac{\sqrt{2}}{3}6a^3$	$3\sqrt{6}a^{-1}$	5.719
球体	$1.00:1$	$4\pi R^2$	$\frac{4}{3}\pi R^3$	$3\pi R^{-1}$	4.836

注: a 为边长; R 为半径。

从表 1 可以看出,随着面数的增加,多面体的单位体积表面积越来越小。4 种正多面体中,正四面体的形状非常接近针片状,同时其单位体积表面积最大,为最不利情况。根据集料相关规范,集料针片状含量(质量分数)应该在 15%以内(高速公路及一级公路表面层)^[7-8]。因此将正四面体作为针片状含量控制指标,占 15%,其余 3 种单体各占 28.33%。条件允许时,各粒径集料的比表面积值应用计算机扫描精确得出。

表 2 各档集料的平均单颗粒体积和面积值

粒径范围/mm	单颗粒体积平均值/ cm^3	单颗粒面积平均值/ cm^2	平均比表面积值/ cm^{-1}
5~10	0.246	2.155	10.248
10~20	1.967	8.620	5.124
20~40	15.737	34.479	2.562
40~60	72.858	95.775	1.537

从表 2 可以看出,用 4 种多面体形状合成的各档集料,随着粒径的增大,平均比表面积值显著减小。

由以上数据可得各档集料的破碎面比率 α 值与单块母岩颗粒平均质量($1.25m_0$)的关系,见表 3。

由表 3 可得到 α 值与 m_0 值对应关系,当 n 值、 m_0 值取不同数值时,即可进一步得到对应的 α 值,见下页表 4。

表 4 不同母岩颗粒对应的 α 值

n	m_0	不同档的母岩颗粒粒径(mm)对应的 α 值/%							
		5~10		10~20		20~40		40~60	
		正六面体	正八面体	正六面体	正八面体	正六面体	正八面体	正六面体	正八面体
-4	0.10	82.12	82.98	64.19	65.86	28.47	31.70		
-3	0.15	84.38	85.13	68.71	70.18	37.52	40.34		0.63
-2	0.22	86.25	86.91	72.46	73.75	45.00	47.49	8.23	12.54
-1	0.33	87.99	88.57	75.95	77.07	51.96	54.13	19.83	23.59
0	0.50	89.54	90.05	79.06	80.04	58.17	60.06	30.20	33.48
1	0.75	90.86	91.30	81.70	82.56	63.46	65.11	39.02	41.89
2	1.13	92.03	92.42	84.04	84.79	68.13	69.57	46.81	49.31
3	1.69	93.05	93.38	86.04	86.70	72.18	73.44	53.58	55.76

母岩颗粒质量 m_0 的 n 值与破碎面比率 α 的对应关系,如图 2 所示。

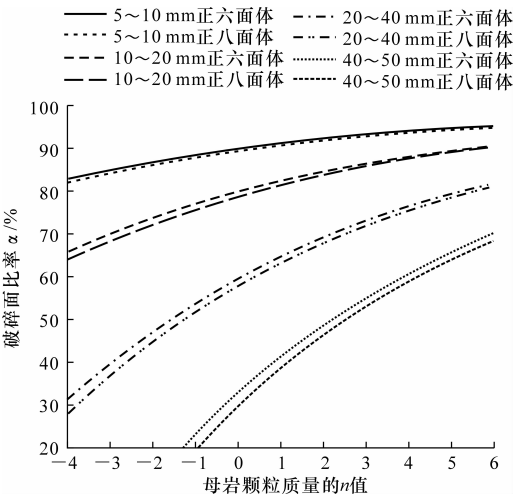


图 2 n 值与 α 值的对应关系

通过对以上算例的计算及图表可以得如下结论。

- (1)假设母岩颗粒分别为正六面体、正八面体时,其计算结果差异较小(2%以内),说明母岩颗粒形状对新鲜破碎面积的增加率影响不大(母岩块度对其影响较大),单位体积面积较大的正八面体比正六面体稍好。
- (2)假设母岩颗粒粒径一定时,5~10 mm、10~20 mm、20~40 mm 及 40~60 mm 四档集料的破碎面比例差异明显,如果笼统或折中地规定某一粒径之上的母岩为合格,不仅会产生大量的浪费,而且难以保证较大颗粒集料的破碎面比例。
- (3)当限定破碎面比例 α 值后,可以方便地读取各不同粒径集料所要求的母岩大小,从而提出母岩破碎前控制筛孔,尤其对于 3~20 mm 集料。
- 比如限定 $\alpha \geq 70\%$ 合格时,相应 3~20 mm 集料的 n 值取-3.2 及以上时(相应 m_0 值为 0.14 kg,母岩筛孔为 37 mm),5~10 mm、10~20 mm 两档集

- 料在破碎面比例的要求上即满足要求,而对 20~40 mm 等较大粒径的集料则需要更大的母岩规格(n 值取 2 及以上,相应 m_0 值为 1.12 kg,母岩筛孔为 75 mm)。
- 如限定 $\alpha \geq 80\%$ 合格时,相应 3~20 mm 集料 n 值取 0.2 及以上时(相应 m_0 值为 0.54 kg,母岩筛孔为 58 mm),5~10 mm、10~20 mm 两档集料在破碎面比例的要求上即满足要求,而对 20~40 mm 等较大粒径的集料则需要更大的母岩规格(n 值取 5 以上,相应 m_0 值为 3.8 kg,母岩筛孔为 112 mm)。
- (4)根据不同粒径集料对母岩规格的不同限定,可以在母岩破碎前进行两档筛分,比如,由上一点假设值为 80% 以上时可对母岩进行双层筛分:58 mm 以下为不良砂土,应予以剔除;58~112 mm 筛孔间母岩可用于破碎 20 mm 以下集料;112 mm 筛孔以上母岩可用于破碎 20 mm 以上集料。
- 3 结 语
- (1)在路面工程中使用母岩时,对母岩不良风化土,尤其是泥土含量较高时,必须予以剔除。
- (2)破碎前母岩表面积越小,破碎后表面积越大,则 α 值越大,相应的石料加工质量越高。即由 S_A 值较小(颗粒较大)的母岩破碎成 S_A 值相对较大(粒径较小)的集料时,其工程性质较优越。
- (3)对母岩进行笼统剔除不仅造成巨大浪费而且效果欠佳,建议对母岩进行区别剔除,可以保障各档集料质量并能大幅提高母岩利用率,大量节省电能消耗。
- (4)碎石场可依据本原理对母岩进行初期分档处理,可在进料口设置震筛,并将各档母岩分别破碎,提高母岩利用率。

欠缺,特殊地区公路防洪标准考虑不全面等不足。

(2)提出了基于洪水风险管理理论的公路防洪标准,对公路防洪标准的修订有一定的参考价值。

参考文献:

References:

[1] 程光明. 中外防洪标准与防洪措施[J]. 水利技术监督,1998,6(5):10-12.
CHENG Guang-ming. The standard and prevention measures for flood control[J]. Technical Supervision in Water Resources,1998,6(5):10-12.

[2] 李家春,董卫卫,马保成. 小桥涵水毁形式分析及防治措施[J]. 西部交通科技,2008(2):1-4.
LI Jia-chun, DONG Wei-wei, MA Bao-cheng. The washout forms of small bridges and culverts and their prevention measures[J]. Western China Communications Science & Technology,2008(2): 1-4.

[3] 马保成. 沿河公路路基水毁灾害评价及防治措施研究 [D]. 西安:长安大学,2008.

[4] 刘春焕. 沿河公路水毁识别技术研究[D]. 西安:长安大学,2009.

(上接第 10 页)

(5)对于集料新鲜破碎面比率 α 的限定值需以大量实地数据及应用经验为支撑,有待进一步研究并完善,为该模型方便指导生产提供准确依据。

参考文献:

References:

[1] 廖志高. 采用二级破碎的沥青面层集料加工与质量控制[J]. 筑路机械与施工机械化,2006,23(10):32-35.
LIAO Zhi-gao. Asphalt pavement aggregate production and quality control with two-phase crashing process[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2006,23(10):32-35.

[2] 赵春花,祝小龙. 含泥量对沥青与粗集料黏附性的影响[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(增):933-936.
ZHAO Chun-hua, ZHU Xiao-long. Influence of clay dosage on the adhesion of asphalt and coarse aggregate [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2008,27(S):933-936.

[5] 高 婷. 公路洪水灾害应急管理体系研究[D]. 西安:长安大学,2010.

[6] 长安大学,陕西省交通厅,四川省交通厅. 山区公路排水评定方法与抗水灾评估指标的研究(调查报告一):山区沿河公路水毁现场调查分析研究报告[R]. 西安:长安大学,2006.

[7] 田伟平,李家春,马保成. 公路洪水灾害防治使用手册 [M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[8] 李原圆. 防洪若干重大问题研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[9] GB 50201—94,防洪标准[S].

[10] JTG C30—2002,公路工程水文勘测设计规范[S].

[11] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].

[12] JTG TD65—04—2007,公路涵洞设计细则[S].

[13] JTG D30—2004,公路路基设计规范[S].

[14] JTG B01—2003,公路工程技术标准[S].

[15] 王开元. 浅谈德法荷三国防洪减灾的主要做法和经验 [J]. 人民珠江,2001(1):33-35.
WANG Kai-yuan. The main procedure and the experience about flood of Germany, France and Holland[J]. Pearl River,2001(1):33-35.

[3] 沈金安. 沥青与沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[4] 何宜典,郭 佩. 用于微表处的集料性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(3):53-56.
HE Yi-dian, GUO Pei. Research on aggregate performance of micro-surfacing [J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2010,27(3):53-56.

[5] 杨 威,程 波. 分形理论在沥青混合料级配设计中的应用[J]. 石油沥青,2009,23(5):26-29.
YANG Wei, CHENG Bo. Application of the fractal theory to gradation design [J]. Petroleum Asphalt, 2009,23(5):26-29.

[6] 杨 威. 基于分形理论的集料破碎规律研究[J]. 公路与汽运,2009,315(6):77-79.
YANG Wei. Regularity of the broken aggregate based on fractal theory[J]. Highways & Automotive Applications,2009,315(6):77-79.

[7] JTJ 052—2000,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[8] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].