

基于灰色关联分析的矿料级配骨架强度研究

Evaluation of Skeleton Strength in Aggregate Gradation Using Grey Relational Analysis

马小平¹, 董海东^{2,3}, 刘 栋^{2,3}, 董冠一^{4,5}, 蔡燕霞^{4,5}

- (1. 河北工程大学, 邯郸 056000; 2. 浙江顺畅高等级公路养护有限公司, 杭州 310000;
3. 公路数智养护浙江省工程研究中心, 杭州 310000; 4. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088;
5. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为了分析各粒径集料对骨架强度的影响和承载比的灰色关联度。采用逐级填充理论和承载比试验方法确定最优骨架的集料掺配比和 CBR 值, 运用 MATLAB 软件计算各粒径集料掺配比对承载比的灰色关联度。试验结果表明: 一级填充矿料骨架 CBR 值和矿料密度均出现两个峰值, 峰值点处 CA1:CA2 的比例分别为 6:4 和 3:7, 此时骨架结构承载能力较优; 二级填充 CA12:CA3=9:1 时 CBR 值最大, 密度最小, 即各集料填充比例为 CA1:CA2:CA3=54:36:10 时可形成最稳定的骨架结构; 各粒径集料对承载比关联度最大为 CA1, CA2 次之, CA3 最小, 即 CA1 构成最佳骨架结构, 承担主要承载力作用, 使沥青混合料在荷载作用下能保持稳定。

关键词: 矿料级配; MATLAB; 承载比; 灰色关联度; 骨架强度

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2025)03-0019-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.004

MA Xiaoping¹, DONG Haidong^{2,3}, LIU Dong^{2,3}, DONG Guanyi^{4,5}, CAI Yanxia^{4,5}

- (1. Hebei University of Engineering, Handan 056000, China; 2. Zhejiang Smooth High Level Highway Maintenance Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Zhejiang Provincial Engineering Research Center for Digital and Smart Maintenance of Highway, Hangzhou 310000, China;
4. Zhong Lu Gao Ke (BeiJing) Road Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;
5. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to analyze the effect of aggregate of each particle size on the strength of the skeleton and the grey correlation of the bearing ratio. The aggregate mixing ratio and CBR value of the optimal skeleton were determined by the stepwise filling theory and the bearing ratio test method, and the grey correlation degree of the aggregate mixing ratio of each particle size was calculated by Matlab software. The test results show that there are two peaks in the CBR value and density of the first-stage filled ore framework, and the ratio of CA1:CA2 at the peak point is 6:4 and 3:7, respectively, and the bearing capacity of

材料科学

the skeleton structure is better. When the secondary filling CA12 : CA3 = 9 : 1 has the highest CBR value and the smallest density, that is, the most stable skeleton structure can be formed when the filling ratio of each aggregate is CA1 : CA2 : CA3 = 54 : 36 : 10. The correlation degree of each particle size aggregate to the bearing ratio is the largest, followed by CA2, and CA3 is the smallest, that is, CA1 constitutes the best skeleton structure and bears the main bearing capacity, so that the asphalt mixture can remain stable under the load.

Key words: mineral aggregate gradation; matlab; bearing ratio; gray correlation degree; skeleton strength

0 引言

随着我国高速公路建设的快速发展,现代化路网体系已基本实现全域覆盖。在长期服役过程中,沥青路面结构稳定性不足,易出现车辙、坑槽和松散等路面病害,路面寿命普遍较低和养护成本偏高等问题^[1-2]。

在高速公路建设中,对路面结构稳定性,抗车辙能力等关键性指标提出更高要求,具备优异路用性能的骨架沥青混合料已成为高性能路面的首选材料。汪海年等^[3]通过研究粗集料形状及其含量对骨架结构的影响,表明立方体状粗集料能构成良好的稳定骨架结构;祝凤丹^[4]提出骨架稳定是在合理的初始接触点和倾角值的情况下形成稳定的骨架结构,初始倾角越小,混合料的动稳定度就越高;Cai等^[5]通过数字图像处理技术对沥青混合料的骨架形成过程进行研究,表明细集料颗粒的连续混合,混合料的空隙率降低,稳定性增加;Jin等^[6]从骨架演变形态的角度来预测混合料的稳定性,结果表明基于荷载传递路径来分析得到力链,以此来确定骨架;刘国强等^[7-8]通过力链理论建立力链性能与级配的关系,从而得到骨架中各集料的参与情况,以及混合料试件在不同压实阶段下的宏观性能,可知沥青混合料在压实过程中的稳定性表现良好;刘焕娇^[9]对颗粒集料散体体积的骨架特性进行研究,结果表明骨架强度能有效的提高沥青混合料的强度、抗车辙能力和抗永久变形能力;彩雷洲等^[10]结合数字图像处理技术分析不同压实功下沥青混合料的骨架特征,混合料骨架特征不衰减的压实功是不超过传统压实功的1.5倍;李微等^[11]用内摩擦角评价骨架强度的稳定性,并给出了薄表层沥青混合料强骨架粗集料的推荐配比;顾兴宇等^[12]采用贯入阻力试验评价沥青混合料的骨架强度,结果表明骨架破坏时的最大贯入压力能真实的评价沥青混合料的骨架强度;Ding等^[13-15]研究表明集料骨架的性能均匀性对混合料的

性能有显著影响,可以通过控制粒组含量来调整级配增强骨架强度,以此改善沥青混合料的路用性能。

沥青混合料的骨架结构直接影响路面抗车辙、抗变形能力及使用寿命。传统设计方法常因集料粒径协同作用不明确,导致骨架松散或密实度不足,引发路面早期损坏。为进一步分析不同粒径集料对骨架强度的影响规律,以优化级配设计,解决骨架稳定性不足的工程痛点,提升路面耐久性。通过逐级填充理论和承载比试验方法确定集料掺配比及CBR值,并采用MATLAB软件对各档集料掺量与承载比强度进行灰色关联度分析,得到骨架强度与各集料掺配比之间的关系,提出最优骨架时各档集料掺量,为沥青混合料骨架设计提供理论依据。

1 试验方案

为深入研究次一级粒径对上二级粒径所构成的混合料密度与力学性能的影响。增加7.2 mm筛孔,将4.75~9.5 mm粒径集料分为4.75~7.2、7.2~9.5 mm两档。应用逐级填充理论,将较低一级的粒径CA2(4.75~7.2 mm)以不同质量比填充至CA1(7.2~9.5 mm)中进行承载比试验,得出承载比CBR值。选取密度与承载比值CBR较优的比例所组成的CA12混合料,填入次一级粒径CA3集料,运用同样的方法得出承载比CBR值,最终选出骨架强度最优值时CA1、CA2、CA3三档集料之间掺配比。

以集料的承载比试验结果CBR值为参考数列,CA1、CA2、CA3的掺量为比较数列,运用MATLAB进行关联度计算。

2 骨料承载比灰色关联度分析

2.1 一级填充试验

将7.2~9.5 mm(CA1)、4.75~7.2 mm(CA2)两个粒径的集料,按比例掺配进行集料承载比试验。集料承载比试验以贯入量为5 mm承载比作为确定集

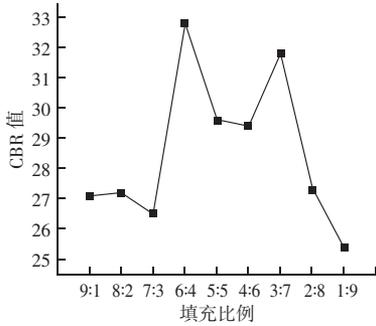


图1 一级填充矿料骨架 CBR 值

Fig. 1 Grade 1 filler aggregate skeleton CBR value

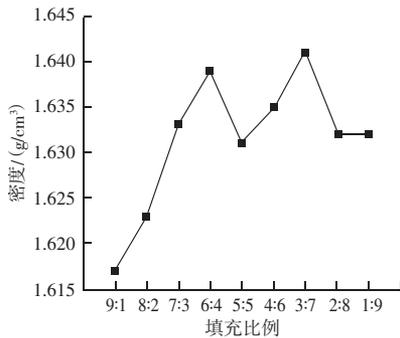


图2 一级填充矿料密度值

Fig. 2 Grade 1 filler aggregate packed density

料掺配比例的主要参考依据。结果如图 1~2 所示。

在矿料骨架 CBR 值和矿料密度试验中均出现两个峰值，一级掺配 CA1 : CA2 的比例分别是 6 : 4 和 3 : 7，此时形成的骨架结构承载能力更强。在峰值 1 时，CA1 集料占比较大，构成了混合料的主骨架，提供主要承载力，CA2 集料起填充效果。随着填充过程的不断进行，CA2 占比也逐渐升高，混合料开始发生干涉现象，表现为矿料承载比和密度同时下降。混合料中 CA2 粒径集料大于 CA1 粒径集料时，粒径之间的干涉达到最大值，同时承载比值和密度降到最低。当 CA1 : CA2 = 3 : 7 时，CA2 粒径集料成为了提供承载力的主体，CA1 粒径集料起着填充效果，密度和承载比再次达到峰值。根据以上试验结果，为了避免 CA1 粒径集料与 CA2 粒径集料之间出现干涉现象，造成混合料的性能降低，分别选取两个峰值时 CA1 与 CA2 的比例，混合均匀后作为二级填充的 CA12 粗集料。

2.2 二级填充试验

2.2.1 峰值点 1 二级填充试验

以密度和承载比值达到最佳为基础，将 CA1 (7.2~9.5 mm) : CA2 (4.75~7.2 mm) 按照 6 : 4 的

比例进行掺配作为 CA12 型集料，将 CA12 与 CA3 (2.36~4.75 mm) 集料按照不同比例进行掺配，记录贯入量为 5 mm 承载比。峰值点 1 二级填充试验结果如图 3~4 所示。

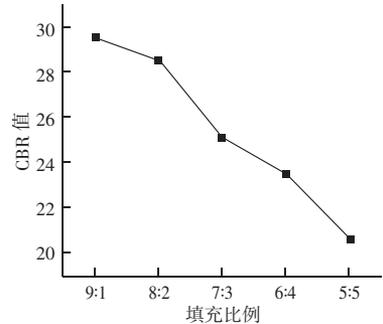


图3 峰值点 1 二级填充矿料骨架 CBR 值

Fig. 3 CBR value of the secondary filled ore skeleton at peak point 1

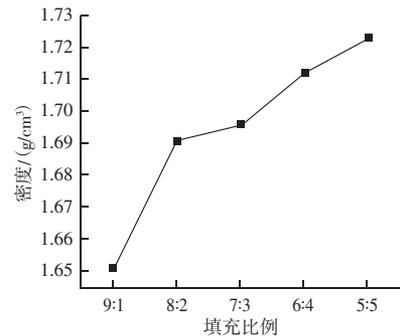


图4 峰值点 1 二级填充矿料密度值

Fig. 4 Peak point 1 secondary fill ore density value

以一级填充 CA1 : CA2 = 6 : 4 与 CA3 二级填充得 CA12 : CA3 = 9 : 1 时 CBR 值最大，密度最小，混合料的承载比和密度较为理想。集料填充的相当紧密，集料骨架强度达到峰值。随着 CA3 粒径集料继续填充，发生干涉现象使得混合料骨架遭到破坏，导致承载比的降低。因此，说明 CA12 : CA3 = 9 : 1 时所形成的骨架结构承载能力更强。

2.2.2 峰值点 2 二级填充试验

将 CA1 (7.2~9.5 mm) : CA2 (4.75~7.2 mm) 按照 3 : 7 的比例进行掺配作为 CA12 型集料，将 CA12 与 CA3 集料按照不同比例进行掺配，采用捣实方法，记录其 5 mm 承载比。峰值点 2 二级填充试验结果如图 5~6 所示。

二级掺配 CA12 : CA3 以 9 : 1、8 : 2、7 : 3、6 : 4 比例，测得各掺配比贯入量为 5.0 mm 承载比均值分别为 23.9、22.5、20.4、20.8。随着 CA12 占比逐渐减小，干涉现象增大，对应的承载比也随之减小，

材料科学

密度则逐渐增大。因此知 CA12:CA3 为 9:1 时混合料的承载比值与密度较为理想,内部骨架结构较为稳定,骨架强度最佳。

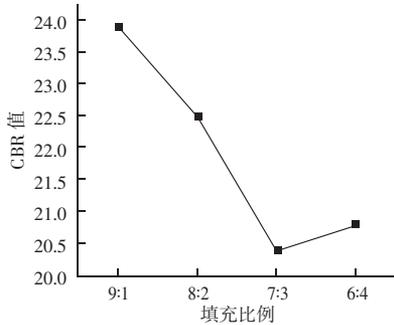


图5 峰值点2二级填充矿料骨架 CBR 值

Fig. 5 CBR value of the secondary filled ore skeleton at peak point 2

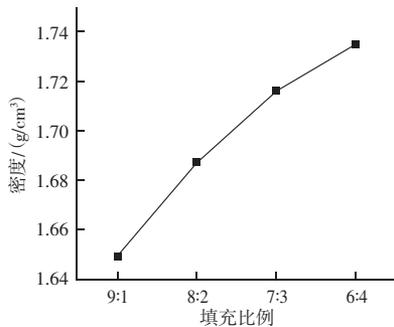


图6 峰值点2二级填充矿料密度值

Fig. 6 Peak point 2 secondary fill ore density value

2.3 各集料承载比灰色关联分析

根据承载比试验得到的掺配比和 CBR 值,选取集料的承载比试验结果 CBR 值为参考数列,选取粗集料一级掺配、二级掺配试验数据进行对承载比计算关联度,CA1、CA2、CA3 的掺量为比较数列,用 3 个比较数列对 1 个参考数列进行关联度计算,在 MATLAB 中输入试验所得结果承载比值与各粒径集料掺配比进行计算,得出各粒径集料对承载比值的相关联程度值,灰色关联度计算结果见表 1。

表1 各粒径集料对承载比值的相关联程度值

Table 1 The correlation degree value of the bearing ratio of each particle size aggregate

研究对象	关联度值		
	CA1	CA2	CA3
承载比	0.7102	0.6780	0.6368

通过 MATLAB 计算关联度结果可知,在矿料骨架中各档集料承受荷载的强度依次为 CA1、CA2、CA3,表现为 CA1 对承载比的关联度最大,CA2 次之,CA3 最小。进一步验证了粒径大的集料在骨架形成后会起着主要的承载力作用,次一级的填充粒

径集料在不发生干涉现象的情况下能够充分地协助主骨架一同承压。

3 结论

通过逐级填充理论和承载比试验方法得到骨架的集料掺配比和 CBR 值,以 MATLAB 软件计算各粒径集料掺配比对承载比的灰色关联度,得到以下结论:

(1) 一级填充矿料的承载比值与密度均出现两个峰值,此时峰值点 1 与峰值点 2 的 CA1:CA2 的比例分别是 6:4 和 3:7,两者都达到最佳填充效果,形成的骨架结构承载能力最佳。

(2) 一级填充时且无干涉现象时,混合矿料的承载比值与密度变化规律基本一致,形成较为稳定的骨架结构,表现为矿料密度和承载比出现峰值;二级填充时由于发生干涉现象,混合料承载比值逐渐减小,而密度逐级增大。

(3) 通过承载比值可知,各集料填充比为 CA1:CA2:CA3 = 54:36:10 时 CA1 形成稳定的骨架结构,CA2 和 CA3 依次填充达到最佳填充效果。

(4) 通过 MATLAB 软件计算关联度结果可知,各集料中 CA1 对承载比的关联度最大,CA2 次之,CA3 最小。即在混合料中各档集料承受荷载的强度依次为 CA1、CA2、CA3,也即 CA1 构成的骨架强度对整体起着最主要的作用,使其在外在荷载和内部应力的作用下混合料能保持稳定。

参考文献

- [1] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.
- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国路面工程学术研究综述·2024[J].中国公路学报,2024,37(3):1-81.
- [3] 汪海年,王惠敏,孔庆鑫,等.粗集料形状对沥青玛蹄脂碎石混合料压实特性与骨架结构的影响[J/OL].重庆大学学报,1-14[2025-06-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20220712.1230.002.html>.
- [4] 祝凤丹.骨架密实型沥青混合料稳态参数分析[D].广州:广州大学,2018.
- [5] CAI X, WU K H, HUANG W K, et al. Study on the correlation between aggregate skeleton characteristics and rutting performance of asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2018, 179: 294-301.

(下转第 35 页)

- [40] 刘军, 齐玮, 刘润清, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土物理力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2015, 29 (16): 111-114.
- [41] 马永炯, 杨安, 洪芬, 等. 基于正交试验的泡沫混凝土配合比设计 [J]. 混凝土, 2021 (7): 147-150.
- [42] ZHANG D S, DING S, MA Y, et al. Preparation and Properties of Foam Concrete Incorporating Fly Ash [J]. Materials, 2022, 15 (18): 6287.
- [43] 嵇鹰, 张军, 武艳文, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (11): 3657-3662.
- [44] 吴丽曼, 孙勇, 张晓莉, 等. 粉煤灰对超轻发泡混凝土孔结构及吸声性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (9): 2387-2392.
- [45] 庞超明, 王少华. 泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (1): 93-98.
- [46] LI G Y, TAN H B, HE X Y, et al. The influence of wet ground fly ash on the performance of foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124676.
- [47] 陈朋, 惠冰, 孟凌霄, 等. 粉煤灰基气泡轻质土配合比和抗压强度研究 [J]. 公路与汽运, 2022 (5): 47-49, 61.
- [48] ABD ELRAHMAN M, EL MADAWY M E, CHUNG S Y, et al. Preparation and Characterization of Ultra - Lightweight Foamed Concrete Incorporating Lightweight Aggregates [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (7): 1447-1458.
- [49] 陈钊, 刘勇, 刘晖, 等. 高性能粉煤灰泡沫轻质土性能试验及应用分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (4): 103-106, 117.
- [50] 陈金威, 刘勇, 石苏意, 等. 不同掺料泡沫轻质土的强度特性 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2016, 13 (4): 15-22.
- [51] 张经双, 朱建华, 朱敬斌. 粉煤灰对聚丙烯纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响 [J]. 煤炭技术, 2018, 37 (11): 118-120.
- [52] 余意. 聚丙烯纤维泡沫混凝土的力学性能及抗盐侵蚀性能试验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- [53] 魏向明. 双掺粉煤灰矿渣泡沫混凝土性能试验研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [54] 陈品明, 曾嵘, 卞绍洋, 等. 路面泡沫混凝土长期耐久性研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (7): 33-36.
- [55] SHE W, DU Y, ZHAO G T, et al. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high - speed railway roadbeds [J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 153-16.

(上接第 22 页)

- [6] JIN C, WAN X, LIU P, et al. Stability prediction for asphalt mixture based on evolutionary characterization of aggregate skeleton [J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36 (11): 1453-1466.
- [7] 刘国强. 沥青混合料主力链特性及骨架构成力学机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [8] 杨昌栋. 压实过程沥青混合料细观骨架结构演变规律及稳定性评价 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2023.
- [9] 刘焕娇. 基于细观力学的颗粒类路面材料堆积行为与骨架结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 彩雷洲, 李刚, 李翔, 等. 压实次数对沥青混合料骨架特征影响研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30 (2): 341-350.
- [11] 李微, 韩森, 黄啟波, 等. 细粒式薄表层沥青混合料中粗集料的骨架特性 [J]. 材料导报, 2019, 33 (4): 617-624.
- [12] 顾兴宇, 章天杰, 王晓威, 等. 一种评价沥青混合料矿料骨架强度的试验方法 [J]. 公路, 2018, 63 (6): 232-238.
- [13] DING X, MA T, ZHANG W, et al. Effects by property homogeneity of aggregate skeleton on creep performance of asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 205-213.
- [14] MIRANDA H M B, BATISTA F A, Neves J, et al. Influence of the aggregate skeleton matrix and volumetric composition on the resistance of stone mastic asphalt to permanent deformation [J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22 (11): 2538-2551.
- [15] 程永春, 李赫, 李立顶, 等. 基于灰色关联度的矿料对沥青混合料力学性能的影响分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (3): 925-935.