DOI：10.16285/j.rsm.2023.0216

基于颗粒破碎特性的盐岩集料基层级配组成设计研究

王朝辉[1]，问鹏辉[1]，宋 亮[1, 2, 3]，牛亮亮[1]，奚 鹤[2]

（1. 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；2. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司，新疆 乌鲁木齐 830006；
3. 新疆交投建设管理有限责任公司，新疆 乌鲁木齐 830049）

摘 要：为实现内陆干盐湖区盐岩集料基层级配组成的科学设计，以罗布泊盐岩为研究对象，分析了不同粒径及含卤水率条件下单粒组盐岩集料颗粒破碎演化特征，构建了复杂粒组下盐岩集料级配转移模型，提出了盐岩集料基层级配组成设计方法，验证了盐岩集料基层级配组成设计方法的合理性，并对比了不同级配组成及失水率下盐岩集料的工程性质。结果表明：击实作用下各粒组盐岩集料均发生颗粒破碎，随着击实能量增加，盐岩集料级配趋于稳定，卤水的赋存会降低单粒组盐岩颗粒破碎率。Weibull 分布可有效表征盐岩集料破碎颗粒级配分布特征。推荐的盐岩集料基层级配组成设计方法可有效推演盐岩集料基层的级配演化特征并实现考虑卤水影响的级配修正。盐岩集料颗粒间卤水盐分结晶有利于盐岩集料基层强度形成，失水率为 75%的盐岩集料无侧限抗压强度可达到 4.1 MPa，盐岩集料可用于干盐湖区公路基层填筑工程。

关 键 词：道路工程；盐岩集料；级配组成设计；基层；颗粒破碎；罗布泊

中图分类号：U 419 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2024) 02－340－13

Gradation composition design of salt rock aggregate base based on particle breakage characteristics

WANG Chao-hui[1], WEN Peng-hui[1], SONG Liang[1, 2, 3], NIU Liang-liang[1], XI He[2]

(1. Key Laboratory for Special Area High Way Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;
2. Xinjiang Transportation Planning Surveying and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830006, China;
3. Xinjiang Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830049, China)

Abstract: To achieve the scientifically designed gradation composition of a salt rock aggregate base in an inland dry salt lake, this study focused on the salt rock in Lop Nur as the research subject. The analysis examined the particle breakage evolution of a single particle group of salt rock aggregate under different particle sizes and brine contents. A gradation transition model for salt rock aggregate under complex gradation was constructed, and a gradation composition design method for salt rock aggregate base was proposed. The rationality of this design method was verified, and the engineering properties of the rock salt aggregate were compared under different gradations and water loss rates. The results demonstrated that all particle groups of the salt rock aggregate experienced breakage during compaction. The gradation of uniformly graded salt rock aggregate tended to stabilize with increasing compaction work. The presence of brine reduced the particle breakage rate of uniformly graded salt rock aggregate. The Weibull distribution effectively characterized the particle breakage distribution characteristics of the salt rock aggregate. The recommended gradation composition design method of salt rock aggregate base successfully deduced the gradation characteristics of salt rock aggregate base and realized the gradation correction considering the influence of brine. Salt crystallization of brine among salt rock particles was conducive to promoting the strength formation of salt rock aggregate base. The unconfined compressive strength of the salt rock aggregate with a water loss rate of 75% reached 4.1 MPa, indicating its suitability for road base engineering in dry salt lake areas.

Keywords: road engineering; salt rock aggregate; grading composition design; base; particle breakage; Lop Nur

收稿日期：2023-02-22 录用日期：2023-05-23
基金项目：交通运输行业重点科技项目（No. 2019-MS1-024）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（No. 2020-D01-A92）；新疆维吾尔自治区交通运输行业科技项目（No. 2019-ZD1-015）。
This work was supported by the Key Science and Technology Program in the Transportation Industry (2019-MS1-024), the Natural Science Foundation Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2020-D01-A92) and the Transportation Department Science and Technology Project in Xinjiang Uygur Autonomous Region (2019-ZD1-015).
第一作者简介：王朝辉，男，1980 年生，博士，教授，主要从事道路新材料与新技术方面的研究工作。E-mail: wchh0205@163.com

1 引　言

近年来，面向西北内陆特殊土地区工程建设规模日益增长，其中罗布泊干盐湖作为西北内陆干旱区独特地质构造、强蒸发气候及水文条件共同作用下发育的特殊区域之一[1-3]，也是联通东疆与南疆、由天山南坡进出新疆的最便捷通道，合理选用干盐湖区筑路材料并进行公路结构组成设计是有效提升区域公路建设水平的重要前提。当前罗布泊地表盐岩广泛分布，其工程性质受水分迁移及温度影响较为突出[4-5]；同时区域砂石严重匮乏，这使得干盐湖区公路交通基础设施的建设发展水平较为低下，湖区通行公路依然是盐岩填筑的低等级公路，在服役期盐岩公路逐渐出现溶洞、坑槽、麻面等病害，盐湖区公路使用品质亟待提升。

目前国内外已有工程采用盐岩作为筑路材料，而关于地表盐岩工程性质相关研究仍较少，主要涉及力学性能及病害特征等方面[6-10]。刘军勇等[6]研究了察尔汗盐岩微观胶结状态及强度特征，发现含盐量增加有利于增强盐岩颗粒间胶结作用并提升其力学强度。冯忠居等[7]发现天然状态下盐岩具有低压缩性，其无侧限抗压强度最大可达 28.6 MPa。刘毅[9]、刘贺业[10]等研究了易溶盐含量、温度等因素对盐岩盐胀特性的影响。现有研究表明，盐岩盐胀、溶陷均与水的迁移与浸入密切相关，而在干燥环境下其能保持良好承载力。因此，在干盐湖区合理布设防水措施基础上选用盐岩作为筑路材料有助于保障结构层使用性能，然而当前关于盐岩用于公路基层的研究未见报道。相比于传统集料，盐岩颗粒强度相对较低，其在外力作用下的颗粒破碎及级配演化特征亟待明确，如何实现盐岩集料基层级配组成的合理设计对保证盐岩集料基层承载力及稳定性至关重要。

干盐湖区盐岩作为一种发育龄期较短且强度较低的特殊岩土材料，其在外力作用下不可避免地会发生颗粒破碎，因此，用于公路基层的盐岩集料在级配组成设计时，务必要考虑颗粒破碎对最终嵌挤级配的影响，以保证级配组成设计的科学性。目前已有学者针对部分岩土材料的破碎特性开展了相关研究，在岩土材料颗粒破碎模式[11-12]、破碎程度量化表征[13]、破碎级配分布特征[14-15]及级配演化规律[16-17]等方面取得了较丰硕的成果，相关成果可为盐岩集料破碎级配表征提供有益借鉴。关于颗粒级配分布特征方面，当前土石料颗粒级配表征仍主要采用级配曲线，在级配分布模型构建时主流思路包括两种，一种是根据材料破碎特征选取合适的分布模型[18-19]，另一种则是根据土石料级配曲线形态直接选用描述其级配线型特征的分布函数[13-14, 20]。关于级配演化方面，学者们最早从单一粒组材料破碎试验出发[21-22]，在确定荷载与颗粒破碎关系基础上建立了级配演化关系[15-16, 23]。描述不同粒径颗粒破碎级配变化时，则采用相同破碎率及级配分布进行表征，这一思路在描述强度高且质地均匀的骨料级配变化时取得了较好的拟合效果，然而对于诸如盐岩等均质性相对较差的材料采用单一级配演化函数表征的适用性尚不明确。此外现有研究多关注荷载或环境影响下颗粒级配演化，对考虑级配要求的初始颗粒级配反演鲜有涉及，同时关于湿化作用下颗粒破碎模式转变对级配演化的影响仍有待明确。

基于此，本文开展不同粒组及含卤水率条件下罗布泊盐岩集料的击实破碎试验，优选盐岩集料破碎后级配分布模型，构建考虑颗粒破碎的盐岩集料基层级配组成设计方法，并验证级配组成设计方法的有效性，进一步对比评价级配及失水率等对盐岩集料力学性能的影响，为盐岩集料在干盐湖区公路基层中的级配组成控制及应用提供理论参考。

2 试验研究

2.1 盐岩材料

试验所用盐岩取自罗布泊盐湖区，其化学成分如表 1 所示。在长期蒸发作用下，盐湖表层形成板块状盐岩覆盖层。原位取样的盐岩尺寸较大，在将其用作基层材料前，首先进行破碎分档并烘干，然后根据级配设计要求进行盐岩集料掺配。盐岩集料拌和时采用饱和卤水，其盐分含量约为 33.67%。

表 1　盐岩化学成分

Table 1　Chemical compositions of salt rock

主要易溶盐离子含量/ %						总含盐量
CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^++Na^+	/ %
0.003	29.559	8.280	1.150	0.427	20.540	60.378

2.2 试验思路

将盐岩集料用于基层结构时，在碾压等外力作用下盐岩颗粒会发生不同程度的破碎，进而导致压实后结构层级配与设计目标级配相背离。因此，为保障盐岩集料颗粒级配组成设计的科学性，在将盐岩用于干盐湖公路基层进行级配组成设计时需考虑盐岩颗粒破碎的影响。

本文结合盐岩粗颗粒破碎特征，提出盐岩集料基层级配组成设计方法，具体步骤如下：①盐岩及饱和卤水选择；②不同粒径与湿化状态盐岩集料破

碎特征确定；③考虑破碎特征的盐岩集料基层级配转移模型构建；④目标级配选择；⑤初始预估级配反演与修正；⑥盐岩集料基层组成设计方法验证与评价。图 1 为盐岩集料基层级配组成设计及反演验证思路。

2.3 试验方法

现有研究[24-25]认为，在结构层中主要由粗集料形成嵌挤骨架结构，故选取粒径大于 4.75 mm 的盐岩粗集料进行破碎试验，重点考虑粗颗粒破碎对级配组成设计的影响。表 2 为单粒组盐岩集料破碎试验方案。试验时，首先对不同粒组及含卤水率条件下拌和的单粒组盐岩集料进行击实破碎，试验采取 JD-2D 型电动标准重型击实仪，击锤重为 4.5 kg，锤头直径为 5 cm，落锤高度为 45 cm，击实筒内尺寸为 ϕ152 mm×120 mm。击实前控制不同试验组盐岩集料颗粒的含卤水率如表 2 所示；随后将盐岩颗粒分 3 层装入击实筒中击实破碎。试验过程中通过调整击实次数控制单位体积击实能量，单位体积击实能量计算见式（1）[16, 26]。在击实结束后对各组盐岩集料筛分，得到破碎后级配。

$$E=\frac{Ncmgh_{\mathrm{H}}}{\pi r^2 h_{\mathrm{c}}} \tag{1}$$

式中：E 为单位体积击实能量（J/m^3）；N 为击实层数；c 为每层击实次数；m 为击实锤重（kg）；g 为重力加速度（m/s^2）；h_{H} 为击实锤下落高度（m）；r 为击实试样半径（m）；h_{c} 为击实试样高度（m）。

此外，在确定级配转移模型后采取与单粒组盐岩集料击实试验一致的击实方法，对反演预估级配下配制的复杂粒组盐岩集料进行破碎并筛分，以验证级配设计方法的科学性。

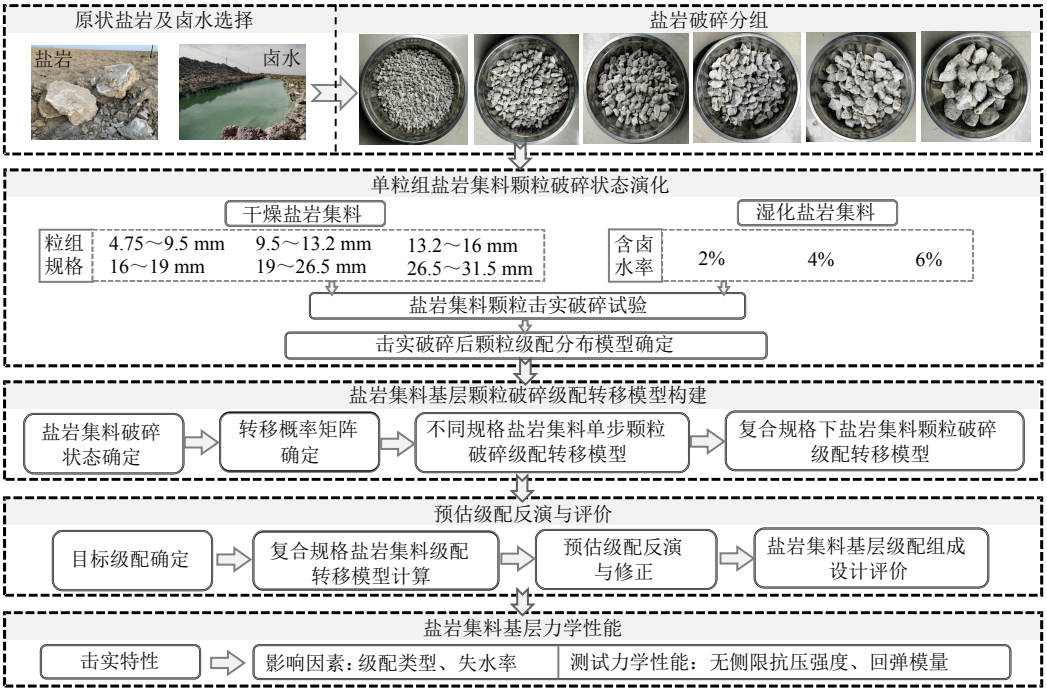


图 1 盐岩集料基层级配组成设计及验证思路

Fig.1 Gradation composition design and verification ideas of salt rock aggregate base

表 2 单粒组盐岩集料破碎试验方案

Table 2 Particle crushing test scheme of uniformly graded salt rock aggregate

试验组	粒组 / mm	击实能量 / (kJ·m^{-3})	含卤水率 / %
1	4.75～9.50	546，1 092，1 639，2 185，2 677	0
2	9.50～13.20	546，1 092，1 639，2 185，2 677	0
3	13.20～16.00	546，1 092，1 639，2 185，2 677	0
4	16.00～19.00	546，1 092，1 639，2 185，2 677	0
5	19.00～26.50	546，1 092，1 639，2 185，2 677	0
6	26.50～31.50	546，1 092，1 639，2 185，2 677	0
7	4.75～9.50，9.50～13.20，13.20～16.00，16.00～19.00，19.00～26.50，26.50～31.50	2 677	2
8	4.75～9.50，9.50～13.20，13.20～16.00，16.00～19.00，19.00～26.50，26.50～31.50	2 677	4
9	4.75～9.50，9.50～13.20，13.20～16.00，16.00～19.00，19.00～26.50，26.50～31.50	2 677	6

在盐岩集料基层级配组成设计基础上进一步确定盐岩集料击实特性并进行力学性能测试。

进行击实试验前准备不同含卤水率的盐岩集料，拌合时控制试样初始含卤水率为 8%～18%，击实过程参考《公路土工试验规程》（JTG 3430－2020）[27]重型击实法进行。击实完成后进行试样称重并从试样中心取样，随后采用烘干法测试实际含水率并计算得到含卤水率。考虑水分蒸发后试样卤水中易溶盐会形成结晶，因此确定盐岩集料击实特性时应考虑盐结晶对干燥后试样干密度的影响。即在理想状态下拌和含卤水率为 w 的盐岩集料时，假设饱和卤水中盐分质量分数为 w_s（饱和卤水烘干至恒重时盐分的质量与饱和卤水质量的比值），结合《公路土工试验规程》[27]可知，卤水未蒸发结晶时试样干密度 ρ_d 可采用式（2）计算，而干燥后盐岩集料试样干密度 ρ_d' 可采用式（3）计算。

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+0.01w} \tag{2}$$

$$\rho_d' = \frac{\rho}{1+0.01w(1-w_s)} \tag{3}$$

式中：ρ_d 为卤水未蒸发结晶时试样干密度（g/cm^3）；w 为拌和含卤水率（%）；ρ 为湿密度（g/cm^3）；ρ_d' 为干燥后试样干密度（g/cm^3）；w_s 为盐分质量分数。

考虑结晶盐岩集料用于基层时受力模式与无机结合料稳定基层相似，因此，在制样、性能测试及计算时参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTG E51－2009）[28]中相关规定进行，成型试样尺寸为 ϕ150 mm×150 mm。将试样脱模后在室内开放养护 7 d 后测试其无侧限抗压强度及回弹模量。此外为确定失水结晶对试样力学性能的影响，将最佳含卤水率下成型的盐岩试样在 50 ℃条件下失水 25%、50%、75%及 100%，随后进行无侧限抗压强度测试。具体根据式（4）、（5）[28]计算相应力学性能。

$$R_c = \frac{4P_c}{\pi D_0^{\,2}} \tag{4}$$

$$E_c = \frac{ph_0}{l} \tag{5}$$

式中：R_c 为无侧限抗压强度（MPa）；E_c 为回弹模量（MPa）；P_c 为试样破坏时的最大压力（N）；D_0 为直径（mm）；p 为单位压力（MPa）；h_0 为试样高度（mm）；l 为回弹变形（mm）。

3　盐岩集料基层级配组成设计方法

3.1　盐岩集料级配分布模型初选

实现盐岩集料基层级配组成量化设计的前提是保证颗粒级配的准确表征。考虑基于颗粒破碎特征选用的分布模型参数意义较明确，因此选用 Weibull 分布模型及分形模型拟合单粒组盐岩集料破碎后级配分布，式（6）、（7）分别为颗粒级配的 Weibull 分布模型及分形模型[12-13, 19]。

$$p_j = 1-\exp\left[-\left(\frac{d_j}{a}\right)^b\right] \tag{6}$$

式中：p_j 为粒径为 d_j 的盐岩集料通过颗粒质量百分比；a 为破碎程度参数；b 为破碎分布特性参数；d_j 为第 j 级筛孔尺寸。

$$p_j = \left(\frac{d_j}{d_{\max}}\right)^{3-D} \tag{7}$$

式中：D 为分形维数；$d_{\max}$ 为最大粒组颗粒粒径。

为便于表征盐岩集料级配与粒径的关系，分别对式（6）、（7）对数化，可得

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-p_j}\right)\right] = b\ln d_j - b\ln a \tag{8}$$

$$\lg p_j = (3-D)\lg\left(d_j/d_{\max}\right) \tag{9}$$

3.2　盐岩集料级配转移模型构建

结合图 1 可知，构建有效关联破碎前后集料级配的转移模型是盐岩集料基层级配组成设计的关键。盐岩集料由多粒组集料共同组成，在级配组成设计时，需明确各粒组颗粒破碎至较小粒径的分布状态[23]，进而保证构建复合粒组盐岩级配转移矩阵的科学性。

3.2.1 盐岩集料破碎状态确定

在不同破碎阶段，盐岩集料破碎颗粒转移到较小筛孔的分计筛余仅与当前分计筛余有关，因此其破碎过程可看作马尔可夫过程。采用 $p_{ii_1}(t) = P\{X_{t+1}=i_1 \mid X_t = i\}$ 表示盐岩颗粒破碎从状态 i 经一步转移到状态 i_1 的概率，称马尔可夫链 $\{X_t, t=0,1,\cdots\}$ 在时刻 t 的一步转移概率。将盐岩集料基层中发挥嵌挤骨架作用的粗集料共分为 6 档，即 4.75～9.5、9.5～13.2、13.2～16、16～19、19～26.5、26.5～31.5 mm。采用各级筛孔尺寸表示不同规格盐岩集料的破碎演化状态，不同粒组破碎状态传递示

意图如图 2 所示，其中 k 表示集料规程，既可以是单一粒径，也可以是复合粒组。

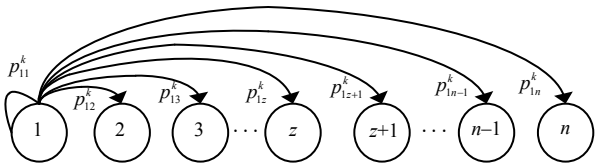


图 2 不同规格盐岩集料破碎状态传递图

Fig.2 Transmission diagram of crushing state of salt rock aggregates with different particles sizes

3.2.2 盐岩集料单步破碎级配转移模型

在构建盐岩集料破碎级配转移模型前先确定单粒组颗粒破碎级配曲线表达方程，初步采用下式表征破碎后盐岩集料颗粒筛分级配曲线。

$$P_z(d_j)=f_z\left(d_j,E\right) \tag{10}$$

式中：$P_z(d_j)$ 为粒组 $[d_{z+1},d_z]$ 的盐岩颗粒破碎后通过筛孔 d_j 的质量百分率，其中 $d_z>d_{z+1}$，下同。

按照公路工程集料分档方法，盐岩集料初始预估级配各粒组盐岩集料分计筛余分别可记为 M_1^0，$M_2^0,\cdots,M_{z-1}^0,M_z^0,\cdots,M_j^0,\cdots,M_n^0$，分别对应于 $[d_2,d_1]$，$[d_3,d_2]$，$\cdots$，$[d_z,d_{z-1}]$，$[d_{z+1},d_z]$，$\cdots,[d_{j+1},d_j],\cdots,[d_{n+1},d_n]$ 等粒组。

对于盐岩集料，在一次破碎作用后单一粒组颗粒会向小于该粒组粒径的各级粒组进行破碎转移，同时大于这一粒组的各粒组盐岩集料同样会向这一粒组进行破碎颗粒转移。记一次破碎后盐岩集料各粒组分计筛余分别为 $M_1^1,M_2^1,\cdots,M_{z-1}^1,M_z^1,\cdots,M_j^1,\cdots,M_n^1$，以粒组 $[d_{j+1},d_j]$ 的颗粒为例，粒组 $[d_{z+1},d_z]$ 的颗粒经破碎后向这一粒组转移的质量分数为 $M_z^0\left(P_z(d_j)-P_z(d_{j+1})\right)$。类似的，其他大于该粒组的颗粒同样会向这一粒组破碎转移，经一次破碎后粒组 $[d_{j+1},d_j]$ 的颗粒质量分数 M_j^1 可通过下式进行计算：

$$\begin{aligned}M_j^1=&\left(M_1^0,\cdots,M_z^0,\cdots,M_{j-1}^0,M_j^0\right)\cdot\\&\left(P_1\left(d_j\right)-P_1\left(d_{j+1}\right),\cdots,P_z\left(d_j\right)-P_z\left(d_{j+1}\right),\right.\\&\left.\cdots,P_{j-1}\left(d_j\right)-P_{j-1}\left(d_{j+1}\right),-P_j\left(d_{j+1}\right)\right)^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{11}$$

根据式（11）可计算得到破碎后各粒组盐岩集料颗粒质量分数，令规格为 k 的盐岩集料破碎后各粒组质量分数组成向量 $\left(M^{k1}\right)=\left(M_1^{k1},\cdots,M_z^{k1},\cdots,M_j^{k1},\cdots,M_n^{k1}\right)$，即可得到一次破碎前后的颗粒级配转移模型：

$$\begin{aligned}&\left(M_1^{k1},...,M_z^{k1},\cdots,M_j^{k1},\cdots,M_n^{k1}\right)=\\&\left(M_1^{k0},...,M_z^{k0},\cdots,M_j^{k0},\cdots,M_n^{k0}\right)\begin{pmatrix}p_{11}^k&\cdots&p_{1n}^k\\\vdots&\ddots&\vdots\\0&\cdots&p_{nn}^k\end{pmatrix}\end{aligned} \tag{12}$$

或写成

$$\boldsymbol{M}^{k1}=\boldsymbol{M}^{k0}\boldsymbol{P}^k \tag{13}$$

综合式（10）、（13），即可得到规格 k 的盐岩集料的一步转移矩阵。

3.2.3 盐岩集料基层颗粒破碎级配转移模型

工程中进行集料级配组成设计时，实际的盐岩集料粒组可视为由若干单一粒组或复杂规格粒组复合组成，如忽略不同规格集料破碎过程的相互作用，可将其破碎过程视为多个规格集料破碎过程的叠加。因此复合后盐岩集料颗粒破碎各级筛孔的筛余百分率组成向量 $\left(M^{1\prime}\right)$ 可表示为

$$\left(M^{1\prime}\right)=(M_1^{1\prime},M_2^{1\prime},\cdots,M_z^{1\prime},\cdots,M_j^{1\prime}\cdots,M_n^{1\prime}) \tag{14}$$

联立不同规格盐岩集料破碎级配转移模型，确定得到复杂规格组合下粒组 $[d_j,d_{j+1}]$ 盐岩集料基层颗粒破碎级配转移模型如下：

$$\boldsymbol{M}_j^{1\prime}=\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{M}_j^{1k}=\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{M}_j^{0k}\boldsymbol{P}^k \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{M}_j^{1\prime}$ 为复合级配盐岩集料基层受力破碎后第 j 级筛孔尺寸的分计筛余百分率（%）。

复合后盐岩集料基层颗粒破碎各级筛孔的筛余百分率组成向量 $\left(M^{1\prime}\right)$ 可由下式计算得到：

$$\begin{aligned}\left(M^{1\prime}\right)=&(\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{M}_1^{0k1}\boldsymbol{P}^{k1},\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{M}_2^{0k2}\boldsymbol{P}^{k2},\cdots,\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{M}_j^{0kj}\boldsymbol{P}^{kj},\cdots,\\&\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{M}_n^{0n}\boldsymbol{P}^{kn})\end{aligned} \tag{16}$$

3.3 盐岩集料预估级配反演与验证

在确定盐岩集料基层目标级配的基础上，可基于上述颗粒破碎级配转移模型进行破碎前初始预估级配的反演，进而完成盐岩集料基层级配组成量化设计。目标级配即破碎后盐岩集料级配，结合盐岩结晶特征、破碎特点及应用环境，推荐参考《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20－2015）[29] 选取目标级配。联立式（12）、（16），计算得到复合规格下盐岩集料级配转移模型并获得破碎后盐岩集料级配组成 $\left(M^{1\prime}\right)=(M_1^{1\prime},M_2^{1\prime},\cdots,M_z^{1\prime},\cdots,M_j^{1\prime}\cdots,M_n^{1\prime})$ 的具体表达式，设目标级配为 $\left(M^{1\prime\prime}\right)=(M_1^{1\prime\prime},M_2^{1\prime\prime},\cdots,M_z^{1\prime\prime},\cdots,M_j^{1\prime\prime},\cdots,M_n^{1\prime\prime})$，采用非线性规划求解反演破碎前预估级配：

$$\left.\begin{aligned}&\min z=\left|M_1^{1\prime}-M_1^{1\prime\prime}\right|+\left|M_1^{1\prime}-M_2^{1\prime\prime}\right|+\cdots+\left|M_z^{1\prime}-M_z^{1\prime\prime}\right|+\cdots+\left|M_j^{1\prime}-M_j^{1\prime\prime}\right|+\cdots+\left|M_n^{1\prime}-M_n^{1\prime\prime}\right|\\&\text{s.t.}\begin{cases}M_1^{1\prime\prime}+M_2^{1\prime\prime}+\cdots+M_z^{1\prime\prime}+\cdots M_j^{1\prime\prime}+\cdots+M_n^{1\prime\prime}=1\\M_1^{1\prime\prime}\geqslant 0,M_2^{1\prime\prime}\geqslant 0,\cdots,M_z^{1\prime\prime}\geqslant 0,\cdots,M_j^{1\prime\prime}\geqslant 0,\cdots,M_n^{1\prime\prime}\geqslant 0\end{cases}\end{aligned}\right\}\tag{17}$$

求解式（17）即可反推出盐岩集料基层破碎前预估级配$\left(M^0\right)$。为验证上述级配组成，设计过程中构建级配转移模型用于干燥盐岩集料级配反演时的准确性，根据计算预估级配进行盐岩集料复配，并采取击实试验进行验证。

此外考虑水分赋存会影响盐岩集料受力状态及破碎模式[30]，可能使得破碎后的湿化盐岩集料颗粒级配超出目标级配范围，因此在确定干燥盐岩集料反演验证预估模型可靠性基础上，对湿化后盐岩集料基层预估级配进行修正，具体修正过程结合湿化后盐岩颗粒击实破碎试验结果确定。

3.4　级配组成设计方法评价

评价盐岩集料基层级配组成设计方法可靠性时，选择目标级配范围作为参考基准。采取绝对误差和相对误差对盐岩集料基层修正后击实筛分级配与优选目标级配参考基准进行对比，计算公式为

$$\mathrm{AE}=\left|p_j{}'-p_j\right|\tag{18}$$

$$\mathrm{RE}=\frac{\left|p_j{}'-p_j\right|}{p_j}\tag{19}$$

式中：AE 为绝对误差；RE 为相对误差；$p_j{}'$为修正后验证级配中第 j 级筛孔通过百分率（%）。

为明确误差的数字特征，采用平均绝对误差和均方根误差综合评价设计结果，计算公式为

$$\mathrm{MAE}=\frac{\sum_{j=1}^{n}\left|p_j{}'-p_j\right|}{n}\tag{20}$$

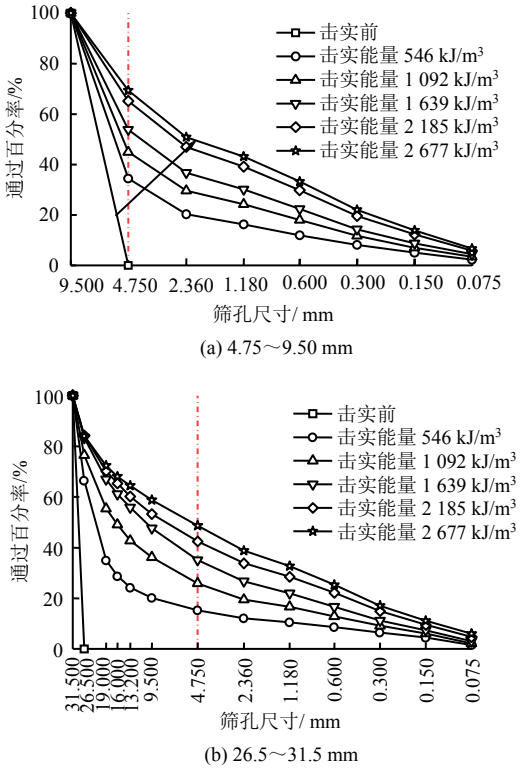
$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(p_j{}'-p_j\right)^2}{n}}\tag{21}$$

式中：MAE 为平均绝对误差；RMSE 为均方根误差；n 为筛孔尺寸级数。

4　级配组成设计方法应用与验证

4.1　单粒组盐岩集料颗粒破碎状态演化

图 3 为击实作用下部分粒组盐岩集料破碎前后的级配曲线。由图可知，击实后不同规格盐岩集料均发生破碎，破碎后颗粒级配呈连续级配特征。随着击实能量增加，盐岩集料破碎逐渐趋于稳定。初始粒径越大，粒组的盐岩集料在击实后颗粒破碎越明显。此外，破碎后粒径大于 4.75 mm 的各档通过百分率变化均较大。这是由于盐岩粗集料间以点状嵌挤接触为主，主要作用力在粗集料间传递，接触力超过颗粒强度时发生破碎；且初始粒径越大时，盐岩粗集料之间接触概率越大，从而破碎程度也越高。



(a) 4.75～9.50 mm

(b) 26.5～31.5 mm

图 3　不同规格盐岩集料破碎前后级配曲线

Fig.3　Grading curves of salt rock aggregate with different particles sizes before and after crushing

粒径为 26.5～31.5 mm 的盐岩集料击实破碎前后筛余百分含量变化如图 4 所示。当击实能量为 2 677 kJ/m³ 时，26.5～31.5 mm 粒组的盐岩集料破碎通过百分率为 84.08%。当击实能量由 546 kJ/m³ 增加到 2 677 kJ/m³ 时，破碎后粒径大于 13.2 mm 的各粒组颗粒含量均有所降低。这表明击实作用下盐岩集料破碎以大颗粒为主，粒径较大粒组$[d_{j+1},d_j]$的盐岩集料破碎转移至粒径较小粒组的颗粒质量小于由粒径更大的各粒组破碎至粒组$[d_{j+1},d_j]$的颗粒质量之和。此外在击实作用下盐岩颗粒间接触位置会发生研磨，但破碎仍是盐岩颗粒细化的主要形式。

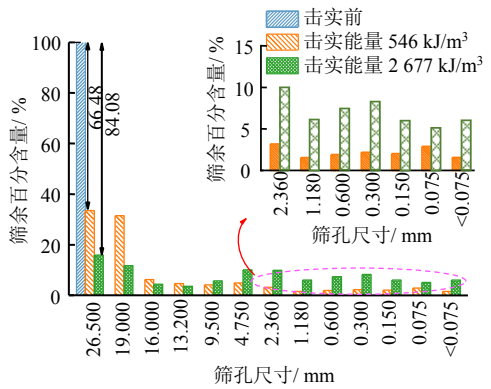


图 4 26.5～31.5 mm 粒组盐岩集料破碎前后筛余百分含量
Fig.4 Retained percentage of salt rock aggregates with particles sizes of 26.5-31.5 mm before and after crushing

图 5 为不同含卤水率下粒径为 26.5～31.5 mm 的盐岩集料破碎后的级配曲线。随着含卤水率增加，破碎后盐岩集料级配曲线均向左下偏移。含卤水率增加有助于降低不同规格盐岩集料破碎概率，且含卤水率越大，降低越显著。这表明卤水的赋存将会降低盐岩集料发生破碎的概率并改变颗粒破碎形式。在击实作用下盐岩集料会发生滑移、错动，且颗粒间卤水会改变颗粒接触受力状态[30]。随着含卤水率增大，接触面结合水膜的存在会降低盐岩集料间移动阻力，这使得盐岩颗粒发生研磨的概率大于破碎，进而级配曲线向左下移动。此外，晶间卤水使得集料孔隙间存在孔隙水压力，击实时会消耗部分击实能量，有助于降低盐岩集料破碎。

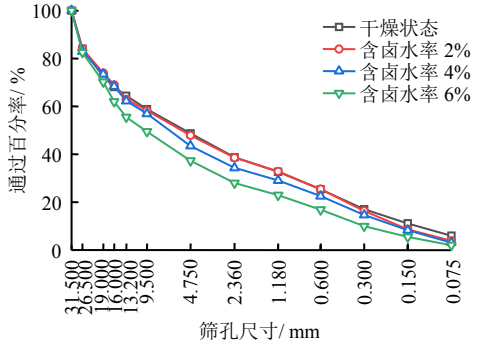
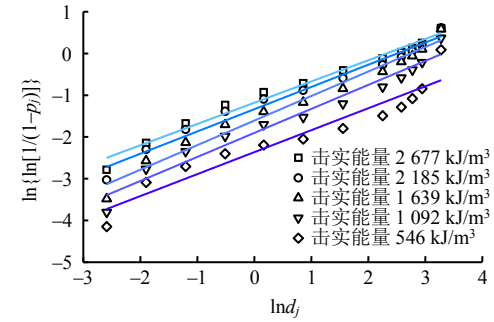
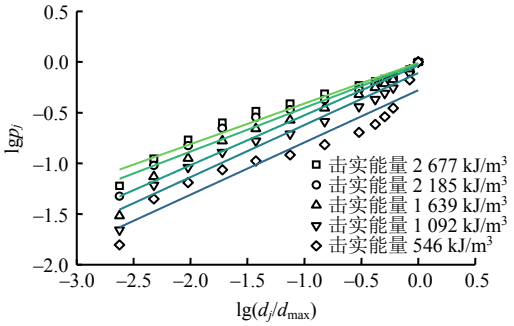


图 5 不同含卤水率下盐岩集料破碎后级配曲线
Fig.5 Grading curves of salt rock aggregate under different brine contents after crushing

粒径为 26.5～31.5 mm 的盐岩集料破碎后的 Weibull 分布和分形分布拟合结果如图 6 所示。由图可知，在双对数坐标中破碎后盐岩集料级配的 Weibull 分布和分形分布拟合曲线均呈线性变化，且击实能量越大时分布模型拟合效果均越好。不同粒组盐岩集料破碎后级配曲线 Weibull 分布和分形分布的拟合相关系数结果见表 3。由表可知，采用 Weibull 分布和分形分布描述盐岩集料破碎级配分布均取得了较高相关系数。其中 Weibull 分布的相关系数相对较高，因此推荐采用 Weibull 分布描述盐岩集料破碎颗粒级配分布。



(a) Weibull 分布拟合



(b) 分形分布拟合

图 6 26.5～31.5 mm 粒组盐岩集料破碎颗粒级配拟合对比
Fig.6 Comparison of crushed particle gradation fitting of salt rock aggregate with particles sizes of 26.5-31.5 mm

根据不同击实能量下模型参数的变化趋势，分别采用指数函数和高斯函数对 Weibull 分布模型参数 a 和 b 拟合，具体如图 7 所示，拟合函数表达式为

$$\left.\begin{aligned} a &= \alpha_a \beta_a^{\,x} + \gamma_a \\ b &= \alpha_b + \frac{1}{\beta_b \sqrt{2\pi}} \exp\left[-2\left(\frac{x-\gamma_b}{\eta_b}\right)^2\right] \end{aligned}\right\} \tag{22}$$

式中：x 为单位体积击实能量；α_a、β_a、γ_a、α_b、β_b、γ_b、η_b 均为拟合系数。

由图 7 可知，不同粒组盐岩集料破碎级配曲线均可采用 Weibull 分布拟合，但各粒组的颗粒破碎率及级配演化特征并不完全一致，而在文献[23]中对于不同粒组土石料可采取相同的破碎率及级配拟合方程。这表明不同土石材料破碎特征存在差异，可能与其矿物组成、单颗粒强度、颗粒破碎尺寸效

表 3　不同规格盐岩集料破碎颗粒分布相关系数

Table 3　Correlation coefficient of crushed particle distributions of salt rock aggregate with different particles sizes

集料规格	击实能量546 kJ/m³		击实能量1 092 kJ/m³		击实能量1 639 kJ/m³		击实能量2 185 kJ/m³		击实能量2 677 kJ/m³	
/ mm	Weibull 分布	分形分布	Weibull 分布	分形分布	Weibull 分布	分形分布	Weibull 分布	分形分布	Weibull 分布	分形分布
4.75～9.50	0.968	0.954	0.972	0.970	0.976	0.974	0.970	0.960	0.967	0.952
9.50～13.20	0.960	0.946	0.970	0.969	0.979	0.959	0.979	0.969	0.975	0.965
13.20～16.00	0.957	0.920	0.972	0.968	0.959	0.940	0.975	0.955	0.978	0.955
16.00～19.00	0.942	0.917	0.971	0.970	0.975	0.968	0.980	0.969	0.981	0.968
19.00～26.50	0.945	0.934	0.950	0.946	0.963	0.950	0.932	0.900	0.920	0.878
26.50～31.50	0.980	0.905	0.976	0.958	0.974	0.970	0.957	0.964	0.903	0.961

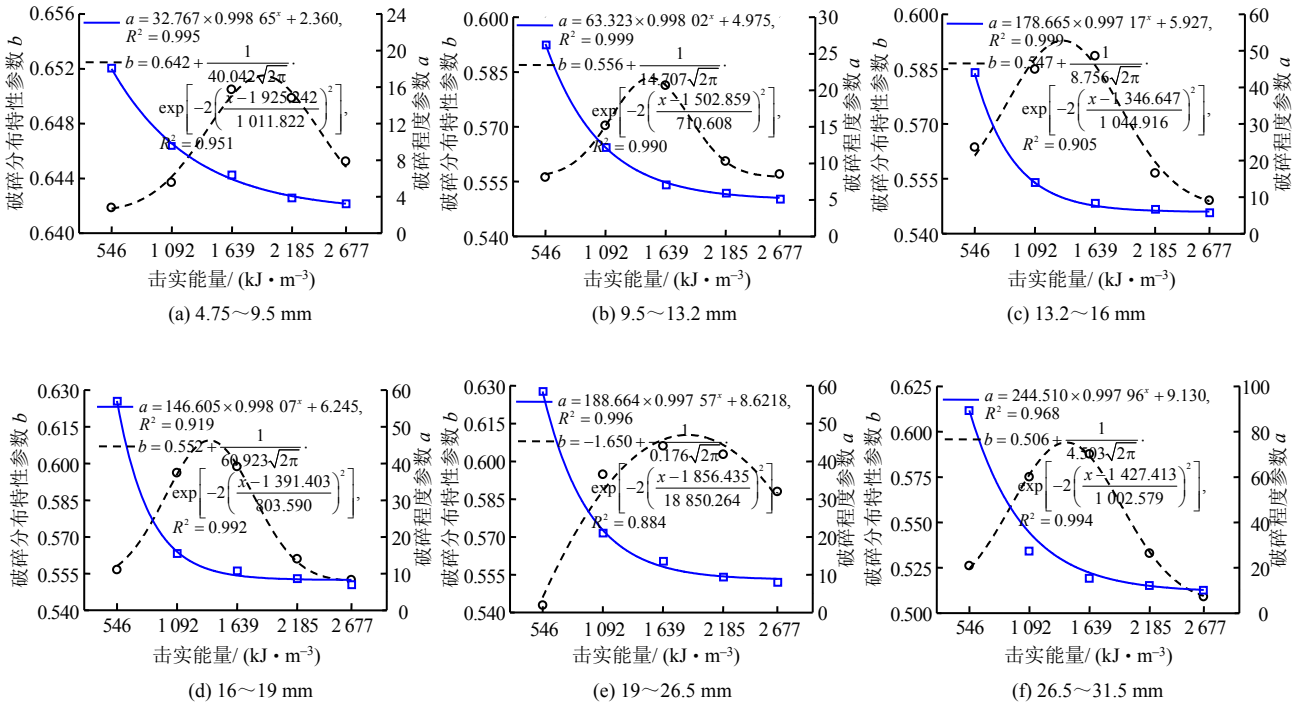


图 7　Weibull 分布参数与击实能量的相关关系

Fig.7　Correlation between Weibull distribution parameters and compaction energy

应等因素有关。相比于较均质的石灰岩或钙质砂，盐岩集料颗粒破碎特征更复杂，其中 Weibull 分布破碎程度参数 a 随击实能量增加而逐渐减小并趋于稳定，Weibull 分布特性参数 b 则随击实能量增加先增大后减小，这主要与盐岩颗粒在不同击实阶段颗粒破碎形式有关。将式（22）代入式（6），可得到盐岩集料破碎后颗粒的质量通过百分率与筛孔尺寸及击实能量的演化模型，即

$$p_j = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{d_j}{\alpha_a \beta_a^{\,x} + \gamma_a}\right)^{\alpha_b + \frac{1}{\beta_b\sqrt{2\pi}}\exp\left[-2\left(\frac{x-\gamma_b}{\eta_b}\right)^2\right]}\right\} \tag{23}$$

进一步可得单一粒组盐岩集料破碎后颗粒分计筛余，即

$$y_j = p_j - p_{j+1} \tag{24}$$

式中：y_j 为第 j 级筛孔的筛余百分率（%）。

4.2　预估级配确定与验证

在目标级配选择时参考《公路路面基层施工技术细则》[29]中推荐的二级公路用水泥稳定级配碎石级配，选取 C-C-1、C-C-2、C-C-3 共 3 种级配作为目标级配范围，其中对于干燥盐岩集料选取 3 组级配上限作为目标级配，级配选取如图 8 所示。

结合式（10）～（13）计算不同单粒组盐岩集料在既定击实能量（2 677 kJ/m³）下的一步转移概率，计算结果如表 4 所示。基于式（14）～（17）反演得到 3 种目标级配对应的破碎前预估级配，如图 9 所示。由图可知，反演后预估级配中盐岩集料粗粒组占比明显增加，不同预估级配中粒径较大的 3 个粒组颗粒占比基本超过 80%，即干燥盐岩集料破碎演化以粗颗粒破碎为主。

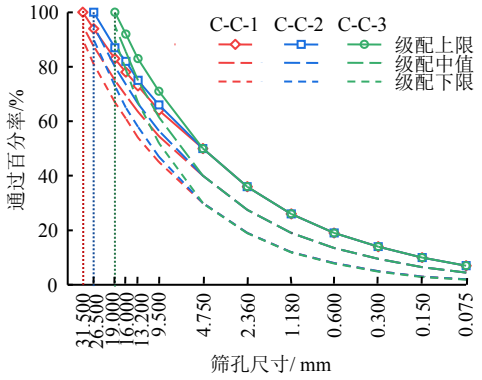


图 8 级配范围选择

Fig.8 Selection of grading range

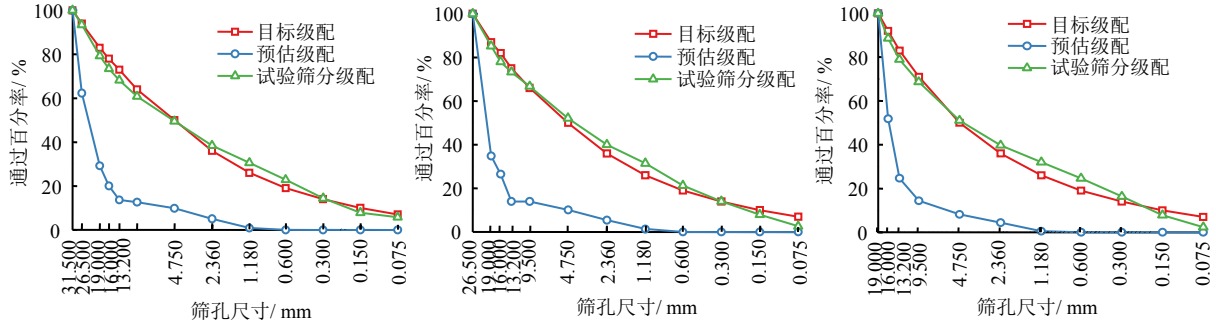
为验证反演预估级配的合理性，采取与单粒组盐岩集料破碎相同的击实方法对按预估级配掺配的盐岩集料进行击实，控制单位体积击实能量为 2 677 kJ/m^3，击实结束后对破碎颗粒筛分，并对比筛分结果与目标级配，如图 9 所示。按破碎前预估级配制备的复合粒组干燥盐岩集料经击实后的破碎级配与目标级配基本重合，仅在个别粒组出现较小偏差。这表明采取推荐级配组成设计方法基本耦合了干燥盐岩集料的破碎规律，可有效推演受力作用下盐岩集料基层级配变化特征。

表 4 不同规格盐岩集料一步转移概率

Table 4 One step transfer probability of salt rock aggregates with different particles sizes

粒径/ mm	一步转移概率											
4.75～9.50	—	—	—	—	—	$p_{11}^{4.75}$	$p_{12}^{4.75}$	$p_{13}^{4.75}$	$p_{14}^{4.75}$	$p_{15}^{4.75}$	$p_{16}^{4.75}$	$p_{17}^{4.75}$
	—	—	—	—	—	0.31	0.18	0.08	0.10	0.11	0.08	0.07
9.50～13.20	—	—	—	—	$p_{11}^{9.5}$	$p_{12}^{9.5}$	$p_{13}^{9.5}$	$p_{14}^{9.5}$	$p_{15}^{9.5}$	$p_{16}^{9.5}$	$p_{17}^{9.5}$	$p_{18}^{9.5}$
	—	—	—	—	0.23	0.21	0.12	0.07	0.07	0.11	0.06	0.06
13.20～16.00	—	—	—	$p_{11}^{13.2}$	$p_{12}^{13.2}$	$p_{13}^{13.2}$	$p_{14}^{13.2}$	$p_{15}^{13.2}$	$p_{16}^{13.2}$	$p_{17}^{13.2}$	$p_{18}^{13.2}$	$p_{19}^{13.2}$
	—	—	—	0.18	0.12	0.14	0.11	0.06	0.06	0.11	0.07	0.06
16.00～19.00	—	—	p_{11}^{16}	p_{12}^{16}	p_{13}^{16}	p_{14}^{16}	p_{15}^{16}	p_{16}^{16}	p_{17}^{16}	p_{18}^{16}	p_{19}^{16}	p_{110}^{16}
	—	—	0.17	0.08	0.11	0.14	0.10	0.07	0.07	0.08	0.06	0.06
19.00～26.50	—	p_{11}^{19}	p_{12}^{19}	p_{13}^{19}	p_{14}^{19}	p_{15}^{19}	p_{16}^{19}	p_{17}^{19}	p_{18}^{19}	p_{19}^{19}	p_{110}^{19}	p_{111}^{19}
	—	0.20	0.06	0.05	0.07	0.12	0.10	0.07	0.06	0.09	0.06	0.09
26.50～31.50	$p_{11}^{26.5}$	$p_{12}^{26.5}$	$p_{13}^{26.5}$	$p_{14}^{26.5}$	$p_{15}^{26.5}$	$p_{16}^{26.5}$	$p_{17}^{26.5}$	$p_{18}^{26.5}$	$p_{19}^{26.5}$	$p_{110}^{26.5}$	$p_{111}^{26.5}$	$p_{112}^{26.5}$
	0.16	0.12	0.04	0.04	0.06	0.10	0.10	0.06	0.07	0.08	0.06	0.05

注：$p_{11}^{4.75}$=0.31，其余一步转移概率以此类推。



(a) C-C-1 型 (b) C-C-2 型 (c) C-C-3 型

图 9 盐岩集料基层破碎前的预估级配曲线反演与验证

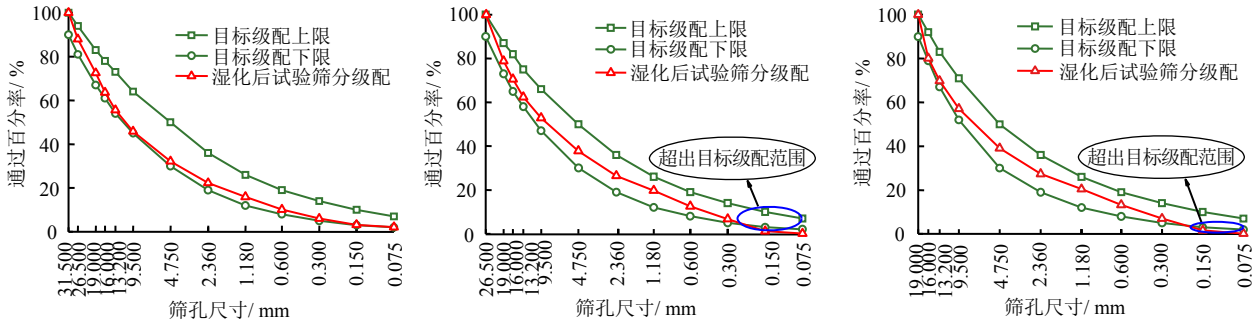
Fig.9 Inversion and verification of estimated grading curves of salt rock aggregate base before crushing

结合图 5 可知，含卤水率的增加会降低盐岩集料的破碎率；另外考虑含卤水率过高会导致击实破碎后颗粒黏附作用突出而难以筛分，因此取含卤水率为 6%的盐岩集料进行击实、干燥并筛分，并将击实试验筛分级配与目标级配范围进行对比以确定是否需要修正。修正时以目标级配为参考，同样仅考虑粗集料的破碎，即对 4.75 mm 以下的盐岩集料不考虑颗粒破碎影响直接进行修正，对于粒径大于 4.75 mm 的盐岩集料则考虑破碎影响，基于此建立湿化盐岩级配修正方程见式（25）。在进行级配修正后则再次结合式（12）～（16）计算湿化盐岩集料破碎前的预估级配。

$$\begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 & p_{17}^{4.75} & \cdots & p_{112}^{26.5} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & p_{12}^{4.75} & \cdots & p_{17}^{26.5} \\ 0 & \cdots & 0 & p_{11}^{4.75} & \cdots & p_{16}^{26.5} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & p_{11}^{26.5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta a_{12} \\ \vdots \\ \Delta a_7 \\ \Delta a_6 \\ \vdots \\ \Delta a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta a'_{12} \\ \vdots \\ \Delta a'_7 \\ \Delta a'_6 \\ \vdots \\ \Delta a'_1 \end{pmatrix} \tag{25}$$

式中：Δa_j 为湿化盐岩集料基层破碎前各粒组的预估级配修正值；$\Delta a_j'$ 为湿化盐岩集料基层破碎后的各粒组目标级配修正值。

在明确湿化盐岩集料级配修正方法基础上，结合复合级配下的湿化盐岩击实试验验证修正方法的合理性。在湿化盐岩集料掺拌时，先采取干燥集料反演的预估级配，并控制含卤水率为 6%。图 10 为不同级配下湿化盐岩集料破碎后筛分结果。由图可知，选用 3 种级配中仅 C-C-1 级配盐岩集料的各粒组筛余均在推荐目标级配范围内，而后两种级配盐岩集料的细粒组含量均较低，超出目标级配下限，因此需要进行级配修正。

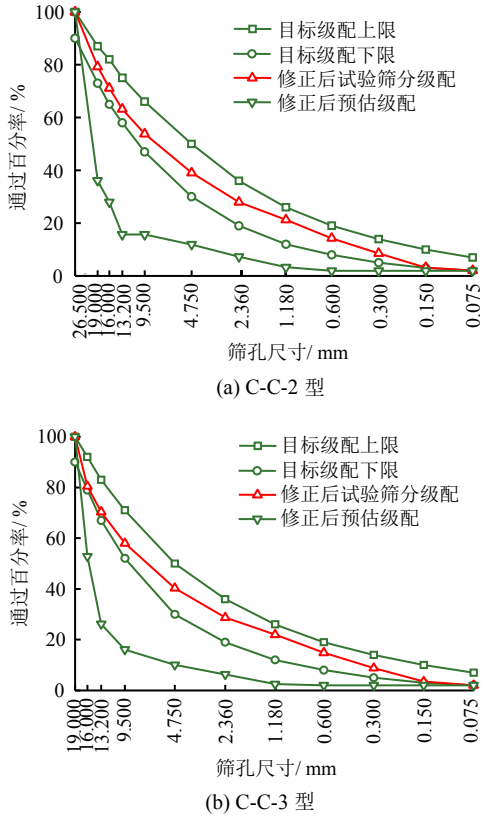


(a) C-C-1 型　(b) C-C-2 型　(c) C-C-3 型

图 10　湿化后盐岩集料基层击实试验验证级配曲线

Fig.10　Grading curves for verification of compaction test of wet salt rock aggregate base

按照前面所述级配修正思路对后两种目标级配下的湿化盐岩集料预估级配进行修正。图 11 为后两种采取修正后预估级配的湿化盐岩集料的破碎筛分试验结果。修正预估级配下掺配的盐岩集料在击实后级配曲线均在目标级配范围内，即推荐预估级配修正方法应用效果良好。



(a) C-C-2 型

(b) C-C-3 型

图 11　湿化盐岩集料基层修正后预估级配破碎结果

Fig.11　Crushing results of estimated grading curves of wet salt rock aggregate base after correction

4.3　级配组成设计评价

根据式（18）、（19）得到盐岩集料基层修正后击实试验验证级配的 AE 和 RE，结果如图 12 所示。由图可知，在筛孔尺寸为 0.075～4.75 mm 时，修正后的盐岩集料验证级配 AE 均较小；当筛孔尺寸大于 4.75 mm 时，AE 均相对较大，这与盐岩集料颗粒破碎主要发生在粗粒组有关。根据式（20）、（21）计算得到盐岩集料基层修正后验证级配的 MAE 与 RMSE，结果如表 5 所示。由表可知，盐岩集料基层修正后验证级配 MAE 和 RMSE 顺序为 C-C-2＜C-C-3＜C-C-1，其中 C-C-2 的 MAE 和 RMSE 最小，分别为 2.1%和 2.5%，精度较高。整体来说，采取提出的盐岩集料级配组成设计方法能有效考虑击实作用下盐岩集料颗粒破碎演化并满足目标设计级配要求。

5　盐岩集料基层力学性能研究

5.1　击实特性

对选用 3 种级配盐岩集料按设定含卤水率拌和完成后进行击实试验，击实前盐岩集料掺配时采取含卤水率为 6%时的预估级配，试验后选取代表性测点绘制得到不同级配下的击实曲线，如图 13 所示。

由图 13 可知，不同级配下盐岩集料击实曲线差异较明显，这与不同级配盐岩击实后颗粒表面水

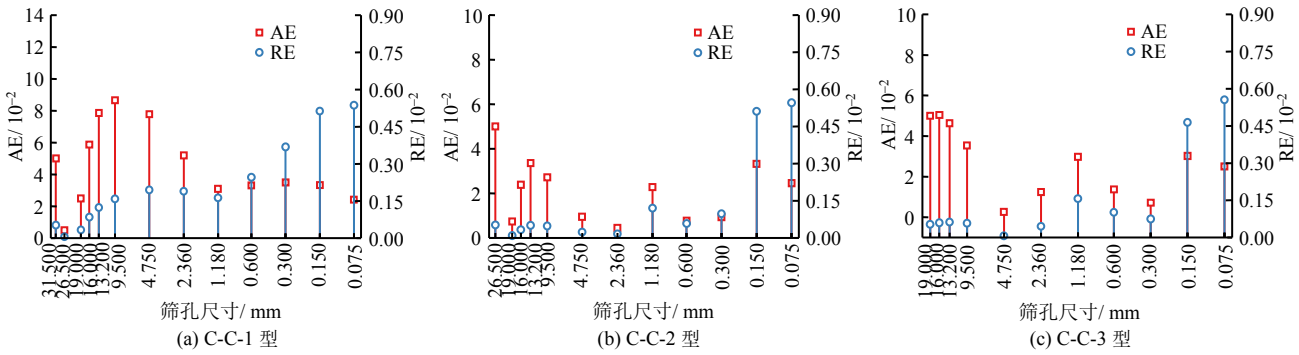


图 12 修正后验证级配的 AE 与 RE

Fig.12 AE and RE of verified gradation after correction

表 5 修正后验证级配的 MAE 与 RMSE

Table 5 MAE and RMSE of verified gradation after correction

级配类型	MAE / 10^{-2}	RMSE / 10^{-2}
C-C-1	4.5	5.1
C-C-2	2.1	2.5
C-C-3	2.8	3.2

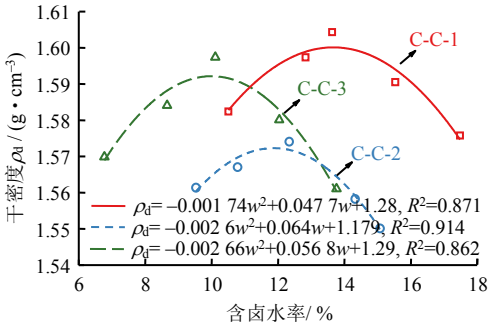


图 13 不同级配盐岩集料击实曲线

Fig.13 Compaction curves of salt rock aggregate with different gradations

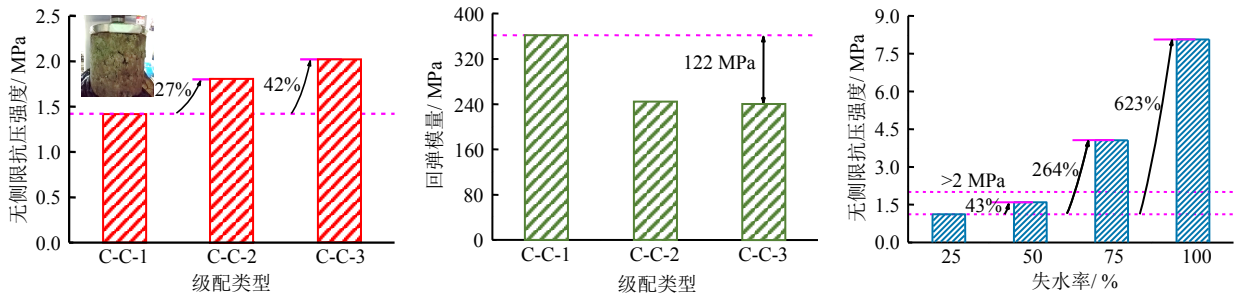
膜厚度、破碎程度及嵌挤状态有关。不同级配盐岩集料均呈现单峰变化趋势，初始级配较粗的盐岩集料在击实后获得较大的最大干密度。当含卤水率较低时卤水对盐岩集料发挥软化和润滑作用，击实时促进盐岩粗集料相互嵌挤并填充密实，进而提升盐岩集料干密度。当含卤水率提升使得颗粒间水膜厚度明显增加时，击实时颗粒间孔隙水压力会消耗部分击实能量，进而导致干密度有所下降。

5.2 不同级配下盐岩集料力学性能

图 14(a)为开放养护 7 d 后的盐岩集料无侧限抗压强度。由图可知，盐岩集料无侧限抗压强度依次为 C-C-1＜C-C-2＜C-C-3。盐岩颗粒间卤水盐分结晶是促进基层强度形成和承载力保障的重要原因。当盐岩集料级配越粗时，卤水盐分结晶对集料的胶结强化效果越弱。

由图 14(b)可知，C-C-2 型与 C-C-3 型盐岩集料抗压回弹模量相差不大，均在 240 MPa 左右，C-C-1 型级配试样的回弹模量最大。盐岩集料基层模量主要受粗骨料强度及其嵌挤骨架影响，当粗骨料含量较高时其抗变形能力则越强。

图 14(c)所示为 C-C-3 型级配盐岩集料在不同失水率下的无侧限抗压强度。随着失水率增加，盐岩集料基层无侧限抗压强度逐渐增加，盐分结晶及颗粒间自由水减少均有利于盐岩集料基层形成强度。此外，在最佳含卤水率下成型的盐岩集料在失水率为 75%时，无侧限抗压强度可达到 4.1 MPa，在《公路路面基层施工技术细则》[29]中中等交通条件下二



(a) 级配对无侧限抗压强度的影响 (b) 级配对回弹模量的影响 (c) 失水率对无侧限抗压强度的影响

图 14 盐岩集料基层力学性能

Fig.14 Mechanical properties of salt rock aggregate base

级公路基层要求水泥稳定材料 7 d 无侧限抗压强度为 2 MPa 以上。罗布泊湖心区表层盐岩的含卤水率一般为 1%～2%，在干旱盐湖区强蒸发及大风气候条件下，铺设盐岩集料基层在开放养护条件下能够快速失水并形成强度，可有效保障干盐湖区公路基层承载力。

6 结　论

（1）击实后各粒组盐岩集料均发生破碎，且初始粒径越大，粒组的盐岩集料级配变化越显著，随击实能量增加，破碎后盐岩集料级配趋于稳定。含卤水率增加会改变盐岩颗粒受力状态并有助于降低颗粒破碎程度。

（2）双对数坐标下破碎后盐岩集料级配的 Weibull 分布和分形分布拟合曲线均呈线性特征，推荐采用 Weibull 分布表征破碎后盐岩集料颗粒级配分布。各粒组盐岩集料颗粒破碎率并不完全一致，随击实能量增加，破碎程度参数 a 逐渐减小，而分布特性参数 b 则先增大后减小。

（3）构建了基于马尔科夫链及非线性规划求解的复杂粒组盐岩集料级配转移模型，形成了干盐湖区盐岩集料基层级配组成设计方法。推荐级配组成设计方法可有效反演盐岩集料基层初始预估级配。

（4）随含卤水率增加，盐岩集料干密度先增大后减小。盐岩集料间的卤水结晶有利于促进盐岩集料基层强度形成。失水率为 75%的盐岩集料无侧限抗压强度可达到 4.1 MPa，盐岩集料可用于干盐湖区公路基层。

参 考 文 献

[1] 张瑜, 马黎春, 王凯. 罗布泊干盐湖第四纪环境演变研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 149-164.
ZHANG Yu, MA Li-chun, WANG Kai. Research progress of quaternary environmental evolution in Lop Nur Playa[J]. **Advances in Earth Science**, 2022, 37(2): 149-164.

[2] ZHAO Z, WU J, YUAN G, et al. Hydrochemical investigation of shallow groundwater in northwest margin of Lop Nur, northwest China[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2016, 75(3): 214.

[3] 张华, 刘成林, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖区深部钾盐找矿: 理论、勘查、进展及前景分析[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2030-2040.
ZHANG Hua, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, et al. Deep potash deposits in the Lop Nur salt lake: theory, practice, exploration advances and prospecting[J]. **Acta Geologica Sinica**, 2021, 95(7): 2030-2040.

[4] 宋亮, 牛亮亮, 王朝辉, 等. 盐岩路基工程特性研究进展[J]. 公路工程, 2021, 46(6): 156-162.
SONG Liang, NIU Liang-liang, WANG Chao-hui, et al. Advances in engineering characteristics in salt rock subgrade[J]. **Highway Engineering**, 2021, 46(6): 156-162.

[5] 李国华, 陈浩宇, 宋亮, 等. 盐岩路基工程应用调查与评价[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(5): 24-29.
LI Guo-hua, CHEN Hao-yu, SONG Liang, et al. Investigation and evaluation of engineering application of carbonate rock subgrade[J]. **Road Machinery & Construction Mechanization**, 2020, 37(5): 24-29.

[6] 刘军勇, 任勇, 张留俊. 察尔汗盐湖地区盐渍土微观结构及其力学特性[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1277-1287.
LIU Jun-yong, REN Yong, ZHANG Liu-jun. The micro-structure of saline soil in Qarham salt lake and its mechanics characteristics[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2016, 12(5): 1277-1287.

[7] 冯忠居, 李维洲, 王廷武, 等. 新疆板块状盐渍土工程特性[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 1-8.
FENG Zhong-ju, LI Wei-zhou, WANG Ting-wu, et al. Engineering characteristics of plate-like saline soil in Xinjiang[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2010, 10(6): 1-8.

[8] 高宝林, 王进昌, 李勇. 青藏铁路察尔汗盐湖路基盐溶病害研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(5): 6-11, 17.
GAO Bao-lin, WANG Jin-chang, LI Yong. Research on the salt soluble disasters of saline lake subgrade along the Qinghai-Tibet railway in Chaerhan salt lake region[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2015, 32(5): 6-11, 17.

[9] 刘毅. 罗布泊地区粗粒盐渍土盐胀特性影响因素试验研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(2): 12-16.
LIU Yi. Experimental study on influence factors for salt expansion characteristics of coarse grained saline soil in Lop Nur region[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2014, 42(2): 12-16.

[10] 刘贺业, 李奋, 李登科. 罗布泊硫酸盐岩路基盐胀敏感区域研究[J]. 铁道建筑, 2017(2): 83-85.
LIU He-ye, LI Fen, LI Deng-ke. Study on salt expansion sensitive region of Lop Nur sulfate rock subgrade[J]. **Railway Engineering**, 2017(2): 83-85.

[11] GUYON E, TROADEC J P. Du sac de billes au tas desable[M]. France: Odile Jacob Science, 1994.
GUYON E, TROADEC J P. From a bag of marbles to a pile of sand[M]. France: Odile Jacob Science, 1994.

[12] 孟敏强, 王磊, 蒋翔, 等. 基于尺寸效应的粗粒土单颗粒破碎试验及数值模拟[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2953-2962.

MENG Min-qiang, WANG Lei, JIANG Xiang, et al. Single-particle crushing test and numerical simulation of coarse grained soil based on size effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 2953-2962.

[13] 丁林楠, 李国英. 基于分形级配方程的堆石料颗粒破碎 SBG 模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 264-270.
DING Lin-nan, LI Guo-ying. SBG model for particle breakage of rockfills based on fractal gradation equation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(2): 264-270.

[14] 朱俊高, 郭万里, 王元龙, 等. 连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1931-1936.
ZHU Jun-gao, GUO Wan-li, WANG Yuan-long, et al. Equation for soil gradation curve and its applicability[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(10): 1931-1936.

[15] 董宗磊, 童晨曦, 张升, 等. 粗粒土颗粒破碎的级配转移矩阵研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1504-1512.
DONG Zong-lei, TONG Chen-xi, ZHANG Sheng, et al. Study on breakage transition matrix of granular soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(7): 1504-1512.

[16] LIN L, LI S, SUN L, et al. Evolution of particle size distribution for carbonate sand under impact load[J]. **Powder Technology**, 2020, 376(4): 549-564.

[17] ZHAO F X, CHI S. Characteristics of particle breakage and constitutive model of coarse granular material incorporating gradation evolution[J]. **Géotechnique**, 2022: 1-14.

[18] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2007, 55: 1274-1297.

[19] 张宗堂, 高文华, 张志敏, 等. 基于 Weibull 分布的红砂岩颗粒崩解破碎演化规律[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 877-885.
ZHANG Zong-tang, GAO Wen-hua, ZHANG Zhi-min, et al. Evolution of particle disintegration of red sandstone using Weibull distribution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 877-885.

[20] 周强, 潘永泰, 朱长勇, 等. 准静态下脆性材料强度分布试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 2): 708-716.
ZHOU Qiang, PAN Yong-tai, ZHU Chang-yong, et al. Experimental research on strength distribution of brittle materials under quasi-static condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(Suppl.2): 708-716.

[21] NAKATA Y, HYODO M, HYDE A F L, et al. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression[J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(1): 69-82.

[22] MCDOWELL G R. On the yielding and plastic compression of sand[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(1): 139-145.

[23] 童晨曦, 张升, 李希, 等. 基于 Markov 链的岩土材料颗粒破碎演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 870-877.
TONG Chen-xi, ZHANG Sheng, LI Xi, et al. Evolution of geotechnical materials based on Markov chain considering particle crushing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(5): 870-877.

[24] WANG H L, CUI Y J, CHEN R P. Investigation on the mechanical behavior of track-bed materials at various contents of coarse grains[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 164: 228-237.

[25] 谭忆秋, 邢超, 任俊达, 等. 基于颗粒堆积理论的沥青混合料细观结构特性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 1-8.
TAN Yi-qiu, XING Chao, REN Jun-da, et al. Research on mesostructured characteristics of asphalt mixture based on particle packing theory[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2017, 30(7): 1-8.

[26] 曹策. 中欧铁路普氏击实试验标准对比研究[J]. 铁道标准设, 2023, 67(4): 152-158.
CAO Ce. Comparative study on the Proctor compaction test between Chinese and European railway standards[J]. **Railway Standard Design**, 2023, 67(4): 152-158.

[27] 交通运输部公路科学研究院. JTG 3430－2020 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG 3430－2020 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.

[28] 交通运输部公路科学研究院. JTG E51－2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E51－2009 Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[29] 交通运输部公路科学研究院. JTG/T F20－2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG/T F20－2015 Technical guidelines for construction of highway roadbases[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[30] MANSO J, MARCELINO J, CALDEIRA L. Single-particle crushing strength under different relative humidity conditions[J]. **Acta Geotechnica**, 2021, 16(3): 749-761.