

田 源,牛冬瑜.铣刨料掺量及掺配方式对再生水稳碎石路用性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(4):39-49.

TIAN Yuan,NIU Dong-yu. Effect of milling material content and blending method on road performance of regeneration cement stabilized gravel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(4): 39-49.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.04.004

## 铣刨料掺量及掺配方式对再生水稳碎石路用性能的影响

田 源<sup>1</sup>,牛冬瑜<sup>2</sup>

(1. 长安大学 西安长大资产经营有限公司,陕西 西安 710064;

2. 长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710061)

**摘 要:**为了研究铣刨料掺配方式、铣刨料粒径对再生水稳碎石路用性能的影响,基于铣刨料的物理力学性能和筛分试验结果,采用整体掺配和分档掺配的级配设计方法,设计了 13 组不同铣刨料掺量和掺配方式的级配方案,开展击实试验和路用性能试验,分析 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度、28 d 干缩性能、28 d 抗冲刷性能,研究铣刨料掺量及掺配方式对再生水稳碎石路用性能的影响。试验结果表明:铣刨料掺量越高,其最佳含水率越大,最大干密度越小,再生水稳碎石的空隙率大于普通水稳碎石;随着铣刨料掺量的增加,再生水稳碎石的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度降低,28 d 干缩系数、冲刷质量损失率均增大。采用整体掺配时,全再生水稳碎石(铣刨料掺量为 100%,质量分数,下同)的 7 d 抗压强度比普通水稳碎石(铣刨料掺量为 0%)降低了 16.3%,28 d 劈裂强度降低了 25%,28 d 干缩系数增大了 16.4%,冲刷质量损失率增大了 62.3%。铣刨料的掺配方式对再生水稳碎石的路用性能影响较大,用天然碎石取代铣刨料时,取代粒径越小,其抗压强度、劈裂强度、干缩系数越小,冲刷质量损失率越大。铣刨料掺量为 75%时,用天然碎石替代 20~30 mm 的铣刨料后,分档掺配的再生水稳碎石(F75-30)的 7 d 抗压强度比整体掺配的再生水稳碎石(XT-75)增大了 4.8%、28 d 劈裂强度增大了 4.4%、冲刷质量损失率降低了 4.6%,干缩系数增大了 3%;用天然碎石替代 0~5 mm 的铣刨料后,则分别降低了 4.1%、3%、-2.3%、2.5%。

**关键词:**道路工程;再生水稳碎石;铣刨料;级配设计;路用性能

**中图分类号:**U416.214

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-8879(2020)04-0039-11

### Effect of milling material content and blending method on road performance of regeneration cement stabilized gravel

TIAN Yuan<sup>1</sup>, NIU Dong-yu<sup>2</sup>

(1. Xi'an Changda Asset Management Co., Ltd., Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

收稿日期:2020-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51608045)

作者简介:田 源(1986-),男,陕西富平人,工程师,E-mail:tianyuan@chd.edu.cn。

通讯作者:牛冬瑜(1984-),男,陕西西安人,副教授,工学博士,E-mail:niudongyu\_1984@163.com。

**Abstract:** In order to study the influence of milling planer mixing method and milling planer particle size on the stability of regeneration cement gravel road, 13 groups of grading with different milling materials and different blending methods, using the grading design method of overall blending and grading blending based on the physical and mechanical properties of milling materials and screening test were studied. Through 7 d compressive strength test, 28 d splitting strength test, 28 d dry shrinkage performance test and 28 d anti scour performance test, the influence of milling material content and mixing mode on the road performance of recycled cement stabilized macadam was analysed. The results show that the higher the content of milling material is, the greater the optimum moisture content and the smaller the maximum dry density is, and the void ratio of recycled cement stabilized macadam is much higher than that of ordinary cement stabilized macadam. With the increase of milling material content, the 7 d compressive strength and 28 d cleavage strength of recycled cement stabilized macadam decrease, the 28 d dry shrinkage coefficient and the erosion quality loss rate increase. When the whole mixture is used, the 7 d compressive strength of the fully recycled cement stabilized macadam (the amount of milling material is 100%, mass fraction, the same below) is 16.3% lower than that of the common cement stabilized macadam (the amount of milling material is 0%), the 28 d splitting strength reduces by 25%, while the 28 d dry shrinkage coefficient is 16.4% higher, and the erosion mass loss rate increases by 62.3%. The mixing method of milling materials has a great influence on the road performance of recycled cement stabilized macadam. When natural macadam is used to replace milling materials, the smaller the replacement particle size is, the smaller the compressive strength, splitting strength and dry shrinkage coefficients are, and the greater the loss rate of scouring quality is. When the milling material content is 75%, after replacing the 20 to 30 mm milling material with natural crushed stone. The 7 d compressive strength of graded recycled water stabilized crushed stone (F75-30) is increased by 4.8%, compared with the whole mixed recycled water stabilized crushed stone (XT-75), the 28 d splitting strength increases by 4.4%, the erosion mass loss rate decreases by 4.6%, and the dry shrinkage coefficient increases by 3%, after replacing the 0 to 5 mm milling material with the natural macadam, that are 4.1%, 3%, -2.3%, 2.5%. 6 tabs, 11 figs, 26 refs.

**Key words:** road engineering; regeneration cement stabilized gravel; milling material; gradation design; road performance

## 0 引 言

将水稳碎石基层铣刨料再次应用于水稳碎石基层中,可以节约优质石料资源、保护自然环境,降低工程成本。但铣刨料具有压碎值大、吸水率高、级配较差等特点,导致再生水稳碎石的路用性能较差,进而限制了铣刨料的实际应用<sup>[1-3]</sup>。

铣刨料的集料性质和掺量对再生水稳碎石的路用性能具有较大影响。Wang 等研究表明,在一定范围内,随着再生料掺量的增加,混合料的最佳含水率增大,但最大干密度和干缩应变减小,合理掺量的再生骨料有利于提高水泥稳定碎石的路用性能<sup>[4]</sup>。Grassl 等研究发现,粗集料特性对水泥稳

定碎石的整体收缩有较大的影响<sup>[5-6]</sup>。侯月琴对不同再生集料掺量的再生水稳碎石的强度、刚度、疲劳性能进行了测试,研究结果表明:再生水稳碎石的抗压强度、劈裂强度、弯拉强度均随龄期增长成非线性变化,并构建了强度增长方程和疲劳方程<sup>[7]</sup>。胡力群等将建筑垃圾按照掺量(质量分数,下同)20%、40%、60%、80%、100%分别代替粗集料、细集料,进行路用性能试验,研究结果表明,建筑垃圾的粗集料替代率不宜高于70%,细集料替代率不宜超过90%<sup>[8]</sup>。总体而言,铣刨料具有压碎值大、吸水率高等特点,随着铣刨料掺量的增大,再生水稳碎石的路用性能逐渐降低。

再生水稳碎石的级配及铣刨料的掺配方式对其

路用性能也有显著的影响。胡忠辉通过研究指出,再生混凝土的物理力学性能满足规范要求,再生集料的各项性能指标随粒径变化较大,增大再生水稳碎石的最大粒径可以明显提高其抗收缩性能<sup>[9]</sup>。李明等研究表明,适当减少水泥用量、粗集料面积占比,采用合适的粗集料最大粒径和级配,并将水泥稳定碎石充分压实,可显著改善水泥稳定碎石的温缩抗裂性能<sup>[10]</sup>。苗乾等采用分档掺配的方式进行水泥稳定碎石级配设计,发现当 20~30 mm 的建筑垃圾掺量为 0%,0~5 mm 的建筑垃圾掺量为 100%,10~30 mm 的天然碎石作为骨架结构时,水泥稳定再生混合料的力学性能最佳<sup>[11]</sup>。White 等认为,铣刨料筛分级配无法反映其级配的真实情况,旧水泥水化产物黏附在集料上,增加了铣刨料筛分试验的误差<sup>[12]</sup>。马在宏等研究表明,基层铣刨料表面存在大量的水泥水化产物,比表面积较大,对再生水稳碎石的实际级配有较大的影响,应采用振动磨耗的室内模拟方式确定再生水稳碎石的级配<sup>[13]</sup>。铣刨料压碎值较大、集料表面杂质较多,导致成型试件后再生水稳碎石的级配失真,细集料含量较高。增大粗集料的粒径或含量,或采用分档掺配等方式改善再生水稳碎石的实际级配,对改善再生水稳碎石路用性能具有积极的意义。

表 1 集料物理力学性能测试结果

Tab. 1 Test results of physical and mechanical properties of aggregates

级配分档	20~30 mm		10~20 mm		5~10 mm		0~5 mm	
	铣刨料	碎石	铣刨料	碎石	铣刨料	碎石	铣刨料	碎石
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.69	2.78	2.63	2.74	2.57	2.73	2.53	2.71
吸水率/%	3.51	0.96	3.92	1.09	4.26	1.26	4.51	1.47
针片状含量/%	15.10	18.30	13.50	16.20	5.60	7.10		
含泥量/%	0.84	0.69	0.94	0.73	0.99	0.82	1.26	0.86

图 1 为铣刨料外观形貌。铣刨料表面裹覆着水泥砂浆等杂质,因水泥砂浆的密度小、吸水率大、抵抗荷载的能力低,造成铣刨料表观密度较小,压碎值较大,吸水率较高;但水泥砂浆对铣刨料的裹覆也降低了其针片状含量。

铣刨料和天然碎石的分档筛分试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,由于铣刨破碎不充分,约有 4.7% 的铣刨料粒径大于 31.5 mm,超过规范要求的高速公路水稳碎石基层最大粒径,这是铣刨工艺不足造成的,在进行室内试验时,需要将超粒径铣刨料筛掉,重新调整级配。

目前,关于铣刨料物理力学性能、铣刨料掺量、级配对再生水稳碎石路用性能影响的研究较多,但铣刨料掺配方式、铣刨料粒径对其影响的研究较少<sup>[14-15]</sup>。不同粒径的铣刨料具有不同的物理力学性能,因此,将铣刨料与天然碎石按照不同粒径进行分档掺配会对再生水稳碎石的路用性能造成不同程度的影响<sup>[16-17]</sup>。本文采用整体掺配和分档掺配的方式,设计了不同铣刨料掺量和不同掺配方式的 13 种级配,研究铣刨料掺量和掺配方式对再生水稳碎石路用性能的影响,以期采用分档掺配的级配设计方法提高铣刨料的掺量,改善再生水稳碎石的路用性能。

## 1 试验原材料与方案

### 1.1 原材料

水泥为陕西耀县产普通硅酸盐水泥 42.5,铣刨料来源于黄延(黄陵—延安)高速公路水稳碎石基层,铣刨料和天然碎石的物理力学性能测试结果如表 1 所示。其中,铣刨料的压碎值为 24.9、碎石的压碎值为 11.3(测试其粒径范围 9.5~13.2 mm)。由表 1 可知,铣刨料表观密度较小,压碎值较大,吸水率较高、含泥量较大,但针片状含量较小,其技术指标均能满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)要求。



图 1 水稳碎石基层铣刨料

Fig. 1 Cement stabilized gravel base for milling and planing

表 2 铣刨料和天然碎石的筛分试验结果

Tab. 2 Sieve test results of milling and natural gravel

级配分档		20~30 mm		10~20 mm		5~10 mm		0~5 mm		铣刨料 混合料
		铣刨料	碎石	铣刨料	碎石	铣刨料	碎石	铣刨料	碎石	
不同筛孔孔径 (mm) 下的通 过率/%	31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.3
	26.5	70.0	69.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	91.7
	19	12.0	13.3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	76.9
	16	1.0		83.5	82.6	100.0	100.0	100.0	100.0	68.6
	13.2			59.7	56.1	100.0	100.0	100.0	100.0	60.4
	9.5			11.2	11.7	100.0	100.0	100.0	100.0	48.4
	4.75			0.6	0.7	10.3	11.8	100.0	100.0	31.1
	2.36					0.5	0.8	75.1	70.0	20.9
	1.18							53.0	52.2	15.1
	0.6							41.7	40.2	11.8
	0.3							27.2	26.1	8.6
	0.15							12.9	11.8	4.8
	0.075							6.6	5.9	1.9

## 1.2 试验方案

基于不同铣刨料掺量和铣刨料掺配方式,进行再生水稳碎石的级配设计,并通过击实试验确定再生水稳碎石配合比。通过 7 d 抗压强度试验、28 d 劈裂强度试验、28 d 干缩抗裂性能试验、28 d 抗冲刷性能试验,研究铣刨料掺量和掺配方式对再生水稳碎石路用性能的影响。水稳碎石混合料的成型、养生及混合料抗压强度、劈裂强度、干缩系数、冲刷质量损失率的测试方法均参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)。

采用静压法成型试件,抗压强度试验、劈裂强度试验采用直径、高均为 150 mm 的圆柱形试件,测试所用仪器为无锡建仪仪器机械有限公司生产的 TYE-2000B 型压力试验机,劈裂条的弧长为 2 cm,长度为 15 cm。干缩性能试验试件尺寸为 100 mm (长)×100 mm (宽)×400 mm (高),干缩应变测量仪器为立式支架及千分表。抗冲刷性能试验采用直径、高均为 150 mm 圆柱形试件,测试仪器为 SANS CMT5105 型万能试验机,冲刷时间为 30 min,冲刷荷载为 0.5 MPa,冲刷频率为 10 Hz。

图 2 为圆柱形试件,图 3 为抗压强度测试。

## 2 再生水稳碎石混合料组成设计

### 2.1 铣刨料掺量及掺配方式选取

考虑到铣刨料压碎值较大,成型试件后,大量的铣刨料被压碎,导致再生水稳碎石中细集料含量增大,再生水稳碎石的设计级配与实际级配差异较大,且铣刨料的最大粒径较大。因此,再生水稳碎石的



图 2 再生水稳碎石试件

Fig. 2 Regeneration cement stabilized macadam specimen

设计级配参考《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)推荐的细集料含量低、最大粒径大的 CB-3 级配。为了研究铣刨料掺量及掺配方式对再生水稳碎石路用性能的影响,将铣刨料和天然碎石分为 0~5、5~10、10~20、20~30 mm 四档,取铣刨料掺量为 0%、25%、50%、75%、100%,掺配方式为整体掺配(分别将全再生水稳碎石和普通水稳碎石的级配调好后,再按照比例进行掺配)和分档掺配(分别将各档集料中铣刨料和天然碎石的比例调好后,再按照设计级配进行掺配)。

13 组级配中,各档集料的掺配比例如表 3 所示。其中,XT-0、XT-25、XT-50、XT-75、XT-100 为整体掺配,铣刨料掺量为 0%、25%、50%、75%、100%。F75-30、F75-20、F75-10、F75-5 为分档掺配,铣刨料的总掺量为 75%。F50-30、F50-20、F50-10、F50-5 为分档掺配,铣刨料的总掺量为 50%。



图 3 抗压强度的测试

Fig. 3 Test of compressive strength

整体掺配方式下,不同铣刨料掺量再生水稳碎

石的级配如表 4 所示。分档掺配方式下,再生水稳碎石的级配如表 5 所示。

2.2 击实试验结果及分析

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定,水稳碎石基层的水泥掺量宜控制在 3.5%~6%,本文参考规范及国内外研究成果,取水泥掺量为 4.5%(外掺法)。参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)进行击实试验,试验结果如表 6 所示。

由表 6 可知,铣刨料掺量越高,其最佳含水率越大,最大干密度越小。铣刨料的密度与天然集料的密度差异较小,但水稳碎石混合料最大干密度的差异却很大,这表明再生水稳碎石的空隙率远大于普通水稳碎石。

3 再生水稳碎石路用性能试验

3.1 力学性能试验

再生水稳碎石的力学性能试验结果如图 4~图 6 所示。

表 3 铣刨料掺配方式及再生水稳碎石级配编号

Tab. 3 Milling planer mixing method and grade number of recycled cement stabilized macadam

级配编号	各档集料(mm)的掺配比例/%								铣刨料 掺量/%
	铣刨料				天然碎石				
	20~30	10~20	5~10	0~5	20~30	10~20	5~10	0~5	
XT-0					25.00	30.00	17.00	28.00	0
XT-25	6.00	7.25	5.00	6.75	18.75	22.50	12.75	21.00	25
XT-50	12.00	14.50	10.00	13.50	12.50	15.00	8.50	14.00	50
XT-75	18.00	21.75	15.00	20.25	6.25	7.50	4.25	7.00	75
XT-100	24.00	29.00	20.00	27.00					100
F75-30		28.00	20.00	27.00	24.00	1.00			75
F75-20	24.00	4.00	20.00	27.00		25.00			75
F75-10	24.00	24.00		27.00		5.00	20.00		75
F75-5	24.00	29.00	20.00	2.00				25.00	75
F50-30		3.00	20.00	27.00	24.00	26.00			50
F50-20	23.00			27.00	1.00	29.00	20.00		50
F50-10	24.00	26.00				3.00	20.00	27.00	50
F50-5	1.00	29.00	20.00		23.00			27.00	50

由图 4~图 6 可知:随着铣刨料掺量的增加,再生水稳碎石的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度均呈现逐渐降低的趋势;全再生水稳碎石(XT-100)的 7 d 抗压强度比普通水稳碎石(XT-0)降低了 16.3%,28 d 劈裂强度降低了 25%。这是因为铣刨料的压碎值较大,无法形成嵌挤的骨架密实结构,从而降低了再生水稳碎石的力学性能。

铣刨料掺量相同时,铣刨料的掺配方式对再生

水稳碎石抗压强度、劈裂强度有着较大的影响。采用整体掺配时,75%铣刨料掺量再生水稳碎石(XT-75)仅比全再生水稳碎石(XT-100)的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度增大了 5.3%、7.9%;而采用分档掺配时,用天然碎石替代 20~30 mm 的铣刨料的再生水稳碎石(F75-30)比全再生水稳碎石(XT-100)的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度分别增大了 10.3%、12.7%。当铣刨料掺量相同时,采用分档掺配可以

表 4 不同铣刨料掺量再生水稳碎石的级配

Tab. 4 Gradations of recycled cement stabilized macadam with different milling material contents

级配分档		铣刨料掺量/%					中值	上限	下限
		0	25	50	75	100			
不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%	31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0			
	26.5	92.0	92.2	92.4	92.6	92.8			
	19	78.3	78.5	78.6	78.7	78.9	77.0	86.0	68.0
	16	69.0	69.6	70.3	70.9	71.5			
	13.2	61.0	61.8	62.7	63.5	64.3			
	9.5	48.5	49.0	49.4	49.8	50.3	48.0	58.0	38.0
	4.75	30.4	30.1	29.9	29.6	29.3	27.0	32.0	22.0
	2.36	19.7	20.0	20.2	20.4	20.6	22.0	28.0	16.0
	1.18	14.6	14.6	14.5	14.4	14.3			
	0.6	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.5	15.0	8.0
	0.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4			
	0.15	3.3	3.4	3.4	3.4	3.5			
	0.075	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.5	3.0	0.0

表 5 采用分档掺配的再生水稳碎石级配

Tab. 5 Gradations of mixed recycled cement stabilized macadam which used grading

级配分档		铣刨料掺量 75%时				铣刨料掺量 50%时				规范中值
		20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm	0~5 mm	20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm	0~5 mm	
不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%	31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	26.5	92.3	92.8	92.8	92.8	92.3	92.8	92.8	92.8	
	19	79.2	78.9	78.9	78.9	79.2	78.9	78.9	78.9	77.0
	16	71.2	70.6	71.3	71.5	70.3	70.5	71.4	70.5	
	13.2	64.3	62.7	64.0	64.3	62.7	62.5	64.2	62.5	
	9.5	50.3	50.4	50.3	50.3	50.4	50.4	50.3	50.4	48.0
	4.75	29.3	29.3	29.8	29.3	29.3	29.8	29.8	29.8	27.0
	2.36	20.6	20.6	20.7	19.1	20.6	20.7	19.1	20.7	22.0
	1.18	14.3	14.3	14.3	14.1	14.3	14.3	14.1	14.3	
	0.6	11.2	11.2	11.2	10.9	11.2	11.2	10.8	11.2	11.5
	0.3	7.4	7.4	7.4	7.1	7.4	7.4	7.1	7.4	
	0.15	3.5	3.5	3.5	3.2	3.5	3.5	3.2	3.5	
	0.075	1.8	1.8	1.8	1.6	1.8	1.8	1.6	1.8	1.5

提高再生水稳碎石的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度。分档掺配时,某粒径范围内的集料全部采用天然碎石,使得集料的性质更加均匀,从而提升其抗压及劈裂强度<sup>[18-22]</sup>。

由图 5、图 6 可知:铣刨料总掺量为 75%时,随着天然碎石替代粒径的减小,再生水稳碎石的抗压强度、劈裂强度逐渐减小,当用天然碎石替代 20~30 mm 的铣刨料时,再生水稳碎石的强度最高;当用天然碎石替代 0~5 mm 的铣刨料时,再生水稳碎石的强度最低。与 XT-75 相比,F75-30 再生水稳碎石的 7 d 抗压强度增大了 4.8%,28 d 劈裂强度增大了 4.4%;F75-5 再生水稳碎石的 7 d 抗压强度降低了 4.1%,28 d 劈裂强度降低了 3%。可见,天然碎

石替代粒径越大,对再生水稳碎石强度的影响越显著。当采用较大粒径天然碎石替换铣刨料时,天然碎石在结构中形成骨架作用,对其强度的提升作用也较大,而采用较小粒径天然碎石替换铣刨料时,天然碎石在结构中起到填充密实的作用,对强度的影响较小。

铣刨料总掺量为 50%时,铣刨料掺配方式对再生水稳碎石的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度也具有较大的影响,F50-30 再生水稳碎石的 7 d 抗压强度、28 d 劈裂强度比 XT-50 再生水稳碎石增大了 2.2%、4.1%。再生水稳碎石的抗压强度、劈裂强度也随着天然碎石替代粒径的减小而逐渐减小。



表 6 击实试验结果  
Tab. 6 Compaction test results

级配编号		最佳含水率/%	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
整体掺配	XT-0	4.9	2.38
	XT-25	6.2	2.29
	XT-50	7.0	2.19
	XT-75	8.1	2.11
	XT-100	9.3	2.03
铣刨料掺量 75%	F75-30	8.2	2.08
	F75-20	8.2	2.09
	F75-10	8.0	2.11
	F75-5	7.9	2.12
铣刨料掺量 50%	F50-30	7.4	2.18
	F50-20	7.2	2.20
	F50-10	6.7	2.23
	F50-5	6.9	2.21

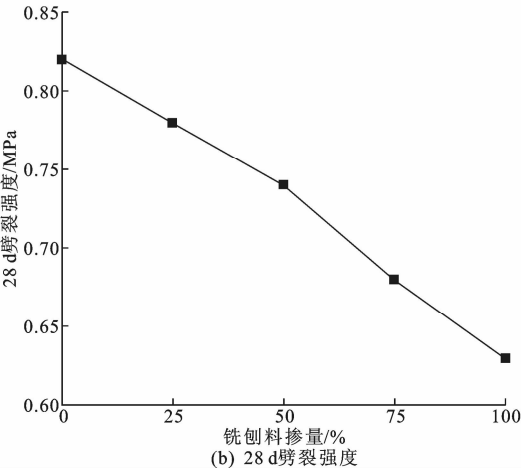
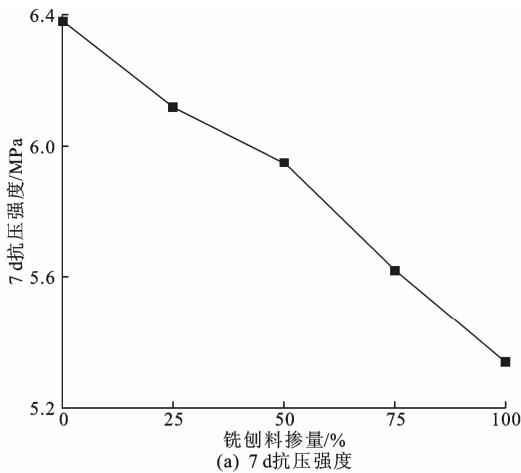


图 4 再生水稳碎石强度随铣刨料掺量的变化趋势  
Fig. 4 Tendency of strength varies with contents of milling material of recycled cement stabilized macadam

3.2 干缩抗裂性能试验

干缩抗裂性能试验结果如图 7~图 9 所示。  
由图 7 可知,再生水稳碎石的干缩系数随着

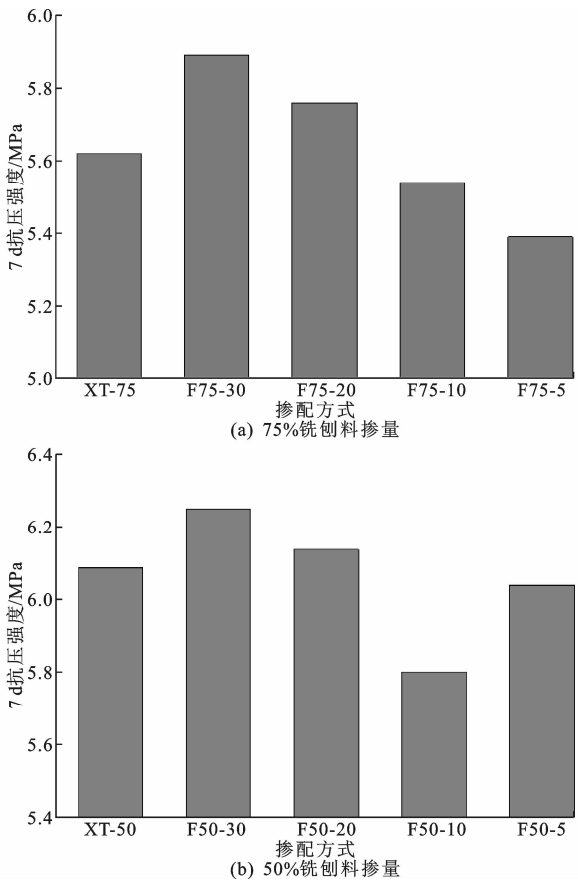


图 5 分档掺配对 7 d 抗压强度的影响  
Fig. 5 Influence of graded blending on 7 d compressive strengths

铣刨料掺量的增大而增大,刨料掺入对再生水稳碎石的干缩抗裂性能有不利的影响,这是因为铣刨料的吸水率较高,且表面有较多的水泥砂浆颗粒,导致再生水稳碎石的失水率较大,进而增大了其干缩系数。

由图 8 可知,全再生水稳碎石(XT-100)和普通水稳碎石(XT-0)的干缩系数均随着龄期的增长而增大,但普通水稳碎石的干缩系数增长较平稳,而全再生水稳碎石干缩系数增长波动较大。这与铣刨料的吸水率较大、且含有较多水泥砂浆颗粒等杂质有关。全再生水稳碎石的 28 d 干缩系数较普通水稳碎石增大了 16.4%。

由图 9 可知,铣刨料总掺量相同时,铣刨料的掺配方式对再生水稳碎石的干缩系数有较大的影响。用天然碎石取代 25%的铣刨料时,取代粒径越小,再生水稳碎石的干缩系数越小,其干缩抗裂性能越好,与 XT-75 相比,F75-5 再生水稳碎石的 28 d 干缩系数降低了 2.5%,F75-30 再生水稳碎石则增大了 3%。天然碎石的吸水率较小且表面无吸水性杂质,降低了再生水稳碎石的失水率;此外,铣刨料粒

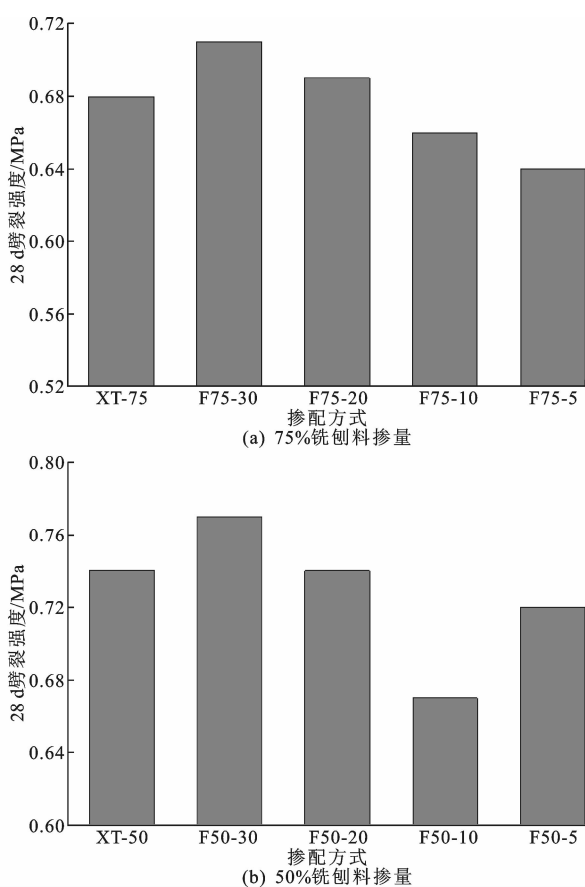


图6 分档掺配对28 d劈裂强度的影响

Fig. 6 Influence of graded blending on 28 d split strengths

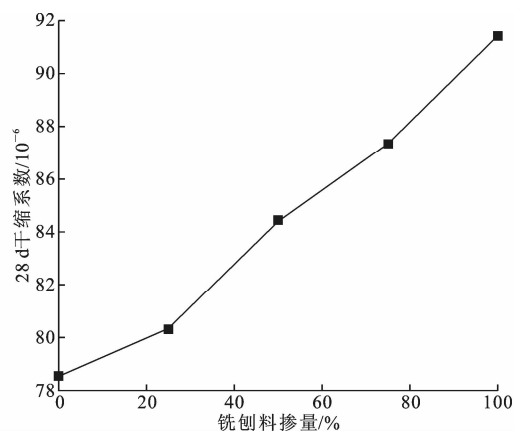


图7 28 d干缩系数随铣刨料掺量的变化

Fig. 7 Changes of 28 d dry shrinkage coefficients with milling planer contents

径越小,吸水率越高,因此当吸水率最高的0~5 mm 铣刨料被天然碎石取代后,对应的F75-5 再生水稳碎石的干缩抗裂性能最好。铣刨料整体掺量为50%时,铣刨料掺配方式对再生水稳碎石的28 d 干缩系数也有较大的影响,当用天然碎石替代0~5、5~10 mm 铣刨料时,再生水稳碎石的干缩抗裂性能最佳。

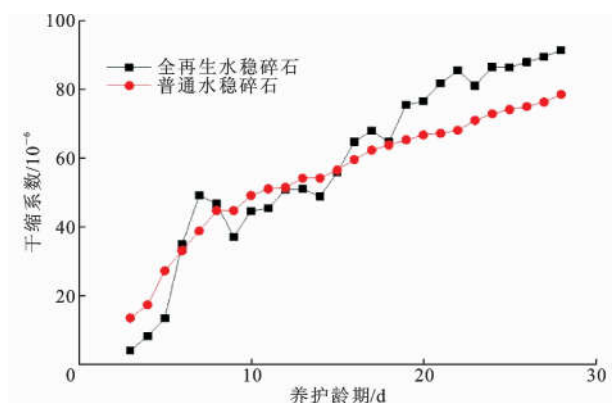


图8 干缩系数随养护龄期的变化

Fig. 8 Variations of dry shrinkage coefficients with curing ages

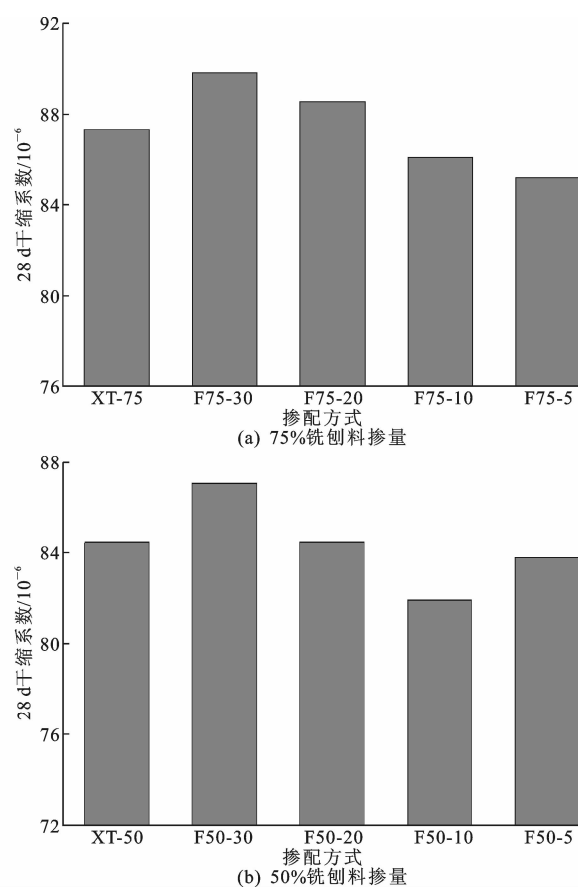


图9 分档掺配对28 d干缩系数的影响

Fig. 9 Influence of graded blending on dry shrinkage coefficients of 28 d mixed grade

### 3.3 抗冲刷性能试验

抗冲刷性能试验结果如图10、图11所示。

由图10可知,随着铣刨料掺量的增加,再生水稳碎石的冲刷质量损失率逐渐增大。XT-100 全再生水稳碎石的冲刷质量损失率较XT-0 普通水稳碎石增大了62.3%。这是由于再生水稳碎石混合料中细集料含量偏高,再生混合料的冲刷损失质量增大。



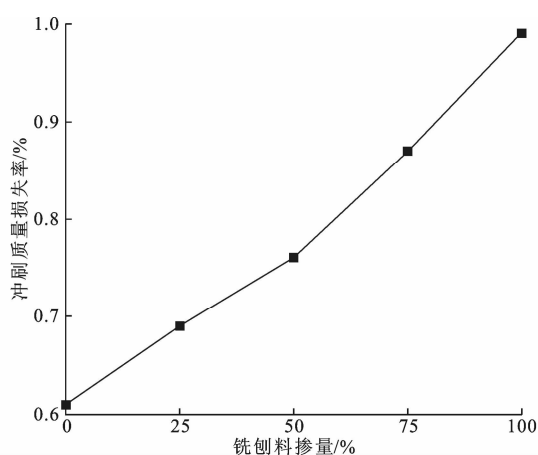


图10 冲刷质量损失率随铣刨料掺量变化趋势

Fig. 10 Variation trends of erosion quality loss rates with milling planer contents

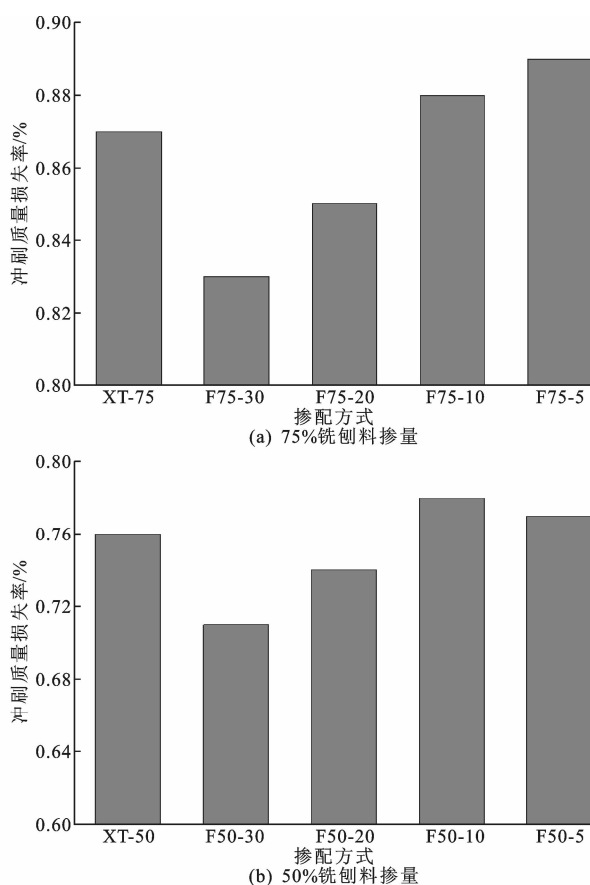


图11 分档掺配对冲刷质量损失率的影响

Fig. 11 Influence of graded blending on erosion quality loss rates of graded blending

由图11可知,铣刨料整体掺量相同时,铣刨料的掺配方式对再生水稳碎石的抗冲刷性能有较大的影响。用天然碎石取代铣刨料时,取代粒径越小,再生水稳碎石的抗冲刷性能越差,与XT-75相比,F75-5再生水稳碎石的冲刷质量损失率增大了3.4%,F75-30则降低了4.6%;F50-30再生水

稳碎石的冲刷质量损失率较XT-50降低了6.6%。用天然碎石替代粗铣刨料时,混合料中细集料的含量偏小,降低了受“泵吸作用”而冲刷掉的细集料质量,增强了再生水稳碎石的抗冲刷性能<sup>[23-26]</sup>。用天然碎石取代铣刨料时,取代粒径越小,对再生水稳碎石的抗冲刷性能的提升效果越差。

## 4 结 语

(1)铣刨料掺量越高,其最大干密度越小,设计级配相同时,再生水稳碎石的密实度低于普通水稳碎石。

(2)随着铣刨料掺量增加,再生水稳碎石的7 d抗压强度、28 d劈裂强度降低,28 d干缩系数、冲刷质量损失率均增大。与普通水稳碎石(XT-0)相比,全再生水稳碎石(XT-100)的7 d抗压强度降低了16.3%,28 d劈裂强度降低了25%,28 d干缩系数增大了16.4%,冲刷质量损失率增大了62.3%。

(3)铣刨料掺量相同时,采用分档掺配的方式可以提高再生水稳碎石的路用性能。与XT-75相比,F75-30再生水稳碎石的7 d抗压强度增大了4.8%、28 d劈裂强度增大了4.4%、28 d干缩系数增大了3%,冲刷质量损失率降低了4.6%。

(4)随着铣刨料整体掺量的增大,再生水稳碎石的路用性能逐渐下降;用天然碎石取代铣刨料时,随着取代粒径的减小,再生水稳碎石的力学性能、抗冲刷性能逐渐降低,干缩性能逐渐提高。铣刨料整体掺量为50%,采用10~20,20~30 mm天然碎石替代铣刨料时,再生水稳碎石的路用性能最优。

(5)在进行再生水稳碎石级配设计时,应当尽量降低铣刨料细集料的含量,保证混合料中有足够的粗骨料形成骨架;在保证再生水稳碎石路用性能的情况下,可以通过分档掺配的方式提高铣刨料掺量,提高铣刨料的利用率。

(6)本文对集料粒径及集料特性对混合料路用性能的影响机理研究不够深入,下一步可结合SEM、CT等微观试验手段,揭示集料特性及集料粒径对混合料路用性能的影响;并针对再生水稳碎石的弹性模量、温缩性能、疲劳性能、抗冻性能等开展研究。

## 参考文献:

## References:

[1] 王婷源. 废旧道路材料混合再生基层材料力学性能研

- 究[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(2): 92-96.
- WANG Ting-hao. Study on material mechanical properties of waste road material mixing regeneration substratum[J]. Journal of Gansu Science, 2019, 31(2): 92-96.
- [2] 肖杰, 吴超凡, 湛哲宏, 等. 水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 25-32.
- XIAO Jie, WU Chao-fan, ZHAN Zhe-hong, et al. Research on performances of cement stabilized brick and concrete recycled aggregate base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 25-32.
- [3] 陈强. 基于旧水泥混凝土再生集料的耐久性半刚性基层性能及设计参数的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- CHEN Qiang. Research on the application of semi-rigid base performance and design parameters based on the durability of the recycled aggregate of the old cement concrete[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [4] WANG H F, LIU H Y, XIAO Z R. Experimental study of recycled concrete aggregate for cement-stabilized macadam[J]. Advanced Materials Research, 2011, 250(4): 3502-3505.
- [5] GRASSL P, WONG H S, BUENFEKL N R. Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar[J]. Cement & Concrete Research, 2010, 40(1): 85-93.
- [6] MARUYAMA I, SASANO H, LIN M. Impact of aggregate properties on the development of shrinkage-induced cracking in concrete under restraint conditions[J]. Cement & Concrete Research, 2016, 85: 82-10.
- [7] 侯月琴. 水泥混凝土再生集料在沥青路面中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- HOU Yue-qin. Research on application of recycled cement concrete aggregate in asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [8] 胡力群, 沙爱民. 水泥稳定废粘土砖再生集料基层材料性能试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 73-79, 86.
- HU Li-qun, SHA Ai-min. Performance test of recycled aggregate base material of cement stabilized waste clay brick[J]. Journal of China Highway and Transport, 2012, 25(3): 73-79, 86.
- [9] 胡忠辉. 大粒径再生集料水泥稳定碎石基层性能试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.
- HU Zhong-hui. Experimental study on properties of pavement base course using cement stabilized large-sized recycled concrete aggregate[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016.
- [10] 李明, 李昶, 刘继华, 等. 粗集料及界面特性对水泥稳定碎石温缩抗裂性能影响性分析[J]. 公路, 2019, 64(10): 1-7.
- LI Ming, LI Chang, LIU Ji-hua, et al. Analysis of the influence of coarse aggregate and interface characteristics on the temperature shrinkage cracking resistance of cement stabilized macadam[J]. Highway, 2019, 64(10): 1-7.
- [11] 苗乾, 魏连雨, 周卫峰, 等. 成型方式对水泥再生混合料性能影响分析[J]. 中外公路, 2011, 31(2): 246-248.
- MIAO Qian, WEI Lian-yu, ZHOU Wei-feng, et al. Analysis of influence of molding method on performance of cement recycled mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(2): 246-248.
- [12] WHITE D J, VENNAPUSA P. Optimizing pavement base, subbase, and subgrade layers for cost and performance of local roads[J]. Pavement Design, 2014, 69(5): 77-89.
- [13] 马在宏, 李豪, 卢勇, 等. 水泥就地冷再生基层铣刨料性状特征和级配影响因素研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 263-268.
- MA Zai-hong, LI Hao, LU Yong, et al. Research on the characteristics and gradation factors of milling material in cold in-place recycling base of cement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2): 263-268.
- [14] SABERIAN M, JIE L, BAO N, et al. Permanent deformation behavior of pavement base and subbase containing recycle concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber[J]. Construction & Building Materials, 2018, 178: 51-58.
- [15] KWON J, KIM S H, TUTUMLUER E, et al. Characterization of unbound aggregate materials considering physical and morphological properties[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 18(4): 303-308.
- [16] NABAVI-PELESARAEI A, BAYAT R, HOSSEINZADEH-BANDBAFHA H, et al. Prognostication of energy

- use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154: 602-613.
- [17] YANG Y H, YANG Y, SHEN Y. Orthogonal test research on molding and curing for cold recycle mix with emulsified asphalt[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 587/588/589: 1194-1198.
- [18] 吴双全. 基于均匀性的水泥稳定碎石设计及抗裂性能研究[C]//中国公路学会. 2019 世界交通运输大会论文集(2). 北京:中国公路学会, 2019: 217-225.
- WU Shuang-quan. Research on the design and crack resistance of cement stabilized macadam based on uniformity[C]//China Highway and Transportation Society. Proceedings of 2019 World Transportation Conference (2). Beijing: China Highway and Transportation Society, 2019: 217-225.
- [19] 刘建兰. 水泥稳定铣刨料再生技术[J]. 公路, 2009, 54(8): 132-134.
- LIU Jian-lan. Cement stabilized milling material regeneration technology[J]. Highway, 2009, 54(8): 132-134.
- [20] 林通, 邝宏柱, 胡力群, 等. 水泥稳定沥青路面铣刨料力学性能分析[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 7-13.
- LIN Tong, KUANG Hong-zhu, HU Li-qun, et al. Analysis of mechanical properties of cement stabilized asphalt pavement milling material[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2): 7-13.
- [21] 张海涛, 梁爽, 杨洪生, 等. 基于室内振动搅拌的水泥稳定碎石性能研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 58-65.
- ZHANG Hai-tao, LIANG Shuang, YANG Hong-sheng, et al. Study on performance of cement-stabilized crushed stone based on indoor vibration mix[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 58-65.
- [22] 庞皓, 王民, 周启伟, 等. 水稳碎石基层材料循环冷再生性能提升试验[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(2): 33-37.
- PANG Hao, WANG Min, ZHOU Qi-wei, et al. Cyclic cold recycling performance improvement test of cement stabilized macadam base material[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2019, 36(2): 33-37.
- [23] 陆超. 贵州高速公路水泥粉煤灰稳定碎石基层抗冲刷性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- LU Chao. Study on scour resistance of cement fly ash stabilized macadam base of Guizhou expressway[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [24] 何小兵, 杨庆国, 易志坚. 水泥稳定碎石基层材料抗冲刷试验评价方法研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2009, 28(3): 555-558, 564.
- HE Xiao-bing, YANG Qing-guo, YI Zhi-jian. Study on evaluation method of anti-scouring test of cement stabilized crushed stone base material[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(3): 555-558, 564.
- [25] 刘海鹏, 蒋应军, 薛金顺, 等. 热阻式 SMA-13 沥青混合料级配优化[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(6): 10-17.
- LIU Hai-peng, JIANG Ying-jun, XUE Jin-shun, et al. Gradation optimization of thermal resistant SMA-13 asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(6): 10-17.
- [26] 延西利, 梁春雨, 许金华, 等. 水泥稳定碎石基层的弹塑性特性(双语出版)[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 29-36.
- YAN Xi-li, LIANG Chun-yu, XU Jin-hua, et al. Elastoplastic characteristics of cement-stabilized aggregate bases(in English)[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 29-36.