

低剂量水泥改性级配碎石力学指标分析

周志刚, 刘智仁, 张军

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了解决低剂量水泥改性级配碎石设计时缺乏强度控制指标及标准的问题,该文针对低剂量水泥改性级配碎石,通过加州承载比 CBR、无侧限抗压强度和抗压回弹模量等力学指标试验,探讨了相关力学指标随龄期和级配的变化规律,对比分析了低剂量水泥改性级配碎石 3 个力学指标之间的关系,并提出了 7 d 龄期和 14 d 龄期的 CBR 值、14 d 龄期的无侧限抗压强度和抗压回弹模量三者之间的回归关系公式。结果表明:CBR 值比无侧限抗压强度更适用于评价低剂量水泥改性级配碎石的强度性能,并建议采用 7 d 或 14 d 龄期的 CBR 值,其最低标准分别为 160% 和 180%,相应的 14 d 龄期的无侧限抗压强度和抗压回弹模量最低值分别为 1.3 MPa 和 260 MPa。按照现行技术规范中关于级配碎石的 CBR 强度要求,低剂量水泥改性级配碎石可用作任何交通等级下的任意等级公路的级配碎石基层和底基层。

关键词:低剂量水泥改性级配碎石;力学指标;CBR;无侧限抗压强度;抗压回弹模量;级配;龄期

1 前言

大量工程应用实践和理论研究表明:在沥青面层与半刚性基层之间设置级配碎石层是一种相对廉价而

又可有效延缓反射裂缝的措施。但在实际工程中,还存在以下问题:如岩石破碎筛分分档不够,难以调配出 JTJ 034-2000、JTG/T F20-2015《公路路面基层施工技术规范》推荐范围内的级配,混合料级配会超出规范范围;又如清洗不干净,含泥量较多,水稳定性不足,

- *****
- [2] 丁智勇,李永弟,侯俊涛,等.改性树脂冷拌混合料在路面坑槽修补中的应用[J].中外公路,2016(6).
 - [3] 漆祥.冬季雨季沥青路面坑槽及时维修技术研究[D].长安大学硕士学位论文,2017.
 - [4] 王火明.沥青路面坑槽冷补料的研究现状与最新进展[J].筑路机械与施工机械化,2018(5).
 - [5] 裴飞鹏,田春玲,董元帅.溶剂型冷补料路用性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017(5).
 - [6] 李璐,李睿,盛兴跃,等.高性能反应型沥青冷补液研究[J].公路工程,2015(2).
 - [7] 胡国鹏,张帅,穆建青.沥青路面坑槽冷补料的研究进展[J].山西交通科技,2016(3).
 - [8] 邓玉训,谢群.一种新型沥青路面坑槽修补材料的性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2018(5).
 - [9] 张争奇,许钺,成高立,等.溶剂型冷补沥青液研制及其沥青混合料路用性能研究[J].铁道科学与工程学报,2016(9).

- [10] 顾成.冷补沥青混合料的结构特性及试验评价[D].东南大学硕士学位论文,2017.
- [11] 李峰,黄颂昌,徐剑,等.冷补沥青混合料组成设计研究[J].武汉理工大学学报,2010(14).
- [12] 李峰,黄颂昌,等.冷补沥青混合料性能评价指标体系[J].公路,2010(11).
- [13] JT/T 972-2015 沥青路面坑槽冷补成品料[S].
- [14] 王佳旭.冷补沥青混合料设计及其耐久性能研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2016.
- [15] 禚炜安.不同类型冷补沥青混合料的初始强度研究[J].交通科学与工程,2013(2).
- [16] 韩继国,王选仓,时成林,等.寒区冷补沥青混合料路用性能评价指标及试验方法研究[J].公路,2008(5).
- [17] 何雄刚.冷施中坑槽修补料工作性评价指标研究[J].中外公路,2018(4).
- [18] 林永会.高性能桥面铺装冷补沥青混合料技术应用研究[D].河北工业大学硕士学位论文,2014.

收稿日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378084);广西交通科技计划项目(编号:桂交综合发[2010]109号)

作者简介:周志刚,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:zhou_zgcs@sina.com

造成级配碎石结构层难以达到理想的强度和稳定性状态。为了解决工程应用中级配碎石存在的不足,提出在级配碎石中掺加 2%~3% 的水泥,形成所谓的低剂量水泥改性级配碎石,以有效地增强混合料的强度和水稳定性,同时仍能保持碎石散粒材料的结构特性,以减少半刚性基层沥青路面反射开裂,并继续发挥级配碎石结构层的排水性能。

关于低剂量水泥改性级配碎石,除了研究人员研究以外,近年道路工程界也开展了一些有益的工作。于新等通过试验论证了低剂量水泥改善水泥处治碎石抗收缩开裂性能的有效性;于保阳等研究指出水泥剂量的变化对水稳碎石的干缩、温缩系数的影响具有一定的规律性;马骁尧等通过试验指出 CBR 与摩尔—库仑参数二者没有明确的相关关系,基于三轴试验的摩尔—库仑准则在评判级配碎石抗剪切破坏能力方面优于 CBR;王天亮等研究表明:水泥的掺加能有效地弥补粒径缺失导致的强度降低现象;彭波、李龙刚等通过试验分析,推荐水泥微黏结级配碎石水泥剂量的合理范围为 2%~4%。

在路面工程混合料配合比设计中,一般需要提出合适的强度性能控制指标及其要求,以评价所设计的混合料是否符合路用要求。因此,该文主要针对多种级配加 2% 水泥剂量的改性级配碎石进行试验研究,探讨低剂量水泥改性级配碎石相关力学指标随龄期的变化规律,对比分析加州承载比 CBR、无侧限抗压强度和抗压回弹模量指标之间的关系,参照级配碎石强度标准,提出低剂量水泥改性级配碎石设计的强度性能评价指标及其控制标准、合适的养生龄期,为低剂量水泥改性级配碎石配合比设计方法的制定提供依据。

2 原材料基本性能

试验所用的碎石及水泥均来源于广西壮族自治区

路网工程试验路,石料压碎值为 15.6%。为了便于级配设计研究,将现场所生产的集料筛分为 8 档,即 0~0.075、0.075~0.6、0.6~2.36、2.36~4.75、4.75~9.5、9.5~19、19~26.5、26.5~31.5 mm。然后对 4.75~9.5、9.5~19、19~26.5、26.5~31.5 mm 共 4 档粗集料检验其针片状含量,分别为 15.6%、17.3%、18.2%、12.9%。

对于细集料,分别测定每档集料的砂当量,然后按照组成比例计算合成的砂当量。0~0.075、0.075~0.6、0.6~2.36、2.36~4.75 mm 档集料的砂当量分别为 66.3%、71.1%、74.7%、75.9%。

将筛分后的 8 档集料按粒径从小到大分别测得表观密度为 2.651、2.663、2.683、2.702、2.720、2.672、2.705、2.688 g/cm³。

以下试验中各种混合料中均掺入 2% 水泥,水泥取自现场袋装 P.C.32.5 级复合硅酸盐水泥,技术指标试验结果符合施工技术规范要求。

3 级配选择及击实试验

由于该文的试验级配碎石中掺入的水泥剂量低,不适合简单套用目前水泥稳定碎石或级配碎石相关规范。为了结合级配碎石和水泥稳定碎石两者的优点,因此可选用 JTJ 034—2000《公路路面基层施工技术规范》和 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中的级配碎石与水泥稳定碎石的级配上下限,共 4 种级配,再结合两条试验路按 SAC 法设计的级配,最终确定试验级配共 6 种,如表 1 所示。

采用 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的 T0804—1994 方法中的丙法,对上述 6 种级配碎石在掺加 2% 水泥后的混合料进行击实试验,得到各级配的最佳含水量与最大干密度,如表 2 所示。

表 1 试验级配

级配来源	编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
		31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
试验路 1	GL	100	91.2	78.1	59.3	44.0	28.5	15.8	3.3
试验路 2	BS	100	93.0	85.6	58.3	36.5	22.1	10.9	4.5
规范级配碎石下限	JX	100	94.0	85.0	52.0	29.0	17.0	8.0	0
规范级配碎石上限	JS	100	100	100	74.0	54.0	37.0	20.0	7.0
规范水稳碎石下限	SX	100	90.0	72.0	47.0	29.0	17.0	8.0	0
规范水稳碎石上限	SS	100	100	89.0	67.0	49.0	35.0	22.0	7.0

表 2 6 种低剂量水泥改性级配碎石重型击实试验结果

级配编号	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
GL	4.5	2.303
BS	4.4	2.292
JS	5.1	2.255
JX	3.8	2.199
SS	5.1	2.278
SX	4.0	2.201

4 强度差异性分析

水泥作为此次试验混合料的黏结剂,有利于提高集料的黏聚力,同时其强度和模量会随着龄期的增长而不断增加。试验中或许存在以下 3 种情形:同种材料使用不同试验方法;不同材料使用同一种试验方法;相同材料及试验方法下进行不同龄期的试验;使得试

验结果存在着差异。现行的相关技术规范规定,加州承载比 CBR 与 7 d 龄期无侧限抗压强度分别被用于评价级配碎石和水泥稳定碎石的强度,故该文拟采用 CBR 与无侧限抗压强度作为强度指标。为保证试验结果的可靠性,下面将对不同级配混合料在不同龄期时的不同强度指标开展差异性分析,藉此确定低剂量水泥改性级配碎石强度试验所需养生龄期及合适的级配设计强度控制指标。

此节试验中的两种混合料级配分别为水泥稳定碎石的级配上限(SS)和级配下限(SX)。按照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的要求,7、14 d 龄期的每组平行试验数量为 13 个。因为级配下限混合料粗集料多、细集料少,而且改性级配碎石水泥剂量少,容易使得试件前期无法形成足够的强度而导致脱模松垮,因此统一在试件成型后放入标准养护室养护 24 h 之后脱模,然后再进行包裹浸水养生。相关试验结果如表 3 所示。

表 3 低剂量水泥改性级配碎石强度试验结果

龄期/ d	SX						SS					
	抗压强度			CBR			抗压强度			CBR		
	均值/ MPa	标准 差/MPa	变异系 数/%	均值/ %	标准 差/%	变异系 数/%	均值/ MPa	标准 差/MPa	变异系 数/%	均值/ %	标准 差/%	变异系 数/%
7	1.21	0.17	14.33	179.9	14.48	8.05	1.95	0.27	13.69	205.7	18.05	8.78
14	1.56	0.20	12.83	209.2	10.31	4.93	2.13	0.25	11.66	234.3	16.15	6.89

分析表 3 中试验数据以及试验过程,总结如下:

(1) 试验数据的有效性。试验结果不存在异常点,同时抗压强度变异系数小于 15%,CBR 的变异系数小于 12%,满足规范要求。

(2) 强度评价指标。表中数据表明,CBR 值的变异系数远小于无侧限抗压强度的变异系数,并且与级配无关。同时由于试验过程中存在部分级配下限混合料的 7 d 龄期抗压强度试件脱模松垮的问题,因此采用 CBR 值作为评价低剂量水泥改性级配碎石的强度指标更有优势。另外,可考虑将 14 d 龄期的无侧限抗压强度作为辅助指标,以便于验证 CBR 指标控制下设计结果的合理性。

(3) CBR 指标试件的龄期。虽然 7 d 龄期的 CBR 值的变异系数大于 14 d 龄期的变异系数,但是 7 d 龄期 CBR 值的变异系数本身就较小,且试件所用养生时间缩短了一半,有利于缩短试验进度。因此采用 7 d 龄期试件进行 CBR 试验更为合适。

5 加州承载比 CBR 分析

通常进行加州承载比(CBR)试验时需要先测量其膨胀量。膨胀量试验采用 14 d 龄期的试件。结果如表 4 所示。

表 4 不同级配混合料膨胀量

级配编号	膨胀量均值/%	级配编号	膨胀量均值/%
GL	0.040 5	JX	0.021 2
BS	0.034 8	SS	0.037 7
JS	0.042 4	SX	0.029 1

由表 4 可以看出:细集料较多的级配上限混合料的膨胀量大于细集料较少的级配下限混合料的膨胀量,但对于所测试的 6 种级配混合料,其膨胀量均已很小,在实际中可不考虑其影响。因此在后续的 CBR

值试验中不再进行试件的膨胀量测定。

对 6 种级配混合料进行不同龄期的加州承载比试验。试验结果如表 5、图 1 所示。

国内外并没有关于 CBR 值与龄期的拟合关系，

分析试验数据，可用 $CBR = a(1 - T^{-b})$ 进行 CBR 值与龄期 T 关系的拟合。此关系式参数的拟合结果如表 5、图 2 所示，数据表明拟合精度较高，同时关系式中的 a 值可认为是 CBR 最终的稳定值。

表 5 不同级配混合料不同龄期的 CBR 值

级配 编号	不同龄期(d)CBR 值/%				CBR 值与龄期拟合关系			$CBR_{7d}/\%$	$CBR_{14d}/\%$
	7	14	28	60	a	b	R^2	a	a
GL	246.7	283.9	320.4	331.8	372.90	0.556	0.982 2	66.2	76.1
BS	233.1	272.0	293.3	309.5	338.28	0.607	0.997 3	68.9	80.4
JS	189.7	219.0	239.1	256.9	284.56	0.560	0.997 4	66.7	77.0
JX	169.9	188.4	210.7	232.8	260.82	0.514	0.948 7	65.1	72.2
SS	205.7	234.3	258.2	275.9	304.29	0.570	0.994 4	67.6	77.0
SX	179.9	209.2	229.5	239.1	263.71	0.595	0.994 3	68.2	79.3

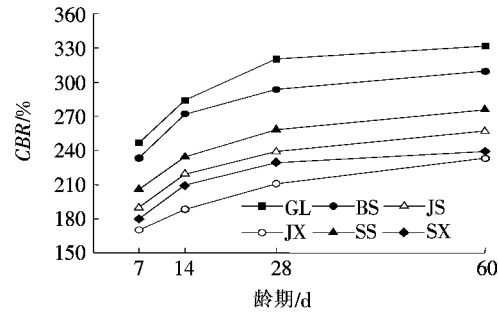


图 1 不同级配混合料 CBR 值随龄期的变化

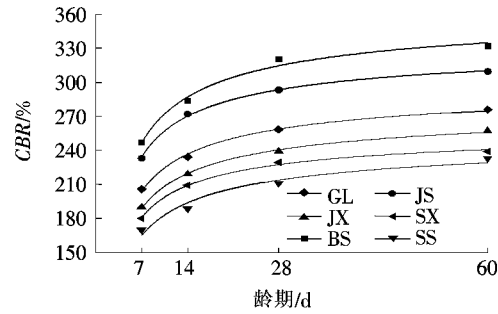


图 2 不同级配混合料 CBR 值和龄期的拟合曲线

分析表 5 及图 1、2 可以得出以下结论：

(1) 各级配混合料的 CBR 值随着龄期的增长而增加，7 d 到 14 d 龄期的 CBR 值增加最快；14 d 到 28 d 龄期的 CBR 值的增加速度逐渐变小；28 d 到 60 d 龄期的 CBR 值的增加率已经很小，基本维持在 5% 左右；60 d 以后混合料的 CBR 值变化更小，并逐渐趋于稳定。

(2) 7 d 龄期的 CBR 值和 14 d 龄期的 CBR 值分别占最终稳定值的 65% 和 75%，说明 7 d 龄期或 14 d 龄期的混合料已具备水泥水化反应完全后的大部分强

度。结合第 3 节的结论，可以推断出，用 7 d 龄期或 14 d 龄期的 CBR 强度作为检验低剂量水泥改性级配碎石级配设计的力学指标具备可行性。

(3) 级配对混合料的 CBR 值影响显著。龄期相同时级配上限混合料的 CBR 值均大于级配下限混合料的 CBR 值，说明对 CBR 值的影响显著的是级配中细集料的含量。

(4) CBR 指标大小的确定。表 6 为现行的 JTJ/T F20—2015《公路路面基层施工技术规范》和 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》关于级配碎石的强度标准。结合表 5 可知：试验结果中 CBR 最小值为级配 JX 的 169.9%，除重交通时的高速公路和一级公路的基层，其他情况均满足规范要求。另外，14 d 龄期的 CBR 最小值为 188.4%，也超过了重交通时高速公路和一级公路基层的 CBR 值要求的 180%。故可以预测，随着龄期的延长，低剂量水泥改性级配碎石的 CBR 最终稳定值足以保证其用作任何交通条件下任意等级公路的级配碎石基层。所以，采用 7 d 龄期的 CBR 值作为低剂量水泥改性级配碎石设计的评价指标是可行的。并且，建议将 160% 作为 7 d 龄期 CBR 值的最低标准，将 180% 作为 14 d 龄期 CBR 值的最低标准。

6 抗压强度与抗压回弹模量分析

表 3 中试验结果表明：对于低剂量水泥改性级配碎石，7 d 龄期的抗压强度比 14 d 龄期抗压强度的变异系数大，并且部分 7 d 龄期的抗压强度试件因其粗

表 6 级配碎石材料的 CBR 强度标准

结构层	公路等级	CBR 强度标准/%		
		极重、特重交通	重交通	中、轻交通
基层	高速公路和一级公路	≥200	≥180	≥160
	二级及二级以下公路	≥160	≥140	≥120
底基层	高速公路和一级公路	≥120	≥100	≥80
	二级及二级以下公路	≥100	≥80	≥60

集料多、细集料少,试件成型时容易损坏。因此,对 6 种级配混合料进行 14 d 龄期的无侧限抗压强度试验以及抗压回弹模量的测定,不再测定其他龄期的抗压强度和抗压回弹模量。

试验采用 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的大试件,压实度控制为 98%。根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,采用顶面法测定 14 d 龄期 2%剂量水泥改性级配碎石的抗压回弹模量。

14 d 龄期的抗压回弹模量和抗压强度的测定结果如图 3 所示。

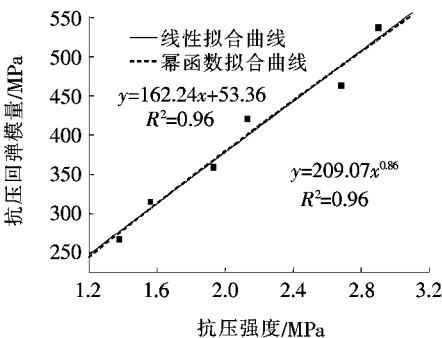


图 3 抗压强度与抗压回弹模量关系

由图 3 可以看出:级配对于 14 d 龄期的抗压强度和抗压回弹模量的影响非常显著。同类型级配,细集料含量越大,其混合料的抗压强度和抗压回弹模量越大。因此,在施工时对低剂量水泥改性级配碎石基层级配的选择和优化非常重要。同时 14 d 龄期的抗压强度与抗压回弹模量具有很高的正相关性,可分别用线性拟合和幂函数拟合,两种拟合精度都很高。

7 CBR 值与抗压强度、抗压回弹模量的关系

抗压回弹模量与 CBR 试验的力学原理不同。室内抗压回弹模量主要反映了材料在弹性范围内应力与应变之间的关系,不包括塑性变形,而 CBR 则反映了材料主要抵抗塑性变形的能力,在贯入过程中有时也

会含有极少量的回弹变形,但与总变形 2.5 mm 或 5 mm 相比完全可以忽略。

各国道路研究者一直比较关注抗压回弹模量与 CBR 值之间的关系。在进行路面结构分析时,通常采用回弹模量作为材料的计算参数,但其检测较为麻烦,而 CBR 的测试比回弹模量方便,故实际工作中人们经常建立回弹模量与 CBR 值的换算公式,通过 CBR 测试得到回弹模量。但目前关于 CBR 与抗压回弹模量之间关系的研究主要集中在土基及级配碎石基层,而对低剂量水泥改性级配碎石材料则研究甚少。

下面采用国内外对于土基 CBR 与抗压回弹模量关系常用的幂函数 $E=a\cdot(CBR)^b$,对该文的低剂量水泥改性级配碎石的 7、14 d 龄期的 CBR 值与 14 d 龄期的抗压回弹模量、抗压强度的关系进行拟合,得到图 4~7 所示结果。

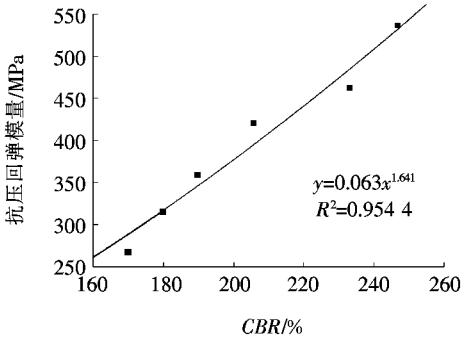


图 4 7 d 龄期 CBR 值与 14 d 龄期抗压回弹模量关系

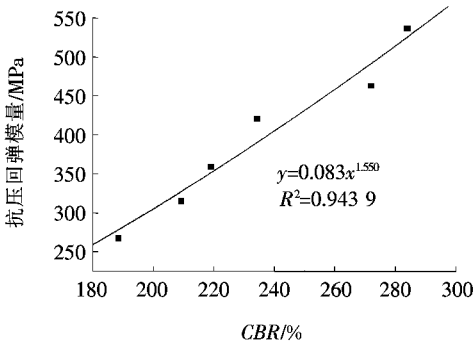


图 5 14 d 龄期 CBR 值与 14 d 龄期抗压回弹模量关系

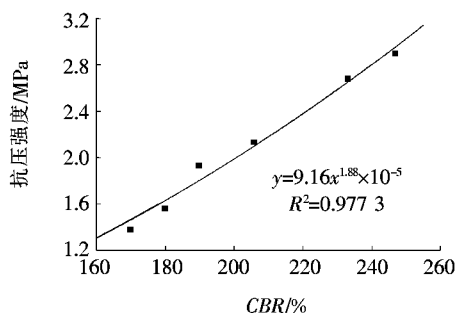


图 6 7 d 龄期 CBR 值与 14 d 龄期抗压强度关系

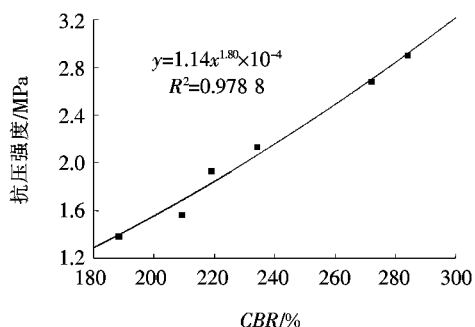


图 7 14 d 龄期 CBR 值与 14 d 龄期抗压强度关系

拟合结果表明:无论是 7 d 龄期还是 14 d 龄期的 CBR 值与 14 d 龄期的抗压回弹模量和抗压强度均具有良好的拟合度,其中抗压强度与 CBR 值的相关性更高。因为前述研究得到 7 d 龄期 CBR 值最小值为 160%,14 d 龄期 CBR 值最小值为 180%,通过 14 d 龄期的无侧限抗压强度和抗压回弹模量与 7、14 d 两类龄期 CBR 值的拟合公式,可知 14 d 龄期的无侧限抗压强度最低标准为 1.3 MPa,14 d 龄期的抗压回弹模量最低值为 260 MPa。

8 结论

针对低剂量水泥改性级配碎石,通过加州承载比 CBR 试验、无侧限抗压强度试验和抗压回弹模量试验,探讨了相关力学指标随龄期和级配的变化规律,对比分析了低剂量水泥改性级配碎石 3 个力学指标之间的关系,得到以下结论:

(1) 通过强度差异性分析,指出将 CBR 值作为评价改性级配碎石的强度评价指标比无侧限抗压强度更有优势。并建议采用 7、14 d 龄期的 CBR 值,其最低标准分别为 160%和 180%。

(2) 通过分析不同级配混合料 CBR 值与龄期之间的关系,推荐采用 $CBR = a(1 - T^{-b})$ 来拟合 CBR 值与龄期的关系,并得到了不同级配混合料的拟合关系参数。

(3) 建立了 7 d 龄期和 14 d 龄期的 CBR 值、14 d 龄期的无侧限抗压强度和 14 d 龄期的抗压回弹模量三者之间的回归关系公式。根据 7、14 d 龄期的 CBR 最低标准要求,14 d 龄期的无侧限抗压强度最低限度为 1.3 MPa,抗压回弹模量最低值为 260 MPa。

(4) 按照现行技术规范关于级配碎石的 CBR 强度要求,低剂量水泥改性级配碎石可用作任何交通等级下的任意等级公路的级配碎石基层和底基层。

参考文献:

- [1] JTJ 034—2000 公路路面基层施工技术规范[S].
- [2] JTG/T F20—2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [3] 长沙理工大学.改性级配碎石基层沥青路面结构研究[R],2008.
- [4] 周志刚,曾勇,孙绪康.沥青路面水泥改性级配碎石力学性能研究[J].交通科学与工程,2012(3).
- [5] 孙绪康.低剂量水泥改性级配碎石力学行为研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,2012.
- [6] 蒋少稀.低剂量水泥改性级配碎石施工变异性分析及质量控制[D].长沙理工大学硕士学位论文,2012.
- [7] 长沙理工大学.沥青路面水泥改性级配碎石基层成套应用技术研究[R],2014.
- [8] 邓廷权,罗竟,周志刚.水泥改性级配碎石基层沥青路面结构研究[J].中外公路,2012(3).
- [9] 于新,黄晓明.低剂量水泥稳定碎石基层干缩温缩性能研究[J].公路交通科技,2007(7).
- [10] 于保阳,王宇,张丽萍.低剂量水泥稳定碎石混合料收缩性能试验[J].辽宁工程技术大学学报,2016(3).
- [11] 马晓尧,高启聚,石鹏程,等.基于摩尔-库伦准则级配碎石强度研究[J].公路,2017(5).
- [12] 王天亮,宋宏芳,郭卓豪,等.水泥掺量和颗粒级配对碎石基层冻融特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2017(12).
- [13] 彭波,李龙刚,尹光凯,等.低水泥剂量稳定碎石级配组成设计与性能研究[J].公路,2018(5).
- [14] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [15] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].