

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.058

土凝岩胶凝材料稳定碎石基层路用性能研究

杨善东¹, 王笑风², 游鹏¹, 杨博², 郭豪彦³

(1. 洛阳市公路管理局, 河南 洛阳 471000; 2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司; 3. 长安大学 材料科学与工程学院)

摘要:对土凝岩胶凝材料(Soil Stabilizer Cementitious Materials,简称 SSCM)和普通硅酸盐水泥材料(Cement Cementitious Materials,简称 CCM)稳定碎石的力学性能、抗收缩性能和抗疲劳性能等进行试验分析。结果表明:同等掺量下的 SSCM 稳定碎石的 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度和抗压回弹模量均优于 CCM 稳定碎石;CCM 和 SSCM 稳定碎石的干缩过程相似,CCM 和 SSCM 掺量越大,稳定碎石的抗干缩能力越差,当掺量相同时,SSCM 稳定碎石具备更好抗干缩能力,但是抗温缩能力相对较差;胶凝材料掺量大的稳定碎石试件对应力水平更敏感,且高掺量 SSCM 和低掺量 CCM 稳定碎石试件在应力变化时表现更优异,且同一应力水平下,掺 SSCM 的稳定碎石试件抗疲劳性能较差。

关键词:土凝岩胶凝材料;路用性能;力学性能;抗收缩性;抗疲劳性

目前,煤矸石、工业尾矿等固体废弃物已被广泛应用于道路工程,研究者将固体废弃物或用作道路填料,或用作生产胶凝材料的原材料等,这些途径都使固态废弃物得到有效的回收再利用,变废为宝。

当前,SSCM 已经被广泛应用于道路工程中,并表现出优良的路用性能。赵晓玉等利用 SSCM 改性轻质粉黏土,研究结果表明土凝岩改良黏性土无侧限抗压强度比水泥改良黏性土强度高;荣云杰等研究了赤

参考文献:

[1] 刘文白,周健,苏跃宏.风砂土基本性质及其与土工格栅作用试验[J].中国沙漠,2003(6).

[2] 李悦,张广泰,陈柳灼,等.沥青及橡胶沥青沙漠砂混合料路用性能研究[J].公路工程,2017(4).

[3] 闫东辉,邢渊浩.库布齐沙漠风积砂压实施工工艺研究[J].内蒙古科技与经济,2018(2).

[4] 李德超.石灰粉煤灰稳定沙漠沙路用性能研究[J].中南公路工程,2005(3).

[5] 满达.FCS-2型固化剂固化风积砂底基层强度及稳定性研究[D].内蒙古工业大学硕士学位论文,2016.

[6] 苏跃宏,宋幸芳.固化风沙土无侧限抗压强度试验研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011(3).

[7] 胡舜娥,蔡燕燕,俞缙,等.水泥固化滨海风积砂三轴试验研究[J].地下空间与工程学报,2014(3).

[8] 李俊丹,王加弟.固化剂稳定风积砂的配合比设计[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2007(1).

[9] 张向东,李军,孙琦,等.水泥改良风积砂负温动力性能与流变特征研究[J].岩土力学,2018(12).

[10] LIU Jun - fang, SU Yue - hong. Analyses of the

Strength Characteristics of Solidified Desert Aeolian Sandy Soil[J]. Highway Transp. Res. Dev. (English Ed.), 2017, 11(2): 32-36.

[11] Aiban S A. A Study of Sand Stabilization in Eastern Saudi Arabia[J]. Eng Geol, 1994, 38(3): 65-79.

[12] 刘军,何森,夏炎.粉煤灰作为路基填料的室内外试验研究[J].中外公路,2015(2).

[13] 宋亮.粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响[J].中外公路,2017(4).

[14] 邹桂莲,刘新海,周浩浩.水泥粉煤灰稳定再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2018(3).

[15] JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[16] 李慧萍,王福满.SG-1型土壤固化剂稳定碎石土的路用性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2016(1).

[17] 俞建荣,栗学铭,窦有年.粉煤灰水泥稳定粒料的路用性能研究[J].中国公路学报,1998(S1).

[18] 孙雅珍,李凯翔,丁传超,等.稳定碎石土底基层材料力学参数试验研究[J].中外公路,2018(1).

[19] 张智豪,李波,李鹏,等.改良铁尾矿用于道路基层材料的研究[J].中外公路,2018(3).

收稿日期:2021-02-13(修改稿)

作者简介:杨善东,男,大学本科,高级工程师,E-mail:2992206831@qq.com

泥基 DHT 土凝岩土壤固化剂稳定细粒土的效果, 研究表明掺入 DHT 土凝岩的细粒土抗剪强度和抗渗性均有不同程度的提高; 汲平等对 DHT 土凝岩稳定材料水稳定性、抗冻性能进行了研究, 结果表明 DHT 土凝岩稳定材料相关指标均不低于相应水泥稳定材料, 具有良好的耐久性能。

该文所用的 SSCM 是一种由工业废料经一定工艺制备的新型材料, 具备与水泥材料类似的胶凝作用。SSCM 稳定碎石基层的力学性能、水稳性能、冻融性能等已被广泛研究, 但对于收缩性以及疲劳性能的研究较少, 为此, 该文主要针对 SSCM 稳定碎石基层的收

缩性能以及疲劳性能进行测试与分析, 以得到 SSCM 稳定碎石基层的路用性能。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

该文所用的胶凝材料为土凝岩材料和 P. O. 42.5 级普通硅酸盐水泥, 两种材料的物理与力学性能如表 1 所示; 集料为 0~26.5 mm 石灰岩, 产自陕西, 表观密度为 2.758 g/cm³, 含泥量为 0.72%, 吸水率为 0.71%, 破碎值为 20.6%。

表 1 两种胶凝材料及砂浆试件性能

| 胶凝材料 | 密度/ (kg·m ⁻³) | 比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹) | 标准稠度 用水量/% | 凝结时间/min | | 抗折强度/MPa | | 抗压强度/MPa | |
|------|------------------------------|--|---------------|----------|-----|----------|------|----------|------|
| | | | | 初凝 | 终凝 | 3 d | 28 d | 3 d | 28 d |
| SSCM | 3 194 | 410 | 29.8 | 185 | 378 | 4.5 | 8.9 | 18.5 | 56.4 |
| CCM | 3 000 | 352 | 28.3 | 198 | 455 | 4.8 | 8.2 | 19.1 | 53.5 |

1.2 成型方法

无机结合料稳定碎石底基层/基层均采用骨架密实型级配, 图 1 为集料级配曲线。该文在以往试验基础上固定胶凝材料的掺量: 底基层: 3.5%; 基层: 4.0%。两种胶凝材料的掺入方式都为外掺, 压实度为 0.98。该文将掺量为 3.5%、4.0% SSCM 的试件分别命名为 d-SSCM、j-SSCM, 将掺量为 3.5%、4.0% CCM 的试件分别命名为 d-CCM、j-CCM。

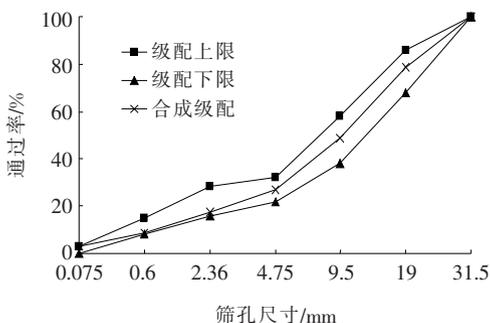


图 1 骨架密实型无机结合料稳定类集料级配曲线

通过 T0804—1994《无机结合料稳定材料击实试验方法》进行击实试验, 以确定该文中 4 种稳定材料的最佳含水量和最大干密度, 试验结果如表 2 所示。

参照 T0843—2009《无机结合料稳定材料试件制作方法(圆柱形)》以及 T0844—2009《无机结合料稳定材料试件制作方法(梁式)》分别成型 $\phi 150$ mm \times 150 mm 圆柱形试件和 100 mm \times 100 mm \times 400 mm 的梁式试件。成型试件数量满足该文进行的相关试验要

求。试件成型后, 参照 T0845—2009《无机结合料稳定材料养生试验方法》进行标准养生。

表 2 最佳含水量和最大干密度试验结果

| 稳定材料 类型 | 结合料 掺量/% | 最佳含 水量/% | 最大干密度/ (g·cm ⁻³) |
|------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| d-SSCM | 3.5 | 4.924 | 2.397 |
| j-SSCM | 4.0 | 4.948 | 2.381 |
| d-CCM | 3.5 | 4.876 | 2.362 |
| j-CCM | 4.0 | 4.955 | 2.387 |

1.3 试验方法

参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行 7 d 无侧限抗压强度、弯拉强度、抗压回弹模量(顶面法, 将单位压力分为 5 等分, 分别为 0.085、1.170、0.255、0.340 以及 0.425 MPa)、干缩、温缩(为准确获得试验过程中应变的变化, 设定数据读取频率为 20 min/次)以及疲劳(按照规范要求与实际情况, 取 0.80、0.75、0.7、0.65 共 4 个应力比对每组试件进行疲劳试验)测试。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的相关规定, 对掺入 CCM 和 SSCM 的 4 种稳定碎石进行了 7 d 无侧限抗压强度试验, 结果如

图2所示。

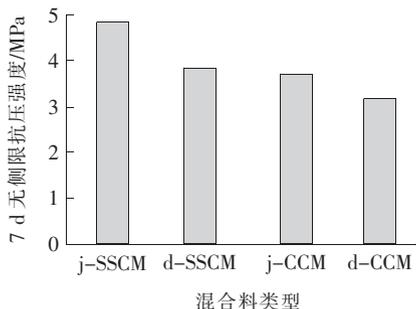


图2 CCM和SSCM稳定碎石的7d无侧限抗压强度

由图2可知:胶凝材料相同时,掺量较高的j-SSCM和j-CCM具有更高的抗压强度,j-SSCM比d-SSCM的抗压强度提高25.5%;j-CCM比d-CCM的抗压强度高约16.8%。胶凝材料掺量相同时,SSCM稳定碎石的抗压强度明显高于CCM稳定碎石,掺量为3.5%时,前者比后者高约23.2%;掺量为4%时,前者比后者高约32.3%。说明同等条件下,SSCM稳定碎石的抗压强度指标明显优于CCM稳定碎石,掺量越高,效果越显著,表明采用SSCM材料代替水泥稳定碎石用于公路工程底基层、基层是可行的。

2.2 弯拉强度

弯拉强度又称抗折强度,是表征路面材料抵抗弯曲变形的能力,是半刚性基层路面材料的一项重要控制指标,CCM和SSCM4种材料稳定碎石的90d弯拉强度试验结果见图3。

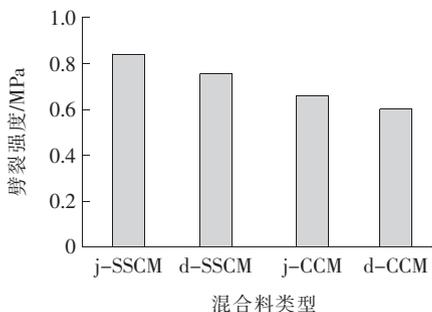


图3 CCM和SSCM稳定碎石的弯拉强度

由图3可知:胶凝材料种类相同,掺量不同时,掺量较大的j-SSCM和j-CCM具有更高的弯拉强度值,j-SSCM比d-SSCM高12%,而j-CCM比d-CCM高10%;胶凝材料掺量相同,种类不同时,SSCM稳定碎石的弯拉强度明显高于CCM稳定碎石,掺量为3.5%的d-SSCM比d-CCM提高约25%,掺量为4%的j-SSCM比j-CCM提高约27%。说明由工业废渣制成的土凝岩材料稳定碎石的抗弯拉性能比

水泥稳定碎石的抗弯拉性能更加突出。

2.3 抗压回弹模量

回弹模量是指路面基层材料在荷载作用下产生的应力与其相应的回弹应变的比值,能够反映路面基层在弹性变形阶段内,在垂直荷载作用下,抵抗竖向变形的能力。CCM和SSCM稳定碎石的90d抗压回弹模量试验结果如图4所示。

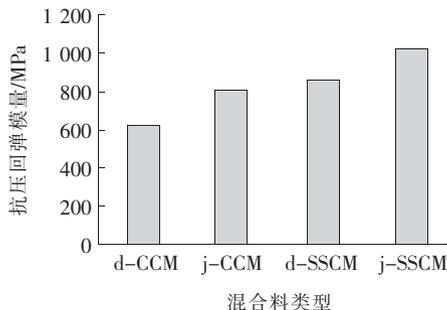


图4 CCM和SSCM稳定碎石抗压回弹模量

由图4可知:两种胶凝材料中,掺量较大的j-SSCM和j-CCM组获得更优的抗压回弹模量值。掺量一致时,SSCM稳定碎石的抗压回弹模量明显高于CCM稳定碎石的抗压回弹模量。当掺量为3.5%时,增幅为37.5%,掺量为4%时,增幅为26.8%。较低掺量的SSCM稳定碎石的抗压回弹模量甚至超过高掺量的CCM的抗压回弹模量,说明水化进程中SSCM产生了较多的水化产物,致使材料各相之间黏附力较大,宏观性能上表现为材料的刚度和抗压回弹模量较大。

2.4 干缩性能

无机结合料稳定材料的干缩性能主要通过干缩失水率和干缩系数两个指标体现。试件的累计失水率指试件的总失水量占试件干燥恒重的比例;干缩系数为干缩应变与失水率的比值,其值越小表示试件的抗干缩能力越好。CCM和SSCM稳定碎石干缩试验试件累计失水率变化见图5,干缩系数见图6。

由图5可知:混合料的失水过程大致可以分为3个阶段:①1~7d。这一阶段曲线斜率最大,说明混合料失水最快。由于混合料在前期水分较多时,除了水分蒸发外,混合料中的胶凝材料会发生水化反应,消耗掉一部分水分,所以可以认为水化反应的快慢与反应程度造成了这一阶段曲线的差异。从图中可以看出,这一阶段的累计失水率:j-SSCM > d-SSCM > j-CCM > d-CCM。相同掺量,甚至低掺量下,掺入SSCM的混合料的失水率更大,说明其水化反应速率快,消耗了更多水分;②8~20d。这一阶段累计失水

率: $j\text{-CCM} > j\text{-SSCM} > d\text{-CCM} > d\text{-SSCM}$ 。这一阶段,胶凝材料的掺量开始起主导作用,掺量较大的混合料消耗的水分较多。另外需要注意的是,两种掺量下掺入 CCM 的混合料的耗水量均大于掺 SSCM 的,这说明尽管 CCM 的早期水化反应速率较慢,但后期反应速率可能超过了 SSCM;③ > 20 d。20 d 后,失水率整体呈减缓趋势,一方面胶凝材料水化反应速率趋于平缓,另一方面,试件内部空隙随着水化反应过程生成的水化产物不断填补而减小,这一阶段的失水率不断减小,最终趋于平缓。

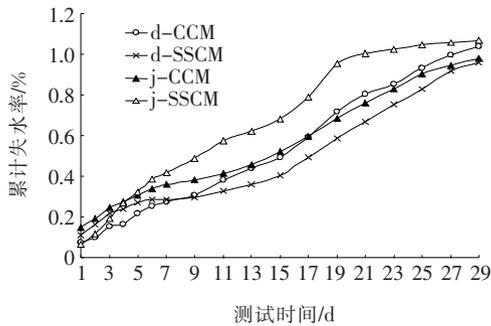


图 5 CCM 和 SSCM 稳定碎石干缩试验试件失水率

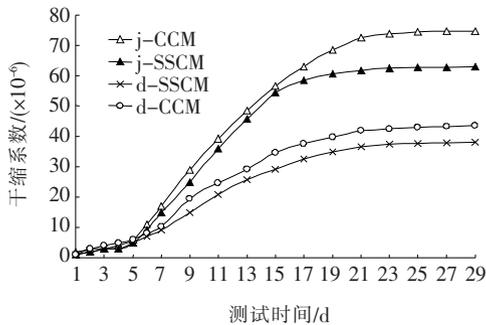


图 6 水泥和土凝岩稳定碎石试件干缩系数

由图 6 可知:① 混合料的干缩系数在养护阶段起始位置较小,但随着时间的推移不断增大,且增长速率保持先增大后减小,最后趋于平缓的趋势。试件的干缩系数与胶凝材料的掺量有很大关系;② 当混合料的干缩系数随胶凝材料掺量的增大而增大;当胶凝材料掺量相同时,掺入 SSCM 的干缩系数较小。说明 SSCM 具备较好的抗干缩能力。

2.5 温缩性能

半刚性材料中存在固、液、气三相。固相为半刚性材料中的集料与胶凝材料,液相为混合料内部的水分,气相即混合料空隙中的气体。当温度发生改变时,混合料产生体积上的收缩,这种收缩基于三相的共同作用,经研究发现,三相中起主要作用的是固相和液相。该试验采用的 4 种试件在级配相同的前提下调整胶凝

材料掺量,且温缩试验前已将试件烘干,排除了水分对收缩过程的影响,所以该文的温缩变化只从固相上考虑。原材料中不同物质具有不同热变形性,例如 C—S—H 热胀系数为 $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,具有较高的热变形性,而集料的热变形性却较小。

图 7 为 CCM 和 SSCM 稳定碎石试件的温缩系数试验结果。由图 7 可知:4 种稳定碎石的温缩系数均保持先增大、再平稳、后减小的规律。将整个温缩过程分为 3 个部分:高温区 ($60 \sim 50^\circ\text{C}$)、中温区 ($40 \sim 30^\circ\text{C}$) 和常温区 (20°C)。求出各个温度区间的平均温缩系数,见图 8。

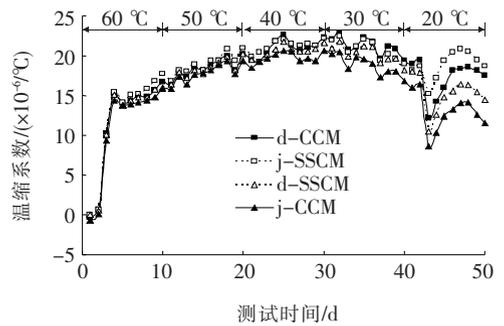


图 7 CCM 和 SSCM 稳定碎石温缩系数

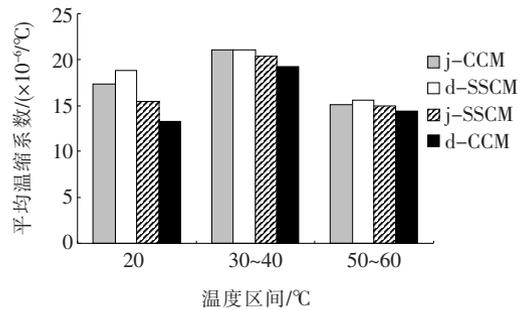


图 8 CCM 和 SSCM 稳定碎石平均温缩系数

结合图 7、8 可知:高温区试件的温缩系数较小,但保持较大的增长速率;在中温区趋于平缓,达到峰值;低温区内又不断减小。3 个温度区间内,4 种试件的平均温缩系数基本保持相同的大小规律,即: $j\text{-SSCM} > d\text{-CCM} > d\text{-SSCM} > j\text{-CCM}$ 。温缩系数为温度应变与温差的比值,其值越小表示材料的抗温缩能力越强。掺量较大的两种胶凝材料稳定碎石表现出两种极端, $j\text{-SSCM}$ 的平均温缩系数最大,说明其抗温缩能力最弱,而 $j\text{-CCM}$ 正相反,抗温缩能力最强。说明为了获得较好的抗温缩能力,可增大 CCM 的掺量,减小 SSCM 的掺量。

2.6 疲劳性能

表 3 为 CCM 和 SSCM 稳定碎石在不同应力水平

下的疲劳寿命试验结果。下文对数据具体处理过程及运算过程进行详细描述。

表3 CCM和SSCM稳定碎石疲劳寿命试验结果

| 结合料类型 | 掺量/% | 不同应力水平下的疲劳寿命/次 | | | |
|-------|------|----------------|--------|---------|---------|
| | | 0.80 | 0.75 | 0.70 | 0.65 |
| CCM | 3.5 | 878 | 13 592 | 123 805 | 256 268 |
| | | 1 165 | 18 786 | 156 940 | 463 203 |
| | | 3 489 | 20 855 | 199 654 | 568 126 |
| | 4.0 | 778 | 26 816 | 106 994 | 296 447 |
| | | 2 385 | 36 493 | 163 483 | 394 105 |
| | | 4 269 | 39 027 | 234 571 | 568 621 |
| SSCM | 3.5 | 596 | 15 630 | 108 562 | 462 116 |
| | | 2 967 | 36 815 | 236 498 | 560 109 |
| | | 5 963 | 53 326 | 292 340 | 806 113 |
| | 4.0 | 894 | 23 685 | 136 648 | 406 623 |
| | | 4 298 | 59 453 | 206 417 | 629 416 |
| | | 6 984 | 96 451 | 308 476 | 921 304 |

Weibull函数和Weibull分布是一种概率密度分布函数,可以用来描述材料强度的数据分布。Weibull密度函数的优点在于其存在最小安全寿命,利用该分布理论,在99%高存活率范围内所给出的安全寿命仍然符合实际试验结果。根据Weibull函数,如果失效概率 $-\ln\ln(1/p)$ 和 $\lg N_i$ 存在良好的线性关系,那么疲劳寿命的试验数据结果就符合Weibull分布,并可以根据 $-\ln\ln(1/p)$ 和 $\lg N_i$ 的关系式计算出一定失效概率(存活率)下的对数疲劳寿命估计值。其中, p

为保证率,可由式(1)计算得出:

$$p = \left[1 - \frac{i}{n+1} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: n 为同一应力比下平行试件的数量; i 为将同一应力比下的疲劳寿命从小到大进行排序后的次序。

对不同应力比下 $-\ln\ln(1/p)$ 与 $\lg N_i$ 进行线性拟合,得到两者的线性方程,并计算保证率为50%和95%下的疲劳寿命对数值,结果列于表4。

表4 不同保证率下CCM和SSCM稳定碎石的的对数疲劳寿命

| 结合料类型 | 掺量/% | 保证率/% | 不同应力水平下的对数疲劳寿命 | | | |
|-------|------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | | | 0.80 | 0.75 | 0.70 | 0.65 |
| CCM | 3.5 | 50 | 3.432 | 4.295 | 5.259 | 5.709 |
| | | 95 | 1.124 | 3.800 | 4.670 | 4.789 |
| | 4.0 | 50 | 3.512 | 4.575 | 5.305 | 5.698 |
| | | 95 | 1.538 | 4.136 | 4.360 | 4.860 |
| SSCM | 3.5 | 50 | 3.627 | 4.648 | 5.416 | 5.856 |
| | | 95 | 0.996 | 3.230 | 4.265 | 5.007 |
| | 4.0 | 50 | 3.733 | 4.886 | 5.420 | 5.897 |
| | | 95 | 1.351 | 3.257 | 4.423 | 4.910 |

该文中疲劳方程采用如式(2)所示的单对数疲劳方程。在不同保证率下,对应力水平与 $\lg N_i$ 进行线性拟合,得到两者的线性方程(以保证率为95%为例,拟合结果列于图9),并计算保证率为50%和95%下的疲劳方程,结果列于表5。

$$\lg N = a + b\sigma/S \quad (2)$$

式中: σ/S 为应力水平; a, b 为参数。

表5 不同保证率下CCM和SSCM稳定碎石疲劳寿命方程

| 结合料 | 掺量/% | 保证率/% | 疲劳方程 | R^2 |
|------|------|-------|-----------------------------------|---------|
| CCM | 3.5 | 50 | $\lg N = 16.197 - 15.898\sigma/S$ | 0.980 1 |
| | | 95 | $\lg N = 24.918 - 29.412\sigma/S$ | 0.806 4 |
| | 4.0 | 50 | $\lg N = 15.792 - 15.198\sigma/S$ | 0.959 5 |
| | | 95 | $\lg N = 22.658 - 16.110\sigma/S$ | 0.781 5 |
| SSCM | 3.5 | 50 | $\lg N = 16.023 - 15.361\sigma/S$ | 0.970 4 |
| | | 95 | $\lg N = 23.623 - 27.933\sigma/S$ | 0.934 6 |
| | 4.0 | 50 | $\lg N = 15.709 - 14.793\sigma/S$ | 0.950 0 |
| | | 95 | $\lg N = 21.886 - 25.381\sigma/S$ | 0.933 0 |

图9中,拟合曲线的斜率表示试件对应力的敏感程度,斜率越大,试件对应力就越敏感。由图9可知:①4种试件拟合曲线的斜率很相近,但略有差异,斜

率大小排序为: $j\text{-CCM} > j\text{-SSCM} > d\text{-SSCM} > d\text{-CCM}$,结果表明胶凝材料掺量较大的稳定碎石试件对应力水平更敏感,且高掺量SSCM和低掺量

CCM 试件在应力变化时表现更优异。同一应力水平下,疲劳寿命越大,说明试件的抗疲劳性能越好;②同一应力水平下,掺 SSCM 的试件疲劳寿命较小,说明掺 SSCM 的试件抗疲劳寿命性能较差。

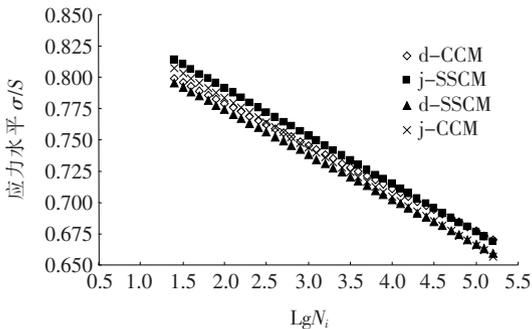


图 9 CCM 和 SSCM 稳定碎石疲劳寿命拟合曲线

3 结论

(1) 相同掺量下,SSCM 稳定碎石的抗压强度和弯拉强度均优于 CCM 稳定碎石,且掺量越高,效果越显著。与 CCM 稳定碎石相比,掺量为 3.5% 时,SSCM 稳定碎石的 7 d 无侧限抗压强度提高约 23.2%,弯拉强度提高约 25%;掺量为 4% 时,抗压强度提高 32%,弯拉强度提高 27%。

(2) SSCM 稳定碎石抗压回弹模量明显高于 CCM 稳定碎石。与 CCM 稳定碎石相比,掺量为 3.5% 时,SSCM 稳定碎石的抗压回弹模量提高了 37.5%;掺量为 4% 时,提高了 26.8%。

(3) CCM 和 SSCM 稳定碎石的干缩过程相似,大致可分为 3 个阶段。CCM 和 SSCM 的掺量越大,稳定碎石的抗干缩能力越差;掺量相同时,SSCM 稳定碎石具备更好的抗干缩能力。

(4) 对于两种胶凝材料的 4 种试件,其平均温缩系数具有相似的规律,即: $j\text{-SSCM} > d\text{-CCM} > d\text{-SSCM} > j\text{-CCM}$ 。说明相同掺量下,SSCM 稳定碎石抗温缩能力相对较差,实际工程应用中,为了获得较好抗温缩能力,应合理控制 SSCM 掺量。

(5) 胶凝材料掺量较大的稳定碎石试件对应力水平更敏感,且高掺量 SSCM 和低掺量的 CCM 试件在应力变化时表现更优异。同一应力水平下,掺 SSCM 的试件抗疲劳寿命性能较差。

参考文献:

- [1] Diniz Dayse Horta, De Carvalho, José Maria Franco, et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9): 04017118.
- [2] GaoJie, Guo Haoyan, Wang Xiaofeng, et al. Microwave Deicing for Asphalt Mixture Containing Steel Wool Fibers [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 1110—1122.
- [3] SaharSeif, Nassim Sebaibi, Daniel Levacher, et al. Mechanical Performance of a Dry Mortar without Cement, Based on Paper Fly Ash and Blast Furnace Slag[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 22: 113—121.
- [4] 吕小武, 吕维前, 李玉梅. 水泥稳定建筑废弃物再生道路底基层的试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(3).
- [5] 白杨. 土壤固化剂稳定细粒土基层试验研究[J]. 北方交通, 2011(5).
- [6] 王一峰, 刘晶磊, 王奥运, 等. DHT 土凝岩改良铁尾矿用性能正交试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017(4).
- [7] 赵晓玉, 于川情, 黄前龙, 等. 水泥、土凝岩改良黏性土路用性能试验研究[J]. 青海交通科技, 2018(2).
- [8] 荣云杰. DHT 土凝岩土壤固化剂稳定细粒土的固化特性研究[D]. 山东农业大学硕士学位论文, 2016.
- [9] 汲平, 迟朝明. DHT 土凝岩稳定材料耐久性试验研究[J]. 工程建设与设计, 2017(23).
- [10] 刘晶磊, 王一峰, 王奥运, 等. 土壤固化剂改良铁尾矿用性能研究[J]. 公路, 2018(4).
- [11] Sain T, Kishen J M C. Probabilistic Assessment of Fatigue Crack Growth in Concrete[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(12): 2156—2164.
- [12] 童攀. PVA 纤维水泥稳定碎石基层材料及结构性能研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2018.
- [13] 崔宏环, 裴国陆. 含赤泥土壤固化剂改良粉质黏土的路用性能研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [14] 李庶安, 孙承吉, 唐晓栋, 等. 土凝岩稳定黏性土的路用性能研究[J]. 公路, 2019(6).
- [15] 孙雅珍, 李凯翔, 丁传超, 等. 稳定碎石土底基层材料力学参数试验研究[J]. 中外公路, 2018(1).
- [16] 高磊, 贾致荣, 袁中玉, 等. 水泥稳定碎石铣刨粗集料路用性能评价[J]. 中外公路, 2019(5).
- [17] 吕会, 庄园. 水泥稳定混凝土再生骨料在干线公路基层中的应用[J]. 中外公路, 2017(6).