【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

施工期水泥稳定碎石底基层的疲劳损伤分析

房娜仁^{1,2}, 胡士清², 王选仓², 李琪琪², 辛磊²

1) 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2) 长安大学公路学院, 陕西西安 710064

摘要: 水泥稳定碎石材料用做路面基层及底基层时, 由于施工期养生龄期不足和车辆荷载超载, 会造成不可逆疲劳损伤。为得到施工荷载对水泥稳定碎石底基层造成的疲劳损伤, 基于 Miner 理论和 ABAQUS 软件, 进行弯拉强度试验和疲劳试验, 分析了 9 种车辆荷载下, 底基层厚度分别为 16、20、24、28 和 32 cm 时, 最大层底拉应力与底基层厚度的关系, 以及底基层模量分别为 400、800、1 200、1 600 和 2 000 MPa 时, 最大层底拉应力与底基层模量的关系。研究表明, 随着底基层厚度的增加, 底基层层底拉应力不断减小, 减小率最大为 8.8%; 随着底基层模量的增加, 底基层层底拉应力不断增大, 但增长率不断降低。依托实际工程, 可得到水泥稳定碎石底基层疲劳预估方程, 基于 Miner 理论计算得到不同工况下, 不同施工荷载对底基层造成的疲劳损伤程度, 为路面设计和施工提供指导。

关键词: 道路工程; 疲劳损伤分析; 疲劳方程; Miner 理论; 水泥稳定碎石; 底基层

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.01061

Fatigue damage analysis of cement stabilized sub-base during construction period

FANG Naren^{1,2}, HU Shiqing², WANG Xuancang², LI Qiqi², and XIN Lei²

1) School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China

2) School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

Abstract: When cement stabilized gravel materials are used as pavement base and sub-base, irreversible fatigue damage often occurs due to insufficient maintenance days during the construction period and overload of vehicle load. In order to obtain the fatigue damage caused by the construction load on the cement stabilized gravel sub-base, the flexural tensile strength test and the fatigue test are carried out based on Miner theory and ABAQUS software. Under 9 kinds of vehicle load, we analyze both the relationship between the maximum tensile stress of the sub-base layer and the substrate thickness when the substrate thickness is 16, 20, 24, 28, and 32 cm and the relationship between the maximum tensile stress of the sub-base layer and the modulus of the sub-base when the modulus of the subbase is 400, 800, 1 200, 1 600, and 2 000 MPa, respectively. The research results show that with the increase of the thickness of the sub-base layer, the tensile stress of the sub-base decreases gradually, and the maximum reduction rate is 8.8%. With the growth of the sub-base modulus, the bottom tensile stress of the sub-base layer increases gradually, but the growth rate continues to decrease. Relying on the actual engineering project, the fatigue prediction

Received: 2020-02-24; **Revised:** 2020-05-20; **Accepted:** 2020-09-10

Foundation: Key Science and Technology Projects of the Ministry of Transport (2018-MS2-042); Science and Technology Demonstration Projects of the Ministry of Transport (2017-04)

Corresponding author: Professor WANG Xuancang. E-mail: wxc2005@163.com

Citation: FANG Naren, HU Shiqing, WANG Xuancang, et al. Fatigue damage analysis of cement stabilized sub-base during construction period [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 61-68. (in Chinese)

equation of the cement stabilized gravel sub-base can be obtained by using Miner theory to calculate the fatigue damage degree of the subbase caused by different construction loads under different working conditions, which provides guidance for the design and construction of the pavement.

Key words: road engineering; fatigue damage analysis; fatigue equation; Miner theory; cement stabilized gravel; sub-base

实际工程中,若在水泥稳定碎石底基层养生 7~14 d 后进行下阶段施工,此时底基层强度尚未达到设计值,运输车辆轴载只能由刚铺筑的结构层承担,底基层内部容易产生微裂缝,影响道路寿命^[1-2].因此,进行施工期车辆荷载对水泥稳定碎石底基层影响的研究显得尤为重要.

目前,中国高速公路主要采用沥青面层和半刚性基层的组合式路面结构.大部分学者通过研究混合料的选择、配合比设计和抗反射裂缝等,提出优化水泥稳定碎石材料、严格控制含水量和增加压实功能等措施,以减小基层开裂^[3-5].只有少数学者从施工期的底基层结构损伤方面考虑道路的疲劳寿命.曹强^[6]指出超载严重的施工期荷载将损失路面结构的使用寿命.张丽宏^[7]分析了水泥稳定基层裂缝产生的机理,指出施工荷载对初期结构层的破坏远大于达到设计强度后的破坏.

目前,多数研究在进行疲劳损伤分析时,并没有考虑施工车辆荷载对路面结构造成的早期疲劳损伤^[8],也很少具体分析出水泥稳定碎石底基层在不同养生龄期和不同施工荷载作用下受到的疲劳损伤^[9].本研究调查了施工期常用车辆荷载,分析不同荷载、不同底基层模量和厚度下的最大层底拉应力,采用 ABAQUS 软件计算了水泥稳定碎石底基层施工应力分布,采用疲劳试验得到水泥稳定碎石底基层的疲劳预估方程,建立不同施工时期的路面工况模型,提出施工荷载作用下水泥稳定碎石底基层疲劳寿命损伤的计算方法.

1 施工期水稳底基层荷载应力分析

中国现行的路面结构设计规范规定,道路使用寿命的开始计算时间是从道路正常通车开始,这项规定没有考虑施工期车辆荷载对道路使用寿命的影响.规范设计轴载为单轴双轮组 100 kN,但在实际施工中,施工段所受到的荷载远高于设计值^[10].

1.1 施工期车辆荷载分析

本研究依托内蒙古自治区 s203 公路,路面结构为:4 cm AC-13C 上面层+6 cm AC-20C 下面层

+18 cm 5% 水泥稳定碎石基层+32 cm 4.5% 水泥稳定碎石底基层.

调查施工期车辆荷载发现,运料车基本上是双后轴重型自卸式货车,车辆总质量在 35 000~70 000 kg,前后轴长度比例约为 0.250:0.375:0.375^[6].根据前后轴轴载分配比例及载重分布,确定轴载分析范围为 100~260 kN,且轴载主要集中在 140~180 kN^[11].轴重增加,轮胎与地面的接地面积也随之增加,因此采用比利时接地面积与轴重经验关系式^[12]计算不同轴载下车辆接地面积,

$$S = (0.008P + 152) \pm 70 \quad (1)$$

其中, S 为单轮轮胎接触面积; P 为单轮轮胎荷载; ± 70 为保证率达到 90% 的误差范围.

根据式(1)计算得到,当轴载分别为 100、120、140、160、180、200、220、240 和 260 kN 时,对应的单轮当量圆半径分别为 10.59、11.17、11.73、12.26、12.77、13.26、13.73、14.18 和 14.61 cm;对应的压强分别为 0.71、0.77、0.81、0.85、0.88、0.91、0.93、0.95 和 0.97 MPa.

为了分析不同轴载对路面结构造成的损伤,假设采用统一荷载车辆进行运输,根据该路段的长度和路面结构,计算出铺筑该路段所需混合料的总质量,进而得到车次.

分析底基层承受荷载作用次数的分布情况.距离拌合站越近,作用次数越多;距离拌合站越远,作用次数越少.不同轴载作用下铺设各个结构层所需运料车次如表 1.

对于施工期的车辆荷载作用次数,需要按照等效原则换算为标准轴载作用次数,规范给出的公式是单轴轴载小于 130 kN 时得到的.很多研究表明,随着轴载的增加,由于材料的非线性贡献的弯沉比例增加,轴载与弯沉呈现指数曲线形势,这种形势在轴载大于 130 kN 后趋于明显,根据规范规定及陈飞等^[13-14]的研究结果,本研究采用“半刚性材料层的拉应力”等效原则,按式(2)进行换算,具体换算结果如表 2.

$$N = C_1 C_2 N_1 \left(\frac{P_1}{P} \right)^{8.95/A_c} \quad (2)$$

其中, N 为以半刚性材料层的拉应力为设计指标时各层的轴载作用次数; C_1 为被换算车型的轴系数; C_2 为被换算车型的轮组系数, 双轮组为 1.0, 单轮组为 18.5, 四轮组为 0.09; N_1 为被换算车型在各级轴载下的运料车次; A_c 为公路等级系数, 高速公路和一级公路为 1.0, 二级公路为 1.1, 三级公路和四级公路为 1.2; P_1 为被换算车型的各级轴载; P 为被换算车型的标准轴载。

表 1 运料车次

Table 1 Number of vehicles

轴载/ kN	车 次			总车次
	基层车次	下面层车次	上面层车次	
100	5 872	2 128	2 067	10 067
120	4 003	1 450	1 413	6 866
140	3 024	1 095	1 067	5 186
160	2 446	886	854	4 186
180	2 042	741	715	3 498
200	1 761	639	617	3 017
220	1 542	559	534	2 635
240	1 376	499	476	2 351
260	1 240	450	432	2 122

表 2 标准轴载作用次数

Table 2 Number of action of standard axle load

轴载/ kN	作用次数			总次数
	基层次数	下面层次数	上面层次数	
100	19 089	6 918	6 720	32 727
120	66 540	24 103	23 488	114 131
140	204 332	73 989	72 097	350 418
160	533 813	193 360	186 376	913 549
180	1 301 657	472 345	455 771	2 229 773
200	2 831 573	1 027 470	992 096	4 851 139
220	5 903 361	2 140 064	2 044 355	10 087 780
240	11 311 815	4 102 177	3 913 099	19 327 091
260	20 870 666	7 574 032	7 271 071	35 715 769

以标准轴载作用次数为基准, 统一 100、120、140、160、180、200、220、240 和 260 kN 对路面结构的作用次数, 随着轴载的增大, 路面各个结构层承受的作用次数急速增大, 更容易对路面结构造

成损害。

1.2 施工期结构层模型及参数的确定

在施工过程中, 不同阶段的路面受力状态不同, 但底基层始终承受铺筑各结构层时的施工荷载, 层底始终处于受拉状态。

进行施工应力分析时, 本研究选取 9 种车辆荷载进行计算。为了分析不同底基层厚度所引起的拉应力变化, 底基层厚度分别取 16、20、24、28 和 32 cm。为了分析不同底基层模量所引起的拉应力变化, 底基层模量分别取 400、800、1 200、1 600 和 2 000 MPa。其他参数取值为: 底基层泊松比为 0.25, 土基模量为 60 MPa, 泊松比为 0.4。

1.3 计算结果与分析

1.3.1 底基层厚度的影响

取底基层模量为 1 600 MPa、土基模量为 60 MPa 时, 分析不同底基层厚度下的最大层底拉应力, 结果如图 1。从图 1 可知, 最大层底拉应力随着底基层厚度的增大而减小, 但减小率普遍较低。随着厚度的增加, 层底拉应力的减小率缓慢增大, 最大减小率仅约为 8.8%, 说明底基层厚度的变化对层底拉应力的影响较小。可以根据施工实际选择适合的底基层厚度。

图 1 底基层厚度与最大层底拉应力的关系

Fig. 1 (Color online) Relationship between maximum sub-base tensile stress and substrate thickness

1.3.2 底基层模量的影响

取底基层厚度为 24 cm、土基模量为 60 MPa 时, 分析不同底基层模量下的最大层底拉应力, 结

果如图 2。从图 2 可知,最大层底拉应力随着底基层模量的增加而增大,且不同荷载作用下的拉应力增长率大致相同。当底基层模量从 400 MPa 增加到 800 MPa 时,拉应力的增长率高达 52.9%;当底基层模量从 1 600 MPa 增加到 2 000 MPa 时,拉应力的增长率为 18.7%。说明模量较小时,对层底拉应力的影响较大,但随着模量的增大,影响力逐渐减小。考虑到底基层应具有一定的柔性,因此模量并不是越大越好,应控制在一定范围。

图 2 底基层模量与最大层底拉应力的关系

Fig. 2 (Color online) The relationship between the maximum tensile stress of the sub-base layer and the modulus of the sub-base layer

综上所述,可以通过增大底基层厚度和模量的方法,减小底基层层底拉应力,从而提高路面使用寿命。考虑到底基层厚度对层底拉应力的影响相对较小,底基层模量随着养生龄期的增加而增大,对层底拉应力的影响较大。

2 水稳底基层的疲劳损伤研究

在整个建设期内,各个阶段的施工荷载会对道路的底基层造成疲劳损伤。因为前期底基层强度较低,施工荷载造成的疲劳损伤不能被忽略^[15-16]。本研究基于实际工程的层位应力分析,考虑不同工况下施工荷载对底基层产生的疲劳损伤,引入 Miner 线性累积损伤理论,则材料的累计疲劳损伤率 D 为

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

其中, N_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 为当材料破坏时各级荷载所对应的作用次数; n_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 为实际情况中各级荷载的作用次数。

2.1 试验设计

世界各国目前应用的疲劳试验为劈裂疲劳试验和弯曲疲劳试验。其中,梁试件弯曲试验最为普遍,操作简便,因此本研究采用三点加载弯曲疲劳试验对水泥稳定碎石底基层的疲劳性能开展研究。根据依托工程的实际情况,采用 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的中梁试件,水泥质量分数为 5.0%,级配为骨架密实型^[17]。采用振动法成型试件,在标准温度 20°C 下,分别养生 7、14、21、28 和 90 d,每个龄期成型 3 组试件,取测量结果平均值。测定前一天将试件浸水 24 h,进行弯拉强度试验后,采用 10 Hz 正弦波应力控制加载模式,进行应力比分别为 0.6、0.7 和 0.8 时的疲劳试验(应力循环特征值为 0.1)。

2.2 试验结果讨论

弯拉强度试验结果如图 3。随着养生天数的增加,弯拉强度逐渐增大,但增长速率逐渐减小。因为随着养生天数的增加,水泥内部水化逐步完成,混合料内部的晶体大量增多,产生较多的网状结构,而随着化学反应的逐渐完成,材料强度基本形成,因此其增长速度逐渐减小。

图 3 不同养生龄期下的弯拉强度

Fig. 3 Bending tensile strength at different health ages

养生 90 d 的试件,其弯拉强度为 1.27 MPa,最大荷载为 5.6 kN。水泥稳定碎石底基层疲劳寿命分散性较大,因此应用韦布尔分布理论对试验数据进行处理。保证率为 50% 时的对数疲劳预估方程为

$$\lg N = 10.79 - 8.17\sigma/f_r \quad (4)$$

其中, N 为达到破坏时重复作用次数; σ 为重复弯拉应力(单位: MPa); f_r 为弯拉强度标准值(单位:

MPa).

龄期为90 d时,水泥稳定碎石材料强度与模量达到稳定状态,疲劳试验的离散性相对较小,具有参考和统计价值.因此,本研究以90 d龄期试件的疲劳方程进行计算.

3 施工期水稳底基层疲劳损伤计算

3.1 分析实际工程的层位应力

实际工程的路面结构层参数如表3.

表3 各结构层计算参数

Table 3 Calculation parameters of each structural layer

结构层名称	结构层厚度/cm	抗压回弹模量/MPa			
		7 d	14 d	21 d	28 d
上面层	4	2 100	2 100	2 100	2 100
下面层	6	1 900	1 900	1 900	1 900
5%水稳碎石基层	18	1 300	1 700	1 900	2 100
4.5%水稳碎石底基层	32	1 200	1 600	1 850	2 000
土基		60	60	60	60

计算底基层在不同荷载、不同龄期下作用下的最大层底拉应力,结果如图4.由图4可知,在相同养生天数下,最大层底拉应力随着施工荷载的增大而增加,但增长速率逐渐降低,从12%降低至7%(不同养生天数下的增长率降低规律都一致);在相同荷载作用下,最大层底拉应力随着养生天数的增长而增加,增长速率逐渐降低,约从11.5%降低至6.6%(不同施工荷载下的增长率降低规律都一致);随着荷载从120 kN增长至260 kN,最大层底拉应力分别增长了11.4%和94.0%;随着养生龄期由14 d增加至28 d,最大层底拉应力分别增大了12.9%和27.1%.

3.2 不同工况下疲劳损伤分析

在实际施工过程中,施工期在铺筑不同结构层时的水泥稳定碎石底基层所处工况也不同,针对不同工况提出的路面工况模型如图5.其中, E_0 为土基模量; E_s 为底基层模量; E_b 为基层模量; E_i 为下面层模量, E_u 为上面层模量; δ 为两个模型间的距离.工况1表示底基层养护7 d后,进行基层施工时的状况;工况2表示底基层养护7 d后,基层施工完毕养生7 d,进行下面层施工时的状况;工况3

(a) 不同荷载与最大层底拉应力的关系

(b) 不同养生龄期与最大层底拉应力的关系

图4 不同情况下计算得到的最大层底拉应力

Fig. 4 (Color online) Maximum base layer tensile stress calculated under different conditions

表示下面层施工完毕养生7 d后,进行上面层施工时的状况;工况4表示上面层施工完毕养护7 d后,路面正式通车的情况.计算不同工况下每层路面结构施工养生7 d后,不同轴载作用下的最大层底拉应力,结果如图6.

由图3可知,水泥稳定碎石底基层养生7、14、21和28 d下的最大弯拉强度分别为0.78、0.96、1.02和1.10 MPa.由图6不同工况时的最大层底拉应力除以对应龄期时的抗拉强度,即为应力比.各工况下的应力比如表4.

由表4可知,随着养生龄期的增加,应力比逐渐减小,对路面造成的损伤也越来越小,路面最不利工况为工况1.

采用 Miner 线性损伤理论,计算得到不同荷载作用对路面造成的疲劳损伤值(表5).其中,工况

图 5 不同施工时期的路面工况模型
Fig. 5 Models of pavement conditions
in different construction periods

4 为路面运营期间, 因此没有施工荷载作用. 在工况 1 下容易发生疲劳损伤. 轴载小于 200 kN 时, 造成的疲劳损伤较小, 可忽略不计; 轴载为 220 kN 时, 疲劳损伤为 0.15; 轴载为 240 kN 时, 疲劳损伤为 0.36; 轴载增加至 260 kN 时, 疲劳损伤达 0.80.

随着路面结构铺筑的逐步完成, 车辆荷载对底基层的损伤迅速减小. 因此, 在路面结构设计时应

图 6 不同工况下不同轴载作用的最大层底拉应力
Fig. 6 (Color online) Maximum bottom layer
tensile stress of different loads under
different working conditions

该充分考虑施工荷载对底基层的损伤, 适当增加底基层的厚度, 严格限制超载施工车辆进入施工区域^[18-20]. 车辆轴载对底基层的损伤影响很大, 荷载从 220 kN 增至 240 kN 时, 损伤增加约 21%; 荷载从 240 kN 增至 260 kN 时, 损伤增到 81%. 从另一方面考虑, 随着底基层养生龄期的增加, 能承受的车辆荷载明显增加, 相同轴载作用下的损伤也在降低. 因此, 应尽量增加基层养生龄期. 在自然环境恶劣、工期紧张的地方, 设计值应该考虑增加底基层材料的强度与厚度. 底基层养生铺筑基层时, 严格限制超载车辆进入施工区域, 减小施工期荷载车辆对路面的损伤.

表 4 不同工况和荷载下的应力比

Table 4 Stress ratio under different working
conditions and loads

荷载/kN	应力比			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
100	0.294	0.156	0.127	0.108
120	0.315	0.163	0.135	0.115
140	0.344	0.172	0.143	0.120
160	0.356	0.180	0.148	0.124
180	0.367	0.188	0.153	0.130
200	0.376	0.195	0.160	0.136
220	0.387	0.202	0.165	0.141
240	0.399	0.209	0.170	0.145
260	0.413	0.216	0.176	0.150

表5 不同工况和轴载下底基层的疲劳损伤情况
Table 5 Fatigue damages of sub-base under different working conditions and loads

车辆轴 载/kN	疲劳损伤				累计疲 劳损伤
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	
100	7.7×10^{-5}	2.1×10^{-6}	1.2×10^{-6}	0	8.1×10^{-5}
120	4.3×10^{-4}	9.2×10^{-6}	5.0×10^{-6}	0	4.4×10^{-4}
140	2.2×10^{-3}	3.6×10^{-5}	1.9×10^{-5}	0	2.2×10^{-3}
160	6.9×10^{-3}	1.1×10^{-4}	5.4×10^{-5}	0	7.1×10^{-3}
180	2.2×10^{-2}	2.3×10^{-4}	1.5×10^{-4}	0	2.2×10^{-2}
200	0.06	7.5×10^{-4}	3.6×10^{-4}	0	6.1×10^{-2}
220	0.15	1.7×10^{-3}	7.8×10^{-4}	0	0.156
240	0.36	3.4×10^{-3}	1.6×10^{-3}	0	0.362
260	0.80	7.1×10^{-3}	3.3×10^{-3}	0	0.810

4 结 论

1) 计算得到了施工期间各个结构层运料车作用次数和标准轴载作用次数,为半刚性基层应力分析提供参考;运用软件模拟计算了不同荷载、模量及底基层厚度下的最大层底拉应力,得到底基层厚度和底基层模量对层底拉应力的影响规律,得到了厚度和模量的确定标准。

2) 依托实际工程,得到了不同荷载和养生龄期对最大层底拉应力的影响;进行弯拉强度试验及疲劳试验,得到了50%保证率下的水泥稳定碎石底基层疲劳预估方程。

3) 建立了不同施工时期的路面工况模型,计算了不同工况下底基层的疲劳寿命,采用 Miner 线性累积损伤理论得到不同施工荷载下路面的累计疲劳损伤值。

基金项目:交通运输部重点科技资助项目(2018-MS2-042);交通运输部科技示范工程资助项目(2017-04)

作者简介:房娜仁(1992—),天津城建大学讲师。研究方向:路基路面工程。E-mail: 2017021044@chd.edu.cn

引文:房娜仁,胡士清,王选仓,等.施工期水泥稳定碎石底基层的疲劳损伤分析[J].深圳大学学报理工版,2021,38(1): 61-68.

参考文献 / References:

- [1] MARANDI S M, SAFAPOUR P. Base course modification through stabilization using cement and bitumen [J]. American Journal of Applied Sciences, 2009, 6(1): 30-

42.

- [2] LI Qiang, WANG Zhibing, LI Yuliang, et al. Cold recycling of lime-fly ash stabilized macadam mixtures as pavement bases and subbases [J]. Construction and Building Materials, 2018, 169(30): 306-314.
- [3] YE Hongyu, WANG Xuancang, FANG Naren, et al. Low-temperature performance and evaluation index of gussasphalt for steel bridge decks [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(2): 1-11.
- [4] 王 艳,倪富健,李再新.水泥稳定碎石基层温缩性能试验及预估控制[J].东南大学学报自然科学版,2008,38(2): 260-264.
- WANG Yan, NI Fujian, LI Zaixin. Experiment and prediction control of temperature shrinkage performance of cement stabilized crushed stone base [J]. Journal of Southeast University Natural Science, 2008, 38(2): 260-264. (in Chinese)
- [5] 周辉勇.水泥稳定碎石基层路用性能及施工技术研究[J].工程建设与设计,2017(10): 74-75.
- ZHOU Huiyong. Research on road performance and construction technology of cement stabilized crushed stone base [J]. Engineering Construction and Design, 2017(10): 74-75. (in Chinese)
- [6] 曹 强.水泥稳定碎石基层施工期结构损伤分析及其处治措施研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
- CAO Qiang. Structural damage analysis and treatment measures of cement stabilized macadam base during construction [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 张丽宏,廖福星,刘巨伟.水泥稳定碎石基层裂缝的控制[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(7): 60-63.
- ZHANG Lihong, LIAO Fuxing, LIU Juwei. Control of cracks in cement stabilized gravel base [J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(7): 60-63. (in Chinese)
- [8] YOON S, ABU-FARSAKH M. Laboratory investigation on the strength characteristics of cement-sand as base material [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2009, 13(1): 15-22.
- [9] LI Wei, LANG Lei, LIN Zhenyue, et al. Characteristics of dry shrinkage and temperature shrinkage of cement-stabilized steel slag [J]. Construction and Building Materials, 2017, 134(3): 540-548.
- [10] 吕松涛,陈杰东,张 晖.水泥稳定碎石拉压弯静态模量与动态模量比较分析[J].公路交通科技,2016,33(10): 39-43, 59.
- LV Songtao, CHEN Jiedong, ZHANG Hui. Comparative

- analysis of static and dynamic modulus of tension and compression of cement stabilized crushed stone [J]. Highway Transportation Science and Technology, 2016, 33(10): 39-43, 59. (in Chinese)
- [11] 张敏江, 方竹胜, 刘洪涛, 等. 水泥稳定级配碎石基层材料路用性能及超轴载下疲劳寿命研究[J]. 沈阳建筑大学学报自然科学版, 2016, 32(6): 1075-1082. ZHANG Minjiang, FANG Zhusheng, LIU Hongtao, et al. Study on road performance and fatigue life under super axial load of cement stabilized graded crushed stone base material [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2016, 32(6): 1075-1082. (in Chinese)
- [12] 孟 岩, 郭林泉, 谈至明. 路面载重车辆的荷载特征[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4): 1-6. MENG Yan, GUO Linquan, TAN Zhiming. Load characteristics of road load vehicles [J]. Highway Transportation Technology, 2007, 24(4): 1-6. (in Chinese)
- [13] 陈 飞, 马 融. 基于两阶段水泥稳定碎石基层寿命预估研究[J]. 公路, 2016, 61(5): 174-177. CHEN Fei, MA Rong. Research on life prediction of cement stabilized crushed stone base course based on two stages [J]. Highway, 2016, 61(5): 174-177. (in Chinese)
- [14] 何 锐. 基于实测轴载谱的沥青路面轴载换算与设计参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. HE Rui. Research on axle load conversion and design parameters of asphalt pavement based on measured axle load spectrum [D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese)
- [15] HADI M, RUI F, GUANG Y, et al. Microstructure-based prediction of the elastic behaviour of hydrating cement pastes [J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(3): 442-445.
- [16] MA Yinhua, GU Jianyi, LI Ya, et al. The bending fatigue performance of cement-stabilized aggregate reinforced with polypropylene filament fiber [J]. Construction and Building Materials, 2015, 132(3): 230-236.
- [17] WANG Xuancang, FANG Naren, YE Hongyu, et al. Fatigue damage analysis of cement-stabilized base under construction loading [J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(11): 2263-2283.
- [18] WANG Xuancang, SU Ziyuan, XU Aimin, et al. Shear fatigue between asphalt pavement layers and its application in design [J]. Construction and Building Materials, 2017, 134(3): 297-305.
- [19] 郭 芳, 付宏渊, 邵腊庚. 基于环境温度变化的混合式基层沥青路面结构疲劳损伤分析 [J]. 中南大学学报自然科学版, 2015, 46(5): 1869-1875. GUO Fang, FU Hongyuan, SHAO Lageng. Fatigue damage analysis of asphalt pavement structure based on ambient temperature variation [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2015, 46(5): 1869-1875. (in Chinese)
- [20] 孙志林, 贺三春, 王 辉. 低温荷载下沥青路面非线性疲劳损伤数值模拟[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1): 149-154, 203. SUN Zhilin, HE Sanchun, WANG Hui. Numerical simulation of nonlinear fatigue damage of asphalt pavement under low temperature load [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(1): 149-154, 203. (in Chinese)
- 【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】