

张磊,张定一,程龙,等. 基于 SCB 试验的既有高速公路半刚性基层疲劳寿命预估[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(3): 1-10.
ZHANG Lei, ZHANG Ding-yi, CHENG Long, et al. Fatigue life evaluation of semi-rigid base course of existing expressway based on SCB test [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43(3): 1-10.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.03.001

基于 SCB 试验的既有高速公路半刚性 基层疲劳寿命预估

张磊¹, 张定一¹, 程龙¹, 庄园², 胡洪龙³, 孙应钦¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210001; 2. 江苏高速公路工程养护技术有限公司, 江苏 南京 210001;
3. 华设设计集团, 江苏 南京 210001)

摘要:为了利用现行路面设计规范中基层结构疲劳寿命计算方法对既有高速公路半刚性基层进行疲劳寿命预估, 首先对所取基层芯样进行半圆弯曲(SCB)疲劳试验, 得到基层疲劳寿命方程; 然后根据力学试验数据以及理论模拟, 建立了无侧限抗压强度和弯拉(劈裂)强度, 及落锤式弯沉仪(FWD)弯沉差与基层层底拉应力之间的回归方程; 最后借助 SCB 疲劳试验方程和建立的回归关系, 构建了以无侧限抗压强度和 FWD 弯沉差为指标的基层疲劳模型, 并进行模型验证。结果表明: SCB 试验中半圆试件在底部切口上方及两端区域内受拉应力作用, 这与利用 BISAR 计算的基层内部实际受力状态一致。半刚性基层材料的无侧限抗压强度和半圆劈裂强度具有较好的线性正相关性, 即抗压强度较高的材料其抗裂性能也较高。利用建立的疲劳模型可以得到路段 A、B、C、D 二灰稳定碎石基层在 99% 保证率下的疲劳寿命分别为 6.496×10^{10} 、 2.541×10^{10} 、 6.569×10^{10} 和 5.378×10^{10} 次。经验证, 其相对误差在 8% 以内, 满足精度要求, 可以为既有半刚性基层利用策略提供决策依据。

关键词: 道路工程; SCB 试验; FWD 弯沉差; 半刚性基层; 疲劳寿命评价

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2023)03-0001-10

Fatigue life evaluation of semi-rigid base course of existing expressway based on SCB test

ZHANG Lei¹, ZHANG Ding-yi¹, CHENG Long¹, ZHUANG Yuan²,
HU Hong-long³, SUN Ying-qin¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210001, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Limited Company, Nanjing 210001, Jiangsu, China;
3. China Design Group, Nanjing 210001, Jiangsu, China)

Abstract: In order to use the fatigue life calculation method of the base structure in the current pavement design specifications to estimate the fatigue life of the semi-rigid base of existing highways. Firstly, semicircular bending (SCB) fatigue test was conducted to obtain the base

收稿日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778142); 山东省交通运输科技计划项目(2022BH08);

江苏省交通运输科技与成果转化项目(2019Z04); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX20_0128)

作者简介: 张磊(1977-), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: lei800@163.com。

fatigue life equation. Then, according to the mechanical test data and theoretical simulation, the regression equations between the unconfined compressive strength and flexural tensile (splitting) strength, the FWD deflection difference and the bottom tensile stress of the base layer were established. Finally, with the help of the SCB fatigue test equation and the established regression relationship, a base-level fatigue model with unconfined compressive strength and FWD deflection difference as the index was constructed, and the model was verified. The results show that in the SCB test, the semicircular specimen is subjected to tensile stress above the bottom cut and in the regions at both ends, which is consistent with the actual stress state inside the base calculated by BISAR. The unconfined compressive strength and semicircular splitting strength of the semi-rigid base material have a good linear positive correlation, and the material with higher compressive strength has higher crack resistance. Using the established fatigue model, the fatigue life of the lime fly ash gravel base layer of road sections A, B, C and D is 6.496×10^{10} , 2.541×10^{10} , 6.569×10^{10} and 5.378×10^{10} times. It has been verified that the error is within 8%, which meets the accuracy requirements and can provide a decision basis for the utilization strategy of the existing semi-rigid base. 3 tabs, 9 figs, 28 refs.

Key words: road engineering; SCB test; FWD deflection difference; semi-rigid base; fatigue life evaluation

0 引言

截至 2021 年底,中国高速公路通车总里程已达 16.82 万 km,位居世界第一。然而中国高速公路设计使用年限较短,仅为 15 年,其中早期修建的高速公路服役年限已接近甚至超过 20 年,大量的公路目前处于改扩建阶段。不同于新建道路,既有道路使用年限长、维修养护次数多、病害组成情况较为复杂,尤其是半刚性基层,作为道路结构的主要承重层,掌握其疲劳损伤状况对于改扩建工程意义重大^[1-4]。

目前中国通常采用间接拉伸试验和小梁四点弯曲试验来评估半刚性基层的疲劳性能,其中间接拉伸试验沿试件直径方向应力分布复杂,试件中心处所受压应力远大于拉应力,与基层实际应力状态相差较大^[5];小梁四点弯曲试验加载力学模型简单,梁中段受均匀的弯拉应力作用,但小梁试件需从现场切割的板中得到,对既有路面损坏大且基层的受力状态也有别于小梁试件的纯弯曲受力状态,导致其评价既有路面结构层性能时存在一定的局限性^[6-7]。基于此,半圆弯曲试验(SCB)以其制备简单、对路面损坏小、重复性好等优点^[8-9],已逐渐引起国内外研究人员的关注。付欣等采用 ANSYS 对带切口的 SCB 试件进行参数分析,发现半圆试件的受力更接近路面结构的受力状态^[10]。赵晓康等采用离散元法和随机算法建立细观非均质随机骨料数值模型,

并利用该模型开展 SCB 强度和疲劳试验,模拟了疲劳开裂全过程^[11]。Dong 等对基层芯样进行 SCB 疲劳试验,通过试验结果建立疲劳方程,从而对既有高速公路半刚性基层的长期性能进行了评价^[12]。

国内外学者对于半刚性基层的疲劳损伤模型也做了较广泛的研究,并取得了一定的研究成果。Thoegersen 等针对 6 条半刚性路面(3 种类型)进行了足尺试验,提出以基层层底拉应变为指标、75%通过率下的结构疲劳方程^[13]。西班牙水稳材料的疲劳模型以材料长期抗弯强度和拉应力作为响应指标;美国规范中,水泥土、水稳碎石以及贫混凝土疲劳模型采用基层层底拉应力和 28 d 弯拉强度为响应指标^[14-15]。中国《公路沥青路面设计规范(JTG D50—2017)》针对无机结合料稳定层(半刚性基层),提出以层底拉应力和弯拉强度为指标的疲劳计算模型。沙爱民等采用振动法制作了 4 种半刚性基层材料不同结构类型的梁试件,应用 MTS 试验机进行了疲劳性能试验并对试验结果进行回归分析,建立了以层底拉应力和弯拉强度为指标的不同材料、不同结构试件的室内疲劳寿命预估模型^[16]。韦金城改进了半刚性材料室内疲劳损伤测试方法,提出了用弯拉模量衰减率和弯拉强度比 2 项指标联合表征的典型半刚性材料疲劳损伤模型^[17]。

尽管国内外学者对半刚性基层的疲劳模型进行了详细的研究,但仍然存在以下问题:①已有研究大

多针对室内刚成型试件^[16,18],对既有公路基层芯样研究较少;②已有疲劳模型大多以弯拉强度和基层层底拉应力作为指标来计算疲劳寿命^[16,19-20],既有路面的弯拉强度和基层层底拉应力较难得到,因此利用该疲劳模型对既有高速公路基层疲劳寿命进行评价具有一定的难度。

基于上述问题,本文首先基于 SCB 试验,得到基层疲劳寿命方程。然后根据试验实测数据和理论模拟,建立无侧限抗压强度和弯拉(劈裂)强度,及落锤式弯沉仪(FWD)弯沉差和基层层底拉应力之间的回归方程。最后将回归方程代入疲劳寿命方程中,构建了以无侧限抗压强度和 FWD 弯沉差为指标的基层疲劳模型。鉴于无侧限抗压强度和 FWD

弯沉差是改扩建工程中的常规检测项目,因此该疲劳模型评价指标简单易得,利用其可对既有高速公路半刚性基层疲劳寿命进行快速有效的评价,可为中国高速公路的改扩建工程提供依据。

1 材料与试验方法

1.1 典型路段概况

在京沪(北京—上海)高速公路新沂段行车道裂缝处进行钻芯取样,该公路服役年限已达 20 年,半刚性基层类型为二灰稳定碎石基层。根据面层表面百米裂缝数量将其划分为 A、B、C、D 四个典型路段,4 个典型路段百米裂缝数量分别为 4、8、2 和 6 条,现场取芯如图 1 所示。



图 1 现场取芯
Fig. 1 On-site coring

1.2 SCB 试验方法

SCB 试件切割流程及试验装置如图 2 所示,首先将钻芯所取的圆柱体试件上、下表面切割,保证试件尺寸为 $\Phi 150\text{ mm}$ (直径) $\times 150\text{ mm}$ (高),并对试件进行整平;然后将切割完成的圆柱体试件沿竖向切割为 3 个等高的片状试件,每 1 片状试件的高度为 50 mm;最后将 3 个片状试件沿直径做第 3 次切割,每个片状试件可获得 2 个相对应的半圆试件。试件底部有 2 个平行圆柱固定支座,可以根据试件尺寸及需求调整位置和间距,半圆顶部是一个圆柱形压头,系统通过压头提供相应的荷载。半圆试件的尺寸为直径 150 mm,厚度 50 mm,缝深 t 为 15 mm,缝宽 h 为 1.5 mm,其中两圆棒支点的距离 S 为 120 mm,相当于半圆试件直径的 80%。

将一个圆柱体试件切割获得的 6 个半圆试件作为 1 组,其中编号为 1、3 和 5 的半圆试件进行半圆劈裂强度试验,加载频率为 50 mm/min,试验过程中每隔 0.01 s 记录当前压头荷载大小及对应竖向位移,直至试件底部开裂破坏,记录峰值荷载。然后将编号 2、4 和 6 的半圆试件在控制应力模式下以同

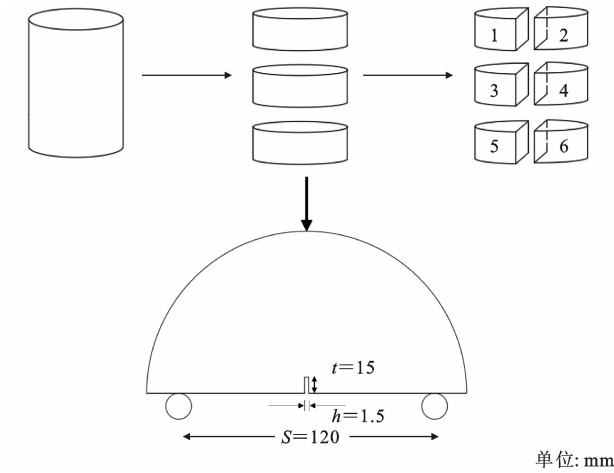


图 2 半圆试件切割流程及试验装置
Fig. 2 Cutting process and test device of semicircle specimen

一应力比进行疲劳试验,加载频率为 10 Hz,加载波为半正弦加载。

1.3 无侧限抗压强度试验方法

无侧限抗压强度试验易于操作,是评价半刚性基层材料力学(抗压)性能的重要指标之一。本文参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》

(JTG E51—2009)对路面基层芯样开展无侧限抗压强度试验,基层芯样的无侧限抗压强度 R_c 。按下式计算

$$R_c = \frac{P}{A}$$

(1)

式中: P 为芯样破坏时最大压力(N); A 为芯样截面面积(mm^2)。

2 SCB 疲劳试验结果

2.1 可行性验证

利用软件 BISAR 对半刚性基层受力状态进行计算可知,半刚性基层内部的应力分布为:沿深度方向由受压转变为受拉,且在层底拉应力达到最大。为验证基于 SCB 的半圆试件受力状态和半刚性基层内部实际的受力状态一致,本节利用有限元软件对 SCB 半圆试件的受力状态进行了分析。有限元模拟采用了三节点平面应力三角形单元(CPS3),加载辊和支撑辊采用刚性曲面进行建模,并假定无摩擦硬接触是滚子和试样之间的界面特性。

通过模拟得到的半圆试件装置及受力状态云图如图 3 所示,其中绿色为压应力区域,红色及橙色部分为拉应力区域。由图 3 可知:半圆试件首先在底部切口的两端及顶部产生拉应力,切口顶部中心处拉应力达到峰值,试件顶部圆弧向内区域和底部两支座处主要受压应力作用;随着荷载的施加,试件底部切口开始产生裂缝,且随着裂缝的扩展,受拉区域逐渐上移,试件顶部压应力也逐渐增加,直到试件破坏。因此,SCB 半圆试件底部中心处的受力状态与基层内部实际受力状态一致,能够较好模拟实际基层受力情况。

2.2 SCB 疲劳方程

根据不同芯样切割获得的半圆试件的劈裂强度,对该高速公路基层芯样按不同应力比进行 SCB 疲劳试验,试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知,二灰稳定碎石基层材料在低应力比下很难发生疲劳破坏,如当应力比为 0.5 时,试件可以承受 30 万~50 万次循环加载。但随着应力比的增加,二灰稳定碎石基层材料的疲劳寿命显著降低。当应力比提升至 0.6 时,二灰稳定碎石基层材料疲劳寿命变异系数最大,疲劳寿命为 1 万~5 万次;当应力比提升至 0.7 后,其疲劳寿命仅为千次循环加载;当应力比提升至 0.8 后,二灰稳定碎石基层材料仅能承受几十次循环加载。

将表 1 中的试验结果在半对数坐标下进行回归,绘制出疲劳寿命曲线,如图 4 所示。

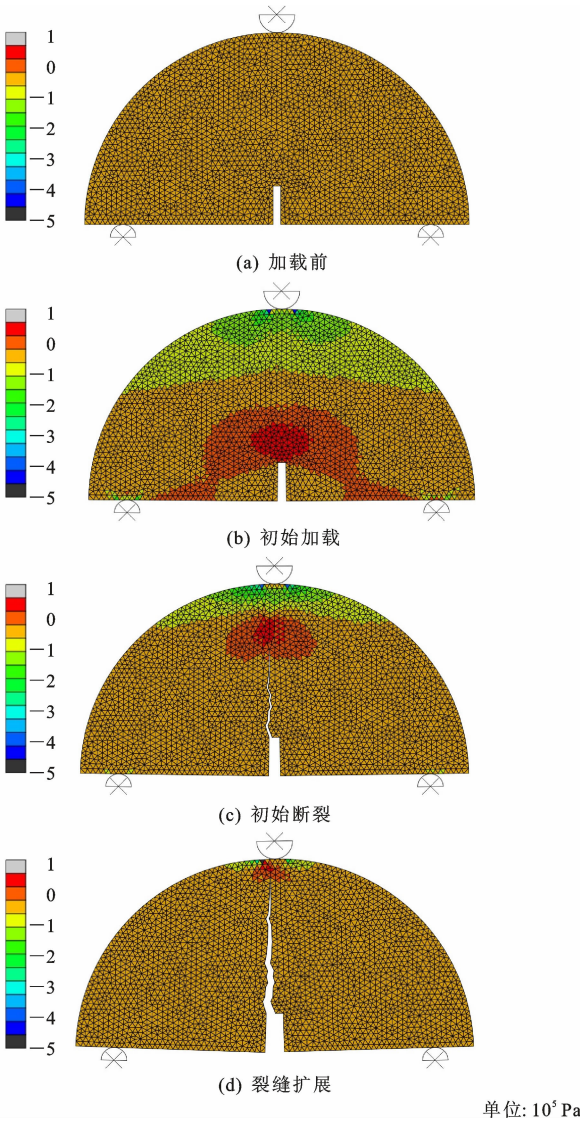


图 3 SCB 半圆试件受力云图

Fig. 3 Force nephograms of SCB semicircle specimens

表 1 基层材料 SCB 疲劳试验结果

Tab. 1 SCB fatigue test results of base material

路段	应力比 k	疲劳破坏加载次数 N
A	0.5	352 750
	0.7	2 663
B	0.7	1 475
	0.8	47
C	0.5	500 155
	0.6	53 900
D	0.6	15 504
	0.8	70

3 回归方程建立

3.1 无侧限抗压强度和弯拉(劈裂)强度

3.1.1 无侧限抗压强度

对路段 A、B、C、D 现场所取芯样按照第 1.3 节

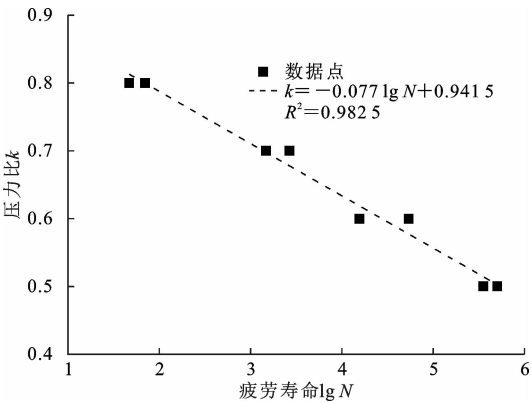


图 4 疲劳方程回归曲线

Fig. 4 Regression curve of fatigue equation

所述方法进行无侧限抗压强度试验,受限于现场取芯以及实验室切割的人工误差,芯样高度无法完全满足一致性,而高度因素对芯样抗压强度影响较大,故利用式(2)和式(3)对芯样尺寸进行标准化处理

$$f_{\frac{l}{d}} = 0.1527 \ln\left(\frac{l}{d}\right) + 1 \quad (2)$$

$$R_{c,f} = f_{\frac{l}{d}} R_c \quad (3)$$

式中: $f_{\frac{l}{d}}$ 为芯样抗压强度尺寸修正系数; l 为芯样高度(mm); d 为芯样直径(mm); $R_{c,f}$ 为芯样无侧限抗压强度 R_c 的修正值(MPa)。

所得试验结果如图 5 所示,图 5 中左边阴影图反映强度大小分布情况,中间箱线图反映数据聚集区间,右边正态图反映数据离散情况,正态图中的 5 个点代表 5 个不同芯样的强度。其中 0.2、0.4、0.6、0.8 代表数据的位置关系,数据中值位于正中间,即坐标 0.5,其余数据按等距间隔依次排列。2 条红色虚线之间表示数据处于正态分布,±0.67 为标准正态分布 0.75 所对应的分位数,通过查正态分布表可得。

根据图 5 可知,所选典型路段 A、B、C、D 二灰稳定碎石基层无侧限抗压强度均值分别为:15.88、8.17、17.7 和 13.07 MPa,均满足中国对于长期基层芯样无侧限抗压强度的要求,且按强度由大到小依次为路段 C、路段 A、路段 D、路段 B。4 个路段的变异系数为 0.148~0.278,由大到小依次为路段 C、路段 D、路段 B、路段 A。

3.1.2 弯拉(劈裂)强度

根据第 1.2 节所述方法对所取芯样进行 SCB 劈裂强度试验,半圆试件开裂状态如图 6 所示。

由图 6(a)可知,裂缝从切口顶端产生,首先到达集料①的底部,并沿着集料①的右侧边缘处向上发展,到达集料②的左侧边缘,然后继续向上贯穿,

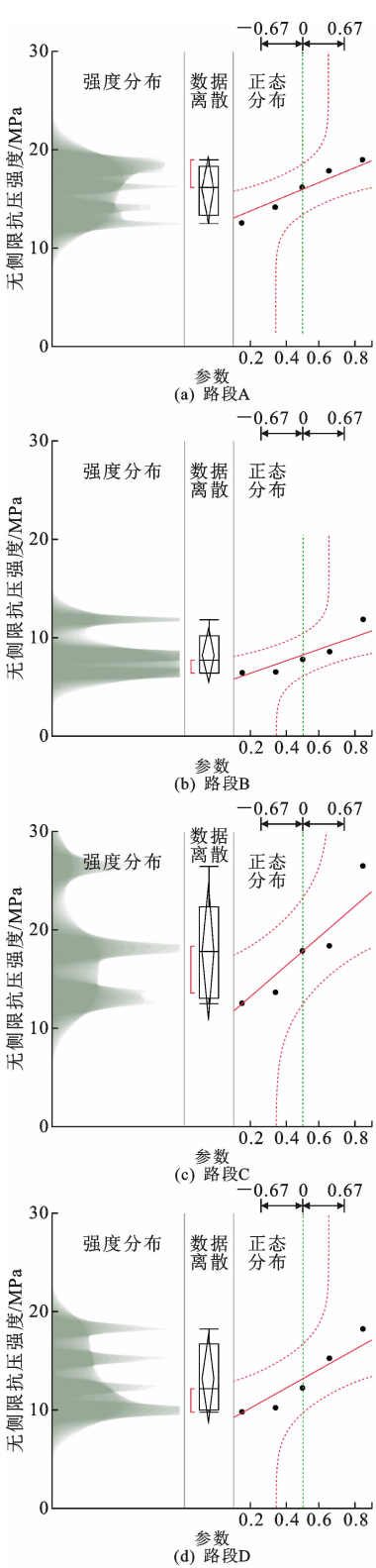


图 5 四个典型路段无侧限抗压强度结果

Fig. 5 Unconfined compressive strength results for four typical road sections

最终试件断裂。由图 6(b)可知,断裂面上集料均完好,且被石灰粉煤灰砂浆包裹。由此可得,劈裂试验本质上是半刚性材料集料间的砂浆受拉应力作用,

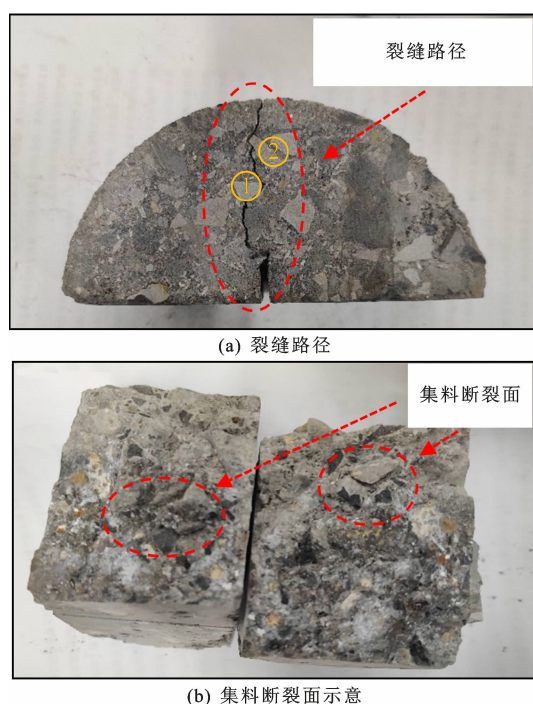


图 6 SCB 劈裂试验试件示意

Fig. 6 Schematic of SCB splitting test specimen

直至超过其抗拉强度,从而分离的过程,其中半刚性材料抗拉强度主要来源于集料间砂浆的黏合、凝结作用。

由 SCB 劈裂试验结果可知,路段 A、B、C、D 平均劈裂强度分别为 1.7、1.29、1.92 和 1.5 MPa,按强度由大到小排列为路段 C、路段 A、路段 D、路段 B,这与无侧限抗压强度以及表面裂缝数量排序结果相同,从而也证明了基层芯样的抗压和抗拉能力具有一定的相关性,且二者均随表面裂缝数量的增加而减小。

3.1.3 回归分析

该高速公路交工验收时的基层 7 d 无侧限抗压强度和劈裂强度分别为 1.18 和 0.08 MPa,这与郑南翔等的研究结果类似,利用无侧限抗压强度和劈裂强度随龄期增长回归关系式,可得到服役 20 年基层芯样无侧限抗压强度和劈裂强度分别为 14.79 和 1.59 MPa,这与本文 4 个典型路段的无侧限抗压强度和劈裂强度均值 13.71 和 1.603 MPa 相近^[21-22]。通过上述分析,可以验证本文所测基层强度数据有效且精度满足要求。

有关研究表明,半刚性基层材料无侧限抗压强度和 SCB 劈裂强度具有一定的相关性^[12]。本文利用实测试验数据对其进行验证,将无侧限抗压强度、SCB 劈裂强度按路段取均值进行线性回归拟合,二者具有良好的正相关性(判定系数 $R^2 = 0.949\ 2$),即抗压强

度较高的材料其抗拉性能也较高,两者的回归方程如下

$$R_{SCB} = 0.063\ 3R_c + 0.734\ 8 \quad (4)$$

式中: R_{SCB} 为基层芯样半圆劈裂强度(MPa)。

3.2 FWD 弯沉差与基层层底拉应力

FWD 自 20 世纪 80 年代提出以来,因弯沉参数中包含的丰富信息及广泛的适用性被道路工程领域普遍用于路面的结构状况评价^[23-26],其现场检测示意如图 7 所示。



图 7 FWD 现场检测

Fig. 7 FWD on-site inspections

已有研究结果表明,弯沉盆参数指标尤其是弯沉差能有效表征路面不同层位的结构性能,崔戌秋采用二维有限元模型对理论弯沉盆的弯沉差与理论基层模量的相关性进行了研究,通过多元回归分析证明 FWD 弯沉差与基层模量的相关性最高, R^2 达到 0.988 5^[27]。胡朋等对 3 种不同的路面结构进行有限元模拟,结果证明基层层底拉应力随着基层模量的增加而增加,即基层层底拉应力和基层模量具有较高的相关性^[28]。

通过上述研究成果可以发现,FWD 弯沉差和基层层底拉应力均与基层模量具有较高的相关性。利用上述结论,本文通过现场 FWD 弯沉检测、模量反算和有限元数值模拟的方法,对实测弯沉差与理论基层层底拉应力的相关性进行了研究,结果表明 FWD 弯沉差和基层层底拉应力相关性最高,如表 2

所示,并建立了 FWD 弯沉差与基层层底拉应力之间的关系分析,流程如下。

表 2 弯沉差与基层层底拉应力的相关性分析结果

Tab. 2 Correlation analysis results of deflection difference and tensile stress at bottom of base layer								
指标	D_0-D_{20}	D_0-D_{30}	D_0-D_{45}	D_0-D_{60}	D_0-D_{90}	D_0-D_{120}	D_0-D_{150}	D_0-D_{180}
R^2	0.047 5	0.094 8	0.167 4	0.245 3	0.226 4	0.229 5	0.259 9	0.248 4
指标	$D_{20}-D_{30}$	$D_{20}-D_{45}$	$D_{20}-D_{60}$	$D_{20}-D_{90}$	$D_{20}-D_{120}$	$D_{20}-D_{150}$	$D_{20}-D_{180}$	
R^2	0.304 2	0.718 0	0.904 0	0.691 5	0.620 4	0.568 9	0.474 1	
指标	$D_{30}-D_{45}$	$D_{30}-D_{60}$	$D_{30}-D_{90}$	$D_{30}-D_{120}$	$D_{30}-D_{150}$	$D_{30}-D_{180}$		
R^2	0.294 1	0.469 4	0.262 2	0.204 7	0.197 1	0.130 2		
指标	$D_{45}-D_{60}$	$D_{45}-D_{90}$	$D_{45}-D_{120}$	$D_{45}-D_{150}$	$D_{45}-D_{180}$			
R^2	0.124 8	0.050 6	0.065 5	0.063 4	0.030 8			
指标	$D_{60}-D_{90}$	$D_{60}-D_{120}$	$D_{60}-D_{150}$	$D_{60}-D_{180}$				
R^2	0.002 6	0.025 4	0.030 9	0.007 6				
指标	$D_{90}-D_{120}$	$D_{90}-D_{150}$	$D_{90}-D_{180}$					
R^2	0.061 4	0.060 5	0.005 4					
指标	$D_{120}-D_{150}$	$D_{120}-D_{180}$						
R^2	0.042 2	0.024 5						
指标	$D_{150}-D_{180}$							
R^2	0.034 9							

(1)在该高速公路 4 个典型路段上选取 20 个点位进行 FWD 现场检测,获取其弯沉盆参数。采用的 FWD 弯沉仪为九点式弯沉仪,传感器位置距荷载中心分别为 0、20、30、45、60、90、120、150 和 180 cm,各传感器弯沉表示为 D_0 、 D_{20} 、 D_{30} 、 D_{45} 、 D_{60} 、 D_{90} 、 D_{120} 、 D_{150} 和 D_{180} 。

(2)根据现场实测段统计弯沉数据,借助 Dynatest 落锤式弯沉仪配套的 ELMOD 软件对 20 个点位的结构层模量进行反算,ELMOD 软件采用当量层原理进行计算。同时按照该高速公路实际路面结构层厚度建立三维有限元模型,有限元模型长、宽、高分别为 10.5、10、9.76 m,层间设置完全连续,边界条件为横向两侧面约束水平位移,模型底部固定,采用半正弦荷载曲线进行加载,同时在荷载施加区域对网格进行加密以提高计算精度,网格单元(C3D8R)设置以及其受力状态如图 8 所示。

(3)将反算模量结果作为参数代入到上述模型中,经过有限元数值模拟计算,可得所选 20 个点位的基层层底拉应力。最后将实测弯沉差 $D_{20}-D_{60}$ 和有限元模拟得到的基层层底拉应力进行回归, R^2 为 0.904,回归方程如下

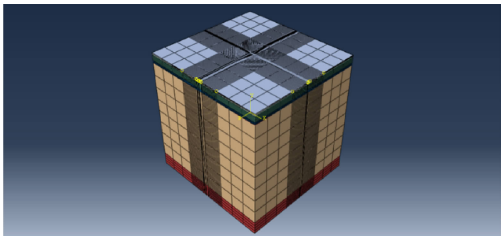
$$\sigma_t=0.062\ 6(D_{20}-D_{60})^{-0.773\ 5}$$

(5)

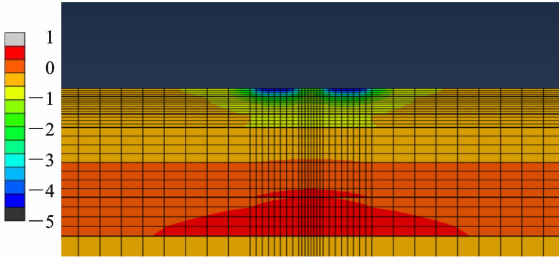
式中: σ_t 为基层层底拉应力(MPa)。

4 半刚性基层疲劳寿命预估及验证

根据国内外现行的半刚性基层结构疲劳模型,



(a) 网格划分



(b) 受力状态云图

单位: 10^5 Pa

图 8 有限元模拟示意

Fig. 8 Schematic of finite element simulation

建立适用于 SCB 试验的基层疲劳模型^[13],该模型在半对数坐标系中具体形式如下

$$\frac{\sigma_t}{R_{SCB}}=\frac{1}{R_F}(-a\lg N+b)$$

(6)

式中: R_F 为工程可靠性因素,根据试验与实际状况, $R_F=2$; a 、 b 为半圆弯曲疲劳试验回归系数。

将式(4)、式(5)代入式(6)中,可得基于 FWD 弯沉差和无侧限抗压强度的半刚性基层疲劳寿命方程为

$$N=10^{b-R_F\frac{0.062\ 6(D_{20}-D_{60})^{-0.773\ 5}}{(0.063\ 3R_c+0.734\ 8)}}-\alpha a^{-1}$$

(7)

式中: δ 为标准偏差,对表1数据进行回归分析可得截距 b 标准偏差为0.017; λ 为目标保证率系数,不同保证率下取值如表3所示; a 、 b 根据第2.2节SCB疲劳寿命结果可得分别为0.077和0.9415。

表3 不同保证率下的保证系数

Tab.3 Guarantee coefficients under different guarantee rates

目标保证率/%	99	95	90
保证率系数 λ	3.143	2.447	1.943

由表1可知,疲劳试验样本数量为 $n=8$,因此对于 $n-2=6$,查 t 分布表可知:保证率为99%时, $\lambda=3.143$,修正系数 $\Delta=\delta\lambda=0.05346$;保证率为95%时, $\lambda=2.447$,修正系数 $\Delta=\delta\lambda=0.04162$;保证率为90%时, $\lambda=1.943$,修正系数 $\Delta=\delta\lambda=0.03305$ 。

将路段A、B、C、D平均实测弯沉差和平均无侧限抗压强度代入式(7)中可得4个路段二灰稳定碎石基层在99%保证率下的疲劳寿命分别为 6.496×10^{10} 、 2.541×10^{10} 、 6.569×10^{10} 和 5.378×10^{10} 次,这与Dong等所计算的二灰稳定碎石基层疲劳寿命为同一数量级^[12]。

为校验进行回归替换后,该疲劳模型的有效性和精度,将半圆劈裂强度实测值和基层层底拉应力计算值代入式(6)中,得到疲劳寿命对比结果,如图9所示。

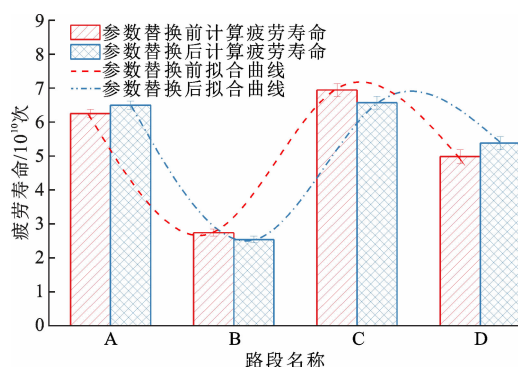


图9 疲劳寿命对比结果

Fig.9 Fatigue life comparison results

经对比计算,使用回归方程参数替换后的4个路段的疲劳寿命相较于SCB基层疲劳寿命方程计算结果,最大相对误差不超过8%,可以有效评价既有高速公路二灰稳定碎石基层的疲劳寿命。

5 结 语

(1)SCB试验中半圆试件在底部切口上方椭圆形区域内受拉应力作用,试件顶部压头圆弧向内区域和底部两支座处主要受压应力作用,这与基层内部实际受力状态一致,能够成为四点弯曲疲劳试验

的有效代替方法。

(2)半刚性基层材料的无侧限抗压强度和半圆劈裂强度具有较好的线性正相关性,即抗压强度较高的材料其抗裂(弯拉)性能也较高,且两者均随路面裂缝数量的增加而逐渐减小。

(3)根据基层SCB疲劳试验结果以及本文所得到的回归方程,建立以FWD弯沉差 $D_{20}-D_{60}$ 和无侧限抗压强度 R_c 为指标的半刚性基层疲劳模型。利用该疲劳模型可以得到路段A、B、C、D二灰稳定碎石基层在99%保证率下的疲劳寿命分别为 6.496×10^{10} 、 2.541×10^{10} 、 6.569×10^{10} 和 5.378×10^{10} 次。经验证,其与直接使用SCB基层疲劳寿命方程计算结果相对误差在8%以内,满足精度要求。

(4)采用本文方法可以推算基层的疲劳寿命,解决了现行路面规范中基层疲劳寿命计算方法难以直接应用的问题,进而为既有半刚性基层利用策略提供决策依据。但本文仅针对1条高速公路进行了研究和评价,后续应该根据更多高速公路数据进行深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 申爱琴,靳欣宽,郭寅川,等.耦合场下陕北地区半刚性沥青路面力学响应分析[J].长安大学学报(自然科学版),2022,42(5):1-11.
SHEN Ai-qin, JIN Xin-kuan, GUO Yin-chuan, et al. Mechanical response analysis of semi-rigid asphalt pavement in Northern Shaanxi under coupling field [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(5): 1-11.
- [2] 黄立葵,宋伟,姜正晖,等.温度和车速对半刚性基层沥青路面模量场和疲劳寿命的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(5):148-156.
HUANG Li-kui, SONG Wei, JIANG Zheng-hui, et al. Effect of temperature and vehicle speed on modulus field and fatigue life of semi-rigid asphalt pavement [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(5): 148-156.
- [3] 李鹏.道路工程弯沉检测技术研究进展[J].市政技术,2022,40(9):210-213.
LI Peng. Research on deflection detection technology of road engineering [J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(9): 210-213.
- [4] 宋波,张金喜,薛忠军,等.既有半刚性基层沥青路面大修处治策略[J].北京工业大学学报,2017,43

- (8):1212-1219.
- SONG Bo, ZHANG Jin-xi, XUE Zhong-jun, et al. Treatment strategy of existing asphalt pavement with semi-rigid base course[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(8):1212-1219.
- [5] 刘宇, 张肖宁. 沥青混合料半圆弯拉强度与间接拉伸强度对比分析[J]. 公路交通技术, 2011, 27(3): 34-37.
- LIU Yu, ZHANG Xiao-ning. Comparative analysis for semicircle bending strength and indirect tensile strength of asphalt mixtures[J]. Technology of Highway and Transport, 2011, 27(3):34-37.
- [6] 朱洪洲, 范世平, 李正浩. 基于SCB试验的沥青混合料宏观断裂愈合性能研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3):426-432.
- ZHU Hong-zhou, FAN Shi-ping, LI Zheng-hao. Research on macro-fracture healing performance of asphalt mixture based on SCB test[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3):426-432.
- [7] 冯伟, 刘朝晖, 柳力, 等. 半刚性基层沥青路面车辙有限元模拟及灰关联分析[J]. 中外公路, 2021, 41(6):60-65.
- FENG Wei, LIU Zhao-hui, LIU Li, et al. Finite element simulation and grey correlation analysis of rutting on asphalt pavement with semi-rigid base[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 60-65.
- [8] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于SCB试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7):50-57.
- FENG De-cheng, CUI Shi-tong, YI Jun-yan, et al. Evaluation index of low-temperature asphalt mixture performance based on semi-circular bending test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7):50-57.
- [9] SAANNIBÉ C S, ARNAUDFEESE R. Numerical and experimental investigation of mode I cracking of asphalt concrete using semi-circular bending test[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 34-46.
- [10] 付欣, 刘秋, 陈拴发. 基于ANSYS的带切口半圆弯曲试验参数分析[J]. 公路交通科技, 2012, 29(2): 13-17, 28.
- FU Xin, LIU Qiu, CHEN Shuan-fa. Parameter analysis of semi-circular bending test on notched specimen based on ANSYS[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(2):13-17, 28.
- [11] 赵晓康, 董侨, 肖源杰, 等. 基于细观非均质模型的水稳碎石基层材料疲劳开裂研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9):3132-3142.
- ZHAO Xiao-kang, DONG Qiao, XIAO Yuan-jie, et al. Fatigue cracking of cement-treated composites with mesoscale heterogeneous model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(9):3132-3142.
- [12] DONG Q, ZHAO X K, CHEN X Q, et al. Long-term mechanical properties of in situ semi-rigid base materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(7):1692-1707.
- [13] THOEGERSEN F, BUSCH C, HENRICHSEN A. Mechanistic design of semi-rigid pavements[R]. Copenhagen: Danish Road Institute, 2004.
- [14] RUIZ RUBIO A, JOFRE IBANEZ C. Manual de firmes con capas tratadas con cemento[M]. Madrid: Ministerio de Fomento, 2003.
- [15] LI Q, XIAO D X, WANG K C P, et al. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): A bird's-eye view[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19:114-133.
- [16] 沙爱民, 贾侃, 李小刚. 半刚性基层材料的疲劳特性[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3):29-33.
- SHA Ai-min, JIA Kan, LI Xiao-gang. Fatigue performances of semi-rigid base course materials[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3):29-33.
- [17] 韦金城. 沥青路面半刚性基层材料与结构疲劳损伤研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WEI Jin-cheng. Study on fatigue damage of semi-rigid base material and structure of asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [18] 吕松涛, 郑健龙, 仲文亮. 养生期水泥稳定碎石强度、模量及疲劳损伤特性[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9):9-15, 45.
- LU Song-tao, ZHENG Jian-long, ZHONG Wen-liang. Characteristics of strength, modulus and fatigue damage for cement stabilized macadam in curing period[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9):9-15, 45.
- [19] 徐世法, 胡超峰, 胡伦福, 等. 基于复合梁疲劳试验的半刚性基层抗反射裂缝性能评价[J]. 公路工程, 2020, 45(6):22-26.

- XU Shi-fa, HU Chao-feng, HU Lun-fu, et al. Reflective cracking evaluation of semi-rigid pavement using composite beam fatigue test[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 22-26.
- [20] 杨光, 王旭东. 高模量沥青混凝土在半刚性基层长寿命沥青路面中应用的合理性研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(5): 20-26, 56.
- YANG Guang, WANG Xu-dong. Study on rationality of application of high modulus asphalt concrete in long-life semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(5): 20-26, 56.
- [21] 郑南翔, 吴传海. 二灰碎石力学性能影响因素的灰色理论分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(5): 20-23.
- ZHENG Nan-xiang, WU Chuan-hai. Mechanics performances for lime fly-ash broken stone mixture by gray theory[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(5): 20-23.
- [22] 吴志心, 张倩, 马强, 等. 二灰碎石力学性能研究[J]. 交通标准化, 2011, 39(1): 118-120.
- WU Zhi-xin, ZHANG Qian, MA Qiang, et al. Study on mechanical performance of lime-fly ash stabilized crushed stone[J]. Transport Standardization, 2011, 39(1): 118-120.
- [23] POŻARYCKI A, GÓRNAS P, WANATOWSKI D. The influence of frequency normalisation of FWD pavement measurements on backcalculated values of stiffness moduli[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(1): 1-19.
- [24] 肖川, 邱延峻, 曾杰, 等. FWD 荷载作用下的沥青路面实测动力响应研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 1-8.
- XIAO Chuan, QIU Yan-jun, ZENG Jie, et al. Study on measured dynamic response of asphalt pavement under FWD load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2): 1-8.
- [25] 柯能信. 基于 FWD 旧沥青路面加铺层设计方法研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 30-35.
- KE Neng-xin. Research on overlay design method of old asphalt pavement based on FWD[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3): 30-35.
- [26] ZHAO W T, YANG Q, WU W L, et al. Structural condition assessment and fatigue stress analysis of cement concrete pavement based on the GPR and FWD[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127044.
- [27] 崔戌秋. 半刚性基层结构及材料性能发展规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- CUI Xu-qiu. Study on the development law of semi-rigid base structure and material properties[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [28] 胡朋, 成英才, 王保群. 贫水泥混凝土基层刚性路面合理结构研究[J]. 公路, 2021, 66(4): 1-5.
- HU Peng, CHENG Ying-cai, WANG Bao-qun. Research on reasonable structure of rigid pavement with lean cement concrete base[J]. Highway, 2021, 66(4): 1-5.