

RUHPC + AC刚柔复合式路面层疲劳 试验研究

姚国森¹, 聂忆华^{1,2}, 陈海冰¹, 何凌朝¹, 钟世雄¹

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²湖南科大工程检测有限公司, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年8月11日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

基于复合式路面及相关材料的发展现状, 本文研究了一种新型RUHPC + AC复合式沥青路面结构, 其中RUHPC层作为下面层起承重作用, 表面AC层起功能作用。在三点弯曲破坏试验基础上, 进一步开展三点弯曲疲劳试验, 研究不同厚度组合的RUHPC + AC复合试件的疲劳寿命特性。研究表明: RUHPC + AC复合试件弯曲疲劳试验破坏的应力比远高于常规普通AC试件; 复合试件总厚固定时, RUHPC层厚度增加可同步提升弯拉强度与疲劳寿命, 且当RUHPC层厚度达到2 cm时性能呈现跃升式增长, RUHPC层对复合结构性能起主导作用; 建立了RUHPC + AC复合试件的疲劳方程。

关键词

复合路面, RUHPC + AC, 弯拉强度, 疲劳寿命, 疲劳方程

Research on Fatigue Testing of RUHPC + AC Rigid-Flexible Composite Pavement Layers

Guosen Yao¹, Yihua Nie^{1,2}, Haibing Chen¹, Lingzhao He¹, Shixiong Zhong¹

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan University of Science and Technology Engineering Testing Co., Ltd., Xiangtan Hunan

Received: Aug. 11th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

Based on the current development status of composite pavements and related materials, this paper

文章引用: 姚国森, 聂忆华, 陈海冰, 何凌朝, 钟世雄. RUHPC + AC 刚柔复合式路面层疲劳试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(9): 2205-2215. DOI: 10.12677/hjce.2025.149238

proposes a new RUHPC + AC composite asphalt pavement structure, where the RUHPC layer serves as the underlying layer providing load-bearing capacity, while the surface AC layer provides the functional performance. Utilizing the results from three-point bending failure tests, three-point bending fatigue tests were conducted to investigate the fatigue life characteristics of RUHPC + AC composite specimens with different thickness combinations. The research findings indicate that the failure stress ratio during the bending fatigue tests of the RUHPC + AC composite specimens is significantly higher than that of conventional AC specimens. For specimens with constant total thickness, increasing RUHPC layer thickness simultaneously enhances flexural tensile strength and fatigue life, with a significant leap in performance observed when the RUHPC layer reaches 2 cm, demonstrating that the RUHPC layer plays a decisive role. Furthermore, Fatigue equation for the RUHPC + AC composite specimens is also proposed.

Keywords

Composite Pavement, RUHPC + AC, Flexural Tensile Strength, Fatigue Life, Fatigue Equation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国沥青路面普遍存在早期损坏严重、实际使用寿命低于设计年限的问题，迫切需提高道路工程耐久性，以促进交通运输事业高质量发展。刚柔复合式沥青路面具有整体强度高、行车舒适性好、使用寿命长、维修费用少等优点，成为重载交通长寿命沥青路面结构的重要发展方向[1]-[3]。我国对超高性能混凝土(UHPC)的研究起步相对较晚，但其发展速度迅猛。毛愷等[4]通过制作 UHPC + AC 复合小梁试件并进行梯度荷载加载试验，对复合试件的 AC 层和 UHPC 层裂缝发展规律进行了量化分析，发现复合试件 AC 层的裂缝分形维数随着荷载的增加呈线性增长，而 UHPC 层的裂缝分形维数则呈指数增长，最终裂缝损伤形态分别表现为网状和线状。此外，Beate Altreuther 等[5]采用预制方法利用 UHPC 制作低噪音路面板，通过 UHPC 中极细颗粒材料的特性构造路面纹理，实现了高耐久性和低噪音结合的路面应用。经济型道路用超高性能混凝土(RUHPC)凭借其出色的连续性、密实度、超高韧性和强度，结合经济性的优势，再搭配超薄沥青面层(AC)，不仅保留了传统刚柔复合式路面的优点，更具备成本可控、施工简便和易于实施等特点。这种新型 RUHPC + AC 复合式沥青路面结构为解决上述问题提供了新思路，有望显著改善普通沥青路面的不足。

本文基于复合式路面及相关材料的最新发展，提出了一种 RUHPC + AC 复合式沥青路面结构，其中 RUHPC 层作为底层承担承重功能，表面 AC 层起功能性作用。基于三点弯曲破坏的试验结果，进一步开展三点弯曲疲劳试验，研究不同厚度组合下 RUHPC + AC 复合试件的疲劳寿命特性。

2. 试件制作及试验方案

2.1. RUHPC 层

RUHPC 具有抗弯拉、耐疲劳、微观结构致密、超高的韧性和延性、具有很强的抗渗透、抗碳化、抗腐蚀和冻融循环能力等特性。本文依据规范[6]的相关规定，对 RUHPC 的力学性能进行了测试。其具体技术性能指标详见表 1。

Table 1. Technical performance index of RUHPC test
表 1. RUHPC 测试的技术性能指标

技术指标	扩展度/mm	抗压强度/MPa		抗弯强度/MPa	轴心抗拉强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
		7 d	28 d				
实测数值	622	96	127	14	5.7	119.3	44.4
实验方法	T/CECS 864-2021 中 4.2	T/CECS 864-2021 中 5.1	T/CECS 864-2021 中 5.5	T/CECS 864-2021 中 5.6	T/CECS 864-2021 中 5.2	T/CECS 864-2021 中 5.3	

2.2. 试件制作

RUHPC + AC 复合试件的 AC 层采用 AC-13, 由 70#道路石油沥青、石灰岩碎石、矿粉组成[4] [7], 具体配合比设计参考规范[8], 最佳油石比为 5.04%, 并按照规范进行三大指标等常规试验。RUHPC 主要成分为水泥、复合掺合料、石英砂、高效减水剂、碎石、钢纤维等, 其强度介于混凝土和钢之间, 略低于 UHPC, 力学性能测试参考规范[6]。层间粘结材料选用改性乳化沥青, 用量为 1.0 kg/m², 同时选取性能较好的玄武岩碎石为嵌石材料。补充 RUHPC + AC 试件制作的关键流程见图 1。

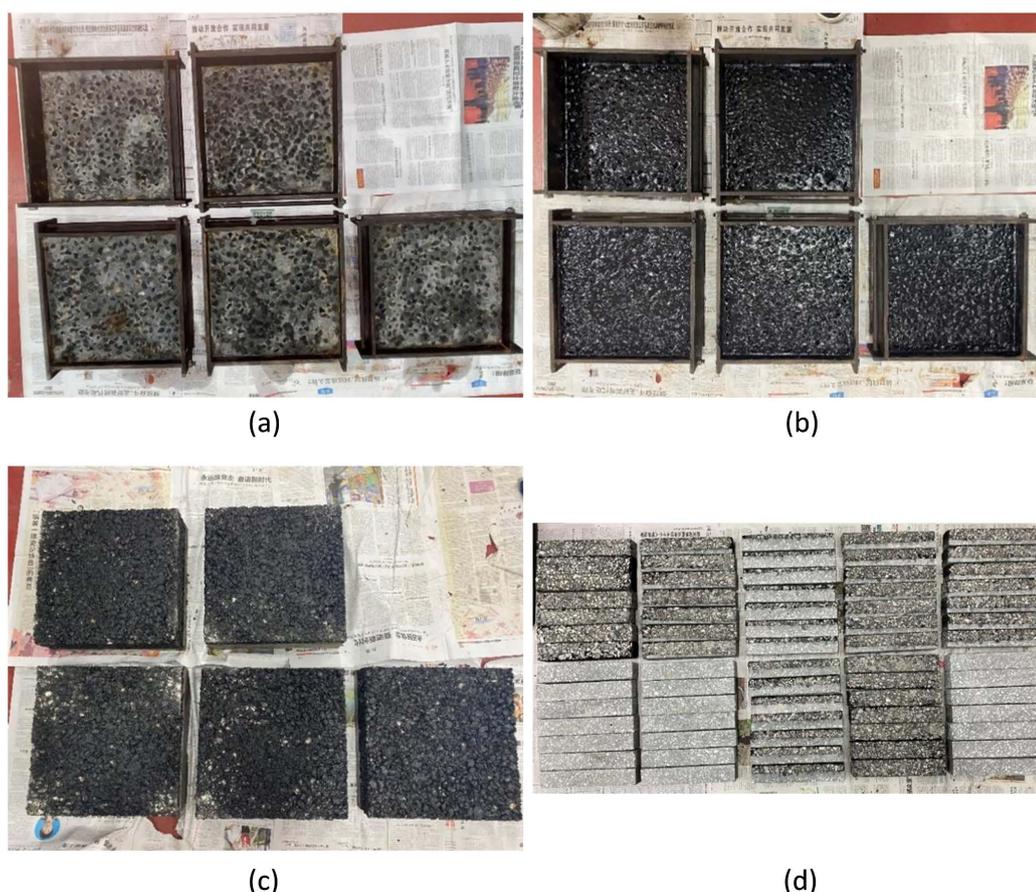


Figure 1. Key steps for Making RUHPC + AC Specimens. (a) Fabrication and curing of RUHPC layer rutting specimens; (b) Coated modified emulsified asphalt; (c) The formation of RUHPC + AC rutting specimens; (d) Cutting specimens of curved beams for experiments

图 1. RUHPC + AC 试件制作关键步骤。(a) RUHPC 层车辙试件制作养护；(b) 涂抹改性乳化沥青；(c) RUHPC + AC 车辙试件成型；(d) 切割弯曲梁实验试件

2.3. 试验方案

设计 5 种不同厚度组合的试件进行试验, 综合现有研究[1]-[3]及规范[8] [9], 采用三点弯曲疲劳试验方法; 试件尺寸长宽高分别为 25 cm × 4 cm × 4 cm。5 种厚度组合方案如下: RUHPC 层厚 0 cm + AC 层厚 4 cm (记为 0 + 4); RUHPC 层厚 1 cm + AC 层厚 3 cm (记为 1 + 3); RUHPC 层厚 2 cm + AC 层厚 2 cm (记为 2 + 2); RUHPC 层厚 3 cm + AC 层厚 1 cm (记为 3 + 1); RUHPC 层厚 4 cm + AC 层厚 0 cm (记为 4 + 0)。

2.4. 实验方法

本文进行三点弯曲破坏试验和三点弯曲疲劳试验。为保证试验数据的可靠性和统计意义, 本试验在每个应力水平(0.75、0.8、0.85、0.9)下均设置了 3~5 个平行试件, 并遵循以下原则: 每组厚度组合(如 0 + 4、1 + 3 等)至少获得 3 个有效数据, 剔除尺寸偏差超±5 mm 的试件。

在进行弯曲破坏试验前, 需将 25 cm × 4 cm × 4 cm 的试件标记好支座和跨中位置, 跨径为 20 cm。将试件放入 15℃ 环境箱中保温至少 4 h, 确保试件内部温度均匀稳定在(15 ± 0.5)℃。取出试件, 对称放置于试验机支座上, 确保支座中心线与标记对齐, 且试件放置方向(上下、成型方向)与试验要求一致。

在 UTM 试验操作系统中选择静态加载模式, 设置加载速率为 50 mm/min 向下加载, 设置加载头保护位移为 18 mm (向下位移 18 mm 时自动停止), 启动加载并持续至试件断裂, 测得破坏荷载 F 后卸载。试件加载方式示意图如图 2 和图 3 所示:



Figure 2. Composite specimen test device
图 2. 复合试件试验装置

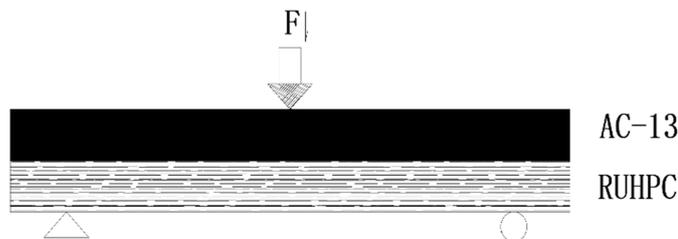


Figure 3. Schematic diagram of composite specimen under stress
图 3. 复合试件受力示意图

试件弯拉强度计算公式见式(1):

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

其中:

F ——试件破坏时的最大荷载(N);

L ——试件的跨径(mm);

b ——试件宽度(mm);

h ——试件的高度(mm)。

三点弯曲疲劳试验考虑实际的车辆荷载加载时间来选取试验荷载加载频率,根据 Vander Poel 提出的公式(2)来确定:

$$t = \frac{1}{2\pi f} \quad (2)$$

其中:

t ——加载时间(s);

f ——荷载加载频率(Hz)。

本次试验设定荷载加载频率为 10 Hz,采用半正弦波波形进行连续加载(未设置加载间歇时间),以模拟小梁试件在最不利疲劳状态下的受力情况。由于 RUHPC 层的优异疲劳寿命,初试采用常规 AC 试件疲劳试验应力比发现加载到 300 万次没有疲劳破坏的迹象,后结合文献资料选取了较高的应力水平进行加速疲劳测试。基于不同厚度组合试件在 15℃下测得的破坏荷载及弯拉强度,控制应力循环中的最小应力与最大应力比(应力比下限)为 0.5,并分别在应力比(应力比上限)为 0.75、0.80、0.85、0.90 的工况下进行试验。

在 UTM 试验机上设置动态加载模式,选择正弦波形,计算中值和幅值。设定试验终止条件为:达到预设的 300 万次循环次数,或试件发生破坏。峰值和谷值停留时间均设置为 0 s,加载头保护位移限值设为 18 mm,记录试件失效时的循环次数后卸载。

试验测得的疲劳寿命(N)与对应的应力水平(σ)之间的关系,可根据标准疲劳方程拟合(S-N 曲线方程),其中 A、n 为试验拟合参数,各工况下疲劳方程的相关系数均在 0.95 至 0.99 之间时,表明拟合效果理想。

3. 试验结果分析

3.1. 弯曲试验结果分析

根据试验记录的力-时间曲线、力-位移曲线以及试验过程观察,不同厚度组合的 RUHPC + AC 复合试件在三点弯曲破坏过程中表现出以下特征:

(1) 0+4 型试件:在持续荷载下,试件挠度持续增大,跨中区域首先出现微裂缝,并逐渐扩展贯穿整个试件直至破坏。由于沥青混合料的粘弹特性,加载至破坏所需时间相对较长。部分试件在达到峰值荷载后,虽未发生完全断裂,但跨中区域已产生显著的塑性变形。

(2) 1+3 型试件:破坏过程同样表现为挠度增大和跨中微裂缝贯穿发展特征。由于底部存在 1 cm 厚的 RUHPC 层,加载至破坏的时间明显缩短。RUHPC 层出现多条裂缝,破坏断面可见明显的钢纤维拔出痕迹。

(3) 2+2 型试件:底部 2 cm 厚的 RUHPC 层导致加载至破坏的时间短,裂缝主要沿 RUHPC 层中粗集料间的空隙扩展。即使在达到峰值荷载后,试件未完全断裂,表现出良好韧性, RUHPC 层在抵抗弯曲荷载中起决定作用。

(4) 3+1 型试件:底部 3 cm 厚的 RUHPC 层,加载至破坏的时间短,破坏始于试件底部(RUHPC 层)开裂并伴随钢纤维拔出。即使表面 AC 层发生断裂,底部 RUHPC 层中未断裂的钢纤维仍能有效连接断裂面,展现出优异的韧性。

(5) 4+0 型试件：在持续荷载下，试件迅速产生贯穿裂缝，加载时间极短。尽管产生贯穿裂缝，试件通常未发生完全断裂分离，RUHPC 层中密集分布的钢纤维提供了极强的桥联作用，有效连接裂缝两侧。断口处可见密集分布的钢纤维，提供超强的抗拔出能力，显著增强了结构整体的弯拉强度。

3.2. 抗弯拉强度分析

表 2 和图 4 给出了不同厚度组合的 RUHPC + AC 复合试件弯拉强度测试结果。得到如下规律：

Table 2. Summary table of flexural tensile strength test data

表 2. 弯拉强度试验数据汇总表

RUHPC + AC (cm)	编号	破坏荷载(KN)	极限抗弯拉强度(MPa)	平均抗弯拉强度(MPa)
0 + 4	1	0.35	1.64	1.69
	2	0.37	1.73	
	3	0.36	1.69	
1 + 3	1	0.66	3.09	2.79
	2	0.54	2.53	
	3	0.59	2.76	
2 + 2	1	0.98	4.59	5.31
	2	1.16	5.43	
	3	1.26	5.91	
3 + 1	1	2.27	10.64	9.20
	2	1.57	7.36	
	3	2.05	9.61	
4 + 0	1	3.79	17.77	16.39
	2	3.39	15.89	
	3	3.31	15.52	

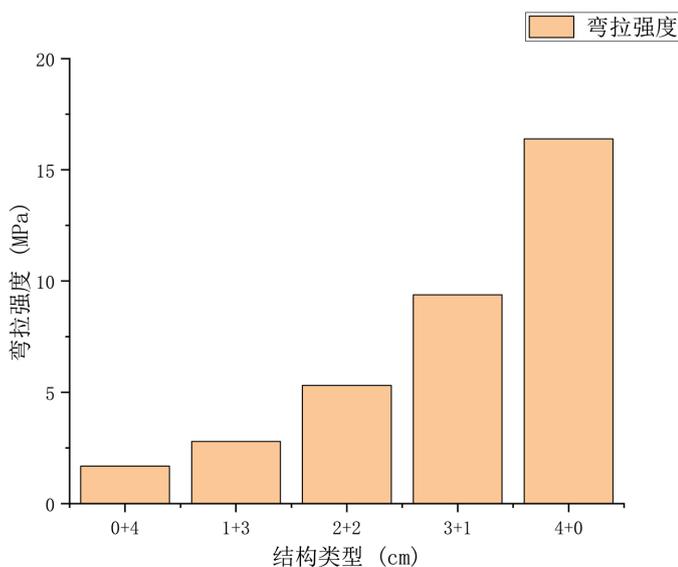


Figure 4. Flexural tensile strength of the specimen

图 4. 试件的弯拉强度

(1) 弯拉强度与 RUHPC 厚度关系: 试件的弯拉强度随 RUHPC 层厚度的增加而显著提升。更厚的 RUHPC 层提供了更强的抗弯刚度, 钢纤维数量的增加显著增强了其桥联作用和抗拔出能力, 从而更有效地抵抗弯曲荷载。

(2) 不同试件类型弯拉强度对比: 当 RUHPC 层厚度超过试件总厚度的一半时(如 3 + 1 型与 2 + 2 型相比), 其弯拉强度呈现显著跃升, 表明 RUHPC 层成为主导承载层后, 其优异的力学性能得以充分发挥。

(3) 弯拉强度拟合公式: 对 4 + 0 试件的弯拉强度与其他结构组合进行多项式拟合(图 5), 拟合模型(式(3))显示相关系数极高($R^2=0.9977$), 表明拟合公式预测精度优异。该模型可有效预测 RUHPC + AC 复合试件的弯拉强度, 对复合路面结构设计提供重要依据。

$$y = 1.84371 - 0.30643x + 0.98786x^2, R^2 = 0.9977 \quad (3)$$

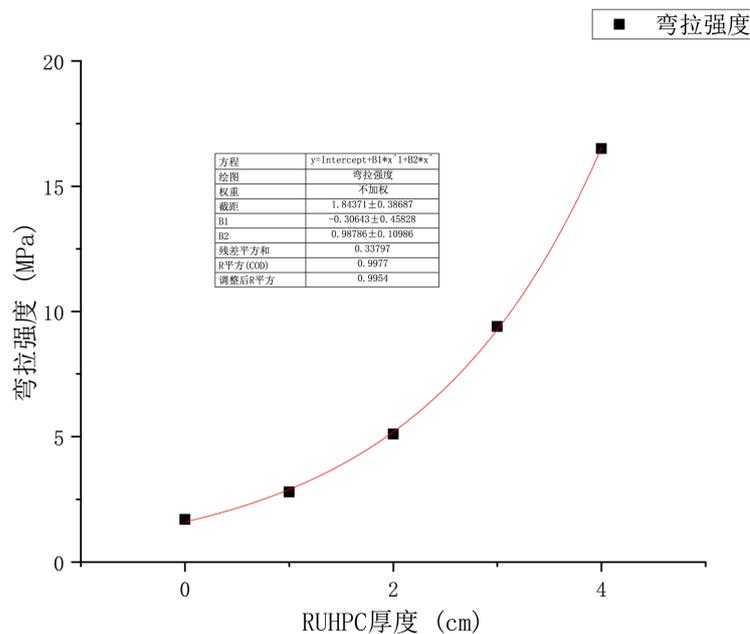


Figure 5. Fitting results of flexural and tensile strength
图 5. 复合构件弯拉强度拟合结果

3.3. 跨中位移与运行次数关系分析

图 6 展示了在应力比为 0.8 时, 不同厚度组合 RUHPC + AC 复合试件的跨中位移随荷载循环次数的发展曲线, 主要特点如下:

(1) 0 + 4 型与 1 + 3 型试件: 位移曲线呈陡峭上升形态, 在极短时间内即达到最大位移, 表明其疲劳寿命短。

(2) 2 + 2 型与 3 + 1 型试件: 位移曲线呈平缓上升趋势(非线性), 位移随循环次数逐渐累积增大, 直至试件断裂。

(3) 4 + 0 型试件: 达到疲劳寿命极限前位移变化极小, 达到疲劳寿命极限时位移骤增至最大限制值, 体现了水泥基材料的脆性破坏特征。

(4) RUHPC 层厚度影响规律: 同样位移水平下, RUHPC 层越厚, 试件的疲劳寿命越长; 同样疲劳寿命次数情况下, RUHPC 层越厚, 试件产生的跨中位移越小; RUHPC 层厚度的增加显著提升了复合试件的整体刚度和抗疲劳变形能力。

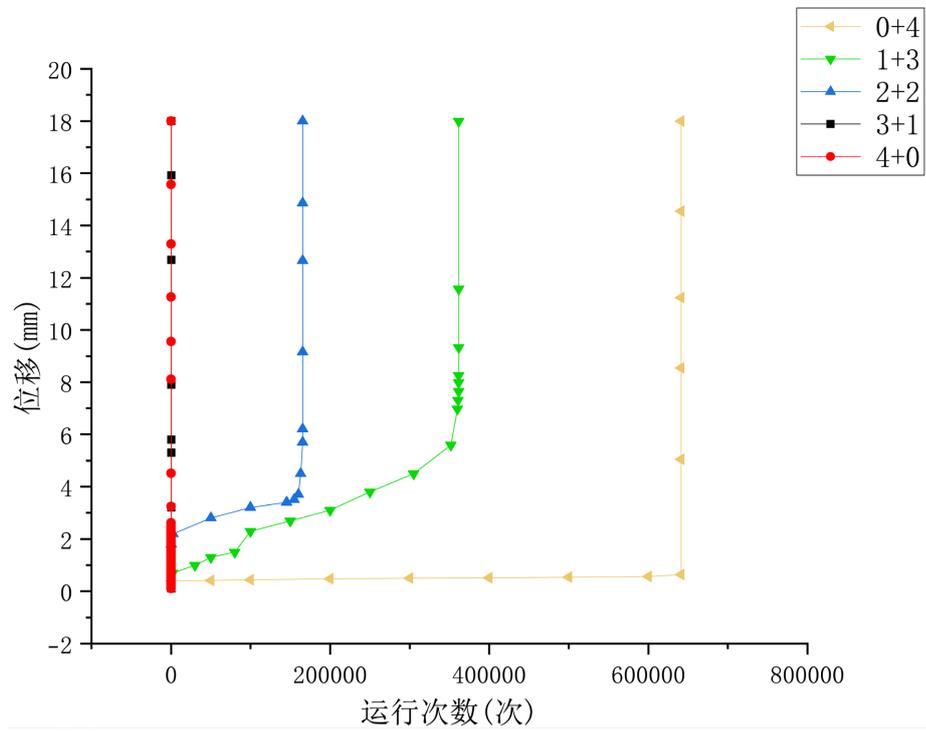


Figure 6. Mapping between mid-span displacement and running times
图 6. 试验跨中位移与运行次数对应关系图

3.4. 疲劳寿命分析

Table 3. Fatigue life test results (times)
表 3. 疲劳寿命试验结果(次)

RUHPC + AC (cm)	应力比			
	0.75	0.8	0.85	0.9
0 + 4	343	185	133	108
1 + 3	1521	712	429	332
2 + 2	750,122	183,037	3206	512
3 + 1	3,000,000	350,259	6221	1125
4 + 0	3,000,000	654,737	7549	1623

Table 4. Fatigue life fitting formula
表 4. 疲劳寿命拟合公式表

拟合对象 RUHPC + AC (cm)	拟合公式	R ²
0 + 4	$y = 3.092x^{-0.155}$	0.953
1 + 3	$y = 4.896x^{-0.117}$	0.962
2 + 2	$y = 5.476x^{-0.023}$	0.964
3 + 1	$y = 9.741x^{-0.021}$	0.977
4 + 0	$y = 17.232x^{-0.022}$	0.959

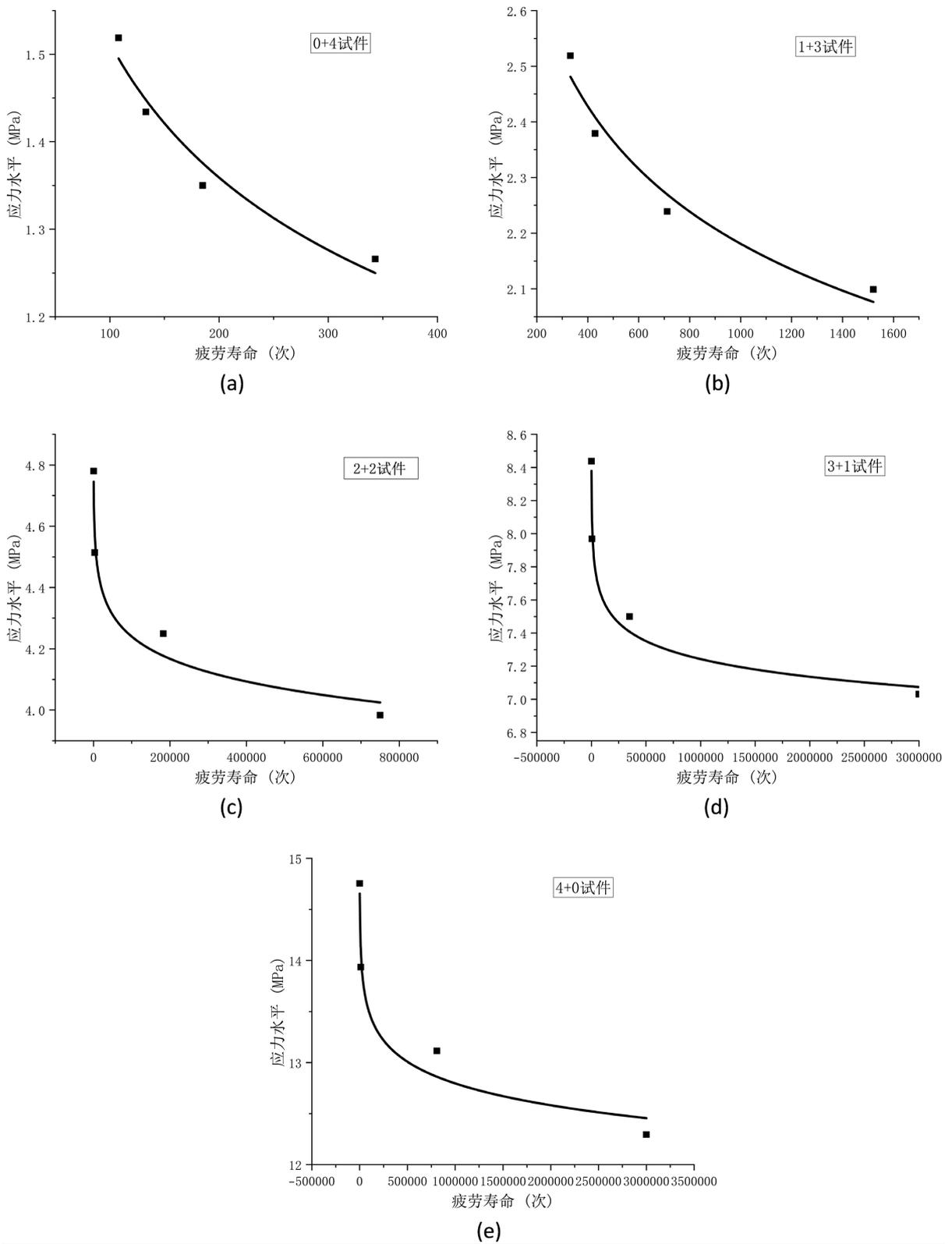


Figure 7. S-N curves of composite specimens of different thicknesses. (a) 0 + 4 specimen; (b) 1 + 3 specimen; (c) 2 + 2 specimen; (d) 3 + 1 specimen; (e) 4 + 0 specimen

图 7. 不同厚度组合复合试件的 S-N 曲线图。(a) 0 + 4 试件; (b) 1 + 3 试件; (c) 2 + 2 试件; (d) 3 + 1 试件; (e) 4 + 0 试件

图 7 给出了不同厚度组合 RUHPC + AC 复合试件的 S-N 曲线图, 表 3、表 4 分别给出了疲劳寿命的试验结果及拟合公式。根据图 7 和表 3、表 4 可知:

(1) 在相同应力比下, RUHPC 层厚度越大, 试件的疲劳寿命显著延长, 表明 RUHPC 层对复合试件的疲劳性能起决定性作用。

(2) 在应力比 0.85 和 0.9 下, 3+1 型试件的疲劳寿命甚至超过 4+0 型试件, 说明 3 cm 厚的 RUHPC 与 4 cm 厚的纯 RUHPC 层承载能力相近, 3+1 型试件寿命更优在于其表面 AC 层的先行破坏有助于诱发应力重分布, 延缓了 RUHPC 层损伤的集中发展, 从而延长了整体疲劳寿命。在应力比 0.75 下, 3+1 型与 4+0 型试件均可达到 300 万次的疲劳寿命而不破坏, 实现长寿命结构。

(3) 在应力比 0.75 和 0.8 下, 相比普通 AC 路面, 仅铺设 1 cm RUHPC 层, 其疲劳寿命提升 3~5 倍; 铺设 2 cm 及以上厚 RUHPC 层, 其疲劳寿命可提升 3 个数量级以上。引入薄层 RUHPC 作为承重层, 可有效解决传统沥青路面易疲劳损坏的问题。

鉴于 RUHPC 成本较高, 在满足长寿命要求的前提下, 3+1 型复合结构相比 4+0 型更具成本效益优势。为确保复合路面获得优异的抗疲劳性能, RUHPC 层最小设计厚度不宜低于 2 cm。

4. 结论

(1) RUHPC + AC 是一种刚柔复合式路面结构, AC 层作为粘弹性材料, 其厚度增加显著延缓了试件的断裂破坏速率, RUHPC 层中的钢纤维提供了卓越的抗拔出能力, 随着 RUHPC 层厚度增加, 复合试件的弯拉强度显著提升。建立的 RUHPC 层厚度与复合试件弯拉强度关系模型拟合精度极高, 为结构设计提供了可靠依据。

(2) 疲劳裂缝通常从试件底部开始出现, RUHPC 底层的疲劳性能直接决定复合结构的疲劳寿命。随着加载次数的增加, 试件跨中位移逐渐增大, AC 层厚度较大的试件位移明显, 而 RUHPC 层主导的复合试件位移极小, 表明 RUHPC 层有优异的抗变形能力和结构刚度, 能有效延缓破坏前的大变形。

(3) 复合试件的疲劳寿命与应力水平在半对数坐标下呈现强线性相关性, 建立的 S-N 回归模型可高精度预测不同厚度组合的疲劳寿命, 长寿命结构中建议 RUHPC 层最小厚度不宜低于 2 cm。

本研究结论基于 15℃ 环境下的三点弯曲破坏试验和疲劳试验, 未涵盖其他极端条件影响(如高温、低温或冻融), 后续将进一步开展相关试验研究, 并通过实体试验路铺筑与长期性能监测进行验证, 以推动该高性能复合路面结构从理论向工程应用的转化。

参考文献

- [1] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 457-458.
- [2] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 1-3.
- [3] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙. CRC + AC 复合式路面结构层厚度对温度效应及车辙变形的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 21-28.
- [4] 毛愷, 聂忆华, 钟世雄, 等. 荷载作用下 UHPC + AC 复合试件裂缝发展的分形分析[J]. 广东建材, 2024, 40(1): 108-111.
- [5] Canestrari, F., Belogi, L., Ferrotti, G. and Graziani, A. (2013) Shear and Flexural Characterization of Grid-Reinforced Asphalt Pavements and Relation with Field Distress Evolution. *Materials and Structures*, **48**, 959-975. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0207-1>
- [6] 中国建筑材料科学研究总院. GBT31387-2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [7] 唐艳华, 聂忆华, 毛愷, 等. 基于 Mpave 的高性能混凝土沥青路面沥青层剪应力分析[J]. 广东建材, 2022, 38(1): 55-59.

- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTGE20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] 中华人民共和国建设部. GBT50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.