

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.04.043

基于单轴拉伸试验的水稳碎石损伤本构方程研究

孙雅珍¹, 房辰泽^{1,2}, 李凯翔¹, 洪媛³

(1.沈阳建筑大学 交通学院, 辽宁 沈阳 110168; 2.大连海事大学 交通运输工程学院; 3.沈阳建筑大学 理学院)

摘要: 为了建立材料的损伤本构方程, 针对不同龄期的水泥稳定级配碎石开展了单轴拉伸试验。根据不同龄期试验结果, 研究了水泥稳定级配碎石抗拉强度与龄期之间的关系。通过拟合材料本构关系, 建立了本构方程。基于 Mazars 损伤模型, 提出了材料单轴拉伸状态下的损伤模型和损伤本构方程。结果表明: 水泥稳定级配碎石前 28 d 的抗拉强度快速增长, 28 d 后抗拉强度的增长速率下降, 对数函数可以很好地表征龄期与抗拉强度的关系; 建立的本构方程可以从数学角度反映水泥稳定级配碎石的应力应变关系, 但不能揭示材料的损伤演化过程; 单轴拉伸状态下水泥稳定级配碎石的非线性损伤演化过程由 3 阶段组成; 损伤本构方程比本构方程可以更好地表征水泥稳定级配碎石的 3 阶段损伤演化过程和应力应变关系。

关键词: 损伤本构方程; 单轴拉伸试验; 水泥稳定级配碎石; 损伤模型; 损伤演化

中国道路建设行业在经济快速发展的大环境下已经取得长足发展, 水稳基层材料被广泛地应用于中国沥青路面结构的基层。水泥稳定级配碎石这种路面基层常用材料是一种典型的准脆性材料, 如工程中常用的岩石、混凝土等也是准脆性材料。水泥稳定级配碎石的承载能力在其承受的荷载达到极限荷载后开始下降, 同时会出现应变软化和应力跌落现象。

采用 90 d 的强度指标对沥青路面结构的基层进行设计, 及时地保湿养生可以避免结构材料的干燥收缩裂缝, 但由于受施工季节及工期所限, 许多高速公路在养生 7 d 后即进行基层的铺筑, 造成了施工期即产生了路面结构的内部损伤。水稳基层材料往往抗压而

不抗拉, 在实际路面结构中水稳基层的破坏一般为受拉开裂破坏。单轴拉伸试验可以准确地反映材料拉伸状态下的受力状态, 可以用来很好地研究水泥稳定级配碎石的力学性能以及损伤演化过程。掌握单轴拉伸作用下的损伤演化规律并建立相应的损伤本构方程, 对于解决水稳基层的开裂破坏问题有着十分重要的工程意义。

在道路工程中, 一般将水稳基层材料视为连续均匀介质, 少有学者运用损伤力学理论研究水稳基层材料的损伤演化。Judycski J. 等对基层材料在重复加载过程中的回弹模量变化规律进行了研究; 杨磊以水泥稳定级配碎石为研究对象, 通过分析抗拉强度的衰减

6 结语

要提高 CFST 的密实性, 减少和杜绝混凝土与钢管间的脱空现象, 可先采用真空辅助灌注技术将混凝土灌满, 其次, 使用自密实无收缩混凝土, 使其在钢管中不产生收缩。事实证明, 上述新技术和新材料的联合应用可大幅提高 CFST 的质量及耐久性, 同时提高拱肋的极限承载力, 这亦是 CFST 拱桥迈向更大跨径的保障和途径。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国 CFST 拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017(6).
- [2] 殷迅. 温度对 CFST 拱桥管内混凝土脱粘的影响[J]. 公路交通技术, 2013(5).
- [3] 苏永亮, 焦楚杰, 张亚芳, 等. CFST 脱空问题的研究进展[J]. 钢结构, 2013(3).
- [4] DB45/T 1097-2014 CFST 拱桥施工技术规范[S].
- [5] JGJ/T 178-2009 补偿收缩混凝土应用技术规程[S].

收稿日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51478276); 辽宁省自然科学基金资助项目(编号: 20170540770)

作者简介: 孙雅珍, 女, 教授, 博士生导师. E-mail: syz16888@126.com

研究了材料的微裂损伤;曹强通过对水泥稳定级配碎石进行损伤演化分析,总结了一系列材料损伤的解决方法;沙爱民等学者以半刚性基层材料为研究对象,通过室内试验研究了重复荷载作用下材料的模量变化规律和损伤演化过程。

虽然上述研究对水泥稳定级配碎石的损伤演化做了不同程度的研究,但是没能通过运用损伤力学理论建立水泥稳定级配碎石的损伤本构方程表征其力学行为。为解决现有研究中存在的不足,以便能深刻地揭示单轴拉伸作用下水泥稳定级配碎石的损伤演化过程和本构关系。该文通过单轴拉伸试验,以不同龄期的水泥稳定级配碎石为研究对象,探究不同龄期对抗拉强度的影响,指出抗拉强度的增长规律并建立抗拉强

度的对数回归公式。通过拟合材料本构关系,建立水泥稳定级配碎石单轴拉伸状态下的本构方程。基于Mazars损伤模型,提出水泥稳定级配碎石单轴拉伸状态下的损伤模型和损伤本构方程。

1 单轴拉伸抗拉强度试验

1.1 试验材料

1.1.1 水泥

选用辽宁本溪地区生产的工源牌水泥(P·S·A 32.5级),抗折与抗压指标检测结果如表1所示,初凝时间与其他指标检测结果如表2所示。

表1 水泥抗压抗折试验结果

龄期/ d	抗压强度/MPa							变异系 数/%	标准差/ MPa	抗折强度/MPa			
	一组		二组		三组		平均值			一组	二组	三组	平均值
3	12.2	10.9	10.4	10.2	10.7	10.3	10.5	2.78	0.29	3.8	3.3	3.5	3.5
28	36.7	39.1	34.9	33.3	37.1	35.7	36.1	1.99	3.06	7.7	7.5	7.7	7.6

表2 水泥其他指标检测结果

项目	凝结时间/min		安定性	细度 (80 μm)/%
	初凝	终凝		
试验值	212	386	合格	1.60
标准值	≤45	≥600	合格	≥10

1.1.2 集料

对风干的碎石原料进行筛分,粗集料(9.5~13.2 mm)压碎值结果如表3所示,由表3可知压碎值均小于26%,符合要求。

表3 压碎值试验结果

通过 2.36 mm 筛 孔的质量/g	试验前 质量/g	压碎值/ %	平均值/ %
541.5	3 000	18.1	
553.7	3 000	18.5	18.3
549.6	3 000	18.3	

1.1.3 试验级配

为了研究成果能广泛应用于实际高等级路面基层工程中,选用JTG/T F20-2015《公路路面基层施工技术细则》实施手册中C-B-2型级配,并结合泰波(A.N.Talbol)级配理论对室内试验的最优级配进行设计,结果如表4所示。

表4 设计最优级配

筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%	筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%
19	100	1.18	22
16	93	0.6	15
13.2	85	0.3	10
9.5	72	0.15	7
4.75	45	0.075	5
2.36	31		

1.1.4 夹具设计

选用HRB345的带肋钢筋与圆盘连接,保证在试验过程中其不产生形变,使水泥稳定级配碎石试件的有效应变更精确。试件与夹具采用有机胶环氧树脂固定防止脱落。

1.2 试验过程

选择型号为CMT-5105的加载试验机进行材料的单轴拉伸试验。使用试验机的两个夹头对制备的试件进行固定,加载方式选择应变控制,水泥稳定级配碎石的单轴拉伸速度为0.05 mm/min。

1.3 试验结果

为了研究测得的抗拉强度与水泥稳定级配碎石龄期之间的联系,选用设计的最优级配进行单轴拉伸试

验,结果如表 5 所示。从表 5 可知:随着水泥稳定级配 碎石龄期的增加,材料的抗拉强度上升。

表 5 抗拉强度试验结果

龄期/ d	抗拉强度/MPa										平均值	标准差	变异系 数/%	有效 值/MPa
	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
7	0.30	0.29	0.28	0.32	0.31	0.29	0.31	0.34	0.33	0.31	0.019 86	6.45	0.28	
28	0.47	0.47	0.42	0.49	0.46	0.44	0.43	0.43	0.41	0.45	0.026 92	6.03	0.40	
90	0.52	0.59	0.53	0.58	0.57	0.55	0.54	0.55	0.56	0.55	0.022 97	4.14	0.52	

2 抗拉强度分析

根据材料的抗拉强度结果,画出材料随龄期变化曲线,如图 1 所示,由图 1 可知:随着龄期的增加,材料的抗拉强度呈现出对数函数的增长规律。碎石和水泥在施工碾压之前为松散体材料,两者通过与水产生化学作用、物理化学作用和物理作用,强度逐渐上升,松散体材料逐渐转变成整体性材料。由表 5 和图 1 可知,在材料养生的初级阶段(0~28 d),水泥稳定级配碎石抗拉强度随龄期的增长速率较为迅速,28 d 龄期后增长速度变缓。这是因为促使水泥稳定级配碎石强度逐渐形成的多种复杂作用主要发生在养生前期,因此,建议注重早期的养生。为了准确描述水泥稳定级配碎石的抗拉强度与龄期的关系,采用对数函数拟合两者的关系,拟合结果如式(1)所示,相关系数大于 0.99,说明对数函数可以很好地预测水泥稳定级配碎石不同龄期的抗拉强度。

$$R_m = 0.093 71gt + 0.064 5, R^2 = 0.997 6 \quad (1)$$

式中: R_m 为水泥稳定级配碎石抗拉强度; t 为龄期。

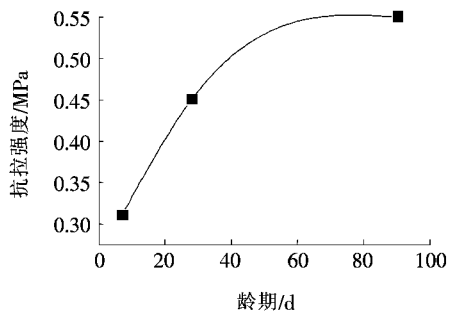


图 1 抗拉强度随龄期变化曲线

3 损伤本构方程的建立

3.1 本构方程的建立

根据 28 d 水泥稳定级配碎石单轴拉伸状态下的

本构关系,建立本构方程。处理单轴拉伸试验数据,得到图 2 所示的材料应力—应变曲线。

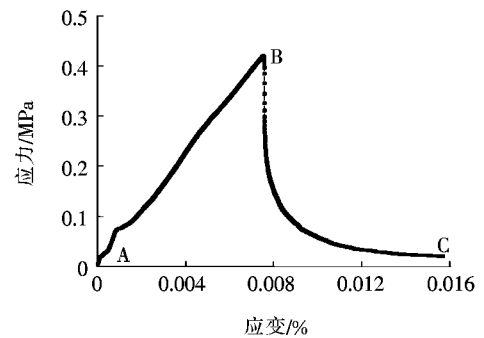


图 2 应力—应变曲线

由图 2 可以看出:水泥稳定级配碎石在单轴拉伸作用下应力随着应变的增大先上升后跌落。材料在初始加载阶段(AB)段,试件基本发生的是线弹性变形。经过极限抗拉应力 B 点这一峰值后水泥稳定级配碎石材料软化,应力值快速跌落,水泥稳定级配碎石在 BC 段发生的是非线性变形。

因为单轴拉伸状态下水泥稳定级配碎石峰值应力之前的变形为线弹性变形,故采用胡克定律表征 AB 段的本构关系;Farazdaghi—Harris 型函数如式(2)所示,使用该函数拟合峰值应力之后的应力—应变曲线,拟合结果如表 6 所示。

$$y = \frac{1}{a + bx^c} \quad (2)$$

式中: y 为因变量; x 为自变量; a 、 b 、 c 为拟合参数值。

表 6 本构方程拟合结果

a	b	c	R^2
490.441	864.371 4	0.114 77	0.937 63

由表 6 可以看出:相关系数大于 0.93,说明 Farazdaghi—Harris 型函数可以较好地用于表征水泥稳定级配碎石峰值应力后的非线性变形,故采用该函数刻画 BC 段的本构关系。故水泥稳定级配碎石在单

轴拉伸全过程中的本构方程式如式(3)所示,因为不含损伤变量,故该本构方程可以从数学角度很好地表征单轴拉伸状态下的本构关系,但不可以准确表征荷载作用下材料内部的损伤演化。

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ \frac{1}{a + b\varepsilon^c}, \varepsilon > \varepsilon_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为材料应力 (MPa); E 为材料弹性模量 (MPa); ε 为材料应变 (%); ε_f 为应力峰值所对应的应变值 (%)。

3.2 损伤本构方程的建立

3.2.1 Mazars 损伤模型

Mazars 损伤模型对于受外界荷载为拉伸状态下的材料,假设材料从应力初始到峰值状态为无损伤,材料内部的应力达到峰值状态后,开始产生宏观裂纹。Mazars 损伤模型如式(4)所示,由式(4)可以看出, Mazars 损伤模型是以材料应变定义的材料损伤变量,材料在峰值应力之前产生线弹性变形,峰值应力后产生非线性变形。使用 Mazars 损伤模型拟合水泥稳定

级配碎石单轴拉伸条件下的应力—应变曲线,拟合结果如表 7 所示,相关系数大于 0.95,故 Mazars 损伤模型可以准确地表征水泥稳定级配碎石单轴拉伸条件下的本构关系。

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, D=0 & \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ E\varepsilon(1-D), D=1 - \frac{\varepsilon_f(1-A_t)}{\varepsilon} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\varepsilon - \varepsilon_f)]} & \varepsilon > \varepsilon_f \end{cases} \quad (4)$$

式中: D 为损伤值; A_t 、 B_t 为材料常数。

表 7 Mazars 损伤模型拟合结果

A_t	B_t	R^2
0.917 55	1 189.166 29	0.953 5

3.2.2 损伤模型的建立

为了掌握水泥稳定级配碎石单轴拉伸条件下的演化规律,需要定义相对合适的损伤因子 D ,建立材料在单轴拉伸条件下的损伤模型。将得到的 A_t 、 B_t 代入式(4),得到水泥稳定级配碎石单轴拉伸损伤模型,如式(5)所示。

$$D = \begin{cases} 0 & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ 1 - \frac{6.208\ 49 \times 10^{-4}}{\varepsilon} - \frac{0.917\ 55}{\exp[1\ 189.166\ 29(\varepsilon - 0.007\ 53)]} & \varepsilon > \varepsilon_f \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)求导得出损伤演化方程,如式(6)所示。

$$\frac{dD}{d\varepsilon} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ \frac{6.208\ 49 \times 10^{-4}}{\varepsilon^2} + \frac{1\ 091.119\ 529}{\exp[1\ 189.166\ 29(\varepsilon - 0.007\ 53)]} & \varepsilon > \varepsilon_f \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)绘制损伤—应变曲线,如图 3 所示。

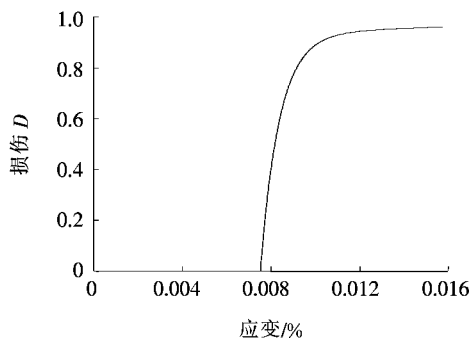


图 3 损伤—应变曲线

由图 3 可以看出:水泥稳定级配碎石在单轴拉伸状态下的非线性损伤演化分为 3 个阶段。在水泥稳定级配碎石单轴拉伸的初始加载阶段,材料基本发生的是线弹性变形,在峰值应力之前水泥稳定级配碎石的

应变小于产生损伤的阈值,故可以近似认为材料内部在该阶段无损伤;在外部荷载作用下,材料在达到应变损伤阈值后其物理力学性能衰变,水泥稳定级配碎石的微裂纹产生并持续扩展导致损伤产生,损伤在该阶段快速演化,直至试件宏观裂纹的形成;水泥稳定级配碎石在损伤累积至一定程度后,损伤稳定地增长且增长速度逐渐减小,最终试件完全破坏。

3.2.3 损伤本构方程的建立

材料的损伤本构方程应在刻画材料本构关系的同时,准确反映荷载作用下材料内部的损伤演化过程。将式(5)代入式(4),得到水泥稳定级配碎石的损伤本构方程,如式(7)所示。根据式(7)绘制试验结果和模型结果的对比图, $D-\varepsilon$ 对比结果如图 4 所示,应力—应变对比结果如图 5 所示。由图 4、5 可知:建立的损伤本构方程比本构方程能更好地表征水泥稳定级配碎石的 3 阶段非线性损伤演化过程和应力应变关系。

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, D=0 & \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ E\varepsilon(1-D), D=1 - \frac{62.0849 \times 10^{-5}}{\varepsilon} - \frac{0.91755}{\exp[1.18916629(\varepsilon - 0.00753)]} & \varepsilon > \varepsilon_f \end{cases} \quad (7)$$

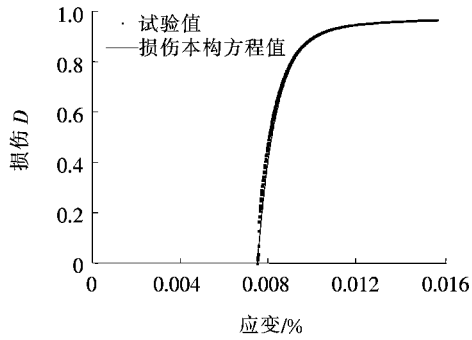


图 4 D-ε 对比图

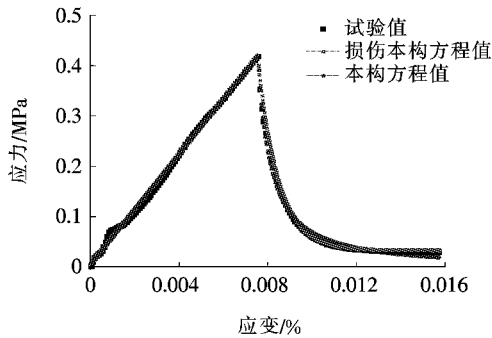


图 5 应力—应变对比图

4 结论

(1) 水泥稳定级配碎石前 28 d 的抗拉强度快速增长, 28 d 后抗拉强度的增长速率下降, 对数函数可以很好地预测水泥稳定级配碎石不同龄期的抗拉强度。

(2) 单轴拉伸状态下的水泥稳定级配碎石在峰值应力之前的变形基本为线弹性变形, 峰值应力后的变形为非线性变形。通过拟合材料应力—应变全曲线建立的本构方程, 可以从数学角度很好地反映单轴拉伸状态下的应力应变关系, 但不能揭示材料的损伤演化过程。

(3) 基于 Mazars 损伤模型, 提出了单轴拉伸损伤模型和损伤本构方程。水泥稳定级配碎石单轴拉伸状态下的非线性损伤演化过程由 3 个阶段组成, 提出的损伤本构方程比本构方程能更好地表征材料的 3 阶段非线性损伤演化过程和应力应变关系。

参考文献:

- [1] 薛勇刚, 宋云祥, 韩志斌. 大掺量废旧沥青混合料水泥稳定基层路用性能研究[J]. 中外公路, 2014(5).
- [2] 白琦峰, 刘玲, 胡伍生. 低剂量水泥稳定碎石基层性能研究[J]. 中外公路, 2006(6).
- [5] 胡力群. 路面水泥稳定碎石基层材料分层摊铺整体压实成型技术研究[J]. 中外公路, 2010(4).
- [4] 温伟标, 赵伟, 杨海玲, 等. 骨架密实型水泥稳定碎石基层配合比设计及施工应用[J]. 中外公路, 2010(2).
- [5] Zang Guoshua, Sun Lijun, Chen Zhang, et al. A Nondestructive Evaluation Method for Semi-Rigid Base Cracking Condition of Asphalt Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 892-897.
- [6] Tang Y, Zhang. K. Analysis on the Fatigue Properties of Semi-Rigid Base Asphalt-Pavement Structures with Horizontal Interfacial Cracks[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2017, 45(6): 2 020-2 028.
- [7] 冯西桥. 脆性材料的细观损伤理论和损伤结构的安定分析[D]. 清华大学博士学位论文, 1995.
- [8] 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(9).
- [9] 应荣华, 张福生, 祝明. 基于路用要求的膨胀剂水稳碎石防裂研究[J]. 中外公路, 2013(2).
- [10] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 半刚性基层材料抗冲刷性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013(4).
- [11] Judycki J. Comparison of Fatigue Criteria for Flexible and Semi-Rigid Pavements[C]. Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, 1997.
- [12] 杨磊. 水稳碎石材料微裂损伤程度控制研究[J]. 公路与汽运, 2017(5).
- [13] 曹强. 水泥稳定级配碎石基层施工期结构损伤分析及其处治措施研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2015.
- [14] 沙爱民, 张登良, 许永明. 无机结合料稳定级配砂砾的疲劳特性研究[J]. 土木工程学报, 1993(1).
- [15] 沙爱民, 贾侃, 陆剑卿, 等. 半刚性基层材料动态模量的衰变规律[J]. 中国公路学报, 2009(3).
- [16] 毛雪松, 支喜兰. 强度随龄期增长的半刚性基层弯沉检测方法[J]. 长安大学学报, 2003(2).
- [17] 仲文亮, 吕松涛. 不同龄期对水稳基层强度与模量及其内在联系的影响研究[J]. 中外公路, 2014(1).
- [18] 蒋应军, 李明杰, 张俊杰, 等. 水泥稳定碎石强度影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010(4).