文章编号:1674-2974(2024)11-0218-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024123

水泥稳定碎石拉压不同力学特性研究

潘勤学[1†],姜舜君[1],郑健龙[1],吕松涛[1],张军辉[1],宋小金[2]
[1. 长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;
2. 中腾智信科技(湖南)有限公司,湖南 长沙 410036]

摘 要:为解决现行路面结构设计参数及其取值与材料实际力学特性不匹配的问题,选取典型水泥稳定碎石开展了不同水泥剂量与加载速度下的单轴压缩及直接拉伸试验,研究了其应力应变特性,并分析了压拉强度、模量及泊松比的变化规律及其相互关系,揭示了水泥稳定碎石的拉压不同力学特性.结果表明:水泥稳定碎石拉压受力状态下的应力应变性质符合双模量理论的双线性特征,2%~3%水泥剂量范围为水泥稳定碎石力学本质特性发生变化的过渡区;水泥稳定碎石的拉压力学参数与加载速度和水泥剂量均呈良好的非线性变化关系;就影响因素而言,水泥剂量对材料拉压参数的影响程度远大于加载速度;就力学参数而言,模量受水泥剂量和加载速度的影响最大,其次为强度,最后为泊松比,且相较于抗压,抗拉力学参数受这2种因素的影响更为显著;压拉模量比及压拉泊松比的比值受加载速度和水泥剂量的影响较小,压拉强度比随水泥剂量的增大而逐渐减小,当水泥剂量超过3%时,压拉强度比趋于稳定,据此建立了水泥稳定碎石的拉压力学参数量化取值模型.研究结果可为基于双模量理论的路面结构设计参数取值提供依据.

关键词:道路工程;路面材料;力学参数;水泥稳定碎石;拉压不同特征;力学特性
中图分类号:U416 **文献标志码**:A

Study on Different Mechanical Properties of Cement Stabilized Macadam under Tension and Compression

PAN Qinxue[1†],JIANG Shunjun[1],ZHENG Jianlong[1],LÜ Songtao[1],ZHANG Junhui[1],SONG Xiaojin[2]
[1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Zhongteng Zhixin Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha 410036, China]

Abstract: To solve the problem of mismatch between design parameters and actual mechanical properties of pavement structure, typical cement stabilized macadam was selected to carry out uniaxial compression and direct tensile tests under different cement dosages and loading speeds. The stress-strain characteristics were studied, and

* **收稿日期**:2023-12-04
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600900,2023YFB2603500),National Key Research and Development Program of China (2021YFB2600900,2023YFB2603500);国家自然科学基金资助项目(52378441,51908071),National Natural Science Foundation of China (52378441,51908071);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202107),Science and Technology Progress and Innovation Plan Project of Hunan Provincial Department of Transportation(202107)
作者简介:潘勤学(1985—),男,湖南常德人,长沙理工大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:pqx123456789pqx@163.com

the variation of compressive and tensile strength (R_c & R_t)/ modulus (E_c & E_t)/ Poisson's ratio (μ_c & μ_t) and their relationships were analyzed, revealing the different mechanical properties of cement stabilized macadam under tension and compression. The results show that the stress-strain properties of cement stabilized macadam under tension and compression are in accordance with the bilinear characteristics of bi-modulus theory. A cement dosage range of 2% to 3% is identified as the transition zone where the mechanical properties change. The tensile and compressive parameters exhibit a strong nonlinear relationship with the loading speeds and cement dosages. Among the influencing factors, the influence of cement dosage on tensile and compressive parameters is much greater than the loading speed. In terms of mechanical parameters, the modulus is most affected by cement dosage and loading speed, followed by strength, and Poisson's ratio. Compared with compressive parameters, tensile parameters are more significantly affected by these two factors. The E_c/E_t and the μ_c/μ_t are less affected by loading speed and cement dosage. The R_c/R_t decreases gradually with the increase of cement dosage. When the cement dosage exceeds 3%, the R_c/R_t tends to be stable. Based on these findings, a quantitative value model for the tensile and compressive mechanical parameters of cement stabilized macadam is established. The research results can provide a basis for the parameter value of pavement structure design based on bi-modulus theory.

Key words: road engineering; pavement material; mechanical parameter; cement stabilized macadam; different characteristics of tension and compression; mechanical properties

截至 2022 年底，我国公路里程达 535.48 万公里，高速公路里程 16.91 万公里，其中 90% 以上为沥青路面. 然而从公路的投入与运营来看，不少路面还未达到使用年限，就已出现严重的功能性衰退和结构性破坏. 究其原因，除了施工及超载等因素[1]外，现行路面结构设计理论及设计参数的取值与实际路面结构与材料的力学特性不匹配也是重要原因之一[2-3].

大量研究表明，道路材料具有显著的拉压不同力学特性，是一种典型的双模量（拉模量与压模量不等）材料，这导致路面结构计算时模量参数不唯一，采用单模量进行路面设计误差大，因此应采用考虑材料拉压差异力学特性的双模量理论进行结构设计[4-9]. 同时，沥青路面材料参数取值的科学性对路面结构计算与设计有显著影响，实际路面结构设计时往往通过查询规范推荐表选取材料参数值，由于所推荐的材料参数范围较大，且结构计算时各参数的取值基本是相互割裂的，一般凭经验及参考规范的推荐范围独立选取，并未严格依据一种材料各力学参数之间可靠的量化关系来取值或调整，导致设计所选取的材料参数与材料真实的力学性能差异巨大[10-12]. 因此，依据双模量理论，并基于量化分析思想，构建了典型路面材料——水泥稳定碎石拉压参数之间的相关关系，确保基于双模量理论的路面设计选取的拉压模量及拉压泊松比有量化规律可依且相互匹配，对建立符合路面材料拉压不同力学特性的沥青路面设计方法具有重要意义.

国内外学者对此开展了相关研究：蒋应军等[13]针对不同水泥剂量、密实度和养护龄期下水泥稳定碎石的抗压强度进行试验，发现抗压强度随影响因素大小的改变而发生变化. 张晨晨等[14]发现水泥稳定碎石的抗压模量和抗弯模量随着水泥剂量的增加而增加. Hu 等[15]发现了劈裂强度和抗弯强度随着水泥剂量的增加而增加. Jiang 等[16]发现随着压实度的增加，水泥稳定碎石试件的劈裂强度也会增加. 吕松涛等[17]分别建立了水泥稳定碎石无侧限抗压强度、弯拉强度和抗压回弹模量与养护龄期的关系模型，并建立无侧限抗压强度与抗压回弹模量间的关系模型. 张辉等[18]建立了水泥稳定碎石劈裂强度随龄期变化的关系模型以及劈裂强度与抗压强度之间的关系模型. Lu 等[19]发现水泥稳定碎石的抗压强度、劈裂强度和抗弯强度皆与加载速度有良好的相关性. 这些针对水泥稳定碎石不同力学参数与影响因素间的关系研究，大多局限于单因素下的简单定量分析

及构建关系模型,鲜少将多因素综合作用纳入考量,以建立更为全面的量化关系模型.此外,相关研究多基于线弹性理论对水泥稳定碎石力学参数之间的相关关系开展研究,而路面材料及结构存在明显的拉压不同力学特性,该特性会导致材料力学参数的不唯一性及结构计算结果的不确定性,从而导致路面设计结果偏差较大[20].

综上所述,近年来提出的基于双模量理论的沥青路面结构计算方法,主要解决了路面材料参数不唯一、路面结构计算的算法及收敛性问题[21],而材料拉压力学参数的非线性特性及结构计算时参数如何科学取值有待进一步研究,且现有研究很少涉及水泥稳定碎石拉压力学参数间关系模型的建立.基于此,本文开展了不同水泥剂量和加载速度下水泥稳定碎石拉压力学参数试验,以期建立材料拉压力学参数间的量化关系,为基于双模量理论的路面计算拉压力学参数的合理取值提供依据.

1 测试方案

1.1 原材料及配合比设计

水泥稳定碎石采用P·C 32.5水泥,其性能指标测试结果见表1,集料采用石灰岩.按照《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)[22],采用悬浮密实型级配,如图1所示.按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)[23],采用振动压实法确定水泥稳定碎石在1%、2%、3%、4%和5%五种水泥剂量下的最佳含水率和最大干密度,结果见表2.混合料搅拌后振动成型,制作高度150 mm、直径150 mm的圆柱体试件与400 mm×100 mm×100 mm的梁式试件,分别用于单轴压缩与直接拉伸试验.试件在标准条件下[温度:(20±2)℃,湿度≥95%]养护90 d后进行试验.

表1 水泥技术指标汇总表

Tab.1 Summary of technical indexes of cement

测试内容		测试值	技术要求
凝结时间/min	初凝	240	≥180
	终凝	419	≥360
安定性(雷氏夹法)/mm		3.2	≤5
水泥砂浆强度/MPa	3 d抗折强度	3.6	≥2.5
	28 d抗折强度	≥5.5	—
	3 d抗压强度	18.2	≥10
	28 d抗压强度	≥32.5	—

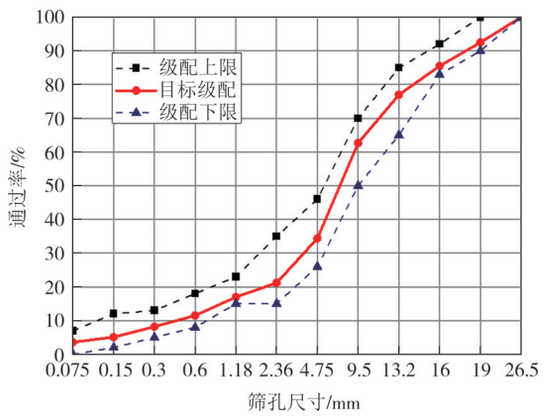


图1 悬浮密实型水泥稳定碎石级配曲线

Fig.1 Grading curve of suspended dense cement stabilized macadam

表2 不同水泥剂量下的最大干密度与最佳含水率试验结果

Tab.2 Test results of maximum dry density and optimum moisture content under different cement dosages

水泥剂量/%	最大干密度ρ_{dmax}/(g·cm^{-3})	最佳含水率ω_0/%
1.0	2.278	5.449
2.0	2.315	5.488
3.0	2.323	5.497
4.0	2.339	5.246
5.0	2.344	5.491

1.2 水泥稳定碎石力学参数测试方案

依据现行规范[22],水泥稳定碎石常用水泥剂量范围为3%~6%,而普遍应用于耐久性沥青路面结构中的水泥稳定碎石层的水泥剂量为1%~2%,因此本文选取1%、2%、3%、4%、5%的水泥剂量开展相关试验.经调研[24-25]及前期试探试验发现,低加载速度下路面材料力学特性变化显著,而高加载速度(≥0.1 MPa/s)下变化平缓,据此确定测试加载速度分别为:0.01、0.02、0.05、0.1、0.5 MPa/s.按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)[23],利用MTS分别进行单轴压缩试验与直接拉伸试验,如图2所示.

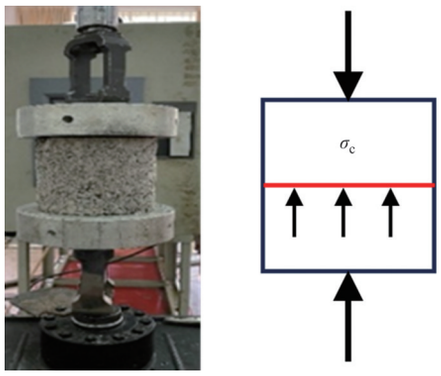
1.2.1 强度

在试验过程中记录最大破坏荷载并按照下式[23, 25]计算强度.

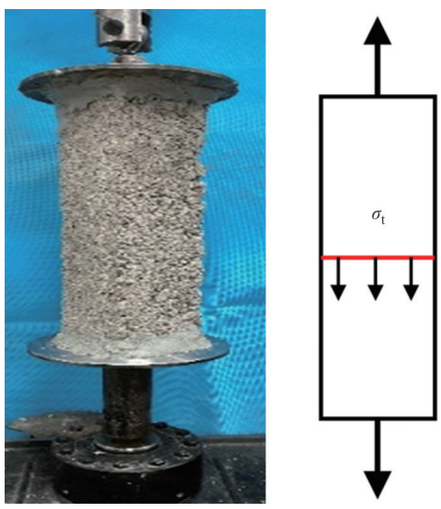
$$R_c = \frac{4P_c}{\pi d^2} \tag{1}$$

$$R_t = \frac{P_t}{bh} \tag{2}$$

式中:R_c与R_t分别为单轴压缩强度与直接拉伸强度,MPa;P_c与P_t分别为试件破坏时对应的荷载峰值,N;d为圆柱体试件的直径,mm;b、h为梁式试件破坏截面的边长,mm.



(a)单轴压缩试验及受力示意图



(b)直接拉伸试验及受力示意图

图 2　单轴压缩试验和直接拉伸试验

Fig.2　Uniaxial compression test and direct tension tests

1.2.2　模量

对水泥稳定碎石试件进行五级逐级加载、卸载,每级荷载大小分别为最大破坏荷载的 10%、20%、30%、40% 和 50%,利用引伸计测量加卸载过程中纵向应变和横向应变并按照式(3)、式(4)[23,25]计算模量.

$$E_c = \frac{4P_c'}{\pi d^2 \varepsilon_c} \tag{3}$$

$$E_t = \frac{P_t'}{bh\varepsilon_t} \tag{4}$$

式中:E_c、E_t分别为试件的单轴压缩模量和直接拉伸模量,MPa;P_c'、P_t'分别为每级压、拉荷载,N;ε_c、ε_t分别为单轴压缩和直接拉伸竖向回弹应变.

1.2.3　泊松比

通过引伸计测得的纵向应变和横向应变按照下式[26]计算泊松比.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} \right| \tag{5}$$

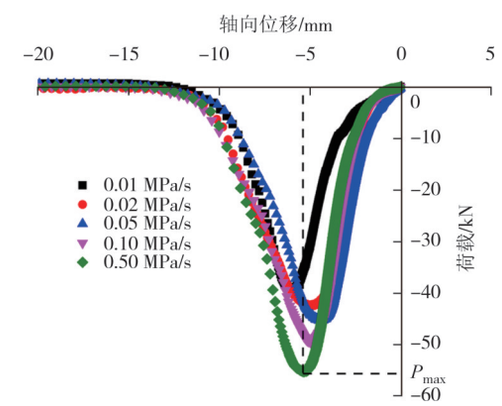
式中:μ为试件的泊松比;ε_h、ε_v分别为试件的横向和纵向应变.

2　水泥稳定碎石拉压力学特性分析

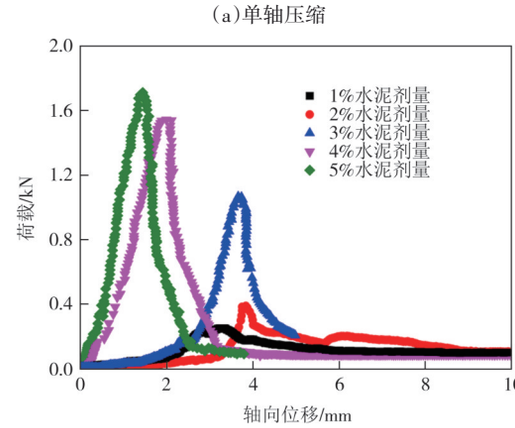
2.1　强度特性

单轴压缩与直接拉伸强度试验过程中试件轴向位移及所受荷载历时曲线如图 3 所示(以 2% 水泥剂量的单轴压缩试验过程和 0.1 MPa/s 加载速度的直接拉伸试验过程为例,其他测试条件下规律类似).

由图 3 可知,压缩状态下,不同加载速度下的荷载-位移曲线规律类似,而在拉伸状态下,水泥剂量从 1% 至 2%,轴向位移与荷载间呈现明显的非线性关系,表现为弹塑性破坏;但从 3% 至 5% 时,轴向位移与荷载间基本呈线性关系,表现为脆性破坏. 表明低剂量的水泥稳定碎石并不能简单的视为一个脆性线弹性体,否则会引起较大误差,而高剂量的水泥稳定碎石则表现为明显的线弹性体性质.



(a)单轴压缩



(b)直接拉伸

图 3　轴向位移-荷载关系图

Fig.3　Relationship between axial displacement and load

2.2　刚度特性

压应力状态下,水泥稳定碎石荷载与竖向应变和横向应变的实时数据(1% 水泥剂量,0.05 MPa/s)如图 4 所示.

由图4可知,1%水泥稳定碎石各级加载卸载曲线具有瞬时性,应变表现为弹性性质,其中拉伸变形存在塑性变形,这与2.1节所述强度特性规律吻合.图5为水泥稳定碎石各级拉压荷载下应力-应变曲线,由图5可知水泥稳定碎石表现出明显的拉压双线性特性,符合双模量应力-应变特征,其他因素组合下也有类似规律.

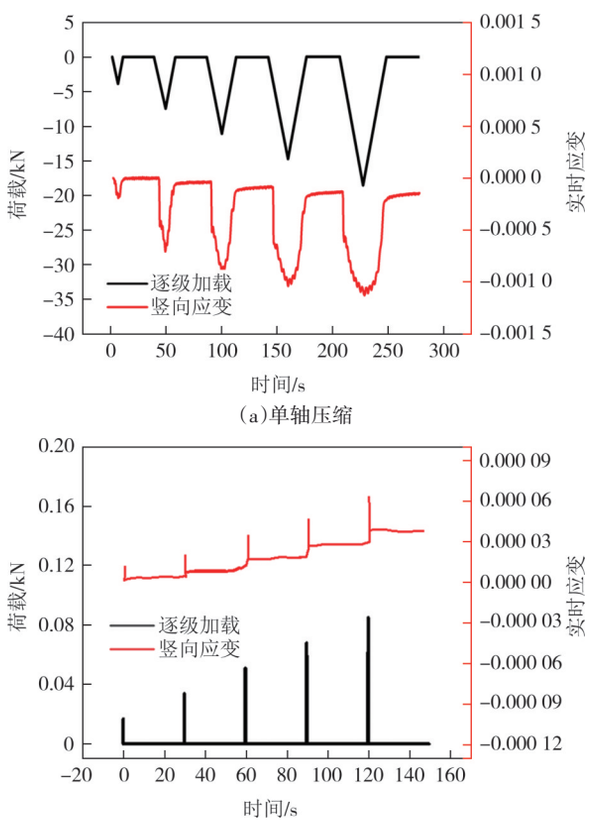


图4 水泥稳定碎石试验各级荷载和应变数据

Fig.4 Load and strain data of cement stabilized macadam test at all levels

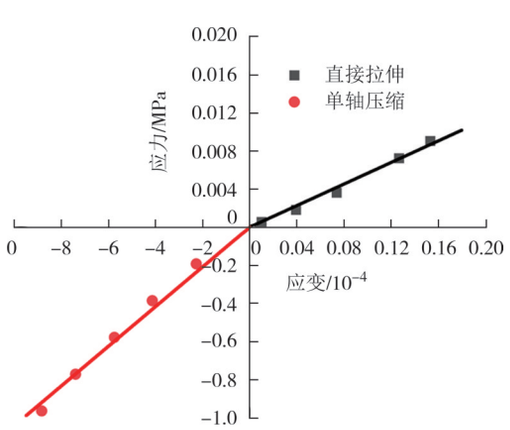


图5 水泥稳定碎石拉压应力-应变双线性模型

Fig.5 Tensile and compressive stress-strain bilinear model of cement stabilized macadam

图6为不同水泥剂量及应力下的压缩泊松比μ_c和拉伸泊松比μ_t测试结果.

由图6可知,拉压泊松比随着施加应力的增加而增加,随水泥剂量的减少而降低.水泥剂量为1%~2%时,拉压泊松比与应力呈非线性关系,但为3%~5%时,拉压泊松比与应力基本呈线性关系,这与2.1节所述强度特性规律吻合.现行规范对水泥稳定碎石材料泊松比测试没有明确规定,考虑到若施加荷载级位总体偏小,则试件变形量小,测量误差大,若荷载级位过大,容易造成试件损伤,且易产生塑性变形,从而影响下级荷载施加后试件回弹变形的可靠性,参考文献[16]中沥青混合料模量确定方法,取$0.5P_{max}$荷载级位下的泊松比作为测试值.

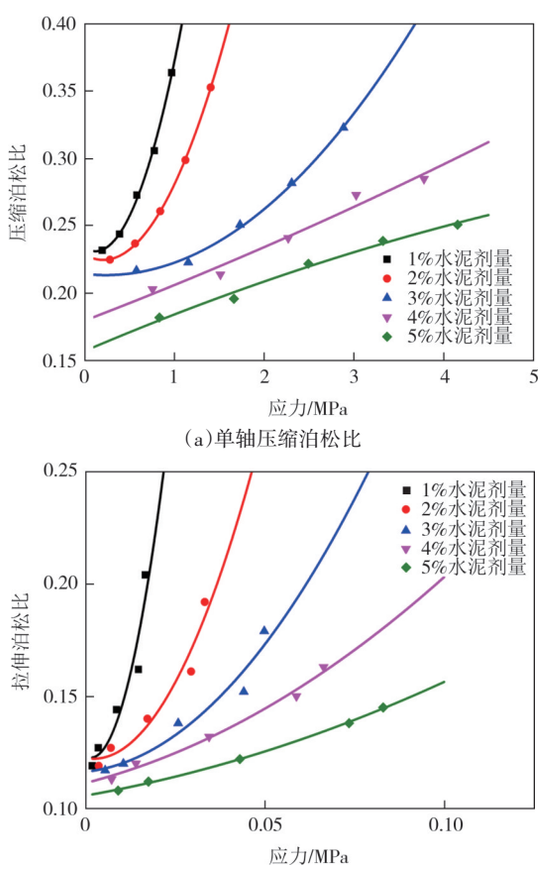


图6 逐级应力与泊松比关系变化图

Fig.6 Change of relationship between progressive stress and Poisson's ratio

3 水泥稳定碎石拉压力学参数变化规律

3.1 强度

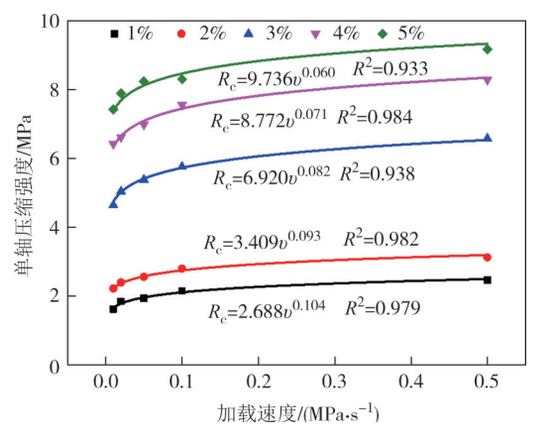
不同加载速度及水泥剂量下水泥稳定碎石单轴

压缩强度R_c、直接拉伸强度R_t测试结果如表3所示，由表3得到拉压强度基本规律如图7和图8所示.

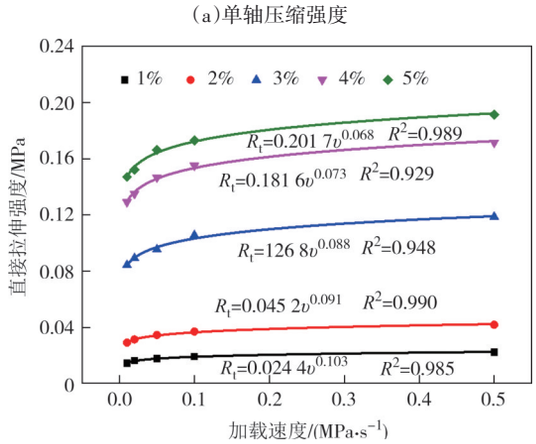
表3　水泥稳定碎石拉压强度试验结果

Tab.3　Tensile and compressive strength test results of cement stabilized macadam

加载速度/(MPa·s^{-1})	水泥剂量									
	1%		2%		3%		4%		5%	
	R_c	R_t	R_c	R_t	R_c	R_t	R_c	R_t	R_c	R_t
0.01	1.63	0.015	2.22	0.029	4.65	0.085	6.43	0.129	7.43	0.147
0.02	1.85	0.017	2.40	0.032	5.05	0.089	6.62	0.135	7.89	0.152
0.05	1.94	0.018	2.57	0.035	5.39	0.096	6.99	0.147	8.24	0.166
0.1	2.16	0.019	2.81	0.037	5.77	0.106	7.56	0.155	8.31	0.173
0.5	2.47	0.023	3.13	0.042	6.59	0.119	8.29	0.172	9.17	0.192



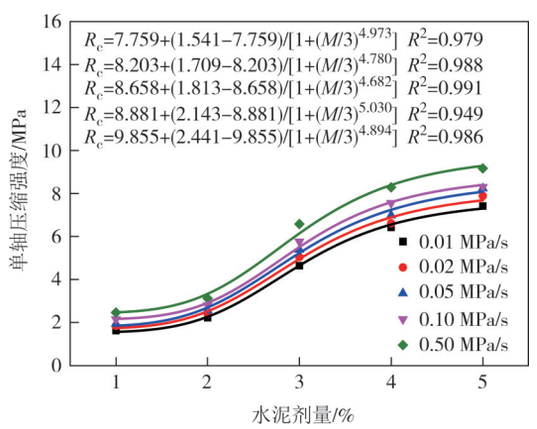
(a)单轴压缩强度



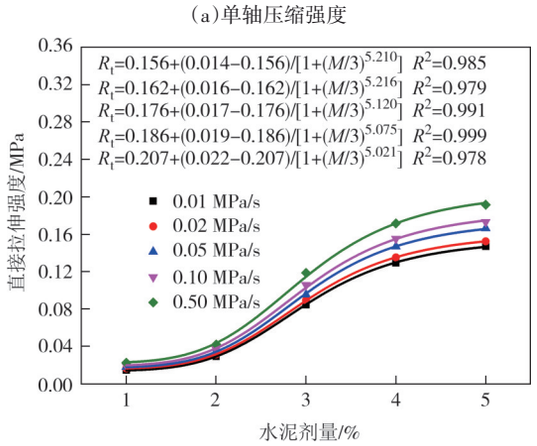
(b)直接拉伸强度

图7　水泥稳定碎石拉压强度随加载速度变化规律

Fig.7　Change law of tensile and compressive strength of cement stabilized macadam with loading speeds



(a)单轴压缩强度



(b)直接拉伸强度

图8　水泥稳定碎石拉压强度随水泥剂量变化规律

Fig.8　Change law of tensile and compressive strength of cement stabilized macadam with cement dosages

由图7可知，拉压强度随加载速度的增大而增大，两者呈幂函数相关关系，在低加载速度阶段增长较快，但随着加载速度的增加，强度的增长趋于稳定. 以3%水泥剂量下抗压强度为例，0.1 MPa/s的抗压强度相比于0.01 MPa/s增加了约24%，而0.5 MPa/s的抗压强度相较于0.1 MPa/s增加了约14%. 相同水泥剂量下，0.5 MPa/s时的强度与0.01 MPa/s时的强度相比，压缩强度增加约20%~50%，拉伸强度增加约30%~50%. 采用摩尔-库伦理论[27]作为水泥稳定碎石的强度分析理论，结合文献[23]推导得出的强度参数黏聚力c及内摩擦角φ的换算公式[式(6)、式(7)]，以4%水泥剂量为例，建立水泥稳定碎石强度参数随加载速度的变化规律，如图9所示. 其他水泥剂量下的变化规律均相同. 由图9可知，黏聚力随加载速度的变化规律同拉压强度的变化规律基本一致，在低

加载速度下黏聚力对加载速度的变化较敏感,呈现急剧增大的变化趋势,而高加载速度下其变化趋于平缓;内摩擦角则在73.5°上下小幅度变化,基本不随加载速度的变化而变化.因此,拉压强度在低加载速度下急剧增大的原因可能是材料内部黏聚力的急剧增大.

$$c = \frac{1}{2}\sqrt{R_c \cdot R_t} \tag{6}$$

$$\sin\varphi = \frac{R_c - R_t}{R_c + R_t} \tag{7}$$

式中:c为黏聚力;φ为内摩擦角.

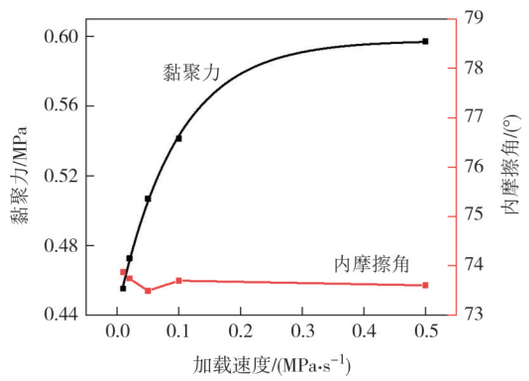


图9 内摩擦角与黏聚力随加载速度的变化规律

Fig.9 The variation of internal friction angle and cohesion with loading speeds

由图8可知,拉压强度随着水泥剂量的增加而增大,两者呈logistics函数变化关系,如式(8)所示.在加载速度不变的情况下,拉压强度增长幅度与水泥剂量存在明显的非线性关系,强度增长幅度随水泥剂量呈现小—大—小的变化趋势,原因在于随着水泥剂量的增加,集料间填充的水泥胶浆变多,良好的胶结能力使强度迅速增加,而当水泥胶浆填充到一定量时,水泥稳定碎石的强度主要由水泥胶浆间的强度构成,强度增长变缓.当水泥剂量从1%增加至5%时,压缩和拉伸强度分别增加约4倍和9倍.相同条件下拉伸强度小于压缩强度,实际工程中水泥稳定碎石的水泥剂量常用范围为3%~6%,推荐压缩强度范围为4.5~9.5 MPa,直接拉伸强度范围为0.08~0.2 MPa.

$$R_c = \frac{a_c - b_c}{1 + (M/3)^k} + b_c \tag{8(a)}$$

$$R_t = \frac{a_t - b_t}{1 + (M/3)^k} + b_t \tag{8(b)}$$

式中:a_c、a_t、b_c、b_t、k均为拟合参数.

基于拉压强度与加载速度和水泥剂量均有着良好的非线性拟合关系,可进一步建立起拉压强度随两种因素变化的量化关系模型.其单轴压缩强度和直接拉伸强度的计算公式如下:

$$R_c = \left[\frac{-7.773}{1 + (M/3)^{4.863}} + 10.422\right] v^{0.115 - 0.01M} \tag{9}$$

$$R_t = \left[\frac{-0.194}{1 + (M/3)^{4.982}} + 0.219\right] v^{0.110 - 0.008\,5M} \tag{10}$$

式中:M为水泥剂量,%;v为加载速度,MPa/s.

3.2 模量

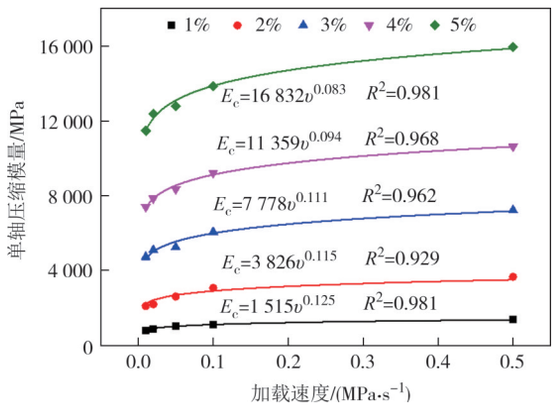
水泥稳定碎石单轴压缩模量E_c及直接拉伸模量E_t测试结果如表4所示,由表4得到的拉压模量基本规律如图10和图11所示.

表4 水泥稳定碎石拉压模量试验结果

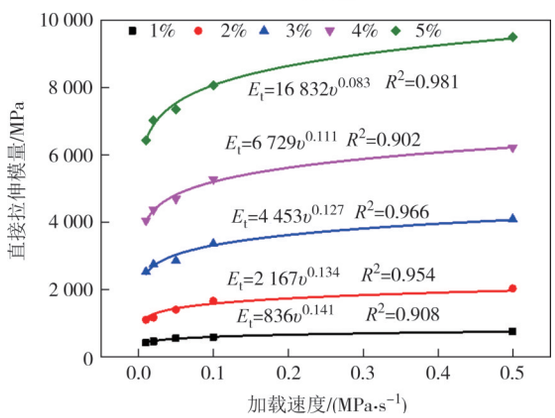
Tab.4 Tensile and compressive modulus test results of cement stabilized macadam

加载速度/(MPa·s⁻¹)	水泥剂量									
	1%		2%		3%		4%		5%	
	E_c/MPa	E_t/MPa	E_c/MPa	E_t/MPa	E_c/MPa	E_t/MPa	E_c/MPa	E_t/MPa	E_c/MPa	E_t/MPa
0.01	834	427	2 122	1 110	4 753	2 535	7 423	4 056	11 487	6 447
0.02	905	468	2 221	1 175	5 111	2 752	7 885	4 380	12 382	7 035
0.05	1 062	561	2 637	1 411	5 270	2 865	8 370	4 702	12 792	7 356
0.1	1 122	598	3 093	1 672	6 081	3 372	9 250	5 286	13 887	8 073
0.5	1 414	770	3 688	2 039	7 252	4 101	10 650	6 228	15 970	9 511

由图10和图11知,拉压模量随加载速度及水泥剂量的变化规律与拉压强度相似,随加载速度和水泥剂量的增加而增大,分别呈良好的幂函数及Slogistic函数[式(11)]相关关系.相同条件下拉伸模量明显小于压缩模量,即呈现明显的拉压差异特性.同一水泥剂量条件下,与0.01 MPa/s时相比,0.5 MPa/s时压缩模量增加约40%~70%,拉伸模量增加约50%~80%.同一加载速度下,水泥剂量从1%增加至5%时,压缩模量增加约10~13倍,而拉伸模量约增加11~14倍,这表明相较于压缩模量,拉伸模量对水



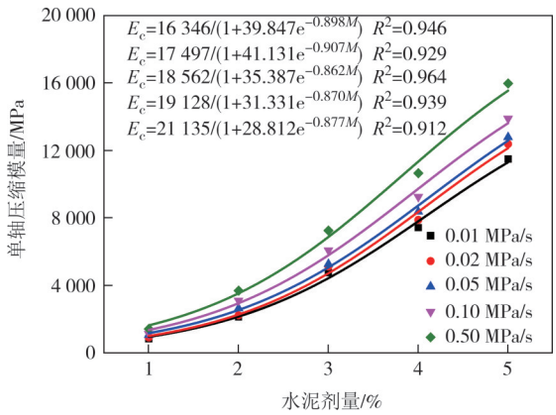
(a)单轴压缩模量



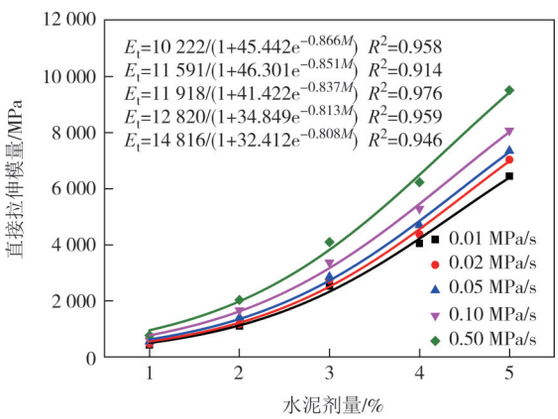
(b)直接拉伸模量

图 10　水泥稳定碎石拉压模量随加载速度的变化规律

Fig.10　Change law of tensile and compressive modulus of cement stabilized macadam with loading speeds



(a)单轴压缩模量



(b)直接拉伸模量

图 11　水泥稳定碎石拉压模量随水泥剂量的变化规律

Fig.11　Change law of tensile and compressive modulus of cement stabilized macadam with cement dosages

泥剂量和加载速度的变化更敏感.

$$E_c = \frac{b_c'}{1 + a_c' e^{-k_c' M}} \qquad [11(a)]$$

$$E_t = \frac{b_t'}{1 + a_t' e^{-k_t' M}} \qquad [11(b)]$$

式中:a_c'、a_t'、b_c'、b_t'、k'均为拟合参数.

根据试验结果,可建立水泥稳定碎石拉压模量考虑加载速度和水泥剂量的计算公式:

$$E_c = \left(\frac{25\,193}{1 + 27.188e^{-0.796M}}\right) v^{-0.010\,5M + 0.137\,1} \qquad (12)$$

$$E_t = \left(\frac{15\,759}{1 + 30.922e^{-0.800M}}\right) v^{-0.010\,9M + 0.154\,9} \qquad (13)$$

实际工程中水泥稳定碎石的常用水泥剂量范围为3%~6%,据本研究可得,压缩模量范围为4 800~18 000 MPa,拉伸模量范围为2 500~12 000 MPa,可为基于双模量理论的路面结构设计参数取值提供参考.

3.3　泊松比

水泥稳定碎石单轴压缩泊松比μ_c及直接拉伸泊松比μ_t测试结果如表5所示,由表5得到的拉压泊松比基本规律如图12和图13所示.

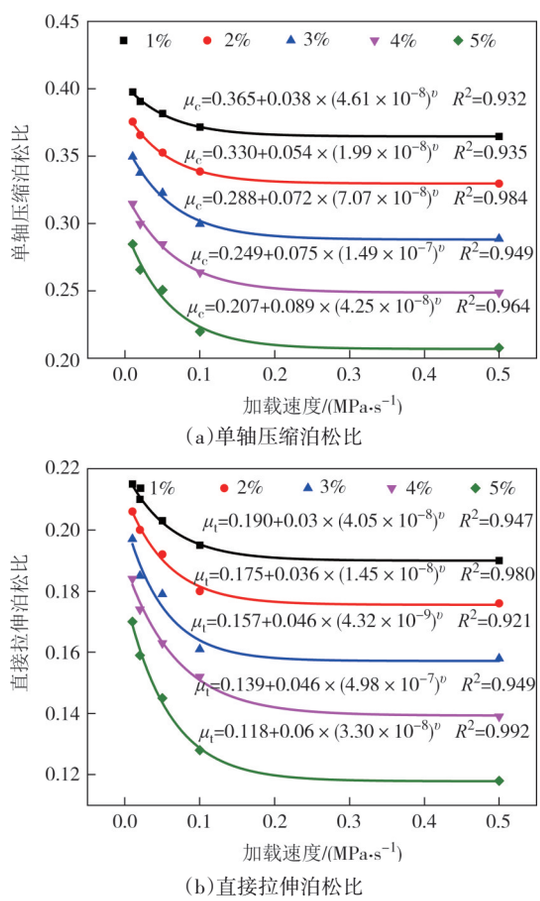
由图12可知,水泥稳定碎石拉压泊松比均随着加载速度的增大而减小,呈良好的指数函数相关关系;加载速度较小时,泊松比减小较快,随着加载速度的继续增大,泊松比逐渐趋于稳定,此时泊松比的变化值基本不受加载速度变化的影响,试件的横向变形和纵向变形均匀变化. 相同水泥剂量条件下,与0.01 MPa/s时相比,0.5 MPa/s时的拉压泊松比均减小了约10%~30%.

由图13可知,水泥稳定碎石拉压泊松比随水泥剂量的增大而减小,呈二次函数变化关系. 在加载速度不变的情况下,当水泥剂量从1%减小至5%时,压缩泊松比减小约30%~40%,而拉伸泊松比减小约20%~40%. 相同条件下拉伸泊松比小于压缩泊松比. 实际工程中水泥稳定碎石的水泥剂量常用范围为3%~6%,因此推荐压缩泊松比范围为0.2~0.3,拉伸泊松比范围为0.1~0.2.

表5 水泥稳定碎石拉压泊松比试验结果

Tab.5 Tensile and compressive Poisson's ratio test results of cement stabilized macadam

加载速度/(MPa·s^{-1})	水泥剂量									
	1%		2%		3%		4%		5%	
	μ_c	μ_t	μ_c	μ_t	μ_c	μ_t	μ_c	μ_t	μ_c	μ_t
0.01	0.398	0.215	0.376	0.206	0.350	0.197	0.315	0.184	0.285	0.170
0.02	0.391	0.210	0.366	0.200	0.338	0.185	0.300	0.174	0.266	0.159
0.05	0.382	0.203	0.353	0.192	0.323	0.179	0.285	0.163	0.251	0.145
0.10	0.372	0.195	0.339	0.180	0.300	0.161	0.264	0.152	0.220	0.128
0.50	0.365	0.190	0.330	0.176	0.289	0.158	0.249	0.139	0.208	0.118

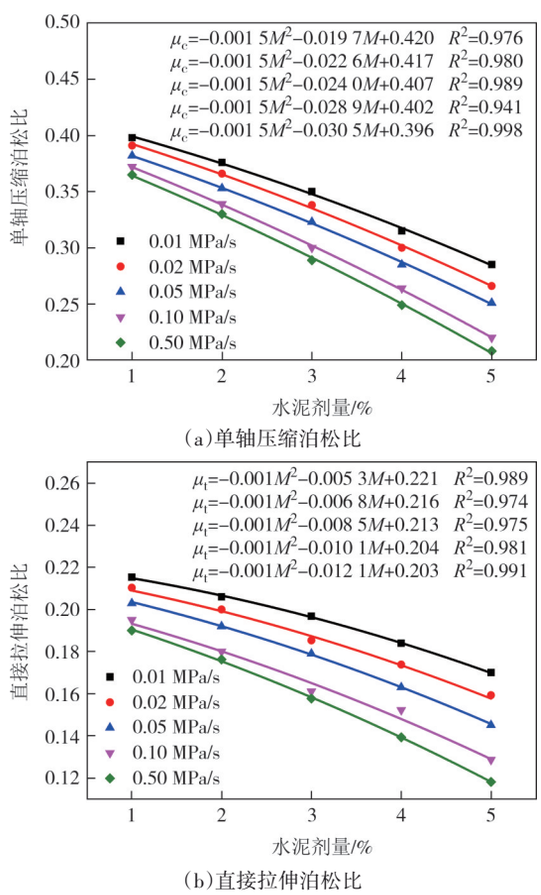


(a)单轴压缩泊松比

(b)直接拉伸泊松比

图12 水泥稳定碎石拉压泊松比随加载速度的变化曲线

Fig.12 Change law of tensile and compressive Poisson's ratio of cement stabilized macadam with loading speeds



(a)单轴压缩泊松比

(b)直接拉伸泊松比

图13 水泥稳定碎石拉压泊松比随水泥剂量的变化规律

Fig.13 Change law of tensile and compressive Poisson's ratio of cement stabilized macadam with cement dosages

根据试验结果建立拉压泊松比考虑加载速度和水泥剂量两种影响因素的计算公式:

$$\mu_c = -0.001\,5M^2 - \left[0.031 - 0.013\,3 \times \left(8.8 \times 10^{-10}\right)^v\right]M + \left[0.397 + 0.03 \times \left(4.048 \times 10^{-11}\right)^v\right] \tag{14}$$

$$\mu_t = -0.001M^2 - \left[0.012 - 0.007\,3 \times \left(1.9 \times 10^{-8}\right)^v\right]M + \left[0.200 + 0.02 \times \left(2.539 \times 10^{-4}\right)^v\right] \tag{15}$$

由上述分析可知,就影响因素的影响程度而言,水泥剂量对材料拉压参数的影响程度远大于加载速度;就具体力学参数而言,水泥剂量和加载速度对模量的影响最显著,其次是强度,而对泊松比的影响最小.

4 水泥稳定碎石不同力学参数之间的关系

拉压参数之间的比值关系体现了同一材料参数的匹配相关性,且由双模量理论可知,拉压模量比是路面分析时影响结构非线性程度的关键因素,因此,研究不同力学参数之间的关系对路面结构设计参数

的合理取值具有重要意义.

4.1　抗拉参数与抗压参数间关系

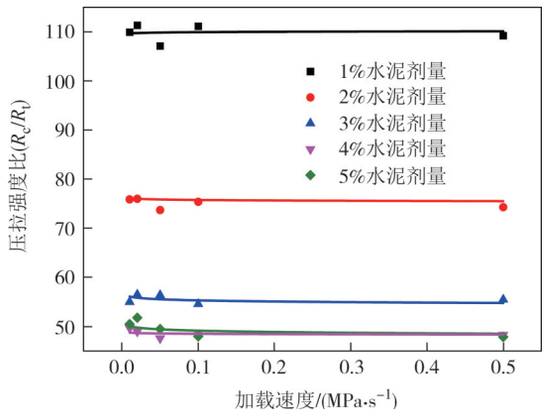
根据试验结果,计算得到水泥稳定碎石抗压参数与抗拉参数的比值,结果如表6所示.根据强度、模量和泊松比随加载速度及水泥剂量的拟合公式,可以得到压拉参数比值与两者的变化关系式,得到压拉参数比值随两者的变化曲线如图14~图16所示.

表6　水泥稳定碎石力学参数比值计算结果

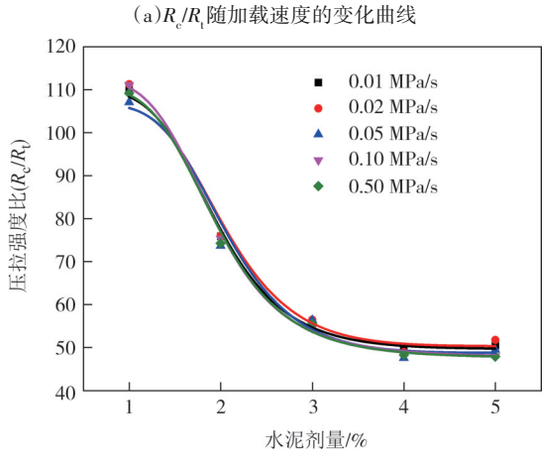
Tab.6　Calculation results of mechanical parameter ratio of cement stabilized macadam

水泥剂量/%	加载速度/(MPa·s^{-1})	R_c/R_t	E_c/E_t	μ_c/μ_t	E_c/R_c	E_t/R_t
1	0.01	109.9	1.95	1.85	512	28 467
	0.02	111.3	1.93	1.86	489	27 529
	0.05	107.1	1.89	1.88	547	31 167
	0.1	111.1	1.87	1.91	519	31 474
	0.5	109.2	1.83	1.92	573	33 478
2	0.01	75.9	1.91	1.83	956	38 276
	0.02	76.0	1.89	1.83	925	36 719
	0.05	73.7	1.87	1.84	1 026	40 314
	0.1	75.4	1.85	1.88	1 101	45 189
	0.5	74.3	1.81	1.88	1 178	48 548
3	0.01	55.0	1.88	1.78	1 022	29 824
	0.02	56.5	1.86	1.83	1 012	30 921
	0.05	56.4	1.84	1.80	978	29 844
	0.1	54.6	1.80	1.86	1 054	31 811
	0.5	55.5	1.77	1.83	1 101	34 462
4	0.01	49.7	1.83	1.71	1 154	31 442
	0.02	49.0	1.80	1.72	1 191	32 444
	0.05	47.6	1.78	1.75	1 197	31 986
	0.1	48.7	1.75	1.74	1 224	34 103
	0.5	48.3	1.71	1.79	1 285	36 209
5	0.01	50.5	1.78	1.68	1 546	43 857
	0.02	51.8	1.76	1.67	1 569	46 283
	0.05	49.5	1.74	1.73	1 552	44 313
	0.1	48.0	1.72	1.72	1 671	46 665
	0.5	47.9	1.68	1.76	1 742	49 537

由图14可知,相同水泥剂量下不同加载速度的压拉强度比基本不变,表明随加载速度变化材料的拉压强度增幅比例基本一致,因此其对压拉强度比的影响极小;压拉强度比随水泥剂量的增大而逐渐减小,1%、2%、3%、4%、5%水泥剂量下不同加载速度的压拉强度比的均值分别约为110、75、56、49、50,当水泥剂量超过3%时,压拉强度比逐渐趋于稳定,接近50,即压缩强度和拉伸强度随加载速度的增幅



(a)R_c/R_t随加载速度的变化曲线



(b)R_c/R_t随水泥剂量的变化曲线

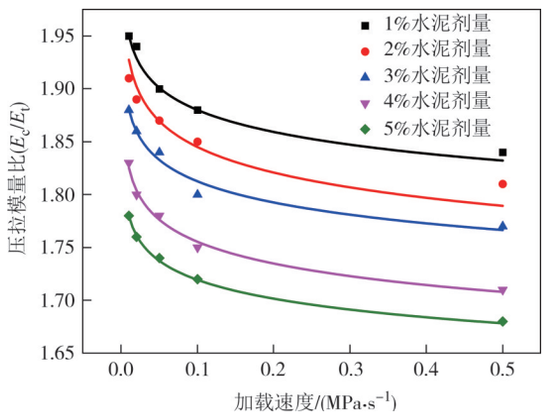
图14　R_c/R_t随加载速度和水泥剂量的变化曲线

Fig.14　R_c/R_t curve with loading speed and dosage of cement factors

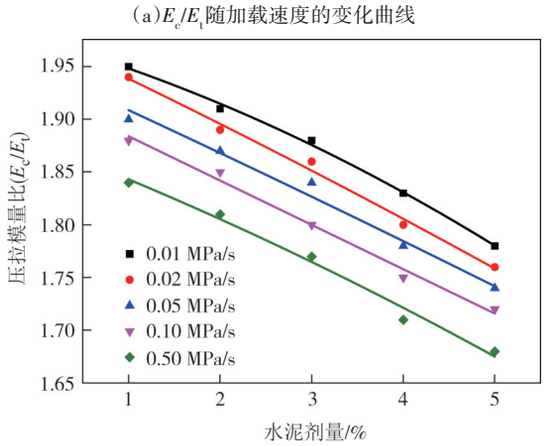
规律相同,这归结于直接拉伸强度主要依靠水泥胶结料的黏聚力.当水泥剂量较小时,水泥浆体胶结料不能完全覆盖集料表面,导致材料内部黏聚力过小,难以有效抵抗拉伸破坏;随着水泥剂量的不断增加,集料间的有效胶结面也随之增加,材料整体黏聚力提升,进而能更好地抵抗拉伸破坏,使得压拉强度比逐渐减小.而当水泥剂量约大于3%时,集料间的有效胶结面达到饱和,因此,即便继续增大水泥剂量,水泥稳定碎石的压拉强度比仍维持不变.现行沥青路面设计规范中水泥稳定碎石的水泥剂量推荐范围为3%~6%,建议此时压拉强度比可取50.

由图15可知,水泥稳定碎石压拉模量比随加载速度和水泥剂量的增大均呈现降低的趋势,但从数值上看,变化幅度较小,即拉压差异特性变化较小,因此,可认为压缩模量和拉伸模量随加载速度和水泥剂量的增幅相似,压拉模量比基本在1.7~1.9范围内,比值之间最大相差10%左右,可以取中值为推荐值.为便于基于双模量理论的路面设计参数取值,对

于3%~6%的水泥剂量,建议压拉模量比控制在1.8左右为宜.



(a)E_c/E_t随加载速度的变化曲线



(b)E_c/E_t随水泥剂量的变化曲线

图15 E_c/E_t随加载速度和水泥剂量的变化曲线

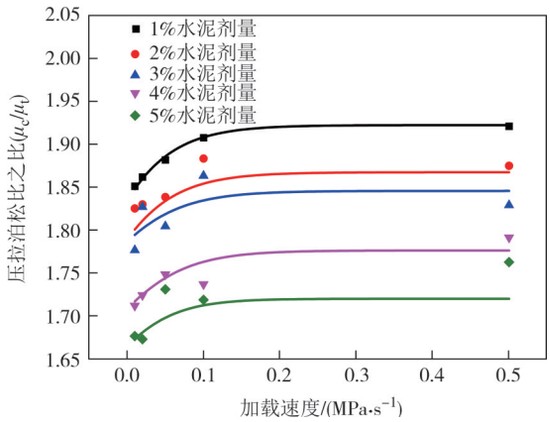
Fig.15 E_c/E_t curve with loading speed and dosage of cement factors

由图16可知,压拉泊松比的比值随加载速度增大而增大,但随着加载速度的继续增大增幅迅速减小,最终趋于固定值;而随水泥剂量的增大而减小,但是从总体数值上看,压拉泊松比基本在1.7~1.9范围内,数值差异在10%左右,差异较小,可取中间值作为推荐值.这表明压缩泊松比和拉伸泊松比随加载速度和水泥剂量的增幅变化规律相似,μ_c/μ_t的比值逐渐趋于稳定.据此可得对于3%~6%水泥剂量的水泥稳定碎石,推荐压拉泊松比的比值为1.8.

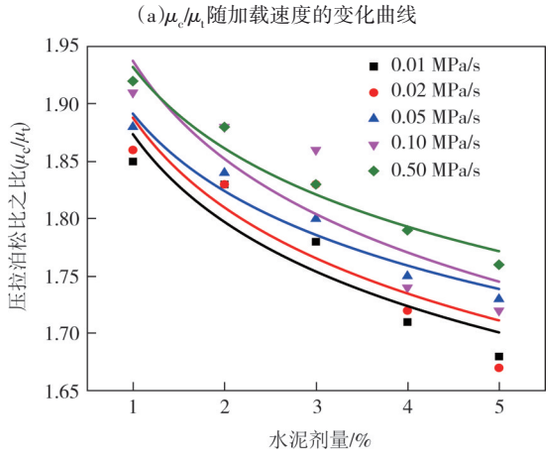
4.2 强度与模量间关系

绘制模强比与影响因素之间的关系折线图,如图17~图18所示.

从图17可以看出,压缩模强比(E_c/R_c)、拉伸模强比(E_t/R_t)在低加载速度时均有明显变化,E_c/R_c增幅最大可达15%,E_t/R_t增幅最大可达18%;而在较高加载速度时变化平缓,E_c/R_c、E_t/R_t增幅最大仅为5%.



(a)μ_c/μ_t随加载速度的变化曲线



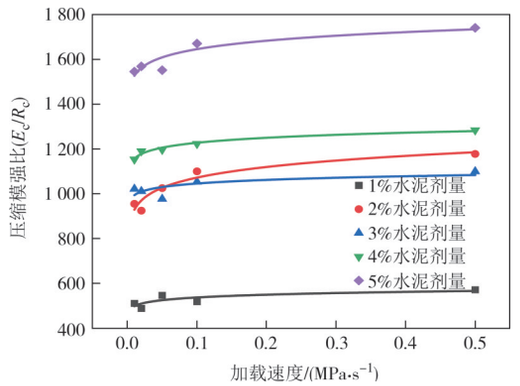
(b)μ_c/μ_t随水泥剂量的变化曲线

图16 μ_c/μ_t随加载速度和水泥剂量的变化曲线

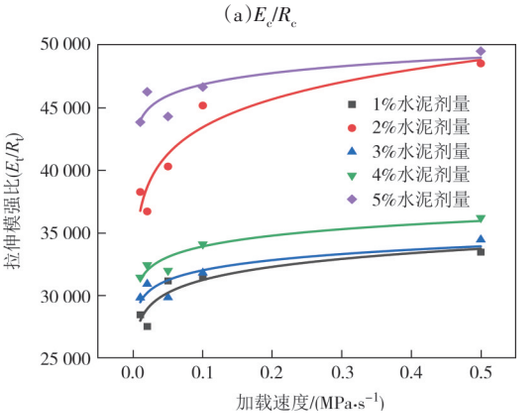
Fig.16 μ_c/μ_t curve with loading speed and dosage of cement factors

此外,从总体趋势可以看出随着加载速度的增大E_c/R_c、E_t/R_t逐渐增大,且增幅逐渐变小,最终趋于一个定值.1%、2%、3%、4%和5%水泥剂量的E_c/R_c的定值分别约为570、1 180、1 100、1 280、1 750,E_t/R_t的定值分别约为33 500、48 500、34 500、36 000、49 500.相同条件下,E_t/R_t远大于E_c/R_c,且有数十倍的差距.因此,E_t/R_t对加载速度变化的敏感性高于E_c/R_c.

由图18可知,水泥稳定碎石E_c/R_c和E_t/R_t随水泥剂量的变化趋势有明显区别.当水泥剂量在1%~2%和超过3%时,E_c/R_c随水泥剂量的增大急剧增加,而水泥剂量为2%和3%时的E_c/R_c相差不大,基本保持稳定;而E_t/R_t随水泥剂量增大呈现先增大后减小再增大的趋势,水泥剂量为3%时E_t/R_t最小.这与2.1节强度特性规律吻合,水泥剂量在2%~3%范围内的水泥稳定碎石的实际力学特性可能发生突变,低剂量的水泥稳定碎石可能与加强的级配碎石的力学特性类似,而当水泥剂量较高时,如达到了3%~4%,实际材料是整体性的弹脆性材料,与弱化的水泥混凝土



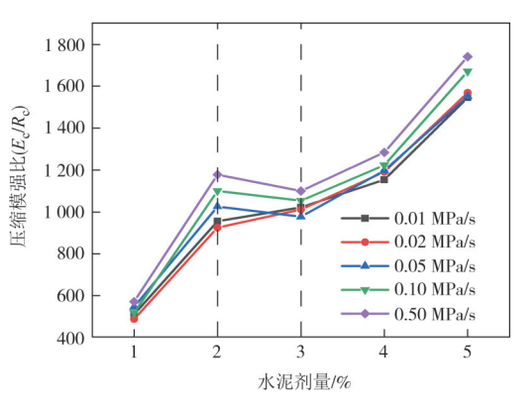
(a)E_c/R_c



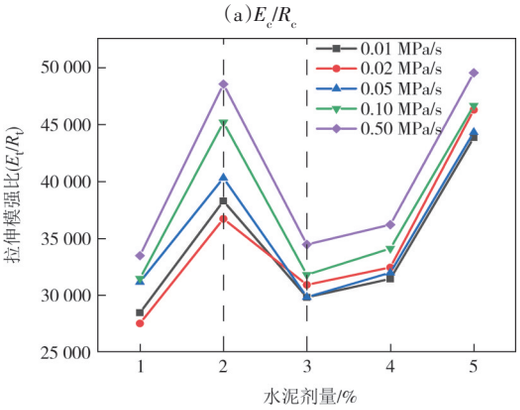
(b)E_t/R_t

图 17　E_c/R_c和E_t/R_t随加载速度的变化规律

Fig.17　E_c/R_c and E_t/R_t change with loading speed



(a)E_c/R_c



(b)E_t/R_t

图 18　E_c/R_c和E_t/R_t随水泥剂量的变化规律

Fig.18　E_c/R_c and E_t/R_t change with cement dosages

力学特性类似.实际沥青路面中水泥稳定碎石基层的水泥剂量一般在3%~6%之间,因此建议E_c/R_c取值匹配范围为 1 000~1 800,E_t/R_t的取值匹配范围为 30 000~50 000.

5　结 论

通过开展不同水泥剂量及加载速度下水泥稳定碎石拉压力学参数测试及分析,得到如下主要结论:

1)水泥稳定碎石的拉压不同应力应变特性符合双模量理论的双线性特征;拉伸状态下,低剂量(1%~2%)水泥稳定碎石呈弹塑性破坏,高剂量(3%~5%)水泥稳定碎石呈脆性破坏,表明水泥剂量2%~3%区间为其力学特性发生质变的过渡区段.

2)水泥稳定碎石拉压强度及模量均随加载速度与水泥剂量的增加而增大,拉压泊松比则呈相反趋势;且强度、模量及泊松比与水泥剂量及加载速度均呈良好的函数变化关系,据此建立了各力学参数随水泥剂量和加载速度变化的量化取值模型.

3)就影响因素的作用程度而言,水泥剂量对材料拉压参数的影响程度远大于加载速度;就具体力学参数而言,水泥剂量和加载速度对模量的影响最明显;就力学参数拉压特性而言,抗拉力学参数对影响因素的变化更敏感.

4)水泥稳定碎石的压拉模量比及压拉泊松比之比受加载速度及水泥剂量的影响较小,比值基本保持稳定,而压拉强度比随水泥剂量的增大而逐渐减小,当水泥剂量超过3%时,其值逐渐趋于稳定.

5)本研究可为基于双模量理论的路面结构计算与分析的设计参数取值提供依据,对于常用3%~6%水泥剂量的水泥稳定碎石材料,其压拉强度比可取50,压拉模量比及压拉泊松比之比均可取1.8,压缩模强比可取 1 000~1 800,拉伸模强比可取 30 000~50 000.

参考文献

[1]　曾凡奇, 黄晓明. 超载对沥青路面的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 8-10.
ZENG F Q, HUANG X M. Asphalt pavement stress under overloading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 8-10.(in Chinese)

[2]　QIAN G P, SHI C Y, YU H N, et al. Evaluation of different modulus input on the mechanical responses of asphalt pavement based on field measurements [J]. Construction and Building Materials, 2021, 312: 125299.

[3] CHEN S Q, WANG D S, FENG D C, et al. Fast and accurate method for calculating the surface mechanical responses of asphalt pavements[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(9): 04020090.

[4] HE X T, ZHENG Z L, SUN J Y, et al. Convergence analysis of a finite element method based on different moduli in tension and compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(20): 3734-3740.

[5] AMBARTSUMYAN S A. The axisymmetric problem of circular cylindrical shell made of materials with different stiffness in tension and compression[J]. Izvestia Akademiya Nauk SSSR, Meckanika, 1965(4): 77-85.

[6] ZHANG L, DONG K J, ZHANG H T, et al. A 3D PVP co-rotational formulation for large-displacement and small-strain analysis of bi-modulus materials[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2016, 110: 20-31.

[7] HUANG T, PAN Q X, JIN J, et al. Continuous constitutive model for bimodulus materials with meshless approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 66: 41-58.

[8] 马超, 陈晶, 王志国, 等. 拉压不同模量硬夹心矩形夹层板的弯曲[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 333-338.
MA C, CHEN J, WANG Z G, et al. Bending analysis of rectangular sandwich plate with different tension and compression modulus in hard-core[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 333-338.(in Chinese)

[9] INSAUSTI N, ADARRAGA I, CARBAJAL N, et al. Numerical assessment of the analytical models used to determine flexural and shear moduli in I-beams when the tensile and compressive moduli are different[J]. Polymer Testing, 2020, 81: 106154.

[10] NOROUZI Y, GHASEMI S H, NOWAK A S, et al. Performance-based design of asphalt pavements concerning the reliability analysis[J]. Construction and Building Materials, 2022, 332: 127393.

[11] DONG Z J, WANG T X, MA X Y, et al. Structural performance evaluation of airport asphalt pavement based on field data measurement and finite element simulation[J]. Measurement, 2023, 210: 112553.

[12] ZHANG J, BAO L L. Determination of asphalt mixture's viscoelastic constitutive parameters for pavement response analysis using dynamic modulus transformation[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125729.

[13] 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, 30(4): 1-7.
JIANG Y J, LI M J, ZHANG J J, et al. Influence factors of strength properties of cement stabilization of crushed aggregate [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(4): 1-7.(in Chinese)

[14] 张晨晨, 王旭东, 钱振东, 等. 半刚性基层材料不同模量试验与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 53-60.
ZHANG C C, WANG X D, QIAN Z D, et al. Test and analysis on different moduli of semi-rigid base material [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6): 53-60.(in Chinese)

[15] HU G H, CHEN X W, WANG X C. Study on the influence of the cement stabilized macadam's gradation to the modulus and strength[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1004/1005: 1579-1584.

[16] JIANG Y J, TIAN T, DENG C Q, et al. Effects of cement content, curing period, gradation, and compaction degree on mechanical behavior of cement-stabilized crushed gravel produced *via* vertical vibration test method[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 3082924.

[17] 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.
LÜ S T, ZHENG J L, ZHONG W L. 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.(in Chinese)

[18] 张辉, 张玉斌, 陈为成. 水泥稳定碎石抗压强度与劈裂强度特性分析[J]. 公路, 2012, 57(10): 172-175.
ZHANG H, ZHANG Y B, CHEN W C. Characteristic analysis of compressive strength and splitting strength of cement stabilized crushed stone[J]. Highway, 2012, 57(10): 172-175.(in Chinese)

[19] LÜ S T, GUO Y P, XIA C D, et al. Unified approach to characterize the strength of cement stabilized macadam subjected to different loading modes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120143.

[20] PAN Q X, ZHENG C C, SONG X J, et al. Mechanical analysis of asphalt pavement based on bimodulus elasticity theory [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124084.

[21] 潘勤学, 郑健龙. 考虑拉压模量不同的沥青路面力学计算方法与分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 110-117.
PAN Q X, ZHENG J L. Mechanical calculation method and analysis of asphalt pavement considering different modulus in tension and compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 110-117.(in Chinese)

[22] 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.(in Chinese)

[23] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.(in Chinese)

[24] 钱国平, 刘宏富, 郑健龙, 等. 不同受力模式下沥青混合料强度的速度特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 681-687.
QIAN G P, LIU H F, ZHENG J L, et al. Strength experiment of speed characteristic of asphalt mixtures in different force modes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(2): 681-687.(in Chinese)

[25] 吕松涛, 张乃天, 吴政达, 等. 三维应力状态下沥青混合料动态模量归一化[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 27-37.
LÜ S T, ZHANG N T, WU Z D, et al. Normalization of dynamic modulus of asphalt mixture under three-dimensional stress state [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(4): 27-37.(in Chinese)

[26] 程箭, 许志鸿, 张超, 等. 水泥稳定碎石设计参数研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6): 673-677.
CHENG J, XU Z H, ZHANG C, et al. Research of design parameters of cement-stabilized macadam [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6): 673-677.(in Chinese)

[27] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
SHA A M. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5.(in Chinese)