

## 不同结构类型水泥稳定碎石材料抗拉性能研究\*

贺芳伟, 陈杰东

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 在室内条件下进行不同结构类型水泥稳定碎石材料弯拉强度、劈裂强度相关试验, 探讨结构类型对水泥稳定碎石抗拉性能的影响, 对两种不同抗拉强度指标进行对比分析, 建立二者之间的换算关系, 并分析弯拉强度、劈裂强度差异的成因。结果表明, 悬浮密实结构的抗拉性能优于骨架密实结构和骨架空隙结构, 悬浮密实型水泥稳定碎石材料具有更好的抗裂性能; 弯拉试验测得的材料抗拉强度大于劈裂试验所得抗拉强度; 弯拉强度与劈裂强度之间具有较好的线性关系; 材料内部应力状态的不同导致弯拉强度、劈裂强度的差异。

**关键词:** 公路; 水泥稳定碎石; 劈裂强度; 弯拉强度; 结构类型

中图分类号: U416.217

文献标志码: B

文章编号: 1671-2668(2018)03-0081-03

半刚性材料的抗拉性能是决定材料抗裂性能的主要因素之一, 材料抗拉性能过低将导致路面基层在车辆荷载作用下产生开裂破坏, 从而影响结构的抗疲劳性能, 造成路面早期破坏。可通过直接拉伸试验或间接拉伸试验(劈裂试验、弯拉试验)评价半刚性基层材料的抗拉性能, 其中直接拉伸试验操作较困难且试件容易出现偏心受拉而影响试验精度, 较少采用, 而较多采用间接方法测得的强度指标来评价材料的抗拉性能。

一方面, 半刚性材料的劈裂强度作为中国现行沥青路面结构的设计参数, 在路面结构设计中具有举足轻重的作用。而弯拉强度与层底拉应力设计指标存在内在联系, 容许拉应力 $[\sigma_R]=S/K_s$ ,  $K_s$  作为抗弯拉结构系数, 与材料的疲劳寿命和弯拉强度有关。因此, 有必要系统开展半刚性材料劈裂、弯拉强度试验, 建立二者之间的相关关系。另一方面, 影响半刚性基层材料强度的主要因素是混合料的结构类型、水泥剂量、压实度等, 其中结构类型的影响最显著。在路面结构中, 某些层位(如半刚性基层底部)要求材料具有较强的抗拉性能以有效加强结构的抗裂能力, 进而提升结构层的抗疲劳性能, 保证路面结构的使用寿命。因此, 有必要系统研究不同结构类型半刚性基层材料的弯拉、劈裂强度性能, 确定具有更优良抗拉性能的混合料结构类型, 以指导半刚性基层沥青路面设计和施工。该文利用 MTS 多功能材料系统, 针对悬浮密实、骨架密实、骨架空隙 3 种

结构类型水泥稳定碎石材料开展弯拉强度、劈裂强度室内试验, 分析水泥稳定碎石材料抗拉强度对结构类型的敏感性, 建立二者之间的换算关系, 并探讨弯拉强度、劈裂强度差异性的原因。

## 1 配合比试验与试件制备

## 1.1 原材料试验

采用 32.5 级普通硅酸盐水泥, 其性能指标见表 1, 满足规范要求。

表 1 水泥的基本性能

项目	测试值	规范要求
细度/%	1.8	$\leq 10$
凝结时间/min	初凝	$\geq 180$
	终凝	$\geq 360$
安定性	2.8	$\leq 5$
抗压强度/MPa	3 d	$\geq 12$
	28 d	$\geq 32.5$
抗折强度/MPa	3 d	$\geq 2.8$
	28 d	$\geq 5.8$

集料性能指标检测结果如下: 表观相对密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , 压碎值为 20.6%, 细长扁平颗粒含量为 8.7%, 均符合规范要求。

## 1.2 配合比试验

悬浮密实、骨架密实、骨架空隙结构采用的矿料级配见表 2。

\* 基金项目: 交通运输部建设科技项目(2015318825120); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51608055)

表2 3种结构类型水泥稳定碎石的级配

结构类型	下列筛孔(mm)的通过率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
悬浮密实	100	96.0	72.0	42.0	24.6	15.0	2.6
骨架密实	100	76.0	51.0	34.0	25.0	15.8	3.8
骨架空隙	100	68.2	27.2	12.3	7.0	1.3	0.0

根据表2中的集料合成级配进行3种结构类型水泥稳定碎石重型击实试验,分别确定3组最佳含水量与最大干密度,再通过无侧限抗压强度试验确定3种结构类型的最佳水泥含量,结果见表3。

表3 3种结构类型水泥稳定碎石的击实试验结果

结构类型	水泥剂量/	最佳含水量/	最大干密度/
	%	%	(g·cm <sup>-3</sup> )
悬浮密实	4.6	5.28	2.668
骨架密实	4.5	4.80	2.512
骨架空隙	4.8	4.60	2.812

确定最大干密度与最佳含水量后,按照相关试验规程和规范要求,静压成型5个100 mm×100 mm×400 mm中梁试件作为弯拉强度试验试件、φ150 mm×150 mm圆柱体试件作为劈裂强度试验试件,在温度(20±2)℃、湿度≥95%的标准养生室养生,达到90 d龄期时利用MTS多功能材料试验系统进行强度试验。

## 2 强度试验方法及试验结果

### 2.1 强度试验方法

按JTG E51-2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的要求,试验前一天对试件作浸水处理,

试验时用软布吸去试件表面的可见自由水,以50 mm/min的速度进行荷载施加,记录试件破坏时的最大压力 $P$ 。

劈裂强度试验中,将试件倒置,采用半径与试件半径相同的弧面压条上下对称施加线性荷载,压条长度应大于试件高度,以保证整个试件高度方向都受到线性荷载作用。按下式计算劈裂强度:

$$R_i = \frac{2P}{\pi dh (\sin 2\theta - a/d)} \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为试件的劈裂强度(MPa); $d$ 为试件直径(mm); $h$ 为浸水24 h后的试件高度(mm); $\theta$ 为半压条对应的圆心角; $a$ 为压条宽度(mm)。

弯拉强度试验采用四点弯曲加载模式。试件按照静压成型时的方向放置,上下压块位于试件的三分点位置。压条处涂抹黄油,以减小试件与压条之间的摩擦阻力,减小试验误差,提高试验精度。按下式计算弯拉强度:

$$R_s = \frac{PL}{b^2 h} \quad (2)$$

式中: $R_s$ 为弯拉强度(MPa); $P$ 为试件破坏时的极限荷载(N); $L$ 为跨距,即两支点间距离(mm); $b$ 为试件宽度(mm); $h$ 为试件高度(mm)。

### 2.2 强度试验结果与分析

对不同结构类型水泥稳定碎石分别进行5组劈裂试验和弯拉试验,试验结果见表4。

从表4可看出:1)不同结构类型水泥稳定碎石的劈裂强度大小为悬浮密实型(0.88 MPa) > 骨架密实型(0.768 MPa) > 骨架空隙型(0.53 MPa),弯拉强度大小为浮密实型(1.488 MPa) > 骨架密实型(1.35 MPa) > 骨架空隙型(1.024 MPa)。表明悬浮

表4 不同结构类型水泥稳定碎石拉伸强度试验结果

结构类型	MPa											
	劈裂强度						弯拉强度					
	1#	2#	3#	4#	5#	均值	1#	2#	3#	4#	5#	均值
悬浮密实	0.88	0.92	0.86	0.85	0.89	0.880	1.52	1.63	1.43	1.35	1.51	1.488
骨架密实	0.72	0.78	0.81	0.80	0.73	0.768	1.28	1.49	1.33	1.36	1.29	1.350
骨架空隙	0.55	0.58	0.49	0.51	0.52	0.530	1.03	1.08	1.11	0.98	0.92	1.024

密实型水泥稳定碎石的抗拉性能优于骨架密实型和骨架空隙型,其具有更强的抗裂性能,更适用于层底拉应力较大的路面结构,更有利于减少结构的开裂破坏。2)悬浮密实、骨架密实、骨架空隙结构中,弯拉强度、劈裂强度比值分别为1.69、1.76、1.93,均值

为1.79,弯拉强度远大于劈裂强度。表明在相同结构类型下采用弯拉强度表征材料的抗拉性能将很大程度上高估其力学特性。

对弯拉强度与劈裂强度进行线性拟合,结果见图(3)和图1。拟合结果表明二者间具有较高的相

关系数,在测得其中一种强度参数的基础上能通过线性关系换算得到另一种强度参数,可为更系统地探究水泥稳定碎石材料抗拉性能提供理论参考。

$$E_s = 1.33E_i + 0.32, R^2 = 0.99 \quad (3)$$

式中: $E_s$ 为弯拉强度; $E_i$ 为劈裂强度。

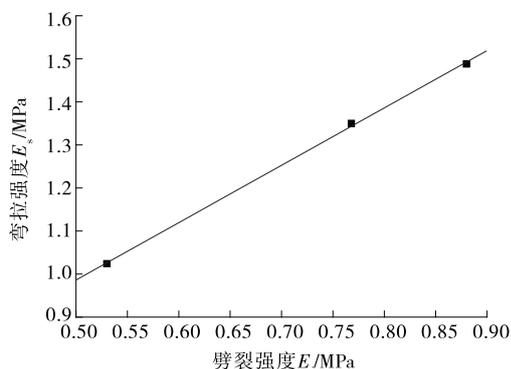


图1 弯拉强度—劈裂强度回归直线

### 3 劈裂强度、弯拉强度比较分析

#### 3.1 决定水泥稳定碎石抗拉性能差异的主要因素

文献[8]指出:在分析材料力学性能时,可将材料分为三相来考虑,即水泥石、集料及水泥石、集料之间的过渡区部分。不同结构类型水泥稳定碎石材料的内部集料、结合料分布见图2。

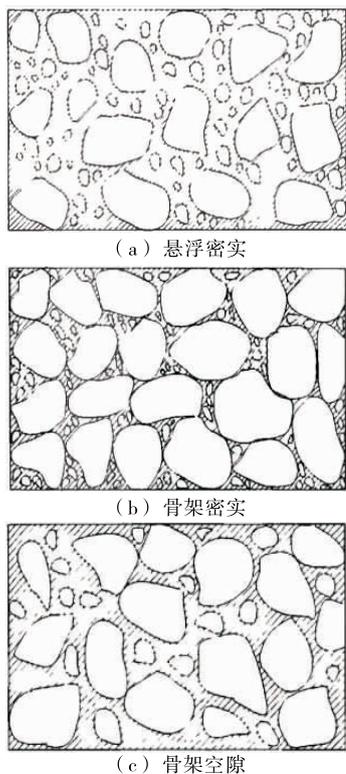


图2 各结构类型水泥稳定碎石的内部集料和结合料分布

在悬浮密实型水泥稳定碎石中,由于较高的水泥与细集料含量,粗集料悬浮其中,不能形成嵌挤作用;在骨架密实结构中,由于有更高的粗集料占比和较少的细集料成分,结构内部能形成更多的粗集料嵌挤和内摩阻力;骨架空隙结构通常用作排水基层,孔隙率高则结构层排水性能好,正因为如此,该结构类型粗集料占比较大,细集料极少。对于抗压性能,能形成更多粗集料嵌挤和更大内摩阻力作用的骨架结构表现得更优越,悬浮结构次之。

相比于抗压性能,更大程度影响混合料抗拉性能的因素在于混合料的粘结力及水泥石与集料界面过渡区的强度,而较少取决于混合料中粗集料的嵌挤作用和集料之间的内摩阻力。显然,水泥水化后形成的水泥石和细集料组成的成分所占比例直接决定材料内部混合料粘结力和集料界面过渡区的强度,而这种成分的占比大小为悬浮密实型>骨架密实型>骨架空隙型,进而导致抗拉强度大小为悬浮密实型>骨架密实型>骨架空隙型。

#### 3.2 不同受力模式下材料应力状态分析

从弯拉试验、劈裂试验条件下试件内部所处应力状态(见图3)的角度分析弯拉、劈裂强度差异的成因。

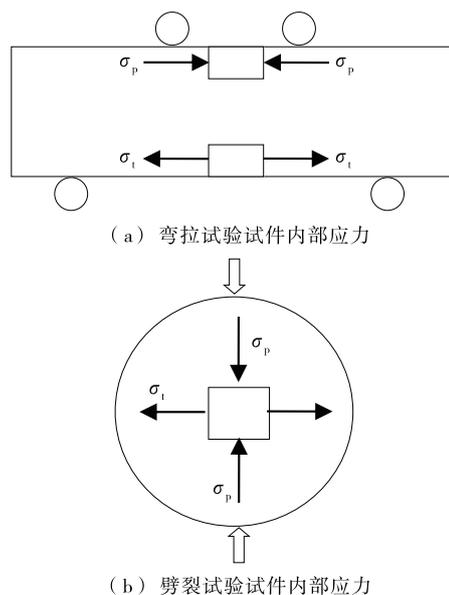


图3 弯拉试验和劈裂试验中材料所处应力状态

从图3(a)可看出:试件处于四点弯曲受力状态时,试件中端处于上部受压、下部受拉的应力状态,试件处于单向受力状态。从图3(b)可看出:线性荷载作用下,试件内部虽然同样存在拉、压两方面的应

(下转第94页)

雨水一部分向外出渗,另一部分在自重应力场作用下继续向边坡内部渗流,致使边坡坡顶位移沉降继续增大,但增大速率缓慢,并最终趋于稳定。

(3) 降雨入渗条件下,边坡安全系数随着降雨时间的增加逐渐减小;降雨停止后,边坡安全系数的回升速率较慢,具有一定的滞后性。

参考文献:

[1] 王平豪,马华.土质高边坡稳定性计算分析方法[J].林业建设,2017,12(2).

[2] 罗根传,胡庆国,谭积青.基于极限平衡法与强度折减法的高边坡过程稳定性分析[J].矿冶工程,2016,14(2).

[3] 李强,沈毅,刘永兵,等.基于西部路域生态工程效果评价信息管理系统的开发[J].公路交通科技:应用技术版,2015(6).

[4] 杨波.边坡稳定性计算中圆弧滑动法与传递系数法的差异[J].黑龙江水利,2016,2(2).

[5] 邱文.基质吸力对非饱和土边坡稳定性影响分析[J].安徽建筑工业学院学报,2012,19(6).

[6] 李佳,高广运,黄雪峰.非饱和原状黄土边坡浸水试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,30(5).

[7] 蒋鑫,刘晋南,黄明星,等.抗滑桩加固斜坡软弱地基路

堤的数值模拟[J].岩土力学,2012,33(4).

[8] 宋焕宇.粗粒土斜坡高路堤变形性状与稳定性研究[D].武汉:华中科技大学,2007.

[9] 韩同春,黄福明.双层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性分析[J].浙江大学学报:工学版,2012,46(1).

[10] 李龙起,罗书学,魏文凯.降雨入渗对含软弱夹层顺层岩质边坡性状影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9).

[11] 汪丁建,童龙云,邱岳峰.降雨入渗条件下非饱和土朗肯土压力分析[J].岩土力学,2013,34(11).

[12] 向冲,费维水.陡斜坡路堤失稳破坏数值分析[J].重庆交通大学学报,2016,30(4).

[13] Van Genuchten M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5).

[14] Dieu Tien Bui, Biswajeet Pradhan, Owe Lofman, et al. Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh Province, Vietnam[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2).

[15] 陈洪江,韩珠峰,周春梅,等.降雨条件下黄土路堑高边坡稳定性分析[J].公路,2017(2).

收稿日期:2018-02-09

\*\*\*\*\*

(上接第 83 页)

力影响,但内部同一单元体同时受到拉、压应力作用,试件处于双向受力状态。不同受力模式下材料内部应力状态的不同导致弯拉、劈裂强度试验结果的差异。

4 结论

(1) 悬浮密实型水泥稳定碎石的抗拉性能优于骨架密实型和骨架空隙型,其具有更强的抗裂性能,更适用于层底拉应力较大的路面结构。

(2) 悬浮密实、骨架密实、骨架空隙结构中,弯拉强度、劈裂强度比值分别为 1.69、1.76、1.93,均值为 1.79。弯拉强度与劈裂强度之间具有较好的线性关系。使用弯拉强度作为结构设计参数将高估路面结构抗裂能力,劈裂强度更适合于表征实际路面结构的受力状态。

(3) 水泥稳定碎石的抗拉性能主要取决于混合料的粘结力及水泥石与集料交界面过渡区的强度,不同受力模式下材料内部应力状态的不同导致材料弯拉、劈裂性能的差异。

参考文献:

[1] 孙兆辉,王铁斌,许志鸿,等.水泥稳定碎石强度影响因素的试验研究[J].建筑材料学报,2006,9(3).

[2] JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S].

[3] 沙庆林.重载交通长寿命半刚性路面设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2011.

[4] 姚祖康.沥青路面结构设计[M].北京:人民交通出版社,2011.

[5] 沙爱民.半刚性基层的材料特性[J].中国公路学报,2008,21(1).

[6] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].

[7] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[8] 李德文.水泥稳定碎石强度控制指标及标准研究[D].西安:长安大学,2010.

[9] 付志国.低剂量水泥稳定级配碎石基层材料收缩性能分析[J].公路与汽运,2018(1).

[10] 董玉凯.掺膨胀剂水泥稳定碎石抗裂性能研究[J].公路与汽运,2017(2).

收稿日期:2017-11-20