

粗粒土直剪试验剪切速率对抗剪强度的影响研究

雷壮, 魏玉峰*, 李远征, 潘远阳

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:为了分析直剪剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响,利用直剪仪开展粗粒土不同剪切速率的剪切试验研究,探讨剪切速率与剪应力—剪切位移曲线变化规律,从颗粒破碎及颗粒重组分析不同剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响,最后,分析剪切速率对强度参数及颗粒破碎率的影响及原因。试验结果表明:在正应力较小时,剪切速率对抗剪强度的影响较小,而正应力较大时,剪切速率对抗剪强度的影响比较大,主要表现为剪切速率越大,抗剪强度减小的幅度越大,内摩擦角越小,黏聚力越大;产生这种现象的原因是剪切速率越小,直剪试验输入能量越大,且剪切时间长,粗粒土颗粒有足够的时间发生颗粒破碎和颗粒重组来耗散能量,使有效应力接触点增多,从而导致抗剪强度较大。

关键词:直剪试验;剪切速率;抗剪强度;强度参数;颗粒破碎率

抗剪强度是工程中粗粒土利用和评价的主要力学指标之一。近年来,国内外众多学者在粗粒土的抗剪强度、变形影响、渗流性能、应力应变等方面取得了丰富的研究成果。在剪切速率对粗粒土强度指标的影响方面也开展过一些研究:周杰等通过对砂土研究,指出当法向应力较小时,剪切速率基本不会影响标准砂的抗剪强度;当法向应力较高时,不能忽略剪切速率对砂土抗剪强度特性的影响,且法向应力越大,剪切速率对其抗剪强度的影响越明显;杨俊等通过对砂土研究得出剪切速率较大时,试样剪切破坏的时间相应较短,在相同的垂直荷载下较剪切速率小的产生固结时间少,孔隙比减少会较小,同时使内摩擦角减小,黏聚力增大;徐肖峰等对相同剪切速率下粗粒土的强度和变形特性进行试验研究,发现当剪切速率较小时,粗粒土强度理论公式拟合相关系数比较理想,随剪切速率的增加,内摩擦角有减小的趋势。

粗粒土成因复杂,高度非均质、非连续,这给粗粒土的研究带来了很大困难。尤其是直剪剪切速率对粗粒土抗剪强度影响程度的定量评价方面,暂未有深入研究成果。因此,该文通过对粗粒土进行不同剪切速率的直剪试验,分析剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响规律。

1 试验方法与方案

1.1 试样制备

根据土工试验规程规定,为满足试验要求,该文试验选用颗粒粒径范围为20~2 mm的不规则石英砂岩人工碎石颗粒。为了尽可能减小尺寸效应的影响,共制备了4组试样进行室内直剪试验。同时为了保证试样具有一定的密实度,采用分层夯填的方式将粗粒土颗粒装入剪切盒中,试样分4次填入,每次填充厚度不超过50 mm。试样密度、颗粒级配如表1所示。

表1 试样基本物理参数

试样 编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%			
		9~20	7~9	5~7	2~5
1	1.75	42.6	21.3	19.7	16.4
2	1.71	44.2	20.1	20.9	14.8
3	1.74	41.5	22.4	19.2	16.9
4	1.77	40.8	20.7	21.1	17.4

1.2 试验方案

该试验剪切盒侧壁为有机玻璃,正面承压板为钢

收稿日期:2020-11-18(修改稿)

基金项目:四川省自然资源厅“8.8”九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究项目(编号:KJ-2018-21);四川省教育厅科研计划重点项目(编号:18ZA0045);四川省科技厅重点研发项目(编号:2019YFS0074)

作者简介:雷壮,男,硕士研究生。E-mail:837832274@qq.com

*通信作者:魏玉峰,男,博士,副教授。E-mail:weiyufeng@cdut.edu.cn

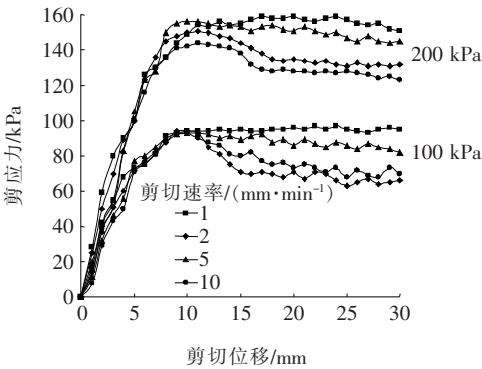
板制成的正方体盒子,剪切盒的净空尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm(包含 15 mm 剪切缝),剪切面积为 0.04 m²。1~4 组试样的剪切速率取 1、2、5、10 mm/min,在每组剪切速率下试样法向应力分别取 100、200、400、800 kPa,剪切过程中当上下剪切盒的相对位移达到 30 mm 时停止试验。剪切过程中,利用在两侧有机玻璃外对称布置的 2 台高清数码相机对剪切全过程进行实时拍摄,以获取剪切过程中粗粒土的影像资料。同时,考虑到试验结果存在离散性,对每种试验条件开展 2 次平行试验,取平均值作为最终结果。试验后分析直剪剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响。

2 试验结果分析

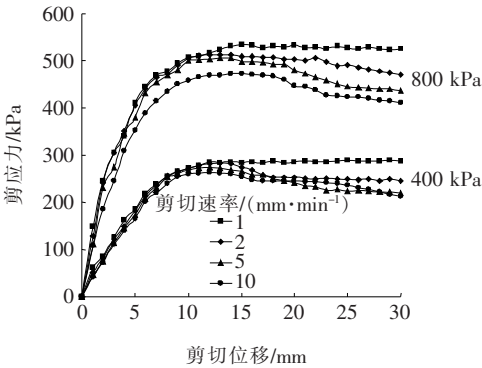
2.1 试验结果

2.1.1 剪应力—剪切位移曲线特性

通过上述系列试验,得到了在不同剪切速率、不同正应力条件下的剪应力—剪切位移曲线(图 1)。



(a) 法向应力 100、200 kPa



(b) 法向应力 400、800 kPa

图 1 不同剪切速率条件下剪应力—剪切位移曲线

由图 1 可以看出:剪切速率对粗粒土的强度有明显的影响。在此次试验剪切速率允许范围内,当剪切速率为 1 mm/min 时,不论正应力如何变化,剪应力

均没有出现峰值,应力—应变曲线呈应变硬化型;剪切速率为 2、5、10 mm/min 时,剪应力均出现峰值,此时应力—应变曲线呈应变软化型。

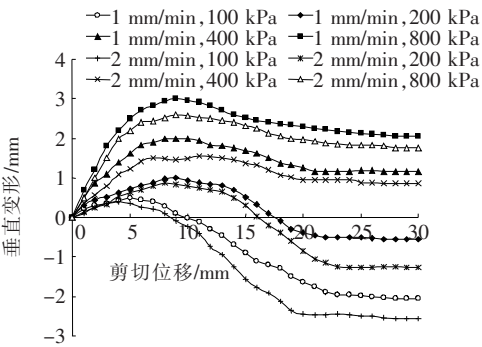
对于剪切速率为 2、5、10 mm/min 的试验,随着正应力增加,相同剪切速率时达到最大剪应力所需的剪切位移呈增加的趋势。在剪切速率为 1 mm/min 的试验中,抗剪强度取位移为 15 mm 处的剪应力,对于其他组试验,用剪应力峰值作为其抗剪强度(表 2)。

表 2 不同剪切速率与正应力条件下粗粒土的抗剪强度

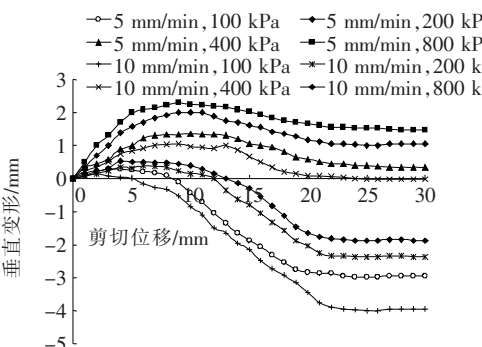
剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	不同正应力(kPa)时粗粒土抗剪强度/kPa			
	100	200	400	800
1	95	159	285	540
2	94	156	282	516
5	93	151	274	505
10	91	144	263	472

2.1.2 剪切位移—垂直变形曲线特性

通过记录的各组直剪试验垂直变形与其剪切位移曲线关系如图 2 所示,正表示剪缩,负表示剪胀。



(a) 剪切速率 1、2 mm/min



(b) 剪切速率 5、10 mm/min

图 2 不同剪切速率条件下剪切位移—垂直变形曲线

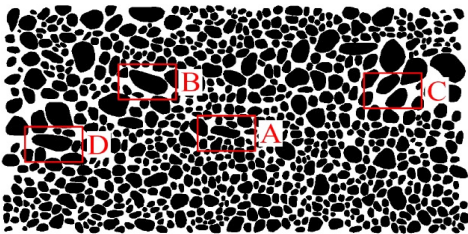
图 2 表明:在正应力为 100、200 kPa 时,试验过程始终是先发生剪缩再发生剪胀。在剪切速率一定时,

随着正应力的增大,剪胀逐渐转化为剪缩最终全部转化为剪缩。同时也发现在相同正应力下,随着剪切速率的增大,相同剪切位移处的垂直变形逐渐减少,即随着剪切速率增大剪胀现象越明显。

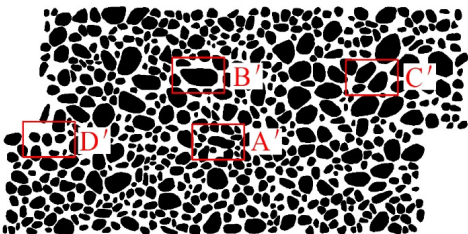
2.2 直剪剪切速率对粗粒土抗剪强度及强度指标的影响

2.2.1 剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响

对正应力为 800 kPa,剪切速率为 1 mm/min 的粗粒土剪切前后的图像进行土体结构图像增强处理得到灰度图像,通过设置阈值的方法对土颗粒进行识别分割。所有灰度值大于或等于阈值的像素都被判属于物体,所有灰度值小于该阈值的像素都被排除在物体之外。对灰度图像进行二值化处理时,所有灰度值高于阈值的像素点的灰度值被设置为 255(显示为白),而低于阈值的像素点的灰度值都被设置为 0(显示为黑)。即对剪切前后的图像进行二值化处理后,土颗粒显示为白色,颗粒间的空隙等显示为黑色。为了更直观地查看粗粒土剪切前后的结构形态,采用 Image-Pro Plus 图像分析软件对二值化后的图像进行处理,得到图 3 所示结果。



(a) 剪切前颗粒分布特征



(b) 剪切后颗粒变形特征

图 3 粗粒土剪切前后变形特征

由图 3 可以发现:在剪切过程中,A—A'处发生了滑移,B—B'处发生了翻滚,C—C'处发生了摩擦,D—D'处发生了颗粒破碎。因此,要了解剪切速率对抗剪强度的影响机理,必须从颗粒破碎和颗粒重新排列等细观角度来进行解释。

图 4 为不同剪切速率下,粗粒土抗剪强度与正应力的关系。由图 4 可以看出:剪切速率对粗粒土的抗

剪强度有明显影响,且随着正应力的增大,剪切速率对抗剪强度的影响愈加明显。在正应力为 100 kPa 时,不论剪切速率如何变化,抗剪强度几乎相同;而正应力为 800 kPa 时,当剪切速率为 1 mm/min 时,抗剪强度为 540 kPa,当剪切速率为 10 mm/min 时,其抗剪强度为 482 kPa,减少了 58 kPa,约为 10.7%。产生这种现象的原因是:在正应力较小时,粗粒土在剪切过程中不会产生较大的压缩,颗粒之间孔隙比较大,有效应力接触点较少;而在正应力较大时,粗粒土在剪切过程中会产生较大的压缩,颗粒之间有效应力接触点较多。因此,在正应力较小时,剪切速率对抗剪强度的影响不明显,而在正应力较大时,剪切速率对粗粒土的影响比较大,这与文献[5]中以砂土为试验对象得出的规律一致。

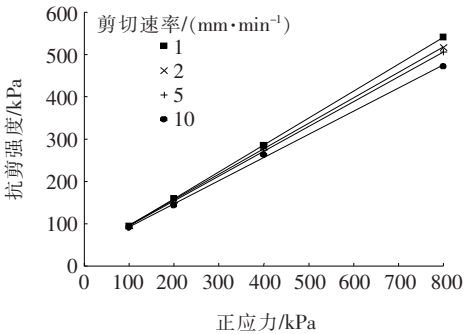


图 4 抗剪强度与正应力的关系趋势线

图 5 为抗剪强度与剪切速率的关系。由图 5 可以看出:在不同正应力条件下,剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响规律并不相同。当正应力为 100 kPa 时,拟合线的斜率几乎为 0,但当正应力大于等于 200 kPa 时,拟合线的斜率为负值,且正应力越大,拟合线的斜率越小。

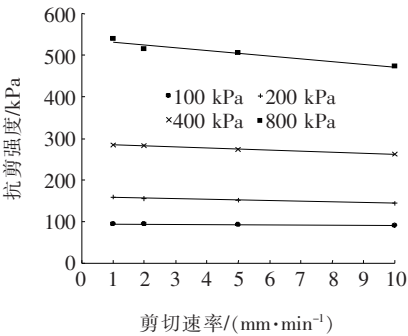


图 5 抗剪强度和剪切速率的关系

因此,抗剪强度与剪切速率的关系可以表示为:

$$\tau = \mu v + \omega \tag{1}$$

式中: τ 为抗剪强度; v 为剪切速率; μ 、 ω 为与正应力

和粗粒土性质相关的系数。

2.2.2 剪切速率对内摩擦角的影响

通过上述直剪试验,得到了粗粒土在不同剪切速率下的内摩擦角,试验结果见表 3。

表 3 不同剪切速率下的内摩擦角

剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	内摩擦角/ (°)	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	内摩擦角/ (°)
1	32.43	5	30.35
2	30.94	10	28.55

图 6 为用对数曲线拟合的内摩擦角与剪切速率的关系。由图 6 可以看出:内摩擦角随着剪切速率的增大持续减小,当剪切速率较小时,内摩擦角减小幅度较大;而剪切速率较大时,内摩擦角减小幅度较小。产生这种现象的原因是:在剪切速率较小时,试样剪切破坏的时间较长,粗粒土颗粒有足够的时间进行自我调整,孔隙比减小,使颗粒间有效接触点增多,剪切阻力会增大,此时内摩擦角较大;在剪切速率较大时,试样剪切破坏的时间较短,孔隙比减少较少,颗粒之间有效接触点较少,故此时内摩擦角较小。

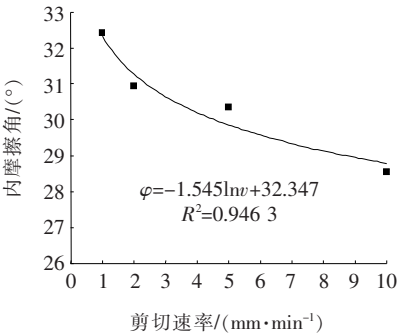


图 6 内摩擦角和剪切速率的关系

由此可以得出,粗粒土内摩擦角与剪切速率的关系为:

$$\varphi=a\ln v+b \tag{2}$$

式中:φ 为内摩擦角;v 为剪切速率;a、b 为与粗粒土性质相关的系数。

2.2.3 剪切速率对黏聚力的影响

表 4 为粗粒土在不同剪切速率试验下的黏聚力。

表 4 不同剪切速率下的黏聚力

剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	黏聚力/ kPa	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	黏聚力/ kPa
1	31.48	5	37.70
2	34.83	10	39.00

图 7 为拟合的黏聚力和剪切速率间的关系。由图 7 可以看出:黏聚力随着剪切速率的增大持续增大,在剪切速率较小时,黏聚力增大速率较大,剪切速率较大时,黏聚力增大速率较小。如剪切速率为 1 mm/min 时,黏聚力为 31.48 kPa,剪切速率为 10 mm/min 时,黏聚力为 39.00 kPa,变化幅值为 7.52 kPa,约为 23.89%,由此看出:剪切速率对黏聚力的影响比较大。产生这种现象的原因是:在剪切速率较小时,黏聚力主要以摩擦、颗粒破碎为主;而在剪切速率较大时,粗粒土在剪切过程中不仅要克服颗粒间的滑移,还要克服颗粒旋转、滚动,因此,剪切速率越大,粗粒土黏聚力越大。

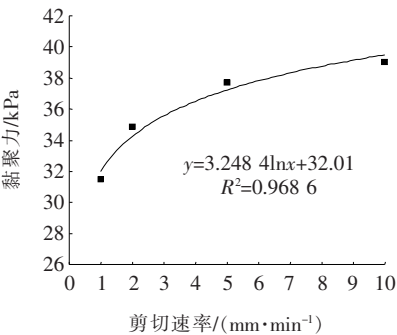


图 7 黏聚力和剪切速率的关系

由此可以得出,粗粒土黏聚力与剪切速率的关系为:

$$c=m\ln v+n \tag{3}$$

式中:c 为黏聚力;v 为剪切速率;m、n 为与粗粒土性质相关的系数。

2.3 剪切速率对颗粒破碎率的影响

统计直剪试验后粗粒土的颗粒破碎率,并建立其与剪切速率的关系如图 8 所示。采用由 Marsal 提出的破碎率 B_g 对此试验的颗粒破碎率进行评价,其中 B_g 为试验前后各粒径组成质量之差的绝对值之和,即:

$$B_g=\sum |W_{ki}-W_{kf}| \tag{4}$$

式中:W_{ki}、W_{kf} 分别为试验前、后某级配粒组的质量分数。

由图 8 可知:

(1) 在正应力一定时,剪切速率越大,颗粒破碎率越小,产生这种现象的原因是:在正应力固定时,抗剪强度随着剪切速率的增大而减小,剪切时间也同时减少,而剪切位移是固定的 30 mm,即输入能量越少,这就造成了粗粒土颗粒需要耗散的能量也越少,颗粒破碎率也就越小。

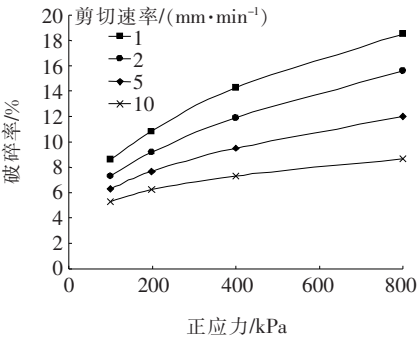


图8 破碎率与正应力的关系

(2) 在不同剪切速率条件下,当正应力为 100 kPa 时,粗粒土的颗粒破碎率都相差不大。但在正应力从 200 kPa 增加到 800 kPa 时,同一剪切速率时的破碎率明显增大。这是由于在正应力较小时,颗粒之间的应力还没有达到颗粒破碎强度的要求,但随着正应力的增大,颗粒之间的有效应力必定增大,一旦应力超过粗粒土颗粒能承受的强度时,颗粒就通过破碎来消耗应力。一般来说,正应力越大,颗粒之间的接触面积和接触点同时也会增加。在同一剪切速率条件下,正应力从 200 kPa 增加到 800 kPa 时,更多的颗粒会发生破碎,但其颗粒破碎速率逐渐减缓,产生这种现象的原因是颗粒破碎导致了小颗粒的增多,而小颗粒也不断地填充大颗粒之间的空隙,因此增加了颗粒之间的接触面积,减小了粗粒土的颗粒破碎率。

2.4 剪切速率对抗剪强度的影响机理

在正应力较小时,不论剪切速率大小如何变化,粗粒土在剪切破坏过程中不会产生较大的压缩,孔隙比较大,有效应力接触点较少;而正应力较大时,剪切速率越小,直剪试验输入能量越大,同时粗粒土颗粒有充足的时间来进行能量耗散,在这个时间段内,粗粒土颗粒破碎率较大,破碎后的小颗粒与大颗粒发生了颗粒重组,同时剪切过程中产生了较大的压缩,使粗粒土的结构更加密实,有效应力接触点较多,导致粗粒土抗剪强度较大,而剪切速率越大,粗粒土的颗粒破碎率越小,抗剪强度以颗粒间的滑移、翻滚和摩擦为主。所以,在正应力较小时,剪切速率对抗剪强度的影响不明显,而在正应力较大时,剪切速率越大,抗剪强度减小的幅度越大。

3 结论

(1) 粗粒土的剪应力—剪切位移曲线在较低剪切速率时呈应变硬化型,在较高剪切速率时呈应变软化型。

(2) 在正应力较低时,剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响较小;正应力较高时,剪切速率对粗粒土抗剪强度的影响较大。随着剪切速率的增大,内摩擦角逐渐减小,黏聚力逐渐增大。且不论正应力如何变化,对粗粒土抗剪强度起主控制作用的总是内摩擦角。

(3) 粗粒土颗粒破碎率随着正应力的增大而增大,但其增大速率却逐渐减小;剪切速率越大,随着正应力增大粗粒土颗粒破碎率增大范围越小。

(4) 当剪切速率较小时,直剪试验输入能量较大,同时剪切时间长导致粗粒土大颗粒有足够的时间发生破碎和颗粒重组来耗散能量,使得粗粒土的抗剪强度较大;当剪切速率较快时,输入能量较小且剪切时间短,抗剪强度以颗粒间滑移、翻滚和摩擦为主,使得粗粒土的抗剪强度较小。

参考文献:

[1] 王冠,陈坚.路基粗粒土抗剪强度影响因素分析[J].路基工程,2015,(3).

[2] 蒋中明,王为,冯树荣,等.应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J].岩土工程学报,2014(1).

[3] 凌华,傅华,韩华强.粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J].岩土工程学报,2017(S1).

[4] Wei Yufeng, Xia Min, Ye Fei, et al. Effect of Drag Force on Stability of Residual Soil Slopes under Surface Runoff, Geomatics[J]. Natural Hazards and Risk, 2018, 9(1): 488—500.

[5] 周杰,周国庆,赵光思,等.高应力下剪切速率对砂土抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2010(9).

[6] 杨俊,黎新春,张国栋,等.不同剪切速率对风化砂改良膨胀土抗剪强度指标的影响[J].地质科技情报,2014(1).

[7] 徐肖峰,魏厚振,孟庆山,等.直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J].岩土工程学报,2013(4).

[8] MARSAL R J. Large Scale Testing of Rockfill Materials [J]. Journal of Soils Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1967, 93(SM2): 27—43.

[9] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等.粗粒料大三轴试验研究进展[J].岩土力学,2002(2).

[10] 王光进,杨春和,张超,等.粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J].岩土力学,2009(12).

[11] 孔德志,张其光,张丙印,等.人工堆石料的颗粒破碎率[J].清华大学学报(自然科学版),2009(6).

[12] Gong Daozhen, Stefan Nadolski, Sun Chunbao, et al. The Effect of Strain Rate on Particle Breakage Characteristics [J]. Powder Technology, 2018, 339: 595—605.

[13] Deniz Eksi, A. Hakan Benzer, Aysegul Sargin, et al. A New Method for Determination of Fine Particle Breakage [J]. Minerals Engineering, 2010, 24(3).

快速同步施工型超薄沥青磨耗层层间 黏结强度试验分析

兰波¹, 高源²

(1. 内蒙古自治区乌兰察布市公路工程质量监督站, 内蒙古 乌兰察布 012000; 2. 内蒙古自治区交通建设工程质量监督局)

摘要: 快速同步施工型超薄沥青磨耗层作为一种新型的道路预防性养护技术, 其与下层的黏结强度决定着使用性能的好坏。该文采用5种成型方法、4种乳化沥青和3种混合料组合测试混合料类型、乳化沥青对层间黏结强度的影响。试验结果表明: 公称粒径、成型方法、上层样品的温度以及养生温度都对层间黏结强度有着不同程度的影响; STCbond 乳化沥青的测试结果要优于普通乳化沥青, 故快速同步施工型超薄沥青磨耗层采用高黏度改性乳化沥青效果最好。

关键词: 快速同步施工; 超薄沥青磨耗层; 黏结强度; 乳化沥青; 混合料类型

快速同步施工工艺是近几年来养护施工中应用最广泛的一种技术。这种工法具有快捷、方便等优点, 同时又能起到封层的效果, 而超薄磨耗层具有抗滑、抗车辙、抗磨耗等优良性能。将二者有效地结合, 采用独特的混合料设计方法, 使得快速同步施工型超薄沥青磨耗层具有同步施工碎石封层的所有优势。近几年随着高速公路交通量的迅速增加, 给路面施工组织管理带来了更大的难度, 低效率的施工使路面维修费用明显增加, 同步施工的技术是解决这些问题的最佳选择。

目前, 快速同步施工型超薄沥青磨耗层主要用于旧路的维修与加铺。对于旧路加铺, 由于旧路处理不干净、黏层油洒布不均匀等施工因素, 使得新加铺的超薄磨耗层与原有的旧路路面接触处形成薄弱环节, 从而导致超薄磨耗层在水平荷载作用下产生推移、拥包或局部开裂现象, 且超薄磨耗层也易出现最大剪应力导致路面 TOP-DOWN 开裂。又由于超薄磨耗层摊铺厚度较薄, 所以其与下承层的层间黏结显得更为重要, 尽可能地提高超薄磨耗层与下承层的黏结能力具

有重要的工程价值。有众多学者针对层间黏结强度和相关黏结材料进行了研究。谭忆秋等结合飞散试验和冻融劈裂试验验证了将冻融劈裂强度比和冻融劈裂强度结合起来可以很好地评价超薄磨耗层材料的抗水损害能力; 赵艳玲等采用车辙试验分析了层间结合条件对路面使用性能的影响; 刘定清等采用拉拔试验探讨了界面处理方式和层间黏结材料对层间黏结强度的影响; 乔维等采用直剪、斜剪试验以及拉拔试验分析了 SBS 改性沥青用量对层间黏结强度的影响; 李亚非等采用自主研发的扭剪仪对层间的抗剪切性能进行了评价。此外, 孙雅珍等采用自主研发的层间剪切试验仪研究了乳化沥青用量、黏度和固含量对层间抗剪切强度的影响; 王燕婷等通过试验确定了最佳乳化因素方案; 曹芳等通过老化试验得到 SBS 复合改性沥青老化后的韧性最高; 李伟等通过对比试验研究了两种温拌剂对 SBS 沥青混合料路用性能的影响; 李永振等通过动态剪切流变仪研究了稳定剂和软化剂对 SBS 改性沥青性能的影响。以上学者研究层间黏结强度时仅考

- [14] 宋杨, 王诚杰, 孙文君, 等. 超大粒径块石在土石混填路基中稳定性数值模拟研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [15] 张宏博, 孙润生, 董行, 等. 黄泛区粉土冲击碾压动力特性研究[J]. 中外公路, 2018(4).
- [16] 房建宏, 王振, 徐安花, 等. 青海黄土工程特性及公路修筑对策研究[J]. 中外公路, 2017(6).

- [17] 朱彦鹏, 朱鋈川, 杨校辉, 等. 山区机场高边坡不同方位原状土强度试验研究[J]. 中外公路, 2016(2).
- [18] 杨三强, 刘娜, 李志农, 等. 荷载、速率效应对路基受力变形的影响研究[J]. 中外公路, 2016(4).
- [19] 程培峰, 王锐, 韩春鹏. 大兴安岭人工冻土抗压抗剪强度试验研究[J]. 中外公路, 2016(5).

收稿日期: 2020-07-12(修改稿)

作者简介: 兰波, 男, 高级工程师. E-mail: jining_bobo@sina.com