

考虑尺寸效应和端部效应下的水泥稳定材料的强度试验

汪水银, 王旭东

(交通部公路科学研究院 北京市 100088)

摘 要:影响水泥稳定碎石材料强度高低的因素很多,有级配的影响、水泥剂量的影响等,在本文中着重就水泥稳定碎石材料7 d 无侧限抗压强度的尺寸效应和端部效应进行研究,以考察水泥稳定碎石材料试验试件尺寸因素和试件端部因素对于强度的影响程度,进而提出合理的强度试验方法,以对现有试验方法进行改进。

关键词:水泥稳定碎石; 尺寸效应; 端部效应; 无侧限抗压强度; 试验

强度是半刚性基层最重要的指标之一,作为半刚性路面主要承重层的基层其强度的高低直接决定了道路的使用性能。当基层的强度降低将会使路面的承载能力降低,进而使路基的受力增大,可能会使路基的沉降增大,最终导致整个道路的承载力不足而遭破坏。所以,要保证半刚性路面的使用性能,半刚性基层的强度一定要满足规范的最低要求。

在我国无论是《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97)还是《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034-2000)中都对半刚性基层材料的强度进行了规定,在《公路沥青路面设计规范》中规定对于水泥稳定类基层在高速公路和一级公路中要求7 d 强度达到3~4 MPa;而在《公路路面基层施工技术规范》中规定水泥稳定类材料用作基层时在高速公路和一级公路的应用上其7 d 强度要达到3~5 MPa。正是因为这两个指导性文件以强度作为半刚性材料的唯一控制指标,因此在我国只要是关于半刚性材料的研究和使用,就一定要进行材料强度的研究。

影响水泥稳定碎石材料强度高低的因素很多,有级配的影响、水泥剂量的影响等,本文着重就水泥稳定碎石材料7 d 无侧限抗压强度的尺寸效应和端部效应进行研究,以考察水泥稳定碎石材料试验试件尺寸因素和试件端部因素对强度的影响程度,进而提出合理的强度试验方法,以对现有试验方法进行改进。

1 材料

1.1 集料

所用集料共4档:北京昌平石灰岩的10~30 mm、10~20 mm、5~10 mm和广东中山花岗岩的0~3 mm。各档集料的性质和级配如表1所示。

表1 集料密度

料档/mm	表干密度 g/cm ³	表观密度 g/cm ³	毛体积密度 g/cm ³	吸水率 %
10~30	2.725 6	2.738 8	2.719 0	0.28
10~20	2.719 3	2.733 5	2.711 1	0.30
5~10(>4.75)	2.712 8	2.738 2	2.698 2	0.54
(≤4.75)	2.667 3	2.727 8	2.632 3	1.33
0~3	2.644 7	2.662	2.634 3	0.39

1.2 水泥

所用水泥为唐山32.5(R)硅酸盐水泥。其密度为3.198 4 g/cm³。为了较粗级配易于室内成型,水泥剂量在此统一选为6%。

1.3 级配

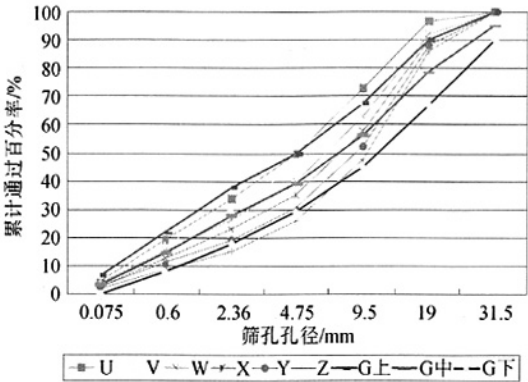
本文以规范的级配为基础分别提出了由细到粗的6组水泥稳定碎石材料的级配进行研究(见表2和图1)。

2 尺寸效应研究

尺寸效应指的是在材料的性能测试时,一些性

表 2 各级配组成

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
U	100.00	96.57	72.62	49.62	33.74	19.47	4.68
W	100.00	92.29	62.65	39.98	26.45	15.27	3.66
Y	100.00	88.01	52.68	30.34	19.16	11.08	2.64
G 上	100.00	90.00	68.00	50.00	38.00	22.00	7.00
G 中	95.00	78.50	56.50	39.50	28.00	15.00	3.50
G 下	90.00	67.00	45.00	29.00	18.00	8.00	0.00



注:G 上、G 中、G 下分别表示规范中的上、中、下级配曲线

图 1 级配曲线

能参数随着材料结构尺寸的变化而发生变化的现象。它是准脆性材料(包括岩石、冰、各种复合材料、增韧陶瓷、混凝土)的固有特性。相类似的水泥稳定碎石也应该是属于此类材料的一种类型之一。因此这种材料试验所得到的力学参数不但依赖于材料性质,而且与试件的尺寸有关,这就是此种材料力学参数的尺寸效应。对于水泥稳定碎石这种结构材料,强度是其最重要的性能指标,因此水泥稳定碎石强度尺寸效应也是其力学参数尺寸效应中最重要的一个方面。

本文针对水泥稳定碎石等半刚性基层材料常用强度尺寸的试件进行了 7 d 无侧限抗压强度试验研究,这些试件的尺寸是直径为 10 cm,高分别为 10 cm、15 cm、20 cm,以及直径为 15 cm,高为 15 cm。通过对这些试件强度的比较分别了解试件尺寸的变化对于强度值大小的影响以及试验室内进行试验时所应该采用的合理尺寸范围(见表 3 和图 2)。

由表 3 和图 2 可见以下几点。

(1)比较 $\phi 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、 $\phi 15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 试件的强度可见,在相同径高比下,试件越大其强度越大,这主要是因为试件在进行无侧限抗压强度试验

表 3 试件尺寸效应强度

级配	抗压强度/MPa			
	$\phi 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$	$\phi 10\text{ cm}\times 15\text{ cm}$	$\phi 10\text{ cm}\times 20\text{ cm}$	$\phi 15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$
U	3.22	2.98	2.72	5.22
W	4.35	3.55	3.08	6.39
Y	3.44	3.1	2.51	5.12

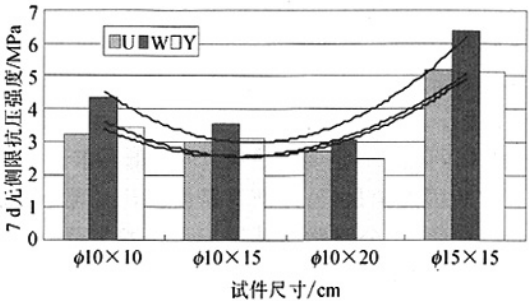


图 2 试件尺寸效应

时试件的破坏主要是在大约 45°斜面上承受剪切应力而达到试件总体抗剪强度破坏的结果,对于大的试件其剪切破坏面积要明显大于小的试件,因此其无侧限抗压强度也要明显大于小的试件。

(2)在相同试件尺寸下,W 级配的无侧限抗压强度要明显大于其他两个级配的,由此可见 W 级配的混合料组成配比要更加有利于强度的形成。

(3)在相同直径下,试件的强度随径高比的减小而减小,对 $\phi 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 试件的高度和强度进行回归分析,得到试件强度和试件尺寸的关系,结果如图 3 所示。由图 3 可见,试件的无侧限抗压强度与试件尺寸之间存在较好的相关性,相关系数都在 0.93 以上,由图 3 得到各级配强度与试件高度的关系式如表 4 所示。

由表 4 可得此种水泥稳定碎石材料的尺寸效应

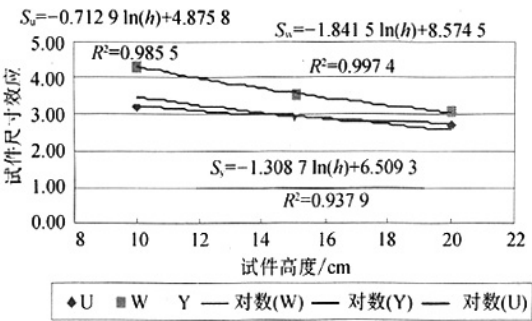


图3 试件尺寸效应线性回归

表4 各级配尺寸效应公式

级配	$S=A\ln(h)+B$	
	A	B
U	-0.712 9	4.875 8
W	-1.841 5	8.574 5
Y	-1.308 7	6.509 3
平均	-1.287 7	6.653 2

公式为:

$S=-1.287\,7\ln(h)+6.653\,2$ (1)

当然,本文所进行的这方面的研究还不够深入,按照混凝土的研究结果,试件的尺寸对于强度的影响在一定范围内是有效的,当试件的尺寸达到一定的时候,试件的尺寸效应影响将会消失,但是,在实践中对于试验上的需要,其试件一般不可能很大,因此选取一定大小的试件都会存在尺寸效应的影响。不同大小试件将会对应应有不同大小的试验强度标准,而这个强度标准都只是试件强度的一个,而且都不是材料的真实强度,实际上不知道材料的真实强度是多少。在国外,进行水泥稳定类等半刚性材料无侧限抗压强度时,一般选取制作径高比为1:2的试件,在本论文中相当于是 $\phi 10\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的强度。由此可见,国外的许多强度控制指标小于我国的强度控制指标,其重要的一个原因是考虑了试件尺寸效应的影响。在进行国内外强度标准比较的同时说明试验所采用试件尺寸的大小是有重要意义的。而在现实中如何进行强度的试验?强度的试验又如何与现场实际路面受力情况相联系?这些都是重要的研究内容而需要解决。本文将在端部效应分析的基础上推荐一种强度试验方法。

3 试件端部效应对强度影响的研究

在进行力学性能试验时,试验仪器的压头与试

件接触往往是硬碰硬的,在没有进行端部处理的情况下,仪器压头与试件接触时按照圣维南原理将会在试件端部产生摩擦力对试件端部产生应力环影响到试件的真实强度。因此研究端部效应对材料力学性能的影响也是重要的方面。

由于在我国半刚性基层材料的主要的控制指标是无侧限抗压强度,因此本论文中仅仅通过3个级配不同尺寸试件的不同端面状态的7 d 无侧限抗压强度进行试验研究,以了解在相同试验条件下端部效应对强度的影响。进而推荐一种新型、简单可行的减小试件端部效应的试验方法。具体的试验过程如下。

本次为了考察端部效应对强度的影响,首先在对试件端部运用刮刀进行刮平后,再分别对端部进行如下的一些处理:

- (1)运用甘油和滑石粉按照1:2的比例调和成混合物,均匀涂布于试件的端部后在路强仪上进行强度试验;
- (2)将试件的一端在70℃蜡中浸泡3次,待蜡凝固后在路强仪上进行试验;
- (3)与(2)相同,只是将试件的两端都在蜡中浸泡3次,凝固后进行试验;
- (4)对正常的不采取任何措施的试件进行试验。

按照以上方法分别对U、W、Y等3个级配的 $\phi 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 试件进行试验。

通过表5和图4可见以下几点。

表5 试件端部状况对于强度的影响

级配	端部状况	平均值/MPa	Cv/%	代表值/MPa
U	饱水后端部涂甘油	4.12	10.16	3.43
	饱水后两端蜡封	2.21	7.16	1.95
	饱水后单面蜡封	2.57	9.39	2.17
	饱水后正常界面	4.19	9.00	3.57
W	饱水后端部涂甘油	5.35	1.63	5.20
	饱水后两端蜡封	2.59	6.67	2.31
	饱水后单面蜡封	2.75	6.46	2.46
	饱水后正常界面	5.79	5.89	5.22
Y	饱水后端部涂甘油	4.46	9.09	3.79
	饱水后两端蜡封	2.18	7.34	1.92
	饱水后单面蜡封	2.26	7.97	1.96
	饱水后正常界面	5.28	9.72	4.44

(1)对于 $\phi 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 试件而言,与前面情况相同,无论何种端部状态3个级配中W级配的强度

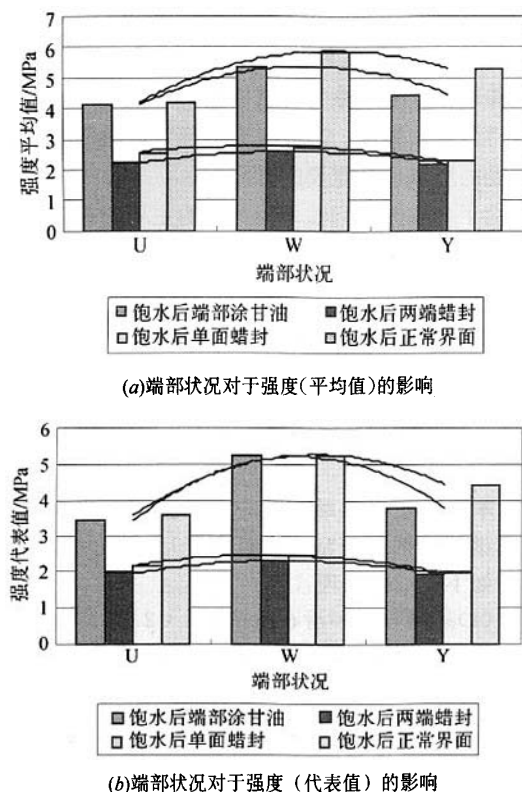


图 4 试件端部状况对于强度的影响

是最高的。

(2) 对于 7 d 无侧限抗压强度而言, 试件的端部状态对其影响较为显著, 在相同级配状态下, 强度最大的是端部未经过任何处理的状态, 最小的是试件两端同时进行蜡封的状态, 二者之间, 从数值上看基本上是端部未经处理的强度试验值是两端蜡封的强度试验值的两倍状态; 而端部涂甘油和滑石粉混合物的强度减小较少, 这主要可能是这种混合物本身是粘稠状的液体状态, 在路强仪上试验时在力的作用下会流走, 影响到了形成光滑界面的作用; 一端涂蜡的强度较为接近两端涂蜡状态, 其值略大于两端涂蜡的状态。

(3) 通过上述试验说明就材料的真实强度而言, 在完全消除仪器压头与试件端部摩擦力造成的应力环对强度影响的情况下, 得到的强度才是一定试件尺寸下材料的真实强度。当然, 这种强度在实际情况下是很难得到的, 在试验过程中所采取的一系列措施只能无限接近这样的状态, 而永远不可能达到。对于道路材料而言, 在实际运用情况下是没有必要确切地知道材料真实强度大小的, 而只要知道在统一的试验状态下, 材料强度的试验值达到多少基本

上就能满足路用性能, 即材料的强度标准问题。对于本文中对强度的试件端部效应的影响只是想说明一个问题, 即同样的材料在不同样的层间接触状态下 (在此姑且认为路强仪的压头和试件之间的接触状态相当于路上不同层材料之间的接触状态), 材料所能承受的破坏力的大小是不相同的。层间完全接触状态下, 所能承受的破坏力相当于接近完全光滑时所能承受的破坏力大小的 2 倍。因此在室内试验中采用端部处理后一定程度上消除端部效应影响而得到的强度标准将会使路用材料的使用性能更加安全。由力学程序如 BISAR 实际计算可知, 在沥青层与半刚性材料基层之间的层间接触状态不同将会严重影响到沥青层的受力, 在计算中, 层间连续时沥青层底为完全受压应力状态, 而当层间光滑时, 受力状态变为受拉应力状态。而通过本文的试验可以认为, 在沥青层与半刚性基层之间层间接触状态的不同也会影响到半刚性材料破坏强度的大小。在实际中, 沥青面层与半刚性基层的接触状态既不是完全连续也不可能是完全光滑, 因此, 在实际路面中, 半刚性材料的受力破坏强度要小于我国试验室通常径高比为 1:1 时端部不处理常规试验所得到的强度状态水平, 这有可能是一些材料的路用性能不能满足于实际需要的原因之一。由此, 加强层间粘结就显得尤为重要, 它不仅有利于面层材料的受力而且也有利于基层的受力。

为了消除端部效应对强度的影响, 国际上一般采用的措施是两种试验方法: 其一是调整试件的径高比, 使试件的径高比减小, 一般国际上采用径高比为 1:2 的试件; 其二是采用端部处理的方法。对于第一种方法, 由于试件的成型有一定的难度, 尤其对于公称最大粒径较大的试件成型, 为了确保试件的均匀性必须要求采用较大直径的试件, 如采用直径为 15 cm 的试件, 而径高比 1:2 则试件的高度达到 30 cm 左右, 按照本文混合料的击实密度, 混合料的质量将达到 13 kg 以上, 再加上试模和垫块压头的质量, 总质量会达到 30 kg 以上, 这样对于试件的成型困难较大。而且混合料径高比的减小将会使较高试件端部的压密程度远远高于中间的, 从而影响到试件的均匀性和实际受力破坏的形式。诸如径高比的减小影响试件的均匀性, 本文也进行了试验研究, 具体的试验方法如下。

分别成型 W 级配的 $\phi 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 、 $\phi 10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 、 $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 、 $\phi 10 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 试件, 对于

成型的 $\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 试件进行正常界面的无侧限抗压强度试验,对于 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 试件先进行正常界面的无侧限抗压强度试验,再将剩下的 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 试件分

别以中心为对称轴切割成 $\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 试件进行正常界面的无侧限抗压强度试验,从而比较这两种方法得到的相同尺寸强度的差异。试验结果汇总如表 6。

表 6 不同方法得到试件强度比较

试件	强度/MPa	变异系数/%	强度/MPa	变异系数/%	强度/MPa	变异系数/%	强度/MPa	变异系数/%
完整试件	$\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$		$\phi 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$		$\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$		$\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$	
正常界面	4.35	13.07	3.55	7.57	3.08	8.05	2.55	18.93
10 cm×30 cm 切割	$\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$		$\phi 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$		$\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$			
正常界面	3.98	10.69	2.73	6.80	2.94	11.56		

由表 6 可见:不论是何种试件尺寸的强度,由 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 试件切割所得到的强度明显小于正常成型时得到试件的强度。为了进一步说明径高比小的试件成型时试件的中间压实度小于两端的压实度,我们还将 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 试件等分切割成 3 个 $\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 试件,并且分别按照试件成型的方向分为上、中、下 3 类试件进行无侧限抗压强度试验,结果如表 7 所示。

表 7 试件成型时不同部位强度对比

由 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 切割成 3 个 $\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 试件的无侧限抗压强度/MPa			
编号	上	中	下
1	5.28	4.60	7.23
2	5.00	4.34	8.28
3	7.22	5.33	5.01
4	5.89	5.25	6.08
5	5.58	4.18	6.70
6		5.26	
平均值	5.79	4.83	6.66

由表 7 可见,由 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 切割成 3 个 $\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 试件的无侧限抗压强度的大小排序为:下>上>中,由此可见,径高比的减小是很不利于试件成型时试件的均匀性的,试件中间部位的强度远远小于两端的,按照本文的试验结果,如果假设上部试件的压实度是要求的 100% 的话,则中间试件的压实度为:

$$\rho_{\text{中}} = \frac{\sigma_{\text{中}}}{\sigma_{\text{上}}} \times 100\% = \frac{4.83}{5.79} \times 100\% = 83.3\% \quad (2)$$

而试件成型的下部的强度相对于上部的也要高些,同样的,按照中间试件的压实度计算下部试件压实度如下:

$$\rho_{\text{下}} = \frac{\sigma_{\text{下}}}{\sigma_{\text{上}}} \times 100\% = \frac{6.66}{5.79} \times 100\% = 115\% \quad (3)$$

之所以出现下部的压实度高于上部的原因可能是 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 试件的下部在成型时除受到压头与上部相同的压力外,还受到一般情况下不考虑的试件本身质量的影响,而且试件的下部在养生期间一直承受 $\phi 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 试件的自重,因此,下部试件的压实度也要高于上部。总之,径高比的减小虽然有利于消除试件端部效应的影响,同时其还在一定程度上影响了混合料试件的均匀性。因此,第一种方法消除端部效应的影响受到试件成型的限制。

4 综合考虑端部效应和尺寸效应

为了合理消除试件的端部效应又在实际的试验中方便易行,综合考虑试件的尺寸效应和试件两端蜡封对于端部效应的影响,进行进一步的试验,分别成型 U、W、Y 级配的 $\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 、 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 试件进行正常界面和两端蜡封的无侧限抗压强度试验,试验结果如表 8 所示。

表 8 尺寸效应和端部效应试验结果

级配		7 d 无侧限抗压强度/MPa			
		$\phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$	$\phi 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$	$\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$	$\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$
U 级配	正常界面	3.22	2.98	2.72	5.22
	两端蜡封	1.95	2.44	2.12	3.05
W 级配	正常界面	4.35	3.55	3.08	6.39
	两端蜡封	2.07	2.83	2.65	3.02
Y 级配	正常界面	3.44	3.10	2.51	5.12
	两端蜡封	1.92	2.49	2.19	2.37

由试验结果可见以下几点。

(1)在本文中为了消除端部效应的影响,采用了

在试件两端蜡封的方法进行强度试验,试验结果如表8所示。端部蜡封对于消除强度端部效应的效果受试件的尺寸影响,对于径高比为1:1的试件其端部蜡封的强度相对于正常界面的强度基本上减小了一半以上,而对于径高比为1:1.5和1:2的试件其强度的减小程度是有限的,究其原因是1:1.5和1:2试件的端部效应因为试件径高比的原因有所消除,再采用两端蜡封的方法对于强度的影响不明显。

(2)从表9中选取 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的正常界面强度和 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 两端蜡封强度,通过对比发现,二者强度相差无几,具有较好的关系。

表9 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的正常界面强度和
 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 两端蜡封强度对比

级配	抗压强度/MPa		$\frac{S_{15 \times 15}}{S_{10 \times 20}}\%$
	$\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 正常界面	$\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 两端蜡封	
U	2.72	3.05	112.13
W	3.08	3.02	98.05
Y	2.51	2.37	94.42
平均	2.77	2.81	101.54

由3个级配的二者比值的平均值可见, $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的正常界面强度和 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 两端蜡封强度相差无几,完全可以推荐采用 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 两端蜡封强度代替 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的正常界面强度,因为在试件的成型、脱模、养生过程中径高比1:1的试件比径高比为1:2的有较大的方便,而且 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 尺寸的试件由于试件较大对于混合料的变异性也会小些,更具有代表性。

5 结论

本文在对水泥稳定碎石材料端部效应和尺寸效应分析的基础上,推荐消除端部效应影响时采用 $\phi 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 试件两端蜡封代替国际上通行的径高比为1:2的 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 试件。

参考文献:

- [1] 沙庆林,主编.高等级公路半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [2] 沙庆林,著.高等级公路沥青路面早期破坏现象及预防[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 同济大学道路与交通工程研究所,编.半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1991.

Strength Test of Cement Stabilized Crushed Stone Considering Scale-Effect and End-Effect

WANG Shui-yin, WANG Xu-dong

(Research Institute of Highway of Ministry of Communications, Beijing 100088, China)

Abstract: A lot of factors affect the strength of the cement stabilized crushed stone, such as gradation, cement dosage and so on. The scale-effect and the end-effect of the 7 d unconfined compressive strength of the cement stabilized crushed stone are researched. And then the test method of the 7 d unconfined compressive strength is improved.

Key words: cement stabilized crushed stone; scale-effect; end-effect; unconfined compressive strength; test