

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.06.054

尺寸效应与成型工艺对无机结合料稳定材料 无侧限抗压强度的影响

邹桂莲¹, 吴欣¹, 刘新海²

(1.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2.广东华路交通科技有限公司)

摘要: 无侧限抗压强度是无机结合料稳定材料配合比设计的关键指标,而试件尺寸与成型工艺影响无侧限抗压强度。目前现行规范中对非标准尺寸的试件与标准试件之间的强度换算关系未给出明确说明。再者,规范中的静压成型试件的压实度偏低,导致现场路面基层的强度高于室内试验的强度值,试验室配合比设计的指导性出现偏差。采用天然集料与再生集料,研究试件尺寸、成型工艺、压实度对水泥稳定材料(Cement Stabilized Material, CSM)与水泥粉煤灰稳定材料(Cement Flyash Stabilizing Material, CFSM)无侧限抗压强度的影响。试验结果表明:无机结合料稳定材料存在显著的尺寸效应,强度随试件尺寸的增加而增大,7 d 无侧限抗压强度 $R_{\phi 150\text{ mm}}/R_{\phi 100\text{ mm}}=1.35$,再生集料无机结合料稳定材料的无侧限抗压强度高于天然集料,但不影响这一换算关系,并分析了尺寸效应产生的机理。压实度提高,抗压强度迅速增长。相同压实度条件下,旋转压实成型试件的强度略高于静压成型试件强度。建议 CSM 和 CFSM 室内配合比设计阶段采用旋转压实法成型试件,压实次数由实测的压实曲线确定。

关键词: 无机结合料稳定材料; 无侧限抗压强度; 再生集料; 尺寸效应; 成型工艺

无侧限抗压强度表征无机结合料稳定类材料的承载能力,是无机结合料稳定材料配合比设计的决定性

指标。已有研究表明:试件尺寸与成型条件是影响土木工程材料强度的主要因素。受室内试验条件与现场

- *****
- [8] Singh D, Ashish P K, Kataware A, et al. Evaluating Performance of PPA — and — Elvaloy — Modified Binder Containing WMA Additives and Lime Using MSCR and LAS tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(8).
- [9] Liu H, Chang R, Zhang M, et al. Study on Low Temperature Performance of Polyphosphoric Acid Modified Asphalt and Asphalt Mixture[J]. Hunan Daxue Xuebao/ journal of Hunan University Natural Sciences, 2017, 44(5): 104—112.
- [10] 丁海波, 周刚, 王火明. 多聚磷酸对沥青化学组分与路用性能的影响[J]. 中外公路, 2014(4).
- [11] 曹晓娟, 张振兴, 郝培文, 等. 多聚磷酸对沥青混合料高温性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014(6).
- [12] 赵毅, 陈玉欣, 秦旻, 等. SBR 改性沥青混合料低温稳定性研究[J]. 公路工程, 2014(2).
- [13] 刘红瑛, 常睿, 张铭铭, 等. 多聚磷酸改性沥青及其混合料低温性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017(5).
- [14] 刘红瑛, 常睿, 王春, 等. 多聚磷酸复合改性沥青混合料的路用性能[J]. 建筑材料学报, 2017(2).
- [15] 张涛, 李东兴. 多聚磷酸与 SBR 复合改性沥青混合料性能及改性机理[J]. 公路工程, 2016(3).
- [16] 王云普, 张峰. 多聚磷酸与 SBR 复配改性国产 90 号沥青的研究[J]. 石油炼制与化工, 2007(9).
- [17] Liang P, Liang M, Fan W, et al. Improving Thermo — Rheological Behavior and Compatibility of SBR Modified Asphalt by Addition of Polyphosphoric Acid (PPA) [J]. Construction & Building Materials, 2017, 139: 183—192.
- [18] Domingos M D I, Faxina A L. High — Temperature Properties and Modeling of Asphalt Binders Modified with SBR Copolymer and PPA in the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Test [J]. APPLIED RHEOLOGY, 2016, 26(5).
- [19] 刘红瑛, 张振兴, 常睿, 等. 多聚磷酸改性沥青流变特性及改性机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016(12).

收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(编号: 2014BAC07B03)

作者简介: 邹桂莲, 女, 博士, 教授. E-mail: glzhou@scut.edu.cn

设备条件的限制,无侧限抗压强度可以采用非标准尺寸的试件,但目前现行规范中:① 对非标准试件与标准试件之间的强度换算关系未给出明确说明;② 规范中推荐的成型方法为静压成型,规范要求路面基层、底基层压实度达 97%或 98%以上,但室内静压成型试件压实度往往达不到设计要求。随着路面基层施工现场压实机械与工艺的改进,压实功增大,压实度提高,甚至超过 100%,现场无机结合料稳定材料的强度高于室内试验的强度值,导致试验室设计与路面基层实际施工脱节,室内设计对现场的指导性变差;③ 目前已有的无机结合料稳定材料的研究成果针对的是天然集料,随着再生集料在路面基层中的推广应用,研究结论是否也适用于再生集料值得探讨。为此,研究采用天然集料与再生集料,探讨试件尺寸、成型工艺、压实度对水泥稳定材料(CSM)与水泥粉煤灰稳定材料(CF-SM)无侧限抗压强度的影响,提出非标准试件与标准试件之间的强度换算关系,推荐无机结合料稳定材料的成型方法,分析尺寸效应产生的机理。

1 原材料与矿料级配

为使研究更具代表性,无机结合料稳定材料采用半刚性基层中应用最广泛的水泥稳定材料与水泥粉煤灰稳定材料,研究采用的主要原材料的性能指标与矿料级配如下。

1.1 水泥

试验采用海螺牌 42.5 号普通硅酸盐水泥,主要性能指标如表 1 所示。

1.2 粉煤灰

采用的粉煤灰成分检测结果如表 2 所示,满足现行规范对粉煤灰的要求。

1.3 集料

天然集料选用花岗岩集料,再生集料选用建筑垃圾再生的再生集料。天然集料与再生集料的压碎值分别为 12.5%、27.1%。集料的吸水率和表观密度如表 3 所示。

表 1 水泥性能指标要求及试验结果

项目	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	安定性	凝结时间/min		3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
			初凝	终凝	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度
实测值	357	合格	203	450	5.9	27.4	45	7.7
规范值	≥ 300	合格	≥ 45	≤ 600	≥ 3.5	≥ 17.0	≥ 6.5	≥ 42.5

表 2 粉煤灰成分检测结果

项目	主要氧化物含量/%						(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + 烧失量/ Fe ₂ O ₃)/%	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃)/%	%
实测值	58	30	4.3	1.5	2.8	3.2	92.3	4.8
规范值	—	—	—	—	—	—	> 70	≤ 20

表 3 集料的吸水率与表观密度

筛孔/ mm	天然集料		再生集料	
	吸水率/ %	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸水率/ %	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0~4.75	0.72	2.686	8.52	2.621
4.75~9.5	0.68	2.709	7.80	2.624
9.5~13.2	0.65	2.736	5.90	2.628
13.2~16	0.48	2.741	5.68	2.628
16~19	0.45	2.743	4.94	2.631
19~26.5	0.45	2.745	4.74	2.635

1.4 级配

与悬浮密实型级配相比,骨架密实型级配的混合

料形成了骨架嵌挤结构,抗压强度高,抗裂性能好,因此越来越多地获得推广应用,该文采用的矿料级配如表 4 所示。

2 试验方案设计

2.1 尺寸效应

尺寸效应是指准脆性材料的强度受材料自身性质以及试件或构件尺寸大小的影响而发生改变的性质。无机结合料稳定材料与水泥混凝土等准脆性材料在不同试件尺寸下测得的强度存在一定的偏差。采用天然集料与再生集料,静压法成型 $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 和 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 两种圆柱形试件,研究水泥稳定材

料和水泥粉煤灰稳定材料尺寸效应对 7 d 无侧限抗压强度的影响,水泥稳定材料中的水泥掺量为最普遍采用的 5%,水泥粉煤灰中无机结合料(水泥与粉煤灰)的比例与用量为前期研究确定的,试验设计如表 5 所示。

表 4 水泥稳定材料与水泥粉煤灰稳定材料的矿料级配

混合料 类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
CSM	—	100	90.5	81.0	65.5	40.0	26.5	17.5	11.5	7.5	5.0	3.5
CFSM	100	83.5	76.0	68.5	56.5	35.0	23.5	16.0	11.0	7.5	5.0	3.5

表 5 无机结合料稳定材料试验设计与编号

混合料 类型	水泥掺 量/%	粉煤灰 掺量/%	再生粗骨 料掺量/%	天然粗骨 料掺量/%	细集料	配合比 编号	试验编号	
							$\phi 100\text{ mm}$ $\times 100\text{ mm(A)}$	$\phi 150\text{ mm}$ $\times 150\text{ mm(B)}$
CSM	5.0	0	0	100	全天然	C1	C1A	C1B
			80	20	全天然	C2	C2A	C2B
			100	0	全天然	C3	C3A	C3B
			0	100	全天然	F1	F1A	F1B
CFSM	4.4	13.2	80	20	全天然	F2	F2A	F2B
			100	0	全天然	F3	F3A	F3B

注:表格中的百分比均为质量百分比,水泥掺量、粉煤灰掺量为水泥、粉煤灰与干燥集料总质量的百分比。

2.2 成型工艺

压实方法影响混合料成型后的集料分布状态和密实度。研究采用静压成型和旋转压实成型两种工艺,对比研究成型工艺对无机结合料稳定材料强度的影响,试验设计如表 6 所示。具体成型方法:静压法采用量程 400~2 000 kN 的压力试验机,应变控制加载模式,以 1 mm/min 的加载速率,直到上下压柱压入试模为止;旋转压实法设置旋转压实仪参数为基座旋转角度 1.250、旋转速度 30 r/min、压力 600 kPa,按操作要求成型压实并记录各旋转压实次数对应的试件高度。

表 6 静压和旋转压实成型对比试验方案设计

混合料类型	配合比	试验编号	
		静压法	旋转压实法
CSM	C1	JC1	XC1
	C3	JC3	XC3
CFSM	F1	JF1	XF1
	F3	JF3	XF3

按表 5 的试验设计成型试件,试件经标准养生后,7 d 无侧限抗压强度试验结果如表 7 所示。为了更直观地分析试验结果, $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 尺寸试件(B 组)的 7 d 无侧限抗压强度代表值与 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 尺寸试件(A 组)的 7 d 无侧限抗压强度代表值的比值以 B/A 表示。

表 7 不同尺寸试件的强度代表值

试件编号	强度代表值/MPa	变异系数/%	强度比(B/A)
C1A	2.84	6.87	1.289
C1B	3.66	4.40	
C2A	3.48	10.59	
C2B	4.58	9.40	1.316
C3A	3.03	11.86	
C3B	4.09	10.51	1.350
F1A	2.04	8.01	
F1B	2.80	10.40	
F2A	2.77	8.30	1.372
F2B	3.80	4.20	
F3A	2.27	7.51	1.356
F3B	3.08	8.20	

3 试验结果与分析

3.1 尺寸效应对强度的影响

为研究尺寸效应对 CSM 和 CFSM 强度的影响,

由表 7 可知:无论采用天然集料还是再生集料,随试件尺寸增大,无机结合料稳定材料 7 d 无侧限抗压

强度随之增大,尺寸效应明显。再生粗集料掺量达到 80%时,两种混合料的 7 d 无侧限抗压强度代表值达到最大值,100%使用再生粗集料的 CSM 和 CFSM 强度也高于天然集料,这是因为再生集料的表面裹覆了丰富的水泥砂浆,有利于无机结合料稳定材料的强度发展。水泥稳定材料与水泥粉煤灰稳定材料 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 试件的强度代表值是 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的 1.29~1.37 倍,随着再生集料用量提高,尺寸效应略有放大。施工单位有尺寸效应统计资料的按统计结果取值,没有统计资料的,推荐取试验研究统计结果的中间值,即 7 d 无侧限抗压强度 $R_{\phi 150\text{ mm}}/R_{\phi 100\text{ mm}}=1.35$ 。

3.2 尺寸效应机理分析

由试验结果可知,无机结合料稳定类材料的无侧限抗压强度随试件尺寸的增大而增大,这与水泥混凝土试件的尺寸效应相反,且尺寸效应的影响也更显著,产生这一相反结论的根本原因在于无机结合料稳定材料和混凝土强度产生的主要来源不同。水泥混凝土强度的来源主要是水泥胶结料的黏结作用,抗压强度的尺寸效应主要是环箍效应造成的,同时也受试件径高比、强度、缺陷等影响。

无机结合料稳定材料强度低,抗压强度主要来源于集料之间的嵌挤力和摩擦力,胶结料的黏结作用有限。 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 试件与 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 试件的唯一区别是大小两种试件横截面受到的横向约束作用力不同(图 1)。试件外部松散区对核心受压区的横向膨胀起着约束作用,集料之间产生指向圆心的摩擦力径向分力,使得核心区材料近似于三向受压状态,从而提高了核心区材料的荷载承受能力。尺寸试件越大核心区材料面积占比越大,荷载承受能力也越大,这又反过来提高径向摩擦力的约束作用(核心受压区箭头更密集),使得试件整体的抗压强度得以提高。

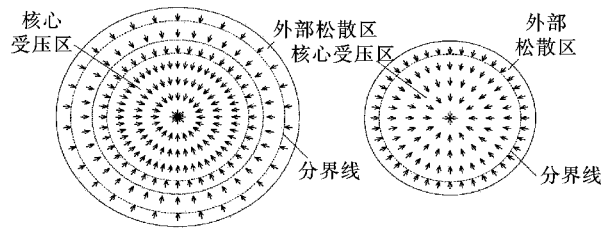


图 1 试件尺寸对横截面约束力(骨料嵌挤力和摩擦力)的影响

3.3 成型工艺与压实度对强度的影响

为研究成型工艺对无机结合料稳定材料强度的影响,

室内采用静压法和旋转压实法成型直径为 $\phi 150\text{ mm}$ 的圆柱形试件,采用全天然集料无机结合料稳定材料以及 100%再生粗集料无机结合料稳定材料对比研究,多组试验的 7 d 无侧限抗压强度试验结果如表 8、图 2 所示。

表 8 静压法成型试件的强度代表值

试验编号	压实度/%	强度代表值/MPa	变异系数/%
JC1	96.7	3.66	4.40
JC3	97.4	4.09	10.51
JF1	95.9	2.80	10.40
JF3	96.6	3.08	8.20

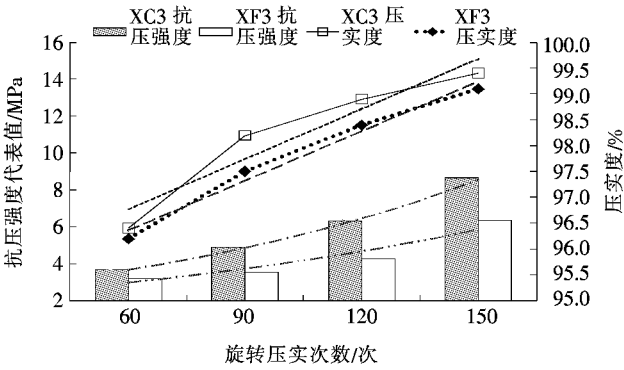


图 2 旋转压实次数对压实度、抗压强度的影响

由表 8 可知:① 无论采用水泥还是水泥粉煤灰作为结合料,无机结合料类稳定材料的抗压强度都随压实度的提高显著增长;② 静压成型法的压实度较低,为 96%~97%,不能满足高等级路面基层 98%压实度的设计要求,更低于目前路面基层施工现场的压实度。

由图 2 可知:① 随着旋转压实次数的增长,无机结合料稳定材料的压实度持续提高,随之而来的,7 d 无侧限抗压强度快速提高,压实度从 96%提高至 99%,抗压强度提高 1 倍以上;② 水泥粉煤灰稳定材料的压实度一直在水泥稳定材料的下方,说明水泥粉煤灰组更难压实,从表 4 可以看出,水泥粉煤灰组的矿料级配较粗,因此需要的压实功较大。

由试验结果可知:旋转压实次数为 90 次时,水泥稳定材料能满足 98%压实度要求;旋转压实次数为 105 次,水泥粉煤灰稳定材料能满足 98%压实度的要求。

比较静压和旋转压实两种成型工艺条件下试件的压实度和抗压强度,旋转压实次数为 70 次时,水泥稳定材料的压实度与静压法相当,此时混合料的 7 d 无侧限抗压强度代表值为采用静压成型的 1.08 倍;旋转

压实次数为 67 次时,水泥粉煤灰稳定材料试件的压实度与静压法相当,此时混合料的 7 d 无侧限抗压强度代表值为采用静压成型的 1.05 倍,表明在相同压实度条件下,旋转压实成型试件的抗压强度略高于静压成型试件的强度。这是因为旋转压实过程有助于集料的取向分布,使集料位于更稳定的状态,也更有利于密实状态的形成;静压成型只有垂直力,不能重新分布集料及集料取向,如果追求更大的压实度,可能造成较软弱集料的破碎,特别是使用再生集料时,再生集料强度低、压碎值大,更易被压碎。与静压法相比,旋转压实法的揉搓挤压作用对再生集料的破坏较小,能够更真实地模拟实际道路施工摊铺后的压实情况。考虑到静压法成型试件的压实度与集料分布状态与实际工况相差较大,而旋转压实法通过改变压实次数达到实际工况状态,且集料分布与取向跟实际压实状态更接近,考虑到旋转压实设备也逐渐普及,建议 CSM 和 CFMSM 室内配合比设计阶段采用旋转压实法成型试件,压实次数由压实曲线确定。

4 结论

通过研究试件尺寸效应和成型工艺对 CSM 和 CFMSM 7 d 无侧限抗压强度的影响,得出以下主要结论:

(1) CSM 和 CFMSM 存在显著的尺寸效应,无侧限抗压强度随试件尺寸的增加而增大。因此,建议当采用非标准试件时,施工单位有尺寸效应统计资料的按统计结果取值,没有统计资料的,推荐 7 d 无侧限抗压强度 $R_{\phi 150\text{ mm}}/R_{\phi 100\text{ mm}}=1.35$ 。研究同时表明:此换算关系基本不受集料是否为再生集料的影响。

(2) CSM 和 CFMSM 试件的抗压强度受压实度影响显著,压实度提高,强度迅速增长,建议加强施工现场的压实。相同压实度条件下,旋转压实成型试件的强度略高于静压成型试件强度。

(3) 旋转压实法通过改变压实次数达到实际工况状态,且集料分布与取向跟实际压实状态更接近,考虑

到旋转压实设备也逐渐普及,建议 CSM 和 CFMSM 室内配合比设计阶段采用旋转压实法成型试件。

(4) 旋转压实的压实度受矿料级配、设备等因素的影响,因此建议压实次数由实测的压实曲线确定。

(5) 再生集料的 CSM 和 CFMSM 强度高于天然集料。再生集料的表面裹覆了丰富的水泥砂浆,且表面更为粗糙,有利于无机结合料稳定材料的强度发展。

参考文献:

- [1] 汪水银,王旭东.考虑尺寸效应和端部效应下的水泥稳定材料的强度试验[J].公路,2007(3).
- [2] 谢若奇,谭振宇,陈明辉,等.水泥稳定碎石静压和旋转压实强度对比研究[J].江西建材,2016(19).
- [3] 李立寒,黄璞,刘栋.旋转与静压成型对水泥稳定碎石性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2016(6).
- [4] 钱树波.旋转压实方法在无机结合稳定料压实性能试验中的应用[J].市政技术,2016(4).
- [5] 张明,卢裕杰,杨强.准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J].岩石力学与工程学报,2010(9).
- [6] 黄海燕,张子明.混凝土的尺寸效应[J].混凝土,2004(3).
- [7] 苏捷.混凝土受压与受拉性能的尺寸效应研究[D].湖南大学博士学位论文,2012.
- [8] 杜修力,张建伟,符佳,等.钢筋混凝土构件的尺寸效应研究进展及展望[J].建筑科学与工程学报,2009(3).
- [9] 惠弘毅,李宗利,杨华,等.不同强度等级混凝土尺寸效应试验研究[J].混凝土,2015(7).
- [10] 海涛,田石柱.尺寸效应对再生混凝土性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2016(11).
- [11] 郭经海,张继伟.混凝土圆柱体和立方体抗压强度试验对比分析[J].安徽建筑,2016(3).
- [12] 李庆华,周宝民,黄博滔,等.超高韧性水泥基复合材料抗压性能的尺寸效应研究[J].水利学报,2015(2).
- [13] 邹桂莲,彭超杰,廖湘南,徐路桥.再生粗集料对沥青混合料路用性能的影响[J].中外公路,2017(2).
- [14] 邹桂莲,周浩浩,彭超杰,等.广东省建筑垃圾再生粗骨料生产与技术指标调查[J].筑路机械与施工机械化,2017(1).
- [15] 邹桂莲,刘新海,周浩浩.水泥粉煤灰稳定再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2018(3).