

蒋应军,李 升,李明杰,等. CTB-50 水泥稳定碎石垂直振动试验方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(3):34-42.  
JIANG Ying-jun,LI Sheng,LI Ming-jie,et al. CTB-50 vertical vibration compaction method for cement stabilized macadam[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2024,44(3):34-42.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.03.003

## CTB-50 水泥稳定碎石垂直振动试验方法

蒋应军<sup>1</sup>,李 升<sup>1</sup>,李明杰<sup>2</sup>,杨 明<sup>2</sup>,陈浙江<sup>3</sup>,何 岩<sup>4</sup>,易 勇<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064; 2. 河南省交通基本建设质量检测站,河南 郑州 450016; 3. 金华交通投资集团有限公司,浙江 金华 321015;  
4. 许昌市公路事业发展中心,河南 许昌 461099)

**摘 要:**为准确评价最大粒径为 53 mm 的水泥稳定碎石(CTB-50)的物理力学性质,采用理论分析和室内试验,研究了试件尺寸对 CTB-50 力学强度测试值的影响,分析了垂直振动试验仪(VVTE)振动参数对 CTB-50 干密度和级配的影响,开发了 CTB-50 垂直振动试验方法(VVTM),并通过与现场芯样力学性质对比验证了 VVTM 可靠性。研究结果表明:随试件尺寸增大,试件松散区的界面效应减弱,试件有效承压面积增大,表现为 CTB-50 强度测试值增大,当试件尺寸达到 200 mm (直径 $\Phi$ ) $\times$ 200 mm(高 $h$ )时,增大试件尺寸对强度不再有显著影响;随工作频率增大,CTB-50 干密度先显著增大,当工作频率超过 32 Hz 时,干密度不再随之变化;随工作质量增大,CTB-50 干密度近似抛物线变化,当工作质量为 302 kg 时干密度达最大,且上车质量 122 kg、下车质量 180 kg 时振动对级配破坏较小;随振动时间延长,CTB-50 干密度先显著增大,振动时间超过 165 s 时干密度不再随之变化。建议 CTB-50 圆柱体试件尺寸为  $\Phi$ 200 mm $\times$  $h$ 200 mm,VVTE 振动参数为工作频率 32 Hz、工作质量 302 kg(上车质量 122 kg、下车质量 180 kg)、名义振幅 1.2 mm,确定最大干密度和最佳含水率的振动时间为 165 s、制备圆柱体试件的振动时间为 120 s;CTB-50 的 VVTM 试件力学强度和现场芯样的相关性达 91%。采用垂直振动试验方法成型 CTB-50 试件合理可行。

**关键词:**道路工程;路面基层;超大粒径;水泥稳定碎石;垂直振动试验方法;力学强度

中图分类号:U416.21

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2024)03-0034-09

### CTB-50 vertical vibration compaction method for cement stabilized macadam

JIANG Ying-jun<sup>1</sup>, LI Sheng<sup>1</sup>, LI Ming-jie<sup>2</sup>, YANG Ming<sup>2</sup>, CHEN Zhe-jiang<sup>3</sup>, HE Yan<sup>4</sup>, YI Yong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Province Traffic Infrastructure Quality Inspection Station, Zhengzhou 450016, Henan, China; 3. Jinhua Communications Investment Group Co. LTD, Jinhua 321015, Zhejiang, China;  
4. Xuchang Highway Development Center, Xuchang 461099, Henan, China)

**Abstract:** In order to evaluate the physical and mechanical properties of ultra-large particle size cement stabilized macadam with a maximum particle size of 53 mm accurately (CTB-50), the

收稿日期:2023-04-10

基金项目:陕西省交通科技项目(21-48K);河南省交通科技项目(2020J-2-2)

作者简介:蒋应军(1975-),男,浙江金华人,教授,博士研究生导师,E-mail:jyj@chd.edu.cn。

influence of specimen size on the mechanical strength test values of CTB-50 was investigated using theoretical analysis and laboratory tests. Then the effect of vibration parameters of the vertical vibration compaction testing equipment (VVTE) on the dry density and gradation of CTB-50 was investigated, and the vertical vibration compression testing method (VVTM) of CTB-50 was developed. The reliability of VVTM was verified by comparing the mechanical properties with the field core samples. The results show that with the increase of specimen size, the interfacial effect of the loose area of the specimen becomes weakened and the effective compression area increases, which shows that the test value of CTB-50's strength increase, and increasing the specimen size has no significant effect on the strength when the specimen size reaches  $\Phi 200$  mm(diameter) $\times h 200$  mm(tall). With the increase of working frequency, the dry density of CTB-50 increases significantly, while the dry density does not change significantly when the working frequency exceeds 32 Hz. With the increase of loading weight of working system, the dry density of CTB-50 varies as parabolic approximately, and the dry density reaches the maximum when the working mass is 302 kg. Then the vibration is less destructive to the gradation when the loading weight of upper-system and lower-system is 122 and 180 kg, respectively. With the extension of vibration time, the dry density of CTB-50 increases significantly, while the dry density does not change significantly when the vibration time exceeds 165 s. Therefore, it is recommended that the size of CTB-50 cylindrical specimen is  $\Phi 200$  mm $\times h 200$  mm, the working frequency of VVTE is 32 Hz, while the working mass is 302 kg (loading weight of upper-system of 122 kg, loading weight of lower-system of 180 kg), and the nominal amplitude is 1.2 mm. To determine the maximum dry density and optimum moisture content, the vibration time is 165 s, and the vibration time for preparing the cylindrical specimen is 120 s. The correlation between the mechanical strength of VVTM specimens and field core samples of CTB-50 is 91%. It is reasonable and feasible to form CTB-50 specimens by VVTM. 8 tabs, 6 figs, 30 refs.

**Key words:** road engineering; road base; ultra-large particle size; cement stabilized macadam; vertical vibration compaction method; mechanical strength

## 0 引言

中国 90% 以上的高等级公路都采用水泥稳定碎石基层或底基层,但存在收缩开裂问题且始终未能很好得到解决<sup>[1-4]</sup>。目前,基层采用最大粒径不超过 31.5 mm、底基层采用最大粒径不超过 37.5 mm。理论上,颗粒粒径越大,稳定性更强、触发颗粒移动所需外力也越大,同时表面积越小、黏结颗粒所需水泥用量就更少,具有更强的力学强度和抗裂性能<sup>[5-6]</sup>。Yi 等研究了最大粒径为 53 mm 的水泥稳定碎石强度增长规律,认为最大粒径为 53 mm 的水泥稳定碎石所需水泥用量更少,可减少基层开裂问题,延长路面使用寿命<sup>[7]</sup>。国计凯认为最大粒径为 53 mm 的水泥稳定碎石形成的嵌挤骨架结构可以抵抗开裂破坏<sup>[8]</sup>。关笑楠研究了不同粒径水泥稳定碎石抵抗开裂能力,认为最大粒径为 53 mm 的水

泥稳定碎石抵抗开裂能力优于最大粒径为 37.5 mm 的水泥稳定碎石<sup>[9]</sup>。上官宇浩研究表明,CTB-50 具有良好路用性能和经济性,可缓解或解决半刚性基层开裂问题,将成为今后的一个研究方向<sup>[10]</sup>。

研究并精准揭示 CTB-50 组成结构与性能之间规律,是 CTB-50 质量控制与推广应用的基础,而试件成型方法对路用性能测试结果影响显著。李立寒等对比分析了旋转成型方法和静压成型方法对水泥稳定碎石物理力学性能的影响,发现 2 种方法成型试件的物理力学指标呈线性关系,且旋转成型试件物理力学指标更接近试验路芯样,但其成型试验设备并未在中国广泛普及,进口设备价格并不便宜<sup>[11-12]</sup>。王龙等自主研制了振动压实设备,并研究了振动成型方法和静压成型方法对规范给定级配水泥稳定碎石无侧限抗压强度的影响,发现 2 种成型方法无侧限抗压强度具有良好线性关系,且振动压

实方法优于静压成型方法<sup>[13]</sup>。田耀刚等采用自制振动仪,研究了振动成型方法与静压成型方法对最大粒径为 31.5 mm 水泥稳定碎石基层路用性能的影响,发现振动成型水泥稳定碎石基层力学性能及抗冲刷性能更优<sup>[14-16]</sup>。曾梦澜等研究了振动成型方法和静压成型方法对最大粒径为 26.5 mm 开级配水泥稳定碎石路用性能的影响,发现振动成型试件强度、刚度性能优于静压成型试件<sup>[17]</sup>。袁可佳等通过对比振动成型和静压成型最大粒径为 31.5 mm 水泥稳定碎石的最大干密度、无侧限抗压强度、抗裂能力等物理特性,提出振动成型标准可大幅提高水泥稳定碎石基层施工质量<sup>[18-20]</sup>。聂桂海等研究了最大粒径为 31.5 mm 水泥稳定碎石力学特性及微裂特性<sup>[21-22]</sup>。蒋应军等开展了室内外试验对比研究并提出了垂直振动试验方法(VVTM),VVTM 试件与现场芯样力学相关性可达 90%<sup>[23-28]</sup>。然而,目前常用的试件成型方法及 VVTM 研究对象主要是传统水泥稳定碎石,其最大粒径不超过 37.5 mm。受尺寸效应影响,上述这些试件成型方法不能直接适用于最大粒径为 53 mm 的 CTB-50,针对 CTB-50 需要重新确定试件尺寸和成型方法。

鉴于此,本文分析了试件尺寸对 CTB-50 力学强度的影响,研究了垂直振动试验仪(VVTE)振动参数对 CTB-50 干密度和级配的影响,提出了 CTB-50 垂直振动试验方法,并通过与现场芯样力学性质对比验证其可靠性。

1 原材料与矿料级配

1.1 原材料

1.1.1 粗集料

试验所用粗集料为陕西宝鸡岐山顺通达矿业有限公司生产的石灰岩,按粒径大小分为 5 档,其技术指标见表 1。

表 1 粗集料技术指标

Tab. 1 Technical index of coarse aggregate

技术指标	不同粒径(mm)粗集料技术指标测定值				
	[40,50]	[30,40]	[20,30]	[10,20]	[5,10]
表观相对密度	2.786	2.769	2.761	2.731	2.729
针片状/%	2.1	7.5	7.1	12.9	
吸水率/%	0.41	0.59	0.91	1.69	0.79

1.1.2 细集料

试验所用细集料为陕西宝鸡的石灰岩,其技术

指标见表 2。

表 2 细集料技术指标

Tab. 2 Technical index of fine aggregate

技术指标	表观相对密度	泥块含量/%	亚甲蓝值/(g·kg <sup>-1</sup> )
测定值	2.728	0	0.8

1.1.3 水泥

试验所用水泥为冀东海德堡(泾阳)水泥有限公司生产的盾石 P·O 42.5 水泥,其技术指标见表 3。

表 3 水泥技术指标

Tab. 3 Technical index of cement

技术指标	细度/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	安定性/mm	3 d 抗压	3 d 抗折	凝结时间/min	
			强度/MPa	强度/MPa	初凝时间	终凝时间
测定值	336	1.3	22.8	5.4	212	452

1.2 级配

水泥稳定碎石级配根据课题组前期研究确定,试验采用矿料级配中值见表 4。

表 4 矿料级配

Tab. 4 Gradations of mineral mixture

筛孔尺寸/mm	53	37.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过率/%	95~100	65~75	55~65	37~47	26~34	18~26	6~14	2~6

2 CTB-50 试件合理尺寸

《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)规定,最大粒径不超过 37.5 mm 时力学强度试件直径  $\Phi$  为 150 mm、高度  $h$  为 150 mm,即最大粒径与试件直径比值约 0.25,试件高径比为 1。若以此为原则,则预估 CTB-50 合理试件尺寸为  $\Phi 212\text{ mm}\times h 212\text{ mm}$ 。因此,拟选择  $\Phi 150\text{ mm}\times h 150\text{ mm}$ 、 $\Phi 200\text{ mm}\times h 200\text{ mm}$ 、 $\Phi 220\text{ mm}\times h 220\text{ mm}$ ,研究试件尺寸对水泥稳定碎石力学性能的影响。

试件尺寸对水泥稳定碎石强度测试值影响见图 1,图中  $R_{c0.95}$ 、 $R_{t0.95}$  分别为抗压强度、劈裂强度代表值,试验平行试件 6 个。试验时水泥剂量  $P_s$  为 3%,采用静压法成型试件。

由图 1 可知,试件强度测试值随试件尺寸增大而增大,但试件尺寸超过  $\Phi 200\text{ mm}\times h 200\text{ mm}$  时,强度不再随尺寸显著增大。分析其原因,受试模刚性约束作用,试件成型过程中靠近试模界面处存在粗集料易压碎且密实性相对较差的外部松散区,松散区削弱了试件的有效承压面积,表现为强度测试值偏小。随试件尺寸增大,松散区界面效应减弱,试件有效承压面积增大,表现为强度测试值增大。当试件尺寸为  $\Phi 200\text{ mm}\times h 200\text{ mm}$  时,松散区界面效

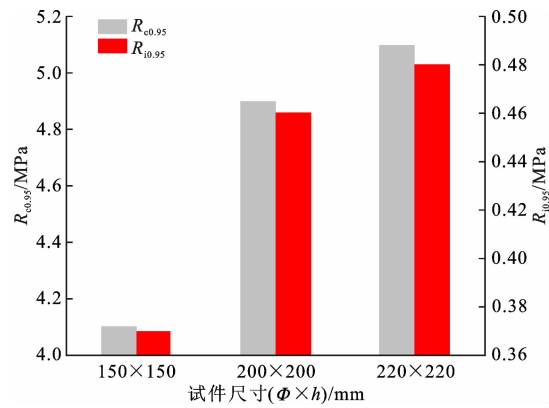


图 1 CTB-50 力学强度-试件尺寸之间关系  
Fig. 1 Relationships between mechanical strength of CTB-50 and specimens size

应对试件强度测试值无显著影响<sup>[29]</sup>。考虑试验易操作性,建议 CTB-50 圆柱体试件尺寸为  $\Phi 200\text{ mm} \times h 200\text{ mm}$ 。

### 3 VVTE 振动参数及选型标准

垂直振动测试仪(VVTE)构造与工作参数直接影响振动压实试验方法的模拟效果。VVTE 选型标准(设备构造与工作参数)是开发 CTB-50 垂直振动试验方法(VVTM)的前提条件。

#### 3.1 VVTE 构造及原理

试验所用 VVTE 的主要构造见图 2<sup>[30]</sup>,主要由控制平台、转动装置和振动系统组成,其核心结构是振动系统中的激振器,由 2 个平行的振动轴和 1 组对称的偏心块组成<sup>[20]</sup>。激振器的工作原理见图 3<sup>[30]</sup>。激振器由 2 块完全相同且对称布置的偏心块构成,电机进行工作时,与电机相连的转动轴将带动 2 块偏心块以相同的角速度  $\omega$  反向转动,两偏心块在水平方向上产生的离心力  $F_0 \cos(x)$  分量刚好相互抵消,而在竖直方向上产生的离心力  $F_0 \sin(x)$  分量则相互叠加,使得 VVTE 在工作过程中理论上仅产生竖直方向作用力而无水平方向作用力,确保 VVTE 稳定性和压实效果可靠性。图 3 中: $F_0$  为激振力; $f$  为工作频率; $M_e$  为偏心距; $m_0$  为偏心块质量; $r_0$  为偏心块重心至转轴距离; $x$  为  $F_0$  与水平分力的夹角。

VVTE 的振动参数包括工作频率、上下车质量和名义振幅。

#### 3.2 工作频率对 CTB-50 干密度的影响

工作频率对 CTB-50 水泥稳定碎石干密度影响见图 4。试验时水泥剂量  $P_s$  分别为 2.5%、3.0%、3.5%,含水率  $w$  为 4%,成型圆柱体试件时上、下车

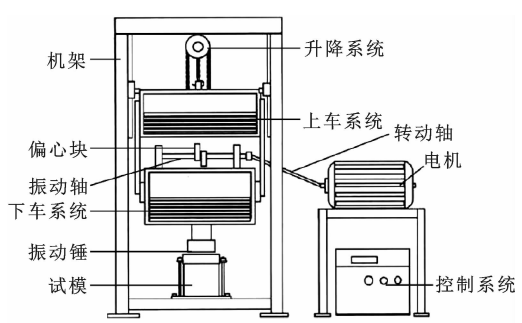


图 2 VVTE 构造<sup>[30]</sup>  
Fig. 2 VVTE structure<sup>[30]</sup>

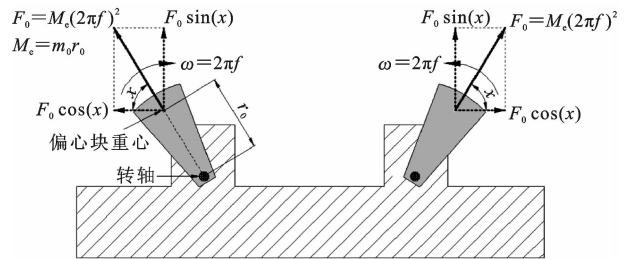


图 3 激振器工作原理  
Fig. 3 Working principle of vibration exciter

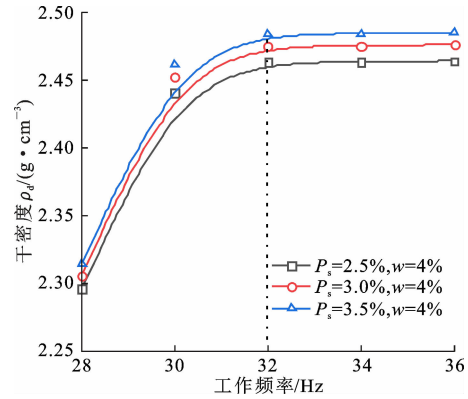


图 4 CTB-50 干密度-工作频率之间关系  
Fig. 4 Relationships between CTB-50 dry density and working frequency

质量分别为 122、180 kg,振动时间为 120 s。

由图 4 可知:工作频率不超过 30 Hz 时,随工作频率增大,CTB-50 干密度增大幅度较大;工作频率超过 32 Hz 时,干密度不再随工作频率变化。这可能是因为工作频率在 28~30 Hz 时,振动激振力不够,振动系统中振动锤无法起跳,被压材料压实效果较差。随工作频率增大,激振力提高,振动锤起跳更充分,被压材料压实效果有较大幅度提高。此外,当工作频率在 28~30 Hz 时,振动过程中紧固螺丝与减震器产生共振,使得装有被压材料的圆柱体试模在垂直方向产生一定程度移动,不利于被压材料压实和 VVTE 工作寿命。随着工作频率增大,该现象

减弱,被压材料干密度显著提升。当工作频率在 30~32 Hz 时,工作频率提供充足激振力,振动锤起跳充分,振动过程中 VVTE 紧固螺丝和减震器共振较小,被压材料充分压实,在 32 Hz 时干密度趋于稳定。当工作频率再增大,被压材料干密度变化不大,但 VVTE 工作频率过高,振动锤跳离被压实材料表面,VVTE 剧烈晃动,严重影响其使用寿命。综上所述,考虑被压材料振动压实效果以及试验操作便利性,建议 CTB-50 的 VVTE 工作频率为 32 Hz。

3.3 工作质量对 CTB-50 干密度和级配的影响

工作质量为上车质量和下车质量总和。VVTE 工作质量计算如下

$$M=221.3+6.9S+4.4X \tag{1}$$

式中: $M$ 为上、下车系统总质量; $S$ 为上车系统配重块数量,每块上车系统配重块质量为 6.9 kg; $X$ 为下车系统配重块数量,每块下车系统配重块质量为 4.4 kg。

3.3.1 对干密度的影响

工作质量对 CTB-50 干密度影响见图 5。试验时水泥剂量  $P_s$  为 2.5%、3.0%、3.5%,含水率  $w$  为 4%,成型圆柱体试件时工作频率 32 Hz,振动时间 120 s,工作质量分别采用 275、291、302、318 和 329 kg。

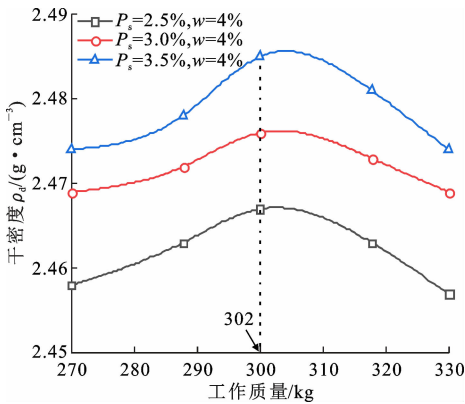


图 5 CTB-50 干密度-工作质量之间关系  
Fig. 5 Relationships between CTB-50 dry density and working quality

由图 5 可知,随工作质量提高,CTB-50 干密度先增大后减小,并在 302~318 kg 之间到达最大,但对干密度无显著差别。

3.3.2 对级配的影响

工作质量对 CTB-50 振动成型前后矿料级配影响见表 5,振动前后关键筛孔通过率差值见表 6。以 CTB-50 试件干密度相同为原则,通过控制振动时

间实现试件干密度相同。试验时水泥剂量  $P_s$  为 2.5%、3.0%、3.5%,含水率  $w$  为 4%,工作频率为 32 Hz。

表 5 CTB-50 试件振动成型前后矿料级配通过率变化  
Tab. 5 Changes of passing rate of mineral mixture before and after vibration molding of CTB-50 specimens

水泥剂量/%	工作质量/kg	振动时间/s	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%				
			53	37.5	19	9.5	4.75
			100.0	70.0	60.0	42.0	34.0
2.5	275	120	100.0	70.3	61.5	42.8	34.7
	302	107	100.0	70.6	61.8	43.0	35.0
	318	99	100.0	72.2	63.0	44.6	36.6
3.0	275	120	100.0	70.5	61.7	43.1	35.1
	302	107	100.0	70.9	62.1	43.4	35.3
	318	99	100.0	72.5	63.3	44.7	36.8
3.5	275	120	100.0	70.7	61.9	43.3	35.4
	302	107	100.0	71.1	62.3	43.5	35.5
	318	99	100.0	72.7	63.6	45.0	37.1

表 6 CTB-50 试件振动成型前后关键筛孔通过率差值  
Tab. 6 Differences of key sieve passing rate before and after vibration molding of CTB-50 specimens

水泥剂量/%	工作质量/kg	不同筛孔孔径(mm)下的通过率差/%					累积差/%
		53	37.5	19	9.5	4.75	
2.5	275	0	0.3	1.5	0.8	0.7	3.3
	302	0	0.6	1.8	1.0	1.0	4.4
	318	0	2.2	3.0	2.6	2.6	10.4
3.0	275	0	0.5	1.7	1.1	1.1	4.4
	302	0	0.9	2.1	1.4	1.3	5.7
	318	0	2.5	3.3	2.7	2.8	11.3
3.5	275	0	0.7	1.9	1.3	1.4	5.3
	302	0	1.1	2.3	1.5	1.5	6.4
	318	0	2.7	3.6	3.0	3.1	12.4

由表 5、表 6 可知,CTB-50 达到相同干密度时,随工作质量增大,振动对级配破坏程度增大。结合课题组前期有关路面材料振动方法对参数的研究可知<sup>[23-28]</sup>,工作质量在 290~300 kg 时,压实效果达到最佳且比较稳定,结合振动压路机设计上、下车系统工作质量比为 0.6~1.0,取 VVTE 上、下车质量为 122、180 kg。

3.4 名义振幅

VVTE 工作实际振幅为工作振幅  $A^{[30]}$ 。 $A$  是 VVTE 随机参数,并不直接可控,故采用名义振幅  $A_0$  评价 VVTE 工作时振动压实特性。 $A_0$  仅与静偏心距  $M_e$  和下车质量  $m_x$  有关,用下式计算

$$A_0 = \frac{M_e}{m_x} \tag{2}$$

VVTE 振幅增大则可提高被压材料压实效果,

但振幅过大对压实不利。分析其原因是,振幅过大使被压材料出现过压实现象,使被压材料结构变得松散,且振幅过大会过度损耗振动设备零部件,对振动设备本身影响较大。因此,根据大量试验研究并结合振动压路机名义振幅取值范围(0.8~1.2 mm),选取 VVTE 名义振幅  $A_0=1.2$  mm。

3.5 VVTE 选型标准

综合考虑压实效果和试验便利性,选取 VVTE 工作参数见表 7。

表 7 VVTE 工作参数  
Tab. 7 VVTE working parameters

工作参数	上车质量/kg	下车质量/kg	工作频率/Hz	名义振幅/mm
技术要求	122	180	32	1.2

4 垂直振动试验方法及可靠性验证

4.1 振动时间的确定

施工现场影响 CTB-50 压实效果关键因素为材料性能及含水率、压路机类型及性能、压实遍数。除了 VVTE 工作参数之外,影响 CTB-50 室内最佳含水率和最大干密度的关键因素为振动时间。若振动时间过长,标准密度过大,施工现场难以达到要求。反之,标准密度过小,现场无需严格控制设备与工艺即可轻松达到要求,压实质量无法保证。因此,为有效确保现场压实效果并指导现场施工,结合现场压路机性能及最大可压实水平,确定室内振动压实时间,是继 VVTE 选型标准确定之后的振动压实试验方法必须解决的第 2 个关键问题。

振动时间对 CTB-50 干密度影响见图 6。试验时水泥剂量  $P_s$  为 3%,含水率  $w$  为 4%,成型圆柱体试件时工作频率为 32 Hz,上、下车质量为 122、180 kg。

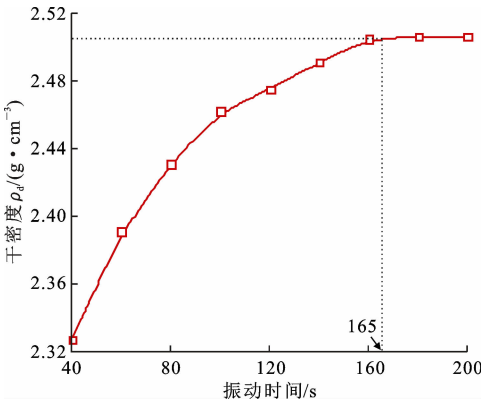


图 6 CTB-50 干密度-振动时间之间关系

Fig. 6 Relationships between CTB-50 dry density and vibration time

由图 6 可知,随振动时间增大,CTB-50 干密度

呈增大趋势,当振动时间增大到 100 s 时,CTB-50 干密度增大趋势减缓,继续增大振动时间对增大 CTB-50 干密度贡献较小,当振动时间超过 165 s 时,CTB-50 干密度不再随之变化。综合考虑被压材料振动压实效果以及试验操作便利性,建议 CTB-50 振动时间为 165 s。

4.2 CTB-50 垂直振动试验方法

垂直振动试验方法包括垂直振动击实试验方法和垂直振动成型方法。采用垂直振动击实试验方法确定 CTB-50 最大干密度  $\rho_{dmax}$  和最佳含水率  $w_{opt}$ ;采用垂直振动成型方法成型  $\Phi$ 、 $h$  均为 200 mm 的 CTB-50 圆柱体试件。

4.2.1 垂直振动击实试验方法

首先,拌制 5 或 6 组不同含水率的湿混合料,将 1 组制备好的湿混合料按四分法装入  $\Phi 200$  mm  $\times$   $h 230$  mm 的试模中,每次装料后用捣棒对四周和中心进行插捣,确保混合料插捣均匀;其次,将装满湿混合料的试模固定在垂直振动击实仪底部,放下振动器使振动锤与被压材料接触,振动击实 165 s;然后,升起振动器,脱模并量取试件高度,高度控制在  $(160 \pm 10)$  mm,计算干密度;重复上述步骤 5 或 6 次,得到每组混和料拌和含水率和干密度,以拌和含水率为横坐标、干密度为纵坐标绘制  $\rho_d-w$  关系曲线,驼峰形曲线顶点纵横坐标分别是最大干密度  $\rho_{dmax}$  与最佳含水率  $w_{opt}$ 。

4.2.2 试件垂直振动成型方法

首先,按照垂直振动击实试验方法确定的  $w_{opt}$  和  $\rho_{dmax}$ ,配置 3~5 组湿混合料,建立振动时间与试件高度关系,求得试件振动击实高度为 200 mm 的时间为 120 s,取 120 s 为振动成型时间。其次,将装有湿混合料的试模固定在垂直振动击实仪底板上,振动击实直至试件高度为 200 mm;然后,将试件脱模,准确对其质量和高度进行测量,试验前后质量损失不大于 45 g,试件高度误差在  $-0.1 \sim 0.3$  mm 之间。试件称量后立即放入塑料袋密封,并用湿巾覆盖移至养生室。

4.3 VVTM 可靠性验证

室内试验结果能否真实、客观且准确地预测现场路面实际性能,是检验试验方法好坏的唯一标准。通过对比分析相同条件下室内成型试件力学性质与现场 CTB-50 芯样力学性质相关性,评价 VVTM 的可靠性。

CTB-50 芯样和 VVTM 试件抗压强度测试值及比值见表 8。试验段位于郑西(郑州—西峡)高速



栾双(栾川—双龙)段 LSZCB-1 项目段太平互通 D 匝道,现场取回水泥稳定碎石湿混合料进行室内振动成型,将成型完毕的试件埋入试验段,与试验段水泥稳定碎石采用完全相同条件进行养护。试验段 CTB-50 水泥稳定碎石水泥剂量采用 3.0%。 $R_{cx0.95}$ 、 $R_{cv0.95}$  分别为芯样和 VVTM 试件的试验结果代表值,平行试件为 6 个, $\bar{R}$  为其结果平均值, $C_v$  为变异系数。根据表 8 可知,VVTM 试件 7 d 抗压强度约为芯样的 91%,二者相关程度较高。

表 8 芯样与 VVTM 试件 7 d 抗压强度对比  
Tab. 8 Comparisons of 7 d compressive strength between core sample and VVTM specimens

成型方法	平行试件强度测试值/MPa						$\bar{R}$ /MPa	$C_v/\%$	$R_{cx0.95}/R_{cv0.95}$	
	1	2	3	4	5	6			MPa	
芯样	8.77	8.13	8.21	9.56	8.49	8.73	8.65	6.0	7.80	0.91
VVTM	8.32	7.63	8.22	7.52	7.42	7.79	7.82	4.8	7.20	

5 结 语

(1)研究了试件尺寸对 CTB-50 力学强度的影响,提出了 CTB-50 圆柱体试件尺寸。结果表明:随试件尺寸增大,松散区界面效应减弱,试件有效承压面积增大,表现为强度测试值增大;当试件  $\Phi$ 、 $h$  均为 200 mm 时,松散区界面效应对试件强度测试值无显著影响;考虑试验易操作性,建议 CTB-50 圆柱体试件  $\Phi$ 、 $h$  均为 200 mm。

(2)研究了 VVTE 振动参数对 CTB-50 干密度和级配的影响,提出了 VVTE 选型标准。结果表明:随工作频率增大,CTB-50 干密度先急剧增大,工作频率超过 32 Hz 时干密度不再随之变化;随工作质量增大,CTB-50 干密度呈近似抛物线变化,工作质量为 302 kg 时干密度达最大,且上车质量 122 kg、下车质量 180 kg 时,振动对 CTB-50 级配破坏较小;建议 VVTE 的工作频率 32 Hz、上车质量 122 kg、下车质量 180 kg、名义振幅 1.2 mm。

(3)研究了 CTB-50 干密度和振动时间的关系,提出了 CTB-50 垂直振动试验方法(VVTM),并依托实体工程验证了 VVTM 可靠性。结果表明:随振动时间延长,CTB-50 干密度先急剧增大,振动时间超过 165 s 时干密度不再随之变化;确定最大干密度和最佳含水率的振动时间为 165 s,制备圆柱体试件的振动时间为 120 s;CTB-50 的 VVTM 试件力学强度和现场芯样的相关性达 91%。

(4)本文仅基于理论分析和室内试验提出适应于 CTB-50 的合理试件尺寸,确定适应于 CTB-50

的 VVTE 振动参数和振动时间,下一步将对 CTB-50 的力学特性、疲劳特性和结构荷载响应等展开研究,提出控制开裂破坏的 CTB-50 VVTM 设计方法。

参考文献:  
References:

[1] DENG C Q,JIANG Y J,TIAN T, et al. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted cement-stabilized macadam[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(11):1435-1445.

[2] 张 阳,王傲鹏,张靖霖,等. 水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(2):297-311.  
ZHANG Yang,WANG Ao-peng,ZHANG Jing-lin, et al. Dry shrinkage in cement-stabilized macadam: A review [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(2):297-311.

[3] 曾梦澜,罗 迪,吴超凡,等. 不同级配类型水泥稳定碎石路面基层材料的抗裂性能 [J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(10):1-7.  
ZENG Meng-lan,LUO Di,WU Chao-fan, et al. Anti-cracking properties of cement stabilized crushed stone pavement base materials of different aggregate structures [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2013,40(10):1-7.

[4] 毕玉峰,聂晨亮,蒋应军,等. 超大粒径 CTB-50 劈裂强度增长规律与影响因素[J]. 公路,2022,67(9):38-43.  
BI Yu-feng,NIE Chen-liang,JIANG Ying-jun, et al. Growth law of splitting strength and influencing factors of super-large particle size CTB-50 [J]. Highway,2022,67(9):38-43.

[5] 谭 波,杨 涛. 基于振动旋转压实制样方式骨架密实型大粒径级配碎石性能研究[J]. 中外公路,2022,42(5):161-166.  
TAN Bo,YANG Tao. Research properties of skeleton-density large graded macadam based on gyratory and vibration compaction [J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(5):161-166.

[6] 杨 明,蒋应军,李明杰,等. CTB-50 水泥稳定碎石抗冻性能研究[J]. 公路,2023,68(1):46-51.  
YANG Ming,JIANG Ying-jun,LI Ming-jie, et al. Research on frost resistance of CTB-50 cement stabilized macadam[J]. Highway,2023,68(1):46-51.

- [7] YI Y, JIANG Y J, TIAN T, et al. Mechanical-strength-growth law and predictive model for ultra-large size cement-stabilized macadam based on the vertical vibration compaction method [J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126691.
- [8] 国计凯. 超大粒径嵌挤结构水稳破口砾石路面基层试验研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.  
GUO Ji-kai. Experimental study on water-stable broken gravel pavement base with ultra-large particle size embedded structure [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [9] 关笑楠. 大粒径水泥稳定碎石抗裂性能试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
GUAN Xiao-nan. Experimental study on crack resistance of large-size cement stabilized macadam [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [10] 上官宇浩. 超大粒径 CTB-50 水泥稳定碎石路用性能及设计方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.  
SHANGGUAN Yu-hao. Research on road performance and design method of super large size CTB-50 cement stabilized macadam [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [11] 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, 36(6): 17-25.  
LI Li-han, HUANG Pu, LIU Dong. Impact on performance of cement stabilized macadam mixtures between gyratory compaction and static compaction methods [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 17-25.
- [12] 刘 栋, 李立寒. 旋转压实成型水泥稳定类基层材料试验 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 118-128.  
LIU Dong, LI Li-han. Experiment on gyratory compaction of cement stabilized base course materials [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 118-128.
- [13] 王 龙, 解晓光. 水泥稳定碎石振动与静压成型物理力学指标关系 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 70-74.  
WANG Long, XIE Xiao-guang. Relationship on index of physics and mechanics cement-stabilized aggregates between vibrating and static compacting methods [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 70-74.
- [14] 田耀刚, 石帅锋, 肖 燕, 等. 成型方式对厚层水泥稳定碎石基层路用性能影响 [J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(3): 278-282.  
TIAN Yao-gang, SHI Shuai-feng, XIAO Yan, et al. Effect of molding methods on pavement performance of thick cement stabilized macadam base [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(3): 278-282.
- [15] 薛万安. 大厚度水泥稳定碎石基层施工质量控制关键技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.  
XUE Wan-an. Research on key technologies of construction quality control of thick cement stabilized macadam base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [16] 纪小平, 王 涛, 周泽洪, 等. 振动法水泥稳定砾石的力学疲劳特性与强度标准 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 761-767, 774.  
JI Xiao-ping, WANG Tao, ZHOU Ze-hong, et al. Mechanical and fatigue properties as well as strength criteria of cement stabilized gravel produced by vibration compaction method [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5): 761-767, 774.
- [17] 曾梦澜, 薛子龙, 谷世君, 等. 开级配水泥稳定碎石基层路用性能的试验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(4): 579-583.  
ZENG Meng-lan, XUE Zi-long, GU Shi-jun, et al. Trial study on the pavement performance of open graded cement stabilized aggregate base [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(4): 579-583.
- [18] 袁可佳, 蒋应军, 邓长清, 等. 水泥稳定破碎砾石垂直振动成型试验方法评价 [J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(3): 288-296.  
YUAN Ke-jia, JIANG Ying-jun, DENG Chang-qing, et al. Evaluation of cement-stabilized crushed gravel compacted using vertical vibration testing method [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(3): 288-296.
- [19] 刘树堂, 夏建平, 高雪池, 等. 压实土体试件动力学参数室内测试 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 1-9.  
LIU Shu-tang, XIA Jian-ping, GAO Xue-chi, et al. Laboratory test of kinetic parameters of compacted soil specimen [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(4): 1-9.
- [20] JIANG Y J, FAN L F. An investigation of mechanical behavior of cement-stabilized crushed rock material using different compaction methods [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 508-515.



- [21] 聂桂海,李伟聪,李 浩. 水泥稳定碎石力学特性研究 [J]. 公路,2021,66(1):44-50.  
NIE Gui-hai, LI Wei-cong, LI Hao. Research on mechanical properties of cement-stabilized aggregate [J]. Highway, 2021, 66(1): 44-50.
- [22] 马士宾,杨鑫玮,徐文斌,等. 水泥稳定碎石基层材料微裂力学特性研究 [J]. 公路工程,2017,42(4):159-163,190.  
MA Shi-bin, YANG Xin-wei, XU Wen-bin, et al. Study on mechanical properties of microcracking of cement stabilized crushed stone base materials [J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 159-163, 190.
- [23] 蒋应军,李湾湾,方 剑,等. 振动压实二灰碎石力学特性及影响因素 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 1-9.  
JIANG Ying-jun, LI Wan-wan, FANG Jian, et al. Mechanical properties and influencing factors of lime-fly-ash crushed rock base on vertical vibration test method [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(1): 1-9.
- [24] 赵 伟,蒋应军,陈浙江,等. 水基聚合物 SRX 稳定碎石路用性能 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 598-603.  
ZHAO Wei, JIANG Ying-jun, CHEN Zhe-jiang, et al. Road performance of water-based polymer SRX stabilized crushed stone [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 598-603.
- [25] 蒋应军,沈 彬,陈冠希. 垂直振动压实水泥冷再生混合料劈裂强度特性 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 9-16, 58.  
JIANG Ying-jun, SHEN Bin, CHEN Guan-xi. Splitting strength properties of cement cold recycling mixtures based on vertical vibration compaction [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(2): 9-16, 58.
- [26] 蒋应军,富志鹏,李宁方. 基于胶浆原理的二灰碎石设计方法 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(5): 8-14, 33.  
JIANG Ying-jun, FU Zhi-peng, LI Ning-fang. Design method of LSCR based on mortar theory [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(5): 8-14, 33.
- [27] DENG C Q, JIANG Y J, LIN H W, et al. Mechanical-strength-growth law and predictive model for cement-stabilized macadam [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 582-594.
- [28] 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: 1-13.
- [29] 邹桂莲,吴 欣,刘新海. 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 [J]. 中外公路, 2019, 39(6): 254-258.  
ZOU Gui-lian, WU Xin, LIU Xin-hai. Influence of size effect and molding process on unconfined compressive strength of inorganic binder stabilized materials [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 254-258.
- [30] JTG E51—2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].  
JTG E51—2009, Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering[S].