
T/CECS G: ***-**-2018

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

填充式大粒径水泥稳定碎石基层

施工技术规范

Technical Specification for Filled with large Diameter Cement Stabilized Gravel Base

征求意见稿

中国工程建设标准化协会发布

Issued by Association for Engineering Construction Standardization

前 言

根据中国工程建设标准化协会公路[2017]36号文《关于开展2017年第一批中国工程建设标准化协会标准(CECS G)制修订项目编制工作的通知》的要求,由长安大学承担《填充式大粒径水泥稳定碎石基层施工技术规程》的制定工作。

本规程采用的填充式大粒径水泥稳定碎石新型路面基层结构,有效地克服了半刚性基层的收缩裂缝和柔性基层的网裂、变形等病害,编制单位经过近二十年的研究和500余公里的道路使用、观测,经分析论证和广泛征求国内专家意见,以提高路面结构耐久性、打造道路长寿命为目标,完成本规程的制定工作。

本规程由7个章和2个附录构成。

请各有关单位在执行过程中,发现的问题和意见,函告本规程日常管理组,联系人:(地址: ; 邮编: ; 电话: ; 传真: ; 电子邮箱:)以便修订时参考。

主编单位:长安大学

参编单位:滁州市公路管理局

滁州市公路勘测设计院

滁州市交通工程检测中心

滁州市路桥工程有限责任公司

皖东天达路桥工程有限公司

全椒县通达交通建设工程有限公司

滁州市公路工程有限责任公司

主编:沙爱民

主要参编人员:蒋新明、胡力群、郑舟、李昶、马峰、袁晓胜、朱玉虎、周勇、李寿高。

目 次

1	总则	1
2	术语	5
3	原材料要求	6
3.1	一般规定	6
3.2	水泥	6
3.3	大粒径碎石	7
3.4	填充料中的集料	8
3.5	水	10
4	混合料组成设计	12
4.1	一般规定	12
4.2	大粒径碎石空隙率	12
4.3	填充料配合比设计	12
4.4	大粒径碎石与填充料的比例	13
5	结构设计	15
5.1	填充式大粒径水泥稳定碎石材料可作为沥青路面结构中的基层设计使用	15
5.2	填充式大粒径水泥稳定碎石应按照柔性基层材料进行路面结构设计	15
5.3	回弹模量	15
6	施工工艺	21
6.1	一般规定	21
6.2	大粒径碎石摊铺	21
6.3	填充料的拌合	22
6.4	I型填充料摊铺	23
6.5	混合料整体路拌	23

6.6	撒布 II 型填充料.....	25
6.7	碾压.....	25
6.8	接缝处理.....	25
6.9	养生与交通管制.....	26
7	施工质量标准与控制.....	27
7.1	一般要求.....	27
7.2	材料检验.....	28
7.3	施工过程检测.....	30
7.4	质量检查验收.....	32
附录 A	填充式大粒径水泥稳定碎石材料回弹模量试验方法.....	34
附录 B	填充式大粒径水泥稳定碎石材料.....	38

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为提高公路沥青路面基层抗裂性，延长公路使用寿命，制定本规程。

条文说明

填充式大粒径水泥稳定碎石，是一种刚柔复合材料，由大粒径主骨料组成框架，水泥稳定碎石填充料填充空隙，强度主要来源于主骨料间的框架嵌锁作用，填充料起到稳固主骨料框架作用。传统的水泥稳定碎石为半刚性材料，具有强度较高、承载力强的优点，缺点是易产生收缩裂缝；级配碎石为柔性材料，具有无收缩裂缝的优点，缺点是刚度低，易变形，产生网裂下沉。该材料将上述两者优点进行复合，并克服两者缺点，是一种新型的路面材料，整体呈现柔性特征，并具有良好的承载力。

填充式大粒径水泥稳定碎石材料具有以下优点：

1、克服收缩裂缝

由于该材料具有柔性特征，因此不会出现如半刚性材料的收缩裂缝。2005年以来，滁州市公路局先后在一、二级及三级公路上应用300余公里，最长已观测12年；2015年开始，湖北省荆州、荆门等市先后应用200余公里，上述路段无收缩裂缝。

2、合适的模量

柔性基层材料如级配碎石的回弹模量一般在300MPa左右，半刚性材料如普通水泥稳定碎石的抗压回弹模量在1800MPa左右，填充式大粒径水泥稳定碎石的回弹模量一般为900~1000MPa，介于两者之间，使该材料不仅具有很好的抗裂性能，也具有足够的承载力。

3、抗变形能力强

该材料骨架内填充材料由水泥胶结成型，具有一定的刚度，且与骨料完全契合，使骨架的嵌锁更加稳定，阻止了骨架位移，保证了基层具有较强的抗变形能力。

4、耐久性能好

主骨料的粒径较大，有很好的嵌锁作用，同时与粒径较小的填充材料形成较大的断档，减少了填充料对主骨料框架的干涉，增强了骨料间的嵌锁力，使该材料结构随着行车荷载尤其是重载的反复作用，嵌锁结构更加稳定，呈现出良好的耐久性和抗重载特性。

安徽省 S206 滁州至全椒段一级公路：2006 年改造，长 6.8 公里，路面宽 23 米，加铺结构为：18cm 普通水泥稳定碎石基层+17cm 填充式大粒径水泥稳定碎石新基层+10cm 沥青面层（非改性沥青）。在极重交通下使用 12 年后，检测结果见表 1.0.1-1。

表 1.0.1-1 安徽省 2006 滁州至全椒段一级公路检测结果

	基层 平整度合格率 (%)	面层平整 度合格率 (%)	弯沉代表值 (0.01mm)	车辙		网裂下沉	收缩裂缝	
				基层	面层		基层	面层
2006 年验收	85.0	95.1	11.6	-	-	-	-	-
2018 年检测	---	90	10.3	无	有	无	无	无

从检测结果看，道路整体状况良好，基层无收缩裂缝和车辙，承载能力未降低；沥青面层有零星坑槽，有车辙，无网裂。安徽省 S331 等 5 条道路实施应用观测情况见表表 1.0.1-2。

表1.0.1-2 安徽省S331等5条道路实施应用观测情况

工程名称	安徽省 S331 全椒段	安徽省 X003 滁梁路	安徽省 S311 滁州至定远段	湖北省公安县 207 国道	
公路等级	二级	三级	二级	二级	
长度 (KM)	28	19	3.8	2.5	
路面结构	18cm 填充式大粒径水泥稳定碎石新基层+6cm 沥青面层	17cm 填充式大粒径水泥稳定碎石新基层+5cm 沥青面层	18cm 填充式大粒径水泥稳定碎石基层+10cm 沥青混凝土面层	18cm 填充式大粒径水泥稳定碎石基层+8cm 沥青面层	
完工日期 (年)	2014	2005	2010	2015	
设计弯沉值 (0.01mm)	30.8	35	27.6	21.7	
2017 年实测	弯沉代表值 (0.01mm)	21	33.4	23.7	11.0
	裂缝	无	无	无	无
	网裂	无	无	无	无

同期实施的 s311 皖苏交界全滁州段、s101 滁州段、s205 天长段等 200 余公里，沥青混凝土路面，基层结构采用水泥稳定碎石，均出现了收缩裂缝，平均间距为 15~20 米。

1.0.2 本规程规定了填充式大粒径水泥稳定碎石基层的材料性质、组成设计、施工技术以及施工质量检查与验收要求。

1.0.3 本规程适用于一级及以下公路沥青路面基层设计与施工。

1.0.4 应采用符合本规程的原材料、施工配合比、施工工艺和质量标准与控制规定。在满足工程技术标准要求的前提下，应优先选用经济合理的当地材料。

1.0.5 质量保障应贯穿于施工全过程，加强各工序质量控制与管理，

保证工程质量。

1.0.6 应建立健全安全生产管理制度及应急预案，严格执行安全操作规程，保障施工人员的职业健康和施工安全。

1.0.7 应注重节约用地，降低能源和材料消耗，保护环境。

征求意见稿

2 术语

2.0.1 填充式大粒径水泥稳定碎石基层 Filled with large diameter cement stabilized gravel base

填充式大粒径水泥稳定碎石基层是用大粒径碎石形成骨架，将集料最大粒径较小的水泥稳定碎石填充料填充骨架空隙，经充分压实后形成路面结构层。填充式大粒径水泥稳定碎石基层的强度主要来源为大粒径碎石骨架间的嵌锁作用，填充料起到稳固大粒径碎石骨架的作用。

条文说明

该结构层与传统水泥稳定碎石相比具有一定的柔性特征。

2.0.2 大粒径碎石 large grain-size macadam

31.5~53mm、37.5~63mm、53~73mm 单一粒径的规格碎石。

2.0.3 填充料 filling material

最大粒径为 9.5mm、13.2mm 或 19.5mm 连续级配的水泥稳定碎石混合料。

3 原材料要求

3.1 一般规定

3.1.1 材料运至现场后，应抽样检测，检测合格后方可使用。

3.1.2 相同料源、规格、品种的原材料作为一批，应分批检测和储存。

3.1.3 在原材料试验评定中，应随机选取具有足够数量的样本进行材料试验。

条文说明

足够数量指满足现行试验规程或相关设计文件中所规定的试验样本数量。

征求意见稿

3.2 水泥

3.2.1 水泥应符合国家相关标准的要求，初凝时间应大于 3h，终凝时间应大于 6h，且小于 10h。宜采用 32.5 或 42.5 号普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥，禁止使用快硬水泥、早强水泥及受潮变质水泥。

条文说明

一般情况下，普通水泥可满足要求。有特殊要求的，可采用 GB/T35162-2017 道路基层用缓凝硅酸盐水泥。

3.2.2 采用散装水泥时，水泥出炉后应停放 7d 以上，且安定性检测

合格后才能使用。运至工地的散装水泥入罐温度应低于 50℃，使用时若高于此温度，应采取降温措施。冬季施工，水泥入拌缸温度应高于 10℃。

3.2.3 水泥质量指标应符合现行试验规程或相关设计文件中的规定。

3.3 大粒径碎石

3.3.1 大粒径碎石宜采用各种硬质岩石反击破碎工艺加工成的碎石，应表面清洁、无风化、富有棱角、质地坚硬。

条文说明

石料富有棱角，有利于使骨料处于嵌锁状态。坚硬的石料形成稳定骨架结构可保证基层具有足够的承载力和抵抗变形的能力。

3.3.2 大粒径碎石技术要求应满足表3.3.2的规定。

表3.3.2 大粒径碎石技术要求

指标	单位	技术要求	试验方法
压碎值	%	≤22	JTG E42 T 0316
表观密度	g/cm ³	≥2.50	JTG E42 T 0304
针片状颗粒含量	%	≤18	JTG E42 T 0312
0.075mm以下粉尘含量	%	≤1.2	JTG E42 T 0310
软石含量	%	≤3	JTG E42 T 0320

3.3.3 粒径范围

大粒径碎石规格宜按表 3.3.3 选用，对于交通量大、荷载较重的公路尽可能使用粒径较大的规格。

表3.3.3 大粒径碎石规格要求

通过质量百分率% 公称尺寸 (mm)	筛孔尺寸 (mm)					
	73	63	53	37.5	31.5	26.5
53~73	100	—	0~10			
37.5~63		90~100	—	0~15	0~5	
31.5~53			90~100	—	0~15	0~5
26.5~37.5				90~100	—	0~5

条文说明

大粒径骨料规格尽量单一，孔隙率较稳定，有利于骨料和填料比例的控制。

3.4 填充料中的集料

3.4.1 填充料中的粗集料

1 粗集料应表面清洁、干糙、无风化、无杂质，其技术要求应满足表 3.4.1 的规定。

表3.4.1 粗集料技术要求

指标	单位	技术要求	试验方法
压碎值	%	≤26	JTG E42 T 0316
表观密度	g/cm ³	≥2.50	JTG E42 T 0304
针片状颗粒含量	%	≤18	JTG E42 T 0312
小于0.075mm颗粒含量	%	≤1.2	JTG E42 T 0310
软石含量	%	≤3	JTG E42 T 0320

2 粗集料公称最大粒径应满足填充料级配的要求，规格应符合《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20）的规定。

3.4.2 填充料中的细集料

1 细集料应洁净、干燥、无风化、无杂质，并有适当的颗粒级配。

2 细集料质量技术要求应满足表 3.4.2 的规定。

表3.4.2 细集料技术要求

项目	单位	技术要求	试验方法
颗粒分析	—	满足级配要求	JTG E42T0327
塑性指数 ^a	%	≤7	JTG E40 T 0118
有机质含量	%	< 2	JTG E42T0336
硫酸盐含量	%	≤0.25	JTG E42T 0341

注：^a应测定 0.075mm 以下材料的塑性指数。

3 细集料规格要求应符合《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20）的规定。

4 细集料中小于 0.075mm 的颗粒含量应不大于 15%。

3.4.3 填充料级配

1 填充料分为 I 型和 II 型两种：I 型填充料用作填充大粒径碎石内部空隙；II 型填充料用作填充大粒径碎石表面开口空隙。

2 填充料应由不少于 2 种规格的材料掺配而成，级配应符合表 3.4.3

的规定。

表3.4.3 填充料级配范围

类 型	通过方筛孔 (mm) 的质量百分率 (%)										
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
I 型	100	86~100	73~90	57~77	30~50	19~36	12~26	8~19	5~14	3~10	2~7
			100	75~100	42~71	27~51	18~36	10~24	6~18	4~13	2~7
				100	43~73	25~52	17~39	12~29	8~21	5~15	2~7
II 型				100	43~73	25~52	17~39	10~24	6~16	4~10	0~5

条文说明

填充料中的集料的最大粒径应与骨料粒径形成较大的断档，最大限度的减少对大粒径碎石骨架的干扰，使骨料能够很好地嵌锁。若大粒径碎石选用 53~73mm 碎石，则填充料中的集料的最大粒径宜选用 19.0mm；若大粒径碎石选用 31.5~53 或 37.5~63mm 碎石，则填充料中的集料的最大粒径宜选用 13.2mm；若大粒径碎石选用 26.5~37.5mm 碎石，则填充料中的集料的最大粒径宜选用 9.5mm。

3.5 水

3.5.1 符合现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749) 的饮用水可直接作为拌合与养生用水。

3.5.2 拌合使用非饮用水应进行水质检验，技术要求应符合表3.5.2 的规定。

表3.4.2 非饮用水技术要求

项次	项目	技术要求	试验方法
1	pH值	≥ 4.5	JGJ 63
2	Cl ⁻ 含量 (mg/L)	≤ 3500	
3	SO ₄ ²⁻ 含量 (mg/L)	≤ 2700	
4	碱含量 (mg/L)	≤ 1500	
5	可溶物含量 (mg/L)	≤ 10000	
6	不溶物含量 (mg/L)	≤ 5000	
7	其他杂质	不应有漂浮的油脂和泡沫及明显的颜色和异味	

征求意见稿

4 混合料组成设计

4.1 一般规定

填充式大粒径水泥稳定碎石配合比设计包括大粒径碎石空隙率的测定、I型和II型填充料的配合比设计以及大粒径碎石与填充料的重量比例设计。

4.2 大粒径碎石空隙率

按照《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005)中粗集料堆积密度及空隙率试验(T0309-2005)规定,测定大粒径碎石振实状态下的空隙率,作为填充料用量的计算依据。

4.3 填充料配合比设计

4.3.1 I型填充料

- 1 填充料集料采用连续级配,其配合比参照普通水泥稳定碎石材料组成设计方法确定。
- 2 水泥剂量不低于 8%。
- 3 7天无侧限抗压强度不低于 6.0MPa。

4.3.2 II型填充料

- 1 填充料中 2.36mm 以下细集料采用河砂或机制砂。
- 2 填充料集料采用连续级配,其配合比参照普通水泥稳定碎石材料组成设计方法确定。
- 3 水泥剂量不低于 12%。
- 4 7天无侧限抗压强度不低于 10.0MPa。

征求意见稿

条文说明

普通细集料中粉料过高时，干燥易起尘，遇水易冲刷，采用河砂或机制砂可消除该现象，增强层间粘结，减少水损害。

4.4 大粒径碎石与填充料的比例

4.4.1 根据大粒径碎石振实后的空隙率体积、填充料的最佳含水量和最大干密度以及压实后的填充料的富裕体积，可按式（5.4.1）计算填充料的体积 V_t 。

$$V_t = V + V_f \quad (5.4.1)$$

式中： V ——振实后大粒径碎石的空隙体积；

V_f ——填充料的富余体积。

V_f 一般取 V 的 6%~10%。 V_f 通常情况下取中值；对于新建道路、老路下承层较为平整、大粒径碎石粒径波动较小时，可取小值；对于老路不平整、大粒径碎石粒径波动较大、施工管理水平较低时，宜取大值。

条文说明

为使填充式大粒径水泥稳定碎石中填充料均匀、密实地填充于大粒径碎石骨架空隙中，填充料体积应有一定富余。已有的工程实践表明：填充料大于 10% 会影响大粒径碎石的骨架形成，填充料小于 6% 会影响填充料的密实和骨架结构稳定性。

4.4.2 计算填充料与大粒径碎石的质量比

1 应按式（5.4.2-1）计算填充料的质量 m_t 。

$$m_t = V_t \times \rho_t \quad (5.4.2-1)$$

式中： V_t ——填充料的体积；

ρ_t ——填充料的击实最大干密度

2 应按式 (5.4.2-2) 计算大粒径碎石的质量 m_s 。

$$m_s = (1 - V_t) \times \rho_s \quad (5.4.2-2)$$

式中: V_t ——填充料的体积;

ρ_s ——大粒径碎石的表观密度

3 应按式 (5.4.2-3) 计算填充料与大粒径碎石的质量比 ω

$$\omega = m_t / m_s \quad (5.4.2-3)$$

式中: m_t ——填充料的质量;

m_s ——大粒径碎石的质量。

4.4.3 I 型填充料占填充料质量总量的 90%，II 型填充料占填充料质量总量的 10%。

征求意见稿

5 结构设计

5.1 填充式大粒径水泥稳定碎石材料可作为沥青路面结构中的基层设计使用。

5.2 填充式大粒径水泥稳定碎石应按照柔性基层材料进行路面结构设计。

条文说明

填充式大粒径水泥稳定碎石的实际服役状态为带微裂纹工作，类似于级配碎石，但回弹模量和抗压能力更高。结构设计中，参照含级配碎石层路面结构进行计算分析，不考虑该层承受拉应力（应变）。

5.3 回弹模量

5.3.1 填充式大粒径水泥稳定碎石基层材料的回弹模量应参照附录A，采用动态三轴压缩模量测试方法确定。

条文说明

填充式大粒径水泥稳定碎石主要用作沥青路面基层，其结构与参数测试应符合《公路沥青路面设计规范》的相关要求。该材料在实际服役状态下为带裂纹工作，其抗压强度主要来源于大粒径颗粒骨架及其与水化后填充料之间的嵌挤作用，应作为粒料类材料看待。按照现行规范要求，其抗压回弹模量应选用粒料类材料的动态三轴回弹模量测试方法，采用动三轴试验仪进行测试。

然而，设计规范中相关试验方法在成型试件时，筛除了 26.5mm

以上颗粒，试件尺寸为：直径×高度=φ150mm×300mm，与填充式大粒径水泥稳定碎石的粒径范围不匹配，实际操作中试件制备困难，且考虑到试件中大粒径颗粒对均匀性的影响，试件直径应适当增加；另一方面，增加试件直径会带来重量增加、成型困难、操作不便等一系列负面影响。综合以上两方面因素影响，且考虑到该材料基层厚度一般不超过 20cm，因此将试件直径设定为 200mm，高度不变。除了试件尺寸变化带来的相应调整外，其他均应参照沥青路面设计规范中附录 D“粒料类材料回弹模量试验方法”执行。

参照规范中附录 D 的试验后数据处理方法，回弹模量计算公式采用的计算参数主要为应力指标，与试件尺寸不直接相关。采用了非线性拟合方式确定回归公式中的回归常数，因此试件直径增加后无需改变回弹模量的计算方法。参考对不同高径比单轴抗压试件尺寸效应的试验研究成果，高径比从 2.0 减小到 1.5 后，其回弹模量增加幅度在 10% 以内。

试件直径较大，且含有大粒径颗粒，制件应采用压力试验机。根据组成设计成果，按一定比例称量单个试件所需主骨料和填充料，分 4~5 次灌入试模中，每次灌入后用夯棒轻轻均匀插实，将上垫块放入试模内，放到压力机上，加载并维持压力，重复该过程直至试件完成后，带模具一起送入养生室，待养生 7d 后脱模进行试验。

根据设备调研，动三轴压力室的尺寸一般均可以满足试件直径 200mm 的要求。试件尺寸的增加将导致加载要求的提高，根据该材料使用层位，实际工作条件下，其顶面压应力不会超过 1MPa，此压力均布在试件顶面时，所需的竖向荷载为 31.4kN，设备所能提供的有效竖向加载能力应不小于该值。

5.3.2 在初步设计或不具备试验条件时，建议设计参数按表 5.3.2 取

值。

表5.3.2 填充式大粒径水泥稳定碎石的设计参数取值范围

指标	回弹模量 (MPa)	泊松比
取值范围	800~1500	0.25

条文说明

该材料在研究与应用过程中,进行了大量的室内外试验,其中,回弹模量作为重要的设计参数也进行了多项试验研究,共分为3个阶段。

第一阶段为材料组成设计研究阶段进行的室内顶面法回弹模量测试。此阶段参照水泥稳定碎石材料顶面法测试,部分测试数据如表5.3.2-1和5.3.2-2所示。测试数据范围约在1000~2000MPa之间。

表5.3.2-1 顶面法回弹模量测试数据(第一次试验)

试件编号	校正后回弹模量		试件编号	校正后回弹模量	
1	1227		11	1742	
2	1620		12	1937	
3	1993		13	1890	
4	1597		14	1561	
5	1882		15	1652	
6	1219		16	1237	
7	1288		17	1287	
8	1762		18	2076	
9	1435		19	1628	
10	1536		20	————	
校正后回弹模量	平均值	标准差	偏差系数	最大值	最小值

	1609 MPa	274 MPa	17.0%	2076 MPa	1219 MPa
--	----------	---------	-------	----------	----------

表5.3.2-2 顶面法回弹模量测试数据（第二次试验）

试件编号	回弹模量MPa		试件编号	回弹模量MPa	
1	1028		13	975	
2	975		14	1377	
3	963		15	950	
4	1034		16	1057	
5	1363		17	1011	
6	1736		18	1451	
7	1230		19	1740	
8	1210		20	1202	
9	1210		21	1568	
10	1315		22	1633	
11	958		23		
12	1108		24		
校正后回弹模量	平均值	标准差	偏差系数	最大值	最小值
	1232 MPa	259.6 MPa	21.1%	1740 MPa	950 MPa

第二阶段为现场试验段研究阶段进行的现场承载板测试和模量反算。选择基础状况良好的地段修筑大型试槽，试槽尺寸 3.5m×20m，在试槽内选取 9 个测点，在基础顶面和养生 7d 后的 15cm 填充式大粒径水泥稳定碎石层顶面上，按测点位置分别测试抗压回弹模量，应用 BISAR 程序逐次迭代，反算出水稳填充大粒径碎石基层的抗压回弹模

量, 结果如表 5.3.2-3 所示。现场施工变异性较大, 在剔除其中最大和最小的两组数据, 其范围约在 600~1000MPa 之间。

表5.3.2-3 现场承载板试验反算回弹模量

测点编号	铺筑前顶面模量(MPa)	铺筑后顶面模量(MPa)	模量反算结果(MPa)	平均值(MPa)	标准差(MPa)	变异系数
1	218	312	950	1091	790	72.4%
2	416	678	2980			
3	260	428	1935			
4	392	454	818			
5	443	504	883			
6	377	344				
7	290	336	611			
8	645	610	776			
9	369	352	454			

第三阶段为《公路沥青路面设计规范》出台后补充进行的动态回弹模量测试。2017年新规范发布后, 根据该材料实际服役状态, 参照“粒料类材料回弹模量试验方法”进行了补充试验, 测试数据范围约在 1200~2500MPa 之间。

水稳填充大粒径碎石的力学性质介于优质骨架密实型级配碎石和普通水泥稳定碎石之间, 根据现有的研究成果, 前者的动态回弹模量取值范围在 300~500MPa 之间, 后者的动态回弹模量测试数据一般不小于 1700MPa, 水稳填充大粒径碎石的回弹模量在两者之间。

前期研究的国省干线公路试验段工程中, 一般用 18~20cm 的水稳填充大粒径碎石等厚度替代普通水泥稳定碎石基层。根据新规范对柔

性基层沥青路面的设计指标要求，在极重交通等级下，等厚度替代普通水泥稳定碎石基层时，从结构受力和疲劳寿命角度出发，水稳填充大粒径碎石的模量最小值应不小于 800MPa。

过高的模量要求会导致成本提高，且从受力和结构疲劳寿命角度看，对柔性基层沥青路面并没有显著改善。综上，适宜的模量范围为 800~1500MPa，不具备试验条件时，按此选取。具备试验条件时，回弹模量按实测数据取值。

泊松比取值参照《公路沥青路面设计规范》中的相关规定，对“粒料”类泊松比取值为 0.35，对“无机结合料稳定类材料”取 0.25。虽然从结构强度来源看，水稳填充大粒径碎石应看作粒料类材料，但由于其材料表现出的模量远高于级配碎石，且采用了无机结合料，因此泊松比取为 0.25。

征求意见稿

6 施工工艺

6.1 一般规定

6.1.1 施工前，建设单位应组织设计、施工、监理等单位进行技术交底，施工单位应进行施工组织设计，施工、监理人员应培训后上岗。

6.1.2 下承层验收合格后，方可以进行上结构层施工。

6.1.3 正式开工之前，应铺筑不小于 200m 的试验段，确定施工工艺和质量控制要求。

1 填充式大粒径水泥稳定碎石基层施工时，填充料采用厂拌法生产，混合料整体采用路拌法施工。

2 摊铺试验段时，根据填充式大粒径水泥稳定碎石基层的设计厚度、大粒径碎石空隙率以及填充料的最大干密度，确定摊铺段所需的大粒径碎石与填充料的比例和质量，并在试验段内均匀分层摊铺，分别确定大粒径碎石和填充料的松铺厚度系数。

6.1.4 应采用流水作业法施工，使各工序紧密衔接，尽量缩短从拌和到碾压终了之间的延迟时间。延迟时间不应超过水泥初凝时间，否则混合料应予以废弃。

6.2 大粒径碎石摊铺

6.2.1 摊铺设备

- 1 大粒径碎石应采用稳定材料摊铺机摊铺。
- 2 当摊铺条件受限，三级及以下等级道路可采用挖掘机等其他设

备摊铺大粒径碎石。

6.2.2 摊铺厚度

摊铺大粒径碎石时，松铺厚度根据摊铺试验段确定。

6.2.3 摊铺工艺

- 1 摊铺过程中按设计标高带钢丝绳，记录基层厚度。同时边部要有侧挡，保证边部压实效果。
- 2 摊铺过程中随时检查摊铺厚度、平整度和大粒径碎石分布的均匀性。
- 3 摊铺前应将大粒径碎石洒水至表面湿润状态。

条文说明

摊铺过程中，大粒径碎石应洒水使表面湿润，可起到润滑作用，减少摊铺阻力和机械磨损。

施工中大粒径碎石一般采用石料运输车从石料厂直接拉至施工现场，进行摊铺，在装运过程中，大粒径碎石容易夹杂部分细集料及粉料，摊铺后，可能形成“集窝”，影响基层的配合比的，因此，在大粒径碎石摊铺后，必须进行检查，如出现细集料集中现象，应及时处理，并补充大粒径碎石。

6.3 填充料的拌合

6.3.1 填充料拌合设备

填充料采用稳定材料拌合设备拌和。

6.3.2 填充料拌合工艺(按《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T

F20) 的规定)

- 1 填充料的含水量控制在最佳含水量。
- 2 每天按检测频率检查填充料的各项技术指标。

6.4 I 型填充料摊铺

6.4.1 摊铺设备

填充料采用挖掘机配合人工摊铺。

6.4.2 摊铺厚度

根据试验段确定的大粒径碎石和填充料的之间的比例来确定填充料的铺筑厚度。

6.4.3 摊铺工艺

1 根据试验段确定的填充料的厚度，带“米”字线用人工配合挖掘机均匀摊铺，用自卸车运输到现场专人指挥卸料。

2 根据摊铺大粒径碎石时的厚度记录，按比例调整填充料的摊铺厚度。

6.4.4 混合料摊铺应保证足够的厚度，碾压成型后每层的厚度宜不小于 160mm，最大厚度宜不大于 200mm。

6.4.5 具有足够的摊铺能力和压实功率时，可增加碾压厚度，具体的摊铺厚度应根据试验结果确定。

6.5 混合料整体路拌

6.5.1 路拌设备

采用的路拌设备拌合能力及参数应能保证大粒径碎石被彻底翻起，并和填充料一起均匀自由落下。

条文说明

路拌设备一般功率不小于 60kW，转速要求为 150rpm。

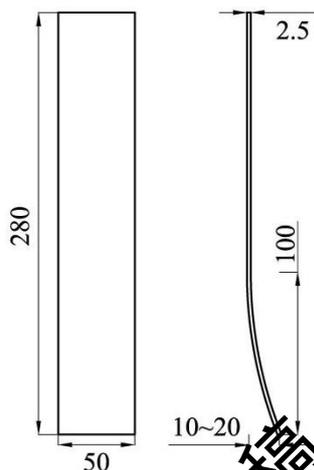


图6.6.1 拌和机刀具尺寸(单位: mm)

6.5.2 路拌工艺

1 待 I 型填充料按规定均匀摊铺在大粒径碎石上后,采用拌和设备将其均匀地翻拌一遍,每次翻拌前检查旋耕刀片,要求刀片完整,刀片缺损要及时更换。

2 旋耕拌和从边部向中间翻拌,翻拌时纵向应重叠 15~20cm,不得有遗漏处。

3 拌和过程中,应有专人现场挖坑检查翻拌均匀性、填充料在大粒径碎石中填充情况、填充料是否填充至结构层底,如不符合要求应重新翻拌。

4 边部、横、纵向接缝要翻拌到位。

5 为防止过度翻拌造成大粒径碎石和填充料之间发生离析,拌和设备停车前就应该同时提起旋耕刀片。

6 检查平整度和路拱,必要时进行人工修整。

6.6 撒布 II 型填充料

6.6.1 用装载机配合人工对表面开口空隙进行撒布填充，并使其均匀。

6.6.2 表层填充料不宜过多，以防表面形成薄层、结壳。碾压过程中，对于局部开口空隙进行找补。

6.7 碾压

6.7.1 碾压设备宜采用 22J 以上的振动压路机及胶轮压路机（或 18~21T 及以上三轮压路机）。

6.7.2 碾压工艺

1 振动压路机振动碾压 4~6 遍，胶轮压路机（或 18~21T 三轮压路机）静压 2-3 遍。

2 加强对中缝、边部部位的振动压实，以确保边部密实。

3 直线段碾压时，压路机应从外侧向路中心碾压；平曲线有超高路段，由低侧向高侧、自内向外碾压。

4 碾压作业应在水泥初凝前完成，基层表面无明显轮迹。

6.8 接缝处理

6.8.1 横缝应与路中心线垂直设置。

6.8.2 后一施工段施工时，应将前一施工段靠近衔接处 1—2m 位置的混合料用挖掘机挖除，换填新的混合料（或人工将此段填充料清除换填新的填充料）。

6.8.3 两幅合拢时，纵向施工缝需处理。刨除已施工半幅的混合料，至密实处止，断面应垂直。

6.9 养生与交通管制

6.9.1 碾压结束并经检查合格后，对施工路段应采取洒水养生，养生时间不少于 7d。

6.9.2 洒水养生应符合下列要求：

- 1 每天洒水次数应视气候而定。高温期施工，宜上、下午各洒水 2 次。
- 2 养生期间，稳定材料层表面应始终保持湿润。
- 3 养生用洒水车应采用喷雾式喷头，严禁采用高压式喷管，以免破坏基层结构。

6.9.3 交通管制

7 天养生期内，晴天无需封闭交通，雨天应封闭交通。

征求意见稿

7 施工质量标准与控制

7.1 一般要求

7.1.1 施工质量标准与控制包括所用材料检验、施工过程检测和工程完工后的质量检查验收。

7.1.2 必须建立、健全工地试验，质量检查及工序间的交接验收等项制度。试验、检验应做到原始记录齐全，数据真实可靠。

7.1.3 施工过程中发现质量缺陷时，应加大检测频率；必要时停工整顿，查找原因。

7.1.4 施工关键工序宜拍摄照片或录像，作为现场记录保存。

7.1.5 施工结束后，应清理现场，处理废弃物，恢复耕地或绿化，做到工完场清。

7.1.6 一级公路，应在拌和厂内或距离不超过 1 km 的范围内设有功能完备的试验室。

7.1.7 在施工过程中，应配备有相关试验资质的试验操作人员。同时应明确每个质量控制环节上的责任人。

条文说明

工程质量的過程化控制，关键在于人。工地试验室的人员配置是保证生产过程中质量控制的必要措施之一。

7.2 材料检验

7.2.1 在施工前以及在施工过程中，原材料或混合料发生变化时，应检验拟采用材料。

7.2.2 用作大粒径碎石和填充料的粗集料,应按表 7.2.2 所列试验项目和要求检测评定。

表7.2.2 大粒径碎石和填充料用粗集料试验项目和要求

项次	实验项目	目的	频度	实验方法
1	含水率	确定原始含水率	每天使用前测 2 个样品	JTG E42T 0305
2	级配	确定级配是否符合要求，确定材料配合比	每档碎石使用前测 2 个样品，使用过程中每 2000m ³ 测 2 个样品	JTG E42T 0303
4	表观密度、吸水率	评定粒料质量，计算固体体积率	使用前测 2 个样品，使用过程中每 2000m ³ 测 2 个样品，碎石种类变化重做 2 个样品	T 0304/T 0308
5	压碎值	评定石料的抗压碎力是否符合要求		JTG E42T 0316
6	粉尘含量	评定石料质量		JTG E42T 0310
7	针片状颗粒含量	评定石料质量		JTG E42T 0312
8	软石含量	评定石料质量		JTG E42T 0320

7.2.3 用作填充料的细集料，应按表 7.2.3 所列试验项目和要求检测评定。

表7.2.3 填充料用细集料试验项目和要求

项次	实验项目	目的	频度	实验方法
1	含水率	确定原始含水率	每天使用前测 2 个样品	JTG E42/T0332
2	级配	确定级配是否符合要求, 确定材料配合比	每档材料使用前测 2 个样品, 使用过程中每 2000m ³ 测 2 个样品	JTG E42 T 0327
3	液限、塑限	求塑性指数, 审定是否符合规定	每种细集料使用前测 2 个样品, 使用过程中每 2000m ³ 测 2 个样品	JTG E40 T 0118
4	有机质和硫酸盐含量	确定是否适宜于用水泥稳定	有怀疑时做此实验	JTG E42T 0336/T 0341

7.2.4 用作填充料的水泥, 应按表 7.2.4 所列试验项目和要求检测评定。

表7.2.4 填充料用水泥试验项目和要求

项次	实验项目	目的	频度	实验方法
1	水泥强度等级和初、终凝时间	确定水泥的质量是否适宜应用	做材料组成设计时测 1 个样品, 料源或强度等级变化时重测	JTG E30 T 0505/T 0506

7.2.5 初步确定使用的填充料应按表 7.2.5 所列试验项目和要求检测评定。

表7.2.5 填充料试验项目和要求

项次	实验项目	目的	频度	实验方法
1	重型击实试验	最佳含水率和最大干密度	材料发生变化时	JTG E51 T 0804
2	抗压强度	填充料配合比试验及施工期间质量评定	每次配合比试验	JTG E51 T 0805
3	延迟时间	确定延迟时间对填充料密度和抗压强度的影响, 确定施工允许的延迟时间	水泥品种变化时	JTG E51 T 0805
4	绘制 EDTA 标准曲线	对施工过程中水泥剂量有效控制	水泥品种变化时	JTG E51 T 0809

7.3 施工过程检测

7.3.1 施工过程中的质量控制应包括外形尺寸检查及内在质量检验两部分。

7.3.2 外形尺寸检查项目、频度和质量标准应符合表 7.3.2 的规定。

表7.3.2 外形尺寸检查项目、频度和质量标准

工程类别	项 目		频 度	质 量 标 准	
				一级公路	二级及二级以下公路
基 层	纵断高程 (mm)		二级及二级以下公路每 20m 1 点；一级公路每 20m 1 个断面，每个断面 3~5 点	+5 ~- 10	+5 ~- 15
	厚度 (mm)	均值	每 1500 ~ 2000m ² 6 点	≥-8	≥-10
		单个值		≥-10	≥-20
	宽度 (mm)		每 40m 1 处	>0	>0
	横坡度 (%)		每 100m 3 处	±0.3	±0.5
	平整度 (mm)		每 200m 2 处，每处连续 10 尺 (3m 直尺)	≤8	≤12
连续式平整度仪的标准差 (mm)			≤3.0	—	

7.3.3 根据施工工艺，施工过程中的内在质量控制应分为后场质量控制和前场质量控制。

7.3.4 后场质量控制的项目、内容应符合表 7.3.4 的规定，实际检测频率应不低于表中的要求，检测结果应满足本规程或具体工程的技术要求。

表7.3.4 施工过程中后场质量控制的关键内容

项目	内容	频率
原材料抽检	水泥质量	每批次
	大粒径碎石级配、规格	每批次
	大粒径碎石品质	每批次

	填充料用的粗细集料级配、规格	异常时，随时试验
	填充料用的粗细集料品质	异常时，随时试验
填充料抽检	填充料级配	每 2000m ² 1 次
	水泥剂量	每 2000m ² 1 次
	含水率	每 2000m ² 1 次

7.3.5 前场质量控制的项目、内容应符合表 7.3.5 的规定，实际检测频率应不低于表中的要求，检测结果应满足本规程或具体工程的技术要求。

表7.3.5 施工过程中前场质量控制的关键内容

项目	内容	频率
大粒径碎石摊铺	摊铺厚度	逐桩检查
填充料摊铺	摊铺厚度	逐桩检查
	含水率状态	随时
混合料整体路拌目测	拌和均匀性	随时
碾压目测	压实机械是否满足	随时
	碾压组合、次数是否合理	随时
填充料强度	在前场取样成型制件	每个作业段不少于 6 个
固体体积率检测	固体体积率	每个作业段检测 3 次以上
大粒径碎石与填充料的质量比检测	挖坑法，试坑尺寸不小于为50cm×50cm（全深）。同时目测填充料的填充密实状态。	每个作业段检测 3 次以上
钻孔检测	-----	每个作业段不少于 3 个
弯沉检测	-----	每个评定路段（不超过 1km） 每车道 40~50 个测点

7.3.6 应在现场碾压结束后及时进行大粒径碎石与填充料的质量比检查和固体体积率检测。

1 大粒径碎石与填充料的质量比检查中，发现比例不满足要求时，应分析原因并采取必要的措施。

2 固体体积率检测应按照附录 B，采用灌砂试验方法测定。

7.3.7 龄期 7~14 d 时，应钻孔检查其整体性。成孔率不低于 90%，孔壁基本完整，不能出现较多的孔洞。

条文说明

施工气温较高时（平均温度 20℃ 以上），可在龄期达到 7 天时进行取芯检查，施工气温较低时（平均温度 20℃ 以下），应适当延迟取芯时间。

7.3.8 应在养生 7~14d 内检测，不满足要求时，应返工处理。

7.4 质量检查验收

7.4.1 基本要求

- 1 大粒径碎石应符合本规程和设计要求；
- 2 填充料最大粒径、水泥剂量和矿料级配应符合设计要求；
- 3 大粒径碎石和填充料的比例应按组成设计要求控制准确，在允许范围内波动。
- 4 路拌深度应达层底，翻拌均匀，及时消除离析现象。
- 5 从填充料加水拌合到碾压終了的时间不应超过水泥初凝时间。
- 6 检测合格后，应立即保湿养生，养生应符合本规程要求。

7.4.2 检查内容应包括工程完工后的外形和质量两方面，外形检查的要求应符合表 7.3.2 的规定。

7.4.3 宜以 1km 长的路段为单位评定路面结构层质量。

7.4.4 应检查施工原始记录，对检查内容初步评定。

7.4.5 应随机抽样检查，不得带有任何主观性。固体体积率、厚度、水泥剂量检测样品和取芯等的现场随机取样位置的确定，应按相关标准的要求执行。

7.4.6 厚度检查时，厚度平均值的下置信限 \bar{X}_L 应不小于设计厚度减去均值允许误差。厚度平均值的下置信限应按式(7.4.6)计算。

$$\bar{X}_L = \bar{X} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (7.4.6)$$

式中： \bar{X} ——厚度平均值；

S——厚度标准差；

n——样本数量；

t_{α} ——t 分布表中随自由度和保证率（或置信度 α ）而变的

系数，对一级公路应取保证率 99%，对二级及二级以下公路可取保证率 95%。

7.4.7 各项技术指标质量应符合表 7.4.7 的规定。

表7.4.7 质量合格标准值

检查项目	检查数量 ^a	标准值	极限低值
固体体积率	3~6 处	87%	82%
大粒径碎石和填充料的质量比	3~6 处	设计值	±5%
填充料的强度	按 JTG F80/1-2004 附录 G 检查	符合设计要求	-----
弯沉值	按 JTG F80/1-2004 附录 I 检查	符合设计要求	-----

注：^a以每天完成段落为评定单位时，检查数量可取低值；以 1km 为评定单位时，检查数量应取高值。

附录 A 填充式大粒径水泥稳定碎石材料回弹模量试验方法

A.1 适用范围

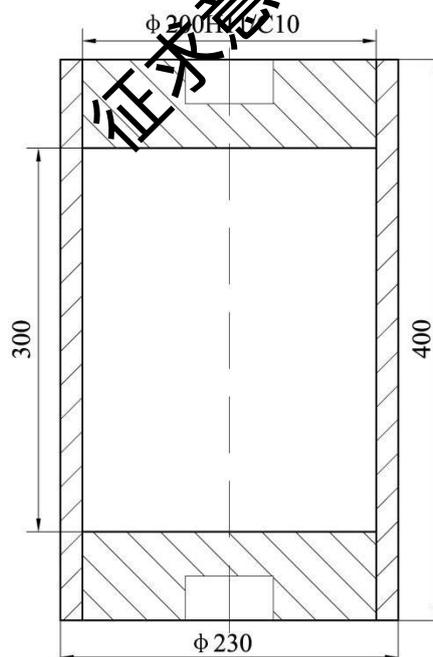
A.1.1 本方法适用于采用动态三轴压缩试验测试填充式大粒径水泥稳定碎石材料的回弹模量。

A.1.2 成型试件可采用静载压实或振动压实等方法。

A.2 仪器设备

A.2.1 试模：

试件尺寸为直径×高度=φ200×300mm，试模的尺寸如图所示：



图A--1 圆柱形试模和垫块设计尺寸（尺寸单位：mm）

注：H11/C10表示垫块和试模的配合精度

A.2.2 电动脱模器

A.2.3 压力试验机:量程不小于 2000kN, 行程、速度可调。

A.2.4 钢板尺:量程 400mm, 最小刻度 1mm.

A.2.5 游标卡尺:量程 400mm。

A.2.6 电子天平:量程 15kg, 感量 1g; 量程 5000g, 感量 0.01g

A.2.7 动三轴试验仪等应符合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)附录 D《粒料类材料回弹模量试验方法》的相关要求。

A.3 试验准备

A.3.1 制备试件时主骨料应筛除粒径大于 53mm 的颗粒, 至少应制备 13 个试件。

A.3.2 根据本规程填充式大粒径水泥稳定碎石配合比设计方法, 计算试件的主骨料质量、填充料的质量。

A.3.3 大粒径碎石(即主骨料)准备

取具有代表性的风干试料, 按《公路工程集料试验规程》测定其表观密度、空隙率、风干含水率等, 备用。

A.3.4 填充料准备

1 按照《公路工程集料试验规程》T0804—1994 确定填充料的最佳含水量和最大干密度。

2 在预定做试验的前一天, 取有代表性的试料测定其风干含水率。将准备好的填充料用材料分别装入塑料袋中备用。

3 按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0843-2009 要求, 制备填充料。拌和均匀的加有水泥的填充料应在 1h 内按下述方法制成试件, 超过 1h 的填充料应该作废。

A.4 试件制备

A.4.1 采用压力试验机制作。

A.4.2 将试模配套的下垫块放入试模的下部, 但外露 2cm 左右。将称量的规定数量的主骨料和混合均匀的填充料分 4~5 次灌入试模中, 每次灌入后用夯棒轻轻均匀插实。然后将与试模配套的上垫块放入试模内, 也应使其外露 2cm 左右 (即上、下垫块露出试模外的部分应该相等)。

A.4.3 将整个试模 (连同上下垫块) 放到压力机上, 以 1mm/min 的加载速率加压, 直到上下垫柱都压入试模为止。维持压力 2min。

A.4.4 解除压力后, 取下试模, 试件带模具一起送入养护室养生, 待养生 7d 后, 放到脱模器上将试件顶出。

A.4.5 在脱模器上取试件时, 应用双手抱住试件侧面的中下部, 然后沿水平方向轻轻旋转待感觉到试件移动后, 再将试件轻轻捧起, 放置到试验台上。切勿直接将试件向上捧起。

A.4.6 检查试件的高度和质量, 不满足成型标准的试件作为废件。

A.4.7 试件称量后应立即放在塑料袋中封闭, 并用潮湿的毛巾覆盖, 移放至养生室养生。

A.5 试验步骤和计算

按《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2017）附录 D《粒料类材料回弹模量试验方法》的相关要求执行。

征求意见稿

附录 B 填充式大粒径水泥稳定碎石材料 固体体积率试验方法

B1 目的与适用范围

B1.1 本方法适用于在现场测定填充式大粒径水泥稳定碎石基层的各种材料压实层的固体体积率。

B1.2 固体体积率为固体体积与所测试洞体积比值的百分率。

B1.3 检测原理是用常规的灌砂法测定现场开挖试洞的体积，将挖起的集料烘干后用排水法测定集料的固体体积。

B2 仪器与材料技术要求

B2.1 直径 200mm 的灌砂筒及附件一套:包括标定罐、基板。

B2.2 量砂: 粒径 0.3~0.6mm 清洁干燥的砂, 约 20~40kg。

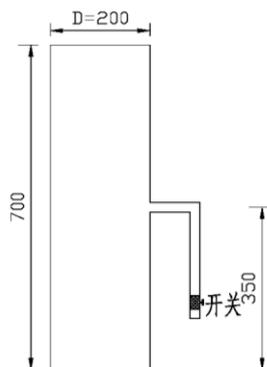
B2.3 试样盒: 容积不小于 5000cm³ 普通塑料盒。

B2.4 台称: 称量 20kg, 感量不大于 1g。

B2.5 天平: 称量 10kg, 最小分度值 0.1g。

B2.6 试样烘干器具: 如烘箱、试样盘等。

B2.7 虹吸筒: 内径 $\Phi 200\text{mm}$, 高 700mm, 在高 350mm 处设带开关的出水口。



虹吸筒示意图 (单位: mm)

B2.8 接水杯：容积不少于 8000cm^3 。

B2.9 搅拌棒：直径 $\Phi 1\text{cm}$ ，长 100cm 金属棒。

B2.10 其它：凿子、铁锤、长把勺、长把小簸箕、毛刷等。

B 3 试验准备

按照《公路路基路面现场测试规程》（JTG E60-2008）的灌砂法（T0921-2008）标定量砂的松方密度 ρ_s 。

B 4 试验步骤

B4.1 测定试坑体积

1 在试验地点，选一块平坦表面，并将其清扫干净，其面积不得小于基板面积。

2 在灌砂筒筒口高度上，向灌砂筒内装砂至距筒顶的距离 15mm 左右为止。称取装入筒内砂的质量 m_1 ，准确至 1g 。以后每次标定及试验都应该维持装砂高度与质量不变。

3 将基板放在平坦表面上，并将盛有量砂（ m_1 ）的灌砂筒放在基板中间的圆孔上。将灌砂筒的开关打开，让砂流入基板的中孔内，直到储砂筒内的砂不再下流时关闭开关。取下灌砂筒，并称量筒内砂的质量 m_2 ，准确至 1g 。

4 取走基板，并将留在试验地点的量砂收回，重新将表面清扫干净。

5 将基板放回清扫干净的表面上（尽量放在原处），沿基板中孔凿洞（洞的直径与灌砂筒一致）。在凿洞过程中，应注意不使凿出的材料丢失，并随时将凿松的材料取出装入试样盒内。试洞的深度应等于测定层厚度，但不得有下层材料混入，最后将洞内的全部凿松材料取出。

6 将基板安放在试坑上，将灌砂筒安放在板中间（灌砂筒内放

满砂到要求质量 m_3)，使灌砂筒的下口对准基板的中孔及试洞，打开灌砂筒的开关，让砂流入试坑内。在此期间，应注意勿碰动灌砂筒。直到灌砂筒内的砂不再下流时，关闭开关。仔细取走灌砂筒，并称量筒内剩余砂的质量 m_4 ，准确至 1g。

7 仔细取出试筒内的量砂，以备下次试验时再用。若量砂的湿度已发生变化或量砂中混有杂质，则应该重新烘干、过筛，并放置一段时间，使其与空气的湿度达到平衡后再用。

B4.2 测定试样的固体体积

1 将挖出的全部试样，放在洁净的试样盆中，放入烘箱内烘干至恒量后取出，冷却至室温。

2 用天平称量接水杯的质量 m_5 ，准确至 1g。

3 将虹吸筒放在平整的地方，打开溢流口开关，注水入虹吸筒，直到溢流口有水溢出时停止注水，等到溢流口流水停止时关闭开关。

4 把已烘干冷却的试样缓慢加入虹吸筒中，用搅拌棒插捣、搅拌水下的试样，排除试样中的气体，搅拌时勿使水溅出筒外，静置 5min；待虹吸筒中的悬浮物沉降后，将接水杯放在出水口下，打开开关，放出虹吸筒内因固体加入而排走的水，待不再有水流出后，闭上开关。

5 取出已盛水的接水杯，用天平称其质量 m_5 ，准确至 1g。并测量接水杯内水的温度 t 。

B 4 计算

B4.1 按式 (B-1) 计算填满试坑所用的砂的质量 m_b (g)：

$$m_b = m_3 - m_4 - (m_1 - m_2) \quad (\text{B-1})$$

式中： m_b —填满试坑所用的砂的质量 (g)；

M_3 —灌砂前灌砂筒内砂的质量 (g)；

m_4 —灌砂后，灌砂筒内剩余砂的质量（g）；

$(m_1 - m_2)$ —灌砂筒下部圆锥体内及基板和粗糙表面间砂的合计质量（g）。

B4.2 按式（B-2）计算试坑体积 V_K ：

$$V_K = m_b / \rho_s \quad (\text{B-2})$$

式中： ρ_s —量砂的松方密度

B4.3 按式（B-3）计算试样的固体体积 V_g ：

$$V_g = (m_6 - m_5) / \gamma_w \quad (\text{B-3})$$

式中： m_5 —接水杯的质量（g）；

m_6 —接水杯和排出水的质量（g）；

γ_w —试验温度 t 下的水密度（g/cm³）

B4.3 按式（B-4）计算试样的固体体积率 K_V ：

$$K_V = V_g \times 100\% / V_K \quad (\text{B-4})$$