

DB 53

云 南 省 地 方 标 准

DB53/T 1359—2025

高速公路基层磷石膏应用技术规范

2025 - 05 - 09 发布

2025 - 08 - 09 实施

云南省市场监督管理局 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 材料 2

 4.1 磷石膏 2

 4.2 水泥 2

 4.3 粉煤灰 2

 4.4 水 2

 4.5 硅酸钠 2

 4.6 固化剂 3

5 混合料设计 3

 5.1 一般规定 3

 5.2 强度要求 3

 5.3 磷石膏碎石混合料推荐级配 4

 5.4 目标配合比设计 4

 5.5 生产配合比设计 5

6 设计 5

7 施工 6

 7.1 一般规定 6

 7.2 施工准备 6

 7.3 拌和与运输 6

 7.4 摊铺与碾压 6

 7.5 养生 6

8 质量控制 7

 8.1 原材料质量检查 7

 8.2 混合料质量检查 7

 8.3 施工过程质量检查 7

9 环保要求 7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由云南省交通运输厅提出。

本文件由云南省交通运输标准化技术委员会（YNTC13）归口。

本文件起草单位：云南省交通投资建设集团有限公司、中国科学院地质与地球物理研究所、云南楚姚高速公路有限公司、交通运输部公路科学研究院、北京中岩天地科技有限公司、中路高科（北京）公路技术有限公司、北京中科新生代科技有限公司、云南交投集团投资有限公司、北京中地务实地质工程技术有限责任公司、云南会巧高速公路有限公司、云南省交通规划设计研究院有限公司、云南交投集团公路建设有限公司、云南交投集团云岭建设有限公司。

本文件主要起草人：周应新、李志清、路凯冀、钱正富、许斌、李亚军、龚万江、陈华斌、方绍林、吴尚峰、姜睿、李丹丹、仝跃、唐忠林、张金安、卫琳琳、刘志义、曾维成、杨天富、高奥东。

高速公路基层磷石膏应用技术规范

1 范围

本文件规定了高速公路基层磷石膏应用的材料、混合料设计、设计、施工、质量控制和环保要求等内容，并给出了其它等级公路基层、底基层磷石膏应用的相关要求。

本文件适用于新建、改扩建的高速公路基层、底基层的设计与施工。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 4209 工业硅酸钠
- GB 8978 污水综合排放标准
- GB 16297 大气污染物综合排放标准
- GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准
- GB/T 23456 磷石膏
- GB/T 32124 磷石膏的处理处置规范
- JTG 3430 公路土工试验规程
- JTG 3432 公路工程集料试验规程
- JTG 3441 公路工程无机结合料稳定材料试验规程
- JTG/T F20 公路路面基层施工技术细则
- HJ 557 固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

磷石膏 phosphogypsum

磷矿石在湿法制取磷酸后产生的副产品，主要成分为二水硫酸钙（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）。

3.2

水泥稳定磷石膏混合料 cement-stabilized phosphogypsum mixture

以水泥为结合料，粉煤灰、硅酸钠、高岭土、矿渣、纤维、固化剂等中的一种或多种为增强料，磷石膏为被稳定材料，加入水拌和形成的混合料，如水泥粉煤灰稳定磷石膏混合料、水泥硅酸钠稳定磷石膏混合料、水泥固化剂稳定磷石膏混合料等，以下简称“混合料”。

3.3

水泥粉煤灰稳定磷石膏混合料 cement & fly ash stabilized phosphogypsum mixture

以水泥为结合料，粉煤灰为增强料，磷石膏为被稳定材料，通过加入水拌和形成的混合料。

3.4

水泥硅酸钠稳定磷石膏混合料 cement & sodium silicate stabilized phosphogypsum mixture

以水泥为结合料，硅酸钠为增强料，磷石膏为被稳定材料，通过加入水拌和形成的混合料。

3.5

水泥稳定磷石膏碎石混合料 cement & gravel stabilized phosphogypsum mixture

以水泥为结合料，碎石、磷石膏为被稳定材料，加入水拌和形成的混合料。

4 材料

4.1 磷石膏

4.1.1 对拟用于高速公路路面基层的磷石膏产地、产量、运距等进行调查，并根据不同工艺来源选取代表性样品进行无害化处理和检验。磷石膏原材料的质量要求应符合表 1 的规定。

表 1 磷石膏原材料质量要求

项目	单位	指标	分析方法
二水硫酸钙（CaSO ₄ •2H ₂ O）（干基）	%	≥65 ^a	GB/T 23456
附着水（H ₂ O）（湿基）	%	≤25	
可溶性磷（P ₂ O ₅ ）（干基）	%	≤ 0.20	
水溶性氟离子（F）（干基）	%	≤ 0.10	
水溶性氯离子（Cl）（干基）	%	≤ 0.02	
水溶性氧化镁（MgO）（干基）	%	≤ 0.30	
水溶性氧化钠（NaO）（干基）	%	≤ 0.10	
^a 半水磷石膏应根据陈化情况进行折算			

4.1.2 结块磷石膏使用前，应进行破碎和筛分处理，2.36 mm 筛孔通过率应为 100%。

4.2 水泥

应采用性能符合GB 175的普通硅酸盐水泥，其强度等级不应低于42.5。

4.3 粉煤灰

粉煤灰应符合JTG/T F20的有关规定，其中氧化铝含量应小于15%。

4.4 水

拌和用水应符合JTG/T F20的有关规定。

4.5 硅酸钠

粉末状，无混入杂质，可溶于常温水。Na₂O 与 SiO₂含量的质量比应为 1.03±0.03，其它技术要求应符合 GB/T 4209 的有关规定。

4.6 固化剂

粉末状，无混入杂物，无腐蚀性，可溶于常温水。分子量小于 600 万，水不溶物小于 10%。

5 混合料设计

5.1 一般规定

5.1.1 应根据公路等级、交通荷载等级、气候条件、路面结构形式、功能要求等进行混合料组成设计，并经技术经济比较，合理确定混合料配合比。

5.1.2 混合料可分为水泥稳定磷石膏混合料和水泥稳定磷石膏碎石混合料两类。混合料组成设计应包括原材料检验、目标配合比设计、生产配合比设计和施工参数确定，其技术要求应符合 JTG/T F20 的有关规定。

5.2 强度要求

5.2.1 混合料 7d/14d 无侧限抗压强度应满足表 2 的要求。

表 2 混合料的 7d/14d 无侧限抗压强度标准 R_d

结构层	公路等级	抗压强度 ^a (MPa)	
		重交通	中、轻交通
基层	高速公路和一级公路	3.5~4.5	3.0~4.0
	二级及二级以下公路	3.0~4.0	2.5~3.5
底基层	高速公路和一级公路	2.0~3.0	1.5~2.5
	二级及二级以下公路	1.5~2.5	1.0~2.0
^a 与普通水泥稳定级配碎石基层相比，混合料的强度增长龄期较长，而混合料的 14d 无侧限抗压强度在工程实践中更具有代表性，因此将 14d 无侧限抗压强度作为水泥稳定磷石膏混合料设计指标，将 7d 无侧限抗压强度作为水泥稳定磷石膏碎石混合料设计指标。			

5.2.2 强度试验应符合 JTG/T F20 的有关规定，并按下列步骤进行：

- 按现场压实度标准采用静压法成型试件；
- 将试件放入温度 20℃±2℃，相对湿度在 95%以上养护室内养生 6 d/13 d；
- 试件取出后浸于 20℃±2℃恒温水槽中 1 d，并使水面高出试件顶部；
- 将试件取出，称取试件质量后，按照 1 mm/min 的加载速率进行抗压试验。

5.2.3 平行试验的最少试件数量应符合表 3 的规定。试验结果的变异系数大于表 3 的规定值时，应重新试验。

表 3 平行试验的最少试件数量

材料类型	变异系数要求		
	<10%	10%~15%	15%~20%
水泥稳定磷石膏混合料	6	9	—
水泥稳定磷石膏碎石混合料	—	9	13

5.2.4 根据试验结果，按式(1)计算强度代表值 R_d^0 。

$$R_d^0 = (1 - Z_\alpha C_v) \cdot \bar{R} \dots\dots\dots (1)$$

式中： Z_α ——标准正态分布表中随保证率或置信度 α 而变的系数，高速公路和一级公路应取保证率95%，即 $Z_\alpha=1.645$ ；二级及以下公路应取保证率90%，即 $Z_\alpha=1.282$ ；
 $\bar{R}$ ——单组试件的强度平均值（MPa）；
 C_v ——单组试件的强度变异系数（%），按照JTG 3441的有关规定计算。

5.3 磷石膏碎石混合料推荐级配

- 5.3.1 磷石膏碎石或砾石的级配可按表4中推荐的级配范围选用，并宜符合下列规定：
- a) 高速公路和一级公路的级配宜符合表5中C-B-1、C-B-2的规定，C-B-1级配宜用于基层和底基层，C-B-2级配宜用于基层；
 - e) 二级及二级以下公路的级配宜符合表5中C-C-1、C-C-2、C-C-3的规定。C-C-1级配宜用于基层和底基层，C-C-2和C-C-3级配宜用于基层。

表 4 磷石膏碎石或砾石的推荐级配范围（%）

筛孔尺寸(mm)	高速公路和一级公路		二级及二级以下公路		
	C-B-1	C-B-2	C-C-1	C-C-2	C-C-3
37.5	—	—	100	—	—
31.5	—	—	100~90	100	—
26.5	100	—	94~81	100~90	100
19	86~82	100	83~67	87~73	100~90
16	79~73	93~88	78~61	82~65	92~79
13.2	72~65	86~76	73~54	75~58	83~67
9.5	62~53	72~59	64~45	66~47	71~52
4.75	45~35	45~35	50~30	50~30	50~30
< 4.75	由磷石膏代替				

5.3.2 二级及以下公路底基层采用未筛分碎石、砾石时，应符合 JTG/T F20 的有关规定。

5.4 目标配合比设计

5.4.1 混合料质量比例可按照表5推荐的范围选择，并通过试验确定。

表 5 混合料比例推荐范围

材料名称	使用层位	结合料与增强剂比例	结合料、增强剂与磷石膏比例
水泥粉煤灰稳定 磷石膏混合料	基层	水泥：粉煤灰= 15：（12~15）	水泥粉煤灰：干磷石膏=（27~30）：（70~73）
	底基层	水泥：粉煤灰= 10：（8~10）	水泥粉煤灰：干磷石膏=（18~20）：（80~82）
水泥固化剂稳定 磷石膏混合料	基层	水泥：固化剂= 15：（0.5~1）	水泥固化剂：干磷石膏=（15.5~16）：（84~84.5）
	底基层	水泥：固化剂= 12：（0.5~1）	水泥固化剂：干磷石膏=（12.5~13）：（87~87.5）
水泥硅酸钠稳定 磷石膏混合料	基层	水泥：硅酸钠= 15：（1~2）	水泥硅酸钠：干磷石膏=（16~17）：（83~84）
	底基层	水泥：硅酸钠= 10：（1~2）	水泥硅酸钠：干磷石膏=（11~12）：（88~89）
水泥稳定磷石膏 碎石混合料	基层或底基层	水泥：干磷石膏=（7~8）：（35~40）	水泥：集料：干磷石膏=（7~8）：（60~65）：（35~40）

5.4.2 按照试验确定的最佳含水率、最大干密度及压实度要求成型标准试件，测定不同结合料剂量条件下 7 d/14 d 无侧限抗压强度，确定符合设计强度要求的最佳剂量。

5.5 生产配合比设计

5.5.1 根据目标配合比确定的各档材料比例，应对拌和设备进行调试和标定，确定合理的生产参数，并应符合下列要求：

- a) 拌和设备的标定包括料斗称量精度、水泥和固化剂等结合料剂量、加水量等；
- b) 按材料比例关系，设定相应的称量参数，确定拌和设备各料仓进料速度；
- c) 按设定好的生产参数进行试拌，检验混合料生产级配。不满足要求时，应进一步调整生产参数。

5.5.2 对混合料分别进行不同成型时间条件下的强度试验，绘制相应的强度延迟时间曲线，根据设计强度的要求确定容许延迟时间，具体方法按照 JTG/T F20 进行确定。

5.5.3 通过试拌确定材料用量、拌和时间等工艺参数，具体方法按照 JTG/T F20 进行，最大干密度应以最终合成级配击实试验的结果为标准。

5.5.4 用于现场施工作业混合料中的水泥、粉煤灰、固化剂剂量、含水率应符合下列规定：

- a) 水泥、粉煤灰剂量宜比设计值增加 0.5 个百分点；
- b) 固化剂剂量宜比设计值增加 0.1 个百分点；
- c) 含水率可增加 0.5 个百分点~2.0 个百分点。

6 设计

6.1 水泥稳定磷石膏混合料结构厚度确定及路面结构验算应符合 JTG D50 的有关设计规定。设计参数采用 90 d 龄期的试验结果，材料弯拉强度和弹性模量宜采用实测值，如无实测值时，其参考范围：弯拉强度取 0.5 MPa~1.0 MPa，动态弹性模量取 1300 MPa~2200 MPa，静态弹性模量取 1000 MPa~1300 MPa。

6.2 磷石膏使用路段宜避让水源富集地、饮用水源保护区、自然保护区、地下水位高或排水不良的填方路段等。路面排水设计应考虑对周边环境的影响。

6.3 水泥稳定磷石膏混合料基层顶部应设置防水封层，宜采用热沥青同步碎石封层，热沥青的洒布量取值宜为 1.0 kg/m²~1.5 kg/m²，施工工艺应符合 JTG/T F20 的有关规定。

7 施工

7.1 一般规定

- 7.1.1 编制施工组织设计方案，做好技术交底与培训，制定交通管控方案。
- 7.1.2 基层施工前，下承层应验收合格，表面应干燥、清洁。
- 7.1.3 施工期的日最低气温应在 5℃ 以上。雨雪天气不应施工。
- 7.1.4 除执行本文件的规定外，还应符合 JTG F20 的有关规定。

7.2 施工准备

7.2.1 拌和站设置应符合以下要求：

- a) 拌和站场地应硬化，设置完善的排水设施；
- b) 磷石膏临时堆放应采用防渗漏、防雨淋、防扬尘等措施。

7.2.2 施工机械与设备应符合以下要求：

- a) 施工机械配置数量应满足施工及工期要求；
- b) 拌和设备：
 - 1) 应具备多种物料添加及计量功能；
 - 2) 宜采用两级振动拌缸，拌和能力宜大于 500 t/h；
 - 3) 磷石膏料仓应加装附着振动器、振动破拱装置。
- c) 运输车宜加装振动器协助卸料；
- d) 压路机的钢轮应采取防粘轮措施。

7.2.3 施工前，应铺筑长度不小于 200 m 试验段，验证生产配合比，确定机械配置、施工参数和施工工艺等。

7.3 拌和与运输

7.3.1 混合料应采用集中厂拌工艺。

7.3.2 混合料运输过程中应采取措施避免雨淋或阳光暴晒。

7.4 摊铺与碾压

7.4.1 应采用摊铺机进行摊铺，水泥稳定磷石膏混合料松铺系数应通过试验段确定。水泥稳定磷石膏松铺系数宜为 1.5~1.6；水泥稳定磷石膏碎石松铺系数宜为 1.3~1.4。

7.4.2 边缘应设置侧模。碾压前，可采取沿侧模处灌入水泥浆等措施保证基层边缘强度。

7.4.3 压路机应紧靠侧模，从外侧向中心开始碾压，最后碾压路中心部分，相邻碾压带应重叠 $1/3 \sim 1/2$ 的碾压轮宽度，路面两侧应多压 1 遍~2 遍。

7.4.4 每层压实厚度不宜超过 20 cm。

7.4.5 层间粘结宜撒布水泥净浆，其喷洒量宜为 $1.0 \text{ kg/m}^2 \sim 1.5 \text{ kg/m}^2$ （按水泥质量计）。

7.5 养生

7.5.1 基层表面宜采用透水无纺土工布、塑料薄膜等及时覆盖，并洒水养生，洒水车的喷头宜用喷雾式，不应用高压式喷管。

7.5.2 养生期宜不少于 14 d。养生结束后，进行下一工序前，施工车辆通行时，应有专人指挥，按规定车道行驶，且车速不应大于 30 km/h。

7.5.3 基层出现裂缝，宜采用灌缝胶、热改性沥青等措施进行封缝处理。

8 质量控制

8.1 原材料质量检查

8.1.1 在工程开始前，应对各种原材料按第 5 章的规定进行检验，并对材料数量、供应计划、料场堆放及储存情况等进行检查。施工过程中材料来源或规格发生变化时，应重新进行复核。

8.1.2 进场材料的检验项目和频度应符合表 6 的要求。

表 6 进场材料的检验项目和频度

名称	项目	频度	试验方法
磷石膏	级配	每批检1次，当1批超过2 000 t时，每2 000 t检测1次	JTG 3432
	二水硫酸钙	每批检1次，当1批超过2 000 t时，每2 000 t检测1次	GB/T 23456
	水溶性五氧化二磷	每批检1次，当1批超过4 000 t时，每4 000 t检测1次	
	水溶性氟离子	每批检1次，当1批超过4 000 t时，每4 000 t检测1次	
	pH	每批检1次，当1批超过2 000 t时，每2 000 t检测1次	
硅酸钠	质量比	每批检1次，当1批超过100t时，每100 t检测1次	GB/T 4209

8.1.3 其它材料的检查应符合 JTG/T F20 的有关规定。

8.2 混合料质量检查

含水率、水泥剂量、水泥稳定磷石膏碎石混合料级配、抗压强度的检查应符合JTG/T F20的有关规定。

8.3 施工过程质量检查

8.3.1 碾压完成后，用环刀法或灌砂法检测水泥稳定磷石膏混合料的压实度，用灌砂法检测水泥稳定磷石膏碎石混合料的压实度，其要求应符合表 7 的规定，每一作业段检查应≥6 次。

表 7 基层、底基层材料压实标准

结构层	公路等级	压实度 (%)		检验方法
		水泥稳定磷石膏混合料	水泥稳定磷石膏碎石混合料	
基层	高速公路和一级公路	≥ 94	≥ 98	JTG 3430
	二级及二级以下公路	≥ 93	≥ 97	
底基层	高速公路和一级公路	≥ 92	≥ 96	
	二级及二级以下公路	≥ 91	≥ 95	

8.3.2 成品检查项目、频度和质量标准，应符合 JTG/T F20 的有关规定。其中，水泥稳定磷石膏混合料的取芯龄期宜为 14 d，水泥稳定磷石膏碎石混合料的取芯龄期宜为 7 d。

9 环保要求

- 9.1 磷石膏贮存应采用防水淋、防扬尘、防散失等措施，并应符合 GB 18599 的有关规定。
- 9.2 磷石膏运输、拌合、基层施工等过程中污水排放标准应符合 GB 8978 的有关规定，大气污染物排放标准应符合 GB 16297 的有关规定。
- 9.3 利用磷石膏的单位应建立管理台账，包括磷石膏来源、利用路段、利用数量、环境质量检测情况、环保措施、留样检测等，并满足相关采样及监测规范，加强运营期跟踪评估。
- 9.4 磷石膏筑路材料在工程应用养护期满后取芯样，按照 HJ 557 规定方法制取的浸出液应符合表 8 的规定，浸出液的其他特征污染物控制指标宜符合表 9 的规定。

表 8 磷石膏浸出液污染物控制指标

试验项目	单位	指标	分析方法
磷酸盐（以 P 计）	mg/L	≤ 0.5	GB 8978
氟化物（以 F 计）	mg/L	≤ 10	
pH	—	6~9	

表 9 磷石膏浸出液的其他特征污染物控制指标

试验项目	单位	指标	分析方法
氨氮	mg/L	≤ 15	GB 8978
化学需氧量	mg/L	≤ 100	
总铍（Be）	mg/L	≤ 0.005	
总铜（Cu）	mg/L	≤ 0.5	
总汞（Hg）	mg/L	≤ 0.05	
总镉（Cd）	mg/L	≤ 0.1	
总铬（Cr）	mg/L	≤ 1.5	
总砷（As）	mg/L	≤ 0.5	
总铅（Pb）	mg/L	≤ 1.0	