

ICS

CCS 点击此处添加 CCS 号

DB 44

广东省地方标准

DB 44/T XXXX—XXXX

公路泡沫轻质土路基技术规范

Technical Specification for Highway Subgrades with Foamed Lightweight Soil

(送审稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

广东省市场监督管理局 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 材料与性能 3

 4.1 原材料 3

 4.2 辅助材料 4

 4.3 性能 4

5 勘察与设计 7

 5.1 一般规定 7

 5.2 勘察与调查 8

 5.3 性能设计 8

 5.4 路基断面设计 10

 5.5 附属工程设计 15

 5.6 设计计算 23

6 配合比 30

 6.1 一般规定 30

 6.2 配合比计算 30

 6.3 配合比试配 31

 6.4 配合比确定 32

7 施工 32

 7.1 一般规定 32

 7.2 施工准备 32

 7.3 现场浇筑 33

 7.4 附属工程施工 34

 7.5 养护 35

8 质量检验与评定 35

 8.1 一般规定 35

 8.2 泡沫轻质土 35

 8.3 护壁 36

 8.4 现浇顶板 37

附录 A（规范性） 吸水及软化性能试验 39

 A.1 适用范围 39

 A.2 仪器、设备 39

 A.3 试件制作及试验取样方法 39

A.4 试件吸水方法 39

A.5 泡沫轻质土吸水软化性能试验步骤 39

A.6 体积吸水率试验步骤 39

附录 B（规范性） 干湿循环性能试验制度 41

 B.1 适用范围 41

 B.2 仪器、设备 41

 B.3 试件制作及试验取样方法 41

 B.4 泡沫轻质土干湿循环步骤 41

附录 C（规范性） 表干容重、饱和容重试验 42

 C.1 适用范围 42

 C.2 仪器、设备 42

 C.3 试件制作 42

 C.4 试验步骤 42

附录 D（规范性） N_{20} 圆锥动力触探法 44

 D.1 适用范围 44

 D.2 检测设备 44

 D.3 触探方法 44

 D.4 触探频率、数量要求 44

 D.5 判定依据 44

附录 E（规范性） 填筑体钻芯法 45

 E.1 适用范围 45

 E.2 检测设备 45

 E.3 芯样钻取 45

 E.4 芯样试件加工 45

 E.5 抗压强度检测 45

 E.6 芯样完整性指数 46

 E.7 浇筑质量评价 46

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由广东省交通运输标准化技术委员会公路工程分技术委员会（GD/TC 133/SC1）归口。

本文件起草单位：广东省交通运输建设工程质量事务中心、广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司、保利长大工程有限公司、广州航海学院、广东省高速公路有限公司、广东省路桥建设发展有限公司、广东省有色工业建筑质量检测站有限公司、广东首诚建设科技有限公司、广东冠生土木工程技术有限公司、珠海交通控股集团有限公司。

本文件主要起草人：

引 言

泡沫轻质土在广东省公路路基工程中广泛应用，近年来在公路改扩建项目中的应用需求快速增长，因应用场景和需求多样，泡沫轻质土生产技术也在迭代发展，且广东地区降雨丰沛、地下水丰富对泡沫轻质土路基耐久性产生影响，泡沫轻质土路基的设计、施工形式多样，缺少统一的标准及实体质量检验与评定方法。为填补相关空白，规范泡沫轻质土路基设计、施工、检测和质量评定，确保工程质量，在总结广东省泡沫轻质土路基应用经验和参考国内外有关研究成果的基础上，制定本文件。

公路泡沫轻质土路基技术规范

1 范围

本文件规定了公路泡沫轻质土路基材料及性能、勘察设计、配合比、施工、质量检验与评定的要求。
本文件适用于各等级新建、改扩建公路以及运营期公路路基病害处治。

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 8076 混凝土外加剂 ✓
- GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行） ✓
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范 ✓
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰 ✓
- GB/T 11969 蒸压加气混凝土性能试验方法 ✓
- GB/T 17643 土工合成材料 聚乙烯土工膜 ✓
- GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉 ✓
- GB/T 33281 镀锌电焊网 ✓
- GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准
- CJJ/T 177 气泡混合轻质土填筑工程技术规程 ✓
- JC/T 2199 泡沫混凝土用泡沫剂 ✓
- JTG C20 公路工程地质勘察规范 ✓
- JTG D30 公路路基设计规范 ✓
- JTG F80/1-2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG/T D31-02 公路软土地基路堤设计与施工技术细则 ✓
- JTG/T D32 公路土工合成材料应用技术规范 ✓
- JTG/T L11 高速公路改扩建设计细则 ✓
- JG/T 406 土木工程用玻璃纤维增强筋 ✓
- JGJ 63 混凝土用水标准 ✓
- DB44/T 2418 公路路堤软基处理技术标准 ✓

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

泡沫轻质土 foamed lightweight soil

用物理方法将发泡液制备成泡沫，再将泡沫按比例混入由水泥、掺合料、外加剂和水搅拌均匀的混合浆料中，经泵送浇筑凝固成型后含有大量均匀封闭微气孔的轻质固态材料。

- 3.2
发泡剂 foaming agent
能用物理方法产生泡沫的表面活性材料。
- 3.3
发泡液 foaming liquid
发泡剂稀释后的液体。
- 3.4
稀释倍率 dilution multiple
发泡液与发泡剂的质量比。
- 3.5
发泡倍率 foaming multiple
发泡液制备的泡沫体积与发泡液体积的比值。
- 3.6
泡沫密度 foam density
泡沫的单位体积质量。
- 3.7
泡沫沉降距 foam column settlement distance
高度和直径均为108mm的泡沫柱静置1h的沉降量。
- 3.8
泡沫泌水量 foam column bleeding volume
高度和直径均为108mm的泡沫柱静置1h的泌水体积。
- 3.9
流动度 flow value
泡沫轻质土浆料流动性能指标。
- 3.10
湿容重 wet density
新拌泡沫轻质土浆料流体状态下的单位体积重量。
- 3.11
表干容重 air-dry density
泡沫轻质土试件在标准环境中密封养护 28d的单位体积重量。
- 3.12
干容重 dry density
烘干泡沫轻质土单位体积重量。
- 3.13
体积吸水率 volumetric water absorption
按试验要求泡沫轻质土试件浸泡72h后，游离水分所占体积与试件的体积比。
- 3.14
标准沉降距 standard settling-distance
泡沫轻质土拌合物在 150mm×150mm×150mm 的立方体试模中硬化后其表面的沉降距离。
- 3.15
软化系数 softening coefficient
泡沫轻质土试件浸水饱和状态下的抗压强度与同龄期标准养护状态下抗压强度的比值。

3.16

干湿循环系数 dry-wet cycle coefficient

泡沫轻质土试件经干湿循环后的抗压强度与同龄期标准养护状态下抗压强度的比值。

4 材料与性能

4.1 原材料

4.1.1 水泥宜采用强度等级为 42.5 级及以上的通用硅酸盐水泥，其性能应符合 GB175 规定。

条文说明：

水泥是制作泡沫轻质土的主要原材料。在工程应用中通常采用通用硅酸盐水泥；当有快硬要求和其他用途时，可选用快硬水泥或特殊水泥。一般情况下，建议选用42.5 级及以上的水泥，当采用 32.5 级的水泥时，使用前应进行配合比试验。

4.1.2 发泡剂性能应符合表 1 的规定。

表 1 发泡剂性能指标

性能指标	规定值
泡沫密度（kg/m³）	30~55
泡沫沉降距（mm）	≤3
泡沫泌水量（ml）	≤25

条文说明：

发泡剂的性能是保证泡沫轻质土浆料稳定性、强度和内部泡孔连通性的关键指标之一，目前国内发泡剂的整体技术水平已有显著提升，结合市场调研情况，制定表1中的指标要求。泡沫密度的范围调整至30~55kg/m³。

4.1.3 拌合用水应满足 JGJ 63 的要求。

4.1.4 掺合料应符合下列规定：

- a) 粉煤灰应采用 II 级及以上等级粉煤灰，其性能应符合 GB/T 1596 的规定；
- b) 矿渣粉应采用 S95 级及以上的粒化高炉矿渣粉，其性能应符合 GB/T 18046 的规定；
- c) 采用其他活性或部分活性矿物如石灰石粉、磷渣粉、钢渣粉、沸石粉、硅灰等做掺合料时，应符合国家相关标准的规定；
- d) 采用赤泥、陶瓷粉、建筑垃圾磨粉、细粒土、细砂等惰性材料作为掺合料时，应进行吸水性、干湿循环和干缩性试验。

条文说明：

目前国内一些项目泡沫轻质土也尝试使用了赤泥、陶瓷粉、建筑垃圾磨粉、细粒土、细砂等惰性材料作为掺合料，由于这几类矿物掺合料工程经验较少，材料来源和矿物成分不稳定；惰性材料存在吸水率高、干缩性强的特性，因此，在做配合比设计时，惰性材料组成的掺合料应满足国家、行业相关标准要求，并进行吸水性、干湿循环及干缩性试验，在性能指标满足设计要求后使用。

4.1.5 外加剂应符合下列要求：

- a) 泡沫轻质土掺入早强剂、憎水剂等外加剂时，外加剂的使用应符合 GB 8076 与 GB 50119 的要求。
- b) 外加剂使用前应与发泡剂进行适应性试验，外加剂对发泡剂性能和泡沫轻质土性能应无不良影响。

条文说明：

外加剂可能会与发泡剂相冲突，引起泡沫消泡或泡沫轻质土混合浆料沉降，因此在使用前应 与发泡剂进行适应性试验，防止影响泡沫轻质土成品的质量。

4.1.6 泡沫轻质土所用原材料的检验项目及检验方法应符合表 2 的规定。

表 2 原材料检验项目及检验方法

序号	原材料名称	检验项目	检验方法
1	水泥	比表面积、凝结时间、安定性、强度	GB 175
2	矿渣粉	比表面积、烧失量、活性指数、流动度比	GB/T 18046
3	粉煤灰	细度、需水量比、含水量、烧失量、安定性	GB/T 1596
4	发泡剂	泡沫密度、泡沫沉降距、泡沫泌水量	CJJ/T 177
5	水	pH 值、氯化物	JGJ 63

4.2 辅助材料

4.2.1 辅助材料应符合下列要求：

- a) 整体性加强材料宜采用镀锌钢丝网、玻璃纤维增强筋网或钢塑土工格栅。镀锌钢丝网性能指标按 GB/T 33281 执行，玻璃纤维增强筋网指标按 JG/T 406 执行，钢塑土工格栅技术指标按 JTJ/T D32 执行。
- b) 变形缝填缝材料宜采用 20mm~30mm 厚聚苯乙烯板或 10mm~20mm 厚夹板。
- c) 防渗土工膜厚度不宜小于 0.5mm，性能指标及试验方法按 GB/T 17643 执行。

条文说明：

a) 镀锌钢丝网、玻璃纤维增强筋网和钢塑土工格栅用于增强泡沫轻质土填筑体的整体性，预防开裂。所用钢丝网钢丝直径一般为3.0mm，间距10cm×10cm，采用镀锌网主要是由于丝径较小，防止钢丝网片在长期使用中锈蚀损坏；如采用了土工格栅替代钢丝网片，普通土工格栅抗拉刚度偏小，与泡沫轻质土模量匹配差，建议使用钢塑土工格栅，但钢塑土工格栅长期位于水位以下容易腐蚀，尤其近海地区；玻璃纤维增强筋网耐腐蚀性好，也是加强整体性的可选材料。

b) 变形缝作为泡沫轻质土分仓浇筑的隔板，本文件对厚度提出了要求，使其具备足够的强度、刚度和稳定性，能承受施工过程中产生的侧压力，不渗漏。

c) 防渗土工膜用于阻隔水渗入泡沫轻质土，常用厚度为0.5mm。

4.3 性能

4.3.1 泡沫轻质土混合料性能指标应符合表 3 的规定：

表 3 新拌或浇筑后泡沫轻质土混合料性能指标

性能指标	规定值	检验方法
流动度	140mm~180mm	CJJ/T 177
湿容重增加量	≤0.3kN/m³	
标准沉降距	≤5%	JC/T 2199

条文说明：

泡沫轻质土的流动度与泡沫的加入量多少相关，当泡沫用量过大才会形成棉团状泡沫浆体，降低其流动度，流动度范围一般为 140mm~180mm。在泵送距离较近或施工温度较低时，流动度可取小值，反之取大值；当流动度较小时，泡沫轻质土浇筑时应勤拖动管口，尽量减少浆料的流动距离。

湿容重增加量和标准沉降距是反应泡沫轻质土浆料经泵送浇筑后，浆料硬化过程的稳定性指标。由于泡沫在浆料硬化过程中会存在消泡、气泡合并、泌水情况，浆料会产生不同程度的下沉，微小下沉属于正常现象，但浆料下沉过大甚至沉陷则会影响填筑体的质量，因此，有必要在配合比设计时对浆料的湿容重增加量进行检验。

4.3.2 泡沫轻质土容重等级按湿容重划分为八个等级，容重允许偏差范围应符合表 4 的规定。

表 4 容重等级

等级	标准值（kN/m³）	允许偏差范围（kN/m³）
W4	4.0	±0.25
W5	5.0	
W6	6.0	
W7	7.0	
W8	8.0	
W9	9.0	
W10	10.0	
W11	11.0	

条文说明：

泡沫轻质土湿容重是水泥基浆料混合泡沫后入模前的混合浆料容重，相比表干容重和干容重，湿容重在配合比和施工过程中容易称量，直接反应浆料的质量。设计上也采用湿容重作为荷载计算容重，泡沫轻质土混合浆料硬化干燥后容重会减少15~20%，可作为设计安全储备。允许偏差是指泡沫轻质土现场浇筑时，浇筑管口浆料的湿容重允许偏差范围。

泡沫轻质土湿容重理论上可在3kN/m³~15kN/m³范围调整。实际上泡沫轻质土浆料湿容重超过11kN/m³后，湿容重逐渐接近粉料水泥基浆液的容重，高效率螺旋混合方式已经很难将泡沫与水基浆液均匀混合，因此，本文件列出公路行业常用的连续大产能设备可生产的 W4~W11 容重等级。

4.3.3 泡沫轻质土的抗压强度等级用符号 C 表示，以泡沫轻质土标准试件 28 天立方体单轴抗压强度平均值进行划分，抗压强度平均值和最小值应按表 5 中的规定执行。

表 5 抗压强度等级

强度等级	抗压强度(MPa)	
	平均值≥	最小值≥
C0.5	0.50	0.43
C0.6	0.60	0.51
C0.8	0.80	0.68
C1.0	1.00	0.85
C1.2	1.20	1.02
C1.5	1.50	1.28
C2.0	2.00	1.70
C3.0	3.00	2.55
C5.0	5.00	4.25

强度等级	抗压强度(MPa)	
C8.0	8.00	6.80
C10.0	10.00	8.50

条文说明：

泡沫轻质土的抗压强度等级范围C0.3~C20,通常强度等级低于 C0.5 的泡沫轻质土浇筑后的填筑体体积吸水率高,仅适用于废弃管道、涵洞、空洞等非承重充填使用,为此,当应用于需要承重的公路路基使用时,泡沫轻质土强度等级最小取 C0.5。

4.3.4 泡沫轻质土容重等级对应的强度等级范围和体积吸水率要求可参照表 6 选取。

表 6 湿容重等级对应表干容重、强度及体积吸水率范围

容重等级	表干容重 γ_g (kN/m ³)	参考对应强度 (MPa)	体积吸水率 (%)
W4	2.90< γ_g ≤3.60	0.5~0.8	≤12
W5	3.80< γ_g ≤4.05	0.6~1.2	≤10
W6	4.60< γ_g ≤5.63	0.8~1.5	
W7	5.40< γ_g ≤6.53	1.2~2.5	≤8
W8	6.20< γ_g ≤7.43	2.0~4.0	
W9	7.00< γ_g ≤8.33	3.5~6.0	≤6
W10	7.80< γ_g ≤9.23	5.0~8.0	
W11	8.60< γ_g ≤10.13	6.5~10.0	

条文说明：

泡沫轻质土立方体抗压强度可通过调整原材料的种类及掺量、泡沫比例、外加剂等进行调整,即同湿容重等级的泡沫轻质土可配置出不同抗压强度的成品泡沫轻质土。设计时可根据表6中容重对应的强度等级范围进行选择。

吸水率是表征泡沫轻质土成品质量的重要指标之一。泡沫轻质土是微小泡孔构成的水泥基材料,泡孔完整性越好,孔的连通性越低,水与气体就越难渗透进入材料内部。吸水率可以间接反应干湿循环、吸水软化、冻融循环等耐久性特性。其它泡沫轻质土规范采用的均为质量吸水率,考虑到相同抗压强度等级的泡沫轻质土会对应不同的湿容重和表干容重,导致相同吸水质量时不同容重试验计算出的吸水率不一致。因此,本文件采用体积吸水率来表征泡沫轻质土的吸水性能。

4.3.5 当泡沫轻质土处于腐蚀、冻融环境时,应进行对应的耐腐蚀、抗冻融试验。

4.3.6 当泡沫轻质土应用于地下水位以下路基填筑时,泡沫轻质土浸水饱和后的软化系数应符合表 7 要求。

表 7 泡沫轻质土软化系数

容重等级	软化系数
W4、W5、W6、W7	≥0.8
W8、W9、W10、W11	≥0.85

4.3.7 当泡沫轻质土处于干湿循环环境下,掺合料采用细粒土等惰性材料时,泡沫轻质土浸水饱和后的干湿循环系数应符合表 8 要求。

表 8 泡沫轻质土干湿循环系数

容重等级	干湿循环系数
W4、W5、W6、W7	≥0.8
W8、W9、W10、W11	≥0.85

条文说明：

泡沫轻质土的掺合料来源广泛，常用的有矿渣粉、粉煤灰掺合料，石灰石粉、磷渣粉、钢渣粉、沸石粉、硅灰等活性掺合料，也有尝试应用建筑垃圾磨粉、赤泥、陶瓷粉、石粉等惰性掺合料。惰性材料作为掺合料的泡沫轻质土成品吸水后可能存在程度不同的软化现象，因此提出干湿循环系数指标，以表征干湿循环状态下的泡沫轻质土成品稳定性。

5 勘察与设计

5.1 一般规定

- 5.1.1 泡沫轻质土路基设计应遵循安全、耐久、适用和经济的原则。
- 5.1.2 泡沫轻质土路基设计内容应包括材料性能、轻质土路基断面、附属工程及计算分析等，设计内容应根据使用目的、使用场景等确定。
- 5.1.3 路基泡沫轻质土不应暴露使用，并应避免撞击。当泡沫轻质土路基可能受水流冲刷时，应采取抗冲刷措施。地表积水、地下水影响区，应进行抗浮验算，并应满足抗浮稳定性要求。
- 5.1.4 泡沫轻质土路堤可直立设置，但不宜用作挡土墙。

条文说明：

- 泡沫轻质土密度小，抗滑移、抗倾覆能力差，泡沫轻质土路堤用作挡土墙的风险较大。
- 5.1.5 泡沫轻质土路堤采用刚性桩进行地基处理时，应验算刚性桩对泡沫轻质土的抗压、抗冲切安全性，安全性不满足要求时应设置桩帽、连梁或筏板。除桩顶设置筏板外，宜验算轻质土底面抗弯能力。

条文说明：

- 刚性桩间距较大、泡沫轻质土抗压强度较小且单桩承担荷载较大时，桩顶处的轻质土在上部荷载作用下，可能被挤压、冲切破坏，因此需要验算刚性桩对泡沫轻质土的压碎、冲切安全性。
- 5.1.6 当泡沫轻质土与对混凝土的腐蚀等级为中或以上的水或土接触时，应进行相应的耐腐蚀设计。

条文说明：

- 土、水中 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 OH^- 、PH、侵蚀性 CO_2 、 HCO_3^- 含量较高时，会对轻质土产生腐蚀。
- 5.1.7 泡沫轻质土不对路基下及其附近的土壤、地下水、地表水造成污染。当泡沫轻质土掺合料采用工业固废时，泡沫轻质土中砷、镉、铬（六价）、铜、铅、汞和镍的含量不应超过 GB36600 规定的第二类用地的筛选值。

条文说明：

为降低成本，部分项目在利用磷石膏、陶瓷粉、钢渣粉等工业固废作为泡沫轻质土的掺合料。工业固废中砷、镉、铬（六价）、铜、铅、汞和镍含量可能较高。为避免对相关人体健康形成不可接受的风险，对轻质土中的砷、镉、铬（六价）、铜、铅、汞和镍的含量进行了规定。泡沫轻质土中水泥等胶结材料会将砷、镉、铬（六价）、铜、铅、汞和镍等离子进行“固结”，从而减少对环境的影响。为简单和安全起见，未考虑轻质土对污染物的“固结”作用。

- 5.1.8 泡沫轻质土路基的总沉降不宜大于 10cm，改扩建项目路基的总沉降、工后沉降尚应符合 JTG/T L11 的规定。

条文说明：

泡沫轻质土属于脆性材料，抗拉应变非常小，因此轻质土路堤对不均匀沉降适应性差。轻质土路堤

开裂后极易在路面产生反射裂缝或导致护壁开裂，且修复难度大，因此需限制轻质土路堤的差异沉降。轻质土路堤差异沉降很难计算，因此本文件限制轻质土路堤总沉降。工程实践表明，轻质土路堤沉降超过 15cm 就可能开裂。因此，泡沫轻质土路堤沉降不宜大于 10cm。限制轻质土路堤的沉降也有利于减少轻质土路堤对桥台的推移。

对总沉降提出要求，未对工后沉降提出要求，主要原因有：轻质土路堤施工完毕时间与通车时间往往不一致。

拓宽抬高路段分幅分期施工时，曾要求相邻区块沉降差异小于 3cm。考虑差异沉降计算困难，对轻质土适应的差异沉降研究较少，因此未提差异沉降要求。

本文件虽然未对泡沫轻质土路堤的差异沉降进行规定，仍对减少泡沫轻质土路堤差异沉降和开裂的措施进行了规定。

5.1.9 对采用轻质土的路基范围及其附近存在滑坡、泥石流、岩溶、采空区等不良地质路段，应综合地形地貌、地质、水文、轻质土路堤断面等对场地稳定性和适宜性进行评价，必要时应采取相应措施或对轻质土路堤进行专项设计。

5.1.10 泡沫轻质土路堤附近存在加载、开挖等作业时，应评估其对泡沫轻质土路基的影响，并采取相应措施。

条文说明：

泡沫轻质土路基附近存在新建路堤、填方场坪、基坑等加载或开挖作业时，可能导致已经施工的轻质土路堤开裂，软土地区尤其严重。为减少附近作业对泡沫轻质路基的影响，通常采取合理安排施工顺序、加强轻质土路堤或相邻加载区地基处理、加强开挖区支护措施等。

5.2 勘察与调查

5.2.1 软土地区的泡沫轻质土路堤勘察应符合 DB44/T2418、JTG C20 的规定，勘察孔间距不宜大于 50m，每段轻质土路基的勘察孔不应少于 1 个。既有路基换填轻质土时，应测试软土的初始孔隙比、各级压力对应的孔隙比，宜测试软土的前期固结压力、压缩指数、再压缩指数。

5.2.2 泡沫轻质土路基路段应根据勘察与调查资料预测设计使用年限内的最高内涝水位；临河泡沫轻质土路基应调查洪水位；部分或全部轻质土位于地面以下时，应根据勘察与调查资料预测设计使用年限内的最高地下水位。

5.2.3 部分或全部泡沫轻质土位于地面或水位以下时，应查明与泡沫轻质土接触的土、地下水对混凝土的腐蚀等级。

条文说明：

目前 JTG C20-2011《公路工程地质勘察规范》规定了水、土对混凝土结构的腐蚀性评价标准。泡沫轻质土的物理化学性质与混凝土的物理化学性质相似，水、土对泡沫轻质土的腐蚀性标准可借鉴水、土对混凝土的腐蚀性评价标准。因此，与泡沫轻质土接触的土、水要求查明其对混凝土的腐蚀等级。

5.2.4 既有路基病害处治、既有路基拼宽或抬高采用泡沫轻质土时，应收集既有路基施工、检测、监测、竣工、养护等资料，调查病害原因，设计需要时应补充勘察、检测、监测等。

5.3 性能设计

5.3.1 泡沫轻质土容重和抗压强度

5.3.1.1 泡沫轻质土的容重和抗压强度等级应根据公路等级、交通等级、应用部位等综合确定。

5.3.1.2 泡沫轻质土性能指标应同时满足表 9、表 10 的要求。施工期积水多且抽排困难的部位，泡沫轻质土容重等级不应小于 W11。

表 9 泡沫轻质土性能指标

部位		最小强度等级		最小容重等级
		高速公路、一级公路	其他等级公路	
路床	轻、中、重交通等级	C1.2	C1.0	W6
	特重、极重交通荷载等级	C1.5		W6
路堤	上路堤	C1.0	C0.8	W5
	下路堤	C0.8	C0.6	W5
地基		C0.6	C0.6	W4

表 10 水位以下泡沫轻质土性能指标

计算水位以下（m）	最小强度等级	最小容重等级
≤3	C0.8	W6
>3	C1.0	W8

条文说明：

不规定最大容重的主要原因：目前轻质土掺合料种类繁多，部分项目采用掺黏土的轻质土，密度过小难以保证轻质土强度；采用轻质土路堤的目的多样，有的路基是为了节约用地，不是为了减少路堤荷载。

5.3.1.3 泡沫轻质土用于路基范围空洞填充、管线回填时，应按饱满性、施工性和经济性综合确定强度等级、容重等级、流动度等。

5.3.2 泡沫轻质土吸水率

用于水位以下、直立式路堤的泡沫轻质土，按附录A试验的吸水率应符合表6的要求。

5.3.3 耐干湿循环性能

当泡沫轻质土位于干湿循环环境，直立式路堤的泡沫轻质土掺合料采用黏性土时，按附录B试验的干湿循环系数应符合表8的要求。

5.3.4 弹性模量

用于路床的泡沫轻质土的弹性模量不应小于路面设计规范对路床顶面回弹模量的要求。轻质土弹性模量可按GB/T 11969试验确定，无试验资料时，可按公式（1）计算取值：

$$E_c = \alpha q_u \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- E_c ——泡沫轻质土弹性模量（MPa）；
- α ——弹性模量与抗压强度的换算系数，常规轻质土可取 250，掺黏土的轻质土可取 100；
- q_u ——泡沫轻质土抗压强度（MPa）。

条文说明：

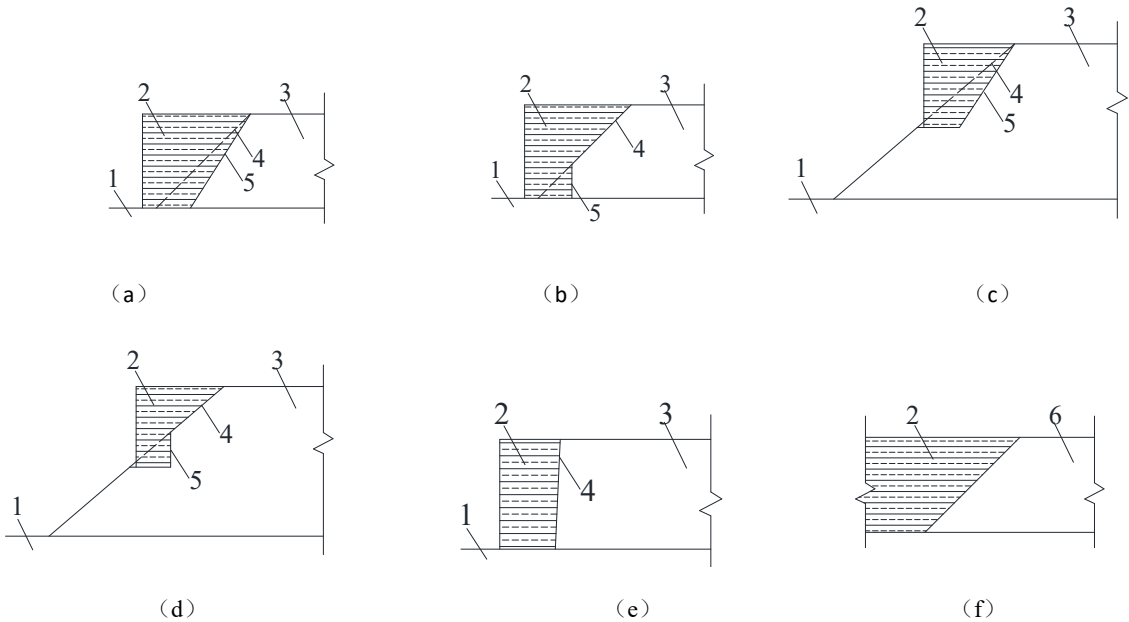
目前轻质土掺合料种类繁多，部分项目采用掺黏土的轻质土。为保证路面结构耐久性，需要对用于路床的泡沫轻质土回弹弹性模量提出要求。轻质土弹性模量和回弹模量差别不大，可偏保守地将弹性模

量作为回弹模量。基于路面对路床回弹模量要求和泡沫轻质土弹性模量实测情况，提出弹性模量不应小于70MPa。

5.4 路基断面设计

5.4.1 泡沫轻质土拼宽路堤

5.4.1.1 一般路段宜根据拼宽路基宽度、既有路堤结构和边坡坡度等采用图 1（a）~图 1（e）所示的横断面及图 1（f）所示的纵断面。既有路堤高度较大时的轻质土拼宽路基横断面宜采用图 1（c）、图 1（d）所示横断面；既有路堤为轻质土路堤或挡土墙路堤时，轻质土拼宽路堤宜采用图 1（e）所示横断面。泡沫轻质土底面宽度不宜小于 2m，泡沫轻质土拼宽路基与既有路堤之间的界面是否设置台阶、锚筋等应根据稳定分析、施工需要等因素确定。



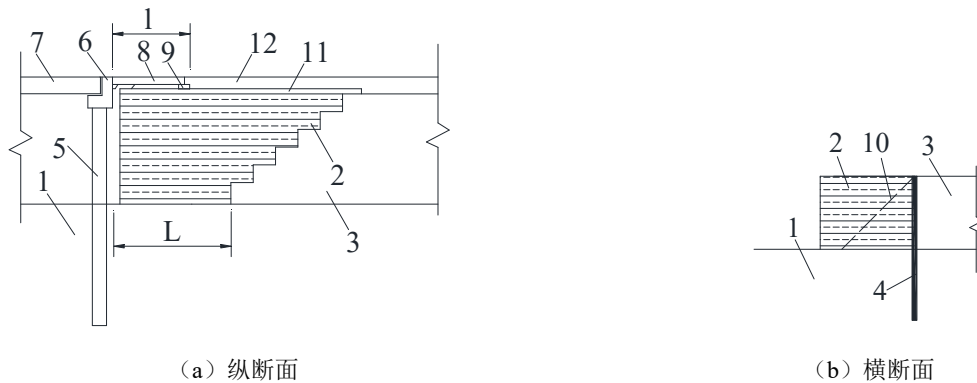
1—地基；2—轻质土拼宽路堤；3—既有路堤；4—既有边坡；5—削陡后边坡；6—普通土拼宽路堤

图 1 一般路段泡沫轻质土拼宽路堤断面

5.4.1.2 桥头泡沫轻质土路堤纵断面宜采用图 2（a）所示的纵断面。桥头泡沫轻质土路堤宜与桥台分离，泡沫轻质土不宜位于桥梁桩基承台上，桥台应设置搭板。台背泡沫轻质土路堤长度应根据桥台类型、路堤纵向稳定性、容许工后差异沉降率、施工需要等综合确定，泡沫轻质土底面长度不宜小于 4m，且宜使 $L > l$ ，泡沫轻质土顶面长度宜按公式（2）确定。与泡沫轻质土路堤相邻的普通土路堤沿路堤纵向的稳定性应满足 DB44/T2418 的要求。直立式泡沫轻质土路堤进入普通土路堤锥坡不应少于 1m。

$$L_a \geq \frac{S_{ra}}{i} \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 L_a ——台背泡沫轻质土路基长度（m）；
 S_{ra} ——一般路段工后沉降量（cm）；
 i ——桥头路堤纵坡容许工后增大值（%）。



1—地基；2—轻质土路堤；3—普通土路堤；4—支护结构；5—桥台柱；6—台帽；7—梁；8—搭板；9—枕梁；10—既有边坡；11—钢筋混凝土板；12—路面

图 2 桥头路段泡沫轻质土拼宽路堤断面

条文说明：

轻质土路堤与桥台分离可节省轻质土用量、减少对桥台的推力，而且不易因路桥差异沉降而导致轻质土开裂。图说明1中轻质土路堤将部分轻质土放在座板式桥台的桩基承台上，差异沉降明显，轻质土路堤在搭板末端荷载作用下断裂。要求 $L > l$ 的主要目的是使搭板末端的枕梁位于轻质土底面范围内，利于轻质土路堤的纵向稳定性。



图说明1 不均匀沉降导致轻质土断裂

5.4.1.3 桥头泡沫轻质土路堤宜采用图 1 (a)~图 1 (e) 所示的横断面。因扩建桥梁的桥台施工，需要直立开挖既有路堤边坡的路段宜采用图 2 (b) 所示的横断面，当轻质土浇筑至路床底面附近时，应将路床底面以上的支护桩切除，支护桩不应拔除，宜对桩顶采取避免冲顶路面的措施。

条文说明：

桥头轻质土拼宽路堤横断面在既有路肩设置支护结构后直立开挖，其目的是为桥台施工提供工作面。

5.4.1.4 既有路肩对应的路床土质或性质较差时，可将其换填为泡沫轻质土，泡沫轻质土路堤宜采用如图 3 所示的横断面。



1—地基；2—轻质土；3—既有路堤；4—既有边坡；5—削陡后边坡

图 3 既有路肩下路床换填泡沫轻质土

条文说明：

通常情况下，泡沫轻质土路基施工完成后再拆除原防撞护栏和挖除土路肩，因此大部分轻质土拼宽路堤断面为图3（a）或图3（b）。路床土质差、压实度和回弹模量较低时，常将其换填为泡沫轻质土、碎石或素混凝土。

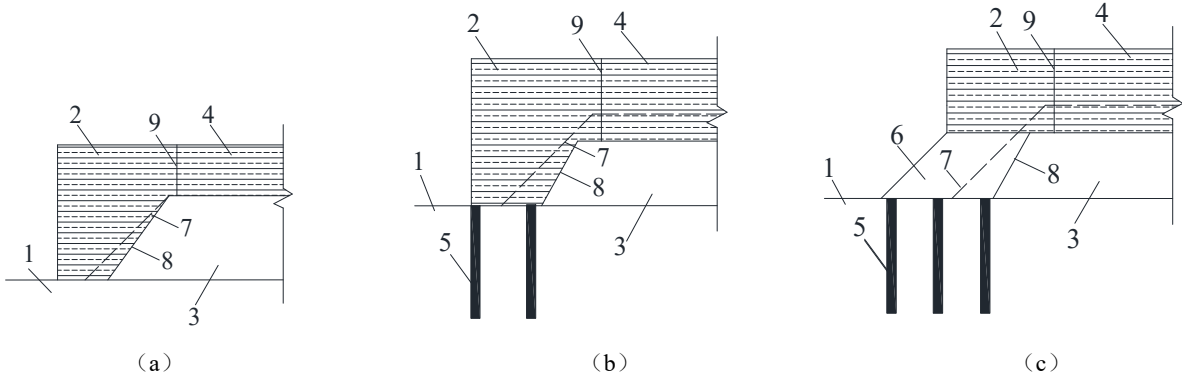
5.4.1.5 当路基拼宽宽度小于 3m 时，泡沫轻质土拼宽路堤宜与护肩墙路堤等方案进行比选。

条文说明：

路基拼宽宽度小于3m时，直立拼宽路堤的高度小于2m，扣除路面结构和混凝土顶板后，轻质土的厚度、数量均较小。此时采用素混凝土护肩墙往往更便于施工。

5.4.2 泡沫轻质土拼宽并加高路堤

5.4.2.1 既有路基采用泡沫轻质土拼宽并加高时，宜采用图 4 所示的横断面。



1—地基；2—轻质土拼宽；3—既有路堤；4—轻质土加高路堤；5—地基处理；6—普通土拼宽路堤；7—既有边坡；8—削陡后边坡；9—拼宽路堤与加高路堤界面

图 4 泡沫轻质土拼宽并加高路堤横断面

5.4.2.2 泡沫轻质土拼宽并加高路堤应根据施工期交通组织和路基施工安排进行轻质土分区设计。拼宽路堤与加固路堤界面处宜设置变形缝，界面处可采用临时护壁。临时护壁可采用木模板或混凝土预制块等防护。

条文说明：

泡沫轻质土拼宽并加高路堤需要保障道路通行时，通常先施工左右幅拓宽泡沫轻质土路基，交通转换至两侧后再施工中间路基。

5.4.3 新建泡沫轻质土路堤

5.4.3.1 根据用地情况，泡沫轻质土路堤横断面宜采用图 5（a）或图 5（b）所示的横断面。为降低工程费用，用地受限路段泡沫轻质土路堤横断面可采用图 5（c）或 5（d）所示的混合断面。陡坡路段采用泡沫轻质土路堤时，泡沫轻质土路堤横断面宜采用图 5（c）所示断面。软土地基、存在地下管线或构筑物的地基换填泡沫轻质土时，泡沫轻质土路堤横断面宜采用图 5（e）所示断面。排水固结与泡沫轻质土联合应用时，泡沫轻质土路堤横断面宜采用图 5（f）或图 5（g）所示的横断面，排水固结后反开挖施工轻质土路堤。

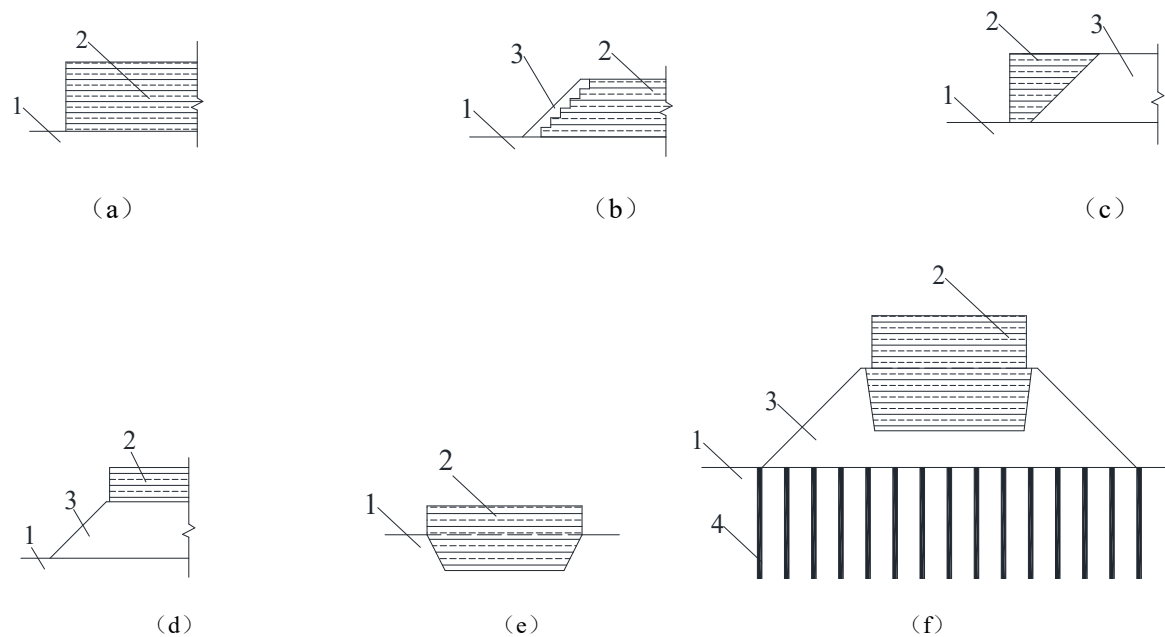
条文说明：

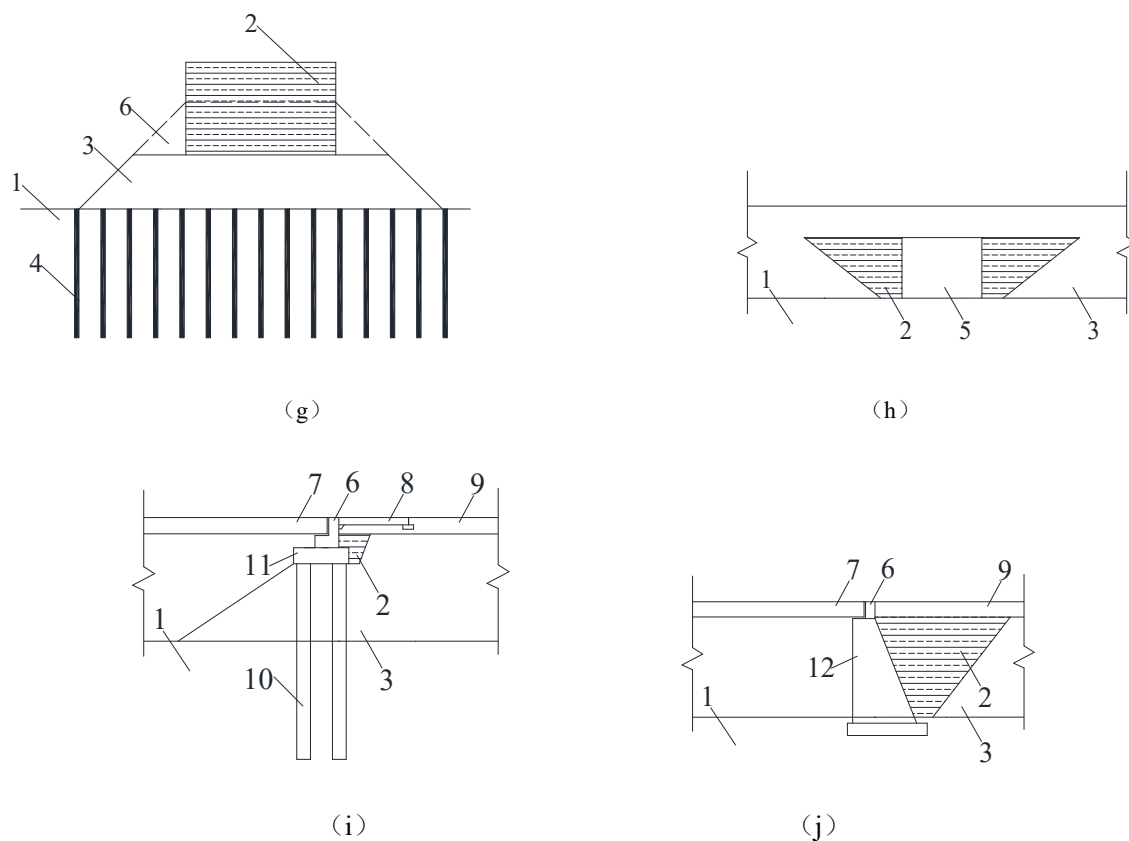
桥头采用泡沫轻质土路堤，且其沉降小于 10cm 时，通常采用桩柱式桥台。相对软基上常用的座板式桥台，有效减少了桥台造价。

《城市轨道交通结构安全保护技术规范》 CJJ/T 202 规定作用于城市轨道交通地下结构外壁上的附加荷载不大于 20kPa。因此，公路路基位于既有地铁隧道、地铁车站等地理结构物上方时，通常采用轻质土路堤、换填轻质土等措施控制结构物附加荷载。

排水固结路堤具有极限填土高度，当路堤高度接近或超过排水固结路基极限高度时，通常采用复合地基。当无法采用复合地基时，采用排水固结与泡沫轻质土路堤也是可行、较节约的方案。先利用小于极限填土高度的填土荷载进行预压，然后卸除部分荷载，换成轻质土。我国最早采用泡沫轻质土路堤的中山至江门高速公路就采用了排水固结与泡沫轻质土联合应用的方案。

5.4.3.2 一般泡沫轻质土路堤纵断面宜采用图 1（f）所示断面。涵洞两侧采用泡沫轻质土路堤纵断面宜采用图 5（h）所示断面。桥头泡沫轻质土路堤纵断面可采用图 2（a）、图 5（i）、图 5（j）所示断面。桥头泡沫轻质土路堤纵断面采用图 2（a）所示断面时，轻质土路堤应与桥台分离，轻质土不应位于桥梁桩基承台上，桥台应设置搭板。





(ii) 1—地基；2—轻质土；3—普通土；4—竖向排水体；5—涵洞；6—台帽；7—梁；8—搭板；9—路面；10—桩；11—承台；12—U形台；13—卸载土方

图 5 新建泡沫轻质土路堤断面

条文说明：

图 5 (i) 为座板台，在路堤填筑后再施工桥台，回填范围较小，通常采用砂、碎石等易于密实的材料回填。采用轻质土回填时，回填长度通常也小于桥头搭板长度。

5.4.3.3 桥头轻质土路堤纵向长度宜根据桥台类型、泡沫轻质土路堤纵向稳定性、桥头路堤容许工后沉降和容许工后差异沉降率等综合确定。桥头泡沫轻质土路堤纵断面采用图 2(a)所示断面时，宜使 $L > l$ ，轻质土底面宽度应满足轻质土路堤纵向稳定性要求。

条文说明：

柱式台、座板式台、肋式台、U形台抗水平能力差别较大，因此不同桥台形式对台后轻质土路堤长度的要求不同。

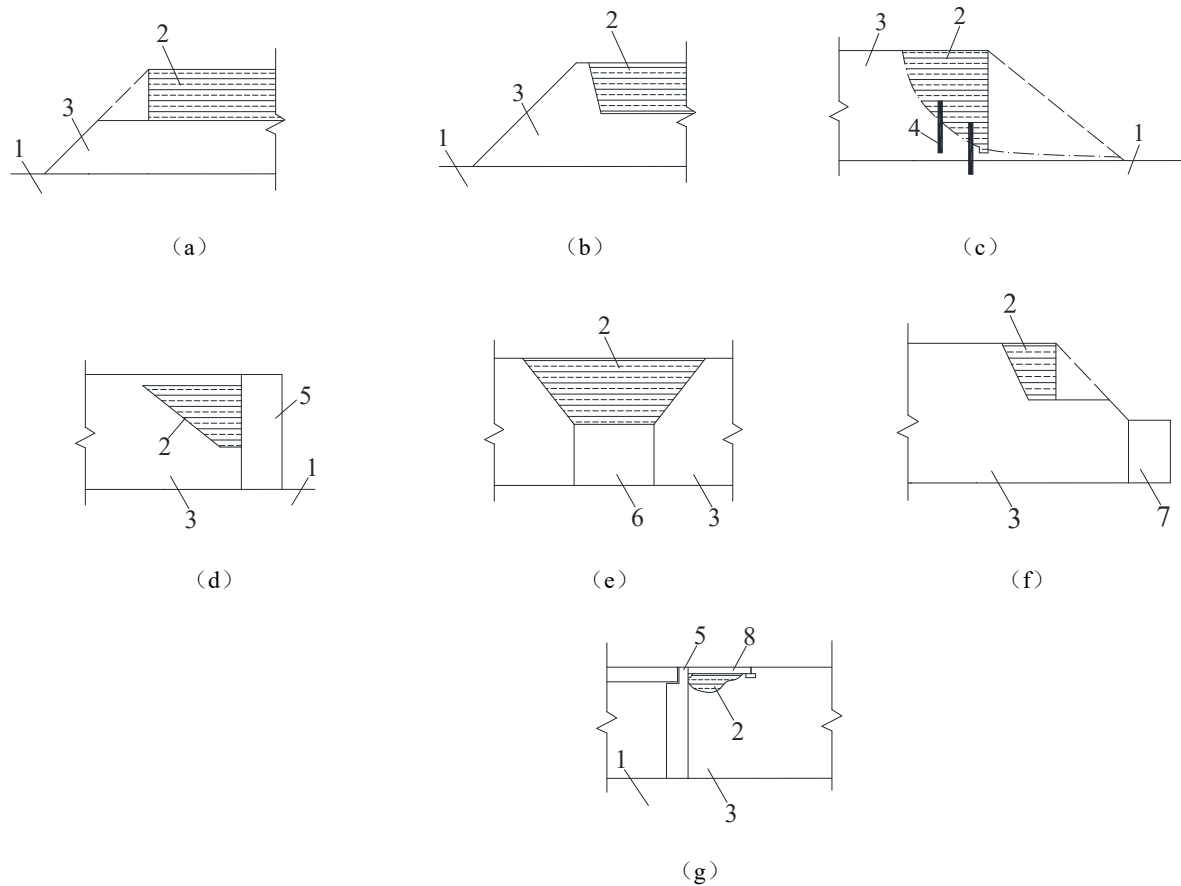
5.4.4 泡沫轻质土处治既有病害路基

5.4.4.1 工后沉降大或稳定性差的路堤换填泡沫轻质土时，宜采用图 6 (a)、图 6 (b) 所示的横断面，换填泡沫轻质土的平面范围、厚度应根据病害范围、稳定分析、沉降计算、施工需要等综合确定。

5.4.4.2 既有路堤滑塌后采用泡沫轻质土修复时，宜采用图 6 (c) 所示的横断面，应清除滑动面内的岩土，并在稳定土层设置台阶或锚固设施。泡沫轻质土范围应根据滑塌及开裂范围、稳定分析、施工需要等综合确定。

5.4.4.3 既有桥台、涵洞、路肩墙存在病害时，其顶部或侧面换填轻质土时宜采用图 6 (d)、图 6 (e)、图 6 (f) 所示断面所示断面。换填泡沫轻质土的空间范围应根据计算分析、施工需要等综合确定。

5.4.4.4 桥台或涵洞搭板下脱空区采用泡沫轻质土填充时，可采用图 6（g）所示的断面。



1—地基；2—轻质土；3—普通土；4—锚固设施；5—路肩墙、桥台或涵洞；6—涵洞；7—路堤墙；8—搭板

图 6 泡沫轻质土处治病害路基

条文说明：

桥台、涵洞搭板脱空多采用注浆方案。注浆的主要目的通常是填充搭板下脱空区，台背或涵背填料压实不足时还可对其进行胶结。注浆费用高，且增加荷载明显，导致桥头、涵背软基进一步沉降。因此搭板下脱空区采用轻质土填充具有其优点。

5.4.5 泡沫轻质土断面其他要求

5.4.5.1 泡沫轻质土厚度不宜小于 1.0m。

5.4.5.2 泡沫轻质土顶面有坡度要求时，应设置台阶，台阶高度不宜大于 15cm。

5.4.5.3 轻质土路堤直立边坡高度超过 15m 时宜设置台阶进行分级，分级高度不宜超过 10m，台阶宽度不宜小于 1m。

5.5 附属工程设计

5.5.1 护壁

5.5.1.1 泡沫轻质土路堤应设置满足耐久性、强度和外观要求的护壁。直立式泡沫轻质土路堤护壁可采用混凝土类或石材类砌块、面板或现浇薄壁墙等，斜坡式轻质土路堤可采用黏土包边作为护壁。可能被撞击、冲刷的部分应采用现浇薄壁墙或增加防护措施。

条文说明：

与《公路路基设计规范》JTG D30 规定轻质土高度超过 3m 时应采用现浇护壁不同，本文件对此未作要求。主要原因有：

- a) 现浇护壁造价高，美观性没优势；
- b) 易出现差异沉降、纵向裂缝、护壁倾斜等病害。
- c) 对投入运营时间超过 18 年的中山~江门高速公路的预制面板护壁轻质土路堤检测表明，预制面板护壁轻质土路堤护壁碳化深度约 3mm，轻质土抗压强度超过设计强度。主要病害有桥台耳墙处轻质土与耳墙脱离约 2cm，部分面板砌缝处有 CaCO_3 析出物。采用预制面板护壁的轻质土路堤耐久性满足工程需要。

5.5.1.2 预制面板护壁应符合下列要求：

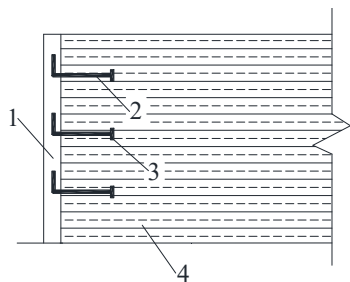
- a) 基础应采用混凝土现浇，强度等级不宜低于 C25。护壁基础宽度不宜小于 80cm，厚度不宜小于 30cm。基础埋深不应小于基础厚度，软基路段不宜小于边沟基槽深度。基础和护壁应设置与轻质土路堤变形缝对齐的沉降缝；
- b) 面板宜采用细石混凝土预制，面板厚度不宜小于 4cm，强度等级不应低于 C25。护壁砌筑砂浆强度不应低于 M7.5；
- c) 面板应通过拉筋与立柱焊接固定。拉筋可采用 HBP300 钢筋，拉筋直径不宜小于 6.0mm。立柱可采用等边角钢，泡沫轻质土路堤高度小于 5m 时，角钢边长不宜小于 50mm；泡沫轻质土路堤高度大于 5m 时，角钢边长不宜小于 70mm；
- d) 对破损的预制面板护壁，宜开挖出立柱重新安装面板，然后浇筑轻质土。用地容许时，也可在既有护壁外侧安装新护壁并在新旧护壁之间浇筑轻质土。

5.5.1.3 制砌块护壁应符合下列要求：

- a) 土质地基应设置护壁基础。基础可采用砌块砌筑或混凝土浇筑。基础厚度不宜小于 30cm，基础宽度应宜按护壁基底应力不大于轻质土基底应力的原则确定。基础埋深不应小于基础厚度，软基路段不宜小于边沟基槽深度。基础和护壁应设置与轻质土路堤变形缝对齐的沉降缝；
- b) 砌块护壁的厚度不宜小于 19cm，砌块强度等级不宜低于 MU15；
- c) 护壁砌筑砂浆强度不应低于 M7.5；
- d) 运营公路破损的预制砌块护壁，宜拆除砌块并开挖轻质土宽度不小于 20cm，重新砌筑护壁后浇筑轻质土。

5.5.1.4 现浇薄壁墙护壁应符合下列要求：

- a) 基础宽度应根据泡沫轻质土、路面结构施工过程中护壁抗倾覆稳定分析确定，且不应小于 1m，基础厚度不宜小于 20cm。护壁厚度不应小于 10cm；
- b) 护壁与泡沫轻质土之间应采取可靠的拉接措施。采用锚筋时，泡沫轻质土中的锚筋末端宜设置与锚筋垂直的钢板，如图 7 所示。锚筋直径不宜小于 12mm，伸入轻质土的长度不宜小于 1m。钢板厚度不小于 10mm，边长不宜小于 150mm；
- c) 护壁的沉降应均匀，且应与泡沫轻质土路堤的沉降应接近；
- d) 护壁的沉降缝间距宜为 10m~15m。



1—现浇护壁；2—锚筋；3—钢板；4—轻质土

图 7 现浇护壁与轻质土之间的拉接措施

条文说明：

轻质土与钢筋的粘结力很小，在轻质土中的锚筋末端设置与锚筋垂直的钢板可充分利用轻质土的抗压性能增大锚固力。

5.5.1.5 斜坡上的直立式泡沫轻质土路堤外侧应设置平台，平台宽度不应小于 1m。平台宜采用素混凝土硬化，并做好排水设置。

5.5.1.6 黏性土护壁厚度不应小于 30cm，压实度不宜小于 85%。护壁采用流塑或软塑状软黏土时可不作压实度要求。黏性土护壁宜采用草灌混合绿化。

5.5.2 加筋

5.5.2.1 泡沫轻质土内宜设置钢丝网、钢筋网、土工格栅等减少开裂的加筋材料，并应符合下列规定：

- a) 钢丝网宜采用镀锌铁丝或不锈钢丝，丝径宜为 2.5mm~3.2mm，网格间距宜为 100mm，钢丝网不应有锈蚀。
- b) 钢筋网宜选用直径 6mm 的钢筋，钢筋网间距宜为 100mm~200mm，钢筋不应有锈蚀。
- c) 土工格栅宜选用双向钢塑土工格栅，格栅延伸率不宜大于 3%，断裂拉力不应小于 60kN/m。
- d) 加筋材料与轻质土顶面、底面的间距宜为 0.3 m~0.5 m。加筋材料的竖向间距不宜大于 2m。
- e) 相邻两层加筋材料搭接部位应错开 50cm 以上。相邻两块钢筋（丝）网、土工格栅的搭接宽度不宜小于 20cm，钢筋（丝）网尚宜采用钢丝绑扎。

5.5.2.2 加筋材料应铺设至护壁。采用现浇薄壁墙时，加筋材料宜浇筑在墙内或与墙上预留锚筋连接牢固。

条文说明：

部分现浇护壁与轻质土之间没有连接措施或连接措施偏弱，泡沫轻质土凝固收缩可能导致轻质土与护壁之间出现裂缝，雨水或养护水进入裂缝导致护壁倾斜，裂缝宽度、深度加大。部分项目加筋铺设至角钢处，而角钢与护壁之间有连接钢筋，因此角钢附近形成薄弱界面，泡沫轻质土凝固收缩导致角钢附近出现纵向裂缝，雨水或养护水进入裂缝导致裂缝宽度、深度加大，甚至导致护壁鼓胀变形，见图说明 2。



(a) 现浇护壁右侧向外倾斜



(b) 角钢附近轻质土开裂

图说明2 加筋不当导致的病害

5.5.3 防排水

5.5.3.1 泡沫轻质土顶面宜设置混凝土板或防水土工膜，并应符合下列规定：

- a) 泡沫轻质土依附于岩土边坡时，混凝土板或防水土工膜宜伸出交界面不小于 1.0m。
- b) 采用包边土护壁时，护壁内侧应铺设防水土工膜。
- c) 混凝土板厚度不宜小于 10cm，混凝土防渗等级不宜低于 P6。
- d) 防水土工膜宜选用聚乙烯或聚氯乙烯复合土工膜，厚度不宜小于 0.5mm，其技术性能应满足表 11 并符合 GB/T 17643 的规定。

表 11 防水土工膜技术性能

技术性能	规定值
渗透系数（cm/s）	$\leq 10^{-11}$
断裂强度（kN/m）	≥ 20
CBR顶破强度（kN）	≥ 2.5

5.5.3.2 泡沫轻质土路堤横断面设富裕宽度、平台时，富裕宽度、平台应采用混凝土封闭，混凝土厚度不宜小于 10cm。

条文说明：

由于预制面板护壁通常高出泡沫轻质土一定高度，不少设置富裕宽度的路堤在泡沫轻质土顶面有预制面板护壁与路面结构形成一条水槽（图说明3a），水槽内的积水沿护壁附近泡沫轻质土的裂隙下渗，最后从砌筑质量不佳的预制面板砌缝中流出，导致泡沫轻质土析出CaCO₃（图说明3b），因此，本文件未要求设置富裕宽度，并要求设置富裕宽度时应对其进行封闭。



(a) 护壁与路面之间的水槽

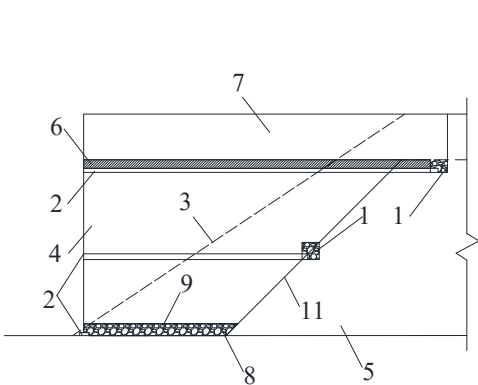


(b) 护壁外侧析出的CaCO₃

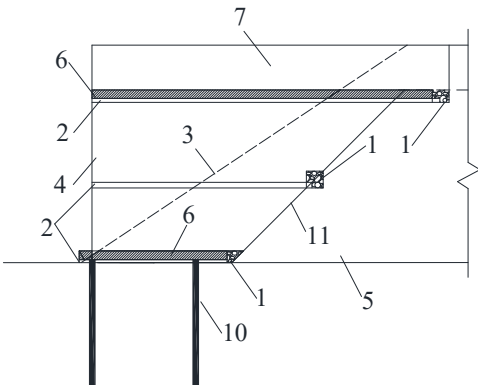
图说明3 富裕宽度设置不当的影响

5.5.3.3 对于侧面临空的泡沫轻质土路堤，除非其依附的岩土边坡及其地基均为强透水岩土，应在其依附的边坡和地基上设置排水设施。排水设施应便于施工、避免被堵塞。根据工程情况可采用分散排水或集中排水方式，并应符合下列规定：

- a) 分散排水设施可由水平布置的盲沟、排水管、排水垫层等组成，如图 8 所示。盲沟之间、盲沟与排水垫层之间的竖向间距不宜大于 3m、排水管的纵向间距不宜大于 5m。坡面明显渗水点处应设置盲沟和排水管。盲沟和排水管宜在轻质土浇筑面高于盲沟顶面后反开挖施工。盲沟横断面的宽度和高度均不宜小于 20cm，盲沟底部应设防渗土工布，顶面和内侧侧面应设反滤土工布；排水管直径不宜小于 7cm，排水管不应打孔，外倾坡度不宜小于 0.3%。



(a) 轻质土底部为排水垫层



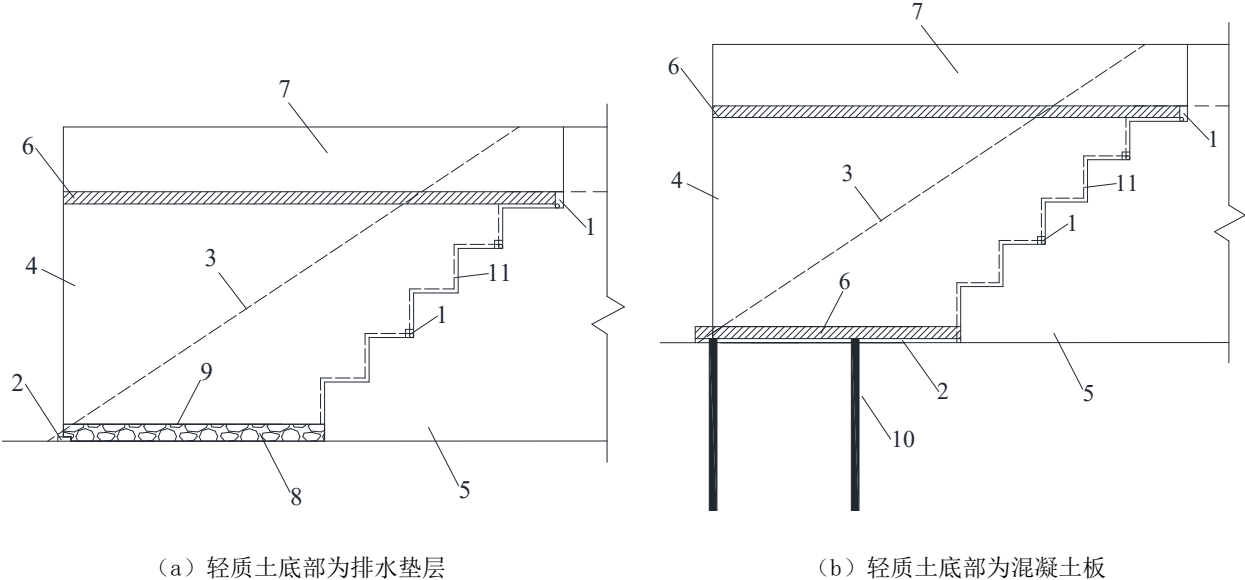
(b) 轻质土底部为混凝土板

1—盲沟；2—排水管；3—既有边坡；4—轻质土；5—岩土；6—混凝土板；7—路面；8—排水垫层；9—反滤土工布；10—桩；11—削陡后边坡

图 8 分散式排水设施

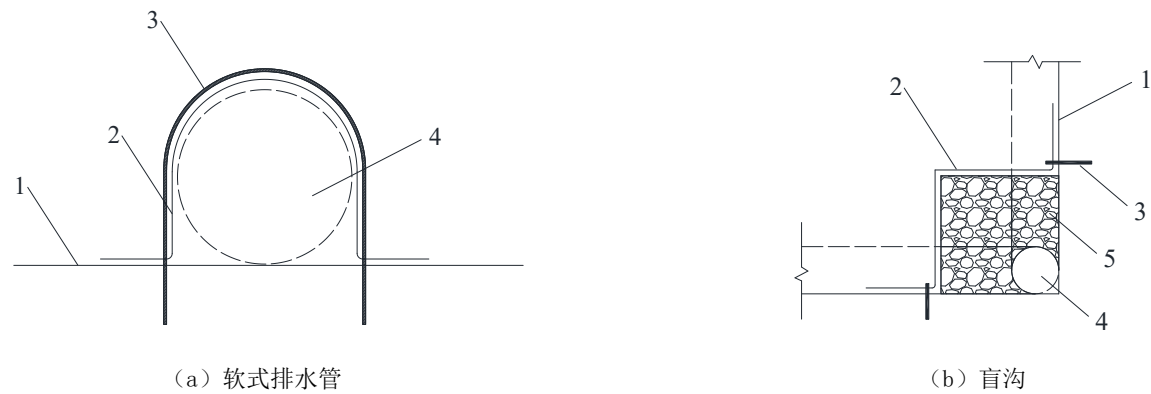
- b) 台后轻质土与普通土路堤之间的水宜采用分散式排水方式，可利用排水管将盲沟中的水引至锥坡外。

c) 集中排水设施可由水平布置的盲沟、排水垫层和竖向布置的排水管等组成，如图 9 所示。盲沟宜设置在台阶上。排水管应连通盲沟、排水垫层，宜采用软式透水管。盲沟间距、盲沟与排水垫层的竖向间距均不宜大于 3m、排水管纵向间距不宜大于 5m，明显渗水点处应设置盲沟。盲沟横断面宽度和高度均不宜小于 20cm，盲沟采用反滤土工布包裹。排水管直径不宜小于 7cm。设置排水设施后，应将坡面满铺土工布或防水土工膜，也可将各个盲沟和排水管靠泡沫轻质土侧分别利用土工布或防水土工膜与轻质土隔离，如图 10 所示。



1—盲沟；2—排水管；3—既有边坡；4—轻质土；5—岩土；6—混凝土板；7—路面；8—排水垫层；9—反滤土工布；10—桩；11—软式透水管

图 9 集中式分排水设施



1—坡面；2—土工布或防水土工膜；3—U形钉；4—软式透水管；5—碎石

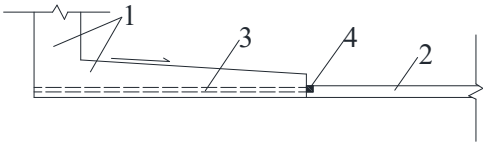
图 10 集中式排水设施固定方式

d) 沫轻质土底部设置排水碎石垫层时，垫层厚度不宜小于 20cm，垫层顶面应设反滤土工布，土工布质量不宜小于 200g/m²。

条文说明：

排水垫层通常不做压实度要求。轻质土底面积水无法排出时，可不设排水垫层。

5.5.3.4 泡沫轻质土路堤上部路面内应设置排水管将路面下渗的水排出，必要时可设置连通排水管的纵向盲沟，如图 11 所示。排水管宜采用直径 5cm~7.5cm 的 PVC 管，间距宜 3m~5m，设置盲沟时取大值。盲沟横断面宽度和宽度均不宜小于 10cm，应设反滤土工布。



1—护栏基座；2—顶板；3—排水管；4—盲沟

图 11 路面内排水设施

5.5.3.5 在地下水位以下换填容重小于 10kN/m³ 的轻质土时，除应验算运营期抗浮稳定性外，应采取避免施工期间轻质土上浮。地下水位与坑底之间均为弱透水层时，可在轻质土底面设置排水层和集水坑进行排水。地下水位与坑底之间存在强透水层时，可在坑周打设钢板桩等进行截水。

5.5.3.6 既有路堤拼宽采用泡沫轻质土且雨季施工时，宜对清表、开挖台阶后的坡面喷射混凝土、抹砂浆等，混凝土厚度不宜小于 4cm，砂浆厚度不宜小于 2cm。宜利用 PVC 管等将急流槽的水引至泡沫轻质土路堤以外。

5.5.3.7 新建项目的陡坡路堤采用泡沫轻质土路堤时，泡沫轻质土路堤上方应设置截水沟，基底宜做好排水措施，路堤下方 1m 范围内宜硬化。

5.5.3.8 路面排水所需的纵横向排水管可设置在轻质土内，应对横向排水管与护壁的衔接进行设计。中央分隔带排水设计进入轻质土时，应采取防水措施。

5.5.4 变形缝

5.5.4.1 泡沫轻质土路堤长度或宽度超过 15m 时应设置变形缝，变形缝间距不应大于 15m，缝宽宜 1cm~2cm。当轻质土厚度、地质、地形、地基处理方案等变化较大处，应增设变形缝。

5.5.4.2 泡沫轻质土与结构物接触面处，宜设置变形缝。

5.5.4.3 变形缝应沿轻质土路基断面贯通设置。软基路段变形缝宜采用聚苯乙烯板。

5.5.4.4 保护壁变形缝设置宜利于保护壁的美观。

5.5.5 调坡层

5.5.5.1 泡沫轻质土路堤顶面调坡宜采用混凝土，设置顶板时宜采用与顶板相同的材料并同时实施。

5.5.5.2 应给出调坡分区坐标、各区调坡层底面高程和体积等。

5.5.6 护栏基座与顶板

5.5.6.1 直立式轻质土路堤顶面应设置护栏基座。护栏基座宜采用 L 形钢筋混凝土基座，基座底宽不应小于 3.0m，厚度不宜小于 20cm。护栏基座混凝土强度等级不小于 C25。

条文说明：

研究表明，大型车辆撞击时先是前轮斜向撞击护栏，然后后轮平行撞击护栏，后轮撞击时撞击力最大。当汽车完全位于护栏基座范围内时，汽车、护栏、基座成为一个结构系A，汽车与护栏基座之间的撞击力成为结构系A的内力，不影响结构系的整体稳定性。因此，基座宽度应满足汽车完全位于护栏基座上的要求。按照《公路工程技术标准》JTG B01-2014中车辆荷载布置，轮距1.8m，中后轮着地宽度为0.6m，护栏底部宽度约为0.6m，累计宽度约3.0m。因此，规定基座底宽不应小于3.0m。

5.5.6.2 护栏基座应双层配筋。护栏基座配筋、基座下轻质土抗压强度应根据汽车撞击时的受力分析确定。基座下轻质土中宜设置钢筋网，钢筋直径不宜小于 10mm，间距不宜大于 15cm。

5.5.6.3 泡沫轻质土路堤顶面宜设置混凝土顶板。顶板厚度不宜小于 15cm，混凝土强度等级不宜低于 C20。顶板可与轻质土顶面调坡结合。桥头路段、软基路段的顶板应双层配筋。

5.5.7 依附的边坡

5.5.7.1 土质边坡应清表且无松土，清表厚度不宜小于 50cm。岩质边坡应清除易滑落的松散体。

条文说明：

松土抗剪强度低，轻质土依附的边坡上存在松土时，可能导致轻质土路堤沿松土滑动。某轻质土路堤依附于松土边坡，降雨后轻质土路堤发生滑塌事故。

5.5.7.2 轻质土路堤依附的粘性土边坡宜设置台阶，台阶高度不宜大于 0.5m。

5.5.7.3 侧面临空轻质土路堤依附的黏性土边坡的综合坡率不宜陡于 1:1；砂性土边坡的综合倾角不宜陡于休止角。

5.5.7.4 侧面临空的轻质土路堤依附的边坡稳定系数小于 1.05、或包括轻质土路堤在内的整体稳定系数小于表 12 中的稳定安全系数时，应对轻质土路堤依附的边坡先行加固。

表 12 侧面临空轻质土路堤依附的边坡整体稳定安全系数

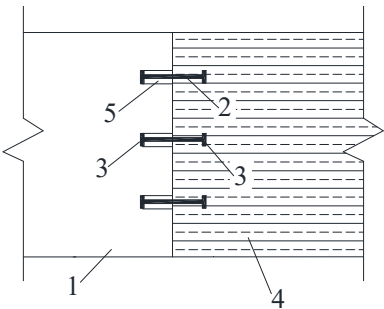
分析工况	稳定安全系数	
	二级及以上公路	三、四级公路
正常工况	1.35	1.30
暴雨或连续降雨工况	1.25	1.15

5.5.7.5 换填轻质土的基坑边坡稳定性不足时，应放缓边坡或采取支护措施，可打设钢板桩或锚杆。

5.5.8 锚固设施

5.5.8.1 侧面临空的泡沫轻质土路堤应满足水平滑动稳定要求，否则应调整轻质土路堤断面、设置台阶或锚固设施。锚筋可设置在边坡上，也可设置在轻质土底面。

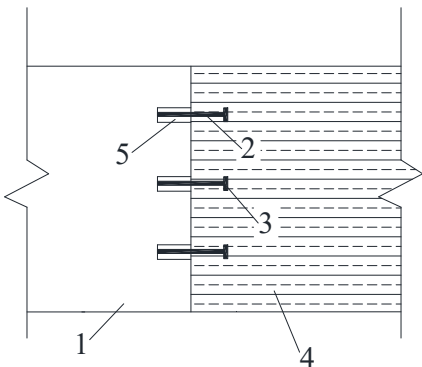
5.5.8.2 与既有直立轻质土路堤拼接时，宜设置锚固设施，如图 12 所示。锚筋直径不宜小于 12mm，伸入两侧轻质土的长度均不宜小于 1m。钢板厚度不小于 10mm，边长不宜小于 150mm。



1—既有轻质土路堤；2—锚筋；3—钢板；4—拼宽轻质土路堤；5—钻孔

图 12 与既有挡土墙、轻质土路堤之间的锚固设置

5.5.8.3 与既有挡土墙拼接时，宜设置锚固设施，如图 13 所示。锚筋直径不宜小于 12mm，伸入轻质土的长度不宜小于 1m。钢板厚度不小于 10mm，边长不宜小于 150mm。



1—既有挡土墙；2—锚筋；3—钢板；4—拼宽轻质土路堤；5—植筋

图 13 与既有挡土墙、轻质土路堤之间的锚固设置

5.5.8.4 锚筋进入土质边坡或地基的长度不宜小于 3m，钻孔直径不宜小于 11cm，水泥浆强度等级不宜低于 M25。锚筋宜采用 HRB400 钢筋或钢管。钢筋直径不宜小于 25mm，钢管直径不宜小于 48mm。锚筋进入轻质土的长度不宜少于 0.5m，锚筋上设抗压钢板宽度不宜小于 10cm，长度不宜小于 50cm。

5.5.8.5 锚索、锚杆宜与现浇护壁联合应用，并应进行抗拔、抗拉验算。

5.6 设计计算

5.6.1 指标取值

不同的环境条件和工程条件下泡沫轻质土的相关性能指标取值应符合表13的要求。

表 13 设计计算性能指标取值

验算内容	验算指标	验算指标取值	
		地下水条件	指标取值
地基承载力、 沉降验算	泡沫轻质土容重	地下水位以上	湿容重 γ_f
		地下水位以下	$(1.1\sim1.3)\gamma_f$
结构上覆荷载验算	泡沫轻质土容重	地下水位以上	γ_f
		地下水位以下	$(1.1\sim1.3)\gamma_f$
抗浮验算	泡沫轻质土容重	地下水位以上或以下	$0.8\gamma_f$
路基整体稳定性 验算	泡沫轻质土粘聚力、内 摩擦角	地下水位以上	试验确定。无试验资料时，可取 $c=0.17qu$ ， $\varphi=5^\circ$
		地下水位以下	试验确定。无试验资料时，可取 $c=0.15qu$ ， $\varphi=4^\circ$
抗滑动、抗倾覆 稳定性验算	与碎石土、砂类土或 基岩接触面摩擦系数	地下水位以上	0.6
		地下水位以下	0.5
	与粘性土、防水材料 接触面摩擦系数	地下水位以上	0.35
		地下水位以下	0.3

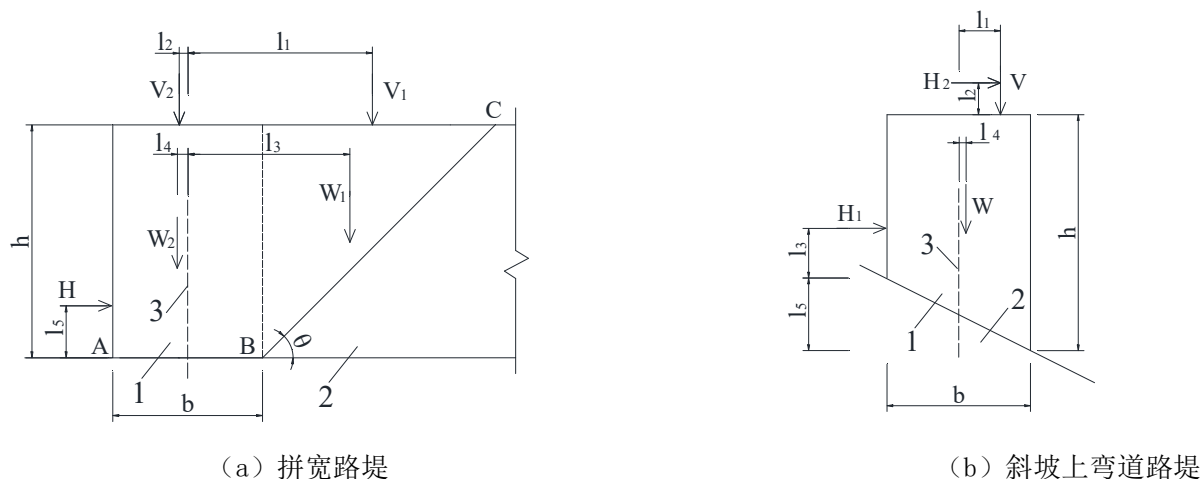
条文说明：

表13参考CJJ/T 177-2012《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》的规定并结合工程经验确定。

5.6.2 地基承载力与轻质土抗压强度验算

5.6.2.1 除与排水固结法联合应用外，直坡轻质土路堤应进行地基承载力验算。采用现浇护壁时，尚应验算护壁地基的承载力。

5.6.2.2 对图 14 (a) 所示的轻质土路堤，当满足公式 (3) 时，基底最大应力可按公式 (4) 计算，否则可按式 (5) 计算。对图 14 (b) 所示的轻质土路堤，轻质土路堤底面的最大应力可按式 (6) 计算。直坡路堤轻质土基底平均应力不应大于地基承载力特征值。受偏心荷载作用时，基底最大应力不宜大于地基承载力特征值的 1.2 倍。轻质土基底最大应力不应大于路堤底面的轻质土抗压强度的 1/3。



1—轻质土；2—岩土；3—轻质土底面中线

图 14 轻质土路堤受力

$$Hl_5 + V_1(l_1 - 0.5b) + W_1(l_3 - 0.5b) \leq V_2(l_2 + 0.5b) + W_2(l_4 + 0.5b) \quad (3)$$

$$\sigma_m = \frac{W_1 + W_2 + V_1 + V_2}{b} + \frac{6(Hl_5 + W_1l_3 + V_1l_1 - W_2l_4 - V_2l_2)}{b^2} \quad (4)$$

否则

$$\sigma_m = \frac{V_2(l_2 + \frac{b}{2}) + W_2(l_4 + \frac{b}{2}) + \frac{(V_1 + V_2 + W_1 + W_2) \csc \theta}{\cot \theta + \tan \phi} (\frac{b}{2} \cos \theta + \frac{2h}{3} \csc \theta) - Hl_5 - V_1(l_1 - \frac{b}{2}) - W_1(l_3 - \frac{b}{2})}{\frac{b \csc \theta}{\cot \theta + \tan \phi} (\frac{b}{4} \cos \theta + \frac{h}{3} \csc \theta) + \frac{b^2}{6}} \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{W + V}{b} + \frac{6(Hl_3 + H_2l_2 + Wl_4 + Vl_1)}{b^2} \quad (6)$$

式中：

σ_m ——轻质土路堤底面最大应力；

W_1 ——BC 线以上普通土、轻质土重量、路面重量之和 (kN)；

W_2 ——AB 线上轻质土重量、路面重量和附属设施重量之和 (kN)；

V_1 ——BC 线以上汽车荷载 (kN)；

V_2 ——AB 线以上汽车荷载 (kN)；

ϕ ——轻质土与 BC 面土体的界面摩擦角 ($^\circ$)，可取土体内摩擦角的 0.67 倍；

H ——作用在轻质土路堤上的水平力 (kN)；

W ——轻质土路堤重量、路面重量和附属设施重量之和 (kN)；

H_1 ——作用在轻质土路堤上的水平力 (kN)；

H_2 ——汽车离心力、声屏障上的风荷载等 (kN)；

V ——汽车荷载 (kN)。

条文说明：

对图14 (a)，式 (4) 是对应轻质土不绕B点转动，BC以下土体对轻质土无反力的情况。式 (5) 是对应轻质土不绕B点转动，AB、BC以下土体对轻质土反力均为三角形分布的情况，为简化计算，偏保守地忽略BC上摩擦力对竖向平衡的影响。

5.6.2.3 泡沫轻质土路堤的软基处理采用刚性桩时，按式 (7) 计算的路堤底部轻质土抗压安全系数不应小于 1.5。

$$F_s = \frac{q_u A_p}{A_u (p + \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i)} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- F_s ——安全系数；
- q_u ——轻质土无侧限抗压强度 (kPa)；
- A_p ——桩 (帽) 顶面面积 (m²)；
- A_u ——单桩承担面积 (m²)；
- p ——汽车荷载 (kPa)；
- n ——自轻质土底面起算的轻质土、路面结构等层数 (m)；
- h_i ——第*i*层材料的厚度 (m)；
- γ_i ——第*i*层材料的容重 (kN/m³)。

条文说明：

桩 (帽) 对轻质土的压力属于局部受压，轻质土被压碎时的荷载集度大于试块抗压强度。因此，安全系数取值较小。

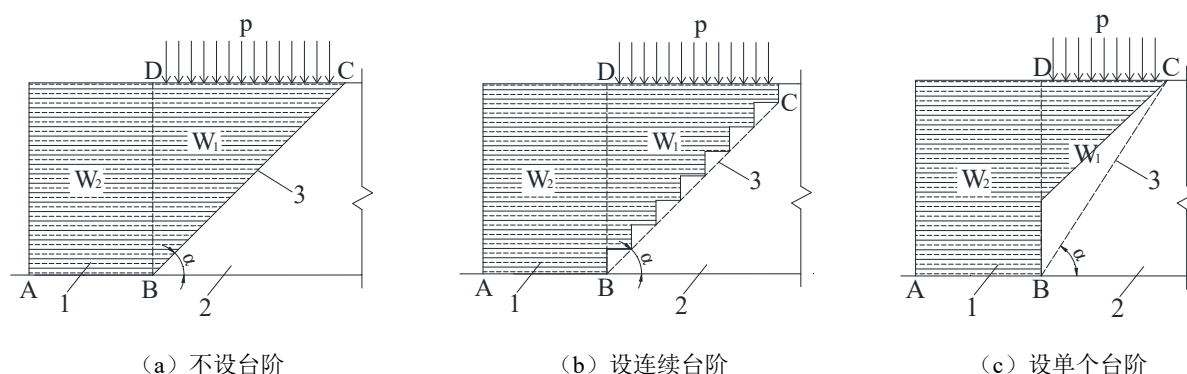
5.6.3 稳定性验算

5.6.3.1 侧面临空且不设置锚固措施的泡沫轻质土路堤按图 15 和式 (8) 计算的稳定安全系数不应小于 1.3。

$$F_s = \frac{f_1(W_1+P) \cos^2 \alpha + c_1 L_1 \cos \alpha + f_2 W_2 + c_2 L_2}{0.5(W_1+P) \sin 2 \alpha} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- F_s ——安全系数；
- f_1 ——BC 线上的摩擦系数。无实测资料时可取 0.5。边坡设置台阶时，可取土的综合内摩擦角；
- W_1 ——BC 线以上普通土、轻质土、路面的重量之和 (kN)；
- P ——BC 线边坡上汽车荷载 (kN)；
- α ——滑动面倾角 (弧度)；
- c_1 ——BC 线上的黏聚力 (kPa)；
- L_1 ——BC 线长度 (m)；
- c_2 ——AB 线上的黏聚力 (kPa)；
- L_2 ——AB 线长度 (m)；
- f_2 ——AB 线上的摩擦系数。无实测资料时可按表 13 取值；
- W_2 ——AB 线上轻质土重量、路面重量和附属设施重量之和 (kN)。



1—轻质土；2—岩土；3—滑动面

图 15 轻质土水平滑动分析分区

5.6.3.2 侧面临空且设置锚固措施的轻质土路堤安全系数按图 16(a)、图 16(b)和式 (9)、式 (10) 计算, 计算安全系数不应小于 1.3。当锚固体位于 AB 范围内时, 轻质土路堤安全系数按图 16(c)、图 16(d)和式 (11)、式 (12) 计算。

$$F_s = \frac{f_1(W_1+P)\cos^2\alpha + c_1L_1\cos\alpha + f_2W_2 + c_2L_2 + T\cos\alpha}{0.5W_1\sin 2\alpha} \quad (9)$$

$$T = \frac{\sin(\alpha+\beta)\min(f_cA_c, f_sA_s, f_aA_a)}{d} \quad (10)$$

$$F_s = \frac{f_1(W_1+P)\cos^2\alpha + c_1L_1\cos\alpha + f_2W_2 + c_2L_2 + T}{0.5W_1\sin 2\alpha} \quad (11)$$

$$T = \frac{\min(f_cA_c, f_sA_s, f_aA_a)}{d} \quad (12)$$

式中:

F_s ——安全系数;

f_1 ——BC 线上的摩擦系数。无实测资料时可取 0.5。边坡设置台阶时, 可取土的内摩擦角计算;

W_1 ——BC 线以上普通土、轻质土重量、路面重量之和 (kN);

P ——BC 线边坡上汽车荷载 (kN);

α ——滑动面倾角 (弧度);

c_1 ——BC 线上的黏聚力 (kPa);

L_1 ——BC 线长度 (m);

c_2 ——AB 线上的黏聚力 (kPa);

L_2 ——AB 线长度 (m);

f_2 ——AB 线上的摩擦系数。无实测资料时可取 0.5;

W_2 ——AB 线上轻质土重量、路面重量和附属设施重量之和 (kN)。

T ——锚固设施沿滑动面的抗滑力 (kN);

β ——锚筋倾角 (弧度);

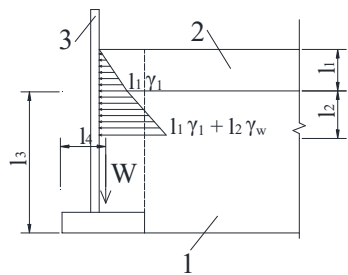
f_c ——轻质土抗压强度设计值 (kPa);

A_c ——抗压板面积 (m²);

f_s ——锚筋抗剪强度 (kPa);

A_s ——锚筋横截面面积 (m²);

f_a ——岩土承载力 (kPa);



1—已凝固轻质土；2—未凝固轻质土；3—现浇护壁

图 17 现浇护壁抗倾覆验算

$$F_s = \frac{Wl_4}{0.5l_1^2\gamma_l\left(\frac{1}{3}l_1+l_3\right)+l_1\gamma_l l_2(l_3-0.5l_2)+0.5l_2^2\gamma_w\left(l_3-\frac{2}{3}l_2\right)} \dots\dots\dots (14)$$

式中：
W ——现浇护壁及其基础上轻质土的重量之和（kN）；
l₁ ——未硬化轻质土厚度（m）；
l₂ ——硬化轻质土裂缝深度（m）；
γ_l ——轻质土容重（kN/m³）；
γ_w ——水的容重（kN/m³）。

条文说明：
不少采用现浇护壁的泡沫轻质土路堤工程出现护壁倾斜的缺陷，其主要原因是未验算现浇护壁在泡沫轻质土施工期间的抗滑移、抗倾覆稳定性，也未验算地基承载力。

5.6.4 抗浮验算

5.6.4.1 水面高于轻质土路堤底面时，按式（15）计算的抗浮稳定安全系数不应小于 1.15。

$$F_s = \frac{0.8\sum_{i=1}^{n_l} V_i\gamma_i+P_h}{V_w\gamma_w} \dots\dots\dots (15)$$

式中：
n_l—— 轻质土层数；
V_i—— 第*i*层轻质土的体积（m³）；
γ_i—— 第*i*层轻质土的湿容重（kN/m³）；
P_h—— 轻质土顶面的恒载（kN）；
V_w—— 水位下轻土体积（m）；
γ_w—— 水容重（kN/m³）。

条文说明：
对轻质土湿重度乘以0.8的折减系数，主要是考虑轻质土长期使用过程中含水量减少。
5.6.4.2 抗浮稳定性受水库、河道、湖泊、海洋等水位控制时，宜采用相应水位验算抗浮稳定性；其他轻质土路堤抗浮稳定验算宜采用洪涝水位。

5.6.5 沉降计算

5.6.5.1 泡沫轻质土路堤应计算沉降。沉降计算宜采用分层总和法。

5.6.5.2 正常固结土、欠固结土地基沉降计算应采用 $e-p$ 曲线或 $e-\log p$ 曲线。既有路基拼宽、削陡既有边坡、加高路堤换填轻质土、地基换填轻质土、病害路堤换填轻质土等情况，宜根据卸载前软土固结程度等确定前期固结压力，考虑回弹再压缩的影响。按式（16）计算换填轻质土后的剩余沉降时， e_{1i} 小于 e_{0i} 的土层可不计算工后沉降。

$$S_r = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} \Delta z_i \quad (16)$$

式中：

S_r ——剩余沉降（m）；

e_{0i} ——补充勘察得到的第 i 层土的初始孔隙比；

e_{1i} ——第 i 层土对应换填轻质土后总应力的孔隙比；

Δz_i ——第 i 层土的厚度（m）。

5.6.5.3 总沉降修正系数宜取 1.0~1.2。当地基容许承载力大于两倍路基荷载时，取小值，其他情况取大值。

5.6.6 换算厚度计算

堆载预压后再施工轻质土路堤时，轻质土厚度应按式（17）、式（18）计算并取大者；真空联合堆载预压后再施工轻质土路堤时，轻质土厚度应按式（18）、式（19）计算并取大者。需要卸除的填土厚度应按式（20）计算。

$$T_l = \frac{K\gamma_f[T_e S_f - T_f(S_f U_t + S_{ra})]}{S_f(\gamma_f - \gamma_l)} \quad (17)$$

$$T_l = \frac{K\gamma_f[T_e S_f - T_{vf}(S_f U_t + S_{ra})]}{S_f(\gamma_f - \gamma_l)} \quad (18)$$

$$T_l = T_e - T_p - T_f \quad (19)$$

$$T_r = T_f + T_l + T_p - T_e \quad (20)$$

式中：

T_l ——轻质土换填厚度（m）；

K ——安全系数，宜取 1.2~1.3；

γ_f ——路堤填土容重（ kN/m^3 ）；

T_e ——路面结构等效填土厚度、路堤设计填土高度、换填轻质土前已完成沉降土方之和（m）。

水位以下沉降土方容重应换算为水位以上填土容重；

S_f ——对应 T_f 的最终沉降（m）；

T_f ——预压填土厚度（m），已通车公路尚应包括路面结构的等效填土厚度。水位以下沉降土方容重应换算为水位以上填土容重；

U_t ——产生工后沉降的主要土层的固结度；

S_{ra} ——容许工后沉降（mm），不宜大于 50 mm；

γ_l ——轻质土容重（ kN/m^3 ）；

T_{vf} ——包括真空荷载等效填土厚度的预压填土厚度（m），已通车公路尚应包括路面结构的等效填土厚度。水位以下沉降土方容重应换算为水位以上填土容重；

T_r ——需要卸除的填土厚度（m）；

T_p ——路面结构等效填土厚度（m）。

6 配合比

6.1 一般规定

- 6.1.1 泡沫轻质土配合比设计包括配合比计算、试配、调整、配合比确定及出具配合比报告等工作内容。
- 6.1.2 泡沫轻质土配合比设计应采用实际使用的原材料进行试配，适配前应按照本文件的规定对原材料进行检验。
- 6.1.3 泡沫轻质土配合比设计应包含湿容重、浆料流动度、抗压强度、体积吸水率、湿容重增加率和浆料标准沉降距等指标，并应符合下列规定：
- a) 湿容重等级和体积吸水率应符合设计要求；
 - b) 流动度宜为 140mm~180mm；
 - c) 28d 抗压强度应大于设计抗压强度的 1.1 倍。
- 6.1.4 试验用小型发泡机发泡量不应小于 50L/min，泡沫密度范围 25g/L-60L/g，泡沫密度要求每隔 10s 连续 3 次测量值的误差范围 $30 \pm 2g$ 。

条文说明：

c) 试配过程是采用小型发泡设备发泡，小型强制搅拌机先将粉料和水搅拌均匀，再加入泡沫搅拌成泡沫轻质土，最后制作试件。现场实际施工时采用一体化大型搅拌设备，采用螺旋混合浆料长距离泵送浇筑。大体积的浇筑生产精细程度和浆料的均匀性要低于适配试验，因此，适配时28d抗压强度提高至设计抗压强度的1.1倍。工期紧张时，试配中可用7d 抗压强度推测28d 抗压强度，宜做7d 抗压强度和28d 抗压强度相关性试验、统计分析。

6.2 配合比计算

- 6.2.1 泡沫轻质土的配合比宜按设计湿容重配置和计算材料用量。
- 6.2.2 泡沫轻质土用水量和泡沫轻质土设计湿容重可按公式（21）、（22）计算：

$$m_w = B \times (m_c + m_m) \dots\dots\dots (21)$$

$$\rho_s = \frac{(m_c+m_m+m_w+\beta m_f)}{100} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

- m_w ——1m³泡沫轻质土的用水量（kg）；
- m_c ——1m³泡沫轻质土的水泥用量（kg）；
- m_m ——1m³泡沫轻质土的掺合料用量（kg）；
- m_f ——1m³泡沫轻质土的发泡剂用量（kg）；
- β ——发泡剂稀释倍数；
- ρ_s ——泡沫轻质土的湿容重 (kN/m³)；

B ——水胶比，用水量与胶凝材料的质量比，未掺入减水剂时，水胶比可按0.5~0.7选取；掺入减水剂时，水胶比应通过试验确定。

条文说明：

也是水泥的磨细程度越来越高的原因，未掺入减水剂时搅拌用水量也对应偏大，才能将水泥基浆料搅拌分散均匀。因此，将未掺入减水剂的水胶比提高至0.7。

公路行业泡沫轻质土生产采用的是大产能一体化设备，对应的搅拌、螺旋混合及泵送设备适应的原材料均为罐装粉料。含细集料和骨料的泡沫轻质土需要强制式搅拌机混合泡沫与浆料，湿容重一般在 $10\text{kN/m}^3\sim 18\text{kN/m}^3$ ，更多的属于轻质混凝土应用范畴，因而湿容重计算时未考虑骨料内容的计算。

6.2.3 1m^3 泡沫轻质土中，由水泥、掺合料和水组成料浆总体积 V_1 和泡沫添加量 V_2 可按公式（23）、（24）计算：

$$V_1 = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_m}{\rho_m} \dots\dots\dots (23)$$

$$V_2 = k(1 - V_1) \dots\dots\dots (24)$$

式中：

- V_1 —由水泥、掺合料和水组成浆料总体积（ m^3 ）
- ρ_c —水泥密度（ kg/m^3 ），取 3100kg/m^3 ；
- ρ_w —水的密度（ kg/m^3 ），取 1000kg/m^3 ；
- ρ_m —掺合料密度，实测（ kg/m^3 ）；
- V_2 —泡沫添加量（ m^3 ）；
- k —富余系数：视发泡剂质量、制泡时间及泡沫加入到浆料中再混合时的损失而定，对于稳定性较好的发泡剂， k 取值 $1.1\sim 1.3$ 。

6.2.4 发泡剂的用量可按公式（25）、（26）计算：

$$m_f = \frac{m_y}{\beta + 1} \dots\dots\dots (25)$$

$$m_y = V_2 \rho_f \dots\dots\dots (26)$$

式中：

- m_f — 1m^3 泡沫轻质土的发泡剂用量（ kg ）；
- m_y —形成泡沫的稀释后泡沫液质量（ kg ）；
- β —发泡剂稀释倍数；
- ρ_f —泡沫密度（ kg/m^3 ）。

6.3 配合比试配

6.3.1 试配应进行湿容重、流动度和湿容重增加量、体积吸水率和浆料标准沉降距试验，当各指标满足要求时，制取试件并养护。抗压强度选用 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的立方体试件，试件制取数量每个配合比不少于 2 组 6 块；标准沉降距试件试件选用 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的立方体试件，每个配合比不少于 1 组 3 块。

条文说明：

当流动度或湿容重增加量不满足要求时，应调整发泡剂的稀释倍率或种类，或调整配合比组成材料的种类和用量，重新进行试配试验。湿容重增加量试验用的浆料不能用于制作试件。如需设计提出软化系数要求时，应增加1组软化试验用试件。

6.3.2 当标准沉降距、抗压强度、体积吸水率不满足要求时，应调整发泡剂的种类和稀释倍率，或调整胶凝材料的用量、标号或品牌，重新进行试配试验。

6.4 配合比确定

泡沫轻质土试配指标结果满足要求后，确定配合比，并形成报告。

7 施工

7.1 一般规定

- 7.1.1 施工前应收集施工图纸、地质勘察报告，对现场施工环境进行调查，编制施工方案，进场前进行技术交底。
- 7.1.2 泡沫轻质土站点宜建在施工工点附近，施工便道应满足粉料罐车通行。
- 7.1.3 施工前应进行配合比验证，施工时应严格按照报验配合比施工，不得随意调整。
- 7.1.4 在浇筑泡沫轻质土之前应做好基底防、排水工作，防止坑槽积水或轻质土与其交界面积水。在地下水或地表渗水比较丰富区域，应采用渗沟、渗井集水进行排水。
- 7.1.5 在大雨天、环境温度低于 5℃或超过 38℃时，不宜进行泡沫轻质土施工。
- 7.1.6 泡沫轻质土工程量超过 10000m³时应先进行试验段施工，并编制试验段总结报告。试验段应选择在地质条件、断面形式及工程量具有代表性段落。
- 7.1.7 路面结构层施工宜在泡沫轻质土路床表面浇筑层强度或路床弯沉达到设计要求后进行。

7.2 施工准备

- 7.2.1 应按原材料使用计划，组织原材料和附属材料进场、检验。
- 7.2.2 按计划组织设备进场，设备安装完成后应进行调试和标定。设备的要求如下：
 - a) 单台设备泡沫轻质土浆料稳定泵送浇筑量≥90m³/h。
 - b) 发泡装置单元应具有发泡剂、水的体积比自动控制与稀释功能。
 - c) 设备应具有自动进料、电子计量、自动控制等功能。各单元控制系统应相互联动，具有自动统计和汇总功能。
 - d) 综合信息显示屏应动态显示各个单元的计量信息和控制参数。
 - e) 设备计量系统应通过相关检测资质的检测机构标定。

条文说明：

a) 泡沫轻质土路基施工为分仓浇筑。设备的产能越大单仓浇筑完成所需时间越短，浆料在初凝前即可均匀混合，成品质量越好。用于路基时泡沫轻质土均为大体积浇筑，因而单台设备稳定产能要求每小时不低于90m³。

b)、c) 为目前国内公路行业泡沫轻质土设备能达到的要求。

7.2.3 泡沫轻质土制作过程中，原材料计量精度要求应符合表 14 的要求。

表 14 原材料计量精度要求

材料	计量单位	计量精度
水泥、外加剂	kg	±2%
水	kg	±2%
发泡剂	L	±2%
掺合料	kg	±2%

条文说明：

表14为原材料的计量精度要求，通过控制原材料的计量精度，达到表6中泡沫轻质土浇筑浆料的湿容重允许偏差范围。

7.2.4 泡沫轻质土施工前应进行工作面的验收，要求如下：

- a) 工作面按设计要求测设放样，确定泡沫轻质土路基边线、基底高程、台阶或坡面开挖的位置；
- b) 基底为原状土或老填土时，应参考 JTG/T 3610 的要求进行场地清理和整平；基底为新填土时，应满足路基分区压实度要求；
- c) 当有地基承载力要求时，基底应进行地基承载力判定。当存在软弱土时应通知建设单位确定处理方案。当与勘察和设计工况不一致时，应及时提出处理方案；
- d) 除设计要求外，开挖后的渣土严禁在路基外侧堆放。

条文说明：

b) 局部存在软弱土体和碎渣应予以清除。

c) 当基底土存在软硬不均时，容易造成泡沫轻质土路基不均匀沉降，导致轻质土填筑体产生结构性剪切开裂，施工时如发现应及时联系项目相关单位，必要时进行软基处理。

d) 路基外侧堆放渣土，附加荷载容易引起地基不均匀沉降，造成轻质土路基的破坏。尤其在软土地基减荷时，更应予以重视。

7.2.5 泡沫轻质土施工前应做好用水、用电规划，满足生产需要。**7.3 现场浇筑****7.3.1 水泥基浆料制备要求如下：**

- a) 根据确定的施工配合比和工艺参数进行水泥基浆料拌合，应确保各组分混合均匀。
- b) 将拌合好的水泥基浆料存储在具备搅拌功能的存储罐内，避免水泥基浆料沉淀。
- c) 水泥基浆料制作到使用的时间不应超过 1h。

7.3.2 泡沫制作要求如下：

- a) 根据配合比稀释倍数要求稀释发泡剂。
- b) 泡沫的产生宜采用压缩空气对发泡剂水溶液加压，发泡倍数可调且稳定。

7.3.3 将泡沫与水泥基浆料稳压混合，形成符合要求的泡沫轻质土浆料。

7.3.4 泡沫轻质土浆料应采用泵送施工，水平泵送最大距离不宜超过 500m，垂直泵送高度不宜超过 20m。地形复杂区域应根据现场情况合理配置输送泵，超出泵送距离和高程时可采用中继泵进行远距离输送或采用分级泵送水泥基浆料，混泡应在最后一级进行。

条文说明：

按照施工经验，以粉料制作的泡沫轻质土浆料水平泵送最大距离约500m，垂直泵送高度约20m。泵送距离越长，浆料的流量越小，300m以内的泵送距离施工效率最好。

7.3.5 应采用分仓、分层方式进行浇筑作业，施工宜间隔一个分区浇筑，单仓浇筑体积不宜大于 100m³，单层浇筑厚度宜控制在 50cm~90cm，最小浇筑厚度不宜小于 30cm。单仓浇筑时间应控制在水泥基浆料初凝时间内。

条文说明：

施工过程中考虑到水泥基浆料的初凝时间，当水泥基材料初凝，就不能再继续施工，所以施工过程要进行分层分块，同时要考虑设备的产能，根据设备的产能来确定分块的大小。目前设备产能大于90立方米每小时，分块一般控制在100m²左右。

单层浇筑的最佳厚度为50cm~90cm,单层厚度过大时泡沫轻质土底部浆料压力增大容易消泡、泌水,形成质量缺陷。单层泡沫轻质土过薄影响整体性,因此本文件提出单层最小厚度要求。

7.3.6 泡沫轻质土浆料宜采用埋管和抛射混合方式分层浇筑。第1层采用埋管方式浇筑,浇筑顺序由浇筑仓内侧向外外侧托管浇筑,尽量减少混合料流动距离;第2层采用抛射方式浇筑,浇筑管宜与浇筑面保持缓倾角度,浇筑时出料口离浇筑点的高差宜控制在1m以内,浇筑顺序由内侧向外侧均匀浇筑;浇筑至每仓顶面时进行喷洒扫平。浇筑喷射浆料不应直接冲击面板及伸缩缝模板部位,避免造成面板底部及接缝处的渗漏。

条文说明:

《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》CJJ/T 177在基于泡沫轻质土小产能的基础上,规定泡沫轻质土浆料采用埋管浇筑的方式,浇筑过程工人站立在浆料中移动浇筑管口,优点是可以避免空气在浇筑过程中混入浆料中形成大气泡。缺点是管道在浇筑浆料中反复拖拽,对前期逐渐初凝的浆料扰动较大,破坏了浆料的均匀性;再者水泥的水化热高,夏天浆料的最高温度超过70℃,工人的工作环境恶劣。

近些年国内的设备和发泡剂技术提升较快,设备产能大,泡沫浆料的稳定性好,消泡率低。实际工程均采用的抛射方式浇筑。浇筑时工人可沿浇筑仓的长边前后移动浇筑管和浇筑管口,采用抛射方式浇筑直接将浆料抛射至浇筑位置,尽量减少浆料的流动距离。抛射的冲击力也可将浆料进行拌合。

7.3.7 泡沫轻质土浆料终凝后方可进行下一层的浇筑施工。

7.3.8 泡沫轻质土浇筑过程控制要求如下:

- a) 浇筑过程的质量检验应符合表15的规定,检验结果应填写浇筑质量检验记录;
- b) 浇筑过程试件制作及养护要求如下:
 - 1) 同一配合比连续浇筑时,每400m³制取2组试件;不足400m³时,取2组;
 - 2) 宜在浇筑管管口取样制作试件;
 - 3) 试件脱膜后,应置于密封塑料袋中或覆膜进行养护;
- c) 浇筑过程中应对施工人员操作、设备参数设置、模板安装质量进行检查。

表 15 浇筑过程的质量检验

项次	检验项目	检验频率	检验方法
1	流动度(mm)	连续浇筑每200m³自检1次	CJJ/T 177
2	湿容重(kN/m³)	连续浇筑每200m³自检1次	CJJ/T 177

条文说明:

《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》CJJ/T 177-2012中第7.2.3节c)条的表述为“当同一配合比连续浇筑大于400m³时,应按每400m³制取2组试件”,对于刚好400m³情况没有包含进去,本文件改为“当同一配合比连续浇筑不少于400m³时,应按每400m³制取2组试件”;另外,对于当同一配合比连续浇筑少于400m³时,改为取2组,与《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610中的要求保持一致。

7.4 附属工程施工

7.4.1 护壁采用混凝土预制面板时,预制面板制作要求如下:

- a) 浇筑混凝土前,应按设计要求定位面板预埋环和粗铁丝网片。
- b) 浇筑混凝土时,要注意控制好振动过程,确保拆模后面板外侧光面、颜色均一。
- c) 浇筑完混凝土后,应重新测量定位面板预埋环位置。

7.4.2 面板安装施工要求如下:

- a) 面板安装前应标出面板外边线并进行水平测量,曲线部分应加密控制点。

- b) 砌缝应平直饱满，外侧勾凹缝。
 - c) 面板安装接近设计顶标高时，通过裁切顶部面板拟合顶面纵坡线性。
- 7.4.3 护壁采用钢筋混凝土薄壁墙时，应符合下列要求：
- a) 地基开挖后应进行地基承载力检测，地基承载力应满足设计要求。当存在软弱土层须换填或进行地基处理；
 - b) 薄壁墙与填筑体之间的拉接构件应在墙体钢筋绑扎和混凝土浇筑时预埋，也可先预埋部分构件再进行焊接接长，焊接搭接长度满足要求。不应在混凝土浇筑完成后植筋或开凿墙体焊接钢筋。
- 7.4.4 钢丝网或钢塑土工格栅铺设、沉降缝设置、抗滑锚固、防排水设施、防撞护栏等附属工程施工应符合有关标准和设计文件的要求。

7.5 养护

- 7.5.1 不宜直接在固化后的泡沫轻质土表面进行机械、车辆作业或堆压重物。
- 7.5.2 相邻浇筑层间隔时间超过 48 小时应进行保湿养护，最后一层泡沫轻质土的养护时间不得少于 7 天。

8 质量检验与评定

8.1 一般规定

- 8.1.1 泡沫轻质土路基质量检验与评定应符合 JTG F80/1-2017 的规定。

条文说明：

泡沫轻质土路基质量检验与评定程序参考《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1-2017中3.1、3.2和3.3条的规定。

- 8.1.2 泡沫轻质土路基工程作为一个分部工程进行质量检验与评定，分部工程划分应符合表 16 的规定。

表 16 泡沫轻质土路基的工程划分

单位工程	分部工程	分项工程
路基工程	泡沫轻质土路基（1~3km 路段）	泡沫轻质土、护壁、现浇顶板等

条文说明：

泡沫轻质土路基作为路基工程的重要组成部分，作用类似于支挡防护工程，本文件将路基工程中的泡沫轻质土路基划分为分部工程。其构造组成包含项目较多，可划分为多个分项工程进行验收，因此，本标准将泡沫轻质土路基划分为泡沫轻质土填筑体、护壁、现浇顶板等。

- 8.1.3 检查项目合格判定应符合下列规定：

- a) 关键项目的合格率应不低于 95%，否则该检查项目为不合格；
- b) 一般项目的合格率应不低于 80%，否则该检查项目为不合格；
- c) 有规定极值的检查项目，任一单个检测值不应突破规定极值，否则该检查项目为不合格。

8.2 泡沫轻质土

- 8.2.1 泡沫轻质土应符合下列基本要求：

- a) 原材料的技术性能、规格符合设计要求和相关标准规范的规定；
- b) 泡沫轻质土的抗压强度、湿容重符合设计要求；

- c) 填筑体钢丝网、土工格栅的规格、间距和搭接等应符合设计要求，基层处理应符合设计要求；
- d) 施工资料、图表和试验检测数据齐全。

8.2.2 泡沫轻质土实测项目应符合表 17 的规定。

表 17 泡沫轻质土实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检验方法	检验频率
1	△表干容重 (kN/m³)		符合表 6 的规定	附录 C	7.3.8 条
2	△强度(MPa)	成型试件	不小于设计值	GB/T 50081	7.3.8 条
		动力触探	在合格标准内	附录 D	每 100m² 不少于 2 点且每个自然 段路基不少于 2 点
		钻芯法	在合格标准内	附录 E	动力触探异常处钻取 1 孔
3	顶面高程(mm)		+50, -30	水准仪	每 100m² 不少于 2 点
4	轴线偏位(mm)		50	经纬仪或尺量	每 20m 测 1 点
5	厚度(mm)		+50	尺量	每 20m 测 1 点
6	宽度(mm)		+50	尺量	每 20m 测 1 点
7	基底高程 (mm)	土质	±50	水准仪	每 20m 测 1 点
		石质	+50, -200		
注1：在空洞充填、管线回填工程中，一般项目内容可不检查。					
注2：“△”标注的为关键项目，其他为一般项目。					
注3：成型试件强度按照GB/T 50081方法检测，加载速率取20mm/min。					

8.2.3 泡沫轻质土外观质量应符合下列规定：

- a) 材质气孔大小均匀、细密，截面表面气孔直径应小于 1.0mm；
- b) 表面出现的非受力贯穿裂缝宽度应小于 2.0mm；
- c) 表面蜂窝面积应小于总表面积的 1%。

8.3 护壁

8.3.1 护壁应符合下列基本要求：

- a) 原材料的技术性能、规格符合设计要求和相关标准规范的规定；
- b) 预制混凝土护壁面板在运输、安装过程不得断裂；
- c) 砌体砂浆配合比准确，砌筑应分层错缝，砌缝内砂浆均匀饱满、勾缝密实；
- d) 变形缝的位置、尺寸和数量应满足设计要求；变形缝应竖直、贯通，填缝料应填充密实，填充深度应满足设计要求。

8.3.2 预制面板实测项目应分别符合表 18 的规定。

表 18 预制面板的质量检验

项次	检验项目	规定值或允许偏差	检验方法	检验频率
1	混凝土强度(MPa)	不小于设计值	成型试件, 按照 GB/T 50081 检测	每 10m³取一组
2	边长(mm)	±0.5%	尺量	长宽各测 1 处, 每 200 块抽查 1 块, 每项目至少 5 块
3	两对角线差(mm)	±0.7%	尺量	每 200 块检查 1 块, 每项目至少 5 块
4	厚度(mm)	+5, -3	尺量	检查 2 处, 每 200 块检查 1 块, 每项目至少 5 块
5	表面平整度(mm)	±0.3%	直尺	长宽各测 1 次, 每 200 块检查 1 块, 每项目至少 5 块
6	预埋件位置(mm)	10	尺量	每 200 块抽查 1 块, 每项目至少 5 块

8.3.3 面板安装实测项目应分别符合表 19 的规定。

表 19 面板安装的质量检查

项次	检验项目	规定值或允许偏差	检验方法	检验频率
1	断面尺寸(mm)	不小于设计值	尺量	每 20m 量测 1 处
2	顶面高程(mm)	±50	水准仪	每 20m 量测 1 处
3	轴线偏位(mm)	50	经纬仪或尺量	每 20m 量测 1 处
4	面板垂直度	- 0.5%	挂垂线	每 20m 量测 1 处

8.3.4 现浇面板实测项目应分别符合表 20 的规定。

表 20 现浇护壁的质量检查

项次	检验项目	规定值或允许偏差	检验方法	检验频率
1	混凝土强度(MPa)	不小于设计值	成型试件, 按照 GB/T 50081 检测	每 10m³取一组
2	断面尺寸(mm)	不小于设计值	尺量	每 20m 量测 1 处
3	顶面高程(mm)	±50	水准仪	每 20m 量测 1 处
4	坡度(%)	≤0.3	铅锤法	每 20m 量测 1 处
5	表面平整度 (mm)	≤8	2m 直尺	每 20m 量测 1 处

8.3.5 护壁外观质量应符合下列规定：

- a) 面板安装应光洁平顺，板缝均匀，线形顺适，无外鼓变形，变形缝上下贯通顺直；
- b) 现浇护壁表面无渗水和结晶物析出。

8.4 现浇顶板

8.4.1 现浇顶板应符合下列基本要求：

- a) 现浇顶板应采用钢筋混凝土，顶板坡度应符合设计要求；
- b) 顶板与泡沫轻质土紧密粘结，无脱空缺陷出现；
- c) 调坡层、衔接面锚固措施应符合设计要求。

8.4.2 现浇顶板实测项目应符合表 21 的规定。

表 21 现浇顶板实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	△强度(MPa)	成型试件	不小于设计值	每 100m3 成型 1 组且每个自然段不少于 1 组
		钻芯法	在合格标准内	每 400m 测 2 点且 每个自然段不少于 1 点
2	△板厚度 (mm)	合格值	-10	参考路面板厚，每 400m 测 2 点且 每个自然段不少于 1 点
		极值	-25	
3	纵断高程 (mm)		+10, -15	水准仪：中线位置每 200m 测 2 点
4	宽度 (mm)		不小于设计值	尺量：每 200m 测 4 点
5	平整度 (mm)		≤15	3m 直尺，每 200m 测 2 处×5 尺
注：“△”标注的为关键项目，其他为一般项目。				

条文说明：

当前泡沫轻质土路基浇筑完毕后，在上方都会浇筑混凝土顶板，然而对于顶板的质量检验缺少标准规范，鉴于此本文件增加了现浇顶板的质量检验内容。

8.4.3 现浇顶板外观质量应符合下列规定：

- a) 不应出现 JTG F80/1 附录 P 中板的外观质量缺陷；
- b) 表面平整、清洁、无积水。

附录 A
(规范性)
吸水及软化性能试验

A.1 适用范围

适用于测定泡沫轻质土体积吸水率及软化性能。

A.2 仪器、设备

吸水及软化性能试验使用的仪器、设备应满足下列要求：

- a) 电子天平，称量 2000g，精度 0.1g
- b) 电热鼓风干燥箱，温度偏差±2℃；
- c) 游标卡尺：尺长 200 mm，分度值为 0.02mm；
- d) 恒温水槽或水箱，水温（20±5）℃；
- e) 材料试验机：除应符合现行国家标准 GB/T 2611 中技术要求的规定外，精度不应低于±2%，量程的选择应能使试件的预期最大破坏荷载处在全量程的 20%~80%范围内。

A.3 试件制作及试验取样方法

试件制作及试验取样方法应满足下列要求：

- a) 试件成型：在试模内浇筑成型；
- b) 规格数量：100mm×100mm×100mm 的立方体试件，共 2 组，每组 3 块；
- c) 试件养护：试件由试模中拆出后，应按组放入塑料袋内密封养生 28d，养生温度应为 20℃±2℃。

A.4 试件吸水方法

将1组试件放入水温为（20±5）℃的恒温水槽或水箱内，保证水面高出试件10cm。试件浸水72h后取出，用湿布抹去表面水分，立即称取每块质量，精确至0.1g。

A.5 泡沫轻质土吸水软化性能试验步骤

泡沫轻质土吸水软化性能试验应按下列步骤进行：

- a) 取 1 组试件按 A.4 步骤吸水后每块试件分别进行抗压强度试验；
- b) 取另 1 组继续标养的试件与吸水后的试件同时分别进行抗压强度试验；
- c) 并计算各组抗压强度平均值 f'_{xc} 和 f_{xc} ；
- d) 吸水软化性能结果应按公式（A.1）计算：

$$K_x = \frac{f'_{xc}}{f_{xc}} \cdots \cdots \cdots (A.1)$$

式中：

- K_x — 软化系数；
- f'_{xc} — 一组吸水后试件强度平均值（MPa），精确至 0.01MPa；
- f_{xc} — 另一组与吸水后试件同龄期标养试件强度平均值（MPa），精确至0.01MPa。

A.6 体积吸水率试验步骤

体积吸水率试验应按下列步骤进行：

- a) 将 A. 5 步骤中压碎后的吸水试件全部碎渣单个装盘放入电热鼓风干燥箱内，在（50±5）℃下保持 24h，烘至恒重；
- b) 计算一组压碎后的吸水试件全部碎渣质量平均值 m_0 ，计算一组碎渣烘干后质量平均值 m_1 ；
- c) 试验结果按公式（A. 2）计算：

$$w = \frac{m_0 - m_1}{\rho_w V} \times 100\% \dots\dots\dots (A. 2)$$

式中：

- w —吸水率(%)；
- m_0 —一组压碎后的吸水试件全部碎渣质量平均值（g），精确至0.1g；
- m_1 —一组碎渣烘干后质量平均值（g），精确至0.1g；
- ρ_w —4℃时水的密度，单位（g/cm³）。
- V —试件体积，单位（cm³）。

附录 B
(规范性)
干湿循环性能试验制度

B.1 适用范围

适用于测定泡沫轻质土干湿循环性能。

B.2 仪器、设备

干湿循环性能试验使用的仪器、设备应满足下列要求：

- a) 电子天平，称量 2000g，精度 0.1g；
- b) 游标卡尺：尺长 200 mm，分度值为 0.02mm；
- c) 恒温水槽或水箱，水温（20±5）℃；
- d) 材料试验机：除应符合现行国家标准 GB/T 2611 中技术要求的规定外，精度不应低于±2%，量程的选择应能使试件的预期最大破坏荷载处在全量程的 20%~80%范围内；

B.3 试件制作及试验取样方法

试件制作及试验取样方法应满足下列要求：

- a) 试件成型：在试模内浇筑成型；
- b) 规格数量：100mm×100mm×100mm 的立方体试件，共 2 组，每组 3 块；
- c) 试件养护：试件由试模中拆出后，应按组放入塑料袋内密封养生 28d，养生温度应为 20℃±2℃。

B.4 泡沫轻质土干湿循环步骤

泡沫轻质土干湿循环应按下列步骤进行：

- a) 将 1 组标准养护后的试块，浸入水温为（20±5）℃的水槽中，保证水面高出试件 30cm，保持 24h 后取出，用湿布抹去表面水分，在室内（20±5）℃自然晾干 24h，作为 1 次干湿循环。
- b) 将达到需要干湿循环后试验次数后的试块分别进行抗压强度试验，并计算抗压强度平均值 f'_{gc} 。
- c) 取另 1 组继续标养的试件与步骤 b) 中的试件同时进行抗压强度试验，并计算各组抗压强度平均值 f_{gc} 。
- d) 达到干湿循环试验次数后对应的干湿循环系数结果按公式（B.1）计算：

$$K_g = \frac{f'_{gc}}{f_{gc}} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

K_g —达到干湿循环试验次数后对应的干湿循环系数；
 f'_{gc} —达到需要干湿循环次数后试件强度平均值（MPa），精确至 0.01MPa；
 f_{gc} —另一组与干湿循环后试件同龄期标养试件强度平均值（MPa），精确至0.01MPa。

附录 C
(规范性)
表干容重、饱和容重试验

C.1 适用范围

适用于测定泡沫轻质土表干容重和饱和容重。

C.2 仪器、设备

表干容重、饱和容重使用的仪器、设备应满足下列要求：

- a) 钢模或塑模：规格100mm×100mm×100mm；
- b) 电子秤：最大量程2000g，精度为0.1g；
- c) 游标卡尺：尺长200 mm，分度值为0.02mm；
- d) 恒温水槽：控制水温（20±5）℃。

C.3 试件制作

试件制作及试验取样方法应满足下列要求：

- a) 试件制备：在试验室搅拌机拌合浆料或在现场浇筑管出口处取样，浇筑成型；
- b) 规格数量：100mm×100mm×100mm立方体试件，二组6块；
- c) 试件养护：试件由钢模中拆出后，3块为一组放入塑料袋内密封自然养护，保持室内养生温度（20±2）℃，养生龄期为28天。

C.4 表干容重试验步骤

表干容重试验应按下列步骤进行：

- a) 试件分3块为一组，逐块量测长、宽、高三个方向的轴线尺寸，精确至1mm；
- b) 计算出试件体积 V （cm³）；
- c) 称量每块试件称重质量 m_a （g）。

C.5 饱和容重试验步骤

饱和容重试验应按下列步骤进行：

- a) 试件放入水温为20±5℃的恒温水槽中，然后加水至试件高度的1/3，经24h，加水至试件高度的2/3，经24h后，再加水至高出试件顶面300mm以上，保持24h；
- b) 将试件从水中取出，擦去表面水分，立即称取每块试件重量 m_s （g）。

C.6 数据处理

数据处理应符合下列要求：

- a) 按公式(C.1)计算出表干容重 γ_a （kN/m³）；
- b) 按公式(C.2)计算出饱和容重 γ_s （kN/m³）。

$$\gamma_a = \frac{10 \times m_a}{V} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$\gamma_s = \frac{10 \times m_s}{V} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

γ_{α} —表干容重 (kN/m³)；

m_{α} —每块标准养护泡沫轻质土试件称重质量 (g)；

V —试件体积 (cm³)。

γ_s —饱和容重 (kN/m³)；

m_s —饱水养护之后的泡沫轻质土试件称重质量 (g)；

附录 D
(规范性)
N₂₀圆锥动力触探法

D.1 适用范围

本方法适用泡沫轻质土填筑体强度推定。

D.2 检测设备

N₂₀圆锥动力触探法使用的检测设备应满足下列要求：

- a) 用于泡沫轻质土填筑体的圆锥动力触探试验的设备参数应符合表 D.1 的要求。
- b) 动力触探设备各部件应由高强度的钢材制作，探杆应采用平直实心杆；探头材料采用 45 号碳素钢或采用优于 45 号碳素钢。
- c) 动力触探设备的落锤应定期进行校准，检查探头磨损、锥尖高度磨损、探杆直线偏差及连接处丝扣完好情况。
- d) 其他辅助工具：钢直尺等，探杆起拔器。

表 D.1 动力触探设备规格

落锤		探头		探杆直径（mm）
重锤质量（kg）	重锤落距（cm）	探头直径（mm）	锥角（°）	
20±0.2	50±2	40	60	25

D.3 触探方法

触探应按下列方法进行：

- a) 落锤应自由落体下落，落距应为 50±2cm。
- b) 检测锤击开始前，应在探杆上贯入 30cm 的位置进行标识。锤击过程保持重锤沿导杆铅直下落。
- c) 记录贯入 30cm 时的锤击数。当贯入深度 30cm 不对应整数锤击数时，以贯入深度超过 30cm 的前一击数值作为锤击数结果；其中贯入深度记录精确至 1cm。
- d) 绘制单孔贯入击数与深度 N 直方图，计算同一强度击数的平均值。
- e) 触探后的孔洞灌注水泥浆或水泥砂浆封堵。

D.4 触探频率、数量要求

圆锥动力触探检测频率、数量符合下列规定：

- a) 圆锥动力触探检测应在最后一层浇筑完成后 28d 进行；
- b) 触探点竖向贯入深度应贯穿泡沫轻质土浇注体，触探击数应连续、无明显连续突变。

D.5 判定依据

表D.2为设计强度与触探标准击数对照表。现场测试的触探击数不应小于表D.2中的触探击数。当局部存在软弱夹层时，层厚不应大于60cm，击数不应少于标准击数3击。

表 D.2 抗压强度与触探击数对照表

设计强度（MPa）	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5
标准击数（击）	12	18	25	32	45

附 录 E
(规范性)
填筑体钻芯法

E.1 适用范围

适用于采用地质勘探钻机或便携式钻芯机现场取芯，检验泡沫轻质土填筑体浇筑质量和强度。

E.2 检测设备

填筑体钻芯法使用的检测设备应满足下列要求：

- a) 钻取芯样、芯样加工和测量的检测设备与仪器均应有产品合格证，计量器具经检定或校准，并应在有效期内使用；
- b) 钻取芯样时宜采用人造金刚石薄壁钻头。钻头胎体不得有裂缝、缺边、少角、倾斜及喇叭口变形；
- c) 锯切芯样使用的锯切机应具有牢固夹紧芯样的装置，配套使用的人造金刚石圆锯片应有足够的刚度；
- d) 宜选用芯样试件公称直径为 100mm 的钻头钻取。

E.3 芯样钻取

芯样钻取应按下列步骤进行：

- a) 芯样应在具有代表性的部位钻取，钻孔位置应避开收缩裂缝，且距离不小于 40cm；
- b) 钻芯机应安放平稳，固定牢靠。钻取芯样时应缓慢匀速钻进，钻进过程保持钻头稳定，钻芯时应加大循环冷却水的流量重排碎屑；
- c) 芯样钻取部位应进行标记、记录，量取芯样节段长度。芯样钻取记录完后排列整齐拍照留底；
- d) 可制取试件的芯样装入密封袋密封，放置在室内进行自然养护；
- e) 钻芯后留下的孔洞应及时进行修补。

E.4 芯样试件加工

芯样试件加工应满足下列要求：

- a) 芯样试件的高度与直径之比宜为 1.00，小于 0.95 或大于 1.05 时无效。
- b) 芯样试件的端面应进行磨平处理，磨平后的试件各方向高度偏差 $\leq \pm 0.1\text{mm}$ 。
- c) 芯样试件上的孔洞应采用石膏胶泥补平，孔洞直径大于 1cm 时应重新加工制作试件。
- d) 在试验前应按下下列规定测量芯样试件的尺寸：
 - 1) 平均直径用游标卡尺在芯样试件上部、中部和下部相互垂直的两个位置上共测量六次，取测量的算术平均值作为芯样试件的直径，精确至 0.5mm；
 - 2) 芯样试件高度用游标卡尺测量，间隔 60°角测量一次，共六次，精确至 0.5mm。芯样试件的实际高度应在 95mm~105mm 之间，高度偏差不满足要求时重新加工直至满足要求。

E.5 抗压强度检测

- a) 芯样试件检测 28d 抗压强度。
- b) 芯样试件抗压强度试验仪器、操作要求及强度计算符合 CJJ/T 177 的规定。
- c) 每组 5 块芯样试件，除去最低和最高值，取 3 块试件抗压强度算术平均值作为抗压强度结果。

E.6 芯样完整性指数

采用地质勘探钻机钻取芯样时，每回次进尺≥10cm的柱状芯样累计长度与每个钻进回次进尺的百分比，计算芯样完整性指数FQD。芯样质量评定参照表E.1。

表 E.1 芯样质量评价

完整程度	完 整	较完整	较破碎		破 碎
完整性指数	>90%	90%~75%	75%~50%		<50%
完整性评价	优良	合格	合格	不合格	不合格
芯样外观性 状	芯样连续完整， 芯柱断口吻合程 度高；芯样表面 光滑，泡孔均匀， 偶有大直径泡孔	芯样基本连续完整，连 续部分的芯柱断口吻合 程度高，破碎部分的芯 柱呈大块状；芯样表面 光滑，泡孔均匀，偶有 大直径泡孔	芯样连续性和完整性 一般，连续部分的芯 柱断口吻合程度一 般，破碎部分的芯柱 呈大块状；芯样不分 层，表面较光滑，泡 孔消泡不明显；芯样 抗压强度满足要求	芯样连续性和完整性一般， 连续部分的芯柱断口吻合 程度一般，破碎部分的芯柱 呈碎块状；芯样有分层现 象，表面粗糙，泡孔消泡明 显；芯样抗压强度不满足要 求	芯样连续性和完 整性差，芯样破碎 或缺失；芯柱显著 分层，表面粗糙， 泡孔消泡明显

E.7 浇筑质量评价

浇筑质量应按下列要求进行评价：

- a) 泡沫轻质土芯样抗压强度不小于设计强度的 75%；
- b) 芯样质量评价合格以上。当芯样质量评价为合格及以上。