



中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路吹填流泥地基处理技术规程

Technical Specification for Ground Treatment of Dredge
Fill in Highway
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction
Standardization

公路吹填流泥地基处理技术规程

Technical Specification for Ground Treatment of Dredge Fill in Highway

主编单位: 温 州 大 学

发布机构: 中国工程建设标准化协会

施行日期: XX 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

XX 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2017 年第 1 批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2017〕36 号）的要求，由温州大学承担《公路吹填流泥地基处理技术规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

编写组按照“全面、实用”的指导原则，进行了广泛的调查研究，查阅了大量国内外有关吹填流泥地基处理的文献资料；积极吸纳近年来国内外吹填流泥地基处理技术的最新研究成果，以及经工程验证的新理论、新技术、新材料、新工艺；掌握国内外先进标准的动态，积极采用经验证符合我国国情的国内外标准；广泛征求主管部门、项目业主、设计、施工等企业的意见；经反复讨论、修改，最终经审查定稿，完成了编制任务。

本规程主要技术内容包括 9 章：总则，术语和符号、基本规定、吹填流泥场地勘察、预压地基沉降与稳定计算、地基处理设计、地基处理施工、施工监测、施工质量检测。

本规程是基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由温州大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组：中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号，邮编：100088；电话：010-62079839），或温州大学建工学院（地址：温州市瓯海区茶山高教园区温州大学建工学院，邮编：325035；电话：0577-86689687；电子邮箱：geowangpeng@163.com），以便修订时参考。

本规范主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位：温州大学

参 编 单 位：华中科技大学

江苏鑫泰岩土科技有限公司

上海大学

上海港湾基础建设（集团）有限公司

同济大学

温州设计集团有限公司

温州市交通规划设计研究院
温州市交通规划设计研究院
浙江大学
浙江工业大学
浙江省交通规划设计研究院
浙江绩丰岩土技术股份有限公司
中交天津港航勘察设计研究院有限公司
中交第一公路勘察设计研究院有限公司

主 编：

参 编 人 员：

蔡袁强	王 军	王 鹏	王立忠	史 吏
马晓华	应永良	谷 川	李进军	张留俊
刘飞禹	金亚伟	杨克军	郭 林	楼晓明
郑俊杰	符洪涛	章荣军	程 瑾	潘晓东
黄茂松				
董全杨	薛维梅			

主 审：

参与审查人员：

吴万平

征求意见稿

目次

1 总则	- 1 -
2 术语和符号	- 2 -
2.1 术语	- 2 -
2.2 符号	- 3 -
3 基本规定	- 7 -
4 吹填流泥场地勘察	- 11 -
4.1 一般规定	- 11 -
4.2 初步设计阶段勘察	- 11 -
4.3 施工图设计阶段勘察	- 13 -
4.4 工程地质测试	- 14 -
5 预压地基沉降及稳定计算	- 16 -
5.1 一般规定	- 16 -
5.2 预压地基沉降计算	- 16 -
5.3 预压地基稳定性验算	- 18 -
6 地基处理设计	- 20 -
6.1 一般规定	- 20 -
6.2 复式真空预压法	- 20 -
6.3 絮凝-真空预压法	- 29 -
6.4 堆载预压法	- 32 -
6.5 真空联合堆载预压法	- 33 -
6.6 水泥搅拌桩法	- 35 -
6.7 桩网复合地基法	- 39 -
7 地基处理施工	- 48 -
7.1 一般规定	- 48 -

7.2 复式真空预压法..... - 48 -

7.3 絮凝-真空预压法..... - 51 -

7.4 堆载预压法..... - 51 -

7.5 真空联合堆载预压法..... - 52 -

7.6 水泥搅拌桩法..... - 53 -

7.7 桩网复合地基法..... - 53 -

8 施工监测..... - 55 -

8.1 一般规定..... - 55 -

8.2 监测断面布置..... - 56 -

8.3 监测实施..... - 57 -

8.4 监测控制指标..... - 59 -

8.5 监测成果编制..... - 60 -

9 施工质量检测..... - 62 -

9.1 一般规定..... - 62 -

9.2 施工过程检测..... - 62 -

9.3 竣工验收..... - 64 -

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为规范公路吹填流泥地基处理设计与施工,提高公路吹填流泥地基处理设计与施工技术水平,,使吹填流泥地基处理设计和施工符合技术先进、安全可靠、经济合理的要求,

1.0.2 本规程适用于各等级公路新建与扩建工程吹填流泥地基处理的设计、施工。其它专用公路、市政道路可参照执行。

1.0.3 公路吹填流泥地基处理应调查收集沿线的地形、地貌、工程地质、水文地质、气象等资料,做好工程地质勘察工作。

1.0.4 公路吹填流泥地基处理应坚持环境保护及节约资源的原则,需符合国家环境保护方面的相关政策及规定。

1.0.5 公路吹填流泥地基处理可采用经工程验证的新技术、新材料、新工艺和新设备。

1.0.6 公路吹填流泥地基处理除应符合本规程的规定外,尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 吹填流泥 dredge fill

采用绞吸或耙吸等方式，通过管道把海底或江河湖泊底部的沉积淤泥输送到指定区域而形成的高含水率淤泥类土，也包括采用挖填等方式形成的高含水率淤泥类土以及经过晾晒、一次地基处理后的吹填淤泥类土

2.1.2 吹填流泥一次处理 first treatment of dredged fill

对吹填流泥进行初步处理，使吹填流泥具备一定强度，形成硬壳层，满足后期施工机械的进场要求。

2.1.3 吹填流泥二次处理 second treatment of dredged fill

在吹填流泥一次处理的基础上，进一步对吹填流泥层及软弱下卧层进行处理，以满足公路工程对地基承载力、工后沉降以及稳定性等方面的要求。

2.1.4 复式真空预压法 complicated vacuum preloading

分级分阶段、密闭式、增压式等真空预压技术的联合应用，将整体式排水板通过接头密闭连接于横向排水系统，同时额外提供由竖向增压板、软管和空气压缩泵构成的增压系统。

2.1.5 真空联合堆载预压法 vacuum preloading combine surcharge loading

采用复式真空预压对吹填流泥处理一段时间，吹填流泥具有一定强度后，联合路堤填方堆载进行预压固结的地基处理方法。

2.1.6 絮凝-真空预压法 flocculant-vacuum preloading

先采用絮凝剂将吹填流泥进行絮凝化处理后，再采用复式真空预压进行地基处理的方法。

2.2 符号

- a —— 桩帽宽度 (m);
 a —— 桩帽边长 (m);
 a_1 —— 换算系数;
 a_i —— 第 i 层下卧层地基土的压缩系数 (kPa^{-1});
 b —— 排水板的宽度 (mm);
 b_i —— 第 i 土条宽度 (m);
 C'_h —— 对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体固结系数 (cm^2/s);
 C_c —— 成拱系数;
 d —— 排水板间距 (cm);
 d_e —— 排水板有效排水直径 (cm);
 d_w —— 排水板等效换算直径 (mm);
 E_{psi} —— 各分层的桩土复合压缩模量 (kPa);
 E_p —— 桩体压缩模量 (kPa);
 E_{si} —— 各分层的土体压缩模量 (kPa);
 e_{0i} —— 第 i 层下卧层地基土的初始孔隙比;
 e_{0i} —— 第 i 层土的初始孔隙比;
 e_{li} —— 第 i 层土在地基固结压力下的孔隙比;
 f_t —— 混凝土轴心抗拉强度 (kPa);
 h —— 土拱高度 (m);
 h_i 、 h_n —— 第 i 、 n 层下卧层地基土的厚度 (m);
 h_i —— 第 i 层土的厚度 (m);
 K —— 安全系数;
 k'_h —— 对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体渗透系数;
 k'_h —— 对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体渗透系数 (cm/s);
 k_c —— 淤堵区土体渗透系数;
 k'_c —— 增压后淤堵区土体渗透系数;
 k_c —— 淤堵区土体渗透系数;
 L —— 塑料排水板的深度 (cm);
 l_i —— 中性点以上第 i 土层的厚度 (m);
 M_R —— 截面抗弯承载力 (kN.m);
 M —— 桩帽截面弯矩 (kN.m);
 m_k —— 渗透增长系数;
 m —— 加载级数;
 m_a —— 增压折减系数;
 m_s —— 沉降经验系数;

- m_t ——强度增长经验系数;
 M_{sd} ——危险滑动面上滑动力矩设计值 (kN.m/m);
 M_{Rk} ——危险滑动面上抗滑力矩标准值 (kN.m/m);
 n ——井径比;
 N ——交通荷载作用次数;
 P_i ——增压前预压荷载 (kPa);
 P_i ——第 i 级预压荷载;
 P_j ——增压后预压荷载;
 p ——地基固结压力 (kN);
 p ——地面均布荷载;
 p ——下卧层地基的固结应力;
 p_a ——气压泵增压压力 (kPa);
 P_s ——相应于荷载效应基本组合时, 作用在桩帽上的压力值 (kPa);
 p_n 、 p_{cn} ——第 n 、 cn 层吹填流泥的欠固结应力 (kPa);
 q_{ki} ——第 i 土条顶面的可变作用标准值 (kN/m);
 q_w ——竖井纵向通水量 (cm^3/s);
 q_w ——竖井纵向通水量 (cm^2/s);
 q_{si}^n ——第 i 层土桩侧负摩阻力标准值;
 q_u ——土体无侧限抗压强度 (kPa);
 Q_g^n ——负摩阻力引起的下拉荷载 (kN);
 r_i 、 r_e ——分别为第 i 计算土层和其上第 e 土层重度;
 S ——桩间距 (m);
 S ——最危险滑动面上的总抗剪切力(kN);
 S_l ——下卧层地基的沉降量 (m);
 S_j ——交通荷载产生的沉降量 (m);
 S_d ——吹填流泥地基的沉降量 (m);
 s ——淤堵区直径与排水板等效直径比值;
 S_{t1} 、 S_{t2} 、 S_{t3} ——时间 t_1 、 t_2 、 t_3 地基沉降量;
 S_t —— t 时间地基的总应变固结度;
 s ——淤堵区直径与排水板等效直径比值;
 T ——加筋体抗拉强度设计值 (kN/m);
 T ——最危险滑动面上的总剪切力, kN;
 T_i^0 ——第 i 级荷载加载起始时间;
 T_i^f ——第 i 级荷载加载终止时间 (s);
 T_1 ——桩帽之上第一层加筋体的抗拉强度设计值 (kN/m);
 T_2 ——第二层加筋体的抗拉强度设计值 (kN/m);

- t ——计算固结度的时间 (s);
 t ——计算次固结沉降的时间;
 t_i ——增压开始时间 (s);
 t_j ——增压时间 (s);
 u_0 ——地基处理前初始孔压 (kPa);
 u_p —— t 时间地基的总应力固结度 (kPa);
 u_ε —— t 时间地基的总沉降量 (m);
 u_p ——桩的截面周长 (m);
 $\bar{U}_r$ ——预压地基平均固结度;
 $\bar{U}_r$ ——地基径向平均固结度;
 $\bar{U}_r$ ——地基平均固结度;
 $U_{ri}\left(t-\frac{T_i^0+T_i^f}{2}\right)$ ——瞬时加载条件下, 第 i 级荷载 t 时刻的平均固结度;
 $\bar{U}_{rj}$ ——增压开始后地基平均固结度;
 U_i ——第 i 层的固结度;
 U_i ——第 i 层吹填流泥的固结度;
 u_{ki} ——第 i 土条滑动面上超静孔压标准值, 可取均值 (kPa);
 V_s ——桩帽上作用的最大冲剪力 (kN);
 W_T ——作用在水平加筋体上的土体重量 (kN);
 W_{ki} ——第 i 土条重力标准值;
 x_R 、 z_R ——圆心的水平、垂直坐标值 (m);
 x_i 、 y_i ——第 i 土条滑动面上中点的水平、垂直坐标值 (m);
 y'_i ——第 i 土条滑动面上中点的一阶倒数值 (m);
 β_{hp} ——冲切高度影响系数;
 δ ——排水板的厚度 (mm);
 γ_{cm} ——桩帽之上填土的平均重度 (kN/m³);
 γ_i 、 γ_n ——第 i 、 n 层吹填流泥的重度;
 γ_0 ——吹填流泥层的重度 (kN/m³);
 η ——影响系数;
 ξ_i ——第 i 层土负摩阻力系数;
 σ'_{ri} ——有土自重引起的桩周第 i 层土平均竖向有效应力;
 τ_p ——桩体的抗剪强度(kPa);
 τ_s ——地基土的抗剪强度(kPa);
 κ_0 ——重要性系数;
 κ_R ——抗力分项系数;
 κ_s ——综合分项系数, 可取 1.0;
 λ ——采用动三轴仪或空心圆柱扭剪仪进行室内土体单元循环加载试验获得的双对数坐

标下累积应变与循环次数关系曲线的斜率;

φ ——填土的摩擦角,黏性土取综合摩擦角($^{\circ}$);

φ_{ki} 、 c_{ki} ——第 i 土条滑动面上的固结快剪内摩擦角($^{\circ}$)和粘聚力标准值(kPa);

φ_{cq} ——固结快剪内摩擦角标准值($^{\circ}$);

ε ——水平加筋体应变;

ε_{pi} ——第 i 层土在经过一定交通荷载次数后的累积应变(%);

$\varepsilon_{pi,1000}$ ——采用动三轴仪或空心圆柱扭剪仪进行室内土体单元循环加载试验获得的试样经过 1000 次循环后的累积应变(%);

Δ ——加筋体的下垂高度(m);

$\Delta\tau_u$ ——地基强度增长标准值;

Δp_a ——土体固结压力增加值(kPa);

Δz_i 、 Δz_e ——第 i 层土、第 e 层土的厚度;

Δp_i ——地基中各分层中点的附加应力(kPa);

Δh_i ——地基各分层的初始厚度(m);

Δu ——预压过程中的孔压累计消散量(kPa);

Δp ——预压荷载(kPa);

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 公路吹填流泥地基一次处理可采用复式真空预压法、絮凝-真空预压法，公路吹填流泥地基二次处理可采用真空联合堆载预压法、堆载预压法、水泥搅拌桩法以及桩网复合地基法。

条文说明：

由于吹填流泥的含水率高，强度低，对地基处理方式造成了一定的限制，如压实、换填、复合地基等方式无法直接应用于吹填流泥地基处理，而真空预压是常用的较为合适的地基处理方式。为解决地基处理过程中的淤堵及真空衰减等问题，现有吹填流泥一次地基处理多采用复式真空预压、絮凝-复式真空预压法，取得了良好的地基处理效果。

但一次地基处理主要目标为吹填流泥层，无法对下卧软弱层进行处理，处理深度不足，土体强度、工后沉降及稳定性无法满足公路工程的要求。因此必要时根据公路工程的要求，进行二次地基处理。在一次地基处理后，吹填流泥层具备了一定的强度，地基处理方式的可选范围扩大，目前广泛应用的地基处理方式如真空联合堆载、堆载、水泥搅拌桩及桩网地基等，均能满足公路工程在沉降、强度以及稳定性等方面的要求。

由于公路工程吹填流泥地基一般要进行二次地基处理，因此一次地基处理目标应以满足二次地基处理施工要求为主，处理时间、深度、范围等参数均应围绕相应地基目标进行确定。

3.0.2 吹填流泥指采用绞吸或耙吸等方式，通过管道把海底或江河湖泊底部的沉积淤泥输送到指定区域而形成的高含水率淤泥类土，也包括采用挖填等方式形成的高含水率淤泥类土以及经过晾晒、一次地基处理后的低含水率吹填淤泥类土，指标可参照表 3.0.2 的相关规定。

表 3.0.2 吹填流泥工程特性

	状态	饱和密度 g/cm^3	含水率 w	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
一次处理前	流态	≤ 1.55	$\geq 85\%$	≥ 2.4	≥ 17	≥ 1.0
晾晒及一次处理后	流塑	≤ 1.80	$\geq 50\%$	≥ 1.5	≥ 17	≥ 0.75

条文说明：

《吹填土地基处理技术规范》(GB/T51064) 中将吹填土分为粗粒土、混合土及细粒土三大类，细粒土下分浮泥、流泥、淤泥等亚类。类似划分方法还有《港口岩土工程勘察规范》(JTS133)、《疏浚岩土分类标准》(JTJ/T320)。我国各地具有代表性的吹填土物理力学指标统计见表 3.0.2。根据统计分析结果，吹填土在自然状态下，一次地基处理前含水率基本不小于 85%以及土的 1.5 倍液限。长时间晾晒沉积或一次地基处理后，吹填流泥含水率基本不小于 50%。本规程中一次、二次地基处理方法及相关规定要求主要针对吹填土中浮泥、流泥以及淤泥类土，以及经一次处理后的淤泥类吹填土，基于地基处理的要求，在此统称为吹填流泥，并确定了对应的吹填流泥工程特性。

表 3.0.2 我国吹填土物理力学指标统计表

、	含水率	密度	比重	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	液性指数	颗分		
	%	g/cm ³			%	%	%	%	>75μm	75~5	<5μm
天津塘沽	33.9	1.77		0.99	38.4	19.5	18.6	1.06	46	47	7.6
	56	1.8	1		48	23.7	24.3	1.3			
天津滨海新区			2.71	3.57	35.36	20.14	14.76		14.228	84.27	1.502
			2.71	3.57	35.25	20.64	14.62		14.19	84.44	1.37
			2.72	3.56	42.9	20.7	20.71		17.19	81.37	1.44
					35.2	20.48	14.73		14.13	84.51	1.36
	85				50	25	25	2.4			
	48.3		37		46	24	22	1.1			
天津临港	193.17				35.83	18.91	16.92	10.3	62.4	37.6	
	197.97				42.81	23.94	18.87	9.2	52.6	47.4	
	204.53				63.87	29.22	34.65	5.1	31.33	68.67	
	130	1.37		3.617	41.1	20.8	21.3	5.13	8.1	43.6	48.3
	123	2.74		3.364	37	19.3	17.7	5.86			
	64.8	1.66		1.782	47	22.6	24.4	1.768	6.1	40	54
深圳前湾	75.6	1.52	2.70	2.00	15.6	2.65	12.95	5.63			
	108.9	1.43		2.967	46.7	27.6	19.1	4.42	11.4	4.7	83.9
	119.9	1.4		3.197	42.9	25.4	17.5	5.35	16.1	32.3	51.6
深圳妈湾	91.7	1.51		2.468	50.2	28.1	22.1	2.895	9.03	37.2	53.85
深圳西乡	82.3	1.53		2.167	54.4	30.8	23.6	1.18	2.4	40.7	56.9
深圳南油	120.2	1.43		3.219					20	45	35
	104.6	1.41		2.824					20	45	35
江苏淮安			2.71		54.7	24.3	30.4		1	40	59
			2.65		39.8	21			2	70	28

续表 3.0.2 我国吹填土物理力学指标统计表

江苏连云港	32.6	1.91	2.62	0.822	31.61	22.74	8.87	1.11	4.5	51.2	44.3
	124	1.41		3.5	50.9	29	21.9	4.34	14.9	30.2	54.9
江苏白马湖	118.5		2.67		88	38	50	1.61			
			2.72		90.6	38	52.6			23.8	76
			2.72		90.6	37.7	52.9			100	
江苏盐城	81.5	1.61	2.73	2.09	49.6	23.4	26.2	2.22			
福建可门港			2.67		61.1	30	31.1			37.1	57.5
			2.67		61.1	29	32.1		1.1	98.9	
辽宁大连	109.64				51.8	30.9	20.9	3.77			
山东青岛	118	1.36		2.43	27.5				45.1	52.9	
浙江钱塘	150	1.44		1.627					11	83.5	5.5
浙江台州	61.1		2.73	1.429	39.6	23.5	16.1	1.78			
温州丁山	96	1.5	2.72	2.37							
温州浅滩	131	1.39	2.71	2.45	45.5	22.8	22.8	4.75			
温州龙湾	130	1.40		2.32	42.8	23.4	26.2	4.07	3.3	58	38.7
温州洞头	116	1.42	2.69	3.1	42.5	22.1	20.6	4.62			
	98	1.52	2.72	4.6	50	28.5	21.5	3.23			
温州瓯飞	187	1.31	2.61	4.72	81	42	39	3.72			
	154	1.51	2.70	5.01	75	48	27	3.93			

3.0.3 公路吹填流泥地基处理承载力、沉降及稳定性控制标准应符合《公路路基设计规范》(JTGD30)的要求。

3.0.4 公路吹填流泥地基设计应符合以下规定：

1 地基处理宽度

1) 采用预压法进行一次及二次地基处理，外扩宽度应在路基坡脚处外扩不小于 3 米。

2) 采用水泥搅拌桩及桩网复合地基进行地基二次处理，外扩处理宽度要根据稳定性验算要求确定。

2 吹填流泥地基处理方案应根据设计要求、路堤填土荷载大小、土质条件 and 环境情况等因素进行综合分析，当工程条件差异较大时应分段设计，并考虑交界面附近的过度衔接，包括选择两种或多种地基处理措施组成的综合处理方案。

3 对初步选出的各种地基处理方案，分别从加固原理、适用范围、预期处理效果、造价、工期要求和对环境的影响等方面进行技术经济分析和对比，选择最佳的地基处理

方法。

4 对已选定的吹填流泥地基处理方法，应进行现场试验、试验性施工及测试，检验设计参数和处理效果，当设计参数与试验结果不符时，应及时修改设计参数或施工工艺。

3.0.5 公路吹填流泥地基处理施工应符合以下规定：

1 吹填流泥地基一次处理施工时应基于吹填流泥的基本性质及一次地基处理方法选择合适的施工方案，要考虑施工机械进场的可行性、安全性，必要时宜通过设置施工垫层形成施工作业面，并采取相应措施保障施工人员安全。

2 吹填流泥地基二次处理施工时应基于一次地基处理的结果，二次地基处理方法及公路工程的要求选取合适的施工方案，并采取相应措施保障施工人员及机械安全。

3.0.6 设计文件的编制按现行设计文件编制办法执行，并符合以下规定：

1 对于高速公路、一级公路等重要工程及地质条件复杂的地基处理项目，地基处理设计应采用初步设计及施工图设计两阶段设计。对于其它等级公路工程及地质条件简单的地基处理项目，可采用一阶段施工图设计。

2 吹填流泥地基一次处理设计文件中应体现吹填流泥地基形成过程，吹填流泥地基二次处理设计文件中应体现地基的一次处理方案。

3 初步设计阶段应包括

- 1) 不同地基处理方案比选；
- 2) 地基处理方案典型平面设计图；
- 3) 不同处理方案的过渡处理图；
- 4) 监测设计图；
- 5) 工程数量表等。

4 施工图设计阶段应包括

- 1) 设计说明
- 2) 地基处理方案平面分区图；
- 3) 地基处理方案平面设计图；
- 4) 不同处理方案的过渡处理图；
- 5) 典型断面图；
- 6) 复杂路段平断面图；
- 7) 节点图；
- 8) 监测设计图；
- 9) 工程数量表等。

4 吹填流泥场地勘察

4.1 一般规定

4.1.1 公路吹填流泥场地勘察应在吹填完成后,地基处理开始前进行,二次地基处理前应对一次地基处理深度范围内的土层及下卧层进行二次场地勘察。

条文说明:

场地勘察主要为吹填流泥地基一次、二次处理提供依据,因此需在吹填完成后进行。一次地基处理前应对吹填流泥层进行勘察。由于一次地基处理采用真空预压法,吹填流泥层及下卧层土体性质在排水固结过程中会有较大变化,二次地基处理前应对其进行二次勘察以确定土体参数。

4.1.2 吹填流泥场地勘察应满足路线布设,方案比选等技术工作的需要,根据场地条件及公路等级综合确定勘察方法,确定场地工程地质条件及水文地质条件,对吹填场地进行分类,为工程设计提供必要的设计参数,提出地基处理的建议。

4.1.3 吹填流泥场地勘察随设计阶段的不同划分为初勘与详勘两阶段,各阶段按准备工作、调查测绘、勘探、试验与资料整理等顺序进行,其勘察方法应、内容与要求应遵照现行标准《公路工程地质勘察规范》(JTJ C20)的相关要求。

4.2 初步设计阶段勘察

4.2.1 初步设计阶段勘察应查明公路工程沿线的地质资料,为工程方案的比选及初步设计文件的编制提供所需的地质资料,基本查明以下内容:

- 1 吹填流泥分布路段的地形、地貌及第四纪地层沉积的关系;
- 2 吹填流泥及下卧层地形地貌的成因、类型、分布范围、结构特点与基底性质;
- 3 各层土的土颗粒组成、结构状况及其它相关的物理、化学、力学性质;
- 4 地下水的位置、水质、成分、埋深、活动情况、补给与排水条件,水质、与地表水的联系;
- 5 周边自然环境及已有建筑物对工程场地的影响。

4.2.2 勘察过程宜按照资料收集-工程地质调查测绘-钻孔及原位测试-室内试验-报告

编制的过程进行，根据不同地质条件选择不同勘察方法，工程地质条件简单的场地可用工程地质调查替代工程地质测绘。

4.2.3 勘点布置

1 勘点间距根据吹填流泥地基处理不同设计阶段，公路等级、场地条件等综合确定，应符合表 4.2.3 的要求，并在不同路段相接及土层变化较大的路段，应做适当加密。

表 4.2.3 公路吹填流泥地基勘点间距

环境类别	公路等级	初步设计阶段（m）	
		一次处理	二次处理
简单场地	二级以上	250~400	700~1000
	二级及以下	350~500	1000~1500
复杂场地	二级以上	150~300	500~1000
	二级及以下	250~400	700~1000

2 勘点位应在 1:2000 路线平面图上标注，或在现场布置。孔点位置需用坐标控制，允许移动范围：对路基孔沿中线前后不超过 30 米，垂直中线左右不超过 15 米；构造物孔沿中线前后不超过 10 米，垂直中线左右不超过 5 米，孔口标高不超过 10 厘米。

3 用于一次地基处理设计的勘探深度应穿透吹填流泥层，进入原土层 1m~2m，用于二次地基处理设计的勘探深度宜穿透下卧软弱土层，对于深厚软弱土层，勘探深度应达到预估的地基附加应力与地基土自重应力比为 0.10~0.15 时所对应的深度（饱和层用浮容重）或不小于地基压缩层的计算深度。

条文说明：

简单场地指场地平坦，吹填流泥分布均匀，性质单一；复杂场地指地形起伏大，吹填流泥分布不均匀，性质变化大。一次处理主要针对吹填流泥层，勘察工作需考虑地基吹填流泥水平及垂直向的差异性且满足地基处理所需，并参考《吹填土地基处理技术规范》（GB/T51064）中吹填后场地勘察要求，结合公路等级对勘点布置进行了适当调整。二次地基处理主要满足公路工程使用，勘察工作参考公路工程地质勘察要求进行勘点布置。

4.2.4 初步设计阶段勘察报告的编制应对各阶段原始数据及中间成果进行及时整理分析，并为确定公路工程的形式、规模、主要地基处理方案提供基本的工程地质数据资料，应包括以下内容：

- 1 勘察工作的目的和任务；
- 2 拟建工程概况；
- 3 勘察工作布置及技术要求；
- 4 勘察工作完成情况；

- 5 吹填场地地形、地貌、吹填流泥分布情况；
- 7 吹填流泥的特殊性评价和描述；
- 8 地下及地表水评价；
- 9 根据公路工程等级及地基使用要求，对地质条件做出综合评价，提出吹填流泥地基处理方案的建议；
- 10 对地基处理施工、公路工程施工及使用期可能发生的岩土工程问题进行预测，提出监控和预防措施的建议；
- 11 相关附图附表：
 - 1) 吹填流泥及下卧层土体物理、化学、力学以及十字板剪切强度、静力触探等原位及室内试验成果资料；
 - 2) 吹填流泥地基全线路工程地质平面图（比例尺 1:10000~1:50000）、纵断面图（比例尺:水平 1:10000，垂直 1:500）及钻孔地质柱状图（比例尺 1:100~1:200）。

4.3 施工图设计阶段勘察

4.3.1 施工图设计阶段勘察为施工图设计提供所需的地质资料，应在初步设计阶段的基础上进行细化及深入，并对复杂地质条件及专门的地质问题进行必要补充，详细查明 4.2.1 的内容。

4.3.2 施工图设计阶段勘察在初步设计阶段勘察基础上进行全面的地质测绘及测试试验，并补充必要的工程测绘，原位测试及室内试验。

4.3.3 施工图设计阶段勘点间距应符合表 4.3.3 的要求，勘点标注及勘察深度应符合 4.2.3 条相关规定。

表 4.3.3 公路吹填流泥地基勘点间距

环境类别	公路等级	施工图设计阶段 (m)	
		一次处理	二次处理
简单场地	二级以上	150~300	500~700
	二级及以下	250~400	700~1000
复杂场地	二级以上	75~150	300~500
	二级及以下	100~200	500~1000

4.3.4 施工图设计阶段勘察报告的编制应包括 4.2.3 中的内容，并补充初勘工作中的不足之处，对不同路段及具体的地质问题进行详细描述，完全明确地质条件。同时图表

资料补充以下内容：

- 1 吹填流泥地基全线路工程地质平面图（比例尺 1:5000~1:10000）；
- 2 纵断面图（比例尺水平 1： 5000~1： 10000，垂直 1： 200~1： 500）；
- 3 钻孔地质柱状图（比例尺 1:100~1:200）；
- 4 各典型路段工程地质纵断面图（比例尺垂直 1： 200，水平比例尺可参照以上比例尺或视路段长度选适宜比例）。

4.4 工程地质测试

4.4.1 一次地基处理前吹填流泥地基应按表 4.4.1 确定测试项目，并符合以下规定：

表 4.4.1 吹填流泥测试项目

试验指标	试验指标	获得参数
物理性质	基本指标	含水率、密度、相对密度、颗粒比重
	可塑性指标	液限、塑限、液性指数、塑性指数
	透水性指标	渗透系数
	颗粒分布	不均匀系数、粒径分布、黏粒含量
力学性质	压缩性	e-p 曲线、e-lgP 曲线、压缩系数、压缩模量、固结系数、次固结系数
	强度指标	有效应力内摩擦角、有效应力粘聚力、总应力内摩擦角、总应力粘聚力、固结排水剪强度、不排水剪强度及不固结不排水强度
化学性质	化学成分	pH 值，各成分组成

- 1 一次地基处理前，含水率高无法取得原状土样的吹填流泥，应采取扰动土样，确定土体含水率、颗粒组成及液、塑限。
- 2 吹填流泥层厚度较大时，应在该层上、中、下层分别取样进行测试。
- 3 吹填流泥固结试验宜采用标准固结试验，起始固结压力不宜大于 2kPa，最大压力应大于有效自重应力与地基处理附加压力之和。

条文说明：

吹填流泥部分指标，如密度、压缩性、强度指标等，需要采取原状土样进行测试。吹填流泥取样应采用封闭式全柱状薄壁取样器，以获得原状土样。当吹填流泥初始含水率较高，不具备稳定结构时，无法取得原状样，此时应采用扰动土样，确定土体含水率、颗粒组成及液、塑限。上述参数与确定土体基本性质，固结过程中的淤堵性以及排水体滤膜的适合孔径密切相关。

常规固结试验起始压力较大，在固结试验过程中，吹填流泥试样经常发生挤出破坏，导致固结试验无法进行。研究表明，吹填流泥固结试验可采用低起始固结压力，起

始固结压力不大于 2kPa，部分试样可从 0.5kPa 或 1kPa 开始。

4.4.2 一次地基处理后吹填流泥及下卧土层物理力学性质的测试方法应按《公路土工试验规程》（JTG E40）的相关规定执行。

征求意见稿

5 预压地基沉降及稳定计算

5.1 一般规定

5.1.1 吹填流泥地基沉降计算及稳定验算应考虑吹填流泥及下卧层的欠固结特性、厚度、强度以及路堤高度。。

5.1.2 吹填流泥地基沉降计算应考虑交通荷载的影响。
条文说明：

从沉降计算的角度宜考虑交通荷载的影响。与其他类型的地基相比，经处理之后的吹填流泥地基仍然表现出孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低等超软土特性，交通荷载引起的附加动应力会引起可观的运营后沉降。日本道路协会《软土地基处理技术指南》，认为路面下高度为 2.0m~2.5m 以下的低路堤经常受到交通荷载引起的不均匀沉降的危害。对处理后的吹填流泥地基，如属于低路堤道路（路堤高度小于 2.5m），应考虑交通荷载的影响，如属于高路堤道路（路堤高度大于 2.5m），宜根据当地经验或者其他手段确定是否考虑交通荷载的影响。

5.1.3 重要工程的沉降计算及稳定验算所需参数应根据模型试验或现场试验结果确定。

5.2 预压地基沉降计算

5.2.1 吹填流泥层欠固结应力应按下列公式计算，并以最上层吹填土作为第 1 层：

$$p_n = \frac{\gamma_n h_n}{2} - p_{cn} \quad (n = 1) \tag{5.2.1-1}$$

$$p_n = \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i h_i + \frac{\gamma_n h_n}{2} - p_{cn} \quad (n \geq 2) \tag{5.2.1-2}$$

式中： p_n ——第 n 层吹填流泥的欠固结应力（kPa）；
 p_{cn} ——第 n 层吹填流泥的欠固结应力（kPa）；
 γ_i 、 γ_n ——第 i 、 n 层吹填流泥的重度，地下水位以下取浮重度（kN/m³）；
 h_i 、 h_n ——第 i 、 n 层吹填流泥的厚度（m）。

条文说明:

欠固结应力为每一层吹填流泥所承受的自重应力与其前期固结压力差值,与吹填流泥的欠固结程度相关,前期固结压力通过一维固结试验确定。

5.2.2 吹填流泥处理前的沉降量可按下列公式计算:

$$S = S_c + S_s \quad (5.2.2-1)$$

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{1 + e_{0i}} p_i h_i U_i \quad (5.2.2-2)$$

$$S_s = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ai}}{1 + e_{0i}} \lg \left(\frac{t}{t_1} \right) h_i \quad (5.2.2-3)$$

式中: S ——吹填流泥层的沉降量 (m);

S_c ——吹填流泥层的主固结沉降量 (m);

S_s ——吹填流泥层的次固结沉降量 (m);

a_i ——第 i 层吹填流泥的压缩系数 (kPa^{-1});

e_{0i} ——第 i 层吹填流泥的初始孔隙比;

C_{ai} ——第 i 层吹填流泥的次固结系数, 应通过试验确定;

p_i ——第 i 层吹填流泥的欠固结应力, 按 5.2.1 条有关规定确定 (kPa);

U_i ——第 i 层吹填流泥的固结度;

t_1 ——主固结度达到 100%所需的时间;

t ——计算次固结沉降的时间, 当主固结度已达到 100%时, 取 t 为固结发生总时间, 当主固结小于 100%时, 取 $t = t_1$ 。

5.2.3 下卧层地基处理前的沉降量可按下列公式计算:

$$S_l = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{1 + e_{0i}} p h_i U_i \quad (5.2.3-1)$$

$$p = \gamma_0 h_0 \quad (5.2.3-2)$$

式中: p ——下卧层地基的固结应力, 对于下卧层应考虑吹填流泥层的自重。

S_l ——下卧层地基的沉降量 (m);

a_i ——第 i 层下卧层地基土的压缩系数 (kPa^{-1}), 应通过试验确定;

e_{0i} ——第 i 层下卧层地基土的初始孔隙比, 应通过试验确定;

h_i ——第 i 层下卧层地基土的厚度 (m);

U_i ——第 i 层下卧层地基土的固结度;

γ_0 ——吹填流泥层的重度 (kN/m^3);

h_0 ——吹填流泥层的厚度 (m)。

5.2.4 预压期吹填流泥地基一次及二次处理沉降量可按下列公式计算：

$$S_d = m_s \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i U_i \quad (5.2.4-1)$$

式中： m_s ——沉降经验系数，无经验地区取 1.0~1.3，土体含水率较高，荷载较大时取高值。

S_d ——吹填流泥地基的沉降量 (m)；

e_{0i} ——第 i 层土的初始孔隙比，应通过试验确定；

e_{1i} ——第 i 层土在地基固结压力下的孔隙比，应通过试验确定，下卧层的固结压力应包括吹填流泥层自重；

h_i ——第 i 层土的厚度 (m)；

U_i ——第 i 层的固结度，应通过试验确定。

5.2.5 交通荷载产生的沉降量可按下列公式计算：

$$S_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{pi} h_i \quad (5.2.5-1)$$

$$\varepsilon_{pi} = \varepsilon_{pi,1000} \left(\frac{N}{1000} \right)^\lambda \quad (5.2.5-2)$$

式中： ε_{pi} ——第 i 层土在经过一定交通荷载次数后的累积应变 (%)；

h_i ——第 i 层土的厚度 (m)；

$\varepsilon_{pi,1000}$ ——采用动三轴仪或空心圆柱扭剪仪进行室内土体单元循环加载试验，获得的试样经过 1000 次循环后的累积应变 (%)；

λ ——采用动三轴仪或空心圆柱扭剪仪进行室内土体单元循环加载试验，获得的双对数坐标下累积应变与循环次数关系曲线的斜率；

N ——交通荷载作用次数；

S_j ——交通荷载产生的沉降量 (m)。

条文说明：

采用分层总和法计算交通荷载引起的沉降，其中参数 $\varepsilon_{pi,1000}$ 、 λ 可通过室内土工试验获得，也可根据当地经验数据取值。交通荷载作用次数可根据《公路沥青路面设计规范》中有关设计交通量的条款确定。

5.3 预压地基稳定性验算

5.3.1 采用堆载预压或复式真空联合堆载预压对吹填流泥地基进行二次处理时，应进行稳定分析，稳定分析宜采用圆弧滑动法，按下列公式计算：

$$\kappa_0 M_{sd} \leq \frac{1}{\kappa_R} M_{RK} \quad (5.3.1-1)$$

$$M_{sd} = \kappa_s \left[\sum (x_R - x_i) (W_{ki} + q_{ki} b_i) \right] \quad (5.3.1-2)$$

$$M_{Rk} = \sum (y_i - z_R) \left[(W_{ki} + q_{ki} b_i - u_{ki} b_i) \tan \varphi_{ki} + c_{ki} b_i \right] \left[1 + \frac{(y'_i - \tan \varphi_{ki} / \kappa_R)^2}{1 + (\tan \varphi_{ki} / \kappa_R)^2} \right] \quad (5.3.1-3)$$

式中： κ_0 ——重要性系数，根据公路重要性等级分别取 1.1、1.0、0.9；

M_{sd} ——危险滑动面上滑动力矩设计值 (kN.m/m)；

M_{Rk} ——危险滑动面上抗滑力矩标准值 (kN.m/m)；

κ_R ——抗力分项系数；

κ_s ——综合分项系数，可取 1.0；

x_R 、 z_R ——圆心的水平、垂直坐标值 (m)；

x_i 、 y_i ——第 i 土条滑动面上中点的水平、垂直坐标值 (m)；

y'_i ——第 i 土条滑动面上中点的一阶倒数值 (m)；

W_{ki} ——第 i 土条重力标准值，可取均值，零压线以下用浮重度计算；当有渗流时，滑动力矩设计值中计算低水位以上零压线以下部分的重力标准值用饱和重度计算 (kN/m)；

q_{ki} ——第 i 土条顶面的可变作用标准值 (kN/m)；

b_i ——第 i 土条宽度 (m)；

u_{ki} ——第 i 土条滑动面上超静孔压标准值，可取均值 (kPa)；

φ_{ki} 、 c_{ki} ——第 i 土条滑动面上的固结快剪内摩擦角 (°) 和粘聚力标准值 (kPa)。

5.3.2 预压地基强度增长标准值按下列公式计算：

$$\Delta \tau_u = m_t \bar{U}_r p \tan \varphi_{cq} \quad (5.3.2-1)$$

式中： $\Delta \tau_u$ ——地基强度增长标准值；

$\bar{U}_r$ ——预压地基平均固结度；

m_t ——强度增长经验系数，无经验地区取 0.8~1.0，土体含水率较高，荷载较大时取低值；

p ——地基固结压力 (kN)；

φ_{cq} ——固结快剪内摩擦角标准值 (°)。

6 地基处理设计

6.1 一般规定

6.1.1 吹填流泥地基一次处理可采用复式真空预压法，絮凝真空预压法。

6.1.2 吹填流泥地基二次处理可采用堆载预压法，真空联合堆载预压法，水泥搅拌桩法，桩网复合地基法。

6.1.3 路堤地基处理，应根据公路等级、路堤填方高度及施工工期，确定地基承载力，工后沉降及稳定性控制指标，选择合适的地基处理方案。在采用复式真空预压或絮凝-真空预压法一次处理后，可结合堆载预压或真空联合堆载预压进行二次处理。

6.1.4 涵洞通道地基处理，应根据公路等级、路基开挖深度及施工工期，确定地基承载力，工后沉降及稳定性控制指标，选择合适的地基处理方案。在涵洞与普通路堤连接段应进行过渡段地基处理设计，减小相邻段不均匀沉降的影响。在采用复式真空预压或絮凝-真空预压法一次处理后，可采用水泥搅拌桩或桩网复合地基法进行二次处理。

6.2 复式真空预压法

6.2.1 吹填流泥地基复式真空预压加固范围应大于拟建公路工程要求处理的地基范围，应符合 3.0.4 条规定。

6.2.2 排水板选型

1 吹填流泥地基处理的竖向排水体宜采用热熔成型的整体式塑料排水板，并应符合表 6.2.2 要求。

表 6.2.2 整体式塑料排水板性能指标

项目	单位	技术指标	备注
厚度	mm	4.0 ± 0.2	
宽度	mm	100 ± 2	
舌型撕裂强度	N	≥ 20	
抗弯折性能	mm	无断裂	180 度对折 5 次
抗拉强度	kN/10cm	≥ 2.0	延伸率 10% 时
纵向通水量	cm ³ /s	≥ 40	侧向压力为 350kPa
单位面积质量	g/m ²	≥ 80	
厚度	mm	≥ 0.2	
渗透系数	cm/s	$\geq 5 \times 10^{-3}$	试件在水中浸泡 24h
等效孔径	μm	60~150	095
芯板		聚丙烯	新料
滤膜		聚酯化合物	与板芯整体融合

排水板的当量换算直径可按照下式计算：

$$d_w = \frac{2(b + \delta)}{\pi} \quad (6.2.2-1)$$

式中： d_w ——排水板等效换算直径（mm）；

b ——排水板的宽度（mm）；

δ ——排水板的厚度（mm）。

2 排水板间距可根据吹填流泥的固结特性和预定时间内所要求达到的固结度确定。设计时，排水板间距可按照井径比 n ($n = d_e/d_w$) 选用， $n=15\sim 22$ 。排水板宜采用正方形或三角形布置，宜为 0.7m~1.0m，并符合以下规定：

$$d_e = a_1 d \quad (6.2.2-2)$$

式中： d_e ——排水板有效排水直径（cm）；

d ——排水板间距（cm）；

a_1 ——换算系数，正三角形布置时取 1.05，正方形布置时取 1.13。

3 排水板竖向布置：

1) 一次地基处理应穿过吹填流泥层，进入原下卧土层 1m~2m，二次地基处理深度应进入下卧软弱层，但不应进入透水层。

2) 当存在深厚软弱层时，插板深度应根据工后沉降控制标准确定。

3) 对以地基抗滑稳定性控制的工程，排水板超过天然地基土最危险滑动面的深度

应大于 2.0m。

条文说明：

工程实例表明，吹填流泥一次地基处理中土体沉降较大，传统膜板分离式塑料排水板强度不足，易在地基处理过程中产生“Z”状弯折，影响排水固结及真空压力传递。整体式塑料排水板提高了板体强度，在沉降过程中呈“S”状弯曲，不会对排水固结造成不利影响。

现行《水运工程塑料排水板应用技术规程》(JTS206)中规定以 O_{95} 计的排水板滤膜孔径 $<75\mu\text{m}$ ，易在吹填流泥一次地基处理中发生淤堵。现有研究表明，合适的滤膜孔径可以防止土颗粒堵塞滤膜孔洞，有利于排水板周围反滤层的形成，能够减轻淤堵，取得较好的加固效果。滤膜孔径宜在 60~150mm 范围内，根据 $O_{95}=4\sim6D_{85}$ 进行选取， D_{85} 为 85%的土颗粒粒径。滤膜孔径过小淤堵严重，孔径过大土颗粒流失增加。

6.2.3 水平排水系统由主管及支管组成，主管宜采用内径 50mm 的 PVC 螺旋型弹性钢丝管，间距为 30m~40m，支管宜采用内径 25mm 的 PVC 螺旋型弹性钢丝管，布置在每两排排水板中间。钢丝管性能指标应符合表 6.2.3 要求。

表 6.2.3 钢丝管性能指标

项目		单位	技术指标
主管	内径	mm	50
	外径	mm	≥ 56
	重量	g/m	≥ 700
	工作压力	MPa	0.4
	每卷长度	m	50
支管	内径	mm	25
	外径	mm	≥ 29
	重量	g/m	≥ 250
	工作压力	MPa	0.5
	每卷长度	m	50

条文说明：

现行标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)以及《吹填土地基处理技术规范》(GB/T51064)中规定真空预压水平排水垫层应采用不小于 0.5m 的砂垫层。但吹填流泥初始强度过低无法进行表层砂垫层施工，因此目前多采用无砂垫层真空预压技术。《吹填土地基处理技术规范》(GB/T51064)规定无砂垫层真空预压法水平垫层应采用直径 50mm~70mm 的波纹滤管。工程实践表明，波纹滤管强度过低，容易在真空压力下发生挤压变形，影响排水效果，且管壁孔洞导致真空压力沿程损失较大，深层土体固结压力

过小。现有如温州瓯飞工程，江苏连云港等地的吹填流泥真空预压地基处理，采用 PVC 螺旋型弹性钢丝管替代传统波纹滤管作为水平排水垫层，避免了管路变形以及真空压力衰减，取得了较好的加固效果。

6.2.4 每根排水板与真空管采用密闭式手板接头连接，真空主管、支管之间采用多通道变径接头连接。手板接头和多通道接头的选择应根据现场施工要求确定。

6.2.5 增压系统

- 1 增压系统由竖向增压板、增压管路和空气压缩泵构成。
- 2 竖向增压板采用整体排水板，性能指标应符合表 6.2.2 要求。
- 3 增压板头应埋置在地表 1.0m 以下作为密封段。
- 4 增压板竖向布置深度宜与排水板深度一致，平面布置宜根据排水板正方形或三角形的布置方式，布置在排水板围绕的中心位置。
- 5 增压管路宜采用 $\Phi 10\text{mm}$ 的 PVC 软管。
- 6 增压管路之间采用二通、三通、四通连接，增压管路与排水板之间采用双向转换接头连接，连接强度应满足真空压力传递，增压压力传递和地基变形的要求。

条文说明：

温州、连云港、天津等地的真空预压工程中采用了增压系统（图 6.2.5-1）来解决吹填流泥真空预压过程中的淤堵问题，地基处理效果提升明显。增压系统布置与真空系统布置类似，区别在于真空系统通过真空射流泵施加真空负压，增压系统通过空气压缩泵施加高压气流，产生正压，通过管路与排水板传递至深层土体。增压系统主要作用在于利用正压增大土体间的压力差，提高固结压力；同时利用高压气流冲刷土体，使土体产生微裂隙，提高土体渗透系数，有利于排水固结。

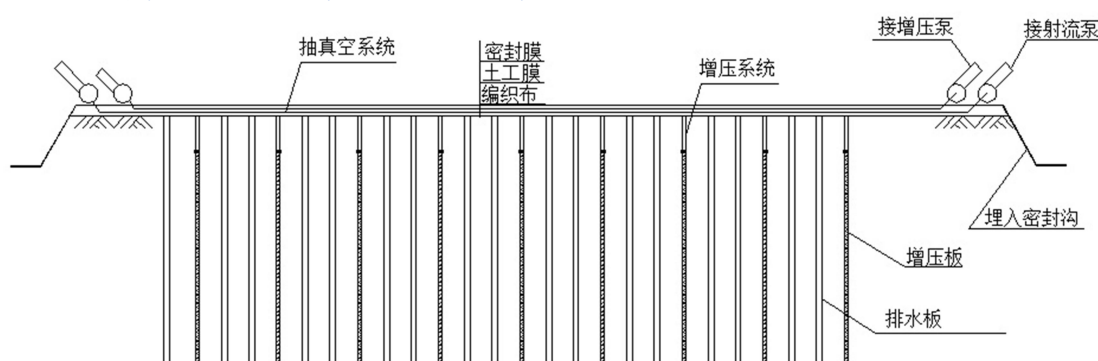


图 6.2.5-1 增压系统示意图

增压过程中，气流会对膜下真空度产生影响，造成固结压力降低，因此施工过程中应设置密封段，在吹填流泥地基处理过程中，排水板间距一般设置为 0.7m~1.0m，将增压板头埋置在地表 1.0m 以下，可以保证增压气流的水平向运动以及真空系统的密封性。密封段可采用延长增压管路及覆土的方式，如图 6.2.5-2 所示。

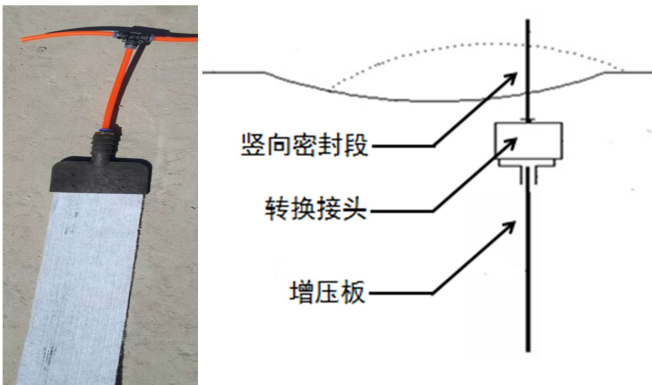


图 6.2.5-2 增压管路连接与密封段

由于增压气流是径向扩散运动，冲刷挤压土体，所以增压板对于围绕其四周排水板的增压作用是相同的。实际工程中为提高增压效率，一般根据排水板的平面布置方式，将增压板布置在几根排水板的中心位置，如图 6.2.5-3 所示。当排水板为正方形布置时，增压板取代一根排水板，布置在 8 根排水板中心，当排水板为三角形布置时，增压板取代一根排水板，布置在 6 根排水板中心。

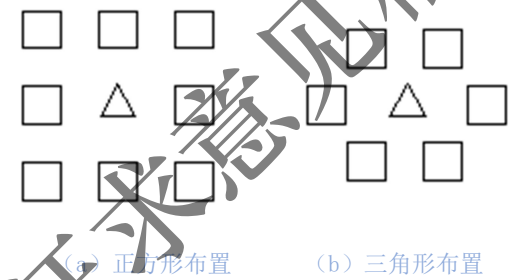


图 6.2.5-3 增压板布置平面图

6.2.6 水平排水系统及增压系统上应铺设 1 层 200g/m² 无纺土工布，土工布性能指标应符合表 6.2.6 要求。

表 6.2.6 200g/m² 土工布性能指标

项目	单位	技术指标
单位质量	g/m ²	≥200
断裂强力	kN/m	≥6.5
断裂伸长率	%	25~100
CBR 顶破强力	kN	≥0.9
垂直渗透系数	cm/s	1×10 ⁻²
撕破强力	kN	≥0.16

6.2.7 密封膜宜采用 2~3 层聚乙烯或聚氯乙烯薄膜，性能指标应符合表 6.2.7 要求。

表 6.2.7 密封膜性能指标

最小抗拉强度 (MPa)		最小断裂伸长率 (%)	最小直角撕裂强度 (kN/m)	厚度 (mm)
纵向	横向			
18.5	16.5	220	40	0.12~0.16

6.2.8 边界密封

1 吹填流泥地基一次处理时,可将密封膜压入吹填流泥面以下 1.5m~2.0m 进行密封,相邻密封膜预留间距 50cm~100cm。

2 吹填流泥地基二次处理时,密封沟深度应低于不透水、不透气层顶面以下 0.5m,以保证密封效果,同时密封沟深度不应小于 1.5m。

3 在地基处理范围内存在砂土层等透气层,宜采用黏土密封墙进行密封。黏土密封墙深度应穿过透气层,厚度不小于 1.2m,粘粒含量应大于 15%,渗透系数应小于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 。

条文说明:

由于吹填流泥初始含水率高,真空预压下土体沉降一般较大,如边界处密封膜插入土体较浅,会出现边界密封膜下沿超出地表的情况,进而影响密封效果,因此需保证密封膜插入土体的深度。

6.2.9 真空加载

1 抽真空设备宜采用射流真空泵,单机功率不小于 7.5kW,真空泵可施加真空压力不小于 95kPa。

2 真空泵宜在加固区均匀布置,射流真空泵每台设备控制面积为 $900\text{m}^2 \sim 1100\text{m}^2$ 。

3 真空加载可采用一次加载,膜下真空度不小于 85kPa。

4 吹填流泥地基一次处理时,为减少吹填流泥淤堵及侧向变形影响,可采用分级加载方式。当前一级荷载施加时间不小于 30d 且出水量明显减少时,施加下一级荷载。

条文说明:

由于吹填流泥不具备稳定结构,在一次地基处理过程中,细小土颗粒会向排水板移动聚集,形成致密土柱,产生淤堵。分级真空预压能够使土体在低真空压力下产生固结,形成稳定结构,减少土体水平移动变形,缓解淤堵。真空压力分级过多容易增加压力控制难度,且延长地基处理时间,真空压力分级过少无法实现预期分级预压处理效果。研究表明,真空压力分三级 30kPa~60kPa~满载较好,并应采用真空压力调节阀进行压力控制。

6.2.10 增压加载

1 增压在预压地基固结度达到 40%左右后开始,地基实际固结度由沉降数据进行计算。

2 气压泵施加增压大小控制在 20kPa~30kPa,每次增压在孔压变化值等于增压值大小后结束,时间一般为 3h~4h。

3 增压加载后，土体固结压力增加值按下式计算：

$$\Delta p_a = m_a p_a \quad (6.2.10-1)$$

式中： Δp_a ——土体固结压力增加值（kPa）；

p_a ——气压泵增压压力（kPa）；

m_a ——增压折减系数，可取 0.5~0.8，随增压板与排水板间距增大取低值。

4 增压方式采用间歇增压方式，增压频率每天一次，整个增压过程自增压开始至地基处理结束。

条文说明：

增压开始时间应根据地基固结度确定。增压时间过早，土体结构不稳定，高压气流容易造成翻浆冒泡，影响密封效果。增压时间过晚，土体致密无法产生增压效果。根据增压试验及工程实例总结，初步确定地基固结度达到 40%左右时为较为合适的时机，能够在密封效果的同时取得较为显著的增压效果。

增压大小以及增压持续时间的控制与增压开始时间的确定原则类似，压力过小或时间过短无法保证增压效果，过大及过长影响密封效果。增压持续时间与土体性质以及排水板间距有关，当排水板与增压板距离较近时，增压持续时间较短，排水板与增压板距离较大时，增压时间也相应增加。工程实例表明，排水板间距 0.7m~1.0m，对应增加时间约在 3h~4h。

真空预压过程中，土体总应力不变，有效应力增加，有效应力增加值等于孔压消散值。增压后土体中的孔压增加，相当于土体总应力增大，而随着孔隙消散，由增压引起的有效应力进一步增长，因此增压加载后固结过程等效于土体固结压力增加。由于土体渗透性的影响，土体固结压力增量小于增压大小，研究表明，排水板间距 0.7m~1.0m，对应增压折减系数约在 0.5~0.8。

6.2.11 真空预压地基处理停泵标准应同时满足以下条件：

1 一次地基处理真空预压处理时间不小于 50d，二次地基处理真空预压处理时间不小于 100d。

2，一次地基处理排水板范围内土体平均固结度不小于 60%，二次地基处理排水板范围内土体平均固结度不小于 90%。

3 一次地基处理地表沉降速率连续 5d 平均沉降量不大于 5mm/d，二次地基处理地表沉降速率连续 5d 平均沉降量不大于 2mm/d。

条文说明：

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79) 规定真空预压时间不小于 90d，土层的平均固结度应大于 90%，5d~10d 内平均沉降量不大于 2mm/d；《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD31-20) 要求地基固结度达到 80%，5d 内平均沉降量不大于 0.5mm/d。吹填流泥一次地基处理主要使吹填流泥具备基本强度，为二次地基处理做准备，因此适

当降低在处理时间、固结度以及沉降收敛方面的要求。工程实例表明，地基处理 60d 后即可满足二次地基处理轨道式插板机的进场要求。如土体初始含水率高，处理过程中淤堵严重，应以土体固结度及地表沉降进行控制，适当延长一次地基处理的时间。

根据工程经验，吹填流泥及海积土软弱下卧层压缩性高，次固结及蠕变变形较大，5d 内平均沉降量不大于 0.5mm/d 的标准很难满足，或导致真空预压时间极长，在此按照《建筑地基处理技术规范》的控制标准，同时适当延长真空预压处理时间至 100d。

6.2.12 复式真空预压一次地基处理平均固结度，按下列公式计算，并考虑固结过程中的淤堵影响：

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\frac{8C'_h t}{F d_c^2}} \quad (6.2.12-1)$$

$$F = F_n + F_c + F_r \quad (6.2.12-2)$$

$$F_n = \ln(n) - \frac{3}{4}, \quad n \geq 15 \quad (6.2.12-3)$$

$$F_c = \left[\frac{k'_h}{k_c} - 1 \right] \ln s \quad (6.2.12-4)$$

$$F_r = \frac{\pi^2 L^2}{4} \frac{k'_h}{q_w} \quad (6.2.12-5)$$

式中： $\bar{U}_r$ ——地基径向平均固结度；

C'_h ——对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体固结系数 (cm^2/s)，通过固结渗透试验获得， σ'_0 为土体初始有效应力， σ 为土体最终有效应力 (kPa)。

k'_h ——对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体渗透系数，通过固结渗透试验获得。
(cm/s)；

k_c ——淤堵区土体渗透系数，宜进行真空预压试验，通过排水板周围淤堵区的土体渗透试验获得，无实验资料时，渗透系数比 k_h/k_c 可取 100~300，土体含水率低时取低值，含水率高时取高值， k_h 为土体渗透系数 (cm/s)；

n ——井径比；

s ——淤堵区直径与排水板等效直径比值，可取 $s = 2.0 \sim 3.0$ ；

L ——塑料排水板的深度 (cm)；

q_w ——竖井纵向通水量 (cm^3/s)。

条文说明：

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)、《吹填土地基处理规范》(GB/T 51064) 规定，当地基土灵敏度较高时，应计算涂抹效应对地基应力固结度的影响。土体渗透系数与涂抹区渗透系数比值取 1.5~8.0。然而由于吹填流泥基本不具备结构性，排水板施工并不会对土体造成明显扰动，涂抹效应并不明显。但真空预压过程中，吹填流泥会围绕排水

板形成淤堵区。相比于涂抹区，淤堵区渗透系数更小，对土体固结影响更为严重。研究表明，吹填流泥初始渗透系数与淤堵区渗透系数比值可取 100~300。由于吹填流泥初始含水率较高，该取值范围分布较大，在实际工程中，宜通过土工试验获得淤堵区土体渗透系数。

6.2.13 当采用分级真空预压方法进行一次地基处理时，应按照分级加载条件计算地基固结度：

$$\bar{U}_r = \sum_{i=1}^m U_{ri} \left(t - \frac{T_i^0 + T_i^f}{2} \right) \frac{P_i}{\sum P_i} \quad (6.2.13-1)$$

式中： $\bar{U}_r$ ——地基平均固结度；

m ——加载级数；

$U_{ri} \left(t - \frac{T_i^0 + T_i^f}{2} \right)$ ——瞬时加载条件下，第 i 级荷载 t 时刻的平均固结度；

t ——计算固结度的时间 (s)；

T_i^0 ——第 i 级荷载加载起始时间；

T_i^f ——第 i 级荷载加载终止时间 (s)，当计算加载期间的应力固结度时，将 T_i^f 改为 t 。

P_i ——第 i 级预压荷载，当计算加载期间的应力固结度时，将 P_i 改为 ΔP ， ΔP 对应第 i 级荷载加载期 t 时刻的荷载增量。

6.2.14 当采用增压真空预压方法进行一次地基处理时，应按下列方法计算地基固结度：

$$\bar{U}_{rj} = \bar{U}_{rj0} + 1 - e^{-\frac{8C_h'}{F_j d_e^2} (t_j - t_i)} \quad (6.2.14-1)$$

$$\bar{U}_{rj0} = \frac{\bar{U}_{ri} P_i}{P_j} \quad (6.2.14-2)$$

$$F_j = F_n + F'_c + F_r \quad (6.2.14-3)$$

$$F'_c = \left[\frac{k'_h}{k'_c} - 1 \right] \ln s \quad (6.2.14-4)$$

$$k'_c = m_k k_c \quad (6.2.14-4)$$

$$F_n = \ln(n) - \frac{3}{4}, \quad n \geq 15 \quad (6.2.14-5)$$

$$F_r = \frac{\pi^2 L^2}{4} \frac{k'_h}{q_w} \quad (6.2.14-6)$$

式中： $\bar{U}_{rj}$ ——增压开始后地基平均固结度；
 $\bar{U}_{ri}$ ——增压开始时刻地基平均固结度，应按照 6.2.12 条相关规定计算；
 P_i ——增压前预压荷载（kPa）；
 P_j ——增压后预压荷载，应考虑增压加载后土体固结压力的增加值（kPa）；
 t_i ——增压开始时间（s）；
 t_j ——增压时间（s）；
 C'_h ——对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体固结系数（cm²/s），通过固结渗透试验获得， σ'_0 为土体初始有效应力， σ 为土体最终有效应力（kPa）；
 k'_h ——对应平均固结应力 $\sqrt{\sigma'_0 \times \sigma}$ 处土体渗透系数（cm/s），通过固结渗透试验获得；
 k_c ——淤堵区土体渗透系数，宜进行真空预压试验，通过排水板周围淤堵区的土体渗透试验获得，无实验资料时，渗透系数比 k_h/k_c 可取 100~300，土体含水率低时取低值，含水率高时取高值， k_h 为土体渗透系数（cm/s）；
 k'_c ——增压后淤堵区土体渗透系数；
 m_k ——渗透增长系数，可取 1.0~2.0，增压压力大，增压板及排水板间距小时取高值；
 n ——井径比；
 s ——淤堵区直径与排水板等效直径比值，可取 $s = 2.0 \sim 3.0$ ；
 L ——塑料排水板的深度（cm）；
 q_w ——竖井纵向通水量（cm³/s）。

6.2.15 复式真空预压吹填流泥地基一次处理的沉降计算应符合 5.2 节相关规定，强度增长标准值应符合 5.3.2 条相关规定，增压时土体的最终固结压力应包括增压加载后土体固结压力的增加值。

6.3 絮凝-真空预压法

6.3.1 该方法适用于含水率不小于 2 倍液限，粘粒含量不小于 50% 的吹填流泥地基。

条文说明：

絮凝剂添加到吹填流泥中，便会产生压缩双电层，使流泥中的悬浮微粒失去稳定性，胶粒物相互凝聚使微粒增大，形成絮凝体、矾花。这样吹填流泥就能够形成较大的颗粒，缩短了沉积的时间，增大了颗粒之间的孔隙。在粘粒含量少的情况下，絮凝效果并不明显。

6.3.2 吹填流泥絮凝剂分为有机、无机、复合絮凝剂三类絮凝剂，宜采用石灰作为絮凝剂。

条文说明：

常用的絮凝剂包括有机高分子絮凝剂、无机絮凝剂和复合絮凝剂三类。有机絮凝剂包括阳离子絮凝剂（如甲基丙烯酸乙酯基氯化铵共聚物，丙烯酸乙酯基三甲基铵硫酸甲酯共聚物等）、阴离子絮凝剂（如聚丙烯酸钠，聚苯乙烯磺酸钠等）以及非离子型絮凝剂（如聚乙烯甲基醚，聚氧化乙烯等）；无机絮凝剂包括无机低分子絮凝剂（如 $KAl(SO_4)_2$ ， $FeCl_2$ 等）和无机高分子絮凝剂（主要有聚铝类和聚铁类）复合絮凝剂为无机、有机等多种絮凝剂的混合物。

综合处理效果，絮凝剂材料用量、材料价格等因素考虑，本规程推荐采用石灰作为絮凝剂。一方面，石灰中的钙离子置换土颗粒表面的单价阳离子，使得土颗粒表面扩散层厚度变薄和颗粒间的排斥力减小，进而土颗粒联结而絮凝成团，增大孔隙提高渗透系数，加速土体的沉降速率。另一方面，当 PH 值大于 12.4 时，土矿物质中的氧化硅和氧化铝处于可溶和游离状态，石灰中的钙离子发生硬凝、结晶和碳化反应，如下所示：



上述硬凝反应中生成硅酸钙和硅酸铝等胶结物，充填于团粒间的孔隙，将团粒联成一体，使土体的强度增大。上述结晶反应中部分石灰未进行化学反应就被硅酸钙、硅酸铝等胶结物包裹，很难发生碳化作用，因此这部分石灰可以吸收水份，由液态状逐渐形成晶体。

6.3.3 液体絮凝剂溶液的固体含量不得大于 3%，不得有沉淀及絮凝现象；粉状絮凝剂的细度为 0.075mm，标准筛筛余量不得大于 15%。

6.3.4 应根据吹填流泥的种类和性质，絮凝剂的主要性能，真空预压的要求以及土体加固要求，综合选择絮凝剂种类、配比及掺量。

6.3.5 絮凝剂的种类选取应进行下列试验：

- 1 沉降柱试验，效果通过沉积稳定时间确定，其中所需时间越短越优，具体不宜超过 35 天。
- 2 浊度试验，效果通过浊度数值确定，其中浊度数值越小越优，不宜超过 200NTU。

6.3.6 絮凝剂配合比通过絮凝剂的干重与吹填流泥土颗粒比例进行确定，应控制在 0.1%~3%。

条文说明：

絮凝剂掺入量过少絮凝反应不充分，无法保证絮凝效果，而絮凝剂掺入过量的情况

下, 由于土颗粒比表面积有限, 不足以通过吸附架桥作用连结土颗粒呈链状结构。而当石灰作为絮凝剂时, 过量会因为石灰溶解度有限, 不足以形成良好的碱性环境促进土体矿物质氧化硅和氧化铝的分离, 以及硬凝反应产生胶结物充填团粒间的孔隙, 同样会导致土体渗透系数。根据不同初始含水率吹填流泥的絮凝试验发现, 絮凝剂配合比合理范围在 0.1%~3% 之间, 含水率较小时取低高值, 含水率较大时取高低值。

6.3.7 絮凝时间由沉积试验的浊度稳定时间确定, 并通过絮凝-真空预压室内模型试验后的加固效果进行修正。

6.3.8 排水板间距宜根据絮凝后吹填流泥的固结特性和预定时间内所要求达到的固结度确定, 同时真空系统设计尚应符合 6.2 节的相关规定。

条文说明:

与传统固化法不同, 本方法中絮凝主要目的在于解决吹填流泥真空预压过程中的淤堵问题, 但地基处理仍以真空预压为主。因此真空系统的设计方法, 包括排水板布置, 水平排水系统, 增压系统, 加载方式等, 与无絮凝时的真空系统一致。但排水板水平间距与真空预压固结度有关, 需考虑絮凝后吹填流泥的固结特性。

6.3.9 絮凝-真空预压法固结度计算应符合 6.2.12 条相关规定, 吹填流泥絮凝后的固结系数 C_h 及渗透系数 k_h 应通过室内试验确定。

条文说明:

吹填流泥絮凝之后物理力学性质会发生改变, 在地基处理之前需重新测定土体渗透、压缩等物理力学指标, 以进行真空预压固结度计算。

6.3.10 絮凝-真空预压法沉降计算应符合 5.2.4 条相关规定, 吹填流泥絮凝后的初始孔隙比 e_{0i} 以及最终压力下的孔隙比 e_{li} 应通过室内试验确定, 沉降经验系数 m_s 取 0.5~1.0, 当絮凝剂掺量少时取高值, 絮凝剂掺量高时取低值。

条文说明:

吹填流泥絮凝主要发生两个阶段的化学反应。一是短期反应, 通常在几个小时或几天内完成, 主要包括阳离子交换反应和絮凝凝聚。二是长期反应, 通常在几个月或几年内完成, 主要包括硬凝、结晶和碳化反应, 与温度、钙离子数量、PH 值和土矿物质中氧化硅和氧化铝的含量有关。当采用絮凝-真空预压处理时, 由于短期反应中钙离子置换土颗粒表面的单价阳离子, 使得土颗粒表面扩散层厚度变薄和颗粒间的排斥力减小, 进而土颗粒联结而絮凝成团, 增大孔隙提高渗透系数, 同时限制了土体的沉降量, 研究结果表明絮凝-真空预压处理后的沉降经验系数宜取 0.5~1.0。

6.3.11 絮凝-真空预压后地基强度增长标准值计算应符合 5.3.2 条相关规定, 吹填流泥絮凝后的固结快剪内摩擦角标准值 φ_{cq} 应通过室内试验确定, 强度增长经验系数 m_i 宜取 1.2~2.0。

条文说明

絮凝过程中，钙离子通过置换土颗粒表面的单价阳离子，使得土颗粒表面扩散层厚度变薄和颗粒间的排斥力减小，进而土颗粒絮凝、凝聚而形成团粒。当絮凝剂掺量增大时，通过硬凝反应生成硅酸钙和硅酸铝等胶结物，充填于团粒间的孔隙，将团粒联结成一体，使土体强度增大。当吹填流泥含水率较大时，需相对应地提高絮凝剂掺量，强度增长经验系数宜取高值。

6.4 堆载预压法

6.4.1 堆载材料

- 1 当堆载层作为公路路堤使用时，宜采用黏土及级配良好的宕渣做为堆载材料，堆载材料的颗粒级配、含水率、压实度等应满足《公路路基设计规范》的相关规定。
- 2 在近海吹填区缺少黏土或宕渣的情况下，可采用覆水做堆载材料。

条文说明：

《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD31-20)、《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)以及《吹填土地基处理技术规范》(GB/T51064)中对堆载预压的材料并无特殊要求，根据堆载材料的密度，换算成散料的堆载高度，满足设计的荷载大小即可。工程实例表明，在公路工程地基处理后，堆载层常作为公路路堤使用。部分工程的地基处理设计施工过程中，如不能满足公路工程对材料强度、压实度等方面的相关要求，后期需针对堆载层的进行额外处理，如材料置换，夯实等，极大的增加了工程难度及造价，且处理效果并不理想，因此本规程规定，当堆载层作为公路路堤使用时，地基处理中，堆载层应按照填方路基进行设计，并满足《公路路基设计规范》的相关要求。

6.4.2 堆载预压需铺设砂垫层，厚度不应小于 500mm，砂料宜用中粗砂，粘粒含量不宜大于 3%，砂料中可混有少量粒径小于 50mm 的砾石，砂垫层的干密度应大于 1.5g/cm^3 ，其渗透系数宜大于 $1\times 10^{-2}\text{cm/s}$ 。

6.4.3 堆载顶面范围应不小于拟建工程要求处理的吹填流泥地基范围。

6.4.4 堆载放坡边缘应设置排水沟，砂垫层内应设置与排水沟相连的排水盲沟。

6.4.5 堆载预压竖向排水体宜选择塑料排水板，塑料排水板性能指标及布置应符合 6.2.3 条要求。

6.4.6 堆载高度应根据吹填流泥地基使用要求确定，不应小于地基使用时的荷载设计值。可根据路堤填方的设计高度，场地现标高，路面设计标高，处理期沉降等综合确定堆载高度。

条文说明:

在满足地基处理要求的前提下,堆载高度可以做适当调整。堆载高度可按照堆载高度=预期沉降+路面设计标高-场地现标高-面层厚度的原则进行确定,从而减少地基处理结束后的填方或卸载。

6.4.7 对沉降要求严格的公路工程,宜采用超载预压。

6.4.8 吹填流泥地基堆载预压应进行分层加载,加载速率应与吹填流泥地基强度增长速率相适应,待上一级预压荷载下地基土的强度增长满足下一级荷载下地基的稳定性要求时方可加载。

6.4.9 卸载标准

- 1 堆载标高小于路堤设计标高时,不需卸载。
- 2 采用超载预压时,卸载标准时地基平均固结度不应小于 90%,且地表沉降速率连续 5d 平均沉降量应不大于 2mm/d。

6.4.10 设计计算

- 1 采用堆载预压进行吹填流泥地基二次处理固结度计算应符合《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)的相关规定。
- 2 采用堆载预压进行吹填流泥地基二次处理沉降计算及稳定分析应符合 5.2 节及 5.3 节相关规定。

条文说明:

工程实例表明,吹填流泥二次地基处理时,由于吹填流泥结构已经稳定,排水固结过程中的淤堵效应较小,可以忽略,因此二次处理时相关计算分析可视为天然地基,按照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)的相关要求进行。

6.5 真空联合堆载预压法

6.5.1 当设计地基预压荷载大于 80kPa,可采用真空联合堆载预压进行地基处理。

6.5.2 密封膜保护层

- 1 真空密封膜应不少于 3 层,密封膜上应平铺一层 450g/m² 无纺土工布作为保护层,土工布范围应大于真空膜范围 2m,土工布性能指标应符合表 6.5.3 要求

。

表 6.5.2 450g/m²土工布性能指标

项目	单位	技术指标
单位质量	g/m ²	≥450
断裂强力	kN/m	≥14
断裂伸长率	%	25~100
CBR 顶破强力	kN	≥2.4
垂直渗透系数	cm/s	≥1×10 ⁻²
撕破强力	kN	≥0.38

2 土工布上应铺一层砂垫层，砂垫层厚度应不小于 0.5m，砂垫层范围应大于真空膜范围 1m，材料性能指标应符合 6.4.2 条规定。

条文说明：

工程案例表明，堆载后无法保持真空压力是真空联合堆载地基处理工程中的主要问题，且密封系统一旦被堆载材料破坏后，修复难度很大。3 层真空密封膜中，上层密封膜用以隔离堆载材料对中层密封膜的破坏，下层密封膜用以隔离水平管路对中层密封膜的破坏，中层密封膜起主要密封作用。

膜上砂垫层为密封膜保护层。作为堆载材料，颗粒较大的粗粒土或体积较大的宕渣极易破坏密封膜，因此一般先采用人工或轻型机械摊铺砂垫层。砂垫层厚度过薄时，无法保证密封效果，且施工过程中较难控制，尤其是采用机械摊铺的情况下。当地表不均匀沉降较大时，应适当增加保护层厚度。个别工程也采用粘土作为保护层。但一方面实际施工过程中粘土质量难以控制，极易破坏密封膜。另一方面，地基处理时间较长的情况下，粘土层容易积水变软导致堆载层失稳，尤其在上层堆载材料为宕渣等透水性较好的材料时。因此本规程中推荐砂垫层作为保护层。

6.5.3 真空设备选用应符合 6.2.9 条规定，同时真空设备布置宜采用加长主管，减小控制面积的方式，将真空设备布置在堆载范围外，避免后期堆载施工的影响。

6.5.4 真空膜密封边界宜布置在堆载范围外。

6.5.5 堆载坡脚线不应超过真空预压边线。

6.5.6 堆载高度应包括膜上保护砂垫层。

6.5.7 堆载应在真空预压满载不小于 30d 后进行。

条文说明：

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79) 中提出了真空压力 (86.7kPa) 以及真空预压

时间（20d~30d）两个控制指标确定堆载开始时间。在实际工程中，如果开泵率足够，真空预压 20d~30d 后都能够实现真空满载。另一方面，如果堆载时间过早，吹填流泥层强度不足，沉降过大，密封膜容易被堆载破坏，且难以修复。因此本规程将堆载开始时间的控制指标简化为 30d 后进行。

6.5.8 堆载应分级进行，分级数应根据吹填流泥地基稳定计算确定。分级加载时，应待前期预压荷载下地基承载力增长满足下一级荷载下地基稳定性的要求时，方可加载。

6.5.9 卸载标准

- 1 堆载到设计标高后，真空联合堆载的满载时间应不小于 60 天；
- 2 真空预压停泵标准应符合 6.2.11 条规定；
- 3 堆载卸载标准 应符合 6.4.9 条规定。

6.5.10 真空联合堆载预压尚应满足 6.2 节及 6.4 节规定。

6.5.11 设计计算

- 1 采用真空联合堆载预压进行吹填流泥地基二次处理固结度计算应符合《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）的相关规定。
- 2 采用真空联合堆载预压进行吹填流泥地基二次处理沉降计算及稳定分析应符合第 5.2 节及 5.3 节规定。

6.6 水泥搅拌桩法

6.6.1 适用范围

- 1 适用于吹填流泥二次地基处理；
- 2 路堤填土高度不宜大于 6m；
- 3 当有机质含量大于 5%、塑性指数大于 25 或地下水具有腐蚀性时，必须通过现场试验确定其适用性。

6.6.2 成桩形式及选用原则

- 1 成桩方式包括浆液搅拌法（湿法）和粉体搅拌法（干法），应根据吹填流泥工程特性选用，必要时进行现场试验；
- 2 单向搅拌桩处理深度不宜大于 10m，双向搅拌桩处理深度不宜大于 15m，宜优先选用双向搅拌工艺。

6.6.3 材料要求

- 1 固化剂宜选择等级 42.5 级以上的普通硅酸盐水泥；

2 外加剂应根据工程地质条件、吹填流泥有机质含量、pH 值和工程要求综合确定。

6.6.4 设计前, 应进行室内配合比试验, 应选用合适的固化剂、外加剂和掺量, 提供不同龄期、不同配合比的强度参数。对竖向承载的水泥土强度宜取 90d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

条文说明

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79) 中提出了当拟加固的软弱地基为成层土时, 应选择最弱的一层土进行室内配比试验。

采用水泥作为固化剂材料, 在其他条件相同时, 在同一土层中水泥掺入不同时, 水泥土强度将不同。由于块状加固对于水泥土的强度要求不高, 因此为了节约水泥, 降低成本, 根据工程需要可选用 32.5 级水泥, 7%~12% 的水泥掺量。水泥掺入比大于 10% 时, 水泥土强度可达 0.3MPa~2MPa 以上。一般水泥掺入比 α_w 采用 12%~20%, 对于型钢水泥土搅拌桩(墙), 由于其水灰比较大(1.5~2.0) 为保证水泥土的强度, 应选用不低于 42.5 级的水泥, 且掺量不少于 20%。水泥土的抗压强度随其相应的水泥掺入比的增加而增大, 但因场地土质与施工条件的差异, 掺入比的提高与水泥土的增加的百分比是不完全一致的。

水泥强度直接影响水泥土的强度, 水泥强度等级提高 10MPa, 水泥土强度 f_{cu} 约增大 20%~30%。

外掺剂对水泥土强度有着不同的影响。木质素磺酸钙对水泥土强度的增长影响不大, 主要起减水作用; 三乙醇胺、氯化钙、碳酸钠、水玻璃和石膏等材料对水泥土强度有增强作用, 其效果对不同土质和不同水泥掺入比又有所不同。当掺入与水泥等量的粉煤灰后, 水泥土强度可提高 10% 左右。故在加固软土时掺入粉煤灰不仅可消耗工业废料, 水泥土强度还可有所提高。

6.6.5 水泥掺量应根据工程要求的水泥土强度试验确定, 水泥掺入比不应小于 12%, 湿法水泥浆水灰比可取 0.45~0.55。

条文说明

水泥搅拌桩的无侧限抗压强度在《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ017) 中采用的是 28d 龄期的强度, 这主要考虑了强度获取时间与工程进度的配合。但是, 水泥搅拌桩在路堤填到设计高度时才需要全部发挥强度, 所以标准强度选 28d 龄期不太适宜, 《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79) 和《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》(TB 10113) 均采用 90d 龄期的强度作为标准强度。从目前高速公路路堤施工情况来看, 桩体施工完 90d, 路堤可以填到 3m 左右, 荷载并不算大, 稳定计算仍是偏安全的。《港口工程地基规范》(JTJ 250) 规定试验室水泥土强度标准值宜取 90d 龄期的无侧限抗压强度, 但天津港湾工程研究所认为, 搅拌桩完成后 4 个月设计荷载也不能完全施加, 因此建议以 120d 龄期的强度代替 90d 龄期的强度进行设计, 以节省工程投资。可见将龄期与实际工程进度相结合起来考虑是合理的。因此, 采用 90d 龄期的强度比采用 28d 龄期

的强度更切合公路工程的实际。

选 90d 的强度作为标准强度，由于龄期长了，会给室内试验和现场检测带来困难。解决方法之一是建立强度增长规律关系式，根据短龄期（7d、28d）的试验、检测数据，按强度增长规律推测 90d 的强度（表 6.6.5）。第二种方法是采用高温快速养护，使试件在很短时间内达到标准养生 90d 的强度。根据研究成果，高温养生 30d 相当于标准养生 28d 的强度值；高温养生 96h 相当于标准养生 90d 的强度值

表 6.6.5 不同地区水泥搅拌土强度与龄期关系式对比表

代表地区和资料来源	关系式	假设 28d 强度为 1.0MPa, 按关系式计算		备注
		7d 强度 (MPa)	90d 强度 (MPa)	
中交第一公路勘察设计院（试验样品取值天津、福建、连云港和南通地区）	$q_{u28} = 2.37q_{u7} - 0.19$ $(r = 0.87, n = 12)$ $q_{u90} = 1.14q_{u28} + 0.85$ $(r = 0.79, n = 15)$	0.50	1.99	q_{u7} 、 q_{u28} 、 q_{u90} 分别表示 7d、28d 和 90d 无侧限抗压强度。 r 、 S 、 n 分别表示相关系数、标准差和统计组数
《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》（TB 10113）	$q_{u28} = 1.49q_{u7}$; $q_{u90} = 1.97q_{u7}$; $q_{u90} = 1.33q_{u28}$	0.67	1.33	
天津地区 天津港湾工程研究所 “水泥鉴别土工程特性研究”（研究报告）	淤泥： $q_{u7} = 0.364q_{u90}$	0.56	1.54	
	$q_{u28} = 0.652q_{u90}$ 淤泥质粘土： $q_{u7} = 0.262q_{u90}$ $q_{u28} = 0.485q_{u90}$	0.54	2.06	
上海地区 《地基处理》（叶书麟，中国建筑工业出版社）	$q_{u7} = 0.56q_{u28}$ $(r = 0.98, S = 0.059, n = 15)$ $q_{u90} = 1.63q_{u28}$ $(r = 0.98, S = 0.143, n = 9)$	0.56	1.63	

6.6.6 桩体布置

1 水泥搅拌桩桩体长度、间距、直径应根据道路结构对承载力、稳定性和变形的要求确定：

- 2 桩体直径不应小于 0.5m。
- 3 桩体平面可按照正方形或梅花形布置，桩间距不应大于 4 倍桩径。
- 4 桩体长度应穿透吹填流泥层到达地基承载力相对较高的土层或原土层。

6.6.7 水平垫层

- 1 宜在桩顶与路基之间设置褥垫层，厚度可取 300~500mm。
- 2 垫层材料可选用级配碎石、砂或含泥量不大于 10%的宕渣，最大粒径不宜大于 100mm。
- 3 垫层加筋材料可采用土工格栅，应满足延伸率 $\leq 5\%$ 时抗拉强度 $\geq 80\text{kN/m}$ 的要求。

6.6.8 水泥搅拌桩单桩承载力特征值应由现场荷载试验确定。初步设计时可根据现行行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)进行单桩承载力估算，并应考虑负摩阻力对桩基承载力和沉降的影响。

- 1 中性点深度 l_n 应按桩周土层沉降与桩沉降相等的条件计算确定，或按照下式确定：

$$l_n / l_0 = 0.5 \sim 0.7 \quad (6.6.8-1)$$

式中： l_n 、 l_0 ——为自桩顶算起的中性点深度和桩周软弱土层下限深度。

- 2 桩周负摩阻力由吹填流泥层的欠固结特性及吹填流泥大面积堆载引起的下卧土层固结沉降引起，当无实测资料时，中性点以上桩周第 i 层土负摩阻力标准值，可按以下公式计算：

$$q_{si}^n = \xi_i (p + \sigma'_{ni}) \quad (6.6.8-2)$$

$$\sigma'_{ni} = \sum_{n=1}^{i-1} r_n \Delta z_n + \frac{1}{2} r_i \Delta z_i \quad (6.6.8-3)$$

式中： q_{si}^n ——第 i 层土桩侧负摩阻力标准值；当按式(6.6.8-2)计算值大于正摩阻力标准值时，增压前预压荷载(kPa)；
 ξ_i ——第 i 层土负摩阻力系数，对于吹填流泥层取 0.10~0.20；
 σ'_{ni} ——有土自重引起的桩周第 i 层土平均竖向有效应力；
 r_i 、 r_n ——分别为第 i 计算土层和其上第 n 土层重度；地下水位以下为浮重度；
 Δz_i 、 Δz_n ——第 i 层土、第 n 层土的厚度；
 p ——地面均布荷载。

- 3 下拉荷载按下式计算：

$$Q_g^n = u_p \sum_{i=1}^n q_{si}^n l_i \quad (6.6.8-4)$$

式中： Q_g^n ——负摩阻力引起的下拉荷载(kN)；
 u_p ——桩的截面周长(m)；
 l_i ——中性点以上第 i 土层的厚度(m)。

条文说明

中性点深度和负摩阻力系数受工程地质条件和设计、施工等因素的影响较大，且吹填流泥地基上相关研究较少，因此应根据工程实际情况进行现场测试确定。

- 6.6.9 复合地基的承载力特征值应通过现场静载荷试验确定，初步设计时可根据现行

行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79)进行估算,并考虑相邻路堤荷载的影响。

6.6.10 加固土桩复合地基的沉降计算应包括复合地基加固区的沉降 S_1 计算和加固区下卧层的沉降 S_2 计算。

1 复合地基加固区的沉降 S_1 可按式(6.6.10-1)计算。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{\text{psi}}} \Delta h_i \quad (6.6.10-1)$$

式中: Δp_i ——地基中各分层中点的附加应力(kPa);

Δh_i ——地基各分层的初始厚度(m);

E_{psi} ——各分层的桩土复合压缩模量(kPa),按式(6.6.10-2)计算。

$$E_{\text{psi}} = mE_p + (1-m)E_{\text{si}} \quad (6.6.10-2)$$

$$E_s = 83.4q_u \quad (6.6.10-3)$$

式中: E_p ——桩体压缩模量(kPa);

E_{si} ——各分层的土体压缩模量(kPa);

q_u ——土体无侧限抗压强度(kPa)。

2 加固区下卧层的沉降 S_2 可按现行《建筑地基基础设计规范》(GB5007)有关规定计算。

6.6.11 路堤最小稳定安全系数应满足现行《公路路基设计规范》(JTGD30)的要求。路整体稳定性验算可采用圆弧滑动法,滑动面上的复合地基抗剪强度 τ_{ps} 按下式计算:

$$\tau_{ps} = m\tau_p + (1-m)\tau_s \quad (6.6.11-4)$$

式中: τ_p ——桩体的抗剪强度(kPa),可钻取试验路段水泥土90d原状试件测无侧限抗压强度,按其一半计算;也可按设计配合比由室内制备的水泥土试件(直径5cm、高度10cm的圆柱体)测得的无侧限抗压强度乘以0.3的折减系数求得;

τ_s ——地基土的抗剪强度(kPa)。

6.7 桩网复合地基法

6.7.1 桩网复合地基适用于处理荷载较大、变形要求严格的高路堤段、桥头或通道与路堤衔接段。

6.7.2 桩型可采用预制桩、就地灌注素混凝土桩、套管灌注桩、预应力混凝土薄壁管

桩(PTC)、预应力高强混凝土管桩(PHC)、现浇混凝土大直径管桩(PCC 桩)等,应根据施工可行性、经济性等因素综合比较确定桩型。

条文说明

桩网复合地基中的桩可采用刚性桩,也可选用低强度桩。实际上采用低强度桩时布桩间距较密,桩顶不需要设置荷载传递所需的桩帽、加筋层,对填土层高度也无严格要求,在形式上与桩网复合地基不一致,所以桩网复合地基中的桩普遍指的是刚性桩。

刚性桩的型式有多种,应根据施工可行性和经济性比选桩型。在饱和软黏土地层,不宜采用沉管灌注桩;采用打(压)入预制桩时,应采取合理的施工顺序和必要的孔压消散措施。

塑料套管桩是专门开发用于桩网复合地基的一种塑料套管就地灌注混凝土桩,桩径150mm~250mm,先由专门的机具将带铁靴的塑料套管压入地基土层中,后灌注混凝土,桩帽可一次浇筑,具有施工速度快,饱和软土地层施工影响小等特点。

6.7.3 桩网复合地基的桩间距、桩帽尺寸、加筋层的性能、垫层及填土层厚度,应根据地质条件、设计荷载和试桩结果综合分析确定。

条文说明

为了充分发挥桩网复合地基刚性桩桩体强度,宜采用较大的布桩间距。但是,加大桩间距时,需加大桩长、增加桩帽尺寸和配筋量,加筋体应具有更高的性能,以及加大填土高度以满足土拱高度要求,结果有可能导致总体造价升高。所以,应综合地质条件、桩的竖向抗压承载力、填土高度等要求,确定桩间距、桩帽尺寸、加筋层和垫层及填土层厚度。

6.7.4 桩径不宜小于 300mm。

6.7.5 桩网复合地基宜按正方形或等边三角形布桩,桩间距应根据设计荷载、单桩竖向抗压承载力计算确定,方案设计时可取桩径或边长的 4~8 倍。

条文说明

正方形布桩并采用正方形桩帽时,桩帽和加筋层的设计计算较方便。同时加筋层的经向或纬向正交于填方边坡走向时,加筋层对增强边界稳定性最有利。三角形布桩一般采用圆形桩帽,采取等代边长参照正方形桩帽设计方法。

根据实际工程统计,桩网复合地基的桩中心间距与桩径之比大多在 5~8 之间。当桩的竖向抗压承载力高时,应选较大的间距桩径比。但 3.0m 以上的布桩间距较少见。过大桩间距会导致桩帽造价升高,加筋体的性能要求提高,以及填土总厚度加大,在实际工程中不一定是合理方案。

6.7.6 单桩竖向抗压承载力应通过试桩确定,在方案设计和初步设计阶段,单桩的竖

向抗压承载力特征值应按现行行业标准《建筑桩基技术规范》（JGJ94）的有关规定计算并应考虑负摩阻力的影响。

6.7.7 桩网复合地基可不验算复合地基的承载力。

6.7.8 采用钢筋混凝土桩帽时，其强度等级不应低于 C25，桩帽的尺寸和强度应符合下列规定：

- 1 桩帽面积与单桩处理面积之比宜取 15%~25%；
- 2 桩帽以上填土高度，应根据垫层厚度、土拱计算高度确定；
- 3 在荷载基本组合条件下，桩帽的截面承载力应满足抗弯和抗冲剪强度要求；
- 4 钢筋净保护层厚度宜取 50mm。
- 5 正方形布桩时，可采用正方形桩帽，桩帽上边缘应设 20mm 宽的 45°倒角。

条文说明

桩帽宜采用现浇，可以保证对中和桩顶与桩帽紧密接触。当采用预制桩帽时，一般在预制桩帽的下侧面设略大于桩径的凹槽，安装时对准桩位。桩帽面积与单桩处理面积之比宜取 15%~25%。当桩径为 300mm~400mm 时，桩帽之间的最大净间距宜取 1.0m~2.0m。方案设计时，可预估需要的土覆填土厚度为最大间距的 1.5 倍。

桩帽作为结构构件，采用荷载基本组合验算截面抗弯和抗冲剪承载力（图 6.7.8）。

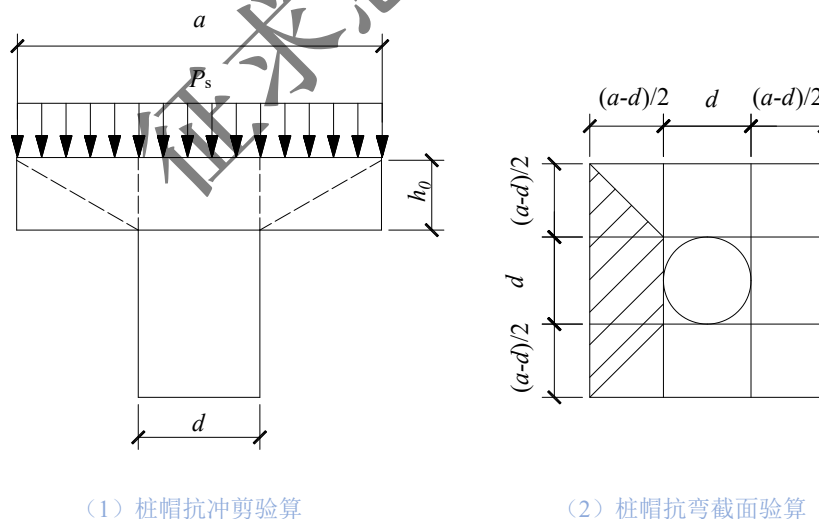


图 6.7.8 桩帽计算

桩帽抗冲剪按下列公式计算：

$$V_s / u_m h_0 \leq 0.7 \beta_{hp} f_t / \eta \quad (6.7.8-1)$$

$$V_s = P_s a^2 - (\tan 45^\circ h_0 + d)^2 \pi P_s / 4 \quad (6.7.8-2)$$

$$u_m = 2(d/2 + \tan 45^\circ h_0 / 2) \pi \quad (6.7.8-3)$$

式中: V_s ——桩帽上作用的最大冲剪力 (kN);
 P_s ——相应于荷载效应基本组合时, 作用在桩帽上的压力值 (kPa);
 β_{hp} ——冲切高度影响系数, 取 1.0;
 f_t ——混凝土轴心抗拉强度 (kPa);
 η ——影响系数, 取 1.25。

桩帽截面抗弯承载力按下列公式计算:

$$M_R \geq M \quad (6.7.8-4)$$

$$M = \frac{1}{2} P_s d \left(\frac{a-d}{2} \right)^2 + \frac{2}{3} P_s \left(\frac{a-d}{2} \right)^3 \quad (6.7.8-5)$$

式中: M_R ——截面抗弯承载力 (kN.m);
 M ——桩帽截面弯矩 (kN.m)。

6.7.9 采用正方形布桩和正方形桩帽时, 桩帽之间的土拱高度可按下列公式计算:

$$h = 0.707(S-a) / \tan \varphi \quad (6.7.9-1)$$

式中: h ——土拱高度 (m);
 S ——桩间距 (m);
 a ——桩帽边长 (m);
 φ ——填土的摩擦角, 黏性土取综合摩擦角 ($^{\circ}$)。

6.7.10 桩帽以上的最小填土设计高度应按下列公式计算:

$$h_2 = 1.2(h - h_1) \quad (6.7.10-1)$$

式中: h_2 ——垫层之上最小填土设计高度 (m);
 h_1 ——垫层厚度 (m)。

条文说明

为确保土拱的形成, 充分发挥土拱效应, 避免桩(帽)土顶面的差异沉降反射到路面而出现蘑菇状高低起伏的现象, 要求刚性桩处理路段的路堤高度宜大于 $1.4(S-a)$ 。

6.7.11 加筋层设置在桩帽顶部, 加筋的经纬方向宜分别平行于布桩的纵横方向, 应选用双向抗拉同强、低蠕变性、耐老化型的土工格栅类材料。

6.7.12 当桩与地基土共同作用形成复合地基时, 桩帽上部加筋体性能应按边坡稳定需要确定, 加筋体的性能应符合下列规定:

1 加筋体的抗拉强度设计值 (T) 可按下列公式计算:

$$T \geq \frac{1.35 \gamma_{cm} h (S^2 - a^2) \sqrt{(S-a)^2 + 4\Delta^2}}{32\Delta a} \quad (6.7.12-1)$$

式中： T ——加筋体抗拉强度设计值（kN/m）；

γ_{cm} ——桩帽之上填土的平均重度（kN/m³）；

Δ ——加筋体的下垂高度（m），可取桩间距的 1/10，最大不宜超过 0.2m。

2 加筋体的强度和对应的应变率应与允许下垂高度值相匹配，宜选取加筋体设计抗拉强度对应应变率为 4%~6%，蠕变应变率应小于 2%；

3 当需要铺设双层加筋体时，两层加筋应选同种材料，铺设竖向间距宜取 0.1m~0.2m，两层加筋体之间应铺设垫层同种材料，两层加筋体的抗拉强度宜按下式计算：

$$T = T_1 + 0.6T_2 \quad (6.7.12-2)$$

式中： T ——加筋体抗拉强度设计值（kN/m）；

T_1 ——桩帽之上第一层加筋体的抗拉强度设计值（kN/m）；

T_2 ——第二层加筋体的抗拉强度设计值（kN/m）。

条文说明

当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时，根据桩网地基的工作机理，土拱产生之后，桩帽以上以及土拱部分填土荷载和使用荷载均通过土拱作用，传递至桩帽由桩承担。当桩间土下沉量较大时，拱下土体通过加筋体的提拉作用也传递至桩帽，由桩承担。目前国外规范关于加筋体拉力的计算方法主要有以下几种：

1 英国规范 BS8006 法

将水平加筋体受竖向荷载后的悬链线近似看成双曲线，假设水平加筋体之下脱空，得到竖向荷载（ W_T ）引起的水平加筋体张力（ T ）按下式计算：

$$T = \frac{W_T(S-a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (6.7.12-3)$$

式中： S ——桩间距（m）；

a ——桩帽宽度（m）；

ε ——水平加筋体应变；

W_T ——作用在水平加筋体上的土体重量（kN）。

当 $H > 1.4(S-a)$ 时， W_T 按下列公式计算：

$$W_T = \frac{1.4S\gamma(S-a)}{S^2 - a^2} \left[S^2 - a^2 \left(\frac{C_c a}{H} \right)^2 \right] \quad (6.7.12-4)$$

对于端承桩：

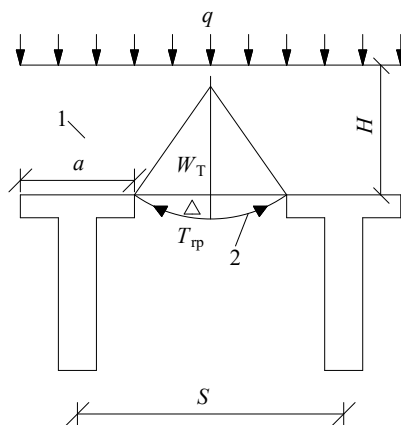
$$C_c = 1.95H / a - 0.18 \quad (6.7.12-5)$$

对于摩擦桩及其他桩：

$$C_c = 1.5H / a - 0.07 \quad (6.7.12-6)$$

式中： C_c ——成拱系数。

2 北欧规范法



图中 1 为路堤；2 为水平加筋体。

图 6.7.12-1 加筋体计算

北欧规范法的计算模式采用了三角形楔形土拱的假设（图 6.7.12-1），不考虑外荷载的影响，则二维平面时的土楔重量（ W_{T2D} ）按下式计算：

$$W_{T2D} = \frac{(S-a)^2}{4 \tan 15^\circ} \gamma \quad (6.7.12-7)$$

该方法中水平加筋体张拉力的计算采用了索膜理论，也假定加筋体下面脱空，得到二维平面时的加筋体张拉力（ T_{rp2D} ）可按下式计算：

$$T_{rp2D} = W_{T2D} \left(\frac{S-a}{8\Delta} \right) \sqrt{1 + \frac{16\Delta^2}{(S-a)^2}} \quad (6.7.12-8)$$

式中： Δ ——加筋体的最大挠度（m）。

瑞典 Rogheck 等考虑了三维效应，得到三维情况下土楔重量（ W_{T3D} ）可按下式计算：

$$W_{T3D} = \left(1 + \frac{S-a}{2} \right) W_{T2D} \quad (6.7.12-9)$$

则三维情况下水平加筋体的张拉力（ T_{rp3D} ）可按下式计算：

$$T_{rp3D} = \left(1 + \frac{S-a}{2} \right) T_{rp2D} \quad (6.7.12-10)$$

3 日本细则方法

日本细则方法考虑拱下三维楔形土体的重量，假定加筋体为矢高 Δ 的抛物线，土拱下土体荷载均布作用在加筋体上，推导出加筋体张拉力可按下式计算：

$$W = \frac{1}{2} h \gamma (S^2 - \frac{1}{4} a^2) \quad (6.7.12-11)$$

格栅上的均布荷载：

$$q = \frac{W}{2(S-a)a} \quad (6.7.12-12)$$

加筋体的张力:

$$T_{\max} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{q\Delta}{2}\right)^2} \quad (6.7.12-13)$$

$$H = q(S-a)^2 / 8\Delta \quad (6.7.12-14)$$

4 本规范方法

本规范采用应力扩散角确定的土拱高度，考虑空间效应计算加筋体张力（图 6.7.12-2）。

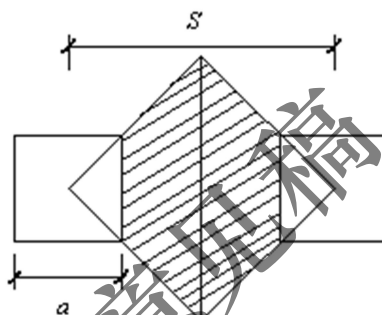


图 6.7.12-2 加筋体计算平面

土拱设计高度 $h = 1.2H_c$ ， $H_c = 0.707(S-a) / \tan \varphi$ （图 6.7.12-2）。加筋体张力产生的向上的分力承担图中阴影部分楔体土的重量，假定加筋体的下垂高度为 Δ ，变形近似于三角形，土荷载的分项系数取 1.35，则加筋体张力可按式计算：

$$T \geq \frac{1.35\gamma h(S^2 - a^2)\sqrt{(S-a)^2 + 4\Delta^2}}{32\Delta a} \quad (6.7.12-15)$$

5 不同方法计算结果的对比

此处以一个算例，对比上述不同规范计算土拱高度和加筋拉力的结果。算例中：布桩间距 2.0m，桩帽尺寸 1.0m，填料内摩擦角取 35°、30°和 25°三种情况，填土的重度取 20kN/m³，填土的总高度大于 2.5m，加筋体最大允许下垂量 0.1m。土拱的高度和加筋体的拉力分别按照不同的规范方法计算，结果列于表 6.7.12

表 6.7.12 不同规范土拱高度和加筋体拉力计算比较

规范或方法名称		英国规范 BS8006 法	北欧规范 法	日本细则 法	本规范法
$\varphi =$	土拱高度 (m)	1.68	2.24	1.45	1.45
	加筋拉力 (kN/m)	64.10	101.90	49.90	58.30
$\varphi =$	土拱高度 (m)	1.68	2.24	1.76	1.76

	加筋拉力 (kN/m)	64.10	101.90	60.70	69.40
$\varphi =$	土拱高度 (m)	1.68	2.24	2.18	2.18
	加筋拉力 (kN/m)	64.10	101.90	75.20	85.32

在本规范确定总填土厚度时,考虑了 20%的安全余量。能够保证桩网复合地基形成完整的土拱,不至于在路面产生波浪形的差异沉降。工程实际和模型试验都表明,增加加筋层数能够有效地减小土拱高度。但是,目前这方面还没有定量的计算方法,建议采用有限元等数值方法和足尺模型试验确定多层加筋土土拱高度。

加筋层材料应选用土工格栅、复合土工布等具有铺设简便、造价便宜、材料性能适应性好等特点的土工聚合物材料。宜选用尼龙、涤纶、聚酯材料的经编型、高压聚乙烯和交联高压聚乙烯材料等拉伸型土工格栅,或该类材料的复合土工材料。热压型聚苯稀、低密度聚乙烯等材料制成的土工格栅强度较低、延伸性大、蠕变性明显,不宜采用。玻纤土工格栅强度很高,但是破坏时应变率较小,一般情况下也不适用。

桩与地基土共同作用形成复合地基时,桩帽上部加筋按边坡稳定要求设计。加筋层数和强度均应该由稳定计算的结果确定。多层加筋也可以解决单层加筋强度不够的问题。从桩网加筋起桩间土提兜作用的机理分析,选择两层加筋体时,两层筋材应尽量靠近。但是贴合会减少加筋体与垫层材料的摩擦力,要求之间有 10cm 左右的间距,所填的材料应与垫层相同。由于两层加筋体所处的位置不同,实际产生的变形量也不同,所以强度发挥也不同。两层相同性质的加筋体,上层筋材发挥的拉力只有下层的 60%左右。

加筋体的允许下垂量与地基的允许工后沉降有关,也关系到加筋体的强度性能。当工后沉降控制严格时,允许下垂量取小值。规定的加筋体下垂量越小,加筋体的强度要求就越高。所以,一般情况下规范推荐取桩帽间距的 10%。

6.7.13 垫层应铺设在加筋体之上,应选用碎石、卵石、砾石,最小粒径应大于加筋体的孔径,最大粒径应小于 50mm;垫层厚度不宜小于 300mm。

条文说明

当桩间土发生较大沉降时,加筋层和桩间土可能脱开,为了避免垫层材料漏到加筋层之下,填料的最小粒径不应小于加筋体的孔径尺寸。如果加筋体的孔径较大,垫层材料粒径不能满足要求时,可在加筋层之上铺设土工布,或者采用复合型的土工格栅。

6.7.14 垫层之上的填土材料可选用碎石、无黏性土、砂质土等,不得采用塑性指数大于 17 的黏性土、垃圾土、混有有机质或淤泥的土类。

6.7.15 桩网复合地基沉降可按现行国家标准《复合地基技术规范》(GB/T 50783)的有关规定计算。

6.7.16 桩网复合地基稳定性可按圆弧滑动总应力法进行验算。最危险滑动面上的总剪切力为 T ,总抗剪切力为 S ,则稳定性安全系数按照以下公式计算:

$$K = \frac{S}{T} \quad (6.7.16)$$

式中： T ——最危险滑动面上的总剪切力，kN；

S ——最危险滑动面上的总抗剪切力，kN；

K ——安全系数，取 1.20~1.30 并且低强度桩桩长应超过危险滑弧以下 2.0m。

条文说明

在计算总抗剪切力的过程中应考虑刚性桩的作用。刚性桩对总抗剪力的作用与桩型、桩间距、桩径、工程地质条件等关系密切，然而其作用的具体计算方法目前尚无定论。实际工程中可采用有限单元法等数值计算方法进行考虑。

6.7.17 当采用端承桩和摩擦端承桩时，应考虑地基土与桩之间的差异沉降对加筋体受力和地基沉降的影响。

条文说明

工程实践表明，由于吹填流泥地基土工后沉降较大，加筋体与地基土脱开现象明显。对于有条件的工程，应定期对路堤底部进行检查，以便及时对该问题进行处理，从而减小其影响。

征求意见稿

7 地基处理施工

7.1 一般规定

7.1.1 地基处理施工方法的选择应考虑吹填流泥的特殊性。

7.1.2 一次地基处理施工时,应根据吹填流泥初始含水率、强度、厚度等以及工程要求选择合适的施工方法,根据吹填流泥强度选择轻型的施工设备,可选用泡沫垫等轻型材料搭建施工平台,并采取相应措施保障施工人员安全。

7.1.3 二次地基处理施工时,应根据一次地基处理结果及工程要求选取合适的施工方法,根据一次处理后的地基承载力选择合适的施工设备,可采取铺设砂垫层等相应措施保障施工机械进场。

7.1.4 路堤地基处理

- 1 路堤地基处理施工应考虑后期路堤高度、荷载、施工工期等方面的要求;
- 2 大范围的路堤一次地基处理应区分路堤范围与范围外对地基处理施工的不同要求;
- 3 施工范围线及区域边界应布置在路堤范围外;
- 4 施工方法应满足不同等级、宽度、高度路堤衔接段的要求。

7.1.5 涵洞通道地基处理

- 1 涵洞通道地基处理施工应考虑后期开挖深度、范围、施工工期等方面的要求;
- 2 施工范围线及区域边界应布置在涵洞通道范围外;
- 3 施工方法应满足涵洞与道路衔接段的要求。

7.2 复式真空预压法

7.2.1 施工宜按以下步骤进行:

- 1 施工准备
- 2 场地清理

- 3 铺设工作平台及垫层
- 4 塑料排水板施工
- 5 水平管路连接
- 6 密封
- 7 埋设监测仪表
- 8 加载

7.2.2 工作平台及垫层施工应符合以下规定：

1 吹填流泥地基一次处理，宜采用竹筏架设浮桥形成施工便道，也可采用塑料泡沫板作为工作平台；

2 吹填流泥地基二次处理，地基承载力较低机械无法进场时，可铺设不小于 50cm 厚中砂垫层；

3 吹填流泥表层应铺设一层编制土工布，防止流泥进入水平排水系统。

条文说明：

部分工程采用了竹筏作为水平垫层后，真空预压时竹筏极易戳破密封膜，导致真空预压失效。因此一次处理过程中，当采用竹筏作为工作平台及施工垫层时，铺设密封膜前应及时将其清理干净，不得将其遗留在密封膜下。

工程实例表明，一次地基处理后，二次地基处理没有尽快进场，或者地表无排水措施，约 50cm 左右的地表土受到扰动或雨水影响后会丧失强度，重新呈现为流泥状态，导致二次地基处理施工困难，此种情况下可采用铺设砂垫层、编织布等方式解决。

7.2.3 塑料排水板施工应符合以下规定：

1 塑料排水板使用前应进行质量检验，塑料排水板性能指标应符合设计要求。

2 塑料排水板不宜长时间暴晒，在现场堆放时应加以保护，防止破损及老化。

3 一次地基处理根据现场情况及插板深度，采用机械插板或人工插板。二次地基处理采用机械插板。

4 排水板施工应防止排水板扭曲，吹填流泥地基处理时排水板不应搭接使用。

5 塑料排水板的平面位置偏差应小于排水板宽度，垂直度偏差小于 1.5%，深度不小于设计要求。

6 塑料排水板板头应露出吹填流泥表面或砂垫层表面，以连接水平排水系统，外露长度应不小于 300mm。

条文说明：

《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）以及《水运工程塑料排水板应用技术规程》（JTS206）中均允许排水板搭接使用。但近几年吹填流泥地基处理工程中，塑料排水板均没有搭接使用的情况，且本规程中规定的整体式塑料排水板搭接困难，对排水效果影响很大。因此本规程规定排水板不应搭接使用。

7.2.4 水平排水系统施工应符合以下规定：

- 1 支管布置在每两排排水板之间，排水板上套密闭式手板接头与支管连接，排水板与手板接头间应采用射钉枪固定，手板接头与支管宜采用自锁方式进行连接，连接长度不小于 50mm。
- 2 支管间宜采用四通、三通或双通接头连接，连接长度不小于 70mm。
- 3 支管与主管宜采用变径四通、三通或双通接头连接，连接长度不小于 100mm。
- 4 主管与主管间宜采用双通接头连接，连接长度不小于 150mm。
- 5 主管出膜应采用专用出膜器，并保证密封效果。
- 6 出膜管与真空设备连接前应安装密封阀和止回阀。

7.2.5 增压系统施工应符合以下规定：

- 1 增压板施工应符合 7.2.3 条 1~5 款的要求。
- 2 排水板上套密闭式手板接头，施工应符合 7.2.4 条要求，手板接头与增压密封段管路采用转换连接器连接。
- 3 增压管路间宜采用带有自锁装置的四通、三通或双通接头连接，连接长度不小于 10mm。

条文说明：

增压板的施工过程与排水板基本一致，但排水板板头需露出地面连接真空管路，增压板头需要埋置在土体 1.0m 以下保证增压时的密封性。人工插板时可先连接增压管路密封段后进行插板，机械插板时可在增压板点位挖除密封段土体，插板连接增压管路后再覆土密封。

7.2.6 密封膜铺设应符合以下规定：

- 1 铺设密封膜前应在水平排水系统上铺设一层 200g/m^2 无纺土工布，防止真空压力下水平排水系统破坏密封膜。
- 2 密封膜宜采用双热合缝的平搭接，搭接宽度应大于 15mm。
- 3 密封膜尺寸每边应超出加固区边界不小于 3m。当加固区内地质条件复杂，易出现较大不均匀沉降、滑移等不利情况时，应加大密封膜尺寸，并松弛铺设。
- 4 密封膜宜铺设 2~3 层，当联合堆载预压时，应不小于 3 层，同时根据设计要求进行边界密封。
- 5 每铺设一层密封膜，应及时检查密封膜，发现孔、洞应修补完好后方可铺设下一层密封膜。
- 6 密封膜铺设时风力不应大于 5 级，并应从上风侧开始铺设。

7.2.7 密封沟开挖应沿加固区周边进行，沟底宽度应大于 40cm，沟内回填黏土应分层压实。

7.2.8 黏土密封墙宜采用双排搅拌桩，搅拌桩直径不宜小于 700mm，搭接宽度不宜小于 200mm。搅拌桩成桩应均匀，深度、黏粒含量及渗透系数应符合设计要求。

7.2.9 真空设备应检查调试合格后才能使用。

7.3 絮凝-真空预压法

7.3.1 絮凝剂添加宜采用管内混合法，在吹填工程开始时，将絮凝剂与吹填流泥在吹填流泥输送主管道内混合，由吹填流泥输送支管及布料器吹送至各吹填片区。

条文说明：

絮凝剂添加工艺主要有管内混合法、场地混合处理方法。采用场地混合处理方法对场地的晾晒时间、土体强度有一定要求。考虑吹填流泥的强度低，含水率高，且絮凝剂添加后还需结合真空预压进行处理，因此采用管内混合法更加合适。采用管内混合法时，先将絮凝剂加入到加料配制仓，搅拌均匀后通过絮凝剂输送管道经泵送仓输送至吹填流泥吹填管道，使其随吹填流泥一起吹填至预定场地，絮凝剂与吹填流泥混合吹填时，絮凝剂输送管道接入吹填土输送管道的位置应距吹填输送管道出口处有一定距离，使絮凝剂和吹填流泥能够充分的混合均匀，吹填到预定场地后要静置沉积 1-2 个月，待其充分反应后进行真空预压。

7.3.2 絮凝剂添加设备应由管内絮凝剂搅拌混合器，带有计量装置的絮凝剂添加器，絮凝剂材料存储器构成。

7.3.3 在施工过程中应保证最优的絮凝剂配合比，配合比偏差不大于 $\pm 5\%$ 。

7.3.4 在施工过程中，应根据吹填流泥性质、絮凝种类、配合比、吹填泵送设备并结合试验或工程经验确定合适的吹填流泥泵送速度、管内絮凝剂搅拌速度、絮凝剂喷射速度等施工参数。

7.3.5 真空系统施工应符合 7.2 节规定。

7.4 堆载预压法

7.4.1 塑料排水板埋入砂垫层长度不应小于 500mm，且应符合 7.2.3 条 1~5 款规定。

条文说明：

因为砂料短缺，部分工程为加快施工进度，在铺设砂垫层之前进行插板施工，排水板板头露出长度不足，或将排水板头压折在砂垫层下，严重影响排水效果。因此为保证

工程效果明确了施工过程中排水板埋入砂垫层的长度，不小于砂垫层的最小厚度。

7.4.2 当堆载层作为公路路堤使用时，堆载应采用分层平铺进行，每层堆载 20cm~30cm 并碾实，压实度应满足设计要求，每层堆载搭接应错开不小于 2m。

7.4.3 当堆载层不作为公路路基使用时，或需要卸载部分，每层堆载 50cm 并碾实。

7.4.4 材料临时堆高不应大于设计高度 1m。

7.4.5 覆水预压施工应符合以下规定：

- 1 砂垫层上应铺设一层 200g/m^2 无纺土工布，以保护密封膜。
- 2 采用 2~3 层密封膜作为防渗膜，第一级加水深度宜为 200mm，以检查防渗膜是否渗漏，后期根据地基强度及稳定性，进行分级加载，每级加载不大于 500mm。
- 3 密封膜边缘应铺设至挡水围堰顶部。

7.4.6 堆载预压加载过程中，应满足地基承载力和稳定控制要求，并结合变形及孔压监测数据速率，严格控制堆载速率。

7.5 真空联合堆载预压法

7.5.1 真空系统施工应符合 7.2 节规定。

7.5.2 密封膜上保护砂垫层及堆载层铺设施工、碾实应采用轻型机械，不得损坏密封膜。

7.5.3 堆载施工应满足 7.4 节规定。

7.5.4 堆载施工开始时间应在真空压力稳定，满载时间达到设计要求后，结合监测数据进行确定。

7.5.6 砂垫层及堆载应分层摊铺，临时堆载高差不得大于 1m。

条文说明：

临时堆载高差过大会造成压力分布不均，不均匀沉降过大，容易导致密封膜破裂，因此规定临时堆载高差不得过大。

7.5.7 堆载施工时应实时监测膜下真空度变化情况，如造成密封膜损坏漏气，应及时修补。

7.6 水泥搅拌桩法

7.6.1 施工步骤

- 1 桩机就位
- 2 预搅下沉至设计桩长
- 3 喷浆搅拌
- 4 根据设计要求喷浆或仅搅拌提升直至预定的停浆面
- 5 停止施工

7.6.2 吹填流泥地基进行水泥搅拌桩施工应进行试桩，试桩数量不少于 5 根，确定如下参数：

- 1 钻进速度、搅拌速度、搅拌头回转数、提升速度等施工参数；
- 2 根据下钻及提升阻力情况，选择保障水泥浆掺入量的合理措施；
- 3 检验实验室确定的配合比是否合适，是否需要添加外加剂；
- 4 单桩承载力。

7.6.3 吹填流泥地基承载力不足时，宜铺设砂垫层，铺设厚度不小于 50cm。

7.6.4 送浆管路不得长于 50m，正常施工时管道末端压力应保持在 0.25MPa~0.4MPa，应保证出浆口水平喷浆距离不小于 2m。

7.6.5 水泥浆充分搅拌后过筛，储浆时应继续搅拌防止离析。喷浆搅拌 30s 后再开始提升搅拌头。

7.6.6 所用水泥及掺加剂性能质量应符合设计要求，使用时水泥过筛，水泥浆液不能离析，泵送必须连续，水泥等材料用量及喷浆量等需有专人记录。

7.6.7 施工时应保持搅拌桩机底盘的水平 and 导向架的竖直，搅拌桩的垂直偏差不得超过 1%；桩位的偏差不得大于 50mm；成桩直径和桩长不得小于设计值。

7.6.8 路堤填筑及涵洞土方开挖时应重视对复合地基的保护，避免水泥搅拌桩位移或剪断。

7.7 桩网复合地基法

7.7.1 预制桩可选用打入法或静压法沉桩，灌注桩可选用沉管灌注、长螺旋钻孔灌注、长螺旋压浆灌注、钻孔灌注等施工方法。

7.7.2 持力层位置和设计桩长应根据地质资料和试桩结果确定,灌注桩施工应根据揭示的地层和工艺试桩结果综合判断控制施工桩长。预制桩沉桩施工时,应以设计桩长控制为主,工艺试桩确定的收锤标准或压桩力控制为辅的方法控制施工桩长。

7.7.3 挤土桩施工应选择合适的施工顺序,并应减少挤土效应,应加强对相邻已施工桩及施工场地周围环境的监测。

7.7.4 加筋层的施工应符合下列要求:

- 1 材料的运输、储存和铺设应避免阳光暴晒;
- 2 应选用较大幅宽的加筋体,两幅拼接时接头强度不应小于原有强度 70%;接头宜布置在桩帽上,重叠宽度不得小于 300mm;
- 3 铺设时地面应平整,不得有尖锐物体;
- 4 加筋体铺设应平整,应用编织袋装砂(土)压住;
- 5 加筋体的经纬方向与布桩的纵横方向应相同。

7.7.5 桩帽宜现浇,预制时,应采取对中措施。桩帽之间应采用砂土、石屑等回填。

7.7.6 加筋体之上铺设的垫层应选用强度较高的碎石、卵砾石填料,不得混有泥土和石屑,碎石最小粒径应大于加筋体孔径,应铺设平整。铺设厚度小于 300mm 时,可不作碾压,300mm 以上时应分层静压压实。

7.7.7 垫层以上的填土,应分层压实,压实度应达到设计要求。

8 施工监测

8.1 一般规定

8.1.1 地基处理施工监测内容及要求应根据地基处理方式、公路等级以及施工阶段确定。施工中，应有专人或专门机构负责监测工作，随时检查施工记录和计量记录，并按照规定的施工工艺对工序进行质量评定。

- 1 真空表、沉降板、孔压计及侧斜管等布置设计，典型断面的设置和监测内容。
- 2 提出地基处理期等真空度、孔压变化警戒值、沉降速率和侧向变形等的控制指标。
- 3 当地基处理施工可能对周边环境和建筑物产生不良影响时，应对施工过程中的振动、位移、地下管线和建筑物变形进行监测。

条文说明：

由于吹填流泥受力后的力学特性相当复杂，各地区吹填流泥成分不尽相同，目前吹填流泥参数测定方法以及相关地基处理技术的分析理论还在发展成熟之中。地基处理前的设计计算一般以室内试验结果得到的各参数为依据，事前设计假定的加载方式，卸载时间，沉降发展，填筑过程等均与实际施工时有一定的出入。另外地质勘点布置不可能很密集，因此事前设计的理论计算必然会产生一定的误差。施工时对吹填流泥变形、稳定进行监测时十分必要的，是公路吹填流泥地基处理问题中的重要组成部分。

采用堆载或真空预压对吹填流泥地基处理应考虑预压对相邻建筑管线等产生附加沉降的影响，同时考虑水平土体变形的影响。《建筑地基处理技术规范》（JGJ79）建议的影响区范围不小于 20m。工程实例表明，水平影响范围随处理场地尺寸及处理深度的增加而增大，且由于吹填流泥及下卧层欠固结特性的影响，水平影响范围会进一步增大。如温州瓯飞起步区 F-02 地块地基处理工程，采用复式真空预压结合堆载，处理深度 20m，监测数据表明，地表沉降最大 1.8m，地基处理边界处水平变形约 105cm，影响范围 20m。因此吹填流泥地基处理监测应注重施工过程对周边环境的影响。

8.1.2 监测应包括以下内容：

- 1 施工前应根据设计要求，埋设观测标志及观测仪器。变形监测网，应由部分基准点、工作基点和变形观测点构成。监测周期，应根据监测点的变形特征、变形速率、观测精度、公路等级及工程地质条件等因素综合确定。
- 2 对观测数据进行定期整理分析，动态调整地基处理时间，加载大小、速率，场地

标高等设计参数。

3 根据沉降数据，提供路堤沉降土方量，校验堆载及路堤填筑标高。

条文说明：

数据整理分析的主要目的是验证处理效果，根据实际工程的进度和实测数据及时调整设计参数，控制加载大小，速率，时间等，确定实际堆载高度，二次开挖和公路面层修建时间，分析计算各阶段合理堆载高度和预留施工空间，确定沉降土方等重要参数。

8.1.3 监测过程应符合以下要求：

- 1 每期观测前，应对所使用的仪器和设备进行自检、校正，并作详细记录。
- 2 监测期间，应根据变形量的变化情况适当调整，各期的变形监测，应满足：

1) 在较短的时间内完成；

2) 采用相同的图形（观测路线）和观测方法；

3) 使用同一仪器和设备；

4) 观测人员相对固定；

5) 记录相关的环境因素，包括荷载、温度、降水、水位等；

6) 采用统一基准处理数据。
- 3 每期观测结束后，应及时处理观测数据，当数据处理结果出现下列情况之一时，必须立刻通知建设单位和施工单位采取相应措施：

1) 变形量达到预警值或接近允许值；

2) 变形量出现异常变化。

8.1.4 除施工单位自行监测外，还应委托有资质的第三方专业单位进行。

条文说明：

目前吹填流泥地基处理通常实行第三方和施工单位监控相结合的方式。近几年地基处理问题很大部分是由于监控不及时及可靠性较差造成的，为保障工程质量，应增加第三方监控的要求。

8.2 监测断面布置

8.2.1 工程观测项目应根据地基处理方案与工程要求有选择性地确定，所有观测点宜集中设置在同一横断面上，监测项目宜按表 8.2.1 所列内容选取。

表 8.2.1 观测项目

观测项目		仪表名称	观测目的
沉降	地表沉降	沉降板	地表以下土体沉降总量，常规观测项目
	地基分层沉降	深层分层沉降标	地基不同层位分层沉降量，按需要设置

续表 8.2.1 观测项目

观测项目		仪表名称	观测目的
水平位移	地表水平位移	水平位移边桩	测定路堤侧向地面水平位移量并兼测地面沉降或隆起量，用于稳定监测，常规观测项目
	地基土体水平位移	测斜管	观测地基各层位土体侧向位移量，用于稳定监测和了解土体各层侧向变位以及附加应力增加过程中的变位发展情况，常规观测项目
应力	地基孔隙水压力	孔隙水压力计	观测地基孔隙水压力变化，分析地基土固结情况
	土压力	土压力计	测定测点位置的土应力及应力分布情况，按需要设置
	承载力	荷载试验仪	一般用于地基或桩（柱）的承载能力测定。
其他	地下水位（辅助观测）	地下水位观测计	观测地基处理后地下水位的变化情况，校验孔隙水压力计读数
	出水量（辅助观测）	单孔出水量计	检测单个竖向排水井排水量，了解地基排水情况

8.2.2 监测断面间距

- 1 在吹填流泥大面积一次处理时，预压区真空表、孔压计、沉降板 5000m^2 左右一点，分层沉降标 20000m^2 左右一点。
- 2 在吹填流泥堆载处理及一般路堤堆载路段，监测断面通常应垂直于路线方向布设，一般为 $100\text{m}\sim 200\text{m}$ ，当吹填流泥层深厚或者土层变化较大时，根据实际情况进行加密。
- 3 为预测工后差异沉降，应分别在距离桥台搭板末端地基处理区约 0m 、 20m 、 40m 处设置沉降观测断面，在复合地基与排水固结交界面及两侧各 20m 左右处也应设置沉降观测断面
- 4 对于沿河段，断面设置不大于 50m 。

条文说明：

监测点布置根据地基处理过程、方式以及公路工程特点确定。一次地基处理时，按照大面积吹填流泥地基处理进行监测点布置，主要监测真空预压过程中的沉降、真空压力及孔压等。二次地基处理时，按照公路软土路基工程进行监测。不同地基处理方式过渡段、桥头涵洞结构物等处后期会有较大的差异沉降，以错台或纵坡过大的形式表现出来，影响工程质量。因此，应在此处对监测点进行适当加密。

8.3 监测实施

8.3.1 真空度监测

- 1 真空度监测为膜下及排水板中真空度，真空表探头设置在密封膜下或插入排水板芯，并用排水板滤膜包裹真空表探头，防止流泥堵塞。
- 2 监控仪器的数量及布设应满足设计要求，监控仪器应在打设塑料排水板后铺设密

封膜前布设。探头出膜应做好密封措施，以保持真空度。

3 真空度监测频率初期应保持 1 天 1 次，中后期 2~4 天观测 1 次，加固区周围有建筑物和地下管线或采用真空联合堆载预压时 1 天 1 次。

条文说明：

进行排水板中的真空度监测主要是了解真空度竖向传递规律及沿程损失，进而判断下层土体的固结情况。部分工程对吹填流泥中的真空度进行了监测，但工程经验表明，土中真空度影响因素较多，现有真空表、监测方法及分析理论并不完备，数据波动及误差较大。因此在实际工程中，土中真空度监测不是必须的，土体加固效果主要是通过孔压变化规律来体现。

8.3.2 孔压监测

1 地基处理深度范围内每 3m 设置一个孔压计，不足 3m 的土层单独设置一个孔压计，孔压计设置深度需超出地基处理深度 3m。

2 最大孔压应为孔压传感器量程的 0.5~0.7 倍，每个钻孔仅可埋设一支孔压传感器。

3 当进行真空预压处理时，孔压计出膜应做好密封措施，以保持真空度。

4 加载施工期孔压监测频率应保持 1 天 1 次，荷载恒定时监测频率可 3 天 1 次。

条文说明：

孔隙水压变化规律是反应土体加固效果的重要参数。然而工程实例表明，负孔隙水压的监测值往往与理论预测值相差较大。一方面是由于加固过程中的淤堵效应，导致负压衰减速率降低，衰减值减小。另一方面，部分孔压计并不能用于负压监测，且孔压计使用前要充分饱和，该过程往往被施工及监测单位忽略。而孔压计探头中的气体对负压监测值影响很大，导致监测值失真。

8.3.3 分层沉降监测

1 地基处理范围内每 3m 设置 1 个分层沉降监测点，不足 3m 的土层单独设置一个分层沉降监测点，设置深度应满足最大沉降量要求。

2 沉降管与路堤之间应设隔离管，分层沉降管应具有足够的抗压强度。深层沉降监测杆外侧应设套管。

3 联合堆载预压路段，分层沉降管与密封膜连接时应预留分层沉降管与土体之间沉降差需要的密封膜，并将其放在膜上侧分层沉降管的套管内。

4 应定期监测沉降管口高程是否产生下沉，并及时修正测点的沉降量。

5 加载施工期孔压监测频率应保持 1 天 1 次，荷载恒定时监测频率可 3 天 1 次。

8.3.4 表层沉降监测

1 真空处理区沉降板设置在密封膜表层，堆载处理区及路堤段应同时设置在原地基表面积及堆载层表面，同一断面在路中及路肩处设置监测点。

2 沉降板由钢或钢筋混凝土底板、金属测杆和保护套管组成。底板尺寸不小于 50cm

×50cm×3cm，测杆直径以 4cm 为宜，保护套管尺寸以能套住测杆并使标尺能进入套管为宜。随着填土的增高，测杆和套管亦相应接高，每节长度不宜超过 50cm。真空预压时沉降板与密封膜之间应采取保护措施。

3 监测精度应符合二等水准测量精度。

4 地基处理加载期应每天监测 1 次，加载间隔期每 3 天监测 1 次，加载结束后 1 个月内每 3 天监测 1 次，第 2 个月每 7 天监测 1 次，后期每 30 天监测 1 次。

条文说明：

沉降板应放置在吹填流泥层表面或者密封膜表面，而不能放在堆载层中。在实际施工中，尤其是后续有堆载施工的情况下，经常出现测点被破坏而影响数据准确性问题，尤其以沉降板、测斜管最为常见，导致监测数据缺失或失真。因此应注重测点的保护工作，在监测期间必须采取有效措施加以保护或者由专人看管。堆载施工期间避免施工车辆等机械的碰撞和认为损坏。监测点一旦遭受碰损，应立即报告施工及监测单位后复位。

8.3.5 水平位移监测

1 边桩埋置深度以地表以下不小于 1.2m，宜设置在堆载坡脚，边沟外缘及边沟外缘 10m 处，并结合稳定性分析在可能的滑裂面与地面相交处设置监测点。

2 测斜仪，应埋设于地基土体水平位移最大的平面位置，一般堆载边坡处或真空预压外缘 1.0m 左右的位置。需穿过吹填流泥层并埋置进下卧层 1m 以上。

3 边桩观测精度±5mm，测斜仪测量精度±0.02mm/500mm。

4 监测频率与沉降监测频率保持一致。

条文说明：

侧向位移观测有位移边桩和测斜管两种方法，在堆载作用下，土体最大水平位移并不在地表而是地表下一定深度，且一般吹填流泥层较厚，位移边桩难以准确及时的反映出土体的水平变形情况，因此，吹填流泥地基的水平变形监测宜以测斜管为主。

8.4 监测控制指标

8.4.1 地基处理期监测控制指标应满足以下规定：

1 真空预压膜下真空度不应小于 80kPa，真空联合堆载预压膜下真空度不应小于 70kPa。

2 采用排水固结进行地基处理时，一般路堤路段沉降速率不大于 15mm/24h，涵洞通道等衔接段沉降速率不大于 10mm/24h，真空联合堆载预压时，沉降速率不大于 20mm/24h。

3 非排水固结地基处理，沉降速率不大于 10mm/24h，

4 各种地基处理方式的水平位移不大于 5mm/24h。

5 当监测数据出现异常情况时，监测单位应立即通知施工单位停止施工，并采取相应措施。

条文说明:

《建筑地基基础处理技术规范》(JGJ79)规定真空预压时的膜下真空度应稳定保持在 86.7kPa 以上;《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD31)规定膜下真空度不小于 70kPa;《吹填土地基处理技术规范》(GB/T51064)规定真空度不小于 85kPa,当采用密封墙时不小于 80kPa。实测资料显示,射流真空泵出口压力可达到 95kPa,但考虑真空度沿程损失,膜下真空压力一般为 80kPa~90kPa。吹填流泥地基处理大变形特性增加了密封的困难性,根据工程经验,在此将膜下真空压力控制指标定为不小于 80kPa。真空联合堆载施工后,由于堆载材料、变形增大、密封膜老化等影响,膜下真空度会有所下降。控制堆载速率,设置保护层可提高密封效果。在此将堆载后真空压力控制指标定为不小于 70kPa,在设计阶段应按 70kPa 确定预压荷载,计算土体沉降。

8.4.2 排水固结地基处理,要求推算的工后沉降量小于设计容许值,同时满足以下沉降速率标准方可卸载:

- 1 对欠载预压的路段,按连续两个月的月沉降速率不大于 3mm 进行控制;
- 2 对等载预压的路段,按连续两个月的月沉降速率桥头不大于 3mm、一般路段不大于 5mm 进行控制;
- 3 对超载预压的路段,当有效应力面积比不大于 0.75 并且预压期超过 6 个月以上时,按连续两个月的月沉降速率不大于 7mm 进行控制。有效应力面积比为 0.75~1.0 时,按连续两个月的月沉降速率桥头不大于 5mm、一般路段不大于 7mm 进行控制。有效应力面积比超过 1.0 时,按连续两个月的月沉降速率桥头不大于 3mm、一般路段不大于 5mm 进行控制。

8.5 监测成果编制

8.5.1 监测单位应定期编制监测报告,阶段报告及总报告,根据工程需要,应包括以下内容:

- 1 变形监测成果统计表;
- 2 水平位移量曲线图;等沉降曲线图;
- 3 有关荷载、孔压、时间;
- 4 其他影响因素的相关曲线图。

8.5.2 所有监测数据应及时记录、随时计算、校核、汇总并整理分析,以便全面了解土体变化情况并做出判断,若发现异常情况应及时复查。对于较大规模的或重要的项目,宜包括下列内容:

- 1 观测成果的可靠性;
- 2 监测体的累计变形量和两相邻观测周期的相对变形量分析;
- 3 相关影响因素(荷载、应力应变、气象和地质等)的作用分析;

4 回归分析。

8.5.3 根据观测成果,计算土体变化情况,并反分析设计计算参数,及时对荷载大小、加载速率、加载时间、卸载标准等方面进行动态调整。

征求意见稿

9 施工质量检测

9.1 一般规定

9.1.4 施工检测包括施工过程质量检测与竣工验收。

9.1.5 检测内容、数量及标准根据公路等级、地基处理方案及工程规模等综合确定。

9.2 施工过程检测

9.2.1 预压法

1 对塑料排水带应进行纵向通水量、复合体抗拉强度、滤膜抗拉强度、滤膜渗透系数和等效孔径等性能指标现场随机抽样测试；

2 对不同来源的砂井和砂垫层砂料，应取样进行颗粒分析和渗透性试验；

3 应清点竖向排水体数量，偏差不得大于±1%。应随机选择 5%的竖向排水体检查间距和直径。

4 宜随机选择 2%的竖向排水体采用冲水拔袋法检测塑料排水板打设深度，深度检测应由施工单位自检、监理单位抽检，有条件时委托具有相关资质的第三方检测单位抽检，检测频率和检验标准应符合相关规范的要求。

5 预压地基施工过程质量检验标准应符合表 9.2.1 的规定

表 9.2.1 预压地基质量检验标准

序	检查项目	允许值或 允许偏差		检查方法
		单位	数值	
1	预压荷载（真空度）	%	≥-2	高度测量（压力表）
2	固结度	%	≥-2	原位测试（与设计要求比）
3	沉降速率	%	±10	水准测量（与控制值比）
4	水平位移	%	±10	用测斜仪、全站仪测量
5	竖向排水位置	mm	≤100	用钢尺量

续表 9.2.1 预压地基质量检验标准

序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
		单位	数值	
6	竖向排水体插入深度	mm	+2000	经纬仪测量
7	插入塑料排水带时的回带长度	mm	≤500	用钢尺量
8	竖向排水体高出砂垫层距离	mm	≥100	用钢尺量
9	插入塑料排水带的回带根数	%	<5	统计
10	砂垫层材料的含泥量	%	≤5	水洗法

9.2.2 水泥搅拌桩法

1 施工前应检查水泥及外掺剂的质量、桩位、搅拌机工作性能，并应对各种计量设备进行检定或校准。

2 施工中应检查机头提升速度、水泥浆或水泥注入量、搅拌桩的长度及标高。

3 施工结束后，应检验桩体的强度和直径，以及单桩和复合地基的承载力。

4 水泥土搅拌桩地基质量检验标准应符合表 9.2.2 的规定。

表 9.2.2 水泥土搅拌桩地基质量检验标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计值		静载试验
	2	单桩承载力	不小于设计值		静载试验
	3	水泥用量	不小于设计值		查看流量表
	4	搅拌叶回转直径	mm	±20	用钢尺量
	5	桩长	不小于设计值		测钻杆长度
	6	桩身强度	不小于设计值		28d 试块强度或钻芯法

续表 9.2.2 水泥土搅拌桩地基质量检验标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
一般项目	1	水胶比	设计值		实际用水量与水泥等胶凝材料的重量比
	2	提升速度	设计值		测机头上升距离及时间
	3	下沉速度	设计值		测机头下沉距离及时间
	4	桩位	条基边桩沿轴线	$\leq 1/4D$	全站仪或用钢尺量
			垂直轴线	$\leq 1/6D$	
			其他情况	$\leq 2/5D$	
	5	桩顶标高	mm	± 200	水准测量,最上部 500mm 浮浆层及劣质桩体不计入
	6	导向架垂直度	$\leq 1/150$		经纬仪测量
	7	褥垫层夯填度	≤ 0.9		水准测量

9.2.3 桩网复合地基中桩、桩帽和加筋网的施工过程中,应随时检查施工记录,并应对照规定的施工工艺逐项进行质量评定。

9.3 竣工验收

9.3.1 预压法

1 预压法地基处理质量检验应表 9.3.1 的规定:

表 9.3.1 预压法地基处理质量检验

序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
		单位	数值	
1	固结度	不小于设计值		实测沉降计算
2	地基承载力	不小于设计值		静载试验
3	处理后地基土的强度	不小于设计值		原位测试
4	变形指标	设计值		原位测试

2 排水竖井处理深度范围内和竖井底面以下受压土层,经预压所完成的竖向变形和平均固结度应满足设计要求,固结度应由实测沉降值及预期总沉降值计算得到,并以孔压消散曲线得到的固结度作为参考,实测沉降值应选取沉降曲线中后段计算。

3 物理力学指标,应进行原位十字板剪切试验和室内土工试验,检测应在卸载 3~5d 后进行。检测点平面布置应根据工程实际确定。对于大面积一次地基处理,检测点一般 3000m²~5000m² 一点,对于路堤范围内的二次地基处理,检测点一般 100m~200m 一点,衔接段适当加密。

4 应采用载荷试验确定地基承载力,地质条件均匀,处理方式一致的情况下 20000m²~30000m² 一点,对于地质条件变化较大,处理方式有所变化的情况,应每个处理分区设置一点。

条文说明:

吹填流泥一次地基处理的最终沉降 (S_{∞}) 应按照第 5 章相关规定进行,地基的应变固结度可按下式进行计算:

$$u_{\varepsilon} = \frac{S_t}{S_{\infty}} \times 100\% \quad (9.3.1-1)$$

式中: S_t —— t 时间地基的总应变固结度;

u_{ε} —— t 时间地基的总沉降量 (m)。

二次地基处理的最终沉降 (S_{∞}) 还可以根据变形-时间曲线,按照下列公式进行计算:

$$S_{\infty} = \frac{S_{t_3}(S_{t_2} - S_{t_1}) - S_{t_2}(S_{t_3} - S_{t_1})}{(S_{t_2} - S_{t_1}) - (S_{t_3} - S_{t_2})} \times 100\% \quad (9.3.1-2)$$

式中: S_{t_1} 、 S_{t_2} 、 S_{t_3} ——时间 t_1 、 t_2 、 t_3 地基沉降量,并取 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ 。

根据实测孔压曲线,地基的平均应力固结度可按下式进行计算:

$$u_p = \frac{\Delta u}{\Delta p + u_0} \times 100\% \quad (9.3.1-3)$$

式中: u_p —— t 时间地基的总应力固结度;

Δu ——预压过程中的孔压累计消散量 (kPa);

Δp ——预压荷载 (kPa);

u_0 ——地基处理前初始孔压 (kPa)。

工程实例表明,由于淤堵以及监测方法的原因,真空预压下的孔压监测数据与理论预测值相差较大,采用孔压计算的地基平均应力固结度往往远小于地基应变固结度。因此实际真空及真空联合堆载地基处理工程中,应采用应变固结度作为控制指标,以应力固结度作为参考。

9.3.2 水泥搅拌桩法

1 水泥搅拌桩复合地基质量检测应符合表 9.3.2 的规定:

表 9.3.2 水泥搅拌桩质量检测

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	桩距 (mm)	±100	尺量：抽查 2%且不少于 5 点
2	桩径 (mm)	不小于设计值	尺量：抽查 2%且不少于 5 点
3 Δ	桩长 (m)	不小于设计值	查施工记录并结合 0.2%成桩取芯检查
4	单桩每延米喷粉 (浆) 量	不小于设计值	查施工记录
5 Δ	强度 (MPa)	不小于设计值	取芯法：抽查桩数的 0.5%，且不少于 3 组
6	单桩承载力	满足设计要求	抽查桩数的 0.2%且不少于 3 处
7	地基承载力	满足设计要求	载荷试验，每 20000 平方一点

2 成桩 3d 内，采用轻型动力触探 (N_{10}) 检查上部桩身的均匀性，检验数量为施工总桩数的 1%，且不少于 3 根。成桩 7d 后，采用浅部开挖桩头进行检查，开挖深度宜超过停浆 (灰) 面下 0.5m，检查搅拌的均匀性，测量成桩直径，检查数量应不少于总桩数的 5%。

3 单桩承载力，载荷试验必须在桩身强度满足试验荷载条件时，并宜在成桩 28 天后进行，检验数量为桩总数的 0.5%~1%，并应不少于三根。

4 复合地基承载力，由载荷试验确定，在成桩 28 天后进行，大面积地基处理每 20000 平方一点，每地基处理区，过渡段处理区，桥头涵洞区各一点。

9.3.3 桩网复合地基

1 桩的质量检验应符合下列规定：

- 1) 就地灌注桩应在成桩 28d 后进行质量检验，预制桩宜在施工 7d 后检验；
- 2) 应挖出所有桩头检验桩数，并应随机选取 5%的桩检验桩位、桩距和桩径；
- 3) 应随机选取总桩数的 10%进行低应变试验，并应检验桩体完整性和桩长；
- 4) 应随机选取总桩数的 0.2%，且每个单体工程不应少于 3 根桩进行静载试验；
- 5) 对灌注桩的质量存疑时，应进行抽芯检验，并应检查完整性、桩长和混凝土的强度。

2 桩的质量标准应符合下列规定：

- 1) 桩位和桩距的允许偏差为 50mm，桩径允许偏差为 ±5%；
- 2) 低应变检测 II 类或好于 II 类桩应超过被检验数的 70%；
- 3) 桩长的允许偏差为 ±200mm；
- 4) 静载试验单桩竖向抗压承载力极限值不应小于设计单桩竖向抗压承载力特征值的 2 倍；
- 5) 抽芯试验的抗压强度不应小于设计混凝土强度的 70%。

3 加筋体的检测与检验应包括下 9 列内容：

- 1) 各向抗拉强度，以及与抗拉强度设计值对应的材料应变率；
- 2) 材料的单位面积重量、幅宽、厚度、孔径尺寸等；
- 3) 抗老化性能；
- 4) 对于不了解性能的新材料，应测试在拉力等于 70%设计抗拉强度条件下的蠕变性能

征求意见稿