

# 团 体 标 准

T/SDHTS XXXXX-202X

## 黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基技术规范

Technical specifications of variable section cement slurry deep mixing pile composite foundation in the Yellow River flooding area

(征求意见稿)

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。

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

山东公路学会 发布

# 目 次

- 前 言..... II
- 1 范围..... 1
- 2 规范性引用文件..... 1
- 3 术语和定义..... 1
- 4 基本规定..... 1
- 5 设计..... 2
  - 5.1 一般规定..... 2
  - 5.2 材料..... 3
  - 5.3 结构..... 3
- 6 施工..... 5
  - 6.1 一般规定..... 5
  - 6.2 施工机具..... 5
  - 6.3 成桩试验..... 5
  - 6.4 施工工艺与技术要求..... 6
- 7 质量检测和验收..... 7
  - 7.1 施工质量要求..... 7
  - 7.2 施工质量检测和验收..... 7

## 前 言

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

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。

本文件由山东大学提出。

本文件由山东公路学会归口。

本文件起草单位：山东大学、齐鲁高速公路股份有限公司、山东高速集团有限公司创新研究院、高德公路建设（德州）有限公司、济南启通项目运营管理有限公司。

本文件主要起草人：姚占勇、侯拥军、董俊杰、毕玉峰、姚凯、张伟、辛公锋、张钰赫、许宪锦、王小华、杨耀辉、雷涛、齐迪、江大海、刘率、许超、李超、郑义、曹培培、王书斌、尚洪涛、董兴鹏、荣玉、李霖。

# 黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基技术规范

## 1 范围

本文件规定了黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基的设计、施工、质量检测和验收的基本要求。

本文件适用于黄泛区公路新建、改（扩）建工程变截面水泥浆喷桩复合地基的设计与施工。

## 2 规范性引用文件

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

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB/T 50783 复合地基技术规范
- JGJ 79 建筑地基处理技术规范
- JGJ/T 233 水泥土配合比设计规程
- JTG C20 公路工程地质勘察规范
- JTG D30 公路路基设计规范
- JTG/T D31-02 公路软土地基路堤设计与施工技术细则
- JTG/T L11 高速公路改扩建设计细则
- JTG/T 3610 公路路基施工技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**浆喷桩** cement slurry deep mixing pile

用具有钻进、回转、喷浆与搅拌功能的机械，通过喷射水泥浆切割土体，与地基土强制拌和形成的、具有一定深度和强度的竖向增强桩体。

### 3.2

**变截面浆喷桩 variable section cement slurry deep mixing pile**

通过调控喷浆压力、喷浆量、提升速度及回转搅拌参数等，形成上部桩体直径扩大的浆喷桩。

注 1：变截面浆喷桩由上部扩大桩体和下部桩体组成。

注 2：根据上部桩体结构，分为变截面实体桩和变截面筒桩。

3.3

**变截面浆喷桩上部扩大桩体 upper enlarged pile section of the variable section cement slurry deep mixing pile**

变截面浆喷桩上部扩大直径的桩段。

注：简称“上部扩大桩体”。

3.4

**变截面实体桩 variable section solid cement slurry deep mixing pile**

上部扩大桩体段筒壁与筒芯均为水泥土的变截面浆喷桩。

3.5

**变截面筒桩 variable section tubular cement slurry deep mixing pile**

上部扩大桩体段筒壁为水泥土、筒芯为土体的筒状结构变截面浆喷桩。

## 4 基本规定

- 4.1 黄泛区变截面浆喷桩复合地基设计前，应按照 JTG C20 的相关规定，查明沿线水文、地质情况，以及拟处理地基土层的物理力学性能。
- 4.2 变截面浆喷桩适用于黄泛区的粉土、粉砂、粉质黏土（硬塑、可塑、软塑）、黏土（可塑、软塑），以及素填土、杂填土等土层。有机质含量大于 10%，以及含较大孤石或障碍物较多且不易清除的地基，不宜采用变截面浆喷桩复合地基处理方法。
- 4.3 黄泛区变截面浆喷桩宜采用智慧施工控制系统对施工工艺、技术参数及施工质量等进行监控施工。

## 5 设计

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 变截面浆喷桩复合地基应根据沿线地质条件、工程类别等合理划分设计段落。
- 5.1.2 黄泛区路堤的稳定性验算与沉降计算应按照工程地质条件分段，并按分层地基进行。各设计路段的地基参数应依据勘探孔勘测结果确定。

5.1.3 路堤稳定性和工后沉降应满足 JTG D30 的要求，其中高速公路改扩建的桥头路基工后沉降应满足 JTG/T L11 的要求。

5.1.4 变截面浆喷桩的设计除应符合本文件的规定外，尚应符合 GB 50007、GB/T 50783、JTG/T D31-02 的有关规定。

## 5.2 材料设计

5.2.1 水泥掺量应结合设计要求，通过配合比试验确定。

5.2.2 水泥土配合比设计应符合 JGJ/T 233 的规定。

5.2.3 变截面浆喷桩宜采用 42.5 级的普通硅酸盐水泥。采用提钻喷浆工艺时，水泥掺入比及掺入量应符合表 1 要求；水泥浆液设计水灰比宜为 0.8~1.2，密度宜为 1400 kg/m<sup>3</sup>~1650 kg/m<sup>3</sup>。当掺加外加剂、掺合料时，掺入量应根据材料设计要求通过室内和现场试验确定。

表 1 变截面浆喷桩的水泥掺入建议值

桩型	变截面实体桩		变截面筒桩	
	上部扩大桩体	下部桩体	上部扩大桩体	下部桩体
水泥掺入比 (%)	18~20	12~19	8~12	12~19
水泥掺入量 (kg/m)	190~200	50~75	90~120	50~75

5.2.4 配合比试验用土的采样位置不应少于 3 处。

5.2.5 不同变截面浆喷桩的 28 d 无侧限抗压强度应符合表 2 的要求。

表 2 变截面浆喷桩的 28 d 无侧限抗压强度要求

单位为兆帕

桩型	变截面实体桩			变截面筒桩		
	筒壁	筒芯	下部桩体	筒壁	筒芯	下部桩体
28 d 无侧限抗压强度	≥4.0	≥3.0	≥1.5	≥3.0	—	≥1.5

## 5.3 结构设计

5.3.1 变截面浆喷桩的桩径、筒壁厚度等结构参数应在现场试验的基础上确定，初步设计时可参照表 3 确定。

表 3 变截面浆喷桩结构参数

单位为厘米

桩型	变截面实体桩			变截面筒桩		
	上部扩大桩	筒壁厚	下部桩径	上部扩大桩	筒壁厚	下部桩径

	体桩径			体桩径		
黏土、粉质黏土地层	80	15	50	75	12.5	50
粉(砂)土地层	90	20	50	85	17.5	50

5.3.2 变截面筒桩上部扩大桩体应进行封顶和封底，封顶高度宜为 100 cm，封底高度宜为 50 cm，上部扩大桩体的总长度宜为 2 m~6 m。

5.3.3 变截面浆喷桩复合地基承载力特征值，应通过现场复合地基载荷试验确定，初步设计时可按式(1)估算：

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_a^k}{A_{p1}} + \beta(1 - m_1)f_{sk} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$f_{spk}$ —复合地基承载力特征值，单位为千帕(kPa)；

$R_a^k$ —单桩承载力特征值，单位为千牛(kN)；

$A_{p1}$ —上部扩大桩体部分截面积，单位为平方米(m<sup>2</sup>)；

$\beta$ —桩间土承载力折减系数，宜按当地经验取值，如无经验时可取 0.75~1.0；

$m_1$ —面积置换率，采用时按照式(2)计算；

$f_{sk}$ —处理后桩间土承载力特征值，单位为千帕(kPa)，宜按当地经验取值，如无经验时可取天然地基承载力特征值。

面积置换率按式(2)计算：

$$m_1 = \frac{D^2}{d_e^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$D$ —上部扩大桩体直径，单位为米(m)；

$d_e$ —一根桩分担的处理地基面积的等效直径(m)

桩采用等边三角形、正方形、矩形的不同布置形式时， $d_e$ 分别按照式(3)~(5)计算：

$$d_e = 1.05S \dots\dots\dots (3)$$

$$d_e = 1.13S \dots\dots\dots (4)$$

$$d_e = 1.13\sqrt{S_1 * S_2} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$S$ —为桩间距，单位为米(m)；

$S_1$ —纵向间距，单位为米(m)；

$S_2$ —横向间距，单位为米(m)。

5.3.4 变截面浆喷桩顶部宜设置厚度 20 cm~40 cm 的褥垫层。

5.3.5 路堤稳定性验算、沉降计算及竖向承载力计算应符合JTG/T D31-02的规定。

## 6 施工

### 6.1 一般规定

6.1.1 变截面浆喷桩施工前应选择典型场地进行成桩现场试验或试验性施工，以验证地基处理效果，优化相关设计、施工技术参数和施工工艺。试验桩数宜不少于 5 根。

6.1.2 施工场地应平整、坚实，水、电应设置专用管路和线路。

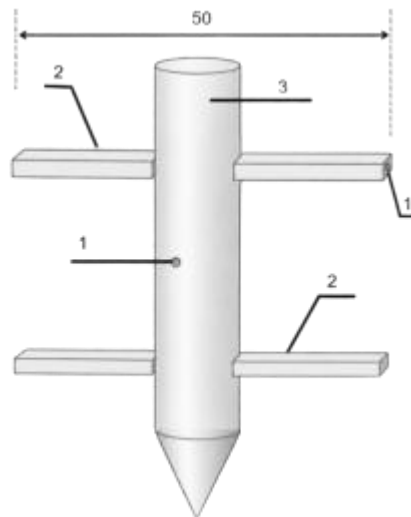
6.1.3 冬期地基暂时不施工时，应铺填一定厚度的虚土防冻或采取其他覆盖保护措施。

6.1.4 施工的其他要求应符合 GB/T 50783 和 JTG/T D31-02 的相关规定。

### 6.2 施工机具

6.2.1 变截面浆喷桩钻头宜垂直交叉设置直径为 50 cm 的上、下 2 层搅拌叶片，并在钻头上、下两层搅拌叶片之间的钻杆前后对称设置 2 个高压喷嘴，在钻头的上层搅拌叶片两端的端部对称设置 2 个高压喷嘴。高压喷嘴的直径宜为 2 mm~4 mm。

单位为厘米



标引序号说明：

1——高压喷嘴

2——搅拌叶片

3——钻杆

图 1 变截面浆喷桩钻头结构示意图

6.2.2 变截面浆喷桩施工应配备 2 台额定压力不小于 30 MPa、流量为 50 L/min~100 L/min 的高压泥浆泵，分别为钻杆和搅拌叶片的喷嘴供应浆液。

6.2.3 应配置与浆液压力匹配的输送浆液管路，管路长度不宜大于 50 m。施工时的喷浆压力应考虑管路损失。

6.2.4 水泥泵入管路的接口应设置 3 层以上的滤网，滤网目数宜为 15~20 目。

### 6.3 成桩试验

6.3.1 应根据设计要求和室内配合比试验确定成桩试验方案，选择典型地层路段开展成桩试验。

6.3.2 成桩试验应完成试验报告，并根据试验情况确定以下主要内容：

——水泥掺入比；

——施工设备；

——根据下钻和提钻情况核查的地层条件和优化的技术方案；

——施工技术参数和施工工艺，包括但不限于下钻速度、提钻速度、搅拌速度、喷浆压力、单位时间喷浆量；

——桩体水泥土的无侧限抗压强度是否满足设计要求；

——单桩承载力、复合地基承载力是否满足设计要求。

6.3.3 当成桩质量不满足设计要求时，应在调整相关参数或工艺后，重新进行试验。

#### 6.4 施工工艺与技术要求

6.4.1 水泥浆的制备与存储符合以下要求：

——使用高速搅拌机制备水泥浆液搅拌时间应不少于 60 s，使用普通搅拌机搅拌时间应不少于 180 s；

——浆液发生离析时应补充搅拌；

——水泥浆存放时浆体温度宜控制在 5℃~40℃之间，高温季节应采取防热和防晒措施，气温超过 20℃时存放不宜超过 3 h，气温在 20℃以下浆液存放不宜超过 4 h；

——冬期施工应采取加热保温措施。

6.4.2 变截面浆喷桩的施工应针对不同土层条件采用不同的喷浆压力，黏土、粉质黏土以及粉（砂）土地层宜分别采用 20 MPa、15 MPa 和 5 MPa 的喷浆压力。

6.4.3 变截面实体桩施工应符合以下工艺与要求：

a) 驱动喷搅钻头沉入土层，启动高压泥浆泵向喷嘴供应水泥浆，4 个喷嘴均维持 1 MPa~3 MPa 低浆压至设计加固深度；

b) 将钻杆处喷嘴调整至设计浆压，搅拌叶片末端喷嘴维持低浆压，持续喷浆搅拌 30 s 后，开始以 70 cm/min~80 cm/min 的提钻速度，边喷浆搅拌、边提升钻杆；

c) 提升至设计上部扩大桩体底部深度以下 50 cm 时，打开搅拌叶片端部 2 个喷嘴调整至设计浆压，并降低提钻速度至 20 cm/min 后继续边喷浆搅拌、边低速提升；

d) 提升至设计桩顶高程以上 50 cm，关闭泥浆泵。

6.4.4 变截面筒桩施工应符合以下工艺与要求：

- a) 驱动喷搅钻头沉入土层，启动高压泥浆泵向喷嘴供应水泥浆，4个喷嘴均维持1 MPa~3 MPa低浆压至设计加固深度；
- b) 将钻杆处喷嘴调整至设计浆压，搅拌叶片末端喷嘴维持低浆压，持续喷浆搅拌30 s后，开始以70 cm/min~80 cm/min的提钻速度，边喷浆搅拌、边提升；
- c) 提升至设计上部扩大桩体底部深度以下50 cm时，搅拌叶片端部2个喷嘴调整至设计浆压，并降低提钻速度至20 cm/min后继续边喷浆搅拌、边低速提升，开始封底施工；
- d) 提升至设计上部扩大桩体底部深度以上50 cm时，将钻杆处喷嘴调整至1 MPa~3 MPa低浆压，提钻速度调整至40 cm/min后，继续边喷浆搅拌、边低速提升；
- e) 提升至桩顶高程以下100 cm时，将4个喷嘴均调整至设计浆压，并降低提钻速度至20 cm/min后边喷浆搅拌、边低速提升，进行封顶施工；
- f) 提升至设计桩顶高程以上50 cm，关闭泥浆泵。

6.4.5 变截面浆喷桩施工喷浆提钻速度与浆压应符合表4的要求。

表4 变截面浆喷桩喷浆提钻速度与浆压技术要求

参数	变截面实体桩		变截面筒桩		
	上部扩大桩体	下部桩体	上部扩大桩体		下部桩体
			封顶/封底	筒	
提钻速度/(cm/min)	20	70~80	20	40	70~80
搅拌叶片浆压(MPa)	设计值	1~3	设计值	设计值	1~3
钻杆浆压(MPa)	设计值	设计值	设计值	1~3	设计值

6.4.6 施工钻进前应进行试压，确保水泥浆喷射正常。

6.4.7 施工中浆液泵送浆应连续进行，如出现压力突降或骤增、孔口冒浆异常等情况时，应查明原因，排除故障或调整参数后方可继续施工。

6.4.8 喷搅过程中因故中断喷浆，搅拌头应下沉至停浆面50 cm以下，恢复施工时复喷搭接，搭接施工间隔时间不宜超过12 h。

6.4.9 连续施工4 h或停机超过2 h，宜接入清水清洗管路后继续施工。

6.4.10 施工完成后的变截面浆喷桩，当桩顶处于地表时，应采取交通管制措施，防止施工设备或车辆碾压。

6.4.11 路基填筑或小型构造物施工时，应将设计桩顶高程以上质量较差的桩段人工清除，清除时应采取措施防止损伤桩顶。

## 7 质量检测和验收

### 7.1 施工质量要求

7.1.1 原材料应按有关规定进行检验和复测，质量合格后方可使用。水泥、外掺剂、用水应符合设计要求。

7.1.2 应随时检测原材料用量，水泥浆材料配制称量误差应控制在 $\pm 1\%$ 以内。

7.1.3 应及时检测设备状况，设备检测应满足表 5 的要求。

表 5 设备检测要求

检测指标	允许偏差	检查频次	检查方法
搅拌叶片直径	$\pm 3\%$	每单元工程检测 1 次	提钻钢尺测量
喷嘴直径	+1 mm		提钻游标卡尺测量

7.1.4 应实时监测施工工艺参数和浆液流量，以及桩距、桩身垂直度等指标，并满足表 6 的要求。

表 6 施工监测要求

监测指标	允许偏差	检查频次	监测方法
钻杆回转	$\pm 5\%$	实时监测	转速表监测
提钻速度			编码器监测或实测
浆压			压力表监测
浆液流量			流量计监测
垂直偏差	无搭接要求时 $\pm 1\%$ 有搭接要求时 $\pm 0.5\%$		经纬仪测量
桩位偏差	无搭接要求时 $\pm 50\text{ mm}$ 有搭接要求时 $\pm 20\text{ mm}$		钢尺测量

### 7.2 施工质量检测和验收

7.2.1 变截面浆喷桩应在成桩 28 d 后钻芯取样，变截面实体桩和变截面筒桩应于桩中心位置处取芯。

7.2.2 芯样的 28 d 无侧限抗压强度应满足设计要求并符合表 2 的规定。

7.2.3 变截面浆喷桩施工质量检测和验收的其他要求应符合 JTG/T D31-02 的规定。

7.2.4 对于质量检验不合格的桩，应在其所处的加固区域进行补桩，补桩后应再次进行质量检验。

# 黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基技术规范

## 编制说明

### 一、工作简况

#### （一）任务来源

根据山东公路学会《山东公路学会关于公布《黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基技术规范》等3项标准立项审查结果的通知》（鲁公学会（2025）27号），《黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基技术规范》为团体标准制定项目，立项编号：2025-12。

#### （二）任务分工

##### 1.本文件主要起草单位

山东大学、齐鲁高速公路股份有限公司、山东高速集团有限公司创新研究院、高德公路建设（德州）有限公司、济南启通项目运营管理有限公司。

##### 2.本文件主要起草人

姚占勇 侯拥军 董俊杰 毕玉峰 姚凯 张伟 辛公锋 张钰赫 许宪锦 王小华 杨耀辉 雷涛 齐迪 江大海 刘率 许超 李超 郑义 曹培培 王书斌 尚洪涛 董兴鹏 荣玉 李霖。

##### 3.任务分工

山东大学主要负责标准的编制进度把关、编制单位和任务协调、标准文本和编制说明的起草，以及标准修改完善等工作；齐鲁高速股份有限公司负责标准的立项需求调研，参与编制方案制定、施工质量验收的起草、意见征求与处理等工作；山东高速集团有限公司创新研究院主要协助相关技术资料收集，负责相关验证工程的实施，参与设计章节的起草工作；高德公路建设（德州）有限公司、济南启通项目运营管理有限公司协助相关资料收集、施工以及质量检验与验收等章节的编写工作。

其中姚占勇担任标准起草组组长，全面组织协调标准的编制工作；侯拥军担任标准起草技术负责人，组织制定标准编写方案，负责关键技术条款编写，对标准技术内容进行总体把关；董俊杰、张伟、许宪锦、王小华、雷涛、齐迪、江大海等负责标准的立项需求调研、编制单位组织协调、工程验证；刘率、

许超、李超等参与施工质量检验验收章节的编写工作；毕玉峰、辛公锋、杨耀辉等参与技术资料收集、相关技术验证工程实施，以及设计章节的起草工作；姚凯、张钰赫、荣玉、李霖等负责标准文本和编制说明的起草、标准修改完善，并协助整理标准文档技术归档，参与办理征求意见、研讨会、审查会等工作；郑义、曹培培、王书斌、尚洪涛、董兴鹏等负责施工以及质量检验与验收等章节的编写，并协助工程资料的收集整理工作。

### （三）制定背景

黄泛平原区约占山东省总面积的 1/3、平原区面积的 62%，广泛分布于鲁西北、鲁西南等区域，区域内公路工程建设规模巨大。黄泛区由于地基软弱，路基的工后沉降问题突出，地基加固成为平原区公路建设的重要工程内容。目前，公路地基加固主要工程技术有浆喷桩、强夯、冲击碾压等，其中，浆喷桩加固技术因其扰动小、施工迅速、造价较低、地基加固深度大等突出优点，被广泛用于公路地基加固工程，大部分黄泛区高速公路浆喷桩用量均达到百万延米以上。

近年来，黄泛区浆喷桩地基加固工程中普遍存在浆喷桩的成桩质量差、承载力严重不足等严重质量缺陷，且施工过程中常伴随严重的“冒浆”现象。为解决这一工程质量问题，预应力混凝土管桩近年来大量应用，尽管技术可靠，但工程费用大幅攀升，在目前交通企业降本增效的背景下，工程建设压力越来越大。

依托济南绕城西线高速公路建设工程，编制单位针对黄泛区粉土、粉质黏土、黏土等典型地层，系统开展了浆液扩散规律与成桩质量现场试验，重点研究不同喷浆压力条件下浆液扩散范围、桩体剖面形态及成桩均匀性的变化规律。研究表明，黄泛区土体具有固结度高、结构性强、土层偏硬等特点，传统低压浆喷工艺下浆液难以有效切割和扰动周围土体，易在钻杆附近聚积并沿孔道上返，造成严重冒浆、上部夹泥夹块、下部无浆可搅甚至不成桩等突出质量问题。

在此基础上，编制单位揭示了黄泛区传统浆喷桩的成桩失效机理，明确了低浆压条件下浆液扩散不足、搅拌范围内无浆可搅是造成成桩质量缺陷的关键原因，并据此提出了黄泛区不同土层分级喷浆压力优化方法。通过现场试验，确定了适用于粉土、粉质黏土和黏土地层的差异化喷浆压力区间，初步解决了传统工艺下浆液扩散受限、桩体不均匀、深部失效等问题，为黄泛区浆喷桩施工质量提升奠定了基础。

在解决成桩质量问题后，编制单位进一步将研究重点转向浆喷桩承载机制与桩型优化。结合数值模拟分析和 G35 济广高速公路改扩建工程现场试验，系统研究了浆喷桩在竖向荷载作用下的承载特性、桩身轴力传递规律及侧摩阻分布特征。研究表明，传统圆柱形浆喷桩作为摩擦桩，其桩身轴力呈现自上而下逐渐衰减的典型规律，且桩身上部侧摩阻力显著大于下部，说明上部桩体是承载发挥的关键部位。

传统等直径桩型未能充分匹配这一受力特征，存在下部材料利用不足、整体承载效率不高等问题，亟需通过优化桩体截面分布来进一步发挥浆喷桩的承载力。

针对上述承载特性，编制单位提出了在搅拌叶片端部加设一对喷嘴的变截面成桩新技术。开启搅拌叶片端部喷嘴时，浆液向外高压喷射形成大直径加固体，进一步通过喷嘴启闭控制与施工参数协同优化，实现桩体不同深度下横截面积的调控，最终研发出变截面水泥浆喷桩新型地基加固技术。该技术不仅能够更充分发挥桩体上部承载作用，而且可有效避免材料浪费、降低工程成本，为黄泛区复杂地层地基处理工程难题提供了新的技术方案。

变截面水泥浆喷桩在济菏高速拓宽改建工程、济南至宁津高速公路工程等工程中成功应用，工程经验已趋成熟。试验和工程应用表明，变截面水泥浆喷桩复合地基技术成桩质量优良，工程可靠，较预应力混凝土管桩加固技术相比具有很大的经济优势，推广应用前景广阔。

目前，浆喷桩地基加固主要依据我国《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79、《复合地基技术规范》GB/T 50783、《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02，而依据上述标准实施的黄泛区浆喷桩工程中一部分桩存在严重的工程缺陷，无法有效指导黄泛区浆喷桩地基加固工程。而对于变截面桩型，目前我国已有《变截面双向搅拌桩技术规程》T/CECS 822，但该标准采用双向搅拌技术，与本标准提出的基于喷射位置和喷射浆压改进的变截面成桩技术有本质的区别，且对于黄泛区典型的高黏性、高塑性和硬度较高的地基土适用性较差，未实现理想的水泥浆混掺，成桩质量改善不大，易出现搅拌叶片被土体包裹粘结、钻进困难，叶片在黏土中展开往往导致电流过大，烧坏电机，未能从根本上解决黄泛区浆喷桩成桩质量问题。

本文件基于工程经济、技术可靠的变截面水泥浆喷桩复合地基技术，结合黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基的工程应用经验，提出变截面水泥浆喷桩的设计、施工、质量控制与验收标准，为规范黄泛区公路工程变截面浆喷桩工程应用提供支撑，对提升浆喷桩成桩质量、完善复合地基加固技术体系、推动公路工程高质量建设具有重要意义。

#### （四）起草过程

##### 1. 立项阶段

2024年12月，成立标准起草工作组，起草组讨论了工作进度安排、任务分工及标准编写的初步思路，正式启动标准制定工作，提出了标准草稿提纲。起草组结合现阶段主管部门的发文、要求以及试点实践等进行了深入分析和研究，完成已有标准、文献资料的收集、分析和总结。

基于国内资料调研和相关研究报告分析，制定了标准编写大纲，形成本文件编写方案。

2025年1月至2025年6月，对山东省沾临高速公路、济高高速公路、济南绕城西线公路等在建高速公路浆喷桩复合地基工程进行了广泛调研；对济菏高速公路改扩建地基浆喷桩加固工程成桩质量、承载力、沉降控制效果等进行了深入分析；对省内乃至全国高速公路浆喷桩复合地基工程规模、地基加固工程技术现状进行了全面分析，掌握了浆喷桩复合地基加固工程需求、应用场景、关键技术问题等，为文件草案的撰写奠定了必要基础。

2025年7月完成标准立项，起草组基于“基于材料结构设计一体化的变截面浆喷复合桩工程技术研究”、“钻搅喷一体桩复合地基关键技术研究”、“绿色高效水泥搅拌桩研究”研究成果，结合国内高速公路浆喷桩复合地基加固、公路浆喷桩复合地基加固相关国家、行业、地方标准及其工程应用调研分析，开始本文件的编写工作。起草组经多次讨论、调研、专家意见征集等形式，于2026年3月完成标准初稿的编写工作。

2. 初稿审查
3. 征求意见
4. 送审稿审查
5. 报批、发布

## 二、标准编制原则、主要内容及其确定依据（修订标准时，还包括修订前后技术内容的对比）

### （一）标准编制原则

本文件的编制充分考虑我国、特别是山东省黄泛区公路浆喷桩复合地基加固工程特点、技术水平，充分体现技术进步和我国公路建设工程趋势，有效推动行业技术水平的提高。本文件依据 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》的要求进行编制。

本文件规定了黄泛区公路变截面浆喷桩复合地基加固设计、施工、质量检测与验收的技术要求。标准的编制主要遵循下述基本原则。

（1）协调性原则。充分做好相关标准、资料的调研和分析，做好与相关标准、规范的协调和衔接。其中变截面浆喷桩的水泥浆液材料标准按照 GB175《通用硅酸盐水泥》中硅酸盐水泥的强度等级、技术要求等指标进行控制；变截面浆喷桩复合地基的设计、施工、质量控制与验收等与 GB50007《建筑地基基础设计规范》、GB/T 50783《复合地基技术规范》、JGJ 79《建筑地基处理技术规范》、JTG 3363《公路桥涵地基与基础设计规范》、JTG/T D31-02《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》等相协调。

（2）可操作性原则。标准条文明晰、规范，设计方法简便，技术指标明确、便于工程中获取，工

程施工、检测可操作性强。

(3) 成熟性原则。标准经充分论证和试验验证，具体内容依据充分，理论正确，验证可信，技术成熟、可靠。

(4) 指标合理性原则。标准中的技术指标具有明确的适用性、实用性和现实性。

(5) 代表性和先进性原则。本文件针对黄泛区软弱地基浆喷桩加固质量缺陷严重、预应力混凝土管桩成本高的普遍工程问题，编写适于黄泛区公路新建和改（扩）建工程变截面浆喷桩复合地基的设计与施工的技术标准，与目前最先进的高压浆喷桩技术与标准相比，不仅可以可靠解决黄泛区浆喷桩成桩质量问题，而且更符合浆喷桩受力特征，更能充分发挥浆喷桩材料力学特性，因此，技术更先进、工程更经济，较目前最先进的高压浆喷桩技术可进一步降低工程费用最高达 26%，经济及社会效益显著，应用前景广阔。

## (二) 主要内容及其确定依据

本文件的名称为《黄泛区变截面水泥浆喷桩复合地基技术规范》。标准的内容包括公路变截面浆喷桩复合地基加固的范围、规范性引用文件、术语和定义、基本规定、设计、施工、质量检测和验收。

1.范围。明确了本文件适用于黄泛区公路新建、改（扩）建工程变截面浆喷桩复合地基的设计与施工。该范围主要依据黄泛区地基特点、浆喷桩工程技术现状与需求的广泛调研提出。

2.规范性引用文件。引用了地基基础设计、复合地基、公路路基设计、施工技术、水泥石灰土配合比设计等相关国家和行业标准，为本标准条文的制定和实施提供依据。

3.术语和定义。对浆喷桩、变截面浆喷桩、变截面实体桩、变截面筒桩等关键术语进行了界定，统一了本标准涉及的基本概念和技术内涵。

4.基本规定。明确了黄泛区变截面浆喷桩复合地基在工程应用前应开展的地形地貌、水文地质、土层分布及物理力学性质调查要求，提出了适用土层范围、智慧施工监控等方面的基本原则。

5.设计。规定了变截面浆喷桩复合地基的设计要求，主要包括一般规定、材料设计和结构设计三部分内容。明确了设计分段原则、稳定与沉降验算要求、水泥掺量与配合比试验要求、桩体强度要求，以及桩径、上部扩大桩体尺寸、筒壁厚度、桩长、桩距、褥垫层设置等结构参数和设计计算要求，为工程设计提供技术依据。

6.施工。规定了变截面浆喷桩的施工要求，主要包括一般规定、施工机具、成桩试验及施工工艺与技术要求等内容。重点对钻头结构、高压泥浆泵配置、浆液输送系统、成桩试验目标、水泥浆制备与存储、不同土层喷浆压力、变截面实体桩和变截面筒桩施工工艺、提钻速度与浆压控制、异常工况处理

以及施工后桩顶保护等提出了具体要求。

7.质量检测和验收。明确了施工质量要求和质量检测验收方法。重点规定了原材料质量控制、配料称量误差、搅拌叶片和喷嘴检测、施工参数监测、桩位与垂直度控制，以及成桩 28 d 后钻芯取样、无侧限抗压强度检验和不合格桩补桩复检等内容，确保工程质量满足设计和规范要求。

### 三、主要技术内容

#### （一）试验验证的分析及关键技术条文说明

##### 1.范围

本章说明标准的适用工程类别和主要应用范围。黄泛区占山东省面积的约 1/3，是省内分布面积最广、最具代表性的软弱地基，区域内浆喷桩应用规模尤其庞大，特别是在公路工程建设中，为解决地基承载力不足和路基的过大沉降问题，在高填路基和小型构造物下地基加固中浆喷桩技术应用广泛。与呈软塑至流塑状态的高含水率的海相、湖相典型软土地基显著不同，黄泛区地层因黄河泛滥冲淤积而成，泥沙沉积呈粉（砂）土、粉质黏土、黏土互层构造（如图 1），在粉（砂）土透水性较好土层条件下，粉质黏土、黏土形成孔隙率相对较低、固结度较高、结构性较强、强度较高的土层特征（表 1）。常规浆喷桩技术源自海相、湖相典型软土地基加固，一般采用 0.4 MPa~0.6 MPa 浆压工艺，但在黄泛区浆液难以喷出并在土层中扩散，因此地基土中也就无浆可搅，难以成桩（图 2）。编制单位研发团队基于不同浆压下不同土层中浆液扩散试验，研究了粉土、粉质黏土、黏土层中浆液扩散规律，提出了适于不同土层中的合理浆压，编写了《黄泛区公路高压喷射搅拌桩复合地基技术规程》（T/CECS G:D21-05-2026）。为充分发挥浆喷桩承载特征，进一步降低黄泛区地基浆喷桩加固工程成本，编制单位通过对钻头和施工工艺改进，研发了上部桩身大直径断面、下部桩身小直径断面的变截面浆喷桩技术，从而形成符合摩擦桩受力特征的上部高承载力、下部低承载力变截面浆喷桩。按照工艺不同，变截面桩包括变截面实体桩和变截面筒桩两种桩型，变截面水泥石浆喷桩的桩体上部为直径 80 cm~90 cm 上部扩大桩体，而桩体下部为直径 50 cm 的小直径桩，上部扩大桩体的厚度可根据工程需求设计为 2 m~6 m。其中变截面实体桩采用实体上部扩大桩体，大幅度提升桩体上部的水泥掺量以获取更高的承载能力；变截面筒桩采用筒形上部扩大桩体，外径 75 cm~85 cm，内径为 50 cm，上部扩大桩体外部为高强度水泥石桩，内部为土芯或返浆搅拌形成强度略有增加的水泥土芯，可更好发挥材料承载特性，在提高承载力的前提下节约水泥用量。

变截面浆喷桩技术有效解决了黄泛区地基浆喷桩加固质量缺陷问题，进一步降低了黄泛区地基浆喷桩加固工程成本。本文件适用于黄泛区公路新建和改扩建工程中的变截面浆喷桩复合地基加固工程，其

他黄泛区建筑、市政、铁路、水利等地基加固工程可参照执行。



图 1 黄泛区地层层状特征

表 1 海相软土及黄泛区土物理力学参数对比表

土类	统计参数	含水率 (%)	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比	塑性指数	不排水抗剪强度 (kPa)	内摩擦角 (°)	压缩系数	
湖相黏土	变化范围	20.7-63.8	16.5-20.5	0.63-1.80	10.2-38.1	14-58	18-23	0.21-2.07	
	均值	42.2	17.9	1.16	19.73	27	21	0.84	
海相黏土	变化范围	34-157	13.1-18.6	0.97-3.9	13-52.5	1.9-19	0-18	0.51-4.41	
	均值	59.95	16.6	1.65	23.57	8.38	5.28	1.53	
黄泛区	粉土	变化范围	14.5-37.6	15.2-21.2	0.57-1.09	2-9.5	3.2-56.9	4.8-32.8	0.08-0.57
		均值	23.09	19.24	0.75	7.93	17.3	20.26	0.22
	粉质黏土	变化范围	15.6-38.8	16.5-21.2	0.52-1.11	10.1-17.7	3-66.6	1.9-34.4	0.15-0.71
		均值	24.87	19.38	0.72	13.07	30	11.56	0.32
	黏土	变化范围	18.9-59.3	16.1-29	0.61-1.6	17.1-33.6	12.9-72.4	3.3-19.3	0.08-1.18
		均值	31.37	18.59	0.92	21.36	39.58	11.03	0.34



图 2 黄泛区常规浆喷桩成桩质量

3.2 规定了变截面浆喷桩的定义和工艺特点。

浆喷桩作为摩擦桩，桩体上部承受大部分荷载，而仅有小部分荷载传递至桩体下部，如图 3 所示。

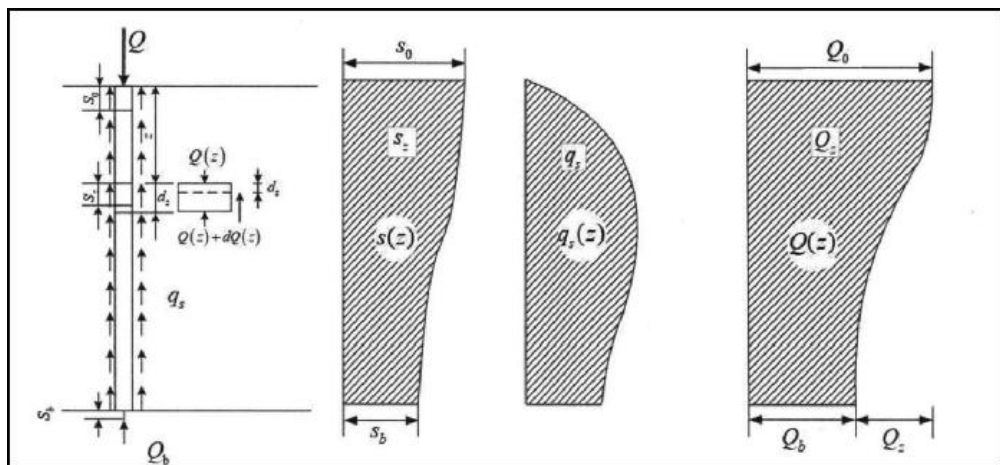


图 3 水泥土浆喷桩受力特征示意图

编制组在前期研究和工程验证的基础上，通过装备和施工工艺改进，研发出了变截面水泥土浆喷桩复合地基技术，利用浆喷桩上部施工时开启搅拌叶片端部高压喷嘴进行高压喷射和低速提升钻杆，可以实现上部桩身大直径断面、下部桩身小直径断面的变截面浆喷桩，从而形成符合摩擦桩受力特征的上部高承载力、下部低承载力变截面浆喷桩。

3.4、3.5 条款规定了两种变截面浆喷桩的定义和工艺特点。

按照工艺不同，变截面桩包括变截面实体桩和变截面筒桩两种桩型，如图 4 所示。变截面水泥土浆喷桩的桩体上部为直径约 80 cm~90 cm 的上部扩大桩体，而桩体下部为直径 50 cm 的小直径桩，上部扩大桩体的厚度可根据工程需求在 2 m~6 m 之间进行调整。其中变截面实体桩采用实体上部扩大桩体，大幅度提升桩体上部的水泥掺量以获取更高的承载能力；变截面筒桩采用筒形上部扩大桩体，外径 78 cm~85 cm，桩体下部为直径 50 cm，可在提高承载力的前提下节约水泥用量。

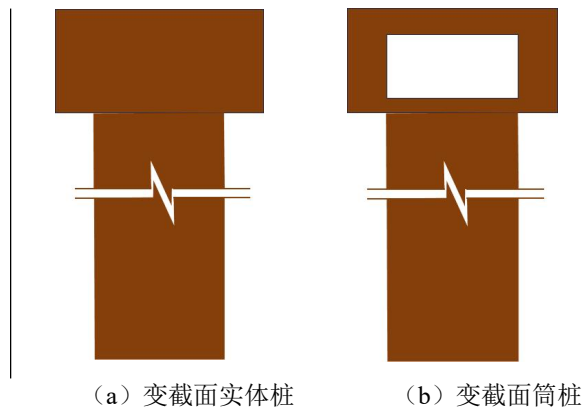


图 4 变截面桩型示意图

变截面水泥土浆喷桩技术通过优化桩体设计，针对性地加固桩体的主要承载部位，避免了传统设计中的材料浪费，大幅度提高了桩体的承载力。变截面桩的上部扩大桩体形式（如实体上部扩大桩体、筒形上部扩大桩体）和厚度可以根据具体的承载力需求进行调整，在确保加固效果的同时，最大限度地降低施工成本。

#### 4.基本规定

4.1 条款规定了公路变截面浆喷桩施工前对场地条件的调查要求。不同地层的分布情况及物理力学性能指标差异对变截面浆喷桩施工工艺参数要求不同，应提前探明场地的工程地质、水文地质条件，查明软弱土层的分布情况及其物理力学性能指标。

4.2 条款规定了变截面浆喷桩复合地基加固技术适用的土质条件。本条款基于《复合地基技术规范》，结合黄泛区特点，明确了变截面浆喷桩适于处理的地基土质类别。基于 GB 50783、JGJ 79，对于含有较大孤石或障碍物较多且不宜清除的杂填土，不宜采用变截面浆喷桩复合地基处理方法。

4.3 条款规定了变截面浆喷桩施工监控的相关要求。

黄泛区地层条件复杂，不同地层条件的工艺参数存在差别，施工控制相对复杂。为了保证施工质量，提高施工效率，建议变截面浆喷桩采用智慧施工控制系统对施工工艺、技术参数及施工质量等进行监控施工。

#### 5.设计

5.1.3 条款规定了路堤稳定性和工后沉降要求。本条款基于 JTG D30 条款，明确了相邻路段工后差异沉降引起的纵坡变化率。基于 JTG/T L11 条款，明确了高速公路、一级公路拼宽路基、通道及涵洞处、其他一般路段工后沉降，与拼宽路基的路拱横坡度工后增大值。

5.2.3 条款规定了变截面浆喷桩复合地基所应用固化剂的相关要求。

由于变截面浆喷桩的下钻速度与土层硬度有关，在下钻功率和喷浆压力不变的条件下，由于不同深

度土层硬度差异导致下钻速度的不同，尽管下钻浆压较小，整体的水泥用量仍存在一定波动。由于提钻速度较慢，提钻过程的水泥用量占主要部分，所以其在提钻速度和喷浆压力不变条件下，桩整体的水泥用量波动很小。基于黄泛区几种典型土质条件，依据现场统计的不同桩型水泥用量范围，以下部桩体桩径 50 cm，变截面浆喷桩上部扩大桩体直径 80 cm，计算得水泥掺入比参考值如表 2 所示。据此，规定了提钻施工时不同桩型的水泥掺入比要求。

表 2 水泥掺入比计算参考值

桩型	桩径 (cm)	水泥用量 (kg/m)	掺入比 (%)
下部桩体	50	50	12
		75	19
变截面筒桩上部 扩大桩体	80	90	8
		120	12
变截面实体桩上 部扩大桩体	80	190	18
		200	20
注：水泥掺入比=水泥掺入实际质量/以设计桩径计算设计桩体范围内土体的质量			

变截面浆喷桩设计水灰比一般为 0.8~1.2，普通硅酸盐水泥密度为 3000 kg/m<sup>3</sup>~3150 kg/m<sup>3</sup>。取水泥密度 3100 kg/m<sup>3</sup>，则水泥浆液对应密度计算如表 3。因此密度建议取值为 1400 kg/m<sup>3</sup>~1650kg/m<sup>3</sup>。

表 3 水泥浆液密度计算参考值

水灰比	水泥浆液密度 (kg/m <sup>3</sup> )
0.8	1603
0.9	1550
1.0	1510
1.1	1480
1.2	1450

5.2.4 条款规定了配合比试验用土采样与保存要求。试验用原状土样密封方法应进行封蜡后采用塑料袋或其他密封容器包装保存，防止水分流失。

5.2.5 规定了变截面浆喷桩 28 d 无侧限抗压强度。由于变截面浆喷桩采用了较大的喷浆压力，其无侧限抗压强度一般较高，但根据地层土质、埋深、含水率等的不同，其强度值也存在较大的差异，根据现场试验和大量工程桩测试情况，结合单桩承载力技术要求，本文件规定了变截面浆喷桩 28 d 无侧限抗压强度最低限值。

变截面浆喷桩下部桩体主要承担剩余轴力传递和整体稳定作用，强度以满足基本承载要求为主，控制为 $\geq 1.5$  MPa。

上部扩大桩体段为变截面浆喷桩发挥承载优势的关键部位，为了实现较大桩径的扩大桩头，采用搅

拌叶片端部喷嘴高压喷浆、低速提升钻杆的施工工艺，不仅获得了浆喷桩上部大桩径桩头，增大了桩侧摩阻力，同时也实现了更高的上部桩身强度，进一步提高了浆喷桩单桩承载力。上部扩大桩体段桩身高强度是由变截面浆喷桩的特殊施工工艺决定的，结合现场试验、大量工程桩检测结果统计分析，提出了上部扩大桩体段的 28 d 无侧限抗压强度最低控制值。

在实体桩中，上部扩大桩体外部由高压喷射而成，水泥土 28 d 强度 $\geq 4.0$  MPa，承担更强的荷载扩散和传递作用；上部扩大桩体内部由水泥浆高压喷射+叶片搅拌而成，水泥土 28 d 强度 $\geq 3.0$  MPa，协同外侧高强部分受力。对于筒桩桩头，除了封顶和封底部分，由于关闭了搅拌杆上的喷嘴，且采用了相较实体桩较快的提钻速度，仅能在筒壁部分形成水泥浆高压喷射而成的高强筒壁，且筒壁的强度略低于实体桩的筒壁强度；而筒芯部分基本不含水泥或水泥含量很低，其强度忽略不计，不做要求。经统计，提出筒桩段筒壁的水泥土 28 d 强度 $\geq 3.0$  MPa 的设计要求，结构力学分析与工程检测表明，满足该强度要求的变截面筒桩结构受力合理。

工程中，由于土质等条件的差异，有时会发生上部扩大桩体段强度过高的现象，工程中可以通过试验，采取降低水泥用量或加大钻杆提升速度等措施适当降低上部扩大桩体段的桩身强度。

5.3 条款规定了变截面浆喷桩复合地基的结构计算及设计。

5.3.1 条款规定了不同变截面浆喷桩结构参数的获取方法，给出了不同桩型初步设计的推荐结构参数。

不同桩型结构参数各桩型主要是通过现场试验和工程统计获得。在水泥浆液扩散较充分的条件下，桩径主要取决于搅拌叶片长度，在典型粉（砂）土、黏土、粉质黏土中，其成桩直径均为 500 mm。上部扩大桩体施工时，其外部成桩直径由搅拌叶片末端的高压喷嘴旋喷浆液扩散范围决定，而该扩散范围受土层分布、钻杆提速、地应力、地下水等因素的影响。表 4 列出了试验和工程不同桩型的直径实测结果。表 4 表明，在推荐的施工工艺和控制参数下，变截面浆喷桩上部扩大桩体的直径在粉（砂）土、黏土、粉质黏土层中分别达到 900 mm、800 mm、800 mm；而变截面筒桩由于采用了更快的提钻速度，其成桩直径相对小一些，在粉（砂）土、黏土、粉质黏土中分别达到 850 mm、750 mm、750 mm 桩径。上部扩大桩体内部直径同样取决于钻杆长度，均为 500 mm。



图 5 某黄泛区上部扩大桩体段成桩直径检测

表 4 不同桩型的现场实测桩径

土质	提升速度 (cm/min)	喷浆压力 (MPa)	桩头直径 (mm)
粉土	35	15	950
	55	15	820
	75	15	750
	55	10	720
	75	20	900
粉质黏土	20	25	800
	20	15	800
黏土	20	25	800

按照试验和工程验证结果统计分析,提出了变截面实体桩和变截面筒桩的上部扩大桩体在不同土层中的桩径、筒壁厚度等工艺参数,供初步设计参考。

5.3.2 条款给出了变截面筒桩的上部扩大桩体封顶、封底和上部扩大桩体总长度的技术要求。

本条规定了变截面筒桩上部扩大桩体封顶、封底的构造要求。数值模拟结果表明,不设置封顶时,上部扩大桩体顶部与桩侧过渡区域应力集中明显,在竖向荷载作用下,荷载难以均匀传递至下部桩体,当上覆荷载达到 500 kN 时,桩侧局部将出现受压受剪作用下的破坏。随着封顶厚度增加,上部扩大桩体顶部整体性增强,桩侧应力集中现象显著减轻,荷载能够更加均匀地向上部扩大桩体及下部桩体传递。当封顶厚度增至 1000 mm 时,桩体可承受的荷载等级由 500 kN 提高至 700 kN;当封顶厚度继续增加时,虽然极限承载水平仍有一定提高,但增幅已明显减小,综合承载提升效果、材料投入和施工经济性,封顶厚度宜取 1000 mm。

封底的设置主要是为了保证上部扩大桩体与下部小直径桩体之间形成连续、稳定的传力路径,避免

荷载在上部扩大桩体底部发生突变，削弱下部桩体受力的连续性。封底厚度过小时，上部扩大桩体底部与下部桩体连接区域的整体性不足，不利于竖向荷载由上部上部扩大桩体向下部桩体平顺传递，也不利于施工过程中形成稳定、完整的底部封闭体；当封底厚度达到 500 mm 时，可较好兼顾传力需要、构造完整性和施工可实施性。综合数值模拟分析结果与工程经验，封底厚度宜取 500 mm。变截面筒桩的封顶和封底通过施工时降低提钻速度至 20 cm/min，利用钻杆、搅拌叶片喷嘴同时高压低速喷射搅拌而成。

图 6 列出了变截面筒桩复合地基单位面积加固费用、单桩承载力随上部扩大桩体长度的变化规律，由现场试验测算得出。由图 6 可见，随变截面筒桩上部扩大桩体长度的增加，变截面筒桩单桩承载力增加，单位面积地基加固成本也逐步降低，但费用降低呈减缓趋势。综合考虑地基加固效果、工程费用情况，建议上部扩大桩体长度取 2 m~6 m。

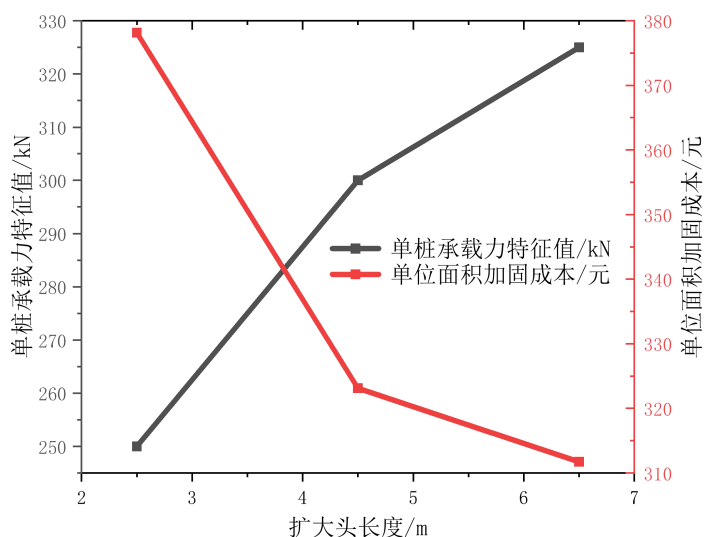


图 6 承载力与加固成本变化规律

5.3.3 条款规定了路基和小型构筑物的变截面浆喷桩复合地基设计要求。

路基下的地基加固主要为了控制路基的沉降变形，因此，要通过路基沉降变形计算控制复合地基设计，并通过地基承载力、路基稳定性验算相关设计；小型构筑物的变截面浆喷桩复合地基主要是为了控制地基承载力，所以首先要计算承载力，并通过变形和稳定性验算相关设计，二者设计流程略有不同。

5.3.7 条款规定了变截面浆喷桩复合地基承载力特征值的计算，

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_a^k}{A_{p1}} + \beta(1 - m_1)f_{sk}$$

$$m_1 = \frac{D^2}{d_e^2}, \quad A_{p1} = \frac{\pi D^2}{4}$$

其中， $m_1$ 是桩头面积置换率， $A_{p1}$ 是桩头部分截面积，

上式可简化为

$$f_{spk} = \frac{D^2}{d_e^2} \cdot \frac{4R_a^k}{\pi D^2} + \beta(1 - m_1)f_{sk}$$

即

$$f_{spk} = \frac{4R_a^k}{\pi d_e^2} + \beta(1 - m_1)f_{sk}$$

其中 $R_a^k$ 是单桩承载力特征值； $d_e$ 是单桩等效加固直径，等边三角形布置时候 $d_e=1.05S$ ；正方形布置时 $d_e=1.13S$ ；矩形布置时 $d_e=1.13\sqrt{S_1 * S_2}$ ； $\beta$ 是桩间土承载力折减系数，取 $0.75\sim 1$ ； $f_{sk}$ 是桩间土承载力特征值。设计中， $R_a^k$ 、 $\beta$ 、 $f_{sk}$ 都是定值，假设桩间距是定值，当 $D$ 取大值时， $m_1$ 增大， $f_{spk}$ 偏小。对于变截面桩，其整根桩承载时的等效桩直径介于小直径和大直径之间，即：

$$d < D_{\text{实际}} < D$$

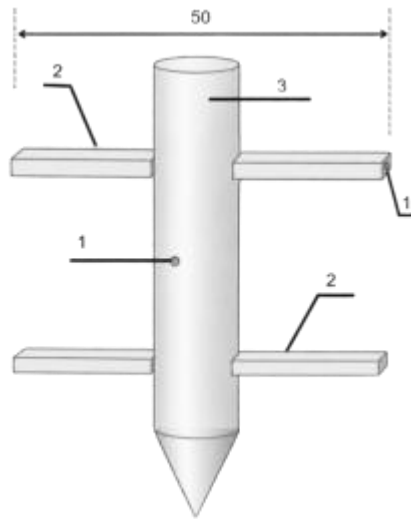
其中 $d$ 是变截面桩的下部桩体直径， $D_{\text{实际}}$ 是其整根桩承载时的等效桩直径， $D$ 是变截面桩的上部扩大桩体直径。因此，若采用上述公式计算，所带入的 $D$ 比实际等效直径偏大，计算出来的 $f_{spk}$ 偏小，设计偏保守。

## 6. 施工

6.1.1 条款规定了变截面浆喷桩复合地基施工前应进行试桩的相关要求。变截面浆喷桩的有效加固半径或喷射范围与射流压力、流量、钻杆提升速度以及土层类型密切相关，由于影响因素复杂，正式施工前应选择有代表性地段进行试桩，以确定相应工程条件下的有效喷射范围、施工参数、浆液性能要求等。

6.2 条款是关于变截面浆喷桩复合地基施工时所用到的主要施工机具要求，包括对钻头、高压泥浆泵、输浆管路等的要求。

变截面浆喷桩钻头如图 7 所示，钻头由钻杆、搅拌叶片、喷射搅拌叶片、浆液喷嘴组成，其中钻杆的直径为 20 cm；搅拌叶片和喷射搅拌叶片垂直交叉设置在钻杆上，其直径均为 50 cm；两对浆液喷嘴分别对称设置在喷射搅拌叶片末端和钻杆处，其直径宜为 2 mm~4 mm。



标引序号说明：

1——高压喷嘴

2——搅拌叶片

3——钻杆

图 7 变截面浆喷桩施工装备钻头结构示意图

变截面浆喷桩所配备的高压泥浆泵应具有能够保持高压施工的能力，由于在黏土层中喷浆压力要求达到 20 MPa，其额定压力不宜小于 30 MPa；如果地层不含黏土层，仅存在粉质黏土、粉土层，其额定压力也可采用 15 MPa~20 MPa 的平均浆压。当喷嘴直径增大时，应加大高压泥浆泵的功率，以确保喷浆压力符合要求。

为适应高压喷浆施工，应配备高压输浆管，并加强水泥浆液过滤，以避免未充分搅拌水泥颗粒进入管路中。

6.4 条款是对变截面浆喷桩复合地基的施工工艺的规定。

变截面浆喷桩由于浆液在地层中扩散充分，因此，施工工艺由传统浆喷桩的“4 搅 2 喷”工艺简化为“2 搅 1 喷”即可确保成桩质量，这大大缩短了施工时间，提高了施工效率。当施工地层条件复杂、对施工质量要求高时，可采用“2 搅 2 喷”工艺施工。

6.4.1 规定了浆液制备与保存条件。

搅拌机的速度宜不小于 60 r/min。变截面浆喷桩的浆液水灰比大，低速搅拌可能出现浆液分层、离析等现象，影响浆液的稳定性。高速搅拌可确保各组分在搅拌过程中均匀混合，避免分层、离析等现象，搅拌后的浆液可保持一定的稳定性，以确保后续使用的效果，提高生产效率。

高温条件下水泥初凝时间缩短，浆液存放过长时间将影响施工质量。国内安徽省地方标准《水泥土

《搅拌桩地基加固施工技术规程》结合工程经验提出了当气温在 10℃以上时浆液存放不应超过 3 h，当气温在 10℃以下时浆液存放不应超过 4 h。本文件编制组开展了不同温度条件下水泥浆液水灰比试验，结果表明，当温度在 20℃以下时，存放在 4h 内水泥浆液水灰比变化不大；当温度超过 20℃时，存放时间超过 3 h 水泥浆液水灰比降低较明显，特别是当温度达到 40℃时。初始水灰比为 1 的水泥浆液，存放 3 h 后水灰比降低为 0.81，而存放 4 h 降低为 0.608，浆液质量明显降低。因此建议气温超过 20℃时浆液存放时间不应超过 3 h，气温低于 20℃时以下浆液存放时间不应超过 4 h。

表 5 室内试验水泥浆液水灰比变化

温度	存放时间 (h)	水灰比
10℃	2	0.970
	3	0.969
	4	0.967
20℃	2	0.962
	3	0.951
	4	0.944
40℃	2	0.878
	3	0.810
	4	0.608

6.4.2 规定了黄泛区不同地层条件下变截面浆喷桩的喷浆压力。

由于黄泛区冲（淤）积而成的土质与常规软土存在显著的差异，0.4 MPa~0.6 MPa 常规浆压难以确保成桩质量。编制组通过数值模拟、现场试验等技术手段，研究了黄泛区黏土、粉质黏土以及粉（砂）土地层中适宜的喷浆压力。图 8 列出了黏土、粉质黏土以及粉（砂）土三种典型地层中黄泛区土喷浆压力与浆液扩散范围之间的关系。由图 8 可见，黄泛区土的硬度较大，需要较高的浆压才能实现水泥浆液在各种土层中的有效扩散，为搅拌成桩提供基本条件；为实现有浆可搅的目标，建议浆液喷射扩散应该达到 35 cm 以上的直径范围，也即超出钻杆以外 7.5 cm 以上（图 9）。结合现场成桩质量验证，提出黏土、粉质黏土以及粉（砂）土适宜的喷浆压力分别为 20 MPa、15 MPa 和 5 MPa。

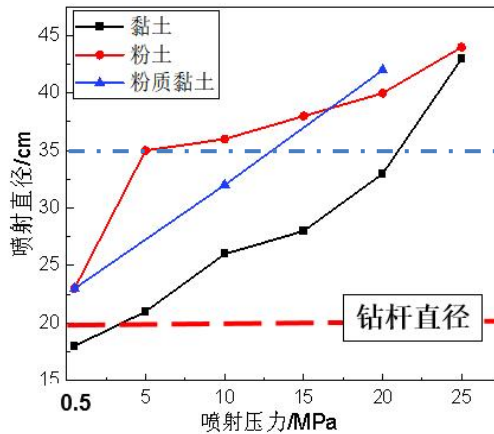


图 8 不同土质中浆液扩散范围随压力的变化图

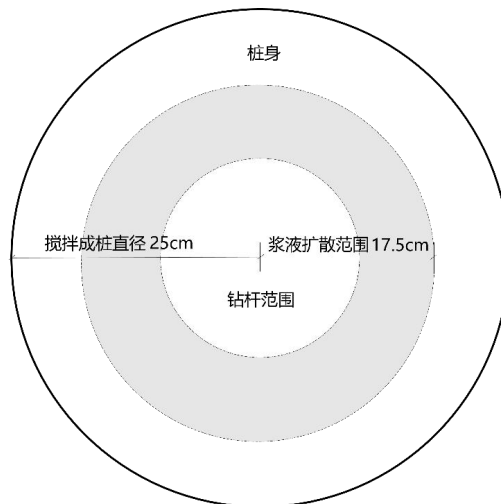


图 9 控制浆液最小扩散范围

6.4.3 和 6.4.4 条款规定了变截面实体桩和变截面筒桩在不同施工部位的喷浆压力、喷嘴启闭和提升速度控制要求。

变截面浆喷桩施工过程中，下钻应尽量快速进行，一般约为 110 cm/min。但由于不同地层土质条件差异较大，下钻速度通常存在一定波动，表现出不均匀性，且与土层软硬程度密切相关，现场施工中较难进行精确控制。并且，通过现场试验和工程应用表明，成桩质量的主要影响因素是上提过程中的喷浆压力和提钻速度，而下钻速度对成桩质量的影响相对较小。因此，对下钻速度一般不作具体要求，可根据实际地层条件灵活调整。

因为现场施工中喷浆压力的建立、喷嘴出浆状态的稳定以及提钻速度的降低都需要一个渐变过程，若在理论分界面处才开始调整，往往会导致实际形成的上部扩大桩体起始位置滞后于设计位置，从而使设计深度处难以形成目标桩型。将参数调整点提前至设计上部扩大桩体底部以下 50 cm，是为工艺转换

预留响应距离，以确保到达设计上部扩大桩体底部时，喷浆压力、喷射范围及提升速度均已进入稳定工作状态，从而在设计深度准确形成设计要求的上部扩大桩体底界面。同时，也可在上部扩大桩体与下部小直径桩体之间形成渐变过渡段，实现荷载向下部桩体平顺传递，避免应力集中引发局部压剪破坏，提高上部扩大桩体与下部桩体之间的协同受力能力。

此外，提前调整参数可在上部扩大桩体与下部小直径桩体之间形成渐变过渡段，而不是形成几何和受力上的突变界面。变截面桩上部扩大桩体与下部桩体的直径差异较大，若在同一深度位置突变，荷载传递过程中容易在该部位产生应力集中，不利于上部扩大桩体荷载向下部桩体平顺传递，也可能引发局部压剪破坏。5.3.2 条已经指出，封顶可显著减轻桩侧应力集中，封底可使荷载在上部扩大桩体和下部小直径桩体间实现有效传递，这说明上部扩大桩体上下过渡区的构造与成型质量对桩体受力性能具有直接影响。将参数调整点提前 50 cm，可使上部扩大桩体底部附近的桩径、浆液扩散范围和桩体强度分布逐渐过渡，在上部扩大桩体下方形成一定长度的过渡区，从而减弱因直径突变带来的应力集中，提高上部扩大桩体与下部桩体之间的协同受力能力。

6.4.5 条款规定了变截面浆喷桩的提钻速度与分段浆压的技术要求。

根据工程经验和现场试验，黄泛区土层条件下下钻时的速度范围为 40 cm/min~150 cm/min，变化较大。这主要由于变截面浆喷桩下钻速度受工程现场土质影响较大，土层较硬时下钻阻力较大，下钻速度减慢，土层较软时下钻速度增大。因此，本条款仅规定了喷浆提钻速度，施工时控制好高压提钻速度即可确保成桩质量，而对下钻时的速度不做规定。

当提钻速度为 20 cm/min 时，由于提速较慢，喷浆量大，水泥浆液可与土体充分混合，并在搅拌叶片搅拌范围内产生返浆，经搅拌形成实心桩体；当提钻速度为 40 cm/min 时，由于提速较快，喷浆量小，在搅拌叶片搅拌范围内基本不产生返浆，仅在外侧喷射形成筒壁。变截面筒桩应做封顶、封底处理，以确保桩承载力，在封顶、封底处将提钻速度由 40 cm/min 降低为 20 cm/min。

变截面筒桩不同部位浆压的调整与其桩型相对应。封顶、封底段的施工目的在于形成上部扩大桩体上下端封闭体，保证上部扩大桩体整体受力及其与下部桩体之间的有效传力，因此钻杆浆压和搅拌叶片浆压均采用设计值，并通过降低提钻速度增强喷射返浆与搅拌成型效果。筒段施工目的在于形成稳定筒壁并控制中部不过度充填，故搅拌叶片浆压仍采用设计值，而钻杆浆压控制为 1 MPa~3 MPa。该压力水平较低，可在满足连续出浆的同时降低喷嘴堵孔风险，并避免高压浆液大量进入筒芯区域，造成材料浪费。下部桩体为常规实心成桩段，故钻杆浆压恢复为设计值，以保证浆液有效扩散和实心桩体成型。

## 7. 质量检测和验收

7.1 条款规定了变截面浆喷桩复合地基施工过程原材料的质量控制要求。

### 7.1.3 条款规定了施工过程中装备与关键工艺参数的检测与监测技术要求

黄泛区典型土质以粉砂、粉土、粉质黏土为主，相对于传统海相、湖相软基，土质偏粗、偏硬，对搅拌叶片磨耗较大；高压喷射对喷嘴磨耗较大，因此，施工过程中应加强对搅拌叶片与喷嘴直径的检测检查。

钻杆回转、提升速度，喷射压力、浆液流量、单桩水泥用量等工艺参数对变截面浆喷桩成桩质量具有重要影响，因此，施工过程中应对这些关键参数指标随时进行监测。

### 7.2 条款规定了变截面浆喷桩的质量验收要求。

## （二）综述报告

黄泛平原区广泛分布于鲁西北、鲁西南等区域，区域面积广，公路工程等工程设施建设规模巨大。为解决区域内地基软弱问题，浆喷桩技术广泛用于公路、铁路、市政、水利、建筑等工程地基加固工程。但黄泛区浆喷桩加固工程中严重的冒浆浪费、质量缺陷问题广受诟病，预应力混凝土管桩等技术的应用又导致工程费用大幅增加。本文件基于黄泛区典型地基条件下成桩质量缺陷机理分析和工程技术研究，通过大量室内与现场试验，研发高压浆喷桩技术，提出了适宜黄泛区典型土层条件的适宜浆喷桩浆压技术指标，在此基础上，进一步提出了适于黄泛区地基条件的变截面成桩新技术，可以实现变截面实体桩和变截面筒桩两种桩型的可靠施工，能够更充分发挥桩体上部承载作用，有效避免材料浪费、降低工程成本，为黄泛区复杂地层地基处理工程难题提供了新的技术方案。该技术在济菏高速拓宽改建工程、济南至宁津高速公路工程、G308 济南段改建等工程中成功应用，工程技术成熟，经济可靠。结合黄泛区变截面浆喷桩复合地基的工程应用经验，提出变截面水泥浆喷桩的设计、施工、质量控制与验收标准，对解决黄泛区复合地基加固的工程难题、确保工程建设质量、降低工程建设费用、完善我国复合地基加固工程标准体系等，具有重要的社会、经济意义。

## （三）技术经济论证（包括预期的经济效益、社会效益和生态效益等）

### （1）经济效益

以 G35 济广高速公路改扩建工程应用为例，分析变截面浆喷桩的经济效益。

不同桩型的单桩承载力特征值差异较大，根据工程设计文件，取设计复合地基承载力为 160 kPa，按照达到该承载力所需的桩间距进行本次施工成本计算。

根据不同桩型的 10 m 单桩费用，以及不同桩型的正三角形布桩面积，10 m 浆喷桩设计单桩承载力特征值一般取 110 kN~130 kN，按照 120 kN 控制，在 160 kPa 的复合地基承载力要求的条件下，单位

面积的地基加固费用如下表所示。与变截面实体桩相比，变截面筒桩具有经济优势，故前期的现场及工程应用以变截面筒桩为主，仅选取上部扩大桩体长度为 2.5 m 的变截面实体桩作为对比：

表 6 复合地基承载力单位面积地基加固费用计算表

桩型	承载力 特征值/kN	桩 径/m	面 积置换率	桩间 距/m	单位面 积加固成本/ 元
传统浆喷桩（设计）	120	0.5	0.16	1.20	476.58
高压浆喷桩	150	0.5	0.17	1.47	418.90
变截面实体桩2.5m扩径	275	0.8	0.21	1.65	405.21
变截面筒桩2.5m扩径	250	0.8	0.24	1.55	378.13
变截面筒桩4.5m扩径	300	0.8	0.19	1.73	323.11
变截面筒桩6.5m扩径	325	0.8	0.18	1.82	311.73

参照高速公路工程地基加固设计文件，一般路基高度的高速公路地基设计复合地基承载力取 160kPa，若传统浆喷桩可以达到设计要求的强度，其单位面积复合地基加固成本是较低的，但是根据黄泛区粉质黏土地基条件下的现场试验，其加固效果差，单桩承载力特征值仅为设计要求的 30%左右，若要达到复合地基设计值需进行加密处理，桩间距需缩小 50%，这也说明了在黄泛区现有工程条件下，其浆喷桩复合地基承载力在一定程度上是无法达到工程设计要求的。变截面实体桩与变截面筒桩是基于高压浆喷桩结构优化发展形成的两类新型桩型，采用变截面实体桩和变截面筒桩进行地基处理，以 2.5 m 上部扩大桩体厚度为例，其单位面积加固成本分别为 405.21 元和 378.13 元，其桩间距更大，减少了布桩数量，相比高压浆喷桩，单位面积加固成本约降低 3%~26%。

## （2）社会效益

变截面浆喷桩复合地基技术针对黄泛区典型土层条件下传统浆喷桩成桩质量差、承载力不足等问题，通过优化桩体结构形式和施工工艺，提高了地基处理工程的可靠性与稳定性，可有效控制路基沉降并提升公路工程整体质量与安全性。该技术在满足工程性能要求的同时显著降低了工程造价，相较于预应力混凝土管桩等替代加固技术具有明显的经济优势，有利于降低工程建设成本，提高公路建设投资效益。同时，该技术成果的推广应用能够促进地基处理技术水平提升，推动公路工程施工技术进步，对保障交通基础设施长期安全运行、服务区域经济发展具有积极意义。

### （3）生态效益

变截面浆喷桩复合地基技术通过合理优化桩体截面形式，将水泥用量集中于主要承载区域，在保证承载能力的前提下减少材料消耗，从而降低资源消耗和工程成本。同时，该技术施工扰动小、对周边环境影响较低，可有效减少施工过程中的弃土和建筑废料产生，降低施工对生态环境的影响。与传统高成本桩基处理方式相比，该技术能够减少水泥等建筑材料的用量，从而降低工程建设过程中的能源消耗和碳排放，符合绿色低碳建设理念，对推动公路工程绿色施工和生态环境保护具有积极作用。

## 四、与国家标准、行业标准、地方标准同类标准技术内容的对比情况

自 20 世纪 70 年代我国由日本引进水泥石拌桩技术以来，浆喷桩地基加固在我国交通、水利、建筑等工程领域软弱地基加固中快速应用，其工程设计、施工、检测等也逐步规范并纳入《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79、《复合地基技术规范》GB/T 50783、《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610、《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02、《黄泛区公路高压喷射搅拌桩复合地基技术规程》T/CECS G: D21-05、《变截面双向搅拌桩技术规程》T/CECS 822 等相关标准。由于国内相关工程技术标准主要是基于滨海软弱地基条件编制而成，因此在我国独具特色、土质偏硬的黄泛区地层条件下难以适应，成桩质量较差。

本文件基于我国黄泛区典型地层条件下浆喷桩技术理论分析、室内外试验、工程验证和广泛的调研分析编制而成，其特色和主要创新是提出了适宜黄泛区典型土层条件的适宜浆喷桩浆压技术指标，以及变截面实体桩、变截面筒桩两种变截面浆喷桩工程设计、施工、检测验收技术标准，在有效控制工程成本的前提下，很好的解决了黄泛区软弱地基条件下的浆喷桩不成桩的突出工程问题，填补了偏硬土质的软弱地基浆喷桩工程技术标准空白，是对国内外相关技术标准的重要完善和有益补充。

## 五、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本规范与国家、行业、地方标准的相关规定无冲突，是对国标、行标、地标的完善与提升。

## 六、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况

日本 Cement Deep Mixing Method Association 所制定的《CDM-LODIC Method Technical Manual》代表国际水泥石拌桩标准最先进水平，主要规范了传统水泥石拌桩的施工技术方法及施工机具，是我国现有水泥石拌桩标准编制的重要依据。但该标准是基于滨海软弱地基条件编制而成，我国现行标准对浆喷桩关键技术、工艺与参数也大部分是借鉴该标准编制而成，难以适应我国独具特色、土质较硬的黄泛区地层条件，因此普遍存在黄泛区浆喷桩成桩质量较差、难以成桩的突出问题。变截面浆喷桩技术更为

先进，基于此的规范编制不仅可有效解决黄泛区地基浆喷桩加固质量缺陷问题，并可较高压浆喷桩技术进一步降低工程成本。

#### 七、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

#### 八、涉及专利情况说明

无。

#### 九、其他应当说明的事项

无。

---