

中国工程建设标准化协会标准

# 公路工程土工合成材料约束桩地基处理技术规程

Technical specification for geosynthetics-reinforced piles composite  
foundation of highway

(征求意见稿)

T/CECS XXX-202X

主编单位： 武汉广益交通科技股份有限公司  
天 津 大 学  
批准单位： 中国工程建设标准化协会  
施行日期： 2 0 2 X 年 X X 月 X X 日

202X 北 京

# 前言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2022 年第二批协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字[2022]40 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 7 章，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、材料、设计、施工、质量检验与验收等。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会城市交通专业委员会归口管理，由武汉广益交通科技股份有限公司、天津大学负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给武汉广益交通科技股份有限公司（地址：湖北省武汉市东湖高新区光谷创业街 10 栋 A 座 2502，邮编：430074，邮箱：[gytst@gytst.com](mailto:gytst@gytst.com)）、天津大学（地址：天津市南开区卫津路 92 号，邮编：300072，邮箱：[cgk@tju.edu.cn](mailto:cgk@tju.edu.cn)）。

**主编单位：**武汉广益交通科技股份有限公司

天津大学

**参编单位：**

**主要起草人：**

**主要审查人：**

# 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.....	5
4 材料.....	7
4.1 散体材料.....	7
4.2 流态固化土.....	7
4.3 活性材料混合料.....	9
4.4 土工合成材料.....	9
5 设计.....	12
5.1 一般规定.....	12
5.2 荷载计算.....	12
5.3 单桩及复合地基结构形式.....	12
5.4 承载力计算.....	15
5.5 沉降计算.....	19
5.6 固结度计算.....	22
5.7 复合地基稳定性.....	25
5.8 特殊地质条件下设计.....	28
6 施工.....	30
6.1 一般规定.....	30
6.2 施工准备.....	30
6.3 施工工艺.....	32
6.4 施工监测.....	33
7 质量检验与验收.....	34
7.1 一般规定.....	34
7.2 施工前检验.....	34
7.3 施工中检验.....	35
7.4 施工后检验.....	35
本规范用词说明.....	38

# Contents

1 General provisions	1
2 Terms and Symbols	2
2.1 Terms	2
2.2 Symbols	3
3 Basic Requirements	5
4 Materials	7
4.1 Granular Materials	7
4.2 Flowable Solidified Soil	7
4.3 Cementitious Material Mixture	9
4.4 Geosynthetics	9
5 Design	12
5.1 General Requirements	12
5.2 Load Calculation	12
5.3 Single Pile and Composite Foundation Structural Types	12
5.4 Bearing Capacity Calculation	15
5.5 Settlement Calculation	19
5.6 Consolidation Degree Calculation	22
5.7 Composite Foundation Stability	25
5.8 Design with Special Geological Conditions	28
6 Construction	30
6.1 General Requirements	30
6.2 Construction Preparation	30
6.3 Construction Technology	32
6.4 Construction Monitoring	33
7 Quality Inspection and Acceptance	34
7.1 General Requirements	34
7.2 Pre-construction Inspection	34
7.3 During-construction Inspection	35

7.4 Post-construction Inspection	35
Explanation of Wording in This Specification	38

# 1 总 则

**1.0.1** 为规范和指导土工合成材料约束桩技术在公路地基处理工程中的应用，提高地基处理技术水平，制定本规程。

## 条文说明

为适应我国交通基础设施建设持续发展的需要，响应国家在工程建设中对节能减排与环境保护提出的更高要求，土工合成材料约束桩技术作为一种绿色、高效的地基处理手段，其应用与推广正逢其时。该技术具有绿色环保、节能降碳、性能优良、施工便捷、质量可控等优势，在公路软基处理工程中应用和推广可满足工程质量要求并助力建筑固废材料的资源化应用，有利于推动工程建设绿色转型。

为了使公路工程中土工合成材料约束桩的设计、施工、质量检验与验收等有条不紊，工程应用中做到安全适用、质量可靠、生态环保、经济合理，本规程的制定对规范和引导行业的良性健康发展意义重大。

**1.0.2** 本规程适用于各等级公路新建及改扩建工程土工合成材料约束桩复合地基的设计、施工、质量检验与验收。

## 条文说明

本规程在保证和增强土工合成材料约束桩软基处理工程安全性、经济性要求的基础上，对用于公路工程土工合成材料约束桩的设计、施工、质量检验与验收做出技术规定。

**1.0.3** 土工合成材料约束桩复合地基设计与施工，应遵循安全可靠、因地制宜、经济合理、保护环境的原则。

**1.0.4** 土工合成材料约束桩复合地基设计与施工应积极采用成熟可靠的新技术、新材料、新设备、新工艺。

**1.0.5** 土工合成材料约束桩设计、施工除应符合本规程的规定外，尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行相关标准的规定。

## 条文说明

凡国家现行标准中已有明确规定的，本规程原则上不再重复。在设计、施工、质量检验与验收中除符合本规程的要求外，尚应满足国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 土工合成材料约束桩 geosynthetics-reinforced piles

由土工合成材料形成具有环向加筋作用的筒袋包裹内部填充料形成的桩体。

#### 2.1.2 土工合成材料约束散体桩 geosynthetics-reinforced granular piles

由土工合成材料形成具有环向加筋作用的筒袋包裹碎石、建筑固废等散体材料形成的桩体。

#### 2.1.3 土工合成材料约束固化土桩 geosynthetics-reinforced solidified soil piles

由土工合成材料形成具有环向加筋作用的筒袋包裹流态固化土、活性材料混合料等形成的桩体。

#### 2.1.4 土工合成材料筒袋 geosynthetics sleeve bags

使用土工织物、土工格栅等土工合成材料无缝编织或缝制搭接而成的具有环向加筋作用的筒袋。

#### 2.1.5 流态固化土 liquid solidified soil

掺加固化剂、外加剂等材料的基泥经均匀拌合，形成具有一定流动性且凝结硬化后能达到一定强度的混合物。

#### 2.1.6 活性材料混合料 cementitious material mixture

指粉煤灰、火山灰、炉渣、废石膏等工业废料按照一定比例混合而成的混合料。

#### 2.1.5 土工合成材料设计抗拉强度 design tensile strength of geosynthetics

考虑设计工作年限内相关因素影响后取用的土工合成材料抗拉强度。

#### 2.1.6 土工合成材料约束桩复合地基 geosynthetics-reinforced piles composite foundation

以土工合成材料约束桩为竖向增强体的复合地基。

#### 2.1.7 面积置换率 replacement ratio of composite foundation

复合地基中桩体的横截面积与该桩体所承担的复合地基面积比值。

#### 2.1.8 桩体单轴抗压强度 uniaxial compression strength of geosynthetics-reinforced piles

土工合成材料约束桩在单向受压至破坏时，单位面积上所能承受的荷载。

### 2.1.9 土工合成材料约束桩桩体模量 deformation modulus of geosynthetics-reinforced piles

土工合成材料约束桩在无侧限条件下的应力与应变之比。

### 2.1.10 建筑固废 construction waste

建筑固废是指对各类建筑物和构筑物及其辅助设施等进行拆除产生的混凝土颗粒及砖渣颗粒等无污染的固体废弃物。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 几何尺寸

$d$ —土工合成材料约束桩径；

$l$ —土工合成材料约束桩桩长；

$S$ —土工合成材料约束桩间距；

### 2.2.2 地基承载力

$f_{sk}$ —桩间土承载力特征值；

$f_{spk}$ —土工合成材料约束桩复合地基承载力特征值；

$R_a$ —土工合成材料约束单桩承载力特征值；

### 2.2.3 系数和参数

$A_p$ —土工合成材料约束桩的截面积；

$D_r$ —填充散体材料相对密实度；

$E_{pi}$ —土工合成材料约束桩桩体模量；

$E_{psi}$ —复合地基加固区第  $i$  层复合模量；

$M_D$ —土体滑动力矩；

$M_{RS}$ —土体抗滑力矩；

$M_{RP}$ —土工合成材料约束桩桩体抗滑力矩；

$Q_a$ —土工合成材料约束桩屈曲失稳极限荷载；

$T_{ult}$ —土工合成材料的极限抗拉强度；

$T_a$ —土工合成材料的设计抗拉强度；

$\sigma_{1f}$ —土工合成材料约束桩单轴抗压强度；

$\varphi$ —桩体填充料的内摩擦角；

$m$ —面积置换率。

## 3 基本规定

**3.0.1** 土工合成材料约束桩可用于十字板剪切强度不小于 10kPa 的软土、盐渍化软弱土、湿陷性黄土、液化土等地基处理。

### 条文说明

土工合成材料约束桩由于土工合成材料对填充料的环向约束作用,可有效限制桩体的侧向变形,提高桩身强度、成桩质量。其对地基的适应性强、环保性好、工程造价低、施工速度快,具有诸多的优越性。

土工合成材料约束桩依所填充的材料可分为土工合成材料约束散体材料桩和土工合成材料约束固化土桩。土工合成材料约束散体材料桩一般填充碎石、建筑固废颗粒等散体材料,具有良好的排水功能,不仅可用于软弱地基处理,亦可用于液化粉土地基处理,可及时消散地震等动载引起的超静孔隙水压力。本规程编制组的相关研究表明,土工合成材料约束散体材料桩桩土应力比是普通碎石桩的3~4倍,复合地基沉降较普通碎石桩复合地基可降低30%~60%,承载力可提高40%以上。地基土强度越低,土工合成材料约束桩处理效果越明显。编制组已将其成功应用到地基土十字板剪切强度为8kPa的软基处理工程,但考虑到各种因素的影响,仍推荐地基土十字板剪切强度不宜小于10kPa。

土工合成材料约束固化土桩可填充流态固化土、活性材料混合料(石灰、粉煤灰等),当填充料为流态固化土时,土工合成材料的加筋作用可提高其桩身强度和韧性,与搅拌桩相比,桩体具有强度高、质量可控的特点;当填充料为活性材料混合料时,由于活性材料水化放热并吸收大量水分,可加速土体固结,有利于桩间土强度的提高。同时,活性材料混合料容重较小,有助于减小地基中附加应力并降低沉降。

**3.0.2** 在土工合成材料约束桩复合地基设计与施工前,应查明地基土层分布、成因、工程和水文地质条件,获得相关物理力学参数,收集掌握上部结构及场地环境等资料。

### 条文说明

土工合成材料约束桩复合地基上可能填筑路堤,修筑涵洞、通道、桥梁等。因此,应收集掌握上部结构资料。

**3.0.3** 土工合成材料约束桩复合地基的设计应综合考虑上部结构、荷载、工程和水文地质条件、施工条件、工期等因素，并分段进行。

**3.0.4** 土工合成材料约束桩复合地基施工应编制施工组织方案，确定施工工艺、施工参数及质量控制要求。

**3.0.5** 土工合成材料约束桩复合地基设计应符合下列规定：

1 复合地基设计应进行承载力、沉降、稳定性计算。

2 土工合成材料约束桩由桩周土和桩端土提供的单桩承载力和桩身承载力均应符合设计要求。

3 对重要或地质条件复杂的工程，应在代表性场地上进行相应的现场试验或试验性施工，检验设计参数和处理效果，通过分析优化设计方案。

4 复合地基应按照上部路堤结构、垫层和地基共同作用的原理进行设计。

**3.0.6** 土工合成材料与填充料应符合国家和行业现行相关产品标准及环境保护的要求。

**3.0.7** 施工过程中应进行工程检验，当检验结果未达到设计要求时，应及时查明原因，并采取必要措施。

**3.0.8** 复合地基应保证安全施工，施工中应重视环境效应，并应遵循信息化、智能化施工的原则。

**3.0.9** 土工合成材料约束桩复合地基施工应采用人工监测或自动化监测方法，对施工安全和地基处理效果进行监测。

#### 条文说明

《公路路基设计规范》（JTG D30）、《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/T D31）等对复合地基的承载力、沉降、稳定性等都提出了明确的要求。土工合成材料约束桩用于地基处理只是处理方法的改变。因此，提出了条文所示的要求。

## 4 材料

### 4.1 散体材料

**4.1.1** 填充材料为碎石时，应符合下列要求：

1 碎石应为不易风化的硬质材料，含泥量（即粒径小于 0.075mm 的颗粒）应小于 5%；粒径宜为 20mm~50mm 之间，且级配良好。

2 当桩体主要起排水功能时，碎石填充相对密实度  $D_r$  宜大于 0.6；当桩体主要起承载功能时，碎石填充相对密实度  $D_r$  宜大于 0.7。

**4.1.2** 填充材料为建筑固废时，应符合下列要求：

1 建筑固废材料轻质杂物含量不宜超过 1.0%。

2 建筑固废应为不易风化的硬质材料，含泥量（即粒径小于 0.075mm 的颗粒）应小于 5%；粒径宜为 20mm~50mm 之间，且级配良好。

3 当桩体主要起排水功能时，建筑固废填充相对密实度  $D_r$  宜大于 0.6；当桩体主要起承载功能时，建筑固废填充相对密实度  $D_r$  宜大于 0.7。

4 应评估建筑固废对水文地质环境的影响，确保其符合国家和行业现行有关标准的规定。

5 建筑固废材料在生产加工、储存、运输及使用过程中应遵守国家相关环境保护法律法规。

6 建筑固废材料利用除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

### 4.2 流态固化土

**4.2.1** 流态固化土原料土应符合下列规定：

1 原料土宜采用废弃土，包括砂土、粉土、黏性土等；原料土中块石、混凝土块、砖块等含量不得大于 5%，且粒径不得大于 100mm。采用泵送浇筑时，原料土最大粒径不得超过 40mm。

2 原料土中不得含有木料、植物根系等有机类垃圾。

3 原料土有机质含量不宜大于 5%、氯盐含量不宜大于 5%、硫酸盐含量不宜大于 2%；超过时，应进行试验论证满足相关要求时方可使用。

4 当原料土为污染土时，应进行满足工程设计和环保要求的试验论证。

## 条文说明

在对淤泥、淤泥质土、疏浚土、建筑泥浆、工程开挖土及废弃土等进行堆积处理时多存在占地严重或污染环境等问题,而将上述各类土作为原土用于流态固化土制备并进行工程应用可减少工程废弃物存量,减少工程扬尘。

当原土中有机质含量过高时会影响固化效果,《土壤固化剂应用技术标准》(CJJ/T 286-2018)中规定有机质含量不宜超过 10%,《土壤固化外加剂》(CJT 486-2015)中规定时有机质含量不宜超过 5%,考虑流态固化土被固化材料主要包括淤泥等土质,控制有机质含量过低时不利于促进流态固化土工程应用,因此建议原土的有机质含量(质量比)不超过 5%。

**4.2.2** 拌合用水宜符合《混凝土用水标准》(JGJ 63)的有关规定。

**4.2.3** 固化剂应符合下列规定:

1 固化剂应根据工程要求、施工工艺、土料性质、低碳环保等条件选用,并应符合《土壤固化剂应用技术标准》(CJJ/T 286)的规定。

2 固化剂匀质性指标应满足表 4.2.3 的规定。

**表 4.2.3 固化剂匀质性指标**

序号	项目	指标	试验方法
1	外观	均匀一致,不应有结块	目视法
2	含水率(%)	≤1	GB/T 50123
3	80μm 方孔筛筛余量(%)	≤10	GB/T 1345

3 固化剂初凝时间应不小于 45min,终凝时间不应大于 600min。

4 固化剂中重金属等污染物控制应符合现行国家标准《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600)及行业标准《固体废物再生利用污染防治技术导则》(HJ1091)的有关规定。

5 固化剂掺入比应根据桩体强度设计要求通过试验确定。

## 条文说明

已经有较多规范对固化剂种类、品质等进行了规定。因此,本条引用了《土壤固化剂应用技术标准》(CJJ/T 286)和《自密实固化土填筑技术规程》(T/CECS 1175)的相关条文。

为了响应国家低碳环保相关政策,推荐优先选用工业固废对固化剂进行辅助固化。

#### 4.2.4 流态固化土性能应满足下列规定：

- 1 流态固化土的立方体抗压强度、水稳性应满足设计和施工要求。
- 2 采用泵送方式浇筑时流动度应在 160mm~200mm 范围；采用非泵送方式浇筑时流动度不宜小于 100mm；拌和物的流动性应保证填筑体充盈、无明显孔洞。
- 3 配合比试验开始前，固化剂掺量可按 7%~25%确定，强度要求高时选大值，强度要求低时选小值。正式施工前应通过配合比试验确定固化剂掺量。
- 4 拌和物填筑后在初凝前不应出现显著泌水，出现显著泌水时，应减少用水量、增加固体物质含量或添加增粘剂等添加剂。
- 5 流态固化土除满足上列规定外，尚应满足国家和行业现行有关标准的规定。

#### 条文说明

流态固化土配比设计及抗压强度、水稳性、流动度测定可按照《自密实固化土填筑技术规程》（T/CECS 1175）相关规定进行。

结合已有研究可知目前在流态固化土制备时掺加的外加剂主要是减水剂，因此要求外加剂建议符合《混凝土外加剂应用技术规范》（GB 50119）的规定。由于土性的变异，一种外加剂并不一定适合所有的土料，需要根据土性、技术要求和经济性比较来选取外加剂品种及其用量。

### 4.3 活性材料混合料

当采用生石灰、废石膏、粉煤灰（炉渣、矿渣）三种材料混合料作为填充料时，各原料所占质量可按生石灰 1 份，废石膏 0.05~0.5 份，粉煤灰（炉渣、矿渣）1~2 份进行控制。

#### 条文说明

炉渣、废石膏和石灰混合形成的轻质活性材料，主要固化剂是生石灰。宜优先选用粉煤灰、火山灰、炉渣、废石膏等工业废料掺合料，并推荐生石灰、掺合料的配比宜采用 1：1 或 1：2。

### 4.4 土工合成材料

**4.4.1** 土工合成材料应根据工程所处地质、水文条件以及排水过滤要求、受力要求等进行选择，宜采用透水土工织物；当采用土工格栅时，宜在土工格栅与填充料间设置透水土工织物。土工合成材料应满足表 4.4.1 的要求。

表 4.4.1 土工合成材料要求

序号	性能		要求
1	强度		抗拉强度>30kN/m, 土工织物的加州承载比 (CBR) 顶破强度>2.5kN
2	过滤性能	挡土要求	土工织物等效孔径 $Q_{95}<0.21\text{mm}$
		透水要求	
3	对盐渍土等具有腐蚀性的地基, 不宜使用聚酯类 (涤纶)、聚酰胺类 (尼龙)、玻璃纤维类土工合成材料		

### 条文说明

为保障桩的强度, 减少桩体环向变形, 要求土工合成材料应具有一定的抗拉强度; 为减少填充料对土工织物的刺破, 要求土工织物应具有一定的顶破强度。为避免桩周土污染桩体填充材料, 保障桩体的长期排水性能。因此, 要求土工合成材料应具有良好的透水和过滤的性能。土工格栅往往强度比较高, 但不能起到过滤作用。因此, 当为满足受力要求需要采用土工格栅时, 宜与土工织物配合使用, 在土工格栅与填充料间设置土工织物。土工合成材料原材料不同, 对酸、碱环境的适应性不同。因此, 在选择土工合成材料时, 应考虑地基土、地下水等环境条件对土工合成材料性能的影响。

**4.4.2** 土工合成材料的设计抗拉强度  $T_a$  应按式 (4.4.2) 确定。式中各折减系数应根据所选择的土工合成材料、所处的环境条件和应力水平等, 进行有关试验确定, 无条件时, 可根据工程情况, 按现行《公路工程土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32-2012) 取值。总折减系数  $RF$  宜在 2.0-5.0 之间。

$$T_a = \frac{T_{ult}}{RF} = \frac{T_{ult}}{RF_{CR} \cdot RF_D \cdot RF_{ID}} \quad (4.4.2)$$

式中:  $T_{ult}$ —加筋材料的极限抗拉强度, 按现行《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50-2006) 试验确定

$RF$ —总折减系数;

$RF_{CR}$ —蠕变折减系数;

$RF_D$ —考虑微生物、化学、热氧化等影响的老化折减系数;

$RF_{ID}$ —施工损伤折减系数。

### 条文说明

随着地基排水固结, 地基土强度会逐渐增加, 桩体土工合成材料受力会减小,

相应的蠕变也减弱在地基中,土工合成材料老化主要由微生物、化学等因素引起,尤其是在盐渍土地基中,应考虑这一因素。土工合成材料的施工损伤主要由填充的材料引起,比路基碾压造成的损伤要小许多。考虑到这些特点,并结合《公路土工合成材料应用技术规范》(JTG/TD32)的相关规定,条文提出了表 4.2.2 中的折减系数,供设计时参考。

# 5 设计

## 5.1 一般规定

**5.1.1** 土工合成材料约束桩复合地基设计计算宜按下列步骤进行：

- 1 根据上覆荷载、地质条件、沉降和承载要求，初步确定单桩、复合地基结构型式及参数；
- 2 选择土工合成材料类型和型号，确定填充材料和相关参数，计算桩身强度和模量；
- 3 计算单桩承载力及复合地基承载力、沉降、路堤稳定性；
- 4 根据计算结果，调整土工合成材料强度选型、桩径、桩间距、桩长等至满足承载力、沉降、稳定性设计要求。

**5.1.2** 土工合成材料约束桩复合地基设计计算应根据地质条件、上覆荷载等情况分段，并按地层性质分层进行，不得简化为均质地基。

**5.1.3** 土工合成材料约束固化土桩设计前应根据强度要求对现场弃土和固化剂进行配比试验，确定固化剂、外加剂类型及掺量。

## 5.2 荷载计算

作用于复合地基上的荷载，对涵洞、通道、桥梁，应参照相关标准确定；对路堤荷载，应按下列要求确定：

- 1 沉降计算时应包括路堤自重、路面的增量荷载；路堤高度小于或等于 2.5m 时，应考虑行车动荷载对沉降的影响。
- 2 稳定性验算时，施工期荷载可仅考虑路堤自重；运营期荷载应包括路堤自重、路面的增量荷载、行车荷载、地震荷载。地震力计算可仅考虑水平地震力。
- 3 稳定性验算时行车荷载可按等效的静止土柱作用考虑。等效土柱高度可按单位车辆投影面积上的车辆荷载换算，土柱位置应选择车辆荷载最不利作用位置。
- 4 路基预压或超填时，稳定性验算和沉降计算应包含预压或超填荷载。

### 条文说明

本条引用了现行《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/TD 31）的相关条文。

## 5.3 单桩及复合地基结构形式

**5.3.1** 土工合成材料约束散体桩为土工合成材料筒袋包裹填充料组成，其中填充料可采用碎石、建筑固废等散体材料。

**5.3.2** 土工合成材料约束固化土桩为土工合成材料筒袋包裹固化土组成，其中固化土可采用流态固化土或活性材料混合料。

**5.3.3** 土工合成材料约束桩复合地基宜采用图 5.3.3 所示的结构形式。

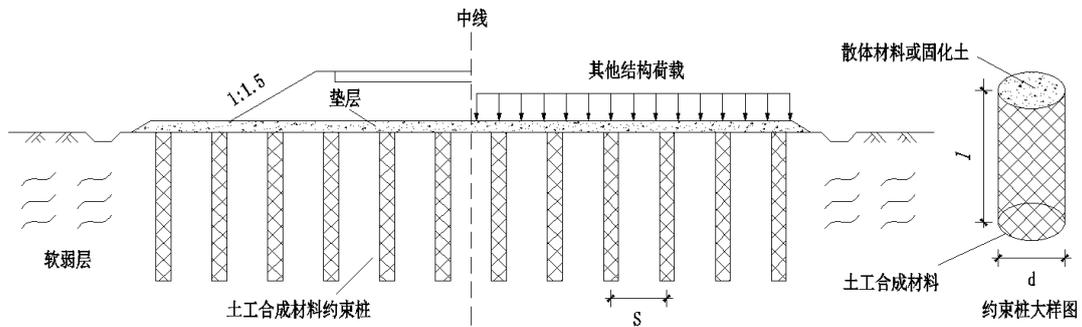


图 5.3.3 土工合成材料约束桩复合地基结构示意图

**5.3.4** 当采用土工合成材料约束固化土桩进行深厚软基浅层处理时，为消除深层沉降，可在桩间打设排水板，其结构布置如图 5.3.4 所示。

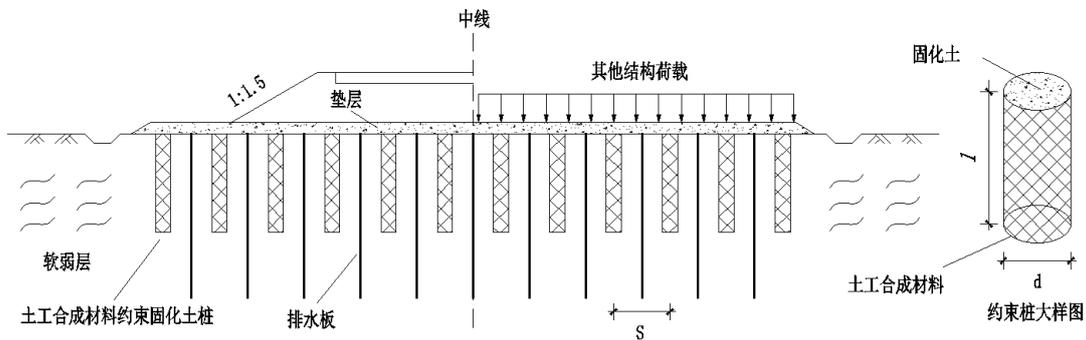


图 5.3.4 土工合成材料约束固化土桩深厚软基浅层处理结构示意图

#### 条文说明

土工合成材料约束固化土桩可在浅层形成硬壳层，解决浅层承载力不足的问题；利用排水板可加速深层沉降。利用上述原理，提出采用土工合成材料约束固化土桩浅层处理联合排水板深层排水处理深厚软基。

**5.3.5** 土工合成材料约束桩的布置方式应符合下列规定：

- 1 桩体平面布设可采用等边三角形、正方形或矩形等方式。
- 2 桩体平面布设范围应根据工程的重要性、场地条件、稳定性和承载要求确定。对软土地基，宜在路基或基础范围外加设 1 排~3 排桩；对液化粉土地基，路基或基础范围外的处治宽度不应小于基底下可液化土层厚度的 1/3，且不应小

于 5m。

3 桩长、桩径和桩间距应根据承载力、沉降、稳定性要求，并结合场地地质条件确定。在初步设计时，桩长、桩径和桩间距宜参考表 5.3.5 取值。

表 5.3.5 土工合成材料约束桩几何尺寸推荐值

桩型	桩长 $l$ (m)	桩径 $d$ (m)	桩间距 $S$ (m)
土工合成材料 散体桩	小于 20m	0.4-0.6, 桥涵基础下可取 0.8	$3d-4d$ , 且不应大于 3m
土工合成材料 固化土桩	小于 15m	0.3-0.5	$3d-4d$ , 且不应大于 3m

4 相对较硬土层埋深较浅时，桩长可按相对较硬土层埋深确定；对液化粉土地基，桩长应按液化处理深度要求确定；对湿地软弱地基，宜采用小长径比桩；对桥涵基础，桩间距宜取小值。

### 条文说明

桩长、桩径和桩间距建议值根据本规程编制组大量的工程实践经验提出，可在初步设计或无类似工程经验时参考采用。

对液化粉土地基，本规程编制组进行了相关数值模拟分析，并建立了孔隙水消散的解析计算方法。通过研究可知：土工合成材料约束散体桩可以较大幅度地提高土层的抗液化能力，距桩中心 1m、2m 和 4m 处，地基基本不产生液化。

**5.3.6** 路堤底面应设置一层与土工合成材料约束桩相连的垫层，垫层的设置应满足下列要求：

1 垫层厚度宜为 0.3m-0.5m。

2 垫层材料可采用碎石、砂砾、石屑、建筑固废颗粒等散体材料，质地应坚硬，粒料中小于 5mm 部分的含泥量应不大于 5%，渗透系数不宜小于  $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。碎石宜采用 5mm~40mm 的天然级配，最大粒径宜不大于 50mm；石屑中粒径小于 2mm 的部分不得超过总质量的 40%。

3 垫层上下可铺设高强度的土工织物、土工格栅；对盐渍土软弱地基，垫层顶面应铺设复合土工膜，复合土工膜应满足《公路土工合成材料应用技术规范》（JTG/TD 32）的相关要求。

4 应根据承载力、沉降、稳定性要求，确定土工合成材料规格，土工合成材料性能及铺设应符合现行《公路土工合成材料应用技术规范》（JTG/TD 32）的相关规定。

## 条文说明

垫层材料的要求是根据本规程编制组的工程经验，并参照《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/TD 31）的相关条文提出的。

在褥垫层中增设土工合成材料，可提高褥垫层的刚度和整体性。工程实际中，多采用高强土工织物、土工格栅和土工格室。高强土工织物、土工格栅通常铺设于褥垫层上下，既起到增强的作用，也可起到隔离作用，保障褥垫层的排水性能。土工格室通常铺设于褥垫层中部，便于形成增强层。对盐渍土软弱地基，铺设复合土工膜可有效阻止地基中的盐分迁移至上部路基，实现对盐分的隔离。《公路土工合成材料应用技术规范》（JTG/TD 32）对采用土工合成材料进行盐分迁移隔离，以及土工合成的铺设有明确的规定。为此，条文提出应符合其相关的规定。

### 5.4 承载力计算

**5.4.1** 复合地基承载力特征值应通过复合地基载荷试验，或综合增强体载荷试验和桩间土地基载荷试验，并结合工程经验综合确定。初步设计时，可按式（5.4.1）进行计算：

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (5.4.1)$$

式中， $f_{spk}$ —复合地基承载力特征值（kPa）；

$f_{sk}$ —桩间土承载力特征值（kPa）；

$R_a$ —单桩承载力特征值（kN）；

$A_p$ —桩的截面积（ $m^2$ ）；

$m$ —面积置换率， $m = d^2 / d_e^2$ ；

$d$ —桩径（m）；

$d_e$ —单根桩分担的地基处理面积等效圆直径（m）；

$\beta$ —桩间土承载力折减系数，当桩端土未经修正的承载力特征值大于桩周土的承载力特征值的平均值时，可取 0.1~0.4，差值大时取低值；当桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土的承载力特征值的平均值时，取 0.5~0.9，差值大时或设置垫层时取高值。

## 条文说明

由于土工合成材料的约束,土工合成材料约束桩更具有加固土类柔性桩的特征,为此条文引用了《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD 31)中加固土桩复合地基承载力估算式。

**5.4.2** 单桩承载力特征值应通过现场载荷试验确定,初步设计时可按式(5.4.2-1)估算,并应同时满足式(5.4.2-2)的要求。

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (5.4.2-1)$$

$$R_a \leq \sigma_{1f} A_p \quad (5.4.2-2)$$

式中,  $u_p$ —桩的截面周长(m);

$q_{si}$ —桩周第*i*层土的侧阻力特征值(kPa);

$q_p$ —桩周第*i*层土的桩端端阻力特征值(kPa);

$l_i$ —第*i*层土的厚度(m);

$\alpha$ —桩端端阻力发挥系数,可取0.4~0.6,桩端地基承载力高时取低值;

$A_p$ —桩端面积(m<sup>2</sup>);

$\sigma_{1f}$ —桩体单轴抗压强度,按式5.4.3中相关规定计算。

**5.4.3** 桩体单轴抗压强度可按照下列方法确定:

1 土工合成材料约束散体桩单轴抗压强度应通过试验确定,初步设计时可按式(5.4.3-1)计算。

$$\sigma_{1f} = \eta \frac{2T_a}{(1 + \varepsilon_r)d} \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5.4.3-1)$$

式中:

$T_a$ —土工合成材料设计抗拉强度(kN/m),应按式(4.4.2)确定;

$\varepsilon_r$ —抗拉强度对应的土工合成材料应变;

$d$ —桩径(m);

$\varphi$ —桩体填充材料的内摩擦角(°);

$\eta$ —桩体强度修正系数,应根据桩体强度试验取值,无实测资料时可取0.7。

2 土工合成材料约束固化土桩单轴抗压强度应通过试验确定,初步设计时可按式(5.4.3-2)计算。

$$\sigma_{\text{if}} = \lambda \left[ \frac{2T_a}{(1 + \varepsilon_r)d} \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi_h}{2} \right) + 2c_h \tan \left( 45 + \frac{\varphi_h}{2} \right) \right] \quad (5.4.3-2)$$

式中： $\lambda$ —桩体强度修正系数，应根据桩体强度试验取值，无实测资料时可取 0.8；

$\varepsilon_r$ —抗拉强度对应的土工合成材料应变；

$d$ —桩径（m）；

$\varphi_h$ —固化土内摩擦角（°）；

$c_h$ —固化土黏聚力（kPa）。

### 条文说明

为研究填充材料相对密实度和土工合成材料强度对约束桩桩体力学特性的影响，本指南编制组选择级配良好的碎石（颗粒特性见表 5.4.3），制备了 3 种相对密实度（42%、62%、78%）、5 种土工织物强度（33kN/m，43kN/m，52kN/m，65kN/m、98kN/m）、直径=300mm 和高度=600mm 的土工合成材料约束散体桩，对其进行单轴压缩试验，得到图 5.4.3-1 和图 5.4.3-2 的结果。

表 5.4.3 碎石颗粒级配特性

不同粒组（mm）含量（%）					控制粒径		
60-40	40-20	20-10	10-5	<5	$d_{60}$	$d_{30}$	$d_{10}$
15	36	25	10	14	26.1	12.4	3.57

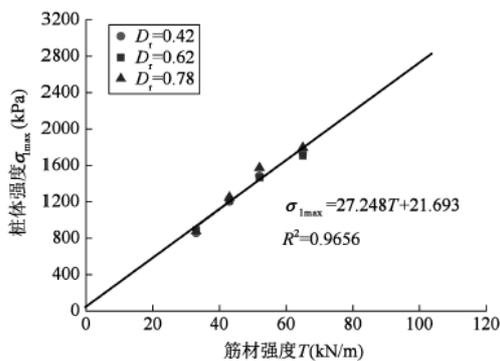


图 5.4.3-1 桩身强度-织物强度关系

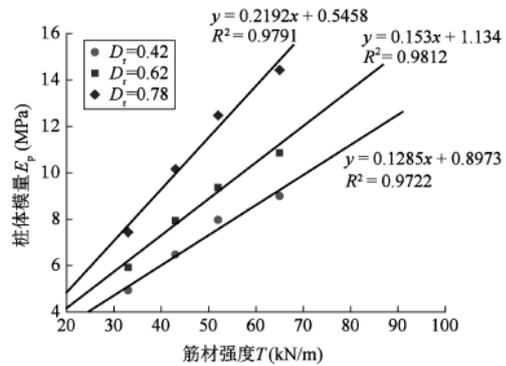


图 5.4.3-2 桩身模量-织物强度关系

结果表明：碎石相对密实度对桩体强度影响很小，桩身强度与织物强度基本呈线性关系，增加土工织物强度能明显提高桩体强度；碎石相对密实度的提高会增大桩体模量。在土工织物强度小于 70kN/m 时，桩体模量随土工织物强度呈线性增大。

根据上述试验研究，结合大量的工程实践，参照相关规范，提出了条文所示

土工合成材料，以及填充料材质、含泥量、粒径等要求。

相对密实度  $D_r$  达到 0.7 时，填充碎石处于中密至密实状态，这样的密度也便于施工。基于此，提出当桩体主要起排水功能时，碎石填充相对密实度  $D_r$  宜大于 0.6；当桩体主要起承载功能时，碎石填充相对密实度  $D_r$  宜大于 0.7。

取折减系数  $\eta=1$ ，将采用式 (5.4.3-1) 计算的结果与本指南编制组开展的土工合成材料约束散体桩桩体 16 组大三轴试验和 34 组单轴试验结果进行对比，得到图 5.4.3-3 的结果。由图可见，桩体强度理论值与试验值之间具有较好的线性拟合关系，但试验值是理论值的 0.67 倍。这是由于实际桩体在轴向荷载作用下，其中间部位发生剪胀或鼓胀破坏，只有该部位土工合成材料达到抗拉强度，而其他部位并没有达到抗拉强度，修正后得到 (5.4.3-1) 中折减系数  $\eta=0.67$ ，修正后的结果如图 5.4.3-4 所示，数据点均集中在 1:1 线上及附近。为偏安全，条文取  $\eta=0.7$ 。同理，根据土工合成材料约束固化土桩试验结果得到 (5.4.3-2) 中折减系数  $\lambda=0.8$ 。

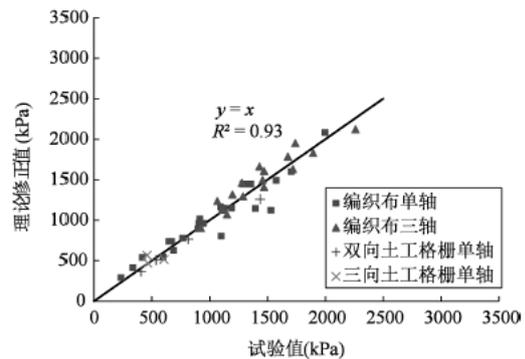
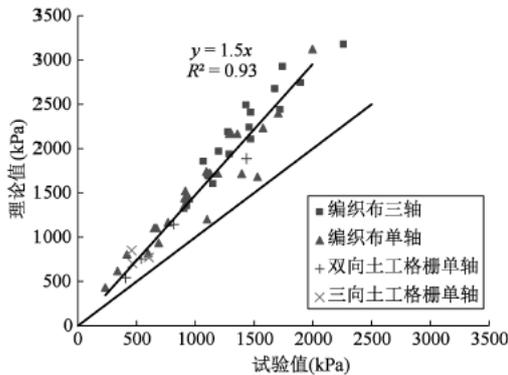


图 5.4.3-3 桩体强度理论值与试验值 图 5.4.3-4 桩体强度理论修正值与试验值

5.4.4 长径比较大或地基土较软时，单桩承载力除按照 5.4.2 中规定进行计算外，尚应进行桩体屈曲失稳条件下承载力验算。

### 条文说明

现场试验、离心模型试验、数值模拟均表明，当桩体长径比较大且软土不排水抗剪强度较低时，桩体会出现屈曲失稳破坏，因此，确定单桩承载力特征值时需考虑屈曲失稳模式。

桩体屈曲失稳荷载  $Q_a$  应通过现场载荷试验确定，初步设计时宜按式 (5.4.4-1) 估算。

$$Q_a = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} + \frac{32mdl^2}{\pi^2} \left( \frac{3}{8} - \frac{1}{\pi} \right) - \frac{\gamma Al}{2\pi^2} (\pi^2 - 4) + \frac{\tau Ul (\pi^2 - 4)}{2\pi^2} \quad (5.4.4-1)$$

式中： $EI$ -桩身抗弯强度；

$l$ -桩长；

$m$ -为地基土水平抗力系数，计算方法按照现行《建筑桩基技术规范》（JGJ 94）的有关规定确定；

$\gamma$ -桩身重度；

$d$ -桩径；

$\tau$ -单位面积侧摩阻力；

$U$ -桩身截面周长。

经大量试验和数值分析表明，桩体受弯时抗弯刚度会随荷载、桩体填充料和土工合成材料而变化，该值需通过试验测定，无实测数据时，宜按式（5.4.4-2）计算。

$$EI = E_c I_c + E_t I_t \quad (5.4.4-2)$$

式中， $E_c$ -桩体填筑材料压缩模量；

$I_c$ -受压区惯性矩；

$E_t$ -土工合成材料拉伸模量；

$I_t$ -受拉区惯性矩。

受压区惯性矩宜按公式（5.4.4-3）计算：

$$I_c = 2 \int_{x_0}^R (x - x_0)^2 \cdot \sqrt{R^2 - x^2} dx \quad (5.4.4-3)$$

$I_t$ 为受拉区惯性矩，宜按公式（5.4.4-4）计算：

$$I_t = 2hr \left[ \int_0^{\frac{\pi}{2}} (r \sin \theta + x_0)^2 d\theta + \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} (x_0 - r \cdot \cos \theta)^2 d\theta \right] \quad (5.4.4-4)$$

中性轴需根据试验确定，无试验数据时，可取距中性轴 $0.2d$ 。

## 5.5 沉降计算

**5.5.1** 复合地基沉降包括复合地基加固区的沉降与加固区下卧层地基的沉降，应计算至附加应力与有效自重应力之比不大于 0.15 处。

$$s = s_1 + s_2 \quad (5.5.1)$$

式中， $s$ -复合地基最终沉降量（cm）；

$s_1$ —复合地基加固区的沉降量 (cm)；

$s_2$ —复合地基加固区下卧层的沉降量 (cm)。

### 条文说明

对复合地基沉降，目前多采用加固区和下卧层分别计算，然后累加的方法。

**5.5.2** 复合地基加固区的沉降量宜按式 (5.5.2) 计算。

$$S_1 = \sum_1^n \frac{\Delta\sigma_i H_i}{E_{psi}} \quad (5.5.2)$$

式中， $\Delta\sigma_i$ —第  $i$  层土上附加应力 (kPa)；

$H_i$ —第  $i$  层土层的厚度 (cm)；

$E_{psi}$ —复合地基加固区第  $i$  层复合模量 (kPa)， $E_{psi} = mE_{pi} + (1-m)E_{si}$ ；

$E_{pi}$ —第  $i$  层桩体压缩模量 (kPa)；

$E_{si}$ —第  $i$  层桩间土压缩模量 (kPa)；

$m$ —面积置换率。

### 条文说明

对加固区内土层的沉降量，目前主要有复合模量法、应力修正法、桩身压缩量法等方法。应力修正法根据桩间土分担的荷载，按照桩间土的压缩模量，采用分层总和法计算加固区土层的沉降量，此种方法形式简单，但在设计计算中应力修正系数难以合理确定，且桩土应力比影响因素众多，计算得到的沉降量往往偏大。桩身压缩量法通过计算桩身压缩量来计算复合地基沉降，虽概念清楚，但在计算桩身压缩量和桩底端刺入下卧土层的刺入量时，会遇到两方面的问题：一是桩身压缩量与桩体轴力沿深度分布规律有关，而桩体轴力与荷载分担比、桩土相对刚度等因素有关，这使得计算桩体轴力沿深度分布比较困难；二是桩底端刺入下卧土层的刺入量计算模型很多，工程实用性较差。为此，目前大多采用复合模量法计算加固区沉降。

对散体材料桩和柔性桩复合地基加固区沉降，《复合地基技术规范》(GB/T 50783) 和《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD 31) 也采用了复合模量法，本规程引用了这一方法。

**5.5.3** 加固区下卧层地基的沉降量可按现行《建筑地基基础设计规范》(GB

50007) 的有关规定计算。

**5.5.4** 土工合成材料约束桩的桩身模量计算，应符合下列规定：

1 土工合成材料约束散体桩桩体模量应通过试验确定，初步设计时可按式(5.5.4-1)计算。

$$E_{pi} = k_g \frac{\left[ k_{si} \sigma_{vsi} + \frac{T_a}{(1 + \varepsilon_r)d} \right] \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}{1 - \frac{\rho_{d0}}{\rho_{d\max}(1 + \varepsilon_r)^2}} \quad (5.5.4-1)$$

式中： $k_g$ —桩体模量修正系数，宜根据当地工程应用经验确定，无相关资料时可取 1.45；

$k_{si}$ —第  $i$  层桩间土侧压力系数；

$\sigma_{vsi}$ —第  $i$  层桩间土平均竖向应力 (kPa)；

$\rho_{d\max}$ —桩身散体材料最大干密度；

$\varphi$ —桩身散体材料的内摩擦角 ( $^\circ$ )；

$\rho_{d0}$ —桩身散体材料干密度。

2 土工合成材料约束固化土桩桩体模量应通过试验确定，初步设计时可按式(5.5.4-2)计算。

$$E_{pi} = k_s E_g \quad (5.5.4-2)$$

式中： $k_s$ —桩体模量修正系数，宜根据当地工程应用经验确定，无相关资料时可取 1.25。

$E_g$ —固化土压缩模量 (kPa)。

### 条文说明

取折减系数  $k_g=1$ ，将采用式(5.4.4-1)计算的结果与编制组开展的土工合成材料约束散体桩桩体 16 组大三轴试验和 41 组单轴试验结果进行对比，得到图 5.5.4-1 的结果。由图可见，桩体模量理论值与试验值之间具有较好的线性关系，试验值是理论值的 1.45 倍。其原因在压缩试验时，桩体中间部位发生剪胀或鼓胀破坏，而其他部位土工合成材料并没有达到抗拉强度对应的应变，使得试验中桩体的径向应变要比理论公式假设的径向应变小，从而轴向应变也小；同时，试

验中的桩体在破坏时其填充材料还未完全达到理论假定的最大干密度。修正后得到 (5.4.4-1) 中折减系数  $k_g=1.45$ ，修正后的结果如图 5.5.4-2 所示，数据点均集中在 1:1 线上及附近。

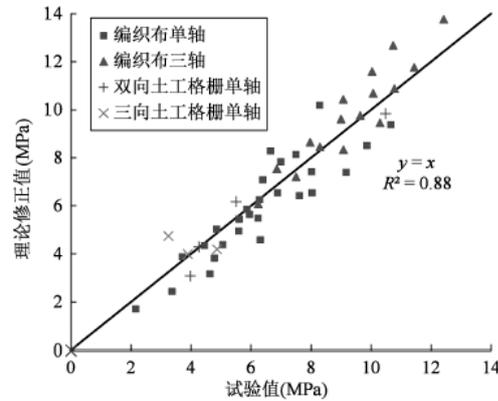
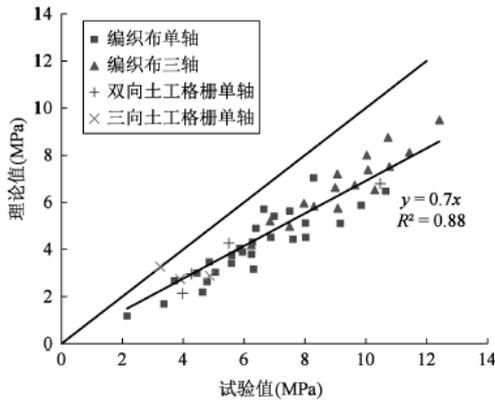


图 5.5.4-1 桩体模量理论值与试验值 图 5.5.4-2 桩体模量理论修正值与试验值

采用相同的方法得到土工合成材料约束固化土桩桩体模量与固化土模量存在线性关系，且得到 (5.4.4-2) 中折减系数  $k_g=1.25$ 。

**5.5.5** 当采用土工合成材料固化土短桩-排水板复合地基时应满足下列要求：

- 1 排水板打设深度应满足附加应力与有效自重应力比小于等于 0.15。
- 2 沉降计算除应计算最终沉降外，尚应计算施工期排水板打设深度范围内固结度和固结沉降，并验算工后沉降是否满足设计要求。

## 5.6 固结度计算

**5.6.1** 土工合成材料约束散体桩复合地基固结应包括竖向固结与水平向固结两部分；土工合成材料约束固化土桩复合地基固结只考虑竖向固结。可采用太沙基固结理论计算。

### 条文说明

土工合成材料具有良好的透水性，故桩体排水特性主要取决于桩体填充料。对于土工合成材料约束固化土桩，忽略其桩体排水能力，视其为不排水桩；对于土工合成材料约束散体桩，视其为排水桩。

**5.6.2** 复合地基平均固结度计算应符合下列规定：

- 1 竖向固结条件下，土工合成材料约束散体桩和固化土桩复合地基竖向平均固结度  $U_v$  可按式 (5.6.2-1) -式 (5.6.2-4) 计算。

$$U_v = \frac{2\alpha U_0 + (1-\alpha)U_1}{1+\alpha} \quad (5.6.2-1)$$

$$U_0 = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} + \frac{1}{25} e^{-25N} + \dots \right) \quad (5.6.2-2)$$

$$U_1 = 1 - \frac{32}{\pi^3} \left( e^{-N} - \frac{1}{27} e^{-9N} + \frac{1}{125} e^{-25N} - \dots \right) \quad (5.6.2-3)$$

$$N = \frac{\pi^2}{4} \frac{C_v}{H^2} t \quad (5.6.2-4)$$

式中： $\alpha$ —排水面处的附加应力与不透水面处的附加应力之比；

$C_v$ —竖向固结系数（ $\text{m}^2/\text{s}$ ）；

$H$ —孔隙水的最大渗径（ $\text{m}$ ），单面排水时取压缩层的厚度，双面排水时取压缩层厚度的一半；

$t$ —固结时间（ $\text{s}$ ）。

2 土工合成材料约束散体桩复合地基径向固结度  $U_r$  可按式（5.6.2-5）-式（5.6.2-7）计算：

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8T_r}{F_n}} \quad (5.6.2-5)$$

$$T_r = \frac{C_r}{d_e^2} t \quad (5.6.2-6)$$

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (5.6.2-7)$$

式中： $C_r$ —径向固结系数（ $\text{m}^2/\text{s}$ ）；

$n$ —井径比，即桩体的有效排水直径  $d_e$  与桩体的直径  $d$  之比；

$d_e$ —桩体的有效排水直径（ $\text{m}$ ），当桩体在平面上为正方形布置时， $d_e = 1.128S$ ；

当为等边三角形布置时， $d_e = 1.05S$ ；

$S$ —桩间距（ $\text{m}$ ）。

3 土工合成材料约束散体桩复合地基总的平均固结  $U$  可按式（5.6.2-8）计算。

$$U = 1 - (1 - U_r)(1 - U_v) \quad (5.6.2-8)$$

4 土工合成材料约束散体桩复合地基以下地基的固结度应按 $U_v$ 计算， $U_v$ 的排水距离 $H'$ 可按式（5.6.2-9）计算。

$$H' = \left( 1 - \xi \frac{H_1}{H_1 + H_2} \right) (H_1 + H_2) \quad (5.6.2-9)$$

$$\xi = 1 - \sqrt{\frac{\pi^2 C_v / (2H)^2}{\pi^2 C_v / (2H)^2 + 8C_r / (F_n d_e^2)}} \quad (5.6.2-10)$$

式中： $H_1$ 、 $H_2$ —桩体深度及桩体以下压缩土层厚度（m）。

5 地基平均固结度可采用改进的太沙基法或改进的高木俊介法修正。

6 采用改进的太沙基法时，多级等速加载下修正后的地基平均固结度 $U_t'$ 可按式（5.6.2-11）计算。

$$U_t' = \sum_{i=1}^n U_{t(t-t_{i-1})} \frac{\Delta p_i}{\sum \Delta p_t} \quad (5.6.2-11)$$

式中： $t_i$ 、 $t_{i-1}$ —各级等速加载的起点和终点时间（d），当 $t$ 在某一级等速加载的过程中时，取 $t_i = t$ ；

$\Delta p_i$ —第 $i$ 级等速加载的荷载增量，当 $t$ 在某一级等速加载的过程中时，用该点的荷载增量（kPa）；

$\sum \Delta p_t$ — $t$ 时 $n$ 级荷载的累加（kPa）。

7 采用改进的高俊介法时，多级等速加载下修正后的地基平均固结度 $U_t'$ 宜按式（5.6.2-12）计算：

$$U_t' = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\sum \Delta p_t} \left[ (t_i - t_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta t_i} - e^{\beta t_{i-1}}) \right] \quad (5.6.2-12)$$

式中： $q_i$ —第 $i$ 级荷载平均加载速率（kPa/d）；

$\alpha$ 、 $\beta$ —参数，宜按表 5.6.7 取值。

表 5.6.7  $\alpha$ 、 $\beta$  值

排水固结条件	竖向排水固结 $U_v > 30\%$	径向排水固结	竖向和径向排水固结 (砂井贯穿土层)	砂井未贯穿 土层固结
$\alpha$	$8/\pi^2$	1	$8/\pi^2$	$8Q/\pi^2$



5.7.2 土体滑动力矩  $M_D$  宜按式 (5.7.2) 计算。

$$M_D = \left[ \sum_{i=1}^n (W_i + q_i b_i) \sin \theta_i \right] R_d \quad (5.7.2)$$

式中,  $W_i$ —第  $i$  土条的重力 (kN) ;

$b_i$ —第  $i$  土条的宽度 (m) ;

$q_i$ —行车荷载的等效均布荷载 (kN/m) ;

$R_d$ —圆弧滑动半径 (m) ;

$\theta_i$ —第  $i$  土条滑弧面中点处的法线与垂直面的夹角 ( $^\circ$ ) 。

5.7.3 土体抗滑力矩  $M_{RS}$  根据地基土采用不同的强度指标, 计算时应符合下列规定:

1 当地基土强度采用直剪快剪、固结快剪, 或三轴剪不排水剪、固结不排水剪指标, 并可获得地基平均固结度时, 土体抗滑力矩  $M_{RS}$  宜按式 (5.7.3-1) 计算:

$$M_{RS} = \left\{ \sum_A^B \left[ \left( c_{qi} L_i + W_{1i} \cos \theta_i \tan \varphi_{qi} + U (W_{2i} + q_i b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{cqi} \right) \right] + \sum_B^C (c_{qi} L_i + (W_{2i} + q_i b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{qi}) \right\} R_d \quad (5.7.3-1)$$

式中,  $c_{qi}$ 、 $\varphi_{qi}$ —第  $i$  土条滑弧面处, 地基土或路堤填料的黏聚力 (kPa) 和内摩擦角 ( $^\circ$ ) ;

$\varphi_{cqi}$ —第  $i$  土条滑弧面处, 地基土的内摩擦角 ( $^\circ$ ) ;

$L_i$ —第  $i$  土条滑弧的长度 (m) ;

$W_{1i}$ —第  $i$  土条地基部分的重力 (kN) ;

$W_{2i}$ —第  $i$  土条路堤部分的重力 (kN) ;

$U$ —地基的平均固结度。

2 当地基土强度十字板强度或静力触探强度指标, 并可获得地基平均固结度时, 土体抗滑力矩  $M_{RS}$  宜按式 (5.7.3-2) 计算:

$$M_{RS} = \left\{ \sum_A^B \left[ (S_{ui} L_i + U m_i (W_{2i} + q_i b_i) \cos \theta_i) + \sum_B^C (c_{qi} L_i + (W_{2i} + q_i b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{qi}) \right] \right\} R_d \quad (5.7.3-2)$$

式中,  $S_{ui}$ —第  $i$  土条滑弧面处, 地基土十字板试验得到的抗剪强度 (kPa) ,

或由静力触探试验的贯入阻力（单桥探头）、锥尖阻力（双桥探头）换算的十字板抗剪强度；

$m_i$ —地基土层强度增长系数，对泥炭土可取 0.35，对泥炭质土可取 0.20，对有机质土可取 0.25，对黏质土可取 0.30，对粉质土可取 0.25；

3 当地基土强度采用有效应力强度指标，并可获得地基土孔隙水压力时，土体抗滑力矩  $M_{RS}$  宜按式（5.7.3-3）-式（5.7.3-5）计算：

$$M_{RS} = \left\{ \sum_A^B \left[ \frac{(c_i b_i + (W_{1i} + W_{2i} + q_i b_i - u_i b_i) \tan \varphi_i) / m_{1\alpha i}}{\sum_B^C (c_{qi} L_i + (W_{2i} + q_i b_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{qi}) / m_{2\alpha i}} \right] \right\} R_d \quad (5.7.3-3)$$

$$m_{1\alpha i} = \cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i / F_{sc} \quad (5.7.3-4)$$

$$m_{2\alpha i} = \cos \alpha_i + \tan \varphi_{qi} \sin \alpha_i / F_{sc} \quad (5.7.3-5)$$

式中， $c_i$ 、 $\varphi_i$ —第  $i$  土条滑弧面处，由三轴试验测得的地基土有效黏聚力(kPa)和有效内摩擦角（°）；

$u_i$ —第  $i$  土条滑弧面处，地基土的孔隙水压力（kPa）。

### 条文说明

对圆弧条分法而言，也有不同的计算方法。《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/TD 31）主要推荐了有效固结应力法、改进总强度法、简化毕肖普法三种方法。这三种方法的主要区别在于土体抗滑力矩 MRS 的计算、条间力的考虑以及采用的抗剪强度指标。对有效固结应力法，当不考虑地基固结带来的强度增长时，即传统的瑞典条分法。为与《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/TD 31）衔接并参照该细则，对土体抗滑力矩 MRS 的计算，条文列出了三种计算方法，式（5.7.3-1）对应有效固结应力法，式（5.7.3-2）对应改进总强度法，式（5.7.3-2）对应简化毕肖普法。

**5.7.4 桩体抗滑力矩  $M_{RP}$  宜按式（5.7.4）计算：**

$$M_{RP} = \zeta T_a d^2 \quad (5.7.4)$$

式中， $T_a$ —土工合成材料设计抗拉强度（kN/m）；

$d$ —桩径（m）；

$\zeta$ —抗弯承载力修正系数，可取为 0.35~0.5，采用低延伸率土工合成材料时

取高值，采用高延伸率土工合成材料取低值。

### 条文说明

工程实践表明，对土工合成材料约束桩，采用桩体抗剪强度计算得到的稳定系数较采用抗弯力矩偏大，偏于不安全，故采用抗弯力矩更为合理，抗弯刚度需开展试验确定，初步设计时可按（5.4.4-2）计算。

**5.7.5** 土工合成材料约束桩复合地基路堤稳定系数应满足表 5.7.5 的稳定安全系数要求。

**表 5.7.5 稳定安全系数要求值**

指标	土体抗滑力矩 $M_{rs}$ 计算方法				
	式 (5.7.3-1)		式 (5.7.3-2)		式 (5.7.3-3)
	不考虑固结	考虑固结	不考虑固结	考虑固结	
直剪快剪、三轴 不排水剪切	1.1	1.2	—	—	—
静力触探、十字 板剪切	—	—	1.2	1.3	—
三轴有效剪切	—	—	—	—	1.4

注：表中所列的稳定安全系数未考虑地震影响。当需考虑力时，表列稳定安全系数减小 0.1。

### 条文说明

不论采用何种地基处理方法，都应当达到需要的稳定安全系数要求。考虑到采用不同的计算方法及抗剪强度指标，计算得到的稳定系数值不同，以及与《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/TD 31）的衔接，本条引用了该细则的稳定安全系数要求值。

## 5.8 特殊地质条件下设计

**5.8.1** 在盐渍土地基时，土工合成材料约束桩应符合以下标准：

1 对盐渍土软弱地基，垫层上宜铺设隔水层材料，宜采用土工合成材料中的复合土工膜或土工膜。采用二布一膜的复合土工膜时，可不设上、下保护层；采用一布一膜的复合土工膜时，可仅在有膜的一面设保护层；采用单层土工膜时，应设上、下保护层。保护层材料宜采用砂料，其粉粒和黏粒含量应小于 15%。

2 桩体材料不宜使用风化易碎的石料、砂料和石灰、水泥混合料。

**5.8.2** 在湿陷性黄土地基时，土工合成材料约束桩应符合以下标准：

1 在湿陷性黄土场地选用土工合成材料约束桩时，应根据工程要求、场地湿陷类型、湿陷性黄土层厚度、桩端持力层的土质情况、施工条件和场地周围环境

等因素综合确定。

2 湿陷性黄土场地的土工合成材料约束桩，其桩端必须穿透湿陷性黄土层，并应选择压缩性较低的岩土层作为桩端持力层。

**5.8.3** 在可液化地基时，土工合成材料约束桩应符合以下标准：

1 所选用土工合成材料的品种与性能及填料，应根据工程特性和地基土质条件，按照现行国家标准《土工合成材料应用技术规范》（GB 50290）的要求，通过设计计算并进行现场试验后确定。土工合成材料应采用抗拉强度高、耐久性好、抗腐蚀的土工带、土工格栅、土工格室、土工垫或土工织物等土工合成材料。垫层填料宜用碎石、角砾等，且不宜含氯化钙、碳酸钠、硫化物等化学物质。当工程要求垫层具有排水功能时，垫层材料应具有良好的透水性。

2 宜选用土工合成材料约束散体桩，填料应为排水性能良好的散体颗粒，应级配良好，不含植物残体、垃圾等杂质。

# 6 施工

## 6.1 一般规定

6.1.1 施工材料应分类堆放，妥善保管。

6.1.2 土工合成材料约束桩复合地基施工工艺流程宜按照图 6.1.2 进行。

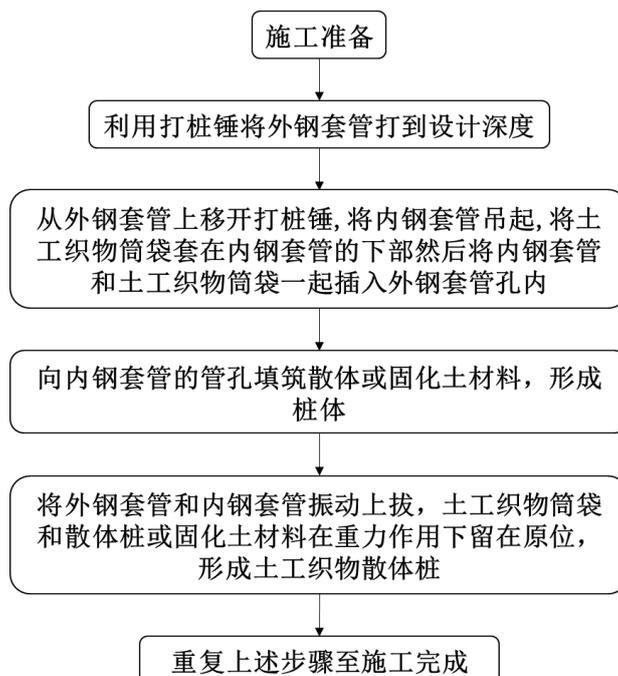


图 6.1.2 施工工艺流程图

6.1.3 施工过程中应贯彻边观察、边分析的动态控制方法。当设计与实际不符时，应及时提出书面报告；必要时，应停工等待处理。

6.1.4 应做好施工原始记录和必要的观测记录。

6.1.5 施工完成后，应根据设计要求进行一定时间的持续观测。

## 6.2 施工准备

6.2.1 施工前应做好下列准备工作：

1 场地平整。施工范围内的场地应平整、无障碍。地表土质较差、承载力较低时，宜采取铺设垫层等措施以满足施工设备的正常移动。

2 材料准备。按设计要求选择土工合成材料、桩体填充料等。

3 施工放样。按设计文件放出桩位并编号，并预留施工车辆通道。

4 施工设备。宜采用专门的桩机进行施工，施工前，应对设备进行检查和调试。

**6.2.2** 应加强土工合成材料运输、工地储存、施工中的管理。材料运送过程中应有封盖，存放场地应通风干燥，严禁日光照射并应远离火源，施工中应避免对土工合成材料的损伤。

**6.2.3** 土工合成材料筒袋制作应符合下列要求：

1 土工织物筒袋应比钢套筒长 10cm~15cm，宜采用圆织机编织成的无缝筒袋。如采用缝制筒袋，应采用工业缝纫机缝制，所用尼龙线的强度不得小于 150N，接缝方法宜采用丁形接缝或蝶形接缝，如图 6.2.2 所示。接缝处强度不应小于土工织物拉伸强度。

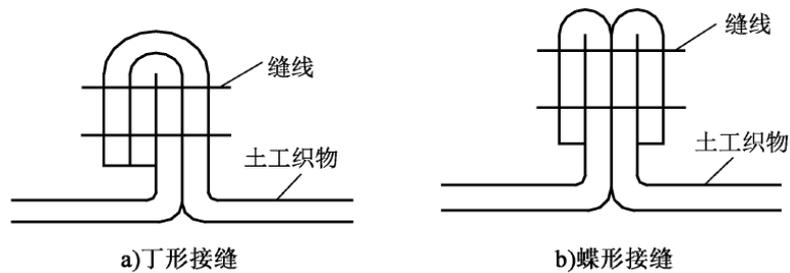


图 6.2.2 土工织物缝接方式

2 土工格栅筒袋宜采用尼龙带缠绕搭接处或采用尼龙搭扣搭接，尼龙带或尼龙搭扣的强度不应小于土工格栅的拉伸强度。

**6.2.4** 钢套筒制作应符合下列要求：

1 钢套筒宜采用 45 号中碳钢热轧无缝钢管。

2 钢套筒壁厚宜为 10mm~12mm，内径应不小于设计桩径，长度应不小于设计桩长，自带活瓣靴的钢套筒长度应包括下端活瓣靴打开后的长度。

3 活瓣靴宜为 3 瓣~5 瓣，长度宜为 30cm~50cm。

4 钢套筒与活瓣靴宜焊接相连，焊缝应饱满、平整和光滑。

**6.2.5** 施工前应进行成桩试验，确定桩体填充料填量、振动频率、成桩工艺等，检验成桩质量；当成桩质量不能满足设计要求时，应调整设计与施工参数，并重新试验。

**6.2.6** 成桩试验的桩数及填充料的充填量应符合下列要求：

1 成桩试验的桩数：当桩采用正三角形布桩时，应不少于 7 根（中间 1 根，周围 6 根）；当采用正方形布桩时，应不少于 9 根（按三排三列布桩）。

2 填充料的充填量可按设计桩孔体积乘以充盈系数确定，充盈系数可取 1.05~1.15。如施工中地面有下沉或隆起现象，则填料数量应根据现场具体情况予

以增减。

### 6.3 施工工艺

**6.3.1** 土工合成材料约束桩应采用振动沉管法进行施工，施工方法可采用置换法和钻挖法。当采用置换法时，钢套管下端应设置活瓣靴或一次性混凝土锥形桩尖；采用钻挖法时，可采用开口钢套管，并配置螺旋取土器。

**6.3.2** 土工合成材料约束桩应按以下工序进行施工：

1 土工织物筒袋准备和钢套管准备。

2 桩机就位。将桩机移到指定位置，调平桩机并将锤尖对好桩位。

3 穿放土工合成材料筒袋。在钢套管内穿放土工合成材料筒袋。对自带活瓣的钢套管，下夹集锁扣；对不自带活瓣的钢套管，将土工合成材料筒袋边口压放在一次性混凝土锥形桩尖顶部。

4 打入钢套管。启动打桩机振动锤，将钢套管打到设计深度，并做好长度标记，钢套管倾斜度不得超过 1%。当遇到粉土、细砂等土层时，可在钢套管外侧增加高压冲水装置，降低桩尖阻力。

5 灌入填充料。从打桩机下料口向钢套管中的土工合成材料筒袋内灌入填充料，并开启振动锤，边振动边灌填，直至装填满。

6 拔出钢套管。装料完毕并振动 1min 左右后，边振动边上拔钢套管。上拔速度宜为 1m/min~2m/min，每拔起 2m 左右留振 30s，直至钢套管拔出地面。

7 成桩移位。单根桩施工完成后，桩机移位，进行下一根桩的施工。

条文说明

土工合成材料筒袋与钢套管的关系如图 6.3.3 所示。内套环和外套环用以固定和撑开土工合成材料套筒的上口端，钢套管主要作用为了挤土成孔。

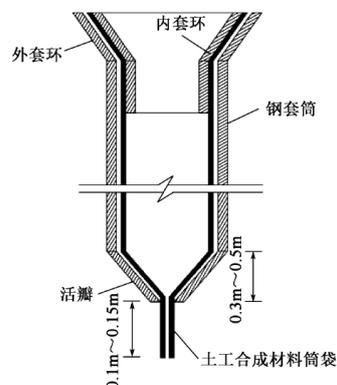


图 6.3.3 土工合成材料筒袋与钢套管关系示意图

**6.3.3** 土工合成材料约束桩宜从处理地基范围中间向外围或间隔跳打。在邻近既有建筑施工时，应背离建筑物方向进行。

**6.3.4** 土工合成材料约束桩施工后，应将场地表面松散桩体清除或夯压密实，并按设计要求铺设排水垫层。垫层施工应符合以下要求：

1 垫层施工作业应在桩体施工完成并检验合格后进行。

2 垫层施工前，应清理平整场地，将场地表面松散桩体清除。

3 垫层宜采用机械碾压施工，碾压工艺和分层摊铺厚度应根据现场试验确定。压实遍数不宜少于 4 遍。

4 土工合成材料铺设时，其纵向应置于垂直路线方向，并根据设计要求确定剪裁长度，尽量避免纵向连接；必须连接时，连接处强度不得低于材料抗拉强度的 80%。相邻两幅土工合成材料应相互顺接。

## **6.4 施工监测**

**6.4.1** 施工监测应根据工程情况、监测目的、监测要求等制定监测方案，明确监测内容、监测位置、监测方法、控制标准等。

**6.4.2** 监测内容宜包括沉降、侧向位移和地面隆起。对重要工程、复杂工程和试验工程，尚应进行孔隙水压力和桩土应力比监测。必要时，宜进行振动监测。

**6.4.3** 监测位置应根据地基及地基处理变化情况、地基上部结构特征变化情况以及监测内容等确定。

**6.4.4** 监测方法应根据监测内容、监测精度等要求确定。

**6.4.5** 监测期间应记录施工、周边环境变化等情况；根据施工进度、指标变化、环境变化等，动态调整监控频率；及时将监测结果反馈给设计、施工单位；出现异常时，应及时预警，查明原因，并采取必要的措施。

**6.4.6** 路基填筑期间的稳定控制标准与路面铺筑时间的控制标准应符合现行《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/TD31-02）的规定。

# 7 质量检验与验收

## 7.1 一般规定

7.1.1 土工合成材料约束桩质量检验按时间顺序可分施工前检验、施工中检验和施工后检验。

7.1.2 土工合成材料约束散体桩质量检验项目应包括原材料、桩身参数、单桩承载力和复合地基承载力等。

7.1.3 土工合成材料约束固化土桩质量检验项目应包括原材料、流态固化土配合比、桩身参数、桩身完整性、单桩承载力和复合地基承载力等。

## 7.2 施工前检验

7.2.1 土工合成材料约束散体桩施工前应根据表 7.2-1 进行下列检验：

- 1 对土工合成材料、填充散体材料、垫层材料应逐批检验。
- 2 对施工机械设备及性能进行检验。
- 3 对桩位进行检查。
- 4 应按设计要求进行现场工艺性试验，确定合适的工艺参数。

表 7.2-1 土工合成材料约束散体桩施工前质量检验标准

分类	检查项目	允许偏差或允许值	检验方法
主控项目	土工合成材料、填充散体材料、垫层材料	满足设计要求	查产品合格证并抽样送检
一般项目	施工机械设备及性能	符合出厂及设计要求	查设备标定记录
	桩位偏差 (mm)	±10	钢尺量或全站仪

7.2.2 土工合成材料约束固化土桩施工前应根据表 7.2-2 进行下列检验：

- 1 对土工合成材料、原料土、用水、固化剂及流态固化土进行复试检验。
- 2 对施工机械设备及性能进行检验。
- 3 对桩位进行检查。
- 4 应按设计要求进行现场工艺性试验，确定合适的工艺参数。

表 7.2-2 土工合成材料约束固化土桩施工前质量检验标准

分类	检查项目	允许偏差或允许值	检验方法
主控项目	土工合成材料、原料土、用水、固化剂、流态固化土	满足设计要求	查产品合格证并抽样送检
一般项目	施工机械设备及性能	符合出厂及设计要求	查设备标定记录
	桩位偏差 (mm)	±10	钢尺量或全站仪

## 7.3 施工中检验

7.3.1 土工合成材料约束散体桩施工中应对成孔深度、垂直度、散体材料填充量等进行检验，检验内容应符合表 7.3-1 的规定。

表 7.3-1 土工合成材料约束散体桩施工中质量检验标准

分类	检查项目	允许偏差或允许值	检验方法
主控项目	桩长 (m)	+0.3	量钻杆有效长度
	桩径 (m)	不小于设计值	钢尺量测
	散体材料用量	满足设计要求	查施工记录
	土工合成材料用量	满足设计要求	查施工记录
	垂直度	$\leq 0.1\%$	钢尺或水准仪量测
	密实度	不小于设计值	查散体材料用量并计算
一般项目	钢套筒上拔速度	满足设计要求	查施工记录
	垫层夯填度	$\leq 0.9$	钢尺量

7.3.2 土工合成材料约束固化土桩施工中应对成孔深度、垂直度、流态固化土配合比、流态固化土灌注量等进行检验，检验内容应符合表 7.3-2 的规定。

表 7.3-2 土工合成材料约束固化土桩施工中质量检验标准

分类	检查项目	允许偏差或允许值	检验方法
主控项目	桩长 (m)	+0.3	量钻杆有效长度
	桩径 (m)	不小于设计值	钢尺量测
	固化剂用量	满足设计要求	查施工记录
	原料土用量	满足设计要求	查施工记录
	用水量	满足设计要求	查施工记录
	垂直度	$\leq 0.1\%$	钢尺或水准仪量测
一般项目	流态固化土流动性	满足设计要求	流动度试验
	浇筑压力	满足设计要求	查施工记录
	浇筑管提升速度	满足设计要求	查施工记录
	钢套筒提升速度	满足设计要求	查施工记录
	垫层夯填度	$\leq 0.9$	钢尺量

7.3.3 施工过程中需填写每根桩的质量检查记录。

7.3.4 不符合设计参数的桩，应经监理单位确认后报设计单位进行处理。

## 7.4 施工后检验

7.4.1 桩体施工结束后，应按照表 7.4-1 对土工合成材料约束散体桩进行检验，并应符合下列要求。

1 检验应按区段进行，地质条件相近、设计参数和施工工艺相同的应设为同一区段，抽检位置宜均匀分布。施工出现异常情况部位、特殊或重要的部位、局部岩土特性复杂部位应重点检查。

2 桩位偏差抽检数量不应少于总桩数的 2%。

3 桩身质量、单桩承载力、桩间土承载力、复合地基承载力测试，应在成桩后一定时间进行。对饱和软黏土地基不宜少于 28d，对粉质黏土地基不宜少于 21d，对粉土地基不宜少于 14d。

4 桩身质量可采用重型（N63.5）动力触探进行检查，抽检数量应为总桩数的 1%~2%。

5 承载力测试应采用静荷载试验方法，单桩承载力检测数量应不少于总桩数的 0.5%，且不少于 3 根；复合地基载荷试验的数量为总桩数的 0.5%~1%，且每个单体工程的试验数量不应少于 3 处；桩间土承载力试验数量不应少于 3 处。

6 对消除液化的地基检验，应采用标准贯入试验。

7 填写相应的质量检验记录。

**表 7.4-1 土工合成材料约束散体桩施工后质量检验标准**

分类	检查项目	允许偏差或允许值	检验方法
主控项目	单桩及复合地基承载力	不小于设计值	静载试验
	桩身质量	满足设计要求	重型（N63.5）动力触探
	桩位	满堂布桩 $\leq 0.4d$ 条基布桩 $\leq 0.25d$	钢尺或全站仪量测， $d$ 为桩径
	桩径（m）	不小于设计值	钢尺量测
	桩长（m）	$l-l+0.3$	查散体材料用量并计算
	垂直度	$\leq 0.1\%l$	钢尺或水准仪量测
一般项目	桩顶标高（m）	$\pm 0.15$	水准仪
	垫层夯填度	$\leq 0.9$	钢尺量
	充盈系数	不小于 1.05	实际与理论灌注量的比

**7.4.2** 桩体施工结束后，应按照表 7.4-2 对土工合成材料约束固化土桩进行检验，并应符合下列要求。

1 检验应按区段进行，地质条件相近、设计参数和施工工艺相同的应设为同一区段，抽检位置宜均匀分布。施工出现异常情况部位、特殊或重要的部位、局部岩土特性复杂部位应重点检查。

2 桩位偏差抽检数量不应少于总桩数的 2%。

3 桩身完整性、单桩承载力、桩间土承载力、复合地基承载力测试，应在成桩后一定时间进行。单桩载荷试验应在成桩 90d 后进行，应在桩顶表面用粗砂或中砂层找平，其厚度不宜大于 20 mm；复合地基载荷试验应在成桩 28 d 后进行，承压板底面以下应铺设中粗砂垫层，垫层厚度宜取 100~150 mm。

4 桩身完整性检测可采用钻芯法、轻型动力触探、静力触探及反射波、瑞利

波等物理勘探方法,对桩的均匀性和完整性进行检查,抽检数量应为总桩数的 2%。

5 承载力测试应采用静荷载试验方法,单桩承载力检测数量应不少于总桩数的 0.5%,且不少于 3 根;复合地基载荷试验的数量为总桩数的 0.5%~1%,且每个单体工程的试验数量不应少于 3 处;桩间土承载力试验数量不应少于 3 处。

6 在成桩 28 d 后进行钻探取芯,抽检频率应为总桩数的 1%~2%,取芯位置宜在桩直径 1/2 处。应将代表性芯样加工成边长 70.7mm 的立方体块进行无侧限抗压强度试验,强度值应达到设计要求。

表 7.4-2 土工合成材料约束固化土桩施工后质量检验标准

分类	检查项目	允许偏差或允许值	检验方法
主控项目	单桩及复合地基承载力	不小于设计值	静载试验
	桩身完整性	满足设计要求	钻芯法
	桩身固化土强度	不小于设计值	钻芯法、无侧限抗压强度
	桩位	满堂布桩 $\leq 0.4d$ 条基布桩 $\leq 0.25d$	钢尺或全站仪量测, $d$ 为桩径
	桩径 (m)	不小于设计值	钢尺量测
	桩长 (m)	$l \sim l + 0.3$	查散体材料用量并计算
	垂直度	$\leq 0.1\%l$	钢尺或水准仪量测
一般项目	桩顶标高 (m)	$\pm 0.15$	水准仪
	垫层夯填度	$\leq 0.9$	钢尺量
	充盈系数	不小于 1.05	实际与理论灌注量的比

# 本规范用词说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合《×××××》（×××）的有关规定”。

2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。