中国公路建设行业协会标准

T/CHCA xxxx-xxxx

公路厚层超软土地基处理技术规程

Technical Specifications for Treatment of Highway Thick Layer Ultra-soft Soil Foundation

xxxx-xx-xx发布 xxxx-xx-xx实施

中国公路建设行业协会发布

中国公路建设行业协会标准

公路厚层超软土地基处理技术规程

Technical Specifications for Treatment of Highway Thick Layer Ultra-soft Soil Foundation

T/CHCA xxxx-xxxx

主编单位：温州大学、浙江工业大学  
批准部门：中国公路建设行业协会  
实施日期： xxxx 年 xx 月 xx 日

Xxxx出版社

前 言

根据中国公路建设行业协会关于下达《装配式公路钢桥桥墩》等32项协会标准的编制通知（中路建协技发〔2023〕号）的要求，由温州大学、浙江工业大学作为主编单位，承担对《公路厚层超软土地基处理技术规程》的编制工作。

本规程编制的指导思想：在编制过程中贯彻执行国家和交通运输部有关技术政策；在总结公路超软土地基处理技术规程施工实践经验并借鉴国外先进技术标准的基础上，吸纳技术成熟 、工艺先进、经济合理、安全环保、节能减排的“四新”技术；更好地体现“安全、耐久、环保、节能减排、可持续发展”的公路厚层超软土地基处理建设理念，使规程真正起到保证工程施工质量和安全、提高施工技术水平的作用。

本规程的编制原则：注重条文的技术先进性、合理性和可操作性，强调对施工关键工序和关键过程的控制；借鉴国外先进技术标准和成果；与相关的标准、规范、规程协调配套。

本规程的主要技术内容包括：1总则；2术语；3基本规定；4超软土地基勘察；5沉降及稳定计算；6地基处理设计；7地基处理施工；8 施工监测；9 施工质量检测与验收。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规程日常管理组，联系人：按打日拉（地址：浙江省温州市温州茶山高教园区，邮编：325035；电话：15267758216，电子邮箱：adrila@163.com），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：温州大学、浙江工业大学

参 编 单 位：浙江坤德创新岩土工程有限公司，天津大学，赣州高速公路有限责任公司，温州市公路运输与管理中心，温州市交通发展集团有限公司，温州市瓯飞开发建设投资集团有限公司，温州市教育基建中心，温州市瓯江口开发建设投资集团有限公司，温州滨海新城投资集团有限公司，温州机场集团有限公司，温州玖信建设有限公司，瑞安经济开发区发展总公司

主 编：王军、蔡袁强

主要参编人员：符洪涛、按打日拉、王鹏、郭林、马晓华、秦伟、倪俊峰、高紫阳、刘志明、孙立强、郭伟、钟鑑方、应梦杰、朱萧霄、高世虎、谷川、袁国辉、王龙、徐敏涛、王航宇、叶剑可、金锦强、谢忠武、翁结群、李建储、陈礼游、陈卫辉、陈志标、曹晓利、余德亮、李明枫、庄恒、戴鸣、朱炜豪、叶飞龙、饶昱、应豪康、李辉

主 审：

参与审查人员：

目录

[1 总则 6](#_Toc178945277)

[2 术语 6](#_Toc178945278)

[3 基本规定 8](#_Toc178945279)

[4 超软土地基勘察 9](#_Toc178945280)

[5 沉降及稳定计算 11](#_Toc178945281)

[6 地基处理设计 14](#_Toc178945282)

[7 地基处理施工 20](#_Toc178945283)

[8 施工监测 24](#_Toc178945284)

[9 施工质量检测与验收 26](#_Toc178945285)

1 总则

1.0.1 为规范公路厚层超软土地基处理技术，保障工程质量和施工安全，制订本规程。

1.0.2 公路厚层超软土地基处理技术的施工应遵守国家安全生产法律法规，建立健全安全生产管理体系及应急预案，明确安全责任，严格执行安全操作规程，保障施工人员的职业健康和施工安全。

1.0.3 公路厚层超软土地基处理技术的施工宜推行标准化、工厂化、装配化和信息化施工，并应积极推广使用可靠的新技术、新工艺、新材料、新装备。

1.0.4 公路厚层超软土地基处理技术的施工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

2.0.1 超软土 ultra-soft soil

含水率大于70%、无侧限抗压强度小于5kPa、重度小于16 kN/m3，液性指数大于 1.4的呈流动性软土。

**条文说明：**

《公路软土地基路堤设计与施工技术规范JTJ 017-96》中规定了软土的特征指标为：天然含水率≥35%与液限、天然孔隙比≥1和十字板剪切强度＜35kPa。超软土相对于软土而言含水率更高、强度更低、物理力学性质更差。我国至今还未有统一的标准从软土中划分出超软土。参考相关研究结果，本规程规定含水率大于70%、无侧限抗压强度小于5kPa、重度小于16 kN/m3，液性指数＞1.4的呈流动性软土为超软土。

2.0.2 公路厚层超软土地基 highway thick layer ultra-soft soil foundation

公路工程影响范围内由超软土形成的地基。

**条文说明：**

“厚层”是指超软土深度远超出一般软土工程。《深厚软土地基建筑基坑工程监测技术标准》规定当软土层单层厚度＞5.0m，该软土地基可称为深厚软土地基。基于此，定义层单层厚度＞5.0m的地基为公路厚层超软土地基。

2.0.3 固结度 degree of consolidation

表征土的固结程度，是指土层或土样在某一级荷载下的固结过程中某一时刻孔隙水压力平均消散值或压缩量与初始孔隙水压力增量或最终压缩量的比值。

2.0.4 反向真空预压法 reversed vacuum preloading

采用密封接头将水平排水系统中的支管连接到排水板底部，进行反向抽真空，将真空压力直接传递到深层土体的一种地基处理方法。

2.0.5 反向真空预压联合堆载法 reversed vacuum-surcharge preloading

在反向真空预压过程中，结合堆载促使地基排水、固结、压密的一种地基处理方法。

2.0.6 爆破挤淤法 blasting method

在超软土层中插入炸药，通过爆炸和堆（抛）填石的方法在极短的时间内将一定深度的超软土置换成堆（抛）填石，形成填石地基的一种超软土地基处理方法。

2.0.7 智能多层互剪搅拌桩法 contra rotational shear deep soil mixing

由大功率双动力头通过同轴双层钻杆驱动框架式互剪搅拌钻头，通过数字化测控管理系统进行自动化施工，对原位土体的多层次、相对剪切搅拌，实现对水泥土的高效强力均匀搅拌，形成质量可控可靠加固体的一种超软土地基处理方法。

3 基本规定

3.1 场地处理设计。应根据超软土厚度、物理力学性质、地形变化情况，路堤高度，构造物位置和结构类型等，分路段确定地基处理方案，并符合下列规定：

3.1.1 处理范围应根据路基或构造物的范围、使用要求、沉降及稳定性的要求确定；

3.1.2 不同地基处理方案衔接路段工后沉降应平缓过渡，减少差异沉降；

3.1.3 桥头路基与一般路基、涵洞通道与一般路基之间地基处理设计应设置过渡段，过渡段长度不宜小于50m；

3.1.4 相邻路段路基工后沉降引起的纵坡变化应小于0.4%。

3.2 场地处理施工。考虑选择合适的施工设备及施工工艺，做好施工组织设计，进行地基处理施工。

3.3 地基处理监测。监测内容及要求应根据地基处理方式、施工阶段、公路等级及路段确定。施工过程中，施工单位应随时检查施工记录，并按照规定的施工工艺对工序进行质量控制。

3.4 检测内容、数量根据地基处理方案及公路路段等综合确定，并应符合现行《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）的有关规定。

4 超软土地基勘察

4.1 一般规定

4.1.1 超软土地基勘察应查明超软土层、下卧层的分布特点，岩土性质，水、土的化学成分及腐蚀性等，获取设计所需的物理力学参数及相关资料，并提出地基处理的初步建议。

4.1.2 超软土地基能满足勘察设备进场作业要求时，初步勘察及详细勘察阶段的勘察方法、内容与要求应符合现行《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）的有关规定。

4.1.3 超软土地基不能满足勘察设备进场作业要求时，可按照《公路吹填流泥地基处理技术规程》（T/CECS G:D21-01）的有关规定，对场地预处理后，再进行补充勘察。

4.2 工程可行性研究阶段勘察

4.2.1 工程可行性研究阶段勘察应掌握路线走廊带内超软土地基分布范围、厚度、成因类型、工程性质。

4.2.2 对超软土地基周边的地下管线、既有路基、涵洞通道、建筑物等进行调查，确定其结构形式，地基和基础类型，了解其可能对工程产生的影响。

4.2.3 编制工程可行性研究阶段勘察报告，提出地基处理的建议。

4.3 初步勘察

4.3.1 初步勘察应以原位测试为主，宜采用轻型设备作业、并结合钻探及土工试验等方法进行。

4.3.2 初步勘察勘察点布置应根据公路等级、超软土路段长度确定。当超软土及下卧层成因复杂时，勘探点宜适当加密。

4.3.3 工程地质初步勘察说明应重点阐明沿线超软土地基的分布范围、物理力学性质及成因类型。

4.3.4 编制初步勘察报告，做出工程地质评价与预测，提出地基处理方法的初步建议。

4.4 详细勘察

4.4.1 详细勘察应基本查明超软土地基的地质条件和物理力学性质指标，为地基处理方案选择提供相关的技术指标。

4.4.2 详细勘察应充分利用初步勘察资料，结合工程实际方案进行勘探。勘探点布置应根据公路等级、超软土路段长度确定。

4.4.3 工程地质说明应重点阐明超软土地基分布范围、物理力学性质与成因类型，结合试验与测试指标做出工程地质评价与预测。

4.4.4 编制详细勘察报告，做出工程地质评价与预测，提出地基处理方法的建议。

4.5 土工试验

超软土应确定含水率、液限、塑限等物理力学指标，下卧层的土工试验应符合现行《公路土工试验规程》（JTG E40）的有关规定。

5 沉降及稳定计算

5.1 一般规定

5.1.1 超软土地基沉降及稳定计算应考虑超软土及下卧层的固结特性、厚度、强度、路堤高度、预压方式以及交通荷载等因素的影响。

5.1.2 沉降和稳定计算所需的参数，应结合工程地质勘察报告的成果，根据超软土及下卧层成因类型、物理力学性质，对公路沿线场地进行工程地质单元划分，对各地质单元的参数进行统计分析，选取相应代表值。

5.1.3 沉降与稳定计算应按分层地基进行，下卧层的沉降计算应将超软土层的自重作为附加荷载。

5.1.4 沉降计算应至下卧软弱层底，当下卧软弱层较为深厚时，沉降计算深度应至附加应力与自重应力比不大于 0.15 处。

5.1.5 路堤高度不大于 2.5m 时，沉降计算应考虑交通荷载的影响。

5.2 沉降计算

5.2.1 超软土地基最终沉降包括瞬时沉降、主固结沉降、次固结沉降及交通荷载引起的沉降，可按式（5.2.1）计算。

（5.2.1）

式中：——地基最终沉降（m）；

——地基瞬时沉降（m）；

——地基主固结沉降（m）；

——地基次固结沉降（m）；

——交通荷载引起的地基沉降（m）。

5.2.2 土体瞬时沉降主要考虑由土体剪切变形引起，计算应符合现行《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/T D30-02）的相关规定。

5.2.3 土体主固结沉降由各层土的厚度、先期固结应力、最终固结应力、压缩指数等确定，可按式（5.2.2）计算。

式中： ——第*i*层超软土的压缩指数；

——第*i*层超软土的初始孔隙比；

——第*i*层超软土的自重应力（kPa）；

——第*i*层超软土的先期固结压力（kPa）；

——第*i*层超软土的附加应力增量（kPa）；

——第*i*层超软土的厚度（m）；

——第*m*层下卧层土的压缩指数；

——第*m*层下卧层土的初始孔隙比；

——第*m*层下卧层土的自重应力（kPa）；

——第*m*层下卧层土的附加应力增量（kPa），包括超软土自重；

——第*m*层下卧层土的厚度（m）。

5.2.4 土体次固结沉降与主固结结束时间、次固结系数、次固结时间等参数确定，可按式（5.2.3）计算。

式中： ——第*i*层超软土的次固结系数；

——第*i*层超软土主固结完成时的孔隙比；

——主固结沉降完成的时间（d）；

—— 次固结沉降完成的时间（d）。

5.2.5 交通荷载产生的沉降可按式（5.2.4）、式（5.2.5）计算。

式中： ——第*i*层超软土在设计年限内累计当量轴次的累积应变（%）；

——采用动三轴仪进行土体单元循环加载试验，经过1000次循环后的累积应变（%）；

——采用动三轴仪进行土体单元循环加载试验，双对数坐标下累积应变与循环次数关系曲线的斜率；

—— 设计年限内一个车道上的BZZ-100累计当量轴次。

**条文说明：**

对处理后的超软土地基，如路堤高度小于2.5m，应考虑交通荷载的影响，如路堤高度大于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。影响拟合参数与的因素包括循环动应力幅值、土体应力状态、土的物理状态、静剪切强度等，与初始静偏应力，交通荷载下主应力轴旋转，排水条件等因素有关。采用动三轴仪进行土体单元循环加载试验时，仪器设备、操作步骤、数据记录和处理等可按现行《土工试验方法标准》（GB/T 50123）的有关规定执行。动应力宜采用半正弦纯压缩波激振，每层土受到的动应力强度宜采用数值解析、有限元计算或者现场测试的方法确定（选用双轮组单轴载100kN作为标准轴载，即BZZ-100）。

5.2.6 超软土公路路基的工后沉降应根据公路等级确定，应符合《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）有关规定（表5.2.6）。

表 5.2.6 容许工后沉降

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 公路等级 | 工程位置 | | |
| 桥台与路堤连接处 | 涵洞、箱涵、通道处 | 一般路段 |
| 高速公路、一级公路 | ≤0.10m | ≤0.20m | ≤0.30m |
| 二级公路（干线公路） | ≤0.20m | ≤0.30m | ≤0.50m |

注：二级非干线及二级下列公路工后沉降控制标准，经论证后可较二级干线公路适当放宽。

5.3 路堤稳定验算

5.3.1 稳定性验算应考虑自重荷载、施工临时荷载的影响；宜采用有效固结应力法或改进总强度法，在试验段或路堤的重点部位，可采用简化毕肖普法或普遍条分法，验算方法应满足现行《公路软土路堤设计与施工技术细则》（JTG/T D30-02）的有关规定。

5.3.2 当存在斜坡地基或路堤沿软弱层带滑动时，路堤的稳定性计算可采用不平衡推动法，验算方法应满足现行《公路路基设计规范》（JTG D30）的有关规定。稳定性计算得到的稳定系数不应低于表5.3.2的要求。

表5.3.2 稳定系数容许值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 分析内容 | 稳定安全系数 | |
| 二级及二级以上公路 | 三、四级公路 |
| 路堤沿斜坡地基或软弱层滑动的稳定性 | 1.30 | 1.25 |

6 地基处理设计

6.1 一般规定

6.1.1 当厚层超软土路段路堤工后沉降或稳定性不满足要求时，应对超软土地基进行处理设计。

6.1.2 涵洞通道路段应进行地基处理后，再进行基础开挖。

6.1.3 地基处理方法应根据超软土及下卧层的厚度和性质，路堤高度及各类地基处理方法的适用性，按表 6.1.3 确定。

表6.1.3 地基处理方法适用条件

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 处理方法 | 适用条件 | 工艺特点 |
| 反向真空预压联合堆载法 | 1）超软土及下卧层较为深厚。2）处理深度厚度不宜超过20m | 采用路堤作为堆载，反向真空预压及路堤堆载共同作用，固结压力高，下卧层处理效果佳，工后沉降小 |
| 爆破挤淤法 | 1）深厚超软土地基；2）处理的淤泥层厚度宜在15 m ~ 40 m | 通过爆炸和堆（抛）填石的方法在极短的时间内将一定深度的超软土置换成堆（抛）填石，形成填石地基。加固效果好，施工工艺简单，工期短 |
| 智能多层互剪搅拌桩法 | 1）已有超软土地基。2）超软土厚度不宜超过15m | 由大功率双动力头通过同轴双层钻杆驱动框架式互剪搅拌钻头，通过数字化测控管理系统进行自动化施工，对原位土体的多层次、相对剪切搅拌，实现对水泥土的高效强力均匀搅拌，形成质量可控可靠加固体。 施工方便、工期短、效果好等 |

6.2 反向真空预压联合堆载法

6.2.1 反向真空预压联合堆载地基处理应设置竖向塑料排水板，其布设方式、间距和打设深度应根据路堤的工后沉降及稳定性计算确定。

6.2.2反向真空预压系统应包括真空系统、反向排水板系统、表层水平排水系统以及密封系统。采用密封接头将水平排水系统中的支管连接到竖直排水板底部，进行反向抽真空加固，可与正向真空预压联合使用。

6.2.3塑料排水板性能指标要求应符合表 6.2.3 规定。

表6.2.3塑料排水板性能指标

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 单位 | 性能指标 | 备注 |
| 厚度 | mm | 4.0±0.2 | — |
| 宽度 | mm | 100±2 | — |
| 抗弯折性能 | mm | 无断裂 | 180°对折5次 |
| 抗拉强度 | kN | ≥2.0 | 延伸率10%时 |
| 纵向通水量 | cm3/s | ≥40 | 侧向压力为350kPa |
| 渗透系数 | cm/s | ≥5×10-3 | 试件在水中浸泡24h |
| 等效孔径 | *μm* | 50~150 | O95 |
| 芯板 | — | 共聚丙烯 | 新料 |
| 滤膜 | — | 聚酯化合物纤维混合热轧 | 与板芯一次性热熔成型 |

6.2.4 反向排水板底部需与接头连接牢固，插板过程中密封接头不可与排水板脱离。真空管宜采用钢丝软管连接，插板过程中真空管不产生变形。

6.2.5 反向排水板插板深度不宜超过10m，正向排水板不宜超过20米。

6.2.6 打设塑料排水板回带长度不得超过500mm，且回带的根数不宜超过打设总根数的5%。

6.2.7 剪断塑料排水板时，反向排水板在土层以上外露长度不小于600mm。

6.2.8反向排水板宜单独设置真空支管连接至真空泵。真空加载设备性能及调试要求应符合表6.2.8规定

表6.2.8 真空加载设备性能及调试要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 主要设备名称 | 规格型号 | 数量  （每50000m2） | 备注 |
| 1 | 水环式真空泵 | 功率55kw  最大气量 35m3/min | 2台 | 并联形成真空机组 |
| 2 | 真空表 | 量程：-100~100kPa 精度：0.1%FS | 5个 | 监测膜下真空度 |
| 3 | 柴油发电机 | SC3200iF | 1台 | 为施工供电备用 |

6.2.9 水平排水系统由主管及支管组成，主管间距为30m～40m，支管布置在每两排塑料排水板中间。主管宜采用内径50mm的PVC螺旋形弹性钢丝管，支管宜采用内径25mm的PVC螺旋形弹性钢丝管，水平排水系统与塑料排水板之间采用密闭接头连接。

6.2.10 密封系统由密闭接头和表层封膜构成，其设置应符合以下规定：

6.2.10.1 密封膜性能

密封膜宜采用2层～3层聚乙烯或聚氯乙烯土工膜，并应在密封膜及水平排水系统之间铺设1层无纺土工织物作为保护层。

6.2.10.2 密封沟

密封膜性能处理区周围应设置密封沟，密封沟底部应低于低渗透性土层顶面下0.5m；条件受限不能设置密封沟时，可将密封膜压入低渗透性土层表面下0.5m进行密封。

6.2.10真空预压场地处理的地基平均固结度宜按式（6.2.1） ~ 式（6.2.2）计算：

（6.2.1）

（6.2.2）

式中： ——固结时间*t*时地基平均固结度（%）；

——土体径向固结系数（m2/d），通过固结试验获得；

——排水板等效处理范围直径（m），排水板正方形排列时*de*=1.05（*l*为排水板布置间距），等边三角形排列时*de*=1.13*l*；

——排水板等效直径（m），取排水板宽度和厚度之和的一半；

——淤堵区等效直径（m），可取1.5～3.0，含水率高时区低值；

——土体平均径向渗透系数（m/d），通过渗透试验获得；

——淤堵区平均土体渗透系数（m/d），宜进行真空预压试验，取排水板周围淤堵区土样，再进行渗透试验获得；无试验资料时可取(1/100～1/10)*kh*，土体含水率低时取小值；

*H*——塑料排水板深度（m）；

——塑料排水板纵向通水量（m3/s），当无数据时可近似为无限大。

**条文说明**

真空预压过程中，超软土颗粒在真空吸力作用下会在塑料排水板附近形成淤堵区。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，吹超软土初始渗透系数与淤堵区渗透系数比值可达100 ~ 300。由于超软土初始含水率较高，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。

6.2.11 堆载底部应铺设排水垫层，其厚度不宜小于 500mm，垫层底部及顶部宜铺设透水土工织物。垫层材料可采用中粗砂、砂砾、碎石等，缺少砂石资源的地区，可采用土工合成材料复合排水垫层。

6.2.12 密封膜下稳定的真空度超过 80kPa 并持续 20d 后，方可进行堆载。

6.2.13 堆载预压应采用分级加载方式，堆载速率应与该级荷载下地基强度增长速率相适应，当地基强度增长可满足下一级荷载下地基的稳定性要求时方可加载。

6.2.14 堆载预压时间应根据施工监测成果确定。超载路段、涵洞通道预压路段需要卸载时，计算的工后沉降应小于设计容许值，同时连续两个月的月沉降速率不宜大于 5mm。

6.2.15 地基固结度超过80%，且连续5d实测地表沉降速率不大于0.5mm/d时，可停止抽真空作业。

6.3 爆破挤淤法

6.3.1 爆破挤淤法应根据超软土层深度、施工场地水文条件等确定合适的药量、布药方式和施工工艺。

6.3.2 采用爆破挤淤法处理地基长度大于400 m时，宜设置试验段，为设计提供合理的爆破和抛填等参数，便于提出合理的设计方案，试验路段长度不少于100 m。

6.3.3 爆破挤淤法处理的淤泥层厚度宜在15m ~ 40m，当处理深度超过40m时，宜开展试验验证，并充分论证后酌情采用。

6.3.4 潮间带区域工程采用爆破挤淤法时，填石设计断面顶部应高于50年平均高潮位1m以上。

6.3.5 路基填石尺寸设计时，宜考虑爆后填石沉降，一般完全落底填石路基可取10cm～15cm，未完全落底填石路基需根据分层总和法计算和实际监测结果综合分析确定，初步设计可取30cm～60cm，未完全落底填石路基可采用路面超载预压法减少工后沉降。

6.3.6 路基填石尺寸设计时，宜考虑爆后填石沉降，一般完全落底填石路基可取10cm～15cm，未完全落底填石路基需根据分层总和法计算和实际监测结果综合分析确定，初步设计可取30cm～60cm。

6.3.7 单次爆破消耗药量应根据常用炸药性能表及换算系数确定，可按式（6.3.1）计算：

（6.3.1）

式中： *Q*——单次爆炸消耗药量（kg）；

——炸药单耗值（kg/m3）；

——单次填石水平推进的距离（m）；

——等效待处理软土层厚度（m）；

——补药线长度。

6.3.8 药包间距宜取2.0m—6.0m范围之内，超出此范围内应根据试验段进行调整药包质量，增减药包个数。

6.3.9 采用爆破挤淤法施工路基的稳定性计算可采用瑞典圆弧滑动法、简化毕肖普法等计算方法进行验算；对于落底不完全路基结构宜考虑沉降对路基稳定性的影响。

6.3.10 起始段与龙口段置换设计规定：

6.3.10.1 起始段一般采用堆填挤淤，按（6.3.2）计算堆填自重挤淤深：

（6.3.2）

式中： ——超软土土层容重（kN/m3）；

——填石路堤自重下沉量（m）；

*h*——填石路堤高度（m）；

——超软土层的不排水抗剪强度（kPa）；

——填石料容重（kN/m3）；

*B*——填石路堤顶宽度（m）。

6.3.10.2 若工程位于潮间带，需要考虑龙口段设计，相关计算可参考《海堤工程设计规范》（SL 345）；

6.3.10.3 起始段和合龙处宜增加侧爆设计。

6.3.11 爆破挤淤法构筑路基抗滑稳定性分析时，填石路基底部的泥石混合层可采用土层的物理力学参数指标计算和设计。

6.4 智能多层互剪搅拌桩法

6.4.1 智能多层互剪搅拌桩复合地基承载力计算，应符合下列规定：

6.4.1.1 搅拌桩复合地基初步设计时，宜按式（6.4.1）估算复合地基承载力特征值：

（6.4.1）

（6.4.2）

式中： ——复合地基承载力特征值（kPa）；

*——*复合地基置换率；

——桩端土极限承载力（kN）；

——桩身横断面积（m2）；

*β*——桩间土承载力发挥系数，宜按当地经验取值；

——天然地基承载力特征值（kPa）；

*d*——单桩直径（m）；

——等效处理直径（m）。

6.4.1.2 智能多层互剪搅拌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。

6.4.2 智能多层互剪搅拌桩单桩承载力计算，应符合下列规定：

6.4.2.1 智能多层互剪搅拌桩单桩承载力特征值应通过现场单桩竖向抗压载荷试验确定；

6.4.2.2初步设计时，由桩周土和桩端土可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值可按公式（6.4.3）进行估算；由桩身强度可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值可按公式（6.4.4）估算。取以上两个计算值的较小值作为单桩竖向抗压承载力特征值：

（6.4.4）

式中： *u*——桩体周长（m）；

*——*第i层土的桩侧摩阻力特征值（kPa）；

——桩长范围内第*i*层士的厚度（m）；

*α*——桩端土承载力折减系数，对超软土可取0.5，对其他土层，可取 0.5~1.0；

——桩端土地基承载力特征值（kPa）；

*η*——桩体强度折减系数，可按 0.3~0.4 取值;；

——桩身抗压强度平均值，可按设计配合比由室内制备的水泥土试件测得28d无侧限抗压强度（kPa）。

6.4.3 智能多层互剪搅拌桩的平面布置应根据上部结构类型、荷载情况及对加固地基的承载力和变形要求等确定，宜采用正方形、等边三角形等布置形式。

6.4.4 智能多层互剪搅拌桩复合地基桩间距及桩长应根据复合地基承载力、变形和稳定性，地基土层条件等确定。

6.4.5 智能多层互剪搅拌桩宜根据室内配比试验对桩长范围内的不同土层，根据桩身强度设计要求，确定合理的水泥掺量。

6.4.6 智能多层互剪搅拌桩加固深度以下的受力层范围内存在软弱下卧层时，应进行下卧层承载力验算。下卧层承载力验算可根据现行国家标准《复合地基技术规范》GB/T 50783和《公路路基设计规范》JTG D30-2015。

6.4.7 智能多层互剪搅拌桩复合地基的沉降计算，可根据现行《公路路基设计规范》JTG D30-2015相关规定计算。

7 地基处理施工

7.1 一般规定

7.1.1 地基处理施工时应考虑选择合适的施工设备及施工工艺，做好施工组织设计。

7.1.2 地基处理施工前应清除场地预处理施工时的遗弃物，以及废弃的监测仪表等。

7.1.3 塑料排水板打设及桩基施工过程中，应做好地质情况记录。当设计与实际情况出入较大时，应及时反馈设计单位。

7.1.4 桥头、涵洞通道路段的地基处理施工应合理安排施工工序与工期，保证足够的预压时间。

7.1.5 修建二级及以上的公路工程时，应选择代表性路段修筑试验路，对设计参数及施工工艺进行试验验证。

7.1.6 地基处理施工过程应进行监测，做好监测仪器设备的保护工作。

7.2 反向真空预压联合堆载法

7.2.1 反向塑料排水板打设应符合下列规定：

7.2.1.1 塑料排水板技术要求应符合本规程表 6.2.3规定；

7.2.1.2 反向塑料排水板实际入土深度与设计深度的差值不应大于0.5m。当与设计深度差值过大时，在未查明原因之前不得截断排水板；

7.2.1.3 反向塑料排水板板底和真空支管应连接牢固，真空支管宜采用强度高的钢丝软管。 反向塑料排水板和真空支管插设后，真空支管截面不出现明显变形；

7.2.1.4 反向塑料排水板尾应露出地基表面，以连接水平排水系统。

7.2.2 水平排水系统施工应符合下列规定：

7.2.2.1支管布置在每两排塑料排水板之间，塑料排水板与真空管应采用带多点倒齿的密闭接头连接，并应采用 U 型钢钉固定，密闭接头与支管的连接宜采用自锁方式，连接长度不应小于50mm；

7.2.2.2 支管间连接宜采用四通、三通或双通接头，连接长度不应小于70mm；

7.2.2.3 支管与主管连接宜采用多通道变径四通、三通或双通接头，连接长度不应小于100mm；

7.2.2.4 主管与主管间连接宜采用双通接头，连接长度不应小于 150mm；

7.2.2.5 出膜管与真空设备连接前应安装密封阀和止回阀。

7.2.3 密封膜性能、密封膜施工应符合本规程 6.2.10节规定。

7.2.4 密封沟开挖施工应符合本规程6.2.10节规定。

7.2.5 堆载应采用分层填筑，每层压实厚度宜为 20cm ~ 30cm，压实度应满足设计要求。

7.2.6 堆载预压加载过程中，应结合监测成果，合理确定加载速率。

7.2.7 预压期及卸载时间应根据施工监测结果分析确定。

7.3 爆破挤淤法

7.3.1 爆破挤淤法处理地基和构筑路基应严格按照规范和相应的施工图设计文件进行，需根据该方法单独编制相应的施工组织设计或说明，对于特殊情况（如处理深度超过40 m，爆破影响范围内有重要建筑物等）需进行专题研究并充分论证，批准后方可进行正式施工。

7.3.2 爆破挤淤法施工前，应编制详细的施工组织设计方案，重点建立健全的安全管理制度、质量管理体系，落实岗位安全责任，制定切实可行的应急预案；爆破作业前应准备所有相关材料向所在地申请爆破作业许可。施工组织方案需论证批准后方可实施。

7.3.3 爆破作业实施承担单位应具备相关施工资质；爆破作业前应按照规定发布爆破施工通告。

7.3.4 确定路基高度和宽度，根据爆破设计确定抛填进尺，进而确定每次爆破后的堆（抛）填石料的用量；

7.3.5 在抛填过程中要经常检查抛填路基尺寸参数，及时纠偏。

7.3.6 路基起始段测爆，合龙处需进行单独的施工组织设计，并作为重点监测位置。

7.3.7 堆（抛）填石料强度、容重、级配及品质等应符合国家或所在地区标准和规程要求，应针对不同位置确定尺寸范围。

7.3.8 布药设备性能应满足性能要求，炸药宜采用稳定性好的乳化防水炸药。

7.3.9 布药设备选择应根据处理土层厚度确定，处理土层厚度不超过15m时，可采用直插式布药机施工，超过15m时，可采用振冲式布药机。

7.3.10 已完成施工的路段若出现沉降过大，超过设计预警值，宜采用路基侧爆方式进行处理，一次处理长度不超过50m，药包量药小于路基端头爆破量，插药深度小于端头插药深度。

7.3.11 抛填进尺不小于4m，最大不宜大于10m，允许误差±0.5m。

7.4 智能多层互剪搅拌桩法

7.4.1 智能多层互剪搅拌桩的施工装备主要由搅拌系统、辅助系统及数字化测控管理系统组成。搅拌系统由动力头、同轴双层钻杆及框架式互剪搅拌钻头组成。辅助系统由桩架、自动制浆与供浆系统组成。数字化测控管理系统应具有数据自动采集与显示、成桩过程自动化控制及监控的功能。施工装备的性能参数应符合标准要求。

7.4.2 智能多层互剪搅拌桩施工应采用经质量检验合格的材料，并应符合下列规定：

7.4.2.1 水泥材料应具有按批量取样送检，强度和安定性检验合格证明；

7.4.2.2 水泥的储存与堆放条件不应影响材料的品质，结块水泥不得使用；

7.4.2.3 应选用符合设计要求的早强剂、缓凝剂、减水剂等外加剂；

7.4.2.4 施工用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ63的有关规定。

7.4.3 正式施工前应进行试成桩，试成桩应根据设计要求、工程特点、地质条件 和周边环境等选择有代表性地层的区域进行，数量应不少于 2 根；成桩施工过程中应采用数字化测控管理系统进行自动化施工和全过程质量管控。

7.4.4 智能多层互剪搅拌桩的数字化测控管理系统，应具备下列功能：

7.4.4.1 测控指标应包括泥浆用量、下沉和提升速度、内外钻杆转速、桩身垂直度、桩长、单桩施工时间等；

7.4.4.2 施工参数测控传感装置应包括经标定的流量计、电流传感器、倾角传感器等；

7.4.4.3 自动制浆站应配置有高速搅拌机、拌浆桶、储浆桶、水箱、水泵、螺旋输送机、称重传感器、电子配料控制主机等，能连续制浆；

7.4.4.4 管理终端应具备实时显示、储存与输出功能。

7.4.5 搅拌桩施工场地应事先平整，清除桩位处地上、地下一切障碍（包括大块石、树根和生活垃圾等）。场地低洼时应回填粘土，不得回填杂土。

7.4.6 水泥搅拌桩开钻之前，应用水清洗整个管道并检验管道中有无堵塞现象，待水排尽后方可下钻。

7.4.7 对每根成型的搅拌桩质量检查重点是水泥用量、水泥浆拌制的罐数、压浆过程中是否有断浆现象、喷浆搅拌提升时间以及复搅次数。

7.4.8 为保证水泥搅拌桩桩端、桩顶及桩身质量，第一次提钻喷浆时应在桩底部停留30秒，进行磨桩端，余浆上提过程中全部喷入桩体，且在桩顶部位进行磨桩头，停留时间为30秒。

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、施工阶段、公路等级及路段确定。施工过程中，施工单位应随时检查施工记录，并按照规定的施工工艺对工序进行质量控制。

8.1.2 监测设计应包括下列内容：

8.1.2.1 场地预处理、地基处理监测项目应按设计要求实施；

8.1.2.2 确定监测内容，选择监测仪表；

8.1.2.3 确定监测周期及监测频率；

8.1.2.4 提出监测内容的控制指标及预警值。

8.1.3 当加固区变形可能对周边环境和建筑物产生不良影响时，应加强对加固区边界 30m 范围内的土体位移、地下管线和建筑物等的监测。

8.1.4 监测过程应对所使用的仪器和设备进行自检、校正，并做详细记录。

8.1.5 应对监测数据进行定期整理分析，当变形量达到预警值或接近允许值、变形量出现异常变化时，应立即预警，并及时反馈设计及施工等相关单位。

8.2 监测系统与监测内容

8.2.1 监测项目应包含表层沉降、分层沉降、水平位移、孔隙水压力和真空压力等，监测项目视处理方法和场地条件选择。

8.2.2 场地预处理真空压力、孔隙水压力、表层沉降监测断面一般路段每 300m ~500m 布设一处，地质条件复杂的情况下可适当加密。加固区边界以外 20m ~ 30m 范围内存在地下管线或建筑物等时，应对土体水平位移进行监测。

8.2.3 地基处理监测断面应根据公路等级及路段确定，并不小于1个/150m间距。

8.2.4 地基处理监测断面应根据公路等级及路段确定。

8.2.5 地基处理时应重新设置监测仪表。

8.3 监测方法

8.3.1 真空表探头设置在密封膜下，并用排水板滤膜包裹真空表探头，防止流泥堵塞，探头出膜时应做好密封措施。

8.3.2 孔压传感器量程应为最大孔压的1.5～2.0倍。当进行真空预压处理时，孔压计出膜应做好密封措施。

8.3.3 沉降监测可采用的沉降板、沉降管等方式，监测点应设置于路中心，与结构物相邻路堤段宜在两侧路肩及边坡坡脚位置增设监测点。监测精度不应小于三等水准测量精度。

8.3.4 分层沉降监测点应布设在土层变化点；当土层厚度较大时，监测点间距宜为 3m。

8.3.5 表层水平位移可采用边桩监测，监测点应设置在堆载坡脚或边沟外缘。土体深层水平位移应采用测斜管监测，测斜管应穿过超软土及下卧层，深度宜与地基处理深度一致。

8.4 监测数据整理与分析

8.4.1 监测单位应定期编制监测报告。报告应包括监测工程方案设计及施工计划书；监测工程进程记录、现场监测仪器设备埋设与监测调试报告监测成果统计图表；

8.4.2 所有监测数据应及时记录并整理分析，若发现异常情况应及时复查。

9 施工质量检测与验收

9.1 一般规定

9.1.1 检测内容、数量根据地基处理方案及公路路段等综合确定，并应符合现行《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）的有关规定。

9.1.2 对检查项目按规定的检查方法和频率进行随机抽样检验并计算合格率。

9.2 真空预压处理检测与验收

9.2.1 土工合成材料检测应符合下列规定：

9.2.1.1 塑料排水板进场时应进行随机抽样，测试纵向通水量、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，合格后方可采用。检测时同批次不应少于 3 卷，根据检测项目数量分别进行取样；

9.2.1.2 施工过程中应对插板间距、长度（深度）等进行检测；

9.2.1.3 施工土工膜、土工织物应进行抗拉强度、抗撕裂强度和伸长率等性能指标的检测，检测方法应符合现行《公路工程土工合成材料试验规程》（JTG E50）的有关规定，检测数量同批次不应少于3卷，每卷根据检测项目数量分别进行取样。

9.2.3 场地预处理完成后应根据设计要求进行交工验收。

9.2.4 场地预处理完成后应根据设计要求进行交工验收。地基处理交工验收时，地基沉降变形和路堤堆载稳定状况应满足设计要求，检测点每 200m~300m 测1点。

9.3 爆破挤淤法质量检测与验收

9.3.1 施工过程中宜根据体积平衡法评估抛填石路基的落底情况，对出现落底严重不完全的情形，宜利用钻探或者合适的地质雷达等物探进行探测落底情况。

9.3.2 对于起始段、合龙处、落底不完全等特殊位置应进行沉降和路基边缘深度水平位移长期监测。

9.3.3 每150m～250m实施常规钻探监测，钻孔位置一般布置在路基中心线等位置，钻孔深度宜超过持力硬土层1m～2m；每25m～50m实施物探监测，每个检测段不低于10m，监测位置包括路基面和两侧腰宽位置；每25m～50m可实施常规沉降监测，监测位置可布置位于路堤顶面两侧附近；对于情况复杂的区域，宜加密监测。

9.3.4 施工质量应根据路基单元工程和分部工程分别进行评定；应经过施工单位自评，监理单位复核，项目法人认定并报备工程质量监督机构。

9.3.5 爆破实施企业及实施人员应具有相应的资质，应设置专门的爆破员和安全员岗位，不得兼任。

9.3.6 爆破安全距离等要求按照《爆破安全规程》（GB6722）和《水运工程爆破技术规范》（JTS 204）有关规定执行。爆破施工时，施工影响范围内的人员、设备、车辆及房屋等应做好必要撤离和安全防范工作。

9.4 智能多层互剪搅拌桩法质量检测与验收

9.4.1 施工过程中的质量控制

智能多层互剪搅拌桩施工过程中，应由数字化测控管理系统实时采集、控制施工工艺参数，并符合下列规定：

9.4.1.1自动制浆系统准确计量水泥用量及用水量精确控制水灰比，喷浆量应与下钻速度自动实时匹配；

9.4.1.2要求沿桩身全长每延米搅拌次数均不小于500次；

9.4.1.3施工过程中，要求桩身完整，搅拌均匀，几何尺寸准确。每根桩应一次性连续完成，不得中途中断、一旦断浆，必须补浆复搅，且与断浆处搭接长度不少于50cm，保证成桩的连续性。

9.4.2 成桩后的质量检验

9.4.2.1 智能多层互剪搅拌桩成桩7d后可采用浅部开挖检查桩体成形情况、搅拌均匀程度和桩身直径。检查数量应符合设计要求；

9.4.2.2 智能多层互剪搅拌桩成桩28d后可采用双管单动取样器取芯，钻孔取芯直径不应小于91mm；并应取代表性芯样进行室内无侧限抗压强度试验及进行标准贯入试验。检验数量应符合设计要求；

9.4.2.3智能多层互剪搅拌桩的单桩承载力检验可采用竖向抗压载荷试验，宜在成桩 28d后进行；检验数量应符合设计要求。

9.4.3 智能多层互剪搅拌桩复合地基的质量检验应符合现行国家标准《复合地基技术规范》GB/T 50783及公路工程相关规范的规定。