

公路工程强力搅拌就地固化 设计与施工技术规范

Technical specification for design and construction of power mix in-situ
solidification in highway engineering

2021 - 09 - 30 发布

2021 - 10 - 30 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本规定	2
5 材料与设备	2
5.1 一般规定	2
5.2 材料	3
5.3 设备	4
6 设计	5
6.1 一般规定	5
6.2 配合设计	5
6.3 就地固化浅层处理	6
6.4 就地固化硬壳层复合地基	12
6.5 监测设计	15
7 施工	15
7.1 一般规定	15
7.2 施工准备	16
7.3 施工要点	16
7.4 动态监测	20
7.5 质量管理	20
8 质量检验	21
8.1 基本要求	21
8.2 实测项目	21
8.3 实测项目	22
附录 A (资料性) 常用固化剂掺入量参考表	23
附录 B (规范性) 就地固化土填料的回弹模量计算	24
附录 C (规范性) 就地固化硬壳层的承载力计算	25
附录 D (规范性) 就地固化硬壳层复合地基的沉降计算	31

前 言

本标准按照 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。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由浙江省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：浙江数智交院科技股份有限公司、河海大学、浙江交工集团股份有限公司、浙江省交通工程管理中心、汇壹（上海）环境岩土科技有限公司。

本标准主要起草人：陈建荣、陈永辉、沈坚、陈龙、曾怀武、楼华锋、毛斌、何杨闽、陈妙初、宋德洲、陈新国、孙美华、余茂科、曾庆余、陈庚、缪国波、陈作雷、段冰、俞涛、程伟述、单君、金康康、何建国、高玉峰、梁诚玉、翟骥腾、吕昆、高大卫、徐洁、高建科、史江伟、潘晟赞、张俊楠、潘非誉、项启浩、方勇刚、水小清。

公路工程强力搅拌就地固化设计与施工技术规范

1 范围

本标准规定了公路工程强力搅拌就地固化设计与施工的基本规定、材料与设备、设计、施工和质量检验等技术要求。

本标准适用于新建、改扩建公路工程强力搅拌就地固化的设计、施工和质量检验。

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标准必不可少的条款。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）适用于本标准。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 176 水泥化学分析方法
- GB/T 208 水泥密度测定方法
- GB/T 1345 水泥细度检验方法
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB 5085.3 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别
- GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法
- GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- CJ/T 486 土壤固化外加剂
- CJ/T 526 软土固化剂
- JTG 3430 公路土工试验规程
- JTG 3450 公路路基路面现场测试规程
- JTG/T 3610 公路路基施工技术规范
- JTG D30-2015 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 D32 公路土工合成材料应用技术规范
- JTG D40 公路水泥混凝土路面设计规范
- JTG D50 公路沥青路面设计规范
- JTG/T F20 公路路面基层施工技术细则
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTJ 63 混凝土用水标准
- NY/T 1377 土壤PH值的测定
- DB33/T 904 公路软土地基路堤设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

就地固化技术 in-situ solidification technique

利用固化剂采用就地固化设备对软弱土等土体进行固化处理，使土体达到一定强度和其它使用要求，实现土体就地利用和满足地基处理要求的技术。

3.2

强力搅拌就地固化系统 power mix in-situ solidification system

由强力搅拌头、挖掘机、固化剂供料设备、储料设备和控制系统等组成的就地固化成套设备系统。

3.3

就地固化浅层处理 in-situ shallow solidification treatment

对地表层深度一般不超过5m的软弱土体进行就地固化处理的一种浅层处理方法。

3.4

就地固化硬壳层 in-situ solidification hard crust

利用就地固化技术处理软土地基，形成具有一定厚度和强度的人工硬壳层。

3.5

就地固化硬壳层复合地基 composite foundation of in-situ solidification hard crust

就地固化硬壳层与刚（或柔）性桩竖向增强体共同承担荷载的人工复合地基。

4 基本规定

4.1 公路工程强力搅拌就地固化（以下简称“就地固化”）设计与施工方案，应遵循“安全适用、技术先进、经济合理、质量可控”的原则，做到因地制宜、节约资源和保护环境。

4.2 就地固化处理路段应做好现场地形地貌、工程地质、水文、气象和筑路材料等调查、分析和试验等勘测和勘察工作，为设计和施工提供基础资料。

4.3 就地固化设计方案应结合现场气候、地形、地质、水文、材料、使用要求、建设工期和养护条件等因素，综合分析确定，满足承载力、沉降和稳定的要求。

4.4 就地固化宜采用湿法施工，应根据设计要求制定详细的施工组织设计，合理确定就地固化施工方法、固化设备和材料选择，实现施工全过程信息化控制和管理。

4.5 应采用动态设计方法，重视施工监测与分析。在施工阶段应通过试验段进行现场试拌和工艺性试验，验证施工配合比，确定施工工艺和技术参数。

4.6 就地固化设计与施工应符合现行国家和行业有关技术要求、环境保护、安全生产与消防等方面的规定

5 材料与设备

5.1 一般规定

5.1.1 固化材料主要包括固化剂、外加剂、外加土和水等，其技术指标应满足相关标准的要求。

5.1.2 固化设备主要包括强力搅拌头、挖掘机、固化剂供料系统、储料设备和控制系统等，其具体要求见 5.3；对就地固化设备进场应提供产品合格证书或使用维护保养资料，并在施工前应进行检查和调试。

5.1.3 根据设计和施工要求，对固化剂进行检验和测试，属于成品的固化剂需提供产品质量检验合格证明等。

5.2 材料

5.2.1 固化剂

5.2.1.1 固化剂的选择应遵循“就地取材、经济合理、保护环境”的原则，其质量应符合 CJ/T 486 和 CJ/T 526 等有关的规定；固化剂类型和掺量应根据土体的性质，可根据室内试验或参照附录 A 选用，并通过现场试验进行调整。

5.2.1.2 固化剂分为无机类、有机高分子类、有机无机复合类和离子类等，相应材料要求及适用条件如下：

- a) 常用的无机类固化剂包括水泥、粉煤灰、石灰、石膏、矿渣微粉、地聚合物等，宜适用于常规软弱土的固化处治；
- b) 常用的有机高分子类固化剂包括有机酶蛋白固化剂、氨基化合物固化剂等，除特殊土体固化或对固化土有特殊要求时采用有机高分子类固化材料处治外，不宜单独使用有机高分子类固化材料对软弱土进行加固处治；
- c) 常用的有机无机复合类固化剂包括水泥类+有机类稳定剂等，宜适用于腐殖质或有机质土等特殊要求的软弱土的加固处治；
- d) 离子类土壤固化剂宜适用于淤泥的加固处治。

5.2.1.3 固化剂按材料形态分为液体和粉体两大类。液体固化剂呈均匀状态，不应有沉淀；粉体固化剂均匀一致，不应有结块；并应符合 CJ/T 486 的规定。

5.2.1.4 常用的水泥、粉煤灰、矿渣微粉和石灰等无机类固化剂，其质量要求应符合以下规定：

- a) 水泥应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，质量应符合 GB 175 中规定的技术要求，且强度等级不应低于 42.5 级；
- b) 粉煤灰应符合 GB/T 1596 中的技术要求，选用不低于二级；
- c) 矿渣微粉应符合 GB/T 18046 中的技术要求，选用不低于 S95 级别；
- d) 石灰应选用不低于 JTG/T F20 中 II 级质量要求的生石灰，材料为粉状或块状，无杂质。

5.2.2 外加剂

5.2.2.1 外加剂包括早强剂、稳定剂、缓凝剂、减水剂等，应针对不同环境和要求，按一定比例与固化剂一同掺入，起到促进或抑制固化土强度的作用，其选用及掺量应通过工程试验或工程经验确定。

5.2.2.2 外加剂的技术要求应符合 GB 50119 的相关规定。

5.2.3 外加土

5.2.3.1 外加土应进行颗粒分布、液塑限、塑性指数、有机质含量、含水率、最佳含水率等基本工程性质试验，测试方法应符合 JTG 3430 的规定，并应符合以下规定：

- a) 外加土应就地取材，土粒最大粒径不应大于 50mm；
- b) 土中有机质含量（重量比）不宜超过 5%，含水率不宜超过 40%，具体应通过试验确定。

5.2.3.2 外加土的技术要求和掺量应根据固化剂类型通过室内配合比试验确定。

5.2.4 水

5.2.4.1 饮用水或自来水均可直接使用。

5.2.4.2 采用地下水、地表水或再生水时，应符合 JTJ 63 的要求。

5.3 设备

5.3.1 强力搅拌就地固化系统由强力搅拌头、挖掘机、固化剂供料系统以及控制系统等组成（见图1），该系统通过后台自动定量供料控制系统控制进料及输料，将后台料仓内的固化剂混合后通过安装于挖掘机上的强力搅拌头的喷粉或喷浆装置输出，在搅拌头的强力搅拌下，将输出的固化剂与土体均匀拌和。

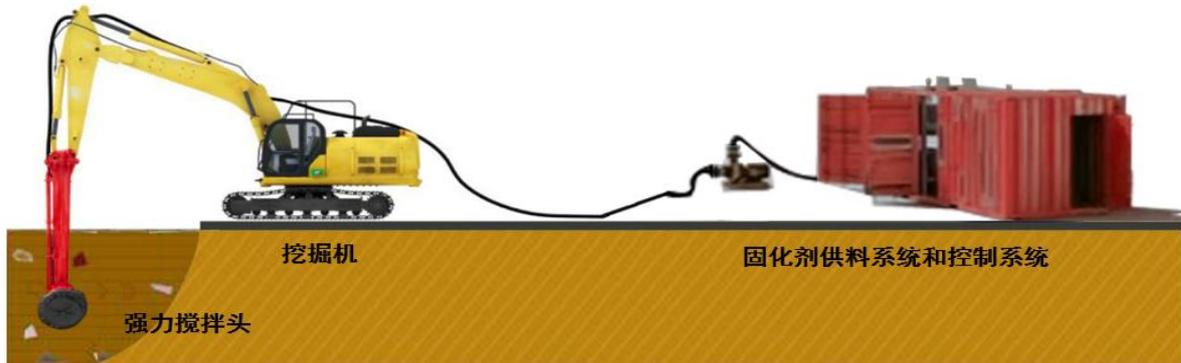


图1 强力搅拌就地固化系统示意图

5.3.2 强力搅拌就地固化系统应满足场地条件，处理深度不宜超过 7m。

5.3.3 强力搅拌头由 2 个及以上按一定角度对称分布在连接杆两侧独立驱动的搅拌头组成，通过挖掘机液压系统驱动，实现固化剂与软弱土的三维搅拌，保证搅拌的均匀性，其结构示意图见图 2，并符合以下规定：

- 搅拌头轴横转速为 $50\text{r}/\text{min}\sim 120\text{r}/\text{min}$ ，单次搅拌形状在平面上为矩形而非圆形，搅拌头连接杆的悬臂长度一般在 $3\text{m}\sim 7\text{m}$ ；
- 搅拌头宽度为 $1.3\text{m}\sim 1.8\text{m}$ ，高度为 $0.8\text{m}\sim 1.0\text{m}$ ；
- 当设计固化深度小于 1.2m 时，宜选用搅拌头高度不超过 0.8m 的搅拌头设备。

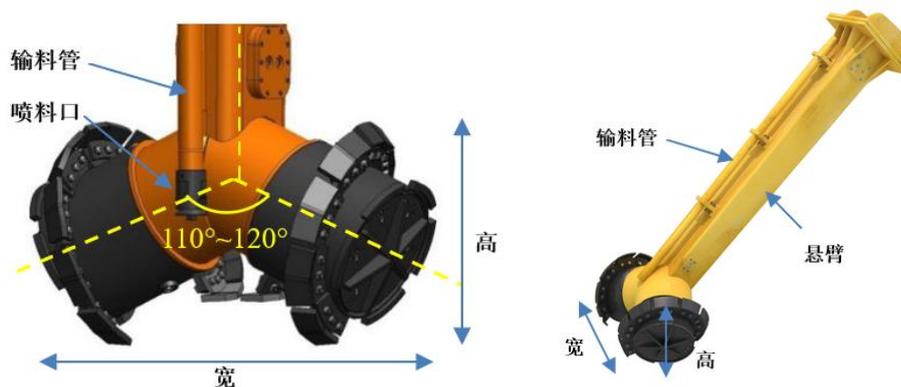


图2 强力搅拌头结构示意图

5.3.4 挖掘机的类型应根据所选用的强力搅拌头尺寸的大小来选择，以提供搅拌头搅拌与移动时的动力，保证搅拌头的液压驱动力和搅拌的稳定性，液压驱动力为 $23\text{MPa}\sim 42\text{MPa}$ ，挖机应选择与搅拌头相匹配的型号。

5.3.5 固化剂供料系统根据就地固化施工方法分为浆剂供料系统和粉剂供料系统，浆剂设备最大压力不小于 3MPa ，粉剂设备最大压力不小于 6MPa ，后台供料系统应实现多种固化剂的同时供料。

5.3.6 控制系统主要包括自动定量供料系统和搅拌头定位系统，应符合以下规定：

- a) 自动定量供料系统宜安装于后台供料系统中，应能控制固化剂出料量与出料时间、实时显示并记录施工区域的用料量，保证每次搅拌区间和整个区块的固化剂用量，数据存储和打印；并进行远程操作，达到固化剂喷料的自动化和智能化；
- b) 就地固化系统应装有搅拌过程定位和记录系统，控制固化全过程。

6 设计

6.1 一般规定

6.1.1 就地固化设计应根据公路等级、交通荷载、填土高度、软弱土的厚度及其指标、使用要求、施工条件、环保要求、经济和社会效益等进行综合经济技术比较，合理确定就地固化处理方案。

6.1.2 软弱土按照厚度分为浅层软弱土（厚度 $\leq 5\text{m}$ ）、中厚层软弱土（ $5\text{m} < \text{厚度} \leq 15\text{m}$ ）、厚层软弱土（ $15\text{m} < \text{厚度} \leq 30\text{m}$ ）和深厚层（巨厚层）软弱土（厚度 $> 30\text{m}$ ）。

6.1.3 就地固化设计应满足地基承载力、沉降和稳定性要求，并应符合 JTG D30、JTG/T D31-02、DB33/T 904 和本文件的相关规定。

6.1.4 根据工程项目使用要求、加固范围和加固方法的不同，就地固化分为就地固化浅层处理和就地固化硬壳层复合地基两大类，其适用范围、常用形式、选用原则和设计要求详见 6.3 和 6.4 的相关规定。

6.1.5 就地固化设计内容主要包括形式选用、材料和设备选择、配合比设计和工程方案设计等，并应符合以下规定：

- a) 就地固化形式的选用按 6.3.2 和 6.4.2 的规定确定；材料与设备的选择应符合第 5 章的规定；
- b) 固化土配合比设计应符合 6.2 的规定，通过配合比试验确定固化材料类型及其掺入量，并确定不同工程固化土的工程技术参数和施工工艺要求；
- c) 工程方案主要包括就地固化浅层处理、就地固化硬壳层复合地基和监控设计等。

6.1.6 应重视施工监测和分析，对就地固化配合比和设计方案采用动态设计方法。

6.2 配合设计

6.2.1 就地固化土配合比设计应符合以下规定：

- a) 初步设计阶段参照以往工程经验和本文件的相关规定，结合地质初勘成果，合理确定固化剂类型和掺量；
- b) 施工图设计阶段根据工程要求和地质详勘成果，进行现场取样和室内配合比或现场试验，确定固化剂种类及固化土的各项设计技术参数；
- c) 在施工阶段，施工单位应根据施工图设计阶段提供的设计配合比，进行现场配合比和工艺性试验，通过试搅和试拌，以验证和优化设计参数。

6.2.2 就地固化配合比试验应符合以下规定：

- a) 配合比试验时至少应采用三个不同的固化剂掺量的配合比，其中一个配合比的固化剂掺量应为基准值，另外两个配合的固化剂掺量在基准值的基础上分别增加和减少 1%~2%；
- b) 试件制备以及相关试验方法应按照 JTG 3430 进行；固化剂掺量计算按原状土干密度或湿密度为基准进行计算；固化土配合比应进行固化土 7d、14d、28d 或 90d 无侧限抗压强度试验；
- c) 设计应考虑就地固化现场对周边重要水源和农作物等环境的影响程度，确定是否需要对固化土的浸出液进行 PH 值等污染物测试，具体测试方法按照 NY/T 1377 和 GB 5085.3 相关内容执行。

6.2.3 配合比设计步骤规定如下：

6.2.3.1 收集和调研已有工程设计和使用效果，对原状土、固化剂、外掺剂、水和外加土进行取样分析，并应符合以下规定：

- a) 对原状土进行取样试验,明确土体含水量、液塑限、有机质含量、PH值等相关指标;
 - b) 外加土所取代表性试样应符合 5.2.3 的规定,并进行含水率、密度、孔隙率和饱和度等必要试验,掌握土的基本物理力学性能指标以及化学性质等。
- 6.2.3.2 根据以往工程经验和本文件规定,合理确定固化材料及其掺量,明确施工方法,并符合以下规定:
- a) 固化剂的掺量、主要成分应结合当地原材料情况、土质情况、地基承载力设计要求,并结合类似的工程经验确定固化剂配合比基准值,湿法施工时应确定水灰比;
 - b) 采用水泥、石灰等无机类固化剂时,固化剂配合比基准值宜取 5%~15%;对不同含水率和不同设计强度要求的固化土,应根据室内试验或参考附录 A 初步确定其固化剂的掺入量;实际施工时,应根据现场试验,进行固化剂的种类和掺量的优化和调整;
 - c) 根据不同工程要求的固化土的无侧限抗压强度和承载比 CBR 等室内试验成果,结合工程实际初步确定固化土最佳配合比,确定固化土材料、掺量和强度等技术要求;不符合设计要求的应重新进行配合比设计;
 - d) 配合比设计报告应包括原状土基本物理和化学性质、固化材料的类型、掺量和固化土的设计技术参数检验结果等。

6.3 就地固化浅层处理

6.3.1 适用范围

适用范围如下:

- a) 浅层软弱土厚度小于 5m 的路段;
- b) 鱼塘、池塘、河道、暗浜和山坳软弱土等需清淤换填的不良地质路段;
- c) 泥浆池、沼泽地、滩涂或围海造路吹填土等无硬壳层路段;
- d) 中厚层~深厚层软弱土低路堤路段;
- e) 地基强度不满足路基路面结构层要求和结构物基础承载力要求的浅层软弱土处治路段;
- f) 当地基处理施工机械行走困难,也可考虑先采用浅层固化处理形成硬壳层,为施工提供条件;
- g) 废弃土体需进行就地固化,达到资源化利用作为路基填料使用的路段。

6.3.2 常用形式及选用原则

6.3.2.1 就地固化浅层处理常用形式为浅层软弱土全部固化处理、部分固化处理、低填浅挖及结构物路段浅层固化处理和中厚层~深厚层软土低路堤浅层固化处理,其中浅层软弱土部分固化处理包括全断面固化、全断面固化组合格栅式固化和全断面固化组合点式固化处理等形式。

6.3.2.2 就地固化浅层处理选用原则,规定如下:

- a) 地基表层厚度不大于 3m 的软弱土路段,采用浅层软弱土全部固化处理,见图 3 所示;
- b) 地基表层软弱土厚度大于 3m 小于 5m 的软土路段,根据路基填土高度采用浅层软弱土全部固化见图 3 或部分固化处理见图 4~图 6;
- c) 常年积水的河塘、洼地、滩地、沼泽地、泥浆池、污染池和欠固结吹填土等地基表层无硬壳层路段,需要清淤和换填处理时,根据路基填筑高度及软弱土厚度,采用全部固化处理见图 3b) 或部分固化处理见图 4b);
- d) 低填浅挖路基软弱土路段,采用部分固化浅层处理见图 7a);挡土墙、通道、箱涵、圆管涵、管线等结构物基础下卧软弱土层,采用就地固化浅层处理,满足结构物基础承载力和使用功能要求见图 7b);



图3 浅层软弱土全部固化处理示意图

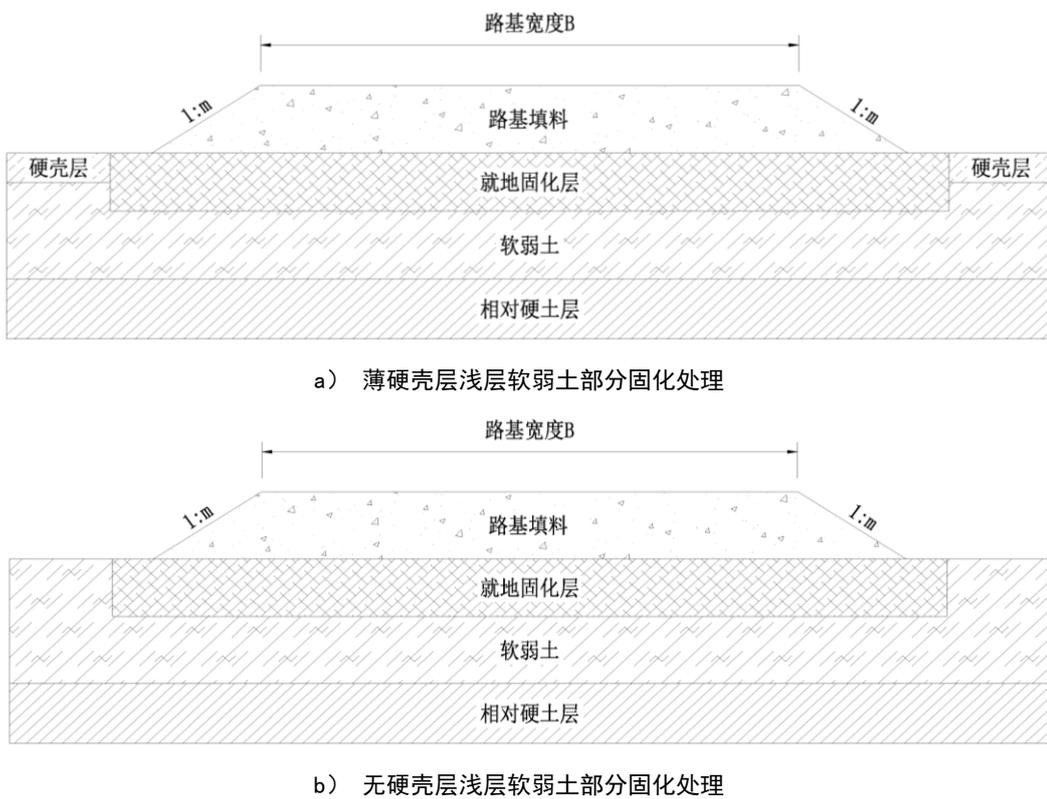


图4 浅层软弱土部分固化处理（全断面固化）示意图

- e) 对于中厚层~深厚层软土低路堤路段，采用部分固化浅层处理见图 8，就地固化硬壳层与软弱土形成双层地基。

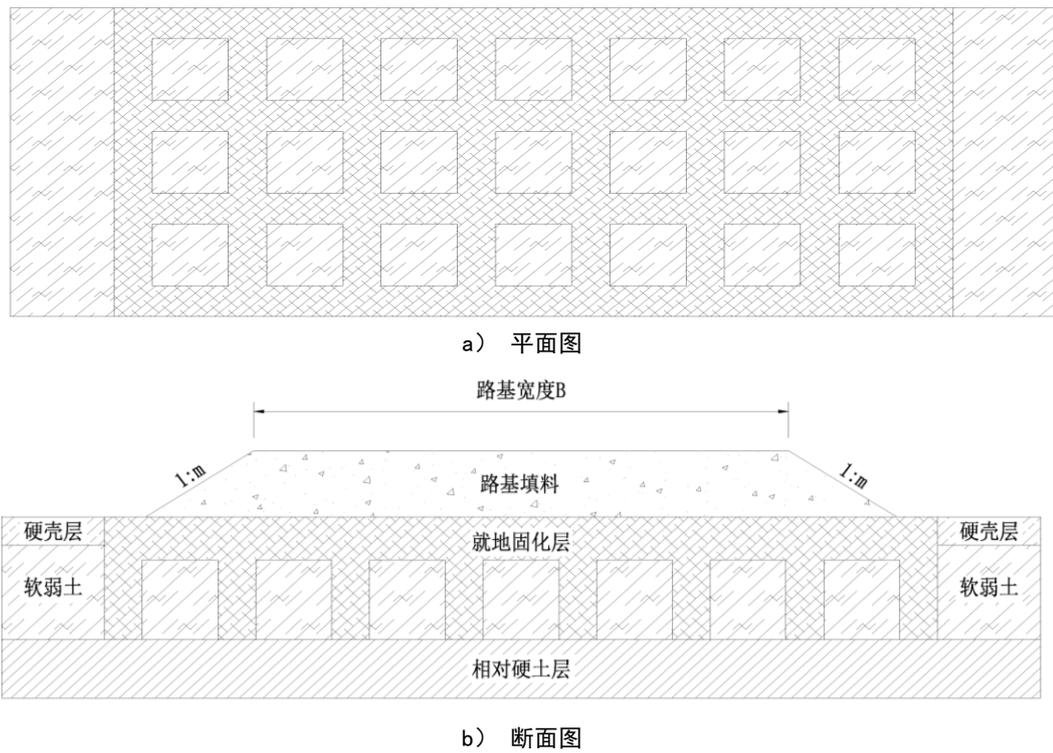


图5 浅层软弱土部分固化处理（全断面固化组合格栅式固化）示意图

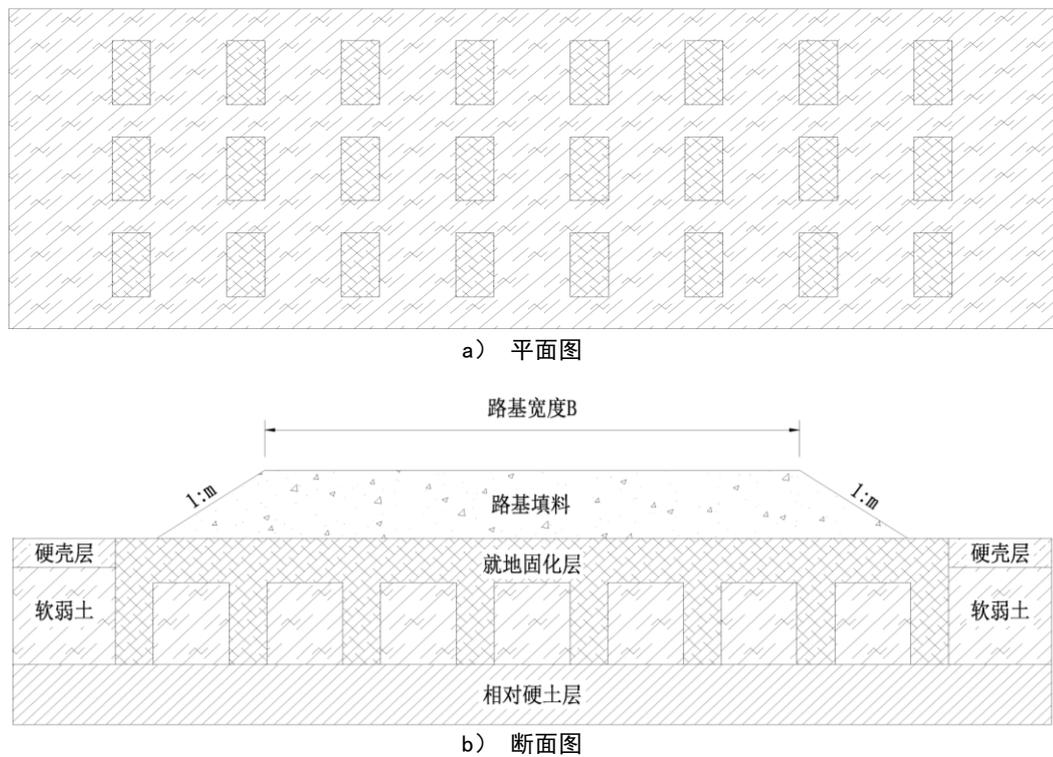


图6 浅层软弱土部分固化处理（全断面固化组合点式固化）示意图

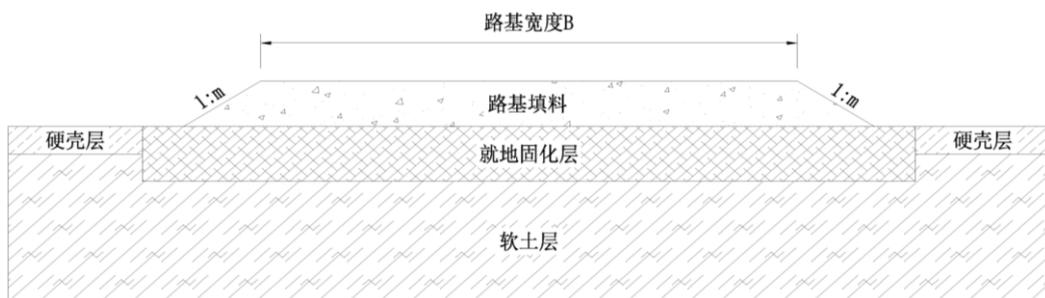


a) 低填浅挖路基软弱土浅层固化处理

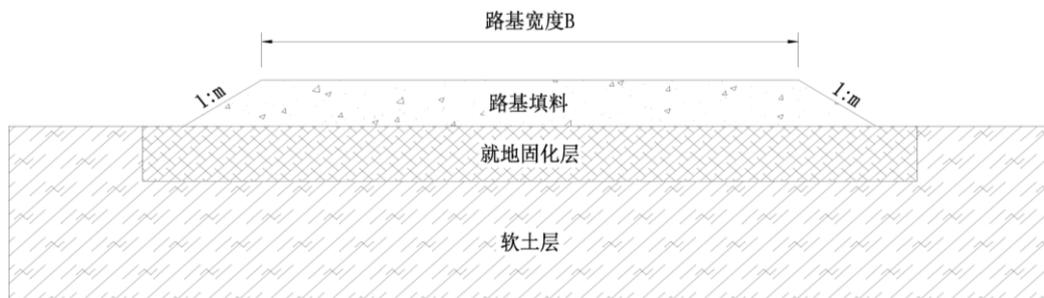


b) 结构物基础浅层固化处理

图7 低填浅挖路基及结构物路段浅层固化处理示意图



a) 薄硬壳层中厚~深厚软土浅层软土部分固化处理



b) 无硬壳层深厚软土浅层软土部分固化处理

图8 中厚层~深厚层软土低填方路堤浅层固化处理示意图

6.3.3 设计计算

6.3.3.1 浅层固化设计内容包括浅层固化土材料及配合比设计、浅层固化厚度、宽度和加筋垫层等；计算内容包括就地固化硬壳层表面承载力、下卧层承载力、沉降和稳定性计算等。

6.3.3.2 浅层固化设计前应在地质勘察成果基础上，按 6.2 的要求进行拟处理土的室内配合比试验，试验确定固化剂类型及其掺量，必要时应进行压缩模量的测试。

6.3.3.3 浅层固化土设计强度采用固化处理后土体的 90d 龄期无侧限抗压强度值，固化处理后土体的 90d 无侧限抗压强度值应通过现场取样试验确定；初步设计时应根据室内固化土试块 90d 无侧限抗压强度估算，具体计算按式（1）估算。

$$f_a = \eta f_{cu} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

f_a ——固化处理后土体 90d 无侧限抗压的强度（kPa）；

η ——强度折减系数（0.60~0.85），当土体与固化剂搅拌均匀性好时取高值，具体可根据试验确定；

f_{cu} ——在标准养护条件下，按设计配合比由室内制备的加固土试块测得的 90d 龄期试块无侧限抗压强度平均值（kPa）。

6.3.3.4 浅层固化处理厚度应根据软弱土的深度、就地固化硬壳层表面及下卧层的承载力确定，应按式（2）、式（3）和式（4）进行反复试算确定。

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

p_z ——相应于荷载效应标准组合时，就地固化层底面处的附加应力（kPa）；

p_{cz} ——就地固化层底面处的自重应力（kPa）；

f_{az} ——就地固化层底面处经深度修正后的地基承载力特征值（kPa）。

6.3.3.5 浅层固化顶面为矩形基础或条形基础时，其附加应力应按式(3)或式(4)进行计算，并进行就地固化层下部土体的承载力验算。

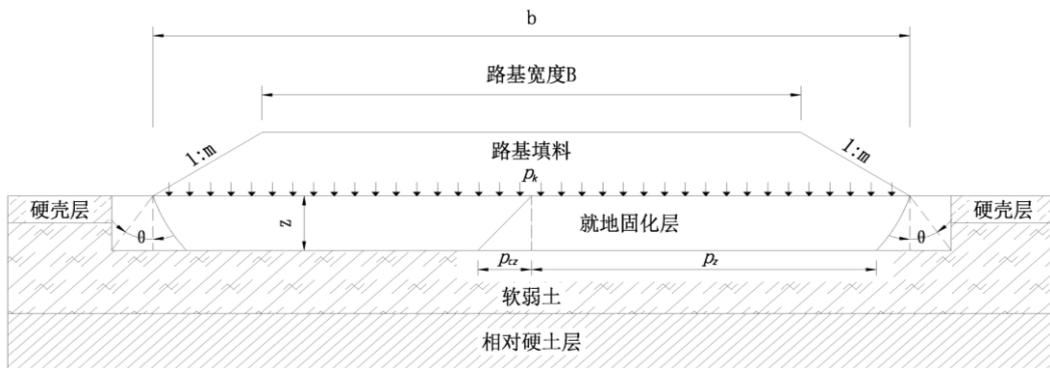


图9 附加应力扩散法计算示意图

$$p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \tan \theta)(1 + 2z \tan \theta)} \dots\dots\dots (3)$$

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

p_z ——相应于荷载效应标准组合时，就地固化层底面处的附加应力（kPa）；

b ——路基（或基础）底面宽度（m）；

- l ——路基（或基础）底面长度（m）；
 p_k ——相应于荷载效应标准组合时，路基（或基础）底面处的平均压力设计值（kPa）；
 p_c ——路基或基础底面处的自重应力（kPa）；
 z ——固化层的厚度（m）；
 θ ——就地固化层压力扩散角（°），取 $28^\circ \sim 45^\circ$ ，无试验资料时取值宜通过试验确定。

6.3.3.6 就地浅层固化层底面处理宽度按式（5）计算确定，路基或基础底面单侧外延伸不小于1.0m。

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \dots \dots \dots (5)$$

式中：

- b' ——固化层底面宽度（m）；
 b ——路基或基础底面宽度（m）；
 z ——固化层的厚度（m）；
 θ ——就地固化层压力扩散角（°），取 $28^\circ \sim 45^\circ$ ，无试验资料时取值宜通过试验确定。

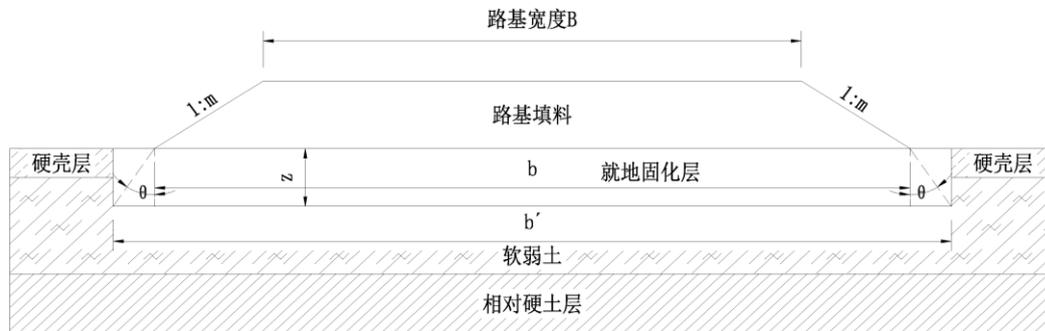


图10 就地固化硬壳层宽度要求示意图

6.3.3.7 低填、浅挖路基底面采用就地浅层固化处理时，固化处理深度应满足相应交通荷载等级的路床厚度和路基工作区深度的要求，且其土基回弹模量 E_0 值应满足JTG D30、JTG D40和JTG D50的要求。

6.3.3.8 标准状态下就地固化土的动态回弹模量值 M_R 应按JTG D30-2015附录A通过重复加载三轴压缩试验确定，也可按式（6）和式（7）进行计算确定。需要考虑路基湿度状态影响时，就地固化土的动态模量值 M_R 应按照附录B中式（B.1）进行估算；需要进一步考虑温度效应时，就地固化土的动态模量值 M_R 应按照附录B中式（B.2）进行估算。

$$M_R = 17.6 CBR^{0.64} \quad (2 < CBR \leq 12) \dots \dots \dots (6)$$

$$M_R = 22.1 CBR^{0.55} \quad (12 < CBR < 80) \dots \dots \dots (7)$$

式中：

M_R ——标准状态下固化土填料的动态回弹模量值（MPa）；

CBR ——加州承载比（%）。

6.3.3.9 就地固化浅层加固软基时应对就地固化硬壳层表面承载力进行计算，并应符合以下规定：

- 就地固化硬壳层表面承载力应按照 JTG 3450 规定要求通过现场载荷试验进行确定；
- 初步设计阶段，就地固化硬壳层表面承载力验算应按照 GB 50007 均质地基进行估算，土层参数根据荷载影响深度按加固区以及加固区以下的加权平均值计算；若需进行精确计算，则应按附录 C 中 C.1 内容进行计算；
- 就地固化浅层加固软基地基承载力计算时，应取就地固化硬壳层表面承载力和下卧层承载力的安全系数小值进行设计验算；相应的下卧层承载力安全系数 K_T 按式（8）计算：

$$K_{\bar{f}} = \frac{f_{\bar{f}}}{P_h} \dots \dots \dots (8)$$

式中：

$K_{\bar{f}}$ ——下卧层承载力安全系数；

$f_{\bar{f}}$ ——下卧层承载力特征值（kPa）；

P_h ——下卧层顶面附加应力（kPa），根据式(3)或式(4)进行计算。

6.3.3.10 就地固化浅层加固软基时应对就地固化硬壳层表面承载力进行计算，并应符合以下规定：就地固化浅层处理下卧软土时沉降计算应满足设计要求。沉降计算包括就地固化硬壳层与就地固化下卧软土层的沉降，如图11所示，具体计算应符合以下规定：

- a) 就地固化硬壳层的压缩沉降量 S_1 可采用复合压缩模量法，按照 JTG/T D31-02 中相关规定进行；
- b) 下卧层软土的压缩沉降量 S_2 按照 GB 50007 采用分层总和法计算。

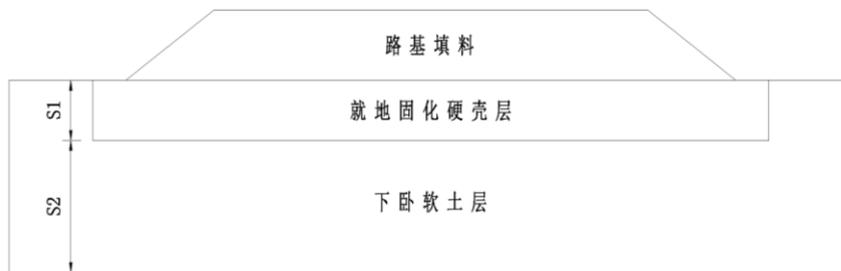


图11 就地固化硬壳层双层地基沉降计算图

6.3.3.11 就地固化浅层处理路堤软基时，路堤的稳定性计算可采用圆弧滑动法进行计算，固化土的抗剪强度可采用试验路段固化土90d原状试件测得的无侧限抗压强度值的1/2，也可按照设计配合比由室内制备的90d固化土试件测得的无侧限抗压强度的30%，具体计算应按照JTG/T D31-02相应内容进行计算。

6.3.3.12 就地固化浅层处理时，为增加其稳定性可在顶面设置加筋垫层。加筋宜采用高强土工合成材料，垫层采用掺灰土或级配碎石及砂砾等透水性良好的填料。

6.4 就地固化硬壳层复合地基

6.4.1 适用范围

无硬壳层或硬壳层厚度薄不满足承载力要求的高填方中厚层~深厚层软基路段或桥头、通道、涵洞等构造物与路堤相邻路段。

6.4.2 常用形式及选用原则

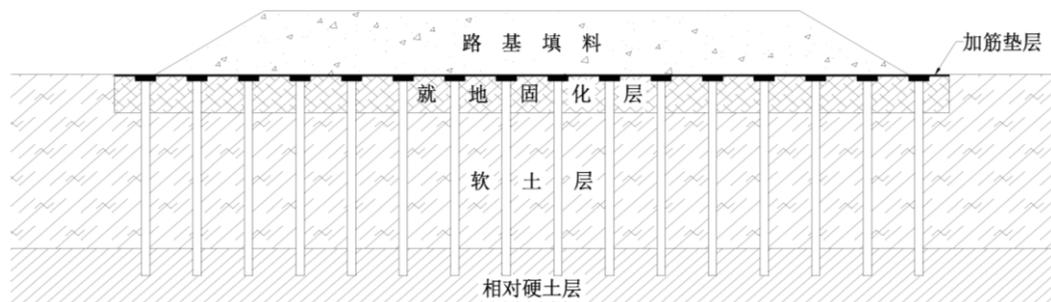
6.4.2.1 就地固化硬壳层复合地基常用形式，主要分为预应力管桩等刚性桩复合地基和水泥搅拌桩等柔性桩复合地基两大类；其中刚性桩复合地基应设置预制桩帽、现浇桩帽或桩帽整体连接，柔性桩复合地基（包括打穿软土层和不打穿软土层）可不设桩帽，见图 12。

6.4.2.2 就地固化硬壳层复合地基选用原则，规定如下：

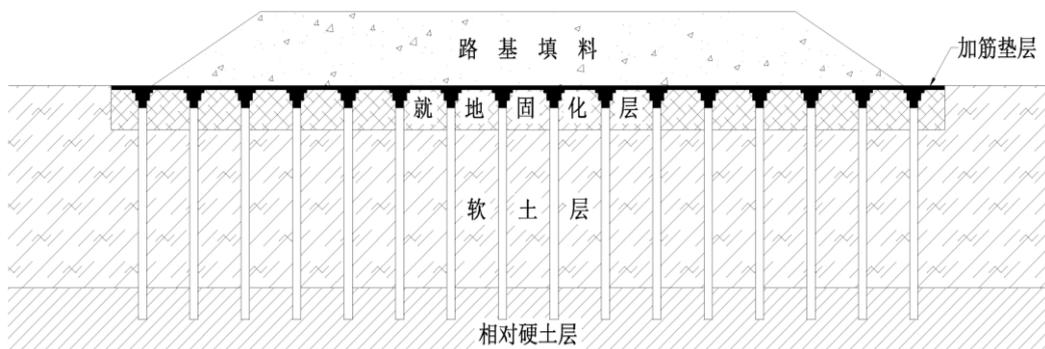
- a) 对无硬壳层或硬壳层薄的中厚层软弱土路段，采用就地固化硬壳层+刚（柔）性桩复合地基处理，刚（柔）性桩应打穿软土层并进入承载力相对较高的土层；对无硬壳层或硬壳层薄的厚层

及深厚层（巨厚层）软弱土路段，采用就地固化硬壳层+刚性桩复合地基处理，刚性桩宜打穿软土层进入持力层；见图 12a）、图 12b）和图 12d）；

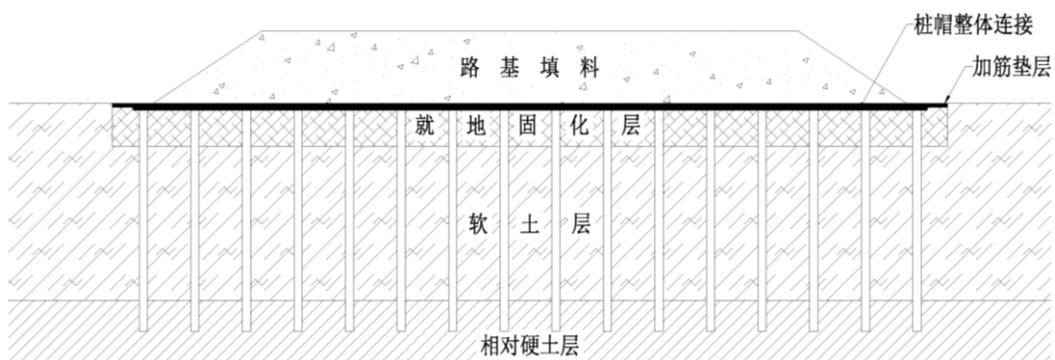
- b) 硬壳层较薄且软土性质较差、软土深度变化较大的傍山路段、临空面较大的沿河（改河）等路段的高路堤或易形成土拱效应的低路堤，刚性桩的帽间宜采用钢筋混凝土系梁连接方式，见图 12c）；
- c) 对无硬壳层或硬壳层薄的厚层及巨厚层软弱土路段，在满足路基沉降和稳定时，也可采用就地固化硬壳层+柔性桩（未打穿软土层）复合地基，必要时可根据 DB33/T 904 结合堆载预压和轻质路堤联合处治。



a) 预制桩帽刚性桩复合地基

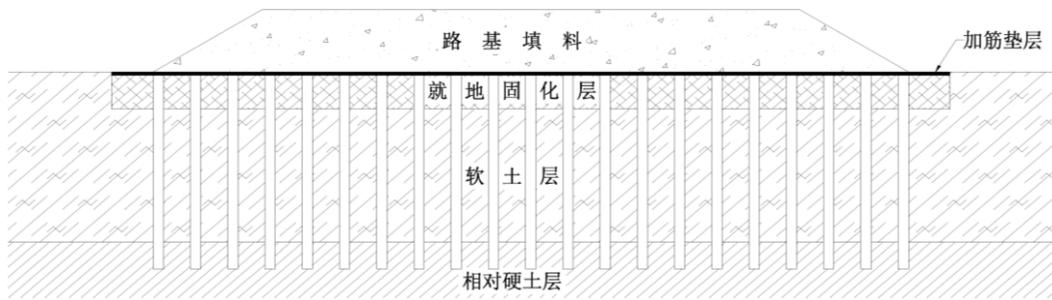


b) 现浇桩帽刚性桩复合地基

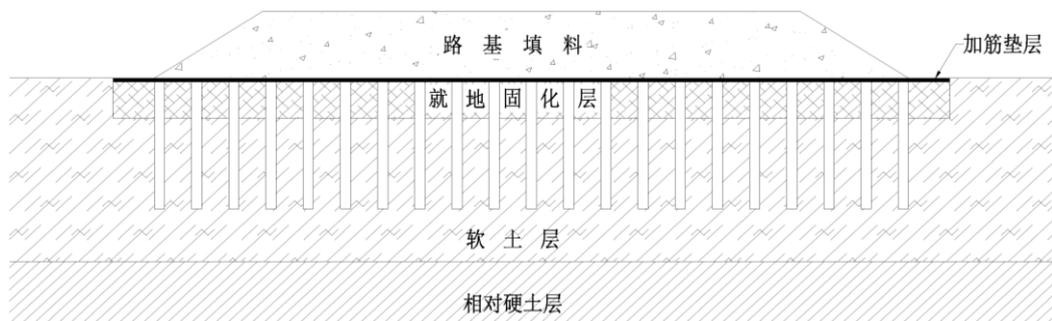


c) 桩帽整体联结刚性桩复合地基

图12 就地固化硬壳层复合地基常用结构形式



d) 不设桩帽柔性桩复合地基（打穿软土层）



e) 不设桩帽柔性桩复合地基（未打穿软土层）

图 12（续） 就地固化硬壳层复合地基常用结构形式

6.4.3 设计要求

6.4.3.1 就地固化硬壳层复合地基设计内容包括浅层固化土材料及配合比设计、浅层固化厚度和宽度和刚（柔）性桩直径、长度和间距和加筋垫层等；计算内容包括就地固化硬壳层复合地基承载力、单桩承载力、沉降和稳定性计算等。

6.4.3.2 就地固化硬壳层复合地基应结合公路等级、软土层厚度及其性状指标、填土高度等，根据路基沉降和稳定控制标准，合理确定就地固化人工硬壳层的加固厚度、刚（柔）性桩类型、布设和水平加筋垫层等。

6.4.3.3 就地固化硬壳层固化土应进行室内配合比试验，并根据已有工程经验，合理确定固化土的固化剂类型、掺量以及固化土的设计强度，具体设计应按照 6.3.3.2 和 6.3.3.3 的规定进行。

6.4.3.4 就地固化硬壳层的厚度宜为 1.5m~3.0m，宽度为坡脚外不小于 1.0 m，具体应结合刚（柔）性桩的布设要求，按 6.3.3.4 和 6.3.3.6 的相关规定进行计算确定。

6.4.3.5 刚（柔）性桩的桩型、桩体材料、桩体平面布置、桩长、桩帽等设计要求应按照 DB33/T 904 中相应规定进行；确定桩间距时，应在保证路堤稳定性及承载力的基础上，充分利用桩间土的承载力。

6.4.3.6 预应力管桩等刚性桩的桩顶设置的预制桩帽宜与就地固化硬壳层顶面持平见图 12a)；设置现浇桩帽时应采用素混凝土或高掺量固化土进行回填的结构形式见图 12b)；特殊地形、地貌和地质路段管桩桩帽采用钢筋混凝土系梁连接时，桩帽和钢筋混凝土系梁宜设置在就地固化硬壳层顶面，且采用现浇施工工艺见图 12c)，以提高整体抗水平侧倾能力。

6.4.3.7 就地固化硬壳层复合地基桥头和路堤过渡段，打穿软土层的刚（柔）性桩宜变间距辅以轻质填料方案平缓过渡，未打穿软土层的柔性桩宜采用变桩长辅以轻质填料方案平缓过渡。过渡段设计应符合 DB33/T 904 中的相关规定要求。

6.4.3.8 土工合成材料水平加筋体的设计和要求应按照 JTG/T D32 和 DB33/T 904 等规定进行，垫层材料可选用掺灰土或级配碎石及砂砾等透水性材料等。

6.4.3.9 就地固化硬壳层复合地基承载力及单桩承载力计算应符合以下规定：

- a) 刚性桩复合地基可不验算复合地基承载力，但作为支挡结构基础时需验算复合地基承载力；其单桩承载力验算可采用单桩静载试验或土体物理指标进行确定，具体计算应按照 DB33/T 904 的规定进行；
- b) 柔性桩复合地基承载力及单桩承载力验算应根据 DB33/T 904 的规定进行，其中固化处理后土体 90d 无侧限抗压的强度应根据 6.3.3.3 条款的规定进行计算；
- c) 复合地基承载力特征值计算时需对桩间硬壳层底部软土顶面附加应力进行验算，附加应力计算采用应力扩散法，具体计算应按照式(3)和式(4)进行；
- d) 初步设计阶段就地固化硬壳层复合地基承载力验算采用简化方法时应按照附录 C 中 C.3 内容进行计算。

6.4.3.10 就地固化硬壳层复合地基沉降计算应符合以下规定：

- a) 就地固化硬壳层复合地基沉降计算时，加固区和下卧层顶部附加应力，对刚性桩复合地基宜采用等效实体法；对柔性桩复合地基，应根据桩土模量比的大小分别采用等效实体法或应力扩散法；具体计算应按照 DB33/T 904 等相关规定进行；
- b) 刚性桩复合地基沉降主要包括桩身压缩量、桩端平面以下沉降量以及桩端刺入量等，可不考虑桩间土压缩变形对沉降的影响，采用单向压缩分层总和法计算最终沉降量；其沉降计算应按照 DB33/T 904 等相关规定进行；
- c) 柔性桩复合地基沉降计算主要包括加固区沉降量和加固区下卧层沉降量，其中加固区沉降量可采用复合压缩模量法进行计算，加固区下卧层沉降量采用分层总和法计算；其沉降计算应按照 DB33/T 904 等相关规定进行；
- d) 就地固化硬壳层复合地基沉降采用简化方法时应按照附录 D 的进行计算。

6.4.3.11 就地固化硬壳层复合地基路堤整体稳定性验算可采用圆弧滑动法，具体计算公式应按照 DB33/T 904 等相关规定进行，其中固化层应采用固化后土体强度等技术指标作为单一土层进行计算。

6.5 监测设计

6.5.1 就地固化监测设计主要内容包括：

- a) 典型断面沉降板、位移桩、测斜管等布置设计和监测内容；
- b) 提出公路填筑期、预压期和路面施工期等沉降速率控制指标和侧向位移的控制指标；
- c) 其他检测内容按照 DB33/T 904 的规定执行。

6.5.2 就地固化动态监测和分析的内容应按照 7.4 的规定执行。

7 施工

7.1 一般规定

7.1.1 公路工程就地固化施工应遵循国家建设工程、安全生产和环境保护等有关法律法规，建立健全质量保证体系、安全生产和环境保护管理体系，保证工程质量和安全，节约资源和保护环境。

7.1.2 根据就地固化设计要求、工程规模、土体情况、施工条件和环保要求等合理确定强力搅拌就地固化施工方法、外加土、固化剂类型和设备。

7.1.3 在软土工程性质及工程建设条件复杂的地区修建二级及二级以上公路时，宜在主线上选择代表性的路段作为试验工程，对就地固化处理方案和施工工艺进行验证。形成试验路段报告，经建设单位批准后，方可正式施工。

7.1.4 施工时应进行动态监控，当实际地质情况与设计不符或设计方案因故不能实施时，应及时提出书面报告，根据实际情况进行动态设计，修正设计方案。

7.1.5 软土地基路堤施工中，应根据设计要求进行监测，合理确定路基填筑速率、预压期和路面铺筑时间。

7.2 施工准备

7.2.1 施工前应做好以下准备工作：

- a) 收集并熟悉工程施工图设计文件（处治方案、固化剂选择、施工设备要求）、工程地质勘察报告、地下管线和构造物等资料；
- b) 施工现场的测量、放样、场地平整、必要的土工试验、设计处治方案的核对，并应具备施工用水、用电、施工道路畅通和必要的安全、环保设施等条件；
- c) 根据施工规模、配置设备和施工现场条件，合理配置施工人员及质量、安全和环保等施工管理人员。

7.2.2 应结合工期要求在施工现场调查的基础上，根据设计要求、施工条件及现场情况等编制科学、完整的施工组织设计或施工方案，合理安排施工工期，并做好现场技术交底工作。

7.2.3 施工前应按 6.2 的规定做好固化土的配合比设计，通过固化土试验路段确定固化土的最佳配合比、施工方法、施工参数和施工工艺，并应符合以下规定：

- a) 根据设计确定的固化土配合比和设计强度要求，选取典型路段进行试验，单个配比试验路段不小于 25m²，进行现场固化土施工配合比的验证；
- b) 按确定的最佳室内施工配合比进行现场试搅和工艺性试验，并对固化土进行相应的试验检测，各项技术指标应符合设计的要求；
- c) 通过试验段的总结，调整、确定最终固化土的施工配合比和施工工艺，为大面积施工提供技术依据；
- d) 根据试验工程调整施工组织设计或施工方案；
- e) 当采用就地固化硬壳层复合地基时，还应进行刚（柔）性桩的成桩工艺和成桩承载力试验，试桩数量应根据不同桩型和工艺要求合理确定；当成桩质量不满足设计要求时，应在调整设计与施工有关参数后，重新进行试验或调整设计，试桩要求按照 JTG/T D31-02 执行；
- f) 在靠近城区及村镇等环保要求较高的路段施工时，应采取合适的施工工艺和必要的环保措施。

7.2.4 固化材料和施工机械设备的选择应符合以下规定：

- a) 固化材料应提供质保单，存储与运输应符合安全、质量和环保等要求；实际施工用固化剂应与室内试验用固化剂类型一致，其余应符合 5.2 的相关规定；材料进场后应相关规定做好进场抽检工作；
- b) 施工机械设备及相应型号的选择，应根据设计要求、工程规模、施工条件与环境条件综合确定，并符合 5.3 的相关规定；施工前应做好设备调试工作。

7.2.5 施工前应对拟采用的土工合成材料，根据设计文件提供的设计指标，按照 JTG/T D32 规定要求，委托具有相应资质的单位进行检测，合格后方可进场和使用。

7.3 施工要点

7.3.1 施工方法

就地固化土施工方法应符合以下规定：

- a) 就地固化宜采用湿法施工，固化土的施工温度宜大于 4℃，同时宜避免暴雨天气施工；
- b) 就地固化处理宜采用边固化边推进的形式进行，见图 13；
- c) 就地固化拌和方式，对一般软土宜采用原位垂直上下搅拌固化方式；对表层存在硬壳层的土体宜采用挖掘机翻松搅拌固化方式；见图 14。

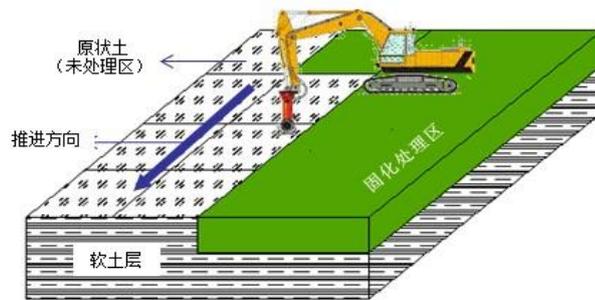


图13 边固化边推进的固化方式

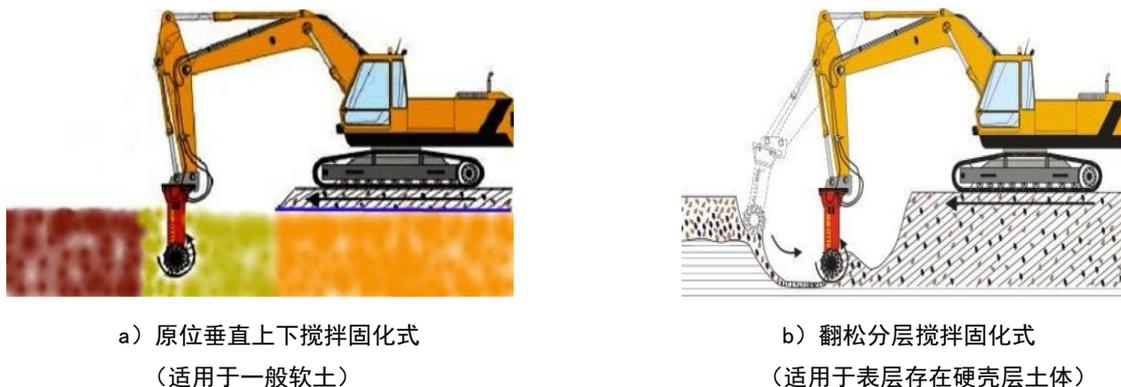


图14 就地固化搅拌方式

7.3.2 施工工艺

7.3.2.1 就地固化的施工工艺流程见图 15。

7.3.2.2 施工放样按照设计要求进行，对原地面进行复测、核对或补充横断面，并设置标识桩。

7.3.2.3 场地准备应符合以下规定：

- a) 清表排水：清除地表面灌木杂草等杂物，对于穿过池塘、虾塘等大面积水塘时，如若需要，可在道路建设范围内设置临时围堰，与外部隔离，在围堰内进行处理；
- b) 回填找平：按照设计固化层顶标高，用推土机对软弱土区场地进行初步整平，低洼处宜采用素土填平，并做好场地表面排水，表面平整，无积水。

7.3.2.4 对固化区域进行分块，区块大小宜为 10m²~30m²，常规的划分尺寸为 5m×6m。

7.3.2.5 采用信息化管理和物联网手段控制固化剂施工用量，并应符合以下规定：

- a) 根据场地区块划分和试验确定的固化土配合比，计算软弱土处理段落的固化剂用量，采用固化剂自动定量供料系统设置固化剂喷料速率及每区块的固化剂用量；
- b) 固化剂供料系统应具备精确实时记录和检测固化剂的用量、出料时间及已施工区域的固化剂用量等自动化和智能化的操作功能。

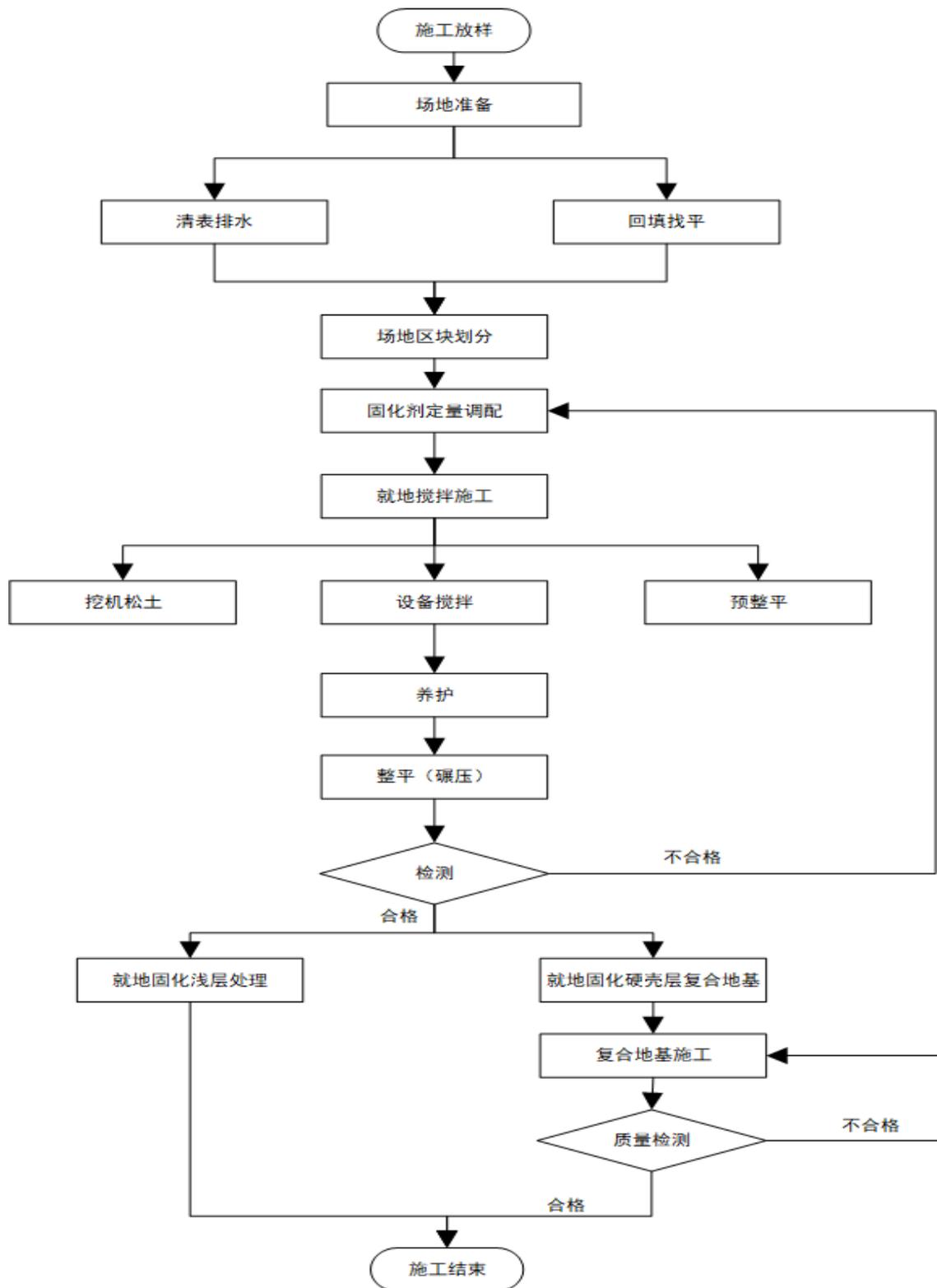


图15 就地固化施工工艺流程图

7.3.2.6 就地强力搅拌施工应符合以下规定：

- a) 固化土应采用根据试验确定的固化土施工方法；

- b) 就地固化处理采用边固化边推进的形式进行，见图 13，该部分为关键工序，应保证搅拌均匀，其强度满足设计要求，各施工方形小区块之间应有不小于 10cm 的复搅搭接宽度，避免漏搅；
- c) 搅拌提升或下降的速率控制在 0.1m/s~0.3m/s，固化剂的喷料速率控制在 100kg/min~200kg/min（粉剂）和 80kg/min~150kg/min（浆剂）；
- d) 按现场试验段批准确定的施工工艺和施工参数采用强力搅拌头对原状土进行就地强力搅拌，就地拌合时，将固化剂与原状土逐步搅拌到地基处理深度，搅拌应均匀，常用搅拌方式见图 14；
- e) 就地搅拌施工应注意以下事项：
- 1) 挖机松土。若强力搅拌头无法直接进行深层土一次处理，可采用挖机对所处理的区域进行松土；若表层存在硬土层时，应先采用挖机进行预松土，保证搅拌机械施工的顺利进行；
 - 2) 搅拌设备正向运行逐渐深入搅拌并喷射固化剂，直至达到地基固化处理深度底部；一般每个点上下搅拌循环次数不小于 2 次；搅拌过程定位系统应实时记录搅拌头搅拌施工全过程；
 - 3) 预整平。当固化区域搅拌完成后，应立即进行预整平，使用挖机将表面进行初步平整，避免场地积水。
- 7.3.2.7 固化土养护应符合以下规定：
- a) 就地固化土搅拌初步平整后进行表面养生，养护时间宜在 7d 以上；在有条件的情况下可结合其他地基处理措施采取相应的预压措施，保证搅拌后板体的整体性及表层土体的压实度；
 - b) 养护时如遇雨天宜在固化场地表面铺设塑料薄膜，同时加强场地排水，减少雨水影响；
 - c) 养护期满足设计要求后，施工单位应按表 2 的要求进行就地固化施工质量的自检工作，以保证工程质量。
- 7.3.2.8 养护完成后，对固化土表层进行整平；固化层作为路基时应整平和碾压，其压实度及平整度应满足设计要求。
- 7.3.2.9 整平（碾压）后的就地固化（硬壳）层，应按表 3 的要求进行就地固化施工质量检验，经检验合格后，方可进行下步的施工作业。
- 7.3.2.10 就地固化经检验合格后，对就地固化浅层处理的路基应按设计要求进行正常填筑施工；对就地固化硬壳层复合地基应按设计要求进行刚（柔）性桩等施工，施工完毕后按相关规定进行复合地基质量检测。
- 7.3.2.11 就地固化硬壳层复合地基施工除应符合 7.3.2 外，其余还应符合以下规定：
- a) 就地固化硬壳层复合地基采用水泥搅拌桩等柔性桩施工时应符合以下规定：
 - 1) 当原地基承载力不能满足机械设备行走和打设能力时，先进行就地固化处理，就地固化养护达到 7 天强度要求后，经检验合格后，即可进行水泥搅拌桩等柔性桩的施工；柔性桩施工时，停浆面不应低于就地固化层顶面标高，保证固化层和柔性桩的整体性；
 - 2) 当原地基承载力满足机械设备行走和打设能力时，也可采用先进行水泥搅拌桩等柔性桩的施工，后进行就地固化处理；柔性桩的施工标高顶面应高于就地固化底面的标高 50cm 以上，经开挖翻松，搅拌均匀后就地固化处理。
 - b) 就地固化硬壳层复合地基采用预应力管桩等刚性桩施工时应符合以下规定：
 - 1) 一般宜先进行就地固化处理，达到满足刚性桩施工承载力要求，经检验合格后可进行预应力管桩等刚性桩的施工；
 - 2) 桩顶标高可根据设计要求的现浇或预制桩帽的位置确定；桩顶采用现浇桩帽时，桩顶应设置等同桩径大小的圆形钢板防止回填土落入管桩，回填材料可采用素混凝土或高掺量固化土；
 - 3) 当固化土强度高，刚性桩桩体无法顺利打设时，可采用在固化后立即插入管道，等待初凝后拔出形成预留孔，或先进行引孔和机械局部开挖。

7.3.2.12 刚（柔）性桩其他具体的施工要求应按照 JTG/T 3610 等规定进行。

7.3.2.13 加筋垫层的施工应符合以下规定：

- a) 加筋垫层的垫层应采用级配良好的砂砾、碎石、中粗砂等散粒状材料或掺灰土水平填筑，宜采用机械碾压施工，分层铺筑、压实；掺灰土施工时地表严禁积水，压实后 3d 内不得受水浸泡；其他施工要求应按照 JTG/T 3610 等规定进行；
- b) 加筋垫层的土工合成材料技术指标应满足设计要求，并按设计要求进行张拉和固定，施工中应采取措施防止土工合成材料受损和长时间在阳光下暴晒；其他施工要求应按照 JTG/T D32 和 DB33/T 904 等规定进行。

7.4 动态监测

7.4.1 动态监测工作除施工企业自行监测外，还应由有资质的第三方试验检测单位进行监测。

7.4.2 路堤填筑前，应根据设计文件的要求，及时埋设观测标志及观测仪器件。

7.4.3 施工期应对深层土压力、沉降、位移等进行定期观测，并对观测数据进行整理分析，及时反馈设计单位进行动态设计，动态调整填筑控制标准、预压期、堆载高度等参数。

7.4.4 根据沉降观测结果，提供路基沉降土方量，校验路基填筑标高。

7.4.5 监测单位应定期编写定期观测报告、阶段报告及总报告。

7.4.6 动态监测除满足本文件的规定外，尚应符合 DB33/T 904 的规定要求。

7.5 质量管理

7.5.1 施工质量管理应贯穿施工全过程，施工过程中应采用物联网控制做到原始记录齐全、数据准确和资料完整；应随时检查施工记录和计量记录，并按设计规定的要求对就地固化土、刚（柔）性桩和加筋垫层进行质量检验。

7.5.2 每道工序完成后，均应进行检查验收。经检验合格的可进入下一道工序施工；经验收不合格的工序应进行翻修或返工，直到达到合格要求。

7.5.3 就地固化施工质量管理应符合以下规定：

表1 固化剂检验项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差		检查方法和频率
		粉体固化剂	液体固化剂	
1	外观	均匀一致，不应有结块	均匀状态，不应有沉淀	目测
2	细度 (粉体状)	80 μ m 方孔筛筛余量应不大于 15%	-	水泥细度检验方法 (GB/T 1345)：每批次 2 个样品
3	固体含量 (%)	± 2	-	均匀性试验 (GB/T 8077)：每批次 2 个样品
4	含水率 (%)	-	± 2	含水率测定 (GB/T 8077)：每批次 2 个样品
5	密度 (g/cm^3)	± 0.03		液体密度测定 (GB/T 8077)：每批次 2 个样品； 粉体密度测定 (GB/T 208)：每批次 2 个样品。
6	PH 值	-	± 1.0	PH 值测定 (GB/T 8077)：每批次 2 个样品
7	化学成分 (必要时)	符合设计要求		化学分析方法 (GB/T 176)：每批次 2 个样品

7.5.4 就地固化硬壳层复合地基水泥搅拌桩和预应力管桩等施工质量检验要求应符合设计文件和 JTG/T 3610 等规定的要求。

7.5.5 加筋垫层应满足设计文件的要求，其质量应按 JTG/T D32 和 JTG/T 3610 等规定要求进行检验。

7.5.6 工程应有真实、准确、齐全、完整的施工原始记录、试验检测数据、质量检验结果等质量保证资料。质量保证资料应包括下列内容：

- a) 固化剂、外加剂、外加土的质量检验结果；
- b) 固化土配合比、试搅试拌检验和试验数据；
- c) 就地固化施工记录；
- d) 质量控制指标的试验记录和质量检验汇总图表；
- e) 施工过程中遇到的非正常情况记录及其对工程质量影响分析评价资料；
- f) 施工过程中如发生质量事故，经处理补救后达到设计要求的认可证明文件等。

8 质量检验

8.1 基本要求

8.1.1 就地固化应作为路基工程的一个分项工程进行检验评定，应按基本要求、实测项目、外观质量和质量保证资料等检验项目进行质量检验。

8.1.2 就地固化施工设备、固化剂应符合设计和施工要求；根据现场试验确定的技术参数进行施工；就地固化系统必须安装自动记录装置；搅拌应均匀和密实。

8.1.3 就地固化层强度和承载力应满足设计要求。

8.1.4 固化层表面平整，路拱合适，排水良好。

8.1.5 软土地基上的路堤，应满足沉降标准和稳定性的设计要求。

8.1.6 除就地固化外，刚（柔）性桩和加筋垫层等质量检查与评定应按照 JTJ F80/1 规定的要求执行。

8.2 实测项目

8.2.1 就地固化处理实测项目见表 2。

8.2.2 表 2 中以“△”标识的实测项目为关键项目，合格率应不低于 95%；其余实测项目为一般项目，合格率应不低于 80%，否则该检查项目为不合格。

表2 就地固化土实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	浅层固化厚度 (mm)		≥设计值	静力触探：每 3000m ² 或每 300m 测试点不少于 3 处
2	浅层固化宽度 (mm)		≥设计值	尺量：每 3000m ² 或每 300m 测试点不少于 3 处
3△	强度	不排水抗剪强度 (kPa)	符合设计要求	十字板剪切试验：每 3000m ² 或每 300m 测试点不少于 3 处
		或静力（或动力）触探锥尖阻力 (MPa)		静力（或动力）触探试验：每 3000m ² 或每 300m 测试点不少于 3 处
4	固化剂掺量 (%)		符合设计要求	查施工记录
5△	承载力 (kPa)		符合设计要求	静力(或动力)触探试验或荷载板试验：每 3000m ² 或每 300m 测试点不少于 1 处

8.3 实测项目

固化土表面平整、无坑洼、无积水，外侧排水通畅。

附录 A

(资料性)

常用固化剂掺入量参考表

A.1 就地固化常用固化剂为水泥、其他固化剂（包含粉煤灰、石灰、石膏、矿渣微粉等）和稳定剂，具体固化剂类型和掺量应根据不同土质情况和施工工艺通过室内配合比试验合理确定。

A.2 采用湿法施工时固化土配合比设计时常用固化剂的掺入量可参照表 A.1。

表 A.1 湿法施工固化剂掺入量参考一览表

28d 无侧限 抗压强度 (kPa)	原状土含水率									
	50%		60%		70%		80%		90%	
	固化剂掺入量百分比 (%)									
	水泥	其他 固化剂	水泥	其他 固化剂	水泥	其他 固化剂	水泥	其他 固化剂	水泥	其他 固化剂
50	3	2~3	4	1~2	4	3~5	5	1~3	6	1~2
80	3	2~3	5	0~1	5	1~3	6	1~3	7	0~1
100	3	3~4	5	1~2	5	3~5	6	3~5	7	1~4
130	4	0~2	5	3~4	6	0~2	7	0~1	7	4~5
160	4	2~4	6	0~2	6	2~3	7	2~3	8	0~2
200	5	5~6	6	2~4	7	4~6	8	4~6	8	3~4
250	6	2~4	7	5~6	7	4~6	9	2~3	9	0~2
300	7	5~6	8	2~4	8	2~3	9	4~6	9	5~6

A.3 表 A.1 使用时应注意以下几点：

- 表 A.1 中固化剂的掺入量按照土体湿密度（常取 17kN/m³）进行取值。固化剂掺入百分比=固化剂质量/原状湿土质量；水灰比（水胶比）取 0.55~1.20，具体选用需结合现场实际情况；
- 表 A.1 中为不同含水率、不同设计强度时固化剂掺入量的参考估算值，实际应用时，当土体含水率等土的性质情况发生变化时，掺量和固化剂的种类也应按设计要求或现场试验情况进行调整；
- 采用干法施工时，水泥掺入量在表 A.1 的基础上减少 1%；
- 对于含水率小于 50% 的土，为考虑拌合均匀性，采用湿法施工，按照土体含水率为 50% 的固化剂掺量取值，并考虑增大其水灰比；
- 若所处理土为有机质含量较高的有机质土，则考虑需添加石灰，或将水泥改为石灰等固化剂，或添加部分有机固化剂，具体掺量根据试验确定。

附录 B

(规范性)

就地固化土填料的回弹模量计算

B.1 考虑路基湿度状态的影响时，固化土填料的动态回弹模量值 M_R 采用式 (B.1) 进行估算：

$$M_R = E_0(p)^{k_1}(1 + q_{cyc})^{k_2}(1 + \frac{S}{p})^{k_3} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

M_R ——标准状态下固化土填料的动态回弹模量值 (MPa)；

E_0 ——标准状态下固化土填料的回弹模量值 (MPa)，按 JTG D30 有关规定，通过路基土动态回弹模量试验方法确定；

p ——土体平均应力 (kPa)，等于 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ ，其中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为土体的最大主应力、中间主应力和最小主应力；

k_1 ——固化土填料回弹模量的围压效应系数，建议取值 1.0；

q_{cyc} ——土体动应力幅值 (kPa)，等于 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 3$ ；

k_2 ——固化土填料回弹模量的动应力幅值效应系数，建议取值 -0.4；

S ——路基平衡湿度对应的土体吸力 (kPa)，路基平衡湿度按《公路路基设计规范》(JTG D30) 有关规定计算；

k_3 ——固化土填料回弹模量的湿度效应系数，建议取值 1.3。

B.2 需要进一步考虑温度效应时，固化土填料的回弹模量值 M_R 采用式 (B.2) 进行估算：

$$M_R = E_0(p)^{k_1}(1 + q_{cyc})^{k_2}(1 + \frac{S}{p})^{k_3} [1 - 0.01(T - T_0)] \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

T ——公路沿线地表温度的全年平均值 (°C)；

T_0 —— E_0 对应的测试温度 (°C)；

其他符号意义同式 (B.1)。

附录 C
(规范性)

就地固化硬壳层的承载力计算

C.1 就地固化硬壳层双层地基表面承载力计算

C.1.1 就地固化浅层加固软基时,表面承载力计算按照就地固化硬壳层双层地基承载力计算方法确定,主要根据荷载的影响深度 d_{max} 与就地固化处理厚度 H 之间的关系来确定滑动面的位置,进而通过极限平衡法获得地基承载力极限值,荷载影响深度根据 GB 50007 规定进行计算。

C.1.2 当 $d_{max} \leq H$ 时,按照均质地基处理。

C.1.3 当 $d_{max} > H$ 时,根据就地固化处理范围与主动土压力区域的关系,确定滑移线的形状,分别计算粘聚力引起的地基承载力与地基土自重引起的承载力,具体计算按以下规定进行:

a) 当 $d_{max} > H \geq \frac{B}{2} \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$ 时,主动土压力区域处于就地固化处理厚度范围之内,滑移线简图

见图 C.1,并按下列计算公式进行计算:

1) 结合太沙基理论整体剪切模式给出的滑移线(螺旋线)计算公式(C.1):

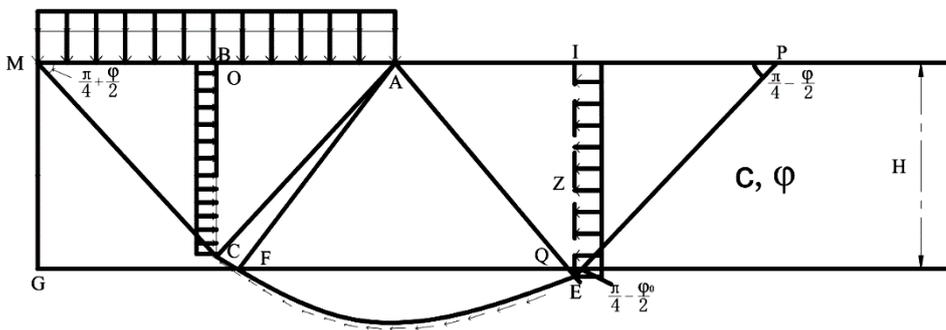


图 C.1 滑移线简图

$$r = r_0 \exp(\theta \tan \varphi_x) \dots \dots \dots (C.1)$$

式中:

r ——滑动区的边界对数螺旋曲线 (m);

r_0 ——滑动边界起始矢径 (m),按 $r_0=AF$ 计算;

θ ——代表积分点到 A 点距离 (m);

φ_x ——复合摩擦角 ($^\circ$),根据角度 $\angle OAF = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_x}{2}$ 进行计算。

2) 粘聚力引起的承载力 q_{u1} 按式 (C.2) 计算:

$$q_{u1} = (M_1 + M_3 - M_2) / (\frac{B^2}{8}) \dots \dots \dots (C.2)$$

式中:

$$M_1 = \int_0^\beta cr_1^2 d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta} c_0 r_2^2 d\theta$$

(其中 $r_1 = r_0 e^{\theta \tan \varphi}$, $r_2 = r_0 e^{\beta \tan \varphi} e^{\theta \tan \varphi_0}$, $\frac{H}{r_0 e^{\beta \tan \varphi}} = \sin(\frac{3\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} - \beta)$);

$$M_2 = p_{\alpha 1} \frac{oc^2}{2}$$

(其中 $p_{\alpha 1} = q_{v1} \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) - 2c \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$, $oc = \frac{B}{2} \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$);

$$M_3 = p_{b1} \frac{H^2}{2} + p_{b2} EQ(\frac{EQ}{2} + H)$$

(其中 $p_{b1} = 2c \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$, $p_{b2} = 2c_0 \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2})$, $EQ = r_0 e^{\beta \tan \varphi} e^{\frac{(\pi-\beta) \tan \varphi_0}{2}} \sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}) - H$);

q_{u1} ——粘聚力引起的承载力 (kPa);

β ——上下土层的分界点;

c , φ ——硬壳层的粘聚力 (kPa) 和摩擦角 ($^\circ$);

c_0 , φ_0 ——下卧层的粘聚力 (kPa) 和摩擦角 ($^\circ$);

H ——硬壳层处理厚度 (m);

B ——基础宽度 (m)。

3) 地基土自重引起的承载力 q_{u2} 按式 (C.3) 计算:

$$\begin{aligned} & q_{u2} t g^2 \alpha_1 H + \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 t g^2 \alpha_1 \\ &= \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 t g^2 (\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + \frac{EZ}{2} [\gamma_1 H t g^2 (\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + (\gamma_1 H + \gamma_0 EZ) t g^2 (\frac{\pi}{2} - \alpha_1)] \\ &+ \int_{\beta}^{\frac{\pi}{2}} (\gamma_1 - \gamma_0) H \frac{r_2 \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta + \int_{\beta}^{\frac{\pi}{2}} \gamma_1 H \frac{r \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta \dots \dots \dots (C.3) \\ &+ \int_0^{\beta} \gamma_1 H \frac{r \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta \end{aligned}$$

式中:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}; \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}; \quad \phi = \frac{\pi}{2} - \alpha_2$$

q_{u2} ——地基土自重引起的承载力 (kPa);

B ——荷载宽度 (m);

H ——硬壳层厚度 (m);

c ——就地固化处理后粘聚力 (kPa);

φ ——就地固化后摩擦角 ($^\circ$);

γ_1 ——就地固化后的重度 (kN/m^3)

β —— $\angle CAF$ ($^\circ$);

c_0 ——下卧层土体粘聚力 (kPa);

φ_0 ——下卧层土体摩擦角 ($^\circ$);

γ_0 ——就地固化后的重度 (kN/m^3)。

b) 当 $d_{\max} > \frac{B}{2} t g(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}) > H$ 时, 主动土压力区域超过就地固化处理厚度, 滑移线简图见图 C.2,

并按下列计算公式进行计算:

1) 粘聚力引起的承载力 q_{u1} 按式 (C.4) 计算:

$$q_{u1} = \frac{M_1 + H^2 \cot\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c_0 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)EZ\left(\frac{EZ}{2} + H\right) + cH^2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) + 2c_0CF\left(\frac{CF}{2} + H\right) \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\frac{B^2}{8} + \frac{H^2}{2} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) + CF\left(\frac{CF}{2} + H\right) \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}\right)} \dots (C.4)$$

式中：

$$M_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} c_0 ds \cos \varphi_0 r = \int_0^{\frac{\pi}{2}} c_0 r^2 d\theta = \frac{c_0 B^2 \csc^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_x}{2}\right)}{8 \tan \varphi_x} (e^{\pi \tan \varphi_x} - 1) ;$$

$$CF = \frac{B_2}{2} \cot\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}\right); \quad EZ = AFe^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi_x} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - H ;$$

c ——就地固化处理后土体粘聚力 (kPa)；

φ ——就地固化处理后土体内摩擦角 ($^\circ$)；

c_0 ——下卧层土体粘聚力 (kPa)；

φ_0 ——下卧层土体内摩擦角 ($^\circ$)；

B ——荷载宽度 (m)；

H ——硬壳层厚度 (m)。

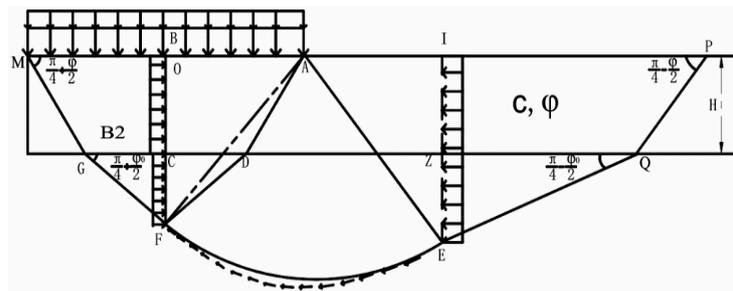


图 C.2 滑移线简图

2) 地基土自重引起的承载力 q_{u2} 按式 (C.5) 计算：

$$q_{u2} = \frac{A}{tg^2 \alpha_1 H + tg^2 \alpha_2 CF} \dots (C.5)$$

其中 A 为：

$$A = \frac{1}{2} \gamma H^2 tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) + \frac{EZ}{2} [\gamma H tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) + (\gamma H + \gamma_0 EZ) tg^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)]$$

$$+ \frac{1}{2} \gamma H^2 tg^2 \alpha_1 + \frac{CF}{2} [\gamma H tg^2 \alpha_1 + (\gamma H + \gamma_0 CF) tg^2 \alpha_2]$$

$$- \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\gamma_1 - \gamma_0) H \frac{r \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \gamma_1 H \frac{r^2 \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}; \alpha_2 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}; CF = \frac{B_2}{2} ctg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2}\right);$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_x}{2}; \quad EZ = AFe^{\frac{\pi}{2} tg \varphi_x} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - H ;$$

$$AF = \frac{B}{2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}; \quad \frac{B_2}{2} = \frac{B}{2} - H ctg\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$OF = OC + CF = H + CF; \quad \angle ADF = \beta = \pi - \frac{\varphi}{2} + \frac{\varphi_0}{2}; \quad oc = H .$$

式中:

- c ——就地固化处理后土体粘聚力 (kPa);
 - φ ——就地固化处理后土体内摩擦角 ($^{\circ}$);
 - c_0 ——下卧层土体粘聚力 (kPa);
 - φ_0 ——下卧层土体内摩擦角 ($^{\circ}$);
 - γ_1 ——固化层重度 (kN/m^3);
 - γ_0 ——下卧层重度 (kN/m^3);
 - B ——荷载宽度 (m);
 - H ——硬壳层厚度 (m);
- OF、OC、CF、H 为图中标注的长度。

c) 以上 C. 1. 3. 1 和 C. 1. 3. 2 两种情况下均给出了粘聚力引起的承载力 q_{u1} 和地基土自重引起的承载力 q_{u2} , 最终地基极限承载力 q_u 按式 (C. 6) 计算:

$$q_u = q_{u1} + q_{u2} \dots \dots \dots (C. 6)$$

式中:

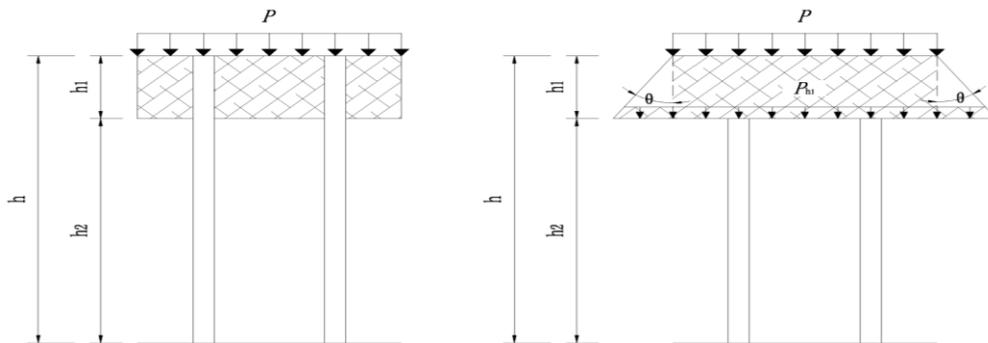
- q_u ——就地固化处理后地基极限承载力 (kPa);
- q_{u1} ——粘聚力引起的承载力 (kPa);
- q_{u2} ——地基土自重引起的承载力 (kPa)。

C. 2 就地固化硬壳层双层地基下卧层承载力计算

下卧层表面附加应力的确定依据应力扩散理论计算, 具体计算按 6. 3. 3. 5 的规定执行。

C. 3 就地固化硬壳层复合地基承载力

C. 3. 1 柔性桩复合地基初步设计阶段就地固化硬壳层柔性桩复合地基承载力可进行简化计算, 计算简图见 C. 3, 其中图 a) 为就地固化硬壳层柔性桩复合地基结构形式, 图 b) 为简化后复合地基结构形式。简化后复合地基承载力验算时可分步进行。



注:

- h ——柔性桩桩长 (m);
- P ——上覆荷载 (kPa);
- h_1 ——就地固化硬壳层厚度 (m);
- P_{n1} ——简化后就地固化硬壳层底面处上覆荷载 (kPa);
- h_2 ——简化后柔性桩桩长 (m);
- θ ——应力扩散角 ($^{\circ}$)。

a) 就地固化硬壳层柔性桩复合地基

b) 计算简化图

图 C. 3 柔性桩复合地基承载力计算简图

C.3.2 h_1 深度处荷载计算, 即下部复合地基表面附加应力 P_{h1} 计算, 根据应力扩散进行计算, 计算公式应根据式(3)和式(4)进行。

C.3.3 复合地基单桩承载力特征值计算应通过桩体材料强度或者桩体侧摩阻力进行确定:

a) 通过桩体材料强度确定时按式 (C.7) 计算:

$$R_a = \eta \times f_{cu} \times A_p \dots \dots \dots (C.7)$$

式中:

R_a ——单桩承载力特征值 (kN);

η ——桩体材料强度折减系数;

f_c ——桩体材料强度 (kPa);

A_p ——桩体截面积 (m^2)。

b) 通过桩体侧摩阻力确定时按式 (C.8) 计算:

$$R_a = U_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \dots \dots \dots (C.8)$$

式中:

R_a ——单桩承载力特征值 (kN);

U_p ——桩周长 (m);

n ——土体中层数;

q_{si} ——第 i 土层桩体侧摩阻力特征值 (kPa);

l_{pi} ——第 i 土层厚度 (m);

α_p ——桩端端阻力发挥系数;

q_p ——桩端端阻力特征值 (kPa);

A_p ——桩体截面积 (m^2)。

c) 复合地基单桩承载力特征值确定: 采用通过桩体材料强度和桩体侧摩阻力计算获得的单桩承载力的最小值。

C.3.4 复合地基表面承载力特征值按式 (C.9) 计算

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \dots \dots \dots (C.9)$$

式中:

f_{spk} ——复合地基表面承载力特征值 (kPa);

λ ——单桩承载力发挥系数;

m ——面积置换率;

R_a ——单桩承载力 (kN);

A_p ——桩体截面积 (m^2);

β ——桩间土承载力发挥系数;

f_{sk} ——桩间土承载力特征值 (kPa)。

根据下部复合地基表面附加应力与复合地基表面承载力, 按式 (C.10) 计算复合基表面承载力安全系数 K 。

$$f_{spk} < \frac{p_{h1}}{K} \quad K_{表} = \frac{p_{h1}}{f_{spk}} \dots \dots \dots (C.10)$$

C.3.5 对复合地基表面承载力安全系数与下卧层承载力安全系数按照本文件式 (8) 进行校核。

C.3.6 就地固化硬壳层刚性桩复合地基计算简图同 C.3 基本一致， h_1 深度处荷载计算，即下部复合地基表面附加应力 P_{h1} 计算，根据应力扩散进行计算，计算公式应根据式 (3) 和式 (4) 进行；其复合地基承载力计算应按照 DB33/T 904 中相应计算方法进行。

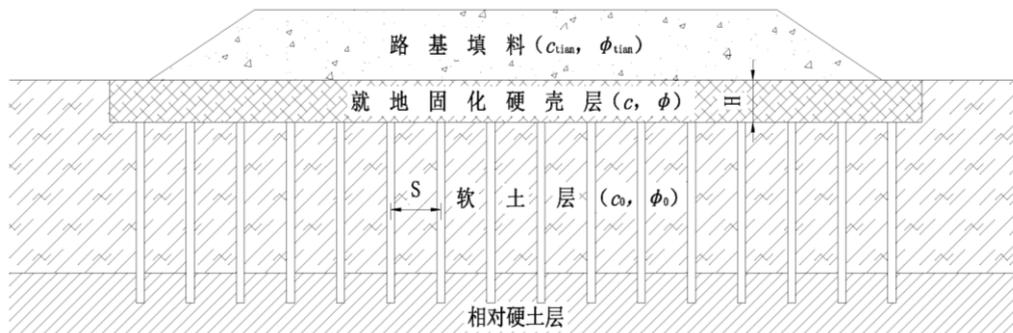
附录 D

(规范性)

就地固化硬壳层复合地基的沉降计算

D.1 就地固化硬壳层复合地基计算模型

就地固化工硬壳层复合地基结构中，是由路基填料、人工硬壳层、桩、复合加固区、下卧土层等组成的，分别对以上结构进行分析，同时考虑各部分之间的应力应变协调关系建立联立方程，得到各部分应力传递规律。计算模型简图如图 D.1 所示：



- 注：
- c_{tian}——路基填料粘聚力 (kPa) ；
 - c₀——软土层粘聚力 (kPa)
 - φ_{tian}——路基填料内摩擦角 (°) ；
 - φ₀——软土层内摩擦角 (°) ；
 - c——就地固化硬壳层粘聚力 (kPa) ；
 - H——就地固化硬壳层厚度 (m) ；
 - φ——就地固化硬壳层内摩擦角 (°) ；
 - S——桩间距 (m) 。

图 D.1 就地固化硬壳层复合地基结构简图

D.2 基本假定

在人工硬壳层复合地基中，涉及路基填料、人工硬壳层、桩、桩间土、下卧层持力层等多因素，其相互作用比较复杂，为了简化计算，假定如下：

- a) 假定人工硬壳层和桩间土为均质各向的理想弹性体；
- b) 在计算桩间土与桩的作用力时，取上覆荷载为均布荷载计算；
- c) 在计算过程中，假定桩间土的应力在同一截面处不变；
- d) 假定在计算过程中，人工硬壳层发生变形但并未破坏；
- e) 桩侧摩阻力和桩土相对位移为理想弹塑性关系，如图 D.2 所示。

$$\tau_p = \begin{cases} K_c (W_p - W_s) & \delta \leq \delta_u \\ c_0 + \sigma' \tan \varphi_0 & \delta > \delta_u \end{cases} \dots \dots \dots (D.1)$$

式中：

- τ_p ——为桩侧摩阻力 (kPa);
- τ_u ——为极限摩阻力 (kPa);
- W_p-W_s ——为桩土相对位移 (m);
- k_c ——为桩侧土摩擦系数;
- c_0 ——为土体的粘聚力 (kPa);
- φ_0 ——为内摩擦角 ($^\circ$);
- σ' ——为土体有效应力 (kPa);
- δ_u ——为桩土间最大的弹性位移 (m)。

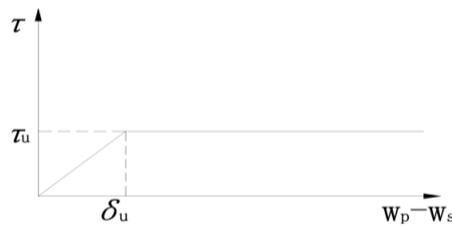
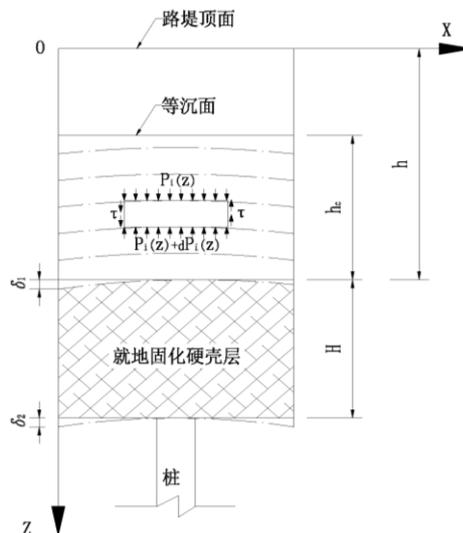


图 D.2 桩侧摩阻力-桩土位移曲线

D.3 计算模型

针对以上假定，就地固化硬壳层复合地基沉降计算主要分路堤填料荷载传递的分析模型、就地固化硬壳层应力传递的计算模型、桩与桩间土的分析模型以及下卧层土地基的计算模型，各模型计算简图见 D.3~图 D.7。

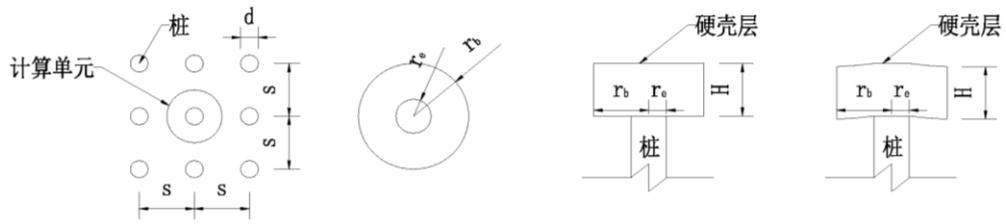
针对各个模型进行分析与应力分布规律总结，计算弹性阶段与弹塑性阶段桩顶应力、桩顶位移与桩间土位移。



注:

- h ——路堤填土高度 (m);
- h_c ——等沉面高度 (m);
- H ——就地固化硬壳层厚度 (m)。

图 D.3 路堤填料荷载传递计算模型



注:

- d—桩直径 (m) ;
- s—桩间距 (m) ;
- r_e —桩半径 (m) ;
- r_e —等效桩半径 (m) 。

图 D.4 就地固化硬壳层计算模型图

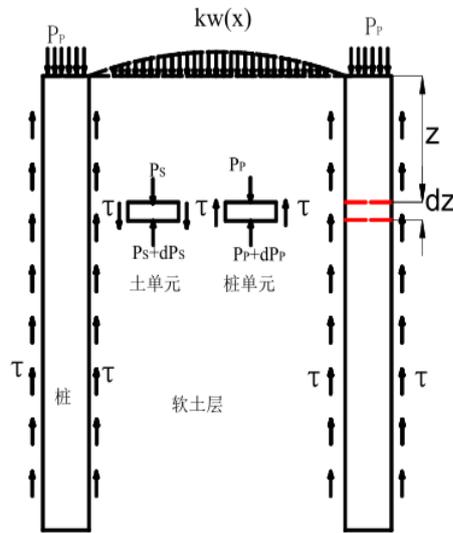


图 D.5 桩土单元计算模型

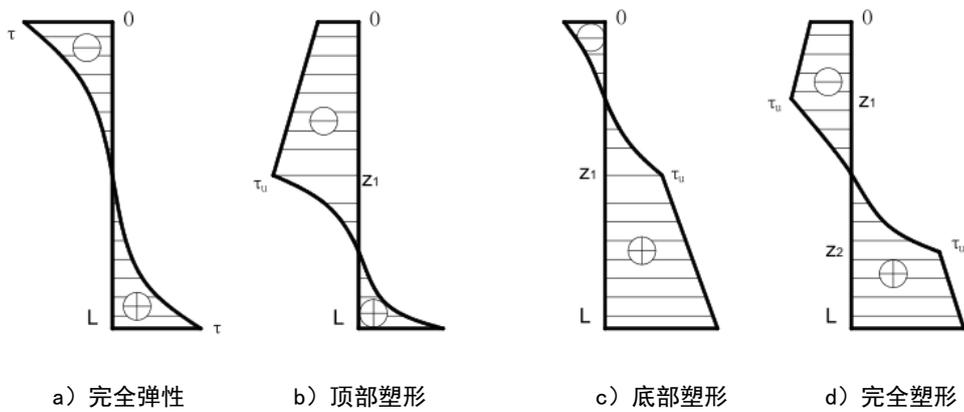


图 D.6 桩侧摩阻力沿桩身分布图

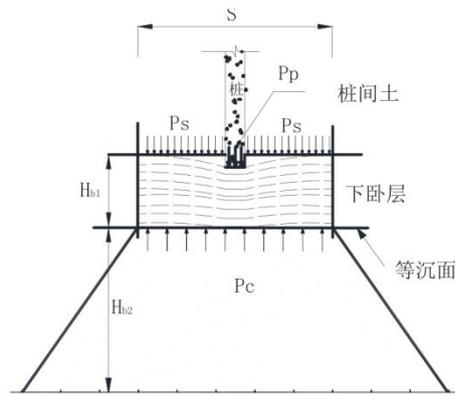


图 D.7 下卧层受力计算模型

D.4 弹性阶段

弹性阶段桩顶应力、桩顶位移与桩间土位移计算时将式 (D.2) ~ 式 (D.17) 联立求解。

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \int_{H_c}^H \frac{p_1(z)}{E_{t\text{ian}}} dz \\
 &= \frac{1}{E_{t\text{ian}}} \left[\frac{\gamma_{t\text{ian}}(H - H_c) + \frac{\gamma_{t\text{ian}} + \beta\zeta c_{t\text{ian}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}}} \right] \exp(\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}} H_c) \dots (D.2) \\
 &\quad - \frac{\gamma_{t\text{ian}}(H - H_c) + \frac{\gamma_{t\text{ian}} + \beta\zeta c_{t\text{ian}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}}} \exp[\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}}(2H_c - H)] - \frac{\gamma_{t\text{ian}} + \beta\zeta c_{t\text{ian}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{t\text{ian}}}(H - H_c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \int_{H_c}^H \frac{p_2(z)}{E_{t\text{ian}}} dz \dots \dots \dots (D.3) \\
 &= \frac{1}{E_{t\text{ian}}} - \frac{1}{1-m} \int_{H_c}^H (\gamma z - mp_1) dz = \frac{1}{E_{t\text{ian}}} - \frac{1}{1-m} \left[\gamma_{t\text{ian}} \frac{H^2 - H_c^2}{2} - m \int_{H_c}^H p_1(z) dz \right]
 \end{aligned}$$

$$S_1 - S_2 = \delta_1$$

$$Q_p = \left[\gamma(h - h_c) + \frac{\gamma + \beta\zeta c_{t\text{ian}}}{\beta\zeta K \tan \phi_{t\text{ian}}} \right] \exp(\beta\zeta K \tan \phi_{t\text{ian}} h_c) - \frac{\gamma + \beta\zeta c_{t\text{ian}}}{\beta\zeta K \tan \phi_{t\text{ian}}} \dots \dots \dots (D.4)$$

$$\delta_1 = C_2 [(r_e - r_b)^2] \dots \dots \dots (D.5)$$

$$\begin{cases} mQ_p + (1-m)Q_s = \gamma h \\ Q_s = \frac{1}{1-m} (\gamma h - mQ_p) \end{cases} \dots \dots \dots (D.6)$$

式中:

S_1 ——桩截面对应位置处等沉面到硬壳层表面处的变形;

S_2 ——桩间土对应位置处等沉面到硬壳层表面处的变形;

$E_{t\text{ian}}$ ——填土的压缩模量 (MPa);

- H ——路堤顶面到就地固化硬壳层表面高度 (m);
- H_c ——等沉面到就地固化硬壳层表面高度 (m);
- $p_1(z)$ ——桩截面对应位置处不同填料高度处的应力 (kPa);
- $\gamma_{\text{土}}$ ——填土容重 (kg/m^3);
- m ——置换率;
- $p_2(z)$ ——桩间土对应位置处不同填料高度处的应力 (kPa);
- δ_r ——硬壳层表面处的沉降差;
- Q_p ——桩截面对应硬壳层表面应力 (kPa);
- Q_s ——桩间土对应硬壳层表面应力 (kPa)。

$$\begin{aligned} & (Q_p + \gamma_c H)A_p + 2\pi(Q_s + \gamma_c H) \left[-\frac{r_e^2}{2} + \frac{r_b^2}{2}\right] - P_p(0)A_p \\ & - k\pi[r_b^2 C_2(r_b^2 - r_e^2) + \frac{2m(r_b^2 - r_e^2)}{2} - \frac{4}{3}r_b C_2[r_b^3 C_2(r_b^3 - r_e^3) + \frac{1}{2}C_2(r_b^4 - r_e^4)]] = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots (D.7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & 2\pi(Q_s + \gamma_c H) \left[\frac{1}{2}r_b^2(r_b^2 - r_e^2) + \frac{(r_b - r_e)^2}{2}(r_b^2 - r_e^2) - \frac{2}{3}r_b(r_b^3 - r_e^3) + \frac{(r_b^4 - r_e^4)}{4} \right] \\ & - \pi D \left[32C_2(r_b - r_e) - \left(\frac{8C_2 r_b^2}{r_b} - \frac{8C_2 r_e^2}{r_e} \right) - 32C_2 r_b \log \frac{r_b}{r_e} \right] \\ & - 2D(1 - \mu)C_2\pi \left[r_b - \frac{r_b^2}{r_e} - 8(r_b - r_e) + 8r_b \log \left(\frac{r_b}{r_e} \right) \right] - 2C_2 D(1 - \mu) \left(\frac{r_b^2 \pi}{r_e} - \frac{r_e^2 \pi}{r_b} \right) \\ & - k\pi \left[r_b^4 C_2(r_b^2 - r_e^2) + r_b^2 m(r_b^2 - r_e^2) + r_b^2 C_2(r_b - r_e)^2(r_b^2 - r_e^2) + m(r_b - r_e)^2(r_b^2 - r_e^2)^2 \right. \\ & \left. - \frac{8}{3}r_b^3 C_2(r_b^3 - r_e^3) - \frac{4}{3}r_b m(r_b^3 - r_e^3) - \frac{4}{3}r_b C_2(r_b - r_e)^2(r_b^3 - r_e^3) + 3r_b^2 C_2(r_b^4 - r_e^4) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2}m(r_b^4 - r_e^4) + \frac{1}{2}C_2(r_b - r_e)^2(r_b^4 - r_e^4) - \frac{8}{5}r_b C_2(r_b^5 - r_e^5) + \frac{C_2}{3}(r_b^6 - r_e^6) \right] \end{aligned} \right\} = 0 \dots\dots (D.8)$$

$$S_T = a - bP_p(0)$$

$$a = 3(1 - \nu) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^3 P_e \frac{r_0}{E_c}; b = 2(1 - 2\nu) \frac{r_e}{E_c} \dots\dots\dots (D.9)$$

式中:

- E_c ——硬壳层压缩模量 (MPa);
- ν ——硬壳层泊松比;
- H ——就地固化硬壳层厚度 (m);
- $P_p(0)$ ——桩顶荷载 (kPa);
- γ_0 ——硬壳层容重 (kg/m^3);
- k ——置换率桩间土的基床系数, 弹性半空间地基条件下, 某一点所受的法向应力和该点对应的变形的比值;
- D ——硬壳层弯曲刚度, 其数值为 $E_c H^3 / 12(1 - \nu^2)$ 。

$$\begin{cases} p_p(z=0) = E_p A_p \frac{\alpha t}{\alpha + \beta} (B_1 - A_1) - D_1 E_p A_p = p_p(0) A_p \\ p_s(z=0) = E_s A_s \frac{\alpha t}{\alpha + \beta} (A_1 - B_1) - D_1 E_s A_s = \int_{r_c}^{r_b} k \omega(r) 2\pi r dr \dots\dots\dots (D.10) \\ \omega_p - \omega_s = -(A_1 + B_1) = \delta_1 + S_T \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_p = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (A_1 e^{tL} + B_1 e^{-tL}) + D_1 L + E_1 \\ \omega_s = \frac{-\beta}{\alpha + \beta} (A_1 e^{tL} + B_1 e^{-tL}) + D_1 L + E_1 \dots\dots\dots (D.11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_p(L) = -E_p A_p \frac{d\omega_p}{dz} = E_p A_p \frac{\alpha t}{\alpha + \beta} (B_1 e^{-tL} - A_1 e^{tL}) - D_1 E_p A_p \dots\dots\dots (D.12) \\ P_s(L) = -E_s A_s \frac{d\omega_s}{dz} = E_s A_s \frac{\beta t}{\alpha + \beta} (A_1 e^{tL} - B_1 e^{-tL}) - D_1 E_s A_s \end{cases}$$

$$p_i(H_c) = \frac{a'b' + c' - b'c'H_c}{b'^2} + C_3 e^{-b'H_c} \dots\dots\dots (D.13)$$

$$s_i = \frac{a'b' + c'}{b'^2} H_c - \frac{c'H_c^2}{2b'} + \frac{C_3}{b'} (1 - e^{-b'H_c}) \dots\dots\dots (D.14)$$

$$s_0 = \frac{P_s(L) + P_c}{2E_b} H_b \dots\dots\dots (D.15)$$

$$\delta_3 = s_0 - s_i = \omega_p(L) - \omega_s(L) \dots\dots\dots (D.16)$$

$$P_c = \frac{p_p(L)A_p + p_s(L)A_s}{\frac{\pi}{4} (2r_b + 2H_c \tan \theta)^2} \dots\dots\dots (D.17)$$

式中：

- A_p ——桩单元面积 (m²)；
- A_s ——土单元面积 (m²)；
- E_p ——桩单元压缩模量 (MPa)；
- E_s ——土单元压缩模量 (MPa)；
- U ——桩周长 (m)；
- L ——桩长 (m)；
- w_p ——取桩顶为 z 轴的零点，向下为 Z 轴的正方向，桩的沉降为 (m)；
- w_s ——桩间土的沉降 (m)。

D.5 弹塑性阶段

弹塑性阶段桩顶应力、桩顶位移与桩间土位移计算时将式 (D.2) ~ 式 (D.9)、式 (D.13) ~ 式 (D.17) 和式 (D.18) ~ 式 (D.21) 联立求解。

$$\begin{cases} p_{p1}(z) = -E_p A_p \frac{d\omega_p}{dz} = -E_p A_p (D_2 - D_4 \beta_p \alpha) = p_p(0) A_p \\ p_{s1}(z) = -E_s A_s \frac{d\omega_s}{dz} = -E_s A_s \left[-\left(\frac{c_0}{\alpha} + \frac{b}{\alpha^2 \beta_s} \right) - D_4 \beta_p \alpha \right] = p_{s1}(0) \end{cases} \dots\dots\dots (D.18)$$

$$\omega_s - \omega_p = D_3 + D_4 - D_0 + D_4 \frac{\beta_p}{\beta_s} = \delta_1 + \delta_r \dots\dots\dots (D.19)$$

$$\begin{cases} \omega_{p(0-z_1)}(z_1) = \omega_{p(z_1-z_2)}(z_1) \\ \omega_{s(0-z_1)}(z_1) = \omega_{s(z_1-z_2)}(z_1) \\ \omega_{p(z_2-L)}(z_1) = \omega_{p(z_1-z_2)}(z_2) \\ \omega_{s(z_2-L)}(z_1) = \omega_{s(z_1-z_2)}(z_2) \\ p_{p(0-z_1)}(z_1) = p_{p(z_1-z_2)}(z_1) \\ p_{s(0-z_1)}(z_1) = p_{s(z_1-z_2)}(z_1) \\ p_{p(z_2-L)}(z_1) = p_{p(z_1-z_2)}(z_2) \\ p_{s(z_2-L)}(z_1) = p_{s(z_1-z_2)}(z_2) \end{cases} \dots\dots\dots (D.20)$$

$$\begin{cases} \omega_{p2}(z_1) - \omega_{s2}(z_1) = -\delta_u \\ \omega_{p2}(z_2) - \omega_{s2}(z_2) = \delta_u \end{cases} \dots\dots\dots (D.21)$$

