

道路工程软弱土 就地固化技术规范

(征求意见稿)

Technical specification for in-situ
solidification of soft soils for road works

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

道路工程软弱土就地固化技术规范

Technical specification for in-situ solidification
of soft soils for road works

T/CHCA xxxx-xxxx

主编单位：南京市公共工程建设中心
苏交科集团股份有限公司

批准部门：中国公路建设行业协会
施行日期：202X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《公路装配式箱涵预制安装技术规范》等 10 项协会标准的编制通知（中路建协技法〔2023〕27 号）”，由南京市公共工程建设中心与苏交科集团股份有限公司为主编单位，河海大学与东南大学为参编单位，承担《道路工程软弱土就地固化技术规范》（以下简称“本规范”）的编制工作。

本规范在制定过程中，编制组在广泛调查研究基础上，认真总结实践经验，参考国内外现行标准和规范，完成本规范的制定。

本规范共分为 7 章，主要技术内容包括：总则、引用规范及标准、术语和符号、材料、设计、施工、质量检验。

本规范由中国公路建设行业协会管理，由南京市公共工程建设中心和苏交科集团股份有限公司负责具体技术内容的解释。

各有关单位在执行过程中，请将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：白兰兰（地址：江苏省南京市建邺区富春江东街 8 号，苏交科集团股份有限公司，邮编：210026；电话：025-86576555，传真：025-86576555；电子邮箱：bailanlan@jsti.com），以便下次修订时参考。

主编单位：南京市公共工程建设中心

苏交科集团股份有限公司

参编单位：河海大学

东南大学

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总则	1
2 引用规范及标准	2
3 术语和符号	3
3.1 术语	3
3.2 符号	3
4 材料	5
4.1 一般规定	5
4.2 固化剂	5
4.3 外加剂	5
4.4 水	5
5 设计	6
5.1 一般规定	6
5.2 技术指标	6
5.3 固化剂配合比设计	7
5.4 设计计算	9
6 施工	14
6.1 一般规定	14
6.2 设备	14
6.3 施工准备	15
6.4 施工工艺	15
6.5 质量控制	17
7 质量检验	19
7.1 一般规定	19
7.2 检测方法	19
7.3 质量检验	19
7.4 检验报告	20

1 总则

1.0.1 为规范就地固化技术在道路工程软弱地基处理中的应用, 保证就地固化处理效果的安全、可靠与耐久, 做到安全适用、技术先进、绿色环保, 特制订本规范。

1.0.2 本规范适用于新建、改建的各等级道路软弱土地基就地固化的设计、施工与验收。针对道路工程中的软弱地基, 利用机械设备将固化剂与软弱土体进行原位搅拌, 使混合后的土体达到一定的强度和承载力, 从而满足道路、构造物或复合地基施工工作面所需的地基承载力要求。

1.0.3 道路工程软弱土就地固化的设计与施工, 应综合考虑工程地质与水文地质特点、道路等级、施工技术及环境条件等因素, 坚持因地制宜、就地取材、保护环境、节约资源和提高效率的原则。。

1.0.4 道路工程软弱土就地固化技术的应用除应符合本规范的规定外, 尚应符合现行国家和行业有关技术要求。

2 引用规范及标准

2.1 下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本规范必不可少的条款。

- 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 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- JTJ 50119 混凝土用水标准
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- CJ/T 486 土壤外加剂标准
- CJ/T 526 软土固化剂
- JGJ 83-2011 软土地区岩土工程勘察规程，
- 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

3 术语和符号

3.1 术语

以下术语和符号适用于本规范。

3.1.1 软弱土地基 Soft soil foundation

含有淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土、其他低承载力或高压缩性土层的地基。

3.1.2 就地固化 in-situ solidification

利用机械设备将固化剂与软弱土层进行原地搅拌，使混合后的土体达到一定强度和承载力，形成硬壳层的一种浅层处理方法。针对就地固化需处理软弱土层厚度和要达到的设计目标，就地固化一般分为浅层软弱地基就地固化和深层软弱地基复合地基施工工作面固化。

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

由挖掘机、强力搅拌头、固化剂供料系统、储料装置及控制系统等组成的就地固化成套系统。

3.1.4 原状土 original soil

道路软弱土地基范围内，需要进行加固处理的天然土体。

3.1.5 固化剂 curing agent

掺入原状土后，通过与原状土、水、空气的物理或化学反应，改善原状土工程性能的材料。主要包括水泥、石灰、粉煤灰及其他工业废渣等无机结合料、土壤固化剂及外加剂等。

3.2 符号

下列符号适用于本规范。

f_{ak} —地基承载力特征值

q_u —7d 无侧限抗压强度

f_d —就地固化浅层加固软基的下卧层承载力

K_d —下卧层承载力安全系数

p_h —下卧层顶面附加应力

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

p_{cz} —就地固化层底面土的自重应力

f_{az} —就地固化层底面经深度修正后的地基承载力特征值

b —条形基础底面的宽度

p_k —相当于荷载效应标准组合时，基础底面的平均应力

p —基础底面土的自重用力

z —基础底面下就地固化层的厚度

θ —就地固化层的应力扩散角

S —沉降量

E_0 —地基变形模量

E_{s1} —上层土压缩模量

E_{s2} —下层土压缩模量

4 材料

4.1 一般规定

4.1.1 材料主要包括固化剂、外添加剂和水等,其技术指标应满足相关规范或标准的要求。

4.1.2 固化剂应进行检验和测试,属于成品的固化剂需提供产品质量检验合格证明等。

4.2 固化剂

4.2.1 固化剂质量应遵循《土壤外加剂标准》(CJ/T 486)和《软土固化剂》(CJ/T 526)等有关规定;固化剂类型和掺量应根据土体的性质,根据室内试验选用,并通过现场试验结果进行优化。

4.3 外添加剂

4.3.1 外添加剂以有机聚合物类(例如高分子吸水树脂 SAP 和聚丙烯酰胺 PAM 等)为主,主要功能包括早强、稳定、缓凝和减水等,针对不同的要求,需要按一定比例与固化剂一同掺入,其技术要求应符合《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119)的相关规定。

4.4 水

4.4.1 水一般使用饮用水、自来水、地下水、地表水和再生水,其中饮用水和自来水可以直接使用,地下水、地表水和再生水应符合《混凝土用水标准》(JTJ 63)的要求。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 就地固化设计应根据道路类型、等级、交通荷载、填土高度、软弱土厚度及指标、使用要求、施工条件、环保要求、经济和社会效益等进行综合比较，合理确定就地固化处理方案。

5.1.2 固化剂选择应结合当地原材料情况、地基土种类和性质及相关工程经验，采用室内配合比试验确定，固化处理后土体无侧限抗压强度应满足地基目标承载力的反算结果，并在施工前进行现场试验，在试验段进行验证、调整并确定。

5.1.3 固化剂设计时，各原材料用量宜采用占原状土干土质量的百分比表示。

5.1.4 应重视施工监测和分析，采用动态设计方法和施工动态控制技术。

5.2 技术指标

5.2.1 根据工程项目的使用要求，综合确定就地固化处理的各项技术指标要求。就地固化处理的技术指标主要包括：就地固化处理后的承载力要求、加固范围、加固深度和加固方式。

5.2.2 软弱地基就地固化处理后应满足道路要求地基承载力，构造物处应满足构造物处地基承载力设计要求。承载力计算方法可参照 5.3.6 进行计算，应根据填土高度、构造物情况综合确定。当进行深层软基处理而表层无硬壳层，需对浅层软弱土进行固化，形成复合地基施工工作面时，处理后的地基承载力，应满足机械施工要求。

5.2.3 加固范围一般应超过路基边缘至少 1m，并满足路基整体稳定性要求。

5.2.4 加固深度应根据软弱土深度、下卧层情况，路基底面应力扩散等要求综合确定。详见 5.4 相关规定。

5.2.5 根据工程情况，对软弱土地基的就地固化加固方式分为两种，一种是浅层软弱地基就地固化，对浅层软弱土体全部固化，达到对软弱土层完全处理的效果，另一种是深层软弱地基复合地基施工工作面固化，仅对深层软弱土分布区的浅部土体进行固化，满足复合地基施工工作面要求即可，一般后期尚需进行复合地基处理。

5.2.6 固化土试件成型后，其无侧限抗压强度试验方法应遵循现行行业标准《公路工程无机结合料稳定材料规程》（JTGE51）的有关规定。

5.3 固化剂配合比设计

5.3.1 使用成品的固化剂应提供产品质量检验合格证明。且其技术要求应满足《混凝土外加剂应用技术规范》(GB50119) 中相关规定。

5.3.2 固化剂配合比设计步骤:

1 对原状土进行取样试验, 明确土体含水率、液塑限、湿密度、压缩模量及有机质含量等指标, 对有特殊要求的, 还需增加其他相关指标测试;

2 根据原状土种类和性质, 确定固化剂类型, 再根据无侧限抗压强度设计要求, 确定固化剂基准掺量;

3 配合比试验应至少采用三组;

4 完成无侧限抗压强度测试后, 根据不同工程要求的固化土的无侧限抗压强度等室内试验成果, 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。最后, 根据当地材料的特点, 通过原材料性能及固化后土的试验评定, 确定固化土配合比。

5.3.3 室内配合比试验宜采用重塑制样法, 配比时需注意掺入量百分比按原状干土质量计算。

5.3.4 软土的重塑制样法参照《公路土工试验规程》(JTG E40) 中相关规定执行。

5.3.5 若被处理的软弱土层不具备进行无侧限抗压强度试验的条件时, 其配合比推荐剂量与室内无侧限抗压强度的关系可按条文说明表 5.3.5 的范围进行取值。

5.3.6 室内试验得出的“7d 无侧限抗压强度”需进行换算, 换算后得出相应的地基承载力特征值 f_{ak} 。

$$f_{ak} = \frac{1}{2} q_u \quad (5.3.6)$$

式中: f_{ak} —地基承载力特征值 (kPa);

q_u —7d 无侧限抗压强度 (kPa);

5.3.7 就地固化加固软弱土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_d 下按式 (5.3.7)计算:

$$K_d = f_d / p_h \quad (5.3.7)$$

式中: f_d —就地固化加固软基的下卧层承载力 (kPa);

K_d —下卧层承载力安全系数;

p_h —下卧层顶面附加应力(kPa)。

5.4 设计计算

5.4.1 一般规定

1 就地固化技术主要适用于对浅层软弱地基进行固化处理，浅层软弱地基处理，应按地质资料准备、设计路段划分、设计验算、处理方案确定的流程进行。

2 各设计路段的软弱土参数应根据工程地质勘察报告进行取值。

3 对于土源缺乏地区，当软弱土层上部需要形成工作平台时，可优先选择就地固化处理。

5.4.2 典型运用工况

针对就地固化需处理软弱土层厚度和要达到的设计目标，就地固化一般分为浅层软弱地基就地固化和深层软基复合地基施工工作面固化。

1 浅层软弱地基就地固化

当软弱土层底部埋深小于 5m 时，可对全深度范围内软弱土层进行固化处理，即软弱土完全处理，根据不同工况可分为以下三类：

1) 硬壳层厚度小于 1.5m，且下卧软弱土层厚度小于等于 3.0m 的浅层软弱土路段；



图 5.4.2-1 就地固化处理示意图

2) 下卧软弱土层厚度大于 3.0m 小于等于 5.0m，但路基填筑高度大于等于土体临界高度的浅层软弱土路段，或处于桥头或构造物等对地基承载力要求较高路段，宜采用完全处理；

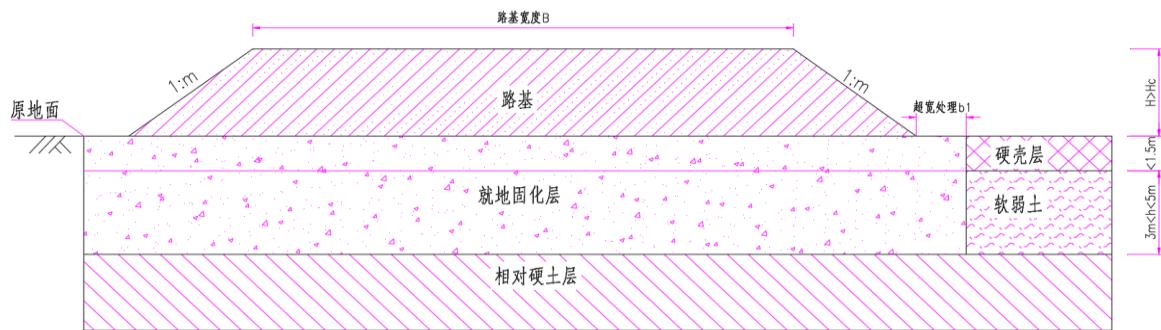


图 5.4.2-2 路基填筑度高大于（路基临界高度）就地固化处理示意图

3) 表层无硬壳层, 软弱土厚度不大于 5.0m 路段 (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) (就地固化施工前应进行抽水处理);

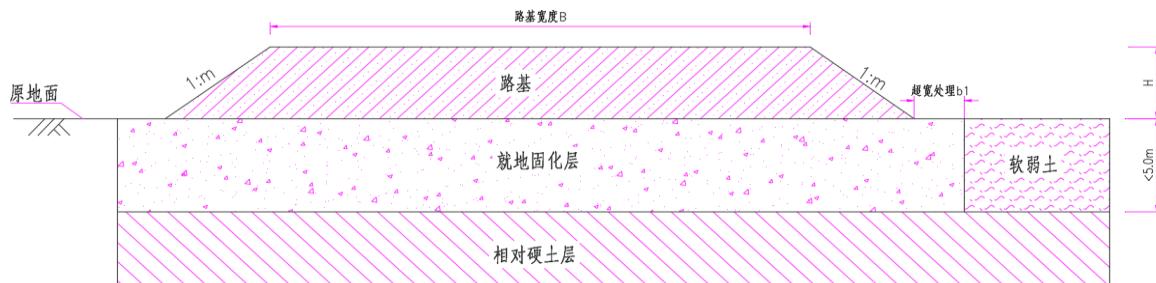


图 5.4.2-3 无硬壳层就地固化整体处理示意图

对于涵洞、通道等构造物路段, 就地固化处理后承载力应满足其承载力要求。

2 深层软基复合地基施工工作面固化

当软弱土层底部埋深大于 5m, 但需要形成一定强度的作业面时, 可仅对浅层软弱土进行固化, 形成人工硬壳层, 根据不同工况可分为以下两类:

1) 硬壳层厚度小于 1.5m, 下卧软弱土层厚度大于 3.0m 小于 5.0m, 但填筑高度较小的低填浅挖路段;

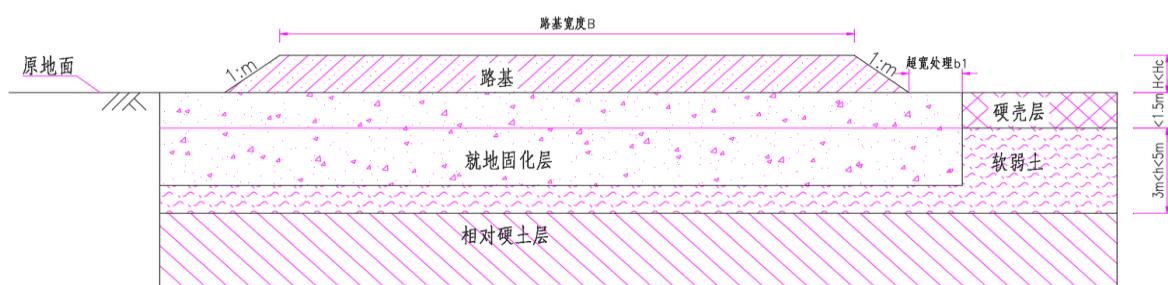


图 5.4.2-4 就地固化硬壳层处理示意图

2) 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。仅进行浅层部分固化处理，承载力、沉降无法满足桥头及重要构造物路段要求的，后期需采用水泥搅拌桩或预应力管桩等复合地基处理，此时，浅层固化处理后承载力宜不大于 150 kPa，以方便后期复合地基的施工。

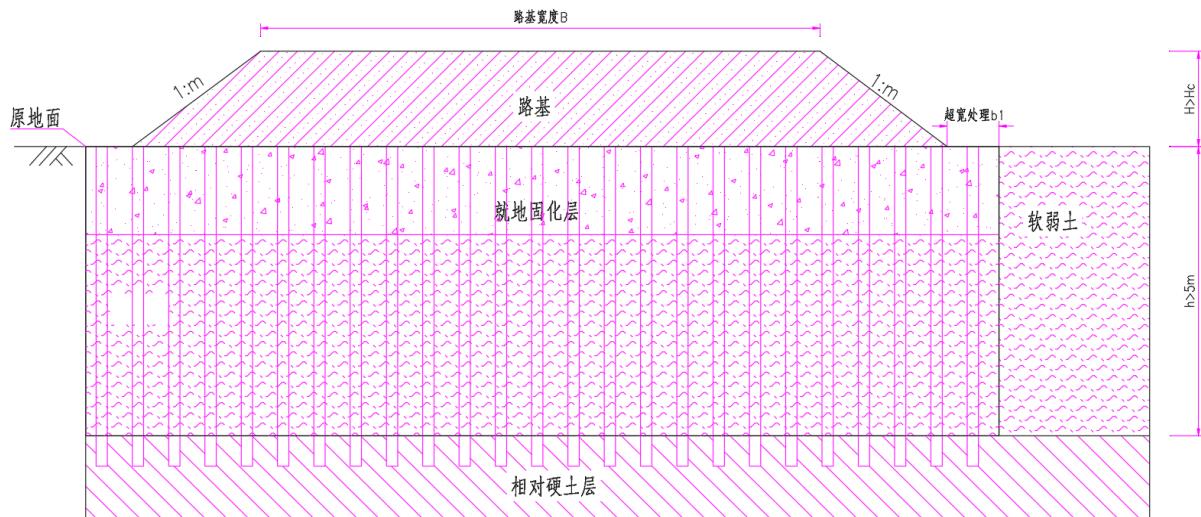


图 5.4.2-5 薄硬壳层中厚～深厚软弱土固化处理

5.4.3 计算

就地固化处理设计应进行承载力、沉降计算及稳定性分析，确定固化剂配合比设计、浅层固化厚度和宽度。

1 就地固化处理软弱土土层的深度宜为 0.8m~5.0m，其应根据软弱土厚度、固化硬壳层表面及下卧层的承载力确定，并应满足式（5.4.3-1）的要求：

$$p_z + p_{cz} = f_{az} \quad (5.4.3-1)$$

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} —就地固化层底面土的自重应力 (kPa)；

f_{az} —就地固化层底面经深度修正后的地基承载力特征值 (kPa)。

2 就地固化层顶面为条形基础时，其附加应力应按式（5.4.3-2）进行计算：

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} \quad (5.4.3-2)$$

式中：b—条形基础底面的宽度 (m)；

p_k —相应于荷载效应标准组合时，基础底面的平均应力 (kPa)；

p_c —基础底面土的自重用力 (kPa)；

z—基础底面下就地固化层的厚度 (m)；

θ —就地固化层的应力扩散角($^{\circ}$), 宜通过试验确定。

其中, θ 为就地固化层压力扩散角(单位: $^{\circ}$), 具体取值宜通过试验确定, 当无试验资料时, 可根据实际工程情况取 $28\sim45^{\circ}$ 取值, 并进行就地固化层下部土体的承载力验算, 验算时需要考虑附加应力扩散的情况, 如图 5.4.3-1 所示。

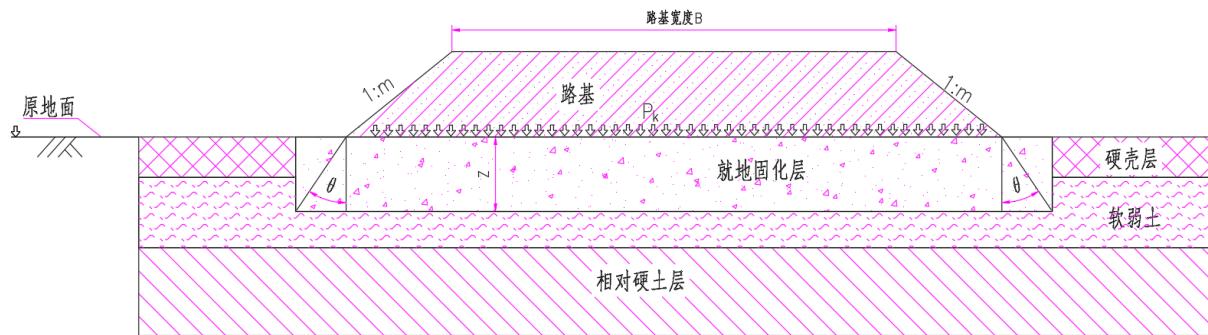


图 5.4.3-1 附加应力扩散法示意图

3 就地固化层底面处理宽度按式(5.4.3-3)计算确定, 计算示意图如图 5.4.3-2 所示, 路基或基础底面单侧外延伸不小于 1.0m 。

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \quad (5.4.3-3)$$

式中: θ —压力扩散角($^{\circ}$)。

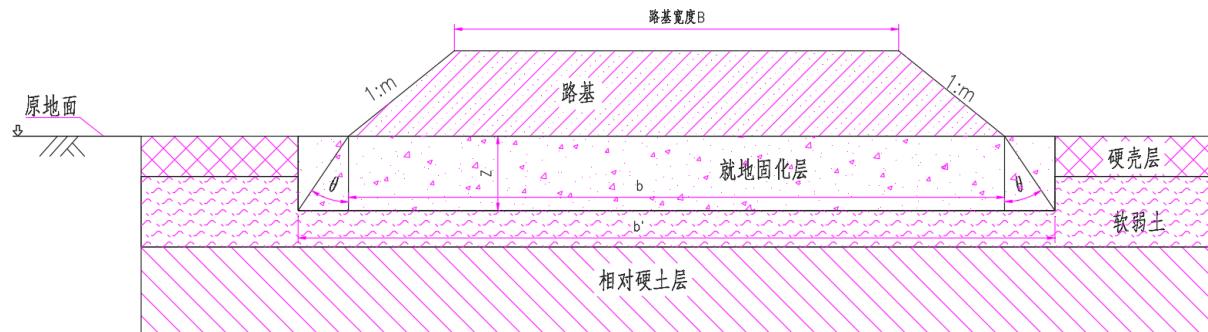


图 5.4.3-2 就地固化硬壳层宽度要求示意图

4 就地固化处理软弱土地基时沉降应满足设计要求, 当就地固化层下部尚有软弱土时, 应进对路基下卧层沉降验算。就地固化处理下卧软弱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弱土层的沉降, 如图 5.4.3-3 所示, 具体计算应符合以下规定:

- 1) 就地固化硬壳层的压缩沉降量 S_1 可采用压缩模量法, 按照《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31-02) 中相关规定进行;
- 2) 下卧层软弱土的压缩沉降量 S_2 按照公路软土地基采用分层总和法计算。

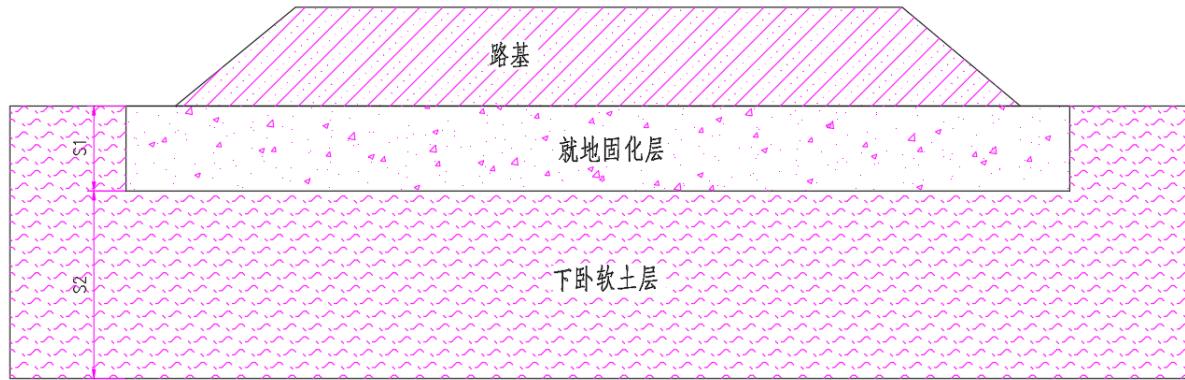


图 5.4.3-3 就地固化硬壳层双层地基沉降计算图

公路等级	工程位置		
	桥台与路堤相邻处	涵洞、箱涵、通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3
二级公路	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.5

5 就地固化处理软弱土地基时稳定性分析可采用圆弧滑动法进行，固化土的抗剪强度可取 90d 龄期无侧限抗压强度值 1/2。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 施工前应充分理解设计意图、固化方案及要求，了解所用固化剂的性能特征与固化机理，掌握就地固化现场施工及质量控制要点，制订详尽的施工组织设计方案，合理安排施工工期，并做好现场技术交底工作。

6.1.2 固化剂的存储与运输应符合相关规定，并提供质保单，实际施工用固化剂应与室内试验用固化剂类型完全一致。

6.1.3 机械设备及相应型号的选择，应根据工程规模、设计要求、施工条件与环境条件综合确定。

6.1.4 施工前应选取典型路段进行现场试验，通过试验路段确定最佳配合比、施工方法、施工设备参数和施工工艺。

6.1.5 就地固化施工不应在雨季进行。

6.1.6 施工阶段实际地质情况与施工图出入较大时，应及时联系设计单位进行动态设计，修正设计方案。

6.2 设备

6.2.1 本规范推荐使用的强力搅拌就地固化系统由强力搅拌头、挖掘机、固化剂供料系统等组成。固化剂供料系统控制进料及输料，通过安装于挖掘机上的强力搅拌头输出，并在强力搅拌头的搅拌下，将输出的固化剂与土均匀拌合。固化设备应提供产品合格证书或使用维护保养资料，并在施工前进行检查和调试。

6.2.2 就地固化施工系统的处理深度取决于强力搅拌头的长度，搅拌头连接杆的悬臂长度应大于处理深度不小于 0.5m。

6.2.3 强力搅拌头应按合理角度对称分布在连接杆和喷嘴的两侧，通过挖掘机液压系统驱动实现三维搅拌，以保证搅拌的均匀性。强力搅拌头的设备参数如下：

1 转动方向为横向转动，搅拌头转速在 50r/min～120r/min；

2 单次搅拌形状在平面上为矩形；

3 搅拌头连接杆的悬臂长度为 3.0m～7.0m；

4 搅拌头宽度为 1.3m～1.8m，高度为 0.8m～1.0m；

5 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。

表 6.1.3 设备选型建议一览表

含水率	推荐搅拌时间与转速
0.8~1.2wl	转速 60-80, 时间 2-4min, 提升或下降速率 0.1-0.3m/s
1.2~1.6wl	转速 80-100, 时间 2-4min, 提升或下降速率 0.1-0.3m/s
1.6~2.0wl	转速 100-120, 时间 2-5min, 提升或下降速率 0.1-0.3m/s

6.2.4 挖掘机用于提供搅拌头搅拌与移动时的动力, 应根据所选用的强力搅拌头的大小来选用, 保证搅拌头的液压驱动力和搅拌的稳定性, 液压驱动力为 23MPa~42MPa。

6.2.5 固化剂供料系统: 强力搅拌就地固化施工方法可采用湿法施工, 供料系统为浆剂供料系统, 浆剂设备最大压力不小于 3MPa, 供料系统应可实现多种固化剂的同时供料。

6.2.6 固化剂供料系统应能控制固化剂出料量与出料时间、实时显示并记录打设区域的用料量, 保证每次搅拌区间和整个区块的固化剂用量, 数据可存储和打印; 并可进行远程操作, 达到固化剂喷料的自动化和智能化, 避免人为造成的资源浪费。

6.3 施工准备

6.3.1 就地固化开工前, 施工单位应在全面熟悉设计文件和设计交底的基础上, 进行现场核对和施工调查,发现问题应及时根据有关程序提出修改意见报请变更设计。

6.3.2 根据现场收集到的情况、核实的工程数量, 按工期要求、施工难易程度和人员、设备、材料准备情况, 编制实施性的施工组织设计。

6.3.3 开工前应做好施工测量工作, 施工测量的精度应符合现行《公路勘测规范》(TTG C10) 的要求。

6.3.4 固化施工前,应详细检查、核对纵横断面图,发现问题时应进行复测。

6.4 施工工艺

6.4.1 就地固化施工宜采用边固化边推进的形式进行, 在垂直方向上, 原位垂直上下固化式适用于一般软弱土, 翻松分层固化式适用于表层存在硬壳层的土体。分层固化的施工质量检验应分层进行, 并应在每层的压实系数符合设计要求后铺填上层。其工艺一般遵循以下流程:

1 施工放样: 按照设计要求进行现场施工放样。

2 场地准备: 排除表面杂草、浮泥等杂质; 将清表后的场地整平, 以便于后续施工。

3 场地区块划分：对固化区域进行分块，区块大小一般为 $10m^2 \sim 30m^2$ ，常规的划分尺寸为 $5m \times 5m$ 或 $5m \times 6m$ 左右的处理区域。如图 6.4.1-1 所示，区块之间存在重叠区域，重叠区域宽度为 0.2m。

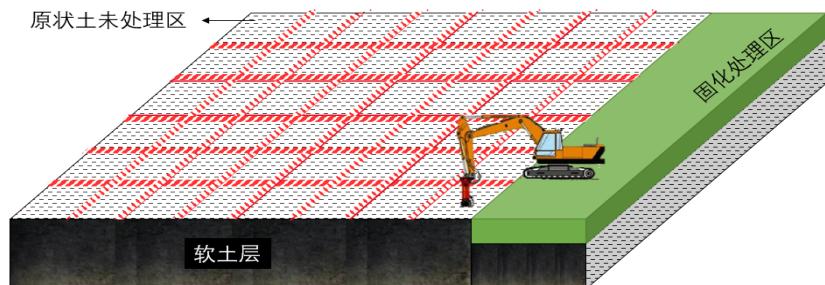
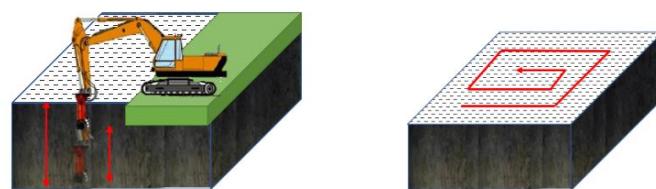


图 6.4.1-1 区块划分示意图

4 固化剂定量调配：施工方法主要为湿法施工。根据处理段落的软弱土工程量计算固化剂用量配合比，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；同时精确实时记录和检测固化剂的用料量、出料时间及已打设区域的固化剂用量等。

5 就地搅拌施工：采用湿法施工，采用边固化边推进的方式进行，应保证搅拌均匀，其强度满足指标要求，各区块之间应有不小于 20cm 的复搅搭接宽度，避免漏搅。按现场试搅确定的施工工艺和施工参数，采用搅拌头对原位土进行就地强力搅拌，就地拌和时，将固化剂与原位土逐步搅拌到地基处理深度，搅拌应均匀，并应符合以下要求：

1) 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，搅拌设备反向运行缓慢提升搅拌并喷固化剂，搅拌提升或下降的速率可控制在每米 10s-20s，固化剂的喷料速率可控制在 $80kg/min \sim 120kg/min$ ，每个点位在垂直方向上需来回 2-3 次，如图 6.4.1-2 (a) 所示。在水平方向采用螺旋向内的搅拌方向，如图 6.4.1-2 (b) 所示。



(a) 垂直方向 (b) 水平方向

图 6.4.1-2 搅拌方向示意图

2) 搅拌过程中, 定位系统应实时记录搅拌头全过程。

6 预压整平:

当施工区域搅拌完成后 1~2 d, 可采取预压压实或其他地基处理措施进行处理。其中素土回填预压厚度可取 0.5m 左右; 预压后进行整平养护, 保证搅拌后板体的整体性及表层土体的压实度, 养护时间宜在 7d 以上。养护时如遇雨季施工, 用塑料薄膜将铺在表面, 同时加强场地排水, 以减少雨水影响。

7 上部结构施工: 当软弱地基完成就地固化和素土回填后, 经质量检验合格后, 方可进行上部结构的施工。

6.5 质量控制

6.5.1 施工单位在施工过程中应做好就地固化处理施工质量管理, 就地固化质量控制应符合以下规定要求:

1 施工中, 应建立健全并认真执行工地试验、质量检查、工序交接、固化剂材料的贮运与保管等规章制度。施工、试验、检测、验收应做到原始记录齐全、数据准确和资料完整;

2 每道工序完成后, 均应进行质量检验, 合格后方可进入下一道工序施工, 经检验不合格的工序应进行翻修, 直到达到合格要求;

3 就地固化使用的原材料, 其检验项目除应符合表 6.5.1-1 的规定, 还应符合相关国家规范与行业标准的要求。

表 6.5.1-1 原材料检验项目

项目		检测频度	质量要求或允许误差	试验方法
固 化 剂	细度 (粉体状)	每批次 2 个样品	0.074mm 标准筛筛余量 小于等于 15%	水泥细度检验方法, GB/T 1345
	含水率 (%)	每批次 2 个样品	检测数据波动幅度±2%	混凝土外加剂匀质性试验方法 (GB/T 8077)
	密度 (g/cm ³)	每批次 2 个样品	±0.03	水泥密度测定方法 (GB/T 208)
	外加剂化学成分 (必要时)	每批次 2 个样品	纯度不小于 98%	水泥化学分析方法, GB/T 176

4 就地固化浅层地基处理施工过程中, 应随时对施工质量进行检测, 发现与设计不符时, 应及时上报、调整。

6.5.2 就地固化处理路段应按照《公路路基设计规范》(JTG D30) 和《公路软土地基

路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31) 进行沉降与稳定监测。

7 质量检验

7.1 一般规定

7.1.1 就地固化验收应包括施工过程的质量检验以及施工后为验收提供依据的工程检测。

7.1.2 工程施工质量应符合设计文件的要求。

7.1.3 参加工程检验的各方人员应具备相应的资格。

7.1.4 工程质量检验应在施工单位自行检查，评定合格的基础上进行。

7.1.5 道路软弱土地基就地固化施工质量验收除应符合本规范规定外，还应根据道路等级，满足现行行业标准的相关规定。

7.2 检测方法

7.2.1 就地固化地基检测可根据检测对象情况，选择深浅结合、点面结合、载荷试验和其他原位测试相等试验方法进行检测。

7.2.2 采用标准贯入试验、静力触探试验、圆锥动力触探试验、十字板剪切试验等方法判定地基承载力和变形参数时，应结合地区经验以及单位工程载荷试验比对结果进行。

7.2.3 就地固化地基检测可在就地固化施工完成后 7d 进行检测，若后期进行了复合地基处理，进行复合地基承载力检测宜在施工结束 28d 后进行；当设计对龄期有明确要求时，应满足设计要求。

7.2.4 质量检验时地基测试点位置的确定，应符合下列规定：

1 同地基基础类型随机均匀分布；

2 局部岩土条件复杂可能影响施工质量的部位；

3 施工出现异常情况或对质量有异议的部位；

4 设计认为重要的部位；

5 当采取两种或两种以上检测方法时，应根据前一种方法的检测结果确定后一种方法的抽检位置。

7.3 质量检验

7.3.1 质量检验的基本要求：

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；严格控制喷浆时间和喷入量，不得中断喷浆，因故中断或喷浆不足时，应进行复搅。

7.3.2 就地固化浅层处理检验的实测项目如表 7.3.2 所示。

表 7.3.2 就地固化处理实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	就地固化厚度 (mm)		不小于设计要求	静力触探确定, 单个区域或每 200m 测试点不少于 2 处, 且不少于 5 点
2	就地固化宽度 (mm)		不小于设计要求	米尺测量, 单个区域或每 200m 测试点不少于 2 处, 且不少于 5 点
3	强度	不排水抗剪强度 (kPa)	不小于设计要求	十字板剪切试验, 单个区域或每 300m 测试点不少于 3 处
		静力触探锥尖阻力 (MPa)		或静力触探试验, 单个区域或每 300m 测试点不少于 3 处
4	固化剂掺入量 (%)		设计值的 ± 0.5	计算机采集数据计算
5	地基承载力 (kPa)		不小于设计要求	静力触探试验, 单个区域或每 300m 测试点不少于 1 处

注: 对富水地区就地固化处理而言, 上表中项次 3 为关键项目, 其合格率不得低于 95%, 其余的一般项目合格率不得低于 80%, 否则该检查项目为不合格。对换填区就地固化处理而言, 上表中项次 3、5 为关键项目, 其合格率不得低于 95%, 其余的一般项目合格率不得低于 80%, 否则该检查项目为不合格。

7.4 检验报告

7.4.1 检验报告应包括下列内容:

- 1 检验报告编号, 委托单位, 工程名称、地点, 建设、勘察、设计、监理和施工单位, 地基及基础类型, 设计要求, 检测目的, 检测依据, 检测数量, 检测日期;
- 2 主要岩土层结构及其物理力学指标资料;
- 3 检验点的编号、位置和相关施工记录;
- 4 检验点的标高、场地标高、地基设计标高;
- 5 检验方法, 检测仪器设备, 检测过程叙述;
- 6 检验数据, 实测与计算分析曲线、表格和汇总结果;
- 7 与检验内容相应的检测结论;
- 8 相关图件或检验报告。

道路工程软弱土 就地固化技术规范

条文说明

Technical specification for in-situ
solidification of soft soils for road works

xxxx-xx-xx发布

xxxx-xx-xx实施

中国公路建设行业协会发布

制定说明

本规范在制定过程中，编制组针对道路工程软弱土就地固化技术的应用进行了广泛的调查、研究，总结了我国目前在道路工程软弱土就地固化技术应用中的相关经验，同时参考了国内外的先进技术法规、技术标准，经过反复讨论、修改和完善，制定了关于道路软弱土就地固化技术的设计、施工及验收的相关条文。

为便于广大技术和管理人员在使用本规范时能正确理解和执行条款规定，编制组按章、节、条的顺序编制了本规范的条文说明，对条款规定的目的、依据及执行中应注意的有关事项进行了说明。

本条文说明不具有与规范正文及附录等同的效力，仅供使用者作为理解和把握导则规定的参考。

目 次

1	总则	27
3	术语和符号	28
4	材料	29
5	设计	30
6	施工	32

1 总 则

1.0.4 道路工程软弱土就地固化技术的设计与施工，应综合考虑工程所在地质条件与水文条件特点、道路等级、施工技术及环境条件等多种因素，不同类别工程项目的软弱土就地固化技术设计和应用存在差异，应充分考虑项目的差异性，因地制宜，分别设计与应用。

3 术语和符号

3.1.1 2013 年颁布的《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31-02-2013) 中指出软弱土地基主要指由天然含水率高、天然孔隙比大、抗剪强度低、压缩性高的细粒土，包括粉土、淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土、杂填土和其他高压缩性土所构成的土质地基。这种土质地基，在荷载作用下易产生滑移或过大沉降变形，需要被加固处理后才能进行路基填筑。

3.1.5 固化剂是指掺入原状土后，通过与原状土、水、空气的物理或化学反应，改善原状土工程性能的材料。根据《土壤固化剂应用技术标准》(GJJ/T286-2018) 可分为 A 类与 B 类固化剂，本规范主要为 A 类。其中 A 类固化剂主要指加入土后通过无机结合料、土、水和空气的物理或化学反应，改善基土工程性能的外加剂，为粉体或液体；B 类固化剂主要指加人土后，通过与土、水和空气的物理或化学反应，单独使用，不与无机结合料复掺使用的土壤固化剂，为粉体。本规范主要为 A 类。

4 材料

4.1.1 条文规定中的水包括拌合用水、稀释用水。水的选用一般以不影响就地固化土的强度和耐久性为原则。可以采用饮用水、自来水、河水、湖泊水,应符合 JTJ 63 的要求,不宜采用油污水、海水等。

4.1.2 条文中固化剂应满足相关国家规范要求,需提供产品质量检验合格证明等方能投入使用。

4.2 固化剂分为无机类、有机化合物类、离子类和复合类,相应材料的要求及适用条件如下:

1) 无机类固化剂包括水泥、石灰、粉煤灰、石膏、矿渣等,宜适用于常规软弱土的固化处理;

2) 有机化合物类固化剂包括水玻璃类、高分子材料类等及其中的两种或多种组合配制而成。高分子材料类包括二羟甲基丁酸、聚丙烯酰胺、羧甲基纤维素、黄原胶、木质素磺酸盐等,有机化合物类固化剂不宜单独使用。

3) 离子类固化剂大多由石油磺化而得到,多为液体状,主要成分为磺化油类表面活性剂、有机大分子基团、无机盐离子及部分催化剂物质等。离子类固化剂适用于膨胀土、红粘土等的固化处理。

4) 常用的复合类固化剂包括水泥类+有机化合物类等,适用于常规软弱土的固化处理。

常用的水泥、石灰、粉煤灰、石膏、矿渣等无机类固化剂,其质量要求应符合以下规定:

1) 水泥应选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,强度等级应不低 42.5 级,并应符合国家标准《通用硅酸盐水泥 GB175》中的技术要求,且强度等级不应低于 42.5 级;

2) 石灰应选用生石灰粉,其氧化钙和氧化镁总量应不小于 75%,且应符合行业标准《建筑生石灰 JC/T 479》中的技术要求;

3) 粉煤灰等级应大于 II 级,并符合国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰 GB/T 1596》中的技术要求;

4) 矿渣应选用矿渣粉,不低于 S95 级,并符合国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉 GB/T 18046》中的技术要求;

5) 具体固化剂配比可参考 5.3.5 节。

5 设 计

5.1.3 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。

5.2.4 固化土试件成型后,需进行技术指标的确定,其中养护 7d 龄期的无侧限抗压强度应符合《公路路基设计规范》JTG D30 的规定。固化土无侧限抗压强度试验方法应符合现行行业标准《公路工程无机结合料稳定材料规程》JTG E51 的有关规定。对于特殊地区土体,还应进行耐久性试验,如干湿循环、干缩、冻融循环等试验,确保固化土满足不同地区的技术要求,以上试验同样需满足相关国家规范。

5.3.5 水泥、石灰等无机结合料具有材料易得、固化效果好及经济性好等优点,是软弱土固化处理的常用固化剂,其他固化剂(包含粉煤灰、石膏、矿渣微粉等)可以根据不同施工要求添加。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。采用湿法施工进行固化土配合比设计时,常用固化剂的复合掺入量可参照表 5.3.5。

表 5.3.5 常见固化剂配合比与强度对应关系

7d 无 侧 限 抗 压 强 度 kPa	原状土含水率																	
	0.8w _L		1.0w _L		1.2w _L		1.4w _L		1.6w _L									
	原状土液性指数 (I _L)																	
	0.75 < I _L ≤ 1.00				1.00 < I _L ≤ 1.30				1.30 < I _L ≤ 1.70				1.70 < I _L ≤ 2.00					
	固化剂掺入量 (%)																	
	水 泥	石 灰	其 他 固 化 剂	水 泥	石 灰	其 他 固 化 剂	水 泥	石 灰	其 他 固 化 剂	水 泥	石 灰	其 他 固 化 剂	水 泥	石 灰				
50	2-4	0-1	1-2	2-4	0-1	1-2	2-4	0-2	2-3	3-5	1-2	2-3	4-6	2-3	2-3			
80	2-4	0-1	2-3	2-4	0-1	2-3	2-5	0-2	2-4	4-6	1-2	2-4	5-7	2-3	2-4			
100	2-4	0-2	3-4	3-5	1-2	3-4	3-5	1-3	3-5	5-7	1-3	3-5	5-8	3-4	3-5			
150	3-4	1-2	3-4	3-5	1-2	3-4	4-6	1-3	4-6	5-8	1-3	4-6	6-8	3-4	4-6			
200	3-4	1-2	4-5	4-6	0-3	4-5	4-6	2-4	4-6	6-9	2-4	4-6	7-9	2-5	4-6			
250	4-5	2-4	5-6	4-6	1-3	5-6	5-7	2-4	5-7	7-10	2-4	5-7	8-10	3-6	5-7			
300	5-6	2-4	5-6	5-7	2-4	5-6	5-8	2-4	5-7	7-10	3-5	5-7	8-10	3-6	5-7			

5.3.6 对于现场工程来说,无侧限抗压强度在《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017-96) 中采用的是 28d 龄期的强度,在《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002) 和《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》(TB 10113-96) 均采用 90d 龄期的强度作为标准强度。这主要考虑了强度获取时间与具体工程进度的配合。但是对于就地固化处理现场,需根据现场施工种类以及施工作业所需地基承载力进行确定,要将龄期与实际工程进度结合起来考虑,但原则上就地固化时间不少于 7d,方可进行施工。

本规范中地基承载力计算方法是根据不排水剪切强度确定,部分工程由于现场条件或试验条件等限制,可能无法准确获得土体不排水剪切强度,因此可用无侧限抗压强度替代。无侧限抗压强度试验和不排水剪切试验本质上并无差别,只是后者试验中试样受到橡皮膜约束而有较高的强度。两种试验测得的不排水强度取决于试样的原位应力和应力释放后试样内部储存的负孔隙水压力的大小。由于取样、储存和实验操作将不可避免地引起土的结构扰动,致使试样内储存的负孔隙水压力一般小于它的原位平均应力,因此 $\frac{q_u}{2} \leq c_u$, 即利用无侧限抗压强度换算不排水剪切强度来计算地基承载力是偏于安全的。

5.4.1 就地固化浅层加固软弱土地基时,硬壳层表面承载力宜通过现场静力触探试验进行确定;对于有承载力要求的结构物基础,就地固化路段、深埋软弱土低路基部分固化段和无硬壳层浅层固化路段应按设计承载力要求进行静力触探试验,对常规路基填筑的河塘清淤就地固化、浅层软弱土全部固化处理,按设计要求进行承载力试验。

5.4.3 考虑到就地固化土层多为水泥土或水泥联合其他固化剂改良土,因此根据 JTGT D31-02 规范,压力扩散角应取大于 28°。

5.5.5 在就地固化浅层处理软弱土地基的沉降计算中,相关土体参数应通过固化土的相关土工试验获得。固化土的压缩模量需根据土工试验结果进行取值,当无试验数据时可参考《岩土工程勘察规范》DGJ08-37 中压缩模量与原位测试成果进行计算。

6 施工

6.1.3 就地固化系统利用自动供料系统与储料装置实现固化剂的自动定量供给,通过安装在强力搅拌头上的喷料装置输出,在搅拌头的搅拌作用下,将输出的固化剂与软弱土均匀拌和,达到就地固化的目的。目前,国内外应用较为成熟的强力搅拌设备为芬兰 ALLU 三维强力搅拌固化系统,河海大学通过水利部“948”项目引入芬兰 ALLU 公司的 PMX 强力搅拌头,结合我国工程实际情况,开展了强力搅拌头国产化和多规格化研究,形成了适用于不同深度、不同粘度的搅拌头,推进了就地固化处理技术在我国软弱土地基加固领域的应用。为方便就地固化技术推广,也可采用国产设备,因此本规范对固化设备不做具体要求,只规定设备的动力和相关参数要求,实际施工中,可采用满足设备参数要求的国产设备。具体搅拌头主要结构参数如下:其平面尺寸: (宽×高) 有 $1.6m \times 0.87m$ 和 $1.4m \times 0.8m$ 两种,最小尺寸为 $1.1m \times 0.6m$,当设计固化深度小于 $1.2m$ 时,应选用搅拌头高度不超过 $0.8m$ 的设备。同时,与常规搅拌头相匹配的挖机型号有 250 和 300。