



T/CECS XXX-202X

中国工程建设协会标准

道路软土地基强力搅拌就地固化 技术规程

Technical specification for in-situ solidification of soft
ground by power mix method

(征求意见稿)

中国工程建设协会标准

道路软土地基强力搅拌就地固化 技术规程

Technical specification for in-situ solidification of
soft ground by power mix method

T/CECS ×××-202×

主编单位：上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

河海大学

批准部门：中国工程建设标准化协会

施行日期：202×年××月××日

中国计划出版社

202* 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2018 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2018]015 号）的要求，规程编制组在广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外现行标准，并在广泛征求意见的基础上，制订本规程。

本规程共分为 5 章和 3 个附录，主要技术内容包括：总则、术语和符号、设计、施工、验收。

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，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄往解释单位（地址：上海市中山北二路 901 号，邮政编码：200092）。

主编单位：上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

河海大学

参编单位：浙江省交通规划设计研究院

汇壹（上海）环境岩土科技有限公司

重庆大学

浙江交工宏途交通建设有限公司

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.....	- 4 -
3 设 计	- 9 -
3.1 一般规定.....	- 9 -
3.2 固化材料设计.....	- 10 -
3.3 就地固化浅层处理.....	- 13 -
3.4 就地固化硬壳层-桩体复合地基	- 17 -
4 施 工	- 20 -
4.1 一般规定.....	- 20 -
4.2 施工准备.....	- 20 -
4.3 施工设备.....	- 21 -
4.4 施工工艺.....	- 21 -
4.5 质量控制.....	- 23 -
5 验 收	- 26 -
5.1 一般规定.....	- 26 -
5.2 就地固化浅层处理.....	- 26 -
5.3 就地固化硬壳层-桩体复合地基	- 27 -
附录 A 就地固化浅层处理相关计算.....	- 28 -
附录 B 就地固化硬壳层-桩体复合地基相关计算	- 32 -
附录 C 就地固化硬壳层-桩体复合地基的沉降计算	- 37 -
本规程用词说明	- 45 -
引用标准名录	- 46 -
条文说明	- 47 -

Contents

1 General provisions	(1)
2 Terms and symbols	(2)
2.1 Terms	(2)
2.2 Symbols	(3)
3 Design	(8)
3.1 General requirements	(8)
3.2 Proportion design of solidification materials	(9)
3.3 In-situ shallow solidification treatment	(12)
3.4 Hard crust-pile composite foundation	(16)
4 Construction	(19)
4.1 General requirements	(19)
4.2 Construction preparation	(19)
4.3 Construction equipment	(20)
4.4 Construction technology	(20)
4.5 Quality control	(22)
5 Acceptance	(25)
5.1 General requirements	(25)
5.2 In-situ shallow solidification treatment	(25)
5.3 Hard crust-pile composite foundation	(26)
Appendix A Correlation calculation of in-situ shallow solidification treatment	(27)
Appendix B Correlation calculation of hard crust-pile composite foundation	(31)
Appendix C Calculate the settlement of hard crust-pile composite foundation	(36)
Explanation of wording in this specification	(44)
List of quoted standards	(45)
Addition: Explanation of provisions	(46)

1 总 则

1.0.1 为规范强力搅拌就地固化技术在道路软土地基加固工程中的应用，保证加固地基的安全、可靠与耐久，特制订本规程。

1.0.2 本规程适用于新建、扩建及改建的各等级道路软土地基强力搅拌就地固化技术的设计、施工与验收。

1.0.3 道路软土地基强力搅拌就地固化技术的设计与施工，应坚持因地制宜、就地取材、保护环境、节约资源和提高效率的原则，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，强化施工过程质量控制和管理，保证施工质量。

1.0.4 道路软土地基强力搅拌就地固化技术除应符合本规程的规定外，还需符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 强力搅拌就地固化技术 in-situ solidification technique

利用强力搅拌头将固化材料与软土地基中的软土进行就地搅拌,使土体达到一定强度或其它使用要求,从而对土体进行就地利用或达到地基处理要求的方法,本规程中简称“就地固化技术”。

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

由强力搅拌头、挖掘机、固化材料自动供料系统、储料装置及控制系统等组成的就地固化成套系统设备。

2.1.3 强力搅拌头 power mixing head

通过挖掘机液压系统驱动,实现三维搅拌,保证固化材料与软土地基中的软土实现强力均匀搅拌的专用设备。

2.1.4 固化材料 solidification materials

用于土壤固化使用的一类材料,主要包括无机结合料、土壤固化剂及外加剂等,可单独使用或混合使用。

2.1.5 原状土 original soil

道路软土地基范围内,待掺加固化材料进行固化处理的土体。

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

对软土厚度为 0.8m~5.0m 的软土地基进行就地固化处理,形成硬壳层进而提高地基承载力的一种浅层处理方法,根据软土范围内处理深度分为全部固化和部分固化。

2.1.7 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且长度和宽度有限的人工硬壳层。

2.1.8 就地固化硬壳层双层地基 double-layered ground of in-situ solidification hard crust

就地固化硬壳层与下卧软土层形成的双层地基。

2.1.9 硬壳层-桩体复合地基 hard crust-pile composite foundation

以桩作为地基中的竖向增强体并与就地固化硬壳层共同承担荷载的人工地

基。根据桩体材料特性的不同，可分为柔性桩复合地基与刚性桩复合地基。

2.2 符 号

- A_j ——空心桩桩端净面积；
- A_p ——桩的截面积；
- A_{pl} ——空心桩敞口面积；
- A_s ——土单元面积；
- b ——路基底面宽度；
- b' ——固化层底面宽度；
- c ——就地固化处理后土体黏聚力；
- c_0 ——下卧层土体黏聚力；
- c_i ——第 i 个分层粘聚力；
- C_3 ——持力层土体粘聚力；
- C_{qi} ——第 i 土条底土体粘聚力；
- d_{max} ——荷载影响深度；
- D ——硬壳层弯曲刚度；
- E_b ——下卧层土体压缩模量；
- E_c ——硬壳层压缩模量；
- E_p ——桩单元压缩模量；
- E_s ——土单元压缩模量；
- E_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量；
- $E_{s,i}$ ——桩端平面以下第 i 土层在自重应力下至自重应力加附加应力作用段的压缩模量；
- E_{tian} ——填土的压缩模量；
- f_a ——固化处理后土体的 90d 无侧限抗压强度；
- f_{az} ——固化层底面处经深度修正后的下卧层承载力特征值；
- f_{cu} ——室内固化土试样 90d 无侧限抗压强度；
- f_{spk} ——复合地基承载力特征值；
- f_{sk} ——桩间土承载力特征值；
- F_B ——整体稳定安全系数；

F_{ub} ——承载力设计安全系数；
 h ——路堤顶面到就地固化硬壳层表面高度；
 h_b ——桩端进入持力层深度；
 h_c ——等沉面到就地固化硬壳层表面高度；
 Δh_i ——桩身第 i 分段的高度；
 H ——就地固化处理厚度；
 H' ——路堤填筑高度；
 l_j ——第 j 桩桩长；
 $I_{p,ij}$ ——第 j 桩的桩端阻力对计算轴线第 i 计算土层 $1/2$ 厚度处的应力影响系数；
 $I_{s,ij}$ ——第 j 桩的桩侧阻力对计算轴线第 i 计算土层 $1/2$ 厚度处的应力影响系数；
 k ——置换率桩间土的基床系数；
 k_i ——第 i 个分层侧压力系数；
 K_0 ——土体静止土压力系数；
 k_c ——为桩侧土摩擦系数；
 l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度；
 l_i^n ——中性点以上的分层厚度；
 Δl_i ——第 i 条滑弧的弧长；
 L ——桩长；
 m ——复合地基置换率；
 n ——地基变形计算深度范围内所划分的土层数；
 n' ——桩身分段总数；
 P_0 ——相应于作用的准永久组合时基础底面处的附加压力；
 $p_1(z)$ ——桩截面对应位置处不同填料高度处的应力；
 $p_2(z)$ ——桩间土对应位置处不同填料高度处的应力；
 p_c ——路基底面处的自重应力；
 p_{cz} ——固化层底面处的自重应力；
 p_k ——相应于荷载效应标准组合时，路基底面处的平均压力设计值；
 p_z ——相应于荷载效应标准组合时，固化层底面处的附加应力；
 P_c ——下卧层等沉面的均布应力；

P_e ——极限扩张力；
 $P_p(0)$ ——桩顶荷载；
 q_c ——路堤顶面荷载；
 q_p ——桩端地基未经修正的承载力特征值；
 q_{pk} ——极限端阻力标准值；
 q_{si} ——桩周第 i 层土的侧摩阻力特征值；
 q_{si}^n ——中性点以上第 i 个分层负摩阻力的标准值；
 q_{ski} ——桩侧阻力标准值；
 q_u ——地基极限承载力；
 q_{u1} ——黏聚力引起的承载力；
 q_{u2} ——地基土自重引起的承载力；
 Q_p ——桩截面对应硬壳层表面应力；
 Q_{pi} ——第 i 段的桩身轴力 (kN)；
 Q_s ——桩间土对应硬壳层表面应力；
 Q_u ——桩帽上部承担的荷载；
 Q_g^n ——桩中性点以上的负摩阻力产生的下拉荷载；
 γ'_i ——第 i 个分层有效容重；
 γ_1 ——路堤填料容重；
 R_a ——单桩竖向承载力特征值；
 R_i ——滑弧半径；
 R_u ——采用静荷载试验确定的单桩极限承载力；
 S ——地基最终变形量；
 S_0 ——按分层总和法计算出的地基变形量；
 S_{01} ——桩截面对应位置处等沉面到硬壳层表面处的变形；
 S_{02} ——桩间土对应位置处等沉面到硬壳层表面处的变形；
 T_i ——第 i 层土工合成材料设计抗拉强度；
 U_i ——地基平均固结度；
 U_p ——桩的周长；

w_s ——桩间土的沉降;
 w_p ——桩的沉降;
 W_i ——第 i 土条重;
 X_i ——第 i 土条中心距滑弧圆心的水平距离;
 Y_i ——第 i 层土工合成材料距滑弧圆心的垂直高度;
 z ——固化层的厚度;
 Z_i ——基础底面至第 i 层土底面的距离;
 ΔZ_i ——桩端平面以下第 i 土层的厚度;
 α ——桩端天然地基土的承载力折减系数;
 α_i ——基础底面计算点至第 i 层土底面范围内平均附加应力系数;
 α_j ——第 j 桩总桩端阻力与桩顶荷载之比;
 β ——桩间土承载力折减系数;
 γ_0 ——硬壳层容重;
 γ_{tian} ——填土容重;
 δ_1 ——硬壳层表面处的沉降差;
 δ_u ——为桩土间最大的弹性位移;
 ζ ——抗剪强度发挥系数;
 η ——强度折减系数;
 η' ——桩体荷载分担比系数;
 θ ——压力扩散角;
 θ_i ——第 i 条滑弧的仰角;
 λ ——单桩承载力发挥系数;
 λ_p ——桩端土塞效应系数;
 ν ——硬壳层泊松比;
 σ' ——为土体有效应力;
 σ'_i ——第 i 个分层有效应力;
 $\sigma_{pz,i}$ ——桩端平面以下地基中由基桩引起的附加应力;
 $\sigma_{sz,i}$ ——桩帽间土体的平均压力在桩端平面以下引起的附加应力;

σ_{zi} ——第 i 个分层附加应力；

τ_p ——为桩侧摩阻力；

τ_u ——为极限摩阻力；

φ ——就地固化处理后土体内摩擦角；

φ_0 ——下卧层土体内摩擦角；

φ_3 ——持力层土体内摩擦角；

φ'_i ——第 i 个分层有效内摩擦角；

ψ_2 ——考虑桩端刺入变形的沉降计算经验系数；

ψ_s ——沉降计算经验系数。

3 设 计

3.1 一般规定

3.1.1 道路软土地基就地固化技术应根据道路等级、交通荷载、原状土的工程性质、工程要求、施工条件、环保要求及经济与社会效益等进行综合比较，合理确定固化材料设计及固化处理方案。

3.1.2 就地固化技术适用于淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、软塑至流塑黏土、软塑至流塑粉质黏土、稍密粉土、有机质土、泥炭质土及泥炭等类型的软土，软土的鉴别可按表 3.1.2 执行。

表 3.1.2 软土鉴别指标表

特征指标 名称		塑性 指数 I _p	天然含水 率 w (%)		天然孔 隙比 e	直剪快 剪内摩 擦角(°)	压缩系 数 α _{0.1-0.2} (MPa ⁻¹)	十字板 抗剪强 度(kPa)	静力触 探锥尖 阻力 (MPa)	标准贯 入试验 锤击数 (次)	有机质含 量 w _u (%)
黏 性 土	淤泥		≥35	≥w _L	e≥1.5	<5	>0.5	<35	≤0.75		
	淤泥质 黏土	I _p >17			1.0≤e< 1.5						
	淤泥质 粉质黏土	10<I _p ≤17									
	黏土	I _p >17		w≥w _L 或 e≥1.0							
	粉质黏土	10<I _p ≤17									
粉土		7<I _p ≤10	>30		e>0.9		>0.3		<2	≤8	
有机质土											5<w _u ≤10
泥炭质土											10<w _u ≤60
泥炭											w _u >60
注 1：当表中部分指标无法获取时，以天然含水率和天然孔隙比两项指标为基础，两个指标同时满足即可划为软土。											
注 2：w _L 指液限（%）。											
注 3：液限及塑限采用 76g 锥试验确定。											

3.1.3 道路软土地基就地固化设计应满足地基承载力、沉降和稳定性要求，并应符合现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 的规定。

3.1.4 固化材料设计应结合当地原材料情况、原状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，在试验段通过试搅拌进行验证、调整并确定。

3.1.5 固化材料设计时，各原材料用量宜采用占原状土质量的百分比表示。

3.1.6 就地固化处理方案包括就地固化浅层处理和就地固化硬壳层-桩体复合地基两大类，应根据设计需要及现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 的控制要求进行计算分析，确定加固范围和加固方法。

3.1.7 就地固化浅层处理多用于承载力和沉降不满足设计要求的浅层软基路段，通过形成硬壳层以提高地基承载力。

3.1.8 就地固化硬壳层-桩体复合地基多用于深厚、深埋软基之上的构筑物与路堤相邻路段。

3.1.9 根据固化材料是否与水预混合形成浆液，将就地固化处理分为干法施工与湿法施工两种。当施工过程对环保要求较高或固化材料存在液体时，应采用湿法施工。

3.1.10 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。

3.2 固化材料设计

3.2.1 无机结合料指水泥、石灰、粉煤灰、矿渣粉及其他工业废渣，应满足下列技术要求：

1 水泥应选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，强度等级应不低于 42.5 级，并应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的相关规定，且不同等级、厂牌、品种及出厂日期的水泥不得混用；

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%，且应符合现行行业标准《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，并符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 中的技术要求；

4 粒化高炉矿渣粉（简称：矿渣粉）应不低于 S95 级，并符合现行国家标准《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 工业废渣作为固化材料使用时，其浸出液中可溶性重金属离子含量最大值应符合现行国家标准《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》GB/T 25499 的规定。

3.2.2 土壤固化剂应符合现行行业标准《土壤固化剂应用技术标准》CJJ/T 286 中的相关技术要求，其匀质性指标应符合表 3.2.2 的规定，使用成品的固化剂应提供产品质量检验合格证明。

表 3.2.2 土壤固化剂匀质性指标

序号	项目	指标
1	外观	均匀一致，不应有结块
2	含水率（%）	≤1
3	80μm 筛余量（%）	≤10

3.2.3 外加剂主要有早强剂、缓凝剂、减水剂及稳定剂等，其技术要求应满足现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 中相关规定，使用时应随其他固化材料一同掺入待固化土体中。

3.2.4 根据地基目标承载力设计要求，参照附录 A 及附录 B 中关于承载力计算的公式反算得出固化处理后土体的 90d 无侧限抗压强度要求，并根据式（3.2.4）估算室内固化土试样的 90d 无侧限抗压强度，进而开展室内配合比试验。

$$f_a = \eta f_{cu} \quad (3.2.4)$$

式中：

f_a ——固化处理后土体的 90d 无侧限抗压强度（kPa）；

η ——强度折减系数（0.60-0.85）；

f_{cu} ——与现场就地固化配合比相同的室内固化土试样，在标准养护条件下 90d 的无侧限抗压强度（kPa）。

3.2.5 固化材料室内配合比试验应按下列步骤进行：

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，确定固化材料类型，再根据无侧限抗压强度设计要求，确定固化材料基准掺量；

3 配合比试验应至少采用三组，其中一组配合比为基准值，另外两组配合比在基准值的基础上分别增加和减少 1%~2%的固化材料用量；

4 完成无侧限抗压强度测试，并进行配合比调整与确定。

3.2.6 室内配合比试验宜采用干法拌制，在没有相关工程经验的情况下，固化材料类型及基准掺量可参照表 3.2.6 进行选取。

表 3.2.6 固化材料推荐掺量一览表

28d	原状土含水率
-----	--------

无侧限抗 压强度 (kPa)	50%		60%		70%		80%		90%	
	固化材料掺量质量百分数（%）									
	水 泥	其它固 化材料	水 泥	其它固 化材料	水 泥	其它固 化材料	水 泥	其它固 化材料	水 泥	其它固 化材料
30	1	2~3	2	0~1	2	2~3	3	0~1	4	0~1
50	1.5	2~3	2	1~2	2	3~5	3	1~3	4	1~2
80	2	2~3	3	0~1	3	1~3	4	1~3	5	0~1
100	2	3~4	3	1~2	3	3~5	4	3~5	5	1~4
130	3	0~2	3	3~4	4	0~2	5	0~1	5	4~5
160	3	2~4	4	0~2	4	2~3	5	2~3	6	0~2
200	3	5~6	4	2~4	4	4~6	5	4~6	6	3~4

注：1 固化材料掺量=固化材料质量/原状土质量，其它固化材料指石灰、粉煤灰、矿渣粉或土壤固化剂等；

2 实际工程中应根据室内试验建立固化土强度增长规律关系式，根据 28d 无侧限抗压强度快速推测出 90d 无侧限抗压强度；

3 当原状土的有机质含量较高，应考虑添加石灰，或将水泥改为石灰，或添加部分有机固化剂，具体的固化材料类型及掺量应根据试验确定。

3.2.7 室内配合比试验应采用机械搅拌，搅拌机可参照现行行业标准《行星式水泥胶砂搅拌机》JC/T 681 规定进行选择。

3.2.8 采用干法拌制时，应符合下列规定：

1 将风干土与固化材料混合均匀后，再加水搅拌至均匀，加水量应使拌合后固化土含水率与原状土保持一致；

2 拌合水可一次加入，也可逐次加入，当逐次加入时，应逐次拌和 1min，且从加水至搅拌结束，搅拌时间不应少于 10min，且不应超过 20min；

3 试样成型、养生及测试应符合现行行业标准《公路土工试验规程》JTG E40 中相关规定执行。

3.2.9 采用湿法拌制时，水灰比宜取 0.5~0.9，且水泥掺量应在表 3.2.6 的基础上增加 1%。

3.2.10 以无侧限抗压强度为指标，根据不同工程的设计要求和实测结果对固化材

料配合比进行调整，宜选择符合设计要求且经济性好的配合比。

3.3 就地固化浅层处理

3.3.1 下列情况下，宜采用就地固化浅层处理的方式进行地基加固：

- 1 硬壳层厚度小于 1.5m，且下卧软土层厚度小于 5.0m 的浅层软土路段；
- 2 泥浆池、沼泽地、江河滩涂或围海造路吹填土等无硬壳层路段；
- 3 地基强度不能满足路面结构层要求的软基浅挖路段；
- 4 鱼塘、池塘、河道、暗浜等需清淤换填路段；
- 5 软土路段结构物基础的浅层处理；
- 6 深厚软基低填方路段。

3.3.2 就地固化浅层处理包括全部固化和部分固化两种形式，应按下列规定进行选取：

1 硬壳层厚度小于 1.5m，且下卧软土层厚度小于等于 3.0m 的软土路段，应采用全部固化的处理形式（图 3.2.2-1）；

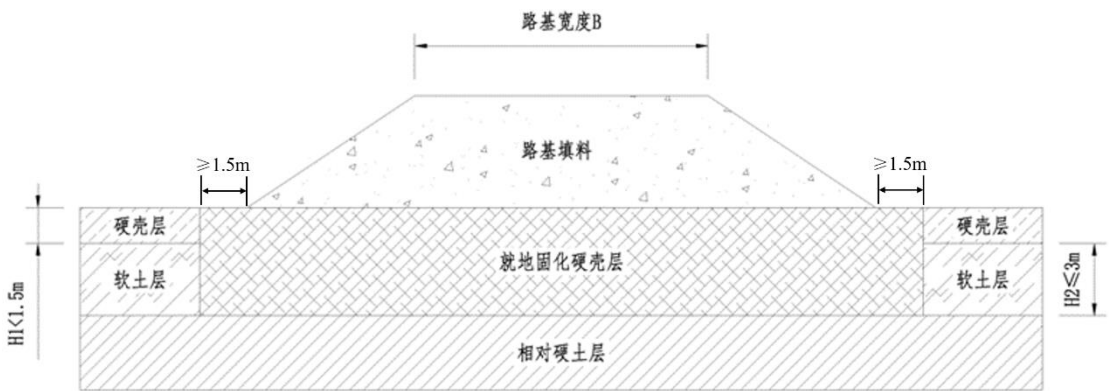


图 3.3.2-1 全部固化处理

2 硬壳层厚度小于 1.5m，且下卧软土层厚度大于 3.0m 小于 5.0m 的软土路段，当路基填筑高度大于等于 3.5m 时，应采用全部固化的处理形式，否则应采用部分固化的处理形式（图 3.2.2-2）；

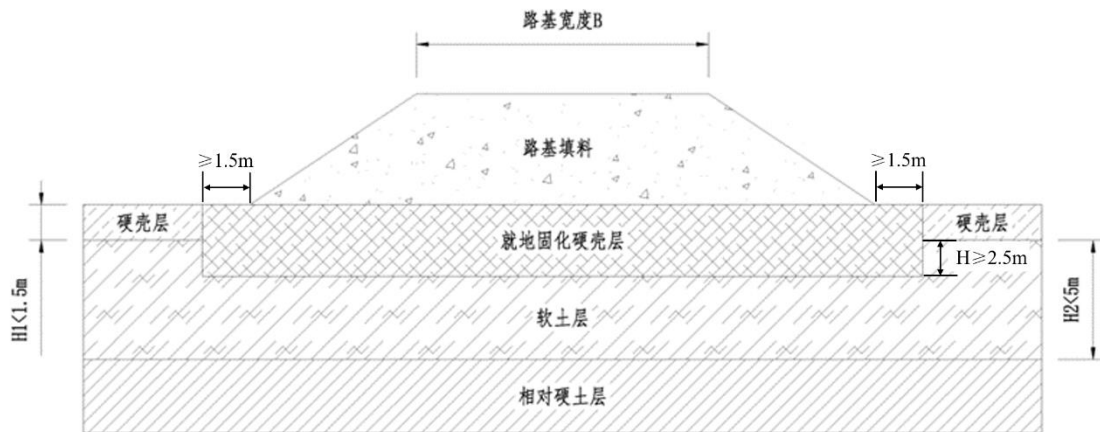


图 3.2.2-2 部分固化处理

3 当路基位于河塘、沼泽地、泥浆池、污染池、欠固结吹填土、常年积水的洼地及滩地，表层无硬壳层路段，路基填筑高度大于等于 3.5m 且软土厚度小于 5.0m 时，应采用全部固化的处理形式（图 3.2.2-3），否则应采用部分固化的处理形式；

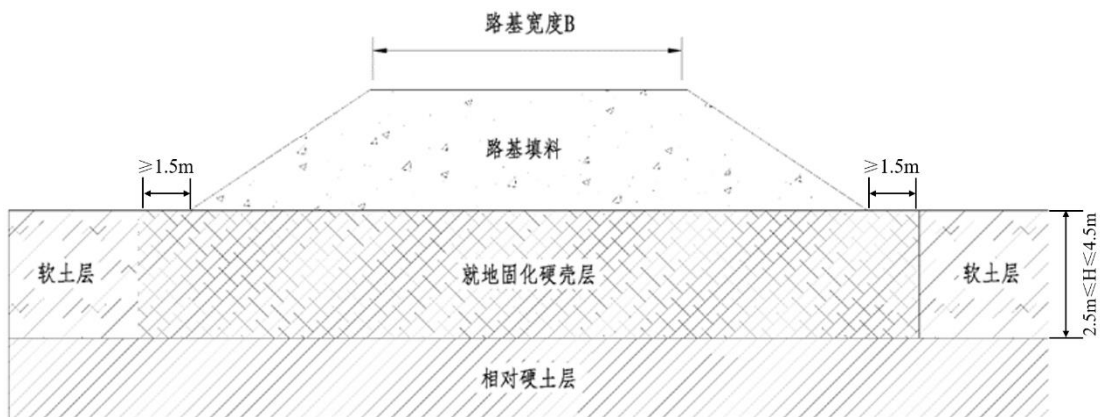


图 3.2.2-3 无硬壳层路段全部固化处理

4 地基承载力不足需清淤换填的软土浅挖路段，可采用部分固化处理的形式，固化深度应大于等于 1.5m 小于等于 3.0m（图 3.2.2-4）；

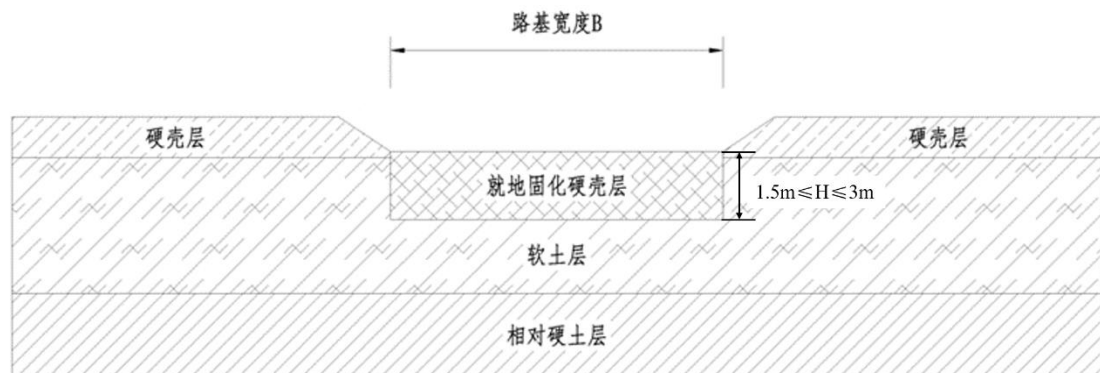


图 3.2.2-4 浅挖路段固化处理

5 支挡结构物、通道、箱涵、圆管涵、管线等下卧软土层，可采用就地固化浅层处理（图 3.2.2-5），以满足结构物或管线基础承载力的要求；

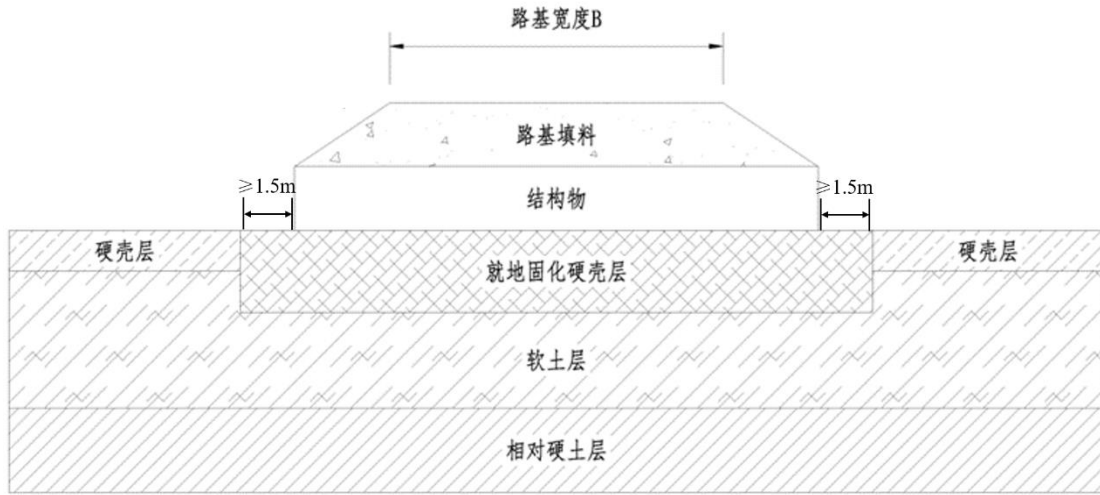


图 3.2.2-5 结构物基础浅层固化处理

6 对于深厚软基低填土路段，可采用部分固化处理的形式（图 3.2.2-6），固化深度应大于等于 2.0m，形成就地固化硬壳层双层地基。

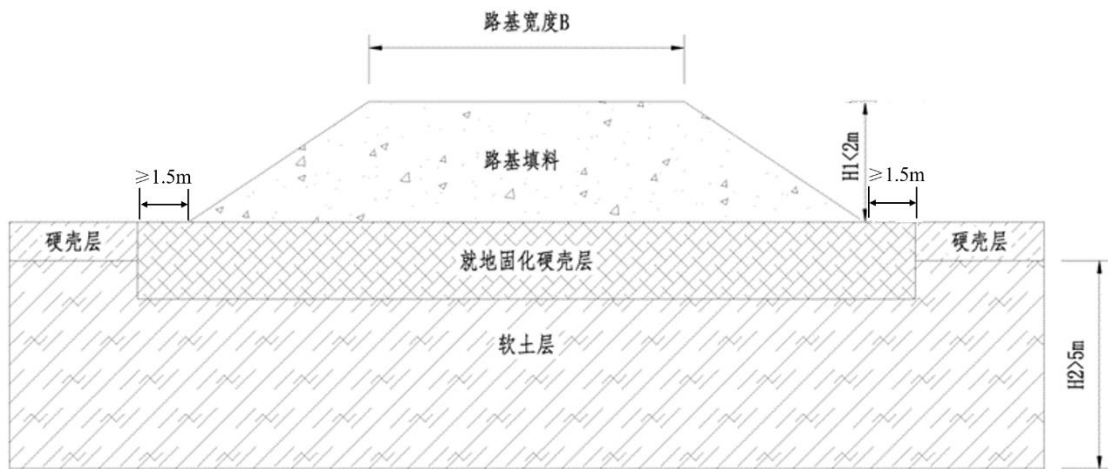


图 3.2.2-6 深厚软基低填方路堤固化处理

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

3.3.4 就地固化浅层处理的固化材料设计应按照本规程 3.2 节要求进行。

3.3.5 就地固化浅层处理软土地基的深度宜为 0.8m~5.0m，其应根据软土厚度、固化硬壳层表面及下卧层的承载力确定，并应满足式（3.3.5）的要求：

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (3.3.5)$$

式中：

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

p_{cz} ----固化层底面处的自重应力（kPa）；

f_{az} ----固化层底面处经深度修正后的下卧层承载力特征值（kPa）。

3.3.6 采用就地固化浅层处理时，应对就地固化硬壳层表面承载力与下卧层承载力进行计算，并应符合下列规定：

1 初步设计阶段，就地固化硬壳层表面承载力验算可采用太沙基公式进行，计算时将就地固化加固区及加固区以下土层参数根据荷载影响深度计算加权平均值，然后按照均质地基进行计算，具体计算方法可参照本规程附录 A 中 A.1 内容进行计算，待施工图阶段，就地固化硬壳层表面承载力应通过现场载荷试验进行确定；

2 就地固化浅层处理软土地基需对下卧层承载力进行验算，固化层底面处的附加应力应依据应力扩散理论进行，具体可按式（3.3.6）进行计算；

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} \quad (3.3.6)$$

式中：

b -----路基底面宽度（m）；

p_k -----相应于荷载效应标准组合时，路基底面处的平均压力设计值（kPa）；

p_c -----路基底面处的自重应力（kPa）；

z -----固化层的厚度（m）；

θ -----压力扩散角(°)，取 28°~45°。

3 就地固化浅层处理软土地基承载力计算时，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。

3.3.7 就地固化浅层处理软土地基的宽度宜为路堤坡脚外延伸 0.5m~2.0m 或控制在附加应力扩散影响范围内，具体可按式（3.3.7）计算确定。

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \quad (3.3.7)$$

式中：

b' -----固化层底面宽度（m）；

3.3.8 就地固化浅层处理软土地基时沉降应满足设计要求，沉降计算包括就地固化加固区与就地固化硬壳层下部土层压缩量两部分，具体计算应符合下列规定：

1 就地固化加固区变形仅考虑其自身的压缩变形,可根据固化土体的压缩模量进行计算;

2 就地固化硬壳层下各土层压缩变形之和可采用分层总和法计算,具体计算方法可按照本规程附录 A 中 A.2 内容进行计算。

3.3.9 就地固化浅层处理软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,具体计算方法可按照本规程附录 A 中 A.3 内容进行计算。

3.3.10 低填、浅挖路基底面采用就地浅层固化处理时,其土基回弹模量值 (E_0) 及路床 CBR 值应满足下列要求:

1 在不利季节,土基顶面设计回弹模量值,对快速路和主干路不应小于 30MPa,对次干路和支路不应小于 20MPa;

2 路床 CBR 值应符合表 3.3.10 的规定:

表 3.3.10 路床填料最小强度值

路床顶面以下深度 (m)	填料最小强度 (CBR) (%)		
	快速路、主干路	次干路	支路
0-0.3	8	6	5
0.3-0.8	5	4	3

3.3.11 就地固化浅层顶面的压实度要求应与相应层次的路堤填料压实度要求相同。

3.3.12 道路路堤范围内局部采用就地固化浅层处理时,其顶面可设置加筋垫层,加筋宜采用高强土工合成材料,垫层可采用改良土或透水性良好的填料。

3.4 就地固化硬壳层-桩体复合地基

3.4.1 软土无硬壳层或天然硬壳层强度、厚度等参数指标不满足工程需要,且不适合采用就地浅层固化处理的路段,宜采用就地固化硬壳层-桩体复合地基的形式对软土地基进行加固。

3.4.2 就地固化硬壳层-桩体复合地基的桩体类型应依据现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 相关规定进行选择,主要分为刚性桩复合地基和柔性桩复合地基两大类。

3.4.3 就地固化硬壳层-桩体复合地基应结合道路等级、软土层厚度及其性状指标、

路堤填高及宽度等情况，根据路基沉降和稳定控制标准，合理确定就地固化硬壳层的加固厚度、刚（柔）性桩类型和土工合成材料加筋体。

3.4.4 就地固化硬壳层-桩体复合地基的硬壳层厚度可参照本规程附录 A 中 A.1 内容进行计算后确定，宜在 0.8m~3.0m 之间进行选取。

3.4.5 就地固化设计前固化土应进行室内配合比试验，以固化土无侧限抗压强度作为指标，综合考虑经济性，最终确定合适的固化材料类型及掺量，具体要求应满足本规程第 3.2 节的相关规定。

3.4.6 就地固化硬壳层-桩体复合地基承载力可采用单桩静载试验或土体物理指标进行复合地基单桩承载力验算，并应符合下列规定：

1 刚（柔）性桩桩体材料、桩体平面布置、桩长的确定以及桩帽的设计要求宜按照现行行业标准《公路路基设计规范》JTG D30 及《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，桩间距的设计在保证路堤稳定性及承载力要求的基础上应充分利用桩间硬壳层的承载力合理设置；

2 刚性桩复合地基单桩承载力验算可按照本规程附录 B 中 B.1 内容进行计算，其中桩顶及桩间硬壳层顶部附加应力计算可采用应力扩散法确定；

3 柔性桩复合地基单桩承载力验算可按照本规程附录 B 中 B.2 内容进行计算，其中固化处理后土体 90d 无侧限抗压强度可根据式(3.2.4)进行计算。

4 土工合成材料水平加筋体的设计和要求可按照现行行业标准《公路土工合成材料应用技术规范》JTG/T D32 中规定进行；

5 复合地基承载力特征值计算时应对硬壳层的下卧层进行验算。

3.4.7 就地固化硬壳层-桩体复合地基沉降计算应符合下列规定：

1 刚性桩复合地基沉降，主要由桩顶沉降控制，包括桩身压缩量、桩端平面以下沉降量以及桩端刺入量，具体可按照本规程附录 B 中 B.3 内容进行计算；

2 柔性桩复合地基按照加固区沉降量和加固区下卧层沉降量进行计算，其中，加固区沉降量可采用复合压缩模量法进行计算，而加固区下卧层沉降量的计算关键在于下卧层顶部附加应力的计算，可采用应力扩散法进行；

3 就地固化硬壳层-桩体复合地基沉降计算也可按照本规程附录 C 计算方法进行。

3.4.8 就地固化硬壳层-桩体复合地基路堤整体稳定性分析可根据圆弧滑动法进

行验算，可按照本规程附录 B 中 B.4 内容进行计算，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。

4 施 工

4.1 一般规定

4.1.1 施工前应充分理解设计意图、固化方案及要求，了解所用固化材料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。

4.1.2 固化材料的存储与运输应符合相关规定，并提供质保单，实际施工用固化材料应与室内试验用固化材料类型完全一致，且实际用量应较室内试验确定用量高 1%。

4.1.3 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。

4.1.4 施工前应选取典型路段进行现场试验，试验路段不小于 30m^2 ，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。

4.1.5 就地固化施工不应在雨季进行。

4.1.6 采用就地固化硬壳层-桩体复合地基时，应进行成桩工艺和成桩强度试验，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，重新进行试验或改变设计，试桩要求应符合现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 相关规定。

4.1.7 在靠近城区及村镇等环保要求较高的路段时，应采取合适的施工工艺和必要的环保措施。

4.1.8 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。

4.2 施工准备

4.2.1 施工前，应收集下列资料：

- 1 拟处理区域的岩土工程勘察报告；
- 2 就地固化工程设计施工图；
- 3 就地固化工程施工组织设计；
- 4 拟处理区域和邻近区域内的环境条件，必要时还需提供固化材料对环境的影响相关报告等调查资料；

5 主要施工机械及其配套设备的技术性能资料。

4.2.2 施工前应结合工程的主要特点,调查周边料源分布、交通条件和场地环境,并完成料场、设备场地及施工便道等建设。

4.2.3 施工前应完成固化材料施工配合比及施工工艺验证,具体应按下列规定进行:

1 根据施工图设计要求,按照本规程第 3.2 节规定进行固化材料配合比室内试验;

2 按确定的最佳室内配合比进行现场试搅和工艺试验,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要求;

3 通过试验段的总结,确定最终的固化材料施工配合比和施工工艺,为实际施工提供技术依据。

4.3 施工设备

4.3.1 强力搅拌就地固化系统的主要设备功能与技术参数应满足下列要求:

1 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,转动方向为横向转动,搅拌头转速在 50r/min~120r/min,搅拌头连接杆的悬臂长度为 3.0m~7.0m;

2 挖掘机用于提供搅拌头搅拌与移动时的动力,根据所用强力搅拌头本身大小来适配挖掘机动力,以保证搅拌头液压驱动力和搅拌的稳定性;

3 采用干粉施工时,自动供料系统供料压力应不小于 0.8MPa,采用湿法施工时,自动供料系统供料压力应不小于 3MPa;

4 强力搅拌头宜具备定位系统,可保证固化范围内的搅拌全覆盖,避免漏搅。

4.4 施工工艺

4.4.1 就地固化浅层处理软土地基的施工过程中,施工工艺应满足下列要求:

1 施工前应按设计要求进行现场施工放样,并完成清表、排水及回填找平等场地准备工作;

2 对固化区域进行分块固化处理,区块大小宜取 $10\text{m}^2\sim 30\text{m}^2$,区块尺寸宜取 5.0m×5.0m 或 5.0m×6.0m;

3 根据试验确定的固化材料施工配合比及固化区块处理范围,确定各固化区

块的固化材料用量，采用固化材料供料系统设置固化材料供料速率，喷料速度控制在 100kg/min~200kg/min（粉剂）和 80kg/min~150kg/min（浆剂）；

4 采用强力搅拌头按垂直上下搅拌并喷射固化材料的方式实现软土地基的原位拌合固化，每个搅拌位置上下搅拌次数应不小于 2 次，强力搅拌头在土体中提升或下降的速率应控制在 10s/m~20s/m，且各固化区块间的复搅搭接宽度应大于 5cm；

5 原位固化处理过程中应严格控制喷浆（粉）的时间和喷入量，且不得中断喷浆（粉），因故中断或喷浆（粉）不足时，应进行复搅；

6 当固化区域搅拌完成后，宜采用满足设计要求的填土材料对搅拌后的土体进行堆载预压，预压后应进行整平养护，养护时间宜在 7d 以上，养护期间应加强场地排水，待施工完成后，宜用推土机对地基表层土碾压整平，整平后的压实度及平整度应满足设计要求。

4.4.2 就地固化浅层处理宜采用边固化边推进的形式进行。对于一般软土路段，采用原位垂直上下拌合固化方式，而对于表层存在硬壳层的土体，应采用翻松后再固化方式。

4.4.3 就地固化联合水泥搅拌桩等柔性桩形成硬壳层-桩体复合地基的施工，当原地基不能提供机械设备及施工所需承载力时，宜采用先就地固化处理，后进行水泥搅拌桩等柔性桩的施工，并应符合下列规定：

1 完成就地固化并达到 7d 无侧限抗压强度要求后，即可进行水泥搅拌桩等柔性桩的施工；

2 在就地固化处理区域内进行水泥搅拌桩施工，水泥搅拌桩施工提浆标高应位于现场固化层顶面，以保证固化硬壳层和水泥搅拌桩的整体性。

4.4.4 就地固化联合水泥搅拌桩等柔性桩形成硬壳层-桩体复合地基的施工，当原地基能够提供机械设备及施工所需承载力时，宜采用先进行水泥搅拌桩等柔性桩施工，后进行就地固化处理，并应符合下列规定：

1 进行水泥搅拌桩施工时，水泥搅拌桩的提浆标高应位于原地面；

2 进行就地固化处理时，当水泥搅拌桩处的强度过高无法进行搅拌时，应先将此处进行翻松，再进行就地固化处理。

4.4.5 就地固化联合预应力管桩等刚性桩形成硬壳层-桩体复合地基的施工，当原

地基不能提供机械设备及施工所需承载力时，宜采用先就地固化处理，后进行刚性桩的施工，并应符合下列规定：

1 当就地固化处理后，地基承载力达到刚性桩施工要求后，即可进行刚性桩的施工；

2 在就地固化处理区域内进行刚性桩的施工，带盖板刚性桩施工时桩体顶面标高应控制在桩帽顶面与就地固化层顶面持平，而不带盖板刚性桩施工时，桩顶伸入固化层 50cm 左右，桩顶以上部分采用台阶开挖形式对桩孔进行回填，回填采用素混凝土或高掺量固化土，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。

4.4.6 就地固化联合预应力管桩等刚性桩形成硬壳层-桩体复合地基的施工，当原地基能够提供机械设备及施工所需承载力时，宜先进行刚性桩施工，后进行就地固化处理，并应符合下列规定：

1 进行预制桩的施工，预制桩打设前应采用钢板或混凝土对桩顶进行封闭，打设至固化层设计标高下 5cm~20cm；

2 进行就地固化处理时，在有刚性桩存在的部位，当采用强力搅拌头进行施工时，为避免搅拌头对管桩产生影响，搅拌固化时可适当离管桩顶部超过 5cm~20cm 的距离。

4.4.7 刚（柔）性桩的其他具体施工要求可参照现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31 和现行行业标准《公路软土地基路堤设计规范》DB 33/T 904 中相关规定进行。

4.5 质量控制

4.5.1 施工过程中应做好就地固化浅层处理施工质量管理，并应符合下列规定：

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，均应进行检查验收，合格后方可进入下一道工序施工，经检测不合格的工序应进行翻修，直至达到合格要求；

3 就地固化使用的原材料，其检验项目应符合表 4.5.1-1 的规定：

表 4.5.1-1 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
固化材料	细度（粉体状）	每批次 2 个样品	80 μ m 筛余量小于等于 10%	水泥细度检验方法，GB/T 1345
	固体含量（液体状）	每批次 2 个样品	符合设计要求	均匀性试验，GB 8077
	化学成分（必要时）	每批次 2 个样品	符合设计要求	水泥化学分析方法，GB/T 176

4 就地固化浅层处理施工过程中，应随时对施工质量进行检测，质量检查的内容、频率、质量要求或允许误差和方法应符合表 4.5.1-2 的规定：

表 4.5.1-2 就地固化浅层处理施工质量检测标准

项次	项目	检测频度	规定值或允许偏差	检查方法
1	固化材料掺量（%）	每天汇总一次，取平均值	设计值的 ± 0.5	计算机采集数据计算
2	浅层固化厚度（mm）	单个区域或每 200m 测试点不少于 3 处	设计值的 ± 200	静力触探或钻孔取样
3	浅层固化宽度（mm）		设计值的 ± 100	米尺，量测
4	强度	单个区域或每 200m 测试点不少于 3 处	不小于设计要求	十字板剪切试验
	不排水抗剪强度（kPa）或静力触探锥尖阻力（MPa）			或静力触探试验
5	承载力（kPa）	单个区域或每 200m 测试点不少于 1 处	不小于设计要求	荷载板试验

5 一般道路路堤采用就地固化代替置换法对软土全部进行固化时，应对处理后地基土强度进行检测，承载力应满足设计要求。

4.5.2 施工过程中应做好就地固化硬壳层-桩体复合地基的施工质量管理，并应符合下列规定：

1 施工质量管理应贯穿施工全过程，并坚持全程的施工监理，施工过程中应随时检查施工记录和计量记录，并按设计规定的施工工艺对就地固化土和刚（柔）性桩进行质量检验，每道工序完成后，均应进行检查验收，合格后方可进入下一道工序施工；

2 就地固化施工中的原材料和质量检验要求，按表 4.5.1-1 和表 4.5.1-2 的规定执行；

3 水泥搅拌桩和预应力管桩等施工质量检验要求应符合表 4.5.2-1 和表 4.5.2-2 的规定。

表 4.5.2-1 水泥搅拌桩施工质量标准

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法及频率
1	桩径（mm）	不小于设计值	用钢尺量，总桩数 3%，并不得少于 5 根
2	桩间距（mm）	设计值的 ± 100	用钢尺量，总桩数 3%，并不得少于 5 根
3	垂直度（%）	≤ 1.5	经纬仪，总桩数 2%，并不得少于 5 根
4	桩长（mm）	不小于设计值	喷浆（粉）前测钻杆长度，结合成桩 28d 后钻孔取芯
5	单桩每延米喷浆（粉）量	不小于设计值	查施工记录
6	桩体无侧限抗压强度（MPa）	不小于设计值	成桩 28d 后钻孔取芯，桩体三等分段各取芯样一个，总桩数 1%~2%，并不得少于 3 根

7	单桩或复合地基承载力 (kPa)	不小于设计值	荷载板试验, 总桩数 0.2%~0.5%, 并不得少于 3 根
---	------------------	--------	---------------------------------

表 4.5.2-2 预应力管桩的施工质量标准

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法及频率
1	桩径 (mm)	不小于设计值	抽查总桩数 5%
2	桩间距 (mm)	设计值的 ± 50	抽查总桩数 5%
3	垂直度 (%)	≤ 1	经纬仪, 总桩数 5%
4	桩长 (mm)	不小于设计值	用绳测量, 总桩数 5%
5	桩帽尺寸 (mm)	不小于设计值	用钢尺量, 总桩数 5%
6	预制桩尖尺寸 (mm)	不小于设计值	用钢尺量, 总桩数 5%
7	28d 单桩承载力 (kPa)	不小于设计值	荷载板试验, 总桩数 0.2%, 并不得少于 3 根
8	桩身完整性	无明显缺陷	低应变测试抽查, 总桩数 5%

5 验收

5.1 一般规定

5.1.1 就地固化作为路基分项工程验收时，应提供下列文件和记录：

- 1 工程设计文件应包括有关设计的文件、图纸以及设计变更文件等；
- 2 原材料质量合格证件；
- 3 原材料检查或试验记录；
- 4 工艺性试验报告；
- 5 固化施工记录。

5.1.2 就地固化处理的各分项工程应按本规程的质量控制要求进行施工质量管理，各分项工程完成后应进行自检、交接检验，并形成记录文件，经监理工程师检查验收后，方可进行下一分项工程的施工。

5.1.3 实测项目为关键项目时，其合格率不得低于 95%，实测项目为一般项目时，其合格率不得低于 80%，否则该检查项目为不合格。

5.1.6 道路软土地基就地固化施工质量验收除应符合本规程规定外，还应满足现行行业标准《城镇道路工程施工与质量验收规范》CJJ 1 或《公路工程质量检验评定标准第一册（土建工程）》JTG F80/1 的相关规定。

5.2 就地固化浅层处理

5.2.1 就地固化浅层处理技术用于软土地基加固时，应满足下列要求：

- 1 固化材料及施工设备应满足本规程 3.2 节及 4.3 节相关规定，施工过程应连续不中断，固化材料掺量应满足本规程表 4.5.1-2 中相关规定；
- 2 就地固化硬壳层强度和承载力应满足设计要求；
- 3 固化层表面应平整、路拱合适且排水良好。

5.2.2 就地固化浅层处理的实测项目应符合表 5.2.2 的规定。

表 5.2.2 就地固化浅层处理实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	浅层固化厚度（mm）		设计值的 ± 200	钻芯取样或静力触探确定，单个区域或每 300m 测试点不少于 3 处
2	浅层固化宽度（mm）		设计值的 ± 100	米尺量测，单个区块或每 200m 测试点不少于 3 处
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
		或静力触探锥尖阻力（MPa）		或静力触探试验，单个区域或每 300m 测试点不少于 3 处

4	固化材料掺量 (%)	设计值的 ± 0.5	查施工记录
5△	承载力 (kPa)	不小于设计要求	荷载板试验, 单个区域或每 300m 测试点不少于 1 处

注: “△”标识的实测项目为关键项目, 其他为一般项目, 下同。

5.2.3 道路软土地基经就地固化浅层处理后, 其表面应无明显坑洼不平或积水。

5.3 就地固化硬壳层-桩体复合地基

5.3.1 就地固化硬壳层-桩体复合地基施工应满足下列要求:

- 1 就地固化硬壳层的基本要求应符合本规程第 5.2.1 条的规定;
- 2 水泥搅拌桩施工前应进行成桩工艺和成桩强度试验, 且施工设备必须安装喷粉(浆)自动记录装置, 施工工艺应符合规范规定;
- 3 预应力管桩施工前应进行成桩试验, 施工工艺应符合规范规定;
- 4 软土地基上的路堤, 应满足沉降标准和稳定性的设计要求。

5.3.2 就地固化硬壳层-桩体复合地基的实测项目包括下列内容:

- 1 就地固化硬壳层实测项目应符合本规程表 5.2.2 的规定;
- 2 水泥搅拌桩实测项目应符合表 5.3.2-1 的规定:

表 5.3.2-1 水泥搅拌桩实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法及频率
1	桩径 (mm)	不小于设计值	尺量: 抽查 2%且不小于 5 点
2	桩距 (mm)	设计值的 ± 100	尺量: 抽查 2%且不小于 5 点
3△	桩长 (mm)	不小于设计值	查施工记录并结合 0.2%成桩取芯检查
4	单桩每延米喷浆(粉)量	不小于设计值	查施工记录
5△	强度 (MPa)	不小于设计值	取芯法: 抽查桩数的 0.5%, 且不小于 3 组
6	地基承载力	满足设计要求	荷载板试验: 抽查桩数的 0.1%且不小于 3 处

3 预应力管桩实测项目应符合表 5.3.2-2 的规定:

表 5.3.2-2 预应力管桩实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法及频率
1△	混凝土强度	在合格标准内	按 JTG F80/1 附录 D 检查
2	桩径 (mm)	不小于设计值	尺量: 抽查 2%且不小于 5 点
3	桩距 (mm)	设计值的 ± 50	尺量: 抽查 2%且不小于 5 点
4△	桩长 (mm)	不小于设计值	查施工记录
5	单桩承载力	满足设计要求	荷载板试验: 抽查桩数的 0.1%且不小于 3 根

4 就地固化硬壳层-桩体复合地基表面应平整、无坑洼。

附录 A 就地固化浅层处理相关计算

A.1 就地固化硬壳层双层地基表面承载力计算

就地固化浅层加固软基时，表面承载力计算可参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，荷载影响深度可根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中规定进行计算。

A.1.1 当 $d_{\max} \leq H$ 时，按照均质地基处理。

A.1.2 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，分别计算黏聚力引起的地基承载力与地土自重引起的承载力，具体分以下两种情况进行：

A.1.2.1 当 $d_{\max} > H \geq \frac{B}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ 时，主动土压力区域处于就地固化处理厚度范围之内，滑移线简图如图 A.1 所示，并结合太沙基理论整体剪切模式给出了滑移线（螺旋线）公式

A.1:

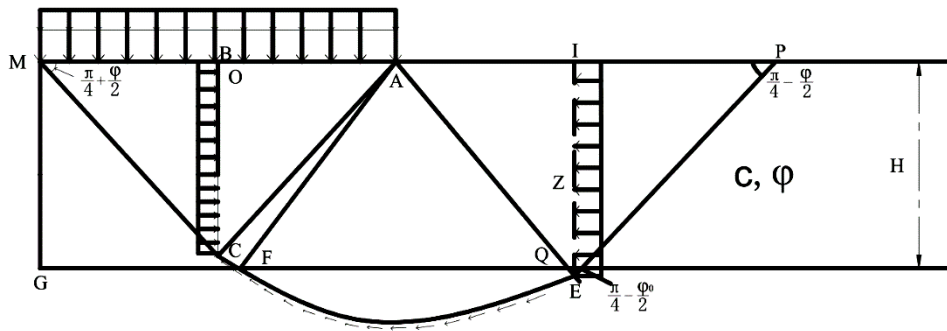


图 A.1 滑移线简图

$$r = r_0 \exp(\theta \tan \phi) \quad (\text{A.1})$$

式中： $r_0 = AF$

a) 黏聚力引起的承载力 q_{u1} 按式 (A.2) 计算：

$$q_{u1} = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{\frac{B_2}{8}} \quad (\text{A.2})$$

式中：

$$M_1 = \int_0^\beta c r_1^2 d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta} c_0 r_2^2 d\theta$$

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

$$M_2 = p_{\alpha 1} \frac{oc^2}{2} \quad (\text{其中 } p_{\alpha 1} = q_{u1} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) - 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right));$$

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

(其中 $p_{b1} = 2ctg(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})$, $p_{b2} = 2c_0tg(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2})$, $EQ = r_0 e^{\beta tg\phi} e^{(\frac{\pi}{2}-\beta)\phi_0} \sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_0}{2}) - H$)

b) 地基土自重引起的承载力 q_{u2} 按式 (A.3) 计算:

$$\begin{aligned} & q_{u2}tg^2\alpha_1H + \frac{1}{2}\gamma H^2tg^2\alpha_1 \\ &= \frac{1}{2}\gamma H^2tg^2(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + \frac{EZ}{2}[\gamma Htg^2(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + (\gamma H + \gamma_0EZ)tg^2(\frac{\pi}{2} - \alpha_1)] \\ &+ \int_{\beta}^{\frac{\pi}{2}}(\gamma_1 - \gamma_0)H \frac{r^2 \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta + \int_{\beta}^{\frac{\pi}{2}}\gamma_1 H \frac{r \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta \\ &+ \int_0^{\beta} \gamma_1 H \frac{r \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta \quad (A.3) \end{aligned}$$

A.1.2.2 当 $d_{max} > \frac{B}{2}tg(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}) > H$ 时, 主动土压力区域超过就地固化处理厚度, 滑移线简图如图 A.2:

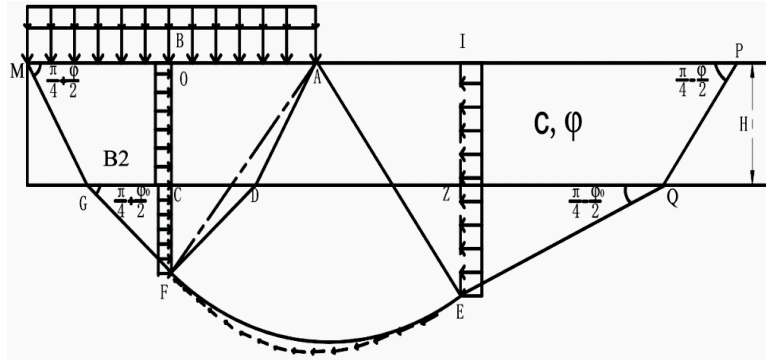


图 A.2 滑移线简图

a) 黏聚力引起的承载力 q_{u1} 按式 (A.4) 计算:

$$q_{u1} = \frac{M_1 + H^2 ctg(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}) + 2c_0 tg(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2}) EZ (\frac{EZ}{2} + H) + cH^2 tg(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}) + 2c_0 CF (\frac{CF}{2} + H) tg(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_0}{2})}{\frac{B^2}{8} + \frac{H^2}{2} tg^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}) + CF (\frac{CF}{2} + H) tg^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_0}{2})} \quad (A.4)$$

b) 地基土自重引起的承载力 q_{u2} 按式 (A.5) 计算:

$$q_{u1} = \frac{A}{tg^2\alpha_1 H + tg^2\alpha_2 CF} \quad (A.5)$$

其中 A 为:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2}\gamma H^2tg^2(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + \frac{EZ}{2}[\gamma Htg^2(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + (\gamma H + \gamma_0EZ)tg^2(\frac{\pi}{2} - \alpha_2)] \\ &+ \frac{1}{2}\gamma H^2tg^2\alpha_1 + \frac{CF}{2}[\gamma Htg^2\alpha_1 + (\gamma H + \gamma_0CF)tg^2\alpha_2] \\ &- \int_0^{\frac{\pi}{2}}(\gamma_1 - \gamma_0)H \frac{r \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}}\gamma_1 H \frac{r^2 \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha - \theta)}{\cos \phi_x} d\theta \end{aligned}$$

式中:

c ——就地固化处理后土体黏聚力 (kPa);

φ ——就地固化处理后土体内摩擦角 ($^{\circ}$);

c_0 ——下卧层土体黏聚力 (kPa);

φ_0 ——下卧层土体内摩擦角 ($^{\circ}$)。

以上两种情况下均给出了黏聚力引起的承载力 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 (A.6) 计算:

$$q_u = q_{u1} + q_{u2} \quad (\text{A.6})$$

A.2 就地固化硬壳层下各土层压缩变形之和

就地固化硬壳层下各土层压缩变形之和可采用分层总和法计算:

$$S = \psi_s S_0 = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (\text{A.7})$$

式中: S ——地基最终变形量 (mm);

S_0 ——按分层总和法计算出的地基变形量 (mm);

ψ_s ——沉降计算经验系数, 根据地区沉降观测资料及经验确定;

n ——地基变形计算深度范围内所划分的土层数;

p_0 ——相应于作用的准永久组合时基础底面处的附加压力;

E_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量 (MPa);

z_i 、 z_{i-1} ——基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离 (m);

α_i 、 α_{i-1} ——基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数。

A.3 浅层固化软基稳定性分析

浅层固化软土地基路堤的稳定验算宜采用圆弧滑动法中的有效固结应力法, 其稳定安全系数可按式 (A.8) 进行计算。

$$F = \frac{\sum_A^B (C_{qi} L_i + W_{li} \cos \alpha_i \tan \varphi_{qi} + W_{li} U_i \cos \alpha_i \tan \varphi_{cqi}) + \sum_B^C (C_{qi} L_i + W_{li} \cos \alpha_i \tan \varphi_{qi})}{\sum_A^B (W_{li} + W_{li}) \sin \alpha_i + \sum_B^C W_{li} \sin \alpha_i} \quad (\text{A.8})$$

式中: C_{qi} 、 φ_{qi} ——地基土 (含固化硬壳层) 或路堤填料的黏聚力 (kPa) 和内摩擦角 ($^{\circ}$),

由快剪试验测得；

φ_{cqi} —地基土的内摩擦角 ($^{\circ}$)，由固结快剪试验测得；

U_i —地基平均固结度 (%)；

α_i —土条底面与水平面交角 ($^{\circ}$)；

L_i —土条底面弧长 (m)；

W_{li} —土条地基部分重力 (kN)；

W_{ni} —土条路堤部分重力 (kN)；

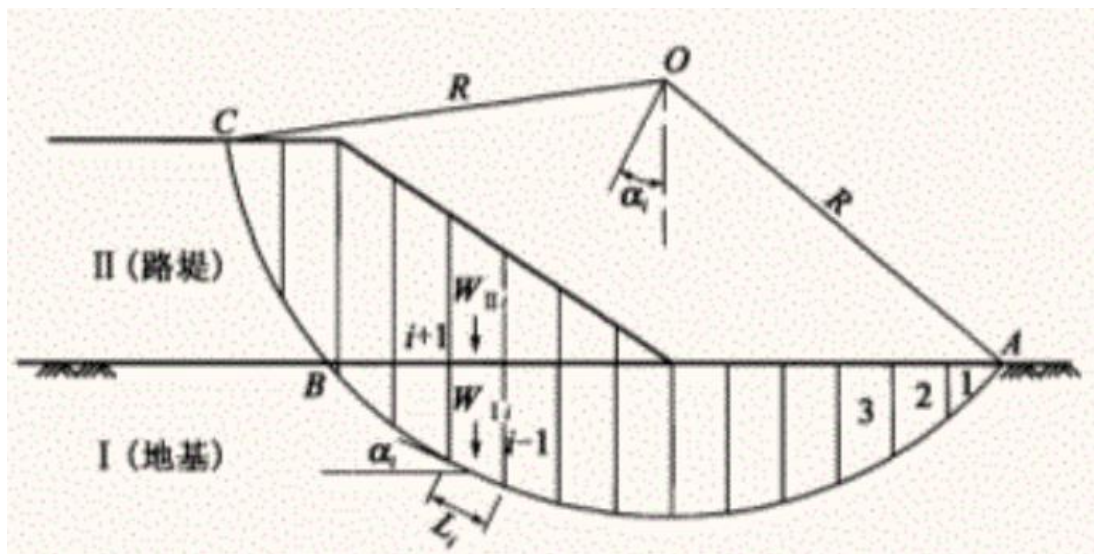


图 A.3 稳定安全系数计算示意图

附录 B 就地固化硬壳层-桩体复合地基相关计算

B.1 刚性桩复合地基单桩承载力计算

刚性桩复合地基单桩承载力可按式计算：

当采用单桩静载荷试验时，单桩承载力计算如下：

$$\frac{R_u - Q_g^n}{Q_u} \geq F_{ub} \quad (\text{B.1})$$

$$Q_g^n = U_p \sum q_{si}^n l_i^n \quad (\text{B.2})$$

$$q_{ki}^n = c_i + k_i \tan \varphi_i' \sigma_i' \quad (\text{B.3})$$

$$\sigma_i' = \sigma_{zi} + \gamma_i' z_i \quad (\text{B.4})$$

式中： R_u —采用静荷载试验确定的单桩极限承载力（kN）；

Q_u —桩帽上部承担的荷载（kN）；

F_{ub} —承载力设计安全系数，取 1.1~1.3；

Q_g^n —桩中性点以上的负摩阻力产生的下拉荷载（kN）；

U_p —桩的周长（m）；

q_{si}^n —中性点以上第 i 个分层负摩阻力的标准值（kPa）；

c_i 、 φ_i' —第 i 个分层粘聚力（kPa）和有效内摩擦角（°）；

k_i —第 i 个分层侧压力系数；

l_i^n —中性点以上的分层厚度（m）；

σ_i' 、 σ_{zi} —分别为第 i 个分层有效应力（kPa）和附加应力（kPa）；

γ_i' —第 i 个分层有效容重（kN/m³）；

z_i —自地表起算的第 i 个分层中点深度（m）。

当根据土体的物理指标确定单桩承载力时，单桩承载力计算如下：

$$\frac{R_u}{Q_u} \geq F_{ub} \quad (\text{B.5})$$

$$R_u = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{ski} l_i + q_{pk} (A_j + \lambda_p A_{pl}) \quad (\text{B.6})$$

式中： l_i —中性点以下的分层厚度（m）；

q_{ski} —桩侧阻力标准值 (kPa);

q_{pk} —极限端阻力标准值 (kPa);

A_j —空心桩桩端净面积 (m^2);

A_{pl} —空心桩敞口面积 (m^2);

λ_p —桩端土塞效应系数, 当 $h_b/d < 5$ 时, $\lambda_p = 0.16$, 当 $h_b/d \geq 5$ 时, $\lambda_p = 0.8$;

h_b —桩端进入持力层深度 (m)。

B.2 柔性桩复合地基单桩承载力计算

柔性桩复合地基承载力验算可按下式计算, 取小值:

$$R_a = U_p \sum q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (B.7)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (B.8)$$

式中: R_a —单桩竖向承载力特征值 (kN);

U_p —桩的周长 (m);

q_{si} —桩周第 i 层土的侧摩阻力特征值;

l_i —桩长范围内第 i 层土的厚度 (m);

q_p —桩端地基未经修正的承载力特征值 (kPa);

α —桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取 0.4~0.6, 承载力高时取低值;

f_{cu} —与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块在标准养护条件下 90d 龄期的立方体抗压强度平均值 (kPa);

η —桩身强度折减系数;

A_p —桩的截面积 (m^2)。

水泥搅拌桩复合地基承载力特征值计算:

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta (1 - m) f_{sk} \quad (B.9)$$

式中: f_{spk} —复合地基承载力特征值 (kPa);

λ —单桩承载力发挥系数;

β —桩间土承载力折减系数;

f_{sk} —桩间土承载力特征值 (kPa);

m —复合地基置换率。

B.3 刚性桩复合地基沉降计算

刚性桩复合地基沉降, 主要由桩顶沉降控制, 包括桩身压缩量、桩端平面以下沉降量以及桩端刺入量, 按下式计算:

桩顶总沉降计算:

$$S' = \psi_2 (S_1' + S_2') \quad (\text{B.10})$$

式中: ψ_2 —考虑桩端刺入变形的沉降计算经验系数, 可取 1.1~1.4。

桩身压缩量 S_1' 计算:

$$S_1' = \sum_{i=1}^{n'} \frac{Q_{pi}}{A_p E_p} \Delta h_i \quad (\text{B.11})$$

式中: Q_{pi} —第 i 段的桩身轴力 (kN);

n' —桩身分段总数;

A_p —桩身截面积;

E_p —桩体弹性模量;

Δh_i —桩身第 i 分段的高度。

桩端平面以下的沉降量 S_2' 计算:

$$S_2' = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_{z,i} \Delta Z_i}{E_{s,i}} \quad (\text{B.12})$$

式中: ΔZ_i —桩端平面以下第 i 土层的厚度 (m);

$E_{s,i}$ —桩端平面以下第 i 土层在自重应力下至自重应力加附加应力作用段的压缩模量 (MPa);

$\sigma_{z,i}$ —桩端平面以下第 i 土层的竖向附加应力, 按下式计算:

$$\sigma_{z,i} = \sigma_{pz,i} + \sigma_{sz,i} \quad (\text{B.13})$$

$$\sigma_{pz,i} = \sum_{j=1}^m \frac{Q_u}{l_j^2} [\alpha_j l_{p,ij} + (1 - \alpha_j) l_{s,ij}] \quad (\text{B.14})$$

$$\sigma_{sz,i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - \eta) (\gamma_1 H' + q_c) \quad (\text{B.15})$$

式中： $\sigma_{pz,i}$ —桩端平面以下地基中由基桩引起的附加应力（kPa）；

$\sigma_{sz,i}$ —桩帽间土体的平均压力在桩端平面以下引起的附加应力（kPa）；

I_j —第 j 桩桩长（m）；

α_j —第 j 桩总桩端阻力与桩顶荷载之比；

$I_{p,ij}$ 、 $I_{s,ij}$ —分别为第 j 桩的桩端阻力和桩侧阻力对计算轴线第 i 计算土层 1/2 厚度处的应力影响系数；

α_i —计算轴线第 i 计算土层 1/2 厚度处的附加应力系数；

Q_u —桩帽上部承担的荷载（kN）；

η' —桩体荷载分担比系数；

q_c —路堤顶面荷载（kPa）；

γ_1 —路堤填料容重（kN/m³）；

H' —路堤填筑高度（m）。

B.4 就地固化硬壳层-桩体复合地基路堤整体稳定性分析

就地固化硬壳层-桩体复合地基路堤整体稳定性根据圆弧滑动法进行验算：

$$F_B = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cos \theta_i \tan \phi_{qi} + C_{qi} \Delta l_i) R_i + \sum_{i=1}^m (T_i Y_i + T_i \tan \phi_{qi} X_i)}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \theta_i) R_i} \quad (B.16)$$

式中： F_B —整体稳定安全系数；

W_i —第 i 土条重（kN/m）；

C_{qi} 、 ϕ_{qi} —第 i 土条底土体粘聚力（kPa）和内摩擦角（°）；

T_i —第 i 层土工合成材料设计抗拉强度（kN/m）；

X_i —第 i 土条中心距滑弧圆心的水平距离（m）；

Y_i —第 i 层土工合成材料距滑弧圆心的垂直高度（m）；

Δl_i —第 i 条滑弧的弧长 (m);

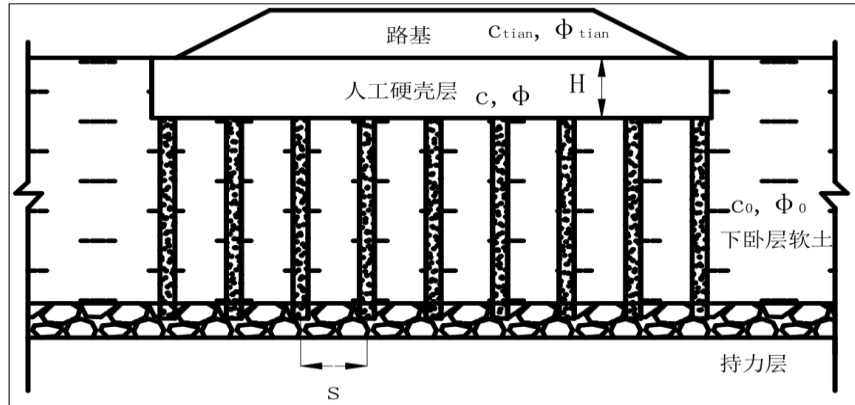
R_i —滑弧半径 (m);

θ_i —第 i 条滑弧的仰角 (°)。

附录 C 就地固化硬壳层-桩体复合地基的沉降计算

C.1 就地固化硬壳层-桩体复合地基计算模型

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 C.1 所示。



说明：

c_{tian} ——路基填土粘聚力(kPa)；

ϕ_{tian} ——路基填土内摩擦角；

c ——就地固化硬壳层粘聚力(kPa)；

c_0 ——下卧层软土粘聚力(kPa)；

H ——就地固化硬壳层厚度(m)；

S ——桩间距(kPa)；

ϕ ——就地固化硬壳层内摩擦角；

ϕ_0 ——下卧层软土内摩擦角；

图 C.1 就地固化硬壳层-桩体复合地基结构简图

C.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：

- 假定人工硬壳层和桩间土为均质各向的理想弹性体；
- 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；
- 在计算过程中，假定桩间土的应力在同一截面处不变；
- 假定在计算过程中，人工硬壳层发生变形但并未破坏；
- 桩侧摩阻力和桩土相对位移为理想弹塑性关系，如图 C.2 所示。

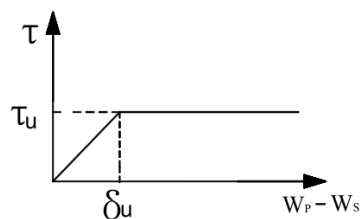


图 C.2 桩侧摩阻力-桩土位移曲线

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

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；

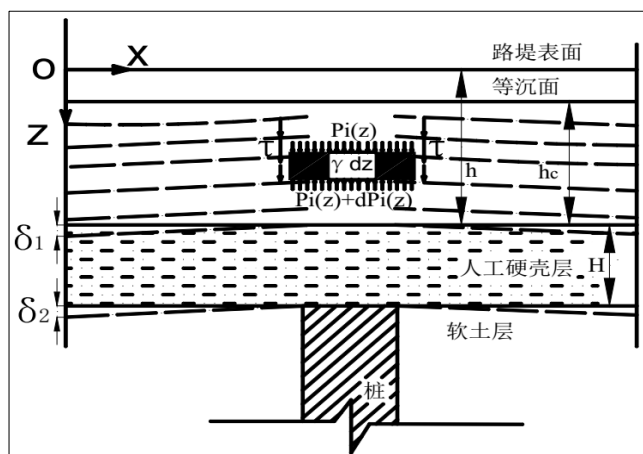
c_0 ——为土体的黏聚力 (kPa)；

φ_0 ——为内摩擦角 (°)；

σ' ——为土体有效应力 (kPa)；

δ_u ——为桩土间最大的弹性位移 (m)。

针对以上假定，就地固化硬壳层-桩体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分析模型、桩与桩间土的分析模型以及下卧层土地基的分析模型，各模型计算简图如图 C.3～图 C.7 所示。



说明：

h ——路堤填土高度 (m)；

H ——就地固化硬壳层厚度 (m)；

h_c ——等沉面高度 (m)；

图 C.3 路堤填料荷载传递分析模型

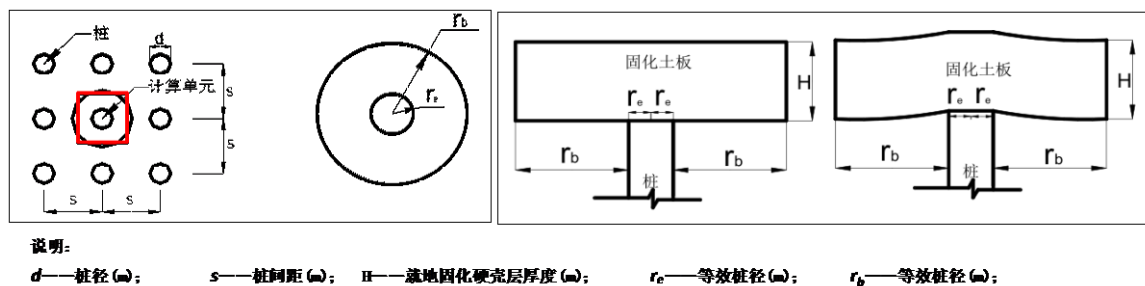


图 C.4 就地固化硬壳层计算模型图

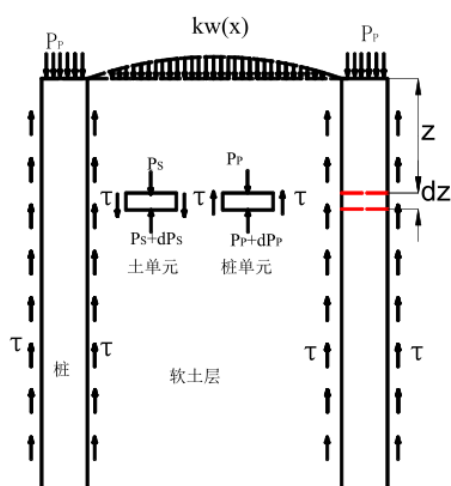


图 C.5 桩土单元计算模型

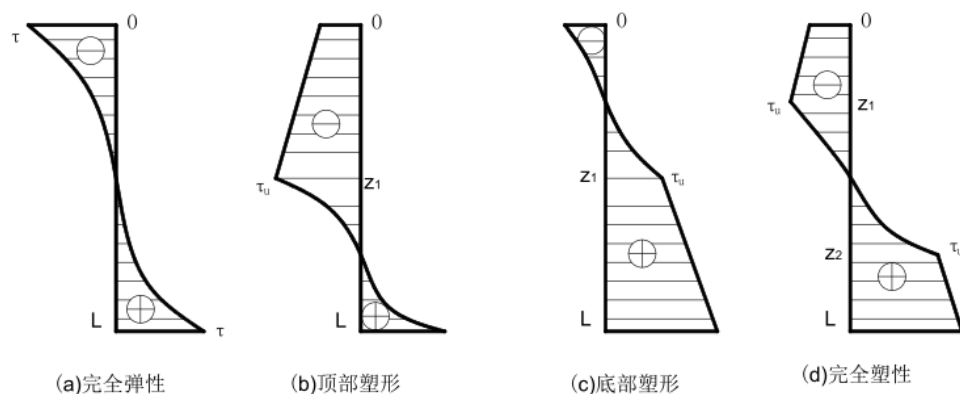


图 C.6 桩侧摩阻力沿桩身分布图

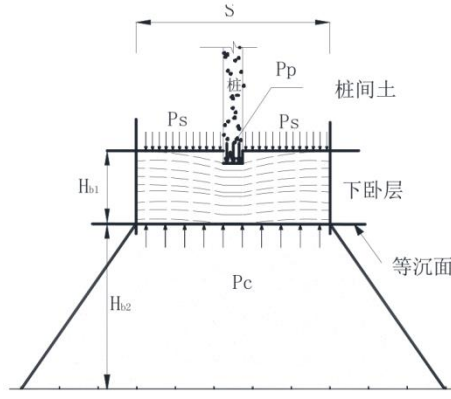


图 C.7 下卧层受力计算模型

针对各个模型进行分析与应力分布规律总结，可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。

C.2.1 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 (C.2) ~ 式 (C.18) 联立求解。

$$\begin{aligned}
 S_{01} &= \int_{H_C}^H \frac{p_1(z)}{E_{tian}} dz \\
 &= \frac{1}{E_{tian}} \left[\frac{\gamma_{tian}(h-h_c) + \frac{\gamma_{tian} + \beta\zeta c_{tian}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}} \right] \exp(\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian} h_c) \\
 &\quad - \frac{\gamma_{tian}(h-h_c) + \frac{\gamma_{tian} + \beta\zeta c_{tian}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}} \exp[\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian} (2h_c - h)] - \frac{\gamma_{tian} + \beta\zeta c_{tian}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}} (h - h_c) \quad (C.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{02} &= \int_{H_C}^H \frac{p_2(z)}{E_{tian}} dz \\
 &= \frac{1}{E_{tian}} - \frac{1}{1-m} \int_{h_c}^h (\gamma z - m p_1) dz = \frac{1}{E_{tian}} - \frac{1}{1-m} \left[\gamma_{tian} \frac{h^2 - h_c^2}{2} - m \int_{h_c}^h p_1(z) dz \right] \quad (C.3)
 \end{aligned}$$

$$S_{01} - S_{02} = \delta_1 \quad (C.4)$$

$$Q_P = [\gamma(h-h_c) + \frac{\gamma + \beta\zeta c_{tian}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}}] \exp(\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian} h_c) - \frac{\gamma + \beta\zeta c_{tian}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}} \quad (C.5)$$

根据路基变形和变形协调条件，当 $r=r_b$ 时，

$$\delta_1 = C_2 [(r_e - r_b)^2] \quad (C.6)$$

$$\begin{aligned}
 \text{其中:} \quad C_2 &= \frac{\gamma(h-h_c) + \frac{\gamma + \beta\zeta c_{tian}}{\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian}}}{\exp(\beta\zeta K_0 \tan \phi_{tian})(h-h_c)} \\
 &\quad \begin{cases} mQ_P + (1-m)Q_S = \gamma h \\ Q_S = \frac{1}{1-m} (\gamma h - mQ_P) \end{cases} \quad (C.7)
 \end{aligned}$$

式中：

S_{01} ——桩截面对应位置处等沉面到硬壳层表面处的变形 (m)；

S_{02} ——桩间土对应位置处等沉面到硬壳层表面处的变形 (m)；

E_{tian} ——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);

K_0 ——土体静止土压力系数;

ζ ——抗剪强度发挥系数, 一般取 0.5-0.8;

β ——定义为 U_p/A_p , 其中 U_p 和 A_p 分别为桩周长 (m) 和桩截面积 (m²);

$p_1(z)$ ——桩截面对应位置处不同填料高度处的应力 (kPa);

γ_{tian} ——填土容重 (kN/m³);

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_1 ——硬壳层表面处的沉降差 (m);

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)。

$$(Q_p + \gamma_c H)A_p + 2\pi(Q_s + \gamma_c H)\left[-\frac{r_e^2}{2} + \frac{r_b^2}{2}\right] - P_p(0)A_p - k\pi[r_b^2 C_2(r_b^2 - r_e^2) + \frac{2m(r_b^2 - r_e^2)}{2} - \frac{4}{3}r_b C_2[r_b^3 C_2(r_b^3 - r_e^3) + \frac{1}{2}C_2(r_b^4 - r_e^4)]] = 0 \quad (\text{C.8})$$

$$\left\{ \begin{aligned} & 2\pi(Q_s + \gamma_c H) \left[\frac{1}{2} r_b^2 (r_b^2 - r_e^2) + \frac{(r_b - r_e)^2}{2} (r_b^2 - r_e^2) - \frac{2}{3} r_b (r_b^3 - r_e^3) + \frac{(r_b^4 - r_e^4)}{4} \right] \\ & - \pi D [32C_2(r_b - r_e) - (\frac{8C_2 r_b^2}{r_b} - \frac{8C_2 r_e^2}{r_e}) - 32C_2 r_b \log \frac{r_b}{r_e}] \\ & - 2D(1 - \nu)C_2\pi[r_b - \frac{r_b^2}{r_e} - 8(r_b - r_e) + 8r_b \log(\frac{r_b}{r_e})] - 2C_2 D(1 - \nu) (\frac{r_b^2 \pi}{r_e} - \frac{r_b^2 \pi}{r_b}) \\ & - k\pi[r_b^4 C_2(r_b^2 - r_e^2) + r_b^2 m(r_b^2 - r_e^2) + r_b^2 C_2(r_b - r_e)^2(r_b^2 - r_e^2) + m(r_b - r_e)^2(r_b^2 - r_e^2)^2 \\ & - \frac{8}{3} r_b^3 C_2(r_b^3 - r_e^3) - \frac{4}{3} r_b m(r_b^3 - r_e^3) - \frac{4}{3} r_b C_2(r_b - r_e)^2(r_b^3 - r_e^3) + 3r_b^2 C_2(r_b^4 - r_e^4) \\ & + \frac{1}{2} m(r_b^4 - r_e^4) + \frac{1}{2} C_2(r_b - r_e)^2(r_b^4 - r_e^4) - \frac{8}{5} r_b C_2(r_b^5 - r_e^5) + \frac{C_2}{3} (r_b^6 - r_e^6)] \end{aligned} \right\} = 0 \quad (\text{C.9})$$

$$S_T = a - bP_p(0) \quad (\text{C.10})$$

其中: $a = 3(1 - \nu)(\frac{r_p}{r_0})^3 P_e \frac{r_0}{E_c}$; $b = 2(1 - 2\nu) \frac{r_e}{E_c}$

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 (kN/m³);

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, 大小为 $D = \frac{E_c H^3}{12(1-\nu^2)}$;

P_e ——极限扩张力, 大小为 $p_e = \frac{4(c \cos \phi + \sigma_0 \sin \phi)}{3 - \sin \phi}$ 。

$$\begin{cases} p_p(z=0) = E_p A_p \frac{\alpha t}{\alpha + \beta} (B_1 - A_1) - D_1 E_p A_p = p_p(0) A_p \\ p_s(z=0) = E_s A_s \frac{\alpha t}{\alpha + \beta} (A_1 - B_1) - D_1 E_s A_s = \int_{r_e}^{r_b} k \omega(r) 2\pi r dr \\ \omega_p - \omega_s = -(A_1 + B_1) = \delta_1 + S_T \end{cases} \quad (C.11)$$

其中: $\alpha = \frac{U_p k_c}{E_p A_p}$, $\beta = \frac{U_p k_c}{E_s A_s}$, $t = \sqrt{\alpha + \beta}$; A_1 , B_1 , D_1 , E_1 为待定系数。

$$\begin{cases} \omega_p = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (A_1 e^{tL} + B_1 e^{-tL}) + D_1 L + E_1 \\ \omega_s = \frac{-\beta}{\alpha + \beta} (A_1 e^{tL} + B_1 e^{-tL}) + D_1 L + E_1 \end{cases} \quad (C.12)$$

$$\begin{cases} P_p(L) = -E_p A_p \frac{d\omega_p}{dz} = E_p A_p \frac{\alpha t}{\alpha + \beta} (B_1 e^{-tL} - A_1 e^{tL}) - D_1 E_p A_p \\ P_s(L) = -E_s A_s \frac{d\omega_s}{dz} = E_s A_s \frac{\beta t}{\alpha + \beta} (A_1 e^{tL} - B_1 e^{-tL}) - D_1 E_s A_s \end{cases} \quad (C.13)$$

$$p_i(H_c) = \frac{a'b' + c' - b'c'H_c}{b'^2} + C_3 e^{-b'H_c} \quad (C.14)$$

$$s_i = \frac{a'b' + c'}{b'^2} H_c - \frac{c'H_c^2}{2b'} + \frac{C_3}{b'} (1 - e^{-b'H_c}) \quad (C.15)$$

其中:

$$a' = \gamma - \frac{4\zeta}{D} c_3 - \frac{4\zeta}{D} \gamma_3 K_3 \tan \phi_3 (h + L);$$

$$b' = \frac{4\zeta}{D} K_3 \tan \phi_3;$$

$$c' = \frac{4\zeta}{D} \gamma_3 K_3 \tan \phi_3。$$

$$s_0 = \frac{P_s(L) + P_c}{2E_b} H_b \quad (C.16)$$

$$\delta_3 = s_0 - s_i = \omega_p(L) - \omega_s(L) \quad (C.17)$$

$$P_c = \frac{p_p(L)A_p + p_s(L)A_s}{\frac{\pi}{4}(2r_b + 2H_c \tan \theta)^2} \quad (C.18)$$

式中：

A_p ——桩单元面积 (m^2)；

A_s ——土单元面积 (m^2)；

E_p ——桩单元压缩模量 (MPa)；

E_s ——土单元压缩模量 (MPa)；

E_b ——下卧层土体压缩模量 (MPa)；

U_p ——桩周长 (m)；

L ——桩长 (m)；

C_3 ——持力层土体粘聚力 (kPa)；

φ_3 ——持力层土体内摩擦角； 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)；

P_c ——下卧层等沉面的均布应力 (kPa)；

C.2.2 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 (C.2)~式 (C.10)、式 (C.14)~式 (C.18)、式 (C.19)~式 (C.22) 联立求解。

$$\begin{cases} p_{p1}(z) = -E_p A_p \frac{d\omega_p}{dz} = -E_p A_p (D_2 - D_4 \beta_p \alpha) = p_p(0) A_p \\ p_{s1}(z) = -E_s A_s \frac{d\omega_s}{dz} = -E_s A_s \left[-\left(\frac{c_0}{\alpha} + \frac{b}{\alpha^2 \beta_s} \right) - D_4 \beta_p \alpha \right] = p_{s1}(0) \end{cases} \quad (C.19)$$

$$\omega_s - \omega_p = D_3 + D_4 - D_0 + D_4 \frac{\beta_p}{\beta_s} = \delta_1 + \delta_T \quad (C.20)$$

其中： $\beta_p = \frac{U_p}{E_p A_p}$, $\beta_s = \frac{U_p}{E_s A_s}$, D_4 为待定系数。 δ_T 为桩顶位置桩土之间沉降差。

$$\begin{cases} \omega_{p(0-z_1)}(z_1) = \omega_{p(z_1-z_2)}(z_1) \\ \omega_{s(0-z_1)}(z_1) = \omega_{s(z_1-z_2)}(z_1) \\ \omega_{p(z_2-L)}(z_1) = \omega_{p(z_1-z_2)}(z_2) \\ \omega_{s(z_2-L)}(z_1) = \omega_{s(z_1-z_2)}(z_2) \\ p_{p(0-z_1)}(z_1) = p_{p(z_1-z_2)}(z_1) \\ p_{s(0-z_1)}(z_1) = p_{s(z_1-z_2)}(z_1) \\ p_{p(z_2-L)}(z_1) = p_{p(z_1-z_2)}(z_2) \\ p_{s(z_2-L)}(z_1) = p_{s(z_1-z_2)}(z_2) \end{cases} \quad (C.21)$$

$$\begin{cases} \omega_{p2}(z_1) - \omega_{s2}(z_1) = -\delta_u \\ \omega_{p2}(z_2) - \omega_{s2}(z_2) = \delta_u \end{cases} \quad (\text{C.22})$$

其中： δ_u 为最大弹性位移。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 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”；

3) 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”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词：

正面词采用“可”，反面词采用“不可”。

2 条文中指定应按其他有关标准执行的，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。非必须按所指定的标准执行的，写法为“可参照……”。

引用标准名录

- 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596
- 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
- 《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046
- 《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》 GB/T 25499
- 《建筑地基基础设计规范》 GB 5007
- 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
- 《复合地基技术规范》 GB/T 50783
- 《城镇道路工程施工与质量验收规范》 CJJ 1
- 《城镇道路路面设计规范》 CJJ 169
- 《城市道路路基设计规范》 CJJ 194
- 《土壤固化剂应用技术标准》 CJJ/T 286
- 《土壤固化外加剂》 CJ/T 486
- 《建筑生石灰》 JC/T 479
- 《建筑消石灰》 JC/T 481
- 《行星式水泥胶砂搅拌机》 JC/T 681
- 《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 D31-02
- 《公路土工合成材料应用技术规范》 JTG/T D32
- 《公路土工试验规程》 JTG E40
- 《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》 JTG F80/1



T/CECS XXXX -202*

中国工程建设协会标准

道路软土地基强力搅拌就地固化 技术规程

Technical specification for in-situ
solidification of soft ground by power mix
method

条文说明

202* 北京

目次

1 总 则	- 49 -
3 设 计	- 50 -
3.1 一般规定.....	- 50 -
3.2 固化材料设计.....	- 50 -
3.3 就地固化浅层处理.....	- 51 -
3.4 就地固化硬壳层-桩体复合地基	- 52 -
4 施 工	- 54 -
4.3 施工设备.....	- 54 -

1 总 则

1.0.1 随着工程实践经验的积累和施工技术的发展，软土地区地基处理应积极采用行之有效且安全可靠的高新技术、新材料和新设备，不断完善软土地基的加固设计、施工与验收。就地固化技术实现了软土的就地加固，提高了地基承载力，避免了软土的开挖换填，具有技术先进、经济合理、因地制宜且保护环境的优点。

3 设 计

3.1 一般规定

3.1.2 《公路工程地质勘察规范》JTG C20-2011 中利用天然含水率、天然孔隙比、压缩系数、标准贯入试验锤击数、静力触探比贯入阻力、十字板抗剪强度 6 项指标鉴别软土，指标考虑较为全面。因此，本规程对软土鉴别标准与其靠近，但软土勘察中标准贯入试验锤击数对软土判别的指导意义不大，可采用快剪内摩擦角指标代替。与此同时，天然含水率及天然孔隙比两项指标具有测试方便且变异性小的特点，因此当部分指标无法获取时，可将两者作为软土鉴别的基础指标。

3.1.8 就地固化硬壳层-桩体复合地基一般用于软土埋深超过 5.0m，且软土厚度大于 5.0m 的地基，具体软土埋深和厚度的判定可以根据具体软土指标、台后填土高度、沉降控制要求等综合确定。

3.2 固化材料设计

3.2.4 对固化处理后的软土地基承载力进行计算时，固化处理后土体黏聚力可取固化处理后土体 90d 无侧限抗压强度 (f_a) 的一半，固化处理后土体内摩擦角可取 0，而 f_a 可根据室内强度试验按式 (3.2.4) 进行推算。

3.2.6 水泥、石灰及粉煤灰等无机结合料具有材料易得、固化效果好及经济性合理等优点，是软土固化处理的常用固化材料，因此表 3.2.6 给出的推荐掺量一览表具有较好的指导意义。

2 参照现行行业规范《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 和《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 相关规定，加固土桩均采用 90d 无侧限抗压强度作为标准强度，结合就地固化处理经验，为节省工程投资，就地固化土采用 90d 无侧限抗压强度是合理的。在实际施工中，由于龄期较长会给室内试验和现场检测带来困难。解决方法之一是建立强度增长规律关系式，进而通过短龄期无侧限抗压强度推测出 90d 无侧限抗压强度，根据前期研究成果，固化土 28d 无侧限抗压强度与其 90d 无侧限抗压强度对应关系相对稳定。第二种方法是采用高温快速养生 ($60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度大于等于 95%)，使试件在较短时间内达到标准养生 ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度大于等于 95%) 90d 的无侧限抗压强度，具体对应关系需

通过试验确定。

3.2.9 为避免干法拌制产生的扬尘，可将粉状固化材料与拌合水进行预混合，再将固化剂浆液掺入固化对象（软土）中。其中，水灰比指拌合水与粉状固化材料的质量比，在满足固化剂浆液的可喷性前提下，水灰比越低固化效果越好。

3.3 就地固化浅层处理

3.3.1 现有规范和标准中关于浅层换填处理一般规定适用于表层软土厚度小于 3.0m 的浅层软弱地基处理；而就地固化强力搅拌法所用机械设备处理能力大幅提高，目前最大施工置换厚度可达 7.0m 以上。但考虑到搅拌的均匀性、经济性和实用性，就地固化浅层处理技术适用于厚度大于 0.8m，小于 5.0m 以内软土地基、河塘及无硬壳层吹土路段等。

3.3.6 为确定就地固化浅层处理软土地基的固化范围，需对硬壳层表面承载力及下卧层承载力进行验算。

2 为方便理解固化层底面处附加应力的计算过程，图 1 给出了附加应力的计算示意图。

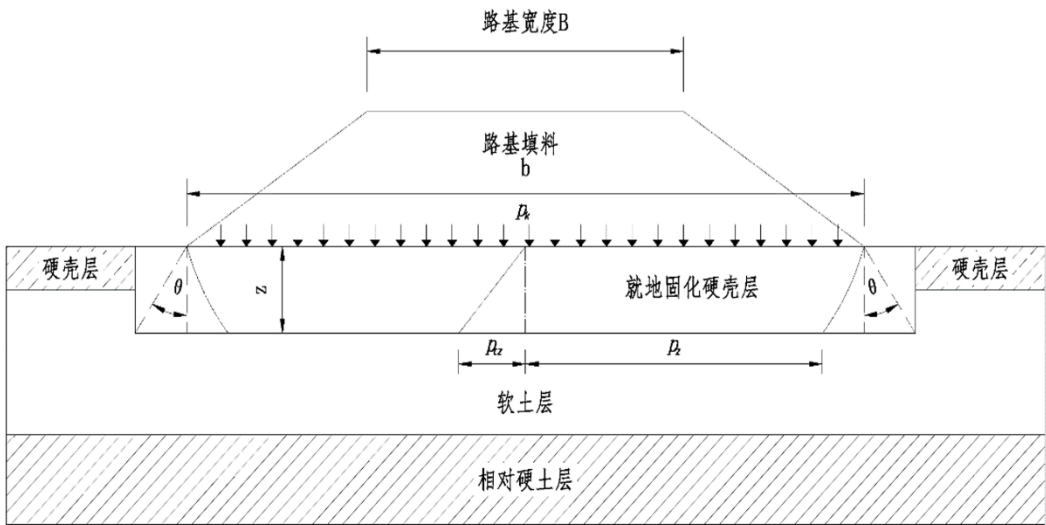


图 1 附加应力计算示意图

3 就地固化浅层加固软基时，硬壳层表面承载力宜通过现场载荷试验进行确定；对于有承载力要求的结构物基础，就地固化路段、深埋软土低路基部分固化路段和无硬壳层浅层固化路段应按设计承载力要求进行载荷试验，对常规路基填筑的河塘清淤就地固化、浅层软土全部固化处理，可不需进行承载力试验。

3.3.7 为方便理解附加应力扩散影响范围的计算，给出如图 2 所示的就地固化硬

壳层宽度要求示意图。

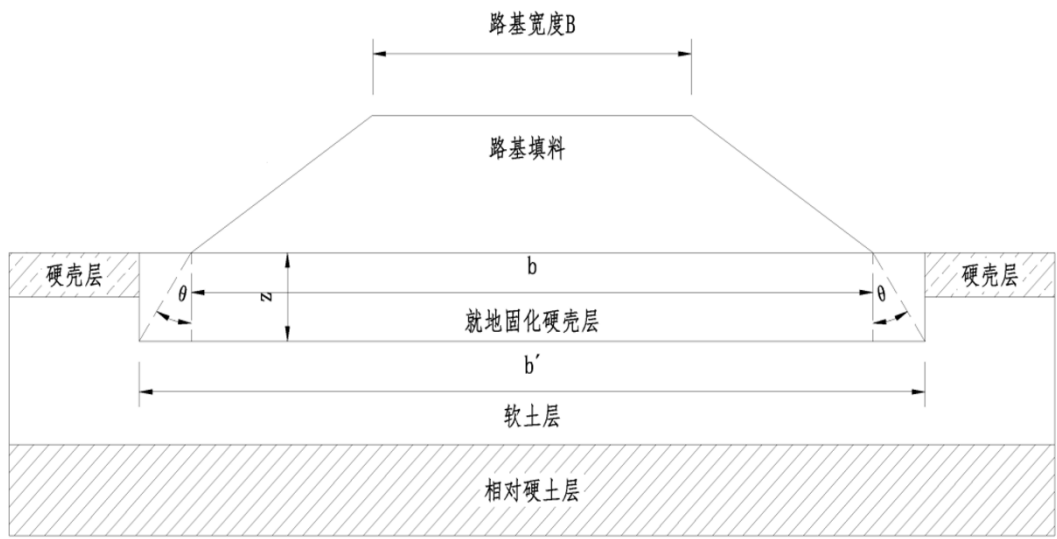


图 2 就地固化硬壳层宽度要求示意图

3.3.8 在就地固化浅层处理软土地基的沉降计算中，相关技术参数宜通过固化土的相关土工试验获得。

1 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。

3.3.10 土基回弹模量 E_0 作为路基强度设计指标，同时弯沉作为路基验收指标之一，在低填、浅挖路基底面采用就地浅层固化处理时，其土基回弹模量 E_0 值应满足《城镇道路路面设计规范》CJJ 169 中相关规定，而路床 CBR 值作为路基填筑材料的强度指标，路床采用就地固化或固化土填筑，其 CBR 值应满足《城市道路路基设计规范》CJJ 194 中相关要求。

3.3.11 路基压实度应满足《城市道路路基设计规范》CJJ 194 中相关要求。

3.4 就地固化硬壳层-桩体复合地基

3.4.1 就地固化硬壳层-桩体复合地基处理工艺多用于深厚、深埋软基之上的构造物与路堤相邻路段。该工艺与传统复合地基的主要区别在于增加的硬壳层，硬壳层的主要作用在于：（1）工程施工阶段可提供良好的作业平台，适用于滩涂、河塘暗浜等工况下的复合地基施工；（2）工程应用阶段可通过硬壳层协调桩土差异平衡，相比传统复合地基可降低路堤中土拱高度，大幅度减低复合地基中差异沉降的向上反射，适用于易出现“蘑菇形”不均匀沉降的低填高路段。

3.4.2 就地固化硬壳层-桩体复合地基，主要由传统桩体和就地固化硬壳层组成。刚性桩复合地基的桩体主要采用预应力管桩、低强度混凝土桩、塑料套管桩（TC桩）等刚性桩，在就地固化硬壳层中宜预留桩帽位置。采用预制桩帽，应在就地固化时预留相应位置，使桩顶设置的盖板应尽量与就地固化硬壳层顶面持平，如图 3（a）；未采用预制桩帽，桩顶位置采用高掺量固化土或素混凝土进行台阶式回填，如图 3（b）；柔性桩复合地基的桩体主要采用水泥搅拌桩等柔性桩，在就地固化硬壳层中无预留桩帽位置的要求，因此只需柔性桩桩顶与就地固化硬壳层顶面持平即可，如图 3（c）。

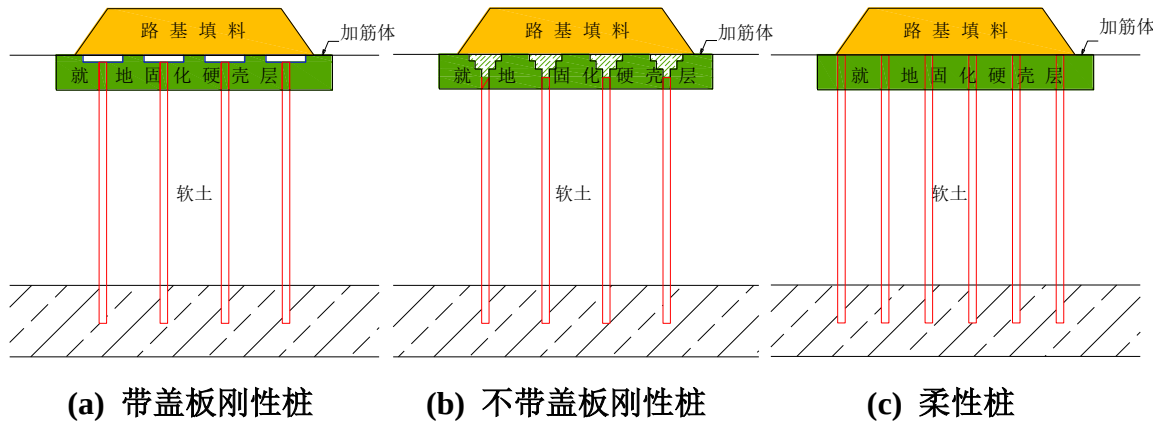


图 3 就地固化硬壳层-桩体复合地基常用结构形式

3.4.5 室内配合比试验是就地固化设计中的关键环节，建议采用经济环保的固化材料，针对设计要求（强度、压缩、渗透系数等）开展试验。考虑到现场拌合与室内拌合差异性，无侧限抗压强度的安全系数（ $q_{u \text{ 室内试验结果}}/q_{u \text{ 设计要求}}$ ）可取 1.5-2.0。

4 施 工

4.3 施工设备

4.3.1 强力搅拌就地固化系统利用固化材料自动供料系统与储料装置实现固化材料的自动定量供给，通过安装于强力搅拌头上的喷粉或喷浆装置输出，在搅拌头的强力搅拌作用下，将输出的固化材料与软土均匀拌和，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，并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土地基加固领域的应用。图 4 给出了就地固化系统的示意图。

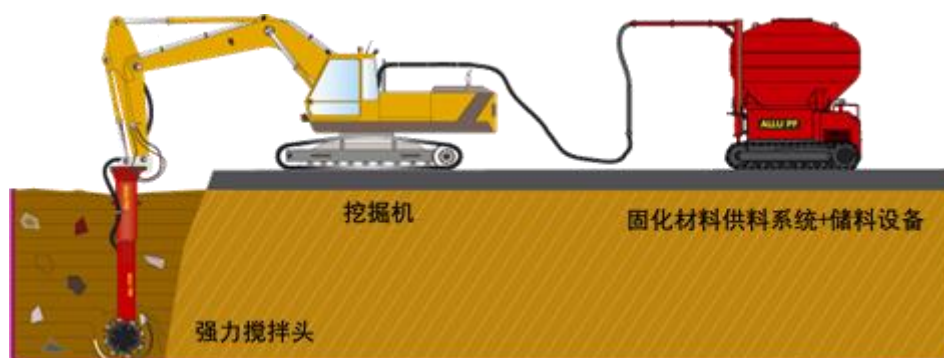


图 4 就地固化系统示意图

将就地固化系统用于软土地基加固，具有的技术特征包括：（1）场地适应能力强，可在软土地基上部实现边推进边固化的施工操作；（2）自动化程度高，可实现固化材料的自动定量供给及拌合固化位置的实时监控，提高拌合均匀性；（3）利用强力搅拌头实现固化材料的边添加边拌合，固化效率高。

为更加清晰的了解强力搅拌就地固化系统，对其主要设备给出如下具体说明：

1 强力搅拌头是就地固化系统的重要设备，PMX 强力搅拌头的结构如图 5 所示，其常规尺寸（平面投影尺寸：宽×高）有 1.6m×0.87m 和 1.4m×0.8m 两种，最小尺寸为 1.1m×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。与此同时，强力搅拌头的国产化也在不断发展，图 6 为编制组在无锡某就地固化项目中使用的国产化强力搅拌头。

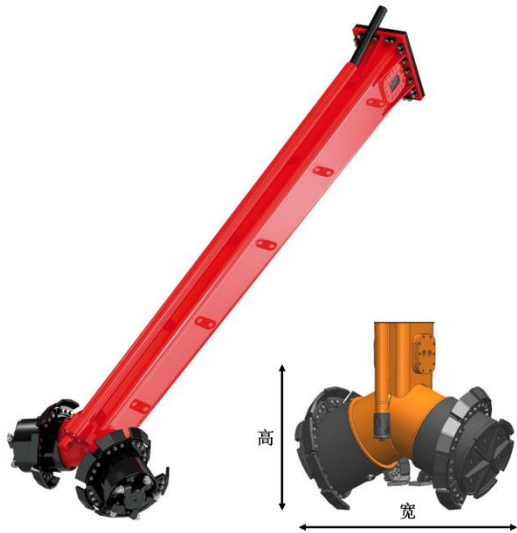


图5 PMX 强力搅拌头



图6 国产强力搅拌头

2 与常规搅拌头相匹配的挖机型号有 250 和 300。

3 自动定量供料系统（图 7）宜安装于后台供料系统中，应能控制固化材料的出料量与出料时间、实时显示并记录固化区域的用料量，保证每次搅拌区间和整个区块的固化材料用量，数据可存储和打印，并可进行远程操作，达到固化材料喷料的自动化和智能化，避免人为造成的资源浪费。



图7 自动定量控制系统

4 在强力搅拌头上安装 3D 定位控制系统可为操作者自动呈现搅拌头的位置和搅拌路径，其应用效果如图 8 所示，进而可以更有效的避免漏搅。



图 8 3D 定位控制系统实施效果