

ICS 93.080

P 66

DB45

广西壮族自治区地方标准

DB 45/T 1972—2019

公路软土地基处治工程技术规范

Technical specification for treatment of highway soft foundation

2019 - 08 - 16 发布

2019 - 08 - 20 实施

广西壮族自治区市场监督管理局 发布

附录 A (资料性附录)	广西壮族自治区公路软土分布图.....	54
附录 B (资料性附录)	广西壮族自治区公路典型软土物理力学指标参考表.....	55
附录 C (资料性附录)	广西壮族自治区公路软土地基常用处理方法及适用范围一览表.....	56
附录 D (资料性附录)	桩体荷载分担比系数表.....	57

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由广西壮族自治区交通运输厅提出。

本标准由广西交通运输标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：广西交通设计集团有限公司、广西北部湾投资集团有限公司、广西交通投资集团有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所。

本标准主要起草人：米德才、刘先林、叶琼瑶、唐正辉、邓胜强、农承尚、匡波、李耀华、陈云生、周铮、李敦仁、孙振海、何军、赵勇、孙冠华、温庆珍、谢东、李世明、陈川、黄泽斌、骆俊晖、陈胜伟、杨东海、黄海峰、漆春。

引 言

鉴于广西目前尚无指导公路软土地基处治的技术规范，而软土地基具有特殊性和复杂性，在软基处治过程中常遇到许多实际工程困难，为进一步统一软土地基的处治技术要求，规范和指导公路软土地基的勘察、设计、施工、检测与监测等，基于广西公路软土地基处治的工程经验和科研成果，结合国家和行业的相关技术标准的规定，制定广西壮族自治区地方标准《公路软土地基处治工程技术规范》。

各单位和个人在执行本规范过程中有何意见或建议，请与广西交通设计集团有限公司米德才 (Tel:0771-3910019 Email:mdc188@163.com)联系，以便下次修订时参考。

公路软土地基处治工程技术规范

1 范围

本规范规定了广西境内公路软土地基处治工程的术语和符号、基本规定、软土地基判别与分类、广西典型软土地基勘察设计、特殊路段软土地基勘察设计、公路软土地基处治方法和动态监测与沉降预测等。

本规范适用于广西区内二级及以上新建或改扩建公路工程软土地基的勘察、设计、施工、检测和监测，二级以下公路及其它工程项目可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- JGJ 79 建筑地基处理技术规范
- JTG C20 公路工程地质勘察规范
- JTG/T D31 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 F80/1 公路工程质量检验评定标准

3 术语和定义、符号

下列术语和定义、符号适用于本文件。

3.1 术语

3.1.1

软土 soft soil

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，包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等。

3.1.2

坡地软土 slope soft soil

分布于坡地上的风化碎屑物或岩石，经地下水浸泡，形成的具有软弱土特性的岩土层，常发育于炭质岩地区和膨胀岩地区。

3.1.3

季节性软土 seasonal soft soil

受季节性雨水浸泡后，强度明显降低，工程特性与软弱土相近的细粒土。

3.1.4

软弱土层 soft soil layer

未经处治其承载能力和稳定性不满足路基与构筑物地基稳定和变形要求的土层，包括冲洪积土、残积土、填土及其他特殊岩土层。

3.1.5

软土地基 soft foundation

由软土或软弱土层组成的天然地基。

3.1.6

施工控制水位 construction control level

采用换填法时，通过开挖排水沟、集水井及水泵抽水等常规的抽排水措施能够降低的基坑最低水位。

3.1.7

复合式换填 compound exchange filling structure

由巨粒土和粗粒土按照一定厚度和顺序分层压实的软土地基换填方式。

3.1.8

强夯置换法 dynamic replacement

利用强夯施工方法，将巨粒或粗粒土挤入软土地基中以加固地基的一种软土地基处治方法。

3.1.9

复合地基 composite foundation

天然地基在地基处治过程中，部分土体得到增强，或被置换，由天然地基土体和桩体两部分组成共同承担荷载的人工地基。根据桩体材料特性的不同，可分为粒料桩复合地基、加固土桩复合地基和刚性桩复合地基。

3.1.10

振冲粒料桩 Vibration-impact granular pile

采用一定功率的振冲器振动成孔，充填碎石、卵石、圆砾、砂砾等硬质松散材料形成的桩体。

3.1.11

加固土桩 solidified soil column

采用具有钻进、回转、喷浆（粉）与搅拌功能的机械在软土地基中将软土与水泥、石灰、粉灰及外加剂等材料混合搅拌形成的有一定长度、直径和强度的桩体。

3.1.12

素混凝土桩 plain concrete pile

采用一定比例的水泥、碎石、砂等混合料，不配置钢筋，现场灌注而成的桩体，混凝土的强度等级宜在C15~C25之间。

3.1.13

水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) cement fly ash gravel pile

采用一定比例的水泥、粉煤灰、碎石以及石屑混合料,现场灌注而成的桩体,强度宜在5.0 MPa~25.0 MPa之间。

3.1.14

刚性桩 rigid pile

桩身抗压强度大于10 MPa的桩,包括素混凝土桩、水泥粉煤灰碎石桩 (CFG桩)、预应力混凝土管桩、预制混凝土桩、钻孔灌注桩等。

3.1.15

充盈系数 filling coefficient

一根粒料桩在施工时实际用料方量与按桩外径计算的理论方量之比。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

G —— 夯击能;

N —— 锤重为 63.5 kg 的标准贯入试验击数;

S —— 桩基最终沉降;

h —— 基础底面的计算埋置深度;

n —— 复合地基桩土应力比;

p —— 复合地基土层顶面附加应力值;

z —— 基础底面下垫层的厚度;

A_e —— 单桩有效处理面积;

A_p —— 单桩截面积;

D_{r1} —— 地基挤密后要求砂土达到的相对密实度;

E_p —— 桩体压缩模量;

E_{ps} —— 复合地基土层压缩模量;

E_s —— 桩间土压缩模量;

F_B —— 整体稳定安全系数;

F_p —— 抗滑稳定安全系数;

- N_{B10} ——锤重为 10kg 的标准轻型动力触探击数；
- N_{H10} ——锤重为 10kg 的荷兰轻型动力触探击数；
- P_p ——被动土压力；
- P_b ——软土层底部抗滑力；
- P_{ag} ——加筋垫层以上堤体主动土压力；
- p_b ——复合地基土层底面附加应力值；
- P_{as} ——软土层主动土压力；
- S_s ——粒料桩加固区原地基土沉降值；
- T_{gc} ——土工合成材料设计抗拉强度；
- T_s ——土工合成材料的抗拉强度；
- Q_u ——为桩帽上部承担的荷载；
- Q_s ——为桩帽间单位长度土体承担荷载；
- ψ_p ——沉降经验系数；
- R_a ——单桩承载力特征值；
- c_q ——土条底土体粘聚力；
- φ_q ——内摩擦角；
- e_0 ——地基处理前砂土的孔隙比；
- e_{\max} ——砂土的最大孔隙比；
- e_{\min} ——砂土的最小孔隙比；
- d_e ——单桩有效直径；
- f_{spk} ——复合地基承载力特征值；
- f_{pk} ——桩体承载力特征值；
- f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值；

f_{az} ——垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值；

f_{a0} ——承载力基本容许值；

k_1 ——基底宽度修正系数；

k_2 ——基底深度修正系数；

q_{si} ——桩周第 i 层土的侧阻力特征值；

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力特征值；

p_z ——荷载效应标准组合时，垫层底面处的附加压力值；

p_{cz} ——垫层底面处土的自重压力值；

p_k ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力值；

p_c ——基础底面处土的自重压力值；

u_p ——加固土桩的周长(m)；

θ ——垫层的压力扩散角；

η ——为桩体荷载分担比系数；

γ_s ——侧阻力分项系数；

γ_p ——端阻力分项系数；

τ_{ps} ——粒料桩复合地基的抗剪强度；

τ_{ps} ——桩体部分的抗剪强度；

τ_s ——地基土的抗剪强度；

λ_c ——材料强度综合修正系数；

γ_1 ——基底持力层土的天然容重；

γ_2 ——基底以上土层的加权平均容重。

4 基本规定

- 4.1 公路软土地基处治的勘察、设计、施工、检测、监测应贯彻执行国家技术经济政策，做到技术安全可靠、经济合理，确保质量和保护环境。
- 4.2 公路软土地基处治的勘察设计属公路工程项目的勘察设计内容，包含在公路勘察设计成果报告中；当软土路段较长、厚度较大、施工环境受限制、采用新技术或者需与桥梁跨越方案进行对比时，应开展专项勘察设计工作，单独提交勘察设计成果文件。
- 4.3 公路软土地基勘察应根据软土类别、特性、范围、工程经验和初拟的处治方案，选择合理的勘察方法和布置适量勘察工作量；勘察成果应满足处治方案的需要。
- 4.4 软土地基勘察除了查明软土的类别、范围、基本特性外，尚应调查场地地表水与地下水、周围环境及施工作业条件等；涉及对地基处理桩体腐蚀性问题时，应进行软土和地下水的腐蚀性评价。
- 4.5 公路软土地基处治方案应以满足公路路基及构筑物的稳定和变形要求为目标，以勘察成果为基础，结合当地工程经验、材料、环境条件、施工条件、处治方法的可行性及可靠性，进行技术经济比较，合理确定；当遇长度大、范围广、厚度大的软土路段，软土地基处治方案宜与桥梁跨越方案进行比选。
- 4.6 软土地基路段设置涵洞、通道等构造物时，地基勘察、处治设计应同时满足构造物设置的需要。
- 4.7 公路软土地基处治提倡积极推广应用经工程验证的新技术、新材料、新工艺和新设备。
- 4.8 公路软土地基处治应采取动态设计和信息化施工，路堤填筑应进行施工监控，及时检测和控制地基承载力及变形稳定情况，调整优化设计和施工技术方案；软土地基规模较大、填方高度较高和特殊路段软土地基处治时，应进行工后沉降观测，以评价路基变形及稳定状况。

5 软土地基判别与分类

5.1 软土地基判别

- 5.1.1 软土地基的判别宜采用现场定性判别和原位测试、室内试验等定量判别相结合的方法进行。
- 5.1.2 软土地基可根据地貌、土的颜色、结构、状态、地质特征，按表 1 进行现场初步判别。

表1 软土现场定性判别

判别项目	判别特征
地貌	多发育于水田、水塘、河道、阶地、滨海滩涂、山间沟谷及地下水丰富的低洼地段等
颜色	颜色较深，多为褐黄、褐灰、灰、灰绿、灰黑色等，手摸易染指
结构	静水环境沉积的软土多具海绵状、蜂窝状结构，动水环境沉积的软土有层理构造，软土和薄层的粉砂、泥炭层等相互交替沉积，或呈透镜体相间形成性质复杂的土体
状态	高含水量，呈流~软塑状，手捏易变形，有滑腻感，常含腐殖质、铁锰质结核及砂砾等，多有腥臭味

- 5.1.3 软土地基承载力可采用标准轻型动力触探、标准贯入试验、荷兰轻型动力触探等原位测试方法进行测定，不同路堤填筑高度地基承载力要求及不同测试方法的试验击数与承载力对应关系见表 2。

表2 软土地基原位测试击数与承载力对应表

路堤填筑高度 (m)	0~2	2~6	6~8	8~12	12~16	16~20
地基承载力要求 f_{ao} (kPa)	≥ 130	≥ 125	≥ 130	≥ 145	≥ 155	≥ 170
标准轻型动力触探击数 N_{610} (击/30 cm)	≥ 18	≥ 17	≥ 18	≥ 20	≥ 21	≥ 23
标准贯入试验击数 N (击/30 cm)	≥ 5	≥ 4	≥ 5	≥ 5	≥ 6	≥ 6
荷兰轻型动力触探击数 N_{110} (击/20 cm)	≥ 10	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12	≥ 14
注1: 该表中轻型动力触探主要适用于软塑~可塑状的黏性土软土地基, 对含砂黏性土或松散粉细砂可根据工程经验选用, 对成分复杂的粗颗粒砂土和杂填土等土层应慎重选用。 注2: 该表承载力主要适用于地形相对平缓的一般软土路基。 注3: 对高填路堤、斜坡路堤或对变形有特殊要求的路基, 应充分论证软土路基稳定与变形, 严格控制路堤填高。						

5.1.4 在静水或缓慢流水等环境中沉积, 具有表3 试验指标和工程地质特性的土, 应判别为软土。

表3 软土试验指标定量判别

软土名称	天然含水率(%)	天然孔隙比	快剪内摩擦角($^{\circ}$)	十字板抗剪强度(kPa)	静力触探锥尖阻力(MPa)	压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ (MPa)
黏性土、有机质土	\geq 液限	≥ 1.0	宜 < 5	宜 < 35	宜 < 0.75	宜 > 0.5
粉质土	≥ 30	≥ 0.9	宜 < 8			宜 > 0.3
注: 当表中部分指标无法获得时, 可以天然含水率和天然孔隙比两项指标为基础, 采用多种方法综合判别。						

5.2 软土分类

5.2.1 根据广西软土形成环境类型, 可按表4 划分为山间沟谷相软土、河湖相软土、滨海相软土和坡地相软土等类型。

表4 软土成因分类

类型	分布及特征	一般厚度	分布情况
山间沟谷相软土	呈V型沟、U型槽、带状、片状分布，沟谷底起伏较大，软土与持力层分界线明显，以淤泥及软粘土为主，局部含粉细砂、泥炭及腐殖质等	1 m~6 m	桂东、桂北、桂西中、北部湾低山及丘陵地区 (主要软土类型)
河湖相软土	沿河湖分布，层理结构相对清晰，湖塘相沉积多为淤泥及泥炭，河相软土沉积成分不均匀，多含砂夹层	1 m~8 m	西江、郁江、右江、钦江、红水河、水库、水塘等地区
滨海相软土	呈平面或片状分布，常夹有薄砂层或砂层透镜体，透水性较强，地下水丰富	2 m~10 m	钦州、北海、防城港等北部湾沿海地区
坡地相软土	分布于坡地上的风化碎屑物或岩石，经地下水浸泡，形成的具有软弱土特性的岩土层，常发育于炭质岩和膨胀岩等地区	1 m~3 m	南丹、河池、崇左、柳州、百色等地区

5.2.2 按广西软土的母岩成分及工程特性，可按表5划分为碎屑岩地区软土、碳酸盐岩地区软土、花岗岩地区软土、特殊岩性地区软土等类型。

表5 软土母岩成分及工程特性分类

类型	分布及特征	分布区域
碎屑岩地区软土	主要分布于砂岩、砾岩、页岩、泥岩等碎屑岩地区的软土，多为冲积、淤积成因，以淤泥及淤泥质土为主，局部含粉细砂、泥炭及腐殖质等，由于母岩成分复杂，软土成分与工程特性差异性较大	北海、钦州、防城港、上思、南宁、梧州、三江、龙胜、百色、田阳、田林、隆林
碳酸盐岩地区软土	主要分布于灰岩、白云岩、白云质灰岩等碳酸盐岩地区的软土，多由冲洪积或风化残积形成，前者以软塑黏性土为主，后者以可塑状为主，普遍具有上硬下软特征	大新、靖西、德保、大化、河池、南丹、柳州、象州、鹿寨、桂林、阳朔等地区
花岗岩地区软土	主要分布于花岗岩地区的软土，多为冲积、淤积成因，以含砂淤泥、淤泥混砂为主，多夹薄层砂或砂层透镜体，软土成分差异性较大	浦北、灵山、兴业、岑溪、资源等地区
特殊岩性地区软土	主要分布于炭质岩、膨胀土等地区，当坡地上的炭质岩或膨胀土，经地下水浸泡，形成的具有软弱土特性的地基土层	南丹、河池、宜州、鹿寨、柳州、百色等为炭质岩区；南宁盆地与宁明盆地等为膨胀土区

6 广西公路典型软土地基勘察设计

6.1 一般规定

6.1.1 软土地基勘察设计划分为预可行性研究阶段、工程可行性研究阶段、初步勘察设计和详细勘察阶段，勘察深度应满足相应设计阶段的要求，在路线位置确定的情况下，可简化勘察阶段，但勘察精度应满足详细勘察阶段要求，当路线位置发生较大变化时，应按详细勘察的精度要求重新进行软土勘察。各阶段勘察应符合下列要求：

- a) 预可行性研究阶段和工程可行性研究阶段勘察应掌握路线走廊带内对工程规模有较大影响的软土分布，了解其对路线的影响，软土地基勘察设计成果满足预可或工可线路方案研究和软土处治工程数量估算的要求；
- b) 初步勘察应基本查明控制路线方案的软土分布及工程特性，研究其对路线的影响，提出处理措施建议，软土勘察设计成果满足路线布设、处理方案设计和工程量计算的要求；
- c) 详细勘察应逐段查明路线范围内软土的工程地质特性，为路堤稳定性与沉降验算、软土处治方案选择提供准确的指标参数，软土处治方案设计和工程数量计算满足施工要求。

6.1.2 软土地基工程地质勘察内容、地质选线原则及调绘要求应符合 JTG C20 和 JTG/T D31 的相关规定。

6.1.3 软土地基勘察设计应考虑软土成因、类型、厚度、性质、路堤填高、周边环境、材料来源及工期要求等因素，有针对性地选择软土勘察设计方案，勘察方法与地基处治设计方法要相互对应；勘察方法可采用简易钻探（麻花钻、轻型动力触探）、钻探、静力触探、十字板剪切试验等方法。

6.1.4 在公路软土勘察过程中宜先进行路线地质调查，并配合麻花钻、轻型触探、钎探等简易勘探手段进行软土厚度摸底，然后再针对软土的厚度、性质、填土高度等布置适当的勘察工作；当前期揭示的软土厚度较小，且拟采用换填法时，可采用简易钻探进行控制；当软土厚度和分布范围较大，且拟采用复合地基法时，应布置钻探工作量。

6.1.5 软土地基工程地质测试，应根据软土厚度、性质、地基处治方法、构筑物类型等条件合理选择室内试验和原位测试方法，为地基变形与稳定评价提供必要资料；对于换填路段，可仅做现场原位测试，涉及沉降与稳定计算的复合地基路段，应采取原状土样进行室内试验，室内试验应符合 JTG/T D31 的相关要求，不同软基处治方法的软土试验与测试项目可按表 6 选用。

表6 不同软基处治方法的软土试验与测试项目

测试项目	处治方法					
	换填法	加筋法	强夯法	粒料桩法	加固土桩法	刚性桩法
天然含水率	(+)	+	+	+	+	+
天然密度	(+)	+	+	+	+	+
天然孔隙比	(+)	+	+	+	+	+
液限	(+)	+	+	+	+	+
塑限	(+)	+	+	+	+	+
压缩	(+)	+	+	+	+	+

表6 不同软基处治方法的软土试验与测试项目（续）

测试项目	处治方法					
	换填法	加筋法	强夯法	粒料桩法	加固土桩法	刚性桩法
直接快剪	(+)	+	+	+	+	+
固结快剪				(+)	(+)	(+)
三轴剪切				(+)	(+)	(+)
渗透试验			(+)	+	+	
有机质含量					+	
轻型动力触探	+	+	+	(+)	(+)	(+)
标准贯入试验	(+)	(+)	(+)	+	+	+
静力触探	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
注1：“+”表示应做室内试验或原位测试。 注2：“(+)”表示可根据需要做室内试验或原位测试。 注3：对于彻底清淤换填路段，软土均已挖除，通常采用麻花钻或轻型动力触探等轻便勘探手段，故取样试验不作严格要求。						

6.1.6 软土地基上的路堤稳定安全系数和工后沉降应满足要求：

a) 路堤稳定安全系数应符合表7的要求：

表7 稳定安全系数容许值

指标	有效固结应力法		改进总强度法		简化 Bishop 法 或 Janbu 条分法
	不考虑固结	考虑固结	不考虑固结	考虑固结	
直接快剪	1.1	1.2			
静力触探、十字板剪切			1.2	1.3	
三轴有效剪切指标					1.4

b) 路基工后沉降应符合表8的要求：

表8 工后沉降容许值

公路等级	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 (新建公路)	≤10 cm	≤20 cm	≤30 cm
高速公路、一级公路 (改扩建公路)	≤5 cm	≤10 cm	≤15 cm
二级公路	≤20 cm	≤30 cm	≤50 cm

注：高速公路改扩建工程应控制拓宽路基的差异沉降，需满足拓宽路基的路拱横坡度增大值不大于0.5%、相邻路段差异沉降引起的纵坡变化不大于0.4%的要求。

c) 路基稳定性验算和沉降计算方法应符合 JTG/T D31 的相关要求，当计算稳定安全系数和工后沉降不满足要求时，应针对稳定和沉降进行软土地基处治设计。

6.1.7 软土地基勘察成果应对存在软土区域的路线及构筑物工程地质条件进行评价，一般软土路段的地质条件可用表格说明，分布范围较广的深厚软土路段应编制专项工程地质勘察报告，提交的勘察成果资料应符合下列规定：

- a) 一般软土路段应提供软土工程地质条件一览表；
- b) 软土工点勘察路段应提供：文字说明；工程地质平面图、纵横剖面图、钻孔柱状图等；土工试验资料成果图表，包括土的物理力学、化学性能试验成果表与指标统计表，孔隙比与荷载关系图等；现场勘探、原位测试照片等；
- c) 文字说明应阐明任务要求、勘察阶段、工程地质条件、工程项目的特点，包括软土地基勘察要求查明内容和结论的说明，以及按软土工程地质评价要求进行工程地质评价的情况及结论。

6.1.8 软土地基处治设计应包括相邻过渡路段的设计内容，一般软土路段地基处治设计可仅提供通用设计图与工程数量表，表中应包括软基处理路段的起讫桩号、路段长度、处理方案、工程数量等信息；重要软土路段工点还应提供软基专项处治设计，文字说明与图表主要包括以下内容：

- a) 软土地基处治方法设计通用图；
- b) 软土过渡路段设计图（桥头、涵洞、通道等）；
- c) 软土分布路段及处治方法表；
- d) 软土地基处治工程数量表；
- e) 软土路基动态监测设计图；
- f) 软土路基动态监测设计工程数量表；
- g) 复杂软土工点专项设计文件（设计文字说明、工程地质平面图、包含地形与路堤断面的地质剖面图及相关工程数量表）。

6.2 碎屑岩地区软土地基

6.2.1 开展勘察设计工作前，宜按表 9 对碎屑岩地区软土类型进行划分，采取针对性的勘察方法及有效的处治方案。

表9 碎屑岩区软土分类

分类名称	分布及特征	处治方案	典型剖面
① 浅层软土	主要分布于水田、水塘、山间沟谷等地段，一般附近山坡残坡积覆盖层薄，软土结构表现为由软到硬，软土厚度1.0m~4.0m，局部软土厚度较大，下伏基岩主要为风化砂岩、砾岩等	换填法 抛石挤淤+强夯置换法	
② 渐变型软土	主要分布于面积较大的水田、沟谷等地段，一般附近残坡积覆盖层较厚，软土结构表现为由软到硬渐变，软土厚度2.0m~5.0m，局部深度较大，下伏基岩主要为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、页岩等	换填法 复合地基法	
③ 上硬下软型软土	主要分布于山脚、沟槽出口等地段，一般冲洪积作用较为强烈，软土结构表现为上硬下软，硬壳层1.0m~3.0m，软土厚度分布不均，1.0m~3.0m，局部厚度较大，下卧硬层为硬塑状土层或基岩	换填法 加筋法 复合地基法	

6.2.2 在山间沟谷地质选线时，路线宜选择在地势较高，硬壳层厚度较大的地段，不宜选择大面积分布软土的沟谷、洼地或下卧硬层横坡较陡的地段；不宜将涵洞通道结构物位置选择在软土厚度大、性质差的部位。

6.2.3 在软土工程地质调绘时，应结合路线占地范围及涵洞、通道、挡墙等构筑物的位置进行调查，应重点调查可能发育坡地软土的位置、分布范围，可采用简易勘探手段辅助工程地质调绘综合判别地势低洼的旱地是否存在软土，当简易钻探不能查明软土厚度时，应布置机械钻孔进一步勘察。

6.2.4 地形平坦的软土路段，勘探点布置宜沿路线中心布置；地形起伏较大的沟谷路段，勘探点可沿路基范围内的冲沟轴向布置；地质条件简单的路段勘探点间距宜为150m~300m，地质条件复杂的路段勘探点间距宜为100m~200m，且每个沟槽均应有勘探点控制，对于横坡较陡或路堤填高较大的软土路段应布置勘探横断面，每个横断面勘探点数量不宜少于2个。

6.2.5 勘探点深度应根据软土的厚度、性质、填土高度和结构物类型等确定，满足软土地基工程地质评价和地基处治设计的需要，符合下列要求：

- a) 对于地形平坦的浅层软土，一般路基的勘探点深度应穿过软土层至下卧硬层，涉及到路基稳定和结构物路段的控制性勘探点深度应进入下卧硬层1m~2m；

b) 对于面积较大的渐变型软土,宜采用轻便钻探和机钻孔进行控制,孔深应达到硬塑状以上的硬层 2 m~3 m;

c) 对于上硬下软型软土,勘探点深度应穿过硬壳层和软弱下卧层,进入下卧硬层 1 m~3 m。

6.2.6 碎屑岩地区软土地基处治可选用换填法、加筋法、水泥搅拌桩法、碎石桩法等;当软土厚度小于 4.0 m 时,软基处治方法宜选用换填法,对于具备施工条件的狭窄沟槽部位,软土换填厚度可适当加深;当软土厚度大于等于 4.0 m 时,且路段长度大于 100 m 的软土路段,宜选用水泥搅拌桩、碎石桩等复合地基处治方法。

6.2.7 针对碎屑岩区软土的分类,可参考下列原则选择合理的地基处理方法:

a) 对于浅层型软土,软基处治方法以换填法为主,局部厚度较大处可选用复合地基方法;当遇涉水路段,软土呈流塑状,当换填开挖困难时,也可考虑抛石挤淤强夯置换法;

b) 对于渐变型软土,软土厚度较浅处可采用换填法,软土厚度较大处应采用复合地基法,应详细论证桩端持力层应进入可塑~硬塑状土层的深度,避免施工期桩长大量增加;

c) 对于上硬下软型软土,应优先论证利用硬壳层的可行性,可采用应力扩散原理验算软弱下卧层是否满足要求;当硬壳层厚度不满足要求时,应综合考虑路堤填高、软土厚度、性质及周边砂、石料等合理选用换填法、加筋法和复合地基法。

6.2.8 应开展路基挖方区土石成分及周边石料、砂砾等料场的调查,地下水贫乏的路段可充分利用路基挖方料进行换填,地下水丰富路段的换填材料应采用硬质挖方料或砂石料,不宜将泥岩、页岩等易软化岩土挖方料用于软基换填。

6.3 碳酸盐岩地区软土地基

6.3.1 开展勘察设计工作前,宜按表 10 对碳酸盐岩地区软土类型进行划分,采取针对性的勘察方法及有效的处治方案。

表10 碳酸盐岩地区软土分类

分类名称	分布及特征	处治方案	典型剖面
① 浅层软土	主要分布于水田、水塘、岩溶洼地等地段,地下水丰富,多为冲洪积成因,软土多呈流塑~软塑状,软土厚度1.0 m~4.0 m,局部软土厚度较大,下伏基岩主要为灰岩、白云岩等碳酸盐岩	换填法	
② 上硬下软型软土	主要分布于平缓微丘、岩溶平原、低洼谷地等地段,多为残积成因的红粘土,粘土层具有上硬下软特征,覆盖层厚度5 m~15 m,其中软弱层厚1 m~3 m,局部厚度较大,下伏基岩主要为灰岩、白云岩等碳酸盐岩	换填法 加筋法 基底填石 复合地基法	

表 10 碳酸盐岩地区软土分类 (续)

分类名称	分布及特征	处治方案	典型剖面
③ 石芽型 软土	主要分布于地下水丰富的岩溶洼地、溶沟、溶槽、石芽出露等地段,多为冲洪积或残积成因,基岩面石芽发育,凹凸不平,石芽间多为软~可塑状软弱土层,压缩性较高,覆盖层厚度不均匀,1m~2m不等,下伏基岩主要为灰岩、白云岩等碳酸盐岩	换填法 加筋法	
④ 季节性 软土	主要分布于岩溶洼地、岩溶漏斗或地势较低的碳酸盐岩路段。覆盖层多为红粘土或次生红粘土,在雨季因地下水上升、地表水汇集而软化而呈软~可塑状;在旱季因地下水沿岩溶裂隙、溶洞等排水通道排泄而呈可~硬塑状,地基土的物理力学性质及承载力随季节变化较大	排水渗沟 基底填石 旱季施工	

6.3.2 在碳酸盐岩地区软土地质选线时,路线宜选择地形平缓、硬壳层厚度较大的地带通过,路线不宜经过大面积分布软土的水田、洼地、石芽等地下水发育的地段,对于常年排水不畅、季节性内涝、强岩溶发育的软土路段,可考虑将路基方案与桥梁方案进行比选。

6.3.3 在软土地基工程地质调绘时,应准确划分软土的分布范围,加强常年排水不畅、季节性内涝、石芽软土等路段的调查,重点关注平缓微丘地段,判别是否发育上硬下软型软土,应以简易勘探手段辅助工程地质调绘,简易钻探不能查明的软土,应布置机械钻孔进一步勘察。

6.3.4 对于碳酸盐岩地区浅埋型软土及覆盖层薄的石芽软土路段,勘探方法可以麻花钻、轻型触探等简易勘探手段为主;对于覆盖层厚度较大的上硬下软型软土,勘探方法应以钻探或静力触探为主,若下伏基岩岩溶强烈发育时,应按岩溶地基勘察要求布置工作量,可考虑布置物探工作进行控制。

6.3.5 对于地形平缓的软土路段,勘探点宜沿路线中心或软土厚度较大的一侧布置;地质条件简单的路段勘探点间距宜为 150 m~300 m,地质条件复杂的路段勘探点间距宜为 100 m~200 m,且每个沟槽均应有勘探点控制,石芽型软土路段应适当加密勘探点间距;对于横坡较陡或路堤填高较大的软土路段应布置勘探横断面,每个横断面勘探点数量宜不少于 2 个。

6.3.6 勘探点深度应根据软土的厚度、性质及填土高度等综合确定,应满足软土工程地质评价和地基处治设计的需要,并应符合下列要求:

a) 对于岩溶不发育区,一般勘探点深度应至少到硬层或基岩,控制性勘探点深度应进入硬层或基岩 1 m~3 m;

b) 对于下伏基岩岩溶发育时,勘探点深度应按岩溶路基考虑,应进入溶洞底板以下 3 m~5 m。

6.3.7 软土勘察时应重点查明上硬下软型软土中硬壳层的厚度及软~可塑状土层的厚度、物理力学性质,加强取样与原位测试,严格控制钻探回次进尺,软土层中的取样与原位测试间距宜为 0.5 m~1.0 m。

6.3.8 碳酸盐岩区软土地基处治方法可选用换填法、加筋法、碎石桩法、排水渗沟法等；当软土厚度小于4m时，软基处治方案宜选用换填法，地下水不甚发育的地段，软土换填厚度可适当加深；软土厚度大于4m，且路段长度大于100m的软土路段，宜考虑就地取材选用碎石桩法。

6.3.9 针对碳酸盐岩区软土的分类，可参考下列原则选择合理的地基处理方法：

- 对于浅层型软土，软基处治方法以换填法为主，局部厚度较大处可选用复合地基方法；
- 对于上硬下软型软土，应优先论证利用硬壳层的可行性，可采用应力扩散原理验算软弱下卧层是否满足要求；当硬壳层厚度偏薄、下部软弱土性质相对较好时，为增加应力扩散层厚度，可考虑在基底设置碎石+土工格栅垫层，或者直接采用基底填石路堤或全部填石路堤，且应满足沉降变形要求；当硬壳层不具备利用条件时，宜选用复合地基法；
- 对于石芽型软土，应全部清除石芽间的软弱土，对参差不平的石芽应削平，坑洼部位以片石或碎石回填，应整平原地面，整平、压实的岩面上应设置碎石调平层，厚度不小于30cm，石芽型软土处治前后示意如图1和图2所示。

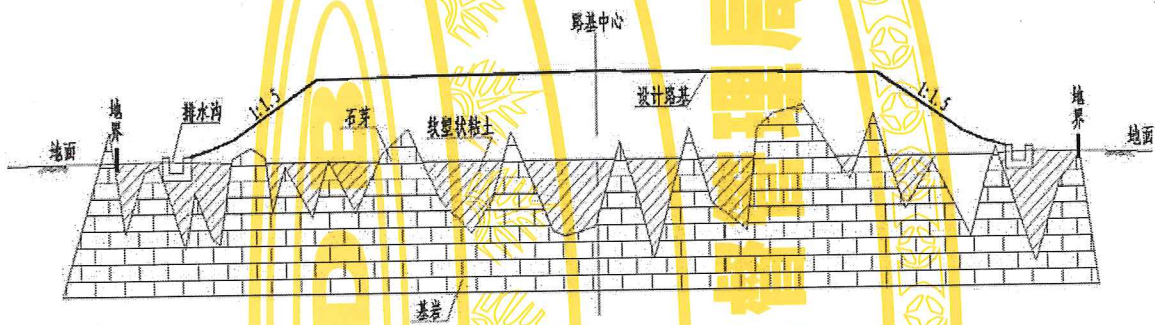


图1 石芽型软土地基处治前示意图

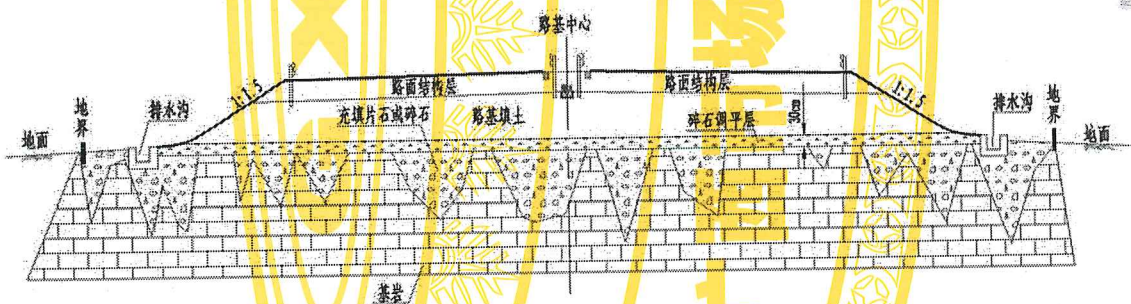


图2 石芽型软土地基处治后示意图

- 对于季节性软土，软土性质随季节变化较大，宜选择旱季施工，应注意地下水的及时疏排，可考虑设置排水渗沟、基底填石或填石路堤等方案；
- 对于部分碳酸盐岩地区坡地低洼处由于季节性排水不畅还可能存在坡地软弱土，宜采用浅层换填碎石、碎石垫层或渗沟等方案进行软弱地基处治。

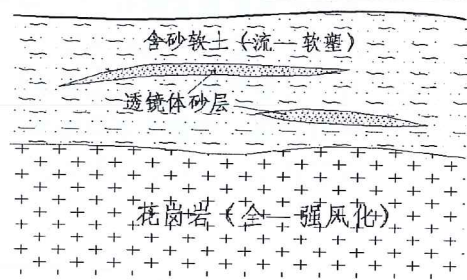
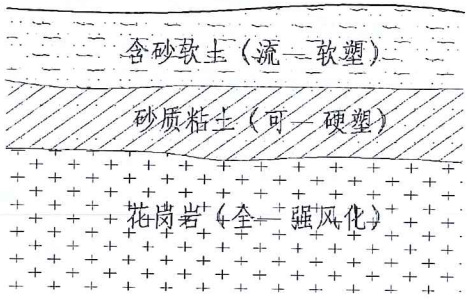
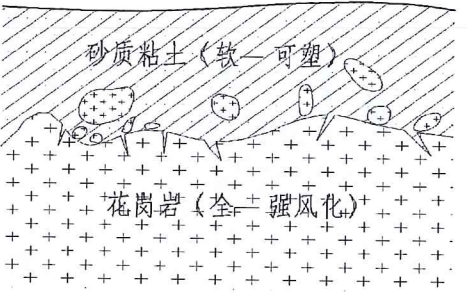
6.3.10 软土路基勘察设计时应开展路基挖方区土石成分及周边石料的调查，地下水贫乏的路段可充分利用路基挖方料进行换填，地下水丰富路段应采用灰岩、白云岩等硬质挖方料或片碎石，不应将红粘土、膨胀土等不合格挖方料用于软基换填。

6.3.11 在软基处治过程中，当地基遇岩溶发育时，地基处理方案选择应综合考虑软土、岩溶等因素。

6.4 花岗岩地区软土地基

6.4.1 花岗岩地区软土可按表 11 进行分类,开展软土勘察设计工作时,宜根据软土分类有针对性的采取有效的勘察方法及处治手段。

表11 花岗岩地区软土分类

分类名称	分布及特征	处治方案	典型剖面
① 浅层软土	主要分布于水田、水塘、山间沟谷等地段,地下水丰富,多为冲洪积成因淤泥、淤泥质含砂粘土、局部含砂或砂砾,软土多呈流塑~软塑状,软土厚度1 m~6 m,局部厚度较大,下伏基岩主要为全风化~强风化花岗岩等	换填法 复合地基法	
② 渐变型 软土	主要分布于靠近山坡的冲沟、谷地、水田等地段,附近残坡积覆盖层一般较厚,表层为冲洪积成因软塑状淤泥质粘土,厚度2 m~7 m,中部为残坡积成因可~硬塑状砂质粘土,下伏基岩主要为全风化~强风化花岗岩等	换填法 复合地基法	
③ 孤石型 软土	主要分布于临近山坡的山间沟谷或斜坡冲沟地段,表层为冲洪积成因软~可塑状淤泥质粘土或砂质粘土,中间夹有花岗岩球状风化孤石,软土厚度1 m~5 m,下伏基岩主要为全风化~强风化花岗岩等	换填法	

6.4.2 在花岗岩地区软土地质选线时,路线宜避开有大面积软土分布的水田、水塘、谷地等地下水发育的地段,无法避开时,应减少穿越软土区域面积,做到填挖平衡。

6.4.3 在软土地基工程地质调绘时,应准确划分软土的分布范围和深度,加强对地下水丰富的冲沟旱地调查,避免遗漏软土路段;当简易钻探不能详细查明软土的分布范围与深度时,应布置机钻孔进一步勘察,避免把砂夹层或砂层透镜体误判成持力层。

6.4.4 花岗岩地区软土勘察可采用麻花钻、轻型触探、静力触探及机械钻探等综合勘察手段;对于软土厚度不大,且含砂量较少黏性土,可以简易勘探手段为主;对于地层复杂的砂砾夹层、渐变型软土及孤石型软土,当采用简易勘探手段易造成软土厚度误判时,应采用机械钻探手段相互佐证。

6.4.5 对于地形平缓的软土路段,勘探点应沿路线中心或软土厚度较大的部位布置;地质条件简单的路段勘探点间距宜为 150 m~250 m,地质条件复杂的路段勘探点间距宜为 80 m~150 m,且每个沟槽均

应有勘探点控制，孤石型软土路段应适当加密勘探点间距；对于横坡较陡或路堤填高较大的软土路段应增加勘探横断面，每个横断面勘探点数量宜不小于2个。

6.4.6 勘探点深度可根据软土的厚度、性质、地基处理方法、填土高度等综合确定，应满足软土工程地质评价和地基处治设计的需要，并应符合下列要求：

- a) 对于软土厚度和填土高度较小的浅埋型软土及渐变型软土，勘探点深度应至少穿过软土层达到下卧硬层；
- b) 对于软土厚度大于3.5m和填土高度较大的浅埋型软土及渐变型软土，若考虑采用复合地基处治时，勘探点深度应进入硬层1m~2m，控制性勘探点深度应进入硬层3m~5m；
- c) 对于孤石型软土，勘探点深度应进入稳定硬层3m~5m。

6.4.7 花岗岩地区软土成分不均匀，应重点查明软土的类型、分布、厚度及物理力学性质等，加强取样试验，当软土取样有困难时，应加密原位测试，严格控制钻探回次进尺，取样与原位测试间距宜为0.5m~1.5m。

6.4.8 花岗岩区软土地基处治方法可选用换填法、水泥搅拌桩法、碎石桩法等；当软土厚度小于4m时，软基处治方案宜选用换填法，对于地下水不甚发育的地段，软土换填厚度可适当加深；当软土厚度大于4m，且路段长度大于100m的软土路段，宜选用复合地基处治方法。

6.4.9 针对花岗岩地区软土地基的分类，可参考下列原则选择合理的地基处理方法：

- a) 对于浅层型软土，软基处治方法以换填法为主，可选择复合式换填或全换填两种形式；对于厚度较大的软土，可选用复合地基处治方法；
- b) 对于渐变型软土，软土厚度较浅时，可采用换填法；对于软土厚度较大时，可采用复合地基处治法，桩长设计宜充分考虑施工作业平台填土厚度及桩端进入持力层的深度；
- c) 对于软土厚度较小的孤石型软土，宜采用换填法处理，清淤后直径小于0.5m的孤石可保留作为回填材料，直径大于等于0.5m的孤石须破碎后方可作为回填材料；
- d) 对于软土厚度较大的孤石型软土，在水泥搅拌桩、碎石桩等复合地基施工过程中，应先用勾机清除孤石后，方可进入下一步复合地基施工工序。

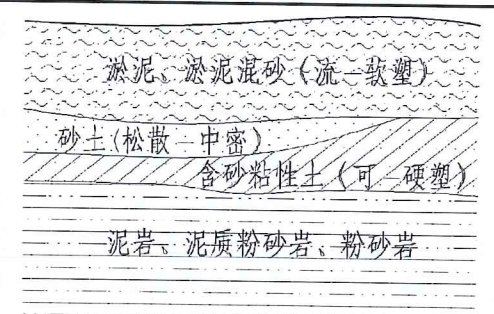
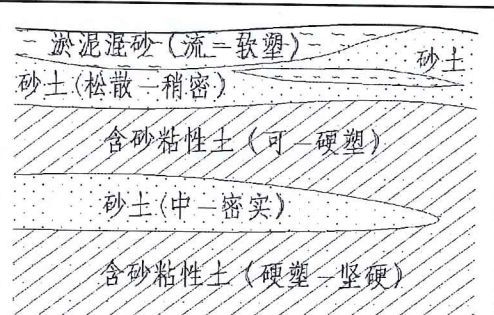
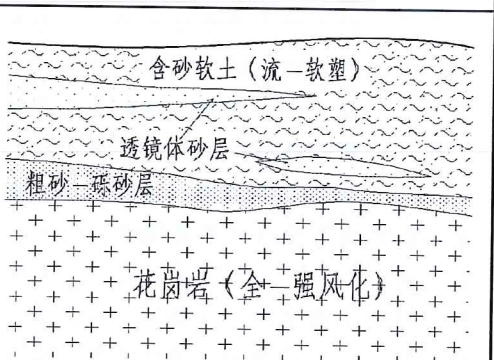
6.4.10 软土路基勘察设计应开展路基挖方区土石成分及周边石料的调查，加强花岗岩残积土的取样试验，查明其是否存在高液限性，地下水匮乏的路段可充分利用路基挖方料进行换填；对于地下水丰富路段，施工常水位以下应采用强~中风化花岗岩挖方料或片碎石进行换填，施工常水位以上可采用合格花岗岩残积土或全风化~强风化花岗岩等换填，不应将具有高液限、膨胀性的花岗岩残积土用于软基换填。

6.4.11 对于花岗岩区其他类型的软土，可参照第8章相关内容进行软土地基处治设计。

6.5 滨海地区软土地基

6.5.1 滨海地区软土可按表12进行分类，开展软土勘察设计工作时，宜根据软土分类有针对性的采取有效的勘察方法及处治手段。

表12 滨海地区软土分类

分类名称	分布及特征	处治方案	典型剖面
①防城钦 州区软土	主要分布于防城港与钦州港一带的滨海和海湾，多为滨海相沉积的灰黑色淤泥、淤泥混砂，总体相对较均匀，软土呈流塑~软塑状，地基承载力40 kPa~60 kPa，厚度2m~10m不等，中部可能夹松散~中密砂层或可~硬塑状含砂黏性土，下伏基岩主要为侏罗系或志留系全风化~中风化泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩	换填法、 抛石挤淤+强 夯置换法、复 合地基法	
②北海区 软土	主要分布于南流江出口、北海、铁山港一带的滨海和海湾，多为滨海相沉积的灰、灰黄、灰黑色松散砂土、淤泥、淤泥混砂等，土质不均匀，软土以夹层状为主，呈流塑~软塑状，软土夹层厚度为1m~3m，局部存在薄硬壳层，地下水丰富，下部为深厚砂层或含砂黏性土，基岩埋藏深	换填法 加筋法 强夯法	
③犀牛脚 区软土	主要分布于犀牛角至大风江一带的滨海地带，多为滨海相沉积的灰黑、深灰色淤泥、淤泥混砂、砂土等，土质不均匀，砂土多呈夹层或透镜体状，软土呈流塑~软塑状，厚度1m~3.5m，地下水丰富，下伏基岩主要为全风化~中风化花岗岩	换填法 加筋法	

6.5.2 在滨海地区软土地质选线时，应根据所处的地理环境及地形、地貌、地质、水文、潮汐、气象等因素，综合施工条件及材料供应情况，合理的选择路线的平面布置、路基设计高程、断面形式；路线宜避开大面积分布软土的水田、虾塘、滩涂等地段，滨海路堤应布设在海面最窄、水深浅、波浪小、海滩地势平坦、地质条件相对较好的地段。

6.5.3 在软土地基工程地质调绘时，应加强潮汐、虾塘、水田等的地表水变化调查，避免遗漏软土路段，应以简易勘探手段辅助工程地质调绘，简易钻探不能查明的软土，应布置机械钻孔进一步勘察，避免把砂夹层或砂层透镜体误判成持力层。

6.5.4 滨海地区软土地基勘察可采用麻花钻、轻型触探、静力触探及机械钻探等综合勘察手段，对于软土厚度不大，且成分均匀的黏性土，可以简易勘探手段为主，对于存在多层软土夹层或软土厚度较大地段，应采用机械钻探或静力触探等手段进行软土勘察。

6.5.5 勘探点布置应沿路线中心或软土厚度较大的部位布置，地质条件简单的路段勘探点间距宜为100m~200m，地质条件复杂的路段勘探点间距宜为50m~100m，局部淤泥与砂层交互沉积的路段，应

适当加密勘探点间距,对于横坡较陡或路堤填高较大的软土路段应增加勘探横断面,每个横断面勘探点数量宜不小于2个。

6.5.6 应根据软土的厚度、性质、地基处理方法、填土高度等综合确定勘探点深度,满足软土工程地质评价和地基处治设计的需要,并应符合下列要求:

- a) 对于软土厚度和填土高度较小的防城钦州区软土及犀牛脚区软土,勘探点深度应进入硬层 1 m~2 m,控制性勘探点深度应进入硬层 3 m~5 m;
- b) 对于软土厚度较大防城钦州区软土或淤泥与砂层交互沉积的地段,勘察孔深度应不小于地基压缩层的计算深度或达到地基附加应力与地基土自重应力比为 0.10~0.15 时所对应的深度。

6.5.7 滨海地区软土成分不均匀,地层差异性较大,应重点查明软土的成分及物理力学性质,加强取样试验,当软土取样有困难时,应加密原位测试,严格控制钻探回次进尺,取样与原位测试间距宜为 0.5 m~1.5 m。

6.5.8 根据滨海地区软土的分类,软土地基处治方法可选用换填法、加筋垫层法、强夯与强夯置换法、水泥搅拌桩法等,具体参考下列原则进行选择:

- a) 对于厚度小于 3.5 m 的淤泥或淤泥混砂,宜选用换填法处治;
- b) 对于厚度较小的松散~稍密状砂土或砂土混淤泥,路堤填高小于 2.5 m 时,宜采用换填法处治;当路堤填高大于等于 2.5 m 时,可考虑加筋垫层法处理;
- c) 对于软土厚度不大且上部已有一定厚度填土的路段,可采用强夯法处治;
- d) 对软土厚度不大且以流塑状淤泥为主的路段,可考虑选用抛石挤淤+强夯置换法处治;
- e) 对软土厚度较大的流塑~软塑状淤泥路段,可考虑选用浅层开挖+抛石挤淤淤泥强夯置换或强夯片石墩等方法;
- f) 软土厚度大于 3.5 m,且路段长度大于 150 m 的软土路段,宜选用复合地基处治方法。

6.5.9 软土路基勘察设计应进行周边取土料、砂料、石料的调查,滨海地区地下水丰富,施工常水位以下宜采用中砂粒径以上海砂或碎石、片石进行换填,施工常水位以上可采用合格粗粒土换填,不应将粉粒海砂、细粒海砂及具有高液限、膨胀性的岩土材料用于软基换填。

6.5.10 有机质含量较高的灰黑色淤泥质土,当采用水泥搅拌桩方案时,应加强水泥配合比试验及现场试桩工作,以确保水泥搅拌桩强度满足要求。

6.6 炭质岩地区软土地基

6.6.1 炭质岩地区软土地基勘察时,应查明以下内容:

- a) 地形地貌的成因、类型、分布和形态特征;
- b) 成因、地层结构、分层厚度等;
- c) 下卧炭质岩的起伏形态和横向坡度;
- d) 地下水的类型、埋深、水位变化情况、水质及腐蚀性;
- e) 当地既有建筑物软弱土地基处治措施和经验;
- f) 拟建公路工程填土高度或构造物及对地基基础承载力要求。

6.6.2 炭质岩地区软土地基勘察时,应遵循以下方法:

- a) 收集并理解设计资料,明确公路路基各段填土厚度及承载力要求;
- b) 加强地质调绘,查明软弱土地段的地质条件、周边工程环境及下伏基岩产状等;
- c) 采用麻花钻、钻探、现场触探、挖探等现场测试,确定软弱土厚度、范围等。

6.6.3 炭质岩地区软土地基勘察时,现场勘探点应符合下列规定:

- a) 勘探时应布置横剖面,横剖面间距 100 m~200 m,局部复杂路段宜加密;
- b) 每个横剖面勘探点数不宜少于 2~3 个;
- c) 重要构筑物如涵洞、通道、挡墙等位置,应布置或加密勘探点;

- d) 控制性勘探点深度应进入强风化层 1 m~2 m。
- 6.6.4 炭质岩地区软土地基处治设计，应符合以下规定：
- a) 炭质岩软土段宜采取换填法或复合地基法进行处理；
 - b) 处治深度以覆盖层厚度为宜，地下水丰富路段，宜加深 1 m~2 m；
 - c) 当基底岩层产状为顺坡向时，应在基底开挖一定数量的反坡向台阶；
 - d) 填方路段处治宽度：下边坡处治范围应是边沟外侧+处治深度宽度范围内垂直区域；上边坡可按普通路段换填宽度处治，见示意图 3；
 - e) 宜于换填底部或原地面标高设置 L 型碎石导水层，导水层厚度 30 cm~50 cm。

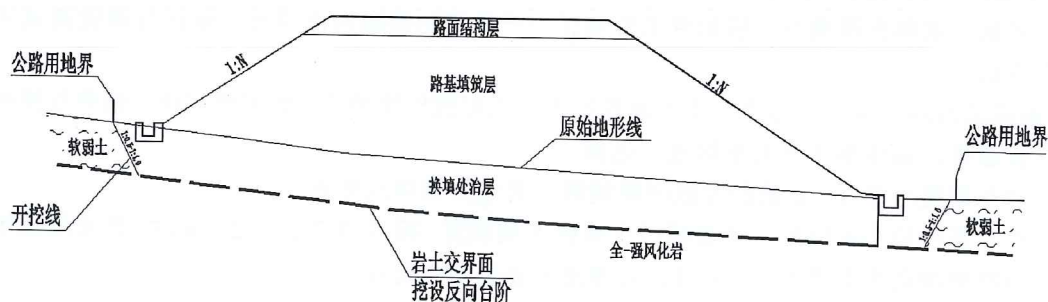


图3 炭质岩地区软土地基处治设计示意图

6.6.5 换填法实施时，各工序需衔接顺畅，软土清除后，应及时回填覆盖底部炭质岩。

6.7 膨胀土地区软土地基

6.7.1 膨胀土地区软土地基勘察，应查明以下内容：

- a) 区域地质、地形地貌，当地气象水文资料、大气影响急剧层深度；
- b) 膨胀土地区的微地形起伏和横向坡度；
- c) 软土的成因、类型、结构、分布范围；
- d) 膨胀土的矿物成分、含有物、物理力学性质、胀缩特性、膨胀等级；
- e) 膨胀土下伏地层及结构面发育情况；
- f) 分析地表水、地下水及工程施工等环境条件变化引起的膨胀土强度、变形发展趋势，评价工程的长期稳定性。

6.7.2 膨胀土地区软土地基地质调绘应符合以下要求：

- a) 地质调绘的范围应包括路中线两侧各不小于 200m 的带状区域，对可能存在不利影响因素的地段，应加宽至可能影响或受影响的区域以外，调绘的比例尺为 1:2000；
- b) 应针对软土的分布、性质、工程类别及规模开展调绘工作，以评价软土对工程的不利影响，并提出预防和处治措施；
- c) 应注意调查工程区既有道路软土的地质条件及工程现状。

6.7.3 膨胀土地区软土路基设计，应符合以下原则：

- a) 膨胀土地区软土路基应注重防水、保湿设计；
- b) 强膨胀土不得作为软基换填材料和路堤填料；当利用弱~中等膨胀土填筑路基时，应采取合适的工程措施降低膨胀土的影响或改善膨胀土的工程性质；
- c) 换填处治时，涵洞、通道、挡墙等构筑物位置，软弱土处治深度应大于大气影响急剧层深度。

7 特殊路段软土地基勘察设计

7.1 路基拓宽

7.1.1 在已有公路软土路基拓宽勘察设计之前，应重点收集既有公路地基与路基的勘察设计文件、竣工图、养护记录、监测等方面的资料，充分利用已有成果资料。

7.1.2 路基拓宽分单侧拓宽和两侧拓宽两种形式，当路基拓宽一侧遇到大面积深厚软土、水塘等软土发育路段时，路基拓宽方式应充分考虑地质选线要求，尽可能避开或从地质条件相对较好的一侧拓宽路基。

7.1.3 在软土工程地质调绘时，应加强既有公路软土路基的现状调查，重点调查软土病害路段的分布范围、发育特征、路基结构与断面形式等，扩建新路基部分应辅助以简易勘探手段进行工程地质调绘，避免遗漏软土或软弱土发育路段。

7.1.4 既有公路软土路基勘察手段以机械钻探为主，拓宽新建软土地基勘察手段可采用简易勘探和机械钻探，对于软土厚度较小的路段，可以简易勘探手段为主，对于软土分布范围和厚度较大的路段，应采用机械钻探进行软土勘察。

7.1.5 应加强高填路堤、陡坡路堤、病害路段等与软土、软弱土相关位置的勘探布置工作，既有公路的高填、陡坡软土路基宜布置横向勘探线，既有公路软土病害路段宜沿裂缝和垂直路线方向布置纵横向勘探线，横向勘探线上钻孔宜布设在既有路基的路面、边坡、坡脚等部位，新建路基部分勘探点可沿路线方向布置，同一横向勘探剖面应包括新旧路基钻孔，以查明既有路基和扩宽地基的地质条件现状。

7.1.6 既有软土路基勘探点深度应穿过路基填土层至下卧持力层 3 m~5 m，拓宽部分的软基勘探点深度可按一般新建软土路段的勘察要求执行，对于软土厚度较大的路段，勘察孔深度应不小于地基压缩层的计算深度或达到地基附加应力与地基土自重应力比为 0.10 所对应的深度。

7.1.7 应通过既有路堤与地基的取样与原位测试，查明既有路基填料的含水率、液限、塑限、CBR 值、压实度等，以及路基沉降完成情况。

7.1.8 应加强既有软土地基分析评价工作，主要分析与评价内容包括：

- a) 通过调查既有公路软土路基的工后沉降情况，分析既有公路软土地基的固结度、固结系数、压缩系数、强度增长或剩余沉降等；
- b) 分析评价拓宽路基与既有路基的稳定性和差异沉降，以及拓宽路基对既有路基稳定和沉降的影响程度，并应提出拓宽路堤软土地基处理措施的建议；
- c) 对于软土病害路段，应根据勘察资料综合分析病害成因，评价既有路基的沉降和稳定性状况，对既有软土路基的可利用程度进行分析与评价，提出病害处治建议和选择有效的处治方案。

7.1.9 既有路基拓宽工程软土地基处治方法以换填法和复合地基法为主，在地基处治设计时，应符合下列规定：

- a) 换填法主要适用于软土厚度小于 2.5 m 的软土路段，当软土性质相对较好时，软土换填厚度可适当加深，但应确保既有路基的稳定；
- b) 复合地基法适用于软土厚度大于 2.5 m，且路段长度大于 100 m 的软土路段。当软土性质相对较好时，也可考虑刚度较低的水泥搅拌桩；当软土性质较差时，宜选用刚性桩复合地基；当软土性质特别差时，宜选用带桩帽的桩承式路堤或轻质材料填筑方案等；
- c) 可根据需要在路基底、路堤中部、路床等部位加铺土工加筋材料，增加拓宽软土路基的稳定性，减少新旧路基之间的差异沉降。

7.1.10 采用换填法处治时，应考虑软土基坑开挖对既有路基稳定的影响，基坑开挖时宜根据现场地质条件和旧路填土高度等情况设置临时支护措施。

7.1.11 采用换填法处治时，换填材料应优先选用片石、碎石或硬质挖方石碴等水稳定性和透水性好的优质材料；在硬质换填材料匮乏的路段，施工常水位以下采用优质换填材料，施工常水位以上部位可适当放宽条件采用合格粗粒土填筑。

7.1.12 换填法可参照图4设计；复合地基法可参照图5设计。

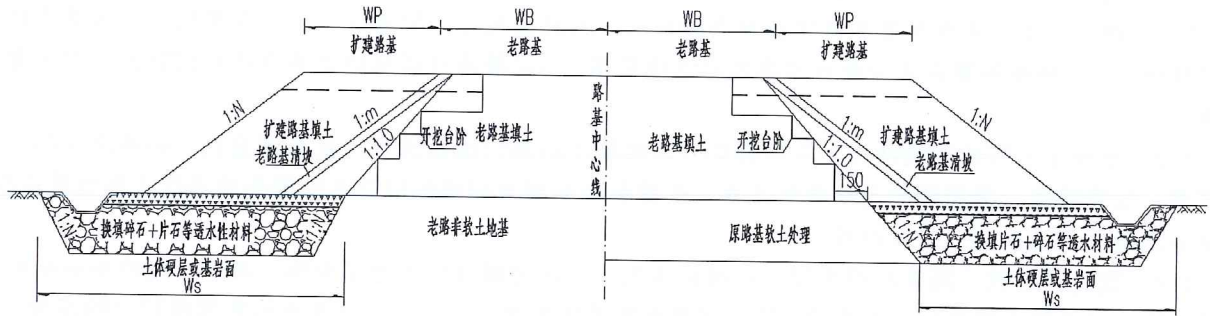


图4 路基拓宽换填法处治设计示意图

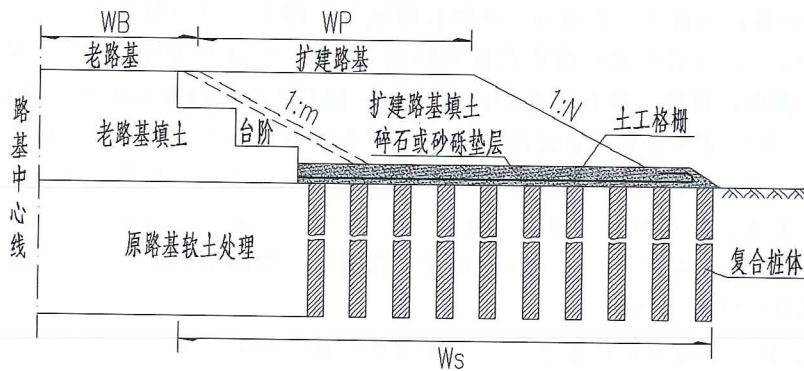


图5 路基拓宽复合地基处治设计示意图

7.2 桥头路段

7.2.1 桥梁方案布置时，应避免将桥头布置在深厚软土路段。

7.2.2 桥头软基勘察除按常规软土路段的勘察要求执行外，应充分利用桥台钻孔资料成果，加强取样试验与现场原位测试工作。

7.2.3 桥头路段设计时应充分考虑桥台结构、桥头路堤和软土地基处理等3个方面协调关系，采取相应的衔接措施，避免桥台推移，实现桥台与台后路堤的平顺过渡。

7.2.4 桥头路段路基设计应符合下列要求：

- 桥台与路线斜交角度较大时，应加强结构措施，不得出现土压力不平衡造成的位移和开裂；
- 搭板长度不宜小于8m；
- 桥台锥坡范围存在软土时，应进行软土处治；
- 应合理控制桥头软土路段的填土高度，不宜大于10m，避免桥头工后沉降过大或地基处理难度过大、造价过高；
- 桥头台背回填材料应选择透水性好、易压实、固结完成快、压缩变形小的砂性土、砂砾土、碎石土等填料；有特殊要求时，可采用级配碎石或无砂大孔混凝土；
- 当桥头位于深厚软土路段时，也可采用气泡混合轻质土以减少桥台侧压力和路基沉降。

7.2.5 桥头软土地基处治典型设计示意详见图 6，应符合下列要求：

- 采用换填法处理时，应彻底清除软土层，换填材料应优先选用硬质挖方料、片石、碎石、砂砾等透水性和稳定性较好的材料；
- 采用复合地基法处理时，应设置过渡路段，过渡路段通常采用变桩距、桩长等方式来调整变形协调过渡，过渡路段长度不宜小于 $(2H+3)$ m (H 为路堤填土高度)。

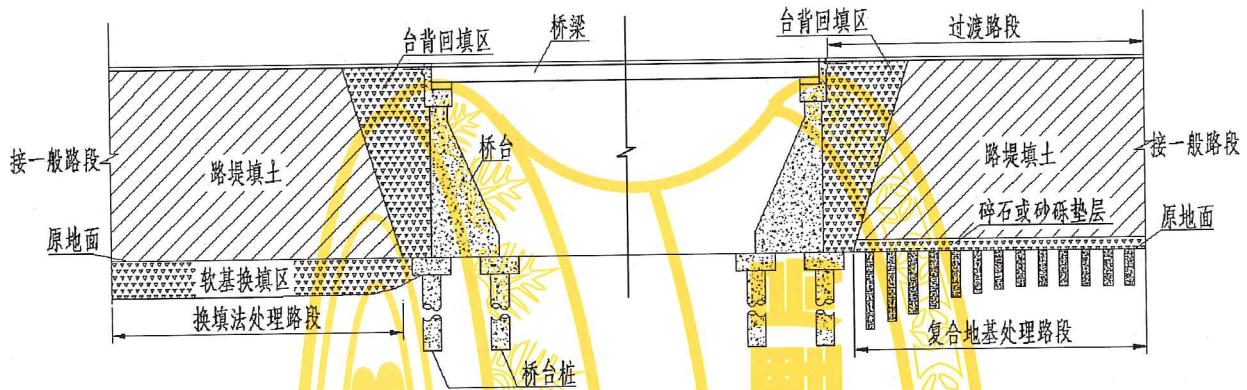


图6 桥头软土地基处治典型设计示意图

7.2.6 软基处治施工应优先进行桥台附近的软土地基处理和路堤填筑，从桥台向路堤方向施工，以争取足够的预压时间。

7.2.7 桥台宜采用反开挖施工，桥台反开挖施工时，应减少反开挖范围，避免大范围的扰动，反开挖施工完成后，应及时回填并继续预压至路面施工。

7.3 涵洞（通道）路段

7.3.1 在地质选址时，宜将涵洞布置在地质条件较好的坡脚地段，不宜将涵洞布置在范围广、厚度大的软土路段。

7.3.2 涵洞（通道）软基勘察除按一般按常规软土路段的勘察要求执行外，应根据软土厚度、性质、填土高度等条件布置典型横向勘探线，勘探点数量宜为 2~3 个，勘探点深度应进入持力层 1 m~2 m，控制性勘探点深度应进入持力层 3 m~5 m。

7.3.3 涵洞（通道）路段设计时应处理好涵洞、台背及软土地基处理之间的协调关系，应采取相应的措施，以实现涵洞（通道）结构物与相邻路段的平顺过渡。

7.3.4 涵洞（通道）路段路基设计应符合以下要求：

- 软土地质条件较差的路段涵洞（通道）宜采用钢筋混凝土箱涵；
- 软土地质条件相对较好或经处理后的软土地基可采用盖板涵，盖板涵宜采用整体式基础；
- 明涵两侧应设置长度不小于 6 m 的搭板。

7.3.5 涵洞（通道）路段软土地基处治典型设计可参考图 7 进行设计，应符合下列要求：

- 采用换填法处理时，应彻底清除软土层，换填材料应优先选用硬质挖方料、片石、碎石、砂砾等水透水性和稳定性较好的材料；
- 采用复合地基法处理时，应设置过渡路段，过渡路段通常采用变桩距、桩长等方式来调整变形协调过渡，过渡路段长度不宜小于 $(2H+0.5)$ m (H 为路堤填土高度)。

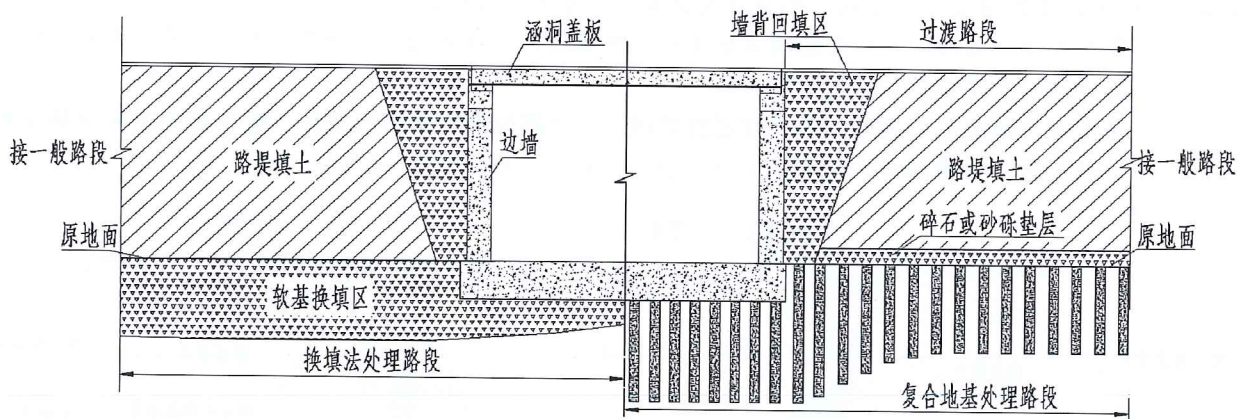


图7 涵洞（通道）路段软土地基处治典型设计示意图

7.3.6 软基施工应优先进行涵洞（通道）附近的软土地基处理和路堤填筑，以争取足够多的预压时间；涵洞（通道）台背回填采用反开挖施工时，应进行两侧对称回填施工，确保回填质量。

8 公路软土地基处治方法

8.1 换填法

8.1.1 换填法可选用全换填法和浅层换填法，其适用范围应符合下列规定：

- a) 换填法适用于换填材料充足、弃土场容易解决的路段；
- b) 对于路线地表为深厚残积细粒土，挖方区很少揭示基岩，且软土基坑地下水丰富路段时，施工常水位以下宜考虑采用片石、碎石、砂砾等材料进行换填；
- c) 地基承载力不足的浅层软土路段，软土厚度不大于 4.0 m，对于软土面积不大的山间沟槽、谷地的换填深度可适当增大；
- d) 软土基坑开挖不影响上边坡稳定，不严重影响周围环境及附近设施的安全运行的路段。

8.1.2 换填基坑底宽不应小于路堤底宽及坡脚排水边沟的范围，最小距离为排水边沟以外 1.0 m；软土基坑临时开挖坡率应满足稳定性要求，参考坡率为 1:0.5~1:1；基坑附近有重要设施时，可考虑做临时基坑防护。

8.1.3 对地层岩性为碎屑岩、碳酸盐岩、花岗岩等山区沟谷相软土，换填材料选择应贯彻因地制宜原则，应优先考虑利用挖方料，地下水匮乏的路段可利用透水性、水稳定性较好的合格挖方料换填；对地下水丰富地段，可考虑采用片石+碎石+挖方合格土料的复合式结构进行换填（见图 8），复合式换填应符合以下要求：

- a) 施工常水位以下应采用硬质挖方石渣或片石、碎石、砂砾等材料换填；
- b) 施工常水位以上可根据经济条件选择合格挖方土石料换填或砂石料；
- c) 片石与砂性土之间宜设不小于 30 cm 的调平层，调平层材料可选用级配碎石、未筛分碎石及砂砾等；
- d) 在软基换填期间，施工常水位应低于施工碾压作业面以下不小于 30 cm；
- e) 不应采用炭质岩、膨胀性岩土、高液限土等水稳性差的材料进行换填。

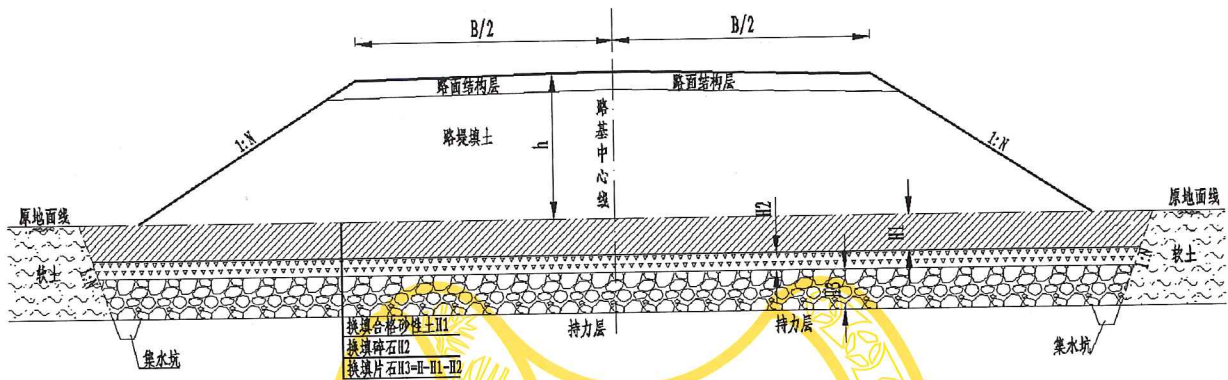


图8 山区沟谷相软土地基复合式换填处治示意图

8.1.4 对于滨海滩涂地区软土，地下水位较高，施工降水困难，可考虑采用海砂+碎石的复合式结构进行换填（见图9），复合式换填应符合以下要求：

- a) 施工常水位以下采用中砂以上粒径的海砂，不得使用粉细砂作为换填材料；
- b) 海砂之上宜设厚度不小于 30 cm 的碎石垫层；
- c) 海砂和碎石的含泥量应小于 5%，渗透性系数大于 6×10^{-2} cm/s。

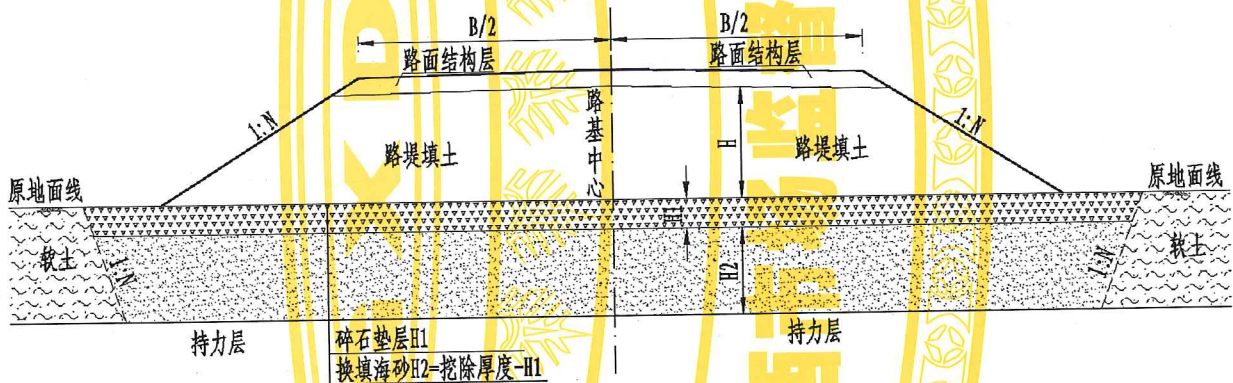


图9 滨海相软土地基复合式换填设计示意图

8.1.5 公路软基段的涵洞、通道及一般路堤，当选用碎石或砂砾垫层对软基进行处治时，垫层的设计需满足构造物或路堤对地基承载力和变形要求，垫层厚度应根据需要置换软土的深度或下卧土层的承载力确定，并符合下式要求：

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{条形基础 } p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2ztg\theta} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{矩形基础 } p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2ztg\theta)(1 + 2ztg\theta)} \dots \dots \dots (3)$$

式中： p_z ——相应于荷载效应标准组合时，垫层底面处的附加压力值（kPa）；

p_{cz} ——垫层底面处土的自重压力值 (kPa)；

f_{az} ——垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值 (kPa)；

b ——矩形基础或条形基础底面的宽度 (m)；

l ——矩形基础底面的长度 (m)；

p_k ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力值 (kPa)；

p_c ——基础底面处土的自重压力值 (kPa)；

z ——基础底面下垫层的厚度 (m)；

θ ——垫层的压力扩散角，可按下表13采用。

表13 垫层压力扩散角 θ

z/b	换填材料		
	中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾、石屑、卵石、碎石、矿渣	黏性土、粉质土	灰土
≤0.25	20	6	28
≥0.50	30	23	

注1：当z/b<0.25时，除灰土取 $\theta=28$ 外，其他材料均取 $\theta=0$ ，必要时宜由试验确定。
注2：当0.25<z/b<0.5时，可内插确定取值。

8.1.6 垫层底面的宽度应满足应力扩散的要求，可按式(4)确定：

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \dots\dots\dots (4)$$

式中： b' ——垫层底面宽度 (m)；

θ ——压力扩散角，按表13取值；当z/b<0.25时，按表13中z/b=0.25取值。

8.1.7 换填法施工应符合以下技术要求：

- a) 正式换填施工前，应先进行清表和开沟排水，利用轻型触探查明地基承载力和确定开挖深度，并宜通过开挖试验确定换填基坑合理边坡值；
- b) 基坑内应设置临时集水井和排水沟，及时抽排坑内积水，将地下水降低至施工常水位；
- c) 开挖到预定开挖深度后，应采用轻型触探核实坑底地基承载力是否满足要求；
- d) 基坑底为斜坡处，应开挖台阶；
- e) 基坑开挖与回填宜分段进行，开挖后应及时组织验收和回填，不应暴露过久或浸水；
- f) 硬质开山石碴、片石、碎石、砂砾等材料可用于水下回填，挖方土石混合料、砂性土等材料应用于施工常水位以上换填；
- g) 回填分层厚度应符合路堤填筑要求，不能分层时，应增加碾压遍数、振冲或强夯等措施。

8.1.8 换填部分应分层检测压实度，片石和碎石的压实程度应按沉降差小于 2mm 控制，其余砂土料压实度应达到 93% 以上，局部困难地段的压实度可适当放宽至 90% 以上，检测方法应符合 JTG F80/1 的相关规定。

8.2 土工合成材料加筋法

8.2.1 存在软土或软弱土地基的路基填挖交界处、高填与陡坡路堤、新旧路基拼接处、路基与桥涵结构物结合处，以及软土路堤、不同地基处理方法交界处等路段，可采用土工合成材料有效预防软土路基的不均匀沉降和增强软土路基的稳定性。

8.2.2 根据不同地质条件、路堤填土高度、软土处治方法等情况，土工合成材料应与砂砾垫层、碎石垫层、复合地基等软弱地基处理措施结合，采用土工合成材料防治不均匀沉降时，应先做好地基处理。

8.2.3 防治路基不均匀沉降时宜采用整体性和耐久性好、强度高、变形小的双向或三向土工格栅、高强土工织物、土工格室等土工材料，主要用于增强软土路基稳定性时，也可采用单向土工格栅或土工格室。土工合成材料性能应满足表 14 要求。

表14 软土地基处治常用土工合成材料要求

材料名称	技术要求
土工格栅、高强土工织物	极限抗拉强度 ≥ 50 kN/m，2%伸长率时的抗拉强度 ≥ 20 kN/m
土工格室	格室片极限抗拉强度 ≥ 20 MPa，焊接处极限抗拉强度 ≥ 20 kN/m，高度 ≥ 10 cm

8.2.4 公路软基处治常用土工格栅与土工格室如图 10 所示，填料为细粒土时可采用土工格栅或土工格室，填料为粒径较大的碎石土或风化料时，宜采用土工格栅，不宜采用土工格室。

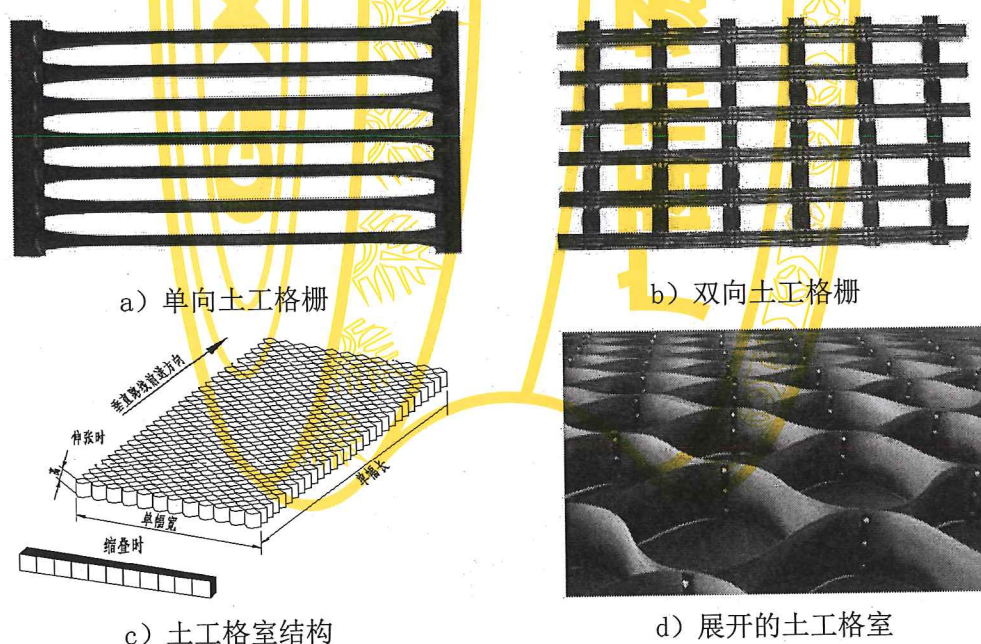


图10 公路软基处治常用土工合成材料示意图

8.2.5 土工合成材料的设计抗拉强度 T_{gc} ，按下式 (5) 确定：

$$T_{gc} = T_s / \lambda_c \dots\dots\dots (5)$$

式中： T_s ——土工合成材料的抗拉强度；

λ_c ——材料强度综合修正系数，对于土工织物取3.0；对于土工格栅取2.0，土工格室可取1.5~2.0。

8.2.6 土工合成材料与路堤填料接触的界面摩擦系数 f_{gs} 可按下列公式估算，对重要工程，当需要进一步校核 f_{gs} 时，应符合 JTG E50 规定的剪切试验方法：

a) 土工织物可按式（6）确定：

$$\text{土工织物 } f_{gs} = 0.9 \text{tg} \varphi_q \dots\dots\dots (6)$$

b) 土工格栅可按式（7）确定：

$$\text{土工格栅 } f_{gs} = 0.667 \text{tg} \varphi_q \dots\dots\dots (7)$$

式中： φ_q ——对无黏性土取土体快剪内摩擦角，对黏性土取考虑粘聚力影响的综合内摩擦角。

8.2.7 土工合成材料的铺设层数、铺设方式、铺设范围，应通过对加筋路堤的稳定性计算、平面滑动稳定性等计算确定。

8.2.8 加筋路堤整体稳定性可采用圆弧条分法公式（8）进行计算：

$$F_B = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cos \theta_i \tan \varphi_{qi} + c_{qi} \Delta L_i) R + \sum_{j=1}^m (T_j Y_j + T_j \tan \varphi_{qi} X_i)}{\sum_{i=1}^n (w_i \sin \theta_i) R + \sum_{i=1}^n Q_i Y_{qi}} \dots\dots\dots (8)$$

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 (°)， c 由直剪快剪试验确定；

T_j ——第 j 层土工合成材料设计抗拉强度 (kN/m) ；

Q_i ——第 i 土条所受地震水平力 (kN/m) ；

X_j ——第 i 土条中心距滑弧圆心的水平距离；

Y_j ——第 j 层 c 土工合成材料距滑弧圆心的垂直高度；

ΔL_i ——第 i 条滑弧的弧长 (m) ；

y_{Qi} ——第 i 土条底部距滑弧圆心的垂直高度；

R ——滑弧半径；

θ_i ——第 i 条滑弧的仰角。

8.2.9 薄层软基可采用水平滑动面法计算抗滑稳定安全系数，可按式 (9) 确定，计算示意图见图 11。

$$F_p = \frac{P_p + P_b + T_{gc}}{P_{ag} + P_{as}} \dots \dots \dots (9)$$

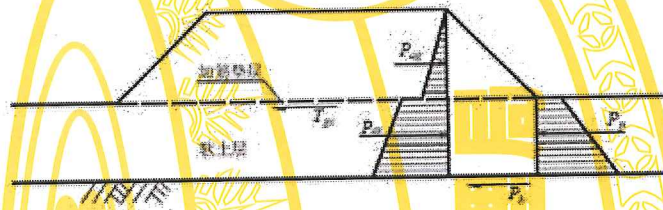


图11 水平滑动稳定验算图

式中： F_p ——抗滑稳定安全系数；

P_p ——被动土压力 (kN/m)；

P_b ——软土层底部抗滑力 (kN/m)；

T_{gc} ——土工合成材料设计抗拉强度 (kN/m)；

P_{ag} ——加筋垫层以上堤体主动土压力 (kN/m)；

P_{as} ——软土层主动土压力 (kN/m)。

8.2.10 碳酸盐岩红粘土地区的软土多为上硬下软结构，当上部硬壳层有一定厚度，下部软弱层厚度较小，且性质相对较好时，清表后可铺设厚约 60 cm 碎石垫层，垫层顶按竖向 50 cm 间距铺设 1~3 层土工格栅或土工格室，典型结构如图 12 所示，土工格栅抗拉强度宜 ≥ 50 kN/m，当采用该处治方案时，应进行路基稳定与沉降验算，路基变形和软弱下卧层验算应满足规范要求。

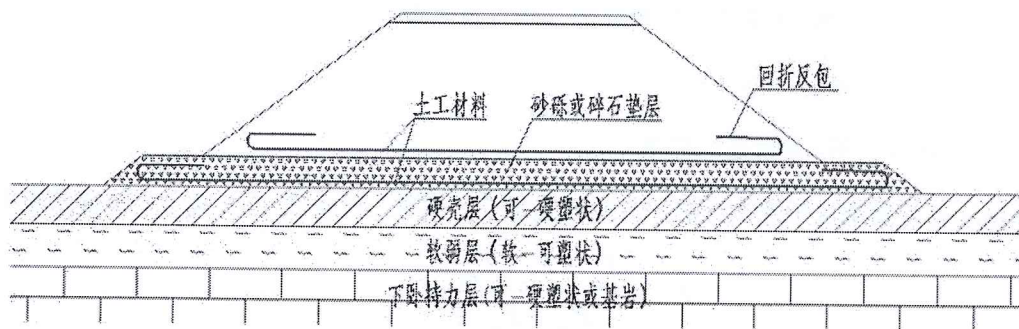


图12 上硬下软地基土工合成材料加筋典型结构图

8.2.11 当上部软弱土为软~可塑含砂黏性土或松散砂性土、性质相对较好、厚度较小时,可考虑清表后,铺设厚约60cm碎石垫层,垫层顶按竖向50cm间距铺设1~3层土工格栅或土工格室,典型结构如图13所示,土工格栅抗拉强度宜 ≥ 50 kN/m。

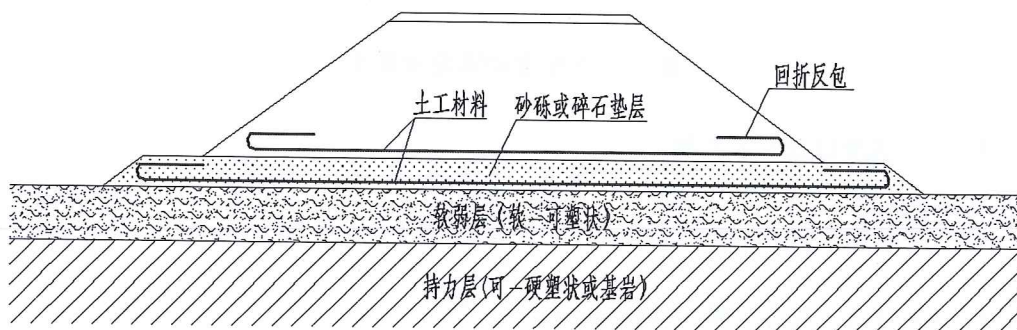


图13 上软下硬地基土工合成材料加筋典型结构图

8.2.12 用于减小公路改建工程新旧路基差异沉降时,土工合成材料宜铺设在路基的底部和路床处,新老路基结合部位应进行搭接,搭接长度宜不小于2.0m,如图14所示,土工格栅或土工格室的铺设层数应根据软土厚度、性质及填土高度综合确定,路基底部宜铺设1~2层,当拓宽路基的填土高度较大时,应根据计算差异沉降量大小,在路基中部按一定间距增设一定层数的土工合成材料。

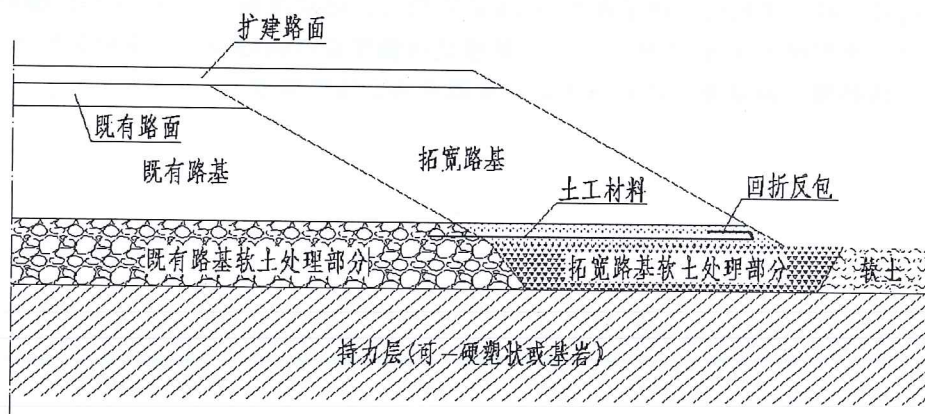


图14 拓宽路基不均匀沉降防治典型结构图

8.2.13 土工合成材料可用于不同软土地基处理方法的过渡路段，宜铺设在交界处的路基底部，不同地基处理方法路段内铺设长度不宜小于 10 m，典型结构如图 15 所示，必要时还可在路床部位设置 1~2 层土工合成材料。

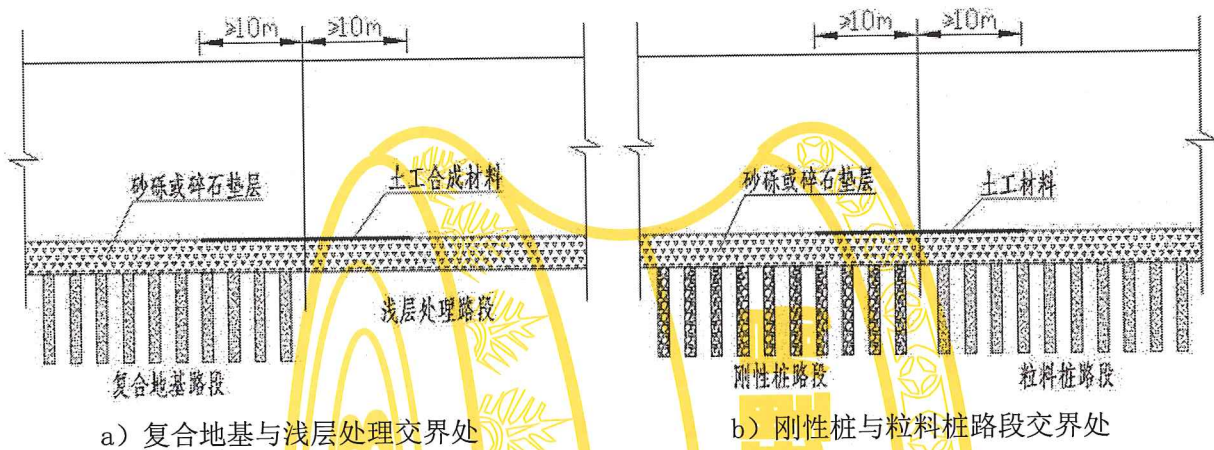


图15 软基不同处理方法过渡路段典型结构图

8.2.14 土工合成材料可用于防治桥台、涵洞等构造物与一般软土路基间的不均匀沉降，可在 U 型桥台或涵洞基础顶面铺设土工格栅；对于桩柱式桥台，可在桥台锥坡及桥台范围内铺设土工格栅。

8.2.15 土工合成材料可与粒料桩、加固土桩、刚性桩等复合地基处理措施相结合，在复合地基桩顶的碎石或砂砾垫层部位加铺 1~N 层土工格栅或土工格室，铺设宽度宜与路基底部同宽。

8.2.16 土工合成材料施工应符合以下技术要求：

- 土工合成材料不应露天堆放，避免暴晒或雨淋，在铺筑土工合成材料前和施工中均应保证材料的完好性，不应使用有断裂或破损的土工合成材料；
- 土工合成材料铺设时，应将强度较高的方向布置于主要受力方向，在地形平坦或横向填挖交界的软基路段，土工合成材料主要受力方向应垂直于路线方向；在纵向填挖交界地段，土工合成材料主要受力方向应平行于路线方向；
- 铺设土工合成材料的土层表面应平整，表面不得有碎、块石等坚硬凸出物；在距土工合成材料层 8 cm 以内的路堤填料其最大粒径不得大于 6 cm；
- 土工合成材料需要搭接的部位，叠合长度不应小于 20 cm，不同层面的搭接位置应相互错开，应采用专用锁扣、铁丝绑扎或 U 型钢钉等联接方式，土工合成材料的铺设不允许有褶皱，铺设时应按照有关规范操作；
- 土工合成材料在铺设完毕未填土前，机械设备不得在上面行驶，填筑时不得直接将填料卸载在土工合成材料上，在有一定坡度的填挖交界处填筑时，应从低处往高处分层摊铺碾压；
- 土工合成材料铺设完毕至填筑覆盖的时候不宜大于 36 h。

8.2.17 对加筋土工合成材料的检验，需根据设计文件所要求的设计指标，检验项目和频率可按表 15 执行，同时应满足 JTG/T D32 相关技术要求。

表15 土工合成材料加筋检验项目

检验项目	单位面积质量	厚度	孔径	几何尺寸	拉伸强度	节点焊接强度	直接剪切摩擦	拉拔摩擦
检验选择	☆	☆	★	★	★	★	★	★
检验频率	1次/10 000 m ²					1次/1批		
注1：“★”为必检项目，“☆”为选检项目。 注2：试验频率亦可根据工程规模、所用数量，由设计单位或监理单位确定。 注3：工地试验频率按所购材料的批次进行，如每批大于5 000 m ² ，则以5 000 m ² 为一批。								

8.3 强夯与强夯置换法

8.3.1 强夯法可用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土、杂填土、素填土及冲填土等软弱地基，处治深度宜不大于10 m。

8.3.2 强夯置换法可分为抛石挤淤强夯置换法和强夯置换墩法，适用于高饱和度的松散砂土、粉土或流塑~软塑状的淤泥、淤泥质土等地基，处治深度不宜大于7 m。

8.3.3 对临近建筑物、设备、地下管线等设施会产生有害影响时，应慎重考虑采用强夯法，当需采用强夯法时，应采取防震、隔振或其他必要措施。

8.3.4 采用强夯法处理后的地基应满足沉降与稳定计算的要求，强夯置换墩复合地基的沉降与稳定计算方法与粒料桩相同，桩土应力比可取2~4。

8.3.5 强夯法宜根据软土厚度、性质、承载力要求及周围环境（建筑物、设备及地下管线等）选择合理、有效的夯实处治方案，公路软土地基常用的强夯与强夯置换适用条件及典型处治方案可参考表16进行设计。

表16 强夯法适用条件及典型处治方案

分类名称	典型适用条件	典型处治方案示意图
①一般软弱土强夯	主要适用于地势较低的旱地，地下水距离地表有一定距离，软弱土以低饱和度的粉质粘土、粉土或砂性土为主，呈软~可塑状，软弱土性质较差，沉降与稳定不满足路基要求，可采用普通强夯法处理，强夯沉降区可回填水稳定性和透水性较好的回填材料	

表 16 强夯法适用条件及典型处治方案（续）

分类名称	典型适用条件	典型处治方案示意图
②洞穴软弱土强夯	主要适用于存在土洞、或浅层采空区的地势低洼段，软弱土以软~可塑状的黏性土为主，软弱土性质较差，且存在浅层洞穴，可采用普通强夯法补强，排除洞穴安排隐患，强夯沉降区可回填水稳定性和透水性较好的回填材料	
③抛石挤淤强夯置换	主要适用于地势低洼的山间沟谷、水塘及滨海汲水路段，软土以流塑~软塑状淤泥、泥炭土为主，性质极差，触变性强，软土厚度3m~5m，若采用换填法，基坑开挖困难，开挖深度不易到底，基坑不易成形，可预铺一定厚度片石，再使用强夯进行补强夯实。	
④浅层开挖区+抛石挤淤强夯置换	主要适用于地势低洼的山间沟谷和水田段，软土以流~软塑状淤泥、淤泥质土为主，性质差，软土厚度3m~6m，若采用换填法基坑开挖困难，开挖深度不易到底，可先浅层开挖2m~3m，然后抛填片石，再使用强夯进行补强夯实，浅层开挖区回填水稳定性和透水性较好的回填材料	
⑤强夯片石墩置换	主要适用于地势低洼的山间沟谷、水田、水塘等路段，软土以流~软塑状淤泥、淤泥质土为主，性质差，软土厚度3m~7m，可采用高夯击能将铺于地表的片石、碎石材料以点夯的方式不断夯入软基中，在夯坑中采用多次填入和重复夯击，直到片石、碎石穿过软土达到下部持力层	

8.3.6 强夯法与强夯置换法处理范围应符合下列要求：

- 强夯法处理范围应超过路堤坡脚，每边超过坡脚的宽度不宜小于 3 m；
- 抛石挤淤强夯置换处理范围应超过坡脚宽度不宜小于 4 m~5 m；
- 强夯置换桩处理范围应为坡脚外增加 1~2 排置换桩。

8.3.7 夯击能 G 和有效加固深度 d 应考虑工程技术要求、地质条件、现场试夯或当地经验等因素，按下列要求确定：

- 可按改进的 Menard 经验公式 (10) 和式 (11) 进行估算：

$$G = 10mh \dots\dots\dots (10)$$

$$d = \alpha\sqrt{mh} \dots\dots\dots (11)$$

式中： G ——夯击能(kN·m)；

d ——加固深度(m)；

m ——夯锤重量(t)；

h ——夯锤落距(m)；

α ——修正系数，取值范围为 0.34~0.80，与土质条件、地下水位、夯击能大小、夯锤底面积等有关，根据现场试夯结果确实。

b) 当初步设计缺少试验资料和经验时，可参考表 17 确定相关参数：

表17 强夯法有效加固深度

单击夯击能 (kN·m)	碎石土、砂土等粗颗粒土	粉土、黏性土等细粒土
1 000	4.0 m~5.0 m	3.0 m~4.0 m
2 000	5.0 m~6.0 m	4.0 m~5.0 m
3 000	6.0 m~7.0 m	5.0 m~6.0 m
4 000	7.0 m~8.0 m	6.0 m~7.0 m
5 000	8.0 m~8.5 m	7.0 m~7.5 m
6 000	8.5 m~9.0 m	7.5 m~8.0 m
8 000	9.0 m~9.5 m	8.0 m~8.5 m
10 000	9.5 m~10.0 m	8.5 m~9.0 m
12 000	10.0 m~11.0 m	9.0 m~10.0 m

8.3.8 强夯置换墩法的夯锤宜选用圆柱状，锤重可选 10 t~60 t，锤底静接地压力可取 80 kPa~300 kPa；其余强夯法夯锤可选用圆饼状或短柱状，锤重宜采用 10 t~40 t，锤底静接地压力可取 25 kPa~40 kPa，锤底面积宜按土的性质确定，对砂性土宜为 3 m²~4 m²，对黏性土不宜小于 6 m²。夯锤落距宜为 8 m~25 m。

8.3.9 强夯的有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定，当初步设计缺少试验资料和经验时，一般强夯法可参考表 17 确定加固深度，强夯置换法可参考表 18 确定加固深度。

- 8.3.12 两遍夯击之间的间隔时间应根据土中超静孔隙水压力的消散时间确定，并应符合下列要求：
- 当缺少实测资料时，可根据地基土的渗透性确定，对于渗透性较差的黏性土地基，间隔时间不应少于3周~4周，粉土地基的间隔时间不宜小于2周；
 - 对于渗透性好的碎石土及砂土地基可连续夯击；
 - 若夯击过程中观察到弹簧情况，或周遭地表隆起鼓包、翻浆等现象，需增大夯击时间间隔。
- 8.3.13 强夯置换法的强夯置换材料可采用硬质开山石渣、片石、碎石等材料，粒径不宜大于0.5m；强夯片石墩置换材料宜选用粒径较小的硬质片石或碎石，粒径大于0.3m的颗粒含量不宜超过30%，含泥量不宜超过总质量的5%。
- 8.3.14 强夯法施工应符合下列要求：
- 当强夯施工振动对临近建筑物、设备、地下管线等设施会产生有害影响时，应采取防震、隔振或其他必要措施，宜设置监测点；
 - 当场地地下水水位较高，夯坑内积水影响施工时，宜采用挖沟排水、人工降低地下水水位或铺填一定厚度的透水材料，及时将场地或夯坑内积水排出；
 - 强夯施工顺序可按平面“由内而外，先中间后四周”或“单向前进”的原则；处治深度按“先深后浅”的原则，即先加固深层土，再加固中层土，最后加固浅层土。当周边有需要保护的建筑设施时，应从建筑设施侧向远处移动。
- 8.3.15 强夯与强夯置换法质量检测应符合以下要求：
- 检测时间间隔应根据地基土性质不同而异，碎石和砂土地基土宜取7d~14d，低饱和度的粉土和黏性土地基土宜取14d~28d，其它高饱和度地基土间隔时间还应适当延长；
 - 检测方法应根据软土性质及设计要求选择采用原位测试、室内土工试验及物探等方法；
 - 对于简单场地上的一般强夯法，可选用平板荷载、标贯、动探等原位测试方法；
 - 对于抛石挤淤强夯置换法，应采用面积较大的平板进行荷载试验，同时宜选用钻探、动探、物探面波等方法进行置换厚度检测；
 - 对于强夯置换墩法，除需了解强夯墩间土的性状外，还需了解墩的直径和深度，强夯置换墩处理后的复合地基承载力可采用复合地基载荷试验确定。

8.4 粒料桩法

- 8.4.1 粒料桩分为振冲粒料桩和沉管粒料桩，粒料桩复合地基处治应符合下列要求：
- 粒料桩适用于处治松散砂土、粉土、黏性土、填土等厚度较大的软弱地基土；对砂土、粉土和碎石土主要起置换和挤密作用；对黏性土和填土，以置换作用为主，兼有不同程度的挤密和排水固结的作用，也可用于液化地基处理；
 - 粒料桩适用于粒料来源丰富的灰岩、白云岩、花岗岩地区及砂砾丰富的大型河流沿线地段；
 - 粒料桩可采用振冲置换法或振动沉管法成桩，振冲粒料桩可用于十字板抗剪强度大于15kPa的地基土，振动沉管粒料桩可用于加固十字板抗剪强度大于20kPa的地基土或标准贯入试验击数大于3击以上的黏性土地基；
 - 黏性土路段应重点获取地基土的抗剪强度和标准贯入试验锤击数，砂土、素填土等应获取地基土的孔隙比、密实程度和标准贯入试验锤击数等相关参数，作为处治方案设计与计算的依据。
- 8.4.2 粒料桩的长度应根据稳定与沉降计算确定，具体应符合下列技术要求：
- 桩长一般宜采用4m~12m，最长不宜大于15m。当软弱土层较薄时，桩长应按穿过软弱土层至相对硬层确定；当软弱土层深厚时，应按沉降与稳定计算确定；当以稳定性控制的工程桩长应穿过潜在危险面以下至少2m；
 - 对于软土地基为软塑~可塑~硬塑渐变型结构，当桩端持力层选用厚度较大的可塑状土层时，应充分论证桩长进行持力层长度，避免施工期发生大量桩长增加变更。

表18 强夯置换有效加固深度

单击夯击能 G ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	有效置换深度 (m)
3 000	3.0~4.0
6 000	5.0~6.0
8 000	6.0~7.0
12 000	8.0~9.0

8.3.10 夯击次数应通过现场试夯来确定，以夯坑的压缩量最大，夯坑周围地面隆起最小为原则，按现场试夯得到的夯击次数与沉降量的关系曲线确定，最后两击的平均夯沉量应满足表 19 的要求，且夯坑周围不应发生过大的隆起，不因夯坑过深而发生提锤困难。

表19 最后两击的平均夯沉量

单击夯击能 G ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	最后两击的平均夯沉量 (mm)
$G < 2\,000$	≤ 50
$2\,000 < G \leq 4\,000$	≤ 100
$4\,000 < G \leq 6\,000$	≤ 150
$6\,000 < G \leq 8\,000$	≤ 180
$8\,000 < G \leq 12\,000$	≤ 200

8.3.11 强夯点可采用正方形或等边三角形布置，夯击遍数应根据地基土性质确定，并应符合下列要求：

- 粗颗粒、渗透性好的地基土夯击遍数可适当减少，细颗粒、渗透性差的地基土夯击遍数可适当增加；
- 一般第一遍夯击点间距可取夯锤直径的 2.5~3.5 倍，第二遍夯击点位于第一遍夯击点之间，第三遍夯击点位于第一遍与第二遍夯击点之间，每层第三遍全部夯击完成后，再改用小夯锤满夯，锤印搭接应满足 $0.25D$ (D 为夯锤直径)，以确保夯实效果；
- 强夯典型平面布置示意可参考图 16 执行。

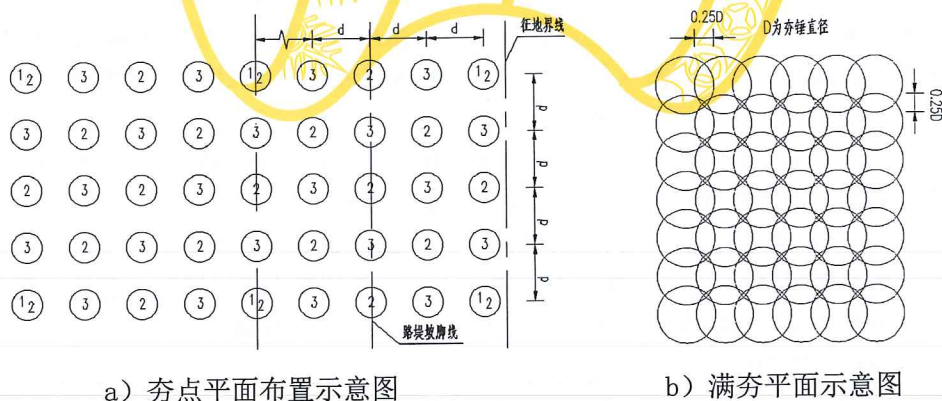


图16 强夯法典型平面布置示意图

8.4.3 粒料桩桩径可根据地基土性质、成桩方式及设备等因素确定，沉管粒料桩的桩径宜为 0.5 m，振冲粒料桩的桩径宜为 0.8 m~1.2 m。

8.4.4 粒料桩间距应根据稳定与沉降计算、现场试验等确定，并应符合下列规定：

- a) 振冲粒料桩间距宜根据地质条件和振冲器功率大小确定，30 kW 振冲器布桩间距宜为 1.3 m~2.0 m；55 kW 振冲器布桩间距宜为 1.4 m~2.5 m；75 kW 振冲器布桩间距宜为 1.5 m~3.0 m；
- b) 沉管粒料桩间距宜为 1.0 m~1.5 m，不宜大于 4 倍桩直径；
- c) 初步设计时，可按下列情况确定：
 - 1) 对松散粉土、砂土地基，按等边三角形布桩的桩间距可用公式 (12) 估算，按正方形布桩的桩间距可按公式 (13) 估算：

$$s = 0.95\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \dots\dots\dots (12)$$

$$s = 0.89\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \dots\dots\dots (13)$$

$$e_1 = e_{\max} - D_{r1}(e_{\max} - e_{\min}) \dots\dots\dots (14)$$

式中：s——粒料桩间距 (m)；

d——粒料桩直径 (m)；

ξ ——修正系数，考虑振动密实作用时，可取 1.1~1.2；不考虑振动密实作用时，可取 1.0；

e_0 ——地基处理前砂土的孔隙比，可根据原状土样和原位测试试验确定；

e_1 ——地基处理后砂土的孔隙比，可根据原状土样和原位测试试验确定；

e_{\max} 、 e_{\min} ——砂土的最大、最小孔隙比；

D_{r1} ——地基挤密后要求砂土达到的相对密实度，可取 0.70~0.85。

面积置换率可按公式 (15) 确定：

$$m = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \dots\dots\dots (15)$$

式中：m——面积置换率。

- 2) 对黏性土地基，按等边三角形布桩的桩间距可用公式 (16) 估算，按正方形布桩的桩间距可按公式 (17) 估算：

$$s = 1.08\sqrt{A_e} = \sqrt{\frac{d^2}{1.05^2 m}} \dots\dots\dots (16)$$

$$s = \sqrt{A_e} = \sqrt{\frac{d^2}{1.13^2 m}} \dots\dots\dots (17)$$

$$m = \frac{d^2}{d_e^2} = \frac{A_p}{A_e} \dots\dots\dots (18)$$

式中： A_e ——单桩有效处理面积 (m)；

d_e ——单桩有效直径 (m)，等边三角形布桩 $d_e = 1.05s$ ，正方形布桩 $d_e = 1.13s$ ，矩形布桩 $d_e = 1.13\sqrt{s_1s_2}$ ， s 、 s_1 、 s_2 分别为桩间距、纵向桩间距和横向桩间距；

A_p ——单桩截面积 (m²)。

8.4.5 粒料桩处治后的地基承载力特征值应符合下列规定：

- a) 粒料桩复合地基承载力特征值宜通过现场单桩复合地基或多桩复合地基荷载试验确定；
- b) 若进行了单桩荷载试验和桩间土荷载试验，则可按式 (19) 计算复合地基承载力；
- c) 受工程条件所限，难以通过荷载试验获得复合地基或桩体与桩间土的承载力时，重大工程初步设计阶段及中小型工程可根据地基天然土质的勘察资料，结合工程实践经验数据，按公式 (20) 和 (21) 计算复合地基承载力。

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1-m)f_{sk} \dots\dots\dots (19)$$

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} \dots\dots\dots (20)$$

$$n = \frac{f_{pk}}{f_{sk}} = \frac{1}{m} \left(\frac{f_{spk}}{f_{sk}} - 1 \right) + 1 \dots\dots\dots (21)$$

式中： f_{spk} ——复合地基承载力特征值 (kPa)；

f_{pk} ——桩体承载力特征值 (kPa)，宜通过单桩荷载试验确定；

f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值 (kPa)，宜按当地经验取值，当无经验时，一般黏性土可取天然地基承载力特征值，松散砂土、粉土可取1.2~1.5倍天然地基承载力特征值；

n ——复合地基桩土应力比，黏性土可取2~5，砂土和粉土可取1.5~3；当桩底土质好，桩间土质差时可取高值，相反可取低值。

8.4.6 粒料桩复合地基的路堤整体抗剪稳定系数计算时，复合地基内滑动面上的抗剪强度可按公式 (22) ~ (23) 计算。

$$\tau_{ps} = m\tau_p + (1-m)\tau_s \dots\dots\dots (22)$$

$$\tau_p = \sigma \cos \alpha \tan \varphi_c \dots\dots\dots (23)$$

式中： τ_{ps} ——粒料桩复合地基的抗剪强度 (kPa)；

τ_p ——桩体部分的抗剪强度 (kPa)；

τ_s ——地基土的抗剪强度 (kPa)；

σ ——滑动面处桩体的竖向应力 (kPa)；

α ——滑动面切面与水平面夹角 (°)；

φ_c ——碎石桩的内摩擦角，桩料为碎石时可取38°，桩料为卵石、圆砾、砂砾时可取35°，

桩料为砂时可取28°。

8.4.7 粒料桩复合地基变形计算可采用分层总和法按式(24)计算，地基变形计算深度应大于复合土层的深度：

$$S = \psi_s S' = \psi_s \sum_1^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \dots \dots \dots (24)$$

式中： p_0 ——相应于作用路基基底处的附加压力 (kPa)；

E_{si} ——基底下第*i*层土的压缩模量 (MPa)，加固区取复合土层的压缩模量，加固区以下取天然土层的压缩模量；

z_i, z_{i-1} ——加固区底面至第*i*层土、第*i*-1层土底面的距离 (m)；

$\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ ——基底至第*i*层土、第*i*-1层土底面范围内平均附加系数，可根据规范GB 50007附录K查询取值；

ψ_s ——沉降计算经验系数，可根据下表取值：

表20 沉降经验系数表

\bar{E}_s	4.0	7.0	15.0	20.0	35.0
ψ_s	1.0	0.7	0.4	0.25	0.2

8.4.8 复合地基土层的分层与天然地基相同，各复合土层的压缩模量等于该天然地基压缩模量的 ξ 倍，可按式(25)计算：

$$E_{sp} = \xi E_s \dots \dots \dots (25)$$

$$\xi = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \dots \dots \dots (26)$$

式中： E_s ——天然地基压缩模量 (MPa)；

E_{sp} ——复合地基加固区的压缩模量 (MPa)；

f_{spk} ——基底复合地基承载力特征值 (kPa)；

f_{ak} ——基底第一层土的天然地基承载力特征值 (kPa)。

8.4.9 复合地基变形计算深度范围内压缩模量的当量值 \bar{E}_s 应按式(27)计算：

$$\bar{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{j=1}^m A_j}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{E_{spi}} + \sum_{j=1}^m \frac{A_j}{E_{sj}}} \dots\dots\dots (27)$$

A_i ——复合地基加固区第 i 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值；

A_j ——复合地基加固区以下第 j 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值；

E_{spi} ——复合地基加固区第 i 层土的压缩模量 (MPa)；

E_{sj} ——复合地基加固区以下第 j 层土的压缩模量 (MPa)。

8.4.10 粒料桩处治范围应根据公路等级和场地地质条件确定，路堤两侧应超过坡脚宽度为 1~3 排桩，地质条件较好处取小值，地质条件差处取大值。粒料桩布置典型横断面示意可参考图 17。

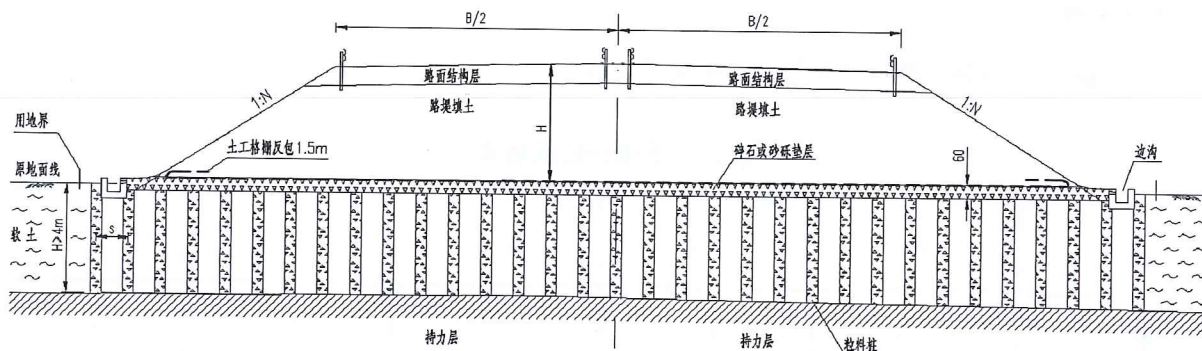


图17 粒料桩布置典型横断面示意图

8.4.11 应在粒料桩桩顶设置一层与粒料桩相连接的排水垫层，根据土质条件和填土高度情况，可考虑在垫层中间或顶部铺设 1~2 层土工格栅或土工格室等土工合成材料，路堤填高 10 m 以下可铺设 1 层，填高 10 m 以上可考虑适当增加加筋层数；土工合成材料应具有较高的抗拉强度；垫层材料可采用碎石或砂砾，其厚度宜为 60 cm，粒料中小于 5 mm 部分的含泥量不宜大于 5%，渗透系数宜大于 1×10^{-3} cm/s。

8.4.12 桩料选择应遵循就地取材原则，可采用碎石、卵石、圆砾、砂砾等材料，宜以粒径 20 mm~80 mm 的硬质岩的碎石或卵石为主，其中 20 mm~50 mm 粒径质量宜占粒料总质量的 50% 以上，不宜使用单一粒径桩料，可部分掺砂砾，含泥量不得大于 5%，不应选用崩解性泥岩或页岩等软质岩石料作为桩料。

8.4.13 在计算所需粒料方量时，应考虑充盈系数，粒料桩的充盈系数应通过试桩确定，初步设计时，如缺少地方工程实践经验，充盈系数可根据地基土质情况取 1.2~1.4。

8.4.14 振冲粒料桩的施工注意事项可参考规范 JTG/T D31 和规范 JGJ 79 相关要求，沉管粒料桩施工应符合下列要求：

- a) 沉管粒料桩可采用振动沉管或锤击沉管等成桩法，临近房屋建筑时，不宜采用锤击成桩法；
- b) 施工前应进行成桩工艺和成桩挤密试验，当成桩质量不满足设计要求时，应进行动态调整相关设计与施工参数；
- c) 对于黏性土地基，打桩顺序宜从中间向外围或间隔跳打；对于砂土地基，打桩顺序宜从外围或两侧向中间进行；在邻近建筑物或重要设施时，应背离建筑设施方向进行；
- d) 成桩时应在套管上画出明显标尺以控制桩长深度，需要留振时，留振时间宜为 10 s~20 s，拔管速度宜控制在 1.5 m/min~3.0 m/min；
- e) 粒料桩施工后，应将表层的松散层挖除或碾压夯实，然后再铺设砂石垫层。

8.4.15 粒料桩质量检测应符合以下规定：

- a) 施工后，应间隔一定时间方可进行质量检测。对淤泥质土、黏土、粉质黏土等黏性土地基质量检测间隔时间可取 28 d~30 d，对于粉土地基可取 21 d~28 d，对于砂土地基可取 14 d~21 d；
- b) 成桩质量检测时，可采用重型动力触探检测桩身长度和密度，抽检频率宜为总桩数的 0.5%~2%，要求贯入量 10 cm 时，碎石桩料锤击数不小于 5 击，砂砾桩料锤击数不小于 10 击；
- c) 当需要检验桩间土挤密效果时，可在三角形或矩形中心采用标准贯入试验，静力触探试验、或其他原位试验方法进行检测；
- d) 竣工验收时，地基承载力检测应采用复合地基静载荷试验为主，抽检频率应为总桩数的 0.1%~0.5%，单个路段不应少于 3 点。当检测桩数较多时，宜同时进行单桩承载力和复合地基承载力检测，必要时可进行多桩复合地基承载力检测。

8.5 加固土桩法

8.5.1 加固土桩复合地基处理的适用条件应符合下列规定：

- a) 适用于处理正常固结且十字板剪切强度大于 10 kPa 的淤泥和淤泥质土、粉土、素填土、黏性土以及无流动地下水的饱和松散砂土等地基层；
- b) 不适用于含大孤石或障碍物较多且不易清除的杂填土、欠固结的淤泥和淤泥质土及地下水渗流影响成桩质量的土层；
- c) 对有机质含量过高的泥炭土、有机质含量大于 10%、PH 值小于 4 的黏性土，以及软土天然含水量大于 70%、塑性指数大于 25 时，处治效果比较差，需通过室内配合比试验和现场试桩试验确定其适用性；
- d) 当地基土中含有较多碎石、卵石、块石、树根等大块物质时，使用搅拌桩法会造成施工困难，应慎重选用，必要时可考虑先清除大块物质后再予以施工；
- e) 对于滨海地区软土，水泥搅拌桩宜选用抗硫酸盐水泥以提高抗侵蚀性能。

8.5.2 加固土桩在勘察设计阶段和施工前期均应进行水泥土配合比试验，并应符合下列规定：

- a) 针对拟处理性质最差的软土，选择合适的固化剂、外掺剂及其掺量，为设计与施工提供不同龄期、不同配比的强度参数；
- b) 固化剂宜选用强度等级在 42.5 级以上的普通硅酸盐水泥，水泥掺入比为 15%~25%，水灰比为 0.45~0.55。

8.5.3 加固土桩布置典型横断面示意如图 18 所示，应符合下列规定：

- a) 桩径、桩长及间距应经稳定验算确定并满足工后沉降的要求；
- b) 宜按三角形和矩形布置，桩间距宜为 1.0 m~1.5 m，直径宜为 0.5 m；
- c) 桩长宜采用 4 m~10 m，最长不宜大于 13 m。当软弱土层较薄时，桩长应按穿过软弱土层至相对硬层确定；当软弱土层深厚时，应按沉降与稳定计算确定；当以稳定性控制的工程桩长应穿过潜在危险面以下至少 2 m；

d) 加固土桩一般布置于路基填土范围内，对地质条件较差、路堤填高或有一定横坡时，可考虑在坡脚填土范围外布置 1~2 排桩。

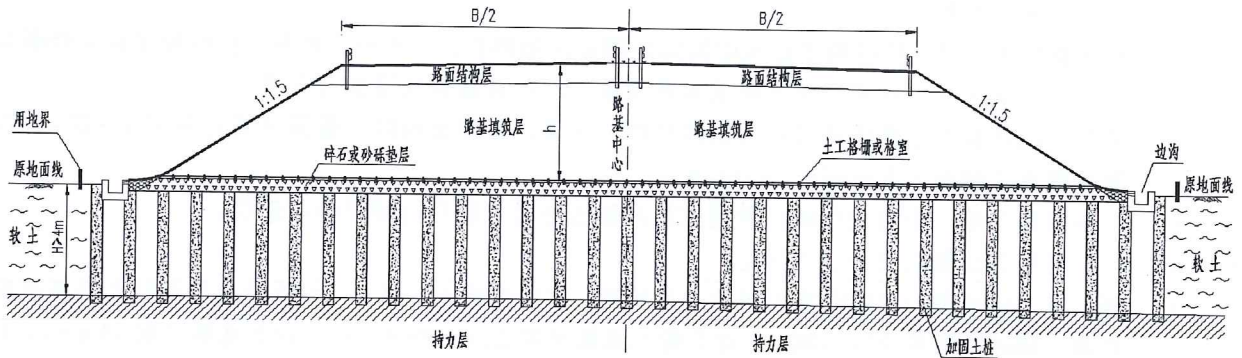


图18 加固土桩布置典型横断面示意图

8.5.4 加固土桩顶与路堤底之间应设置厚 60 cm 的褥垫层，垫层宽度不小于路基宽度，根据土质条件和填土高度情况，可考虑在垫层部位铺设 1~2 层土工格栅或土工格室等土工合成材料，土工合成材料应具有较高的抗拉强度；垫层材料可采用碎石或砂砾，粒料中小于 5mm 部分的含泥量不宜大于 5%，渗透系数不宜小于 1×10^{-3} cm/s。

8.5.5 加固土桩的单桩承载力特征值 R_a 应通过现场载荷试验确定，初步设计时可按公式(28)和(29)估算，并取其中较小值：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \dots\dots\dots (28)$$

$$R_a \leq \eta f_{cu} A_p \dots\dots\dots (29)$$

式中： u_p ——桩的周长(m)；

R_a ——单桩承载力特征值(kN)；

q_{si} ——桩周第*i*层土的侧阻力特征值，对淤泥可取4 kPa~7 kPa，对淤泥质土可取6 kPa~12 kPa，对软塑状态的黏性土可取10 kPa~15 kPa，对可塑状态的黏性土可以取12 kPa~18 kPa；

l_i ——桩长范围内第*i*层土的厚度(m)；

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；

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力特征值(kPa)，可按规范 GB 50007 的有关规定确定，无经验时可取桩端土的地基承载力特征值；

A_p ——为桩的截面积 (m^2)；

η ——桩身强度折减系数，粉喷桩可取 0.20~0.30，浆喷桩可取 0.25~0.33；

f_{cu} ——与加固土桩桩身水泥土配合比相同的室内加固土试块(边长 70.7 mm 或 50 mm 的立方体)在标准养护条件下 90 d 龄期的抗压强度平均值 (kPa)。

8.5.6 复合地基的承载力特征值 f_{spk} 应通过现场单桩复合地基或多桩复合地基载荷试验确定, 初步设计时可按式(30)估算:

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \dots \dots \dots (30)$$

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

8.5.7 路堤整体稳定性验算可采用圆弧滑动法, 加固土桩的抗剪强度可按公式(31)估算, 滑动面上的复合地基抗剪强度按公式(32)计算:

$$\tau_p = 0.3q_u \dots \dots \dots (31)$$

$$\tau_{ps} = m\tau_p + (1-m)\tau_s \dots \dots \dots (32)$$

式中: τ_p ——桩体的抗剪强度 (kPa), 可钻取试验路段水泥土 90 d 原状试件测无侧限抗压强度, 按其一半计算; 也可按设计配合比由室内制备的水泥土试件 (直径 5 cm、高度 10 cm 的圆柱体) 测得的无侧限抗压强度乘以 0.3 的折减系数求得;

τ_{ps} ——加固土桩复合地基的抗剪强度 (kPa);

q_u ——按室内配合比制备加固土试件 90 d 无侧限抗压强度 (kPa)。

8.5.8 加固土桩复合地基变形计算方法与粒料桩相同, 可按式(24)、式(25)、式(26)、式(27)及相关规定进行计算。

8.5.9 加固土桩施工应符合下列规定:

- a) 加固土桩施工现场事先应予以平整, 应清除地表植被和地下孤石、管线等障碍物, 遇明浜、池塘及洼地时应抽水和清淤, 回填黏性土料并予以压实, 不得回填杂填土或生活垃圾;
- b) 施工前应选择典型路段进行试桩, 获取钻进速度、提升速度、搅拌速度、喷浆(粉)压力、单位时间喷浆量、水灰比、添加外加剂等技术参数;
- c) 施工机械应安装喷浆(粉)量自动记录装置, 并对该装置定期标定, 每天检查钻头磨损情况, 当直径磨损量大于 10 mm 时, 应更换或修补钻头;
- d) 浆液应按照成桩试验确定的配合比拌制, 制备好的浆液不得离析, 放置时间不得超过 2 h;
- e) 预搅下沉至设计加固深度, 边喷浆(或粉), 边搅拌提升直至预定的停浆(或灰)面, 重复搅拌下沉至设计加固深度, 根据设计要求, 喷浆(或粉)或仅搅拌提升直至预定的停浆(或灰)面。在预(复)搅下沉时, 也可采用喷浆(或粉)的施工工艺, 确保全桩长上下至少再重复搅拌一次; 对地基土进行干法咬合加固时, 如复搅困难, 可采用慢速搅拌, 保证搅拌的均匀性;

- f) 提升钻杆、喷浆搅拌时,应使钻头反向边旋转、边喷浆、边提升,提升速度宜控制在 0.5 m/min~0.8 m/min。当钻头提升至距离地面 1 m 时,宜用慢速提升,钻头转速控制在 30 r/min;当喷浆口即将出地面时,应停止提升,搅拌 10 s~20 s,保证桩头搅拌均匀;
- g) 应随时记录喷浆压力、喷浆量、钻进速度、提升速度等有关参数的变化。当发现喷浆量不足时,应整桩复打。当施工中因故停浆时,应使搅拌头下沉至停浆面以下 0.5 m 重叠接桩,接桩长度不少于 0.5 m,当停机超过 3 h 时,应拆卸输浆管路,清洗后方可继续施工,防止浆液硬结堵管,在原桩位旁边进行补桩处理;
- h) 对地基为由软到硬渐变型结构,当桩端进行持力层的深度不易判断时,可参考采用机械工作密实电流值连续达到 65 mA~80 mA 作为桩端进入持力层的标志。

8.5.10 加固土桩质量检测应符合以下规定:

- a) 成桩 3 d 内,用标准轻型动力触探 (N10) 检查每米桩身的均匀性,检查频率为每段落内总桩数的 1%,且不少于 3 根;
- b) 成桩 7 d 后,采用浅层开挖、目测检查桩体搅拌均匀性、整体性及外观质量,并测量成桩直径,开挖深度为停浆面以下 1.5 m 处,检查频率为每段落总桩数的 1%~5%;
- c) 成桩 28 d 后,进行钻探取芯做无侧限抗压强度试验,并检查水泥土搅拌均匀性、桩长及桩底是否穿过软土层,抽检频率不小于每段落总桩数的 0.5%,且不少于 3 根桩。在取样桩的桩顶、桩中间及桩底各取 1 个试件,室内加工成 50 mm×100 mm 的圆柱体,进行无侧限抗压强度试验,强度值应达到设计要求;
- d) 成桩 28 d 后,对单桩承载力及复合地基承载力进行检测。检测频率不小于每段总桩数的 0.1%,且不少于 3 根,测定的承载力应达到设计要求。

8.6 刚性桩法

8.6.1 刚性桩可选用粘结强度较高的素混凝土桩、水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 和高强度的预应力混凝土管桩 (PHC)、预应力混凝土薄壁管桩 (PTC)、预制混凝土桩、钻孔灌注桩、现浇混凝土大直径管桩 (PCC 桩) 等。

8.6.2 刚性桩复合地基处理的适用条件应符合下列规定:

- a) 适用于处理性质较差的深厚软土,桩端持力层宜为坚硬的黏土层、密实砂砾层、全风化~中风化基岩等;
- b) 在使用素混凝土桩和预应力管桩时,应加强岩、土、水对桩体的腐蚀性评价;
- c) 适用于桥头、通道、涵洞、挡墙等构筑物地基处理或与路堤过渡路段的衔接部位,以减少沉降;
- d) 适用于公路改扩建工程的路基拓宽路段,控制新旧路基之间的差异沉降;
- e) 适用于填土厚度较大的高填方路段,以控制稳定与沉降变形;
- f) 不适用于地层中存在较多孤石、旧基础、管线等地下障碍物的环境,若在这种条件下施工,不仅施工困难,而且会造成很多质量问题;
- g) 不宜选用或慎用坚硬的夹层作为桩端持力层;
- h) 预应力管桩在石灰岩地区基岩面起伏较大的地方应慎用,由于石芽、沟槽发育,桩长难以控制,且桩身易发生倾斜和折断,稳定性较差。

8.6.3 刚性桩布置典型横断面示意如图 19 所示,应符合下列规定:

- a) 桩径、深度及间距应经稳定验算确定并满足工后沉降的要求;
- b) 素混凝土桩宜按三角形和矩形布置,桩间距宜为 1.0 m~1.8 m,桩径宜取 0.5 m;
- c) 预应力管桩宜设置桩帽,按三角形和矩形布置,桩间距宜为 1.5 m~2.5 m,桩径宜取 0.4 m~0.6 m;

- d) 素混凝土桩桩长宜采用 4 m~15 m，最长不宜大于 20 m；预应力管桩长度宜采用 10 m~25 m，最长不宜超过 30 m；
- e) 当软弱土层较薄时，桩长应按穿过软弱土层至相对硬层确定；当软土层深厚时，应按沉降与稳定计算确定；当以稳定性控制的工程桩长应穿过潜在危险面以下至少 1 m~4 m；
- f) 刚性桩一般布置于路基填土范围内，对地质条件较差、路堤填高或有一定横坡时，可考虑在坡脚填土范围外布置 1~2 排桩。

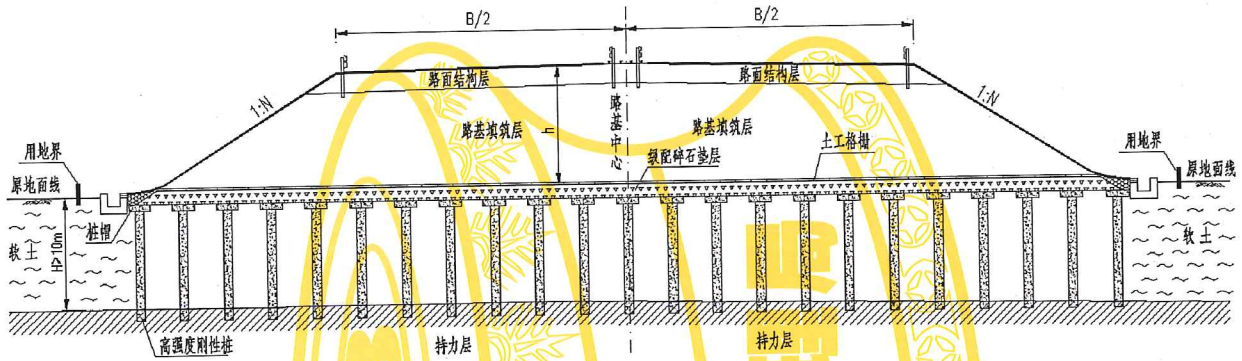


图19 刚性桩布置典型横断面示意图

8.6.4 预应力管桩和预制混凝土桩等高强度的刚性桩宜设置桩帽，桩帽设计应符合下列规定：

- a) 形状宜以正方体或圆柱状为主（圆形桩帽可按面积等效的方式换算成方形桩帽），桩帽边长宜为 1.0 m~1.5 m，厚度宜为 0.3 m~0.5 m，宜采用 C30 以上的钢筋混凝土现场浇筑而成；
- b) 桩与桩间土因刚度差异而在路堤中产生土拱效应，桩帽上部的等效荷载可按公式 (33) 计算：

$$Q_u = \eta(\gamma_1 H + q_c) S_a^2 \dots \dots \dots (33)$$

式中： Q_u ——桩帽上部承担的荷载（kN）；

η ——桩体荷载分担比系数，可根据附录 D 查表求得；

q_c ——路基的路面超载（kPa）；

γ_1 ——路堤填料重度（kN/m³）；

H ——路堤填土高度（m）；

S_a ——桩中心间距（m）。

- c) 桩帽的强度验算可根据桩帽与桩连接部位的最大弯矩值 M_{max} 可按下列公式计算：

$$M_{max} = \frac{\xi_p B (B - D_p)^2}{8} \dots \dots \dots (34)$$

$$p = \frac{Q_u}{B^2} \dots \dots \dots (35)$$

式中： ξ ——修正系数，取值范围2.7~3.8，当桩帽尺寸较大时取低值，桩帽尺寸较小时取高值，中间可用插值处理；

p ——桩桩帽上的等效平均应力（kPa）；

B ——方形桩桩帽边长（m），当桩帽桩为圆形时，按面积等效原则换算；

D_p ——桩径（m）。

8.6.5 刚性桩顶与路堤底之间应设置厚60 cm~80 cm的褥垫层，垫层宽度不小于路基宽度，并应符合下列要求：

- a) 垫层材料可采用碎石、砂砾等硬质材料，垫层材料中小于5 mm部分的含泥量不宜大于5%，渗透系数不宜小于 1×10^{-3} cm/s；
- b) 桩承式加筋路堤中水平加筋体拉力由支承部分竖向路堤荷载引起的拉力和抵抗路堤边坡外推力而引起的拉力组成，桩承式加筋路堤的加筋体抗拉强度 T_{gc} 可按下列公式计算：

$$T_{gc} = \frac{Q_s(S_a - B)}{2B} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon} + 0.5K_a\gamma_1 H^2} \dots\dots\dots (36)$$

$$Q_s = (1 - \eta)(\gamma_1 H + q_c)S_a \dots\dots\dots (37)$$

$$T_{gc} \leq T_s / \lambda_c \dots\dots\dots (38)$$

式中： Q_s ——桩帽间单位长度土体承担荷载（kN/m）；

ε ——水平加筋体的延伸率，可取5%；

K_a ——主动土压力系数， $K_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$ ；

T_s ——土工合成材料的抗拉强度（kN），可按延伸率5%时确定；

λ_c ——考虑实际施工损伤、材料耐久等情况的折减系数，可取2.0~3.0。

8.6.6 根据软土地质条件和填土高度情况，可在垫层部位铺设土工合成材料，应符合下列要求：

- a) 对于素混凝土桩和CFG桩，加筋垫层可采用加固土桩的垫层设置方法；
- b) 对于预应力管桩或预制混凝土桩，桩帽顶应铺设具有一定厚度、强度、完整连续的土工格栅，形成桩承式加筋路堤。

8.6.7 素混凝土桩和水泥粉煤灰碎石桩（CFG桩）等粘结强度较高刚性桩复合地基承载力特征值可按式(39)计算，单桩竖向承载力特征值应满足式(40)要求，当复合地基承载力需进行桥台、涵洞、通道、挡墙等基础埋深的深度修正时，单桩竖向承载力特征值还应满足式(41)要求， f_{cu} 取大值。

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \dots\dots\dots (39)$$

$$f_{cu} \leq \frac{4\lambda R_a}{A_p} \dots\dots\dots (40)$$

$$f_{cu} \leq \frac{4\lambda R_a}{A_p} \left[1 + \frac{r_m(d-0.5)}{f_{spa}} \right] \dots\dots\dots (41)$$

式中： λ ——单桩承载力发挥系数，可按地区经验取值，素混凝土桩和CFG桩取0.8~0.9；

β ——桩间土承载力折减系数，可按地区经验取值，素混凝土桩和CFG桩取0.9~1.0；

f_{cu} ——桩体试块（边长150mm立方体）标准养护28d的立方体抗压强度平均值（kPa）；

γ_m ——桥涵结构物基础底面以上土的加权平均重度（kN/m³），地下水以下取有效重度；

d ——桥涵结构物基础埋置深度（m）；

f_{spa} ——桥涵结构物基础深度修正后的复合地基承载力特征值（kPa）。

8.6.8 高强度的预应力管桩和其他混凝土桩不可验算复合地基承载力，单桩承载力 R 可按式(42)和式(43)进行验算：

$$\frac{R}{2} \geq Q_u \dots\dots\dots (42)$$

$$\frac{R}{2} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} (A_j + \lambda_p A_{p1}) \dots\dots\dots (43)$$

式中： q_{sik} ——极限桩侧阻力标准值（kPa）；

q_{pk} ——极限端阻力标准值（kPa）；

l_i ——桩周第 i 层土的厚度（m）；

A_p ——空心桩敞口面积， $A_{p1} = \frac{\pi}{4} d_1^2$ ；

A_j ——空心桩桩端净面积，管桩 $A_j = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2)$ ，空心方桩 $A_j = b^2 - \frac{\pi}{4} d_1^2$ ；

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

h_b ——桩端进入持力层深度（m）；

d 、 d_1 ——分别为管桩外径和内径（m）。

8.6.9 素混凝土桩和水泥粉煤灰碎石桩（CFG桩）等粘结强度较高刚性桩沉降与稳定计算方法可采用与加固土桩相同的方法。

8.6.10 带桩帽的高强度预应力管桩类刚性桩可不考虑桩间土压缩变形对沉降的影响,可采用公式(44)进行沉降计算,处理后地基稳定性可采用圆弧滑动法验算,滑动面抗剪强度采用桩土复合抗剪切强度,可按公式(32)计算。

$$S = \psi_p \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \frac{\delta_{j,i} \Delta h_{j,i}}{E_{sj,i}} \dots \dots \dots (44)$$

式中: S ——桩基最终沉降 (m);

ψ_p ——沉降经验系数,可根据工程实测资料统计对比确定;

$\delta_{j,i}$ ——为桩端以下第 j 层第 i 分层的竖向附加应力 (kPa),可参考 GB 50007;

$\Delta h_{j,i}$ ——桩端以下第 j 层第 i 分层的厚度 (m);

$E_{sj,i}$ ——桩端平面下第 j 层第 i 分层在自重应力至自重应力加附加应力作用段的压缩模量 (MPa)。

8.6.11 刚性桩施工应符合下列规定:

- a) 刚性桩施工应根据现场地质条件及工程特点选用成桩设备,预制桩可选用锤击打入法或静压法沉桩,灌注桩可选用沉管灌注和长螺旋钻孔灌注等施工方法,当软土深厚且布桩较密,或周边环境有严格要求时,不宜选用振动沉管灌注成桩法;
- b) 持力层位置和施工桩长应根据现场地质条件和试桩结果确定,灌注桩施工应根据揭示的地层和工艺试桩结果综合判断控制施工桩长;预制桩施工应以设计桩长控制为主,工艺试桩确定的收锤标准或压桩力控制为辅的方法控制施工桩长;
- c) 饱和深厚软土地层挤土桩施工应选择合适的施工顺序,并宜避免挤土效应,当设计桩间距较小时,宜按隔桩跳打的顺序施工,施打新桩与已打桩间隔的时间不应少于 7 d,应加强对已施工桩及场地周边环境的监测;若桩较密集且一侧靠近建(构)筑物时,宜从毗邻建(构)筑物的一侧开始由近及远地进行;
- d) 素混凝土桩和水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)的强度宜为 5.0MPa~25.0MPa,桩体粗集料宜采用硬质碎石或砾石,CFG 桩采用的粉煤灰宜为 II 级或 III 级粉煤灰;
- e) 预制桩宜一次性连续沉桩至控制高程,沉桩过程中停歇时间不应过长;
- f) 预制桩接桩时上、下节桩的中心线偏差不得大于 5mm,节点弯曲矢高不得大于桩段的 0.1%。桩接头焊好后应自然冷却至少 5 min~8 min,不得用水冷却;
- g) 预制桩焊接接桩时,焊缝应连续饱满,满足二级焊缝的要求,因施工误差等因素造成的上、下桩端头间隙应采用厚薄适当的模形铁片填实焊牢;
- h) 预制桩在沉桩过程中遇到较难穿透的土层时,接桩宜在桩尖穿过该土层后进行;
- i) 当管桩采用锤击法施工遇上厚度较大的淤泥层或松软的回填土时,柴油锤宜采用不点火(空锤)的方式施打;液压锤应采用落距为 20 cm~30 cm 的方式施打。

8.6.12 刚性桩质量检测应符合以下规定:

- a) 刚性桩复合地基检测宜采用低应变、钻探取芯和承载力荷载试验法等方法进行;
- b) 对于素混凝土桩和水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)等粘结强度较高的刚性桩,在成桩 28 d 后,可选用低应变法、钻探取芯法和荷载试验法等方法进行质量检测,其中低应变法检测频率不少于

1%~5%，钻探取芯检测频率不少于 0.5%，单桩承载力与复合地基承载力荷载试验检测频率不少于 0.1%，且同一路段不少于 3 根，测定的承载力应达到设计要求；

- c) 对于高强度的预应力管桩等刚性桩，在成桩 28 d 后，可选用低应变法和荷载试验法等方法进行质量检测，其中低应变法检测频率不少于 1%~5%，单桩承载力与复合地基承载力荷载试验检测频率不少于 0.2%~0.5%，且同一路段不少于 3 根，测定承载力应达到设计要求。

9 动态监测与沉降预测

9.1 动态监测

9.1.1 软土路基在施工期间应选择代表性的软土路段进行动态监测，其中，高速公路与一级公路应进行动态监测，其他等级公路可参照本章要求选择性的进行动态监测。

9.1.2 动态监测项目应根据软土性质、厚度、所采用的地基处理方法、路堤填土高度及监测对施工的影响程度等综合确定，软土路基动态监测项目选取原则如表 21 所示。

表21 软土路基动态监测项目表

监测项目	仪器设备	监测目的	主要适用条件
地表沉降 (必测项目)	沉降板 水准仪	1、观测地表沉降量及沉降速率，控制填土速度； 2、预测沉降趋势，确定路面铺筑时间。	1、适用所有地理处治方法，对复合地基路段应加强监测，对清淤换填彻底路段可适当放宽监测要求； 2、适用填土高度：坡地软土填高 $\geq 6\text{m}$ ，其他软土填高 $\geq 10\text{m}$ ；
地表水平位移 (必测项目)	水平位移桩、 测距仪、经纬 仪、钢尺	1、观测路堤坡脚地表水平位移和隆起情况； 2、用于路堤在施工过程中的安全与稳定判定。	3、软基长度宜大于 100 m； 4、软土厚度与性质情况，对软土厚度大、性质差的路段应加强监测。
深层侧向位移 (一般路基为选测项目，高填及特殊路基为必测项目)	测斜管 测斜仪	1、观测深层地基土体侧向位移，用于掌握地基土潜在滑动面的发展变化，评价地基稳定性； 2、用于路堤施工过程中的稳定控制。	1、主要适用于复合地基处治方法，高填换填路段也应进行监测； 2、适用填土高度（坡地软土填高 $\geq 15\text{m}$ ，其他软土填高 $\geq 20\text{m}$ ）宜进行监测； 3、软土厚度与性质情况，对软土厚度大、性质差的路段宜进行监测。
地下分层沉降 (选测项目)	沉降磁环 分层沉降仪	观测深层地基土不同层位的沉降量及沉降速率，预测分层土沉降趋势。	主要适用于复合地基处治方法，适用于有多层深厚软土分布的区域。
孔隙水压力 (选测项目)	孔隙水压 力计	观测地基土孔隙水压力，分析超静孔压情况，预测地基土固结情况。	主要用于粒料桩、强夯和强夯置换、排水固结及各种打入桩的施工监测，适用于深厚淤泥或淤泥质土。

表 21 软土路基动态监测项目表 (续)

监测项目	仪器设备	监测目的	主要适用条件
土压力 (选测项目)	土压力盒	观测软土和填土中埋设点的土体压力变化, 分析桩土压力比。	适用于复合地基处治方法, 埋设在桩顶和桩间土不同位置, 主要用于刚性桩及桩承式路堤中。
土工格栅位移 (选测项目)	土工格栅位移计	观测土工格栅在填土过程中的位移变化, 分析土工格栅的受力。	适用于加筋法和复合地基处治方法, 埋设于土工格栅表面, 主要用于观测不同位置土工格栅的变形和受力情况。

9.1.3 地表沉降和地表水平位移为必测项目; 高填软土路基及其他比较特殊软土路基应进行深层侧向位移观测; 地下分层沉降、孔隙水压力、土压力、土工格栅位移等为选测项目, 可用于深入研究和科研路段使用。

9.1.4 在代表性软土路段监测中, 监测断面纵向间距宜为 50m~100m, 宜将监测点布置在预测变形比较大的位置, 同时应兼顾桥头、涵洞、通道、不同地基处理方法等软土过渡的监测。

9.1.5 沉降监测断面上的沉降板宜设置在路基中心和路肩附近, 沉降板底板尺寸不宜小于长 50cm×宽 50cm×厚 10cm, 测管宜采用直径 4cm 的钢管, 保护套管尺寸应能套住测杆, 并使标尺能进入套管, 测杆每节长度不宜超过 50cm。套管上应加盖封闭, 避免填料落入管内影响测杆自由下沉。

9.1.6 位移监测点的设置应符合下列要求:

- 水平位移观测桩宜设置于路堤边坡坡脚外 10m 范围内, 每测宜设置 3~4 个点;
- 水平位移监测基桩应设置在地基变形影响范围之外;
- 水平位移观测桩宜采用 5cm~10cm 的预制方桩或木桩, 长度不宜小于 1.5m;
- 监测点位置应设置明显的警示标志, 提醒施工人员及机械注意观察, 以防止损坏监测点。

9.1.7 典型监测断面布置及监测设备大样示意如图 20 和图 21 所示。

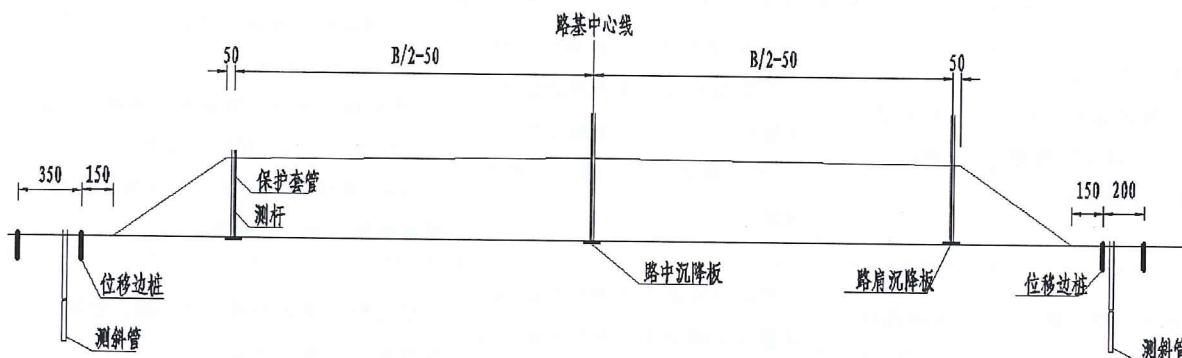


图 20 软土路基必测项目动态监测示意图

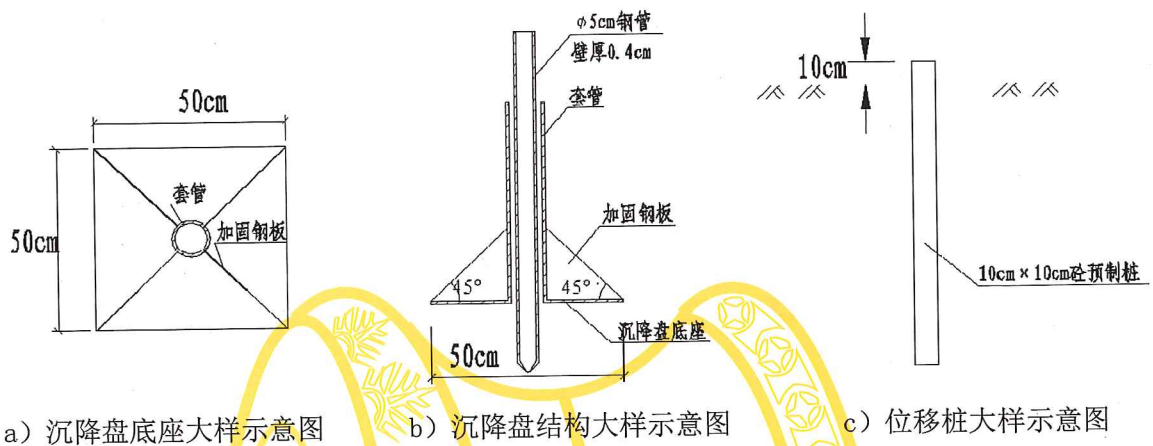


图21 沉降板与位移桩大样示意图

9.1.8 软土路基观测在施工填土期应每填一层观测一次；临时中断施工或加载间隙期，可间隔 3 d 观测一次；当路堤填土至路床顶后，在铺筑路面前的预压期内，宜根据软基沉降速率变化 3 d~15 d 观测一次。

9.1.9 软土路基动态监测指标应符合下列要求：

- a) 在路堤填筑期间，路堤中心沉降每昼夜不得大于 10mm~15mm，边桩位移每昼夜不得大于 5mm，当沉降或位移超标时，应立即停止路堤填筑；
- b) 路面铺筑时间应在沉降稳定后进行，采用双标准控制：即推算的工后沉降量应小于设计容许值，同时连续 2 个月观测的月沉降量均不得超过 5mm，方可开始路面铺筑。

9.2 沉降预测

9.2.1 利用软土路基沉降监测数据，可对软土路基应进行沉降预测分析，常用的沉降预测方法有双曲线法、星野法和三点法等。

9.2.2 采用双曲线法进行沉降预测时，可采用式 (45) 进行施工过程中的沉降预测，采用式 (46) 进行最终沉降预测。

$$S_t = S_a + \frac{t - t_a}{\alpha + \beta(t - t_a)} \dots \dots \dots (45)$$

$$S = S_a + \frac{1}{\alpha + \beta} \dots \dots \dots (46)$$

式中： t_a 、 S_a ——拟合计算起始点参考点的观测时间与沉降值；

t 、 S_t ——拟合曲线上任意点的时间与对应的沉降值；

α 、 β ——根据实测值求出的参数，化为直线时分别表示直线的截距与斜率（图 22）。

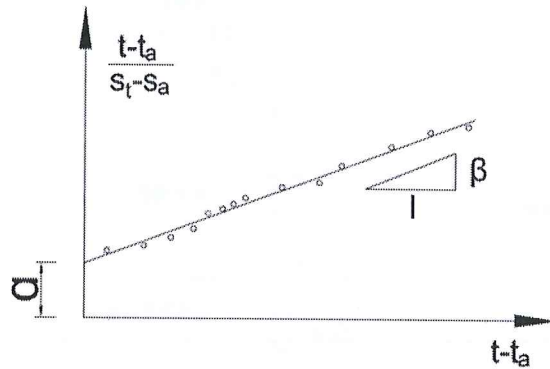


图22 $(t-t_a)/(S_t-S_a)$ 与 $(t-t_a)$ 关系图

9.2.3 采用星野法进行沉降预测时，可采用式 (47) 进行施工期间的沉降预测，采用式 (48) 进行最终沉降预测。

$$S_t = S_i + \frac{AK\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{1+K^2(t-t_0)}} \dots\dots\dots (47)$$

$$S = S_i + A \dots\dots\dots (48)$$

$$\frac{t-t_0}{(S_t-S_i)^2} = \frac{1}{A^2K^2} + \frac{1}{A^2}(t-t_0) \dots\dots\dots (49)$$

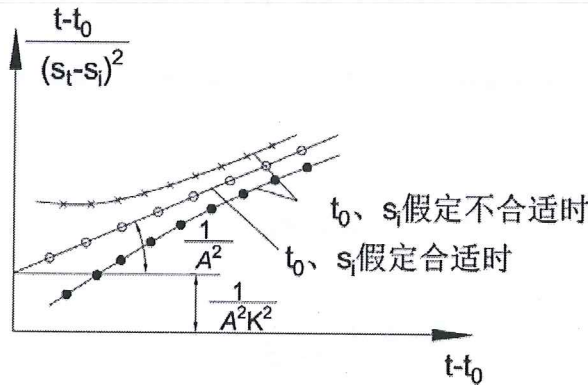


图23 参数 A , K 的确定

式中： t_0 、 S_i ——拟合计算起始点参考点的观测时间与瞬时沉降值；

K ——影响沉降速度的系数，可根据式 (49) 采用图解法(图 23) 求得；

A ——求 $t \rightarrow \infty$ 时最终沉降值的系数，可根据式 (49) 采用图解法(图 23) 求得。

9.2.4 采用三点法进行沉降预测时，可从沉降—时间关系曲线上，取最大恒载时间段内时间间隔相等的三点沉降值，采用式 (50) 进行最终沉降预测，采用式 (51)和式 (52)计算任意时间沉降。

$$S_{\infty} = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)} \dots\dots\dots (50)$$

$$\beta = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \dots\dots\dots (51)$$

$$S_t = U_t S_{\infty} = (1 - \alpha e^{-\beta t}) S_{\infty} \dots\dots\dots (52)$$

式中： S_{∞} ——预测最终沉降量（mm）；

S_1 、 S_2 、 S_3 ——分别为路堤填筑停止后的最大恒载作用下，时间 t_1 、 t_2 、 t_3 相对应的竖向变形观测值（mm），同满足时间间隔相等（ $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = \Delta t$ ）的条件；

β 、 U_t ——分别为固结度计算系数和 t 时刻对应的地基固结度。



附录 A
(资料性附录)
广西壮族自治区公路软土分布图

广西壮族自治区公路软土分布见图A.1。

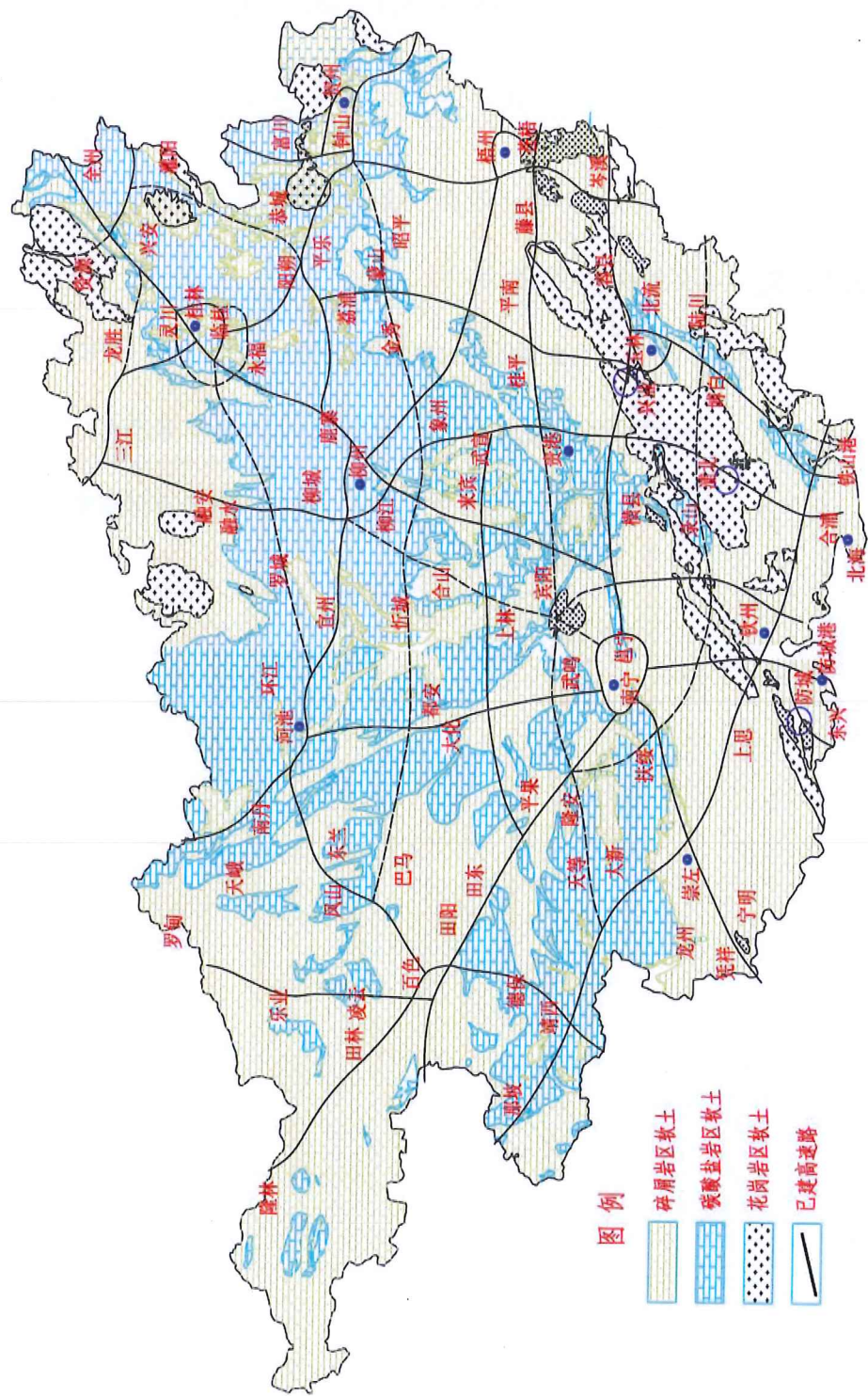


图 A.1 广西壮族自治区公路软土分布图

附录 B
(资料性附录)
广西壮族自治区公路典型软土物理力学指标参考表

广西壮族自治区公路典型软土物理力学指标参考表B.1。

表B.1 广西壮族自治区公路典型软土物理力学指标参考表

参数	单位	碎屑岩 地区软土	碳酸盐 地区软土	花岗岩		滨海地区软土		
				地区软土	地区软土	北海铁山港区	防城港区	钦州港区
自由膨胀率	%	5~48 (26)	13~84 (41)	5~49 (28)	12~59 (38)	5~51 (29)	21~54 (39)	
含水率	%	22.4~89.7 (43.1)	19.5~54.7 (32.3)	20.6~109.0 (40.0)	27.7~75 (46.5)	20.4~36.9 (27.4)	26.1~77.7 (52.9)	
天然密度	g/cm ³	1.43~2.06 (1.79)	1.62~2.08 (1.89)	1.35~2.09 (1.81)	1.54~2.15 (1.80)	1.73~2.18 (2.01)	1.58~2.06 (1.73)	
天然孔隙比	—	0.754~2.252 (1.123)	0.723~1.510 (0.962)	0.703~2.793 (1.119)	0.608~1.943 (1.180)	0.554~1.154 (0.741)	0.789~2.025 (1.534)	
饱和度	%	82.2~100.0 (97.3)	83.8~99.8 (96.5)	72.5~100.0 (94.4)	90.8~100 (98.5)	94.9~100.0 (99.2)	92.5~100.0 (98.2)	
土粒比重	—	2.33~2.75 (2.65)	2.60~2.83 (2.70)	2.40~2.77 (2.66)	2.51~2.69 (2.63)	2.66~2.75 (2.7)	2.64~2.70 (2.68)	
液限	%	24.4~75.6 (44.0)	20.1~81.2 (51.1)	32.5~69.1 (48.4)	19.8~58.1 (40.2)	22.8~47.7 (32.2)	24.5~55.2 (40.8)	
塑限	%	16.9~34.8 (24.2)	13.0~39.3 (27.0)	17.8~34.2 (25.4)	13.3~35.6 (24.5)	13.7~24.6 (19.2)	17.6~26.5 (22.4)	
塑性指数	—	6.0~40.8 (19.8)	6.4~56.5 (25.3)	11.5~42.3 (23.2)	5.9~28.2 (16.8)	8.1~24.0 (13.0)	6.0~28.7 (18.5)	
液性指数	—	0.510~1.952 (0.917)	0.5~1.17 (0.727)	0.541~2.279 (1.000)	0.812~2.518 (1.456)	0.519~1.409 (0.884)	0.610~3.292 (1.745)	

表 B.1 广西壮族自治区公路典型软土物理力学指标参考表(续)

参数	单位	碎屑岩 地区软土	碳酸盐 地区软土	花岗岩 地区软土	滨海地区软土		
					北海铁山港区	防城港区	钦州港区
压缩系数 $\sigma_{0.1}^{0.2}$	MPa ⁻¹	0.26~1.54 (0.67)	0.18~0.99(0.35)	0.23~2.48(0.61)	0.21~2.34(0.72)	0.24~0.59(0.36)	0.24~2.17(1.19)
压缩模量 $E_{S100-200}$	MPa	1.93~7.63 (3.76)	2.50~7.90(5.61)	1.26~7.63(4.09)	1.22~9.20(5.31)	3.24~9.88(6.47)	1.39~7.04(3.02)
凝聚力 c_q	kPa	0.8~12.6 (4.6)	4.3~46.5(22.3)	2.0~27.0(11.0)	3.9~31.5(12.5)	3.3~23.1(11.1)	2.4~22.1(7.6)
内摩擦角 φ_q	度	1.2~13.9 (6.0)	5.3~16.1(10.2)	2.3~19.9(9.3)	3.5~13.4(8.3)	2.8~11.5(7.1)	4.0~11.8(7.2)

注：上表（）中数值为参考指标推荐值。

附录 C
(资料性附录)

广西壮族自治区公路软土地基常用处理方法及适用范围一览表

广西壮族自治区公路软土地基常用处理方法及适用范围见表C.1。

表 C.1 广西壮族自治区公路软土地基常用处理方法及适用范围一览表

软基处理方法		处理深度	技术特点	技术适用范围	工期
换填法		≤4.0 m	工艺、设计简单	适用于各区、各类软土地基的浅层处理	短
加筋法		1 m~3 m	工艺简单, 功效较高	适合浅层软弱土或路基填挖交界处、高填与陡坡路堤、新旧路基拼接处、路基与桥涵结构物结合处, 以及软土不同地基处理方法交界处等路段, 如碳酸盐岩区上硬下软型软土、石芽型软土等或其他特殊路段	较短
强夯法		3 m~8 m	工艺简单, 功效高, 节约原材料	适用于碎屑岩区、碳酸盐区、花岗岩区的非饱和性浅埋型软土, 不适宜于淤泥质土, 应充分考虑扰民问题及对周围建筑物和构造物的影响	短
强夯置换法		5 m~8 m	工艺简单, 功效较高	适用于常规措施不易实施的地势低洼、地表水体或地下水丰富的淤泥质土、淤泥等饱和性软土, 应考虑扰民问题及对周围建筑物和构造物的影响	短
料粒桩法	碎石桩 砂砾桩	4 m~9 m	桩的承载力较高, 工后沉降小, 质量可靠性高	适用于碎屑岩区渐变型软土、上硬下软型软土、花岗岩区浅埋型、渐变型软土以及滨海地区中松散砂土、粉土、黏性土、淤泥质粘土、填土等厚度较大的软弱地基土	较短
加固土桩法	浆液水泥搅拌桩、粉喷桩	4 m~10 m	无振动, 无噪音, 无污染, 承载力较高, 工后沉降较小	适合软土厚度较大的路堤或地基承载力要求较高、工后沉降要求较小的结构物与路堤过渡段以及周围有建筑物的地基处理; 适用于适用于碎屑岩区、碳酸盐区、花岗岩区、滨海区中厚度较大的黏性土、含砂黏性土	较长
刚性桩法	CFG 桩 素混凝土桩	4 m~15 m	桩承载力高, 工后沉降小, 质量可靠性高	适合软土厚度大、承载力要求高、工后沉降要求小的路堤或桥头与路堤过渡段等的地基处理; 适用于碎屑岩区、碳酸盐区、花岗岩区、滨海区、特殊岩性区的中深层软土	较短
	管桩 预制桩	10 m~25 m	桩承载力高, 其生产效率和质量可靠性高	适合深厚软土、承载力要求高、沉降要求严格的结构物基础或路堤的地基处理; 适用于碎屑岩区渐变型软土、上硬下软型软土、花岗岩区浅埋型、渐变型软土, 滨海地区深厚层软土	较短

附录 D
(资料性附录)
桩体荷载分担比系数表

桩体荷载分担比系数见表D.1。

表 D.1 桩体荷载分担比系数表

$\frac{s}{h}$	20°				25°				30°			
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6
0.3	0.321	0.494	0.652	0.781	0.423	0.609	0.757	0.863	0.540	0.722	0.846	0.911
0.4	0.321	0.494	0.652	0.781	0.423	0.609	0.757	0.863	0.540	0.722	0.813	0.867
0.5	0.321	0.494	0.652	0.781	0.423	0.609	0.748	0.817	0.540	0.686	0.748	0.817
0.6	0.321	0.494	0.652	0.760	0.423	0.607	0.677	0.760	0.540	0.607	0.677	0.760
0.7	0.321	0.494	0.603	0.697	0.423	0.527	0.603	0.697	0.468	0.527	0.603	0.697
0.8	0.321	0.447	0.526	0.628	0.387	0.447	0.526	0.628	0.387	0.447	0.526	0.628
0.9	0.310	0.368	0.448	0.555	0.310	0.368	0.448	0.555	0.310	0.368	0.448	0.555

注1: φ —路堤填料的内摩擦角($^\circ$)。
注2: s —桩的中心间距(m)。
注3: b —方形桩帽的边长或圆形桩帽的等效边长(m)。
注4: h —路堤填筑高度(m)。

表 D.1 桩体荷载分担比系数表 (续)

$\frac{s}{h}$	35°				40°				45°				
	$\frac{b}{s}$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6
0.3		0.663	0.822	0.872	0.911	0.778	0.843	0.872	0.911	0.799	0.834	0.872	0.911
0.4		0.663	0.762	0.813	0.867	0.718	0.762	0.813	0.867	0.718	0.762	0.813	0.867
0.5		0.634	0.636	0.748	0.817	0.634	0.686	0.748	0.817	0.634	0.686	0.743	0.817
0.6		0.551	0.607	0.677	0.760	0.551	0.607	0.677	0.760	0.551	0.607	0.677	0.760
0.7		0.468	0.527	0.603	0.697	0.468	0.527	0.603	0.697	0.468	0.527	0.603	0.697
0.8		0.387	0.447	0.526	0.628	0.387	0.447	0.526	0.628	0.387	0.447	0.523	0.628
0.9		0.310	0.368	0.448	0.555	0.310	0.368	0.448	0.555	0.310	0.368	0.443	0.555

注1: ϕ —路堤填料的内摩擦角 ($^\circ$)。
注2: s —桩的中心间距 (m)。
注3: b —方形桩帽的边长或圆形桩帽的等效边长 (m)。
注4: h —路堤填筑高度 (m)。

中华人民共和国广西地方标准
公路软土地基处治工程技术规范

DB45/T 1972—2019

广西壮族自治区市场监督管理局统一印刷

版权专有 侵权必究