



T/CECS G:

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association of Engineering Construction Standardization

公路筋箍碎石桩复合地基技术规程

Technical Specification for Highway Composite Foundation with
Reinforced- Encasement Stone Column

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路筋箍碎石桩复合地基技术规程

Technical Specification for Highway Composite Foundation with
Reinforced- Encasement Stone Column

T/CECS G XXX-2026

主编单位：湖南大学

湖南省交通规划勘察设计院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2026年XX月XX日

***出版社

2026

前 言

根据中国工程建设标准化协会公路分会《关于开展 2024 年第二批中国工程建设标准化协会标准 (CECS G) 制修订项目编制工作的通知》(中建标公路 [2024] 279 号) 要求,由湖南大学、湖南省交通规划勘察设计院有限公司共同《公路筋箍碎石桩复合地基技术规程》(以下简称“本规程”)的制定工作。

编制组经广泛调研国内外相关工程实践,系统总结筋箍碎石桩复合地基技术的研究成果和工程应用经验,参考现行国家、行业相关标准规范,结合我国公路工程建设实际情况,在广泛征求意见的基础上,完成了本规程的编制工作。

本规程共分5章和2个附录,主要内容包括:总则、术语和符号、设计、施工、质量控制与监测,以及附录A筋箍碎石桩复合地基设计计算示例等。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利,本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理,由湖南大学负责具体技术内容的解释。执行过程中,如有意见或建议,请函告本规程日常管理组,中国工程建设标准化协会公路分会(地址:北京市海淀区西土城路8号;邮编:100088;电话:010-62079839;传真:010-62079983;电子邮箱:she@rioh.cn),以便修订时参考。

主 编 单 位: 湖南大学
湖南省交通规划勘察设计院有限公司

参 编 单 位: 湖南致力工程科技有限公司
北京路桥通国际工程咨询公司
湖南大学设计研究院有限公司
南昌瑀城交通设计有限公司
广东省建科建筑设计院有限公司
甘肃中建市政工程勘察设计院有限公司
深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司
湖南省勘测设计院有限公司
湖南沿湖建设工程有限公司
湖南省交通职业技术学院
湖南湖大土木建筑工程检测有限公司

主 编: 张玲、肖燕

主要参编人员：赵明华、侯俊敏、彭文哲、段少华、龚先兵、娄峰、尹雨阳、郦维、黄月华、陈传涛、龙军、何腊平、胡昌文、蒋德松、刘博、邹新军、杨超炜、张鹏、胡立卫

主 审：张留俊

参与审查人员：

目次

1 总则	1
2 术语和符号	2
3 设计	6
3.1 一般规定	6
3.2 材料	6
3.3 复合地基与桩体结构	7
3.4 桩体设计计算	9
3.5 复合地基设计计算	13
4 施工	23
4.1 一般规定	23
4.2 筋箍套筒制作	23
4.3 桩管制作	23
4.4 成桩试验	24
4.5 振动沉管施工	25
4.6 褥垫层施工	27
5 质量控制与监测	28
5.1 施工质量检查	28
5.2 成桩质量检验	28
5.3 施工监测	29
5.4 工程验收	30
附录A 筋箍碎石桩复合地基设计计算示例	33
本规程用词用语说明	38

Contents

1 General provisions	1
2 Terms and symbols	2
3 Design	6
3.1 General requirements	6
3.2 Materials	6
3.3 Composite foundation and pile structure	7
3.4 Pile design and calculation	9
3.5 Composite foundation design and calculation	13
4 Construction	23
4.1 General requirements	23
4.2 Fabrication of reinforced encasement	23
4.3 Pile tube fabrication	23
4.4 Pile forming test	24
4.5 Vibro-driven pipe construction	25
4.6 Cushion construction	27
5 Quality control and monitoring	28
5.1 Construction quality inspection	28
5.2 Pile forming quality inspection	28
5.3 Construction monitoring	29
5.4 Project Acceptance	30
Appendix A Design and calculation example of reinforced encasement stone column composite foundation	33
Explanation of wording	38

1 总则

1.0.1 为规范公路筋箍碎石桩复合地基的设计、施工及质量检验，指导公路软土地基处理工程的建设，确保技术先进、经济合理、安全可靠，同时满足公路工程对地基承载力、沉降控制及稳定性的要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各等级公路新建路基筋箍碎石桩复合地基的设计、施工及质量检验，桥涵构筑物及各等级公路改扩建工程可参考使用。

1.0.3 筋箍碎石桩复合地基设计与施工除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 筋箍碎石桩 reinforced-encasement stone column (RESC)

在普通碎石桩外围竖向增设高抗拉强度筋箍套筒形成的新型桩体。

2.1.2 筋箍碎石桩法 reinforced-encasement stone column technique

采用振动沉管等方式在地基土中成孔后，在桩孔中置入筋箍套筒，再填入碎石等桩体填料，形成密实桩体，并由由筋箍碎石桩、桩间土和褥垫层共同组成的复合地基处理方法。

2.1.3 筋箍套筒 reinforced encasement

由抗拉强度高、抗腐蚀、抗老化和耐久性优良的筋材叠边搭接形成的圆筒状结构物。

2.1.4 环箍效应 hoop confinement effect

碎石桩受竖向荷载作用发生鼓胀变形时，包裹其外的筋箍套筒受径向扩孔作用，为碎石桩提供附加侧向约束，有效约束碎石桩鼓胀变形。

2.1.5 筋材 reinforcement

土工格栅片材、钢丝网等抗拉强度高、抗腐蚀、抗老化、耐久性优良，能对碎石桩产生良好环箍效应的材料。

2.1.6 桩体填料 column fill material

筋箍碎石桩成孔后，在桩孔中充填的碎石、卵石、角砾等性能稳定的硬质透水性材料。

2.1.7 弧形门 curved gate

为便于筋箍套筒和桩体填料投入桩管，在桩管侧壁开设槽口，并于槽口上设置一可灵活启闭的弧形构件；闭合后该构件与桩管形成完整圆形管体。

2.2 符号

A_p ——桩身横截面面积

C_p ——桩身横截面周长

c_p ——筋箍碎石桩桩体等效黏聚力

c_{ps} ——复合土体等效黏聚力

c_s ——桩间土黏聚力

c_u ——土的不排水抗剪强度

d ——桩体直径

d_e ——单桩所分担的处理面积的等效圆直径
 D_r ——相对密实度
 E_p ——碎石桩的压缩模量
 E_{pg} ——筋箍碎石桩的压缩模量
 E_s ——桩间土压缩模量
 E_{sp} ——非筋箍段复合土体的压缩模量
 E_{spg} ——筋箍段复合土体的压缩模量
 f_c ——桩体等效抗压强度
 f_{sk} ——加固后的桩间土承载力特征值
 f_{spk} ——筋箍碎石桩复合地基承载力特征值
 $h_{g,i}$ ——筋箍段内第 i 层土的厚度
 h_i ——非筋箍段内第 i 层土的厚度
 h_u ——滑动面以上的桩长
 K_s ——桩侧土抗力安全系数
 K_0 ——桩周土静止侧压力系数
 K_{pp} ——桩体填料被动土压力系数
 M_{rs} ——桩间土体抗滑力矩之和；
 M_{rp} ——桩体抗滑（抗弯）力矩之和
 M_u ——桩体临界弯矩
 M_D ——荷载效应标准组合下最危险滑动面上的总滑动力矩
 M_R ——最危险滑动面上的总抗滑力矩
 M_{Re} ——路堤土体抗滑力矩
 M_{Rc} ——复合地基抗滑力矩
 R_a ——顶部加筋筋箍碎石桩竖向抗压承载力特征值
 R_a' ——全长加筋筋箍碎石桩竖向抗压承载力特征值
 R_{a0}' ——非筋箍段桩周土侧向约束提供的桩体竖向抗压承载力特征值
 R_{a1} ——筋箍段控制的顶部筋箍碎石桩承载力特征值
 R_{a1}' ——桩周土侧向约束与筋材环箍效应协同作用提供的桩体竖向抗压承载力特征值
 R_{a2} ——非筋箍段控制的顶部筋箍碎石桩承载力特征值
 R_{a2}' ——桩侧摩阻力与桩端阻力协同作用提供的桩体竖向抗压承载力特征值

Q_s ——筋箍段桩侧摩阻力特征值
 R ——圆弧滑动半径
 r_0 ——桩体初始半径
 r_p ——桩体变形后半径
 s ——筋箍碎石桩复合地基总沉降量
 s_1 ——复合地基加固区复合土层压缩变形量
 s_{11} ——加固区筋箍段复合土层压缩变形量
 s_{12} ——加固区非筋箍段复合土层压缩变形量
 s_2 ——加固区下卧土层压缩变形量
 T_a ——筋材抗拉强度设计值
 T_u ——筋材极限抗拉强度
 z ——自桩顶至计算点的深度
 σ_1 、 ε_1 ——桩体轴向应力、应变；
 σ_3 ——桩周土对桩体提供的有效侧向约束应力
 σ_{ru} ——桩周土所能提供的最大侧限力
 σ_{ru1} ——筋箍段桩周土所能提供的最大侧限力
 σ_{ru2} ——非筋箍段桩周土所能提供的最大侧限力
 τ_s ——桩周土侧阻力特征值
 Δp_i ——第*i*层土的平均附加应力增量
 α ——受压区扇形面积与桩身横截面面积的比值
 α_t ——受拉区筋材截面面积与总筋材截面面积的比值
 β_1, β_2 ——等效弯矩系数
 γ_s ——桩周土有效重度
 ε_r ——筋材达到 T_a 时的拉应变
 φ_p ——桩体填料内摩擦角
 φ_{ps} ——复合土体等效内摩擦角
 φ_s ——桩间土内摩擦角
 θ ——滑动面中点处切线与水平面的夹角
 ρ_{d0} ——桩体填料初始干密度

ρ_{dmax} ——桩体填料最大干密度

ψ_r ——筋材抗拉强度综合折减系数

ψ_s ——沉降计算经验系数

$[s]$ ——复合地基变形限值

3 设计

3.1 一般规定

3.1.1 筋箍碎石桩复合地基可用于加固十字板不排水抗剪强度 $\tau_{su} \geq 15\text{kPa}$ 的软弱地基。当 $10\text{kPa} \leq \tau_{su} < 15\text{kPa}$ 时，应通过现场试验确定其适用性。

条文说明

筋箍碎石桩在普通碎石桩外侧设置高抗拉强度筋材套筒，利用筋材的环箍约束作用提高桩身刚度、限制桩体鼓胀变形，在保留碎石桩排水功能的同时提高地基承载力、减少沉降量。

《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/TD31-02)和《公路路基设计规范》(JTG D30)规定沉管粒料桩适用于 $\tau_{su} > 20\text{kPa}$ 的地基。本规程编制组研究表明：筋箍碎石桩承载力较普通碎石桩提高30%~60%，按最低增幅30%折算，其适用于 $\tau_{su} \geq 15\text{kPa}$ 的地基。

工程实践中虽有在 $\tau_{su} < 10\text{kPa}$ 地基中应用筋箍碎石桩的成功案例，但综合考虑地质条件变异性、施工工艺差异等因素，为保障工程安全，本规程规定将 τ_{su} 下限取位15kPa。对于 $10\text{kPa} \leq \tau_{su} < 15\text{kPa}$ 的地基，应经现场试验验证后方可采用。

3.1.2 筋箍碎石桩复合地基设计前，应查明地基土层分布、成因类型、工程地质及水文地质条件，获取土层物理力学参数指标，并收集上部结构、场地环境等相关资料。

3.1.3 筋箍碎石桩复合地基设计应综合考虑上部结构、荷载特性、工程地质及水文地质条件、施工工艺、工期等因素，按路段分段进行专项设计。

3.1.4 筋箍碎石桩复合地基加固范围应超出基础底面积。高等级公路工程每侧宜增设1~3排桩，地质条件复杂或高路堤路段取上限值。

3.2 材料

3.2.1 桩身筋材应具备高抗拉强度、良好的抗腐蚀性与抗老化性能，并能对碎石桩形成有效的环箍效应，可采用土工格栅、钢丝网等。

3.2.2 选用土工格栅作为桩身筋材时，应符合下列规定：

1 宜采用双向塑料土工格栅，双向抗拉强度不应小于30kN/m，双向极限延伸率不应大于3%；

2 网孔尺寸应根据填料粒径及级配确定，不得使填料从网孔漏出；

3 材料性能应符合《公路工程土工合成材料 第1部分：土工格栅》（JT/T 1432.1）及《土工合成材料塑料土工格栅》（GB/T 17689）的规定；进场时应提供产品合格证、抗拉强度及延伸率检测报告；

4 运输时应采取覆盖防护措施，存放场地应通风干燥，严禁日光暴晒及靠近火源。

3.2.3 桩身筋材除土工格栅外，也可采用钢丝网等高抗拉强度、耐腐蚀、抗老化的材料，其选材应满足设计要求并结合工程实际确定。

3.2.4 桩体填料宜就地取材，选用碎石、卵石、角砾等硬质骨料，不得选用风化易碎石料。最大粒径不宜大于50mm，含泥量小于5%，级配良好，相对密实度 $D_r > 0.6$ 。

3.3 复合地基与桩体结构

3.3.1 筋箍碎石桩复合地基由筋箍碎石桩、桩间土及褥垫层组成（结构形式见图3.3.1）。设计时应保证在荷载作用下桩体与桩间土协同承载。

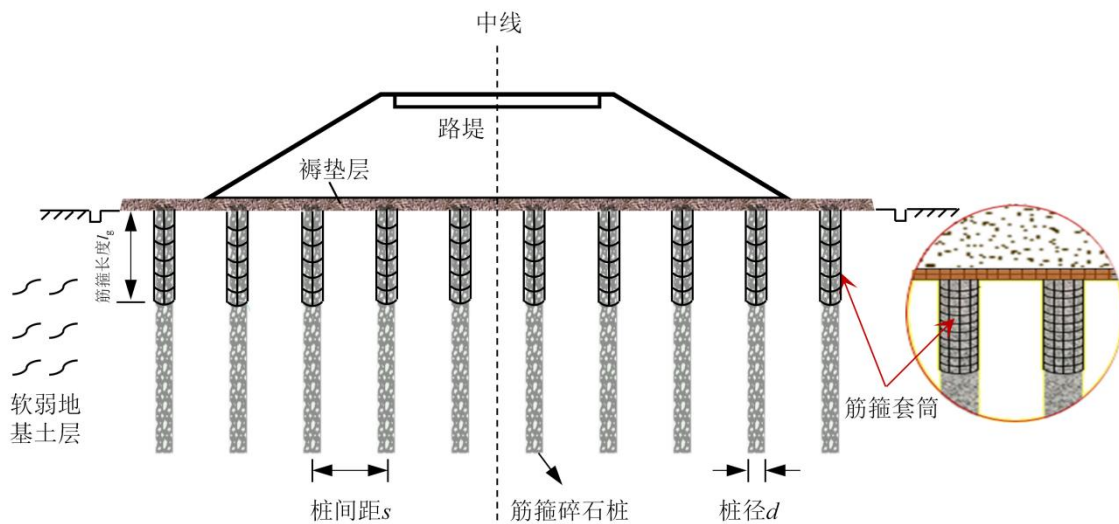


图 3.3.1 筋箍碎石桩复合地基结构形式示意图

3.3.2 筋箍碎石桩按筋材布设形式分为顶部筋箍碎石桩和全长筋箍碎石桩两类（图 3.3.2），其适用工况及筋箍套筒设计应符合下列规定：

1 适用工况：

（1）顶部筋箍碎石桩：适用于桩顶一定范围内需强化侧向约束的工况，如浅层软土地基或仅需控制桩顶鼓胀变形时；

（2）全长筋箍碎石桩：适用于需沿桩身全段提供环向约束的工况，如深厚软土地基或桩身整体稳定性要求较高时。

2 筋箍套筒设计：

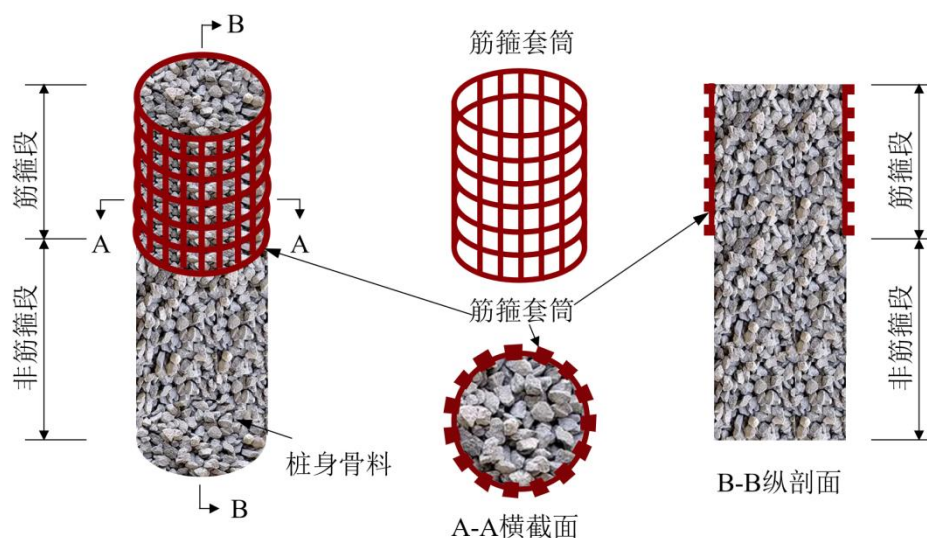
（1）顶部筋箍碎石桩的套筒长度不宜小于 2.0 m；

（2）以变形控制为主的工程，套筒长度应按复合地基变形限值 $[s]$ 确定；

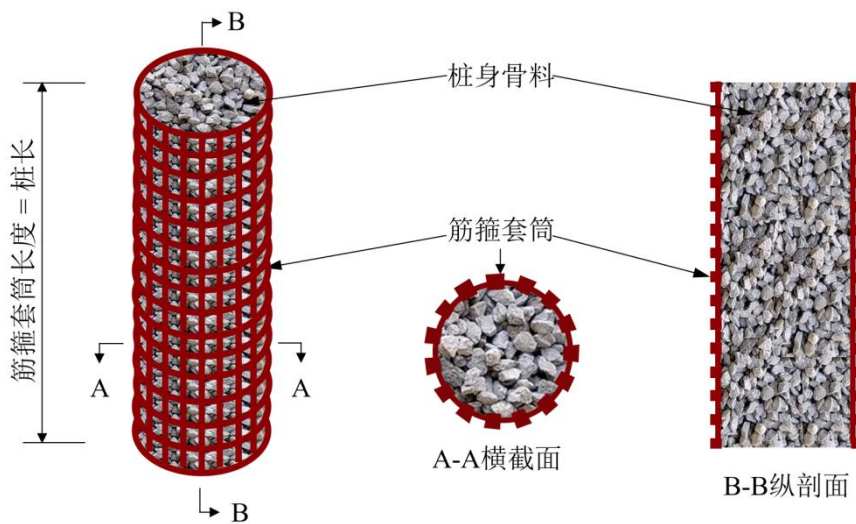
(3) 以稳定性控制为主的工程（含斜坡路段），套筒长度不应小于最危险滑动面深度 + 2.0m。

条文说明

顶部箍筋碎石桩套筒长度不宜小于2.0m，是基于桩顶附近2倍桩径范围内鼓胀变形最显著的工程经验。稳定性控制工程要求套筒长度不小于最危险滑动面深度加2.0m，是为防止滑动面处桩体发生弯剪破坏并留有安全冗余。



(a) 顶部筋箍碎石桩



(b) 全长筋箍碎石桩

图 3.3.2 筋箍碎石桩结构形式示意图

3.3.3 褥垫层设置应符合下列规定：

- 1 厚度不宜小于400mm；

2 材料宜选用碎石、砂砾等质地坚硬、透水性良好的粒料，不得选用风化易碎材料；

3 宜增设土工合成材料。当采用高强度土工织物、土工格栅时，可分别铺设于垫层上下表面；当采用土工格室时，可设置于垫层中部；盐渍土、膨胀土等特殊性地基中，褥垫层顶面应铺设复合土工膜；

4 土工合成材料的性能指标及铺设工艺应符合现行《公路土工合成材料应用技术规范》（JTG/T D32）的相关规定。

3.3.4 筋箍碎石桩的桩径、桩长、桩间距及布桩形式应按下列规定确定：

1 桩径：应根据地基土质条件、施工设备等因素综合确定。采用沉管法施工时，桩径宜采用 300mm~500mm，成桩直径与套管直径之比不宜大于 1.5；

2 桩长：较好土层埋深较小时，桩端应支撑于较好土层；若较好土层埋深较大时，变形控制的工程应满足复合地基变形 $\leq[s]$ ，稳定性控制工程应满足桩长 \geq 最危险滑动面深度 + 2.0 m；可液化地基中，应按抗震处理深度要求确定；

3 桩间距：应根据承载力、沉降及稳定性计算确定。采用沉管法施工时，桩间距宜为 2~4 倍桩径；

4 布桩形式：宜优先采用等边三角形布置，也可采用正方形、矩形或等腰三角形布置，具体应结合工程地质条件及设计要求确定。

3.4 桩体设计计算

3.4.1 筋箍碎石桩桩体设计计算的主要内容应包括桩身筋材强度、桩体竖向抗压承载力等。

3.4.2 筋材抗拉强度设计值 T_a 可按式(3.4.2-1)计算：

$$T_a = \frac{T_u}{\psi_r} \quad (3.4.2-1)$$

式中：

T_a ——筋材抗拉强度设计值（kN/m），计算结果向上取整；

T_u ——筋材极限抗拉强度(kN/m)，按现行《公路工程土工合成材料试验规程》(JTGE50)试验确定；

ψ_r ——筋材抗拉强度综合折减系数，可取2.0~4.0。工作环境较恶劣（如强盐渍土、高应力工况、服役期超过50年）或施工条件复杂（如填料棱角尖锐、填充压实能量高）时，取高值（3.0~4.0）；环境条件温和（如常规软土、中性地下水）、施工控制严格（如填料圆润、压实工艺规范）时，取小值（2.0~3.0）。

条文说明

筋箍碎石桩桩身土工格栅的受力与衰减特性具有显著特殊性：随着地基排水固结进程，地基土强度逐步提升，筋材所承受的作用力会逐渐减小；同时，桩身筋材埋置于地下，受外界环境直接影响较小，性能衰减程度低于常规外露土工合成材料。施工阶段损伤主要来自填料嵌挤磨损，无大型机械直接碾压；微生物及化学侵蚀作用也相对缓和。结合《公路土工合成材料应用技术规范》（JTG/T D32）中“综合折减系数（总折减系数）宜在 2.0~5.0 之间”的规定，以及“工作环境影响大取高值、影响小取小值”的取值原则，筋箍碎石桩的桩身筋材属于工作环境影响相对较小的情况，因此建议其综合折减系数取值为2.0~4.0。

3.4.3 筋箍碎石桩的竖向抗压承载力特征值应通过单桩竖向抗压载荷试验确定。初步设计时，应根据筋材布设形式，分别按下列规定计算：

（1）顶部筋箍碎石桩：应符合本规程第3.4.4条的规定；

（2）全长筋箍碎石桩：应符合本规程第3.4.5条的规定。

3.4.4 顶部筋箍碎石桩的单桩竖向抗压承载力特征值 R_a 应考虑筋箍段鼓胀、非筋箍段鼓胀两种潜在破坏模式，按最不利情况取计算结果最小值确定：

$$R_a = \min(R_{a1}, R_{a2}) \quad (3.4.4-1)$$

式中：

R_a ——顶部筋箍碎石桩的单桩竖向抗压承载力特征值（kN）；

R_{a1} ——筋箍段控制的顶部筋箍碎石桩单桩竖向抗压承载力特征值（kN）；

R_{a2} ——非筋箍段控制的顶部筋箍碎石桩单桩竖向抗压承载力特征值（kN）。

1 筋箍段控制时，单桩竖向抗压承载力特征值 R_{a1} 仅考虑筋箍段约束效应，按式(3.4.4-2)计算：

$$R_{a1} = A_p \cdot \left(\frac{\sigma_{ru1}}{K_s} + \frac{T_a}{r_p} \right) \cdot K_{pp} \quad (3.4.4-2)$$

式中：

A_p ——桩身横截面面积（ m^2 ）， $A_p = \pi r_0^2$ ；

σ_{ru1} ——筋箍段桩周土所能提供的最大侧限力（kPa），可按《复合地基技术规范》（GB/T 50783）第5.3.2条确定，采用圆孔扩张理论、Brauns计算方法、经验公式等；重要工程应采用2种及以上方法估算，结合区域工程经验合理取值；

K_s ——桩侧土抗力安全系数，可取2.0；

r_p ——桩体变形后半径（mm），可按 $r_p = r_0(1 + \varepsilon_r)$ 简化计算；

r_0 ——桩体初始半径（mm）；

ε_r ——筋材达到 T_a 时的拉应变，由筋材拉伸试验确定；

K_{pp} ——桩体填料被动土压力系数， $K_{pp} = \tan^2(45^\circ + \varphi_p/2)$ ；

φ_p ——桩体填料内摩擦角（°），填料为碎石时可取38°，为砂砾时可取35°，为砂时可取28°。

2 非筋箍段控制时，单桩竖向抗压承载力特征值 R_{a2} 由非筋箍段桩周土侧向约束提供的单桩竖向抗压承载力特征值 R_{a0}' 与筋箍段桩侧摩阻力特征值 Q_s 组成，按式 (3.4.4-3)~(3.4.4-5)计算：

$$R_{a2} = R_{a0}' + Q_s \quad (3.4.4-3)$$

$$R_{a0}' = A_p \cdot \frac{\sigma_{ru2}}{K_s} \cdot K_{pp} \quad (3.4.4-4)$$

$$Q_s = C_p \sum_{i=1}^n \tau_{s,i} h_{g,i} \quad (3.4.4-5)$$

式中：

R_{a0}' ——非筋箍段桩周土侧向约束提供的单桩竖向抗压承载力特征值（kN）；

Q_s ——筋箍段桩侧摩阻力特征值（kN）；

σ_{ru2} ——非筋箍段桩周土所能提供的最大侧限力（kPa），取值方法同本规程第3.4.4条中 σ_{ru1} ，但需考虑筋箍段桩周土自重的有利影响；

C_p ——桩身横截面周长（m）， $C_p = 2\pi r_0$ ；

$h_{g,i}$ ——筋箍段内第*i*层土的厚度（m）；

$\tau_{s,i}$ ——桩周第*i*层土的侧阻力特征值（kPa），应通过单桩竖向静载荷试验确定。初步设计时，当无当地可靠试验资料，对淤泥可取4kPa~7kPa，对淤泥质土可取 6kPa~12kPa，对软塑状态的黏性土可取 10kPa~15kPa，对可塑状态的黏性土可取 12kPa~18kPa，根据筋箍材料特性、施工工艺及地区经验等因素综合调整。

条文说明

竖向荷载作用下，顶部筋箍碎石桩存在以下两种破坏模式（图3.4.4-1）：

(1) 模式一（筋箍段控制）：筋箍段筋材强度不足，鼓胀破坏发生在筋箍段本身；

(2) 模式二（非筋箍段控制）：筋箍段筋材强度足够，鼓胀破坏发生在筋箍段以下的普通碎石桩段。

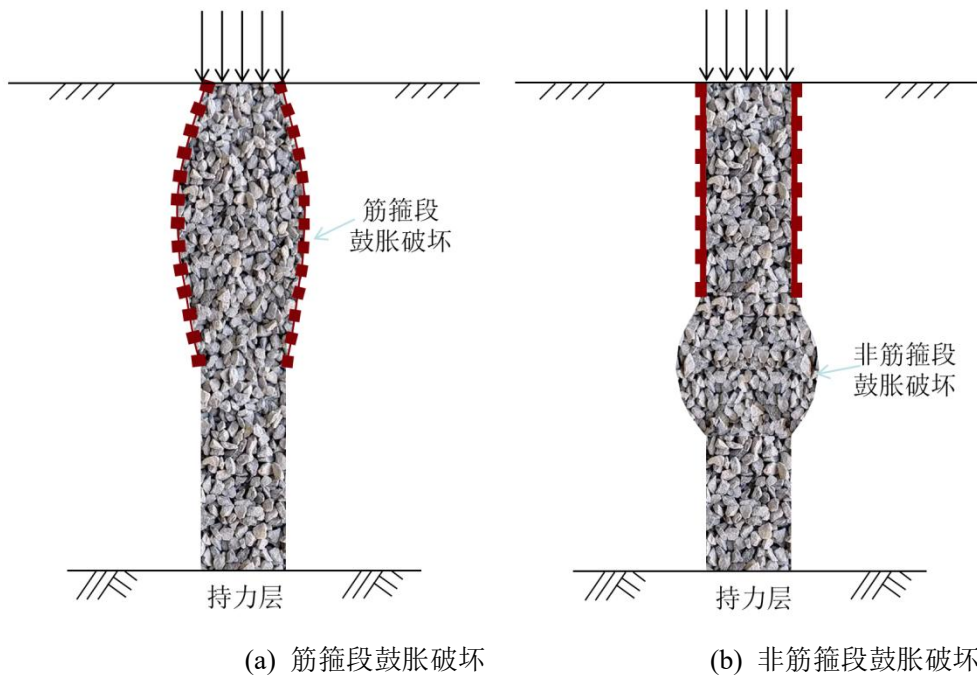


图3.4.4-1 顶部加筋箍碎石桩破坏模式示意图

筋箍碎石桩桩身填料为散体材料，其抗压强度来自侧向约束（图3.4.4-2），包括桩周土体提供的围压 σ_{rs} 和筋材因桩体鼓胀拉伸产生的附加围压 $\Delta\sigma_r=T/r$ （ T 为筋材环向拉力）。当桩体达到极限承载力时，桩周土与筋材的侧向约束会协同发展至各自的极限状态：桩周土侧向约束达到极限侧限 $\sigma_{rs}=\sigma_{ru}$ ，筋材环向拉力达到其设计抗拉强度 $T= T_a$ 。

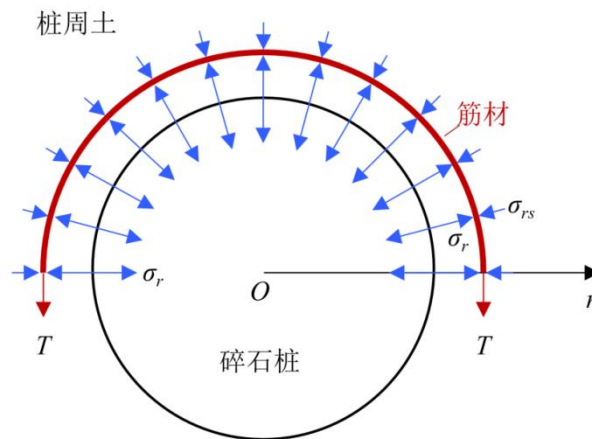


图3.4.4-2 筋箍碎石桩受力示意图

顶部筋箍碎石桩的核心设计逻辑是“分段受力+最不利控制”：模式一对应筋箍段的筋材约束与土体约束协同作用极限，模式二对应非筋箍段的桩周土侧限不足。模式一的约束机制与全长加筋箍碎石桩一致（土体极限侧限+筋材附加围压），仅计算范围限定为筋箍段长度。

需注意，筋箍段桩周土所能提供的最大侧限力 σ_{ru1} 与非筋箍段 σ_{ru2} 虽计算方法相同，

但 σ_{ru2} 需计入上覆土自重应力的有利影响，取值应大于或等于 σ_{ru1} 。

3.4.5 全长箍筋碎石桩桩身全段受筋材约束，其单桩竖向抗压承载力特征值 R_a' ，基于桩身全段筋材与桩周土的协同约束效应，分别按式(3.4.5-1)和式(3.4.5-2)计算后取小值：

$$R_{a1}' = A_p \cdot \left(\frac{\sigma_{ru}}{K_s} + \frac{T_a}{r_p} \right) \cdot K_{pp} \quad (3.4.5-1)$$

$$R_{a2}' = C_p \sum_{i=1}^n \tau_{s_i} h_{g_i} + \alpha_p q_p A_p \quad (3.4.5-2)$$

$$R_a' = \min(R_{a1}', R_{a2}') \quad (3.4.5-3)$$

式中：

R_a' ——全长加筋箍筋碎石桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

R_{a1}' ——桩周土侧向约束与筋材环箍效应协同作用提供的单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

R_{a2}' ——桩侧摩阻力与桩端阻力协同作用提供的单桩竖向抗压承载力特征值(kN)；

σ_{ru} ——桩周土所能提供的最大侧限力(kPa)，取值方法同本规程第3.4.4条中 σ_{ru1} 的规定；

q_p ——桩端地基土未经修正的承载力特征值(kPa)，可按现行《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)的有关规定确定；

α_p ——桩端端阻力发挥系数，可取 0.4~0.6，桩端地基承载力高时取小值。

3.5 复合地基设计计算

3.5.1 箍筋碎石桩复合地基设计计算的主要内容应包括复合地基承载力计算、复合地基沉降计算、复合地基稳定性分析等。

3.5.2 箍筋碎石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载荷试验确定；初步设计时，可按式(3.5.2-1)和式(3.5.2-2)计算：

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + (1-m) f_{sk} \quad (3.5.2-1)$$

$$m = \frac{d^2}{d_e^2} \quad (3.5.2-2)$$

式中： f_{spk} ——箍筋碎石桩复合地基承载力特征值(kPa)；

f_{sk} ——加固后的桩间土承载力特征值(kPa)，宜按当地经验取值；当无经验时，可取天然地基承载力特征值；

m ——复合地基面积置换率；

d ——桩体直径 (mm) ;

d_e ——单桩所分担的处理面积的等效圆直径 (m) , 根据布桩形式确定。等边三角形时, $d_e=1.05S$; 正方形时, $d_e=1.13S$; 矩形时, $d_e=1.13\sqrt{S_1S_2}$ 。其中, S 为等边三角形、正方形的桩间距 (m) , S_1 、 S_2 分别为矩形的纵向、横向桩间距 (m) 。

3.5.3 筋箍碎石桩复合地基的沉降由加固区复合土层压缩变形量和加固区下卧土层压缩变形量两部分组成。加固区复合土层压缩变形量应桩身加筋形式分段计算。

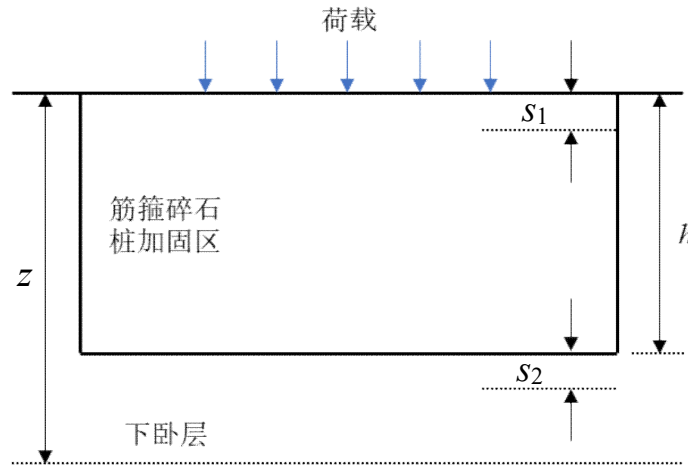


图3.5.3 复合地基沉降计算示意图

1 筋箍碎石桩复合地基总沉降量 (s) 按式 (3.5.3-1) 计算:

$$s = s_1 + s_2 \quad (3.5.3-1)$$

式中:

s ——筋箍碎石桩复合地基总沉降量;

s_1 ——加固区复合土层压缩变形量 (mm) , 根据桩身加筋形式分段计算;

s_2 ——加固区下卧土层压缩变形量 (mm) , 采用分层总和法计算。

2 加固区复合土层压缩变形量 (s_1) 应计入筋箍段与非筋箍段的共同作用, 按式 (3.5.3-2) 计算:

$$s_1 = s_{11} + s_{12} \quad (3.5.3-2)$$

式中:

s_{11} ——加固区筋箍段复合土层压缩变形量 (mm) ;

s_{12} ——加固区非筋箍段复合土层压缩变形量 (mm) 。

(1) 筋箍段压缩量 (s_{11}) 可采用复合模量法, 按式(3.5.3-3)和式(3.5.3-4)计算:

$$s_{11} = \sum \frac{\Delta p_i}{E_{\text{spg},i}} h_{g,i} \quad (3.5.3-3)$$

$$E_{\text{spg},i} = m \cdot E_{\text{pg},i} + (1 - m) \cdot E_{s,i} \quad (3.5.3-4)$$

式中：

Δp_i ——筋箍段内第 i 层复合土体的平均附加应力增量 (kPa)，可取该层顶面和底面附加应力增量的平均值；

$E_{\text{spg},i}$ ——筋箍段内第 i 层复合土体的压缩模量 (kPa)；

$E_{\text{pg},i}$ ——筋箍段内第 i 层筋箍碎石桩的压缩模量 (kPa)；

$E_{s,i}$ ——筋箍段内第 i 层桩间土的压缩模量 (kPa)。

(2) 非筋箍段压缩量 (s_{12}) 可采用复合模量法，按式(3.5.3-5)和(3.5.3-6)计算：

$$s_{12} = \sum \frac{\Delta p_i}{E_{\text{sp},i}} h_i \quad (3.5.3-5)$$

$$E_{\text{sp},i} = m \cdot E_{\text{p},i} + (1 - m) \cdot E_{s,i} \quad (3.5.3-6)$$

式中：

$E_{\text{sp},i}$ ——非筋箍段内第 i 层复合土体的压缩模量 (kPa)；

Δp_i ——非筋箍段内第 i 层复合土体的平均附加应力增量 (kPa)，可取该层顶面和底面附加应力增量的平均值；

$E_{\text{p},i}$ ——非筋箍段内第 i 层碎石桩的压缩模量 (kPa)；

$E_{s,i}$ ——非筋箍段内第 i 层桩间土的压缩模量 (kPa)；

h_i ——非筋箍段内第 i 层土的厚度 (m)。

3 加固区下卧土层压缩变形量 (s_2) 可采用分层总和法，按式(3.5.3-7)计算：

$$s_2 = \psi_s \sum \frac{\Delta p_i}{E_{s,i}} h_i \quad (3.5.3-7)$$

式中：

ψ_s ——沉降计算经验系数，按地区经验确定；

Δp_i ——下卧层第 i 层土的平均附加应力增量 (kPa)；

$E_{s,i}$ ——下卧层第 i 层土的压缩模量 (kPa)；

h_i ——下卧层第 i 层土的厚度 (m)。

4 作用在下卧层顶面的附加压力，应考虑加固区的桩土相互作用，可按压力扩散法或等效实体法计算；当缺乏资料时，也可忽略桩体作用，按天然地基计算。

条文说明

筋箍碎石桩复合地基的沉降计算中，加固区需按筋箍段与非筋箍段分别计算压缩量，主要基于以下原因：筋箍段因筋材环箍约束作用，桩体压缩模量显著高于非筋箍段，两段的桩土应力比和变形特性存在差异，分段计算更符合实际受力特征。

3.5.4 筋箍碎石桩复合地基的稳定性分析，应根据工程规模、基础形式、地质条件及分析目的，选用适宜的计算方法。稳定性分析中应重点考虑筋箍碎石桩可能发生的桩身弯曲破坏、桩体剪切破坏及桩间土剪切破坏等失稳模式，并应计入筋箍对碎石桩抗剪承载力的增强作用。

3.5.5 筋箍碎石桩复合地基整体稳定性分析可采用圆弧条分法（图3.5.5-1）。当场地存在软弱夹层、斜坡地基或可能形成复式滑动面时，宜采用不平衡推力法进行补充验算；对安全等级较高或地质条件复杂的重要工程，除采用上述方法外，尚宜结合数值分析方法（如强度折减法等）对整体稳定性进行验证。

条文说明

在筋箍碎石桩复合地基路堤的稳定性分析中，土体、桩体及褥垫层均有抗滑作用。但由于褥垫层（尤其是加筋褥垫层）的抗滑作用暂无成熟的计算方法，本规程暂不考虑其抗滑作用。

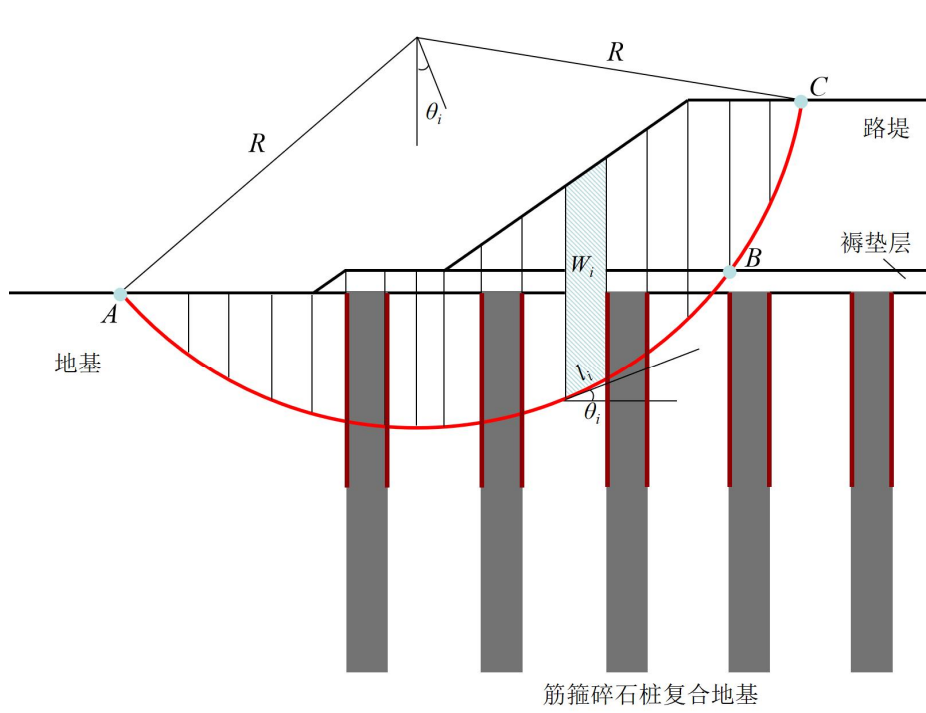


图3.5.5-1 筋箍碎石桩复合地基路堤稳定性分析圆弧条分法示意图

3.5.6 筋箍碎石桩复合地基整体稳定安全系数 F_s 可按式(3.5.6-1)计算:

$$F_s = \frac{M_R}{M_D} \quad (3.5.6-1)$$

并应满足:

$$F_s \geq [F_s] \quad (3.5.6-2)$$

式中:

F_s ——筋箍碎石桩复合地基整体稳定安全系数;

M_R ——最危险滑动面上的总抗滑力矩 (kN·m);

M_D ——荷载效应标准组合下最危险滑动面上的总滑动力矩 (kN·m);

$[F_s]$ ——安全系数容许值,应符合本规程第3.5.9条的有关规定。

总滑动力矩 M_D 可按式(3.5.6-3)计算:

$$M_D = \sum [(W_i + p_i b_i) \sin \theta_i] R \quad (3.5.6-3)$$

总抗滑力矩 M_R 由路堤土体抗滑力矩 M_{Re} 和复合地基抗滑力矩 M_{Rc} 两部分组成,按式(3.5.6-4)计算:

$$M_R = M_{Re} + M_{Rc} \quad (3.5.6-4)$$

路堤土体抗滑力矩 M_{Re} 可按式(3.5.6-5)计算:

$$M_{Re} = \sum (c_e l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_e) R \quad (3.5.6-5)$$

以上各式中:

M_{Re} ——路堤土体抗滑力矩 (kN·m);

M_{Rc} ——复合地基抗滑力矩 (kN·m);

c_e 、 φ_e ——路堤土体的黏聚力 (kPa) 和内摩擦角 ($^\circ$);

W_i ——第*i*个土条重力 (kN),当土条范围涵盖路堤与地基时,为对应范围内路堤土体与地基土体的重力之和;

p_i ——作用在第*i*个土体上车辆荷载等效的均布荷载 (kN/m);

b_i ——第*i*个土条宽度 (m);

l_i ——第*i*个土条对应滑动面的弧长 (m);

θ_i ——第*i*个土条滑动面中点处切线与水平面的夹角 ($^\circ$);

R ——圆弧滑动半径 (m)。

3.5.7 在初步设计、快速估算,或对变形控制要求较低、筋材刚度较小,且地基破坏模式以整体剪切破坏为主时,可将筋箍碎石桩加固区等效为均质复合土体,采用圆弧滑动

条分法进行整体稳定性分析。但不宜用于筋材刚度较大、桩体弯曲破坏对整体稳定性起控制作用的工程。

采用复合土体法时，复合地基抗滑力矩 M_{Rc} 可按式(3.5.7-1)计算：

$$M_{Rc} = \sum (c_{ps}l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_{ps})R \quad (3.5.7-1)$$

式中：

c_{ps} 、 φ_{ps} ——复合土体的等效黏聚力（kPa）和等效内摩擦角（°）。

复合土体的黏聚力 c_{ps} 和内摩擦角 φ_{ps} 按加权平均法确定：

$$c_{ps} = m \cdot c_p + (1-m) \cdot c_s \quad (3.5.7-2)$$

$$\tan \varphi_{ps} = m \cdot \tan \varphi_p + (1-m) \cdot \tan \varphi_s \quad (3.5.7-3)$$

式中：

c_s 、 φ_s ——桩间土的黏聚力（kPa）和内摩擦角（°）；

c_p 、 φ_p ——筋箍碎石桩桩体的等效黏聚力（kPa）和内摩擦角（°）。

筋箍碎石桩桩体的等效黏聚力 c_p 可按式(3.5.7-4)计算：

$$c_p = \frac{T_a}{2r_p} \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right) \quad (3.5.7-4)$$

条文说明

本条采用的稳定性分析方法，其核心是将筋箍碎石桩加固区等效为均质复合土体。其中，桩体等效黏聚力是体现加固效果的关键参数。该参数基于桩体破坏时的极限平衡条件推导得出，具体过程如下：

筋箍碎石桩桩体为散体材料，其承载能力受筋材约束作用显著提升。当桩体达到极限平衡状态时，极限大主应力 $\sigma_{1,max}$ 由两部分提供：一是桩周土产生的小主应力 σ_3 ，二是筋材张拉产生的环向约束力。据此建立极限大主应力表达式：

$$\sigma_{1,max} = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right) + \frac{T_a}{r_p} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right)$$

根据散体材料极限平衡理论，对于具有黏聚力 c_p 和内摩擦角 φ_p 的土体，极限大主应力与小主应力满足摩尔-库仑强度准则：

$$\sigma_{1,max} = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right) + 2c_p \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right)$$

联立上述两式，消去相同项 $\sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right)$ 后可得：

$$\frac{T_a}{r_p} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right) = 2c_p \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2} \right)$$

两边同时除以 $\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2}\right)$ （该值不为零）进行化简，最终得到桩体等效黏聚力 c_p 的计算公式：

$$c_p = \frac{T_a}{2r_p} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2}\right)$$

3.5.8 当路堤工程安全等级较高、变形控制严格，或潜在危险滑动面穿越坡脚附近桩体且筋材刚度较大、桩体易发生弯曲破坏时，可采用桩体弯曲破坏法进行整体稳定性分析。

采用桩体弯曲破坏法时，复合地基抗滑力矩 M_{Rc} 可按式(3.5.8-1)~(3.5.8-5)计算：

$$M_{Rc} = M_{rs} + M_{rp} \quad (3.5.8-1)$$

$$M_{rs} = (c_s l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_s) R \quad (3.5.8-2)$$

$$M_{rp} = \sum \left[\frac{1.2 M_u \cos \theta_i}{h_{u,i}} \left(R - \frac{h_{u,i}}{1.2} \sec \theta_i \right) + W_i R \cos \theta_i \tan \varphi_g \right] \quad (3.5.8-3)$$

$$M_u = \beta_1 f_c A_p r_p + \beta_2 T_a C_p r_p \quad (3.5.8-4)$$

$$f_c = \left(\sigma_{ru} + \frac{T_a}{r_p} \right) \cdot K_{pp} \quad (3.5.8-5)$$

以上各式中：

M_{rs} ——桩间土体抗滑力矩之和（kN·m）；

M_{rp} ——桩体抗滑（抗弯）力矩之和（kN·m）；

M_u ——桩体临界弯矩（kN·m）；

f_c ——桩体等效抗压强度（kPa）反映碎石集料在环向筋材约束下的综合抗压能力；

$h_{u,i}$ ——受弯区第*i*根桩所在土体滑动面以上的桩长（m）；

β_1 、 β_2 ——等效弯矩系数， $\beta_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi}$ ， $\beta_2 = \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi}$ 。

α_t ——受拉区筋材截面面积与总筋材截面面积的比值， $\alpha_t = 1.25 - 2\alpha$ ；

α ——受压区扇形面积与桩身横截面面积的比值，也即受压区圆心角（rad）与 2π 的比值，反映了破坏时截面中性轴的位置。对于筋材拉伸强度设计值为10kN/m~400kN/m、桩径为300mm~2000mm、桩体内摩擦角为 $28^\circ \sim 46^\circ$ 的筋箍碎石桩，可取 $\alpha=0.301$ 。

条文说明

已有研究表明，在筋材刚度较大、桩径较小或潜在滑动面穿越坡脚附近桩体的工况下，筋箍碎石桩整体滑动过程中的破坏形式不以桩体整体剪切破坏为主，而是由桩身弯

曲破坏控制边坡稳定性。此时，筋箍碎石桩在路堤边坡荷载作用下的弯曲破坏可类比为“周边均匀配筋”的圆形截面钢筋混凝土构件，其受力特性及计算示意图3.5.8-1。

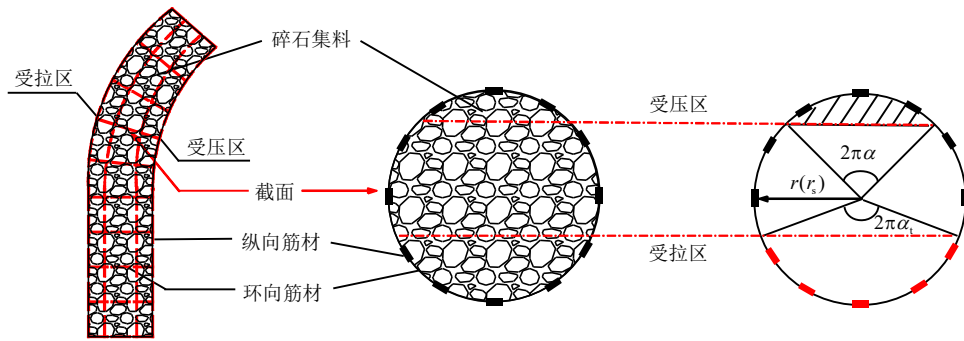


图3.5.8-1 筋箍碎石桩正截面受弯受力分析示意图

结合筋箍碎石桩的结构特殊性，建立如下力学模型及假定：

(1) 受力分区特性：受拉侧拉力由土工格栅套筒的纵向筋材承担，受压侧压力由环向筋材约束的碎石集料承担。由于碎石集料无抗拉能力，计算中忽略受拉区集料作用；同时不计筋材的抗压强度，仅考虑其抗拉作用。

(2) 平截面假定：桩身在弯曲破坏前满足平截面假定，即桩身截面弯曲后仍保持平面，为后续公式推导提供理论基础。

桩身弯曲变形过程中，受拉侧筋材应力随变形同步增大。参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010)中圆形截面受弯构件的计算方法，结合筋箍碎石桩特性，当受拉区筋材达到设计抗拉强度时，判定桩身进入失稳临界状态，此时对应的截面弯矩定义为临界弯矩 M_u 。

计算中忽略筋材厚度，将土工格栅套筒半径视为与桩体半径一致，基于上述假定及力与力矩平衡条件，推导得到筋箍碎石桩临界弯矩 M_u 计算公式如下：

$$\begin{aligned} M_u &= \frac{2}{3} f_c A_p r_p \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + T_a C_p r_p \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi} \\ &= \beta_1 f_c A_p r_p + \beta_2 T_a C_p r_p \end{aligned}$$

式中：

f_c ——桩体等效抗压强度，反映碎石集料在环向筋材约束下的综合抗压能力；

桩体等效抗压强度 f_c 可按下式计算：

$$f_c = \left(\sigma_{ru} + \frac{T_a}{r_p} \right) \cdot K_{pp}$$

α_t ——受拉区筋材截面面积与总筋材截面面积的比值， $\alpha_t = 1.25 - 2\alpha$ ；

α ——受压区扇形面积与桩身横截面面积的比值，也即受压区圆心角 (rad) 与 2π 的比值，反映了破坏时截面中性轴的位置。

$$\beta_1、\beta_2\text{——系数，}\beta_1 = \frac{2\sin^3 \pi\alpha}{3\pi}, \beta_2 = \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi}$$

α 需求解以下超越方程确定：

$$\alpha f_c A_p \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha} \right) + (\alpha - \alpha_t) T_a C_p = 0$$

为确定参数 α 的取值范围，编制组选取80个不同参数组合的筋箍碎石桩案例进行计算分析，参数取值覆盖工程常用范围及试验实测数据：筋材拉伸强度10kN/m~400 kN/m、桩径300mm~2000mm、桩体内摩擦角28°~46°。计算结果见图3.5.8-2， α 值范围为0.27~0.36，平均值为0.301。

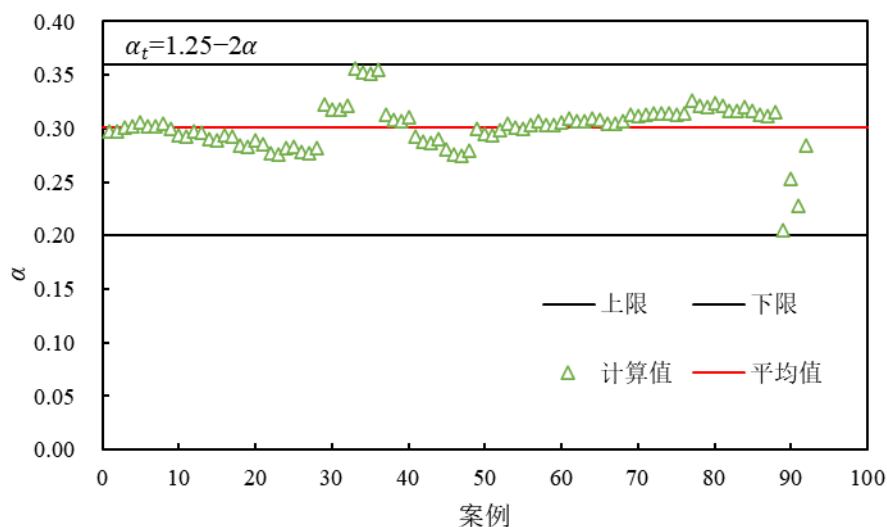


图3.5.8-2 α 的取值范围

为便于工程设计应用，本条统一取 $\alpha=0.301$ 进行简化计算。将 $\alpha=0.301$ 代入上述临界弯矩计算公式，可得公式系数 $\beta_1=0.113$ 、 $\beta_2=0.543$ 。

当桩身受弯截面达到临界弯矩 M_u 后，桩身在滑裂面处形成塑性铰，进入屈服阶段并发生内力重分布。由于筋箍碎石桩具有较强柔性，破坏时滑裂面附近会形成塑性铰并伴随一定范围的塑性变形，而非脆性断裂。受内力重分布效应影响，桩体实际等效抗弯作用大于单一截面理论临界弯矩。为充分发挥材料潜力并兼顾结构安全，引入1.2的修正放大系数，考虑塑性变形带来的抗弯能力提升。

桩体抗弯能力经滑裂面方向投影及受弯区有效力臂换算后，最终转化为对整体滑动的抗滑力矩。

此外，上述稳定性分析宜采用迭代法寻找最危险滑动面，具体流程如下：首先采用传统极限平衡法（假定剪切破坏）确定初次滑动面；根据滑动面深度 h_u 计算受弯区桩身的临界弯矩；将上述等效抗滑力矩 M_{rp} 代入分析模型，重新搜索滑动面，重复上述步骤直至安全系数收敛，最终确定最危险滑动面及对应安全系数。

3.5.9 复合地基路堤稳定容许安全系数

复合地基路堤稳定容许安全系数 $[F_s]$ 应根据抗剪强度指标的试验方法确定，不同试验方法对应的容许安全系数应符合表3.5.9的规定。

表3.5.9 复合地基路堤稳定容许安全系数

抗剪强度指标试验方法	容许安全系数 $[F_s]$
直剪不固结不排水剪、三轴不排水剪（UU试验）	1.1~1.2
直剪固结快剪、三轴固结不排水剪（CU试验）	1.2~1.3
直剪固结排水剪、三轴固结排水剪（CD试验）	1.4

注：表列安全系数未考虑地震影响，当需考虑地震荷载时，表列值减小0.1；计算时不考虑固结取小值，考虑固结取高值。

条文说明

本条参考《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/T D31-02）中关于路堤稳定性分析的技术要求，结合筋箍碎石桩复合地基工程特性，明确抗剪强度指标试验方法与安全系数的对应关系。

4 施工

4.1 一般规定

4.1.1 筋箍碎石桩的施工应编制施工组织计划，明确施工工艺、施工参数及质量控制措施。施工工艺应结合工程地质条件、设计要求、施工设备适用性及工期要求综合选定。

4.1.2 施工前应做好各项准备工作，包括场地平整、施工材料进场检验与存放、施工放样、施工设备调试与检查、技术交底及施工人员安全培训等。

4.1.3 桩体施工宜采用振动沉管法。振动频率、沉管速度、拔管速度、填料量等施工参数，应根据工程规模、地质条件、桩径、桩长等设计参数及施工场地实际情况合理确定并优化。成桩顺序应根据地基土质确定：对黏性土地基，宜从中间向外围推进或采用间隔跳打方式；对砂土、粉土地基，宜从外围向中间进行。当邻近存在既有构筑物时，应背离构筑物方向施工。

4.1.4 二级及二级以上公路工程，应选择有代表性的路段开展现场成桩试验，试验桩数量及布置应符合本规程第 4.4.2 条的规定，试验合格后方可进行大面积施工。

4.2 筋箍套筒制作

4.2.1 筋箍套筒可按设计要求选用土工格栅、钢丝网等筋材卷制成桩身套筒。筋材搭接宽度应满足：土工格栅不应小于 150mm，钢丝网不应小于 100mm；搭接接缝处应连接牢固，防止施工过程中松动或脱开；卷制完成后应检查套筒整体外观，确保表面平整、无破损、无褶皱。

4.2.2 土工格栅套筒搭接接缝可采用双股尼龙绳交叉绑扎（绑扎间距不应大于 200mm）或尼龙搭扣粘接，尼龙绳、尼龙搭扣的强度及节点抗拉强度均不应小于筋材的抗拉强度；钢丝网套筒搭接接缝应采用满焊处理，焊缝应连续无夹渣、虚焊，焊接完成后应清除焊渣并做防锈处理。

4.2.3 套筒长度应符合设计要求，允许偏差宜为 $\pm 100\text{mm}$ 。套筒外径应比桩管内径小 20mm~30mm，确保能顺利放入桩管且与管体内壁保持适当间隙。

4.3 桩管制作

4.3.1 筋箍碎石桩桩管可以常规振动沉管碎石桩桩管为基础进行改装，桩管及活瓣靴应符合下列要求：

1 桩管选材：钢套筒（桩管）应具有足够的强度、刚度和耐磨性，宜采用优质碳素结构钢或低合金高强度结构钢的热轧无缝钢管。壁厚不应小于管径的 1.5%，且不应小于 6mm。内径不应小于设计桩径；桩管长度不应小于设计桩长，自带活瓣靴时钢套筒长度应为下端活瓣靴打开后的总长度。

2 活瓣靴要求：活瓣靴宜采用 3 瓣~5 瓣结构，长度宜为 300mm~500mm，与钢套筒宜采用焊接连接，焊缝应饱满、平整且光滑，无夹渣、虚焊等缺陷。

4.3.2 槽口开设位置应根据筋箍套筒高度确定（常规套筒高度 2.0m 时，槽口底端距管体底端 2.0m~4.0m），槽口宽度为管体直径的 0.25~0.3 倍、高度不应小于筋箍套筒长度；若套筒高度调整，槽口位置应同步调整，调整方案需经设计单位确认；切割后槽口边缘应打磨光滑并涂刷环氧富锌防锈漆，避免锈蚀或划伤筋箍套筒。

4.3.3 弧形门应采用槽口切割下来的桩管母材加工制作（确保材质、强度与桩管一致）；通过高强度轴承与槽口边缘连接；安装后弧形门关闭时应与管体表面平齐密封（缝隙不应大于 2mm），打开角度不应小于 90°，保证筋箍套筒能顺利放入。

4.3.4 改装后应进行质量校验。连接弧形门与桩管的轴承焊缝应饱满无缺陷，门的开关调试应灵活无卡顿；改装完成后应试运转（模拟沉管、拔管及弧形门开关动作），确保槽口及弧形门结构在振动施工中稳定可靠，槽口处无变形、开裂风险。

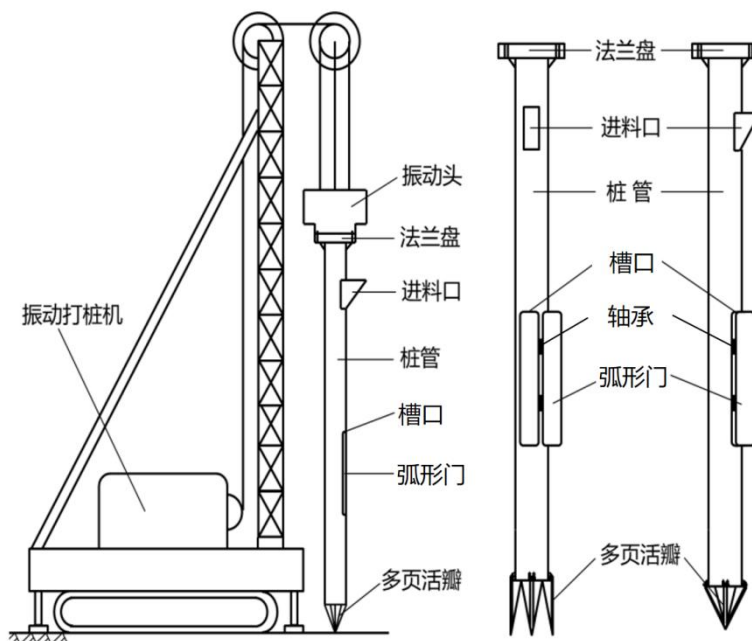


图 4.3 沉管法筋箍碎石桩桩管及施工设备示意图

4.4 成桩试验

4.4.1 施工前应进行成桩试验，确定桩体最佳充盈系数（可初取1.2~1.4）、振动频率、拔管速度等关键施工参数，并检验成桩工艺的可行性与成桩质量。当成桩试验结果不能满足设计要求时，应调整设计或施工参数，并重新组织试验。

4.4.2 成桩试验的桩数及布置应符合下列要求：

1 试验桩数量：等边三角形布桩时，不应少于7根（中间1根，周围6根）；正方形布桩时，不应少于9根（按三排三列布桩）。对于重要工程或地质条件复杂的路段，应增加试验桩数量。

2 试验桩位置：应选择在地质条件具有代表性的路段进行。

4.4.3 成桩试验时应采用与正式施工相同的工艺、设备及材料进行，并应详细记录各项施工参数，包括：桩号、施工日期、桩位坐标、成孔深度、各次填料量、振动频率、振动时间、拔管速度、留振时间、总填料量及充盈系数等。

4.4.4 试验桩应进行质量检测，检测项目包括桩身垂直度、桩位偏差、桩径、填料密实度、筋箍套筒的完整性和就位情况等，并根据检测结果评估施工工艺和参数的合理性。

4.5 振动沉管施工

4.5.1 设备就位

将振动沉管设备移至施工位置，关闭弧形门，调整设备使其稳定且竖直，确保桩管中心与预定桩位对中。校核桩管垂直度，确保桩管与振动头连接牢固。

4.5.2 沉管成孔

启动振动设备，采用匀速沉管方式将桩管沉入预定加固深度，沉管速度宜控制在0.8m/min~1.5m/min，在软弱土层或遇阻力时，应适当减慢。沉管过程中应实时监测振动电流变化，当电流突然增大时，应放慢沉管速度或暂停沉管，待电流稳定后再继续施工。沉管深度应以设计桩长控制为主，并辅以电流变化和贯入度进行综合判断。当桩管底端到达预定深度时，停止振动下沉，留振 30s~60s，确保孔壁稳定、无明显坍塌现象。

4.5.3 填料与拔管

从桩管顶端进料口向桩管内灌入填料，填料灌入量应根据施工前成桩试验结果控制，并应保证桩管振动上拔过程中，桩管内碎石面与桩顶设计标高距离大于套筒高度。拔管过程中应控制拔管速度，宜为1.2m/min~1.5m/min，在软弱土层中应适当减慢。

应采用“一拔一留振”的作业方式，每次提升1.0m~2.0m，留振30s~60s，确保桩体填料密实，不得出现断桩、缩颈现象。在需要时，可采用反插工艺，反插深度宜为0.3m~0.5m。

条文说明

振动沉管法的拔管速度是控制成桩质量的关键参数。现行主要技术标准对类似工艺的拔管速度规定如下：

1 《建筑地基处理技术规范》（JGJ 79）第7.7.3条规定，水泥粉煤灰碎石桩（CFG桩）振动沉管灌注成桩的拔管速度宜为 1.2m/min~1.5m/min。

2 《复合地基技术规范》（GB/T 50783）第14.3.2条规定，刚性桩沉管灌注成桩拔管速度宜控制在 1.5m/min~2m/min，遇淤泥或淤泥质土时取低值。

3 《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/T D31-02）第7.5.6条规定，粒料桩振动沉管法拔管速度宜控制在 1.5m/min~3.0m/min。

4 《公路路基施工技术规范》（JTG F10）第6.3.13条规定，Y型沉管灌注桩的拔管速度应保持在 1.0m/min~1.2m/min。

筋箍碎石桩在振动拔管过程中，需确保内部的筋箍套筒位置稳定。过快的拔管速度产生的上拔力及振动扰动，极易导致筋材套筒被带出、移位或桩体填料振密不充分，从而形成断桩、缩颈或套筒失效等缺陷。综合上述规范规定并考虑筋箍结构的特殊性，为在保证桩体密实度的前提下确保筋箍套筒有效就位，本条规定筋箍碎石桩的拔管速度宜为 1.2m/min~1.5m/min，在软弱土层中应适当减慢。

4.5.4 筋箍套筒安装位置确定

当桩管拔升至槽口底端与桩顶设计标高平齐时，停止拔管并关闭振动设备，打开弧形门；采用测量卷尺精准检测碎石顶面与槽口底端的距离，若超过套筒高度，应从槽口补充灌入碎石并开启振动设备压实，反复检查调整，直至碎石面距槽口底端平面高度正好等于套筒高度。

4.5.5 筋箍套筒安装与固定

将制作合格的筋箍套筒从槽口缓慢竖直放入，放入过程中确保套筒无扭曲、无破损；从槽口继续灌入碎石，灌入量应满足拔管结束后桩顶标高达到设计标高要求；启动振动设备振动 30s~60s，通过碎石压实作用固定筋箍套筒，防止后续施工中发生位移；关闭弧形门，仔细检查密封情况，确保无缝隙，防止填料泄漏。

4.5.6 成桩完成

继续向桩管内填充碎石填料，重复振动拔管工序，直至桩管完全拔出地面；拔管过程中应确保弧形门始终保持关闭状态，桩顶碎石面应高出设计标高 50mm~100mm。桩体施工完成后，应及时清理桩位周围浮土，按“桩号 - 施工日期 - 施工人员”的格式清晰标识桩体，并设置警示标志避免施工车辆碾压；成桩 24h 内，禁止在桩位周边 1m 范围内进行重型作业。单根桩施工完成后，桩机移位开展下一根桩的施工。

4.6 褥垫层施工

褥垫层施工应符合下列要求：

- 1 施工作业应在桩体施工完成并检验合格后进行。
- 2 施工前应清理平整场地，清除场地表面松散桩体及桩顶高出设计标高的部分。
- 3 褥垫材料宜选用碎石、砂砾等质地坚硬、透水性良好的粒料。
- 4 褥垫层厚度宜不小于400mm，铺设范围应超出基础边缘，其宽出部分不宜小于褥垫层的厚度。
- 5 宜采用机械碾压施工，碾压工艺和分层摊铺厚度应根据现场试验确定，压实遍数不宜少于4遍。

5 质量控制与监测

5.1 施工质量检查

筋箍碎石桩施工过程中，应按下列规定进行质量检查：

1 材料质量控制：原材料性能应满足设计要求。其中，土工格栅应核实材料的产地、品种、规格、批次、外观、生产日期、数量及相关合格证明材料，对设计要求的参数进行抽样检验，其检测频率和方法应符合现行《公路工程土工合成材料应用技术规范》(JTG/T D32)的规定；桩体充填料及褥垫层材料应逐批检测，各项性能均应符合设计要求。

2 桩管定位与垂直度控制：桩长不应小于设计值，桩身垂直度允许偏差不应大于1%，桩位允许偏差不应大于桩径的1/4。施工期间应定期检查桩管磨损状况，确保桩管活瓣靴开闭灵活、弧形门密封完好。

3 桩体密实度控制：应通过振动设备确保填料密实，拔管时留振时间、振动频率按成桩试验确定，避免桩体出现空洞、松散等缺陷。

4 筋箍套筒性能与安装：筋箍套筒尺寸应满足安装要求，其外径应比桩管内径小20mm~30mm。套筒卷边搭接处应绑扎牢固，搭接质量符合本规程第4.2.1条要求，确保施工过程中不松动、不移位。

5 筋箍套筒长度控制：应严格控制拔管进度与振动频率，确保筋箍套筒在桩体内的有效长度符合设计要求。施工后应对桩头进行检查，若发现套筒高出地面或有效长度不足，应立即采取补救措施。

6 施工记录检查：应检查每根桩的施工记录是否齐全、准确，包括桩号、日期、深度、填料量、电流、拔管速度、留振时间等。

5.2 成桩质量检验

5.2.1 成桩质量检验方法及抽检数量应符合下列规定：

1 检验区段划分：检验应按区段划分，地质条件相近、设计参数及施工工艺一致的场地可划分为同一检验区段，抽检点位应均匀分布。施工异常部位、重要功能区域、岩土特性复杂区域应列为重点检验区域。

2 桩位偏差检验：可采用钢尺量测法检验桩位偏差，偏差标准应符合本规程第5.1.1条第2款的规定；抽检数量不应少于总桩数的2%。

3 检测时间要求：桩身质量、单桩承载力、桩间土承载力及复合地基承载力检测，应在施工完成后间隔一定时间进行，间隔时间应根据地基土质类型确定：

- (1) 黏性土地基：间隔时间不应少于 28d；
- (2) 粉性土地基：间隔时间不应少于 14d；
- (3) 砂土地基：间隔时间不应少于 7d。

4 桩径、桩长检验：可通过现场量测与查阅施工记录评定桩径、桩长是否满足设计要求。

5 桩身质量检查：可采用重型动力触探法检验桩身密实度，要求贯入量 100mm 时的锤击数不应少于 5 击；抽检数量应为总桩数的 1%~2%，且每个单体工程或独立工点抽检数量不应少于 3 根。

6 承载力检验：对筋箍碎石桩复合地基，承载力检验应采用静荷载试验法，抽检数量规定如下：

- (1) 单桩承载力：抽检数量不应少于总桩数的 0.5%，且不得少于 3 根；
- (2) 复合地基承载力：抽检数量应为总桩数的 0.5%~1%，且每个单体工程抽检数量不得少于 3 处。

5.2.2 检验结果合格时，应及时将检测报告提交建设、设计、监理等相关单位，作为工程竣工验收的依据之一；当检验发现质量问题时，应立即通知施工单位制定专项整改方案并实施整改。整改完成后应重新组织检验，直至检验合格。整改过程应形成专项记录，详细载明整改措施、实施过程及整改结果，确保质量问题闭环处理。

5.3 施工监测

5.3.1 筋箍碎石桩复合地基工程应进行施工阶段的全过程监测。监测工作应覆盖桩体施工期与路基填筑期。施工前应根据工程地质条件、周边环境、设计及施工方案编制专项监测方案，明确监测项目、测点布置、控制标准、预警值及信息反馈流程，经监理单位审查后实施。

5.3.2 监测内容应根据工程安全与控制需求确定，并应符合下列规定：

1 桩体施工期：应对施工影响范围内的地表沉降、深层土体水平位移进行监测。当施工区域邻近既有建（构）筑物、地下管线或位于敏感环境时，尚应对其变形进行监测。

2 路基填筑期：必须进行地表沉降与坡脚水平位移监测。对高路堤、桥头路段、软土深厚等特殊或重要路段，尚应进行深层土体水平位移、分层沉降及孔隙水压力监测。

3 周边环境影响监测：当施工可能对邻近建（构）筑物、道路、管线产生不良影响时，应对其竖向及水平位移、裂缝开展情况进行监测。

5.3.3 监测点布置应具有代表性，能反映监测对象的实际状态。主要监测断面应垂直于路堤中心线布置。沉降监测点应沿路堤中心线、两侧路肩及坡脚布置；水平位移监测点应布置于坡脚外及潜在滑动区域。监测基准点应设置在变形影响范围以外的稳定区域。

5.3.4 监测频率应与施工工况、加载速率和变形发展相适应，并应符合下列规定：

1 桩体施工期间，应对关键部位每日进行监测。

2 路基填筑期间，每填筑一层应监测一次。当填筑间歇时间较长时，每 3 天至少监测一次。

3 当路堤填筑高度接近设计临界高度时，应加密监测频率。

4 当监测数据变化异常或接近控制标准时，应立即提高监测频率。

5.3.5 路堤填筑期间，必须进行稳定性控制。地基沉降与水平位移速率控制标准应符合现行《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》（JTG/T D31-02）的有关规定。当设计有更严格要求时，应按设计要求执行。

5.3.6 监测数据应及时采集、整理和分析，绘制时程曲线，动态评估地基稳定性与变形发展趋势。监测成果应定期报送建设、设计、监理和施工单位。

5.3.7 当监测数据达到预警值或超过本规程第 5.3.5 条规定的控制标准时，监测单位必须立即发出预警。施工单位应暂停施工，并会同设计、监理等单位分析原因，采取有效措施。待险情排除、监测数据恢复正常后，方可继续施工。

5.3.8 施工阶段全部监测工作应形成完整记录。监测资料应作为评价施工安全、验证处理效果及工程竣工验收的必要文件。

5.4 工程验收

5.4.1 筋箍碎石桩复合地基工程验收应在所有施工及质量检验工作完成后进行，验收程序应符合国家和行业现行公路工程相关验收规定。

5.4.2 筋箍碎石桩复合地基工程验收时应提交下列文件：

1 施工图设计文件、图纸会审记录及设计变更通知单；

2 施工组织设计（专项施工方案）及技术交底记录；

3 原材料（筋材、碎石等）出厂合格证、检验报告及进场复验报告；

4 成桩试验报告及施工工艺参数确认记录；

5 施工记录（包括桩位编号、沉管深度、填料量、拔管速度、留振时间等）；

- 6 成桩质量检验报告（包括桩位偏差、桩身垂直度、桩体密实度、箍筋套筒完整性等）；
- 7 单桩承载力及复合地基承载力静载荷试验报告；
- 8 施工监测数据及分析报告；
- 9 工程质量问题及处理记录；
- 10 其他必要的文件和资料。

5.4.3 箍筋碎石桩复合地基的验收项目与质量要求应符合表 5.4.3 的规定。

表 5.4.3 箍筋碎石桩复合地基验收项目与质量要求

验收项目	质量要求	检验数量
桩位偏差	不应大于设计桩径的 1/4，且不应大于 100mm	不少于总桩数的 2%，且每个工点不少于 5 根
桩身垂直度	不应大于 1%	不少于总桩数的 2%，且每个工点不少于 5 根
桩体有效桩长	不应小于设计值；可采用钻孔取芯或低应变反射波法辅助判断	不少于总桩数的 1%，且每个工点不少于 3 根
桩体直径	不应小于设计值；成桩直径与套管直径之比不宜大于 1.5	不少于总桩数的 1%，且每个工点不少于 3 根
桩体密实度	重型动力触探试验，贯入 100mm 锤击数不应少于 5 击	不少于总桩数的 1%~2%，且每个工点不少于 3 根
箍筋套筒	材质、尺寸、抗拉强度符合设计要求；套筒完整、就位准确、搭接牢固	不少于总桩数的 0.5%，且每个工点不少于 3 根；可采用开挖或钻孔内窥检验
单桩竖向抗压承载力	承载力特征值不应小于设计值	不少于总桩数的 0.5%，且每个工点不少于 3 根
复合地基承载力	承载力特征值不应小于设计值	不少于总桩数的 0.5%~1%，且每个工点不少于 3 处
褥垫层	材料、厚度、压实度及加筋层数、位置符合设计要求	每 100m 测 1 处，且每个工点不少于 3 处

注：桩体密实度检验采用其他原位测试方法时，应建立与重型动力触探的对应关系，验收标准由设计确定。

5.4.4 验收项目中，单桩承载力、复合地基承载力、桩体密实度应为主控项目，其余为一般项目。主控项目应全部合格；一般项目合格率不应低于 80%，且不合格点偏差不应大于限值的 1.5 倍。

5.4.5 当验收结果不满足本规程第 5.4.3 条和第 5.4.4 条规定时，应按下列要求处理：

- 1 对不合格桩体，应会同设计、监理等单位分析原因，确定处理方案；
- 2 经设计确认，可采用补桩、加强桩体或调整褥垫层等措施处理；
- 3 处理完成后，应重新检验与验收，直至合格。

5.4.6 验收合格后，应形成书面验收报告，由建设、设计、施工、监理等单位签字盖章后归档。

附录A 筋箍碎石桩复合地基设计计算示例

A.1 工程概况

某高速公路软土地基处理工程，线路长度 360m，为保证地基承载力、路堤稳定性及沉降变形满足规范与设计的要求，拟对该路段软土地基采用筋箍碎石桩复合地基进行加固处理。

1.路堤设计条件：设计路堤高度 6.00m，顶面宽度 28m，路堤边坡坡比为 1:1.5。路堤填土重度 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ ，黏聚力 $c_e=0\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\phi_e=30^\circ$ 。

2.场地地质与水文条件：该路段位于冲积平原区，地势低平开阔，地下水位埋深 0.6~1.0m。地基土为河、湖相交替沉积形成的软土，表层约 0.50m 为人工填土或耕植土，其下为厚度 5.10m~5.70m 的淤泥质软土层，重度 $\gamma_s=17\text{kN/m}^3$ ，压缩模量 $E_s=4\text{MPa}$ ，天然地基十字板不排水抗剪强度 $c_u=20\text{kPa}$ ，具有压缩性高、承载力低、抗剪强度低、固结缓慢等特点，属典型软弱地基。软土层下伏全风化花岗岩层，为良好桩端持力层。载荷试验测得天然地基承载力特征值为 65kPa，地基承载力设计值要求达到 125kPa。

A.2 设计参数确定

A.2.1 桩体与筋材参数

桩型：顶部筋箍碎石桩，筋箍套筒长度 $l_g=2.0\text{m}$

桩径 $d=500\text{mm}$ ，初始半径 $r_0=250\text{mm}$

布桩形式：等边三角形（梅花形），桩间距 $S=1.2\text{m}$

筋材：双向塑料土工格栅，极限抗拉强度 $T_u=40\text{kN/m}$

桩体填料：碎石，粒径 5mm~50mm，重度 $\gamma_p=22\text{kN/m}^3$ ，黏聚力 $c_p=0\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\phi_p=38^\circ$

筋箍段桩体压缩模量 $E_{pg}=160\text{MPa}$ ，非筋箍段桩体压缩模量 $E_p=100\text{MPa}$

A.2.2 面积置换率

等边三角形布桩，等效圆直径 $d_e=1.05S=1.26\text{m}$

面积置换率：

$$m = \frac{d^2}{d_e^2} = \frac{0.5^2}{1.26^2} = 15.75\%$$

A.2.3 褥垫层设计参数

褥垫层设置应符合本规程第3.3.3条的有关规定，具体参数如下：

材料：采用级配良好的碎石，粒径5mm~30mm，含泥量小于5%；

厚度：取400mm；

加筋：褥垫层中部铺设一层双向土工格栅，极限抗拉强度不小于30kN/m；

铺设范围：超出路基坡脚外侧不小于500mm。

A.3 单桩竖向抗压承载力计算

A.3.1 筋材与桩体参数计算

筋材抗拉强度设计值按本规程第 3.4.2 条式 (3.4.2-1) 计算：

$$T_a = \frac{T_u}{\psi_r} = \frac{40}{2.0} = 20 \text{ kN/m} \quad (\text{综合折减系数 } \psi_r = 2.0)$$

径向应变 $\varepsilon_r = 5\%$ ，变形后半径： $r_p = r_0(1 + \varepsilon_r) = 0.2625\text{m}$

桩身横截面积： $A_p = \pi r_p^2 = 0.2165\text{m}^2$

被动土压力系数按本规程第 3.4.4 条计算：

$$K_{pp} = \tan^2(45^\circ + \varphi_p/2) = \tan^2(45^\circ + 38^\circ/2) = 4.2$$

A.3.2 桩周土极限侧限力

①采用 Brauns 公式，筋箍段桩周土最大侧限力：

$$\sigma_{ru1} = \frac{2c_u}{\sin 2\delta} \left(\frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} + 1 \right) = 5c_u = 100\text{kPa}$$

其中夹角 δ 要按下式用试算法求得

$$\tan \delta_p = \frac{1}{2} \tan \delta (\tan^2 \delta - 1)$$

$$\delta_p = 45^\circ + \varphi_p/2$$

桩体材料内摩擦角 $\varphi_p = 38^\circ$ ，则 $\delta_p = 64^\circ$ ，试算得 $\delta = 61^\circ$ 。

②采用圆孔扩张理论，筋箍段桩周土最大侧限力：

$$\sigma_{ru1} = c_u \cdot \ln \left(\frac{E_s}{2c_u} \right) = 20 \times \ln(100) = 92.10\text{kPa}$$

③采用 Hughes 和 Withers 法，加箍段桩周土最大侧限力：

$$\sigma_{ru1} = 6c_u = 120\text{kPa}$$

综合上述三种计算方法，结合本工程淤泥质软土特性及工程经验，取筋箍段桩周土最大侧限力 $\sigma_{ru1} = 90\text{kPa}$ ，满足本规程第 3.4.4 条重要工程应采用 2 种及以上方法估算的要求。

非筋箍段桩周土最大侧限力考虑上覆筋箍段桩周土自重的有利影响，按本规程第 3.4.4 条计算：

$$\sigma_{ru2} = \left(\frac{2c_u}{\sin 2\delta} + \gamma_s l_g \right) \left(\frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} + 1 \right) = 90 + 17 \times 2 \times 2.1365 = 162.6 \text{ kPa}$$

结合软土分层特性及应力扩散规律， $\sigma_{ru2} = 160 \text{ kPa}$

A.3.3 单桩承载力特征值

根据本规程 3.4.4 条，顶部筋箍碎石桩按筋箍段控制与非筋箍段控制取最小值：

$$R_a = \min(R_{a1}, R_{a2})$$

(1) 筋箍段控制承载力 R_{a1}

R_{a1} 按本规程 3.4.4 条式(3.4.4-2)确定：

$$R_{a1} = A_p \cdot \left(\frac{\sigma_{ru1}}{K_s} + \frac{T_a}{r_p} \right) \cdot K_{pp} = 0.2165 \times \left(\frac{90}{2.0} + \frac{20}{0.2625} \right) \times 4.2 = 109.2 \text{ kN}$$

其中，桩侧土抗力安全系数 $K_s = 2.0$ 。

(2) 非筋箍段控制承载力 R_{a2}

R_{a2} 按本规程 3.4.4 条式(3.4.4-3)~(3.4.4-5)确定：

$$R_{a2} = R_{a0}' + Q_s$$

其中非筋箍段桩周土侧向约束提供的竖向承载力 R_{a0}' ：

$$R_{a0}' = A_p \cdot \frac{\sigma_{ru2}}{K_s} \cdot K_{pp} = 0.2165 \times \frac{160}{2.0} \times 4.2 = 72.7 \text{ kN}$$

筋箍段桩侧摩阻力 Q_s （取筋箍段桩侧摩阻力 $\tau_s = 10 \text{ kPa}$ ）：

$$Q_s = C_p \sum_{i=1}^n \tau_{s_i} h_{g_i} = 31.4 \text{ kN}$$

因此，

$$R_{a2} = 72.7 + 31.4 = 104.1 \text{ kN}$$

(3) 单桩承载力特征值确定

因 $R_{a1} = 109.2 \text{ kN} > R_{a2} = 104.1 \text{ kN}$ ，故取最小值 $R_a = 104.1 \text{ kN}$ 。

A.4 复合地基承载力计算

复合地基承载力特征值按本规程 3.5.2 条式(3.5.2-1)计算：

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + (1-m)f_{sk} = 0.1575 \times \frac{104.16}{0.2165} + (1-0.1575) \times 65 = 130.5 \text{ kPa}$$

该值大于设计要求的 125 kPa ，满足设计指标；同时复合地基承载力（ 130.5 kPa ）远高于天然地基承载力（ 65 kPa ），加固效果显著。

A.5 复合地基沉降计算

根据本规程 3.5.3 条，筋箍碎石桩复合地基总沉降量由筋箍段沉降量（ s_{11} ）、非筋箍段沉降量（ s_{12} ）及下卧层沉降量（ s_2 ）组成，公式为：

$$s=s_{11}+s_{12}+s_2$$

本工程桩端进入全风化花岗岩层（承载力高、压缩性低），故下卧层沉降量 $s_2=0$ ，不计沉降计算经验系数 ψ_s 。

A.5.1 筋箍段复合模量及沉降量

筋箍段复合土体压缩模量 E_{sp1} 按本规程第 3.5.3 条式 (3.5.3-4)计算：

$$E_{sp1}=mE_{pg}+(1-m)E_s=0.1575\times 160+(1-0.1575)\times 4=25.2+3.37=28.57\text{MPa}$$

筋箍段沉降量按本规程第 3.5.3 条式 (3.5.3-3)计算：

$$s_{11}=\sum \frac{\Delta p_i}{E_{spg,i}} h_i=9.1\text{mm}$$

A.5.2 非筋箍段复合模量及沉降量

非筋箍段复合土体压缩模量按本规程第 3.5.3 条式 (3.5.3-6)计算：

$$E_{sp2}=mE_p+(1-m)E_s=0.1575\times 100+(1-0.1575)\times 4=15.75+3.37=19.12\text{MPa}$$

非筋箍段沉降量非筋箍段沉降量按本规程第 3.5.3 条式 (3.5.3-5)计算：

$$s_{12}=\sum \frac{\Delta p_j}{E_{spj}} h_j=23.5\text{mm}$$

A.5.3 总沉降

$$s=9.1+23.5+0=32.6\text{mm}$$

满足变形控制要求。

A.6 复合地基稳定性计算

本工程为高速公路，安全等级较高，故按本规程第 3.5.8 条要求，先采用复合土体法进行初步设计，进一步采用桩体弯曲破坏法进行验算。采用三轴固结不排水剪（CU 试验），容许安全系数 $[F_s]=1.2\sim 1.3$ （符合本规程表 3.5.9 规定）。

A.6.1 复合土体法

(1) 桩体等效黏聚力按本规程第 3.5.7 条式 (3.5.7-4)计算：

$$c_p=\frac{T_a}{2r_p} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_p}{2}\right)=\frac{20}{2\times 0.2625} \times \tan 64^\circ =78.1\text{kPa}$$

(2) 复合土体等效抗剪强度本规程第 3.5.7 条式 (3.5.7-2)、式 (3.5.7-3)计算：

根据土质条件，桩周软土黏聚力 $c_s=20\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi_s=0^\circ$

① 等效黏聚力： $c_{ps}=mc_p+(1-m)c_s=0.1575\times 78.11+(1-0.1575)\times 20=29.2\text{kPa}$

② 等效内摩擦角：

$$\tan \varphi_{ps}=m \tan \varphi_p+(1-m) \tan \varphi_s=0.1575 \times \tan 38^\circ +0.8425 \times 0=0.1231,$$

故 $\varphi_{ps}=\arctan(0.1231)\approx 7.02^\circ$ （简化取 7° ）

(3) 稳定安全系数本规程第 3.5.6 条式 (3.5.6-1)~式 (3.5.6-6)计算：

$$\text{总滑动力矩 } M_D = \sum [(W_i + p_i b_i) \sin \theta_i] R = 4436.9 \text{ kN/m}$$

$$\text{路堤土体抗滑力矩 } M_{Re} = 12800.7 \text{ kN/m}$$

$$\text{复合地基抗滑力矩 } M_{Rc} = \sum (c_{ps} l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_{ps}) R = 11297.9 \text{ kN/m}$$

$$\text{总抗滑力矩 } M_R = M_{Re} + M_{Rc} = 24098.6 \text{ kN/m}$$

稳定安全系数

$$F_s = \frac{M_R}{M_D} = \frac{24098.6}{4436.9} = 5.43 > [F_s] = 1.2 \sim 1.3, \text{ 满足稳定要求。}$$

A.6.2 桩体弯曲破坏法

采用桩体弯曲破坏法验算，按本规程第 3.5.8 条确定最危险滑动面，滑动面圆心位于坡肩左侧水平距离 5m、高度 7.06m 处，滑动半径 $R=12\text{m}$ ，滑动圆弧穿过坡脚并贯穿 14 根抗滑桩。

桩体临界弯矩 M_u 及抗滑力矩按本规程第 3.5.8 条式 (3.5.8-1)~式 (3.5.8-5) 计算， α 统一取平均值 0.301（符合本规程简化计算要求）。

$$\text{总抗滑力矩 } M_R = 21862.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{总滑动力矩 } M_D = 5730.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

稳定安全系数：

$$F_s = \frac{M_R}{M_D} = \frac{21862.2}{5730.2} = 3.82 > [F_s] = 1.2 \sim 1.3, \text{ 满足稳定要求。}$$

本示例所有计算均符合 T/CECS G XXX-2026 《公路筋箍碎石桩复合地基技术规程》要求。

本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用以下写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：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：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：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，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《xxxxxx》(xxx)的有关规定”。
- 3) 当引用本规程中的其他规定时，表述为“应符合本规程第x章的有关规定”“应符合本规程第x.x节的有关规定”“应符合本规程第x.x.x条的有关规定”或“应按本规程第x.x.x条的有关规定执行”。