

福建省工程建设地方标准

DB

工程建设地方标准编号：DBJ/T 13-221-2023

住房和城乡建设部备案号：J 1 2 9 8 5 - 2 0 2 3

大面积基础刚性桩及桩网路基 设计与施工技术标准

Design and Construction Standard for the Rigid Piles on
Large-area foundation and Pile-net Roadbed

2023-02-27 发布

2023-06-01 实施

福建省住房和城乡建设厅 发布

福建省工程建设地方标准

大面积基础刚性桩及桩网路基
设计与施工技术标准

Design and Construction Standard for the Rigid Piles on Large-area
foundation and Pile-net Roadbed

工程建设地方标准编号：DBJ/T13-221-2023
住房和城乡建设部备案号：J12985-2023

主编单位：福建省建筑科学研究院有限责任公司
福州城建设计研究院有限公司
福建省建科工程技术有限公司
批准部门：福建省住房和城乡建设厅
实施日期：2023年06月01日

2023年 福州

前 言

根据福建省住房和城乡建设厅《关于公布全省工程建设地方标准复审修编项目计划的通知》（闽建科（2020）13号）要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，修订本标准。

因忽略了单桩的侧摩阻在大面积基础中难以向远处传递，原单桩竖向承载力计算结果偏大。因软土路基中桩体破坏模式为弯断破坏，原路基稳定验算使用桩体抗剪强度不符合实际。针对原设计计算存在的缺陷和挤土效应引起的挤土桩施工质量问题，本标准在三个方面做了发展和完善：1.改进大面积基础刚性桩计算，根据对称面原理将基础分割为桩土棱柱体，引入桩顶和桩端边界约束，联立求解桩土复合棱柱体；2.完善刚性桩路基稳定验算，按弯断模式和弹性地基梁理论求桩体水平抗力，并把滑面总荷载减去滑面处桩身轴力；3.加强软土中挤土桩位移监控，预防浮桩、斜桩和断桩。

本标准的主要技术内容是：1.总则；2.术语与符号；3.基本规定；4.刚性桩及桩网路基设计；5.刚性桩及桩网路基施工；6.施工监测及工程质量检验与验收；7.附录（A~E）。

本标准修订的主要技术内容是：1.把初版中路基刚性桩计算方法应用到大面积基础的建筑桩基；2.细化基岩持力层和桩顶梁板结构路基的刚性桩计算；3.补充欠固结土的刚性桩计算；4.完善饱和软土中挤土桩位移的施工监测；5.收集补充设计参数。

本标准由省住房和城乡建设厅负责管理，由福建省建筑科学研究院有限责任公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见和建议，请寄送福建省住房和城乡建设厅科技与设计处（地

址：福州市北大路 242 号，邮编：350001）和福建省建筑科学研究院有限责任公司（地址：福州市高新区高新大道 58-1 号，邮编：350108），以供今后修订时参考。

本标准主编单位：福建省建筑科学研究院有限责任公司
福州城建设计研究院有限公司
福建省建科工程技术有限公司

本标准参编单位：闽鑫建工集团有限公司
福建艺景生态建设集团有限公司
福州铁建工程质量检测有限公司
福建冶地恒元建设建设有限公司
福建省交设工程试验检测有限公司
福建省高速公路科技创新研究院有限公司
建华建材科技（福建）有限公司
漳州高新区建设工程质量安全监督站

本标准主要起草人：朱春森 林一庚 钟贵荣 郑守铭
严东升 黄年生 廖光志 许国平
李杨坚 姜拥政 陈礼彪 李军心
苏德垠 张雅玲 王景恒 刘兴康
刘永强 潘海文 彭仲鑫 陈俊义
黄建辉 黄玲航 陈祥希

本标准主要审查人：吴铭炳 卢才金 陈治伙 廖建康
林智勇 林方毅 王韶国 郑金伙
谢琪 阙云 顾中华 张必胜

目 次

1	总则	1
2	术语与符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	6
4	刚性桩及桩网路基设计	8
4.1	一般规定	8
4.2	桩长和桩距设计	11
4.3	桩截面设计	13
4.4	桩帽设计	16
4.5	褥垫层设计	19
4.6	沉降计算	20
4.7	桩网路基稳定验算	21
5	刚性桩及桩网路基施工	28
5.1	一般规定	28
5.2	灌注桩施工	29
5.3	预制桩施工	31
5.4	桩帽施工	33
5.5	褥垫层施工	34
6	施工监测及工程质量检验与验收	36
6.1	一般规定	36
6.2	桩基工程施工监测和质量检验与验收	36
6.3	桩帽工程检验与验收	38
6.4	褥垫层工程检验与验收	39

附录 A 大面积基础刚性桩计算	40
附录 B 单桩水平抗力计算	49
附录 C 地层设计参数	53
附录 D 垫层和持力层弹簧系数及单桩水平抗力试验	55
附录 E 施工记录和质量验收与监测表	61
本标准用词说明	74
引用标准名录	75
附：条文说明	76

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Basic requirements	6
4	Design of Rigid piles and pile-net roadbed	8
4.1	General requirements	8
4.2	Length and interval of piles	11
4.3	Cross-section of pile	13
4.4	Design of pile cap	16
4.5	Design of bedding cushion	19
4.6	Calculation about the subgrade settlement	20
4.7	Stability analysis of pile-net roadbed	21
5	Construction of rigid piles and pile-net roadbed	28
5.1	General requirements	28
5.2	Construction of cast-in-place pile	29
5.3	Construction of precast pile	31
5.4	Construction of pile cap	33
5.5	Construction of bedding cushion	34
6	Monitor check and acceptance in Construction	36
6.1	General requirements	36
6.2	Monitor check Acceptance for pile	36
6.3	Check Acceptance for pile cap	38
6.4	Check Acceptance for bedding cushion	39

Appendix A	Calculation of rigid piles on large-area foundation ...	40
Appendix B	Calculation about lateral resistance of pile	49
Appendix C	Design parameters about soil	53
Appendix D	The experiments for design parameter	55
Appendix E	The tables for construction check and Monitor	61
	Explanation of Wording in This Code	74
	List of Quoted Standards	75
	Addition: Explanation of Provisions	76

1 总 则

1.0.1 为规范大面积基础刚性桩及桩网路基的设计、施工与验收，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、保护环境，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于福建省大面积基础刚性桩及桩网路基的设计、施工和验收。

1.0.3 大面积基础刚性桩及桩网路基设计、施工和验收除应符合本标准外，尚应符合国家、行业和福建省现行有关技术标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 大面积基础刚性桩 the rigid piles on large-area foundation

大面积基础刚性桩指大面积基础中的刚性桩，如厂房、仓库、地坪、货场等基础和路基中的刚性桩，因基础面积较大、布桩较多，桩侧摩阻力难以向远处传递扩散。刚性桩指变形模量和强度与土体差异显著的加固柱体，如混凝土桩、钢桩、搅拌桩和旋喷桩。

2.1.2 桩网路基 pile-net roadbed

刚性桩、土体、桩帽（含格构系梁）、加筋褥垫层或梁板结构组成的复合路基，其特点是网格布桩、桩土刚度强度差异显著、加筋褥垫层填料内部存在水平土压力。

2.1.3 桩帽 pile cap

桩顶起传递扩散竖向荷载作用的混凝土结构，格构系梁投影面积可计入桩帽面积，梁板和承台板结构可视为连续桩帽。

2.1.4 加筋褥垫层 reinforcement cushion

填料散粒体、加筋体组成的垫层，起到找平、扩散压力和增加水平抗力作用，加筋体包括土工合成材料、钢筋网片和格构系梁等抗拉加强体。

2.1.5 挤土桩 the displacement pile

在成桩过程中产生挤土效应的桩，分为挤土桩和部分挤土桩。

2.1.6 侧限变形模量 the deformation module of lateral confinement

由地基土平板载荷试验测得土层自由变形模量 E_0 按泊松比换算所求得的侧限变形模量 E_s 。

2.1.7 桩土相对位移 the relative displacement between pile and soil

同一水平面的桩身截面与桩间土布桩多边形形心的位移差；桩顶与同平面褥垫层布桩多边形形心的位移差称为桩顶桩土相对位移；

桩端与同平面持力层布桩多边形形心的位移差称为桩端桩土相对位移。

2.1.8 桩帽垫层弹簧系数 the spring factor of cushion with pile cap

桩顶荷载增量与桩顶桩土相对位移增量的比值，单位 kN/m。

2.1.9 桩端持力层弹簧系数 the spring factor of bearing layer with pile end

桩端荷载增量与桩端桩土相对位移增量的比值，单位 kN/m。

2.1.10 地基系数 the coefficient of subgrade reaction

桩顶垫层及桩端持力层的压力增量与桩土相对位移增量的比值，单位 kPa/m。

2.1.11 中性区 neutral zone

桩土相对位移等 0 的桩长区间，因侧摩阻为 0 也叫零摩阻区，同时也是桩土竖向等应变区。

2.1.12 中性面 neutral plane

当桩顶和桩端的桩土相对位移较大而桩长较短，中性区将收缩为一个面，即桩土相对位移等零的水平面，为负正摩阻区分界面，习惯上也叫中性点。

2.1.13 工期沉降 the settlement during construction

在填筑路堤和施工路面期间路基所完成的沉降量。

2.1.14 工后沉降 the settlement after construction

路面工程完工之后产生的残余沉降，包括桩土复合层和桩底下卧层工后沉降。桩土复合层工后沉降取最终残余沉降量，桩底下卧层工后沉降取使用年限内残余沉降量。

2.2 符 号

2.2.1 面积(m²)

- A —— 单桩分摊基础面积;
- A_p —— 桩身截面积;
- A_s —— 单桩分摊桩间土面积;
- A_h —— 桩帽面积。

2.2.2 长度(m)

- b —— 桩帽宽度或桩帽直径;
- B —— 桩间距, 如布桩不规则桩间距取 $A^{1/2}$;
- D —— 桩直径;
- h_c —— 路面结构层厚度, 包括水稳层和面层;
- h_s —— 路堤填土厚度, 含垫层, 不含路面结构层;
- H_a —— 土拱高度;
- L_a —— 土拱跨度;
- l —— 桩长;
- s —— 路基最终总沉降;
- s_r —— 路基工后沉降;
- z₁ —— 中性区上边界离桩顶深度;
- z₂ —— 中性区下边界离桩顶深度;
- z_m —— 中性面深度;
- z_p —— 滑动面之上桩体水平力作用点离滑面高度;
- δ_t —— 桩顶桩土相对位移, 桩顶与同平面桩间土布桩多边形形心的沉降差;
- [δ_t] —— 桩顶桩土相对位移允许值;
- Δe —— 桩端桩土相对位移, 桩端与同平面桩间土布桩多边形形心的沉降差;
- [δ_e] —— 桩端桩土相对位移允许值。

2.2.3 力

- F_0 ——作用点与滑面高度为0时单桩水平抗力设计值(kN);
- F_p ——作用点与滑面高度为 z_p 时单桩水平抗力设计值(kN);
- M ——力矩(kN.m);
- N_b ——静压桩施工压桩力(kN);
- N_{\max} ——桩身最大轴力(kN);
- q ——基础上覆荷载(kPa);
- q_l ——路面荷载(kPa);
- q_h ——桩帽竖向荷载(kPa);
- q_s ——桩帽间土体竖向荷载(kPa);
- σ_p ——桩身竖向附加应力(kPa);
- σ_s ——桩间土体竖向附加应力(kPa)。

2.2.4 力学性质

- c ——土层黏集力(kPa);
- φ ——土体内摩擦角($^{\circ}$);
- γ_s ——土体重度(kN/m^3), 地下水位之下使用浮重度;
- E_p ——桩截面弹性模量(kPa);
- E_s ——土层侧限变形模量(kPa);
- k_t ——褥垫层地基系数(kPa/m);
- K_h ——桩帽褥垫层弹簧系数(kN/m);
- K_e ——桩端持力层弹簧系数(kN/m)。

2.2.5 其他

- k_f ——路基抗滑安全系数;
- β ——桩土变形系数(m^{-1});
- m ——中性区单元号;
- ζ ——桩侧土层摩阻力残余值与极限值的比值;
- η ——水平抗力群桩效应折减系数。

3 基本规定

- 3.0.1** 大面积基础刚性桩设计应以桩端桩土相对位移为控制目标。当持力层为中微风化岩层且缺乏实验数据时，可先计算出基岩面处桩身轴力，然后根据岩层的侧阻和端阻参数设计嵌岩桩段。
- 3.0.2** 对于刚性桩路基，刚性桩设计还必须满足路基稳定验算要求和路基工后沉降要求。
- 3.0.3** 当刚性桩路基作为桥涵过渡段，过渡段两端的工后沉降应分别与桥涵基础和普通路基协调。
- 3.0.4** 在设计饱和软土地区挤土桩时，应提出施打顺序要求和施工过程中工程桩的位移监控要求，同时提出对周边建(构)筑物、地下管线变形的监测要求。
- 3.0.5** 路基存在软土且有持力层宜采用刚性桩，当持力层埋深大于 25m 或填高大于 10m，路基应与桥梁方案进行经济比较。
- 3.0.6** 当地层存在欠固结土或可液化土，刚性桩地基应与强夯和振冲挤密等加固方法进行经济比较。
- 3.0.7** 新旧路基无分离的软土路基拓宽工程宜采用刚性桩，且桩顶宜采用梁板结构。
- 3.0.8** 当路堤填土高度较小不能满足成拱条件，刚性桩桩顶不宜采用独立桩帽，可采用梁板结构。
- 3.0.9** 钻探孔持力层揭示厚度应满足桩基设计需要，控制孔还应满足总沉降计算需要。持力层顶面起伏大时，应适当加密钻孔和地层剖面。勘察报告应满足荷载验算和沉降计算的基础设计要求，除了提供常规指标，还应提供各土层侧限变形模量和持力层弹簧系数。
- 3.0.10** 在岩溶发育区，刚性桩基础应查明溶洞分布和评价地面

塌陷危险性。在水、土强腐蚀性地区，刚性桩应采取耐久性措施。

3.0.11 在地震设防地区，当刚性桩路基临近有重要建(构)筑物和设施，或不同道路类型和等级的路基设计规范有明确要求，路基稳定验算应计入地震水平加速度惯性力。

3.0.12 当密实卵石碎石、中微风化基岩等持力层直接上覆软土，且持力层面坡率大于 0.15，桩端必须嵌入持力层。嵌入深度应结合基础类型确定，刚性桩路基桩顶还应采用梁板结构或格构系梁。

3.0.13 在施打挤土桩过程中，施工单位应考虑挤土效应对毗邻建(构)筑物基础和地下管网的影响，对已施工工程桩的影响，以及对已施工桥涵基础的影响，按设计要求制定施工方案和技术措施。

3.0.14 面积较大工点宜在施工前进行试桩，根据试桩结果，并结合工程地质条件相似地区试验数据，修正地层参数和优化设计。

3.0.15 为了收集、补充和修正本标准的地层参数，对于软土深厚、土层和持力层水平均质的典型地层结构路基工点，除常规施工监测内容外，还宜增加桩顶压力、桩顶和桩间土竖向位移监测项目，且监测时间延续至路面完工后 2 年。

3.0.16 在设计前应踏勘工点现场，了解施工条件和调查周边环境。

3.0.17 工程桩应进行桩身完整性和承载力检测，检测数量和方法应按现行国家标准《复合地基技术规范》GB/T 50783 执行。填筑路堤应进行路基监测，监测要求按现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 执行。

3.0.18 刚性桩路基工程的地表处理、填土要求、边沟和边坡防护设计施工应按现行行业标准《城市道路路基设计规范》CJJ194 和《公路路基设计规范》JTGD30 执行。

4 刚性桩及桩网路基设计

4.1 一般规定

4.1.1 大面积基础刚性桩设计计算应按下列步骤和要求进行：

1 必须考虑大面积基础中刚性桩桩侧摩阻无法向远处传递扩散问题，利用对称面原理把基础分割为独立的桩土复合棱柱体，空间问题简化为桩土棱柱体问题；

2 建立桩帽与垫层、桩端与持力层的弹性约束关系，按结构力学方法联立求解桩土棱柱体。桩顶为梁板结构，持力层为中微风化基岩，可视为刚性约束并简化计算；

3 应根据桩土相对位移确定桩侧摩阻力及侧摩阻分区，从而计算桩身轴力分布和桩身最大轴力；

4 通过迭代计算使桩端桩土相对位移逼近允许值，优化桩长和桩距，并确定合理的桩径和桩帽尺寸。

4.1.2 建筑基础荷载应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 确定。

路基荷载 q 包括路堤填料重量、路面结构层重量和路面活载，路基荷载设计值应按下式确定：

$$q = \gamma_s h_s + \gamma_c h_c + q_l \quad (4.1.2)$$

式中： γ_s ——填料重度，无试验数据时，填土可取 18kN/m^3 ，填石可取 20kN/m^3 ；

h_s ——填料高度；

γ_c ——路面结构层重度，无试验数据时可取 22kN/m^3 ；

h_c ——路面结构层厚度；

q_l ——路面荷载，按照现行道路设计标准确定，高速公路和城市快速路为 26kPa。

在路基稳定验算时，路基荷载应按现行行业标准《公路路基设计规范》JTG D30 规定考虑地震水平加速度惯性力。

4.1.3 桩顶桩土相对位移（桩顶有梁板结构时等 0）和桩端桩土相对位移应不超过下式规定的允许值：

$$[\delta_t] = 0.02b$$
$$[\delta_e] = \begin{cases} (0.02 \sim 0.05)D & (\text{密实砂土和碎块状强风化取小}) \\ \delta_{\max} / 3 & (\text{中微风化基岩}) \end{cases} \quad (4.1.3)$$

式中： $[\delta_t]$ —— 桩顶桩土相对位移允许值；

$[\delta_e]$ —— 桩端桩土相对位移允许值；

b —— 桩帽宽度或直径；

D —— 桩身直径或宽度；

δ_{\max} —— 临界位移，由原位等截面载板或单桩静载试验确定，试验桩须无质量缺陷，桩顶位移须扣减桩身压缩量。

4.1.4 把桩长、单桩分摊面积以及桩径和桩帽尺寸代入附录 A，计算桩端桩土相对位移，逐步优化调整桩长及分摊面积。桩端桩土相对位移不得超过允许值 $[\delta_e]$ ，宜控制在 $(0.95 \sim 1)[\delta_e]$ 之间。

4.1.5 当桩顶为梁板结构，可把上部桩段视为中性区，附录 A 只需要求解桩长下部的正摩阻区。

当持力层为中微风化基岩且缺乏实验数据，可把基岩面上部分桩段视为中性区，附录 A 只需要求解桩长上部的负摩阻区。岩面处桩身轴力可按桩土刚度比进行计算，并以基岩面处桩身轴力为荷载，根据岩层的侧阻和端阻设计嵌岩深度，设计应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94 规定。

根据地层是否有欠固结土(可液化土和湿陷性土相同)，基岩

面处桩身轴力应按下列式计算：

$$N_p(l_b) = \begin{cases} Aq \frac{E_p A_p}{E_s A_s + E_p A_p} & (\text{正常固结土}) \\ (Aq + F_{sw}) \frac{E_p A_p}{E_s A_s + E_p A_p} & (\text{欠固结土}) \end{cases} \quad (4.1.5)$$

式中： l_b ——持力层岩面深度；

A ——单桩分摊面积；

q ——基础分布荷载；

A_p ——桩体截面积；

A_s ——单桩分摊桩间土面积；

E_p ——桩截面弹性模量；

E_s ——基岩面上土层侧限变形模量(应变 2%时)；

F_{sw} ——欠固结引起的附加荷载(侧摩阻与土柱重量的小值)：

$$F_{sw} = \min\left(\pi D \sum_{i=1}^m h_{si} f_{si}, A_s \sum_{i=1}^m h_{si} \gamma_{si}\right)$$

(取两者小值)

i ——土层编号；

m ——欠固结土层编号；

h_{si} ——土层厚度；

f_{si} ——土层侧摩阻；

γ_{si} ——土层重度，地下水位以下取浮重度。

4.1.6 当地层有欠固结土、可液化土或湿陷性土时，桩端桩土相对位移和桩身最大轴力计算应考虑附加荷载。

4.1.7 大面积基础刚性桩应进行桩身承载力验算，建筑基础还应进行基础沉降验算，刚性桩路基还应进行稳定性验算和工后沉降验算。

4.1.8 刚性桩建筑基础总沉降应不超过现行国家标准《建筑地基

基础设计规范》GB 50007 规定的地基变形允许值。刚性桩路基工后沉降应满足行车安全性和舒适性需求，根据道路类型、重要性及等级满足相应的工后沉降要求。高速公路和城市快速路刚性桩路基的工后沉降应不超过如下允许值：

一般软土路基： $[s_r]=300\text{mm}$ ；

过渡段路基端： $[s_r]\leq 300\text{mm}$ 且应满足与普通路基沉降协调；

过渡段桥涵端： $[s_r]=0.005L_t$ 且 $\leq 100\text{mm}$ (L_t 搭板长度)，

$[s_r]=30\text{mm}$ (无搭板时)。

过渡段路基长度不宜小于 35m。

4.1.9 刚性桩路基的桩顶应设置桩帽或梁板结构，桩帽尺寸应满足桩顶桩土相对位移允许值要求，满足路堤填土成拱需要，并满足土工合成材料不被拉断和刺破的要求。

4.1.10 桩帽之上应铺设级配碎石或中粗砂垫层，并铺设不少于一层土工合成材料。在铺设土工合成材料之前，垫层面应先找平。

4.1.11 桩网路基作为桥涵过渡段时，可采用调整桩长、桩距、桩帽面积或垫层厚度等协调沉降措施。

4.1.12 对于桩身、桩帽、格构系梁和梁板结构等钢筋混凝土结构，构造与耐久性应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 要求。土工合成材料应满足耐久性要求。

4.2 桩长和桩距设计

4.2.1 大面积建筑基础的刚性桩宜穿透软弱层。刚性桩路基应验算软弱下卧层的工后沉降，不满足时应穿透软弱下卧层。过渡段路基桥涵端刚性桩，设计桩长应与毗邻构筑物（如桥涵和收费岛）基础进行沉降协调。

4.2.2 根据持力层类型及埋深，桩长设计初值可按下式确定：

$$l = \begin{cases} l_b + 5D \\ l_b \end{cases} \quad (\text{中微风化基岩层}) \quad (4.2.2)$$

式中： l —— 桩长；

D —— 桩径；

l_b —— 持力层顶面深度。

4.2.3 单桩分担基础面积的初值可按 4 倍桩径的桩间距确定，也可根据初始桩长和土层侧摩阻由下式计算：

$$A = (F_b + K_e[\delta_e])/q \quad (4.2.3)$$

式中： A —— 单桩分担基础面积；

F_b —— 桩周总侧摩阻力；

K_e —— 桩端持力层弹簧系数；

$[\delta_e]$ —— 桩端桩土相对位移允许值；

q —— 基础荷载。

4.2.4 当地层有欠固结土(可液化土和湿陷性土相同处理)，因桩顶桩土位移不连续，只能求解正摩阻区。在附录 A 求解正摩阻区时，总荷载应加上欠固结土及以上土层重量。

4.2.5 在优化设计单桩分担基础面积之后，桩距可按下式计算：

$$B = \begin{cases} \sqrt{A} & (\text{正方形布桩}) \\ 1.07\sqrt{A} & (\text{正三角形布桩}) \end{cases} \quad (4.2.5)$$

式中： B —— 桩间距；

A —— 单桩分担路基面积。

4.2.6 采用静压施工工艺时，桩长应由施工压桩力控制，压桩力必须考虑持力层全部上覆土层的残余侧摩阻。根据设计桩长和持力层类型，应按下式计算压桩力：

$$N_b = \begin{cases} \pi D \sum \zeta_i q_{sik} l_i + K_e [\delta_e] \\ \pi D \sum \zeta_i q_{sik} l_i + \lambda N_p(l) \text{ (中微风化岩层)} \end{cases} \quad (4.2.6)$$

式中： N_b —— 设计施工压桩力；

D —— 桩径；

ζ_i —— 桩侧第 i 层土侧阻力残余值与极限值的比值，
砂性土取 0.9，黏性土取 0.8；

q_{sik} —— 桩侧第 i 层土极限侧阻力；

l_i —— 桩侧第 i 层土层厚度；

K_e —— 桩端持力层弹簧系数，按照附录 B 表 B.3 取值；

$[\delta_e]$ —— 桩端桩土相对位移允许值；

$N_p(l_b)$ —— 基岩面处桩身轴力，按式(4.1.3)计算；

λ —— 基岩端阻安全系数，根据岩面深度 l_b 取值：

$\lambda=1.8(l_b \leq 20\text{m}), 1.7(20\text{m} < l_b \leq 30\text{m}), 1.6(30\text{m} < l_b \leq 40\text{m}), 1.5(l_b > 40\text{m})$

4.2.7 大面积基础刚性桩宜采用长而稀方案，在饱和软土中挤土桩间距不宜小于 5D。刚性桩路基采用独立桩帽结构时，桩间距及桩帽宽度应满足路堤填料的成拱需要。

4.2.8 为了使刚性桩过渡段路基两端实现工后沉降协调，可采取如下技术措施：

1 在满足刚性桩路基稳定验算条件下，调整桩长与桩距，使两端的工后沉降分别与桥涵基础和普通路基协调；

2 靠近过渡段的软土路基，进行局部加固，或按台阶形、楔形填轻质填料，以降低其工后沉降；

3 当采用静压桩工艺，分别设计过渡段两端的压桩力，在施工时逐排调整压桩力。

4.3 桩截面设计

4.3.1 大面积基础刚性桩直径（或宽度）的初值可根据设计经验

和工艺限制取值（如 400mm 或 600mm），在优化确定桩长桩距后必须计算桩身最大轴力进行截面承载力验算。

4.3.2 桩身最大轴力设计值不得超过桩身截面竖向承载力：

$$N_{\max} \leq \psi_c f_c A_p \quad (4.3.2)$$

式中： A_p —— 桩截面积；

f_c —— 混凝土轴心抗压强度设计值；

ψ_c —— 成桩工艺系数，应按现行国家标准《建筑桩基技术规范》JGJ94 规定取值；

N_{\max} —— 桩身最大轴力设计值。

4.3.3 桩身最大轴力位于中性面，应根据附录 A 求解的侧摩阻分布和桩顶荷载 $\sigma_p(0)$ ，最大轴力设计值按下式计算：

$$N_{\max} = A_p \sigma_p(0) + \pi D \sum h_{si} f_{si} \quad (4.3.3)$$

式中： N_{\max} —— 桩身最大轴力设计值；

A_p —— 桩截面积；

$\sigma_p(0)$ —— 桩顶应力；

h_{si} —— 中性面之上各土层厚度；

f_{si} —— 中性面之上各土层侧摩阻。

当存在中性区应按式(4.3.4)计算，当地层有欠固结土或可液化土应按式(4.3.5)计算。

4.3.4 当存在中性区，桩身最大轴力位于中性区内最软弱土层处，最大轴力设计值应按式(4.3.4)计算：

$$N_{\max} = Aq \frac{E_p A_p}{E_s A_s + E_p A_p} \quad (4.3.4)$$

式中： N_{\max} —— 桩身最大轴力设计值；

A —— 单桩分摊基础面积；

- q —— 基础荷载;
 A_p —— 桩截面积;
 A_s —— 单桩分摊桩间土面积;
 E_p —— 桩截面弹性模量;
 E_s —— 中性区内最软弱土层侧限变形模量(应变 2‰时)。

4.3.5 当地层存在欠固结土(可液化土和湿陷性土相同处理), 桩身最大轴力设计值 N_{\max} 应按下列各式确定:

$$N_{\max} = \begin{cases} (Aq + F_{sw}) \frac{E_p A_p}{E_p A_p + E_s A_s} \\ (Aq + F_{sw}) / A_p \quad (\text{中微风化基岩持力层}) \end{cases}$$

$$F_{sw} = \min(\pi D \sum_{i=1}^m h_{si} f_{si}, A_s \sum_{i=1}^m h_{si} \gamma_{si}) \quad (4.3.5)$$

- 式中: i —— 土层编号;
 m —— 中性面上方(或基岩持力层上欠固结土)土层编号;
 q —— 基础荷载;
 A —— 单桩分摊基础面积;
 A_p —— 桩截面积;
 A_s —— 单桩分摊桩间土面积;
 E_p —— 桩截面弹性模量;
 E_s —— 中性面上或欠固结土层侧限变形模量(应变 2‰时);
 F_{sw} —— 欠固结引起的附加荷载(侧摩阻与土柱重量的小值);
 h_{si} —— 土层厚度;
 f_{si} —— 土层侧摩阻;
 γ_{si} —— 土层重度, 地下水位以下取浮重度。

4.3.6 当采用静压桩时, 桩身截面设计不仅必须满足最大轴力设计值的要求, 且必须满足临时施工荷载压桩力的需要, 取两者较大者。

4.3.7 灌注桩桩径不宜小于 400mm, 以保障桩体质量的稳定性。

4.3.8 灌注桩混凝土强度等级不应低于 C20，当存在饱和砂性土时不应低于 C25。

4.3.9 灌注桩结构配筋应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94 规定。在软土路基中，位于最不利滑动面范围及毗邻一排桩的配筋还应满足单桩水平抗力特征值下桩身最大弯矩的要求：

$$[M_p] \geq \frac{e^{-\pi/4}}{\sqrt{2}} F_0 / \beta$$
$$\beta = \sqrt[4]{kD/(4EI)} \quad (4.3.9)$$

式中： D —— 桩径；

EI —— 桩体截面抗弯刚度；

k —— 土层侧向地基系数；

F_0 —— 作用点高度为 0 时单桩水平抗力特征值；

β —— 桩土变形系数；

$[M_p]$ —— 桩体截面抗弯矩设计值。

4.4 桩帽设计

4.4.1 桩帽面积初值可按 2 倍桩径宽度计算，或按下式确定：

$$A_h = \frac{qA}{k_t[\delta_t]} \quad (4.4.1)$$

式中： A_h —— 桩帽面积；

A —— 单桩分担路基面积；

q —— 路基荷载；

k_t —— 褥垫层地基系数；

$[\delta_t]$ —— 桩顶处的桩土相对位移允许值。

当桩帽之间有格构系梁时，在附录 A 的计算中，桩帽面积还应计入单桩分摊的系梁投影面积。

4.4.2 桩帽宽度不宜大于 4 倍桩径，桩顶桩土相对位移不得超过

本标准规定的允许值。桩帽之间土拱净跨度应满足路堤填料的成拱要求，并应满足土工合成材料的拉伸率限制。

4.4.3 桩帽净跨度应满足填料的成拱要求，土拱高度不得超过路面结构层底面高度，应按下式进行验算：

$$\frac{L_a}{2 \tan(45^\circ - \phi / 2)} \leq h_s + b / 2$$

$$L_a = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{3}} B - b & \text{(正三角布桩)} \\ \frac{2}{\sqrt{2}} B - b & \text{(正方形布桩)} \end{cases} \quad (4.4.3)$$

式中： L_a ——土拱净跨度，等于土拱高点(布桩多边形形心正上方)与桩帽边缘水平距离 2 倍；

B ——桩间距；

b ——桩帽宽度或直径；

h_s ——路堤垫层和填土高度(不含路面结构层)；

ϕ ——填料内摩擦角，无试验数据时可按下面取值：

碎石 35°，中粗砂取 30°，砂黏土 26°。

4.4.4 钢筋混凝土桩帽厚度不应小于 $(b-D)/2$ ，素混凝土桩帽厚度不应小于 $b-D$ ，其中 b 为帽宽， D 为桩径。

4.4.5 桩帽配筋应满足桩帽最大弯矩的验算要求，并符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定。桩帽最大弯矩位于桩与帽连接处，桩帽最大弯矩应按下式计算：

$$M_{h \max} = \begin{cases} \frac{\pi}{12} q_h (b + D / 2)(b - D)^2 & \text{(圆形桩帽)} \\ \frac{\kappa}{8} q_h b(b - D)^2 & \text{(方形桩帽)} \end{cases} \quad (4.4.5)$$

式中： $M_{h \max}$ ——桩帽弯矩；

q_h ——桩帽竖向荷载；

- b ——圆形桩帽直径或方形桩帽宽度；
 D ——刚性桩直径；
 κ ——方板桩帽修正系数 $\kappa=4.9-0.55\times b/D$ 。

4.4.6 在计算设计桩帽配筋时，桩帽可视为自由板，并假定桩帽与垫层之间、桩帽与桩头之间作用力均布。

4.4.7 因求解时桩帽进行了等截面、变刚度简化，在确定桩帽竖向荷载和垫层竖向荷载时，附录 A 求解的桩顶竖向应力 $\sigma_p(0)$ 和桩间土竖向应力 $\sigma_s(0)$ 必须按下式进行换算：

$$\begin{aligned} q_h &= \frac{A_p}{A_h} \sigma_p(0) \\ q_s &= \frac{A_s}{A - A_h} \sigma_s(0) \end{aligned} \quad (4.4.7)$$

- 式中： q_h ——桩帽竖向荷载；
 q_s ——桩帽之间土体竖向荷载；
 A ——单桩分担基础面积；
 A_h ——桩帽面积；
 A_p ——桩身截面积；
 $\sigma_p(0)$ ——桩顶处桩体附加竖向应力；
 $\sigma_s(0)$ ——桩顶处土体附加竖向应力。

4.4.8 当地层有欠固结土、可液化土或湿陷性土时，可按桩帽承担全部荷载计算桩帽竖向荷载：

$$q_h = qA/A_h \quad (4.4.8)$$

- 式中： q_h ——桩帽竖向荷载；
 q ——基础荷载；
 A ——单桩分担基础面积；
 A_h ——桩帽面积。

4.4.9 同一横断面的桩帽设计标高应水平共面，纵向高差不宜大于桩间距 5%。

4.4.10 桩帽顶面可采用正多边形或圆形，立面可采用喇叭形或台阶形，正多边形的边宜与路基中线平行。

4.4.11 桩帽结构的抗冲切和抗弯设计应满足福建省现行地方标准《建筑地基基础技术规范》DBJ13 要求。

4.4.12 钢筋混凝土桩帽最小尺寸、强度等级和保护层厚度等应符合福建省现行标准《建筑地基基础技术规范》DBJ13 规定。

4.4.13 钢筋混凝土桩帽、格构系梁、梁板结构和承台板结构，应按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 设计。

4.5 褥垫层设计

4.5.1 垫层材料应为级配砂碎石或中粗砂，与土工合成材料接触的碎石垫层粒度不应超过 20mm。铺设垫层应在桩帽混凝土达到设计强度等级 70%之后。桩帽周围应填充密实，垫层应平整密实，在 1m² 内凹凸差值不应超过 15mm。铺设土工合成材料应在验收垫层密实度和平整度之后。

4.5.2 土工合成材料的抗拉、抗剪和耐久性应符合行业质量标准要求。在允许拉伸率下，每延米拉力不应低于设计值，并按下式进行拉伸率验算：

$$\frac{1}{2}\sqrt{1+\theta^2} + \frac{1}{2\theta}\ln(\theta + \sqrt{1+\theta^2}) - 1 \leq [\varepsilon_t]$$
$$\theta = 4 \frac{\delta_t}{B-b} \quad (4.5.2)$$

式中：B——桩间距；

b——桩帽宽度或直径；

δ_t ——桩顶桩土相对位移；

$[\varepsilon_t]$ ——土工合成材料允许拉伸率，取极限拉伸率 0.7 倍。

4.5.3 土工合成材料与桩帽之间垫层厚度应不小于 30cm。

4.5.4 在土工合成材料之上的垫层厚度应根据路堤填料类型确定，当填料为土体时该厚度不宜小于 20cm。

4.5.5 褥垫层应铺设土工合成材料，填高 6m 以上不宜少于 2 层，具体层数还应满足刚性桩路基稳定验算要求。多层土工合成材料的层间距宜小于 20cm，当填高充分满足填料成拱需要时不受限制，部分土工合成材料可铺设在褥垫层以上的填料中。

4.5.6 土工合成材料必须横向铺设，纵向搭接宽度应符合相应材料的施工技术规范。土工合成材料应铺设平整并绷紧，在验收之后才能进行后续施工。

4.6 沉降计算

4.6.1 大面积基础刚性桩的基础总沉降由桩顶桩土相对位移、桩体压缩、桩端桩土相对位移和桩端下卧层压缩量 4 部分(参见附录 A 图 A.2)组成，基础总沉降应按下式计算：

$$s = \delta_t + \delta_p + \delta_e + s_b \quad (4.6.1)$$

式中：s —— 路基总沉降；

δ_t —— 桩顶桩土相对位移；

δ_p —— 桩体压缩量；

δ_e —— 桩端桩土相对位移；

s_b —— 桩端下卧层压缩量。

4.6.2 在计算总沉降时，附录 A 方程中的土层侧限变形模量 E_s 必须采用土层的侧限压缩模量。

4.6.3 桩顶为梁板结构桩时可按刚性约束简化，顶桩土相对位移 δ_t 可近似取 0。当地层有欠固结土、可液化土或湿陷性土时，假定桩帽承担全部荷载，桩顶桩土相对位移可按下式计算：

$$\delta_i = Aq/k_h \quad (4.6.3)$$

式中： δ_i ——桩顶桩土相对位移；
 A ——单桩分担基础面积；
 q ——基础荷载；
 k_h ——桩帽垫层弹簧系数。

4.6.4 桩端持力层为中微风化基岩时按刚性约束简化，桩端桩土相对位移 δ_e 可近似取 0。

4.6.5 在计算桩端下卧层压缩量时，整个基础的桩土复合体可视为一个深埋基础，刚性桩路基可视为一个无限条形深埋基础，可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定的分层总和法计算桩端下卧层压缩量。

4.6.6 刚性桩路基的工后沉降可按下列三种方法推算：

1 把土层侧限压缩模量与侧限变形模量分别代入附录 A 方程，求解桩土相对位移和桩身压缩量，以两次计算的差值作为桩土复合层的工后沉降。下卧层的工后沉降，可按现行行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02 规定计算；

2 利用施工监测得到的填筑期沉降值和恒载期沉降曲线，采用固结函数或双曲函数的拟合曲线来推算路基的工后沉降；

3 总沉降计算值扣减工期沉降实测值作为工后沉降预测值。

4.6.7 当桩端之下无软弱下卧层，在计算刚性桩路基工后沉降时，可不考虑桩端下卧层的工后压缩量。

4.7 桩网路基稳定验算

4.7.1 滑动面应采用圆弧面，当滑动弧倾角超过路堤主动破裂角时，应根据滑动弧与主破裂面切点处离路面的深度，按下面方法确定滑动面构成：

1 当切点深度小于路堤自稳高度时，从切点作垂直滑面至路面；

2 当切点深度大于路堤自稳高度, 延长主动破裂面至路堤自稳高度, 然后作垂直滑面至路面, 参见图 4.7.1。

3 路堤主动破裂角和自稳高度应按下式计算:

$$\begin{aligned} \alpha_c &= 45^\circ + \varphi / 2 \\ H_c &= (2c / \tan \alpha_c - q_l) / \gamma \end{aligned} \quad (4.7.1)$$

式中: α_c —— 主动破裂角;

H_c —— 路堤自稳高度;

q_l —— 路面荷载;

φ —— 路堤填料内摩擦角;

c —— 路堤填料黏集力;

γ —— 路堤填料容重。

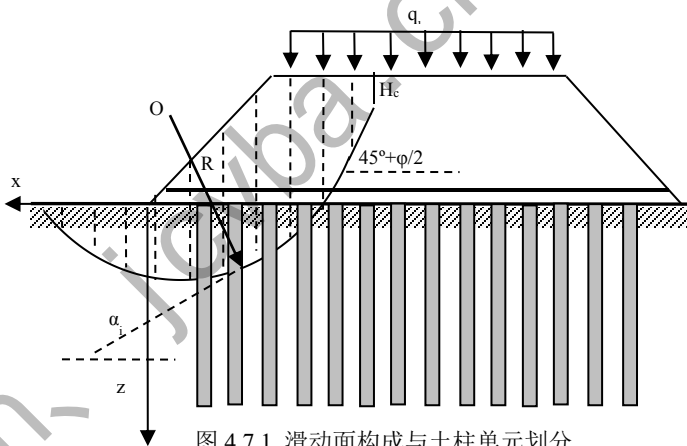


图 4.7.1 滑动面构成与土柱单元划分

O—滑动圆心;R—滑动半径; q_l —路面荷载; H_c —自稳高度; φ —填料内摩擦角; α_c —滑面倾角

4.7.2 为了方便计算, 宜按单桩分摊面积划分单元截面积(即有桩单元含 1 根桩)。

4.7.3 有桩单元滑面上的总荷载必须扣减滑面处桩身轴力, 计算

桩身轴力应根据附录 A 求解的侧摩阻分布，参见图 4.7.2。

4.7.4 桩体水平抗力计算应按弯断破坏模式，并采用弹性地基梁理论，参见附录 B。

4.7.5 在稳定验算时，土工合成材料或格构系梁主筋的拉力应采用抗拉设计值，抗震验算时应使用抗拉强度值，拉力方向与土工合成材料或主筋铺设方向相同。

4.7.6 在路基稳定验算时，饱和软土层宜采用原位十字板剪强度或静力触探换算十字剪强度，缺乏实验数据时可使用快剪指标。

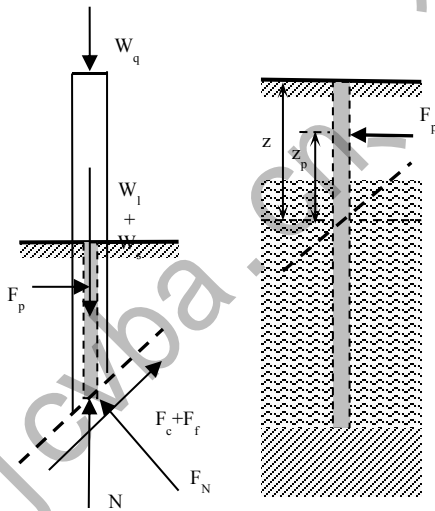


图 4.7.2 含桩土柱单元受力与桩体水平抗力

W_q —活载重量； W_l —路堤重量； W_s —地层重量； N_p —滑面处桩身轴力； F_p —桩体水平抗力；

F_c —滑面黏集力； F_r —滑面摩擦力； F_N —滑面法向力； z —滑面深度； z_p —水平抗力作用点

4.7.7 地震设防地区的高填路堤，路基稳定验算应计入路堤滑体部分的地震水平加速度惯性力，且验算时应使用固结快剪指标，抗滑稳定系数应按 1.1 进行验算。

4.7.8 路基抗滑稳定系数不应小于 1.1，毗邻重要建筑物时不应小于 1.2。

4.7.9 当桩顶采用梁板结构，可按需要进行路基稳定验算。当梁板与地面脱空，梁板横向配筋应考虑路堤填土内部侧向静止土压力。当路堤中央隔离带填砂且可能浸水，梁板中部横向配筋应考虑侧向水压力，水压力与土压力取两者较大者。

4.7.10 本标准通过计算作用在滑动体上抗滑力矩与滑动力矩的比值，并搜索其最小值作为路基稳定系数。在求解最小值的过程中，必须同时搜索滑动弧圆心和滑动弧半径。

4.7.11 作用在滑动体上的抗滑力矩与滑动力矩的比值，应按下式进行计算：

$$k_f = \left(\sum_{i=1}^n M_{si} + \sum_{i=1}^n M_{pi} + \sum_{j=1}^m M_{fj} \right) / \left(\sum_{i=1}^n M_{wi} + \sum_{i=1}^n M_{EHi} \right) \quad (4.7.11)$$

式中： k_f ——抗滑力矩与滑动力矩比值；

i ——土柱单元编号；

n ——土柱单元数；

j ——土工合成材料层号；

m ——土工合成材料层数；

M_{si} ——单元滑面抗剪力矩；

M_{pi} ——单元桩体水平抗滑力矩(滑面没切过桩体为 0)；

M_{fj} ——单元土工合成材料抗滑力矩；

M_{wi} ——单元土柱净重力矩；

M_{EHi} ——路堤土柱地震水平惯性力力矩(路堤外为 0)。

1 单元滑面抗剪力矩应按下列各式计算：

$$M_{si} = \begin{cases} (A - A_p) / \cos \alpha_i \times \tau_{si} \times R & \text{(采用原位十字剪强度)} \\ M_{ci} + M_{fi} & \text{(采用快剪强度指标)} \end{cases} \quad (4.7.11-1)$$

$$M_{ci} = (A - A_p) / \cos \alpha_i \times c_i \times R$$

$$M_{fi} = \begin{cases} W_{si} \cos \alpha_i \tan \phi_i \times R & (\text{土条滑面为饱和粘性土}) \\ W_{vi} \cos \alpha_i \tan \phi_i \times R & (\text{土条滑面为其他土层}) \end{cases}$$

式中： A —— 单元截面积(等于单桩分担面积)；

A_p —— 桩截面积(无桩单元或滑面没切过桩体为 0)；

R —— 滑动圆半径；

M_{ci} —— 单元滑面黏集力矩；

M_{fi} —— 单元滑面摩擦力矩；

α_i —— 单元滑面倾角；

τ_{si} —— 单元滑面处土层原位十字剪强度；

c_i —— 单元滑面处土层黏集力快剪指标标准值；

ϕ_i —— 单元滑面处土层内摩擦角快剪指标标准值。

2 单元桩体水平抗滑力矩和加筋体抗滑力矩应按下列式计算：

$$\begin{aligned} M_{pi} &= F_{pi} \times (R \cos \alpha_i - z_i / 3) \\ M_{ij} &= Q_{ij} \times Y \times z_{ij} + Q_{ij} \times Y \times \tan \phi_{jt} \times x_{ij} \\ Y &= A / X \end{aligned} \quad (4.7.11-2)$$

式中： R —— 滑动圆半径；

M_{pi} —— 桩体抗滑力矩；

F_{pi} —— 桩体水平抗力(按附录 B 计算)；

α_i —— 单元滑面倾角；

z_i —— 单元滑面深度(桩体水平抗力作用点取 $z_i/3$)；

M_{ij} —— 加筋体抗滑力矩；

ϕ_{jt} —— 土工合成材料所在的填料内摩擦角；

z_{ij} —— 土工合成材料与滑动圆心的高差；

x_{ij} —— 土工合成材料滑面处与滑动圆心的水平距离；

Q_{ij} —— 土工合成材料每延米拉力设计值；

(抗震验算采用抗拉强度值)

A —— 单元截面积(等于单桩分担面积)；

Y —— 单元纵向计算宽度；

X ——单元横向计算宽度(按计算精度需要取)。

3 单元重力滑动力矩应按下列式计算:

$$\begin{aligned} M_{wi} &= W_{vi} \times R \sin \alpha_i \\ W_{vi} &= \begin{cases} Aq_i + W_{si} & \text{(无桩)} \\ \sigma_{si}(0)A_s + \pi D \sum_{j=1}^{n_i} f_j h_j + W_{si} & \text{(切桩)} \end{cases} \\ W_{si} &= A_s \sum_{j=1}^{n_i} \gamma_j h_j \end{aligned} \quad (4.7.11-3)$$

式中: i —— 单元编号;

j —— 土层编号;

W_{vi} —— 单元土柱总净重;

W_{si} —— 单元土柱有效地层重量;

R —— 滑动圆半径;

α_i —— 单元滑面倾角;

q_i —— 单元路基荷载(上覆路堤重量和路面荷载);

A —— 单元截面积(等于单桩分担面积);

$\sigma_{si}(0)$ —— 单元桩间土竖向压力;

(根据单元的路基荷载按附录 A 求解)

A_s —— 桩间土面积;

n_i —— 单元滑面之上的土层层数;

f_j —— 第 j 层土侧阻力;

(负摩阻区取负, 中性区取 0, 正摩阻区取正)

h_j —— 单元第 j 层土厚度;

γ_j —— 单元第 j 层土重度, 地下水位以下取浮重度。

4 地震水平惯性力滑动力矩应按下列式计算:

$$M_{EHi} = \frac{a_{EH}}{g} A \gamma H_i (z_o - \frac{H_i}{2}) \quad (4.7.11-4)$$

式中： i —— 单元编号；

M_{Ehi} —— 单元的地震水平惯性力力矩；

a_{EH} —— 地震水平加速度；

g —— 重力加速度；

A —— 单元截面积(等于单桩分担面积)；

γ —— 路堤重度；

H_i —— 单元路堤高度(路堤外为 0)；

Z_o —— 滑动园心高度。

5 刚性桩及桩网路基施工

5.1 一般规定

5.1.1 刚性桩及桩网路基施工前应具备下列资料：

- 1 施工场地岩土工程勘察报告；
- 2 桩基工程施工图及图纸会审纪要；
- 3 施工场地和邻近区域的地下地上管线和建(构)筑物调查资料，原地表测量资料；
- 4 主要施工机械及其配套设备技术性能资料；
- 5 桩基工程施工组织设计，包括施工监测方案；
- 6 水泥、砂、石、钢筋等原材料及其制品的质检报告和砼配合比试验报告；
- 7 原位试桩资料。

5.1.2 桩基施工前应处理空中和地下障碍物，场地应平整，排水应畅通，场地宽度应满足施工最边缘工程桩需要。场地地基承载力应不小于施工机械接地压力 1.2 倍，当软土地基不足以承担施工机械荷载应铺设垫层或加固，必须保证施工机械不出现倾斜。

5.1.3 施工机械及成桩工艺选择应经济、安全、适用，应依据场地工程地质条件、场地承载力和设计要求，应考虑施工环境、施工经验、设备限制、施工工法特点、材料供应条件及工期等因素。

5.1.4 施工组织设计应结合工程特点，有针对性地制定质量安全管理措施。挤土桩施工组织设计，应制定周边建(构)筑物和管线监控方案，制定防范措施，锤击桩还应包含必要的打桩振动监测方案。

5.1.5 在施工中应按照设计要求进行监测，并根据监测结果控

制施工进度和调整施工工艺。

5.1.6 在桩基施工时，安全、劳动保护、防火、防雨、防台风、文物和环境保护等方面应按有关规定执行。

5.1.7 工程桩桩位偏差应不大于 150mm，垂直度偏差不大于 1%，灌注桩桩径偏差不大于-20mm。

5.1.8 在饱和软土层施打挤土桩，打桩顺序宜从场地中心由里到外、逐排交织施打，宜先深后浅、先长后短、先大后小。当毗邻建(构)筑物基础或地下管网，打桩顺序应从靠近影响区向外推移。过渡段路基挤土桩，宜在桥涵基础施工前完成，且在开挖桥涵基础基坑时应进行临时支护。

5.1.9 在饱和软土层施打挤土桩，施工过程应监控工程桩位移，按设计要求布置观测断面。观测工程桩施工后应及时埋设观测点，并观测其坐标和标高。当位移监控数据达到预警，应控制打桩速率，并采取引孔、挖防挤沟和排水消压等措施。桥涵台后布桩密集区，可进行复压以防浮桩。

5.1.10 各种类型刚性桩施工均应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 规定，且应符合地方现行标准《福建省建筑地基基础技术规范》DBJ 13 要求。

5.2 灌注桩施工

I 一般规定

5.2.1 成孔设备就位后必须保持平整稳固，在成孔过程中不发生倾斜和移位。钻具应设置控制深度和垂直度的标尺，或使用专业测量仪器，在施工中进行观测和记录。

5.2.2 成孔深度应符合下列要求：

1 摩擦桩按设计桩长控制深度，且必须进入设计持力层，锤击沉管深度控制应以标高为主、贯入度为辅。

2 端承桩长螺旋钻孔深度宜用钻杆进入持力土层验槽确定

的主机电流来控制，锤击沉管深度控制应以贯入度为主、标高为辅，静压沉管深度控制应以设计压桩力为主、标高为辅。

3 施工桩长与设计桩长差异较大，应及时通知勘察设计单位。

5.2.3 钢筋笼制作和安装质量应符合下列要求：

1 钢筋笼制作和安装质量应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 规定；

2 钢筋笼安装的标高应跟桩顶设计标高一致，并预留与上部结构连接的锚固筋。

5.2.4 混凝土拌制应符合下列要求：

1 桩身混凝土设计强度等级的混凝土配合比应通过试验确定，混凝土坍落度应满足施工工艺要求；

2 骨料可采用卵石或碎石，骨料粒径不大于钢筋间距最小净距的 1/3，且不宜大于 40mm；

3 水泥可选用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣等硅酸盐水泥，强度等级不低于 32.5；

4 搅拌混凝土用水必须符合现行行业标准《混凝土拌用水标准》JGJ63 规定；

5 掺加混合材料或外加剂的品种及掺量，必须根据混凝土性能要求、施工及气候条件等因素经试验确定。

5.2.5 在检查成孔质量合格后应及时灌注混凝土。灌注混凝土过程中应抽样做试块，每台机械一天应做 1 组(3 块)试块(立方体边长 150mm)，标准养护，并按规定测定试块抗压强度。

5.2.6 在施工前宜会同设计单位选定 2~3 根桩进行试成孔，核对场地地质情况、检验施工设备及施工工艺。

5.2.7 必须经常检查施工现场所有设备设施、安全装置、工具配件及个人劳保用品的完好和安全。

II 沉管灌注桩施工

5.2.8 混凝土充盈系数不得小于 1.0，充盈系数小于 1.0 应全长复打。可能出现断桩和缩颈部位应局部复打，复打范围应超过断桩或缩颈区 1m 以上。

5.2.9 全长复打桩施工应符合下列规定：

- 1 复打与初打应桩轴线重合；
- 2 复打施工必须在第一次灌注的混凝土初凝之前完成；
- 3 桩管深度应接近原桩长，灌注混凝土应到达地面；
- 4 拔管过程中应及时清除管壁上和散落在地面的混凝土。

5.2.10 成桩后混凝土达到强度等级的标高应不低于设计桩顶标高，钢筋笼安装标高应与控制基槽开挖后的桩头标高一致。

III 长螺旋钻孔压灌桩施工

5.2.11 在挤土效应高的地层中施工，可采用长螺旋钻孔法来降低挤土效应。

5.2.12 地下水位以下的成桩可采用长螺旋跟管钻孔、管内泵压灌注成桩。

5.2.13 对于后插筋工艺的泵送混凝土制作应按第 5.2.6 条要求抽样做试块，粗骨料最大粒径不宜大于 31mm，细骨料应用净粗砂，砂率宜控制在 40%~50%，坍落度宜控制在 200mm~220mm。

5.2.14 后插钢筋笼应始终对准孔中心，宜采用专用插筋器引导钢筋笼的安装。管内混凝土不够时可在导管插入混凝土内 50cm，再进行压灌混凝土至桩顶设计标高以上 50cm。

5.3 预制桩施工

I 一般规定

5.3.1 工点施工前应先试桩，以确定合适的桩长及桩节组合，接头不宜超过两个，同一平面接头率不应超过 50%，避免大量截桩。

II 桩的预制、预制桩的吊运、堆放、取桩和桩连接规定

5.3.2 预制桩连接应符合现行行业标准福建省现行标准《预应力混凝土管桩机械快速连接接头施工及验收规程》DBJ 13-58 要求。

5.3.3 预制混凝土桩质量应符合现行标准《先张法预应力混凝土管桩》GB13476 和《预应力混凝土空心方桩》JG 97 规定。

5.3.4 预制桩接桩可采用焊接、法兰连接或机械快速连接(螺纹式、啮合式、钢带螺栓式等)。

III 锤击沉桩

5.3.5 施工大面积基础刚性桩，施打桩可采取下列辅助措施：

1 预钻孔沉桩，预钻孔孔径可比桩径(或宽度)小 50mm~100mm，深度宜到达饱和黏土层底，且不宜少于桩长的 1/3~1/2，桩架宜具备钻孔和锤击双重功能，以便随钻随打；

2 设置隔离板桩或地下连续墙；

3 开挖地面防震沟，沟宽可取 0.5m~0.8m，深度按土质和经验决定；

4 限制打桩速率和日打桩量，24 小时内休止时间应不少于 8 小时；

5 沉桩结束后，若有浮桩宜对浮桩实施复打；

6 沉桩总锤击数及最后 1m 沉桩锤击数应根据当地工程经验以及试打桩确定。

IV 静压沉桩

5.3.6 出现下列情况应暂停压桩作业，并分析原因和采取措施：

1 压力表读数与勘察报告中的土层性质明显不符；

2 桩难以穿越具有软弱下卧层的硬夹层；

3 实际桩长与设计桩长相差较大；

- 4 出现异常响声，压桩机械工作状态出现异常；
 - 5 桩身出现纵向裂缝、突然发生位移、倾斜、严重回弹和桩头混凝土出现破坏等异常现象；
 - 6 压桩夹具打滑；
 - 7 压桩机下陷或倾斜；
 - 8 因挤土效应施工监测数据达到报警值。
- 5.3.7 当桩较密集或地基为饱和黏性土，宜采用塑料排水板、袋装砂井或引孔等措施，并加强施工监测，出现浮桩须进行复压。

5.4 桩帽施工

I 基槽开挖

- 5.4.1 基槽开挖应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 规定，并符合下列要求：
- 1 基槽开挖应在桩体强度达到设计强度 70%以上后进行；
 - 2 清渣和截桩不得造成桩顶标高以下桩身断裂和扰动桩间土；
 - 3 基槽底面以上 50cm 土层应人工开挖，不得超挖，不得扰动基底土和桩间土；
 - 4 基槽坡顶 1.5m 内不得堆载，机械设备不得停放和行走。
- 5.4.2 开挖至基槽底出现桩间土局部软化时，不得擅自处理，应报告设计单位处理。
- 5.4.3 基槽出现超挖不得擅自回填，应报告设计单位处理。
- 5.4.4 场地内弃土清运时，不得扰动未施工桩位的表面土层。

II 桩头处理

- 5.4.5 桩头处理应在桩体强度达到设计要求后进行。
- 5.4.6 凿除桩顶超灌和浮浆不得造成桩顶设计标高以下桩身断

裂和扰动桩间土。

5.4.7 截桩严禁使用大锤砸，应先将不需要截除部分用钢箍包紧，然后沿钢箍上沿凿槽气割。

III 现浇桩帽施工

5.4.8 基槽开挖和桩头处理完成后应及时进行桩基质量检测，桩帽施工应在验收合格后进行。

5.4.9 在桩头位置地面以上按桩帽设计尺寸立模。

5.4.10 钢筋绑扎、混凝土拌制浇筑及养护应按符合设计要求，桩头钢筋应有足够长度嵌入桩帽钢筋笼内。预制管桩如没有截桩，可将桩帽钢筋焊接在桩接头钢板上。

5.5 褥垫层施工

I 垫层施工

5.5.1 褥垫层的虚铺厚度和整平应满足本标准“4.5 褥垫层设计”要求，铺设前基槽中应设立厚度控制标尺，并妥善保护。

5.5.2 基础开挖时应避免坑底土层受扰动、践踏、受冻或浸泡，可保留约 200mm 厚土层暂不挖去，待铺填垫层前再挖至设计标高。碎石或卵石垫层底部宜设置 150mm~300mm 厚砂垫层。

5.5.3 垫层底面宜在同一标高，如深度不同，基坑底应挖成阶梯或斜坡，搭接处应夯压密实。

5.5.4 垫层的分层铺填厚度、每层压实遍数等宜通过试验确定。垫层底层应根据施工机械设备及下卧土层条件确定厚度，其余分层铺填厚度宜为 200mm~300mm。

5.5.5 粉质黏土和灰土垫层土料的施工含水量宜控制在最优含水量 $\omega_{op}\pm 2\%$ 内，粉煤灰垫层的施工含水量宜控制在 $\omega_{op}\pm 4\%$ 内。最优含水量可通过击实试验确定，也可按当地经验确定。

5.5.6 褥垫层铺设宜采用静力压实法,当基础底面下桩间土的含水量较小时,也可采用动力夯实法,夯填度不得大于0.9。

5.5.7 换填垫层施工应注意基坑排水,除采用水撼法施工砂垫层外,不得在浸水施工,必要时应采用降低地下水位措施。

5.5.8 当地下水位较高或桩间土含水量较高,影响褥垫层铺设夯实,应进行降水处理。夯实方法宜根据桩间土含水量,分别采用静力压实法或动力夯实法。砂石材料较干时,宜洒水后再振动夯实。

5.5.9 褥垫层铺设夯实后,若粗颗粒碎石沉陷明显而导致面层级配不均,可在面层增补适量的粗颗粒碎石后,继续振压或夯实。

II 土工合成材料铺设

5.5.10 铺设土工合成材料应在垫层密实度和平整度验收后施工。

5.5.11 土工合成材料必须横向铺设,纵向搭接宽度应不小于300mm。垫层上的杂物应清除干净,防止土工合成材料被刺穿、顶破。铺设时应把土工合成材料张拉平直、绷紧,严禁有折皱,端头应固定或回折锚固,连结可用搭接法、缝接法和胶结法,连结强度不低于材料抗拉强度。

5.5.12 在填土施工之前,垫层和土工合成材料施工应进行验收。

6 施工监测及工程质量检验与验收

6.1 一般规定

6.1.1 刚性桩及桩网路基工程验收应符合下列规定：

1 按照桩基、桩帽和褥垫层或梁板结构项目依次进行，其中混凝土结构检验和验收应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 执行；

2 刚性桩工程完工后，检验不合格且未经处理的工程，不得进入下一道工序施工。

6.1.2 建筑材料和土工合成材料应按有关标准进行质量检验。

6.1.3 工程分项检验应包含三个阶段：施工前检验、施工过程检验和施工后检验。

6.1.4 桩网路基工程质量控制按本标准附录 E.7 记录表进行验收。

6.1.5 刚性桩、桩帽和褥垫层分项工程检验批质量控制按附录 E.8~E.10 记录表进行验收。

6.1.6 褥垫层子项垫层和子项土工合成材料工程检验批质量控制按本标准附录 E.11 和 E.12 记录表进行验收。

6.1.7 要求主控项目全部合格，一般项目满足施工规范规定要求。

6.2 桩基工程施工监测和质量检验与验收

I 施工监测

6.2.1 挤土桩工点附近如有建(构)筑物、地下管网或地铁，施工

时应布置沉降和位移监测点，必要时埋设测斜管测量土体深层位移。每座建(构)筑物布置不少于 4 个监测点，管网或地铁间距 15m 设一个监测点。监测频率、方法和精度应符合现行行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8 规定，预警值采用相关行业现行标准。

6.2.2 饱和软土层施打挤土桩，施工过程中应监测已施工工程桩的坐标和高程。每个工点布设不少于 2 个工程桩监测断面，监测断面间距不大于 30m。每个断面监测点不少于 3 根桩，布置在左中右。工程桩施打后及时在桩顶设置监测点，测量其初始坐标和高程，按附录表 E.13 记录。

6.2.3 挤土工程桩位移监测频率：施打每根邻桩前后各观测 1 次，以后每天施工前后各观测 1 次，可据位移情况调整观测频率，桩基完工测量 1 次。

6.2.4 当工程桩水平位移日增量达到 5mm 或竖向位移日增量达到 2mm，应控制施打进度和调整施工顺序。当累计水平位移达到 50mm 或累计竖向位移超过 20mm，必须报告建设单位和设计单位，并暂停施工和分析原因，应采取相应措施后继续施工，且每施工 1 根应观测 1 次，直至位移稳定。

6.2.5 累计水平位移超过 100mm 的工程桩应进行完整性检测，累计竖向位移超过 40mm 的工程桩必须跑桩复压。

II 施工前检验

6.2.6 刚性桩施工前应检验桩位。

6.2.7 灌注桩施工前应检验钢筋笼和混凝土拌制。

6.2.8 预制桩施工前应对接桩用焊条、快速接头、压桩压力表等材料和设备进行检验。

III 施工过程中检验

6.2.9 沉管灌注桩施工过程中检验应按现行地方标准《福建省建筑

地基基础技术规范》DBJ 13 执行。

6.2.10 灌注桩施工过程中根据桩型按照本标准附录表 E.1~E.3 进行记录和检验。预制桩施工过程中根据沉桩工艺按照本标准附录表 E.4~E.5 进行记录和检验。

IV 施工后验收

6.2.11 灌注桩应预留混凝土试件进行 28 天(或设计要求龄期)抗压强度检验。

6.2.12 基桩承载力检测应满足地基土休止时间和桩身混凝土龄期(或设计强度)要求,单桩静载试验和完整性检测的数量、抽检率应按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 执行。

6.2.13 刚性桩路基应按附录 C 要求进行水平静载试验。

6.3 桩帽工程检验与验收

I 施工前检验

6.3.1 桩帽施工前应复核桩顶标高,当桩顶标高不满足时必须进行接桩处理。

6.3.2 应按国家现行标准检验砂石料、水泥和钢材质量。

II 施工过程检验

6.3.3 灌注混凝土前应检验模板位置、尺寸、平整度和牢固性,检查钢筋笼位置、配筋数量、尺寸和保护层,填写检查记录。

6.3.4 预留混凝土试件进行 28 天或设计要求龄期抗压强度检验。

III 施工后验收

6.3.5 桩帽工程验收资料应包括施工检查记录、混凝土强度报告、尺寸量测记录、坐标、外观描述以及桩头与桩帽的锚筋记录。

6.3.6 桩帽施工质量检查应按下表规定项目和要求进行。

表 6.3.6 桩帽施工允许偏差和检查方法

项目	轴线 偏位偏差	平面尺寸 偏差	帽顶标高 偏差	桩帽厚度 偏差	钢筋间距 偏差
允许 偏差	±15cm	±3cm	±10cm	±1cm	±10mm
检查 方法	抽查 2% 全站仪测量	抽查 10% 钢尺测量	抽查 2% 水准测量	抽查 2% 钢尺(四个 方位均值)	抽查 2% 钢尺测量

6.4 褥垫层工程检验与验收

I 施工前检验

- 6.4.1 复核桩帽标高，查看桩帽验收报告。
- 6.4.2 按现行标准检验垫层填料和土工合成材料的质量。

II 施工过程检验

- 6.4.3 每层应检查厚度和质量，压实系数应符合设计要求。
- 6.4.4 压实系数可采用灌砂法、灌水法或其他方法检验。
- 6.4.5 检验垫层施工质量每 100m² 不应少于 1 个检验点。
- 6.4.6 土工合成材料铺设应检查铺设方向、搭接宽度和平整度。

III 施工后检收

- 6.4.7 褥垫层施工验收应在完工并经检查合格后进行。
- 6.4.8 褥垫层工程验收程序应符合下列规定：
- 1 褥垫层未经检查合格不得进行隐蔽验收和进行下一道工序的施工；
 - 2 褥垫层施工与质量检查记录及汇总，应包括褥垫层骨料配合比、厚度与层顶标高、夯实施工和压实度检查记录、土工合成材料质量检验报告和施工检查记录。

附录 A 大面积基础刚性桩计算

A.1 半空间问题简化为桩土棱柱体结构力学问题

A.1.1 当基础面积较大、布桩均匀、荷载均布且土层水平，基础空间问题可简化为一个独立的桩土复合棱柱体结构力学问题。以三角形布桩为例，分别在邻桩连线中点作连线垂线，六条垂线围成一个正六边形，参见图 A.1 左图。每条垂线就是一个基础半空间问题的对称面投影，六组对称面将基础中分割为一个个桩土复合六棱柱，参见图 A.1 右图。

A.1.2 当根据介质力学原理，对称面上剪应力为 0、法向位移为 0。这意味着桩土复合棱柱体无法向外传递侧摩阻力，各个桩土棱柱体可被视为独立的侧限柱体。桩土棱柱体两端分别受到垫层和持力层的弹性约束，问题可转化为联立求解桩土复合棱柱体的结构力学问题。

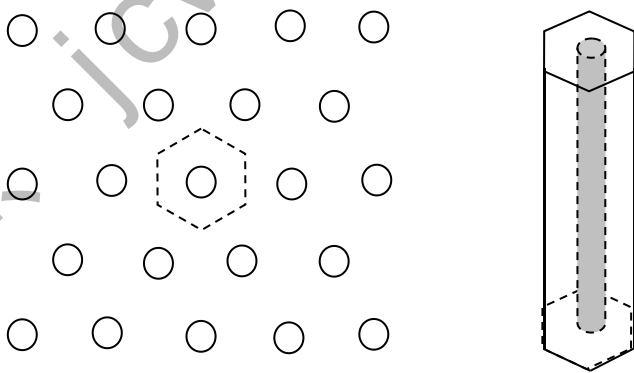


图 A.1 大面积基础刚性桩简化为桩土棱柱体问题

A.2 桩土复合棱柱体结构力学分析

A.2.1 假定土柱和桩体竖向附加应力均布，桩帽与桩可按等截面简化，但桩顶与垫层约束力必须按桩帽垫层弹簧系数计算，即等截面、变刚度处理。因棱柱体表面剪应力为0，桩侧摩阻力仅在棱柱体内的桩土之间相互传递。桩土竖向附加应力 $\sigma_p(z)$ 和 $\sigma_s(z)$ 为深度 z 函数，两者的函数增量符号相反、数值相等，且等于桩周总侧摩阻力 $F(z)$ 增量。

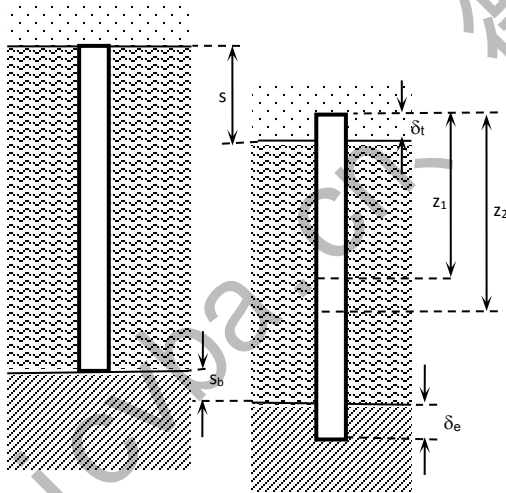


图 A.2 桩土相对位移关系

z_1 —中性区上界； z_2 —中性区下界； s —总沉降；
 s_t —桩顶桩土相对位移； s_e —桩端桩土相对位移； s_b —下卧层压缩量

A.2.2 计算时可将桩长分为负摩阻区、中性区(可能收敛为中性面)和正摩阻区 3 个区间，其中中性区 $[z_1, z_2]$ 的桩土相对移动为 0，参见图 A.2。以中性区 $[z_1, z_2]$ 为基准，分别计算桩和土的位移，两者的差值称为桩土相对位移，决定了侧摩阻的发挥及方向。负摩阻区桩土总压缩量的差值称桩顶桩土相对位移，等于桩帽与垫层

的相对位移 δ_t 。正摩阻区桩土总压缩量的差值称桩端桩土相对位移，等于桩端与持力层的相对位移 δ_e 。

A. 2. 3 桩顶桩土相对位移与桩顶荷载之间，桩端桩土相对位移与持力层端承力之间，应按弹性约束考虑。由桩帽垫层弹簧系数建立桩顶荷载与桩顶桩土相对位移的关系，由桩端持力层弹簧系数建立桩底反力与桩端桩土相对位移的关系。

A. 3 桩土复合棱柱体求解

I 棱柱体单元划分

A. 3. 1 求解时可假定存在中性区 $[z_1, z_2]$ ，以中性区为固定边界，分别求解负摩阻区下边界 z_1 与正摩阻区上边界 z_2 。当 $z_1 \leq z_2$ 中性区存在，计算结果成立；当 $z_1 > z_2$ 中性区收缩为中性面，必须联立求解负摩阻区和正摩阻区，以确定中性面位置 z_m 。

A. 3. 2 计算桩体和土体压缩量的定积分涉及到变量边界 z_1 及 z_2 ，方程组可采用迭代数值解法。

A. 3. 3 棱柱体可划分为 n 个单元：负摩阻区 $[0, z_1]$ 划分为 $m-1$ 个单元，单元编号1至 $m-1$ ；中性区 $[z_1, z_2]$ 为1个单元，单元编号 m ；正摩阻区 $[z_2, l]$ 划分为 $n-m$ 个单元，单元编号 $m+1$ 至 n 。边界 z_1 和 z_2 初值宜取软弱层中央，单元划分长度可以不同，但单元节点应与土层界面、中性区边界或中性面对齐。

II 求解中性区上界 z_1

A. 3. 4 求解中性区上界 z_1 可按下列步骤建立方程组(A.3.4)：

1 根据桩土压力之和等于上覆荷载，建立柱顶荷载平衡条件，得到方程组(A.3.4)中第1方程；

2 根据负摩阻区土柱总压缩量等于桩帽与垫层之间的桩土相对位移，建立变形协调条件，得到方程组(A.3.4)中第2方程；

3 根据垫层对桩帽的弹性约束, 建立桩顶位移边界条件, 得到方程组(A.3.4)中第 3 方程;

4 根据中性区桩土等应变关系, 建立中性区应力边界条件, 得到方程组(A.3.4)中第 4 方程。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_s(0)A_s + \sigma_p(0)A_p = qA \\ \sigma_s(0)\sum_{i=1}^{m-1} \frac{l_i}{E_{si}} - \sigma_p(0)\sum_{i=1}^{m-1} \frac{l_i}{E_p} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{F_i}{A_s} \frac{l_i}{E_{si}} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{F_i}{A_p} \frac{l_i}{E_p} = \delta_t \\ \sigma_p(0)A_p - \sigma_s(0) \frac{A_s A_h}{A - A_h} = k_h \delta_t \\ \sigma_s(0)E_p - \sigma_p(0)E_{sm} = -F_m \left(\frac{E_p}{A_s} + \frac{E_{sm}}{A_p} \right) \end{array} \right. \quad (\text{A.3.4})$$

式中: i —— 单元号;

m —— 中性区单元号;

q —— 基础荷载;

$\sigma_p(0)$ —— 在 $z=0$ 处桩身附加应力;

$\sigma_s(0)$ —— 在 $z=0$ 处土体附加应力;

A_p —— 桩身面积;

A_s —— 桩间土面积;

A —— 单桩分摊基础面积;

A_h —— 桩帽面积;

δ_t —— 桩顶桩土相对位移;

k_h —— 桩帽垫层弹簧系数;

l_i —— 第 i 单元长度;

E_{si} —— 第 i 单元土层侧限变形模量;

E_{sm} —— z_1 处土层侧限变形模量(在层面时取下方土层);

E_p —— 桩身变形模量;

F_i —— 作用于第 i 单元桩体及土体的侧摩阻力;

$$F_i = \pi D \sum_{j=1}^{i-1} f_j l_j + \frac{\pi D f_i l_i}{2} \quad (i=1, m-1)$$

j —— 第 i 单元以上单元的单元号；

D —— 桩径；

f_j —— 第 j 单元侧摩阻，负摩阻取 $-$ ，中性区取 0 ，正摩阻取 $+$ ；

F_m ——

$$F_m = \pi D \sum_{i=1}^{m-1} f_i l_i$$

中性区之上总侧摩阻力

A. 3. 5 方程组(A.3.4)可采用逼近算法按下列步骤求解：

1 计算作用于各单元桩体和土体内的总侧摩阻力 $F_i(i=1, m-1)$ ，桩体和土体等值相同反向，计算中性区之上总侧摩阻力 F_m ；

2 由方程组(A.3.4)中的方程 1 和 4，联立求解 $\sigma_p(0)$ 和 $\sigma_s(0)$ ；

3 把 $\sigma_p(0)$ 和 $\sigma_s(0)$ 代入方程组(A.3.4)中的方程 2 和 3，计算负摩阻区土柱压缩量和桩顶桩土相对位移；

4 比较两者误差，当误差超过要求(5%)调整 z_1 ，若方程 2 所求的土柱压缩量小于方程 3 所求的桩顶桩土相对位移，则 z_1 下移，反之上移。重复计算，直至满足设定精度。

III 求解中性区下界 z_2

A. 3. 6 求解中性区下界 z_2 可按下列步骤建立方程组(A.3.6)：

1 根据正摩阻区土柱总压缩量等于桩端与持力层之间的桩土相对位移，建立变形协调条件，得到方程组(A.3.6)中第 1 方程；

2 根据持力层对桩端的弹性约束，建立桩端位移边界条件，得到方程组(A.3.6)第 2 方程。

$$\begin{cases} \sigma_s(0) \sum_{i=m+1}^n \frac{l_i}{E_{si}} - \sigma_p(0) \sum_{i=m+1}^n \frac{l_i}{E_p} + \sum_{i=m+1}^n \frac{F_i l_i}{A_s E_{si}} + \sum_{i=m+1}^n \frac{F_i l_i}{A_p E_p} = \delta_e \\ (\sigma_p(0) - \sigma_s(0)) A_p - (1 + A_p / A_s) F_l = k_e \delta_e \end{cases} \quad (\text{A.3.6})$$

式中： m —— 中性区单元号；

$\sigma_p(0)$ —— 在 $z=0$ 处桩身附加应力，方程组(A.3.4)求得；

$\sigma_s(0)$ —— 在 $z=0$ 处土体附加应力，方程组(A.3.4)求得；

A_s —— 桩间土面积；

A_p —— 桩身面积；

l_i —— 第 i 单元长度；

E_{si} —— 第 i 单元土层侧限变形模量；

E_p —— 桩身变形模量；

F_i —— 作用于第 i 单元桩体及土体的总侧摩阻力：

$$F_i = F_m + \pi D \sum_{j=m+1}^{i-1} f_j l_j + \frac{\pi D f_i l_i}{2} \quad (i = m+1, n)$$

F_m —— 中性区之上总侧摩阻力；

$$F_l = F_m + \pi D \sum_{i=m+1}^n f_i l_i$$

总侧摩阻

A.3.7 方程组(A.3.6)可采用逼近算法按下列步骤求解：

1 由前一步所求的中性区之上总侧摩阻力 F_m ，计算作用于各单元桩体和土体内的总侧摩阻力 $F_i(i = m+1, n)$ 和总侧摩阻 F_l ；

2 把前面所求的 $\sigma_p(0)$ 和 $\sigma_s(0)$ 代入方程组(A.3.6)，计算正摩阻区土柱压缩量和桩端桩土相对位移；

3 比较两者误差，当误差超过要求(5%)调整 z_2 ，若方程 1 所求的土柱压缩量小于方程 2 所求的桩端桩土相对位移，则 z_2 上移，反之则下移。重复计算，直至满足设定精度。

IV 求解中性面 z_m

A. 3. 8 求解中性面 z_m 可按下列步骤建立方程组(A.3.8):

1 当前两步求解结果为 $z_1 > z_2$, 中性区缩为一个中性面 $z_1 = z_2 = z_m$, 等应变边界条件即方程组(A.3.4)中的第 4 方程不成立, 必须联立求解正负摩阻区以确定中性面位置 z_m 。

2 去掉中性区单元, 负摩阻区单元编号 1 至 m , 正摩阻区单元编号 $m+1$ 至 n 。剔除方程组(A.3.4)中的第 4 方程, 然后联立方程组(A.3.4)和方程组(A.3.6), 得到方程组(A.3.8)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_s(0)A_s + \sigma_p(0)A_p = qA \\ \sigma_s(0)\sum_{i=1}^m \frac{l_i}{E_{si}} - \sigma_p(0)\sum_{i=1}^m \frac{l_i}{E_p} + \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{A_s} \frac{l_i}{E_{si}} + \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{A_p} \frac{l_i}{E_p} = \delta_t \\ \sigma_p(0)A_p - \sigma_s(0)\frac{A_s A_h}{A - A_h} = k_h \delta_t \\ \sigma_s(0)\sum_{i=m+1}^n \frac{l_i}{E_{si}} - \sigma_p(0)\sum_{i=m+1}^n \frac{l_i}{E_p} + \sum_{i=m+1}^n \frac{F_i}{A_s} \frac{l_i}{E_{si}} + \sum_{i=m+1}^n \frac{F_i}{A_p} \frac{l_i}{E_p} = \delta_e \\ (\sigma_p(0) - \sigma_s(0))A_p - (1 + A_p/A_s)F_l = k_e \delta_e \end{array} \right. \quad (\text{A.3.8})$$

式中: m —— 负摩阻区单元数;

n —— 总单元数;

q —— 基础荷载;

$\sigma_p(0)$ —— 在 $z=0$ 处桩身附加应力;

$\sigma_s(0)$ —— 在 $z=0$ 处土体附加应力;

A —— 单桩分摊基础面积;

A_p —— 桩身面积;

A_s —— 桩间土面积;

A_h —— 桩帽面积;

l_i —— 第 i 单元长度;

E_{si} —— 第 i 单元土层侧限变形模量;

E_p —— 桩身变形模量；
 k_h —— 桩帽垫层弹簧系数；
 K_e —— 桩端持力层弹簧系数；
 δ_t —— 桩顶桩土相对位移；
 δ_e —— 桩端桩土相对位移；
 F_i —— 作用于第 i 单元桩体及土体的总侧摩阻力；

$$F_i = \pi D \sum_{j=1}^{i-1} f_j l_j + \frac{\pi D f_i l_i}{2}$$

$$F_l \text{ —— 总侧摩阻力} \quad F_l = \pi D \sum_{i=1}^n f_i l_i$$

A. 3. 9 方程组(A.3.8)可采用逼近算法按下列步骤求解：

- 1 计算作用于各单元桩体和土体内的总侧摩阻力 $F_i(i=1, n)$ 和总侧摩阻 F_l ；
- 2 由方程组(A.3.8)中的方程 1、4 和 5，联立求解 $\sigma_p(0)$ 、 $\sigma_s(0)$ 和桩端桩土相对位移 δ_e ；
- 3 把 $\sigma_p(0)$ 和 $\sigma_s(0)$ 代入方程组(A.3.8)中的方程 2 和 3，计算负摩阻区土柱压缩量和桩顶桩土相对位移；
- 4 比较两者误差，当误差超过要求(5%)调整 z_m ，若方程 2 所求的土柱压缩量小于方程 3 所求的桩顶桩土相对位移，则 z_m 下移，反之上移。重复计算，直至满足设定精度。

V 特殊情况计算处理

A. 3. 10 当桩顶采用梁板结构，桩顶桩土相对位移取 0，上部桩段视为中性区 $F_m=0$ ，由方程组(A.3.4)的方程 1 和 4 求得 $\sigma_p(0)$ 和 $\sigma_s(0)$ ，然后代入方程组(A.3.6)求解中性区上界 z_2 。

A. 3. 11 当持力层为中微风化基岩且缺乏实验数据，基岩面处桩土相对位移近似取 0，基岩面上桩土的荷载分摊按桩土刚度比确定。根据基岩面处桩身轴力，可按极限荷载法设计嵌岩桩段。

A. 3. 12 当地层存在欠固结土(可液化土和湿陷性土相同处理), 基础可能脱空取 $\sigma_s(0)=0$ 。垫层与土层位移不连续, 无法求解 z_1 。在计算 z_2 之上总负摩阻 F_m 和土柱重量 $A_s \sum h_{si} \gamma_{si}$ 时, 应取较小者作为欠固结产生的桩身附加荷载 F_{sw} , 并按下式计算 z_2 处桩体应力:

$$\sigma_p(z_2) = (qA + F_{sw}) / A_p$$

假定在 z_2 处土体的附加应力 $\sigma_s(z_2)=0$, 把 $\sigma_p(z_2)$ 和 $\sigma_s(z_2)$ 代入方程组(A.3.4)中的 $\sigma_p(0)$ 和 $\sigma_s(0)$, 并令 $F_m=0$, 相当于把 z_2 视为新的桩顶。方程组(A.3.4)的求解步骤和逼近算法, 跟第III小节相同。

附录 B 单桩水平抗力计算

B.1 计算模型

B.1.1 在软土层中，滑动面两侧土体对桩体的水平约束很弱。刚性桩路基中桩体的破坏模式为弯断破坏，而不是剪切破坏，应按弯断破坏模式考虑桩体的抗滑作用，即应通过桩的截面抗弯矩，而不应采用截面抗剪力，来确定桩体的水平抗力。

B.1.2 在计算单桩水平抗力时，把滑动面以上桩体视为悬臂梁，滑动面以下桩体可视为无限长弹性梁，并按弹性地基梁理论进行计算。

B.1.3 可采用 k 法求解弹性地基梁，即假定桩侧某点土压力与该点的水平位移的比例系数 k 为常数(地基系数)，相当于假定滑动面以下土层为均质，宜取滑动面所在软土层的参数。

B.1.4 悬臂梁的侧向推力，可假定按倒三角形分布，即土体对桩体水平推力的作用点的高度取滑动面深度的 2/3 位置。

B.2 计算方法

B.2.1 在刚性桩路基中，单桩水平抗力 F_p 可按下式计算：

$$\left\{ \begin{array}{l} F_p = \frac{\beta e^{\omega}}{(1 + \beta z_p) \sin \omega + \beta z_p \cos \omega} M_p \\ \beta = \sqrt[4]{kD/(4EI)} \\ \tan \omega = 1/(1 + 2\beta z_p) \end{array} \right. \quad (\text{B.2.1})$$

式中： D ——桩径；

β ——桩土变形系数；

EI ——桩身截面抗弯刚度；

k ——土层侧向地基系数；

z_p ——水平抗力作用点，取 $z_p = z \times 2/3$ ， z 为滑面深度；

F_p ——单桩水平抗力，作用点高度为 z_p 。

M_p ——桩截面抗弯矩。

B. 2. 2 当缺乏土层侧向地基系数参数，或截面抗弯矩和抗弯刚度不易确定，可根据表 B.3.1 实验数据由式(B.2.2)计算，即通过荷载作用点高度为 0 的单桩水平静载试验的极限荷载，来推算作用点高度为 z_p 时的单桩水平抗力：

当水平作用力沿着软土面即作用点高度等 0 时，根据弹性地基梁微分方程，可得到桩身最大弯矩值 M_{\max} 算式：

$$\begin{cases} M_{\max} = \frac{e^{-\pi/4}}{\sqrt{2}} F_0 / \beta \\ u_0 = F_0 / (2EI\beta^3) \\ \theta_0 = F_0 / (2EI\beta^2) \end{cases}$$

在极限荷载状态下，令 $M_{\max} = M_p$ ，联立上式和(B.2.1)式，可导出如下单桩水平抗力 F_p 计算式：

$$\begin{cases} F_p = \frac{e^{\omega - \pi/4}}{\sqrt{2}((1 + \beta z_p) \sin \omega + \beta z_p \cos \omega)} F_0 \\ \beta = \theta_0 / u_0 \\ \tan \omega = 1 / (1 + 2\beta z_p) \end{cases} \quad (\text{B.2.2})$$

式中： β ——桩土变形系数；

u_0 ——地面处桩顶水平位移；

θ_0 ——地面处桩顶转角；

F_0 ——单桩水平抗力，作用点高度为 0；

F_p ——单桩水平抗力，作用点高度为 z_p 。

B. 2. 3 在计算单桩水平抗力 F_p 设计值时，宜使用单桩水平抗力特征值，即取单桩水平静载实验中位移曲线直线段的最大荷载，作为单桩水平抗力 F_0 ，叫单桩水平抗力线性特征值(简称特征值)。因土工合成材料的拉伸率限制和格构系梁的应变限制，在工程中刚性桩的允许水平位移远小于极限实验荷载下的临界位移，刚性桩水平抗力无法充分发挥，桩体水平抗力实际上难以有效利用。

B. 3 计算参数经验值

B. 3. 1 当缺乏原位实验数据，或缺乏土层侧向地基系数，可根据表(B.3.1)的单桩水平抗力特征值 F_0 和桩土变形系数 β 的经验值，计算单桩水平抗力 F_p 设计值。

因大面积基础刚性桩的桩径范围有限(400~600)mm，滑动面范围内的土层较为一致，通常为流塑~软塑软土。通过原位单桩水平荷载试验，按桩径和软土性质，建立地区性 F_0 和 β 的经验参数表，不失为简单可行的计算方法。根据单桩水平荷载原位试验结果，下表给出福建地区滨海相软土中直径 400mm 刚性桩的相关参数经验值。

表 B.3.1 单桩水平抗力 F_0 (kN)和桩土变形系数 β (m^{-1})经验值

参数	桩径	400mm	
		β	F_0
桩材	土层		
素混凝土桩	流塑软土	0.40	10
	软塑软土	0.44	15
钢筋混凝土桩	流塑软土	1.1	35
	软塑软土	1.2	40

注：素混凝土桩实验均达断裂，地面处最大水平位移小于 5mm。钢筋混凝土桩均未进入断裂状态，地面处最大水平位移大于 200mm。其他桩径的水平抗力参数有待补充。

B.3.2 其他桩径可根据桩径(mm)比值修正表 B.3.1 参数值，即按系数 $(D/400)^2$ 修正单桩水平抗力特征值 F_0 值，按系数 $(400/D)^{1/4}$ 修正桩土变形系数 β 值。

B.4 群桩效应折减

B.4.1 单桩水平抗力设计值应考虑群桩效按下式进行折减：

$$F_p = \eta F_{p0} \quad (\text{B.4.1})$$

式中： η ——群桩效应系数，按桩间距 B 与桩径 D 比值确定：

B/D=3,4,5,6 对应的 $\eta=0.4,0.5,0.6,0.7$ 。

附录 C 地层设计参数

表 C.1 侧限变形模量与压缩模量经验值

土类	性质	侧限变形模量 $E_s(1000\text{kPa})$	压缩模量 $E_{sa}(1000\text{kPa})$
硬壳层 砂黏土	可塑	4.4	3.8
	硬塑	5.5	5.5
淤泥	流塑	3.4	1.8
	软塑	4.2	2.2
粉质黏土	软塑	16	/
	可塑	20	/
	硬塑	23	/
黏性土	软塑	27	3.2
	可塑	28	4.5
	硬塑	30	6.0

注：硬壳层和淤泥通过平板载荷试验获得，其余参考压缩试验数据和《工程地质手册》，空白有待补充参数。

土层压缩模量 E_{sa} 由侧限排水压缩试验取得，土层侧限变形模量 E_s 由载板试验获得。由载板试验获得 E_0 后，按下式换算求 E_s ：

$$E_0/E_s = 1 - 2\mu^2 / (1 - \mu)$$

其中泊松比 $\mu = \xi / (1 + \xi)$ ， ξ 为静止侧压力系数。载板面积不宜小于 0.5m^2 ，实验的土层厚度不宜小于 5 倍载板宽度。

土层侧限变形模量 E_s 与压缩模量 E_{sa} 应按以下规定使用：

1 路基稳定验算和工期沉降计算，应使用侧限变形模量。缺乏试验数据，砂性土和非饱和黏性土可使用压缩模量。

2 桩长桩距的设计计算，桩身最大轴力计算，基础沉降以及路基工后沉降计算，应使用土层压缩模量。

3 通过刚度比计算桩土分摊荷载，应使用该土层的侧限变形模量。因为桩土等应变区的土体变形未达土体结构调整水平，不会发生排水固结。

表 C.2 褥垫层地基系数经验值(kPa/m)

垫层填料 路堤填料	中粗砂	级配碎石	级配砂碎石
土	21000	23000	24000

注：填石路堤有待补充参数。

桩帽褥垫层弹簧系数 K_h 可从监测桩顶轴力和位移以及桩间土位移得到，或由模拟褥垫层载板试验获得。桩帽褥垫层弹簧系数取位移曲线的直线段斜率，褥垫层弹簧系数除以桩帽面积叫褥垫层地基系数。载板试验模拟垫层和填土的密实度及应力状态与实际存在差异，桩帽垫层弹簧系数的原位实测值大约是载板试验的 2/3 倍，褥垫层地基系数应取载板实验值 0.7 倍。

表 C.3 桩端持力层弹簧系数经验值($\times 1000\text{kN/m}$)

土层种类	桩径 mm	400	500	600
	性质			
细砂	中密			
	密实			
中粗砂	中密			
	密实			
卵石	松散			
	中密	20~60	150~220	
	密实	60~80		
黏性土	可塑	9~15	12~40	
	硬塑	15~30	40~60	
强风化	◆ 全风化		60~120	220~360
	砂土状强风化	20~40	130~150	520~620
	碎块状强风化	120~180	180~320	

注：由福建地区单桩垂直静载试验数据统计，非挤土桩按 0.6~0.8 折减，空白有待补充。

桩端持力层弹簧系数 K_e 可由深层载板试验，或单桩垂直静载试验获得，取位移曲线第一与第二拐点之间平均斜率。当桩土相对位移达到一定值，桩侧阻力将进入稳定的残余值，把桩顶位移扣减桩体压缩增量，荷载增量与位移增量的比值即为桩端持力层弹簧系数。深层载板试验和单桩荷载试验应在同一持力层进行，荷载板和试桩应与工程桩等截面、同深度。持力层弹簧系数随着埋深而显著变化，施工设计宜通过原位试桩或载板实验确定。

附录 D 垫层和持力层弹簧系数及 单桩水平抗力试验

D.1 基本规定

D.1.1 在试验之前应对仪器仪表设备进行检查调试，加载系统的千斤顶和传感器须进行重新率定，并校对和打印率定表格，供现场试验使用。

D.1.2 水平荷载试验必须使用多向传感器，垂直荷载试验亦宜使用多向传感器。

D.1.3 分级加载，每级荷载不应大于最大加载量或预计极限荷载的 1/10。

D.1.4 荷载应均匀、连续、无冲击地缓慢增加，每级荷载的试验时间不少于 2 小时。

D.1.5 当使用多向压力传感器时，应根据各个方向读数的平均值对照率定表提供的平均值来控制荷载。

D.1.6 位移观测宜采用百分表，百分表顶针必须移动顺畅，表针转动正常。

D.1.7 百分表表座必须安装牢靠，位移基准面必须平滑且垂直于位移方向，百分表顶针必须保持与位移基准面垂直，否则应及时记录读数并重新安装调表。

D.1.8 试验报告应包括试验概况、试验资料和试验成果。

D.2 垫层弹簧系数试验

D.2.1 垫层弹簧系数试验应在相同填料及密实度的路堤上进

行，并铺设模拟实际工程的垫层结构，包括垫层级配、密实度、厚度以及土工合成材料。

D. 2. 2 荷载板底面之下的路堤填土高度不应小于 3m。

D. 2. 3 预铺模拟实验的土工合成材料，面积不应小于 9 倍单桩分摊路基面积，其上应预铺与实际工程一致的垫层，然后铺设 2 至 3 倍单桩分摊路基面积的保护帆布。测量记录方形试验坑的中心点坐标，以便指导开挖。

D. 2. 4 实验铺设的土工合成材料上的填土厚度达到 1.5m（从试验操作和安全考虑试坑深度不宜大于 2m）后应暂停填土，进行人工开挖试验坑。方形试验坑面积约 2 至 3 倍单桩分摊路基面积，应以能够满足实验操作为准。在开挖试坑、取出帆布和安装设备时，不应扰动和污染预铺的垫层。

D. 2. 5 荷载板形状和面积应与桩帽一致，并加工钢结构托盘，以满足荷载板的刚度要求，载板下面的垫层必须进行平整和压密。

D. 2. 6 试验反力压重不应小于试验荷载 1.2 倍，压重底座应尽量远离荷载板，与载板中心距离不应小于荷载板宽度或直径的 4 倍，压重平台重心应与载板中心重叠。

D. 2. 7 荷载板、千斤顶、传感器、托盘、反力梁和配重重心应保持中心共线。

D. 2. 8 位移基准梁支座与荷载板中心点的距离应等于实际桩间距或折算桩间距($A^{1/2}$)的一半，且应避开压重平台底座。

D. 2. 9 在正式试验之前应预压 0.5 小时然后回零，预压荷载为最大试验荷载的 10%，以降低开挖扰动对变形量的影响。

D. 2. 10 每半小时应读一次位移，当位移增量小于 0.2mm 且本级荷载的试验时间不小于 2 小时，加下一级荷载。

D. 2. 11 当出现以下三种情况之一，可终止加载：

- 1 位移急剧加大、载板周围土体明显挤出、荷载不能增加；
- 2 本级荷载的试验时间大于 6 个小时；
- 3 沉降量与荷载板宽度或直径之比大于 0.03。

D. 2. 12 试验概况应记录日期、天气和场地排水情况，描述填土、垫层、试坑、荷载板、反力系统、堆载等详细情况和结束加载原因；试验资料应记录基准梁、基准点位置、试验过程和加载情况，并提交试验记录表；试验成果应提交荷载位移表、荷载位移曲线，并提供垫层弹簧系数 K_h 。垫层弹簧系数取荷载位移曲线第一拐点荷载与位移的比值(与载板面积有关)，单位 kN/m。

D. 3 持力层弹簧系数试验

D. 3. 1 可通过单桩静载实验或原位等截面载板实验，获取持力层的荷载变形曲线及弹簧系数。持力层为中微风化基岩，且工点附加有地层露头，应在露头处进行原位载板实验。持力层为散粒体，应采用深层原位实验或与工程桩实际深度相近、施工工艺相同的试桩实验。原位载板实验基本要求同 D.2 节。

D. 3. 2 试验桩截面积与工程桩一致，截面抗压强度不应低于工程桩，试验桩的主筋直径宜比工程桩大一级。

D. 3. 3 当利用工程桩作为试桩时，应选取桩身完整、垂直度好且桩头无破损工程桩。

D. 3. 4 试桩桩头应凿平并冲刷干净，涂抹环氧树脂砂浆找平，然后安放可覆盖桩截面 20mm 厚钢板，并用水平尺调平。

D. 3. 5 反力压重不应小于试验荷载的 1.2 倍，压重平台底座应远离试桩和载板，压重平台重心应与试桩和载板中心重叠。

D. 3. 6 试桩和载板中心、千斤顶中心、传感器中心、托盘中心、反力梁中心和配重重心应保持共线。

D. 3. 7 位移基准梁支座与试桩或载板中心的距离应为 1/3 至 1/2 桩长或 3 倍载板宽度，并应避开压重平台底座。

D. 3. 8 每半小时应读一次位移，当位移增量小于 0.1mm 且本级荷载的试验时间不小于 2 小时，加下一级荷载；

D. 3. 9 当出现如下三种情况之一，可终止加载：

- 1 荷载无法增加、位移急剧加大；
- 2 桩顶沉降量大于前一等级荷载作用下沉降量的 2 倍，且经 6h 尚未达到相对稳定标准；
- 3 位移大于 $L \times 2\% + D \times 10\%$ (柔性持力层) 或 $L \times 2\%$ (刚性持力层)，其中 L 为桩长、 D 为桩径。

D. 3. 10 试验概况应记录日期和天气情况，介绍试桩、反力系统、堆载等详细情况和结束加载原因；试验资料应记录桩头处理、基准梁情况、基准点位置和加载试验过程，并提交试验记录表；试验成果应提交荷载位移表、荷载位移曲线，并提供持力层弹簧系数 K_e 。持力层弹簧系数取荷载位移曲线第一拐点至第二拐点之间荷载增量与位移增量（扣除桩身压缩增量）的比值，单位 kN/m 。

D. 4 单桩水平抗力试验

D. 4. 1 单桩水平抗力试验可在同一场地外单独施工试验桩，也可直接使用桩身完整的工程桩，试桩类型和尺寸应与工程桩相同，土层结构和持力层深度应与实际工程基本一致。

D. 4. 2 当采用工程桩作为试桩时，试桩应选择路基中心线上的工程桩，试桩之间的间隔不应少于 3 根桩（含试桩），试验应在桩帽施工之前完成。

D. 4. 3 水平推力试验必须开挖试坑，试坑面积不宜小于 2 倍单桩分担面积，试坑深度不应小于 1.5m，且必须在地表硬壳层之下。

D. 4. 4 水平推力的反力支座可采用钢结构底板或毗邻工程桩，底板面积不小于 1m^2 ，板面与试桩平行，板中心与加载点连线必须水平，即底板一半应埋入开挖面之下。

D. 4. 5 当利用毗邻工程桩作为反力支座时，该工程桩桩背必须填充密实，必要时可在桩背局部填充素混凝土。

D. 4. 6 反力支座必须是平整、垂直、牢固的钢结构，顶力支座必须采用能够抱箍桩体且设置柱形或球形铰白的钢结构。

顶力支座与桩体之间必须安装橡胶垫并抱箍牢固，且必须通过柱形铰或球形铰与传力杆铰接。以便当桩顶转角和位移较大时，保持加载作用力水平和加载作用点不变。

D. 4. 7 试坑底面应安装水平工作平台，并标记传力系统轴线，轴线必须对准桩中心线和反力支座对称线。顶力支座、传力杆、压力传感器、千斤顶和反力支座等组成的加载系统的中心线必须位于同一水平线。

D. 4. 8 加载系统必须保证荷载的测量精度，应使用压力传感器，或使用小顶力液压千斤顶。

D. 4. 9 桩顶转角可采用吊锥或经纬仪测量。

采用吊锥时应加工立杆与弧形扁钢的丁字正交钢结构，立杆有效高度即吊线长度不小于 1.5m(越长精度越高)。立杆须牢固地安装在桩头上且与地面垂直，且圆弧形扁钢与荷载加力系统轴线共面。

圆弧形扁钢内侧粘贴卷尺，圆弧扁钢的半径与立杆有效高度一致，弧长不小于 300mm(量程)。为了克服风力干扰读数，必要时安装有机玻璃罩或其它防风装置。

D. 4. 10 加载点水平位移可采用百分表或经纬仪测量。

基准梁支座离试桩距离应不小于 8 倍桩径，基准梁必须有足够的刚度，支座须固定牢靠。

水平位移基准面应采用与桩身铰接的活页钢片，且可自由稳定地调节钢片垂直度。以便随着桩顶转动调整基准面垂直度，使百分表顶针与位移基准面保持垂直，且测点位置保持不变。

D. 4. 11 加载应采用慢速加载法，按下列规定执行：

1 加载应分级进行，且采用逐级等量加载，分级荷载为预估最大试验荷载值的 1/10，其中第一级可取分级荷载的 2 倍；

2 加载时应使荷载传递均匀、连续、无冲击，且每组荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分级荷载的 $\pm 10\%$ ；

3 每半小时应读一次水平位移和弧长(转角)，当水平位移

增量小于 0.5mm，且本级荷载的试验时间不小于 2 小时，可加下一级荷载。

D. 4. 12 当出现如下三种情况之一，可终止加载：

- 1 荷载无法增加、位移急剧加大或桩体断裂；
- 2 本级荷载位移量大于前一级荷载作用下位移量的 2 倍，且经 6h 尚未达到相对稳定标准；
- 3 水平位移超过桩径的 0.25 倍或软土底面深度的 1%(取两者较大者)。

D. 4. 13 试验报告除了提交各级水平荷载及水平位移等常规数据，还必须提交桩顶转角数据。

附录 E 施工记录和质量验收与监测表

表 E.1 振动沉管刚性桩施工记录表

施工日期 年 月 日

工程名称		施工单位				监理单位										
设计桩长 (m)	设计桩径 (m)	砼设计强度	坍落度 (mm)	地面标高 (m)	桩顶标高 (m)	配筋长度 (m)	抬架重量 (t)	桩机类型	桩尖类型							
桩位编号	设计桩长 (m)	实际桩长 (m)	有无抬架	拔管时间		砼用量 (m ³)		充盈系数	浮浆高度 (mm)	激振电流 (A/m)					验收记录	
				起	止	设计	实际			1	2	3	4	5		
施工技术负责人		施工员		机长		监理工程师										

表 E.2 锤击沉管灌注桩施工记录表

施工日期 年 月 日

工程名称		施工单位				监理单位					
设计桩长 (m)	设计桩径 (m)	配筋长度 (m)	砼设计强度		坍落度 (mm)		地面标高 (m)				
桩顶标高 (m)	实际桩长 (m)	拔管时间		砼用量 (m ³)		充盈 系数	浮浆 高度 (mm)	最后三阵 贯入度 (cm/10 击)	验收 记录		
桩位编号	设计 桩长 (m)	实际 桩长 (m)	起	止	设计	实际		一	二	三	
施工技术负责人		施工员		机长		监理工程师					

表 E.3 螺旋取土成孔灌注桩施工记录表

施工日期 年 月 日

工程名称		施工单位				监理单位					
设计桩长 (m)	设计桩径 (m)	砼设计强度				坍落度 (mm)	地面标高 (m)				
桩顶标高 (m)	配筋长度 (m)	螺旋杆直径 (m)				桩机类型	桩尖类型				
桩位编号	桩孔径实测值 (cm)	桩长度实测值 (m)	桩底持力层		桩底沉碴处理情况	钢筋笼长度实测值 (m)	终孔电流 (A)	砼用量 (m ³)		充盈系数	验收记录
			土质名称	进入深度 (m)				设计	实际		
施工技术负责人		施工员		机长		监理工程师					

表 E.4 锤击预制桩施工记录表

施工日期 年 月 日

工程名称						施工单位						监理单位											
设计桩长 (m)		设计桩径 (m)				砼设计强度				预制桩型号				地面标高 (m)									
桩顶标高 (m)		垂重 (kN)				桩机类型				接桩类型				桩尖类型									
桩位编号	制桩日期	总锤击数	接桩次数	最后三阵贯入度 (cm/10 击)			实际桩长 m	桩顶标高 m	砍 (接) 桩长度 m	预制桩检测		打桩质量					接桩质量			验收记录			
				一	二	三				尺寸偏差	外观质量	倾斜	偏位	回弹	垂直度	缝长 cm	缝高 cm	冷却时间 min	外观质量				
施工技术负责人						施工员				机长						监理工程师							

表 E.5 压预制桩施工记录表

施工日期 年 月 日

工程名称		施工单位			监理单位		
设计桩长 (m)	设计桩径(m)	预制桩型号	砼设计强度	地面标高 (m)			
桩顶标高 (m)	最大压桩力 (KN)	桩机类型	接桩类型	桩尖类型			
桩位编号	实际桩长 (m)	送(砍)桩长 (m)	最终压力表读数 (MPa)	最终压桩力 (kN)	垂直度	验收记录	
施工技术负责人		施工员	机长		监理工程师		

表 E.7 桩网路基工程质量控制资料核查记录

年 月 日

工程名称			施工单位		
序号	项目	资料名称	份数	核查意见	核查人
1	桩基 桩帽 褥垫层	图纸会审、设计变更、洽商记录			
2		工程定位测量、放线记录			
3		原材料出场合格证书和进场检（试）验报告			
4		桩基施工记录			
5		桩帽施工记录			
6		褥垫层级配、密实度施工记录			
7		土工土工合成材料铺设施工记录			
8		预制构件、预拌混凝土合格证			
9		路基检验及抽样检测资料			
10		检验批、分项、工程质量验收记录			
11		工程质量事故及事故调差处理资料			
12		新材料、新工艺施工记录			
13		监测方案和报告			
14		其他			
结论：					
施工单位项目经理：			总监理工程师 (建设单位项目负责人)：		
年 月 日			年 月 日		

表 E.8 大面积基础刚性桩分项工程检验批质量验收记录表

年 月 日

工程名称			验收部位		
施工单位			项目经理		
施工执行标准名称及编号					
施工质量验收的规定				施工单位检查评定记录	监理单位(建设)验收记录
主控项目	1	原材料	合格		
	2	桩径 (mm)	≤-20		
	3	桩身强度	合格		
	4	单桩承载力	合格		
	5	桩顶水平位移 (mm)	≤150mm		
桩顶竖向位移 (mm)		≤40mm			
一般项目	1	桩身完整性	设计与规程要求		
	2	桩位偏差	≤150mm		
	3	桩垂直度 (%)	≤1		
	4	桩长 (mm)	±100		
施工单位检查评定结果	施工员		施工班组长		
	项目专业质量检查员: 年 月 日				
监理单位(建设)验收结论	专业监理工程师: (建设单位项目专业技术人)				年 月 日

表 E.9 桩帽分项工程检验批质量验收记录表

年 月 日

工程名称			验收部位		
施工单位			项目经理		
施工执行标准名称及编号					
施工质量验收规定			施工单位检查评定记录	监理单位(建设)验收记录	
主控项目	1	原材料	合格		
	2	混凝土强度	合格		
	3	桩帽钢筋强度	合格		
	4	厚度	合格		
一般项目	1	桩位偏差	$\leq 150\text{mm}$		
	2	宽度	≤ 1		
	3	桩长 (mm)	$\leq \pm 100$		
	4	桩帽尺寸偏差	设计规程要求		
施工单位检查评定结果	施工员		施工班组长		
	项目专业质量检查员： 年 月 日				
监理单位(建设)验收结论	专业监理工程师： (建设单位项目专业技术人)				年 月 日

表 E.10 褥垫层分部质量验收记录表

年 月 日

工程名称			验收部位		
施工单位			项目经理		
施工执行标准名称及编号					
施工质量验收的规定				施工单位 检查 评定记录	监理单位 (建设) 验收记录
主控项目	1	原材料	合格		
	2	褥垫层密实度	合格		
	3	褥垫层厚度	合格		
	4	土工合成材料铺设	合格		
一般项目	1	褥垫层级配	设计规程要求		
	2	褥垫层平整度	设计与规程要求		
	3				
施工单位 检查评定 结果	施工员		施工班组长		
	项目专业质量检查员:				年 月 日
监理单位 (建设) 验收结论	专业监理工程师 (建设单位项目专业技术人)				年 月 日

表 E.12 褥垫层子项土工合成材料工程检验批质量验收记录表

工程名称				验收部位			
施工单位				项目经理			
施工执行标准名称及编号							
施工质量验收规范规定			施工单位检查评定记录				监理单位(建设)验收记录
主控项目	1	土工合成材料质量指标符合设计要求					
	2	土工合成材料搭接宽度回卷长度符合要求					
一般项目	1	下承层无突刺尖角					
	2	下承面平整度	≤15				
	3	下承面平拱度	±1%				
施工单位检查结果	施工员				施工班组长		
	项目专业质量检查员： 年 月 日						
监理单位(建设)验收结论	专业监理工程师： (建设单位项目专业技术负责人)						年 月 日

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：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 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定（要求）”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 2 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 3 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB50204
- 4 《建筑与市政地基基础通用规范》 GB55003
- 5 《建筑桩基技术规范》 JGJ 94
- 6 《建筑基桩检测技术规范》 JGJ106
- 7 《城市道路路基设计规范》 CJJ194
- 8 《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》 JTG/T D31-02

福建省工程建设地方标准

大面积基础刚性桩及桩网路基
设计与施工技术标准

DBJ/T13-221-2023

条文说明

修 订 说 明

《大面积基础刚性桩及桩网路基设计与施工技术标准》DBJ/T 13-221-2023, 经福建省住房和城乡建设厅 2023 年 02 月 27 日以闽建科(2023)7 号文批准发布, 并经住房和城乡建设部备案, 备案号为 J12985-2023。

本标准是在《刚性桩及桩网路基设计与施工技术规程》DBJ/T 13-221-2015 的基础上修订而成, 上一版的主编单位是福建省建筑科学研究院, 参编单位是福建省交通规划设计院和深圳市市政设计研究院有限公司, 主要起草人员是邓剑涛、朱春森。本次修订的主要内容是: 1.把路基刚性桩计算方法拓展到大面积建筑桩基础; 2.修改条文以涵盖桩板结构路基; 3.增加欠固结土等计算条文; 4.补充基岩持力层计算条文; 5.完善饱和软土层挤土桩施工的桩顶位移监测条文; 6.收集补充地层设计参数。

本标准修订过程中, 修订组进行了广泛的调查研究, 总结我省地基基础建设的实践经验, 同时参考省内外先进技术法规、技术标准, 分析漳州高新区大量试桩数据, 完善补充桩端持力层弹簧系数。

为便于广大建筑工程施工、监理等人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定, 《大面积基础刚性桩及桩网路基设计与施工技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明, 对条文规定的目的、依据以及执行中须注意的有关事项进行了说明。但是, 本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则.....	79
2	术语与符号.....	80
2.1	术语.....	80
3	基本规定.....	81
4	刚性桩及桩网路基设计.....	84
4.1	一般规定.....	84
4.2	桩长和桩距设计.....	85
4.3	桩截面设计.....	87
4.4	桩帽设计.....	87
4.5	褥垫层设计.....	88
4.6	沉降计算.....	89
4.7	桩网路基稳定验算.....	89
5	刚性桩及桩网路基施工.....	92
5.1	一般规定.....	92
5.2	灌注桩施工.....	92
5.3	预制桩施工.....	93
5.4	桩帽施工.....	94
5.5	褥垫层铺设.....	94
附录 D	垫层和持力层弹簧系数及单桩水平抗力试验.....	95

1 总 则

本省软土地区大面积的刚性桩基础屡次出现沉降过大和路基开裂滑移等质量事故，然而桩基检测、单桩静载和复合荷载实验均满足设计要求。究其原因，因群桩效应大面积基础中桩侧摩阻无法向外传递，转化为桩间土竖向压力，增加桩间土变形，减小桩土相对位移，长桩中段因相对位移等零而出现零摩阻区，导致单桩承载力计算失真。另外，因软土约束弱软土路基中刚性桩的破坏形式为弯断而不是剪断，以桩体抗剪力作为抗滑力严重失真。

解决大面积基础的刚性桩设计问题和路基稳定验算中的桩体抗滑作用问题，正是本标准的编制目的。另外，在饱和黏土层中大面积施打挤土桩会产生强烈的挤土效应，常导致已施工的工程桩出现浮桩、斜桩和断桩现象，本标准对施工顺序和施工过程的工程桩位移监控作了规定。

2 术语与符号

2.1 术语

- 2.1.1** 当面状布桩达到 5 行和 5 列，可认为属于大面积基础。
- 2.1.5** 桩顶整体梁板结构和承台板结构为独立桩帽结构的扩展，规程中的刚性桩设计计算方法同样适用。
- 2.1.8** 由荷载实验得到的荷载与位移比值，本标准把该比值叫弹簧系数，包含了截面积对变形的影响。通过实测刚性桩路基中的桩顶荷载、桩顶位移和桩间土布桩多边形形心位移，可获得桩帽垫层弹簧系数。在路堤上通过模拟褥垫层的桩帽等截面平板载荷试验，也可以获得桩帽垫层弹簧系数。
- 2.1.9** 在单桩静载试验中，当桩侧阻力达到稳定的残余强度后，桩端荷载增量等于桩顶荷载增量，荷载增量与位移增量(扣除桩身压缩增量)比值作为桩端持力层弹簧系数。当工点附近有持力层露头，应由原位等截面载板实验获取位移曲线和持力层弹簧系数。
- 2.1.10** 地基系数定义为压力增量与位移增量的比值， $\text{弹簧系数} = \text{地基系数} \times \text{载板面积}$ 。垫层地基系数等于桩帽垫层弹簧系数除以桩帽面积，持力层地基系数等于桩端持力层弹簧系数除以桩端面积。
- 2.1.11** 原设计方法认为桩周侧阻有一个中性面，其上为负摩阻，其下为正摩阻。变形协调分析的计算结果显示，当桩长较大或持力层刚度较大时，桩的中段存在一个零摩阻区，而不是一个面，本标准把桩土相对位移等 0 的桩段定义为中性区。
- 2.1.12** 中性面是中性区的一个特例，即中性区宽度收缩为零。
- 2.1.14** 因获取使用年限对应的土层压缩模量比较困难，而且刚性桩复合层工后沉降很小，复合层工后沉降取最终残余沉降量。

3 基本规定

3.0.1 在大面积基础中的刚性桩，桩侧摩阻无法向远处传递扩散。侧摩阻在桩间土柱中产生竖向应力，土柱因压缩而减小桩土相对位移，从而降低了侧摩阻的发挥。直接按桩间土强度计算桩侧摩阻，未考虑侧摩阻与桩土相对位移的关系，会导致大面积基础的单桩侧摩阻计算值失真。计算结果显示，桩周不仅出现负摩阻区，还可能出现零摩阻区。摩阻力计算须确定侧摩阻分布，侧摩阻分布取决于桩土相对位移，桩土相对位移涉及桩顶和桩端的变形计算。以桩端桩土相对位移作为设计控制，一方面适应本标准的计算方法，另一方面也符合持力层临界位移的传统概念。

鉴于目前中微风化基岩持力层缺乏弹簧系数和桩土相对位移允许值等设计参数，嵌岩桩段设计暂采用简化计算。

3.0.2 路基工程不同于建筑物，工期沉降不影响其使用功能，但工后沉降有限制。路堤填料属于散粒体存在侧向土压力，无整体梁板结构时，路基稳定是设计的核心任务。本标准路基稳定验算采用弯断破坏模式，按弹性地基梁理论计算桩体水平抗力。在计算下滑力时进行桩土分离，把含桩单元的总重(含荷载)减去滑动面处的桩身轴力，再计算该单元滑面上的竖向压力及单元下滑力。

3.0.3 当桩网路基作为桥涵过渡段时，须考虑过渡段两端的工后沉降分别与桥台或涵洞基础及普通路基的沉降协调问题，尤其与普通软土路基搭接端的沉降协调问题，防止路面开裂和跳车等病害后移，使过渡段路基失去工程意义。

3.0.4 在饱和软土中大面积施打挤土桩，挤土效应将导致土体水平移动和竖向隆起，从而导致工程桩断桩、浮桩和移位现象。因在实际工程中造成多起质量事故，单列条文以强调挤土效应对工

程桩质量的威胁。通过观测工程桩的坐标高程来监控挤土效应，以防止桩基质量事故，指导桩基施工进度和施打顺序。

3.0.5 工程实践显示，软土厚度超过 15m、含水量高或有机质含量高时，搅拌桩和砂石桩难以保障质量。同时，随着人工费增长，搅拌桩和砂石桩总造价并不比静压预制桩便宜。

当软土较厚时，比如持力层埋深大于 25m，刚性桩桩网路基造价及养护成本总和可能超过桥梁。高填路堤刚性桩路基，比如填土高度大于 10m，计入边坡和排水沟占地成本及养护成本总费用也可能高于桥梁。

3.0.7 路基拓宽的新增填土荷载容易导致原路基下沉开裂，采用刚性桩，桩顶采用梁板结构，可以大幅降低软土路基的附加应力。

3.0.8 如果填土高度低于成拱高度，不仅严重影响路床碾压密度，而且会引起路面结构层开裂，并出现塌陷和鼓包现象。假定单桩分担面积 4.5m^2 ，桩帽宽度 1.2m，正方形布桩，土拱计算高度约 1.3m，拱壳厚度取 0.6m，总高约 2m。填高 $\leq 2.5\text{m}$ (不含面层) 不宜使用桩帽，若低填路基采用刚性桩，建议桩顶采用梁板结构。

3.0.9 本标准桩基设计计算和工后沉降计算需要土层侧限变形模量与压缩模量参数，本标准要求勘察报告同时提交土层的侧限压缩模量和侧限变形模量。土层侧限变形模量应由平板载荷试验确定，无原位试验资料时可根据工程经验按附录 B 确定。持力层参数可通过原位平板载荷试验或试桩确定，载板应与拟采用桩径同截面。

3.0.11 设计考虑地震荷载将显著增加刚性桩桩网路基造价，应根据道路临近工程重要性、危害后果及与道路类型等级相关规范标准的要求，来决定是否考虑地震荷载。

3.0.12 因持力层上软弱土层不能提供嵌固作用，不嵌岩工程桩容易上浮倾斜，嵌岩深度通常取 3 倍桩径。

3.0.15 地层侧阻力和桩端持力层弹簧系数变化范围大，宜根据原位试桩数据确定土层设计参数和修正刚性桩设计。

通过实际工程原位实测桩顶荷载、桩顶与桩间土相对位移具有重要的意义，可以收集桩帽垫层地基系数，判断桩网路基沉降构成，掌握桩顶桩土相对位移变化趋势及规律，以便进一步完善设计理论和设计参数。

4 刚性桩及桩网路基设计

4.1 一般规定

4.1.1 根据大面积的刚性桩基础特点,应用介质力学对称面剪应力为 0 原理,将空间问题简化为桩土棱柱体结构力学问题进行变形分析,并引入桩顶与褥垫层弹性约束关系、桩端与持力层弹性约束关系。通过变形分析计算桩土相对位移,由桩土相对位移确定桩周侧摩阻方向及零摩阻区。根据不同持力层力学性质,以桩端桩土相对位移作为刚性桩设计控制目标。刚性桩桩顶采用梁板结构,近似认为桩顶桩土相对位移等零。持力层为中微风化基岩刚性持力层,近似认为桩端桩土相对位移等零。

4.1.2 在路堤稳定验算时,荷载按土条位置对应的填土高度和活载分布分别确定,地震设防地区应考虑地震水平力。

4.1.3 为了防止桩帽刺破土工合成材料,桩帽桩土相对位移应严格限制,桩帽桩土相对位移的允许值基本对应于平板载荷试验位移曲线第一拐点。

建筑物总沉降会影响其使用功能,如倾斜和管道开裂等。路基则不同,限制工后沉降,但不限工期沉降。因桩端桩土相对位移有限,且绝大部分在工期完成,宜允许较大变形以充分发挥持力层承载力,桩端桩土相对位移允许值取桩径 0.02~0.05 倍,对应于深层平板载荷试验位移曲线第二拐点。基岩持力层桩端桩土相对位移允许值取临界位移的 1/3,基本相当于极限荷载 0.5 倍的位移。

桩端桩土相对位移允许值只是过渡性控制办法,发展方向是建立桩端持力层地基系数的非线性模型,以适应不同持力层的变

形特点和优化桩基设计。

4.1.5 中微风化基岩持力层的极限荷载试验十分少见，资料匮乏。基岩面处桩土相对位移近似为 0 即桩土等应变，岩层上土层按桩土刚度比分摊荷载，计算基岩面处桩身轴力。然后利用岩土勘察报告给出的持力层侧摩阻及端阻，按承载力法设计嵌岩桩段。

注意，混凝土应变很低，按桩土刚度比计算分摊荷载时，土层侧限变形模量取值必须与混凝土应变相对应。依据混凝土结构的压应变允许范围，本标准采用应变 2‰时土层的侧限变形模量。

4.1.8 为防止桥头跳车，美国公路纵向变坡率标准为 5‰，桥头沉降差超过 30mm 将出现明显跳车现象。台后路基工后沉降允许值取 30mm，当采用搭板时按搭板长度 5‰确定台后路基工后沉降允许值。刚性桩过渡段路基易于满足工后沉降要求，应关注与一般路基的沉降协调。过渡段与普通路基间的允许沉降差取 100mm，过渡段路基需要调节的沉降差为 $300-100-30=170\text{mm}$ ，按 5‰变坡率计算，过渡段最小长度为 34m，本标准取 35m。

4.1.9 厂房地坪、仓库及码头货场等基础对变形控制较低，大面积的刚性桩基础可能采用独立桩帽加褥垫层。对于变形控制要求较高的建筑物，刚性桩基础通常直接连接梁柱或梁板结构。

4.1.10 在软土中桩的水平抗力很低，通过铺设土工合成材料提高路基稳定性，降低成拱高度，是经济合理的选择。

4.2 桩长及桩距设计

4.2.1 持力层下存在软弱下卧层，工后沉降通常很难与基础穿透下卧层的毗邻构筑物协调。但部分小桥涵常采用浅基础，故适当放宽刚性桩的持力层限制，以满足工程的实际需要。

4.2.3 计算单桩分担面积初始值暂忽略桩间土的分摊荷载。在大面积基础刚性桩中，桩间土分担的荷载难以向路基外扩散，而是以负摩阻力形式返回桩体。另外，刚性桩与软土刚度相差悬殊，

通过中性区土体传递的竖向荷载十分有限。

在大面积分布荷载的刚性桩基础中，刚性桩直径(mm)通常为400、500和600，细长桩能充分利用持力层承载力，应根据经济技术合理性选择桩径与桩距。独立桩帽桩距通常在1.5m至3m之间，梁板和承台板结构桩距在2m至5m之间。

4.2.4 地层存在欠固结土，地面与垫层或桩顶结构可能脱空，桩土相对位移不连续，本标准采用简化处理：先把欠固结土及以上土层视为荷载，暂假设欠固结土层底面处桩土等应变，桩长暂取欠固结土以下长度，然后按附录A求解。

可液化土和湿陷性土同样处理。

4.2.6 持力层标高起伏不定，统一桩长难以迎合持力层的深度变化。当采用静压施工工艺时，如静压预制管桩和静压沉管灌注桩等，不宜采用统一施工桩长，应以压桩力为控制标准。在实际工程中静压桩的施工桩长与设计桩长常不一致，修编条文描述压桩力计算与设计桩长的关系更清晰。从静压桩工程实际出发，当持力层为中风化基岩、微风化基岩等刚性持力层时桩长优化意义不大，施工桩长往往直达持力层面。

在柔性持力层的压桩力计算中，相当于把土层侧摩阻的恢复值作为安全储备。在刚性持力层的压桩力计算中，基岩持力层的桩土相对位移很小土层侧摩阻难以有效发挥，端阻需要足够的安全储备，故增加了端阻安全系数。

4.2.7 中性区或中性面以上桩长对承载力无贡献，而进入持力层的长度则显著提高承载力。加桩长、减桩数，不仅节约造价，且降低挤土效应。

挤土桩间距约5倍桩径的饱和软土路基，出现过大部分工程桩丧失承载力现象，务必重视挤土效应引起的断桩和浮桩风险。

4.2.8 控制桩长调整过渡段路基刚度，是协调工后沉降的有效措施，但会降低过渡段路基普通路基一端的稳定性，应增加土工合成材料层数以满足稳定要求。

4.3 桩截面设计

4.3.2 大面积基础刚性桩的配筋量有限,且软土土体侧向约束较小,不考虑主筋竖向承载力,作为截面压弯的安全储备。

4.3.4 中性区为等应变区,可以按桩土刚度比计算桩身轴力,并取中性区内各土层侧限变形模量最小值进行计算。依据混凝土结构的压应变允许范围,桩间土压缩模量采用应变2%时侧限压缩模量。

4.3.5 当地层存在欠固结土(可液化土和湿陷性土相同),桩顶桩土相对位移不连续。从工程安全和计算简单可行出发,忽略地面处桩间土分摊的竖向荷载。同时,计算欠固结土及其上覆土层土柱重量和总侧摩阻力,取两者的小值作为欠固结引起的附加荷载。因为附加荷载既不会超过总侧摩阻力,也不会超过土柱重量。在计算桩身最大轴力时,持力层为中微风化基岩不考虑桩间土分摊荷载。

4.3.6 当采用静压桩时,虽然桩截面满足轴力设计要求,但可能不满足施工荷载需要。

4.3.8 由于机械台班、人工费和砂石料的造价占比不断攀升,增加水泥用量大幅提高桩截面承载力是合理选择。从经济性和挤土效应考虑,桩截面设计应遵循高强、小截面原则。

4.4 桩帽设计

4.4.1 从经济性设计桩帽面积,使桩顶桩土相对位移接近允许值。

4.4.2 桩帽面积的填土垫层承载力应与桩身截面承载力协调,桩帽与桩身面积比大致等于桩身混凝土抗压强度设计值与路堤垫层承载力特征值之比。桩帽面积过大不仅浪费,且放大偏压弯矩,容易引起桩帽与桩头开裂和脱离。

4.4.5 如果桩帽净间距与填土高度不匹配,路堤填土未能形成土

拱，可能导致路面结构层开裂或路面起伏。拱壳厚度取桩帽宽度一半，并把土工合成材料引起土拱高度的降低作为安全储备。

上式基于单拱模型，并假定拱壳截面法向压力在帽缘达到最大值。事实上，桩网路基上的土拱是变截面的(拱壳过渡到拱柱)，拱壳压力并不相等。另外，在土拱形成之前，桩土压力均大致等于填土荷载，这与自然土体中的掏土成拱也是不同的。所以土拱高度和土工合成材料上下压力的计算问题需要进一步研究。

桩网上的土拱由多组拱壳和拱柱组成，拱顶的最高点应在布桩多边形的形心上方，而不是桩连线的中心点上方。为了简化计算，计算土拱净跨度时直接扣减方形桩帽宽度(本应取土拱脊线投影与桩帽边缘的交线长度)，简化处理误差很小且偏安全。

4.4.7 为了简化计算，根据桩帽面积修正垫层地基系数，再按等截面桩土复合体进行变形分析。在验算桩帽和土工合成材料时，须使用桩帽及桩帽间土体实际分担的分布荷载 q_n 和 q_s 。

4.4.9 如果桩帽顶面标高不在同一平面，不仅影响土工合成材料受力性能，而且影响填土碾压密实度，同时不利于土拱的形成。

4.4.10 降低土工合成材料被刺破的风险。

4.4.11 从倒立的受力角度来看，桩帽相当于独立基础，刚性桩相当于立柱。但不同于高耸建筑物，路基桩帽无需向桩传递很大的拉力和弯矩。

4.5 褥垫层设计

4.5.2 为了防止土工合成材料被刺破或拉断，桩帽净间距必须与桩帽桩土相对位移协调。在计算拉伸率时假定土工合成材料呈抛物面，并把桩帽范围土工合成材料的拉伸量作为安全储备。

土工合成材料承受的分布荷载等于上面拱内土压力减去下面桩间土压力，两者均难以确定。本标准用土工合成材料拉伸率验算代替拉力验算，以避开土工合成材料上下土压力计算难题，这

也是计算桩顶桩土相对位移的主要目的。

4.5.3 以便增加沉降协调性,在土工合成材料之下垫层厚度越大桩帽刺入量也越大。

4.5.5 土工合成材料是提高路基稳定性的经济有效办法,当布桩已满足工后沉降要求仍需要提高抗滑稳定性,应优先考虑土工合成材料。土工合成材料不仅有效提高路基稳定性系数,而且有助于尽早形成土拱,利于路堤的填土密实度。在满足成拱条件下,土工合成材料层间距大利于发挥抗滑力,且增强约束圆弧滑动。加筋层分开,相当于拉杆分层,可增强约束作用。

4.5.6 多个工点出现过纵向铺设土工织物错误,考虑到施工企业现状,应加强土工合成材料的施工监理和验收工作。

4.6 沉降计算

4.6.1 通过桩顶和桩端的桩土相对位移计算,可以确定桩身轴力、桩帽分布荷载和桩帽垫层相对位移,为路基稳定验算、桩帽设计和土工合成材料拉伸率验算提供依据。

4.6.6 随着排水固结,桩间土压缩量将增大,桩顶和桩端的桩土相对位移也将相应加大,直至桩间软土固结完成。近似认为非饱和黏性土和砂性土变形在工期内完成,在计算此类土层的压缩量时总是使用压缩模量。

4.6.7 非软弱地层压缩量绝大部分在工期内完成,可不考虑工后沉降。相反,当持力层下存在软弱下卧层,下卧层压缩很难在工期内完成,残余压缩量较大,无法实现与桥涵基础的沉降协调,除非桥涵基础存在一样的软弱下卧层。

4.7 桩网路基稳定验算

4.7.2 在实际计算中,可根据算法稳定和精度需要划分土柱单元的横向宽度,相应调整纵向计算长度,使土柱单元截面积保持不

变。这属于算法技巧，不影响计算结果。

4.7.3 本标准把桩体抗滑作用分为两个方面：桩体分摊传递竖向荷载降低了桩间土体的下滑力；桩体本身存在的水平抗滑力。

因土工合成材料或梁板结构的拉伸率限制，桩体水平抗力难以发挥，而且桩体承担的水平力将传递给滑面下被动区桩间土体，在软土路基中刚性桩主要抗滑作用是传递竖向荷载，桩体本身的水平抗滑作用则十分有限。

4.7.4 因滑面软土层对桩体约束很弱，刚性桩弯断破坏的可能性远大于剪切破坏。离心机模拟试验也证明，在软土中刚性桩破坏形式为弯断。按桩体抗剪强度计算桩体抗滑力，脱离桩体的实际破坏形式，计算结果严重失真。

4.7.6 土条总重量 W 等于土层重量 W_S 、填土重量 W_L 与路面活荷载 W_P 之和，桩体轴力 $N_p(z)$ 等于桩顶荷载减去滑面深度 z 桩侧阻力总和，参见图 4.7.2。总重量 W 扣减滑面处桩体轴力 $N_p(z)$ 后等于土条净重 W_V (非挤土桩可扣减桩孔排出土重)：

$$\begin{aligned} W &= A \times q + (A - A_p) \int_0^z \gamma_s(z) dz \\ N_p(z) &= \sigma_p(0) \times A_p - \pi D \int_0^z f(z) dz \\ W_V &= W - N_p(z) \end{aligned}$$

其中 q 为土条上覆荷载，把 $A_q = \sigma_s(0)A_S + \sigma_p(0)A_P$ 代入得到下式：

$$W_V = \sigma_s(0)A_S + \pi D \int_0^z f(z) dz + A_s \int_0^z \gamma_s(z) dz$$

把上式定积分以数值求和表达，即可得到有桩单元有效重量的算式。

4.7.7 只有桩顶出现一定刺入变形，桩间土才会承担一定竖向荷载，从而产生一定水平滑动力。桩板结构路基不存在桩顶刺入，桩间土仅按桩土刚度比分摊上覆荷载，桩间土的附加竖向压力很小，几乎不产生侧向滑动力。但路堤填土为散粒体，内部会产生

侧向土压力，浸水会产生水压力，当地面摩擦不能平衡时梁板需要增加配筋。土压力与水压力不是叠加关系，考虑水压力就不再考虑土压力。

5 刚性桩及桩网路基施工

5.1 一般规定

5.1.4 当周边有浅基构筑物、道路、地下管线时,周边可挖隔振防挤沟,沟深应大于浅基或地下管线埋深,隔振防挤沟与周边构筑物净距不得小于 2.5m;当与煤气管线距离小于 3m 时,宜挖开并架空煤气管道;当周边有深基或桩基构筑物时,宜根据周边构筑物变形监测情况,必要时,在场地与临近构筑物之间(或在桩位上)预钻取土,一般深度为 1/3 桩长,以减小挤土效应;在淤泥土层中施工时,不仅应注意施工桩的质量,也要同时观察邻近桩的桩顶变化,可采取长螺旋钻孔取土、隔离沟等减压或跳打等措施。也可采取打砂井或塑料排水板措施,以消除超静孔隙水压力。

5.1.6 振动及锤击法施工产生的噪音污染严重,不宜在临近居民区采用,若采用时,建议在震动锤顶头安装消声装置。振动会对施工现场周围居民正常生活产生不良影响,导致扰民使施工无法正常进行,建议设有 50m 以上的隔离距离。

5.1.9 饱和软土地区大面积基础刚性桩出现质量问题主要有两个原因:其一、设计上忽略了大面积布桩导致桩侧摩阻实际作用的大幅降低;其二、施工上忽视了大面积施打挤土桩产生的挤土效应对工程桩质量的严重威胁。

5.2 灌注桩施工

I 一般规定

5.2.4 钢筋混凝土坍落度宜采用 80mm~100mm,素混凝土宜采

用 50mm~80mm，泵送或水下混凝土宜为 180mm~220mm。带振动头灌注混凝土坍落度宜取低值，后插筋混凝土宜取高值。

III 长螺旋钻孔压灌桩施工

5.2.12 对于在流塑淤泥土层成孔过程中有可能产生塌孔、缩颈、沉渣等地层，应采用带套管跟进的成孔机型，地下水位高时应采用压灌成桩工艺，采用压灌成桩工艺能充分增加桩的侧壁摩阻力和端承力。以摩擦为主的桩长 $\leq 25\text{m}$ （一次成桩 $\leq 15\text{m}$ ）情况特别合适，但对于可塑~硬塑（塑性指数 > 15 ）的黏性土分布地区或夹杂漂砾的地区使用要慎重。当需要穿越老黏土、厚层砂土、碎石土以及塑性指数大于 25 的黏土时，应进行试钻。

在淤泥土层中施工时，不仅应注意施工桩的质量，也要同时观察邻近桩的桩顶变化，可采取土、隔离沟等减压或跳打等措施来减少挤土效应的影响。

5.2.14 长螺旋钻孔、管内泵压混合料成桩施工在钻至设计深度后，应准确掌握提拔钻杆时间，混合料泵送量应与拔管速度相配合，遇到饱和砂土或饱和粉土层，不得停泵待料；沉管灌注成桩施工拔管速度应按匀速控制，拔管速度应控制在 1.2m~1.5m/min 左右，如遇淤泥或淤泥质土，拔管速度应适当放慢。

5.3 预制桩施工

I 一般规定

5.3.2 有抗水平力、抗拔力以及抗地震要求的工程建议使用符合有关规定的快速机械接头。

III 锤击沉桩

5.3.7 设置袋装砂井或塑料排水板。袋装砂井直径宜为 70mm~80mm，间距宜为 1.0m~1.5m，深度宜为 10m~12m；塑料排水

板的深度、间距与袋装砂井相同；

5.4 桩帽施工

I 基槽开挖

5.4.10 注意现场安装钢筋笼的钢筋要有足够的长度嵌入现场安装的桩帽钢筋笼内。预制的管桩没有截桩时，可以将桩帽钢筋按要求直接焊接在桩接头钢板上。

5.5 褥垫层铺设

I 垫层施工

5.5.4 垫层施工应根据不同的换填材料选择施工机械，粉质黏土、灰土宜采用平碾、振动碾或羊足碾，中小型工程也可采用蛙式夯、柴油夯。砂石等宜用振动碾。粉煤灰宜采用平碾、振动碾、平板振动器、蛙式夯。矿渣宜采用平板振动器或平碾，也可采用振动碾。桩间土的填充找平采用小型夯实机具夯实，褥垫层的填筑要防止损坏桩帽。

5.5.5 灰土应拌合均匀并应当日铺填夯压。灰土夯压密实后 3d 内不得受水浸泡。粉煤灰垫层铺填后宜当天压实，每层验收后应及时铺填上层或封层，防止干燥后松散起尘污染，同时应禁止车辆碾压通行。

附录 D 垫层和持力层弹簧系数及 单桩水平抗力试验

D.1 基本规定

D.1.2 以克服荷载偏压引起千斤顶实际顶力与油压表读数的误差。

D.3 持力层弹簧系数试验

D.3.1 散粒体持力层的力学性能受应力状态和含水量影响，试桩和工程桩的桩端持力层状态应基本一致。

D.3.9 混凝土极限压应变率约 3%，在试验荷载下桩体应变率不允许超过 2%。

D.3.10 当桩土相对位移大于一定值后，桩周侧摩阻将趋于稳定值即残余强度，此时荷载增量全部施加在持力层上。沉降曲线进入第一拐点后大部分桩段的侧摩阻达到残余强度，桩端压力增量等于荷载增量，桩周侧摩阻不再影响荷载增量与位移增量的比值。

D.4 单桩水平抗力试验

D.4.3 滑动面切过的桩体部位大部分位于软土层之中，需要排除硬壳层对桩体水平抗力的影响，以便测试到软土层的单桩水平抗力及桩土变形系数。

D.4.11 一旦试桩的水平位移出现成倍增加，很难满足相对稳定标准。为了节约试验时间，本标准缩短最后一级荷载的维持时间。