

团 体 标 准

T /CAGHP XX - XXXX

抗滑桩治理工程设计规范（试行）

Design specification for anti-sliding piles of improvement engineering

（报批稿）

XX-XX-XX发布

XX-XX-XX实施

中国地质灾害防治工程行业协会 发布

目 次

前言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
3.1	1
抗滑桩 anti-sliding pile	1
3.2	1
悬臂式抗滑桩 cantilever anti-sliding pile	1
3.3	1
锚拉桩 anti-sliding pile with anchors	1
3.4	1
钻孔灌注桩 bored pile	1
3.5	2
挖孔桩 manual digging pile	2
3.6	2
微型桩 mini pile	2
3.7	2
群桩 pile group	2
3.8	2
多排桩 multi-row pile	2
3.9	2
抗滑桩间距 spacing between anti-sliding piles	2
3.10	2
抗滑桩净间距 net spacing between anti-sliding piles	2
3.11	2
合理桩间距 proper pile spacing	2
3.12	2
抗滑桩锁口 locking wellhead	2
3.13	2
抗滑桩护壁 anti-sliding pile clapboard	2
3.14	2
滑桩锚固(嵌固)深度 embedded depth	3
3.15	3
滑坡推力 landslide thrust	3
3.16	3
滑坡推力曲线 landslide thrust curve	3
3.17	3
桩前滑体抗力 landslide resistance before piles	3
3.18	3
桩侧弹性抗力 pile-side elastic resistance	3
3.19	3

桩身内力	internal force of pile	3
3.20		3
地基系数	foundation coefficient	3
3.21		3
m 法	m method	3
3.22		3
K 法	K method	3
3.23		3
结构重要系数	coefficient for importance of a structure	3
4	基本规定	4
4.1	抗滑桩治理工程设计阶段	4
4.2	地质灾害防治工程分级	4
4.3	地质灾害荷载及强度标准	4
4.4	地质灾害防治工程计算工况与安全系数	5
4.5	抗滑桩类型及适用范围	6
4.6	勘察要求	6
4.7	稳定性评价方法	6
4.8	岩土体参数取值方法	6
4.9	抗滑桩桩位和桩参数	6
5	抗滑桩设计推力确定方法	7
6	抗滑桩结构内力计算方法与要求	8
6.1	抗滑桩结构设计重要系数	8
6.2	悬臂桩结构内力计算方法与要求	9
6.3	锚拉桩结构内力计算方法与要求	11
6.4	抗滑桩护壁荷载及内力计算	14
6.5	多排桩设计要求	14
6.6	微型组合抗滑桩群设计要求	14
7	抗滑桩结构设计	14
7.1	抗滑桩结构构造要求	15
7.2	抗滑桩承载力计算	16
7.3	锚索结构设计验算	19
8	抗滑桩施工、检测与监测要求	20
8.1	抗滑桩施工要求	20
8.2	抗滑桩检测	20
8.3	抗滑桩监测	20
9	设计成果	20
9.1	设计成果内容	20
9.2	设计成果要求	21
附录 A (资料性附录)	钢筋参数表	23
附录 B (资料性附录)	混凝土参数表	24
附录 C (资料性附录)	抗滑桩设计地基系数表 (K 法、m 法、抗压强度与地基系数)	25
附录 D (资料性附录)	滑坡稳定性评价和推力计算公式	27
附录 E (资料性附录)	地基系数法	31

附录 F (资料性附录)	锚拉桩计算方法.....	37
附录 G (资料性附录)	护壁内力计算方法.....	41
附录 H (资料性附录)	微型桩单桩计算公式.....	43
附录 I (规范性附录)	设计书主要章节.....	45
附录 J (规范性附录)	设计计算书主要格式.....	46
附录 K (资料性附录)	砂浆与岩土体粘结强度表.....	47

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准附录 I 和 J 为规范性附录，附录 A、B、C、D、E、F、G、H、K 为资料性附录。

本标准由中国地质灾害防治工程行业协会提出并归口。

本标准起草单位：中国地质大学（武汉）、中国地质科学院探矿工艺研究所、湖北省地质环境总站、中煤科工集团西安研究院有限公司、山东大学、武汉地质工程勘察院、三峡大学。

本标准主要起草人：唐辉明、胡新丽、邹安权、石胜伟、王志俭、彭进生、王全成、李长冬、杨栋、韩琨、方山耀、宁国民、王亮清、苏爱军、李术才、张乾青、傅静安。

本标准由中国地质灾害防治工程行业协会负责解释。

抗滑桩治理工程设计规范

1 范围

本标准规定了抗滑桩设计的技术要求，除应符合本规程外，还应遵循国家现行有关规范和标准的规定。

本标准适用于指导山体滑坡及不稳定斜坡等地质灾害治理工程中的抗滑桩设计。

2 规范性引用文件

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

GB 50007-2011	建筑地基基础设计规范
GB 50010-2010	混凝土结构设计规范
GB 50011-2010	建筑抗震设计规范
GB 50021-2001（2009 年版）	岩土工程勘察规范
GB 50330-2013	建筑边坡工程技术规范
GB/T 14370-2007	预应力筋用锚具、夹具和连接器
GB/T 32864-2016	滑坡防治工程勘查规范
DZ/T 0219-2006	滑坡防治工程设计与施工技术规范
TB 10025-2006	铁路路基支挡结构设计规范（2009 年局部修订）
CECS 22: 2005	岩土锚杆（索）技术规程
DL/T 5176-2003	水电工程预应力锚固设计规范
JTG D30-2004	公路路基设计规范
JGJ 94-2008	建筑桩基技术规范

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

抗滑桩 anti-sliding pile

穿过滑体进入滑动面以下一定深度，阻止滑体滑动的柱状构件。

3.2

悬臂式抗滑桩 cantilever anti-sliding pile

满足一定嵌固深度可视作悬臂结构，用以阻止滑体滑动的柱状构件。

3.3

锚拉桩 anti-sliding pile with anchors

3.4

钻孔灌注桩 bored pile

指使用机械在岩土层中成孔，现场浇注形成的钢筋混凝土柱状构件。

3.5

挖孔桩 manual digging pile

人工挖掘成孔的灌注桩。

3.6

微型桩 mini pile

一般指桩径小于 300mm，长细比大于 30 的钻孔灌注桩。

3.7

群桩 pile group

两根以上的桩组成共同承担荷载的桩组合。

3.8

多排桩 multi-row pile

布设在滑坡相同部位、共同阻滑的两排及以上的抗滑桩组合体。

3.9

抗滑桩间距 spacing between anti-sliding piles

两根相邻抗滑桩截面中心对截面中心的距离。

3.10

抗滑桩净间距 net spacing between anti-sliding piles

两根相邻抗滑桩邻近边的距离。

3.11

合理桩间距 proper pile spacing

在同一桩体后侧的局部区域内，相邻两桩的土拱会在此处形成三角形受压区，并保证该三角形受压区能正常发挥效应而不被破坏，桩间能形成稳定土拱，桩间土不会产生挤出的桩间距。

3.12

抗滑桩锁口 locking wellhead

为避免抗滑桩开挖过程中井口周边岩石落入、土体垮塌及地表水灌入井内，在井口设置的围护结构，一般采用钢筋混凝土材料。

3.13

抗滑桩护壁 anti-sliding pile clapboard

人工挖孔桩施工过程中使用钢筋混凝土等材料在孔壁做成的板状或筒状结构层，其作用为防止孔壁坍塌、局部阻水。

3.14

滑桩锚固（嵌固）深度 embedded depth

抗滑桩结构在滑面以下的埋置深度。

3. 15

滑坡推力 landslide thrust

滑坡体作用在支挡结构上的下滑力。

3. 16

滑坡推力曲线 landslide thrust curve

在滑坡主滑方向上各点计算所得的推力值所形成的曲线。

3. 17

桩前滑体抗力 landslide resistance before piles

指滑动面以上桩前滑体所能提供的阻滑力。

3. 18

桩侧弹性抗力 pile-side elastic resistance

抗滑桩结构发生向嵌固端围岩方向的变形引起的围岩对抗滑桩结构的约束反力。

3. 19

桩身内力 internal force of pile

在外力作用下，引起抗滑桩内部相互作用的力。包括抗滑桩桩身的弯矩和剪力。受荷段桩身内力应根据滑坡推力和阻力计算，嵌固段桩身内力根据滑面处的弯矩和剪力按地基弹性的抗力地基系数（ K ）概念计算。

3. 20

地基系数 foundation coefficient

表征土体表面在平面压力作用下产生的可压缩性的大小。采用刚性承载板进行静压平板载荷试验获得的应力—位移曲线综合确定，单位：MPa/m。地基系数与滑床岩体性质相关，主要包括两种取值方法 K 法和 m 法。

3. 21

m 法 m method

地基系数随深度呈线性增加的抗滑桩内力确定方法。

3. 22

K 法 K method

地基系数为常数的抗滑桩内力确定方法。

3. 23

结构重要系数 coefficient for importance of a structure

指对不同安全等级的结构，为使其具有规定的可靠度而采用的系数。可依据工程类型依据相关规范取用。

4 基本规定

4.1 抗滑桩治理工程设计阶段

4.1.1 抗滑桩治理工程设计分为可行性方案论证和施工图设计阶段。前者为抗滑桩治理工程与其他治理工程进行技术和经济合理性比较的阶段。后者为治理工程确定采用抗滑桩形式，为保证工程施工顺利进行的设计工作阶段。

4.1.2 两个设计阶段均需在已审定批复工程地质勘察报告的基础上进行设计。

4.2 地质灾害防治工程分级

4.2.1 以危害对象、危害人数及经济损失程度为依据将地质灾害防治工程分为三级，见表1。

表1 地质灾害防治工程分级表

级 别		I	II	III
危害对象		县级和县级以上城市、国防和生命工程	主要集镇，或大型工矿企业、重要桥梁、国道专项设施等	一般集镇，县级或中型工矿企业，省道及一般专项设施等
危害人数 (人)		>1 000	1 000~500	<500
经济 损 失	直接经济损失 (万元)	>1 000	1 000~500	<500
	潜在经济损失 (万元)	>10 000	10 000~5 000	<5 000

4.2.2 工程等级确定应同时满足表1中危害对象、危害人数和经济损失三项指标中的二项。

4.2.3 确定滑坡等级时应考虑滑坡可能引发的次生灾害的影响。

4.2.4 因特殊情况需要进行等级增减的，需要经过专门论证与批准。

4.3 地质灾害荷载及强度标准

4.3.1 荷载

- 滑体自重；
- 滑体上建（构）筑物附加荷载；
- 地下水产生的荷载，包括静水压力和渗透压力等；
- 地表水产生的荷载；
- 地震；
- 其他，如物料和交通工具引起的活荷载等。

4.3.2 地质灾害防治工程暴雨和地震荷载强度取值标准参见表2。荷载强度标准：

- 暴雨强度按10~100（年）的重现期计；
- 地震荷载按50~100（年）超越概率为10%的地震加速度计。

表2 地质灾害防治工程荷载强度标准表

级别	暴雨强度重现期/a	地震荷载（年超越概率10%）
----	-----------	----------------

	设 计	校 核	设 计	校 核
I	50	100	50	100
II	20	50		50
III	10	20		

4.4 地质灾害防治工程计算工况与安全系数

4.4.1 地质灾害防治工程计算工况

- a) 设计工况
工况 I, 自重;
工况 II, 自重+地下水;
- b) 校核工况
工况 III, 自重+暴雨+地下水;
工况 IV, 自重+地震+地下水;

4.4.2 地质灾害防治工程设计安全系数

- a) 抗滑安全系数
 - 1) 设计工况安全系数
工况 I, 自重, $K_s=1.15\sim1.4$;
工况 II, 自重+地下水, $K_s=1.1\sim1.3$ 。
 - 2) 校核工况安全系数
工况 III, 自重+暴雨+地下水, $K_s=1.02\sim1.15$;
工况 IV, 自重+地震+地下水, $K_s=1.02\sim1.15$ 。
- h) 抗剪断安全系数
当采用微型桩加固滑坡时, 应采用抗剪断安全系数进行设计。
 - 1) 设计工况安全系数
工况 I, 自重, $K_s=2.0\sim2.5$;
工况 II, 自重+地下水, $K_s=1.7\sim2.2$ 。
 - 2) 校核工况安全系数
工况 III, 自重+暴雨+地下水, $K_s=1.2\sim1.5$;
工况 IV, 自重+地震+地下水, $K_s=1.2\sim1.5$ 。
- i) 地质灾害防治工程设计, 应根据其工程级别进行安全系数取值, 即 I 级防治工程的安全系数取高值, III 级防治工程的安全系数取低值。
- j) 地质灾害防治工程设计, 可依据防治工程类别进行安全系数取值, 即主体防治工程安全系数可取高值, 附属或临时防治工程安全系数可相应降低。
- k) 地质灾害防治工程设计安全系数取值推荐见表 3。

表3 地质灾害防治工程设计安全系数推荐表

工程级别与工程安全系数取值	I 级防治工程				II 级防治工程				III 级防治工程			
	设 计		校 核		设 计		校 核		设 计		校 核	
	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV
抗滑动	1.3	1.2	1.10	1.10	1.25	1.15	1.05	1.05	1.15	1.10	1.02	1.02
	∩	∩	∩	∩	∩	∩	∩	∩	∩	∩	∩	∩
	1.4	1.3	1.15	1.15	1.30	1.30	1.10	1.10	1.20	1.20	1.05	1.05
抗剪断	2.2	1.9	1.40	1.40	2.1	1.8	1.30	1.30	2.0	1.7	1.20	1.20

	∫ 2.5	∫ 2.2	∫ 1.50	∫ 1.50	∫ 2.4	∫ 2.1	∫ 1.40	∫ 1.40	∫ 2.3	∫ 2.0	∫ 1.30	∫ 1.30
--	----------	----------	-----------	-----------	----------	----------	-----------	-----------	----------	----------	-----------	-----------

注1：工况I—自重；

注2：工况II—自重+地下水；

注3：工况III—自重+暴雨+地下水；

注4：工况IV—自重+地震+地下水。

4.5 抗滑桩类型及适用范围

4.5.1 抗滑桩主要适用于滑坡治理和斜坡加固。

4.5.2 常用抗滑桩类型按受力方式分为悬臂抗滑桩、锚拉桩、微型组合抗滑桩群和多排桩。按截面形态可分为矩形抗滑桩和圆形抗滑桩。

4.5.3 悬臂抗滑桩适用于一般滑坡治理，当悬臂抗滑桩设计弯矩过大，或桩顶位移超过容许位移时，可采用锚拉桩或多排桩。

4.5.4 采用悬臂抗滑桩、锚拉桩对滑坡进行分段阻滑时，每段宜以单排布置为主。

4.5.5 于滑体厚度较薄、推力较小的滑坡，当不宜进行大截面抗滑桩开挖施工时，可选择微型桩。

4.5.6 对于在下述条件设置锚拉桩时，应进行专门的论证：

- a) 水位以下及水位变动区；
- b) 滑体土为欠固结土或对锚索可能产生横向荷载的地区；
- c) 对锚索具有腐蚀性环境的地区。

4.6 勘查要求

4.6.1 抗滑桩治理工程勘查应提供滑（斜）坡区的工程地质平面图、剖面图。勘探线应保证最少一纵（主滑线方向）一横剖面（工程布置断面）。

4.6.2 抗滑桩治理工程勘查应提供滑（斜）坡评价地质模型。

4.6.3 抗滑桩治理工程勘查应提供滑体、软弱面和滑动面（带）、滑床的岩土体物理力学性质参数。

4.6.4 抗滑桩治理工程勘查应提供降水、地表水与地下水相关参数。

4.6.5 抗滑桩治理工程施工期间发现地质勘查报告不符合实际情况时，应进行补充地质勘查工作，提交补充地质勘查报告，内容应符合有关规范和设计要求。

4.6.6 未尽事宜按 GB/T 32864-2016 执行。

4.7 稳定性评价方法

4.7.1 滑（斜）坡稳定性评价至少进行一条纵剖面计算。

4.7.2 滑（斜）坡稳定性计算方法应根据岩土类型、滑坡形态和可能的破坏形式，选择适宜的计算方法。

4.7.3 对变形破坏机制复杂的滑（斜）坡，宜结合数值分析法进行评价。

4.7.4 除验算整体稳定性外，尚应验算局部稳定性。

4.8 岩土体参数取值方法

4.8.1 计算参数宜根据测试结果、反演和当地经验综合确定。

4.8.2 滑坡岩土体力学参数反演可采用基于刚体极限平衡理论的公式和数值方法。

4.8.3 岩体结构面的抗剪强度宜根据试验确定。无条件进行试验时，可采用经验值和反算分析等方法综合确定。

4.8.4 地基土水平抗力系数的比例系数 m 和地基弹性抗力系数 K 取值可参考附录 C 选用。

4.9 抗滑桩桩位和桩参数

4.9.1 4.9.1 抗滑桩的平面布置、桩间距、桩长和桩身截面尺寸等应根据滑（斜）坡推力大小、地层性质、滑面形态和坡度、锚固段岩土体的横向承载力特征值、滑体厚度及施工条件等因素综合确定。

4.9.2 4.9.2 抗滑桩一般应布设在滑（斜）坡中前部的阻滑段，根据滑（斜）坡的地层性质、滑（斜）坡推力大小、滑动面坡度、滑体厚度和施工条件等因素综合考虑确定，有重要保护对象或施工条件制约可适当调整。

4.9.3 4.9.3 抗滑桩沿横剖面布置方向宜与滑动方向垂直。

4.9.4 4.9.4 桩间距宜为 3~8 m，并应根据桩径及推力进行验算，避免桩间土挤出。当滑体完整、密实或滑（斜）坡推力较小时，抗滑桩间距可取大值；反之，可取小值。滑（斜）坡主轴附近抗滑桩间距可取小值，两侧桩间距可取大值。

4.9.5 4.9.5 抗滑桩桩长一般不宜大于 35 m。对于滑带埋深大于 25 m 的滑坡，采用抗滑桩阻滑时，应充分论证其可行性。

4.9.6 4.9.6 抗滑桩嵌固段须嵌入滑床中，嵌入段长度根据验算确定。滑带以下岩土体的侧向压应力不得大于该岩土体的容许侧向抗压强度。坚硬岩石嵌岩深度应结合桩长进行桩型优化设计。对于土层或软弱岩层，抗滑桩嵌固段长度宜为桩长的 1/2~1/3；对于较完整、坚硬岩层，抗滑桩嵌固段长度宜为桩长的 1/3~1/4。

4.9.7 4.9.7 抗滑桩截面形状以矩形为主，截面宽度一般为 1.5~2.5 m，截面高度一般为 2.0~4.0 m。采用人工挖孔施工时，抗滑桩最小边宽度不宜小于 1.25 m。

4.9.8 抗滑桩的计算宽度 B_p 按照式（1）和式（2）取值。

矩形抗滑桩

$$B_p = K_f \cdot K_B \cdot b = 1.0 \times \left(1 + \frac{1}{b}\right) b = b + 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

圆形抗滑桩

$$B_p = K_f \cdot K_B \cdot b = 0.9 \times \left(1 + \frac{1}{b}\right) b = 0.9(b + 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

b ——为矩形桩的截面宽度（m）；

d ——为圆形桩的截面直径（m）；

K_f ——为形状换算系数，对于矩形桩 $K_f = 1.0$ ，对于圆形桩 $K_f = 0.9$ ；

K_B ——为受力换算系数，矩形桩宽度 $b \geq 1\text{m}$ 时， $K_B = 1 + 1/b$ ，圆形桩 $d \geq 1\text{m}$ 时， $K_B = 1 + 1/d$ 。

4.9.9 抗滑桩应嵌固在滑动面以下的稳定岩（土）体中，保证滑坡体不越过桩顶或从桩间挤出，不产生新的深层滑动。

4.9.10 当桩前临空时，为防止桩间土挤出，可在桩间设挡土板或挡土墙。

4.9.11 可在抗滑桩之间采用连系梁联接增强抗滑桩整体性，抗滑桩桩顶嵌入连系梁内的长度不小于 50 mm。桩顶纵向主筋应锚入连系梁内，其锚入长度不宜小于 35 倍纵向主筋直径。

5 抗滑桩设计推力确定方法

5.1 作用于抗滑桩的外力应计算滑坡推力（包括活荷载引起的滑坡推力）、桩后主动土压力、桩前土体抗力（指滑面以上土体对抗滑桩的反力）及锚固地层的抗力。可不计桩侧土的摩擦力、桩身自重及桩底反力。

5.2 抗滑桩所受推力应按设桩处的滑坡推力确定。滑坡推力应按滑坡类型、滑面形态选用相应的推力计算方法（见附录 D）。

a) 对于滑动面为单一平面或圆弧形的堆积层（包括土质）滑坡，可用瑞典条分法等进行稳定性评价，可用毕肖普法（Bishop）等方法进行校核。

1) 对于滑动面为折线形的堆积层（包括土质）滑坡，用传递系数法进行推力计算。对于岩质滑坡，用平面极限平衡法进行稳定性评价和推力计算。

5.3 抗滑桩所受推力可根据滑坡的物质结构和变形滑移特性，按三角形、矩形或梯形分布考虑。

5.4 5.4 抗滑桩桩后主动土压力（Ea）应按公式（3）、（5）、（7）进行计算。当 KEa 大于滑坡剩余下滑力的时候，滑坡推力取 KEa，K 为安全系数。

a) 岩土体为无粘性土时

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_a \dots\dots\dots (3)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_p \dots\dots\dots (4)$$

$$K_a = \tan^2(45 - \varphi / 2) \dots\dots\dots (5)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \varphi / 2) \dots\dots\dots (6)$$

m) 岩土体为粘性土时

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_a - 2ch_1 \sqrt{K_a} + \frac{2c^2}{\gamma} \dots\dots\dots (7)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_p + 2ch_1 K_p \dots\dots\dots (8)$$

K_a、K_p——分别为主动土压力系数、被动土压力系数。
c——岩土体的粘聚力（kPa）。

5.5 抗滑桩桩前土压力应按公式（4）、（6）、（8）进行计算。桩前抗力（P）可由极限平衡时滑坡推力曲线（图1）或桩前被动土压力确定，设计时选用小值。

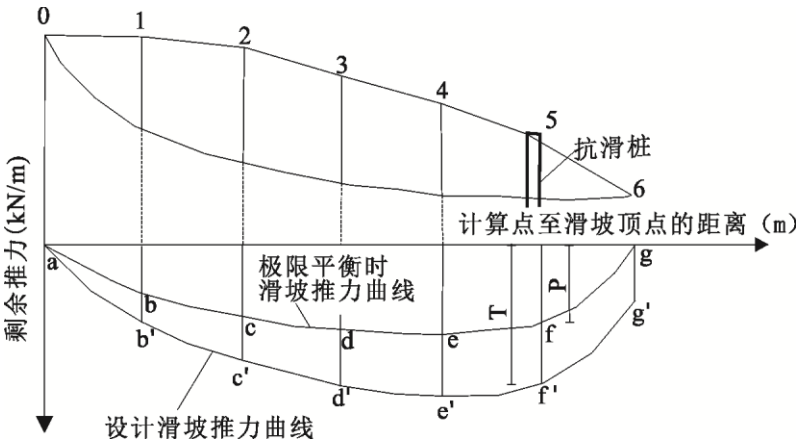


图1 滑坡推力曲线

（T—桩上滑坡推力（kN/m）；P—桩前滑体抗力（kN/m））

5.6 桩前土体稳定性不满足要求时，应不考虑桩前抗力。

6 抗滑桩结构内力计算方法与要求

6.1 抗滑桩结构设计重要系数

6.1.1 结构设计重要系数不应小于 1.0，I 级防治工程取 1.1，II、III 级防治工程取 1.0。

6.2 悬臂桩结构内力计算方法与要求

6.2.1 抗滑桩锚固段地层为土层或软弱破碎岩体时，抗滑桩桩端可视为自由端；抗滑桩锚固段地层完整、嵌入较浅时，抗滑桩桩端可视为铰支端。抗滑桩结构设计时，桩底支承一般为自由端或铰支端。

6.2.2 滑动面处及滑动面以上段的桩身内力，根据滑坡设计推力和桩前抗力，按悬臂梁计算。

6.2.3 水平地基系数为常数时，采用“K”法，按附录 E.1 计算抗滑桩锚固段内力及位移。

6.2.4 水平地基系数随深度线性变化时，采用“m”法，按附录 E.2 计算抗滑桩锚固段内力及位移。

6.2.5 当满足公式（9）或公式（11）时，可视为刚性桩，按附录 E.3 计算抗滑桩锚固段内力及位移。

$$\beta h_2 \leq 1 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{KB_p}{4EI}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\alpha h_2 \leq 2.5 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mB_p}{EI}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

β ——当锚固段水平地基系数为常数 K 时，桩的变形系数（ m^{-1} ）；

K ——水平地基系数（ kN/m^3 ）；

α ——当锚固段水平地基系数为线性变化时，桩的变形系数（ m^{-1} ）；

m ——水平地基系数的比例系数（ kN/m^4 ）；

h_2 ——滑动面以下的桩长（ m ）；

B_p ——桩的计算宽度（ m ）；

EI ——桩身抗弯刚度（ $kN \cdot m^2$ ）；对于钢筋混凝土桩， $I=0.85E_cI_0$ ，其中 E_c 为混凝土弹性模量， I_0 为桩身换算截面惯性矩。

圆形截面 I_0 按公式（13）计算：

$$I_0 = W_0 d_0 / 2, \quad W_0 = \frac{\pi d}{32} [d^2 + 2(\alpha_E - 1)\rho_g d_0^2]; \quad \dots\dots\dots (13)$$

矩形截面 I_0 按公式（14）计算：

$$I_0 = W_0 b_0 / 2, \quad W_0 = \frac{b}{6} [b^2 + 2(\alpha_E - 1)\rho_g b_0^2]。 \quad \dots\dots\dots (14)$$

其中：

d ——桩直径（ m ）；

d_0 ——扣除保护层的桩直径（ m ）；

b ——矩形桩宽度（ m ），

b_0 ——扣除保护层的桩截面宽度（ m ）；

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

ρ_g ——桩身配筋率。

6.2.6 锚固段桩周岩土侧向应力按附录 E.1、附录 E.2 和附录 E.3 计算。

6.2.7 锚固段地层为岩层时，桩周岩土侧向应力最大值 σ_{max} 应小于或等于地基的水平向容许承载力。地基的水平向容许承载力可按式（15）计算：

$$[\sigma_H] = K_H \eta R_c \dots\dots\dots (15)$$

式中:

K_H ——在水平方向的换算系数, 根据岩石的完整程度、层理或片理产状、层间的胶结物与胶结程度、节理裂隙的密度和充填物, 可采用 0.5~1.0;

η ——折减系数, 根据岩层的裂隙、风化及软化程度, 可采用 0.3~0.45;

R_c ——岩石饱和单轴抗压极限强度 (kPa)。

6.2.8 锚固段地层为土层或风化成土、砂砾状岩层时, 滑动面以下的桩周岩土侧向应力最大值应小于或等于地基的水平向容许承载力, 地基水平向容许承载力计算应符合以下规定:

a) 当滑动面纵向坡度较小时, 地基 y 点的水平向容许承载力可按式 (16) 计算:

$$[\sigma_H] = \frac{4}{\cos \varphi} [(\gamma_1 h_1 + \gamma_2 y) \tan \varphi + c] \dots\dots\dots (16)$$

式中:

$[\sigma_H]$ ——地基的水平向容许承载力 (kPa);

γ_1 ——滑动面以上岩土体的重度 (kN/m³);

γ_2 ——滑动面以下岩土体的重度 (kN/m³);

φ ——滑动面以下岩土体的内摩擦角 (°);

c ——滑动面以下岩土体的粘聚力 (kPa);

h_1 ——抗滑桩受荷段长度 (m);

y ——滑动面至锚固段上计算点的距离 (m)。

n) 当滑动面纵向坡度 i 较大且 $i \leq \phi_d$ 时, 地基 y 点的水平向容许承载力可按式 (17) 计算:

$$[\sigma_H] = 4(\gamma_1 h_1 + \gamma_2 y) \frac{\cos^2 i \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi_d}}{\cos^2 \phi_d} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

ϕ_d ——滑动面以下土体的综合内摩擦角 (°)。

6.2.9 抗滑桩锚固段桩身变形和转角按附录E.1、附录E.2和附录E.3确定, 悬臂段水平位移 x_y 与转角 φ_y 按下列公式计算:

$$x_y = x_0 - \varphi_0(h_1 - y) + \frac{e_1}{EI} \left(\frac{h_1^4}{8} - \frac{h_1^3}{6} + \frac{y^4}{24} \right) + \frac{e_2}{EI h_1} \left(\frac{h_1^5}{30} - \frac{h_1^4 y}{24} + \frac{y^5}{120} \right) \dots\dots\dots (18)$$

$$\varphi_y = \varphi_0 - \frac{e_1}{6EI} (h_1^3 - y^3) - \frac{e_2}{24EI h_1} (h_1^4 - y^4) \dots\dots\dots (19)$$

式中:

x_0 ——滑动面处的初始水平位移 (m); 按附录E.1、附录E.2确定;

φ ——滑动面处的初始转角 (rad); 按附录E.1、附录E.2确定;

h_1 ——抗滑桩受荷段长度 (m);

e_1 、 e_2 ——抗滑桩荷载分布图形参数 (kN/m); 荷载分布为三角形时 $e_1=0$, 荷载分布为矩形时, $e_2=0$; 见图 2;

y ——滑动面以上某点与桩顶的距离 (m)。

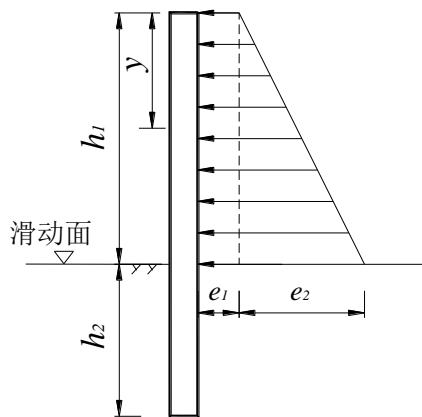


图2 抗滑桩荷载分布图

6.3 锚拉桩结构内力计算方法与要求

6.3.1 一般规定

- a) 当悬臂抗滑桩截面及桩间距无法满足设计弯矩要求时，宜采用锚拉桩。
- o) 锚拉桩内力可采用强度控制方法，对于变形控制要求较高的锚拉桩工程应使用变形控制方法。

6.3.2 桩锚设计内容

桩锚设计应包括下列内容：

- a) 侧向滑动推力计算；
- b) 桩锚结构内力计算；
- c) 桩嵌入深度计算；
- d) 锚索计算和混凝土结构局部承压强度计算；
- e) 变形控制设计。

6.3.3 设计计算

锚拉桩宜按超静定体系分析。据桩和锚索变形协调条件，采用结构力学方法计算锚索分担的载荷，并分项进行锚索和桩体设计（附录 F）。

6.3.4 锚索锚固力确定

- a) 预应力锚索设置应保证达到所设计的锁定锚固力要求，避免由于钢绞线松弛而失效。
- p) 锚索锚固力 P 必须小于 P_1 , P_2 , P_3 和 P_4 的条件，其中 P_1 为锚索设计承载力， P_2 为锚索同砂浆的握裹力， P_3 为砂浆同孔壁的摩阻力， P_4 为锚固段岩体倒圆锥形的稳定力。

锚索设计承载力 P_1 的计算公式：

$$P_1 = nS[\sigma] \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中：

n ——锚索钢绞线的根数（根）；
 S ——每根钢绞线的计算面积（ m^2 ）；
 $[\sigma]$ ——钢绞线的设计抗拉强度（ kPa ）。

锚索同砂浆的握裹力 P_2 的计算公式：

$$P_2 = \pi d_c L_e \tau_2 \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中：

d_c ——锚索的等效直径（ m ）；

L_e ——锚索的有效锚固长度 (m);

τ_2 ——钢绞线与砂浆之间的粘结强度 (kPa), $\tau_2=K_1R$, R 为砂浆的极限抗压强度, 系数 K_1 取值 0.5~0.55。

砂浆同孔壁的摩阻力 P_3 的计算公式:

$$P_3 = \pi D L_e \tau_3 \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

D ——锚索孔的直径 (m);

τ_3 ——砂浆与孔壁岩土之间的粘结强度 (kPa)。

锚固段岩体的稳定力 P_4 的计算公式中, 按柯因假定进行计算, 以锚固段底端为顶点, 扩散角为 90° 的圆锥体的抗拔力:

$$P_4 = \frac{1}{3} \pi r^2 h_{yz} \rho K_2 + \pi r c \frac{h_{yz} K_2}{\cos 45^\circ} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

r ——扩散角上边同滑面的交点至锚索中心线的垂直距离 (m),

h_{yz} ——倒圆锥体的高度 (m);

ρ ——岩土体容重 (kN/m³);

c ——岩土体的粘聚力 (kPa);

K_2 ——系数, 取值 0.4~0.7。

q) 预应力锚索设计时, 应进行拉拔试验, 校核内锚固段长度、握裹力设计数值。

6.3.5 锚拉桩内力计算

a) 单排锚索锚拉桩桩身内力计算

在确定满足强度验算要求的条件下, 根据附录 F 中 (F.11) 式计算出锚索拉力 T_A , 将其视为外力作用在桩顶, 滑坡推力按分布力考虑, 桩前滑面以上岩土体抗力按主动土压力计算, 即可计算出桩身内力。

滑面以上桩自由段采用结构静力学求解计算。

滑面以下桩身内力及侧应力计算时, 将荷载移至滑面处, 求出 Q_0 和 M_0 (其中 Q_0 为抗滑桩于滑面处所受剪力; M_0 为抗滑桩于滑面处所受弯矩):

$$\begin{cases} Q_0 = E' - T_A - E_a \\ M_0 = E' L_0 - T_A h_1 - \frac{1}{3} E_a h_t \end{cases} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

E' ——设桩处滑坡推力 (kN);

E_a ——作用在抗滑桩上的主动土压力 (kN);

h_1 ——抗滑桩受荷段长度 (m); 受荷段指抗滑桩位于滑面以上的部分;

h_t ——桩前滑面以上的滑体厚度 (m);

L_0 ——设桩处滑坡推力合力作用点距离滑面的距离 (m)。

后续即可按 6.2 一般悬臂抗滑桩的方法求解桩身弯矩、剪力、侧应力和位移, 采用与悬臂抗滑桩相同的方法进行桩体设计。

b) 多排锚索锚拉桩桩身内力计算

多根锚索的锚拉桩内力计算参照附录 F 中的 F.2。据公式 (F.21) 可得到锚索拉力, 进行各根锚索的设计, 后续抗滑桩的设计与悬臂抗滑桩相同。

r) 锚固段桩周岩土体侧向应力

锚拉桩锚固段桩周岩土体侧向应力计算与悬臂抗滑桩相同。

6.3.6 桩锚结构变形（挠度）计算

a) 弹性桩模式桩顶位移计算

桩顶位移可由第 $n-1$ 个和第 n 个锚索点的位移推算求得。其基本假定是从第 $n-1$ 个锚索点至桩顶的有限范围内的桩身位移曲线可进行分段取直处理（见图 3）。根据几何学的方法可求得桩顶的位移（式（25））：

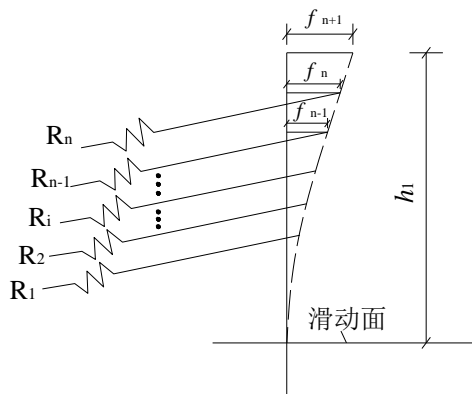


图3 桩顶位移求解示意图

$$f_{n+1} = f_{n-1} + \frac{h_1 - L_{n-1}}{L_n - L_{n-1}}(f_n - f_{n-1}) \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中：

L_{n-1} ——第 $n-1$ 排锚索距离滑动面的距离（m）；

L_n ——第 n 排锚索距离滑动面的距离（m）；

f_{n-1} ——第 $n-1$ 排锚索的水平位移（m）；

f_n ——第 n 排锚索的水平位移（m）；

f_{n+1} ——第 $n+1$ 排锚索的水平位移（m）。

按照桩顶位移控制标准进行校核，当位移值不能满足要求时，调整锚索预应力值和设计值，重新计算直到满足要求为止。

b) 刚性桩模式桩顶位移计算

桩顶位移可由式（26）计算：

$$f_{n+1} = (x_0 + h_1) \cdot \varphi \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中：

x_0 ——桩体围绕旋转的中心轴距滑动面的距离（m）；

φ ——桩体绕旋转中心旋转的角度（rad）。

6.3.7 锚索张拉锁定

锚拉桩施工宜先进行抗滑桩施工，再进行锚索施工。锚拉桩桩体施工时，应预先埋设锚索通道。

预应力锚索的张拉与锁定应符合下列规定：

- 锚索张拉宜在锚固体强度大于 20MPa 并达到设计强度的 80% 后进行；
- 锚索张拉顺序应避免相近锚索相互影响；
- 锚索张拉控制应力不宜超过 0.65 倍钢绞线的强度标准值；
- 锚索进行正式张拉之前，应取 0.10~0.20 倍锚索轴向拉力值，对锚索预张拉 1~2 次，使其各部位的接触紧密和杆体完全平直；
- 宜进行锚索设计预应力值 1.05~1.10 倍的超张拉。

6.3.8 预应力锚索极限承载力确定

预应力锚索极限承载力是指加荷至锚索锚固段出现破坏时的荷载，锚索破坏标准为：

- a) 锚头位移不收敛；
- b) 锚头总位移超过设计允许值；
- c) 后一级荷载作用下锚头位移增量达到或超过前一级荷载作用下锚头位移增量的 2 倍；

预应力锚索极限承载力基本值取破坏荷载前一级的荷载值。在最大试验荷载作用下未达到上述三条破坏标准时，预应力锚索极限承载力取最大荷载值为基本值。

6.4 抗滑桩护壁荷载及内力计算

6.4.1 护壁侧压力计算

护壁侧压力一般根据库伦主动土压力公式进行计算（附录 G.1）。

6.4.2 护壁结构内力计算

按板结构来进行护壁结构内力计算。

护壁内力计算方法见附录 G.2。

6.5 多排桩设计要求

6.5.1 对于滑坡推力较大、滑面埋深较深的滑坡，单排抗滑桩无法满足要求时，可以考虑使用多排桩进行支挡。

6.5.2 多排桩宜在桩间设置连系梁，使连系梁与桩顶形成刚性节点，内力计算采用平面刚架结构模型。

6.5.3 多排桩排距宜取 $2 \sim 4h$ （ h 为桩的截面高度； d 为桩径）。连系梁宽度不小于 h （ d ），高度不小于 $0.8h$ （ d ），连系梁高度与多排桩排距比值宜取 $1/6 \sim 1/3$ 。

6.5.4 排桩与连系梁节点处，桩的受拉钢筋与刚架梁的受拉钢筋的搭接长度不应小于受拉钢筋锚固长度的 1.5 倍，其节点构造应符合现行国家标准 GB 50010-2010 对框架顶层端节点的有关规定。

6.5.5 多排桩设计可采用数值方法进行验算。

6.6 微型组合抗滑桩群设计要求

6.6.1 本规定适用于直径 $\phi 100 \sim 300\text{mm}$ 微型桩的组合抗滑桩群设计。

6.6.2 其它规定参照人工挖孔矩形抗滑桩。

6.6.3 微型桩群设计应包括：平面布置、剖面布置、微型桩群和单个微型桩承受的滑坡推力、微型桩内力、微型桩单体结构、微型桩群连系梁和构造设计。

6.6.4 微型桩变形及内力计算推荐采用弹性分析法。对于较完整的岩质滑坡，计算微型桩内力时，可假定作用于微型桩群的水平推力均匀分布于各排微型桩上；对于其他滑坡，各排微型桩所承担推力的比值可通过地区经验、试验及数值分析确定。

6.6.5 微型组合桩群设计应据防治工程的等级，按表 3 推荐的抗剪断设计安全系数取值，并采用数值模拟方法进行整体稳定性验算。

6.6.6 微型桩桩位宜设在滑坡体较薄、嵌固段地层强度较高的地段，桩前不宜完全临空。

6.6.7 微型组合桩群平面布置以“品”字型（俗称梅花形）为宜，桩顶宜用连系梁连接。

6.6.8 微型桩的桩径宜为 $100 \sim 300\text{mm}$ ，长度一般不超过 30m ，桩群间距宜取 $0.5 \sim 2.0\text{m}$ ，岩土体条件好时取上限值，岩土体条件差时取下限值。

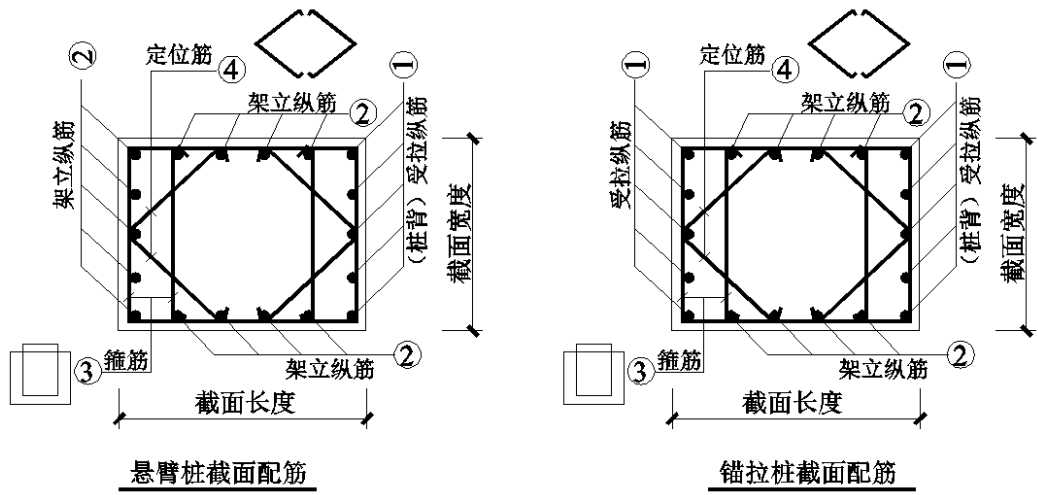
6.6.9 微型桩在滑面以下的嵌固深度不宜大于 $30d$ （ d 为微型桩的桩径），且不宜大于 $1/3$ 桩长，不宜小于 2m ，并应符合微型桩的抗拉拔强度要求。

6.6.10 微型桩的受力筋可采用钢筋、型钢或钢管。微型桩孔内宜采用二次注浆工艺注浆，也可采用细石混凝土灌注。水泥砂浆的强度应不低于 M25。细石混凝土的骨料粒径不宜大于 20mm ，强度不宜小于 C25。

7 抗滑桩结构设计

7.1 抗滑桩结构构造要求

- 7.1.1 挖孔桩直径或最小边宽度不宜小于 1.2m；钻孔桩设计直径不宜小于 0.8m。
- 7.1.2 桩顶宜埋置于地面以下 0.5m，应保证滑坡体不越过桩顶。当有特殊要求时，如作为建筑物基础等，桩顶可高于地面。
- 7.1.3 桩身混凝土强度不小于 C30。地下水或环境土有侵蚀性时，水泥应按有关规定选用。受力筋的混凝土保护层厚度，在土体中当有混凝土护壁时不应小于 50mm，无混凝土护壁时不应小于 70mm，在岩体中不应小于 50mm。
- 7.1.4 纵向受拉钢筋宜采用 HRB400，箍筋可采用 HPB300 或 HRB335。
- 7.1.5 桩应按桩身内力大小分段配筋。当内力计算表明不需配筋时，应设通长构造钢筋，受力筋向不受力段延伸长度不宜小于钢筋直径的 35d。
- 7.1.6 桩内主筋直径不应小于 16mm，每桩的主筋数量不应少于 8 根，其净距不应小于 80mm 且不应大于 350mm。
- 7.1.7 如配筋较多，可采用束筋。组成束筋的单根钢筋直径不宜大于 36mm，每束不宜多于 3 根。束筋成束后等代直径为 $d_e = \sqrt{nd}$ ，式中 n 为单束钢筋根数，d 为单根钢筋直径。
- 7.1.8 纵向受拉钢筋如配置单排钢筋有困难时，可设置两排或三排，排距宜控制为 120~200mm，抗弯计算时按两排或三排的合力点计算。
- 7.1.9 桩内不宜配置弯起钢筋，可适当配定位筋，可采用调整箍筋的直径、间距和桩身截面尺寸等措施，以满足斜截面的抗剪强度。
- 7.1.10 箍筋宜采用封闭式。肢数不宜多于 4 肢，直径不应小于主筋直径的 1/4，其直径一般为 10~16mm，且不应小于 8mm，其中距不应大于主筋直径的 15 倍且不应大于 400 mm(见图 4)，加密区不宜小于 100mm。
- 7.1.11 圆形截面桩箍筋宜设置螺旋筋，钢筋笼骨架上每隔 2.0~2.5m 设置直径 16~32mm 的加劲箍一道。钢筋笼四周应设置突出的定位钢筋、定位混凝土块，或采用其他定位措施。



配筋表

配筋	①	②	③	④
钢筋直径 (mm)	≥16	≥16	8~12	8~12
钢筋间距 (mm)	≤200	≤200	≤200	≤400
钢筋种类	HRB335 HRB400	HRB335 HRB400	HPB300 HRB335	HPB300 HRB335

图4 箍筋截面配筋图

- 7.1.12 钢筋的连接应符合 JG/J 18-2010，且应符合 JG/J 107-2010。纵向受力筋的接头应相互错开，同一连接区段内接头面积不宜大于 50%。钢筋接头断面应避开滑面。

7.1.13 抗滑桩井口应设置锁口，桩井位于土层和风化破碎的岩层时宜设置护壁。一般地区锁口和护壁的混凝土强度等级不小于 C20，严寒和软土地区锁口和护壁的混凝土强度等级不小于 C25。

7.1.14 护壁尺寸及配筋，应通过计算确定。厚度不宜小于 100mm；一般自稳性较好的可塑-硬塑状粘性土、稍密以上的碎块石土或基岩中为单节高度 1.0~1.2m；软弱的粘性土或松散的、易垮塌的碎石层为 0.5~0.6m；垮塌严重段宜先注浆后开挖。

7.1.15 当采用锚拉桩时，配筋除满足 GB 50010-2010 外，尚应符合下列要求：

- a) 受压区钢筋宜通长布置，一般不应截断（可顺桩头斜面弯起）。
- s) 锚索孔附近的桩身箍筋应适当加密，必要时应增设间接钢筋，以增强局部受压承载力。
- t) 锚头部位应做成斜面桩身安设锚索部位应做成三角形垫墩斜面。斜面与锚索垂直。
- u) 锚索防腐等级按相关规范的要求。
- v) 下列情况的锚索设计锚固力应根据拉张试验确定，试验方法参见有关规范。
 - 1) 采用新工艺、新材料或新技术的锚索；
 - 2) 无锚固工程经验的岩土层内的锚索；
 - 3) 一级抗滑工程的锚索。

7.1.16 锚束的结构设计应符合下列规定：

- a) 锚束采用的高强预应力钢绞线的材质应符合 GB/T 5224-2014 的规定。进行预应力锚索设计时，在设计张拉力作用下，钢材强度的利用系数宜为 0.6~0.65。
- w) 沿锚束的长度方向应安设隔离架。对于陡倾角方向布置的锚索隔离架间距不宜大于 4 m，对于缓倾角方向布置的锚索隔离架间距不宜大于 2.0 m。隔离架中应预留灌浆管和排气管的通道。
- x) 有黏结预应力锚索封孔灌浆后锚束的保护层厚度不应小于 20 mm。

7.1.17 预应力锚索外锚头的结构设计应符合下列规定：

- a) 外锚头及其各部件的承载能力必须同单根锚索的最大张拉力相匹配，其材料性能应符合强度要求。
- b) 外锚头结构型式应有利于孔口设备的布置与安装、锚索的张拉，且有利于锚索的锁定和多余钢绞线的切除。
- c) 当锚索张拉时采用的锚夹具应保证锚索受力均匀、夹片硬度适中并不损伤钢丝或钢绞线。锁定时，钢丝或钢绞线的回缩量不宜大于 5 mm。
- d) 孔口混凝土垫墩应保证传力均匀。垫墩尺寸应根据单根锚索的最大张拉力、垫墩材料性质、锚索孔口周围的地质情况及其力学性质，通过计算确定。垫墩混凝土的强度等级不应低于 C30。
- e) 垫墩顶面应设置钢垫板，其平面尺寸可略小于垫墩上平面尺寸，厚度不宜小于 20 mm。钢垫板和垫墩的承力面，应垂直于锚索孔的轴线，其角度偏差不宜大于 $\pm 2^\circ$ 。

7.2 抗滑桩承载力计算

7.2.1 抗滑桩结构设计验算内容包括抗滑桩受弯桩、偏心受力桩正截面承载力验算和斜截面承载力验算。

7.2.2 受弯桩、偏心受力桩正截面承载力计算时，受压区混凝土的应力图可简化为等效的矩形应力图（图 5）。

- a) 矩形截面受弯桩，当计入纵向受压钢筋时，其正截面受弯承载力应符合式（27）规定：

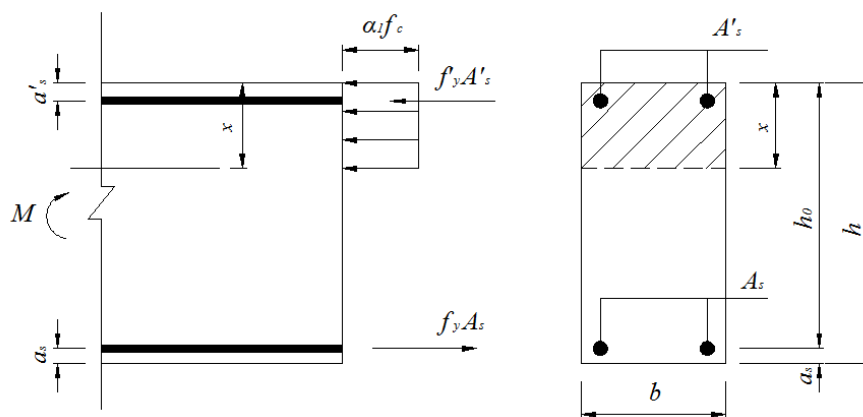


图5 矩形截面受弯桩正截面受弯承载力计算

$$M \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_y A_s' (h_0 - a_s') \quad \dots\dots\dots (27)$$

混凝土受压区高度应按公式 (28) 确定。即：

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s - f_y' A_s' \quad \dots\dots\dots (28)$$

混凝土受压区高度尚应符合公式 (29)：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

考虑纵向受压筋时，混凝土受压区高度尚应符合式 (30)：

$$x \geq 2a_s' \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中：

α_1 ——系数，混凝土强度等级不超过 C50 时取 1，当混凝土强度等级为 C80 时，取 0.94，期间按线性内插法确定；

A_s 、 A_s' ——受拉区、受压区纵向钢筋的截面面积 (mm²)；

a_s' ——受压区纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离 (m)；

b ——矩形截面的宽度 (m)；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa)；

f_y ——钢筋抗拉强度设计值 (MPa)；

f_y' ——钢筋抗压强度标准值 (MPa)；

h_0 ——截面有效高度 (m)；

x ——混凝土受压区高度 (m)；

ξ_b ——相对界限受压高度，取 x_b/h_0 (m)。

- b) 受弯桩正截面受弯承载力计算应符合本规范公式 (27) 的要求。当由构造要求或按正常使用极限状态验算要求配置的纵向受拉钢筋截面面积大于受弯承载力要求的配筋面积时，按本规范公式 (28) 计算的混凝土受压区高度 x ，可仅计入受弯承载力条件所需的纵向受拉钢筋截面面积。

- y) 当不计入纵向受压钢筋时，矩形截面受弯桩，正截面受弯承载力应符合式 (31) 规定：

$$M \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

7.2.3 矩形截面抗滑桩受弯时，抗滑桩斜截面上的最大剪力设计值 V 按公式 (32) 和公式 (33) 计算。

当 $h_0/b \leq 4$ 时，抗滑桩斜截面上的最大剪力设计值 V 为：

$$V = 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad \dots\dots\dots (32)$$

当 $h_0/b \geq 6$ 时，抗滑桩斜截面上的最大剪力设计值 V 为：

$$V = 0.20\beta_c f_c b h_0 \quad \dots\dots\dots (33)$$

当 $4 < h_0/b < 6$ 时， V 值按线性内插法确定。

式中：

β_c ——混凝土强度影响系数：当混凝土强度等级不超过C50时， β_c 取为1.0。

7.2.4 在计算斜截面的受剪承载力时，剪力设计值的计算截面按 GB 50010-2010 中第 6.3.2 条的规定采用。

7.2.5 矩形截面抗滑桩，当仅配置箍筋时，其斜截面受剪承载力应符合式（34）规定。即：

$$V \leq 0.7 f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中：

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积（ mm^2 ）；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距（ mm ）；

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值（ MPa ）；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值（ MPa ）。

7.2.6 圆形桩结构设计验算包括均匀配筋钢筋和非均匀配筋钢筋的正截面受弯承载力验算。

a) 圆形抗滑桩均匀配筋钢筋应沿桩周均匀布设，当钢筋根数不少于 6 根时，圆形抗滑桩截面受弯承载力计算按公式（35）：

$$M = \frac{2}{3} f_{cm} A r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi} \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$\alpha f_{cm} A \left(1 - \frac{\sin 2\pi \alpha}{2\pi \alpha} \right) + (\alpha - \alpha_t) f_y A_{s0} = 0 \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$\alpha_t = \begin{cases} 1.25 - 2\alpha & 0 \leq \alpha \leq 0.625 \\ 0 & 0.625 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中：

M ——抗滑桩正截面受弯承载力（ kN ）；

A ——抗滑桩横截面积（ m^2 ）；

A_s ——桩的配筋面积（ mm^2 ）；

r ——抗滑桩的半径（ m ）；

r_s ——纵向钢筋所在圆周的半径（ mm ）；

α ——对应于受压区混凝土截面面积的圆心角与 2π 的比值；

α_t ——纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值；

f_{cm} ——混凝土弯曲抗压强度设计值（ MPa ）。

b) 圆形抗滑桩非均匀配筋宜按 120° 夹角非均匀配筋计算理论计算，正截面强度计算公式（38）如下：

$$M = \frac{2}{3} f_{cm} A r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + f_y A_{s0} r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi} + 1.102658 f_y A_{s1} r_s \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$\alpha f_{cm} A \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha} \right) + (\alpha - \alpha_t) f_y A_{s0} - f_y A_{s1} = 0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

$$\alpha_t = \begin{cases} 1.25 - 2\alpha & 0 \leq \alpha \leq 0.625 \\ 0 & 0.625 \leq \alpha \leq 1 \text{ 或 } \alpha < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

A_{s0} ——沿周边均匀配置的钢筋面积 (mm^2);

A_{s1} ——120度夹角内增加的抗拉钢筋面积 (mm^2);

其余符号意义同前。

7.3 锚索结构设计验算

7.3.1 锚索设计除应满足锚索一般规定外,还应验算抗滑桩桩体锚头处混凝土抗压强度,满足局部抗压要求。

7.3.2 锚索轴向拉力标准值应按下式计算:

$$P = \frac{N}{\cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

P ——相应于作用的标准组合时锚索所受轴向拉力 (kN);

N ——锚索水平拉力标准值 (kN);

α ——锚索倾角 ($^\circ$)。

7.3.3 锚索钢绞线截面面积应满足下列公式的要求

$$A_s \geq \frac{K_b P}{f_{py}} \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:

A_s ——预应力锚索截面面积 (m^2);

f_{py} ——钢绞线抗拉强度设计值 (kPa);

K_b ——锚索杆体抗拉安全系数,取值范围 1.8~2.2。

7.3.4 锚索锚固体与岩土层间的长度应满足下式的要求:

$$l_a \geq \frac{K_a N}{\pi \cdot D \cdot f_{rb}} \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

K_a ——锚索锚固体抗拔安全系数,取值范围 2.2~2.6;

l_a ——锚索锚固段长度 (m);

f_{rb} ——岩土层与锚固体极限粘结强度特征值 (kPa); 应通过试验确定,当无试验资料时可按附表 K.1和K.2取值。

7.3.5 锚索体与锚固砂浆间的锚固长度应满足下式的要求:

$$l_a \geq \frac{K_a N}{n\pi \cdot d \cdot f_b} \quad \dots\dots\dots (44)$$

式中:

l_a ——锚筋与砂浆间的锚固长度 (m);

d ——锚筋直径 (m);

n ——钢绞线根数 (根);

f_b ——锚筋与砂浆间粘结强度设计值（kPa）；应通过试验确定，当无试验资料时可按M25—2.75，M30—2.95和M35—3.40取值。

8 抗滑桩施工、检测与监测要求

8.1 抗滑桩施工要求

8.1.1 抗滑桩要按照施工图准确定位。

8.1.2 抗滑桩按由浅至深、由两侧向中间顺序施工。应采用间隔开挖方式，每次间隔1~2孔。成孔后应及时浇注混凝土，7~15日后方可开挖相邻桩。

8.1.3 开挖过程及时进行地质编录。

8.1.4 滑带、实挖桩底高程应由施工单位会同设计、勘察、监理、业主等单位现场确定。

8.1.5 桩身混凝土宜采用商品混凝土，条件不允许时可采用现场搅拌。

8.1.6 桩身混凝土灌注应连续进行，不留施工缝。

8.1.7 当无法实施抽水施工时，宜采用机械成孔。

8.2 抗滑桩检测

8.2.1 抗滑桩桩身完整性、桩身混凝土强度检测通常采用声波透射法。当桩身有缺陷时，用钻孔取芯法进一步验证。

8.2.2 抗滑桩桩身完整性检测应按100%进行检测进行，桩径800 mm以上、矩形桩短边边长1000 mm以上，应采用声波透射法；桩径800 mm以下、矩形桩短边边长1000 mm以下和微型桩采用低应变法。

8.2.3 锚拉桩宜随机抽取总数的10%~20%进行超张拉检验，张拉力为设计锚固力的120%，且张拉实际伸长值符合设计要求。

8.3 抗滑桩监测

8.3.1 抗滑桩监测系统应根据整个滑斜坡地质灾害防治监测系统的要求统一布设。

8.3.2 抗滑桩监测主要包括施工安全监测、防治效果监测和动态长期监测。应以施工安全监测和防治效果监测为主，所布网点应可供长期监测利用。

8.3.3 I级滑坡防治工程，应进行抗滑桩应力、位移监测；II级滑坡防治工程，宜进行抗滑桩应力、位移监测，位移监测可以桩顶位移监测为主；III级滑坡防治工程，可进行桩顶位移监测。

8.3.4 锚拉桩应进行锚索预应力监测。监测锚索的数量不少于10%。I级滑坡防治工程不少于2根。

8.3.5 主剖面上的桩应进行监测，监测桩的数量不少于10%。I级滑坡防治工程不少于3根，主剖面上的桩应进行监测。

8.3.6 监测数据的采集应采用自动化方式。

8.3.7 防治效果监测时间不应小于一个水文年，数据采集时间间隔宜为7~10天。在外界扰动较大时，如暴雨期间，应加密观测次数。主要包括监测预应力锚索应力值的变化、抗滑桩的变形和土压力。

8.3.8 抗滑桩长期监测在防治工程竣工后。长期监测主要对I级滑坡防治工程进行。数据采集时间间隔宜为10~15天。动态变化较大时，可适当加密观测次数。

8.3.9 抗滑桩监测应采用先进和经济实用的技术方法，与群测群防相结合。

9 设计成果

9.1 设计成果内容

9.1.1 设计说明

- a) 工程概况，工程地质及水文地质条件简述，稳定性验算结论，设计原则和依据，设计措施，施工条件，材料要求，施工技术要求，监测工程。

- b) 工程量汇总表。

9.1.2 图件

- a) 抗滑桩治理工程平面布置图
 - 1) 场地位置、地形、征地红线;
 - 2) 抗滑桩平面布置、桩位坐标、各控制点的坐标与工程量表;
 - 3) 剖切线位置和编号、指北针;
 - 4) 说明、图纸名称、图签。
- b) 抗滑桩治理工程剖面图
 - 1) 抗滑桩剖面布置、桩顶高程、高程坐标和水平标尺;
 - 5) 剖切线位置和编号;
 - 6) 说明、图纸名称和图签。
- c) 抗滑桩治理工程立面图
 - 1) 抗滑桩横剖面布置、桩顶高程、高程坐标和水平标尺;
 - 7) 说明、图纸名称和图签。
- d) 结构详图
 - 8) 抗滑桩桩身、锁口护壁结构详图及配筋图;
 - 9) 桩身和锚索连接部分细部结构图;
 - 10) 锚索结构图;
 - 11) 钢筋大样图及计算用量表;
 - 12) 说明、图纸名称、图签。
- e) 监测工程平面图
 - 场地地形和监测点的坐标、类型等。
- z) 监测工程结构详图。
- aa) 施工组织平面布置图
 - 1) 场地地形、拟建构筑物的位置与轮廓尺寸;
 - 2) 材料堆放、拌合站及设备维修等的位置与面积;
 - 3) 施工道路、办公与生活用房等临时设施的位置与面积;
 - 4) 消防及环保设施布设等。

9.1.3 计算书

主要包含滑坡推力计算、单桩内力及位移计算、单桩及锚索承载力验算。

9.1.4 (预)算书

9.2 设计成果要求

9.2.1 成果书写格式

- a) 设计成果应按照内容分节撰写绘制,层次清楚。
- b) 文字及图件的术语、符号、单位应前后一致,符合国家现行标准。

9.2.2 图件比例尺

- a) 抗滑桩治理工程平面布置图 (1: 500~1: 2000)
- b) 抗滑桩治理工程剖面图 (1: 200~1: 1000)
- c) 抗滑桩治理工程立面图 (1: 500~1: 1000)
- d) 结构详图 (1: 50~1: 200)
- a) 监测工程平面图 (1: 500~1: 2000)
- f) 监测工程结构详图 (1: 50~1: 200)

g) 施工组织平面布置图（1：500～1：2000）

9.2.3 本规定对设计成果的要求具有通用性。对于具体的工程项目设计，执行时应根据项目的内容和设计范围对本规定的内容进行合理调整。

附 录 A
(资料性附录)
钢筋参数表

A.1 单肢箍 A_{sv1}/s (mm^2/mm)

箍 筋 间 距 s (mm)	钢 筋 直 径 d (mm)			
	6	8	10	12
100	0.283	0.503	0.785	1.131
150	0.188	0.335	0.523	0.754
200	0.142	0.251	0.392	0.566

A.2 钢筋弯钩增长值一览表

钢筋直径 d (mm)	弯钩增长值 (cm)				理论重量 (kg/m)	螺纹钢 外径 (mm)
	光圆钢筋			螺纹钢		
	90°	135°	180°	90°		
10	3.5	4.9	6.3	4.2	0.617	11.3
12	4.2	5.8	7.5	5.1	0.888	13
14	4.9	6.8	8.8	5.9	1.21	15.5
16	5.6	7.8	10	6.7	1.58	17.5
18	6.3	8.8	11.3	7.6	2	20
20	7	9.7	12.5	8.4	2.47	22
22	7.7	10.7	13.8	9.3	2.98	24
25	8.8	12.2	15.6	10.5	3.85	27
28	9.8	13.6	17.5	11.8	4.83	30
32	11.2	15.6	20	13.5	6.31	34.5
36	12.6	17.5	22.5	15.2	7.99	39.5
40	14	19.5	25	16.8	9.87	43.5

A.3 钢筋弯折修正值一览表

钢筋直径 d (mm)	弯折修正值			
	光圆钢筋		螺纹钢	
	45°	90°	45°	90°
10		-0.8		-1.3
12	-0.5	-0.9	-0.5	-1.5
14	-0.6	-1.1	-0.6	-1.8
16	-0.7	-1.2	-0.7	-2.1
18	-0.8	-1.4	-0.8	-2.3
20	-0.9	-1.5	-0.9	-2.6
22	-0.9	-1.7	-0.9	-2.8
25	-1.1	-1.9	-1.1	-3.2
28	-1.2	-2.1	-1.2	-3.6
32	-1.4	-2.4	-1.4	-4.1
36	-1.5	-2.7	-1.5	-4.6
40	-1.7	-3	-1.7	-5.2

附 录 B
(资料性附录)
混凝土参数表

B.1 混凝土强度设计值 (N/mm^2)

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$f_c(\text{MPa})$	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9
$f_t(\text{MPa})$	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04	2.09	2.14	2.18	2.22

B.2 混凝土弹性模量 ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)

砼强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
E_c	2.20	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.85

附 录 C

(资料性附录)

抗滑桩设计地基系数表 (K 法、m 法、抗压强度与地基系数)

C.1 水平地基系数 K 可以由旁压试验或大型实体推桩试验确定, 无试验资料时, 可按表 C.1、表 C.2 取值。

表 C.1 抗滑桩嵌岩段岩石的抗压强度和水平地基系数 K

序 号	单轴极限抗压强度 (kPa)	水平地基系数 K (kN/m ³)
1	10000	60000~160000
2	15000	150000~200000
3	20000	180000~240000
4	30000	240000~320000
5	40000	360000~480000
6	50000	480000~640000
7	60000	720000~960000
8	80000	900000~2000000

表 C.2 抗滑桩嵌岩段岩质地层物理力学指标和水平地基系数 K

地层种类	内摩擦角	弹性模量 E_0 (kPa)	泊松比 μ	水平地基系数 K (kN/m ³)	剪切应力 (kPa)
细粒花岗岩、正长岩	80 °以上	5430~6900	0.25~0.30	$2.0 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$	1500 以上
辉绿岩、玢岩		6700~7870	0.28	2.5×10^6	
中粒花岗岩		5430~6500	0.25	$1.8 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^6$	
粗粒正长岩、坚硬白云岩		6560~7000			
坚硬石灰岩	80 °	4400~10000	0.25~0.30	$1.2 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^6$	1500
坚硬砂岩、大理岩		4660~5430			
粗粒花岗岩、花岗片麻岩		5430~6000			
较坚硬石灰岩	75 °~80 °	4400~9000	0.25~0.30	$0.8 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^6$	1200~1400
较坚硬砂岩		4460~5000			
不坚硬花岗岩		5430~6000			
坚硬页岩	70 °~75 °	2000~5500	0.15~0.30	$0.4 \times 10^6 \sim 0.8 \times 10^6$	700~1200
普通石灰岩		4400~8000	0.25~0.30		
普通砂岩		4600~5000	0.25~0.30		
坚硬泥灰岩	70 °	800~1200	0.29~0.38	$0.3 \times 10^6 \sim 0.4 \times 10^6$	500~700
较坚硬页岩		1980~3600	0.25~0.30		
不坚硬石灰岩		4400~6000	0.25~0.30		
不坚硬砂岩		1000~2780	0.25~0.30		
较坚硬泥灰岩	65 °	700~900	0.29~0.38	$0.2 \times 10^6 \sim 0.3 \times 10^6$	300~500
普通页岩		1900~3000	0.15~0.20		
软石灰岩		4400~5000	0.25		
不坚硬泥灰岩	45 °	30~500	0.29~0.38	$0.06 \times 10^6 \sim 0.12 \times 10^6$	150~300
硬化粘土		10~300	0.30~0.37		
软片岩		500~700	0.15~0.18		

表 C.2 抗滑桩嵌岩段岩质地层物理力学指标和水平地基系数 K (续)

硬煤	30°~45°	50~300	0.30~0.40	$0.3 \times 10^6 \sim 0.06 \times 10^6$	100~150
密实粘土		10~300	0.30~0.37		
普通煤		50~300	0.30~0.40		
胶结卵石		50~100			

掺石土		50~100			
-----	--	--------	--	--	--

C.2 地基水平抗力系数的比例系数 m ，由试验确定，无试验数据时，表C.3 可供参考。

表C.3 地基土水平抗力系数的比例系数 m

序号	地基土类别	m (MN/m ⁴)	相应单桩在地面 处水平位移 (mm)
1	淤泥，饱和湿陷性黄土	2.5~6	6~12
2	流塑 ($I_L > 1$)、软塑 ($0.75 < I_L \leq 1$) 状粘性土， $e > 0.9$ 粉土，松散粉细砂，松散、稍密填土	6~14	4~8
3	可塑 ($0.25 < I_L \leq 0.75$) 状粘性土， $e = 0.75 \sim 0.9$ 粉土，湿陷性黄土，中密填土，稍密细砂	14~35	3~6
4	硬塑 ($0 < I_L \leq 0.25$)、坚硬 ($I_L \leq 0$) 状粘性土，湿陷性黄土， $e < 0.75$ 粉土，中密中粗砂，密实老填土	35~100	2~5
5	中密、密实的砂砾、碎石类土	100~300	1.5~3

注1：当桩顶水平位移大于表列数值或当灌注桩配筋率较高 ($\geq 0.65\%$) 时， m 值应适当降低。

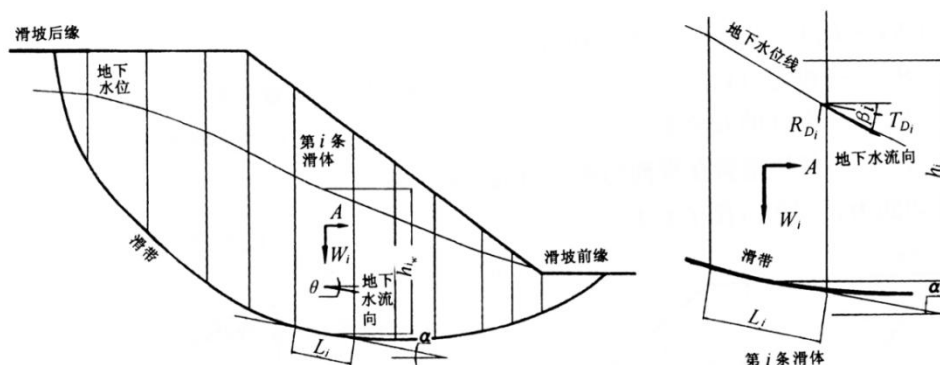
注2：当水平荷载为长期或经常出现的荷载时，应将表列数值乘以0.4，降低采用。

注3：桩嵌滑床范围内有数种不同土层时，应将滑面以下 $h=2(b+1)$ 米深度，对刚性桩 h_m 值用嵌入滑床的整个桩长，各层土按下列公式，计算 m 值。

附 录 D
(资料性附录)
滑坡稳定性评价和推力计算公式

D.1 堆积层(包括土质)滑坡稳定性评价和推力计算

D.1.1 滑动面为单一平面或圆弧形(图D.1)



图D.1 瑞典条分法(圆弧形滑动面)(堆积层滑坡计算模型之一)

a) 滑坡稳定性计算

$$K_f = \frac{\sum ((W_i (\cos \alpha_i - A \sin \alpha_i) - N_{wi} - R_{Di}) \tan \varphi_i + c_i L_i)}{\sum (W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + T_{Di})} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

其中孔隙水压力 $N_{wi} = \gamma_w h_{iw} L_i \cos \alpha_i$, 即近似等于浸润面以下土体的面积 $h_{iw} L_i \cos \alpha_i$ 乘以水的容重 γ_w (kN/m³);

渗透压力产生的平行滑面分力 T_{Di} :

$$T_{Di} = N_{wi} \sin \beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i) \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

渗透压力产生的垂直滑面分力 R_{Di}

$$R_{Di} = N_{wi} \sin \beta_i \sin(\alpha_i - \beta_i) \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

- W_i ——第 i 条块的重量 (kN/m);
- c_i ——第 i 条块粘聚力 (kPa);
- φ_i ——第 i 条块内摩擦角 (°);
- L_i ——第 i 条块滑面长度 (m);
- α_i ——第 i 条块滑面倾角 (°);
- β_i ——第 i 条块地下水流向 (°);
- A ——地震水平加速度, 可按 (GB 50011-2010) 相关规定确定;
- K_f ——斜坡稳定性系数。

若假定有效应力

$$\overline{N}_i = (1 - r_U) W_i \cos \alpha_i \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

其中 r_U 是孔隙压力比, 可表示为:

$$r_U = \frac{\text{滑体水下体} \times \text{水的容重}}{\text{滑体总体积} \times \text{滑体容重}} \approx \frac{\text{滑体水下面积}}{\text{滑坡总面积} \times 2} \dots\dots\dots (\text{D.5})$$

简化公式:

$$K_f = \frac{\sum (W_i ((1 - r_U) \cos \alpha_i - A \sin \alpha_i) - R_{D_i}) \tan \phi_i + C_i L_i}{\sum (W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + T_{D_i})} \dots\dots\dots (\text{D.6})$$

b) 滑坡推力计算公式

对剪切而言:

$$H_s = (K_s - K_f) \times \sum (T_i \times \cos \alpha_i) \dots\dots\dots (\text{D.7})$$

对弯矩而言:

$$H_m = (K_s - K_f) / K_s \times \sum (T_i \times \cos \alpha_i) \dots\dots\dots (\text{D.8})$$

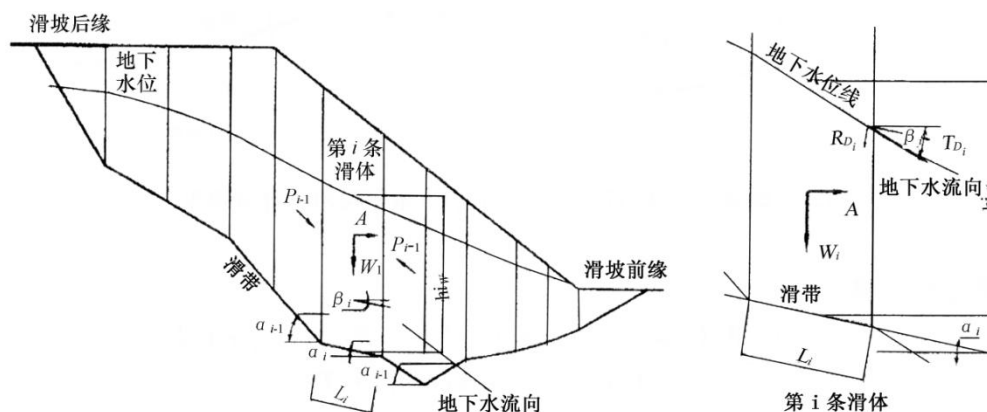
其中:

H_s 、 H_m ——推力 (kN);

K_s ——设计的安全系数;

T_i ——条块重量在滑面切线方向的分力。

D. 1. 2 滑动面为折线形 (图D. 2)



图D.2 传递系数法 (折线型滑动面) (堆积层滑坡计算模型之二)

a) 滑坡稳定性计算

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (((W_i ((1 - r_U) \cos \alpha_i - A \sin \alpha_i) - R_{D_i}) \tan \phi_i + C_i L_i) \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} ((W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + T_{D_i}) \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \dots\dots\dots (\text{D.9})$$

其中:

$$R_n = (W_n ((1 - r_U) \cos \alpha_n - A \sin \alpha_n) - R_{D_n}) \tan \phi_n + C_n L_n$$

$$T_n = (W_n (\sin \alpha_n + A \cos \alpha_n) + T_{D_n})$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \psi_{i+1} \psi_{i+2} \dots \psi_{n-1}$$

式中:

ψ_j ——第 i 块段的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块段时的传递系数 ($j=i$)。

$$\psi_j = \cos(a_i - a_{i+1}) - \sin(a_i - a_{i+1}) \tan \phi_{i+1} \quad \cdots \cdots \cdots (D.10)$$

其余注释同上。

b) 滑坡推力

应按传递系数法计算，公式如下：

$$P_i = P_{i-1} \times \psi + K_s \times T_i - R_i \quad \cdots \cdots \cdots (D.11)$$

其中：

P_i ——为第 i 条块的推力 (kN/m)；

P_{i-1} ——为第 i 条的剩余下滑力 (kN/m)。

下滑力 T_i ：

$$T_i = W_i (\sin a_i + A \cos a_i) + N_{wi} \sin \beta_i \cos(a_i - \beta_i) \quad \cdots \cdots \cdots (D.12)$$

抗滑力 R_i ：

$$R_i = W_i (\cos a_i - A \sin a_i) - N_{wi} - N_{wi} \sin \beta_i \sin(a_i - \beta_i) \tan \phi_i + C_i L_i \quad \cdots \cdots (D.13)$$

传递系数

$$\psi = \cos(a_{i-1} - a_i) - \sin(a_{i-1} - a_i) \tan \phi_i \quad \cdots \cdots \cdots (D.14)$$

孔隙水压力 N_{wi}

$$N_{wi} = \gamma_w h_{iw} L_i \cos a_i \quad \cdots \cdots \cdots (D.15)$$

即近似等于浸润面以下土体的面积 $h_{iw} L_i \cos a_i$ 乘以水的容重 γ_w 。

渗透压力平行滑面的分力 T_{Di}

$$T_{Di} = N_{wi} \sin \beta_i \cos(a_i - \beta_i) \quad \cdots \cdots \cdots (D.16)$$

渗透压力垂直滑面的分力

$$R_{Di} = N_{wi} \sin \beta_i \sin(a_i - \beta_i) \quad \cdots \cdots \cdots (D.17)$$

当采用孔隙压力比时，抗滑力 R_i 可采用如下公式：

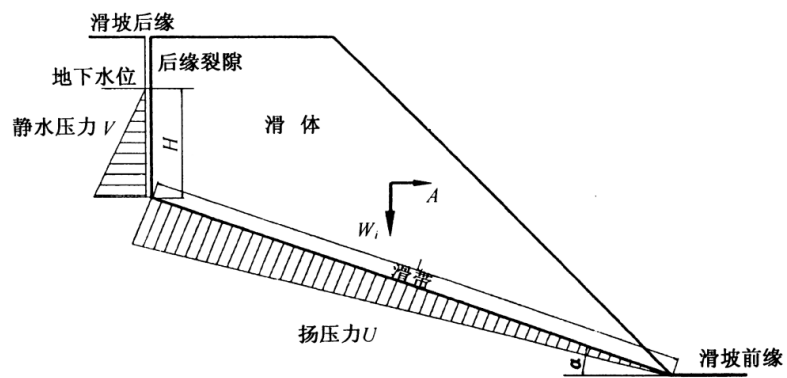
$$R_i = (W_i ((1 - r_U) \cos a_i - A \sin a_i) - \gamma_w h_{iw} L_i) \tan \phi_i + C_i L_i \quad \cdots \cdots \cdots (D.18)$$

式中：

r_U ——孔隙压力比。

D.2 岩质滑坡稳定性评价 (图D.3)

$$K_f = \frac{(W(\cos a - A \sin a) - V \sin a - U) \tan \phi + CL}{W(\sin a + A \cos a) + V \cos a} \quad \cdots \cdots \cdots (D.19)$$



图D.3 极限平衡法（岩质滑坡计算模型）

其中，后缘裂缝静水压力 V

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \quad \dots\dots\dots (D.20)$$

沿滑面扬压力 U

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w LH \quad \dots\dots\dots (D.21)$$

其余注释同上。

附录 E
(资料性附录)
地基系数法

E.1 “K法”计算单桩内力及位移

E.1.1 基本微分方程：将桩视为一竖向弹性地基梁，由材料力学公式及Winkler假定可建立下述微分方程：

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + KB_p x = 0 \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

K ——水平地基系数，(kN/m³)；可以由旁压试验或大型实体推桩试验确定。无试验资料时，可按表 C.1 或 C.2 取值；

B_p ——桩的计算宽度，(m)。

E.1.2 桩身锚固段任一截面 y 处的水平位移 x 、转角 φ 、弯矩 M 、剪力 Q 及桩周岩土侧向应力 σ 按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} x(y) &= x_0 \varphi_1 + \frac{\varphi_0}{\beta} \varphi_2 + \frac{M_0}{\beta^2 EI} \varphi_3 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \varphi_4 \\ \varphi(y) &= \beta(-4x_0 \varphi_4 + \frac{\varphi_0}{\beta} \varphi_1 + \frac{M_0}{\beta^2 EI} \varphi_2 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \varphi_3) \\ M(y) &= \beta^2 EI(-4x_0 \varphi_3 - 4 \frac{\varphi_0}{\beta} \varphi_4 + \frac{M_0}{\beta^2 EI} \varphi_1 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \varphi_2) \\ Q(y) &= \beta^3 EI(-4x_0 \varphi_2 - 4 \frac{\varphi_0}{\beta} \varphi_3 - \frac{M_0}{\beta^2 EI} \varphi_4 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \varphi_1) \\ \sigma(y) &= K_H x(y) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{KB_p}{4EI}} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中：

φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 ——“K”法影响函数值。

按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \cos(\beta y) ch(\beta y) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{2} [\sin(\beta y) ch(\beta y) + \cos(\beta y) sh(\beta y)] \\ \varphi_3 &= \frac{1}{2} \sin(\beta y) sh(\beta y) \\ \varphi_4 &= \frac{1}{4} [\sin(\beta y) ch(\beta y) - \cos(\beta y) sh(\beta y)] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

式中：

Q_0 、 M_0 ——滑动面处的剪力及弯矩，按 6.2.2 确定；

x_0 、 φ_0 ——滑动面处的水平位移及转角，根据桩底支承条件确定：

a) 当桩底为固定端时, $x_{h2}=0$, $\varphi_{h2}=0$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{M_0}{\beta^2 EI} \frac{\varphi_2^2 - \varphi_1 \varphi_3}{4\varphi_4 \varphi_2 + \varphi_1^2} + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \frac{\varphi_2 \varphi_3 - \varphi_1 \varphi_4}{4\varphi_4 \varphi_2 + \varphi_1^2} \\ \varphi_0 &= -\frac{M_0}{\beta EI} \frac{\varphi_1 \varphi_2 + 4\varphi_3 \varphi_4}{4\varphi_4 \varphi_2 - \varphi_1^2} - \frac{Q_0}{\beta^2 EI} \frac{\varphi_1 \varphi_3 + 4\varphi_4^2}{4\varphi_4 \varphi_2 - \varphi_1^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.5)$$

b) 当桩底为铰支端时, $x_{h2}=0$, $M_{h2}=0$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{M_0}{\beta^2 EI} \frac{4\varphi_3 \varphi_4 + \varphi_1 \varphi_2}{4\varphi_2 \varphi_3 - \varphi_1 \varphi_4} + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \frac{4\varphi_4^2 + \varphi_2^2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} \\ \varphi_0 &= -\frac{M_0}{\beta EI} \frac{\varphi_1^2 + 4\varphi_3^2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} - \frac{Q_0}{\beta^2 EI} \frac{4\varphi_3 \varphi_4 + \varphi_1 \varphi_2}{4\varphi_2 \varphi_3 - 4\varphi_1 \varphi_4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.6)$$

c) 当桩底为自由端时 $Q_{h2}=0$, $M_{h2}=0$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{M_0}{\beta^2 EI} \frac{4\varphi_4^2 + \varphi_1 \varphi_3}{4\varphi_3^2 - 4\varphi_2 \varphi_4} + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \frac{\varphi_2 \varphi_3 - \varphi_1 \varphi_4}{4\varphi_3^2 - 4\varphi_2 \varphi_4} \\ \varphi_0 &= -\frac{M_0}{\beta EI} \frac{4\varphi_3 \varphi_4 + \varphi_1 \varphi_2}{4\varphi_3^2 - 4\varphi_2 \varphi_4} - \frac{Q_0}{\beta^2 EI} \frac{\varphi_2^2 - \varphi_1 \varphi_3}{4\varphi_3^2 - 4\varphi_2 \varphi_4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.7)$$

E. 2 “m法”计算单桩内力及位移

E. 2.1 基本假定

将承受水平荷载的单桩视作 Winkler 地基（由水平弹簧组成的线性变形体）上的竖直梁。在深度 y 处，地基对桩的水平抗力：

$$\sigma_x = c_x x \dots\dots\dots (E.8)$$

假定地基水平抗力系数的比例系数随深度增加：

$$c_x = my \dots\dots\dots (E.9)$$

由材料力学公式及 Winkler 假定可建立下述微分方程：

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + my B_p x = 0 \dots\dots\dots (E.10)$$

式中：

m ——地基水平抗力系数的比例系数，由试验确定，表 C. 3 可供参考。

当 h_m 范围内存在两种不同土层时，

$$m = \frac{m_1 h_{m1}^2 + m_2 (2h_{m1} + h_{m2}) h_{m2}}{h_m^2} \dots\dots\dots (E.11)$$

当 h_m 范围内存在三种土层时，

$$m = \frac{m_1 h_{m1}^2 + m_2 (2h_{m1} + h_{m2}) h_{m2} + m_3 (2h_{m1} + 2h_{m2} + h_{m3}) h_{m3}}{h_m^2} \dots\dots\dots (E.12)$$

E. 2. 2 桩身锚固段任一截面 y 处的水平位移 x 、转角 φ 、弯矩 M 、剪力 Q 及桩周岩土侧向应力 σ 按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} x(y) &= x_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 \\ \varphi(y) &= \alpha(x_0 A_2 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_2) \\ M(y) &= \alpha^2 EI(x_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_3) \\ Q(y) &= \alpha^3 EI(x_0 A_4 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_4) \\ \sigma(y) &= m y x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.13)$$

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{m B_p}{EI}} \dots\dots\dots (E.14)$$

式中:

A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i ——“ m ”法影响函数值,按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-4)!!}{(5k)!} (\alpha y)^{5k} \\ B_1 &= \alpha y + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-3)!!}{(5k+1)!} (\alpha y)^{5k+1} \\ C_1 &= \frac{(\alpha y)^2}{2!} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-2)!!}{(5k+2)!} (\alpha y)^{5k+2} \\ D_1 &= \frac{(\alpha y)^3}{3!} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-1)!!}{(5k+3)!} (\alpha y)^{5k+3} \end{aligned} \right\} (k=1,2,3,\dots) \dots\dots\dots (E.15)$$

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= -\frac{1}{4!} (\alpha y)^4 + \frac{6}{9!} (\alpha y)^9 - \frac{6 \times 11}{14!} (\alpha y)^{14} + \frac{6 \times 11 \times 16}{19!} (\alpha y)^{19} + \Lambda \\ A_3 &= -\frac{1}{3!} (\alpha y)^3 + \frac{6}{8!} (\alpha y)^8 - \frac{6 \times 11}{13!} (\alpha y)^{13} + \frac{6 \times 11 \times 16}{18!} (\alpha y)^{18} + \Lambda \\ A_4 &= -\frac{1}{2!} (\alpha y)^2 + \frac{6}{7!} (\alpha y)^7 - \frac{6 \times 11}{12!} (\alpha y)^{12} + \frac{6 \times 11 \times 16}{17!} (\alpha y)^{17} + \Lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.16)$$

$$\left. \begin{aligned} B_2 &= 1 - \frac{2}{5!} (\alpha y)^5 + \frac{2 \times 7}{10!} (\alpha y)^{10} - \frac{2 \times 7 \times 12}{15!} (\alpha y)^{15} + \Lambda \\ B_3 &= -\frac{2}{4!} (\alpha y)^3 + \frac{2 \times 7}{9!} (\alpha y)^9 - \frac{2 \times 7 \times 12}{14!} (\alpha y)^{14} + \Lambda \\ B_4 &= -\frac{2}{3!} (\alpha y)^3 + \frac{2 \times 7}{8!} (\alpha y)^8 - \frac{2 \times 7 \times 12}{13!} (\alpha y)^{13} + \Lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.17)$$

$$\left. \begin{aligned} C_2 &= (\alpha z) - \frac{3}{6!} (\alpha y)^6 + \frac{3 \times 8}{11!} (\alpha y)^{11} - \frac{2 \times 7 \times 13}{16!} (\alpha y)^{16} + \Lambda \\ C_3 &= 1 - \frac{3}{5!} (\alpha y)^5 + \frac{3 \times 8}{10!} (\alpha y)^{10} - \frac{2 \times 7 \times 13}{15!} (\alpha y)^{15} + \Lambda \\ C_4 &= -\frac{3}{4!} (\alpha z)^4 + \frac{3 \times 8}{9!} (\alpha y)^9 - \frac{2 \times 7 \times 13}{14!} (\alpha y)^{14} + \Lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.18)$$

$$\left. \begin{aligned} D_2 &= \frac{(\alpha y)^2}{2!} - \frac{4}{7!} (\alpha y)^7 + \frac{4 \times 9}{12!} (\alpha y)^{12} - \frac{4 \times 9 \times 14}{17!} (\alpha y)^{17} + \Lambda \\ D_3 &= (\alpha y) - \frac{4}{6!} (\alpha y)^6 + \frac{4 \times 9}{11!} (\alpha y)^{11} - \frac{4 \times 9 \times 14}{16!} (\alpha y)^{16} + \Lambda \\ D_4 &= 1 - \frac{4}{5!} (\alpha z)^5 + \frac{4 \times 9}{10!} (\alpha y)^{10} - \frac{4 \times 9 \times 14}{15!} (\alpha y)^{15} + \Lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.19)$$

Q_0 、 M_0 ——滑动面处的剪力及弯矩，按 6.2.2 确定；

x_0 、 φ_0 ——滑动面处的水平位移及转角，根据桩底支承条件确定：

a) 当桩底为固定端时， $x_{h2}=0$ ， $\varphi_{h2}=0$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \frac{B_1 C_2 - C_1 B_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \frac{B_1 D_2 - D_1 B_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} \\ \varphi_0 &= \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \frac{C_1 A_2 - A_1 C_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} + \frac{Q_0}{\alpha^2 EI} \frac{D_1 A_2 - A_1 D_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.20)$$

h) 当桩底为铰支端时， $x_{h2}=0$ ， $M_{h2}=0$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \frac{C_1 B_3 - C_3 B_1}{A_3 B_1 - B_3 A_1} + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \frac{B_3 D_1 - D_3 B_1}{A_3 B_1 - B_3 A_1} \\ \varphi_0 &= \frac{M_0}{\alpha EI} \frac{C_3 A_1 - A_3 C_1}{A_3 B_1 - B_3 A_1} + \frac{Q_0}{\alpha^2 EI} \frac{D_3 A_1 - A_3 D_1}{A_3 B_1 - B_3 A_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.21)$$

i) 当桩底为自由端时 $Q_{h2}=0$ ， $M_{h2}=0$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \frac{C_4 B_3 - C_3 B_4}{A_3 B_4 - B_3 A_4} + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \frac{B_3 D_4 - D_3 B_4}{A_3 B_4 - B_3 A_4} \\ \varphi_0 &= \frac{M_0}{\alpha EI} \frac{C_3 A_4 - A_3 C_4}{A_3 B_4 - B_3 A_4} + \frac{Q_0}{\alpha^2 EI} \frac{D_3 A_4 - A_3 D_4}{A_3 B_4 - B_3 A_4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (E.22)$$

当滑动面处的地基系数 $C_x=A+my$ 不为零时，上述公式不能直接使用。为此，需按照下述方法处理（如图 E.1 所示）。

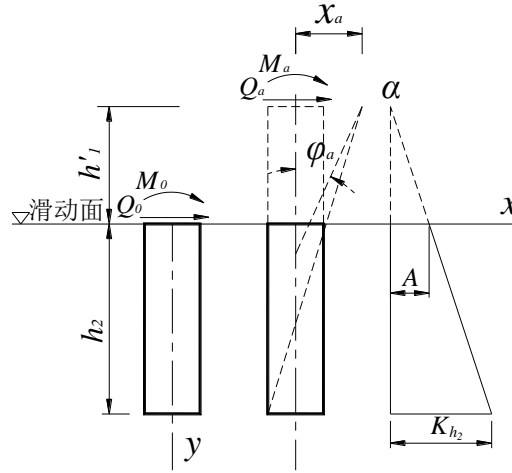


图 E.1 滑动面处抗力不为零时的示意图

将地基系数的变化图形向上延伸至 a 点，延伸部分为虚线，其高度为：

$$h_1' = \frac{A}{m} \dots\dots\dots (E.23)$$

将虚点 a 以下视为锚固段深度为 (h_2+h_1') 的抗滑桩，即可直接使用已有的公式计算，但须重新确定 a 点的初参数 M_a 、 Q_a 、 x_a 和 φ_a 。在 M_a 和 Q_a 的作用下，必须满足当滑动面处 $M=M_0$ 、 $Q=Q_0$ ， x_a 和 φ_a 根据桩底支承条件确定。

E.3 刚性桩锚固段内力及位移计算

E. 3.1 桩身内力基本公式

当刚性桩身埋入一种地层、滑动面以下岩土体为相同 m 值, 滑动面处桩前、后岩土的地基系数为 A 、 A' , 如图 E. 2, 可视桩底为自由端条件, 桩身锚固段任一截面 y 处的水平位移 x 、弯矩 M 、剪力 Q 及桩周岩土侧向应力 σ_y 按下式计算:

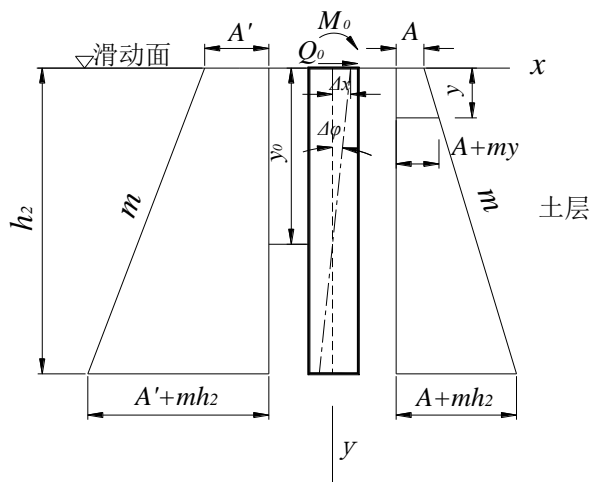


图 E. 2 地基系数 $K=A+my$ 地层中的刚性桩图

当 $y < y_0$ 时:

$$\Delta x = (y_0 - y) \Delta \varphi \quad \dots\dots\dots (E.24)$$

$$\sigma_y = (A + my)(y_0 - y) \Delta \varphi \quad \dots\dots\dots (E.25)$$

$$Q_y = Q_0 - \frac{1}{2} B_p A \Delta \varphi y (2y_0 - y) - \frac{1}{6} B_p m \Delta \varphi y^2 (3y_0 - 2y) \quad \dots\dots (E.26)$$

$$M_y = M_0 + Q_0 y - \frac{1}{6} B_p A \Delta \varphi y^2 (3y_0 - y) - \frac{1}{12} B_p m \Delta \varphi y^3 (2y_0 - y) \quad \dots\dots (E.27)$$

当 $y \geq y_0$ 时:

$$\Delta x = (y - y_0) \Delta \varphi \quad \dots\dots\dots (E.28)$$

$$\sigma_y = (A' + my)(y_0 - y) \Delta \varphi \quad \dots\dots\dots (E.29)$$

$$Q_y = Q_0 - \frac{1}{6} B_p m \Delta \varphi y^2 (3y_0 - 2y) - \frac{1}{2} B_p A \Delta \varphi y_0^2 + \frac{1}{2} B_p A' \Delta \varphi (y - y_0)^2 \quad \dots\dots\dots (E.30)$$

$$M_y = M_0 + Q_0 y - \frac{1}{6} B_p A \Delta \varphi y_0^2 (3y - y_0) + \frac{1}{6} B_p A' \Delta \varphi (y - y_0)^3 - \frac{1}{12} B_p m \Delta \varphi y^3 (2y_0 - y) \quad \dots\dots (E.31)$$

式中:

$\Delta\varphi$ ——桩的旋转角，(rad)；

y_0 ——滑动面至桩旋转中心的距离，(m)；

h_2 ——滑动面以下桩的长度，(m)；

y_0 、 $\Delta\varphi$ 可由静力平衡条件按公式(E.32)、(E.33)联立求得：

$$\Sigma H = 0$$

$$Q_0 = \frac{1}{2} B_p A \Delta\varphi y_0^2 - \frac{1}{2} B_p A' \Delta\varphi (h_2 - y_0)^2 + \frac{1}{6} B_p m \Delta\varphi h_2^2 (3y_0 - 2h_2) \quad \cdots \cdots (E.32)$$

$$\Sigma M = 0$$

$$\begin{aligned} M_0 + Q_0 h_2 = & \frac{1}{6} B_p A \Delta\varphi y_0^2 (3h_2 - y_0) - \frac{1}{6} B_p A' \Delta\varphi (h_2 - y_0)^3 \\ & + \frac{1}{12} B_p m \Delta\varphi h_2^3 (2y_0 - h_2) \end{aligned} \quad \cdots \cdots (E.33)$$

当 $A=A'$ 时， y_0 、 $\Delta\varphi$ 可按公式(E.34)、(E.35)计算

$$y_0 = \frac{h_2 [2A(3M_0 + 2Q_0 h_2) + m h_2 (4M_0 + 3Q_0 h_2)]}{2[3A(2M_0 + Q_0 h_2) + m h_2 (3M_0 + 2Q_0 h_2)]} \quad \cdots \cdots (E.34)$$

$$\Delta\varphi = \frac{12[3A(2M_0 + Q_0 h_2) + m h_2 (3M_0 + 2Q_0 h_2)]}{B_p h_2^3 [6A(A + m h_2) + m^2 h_2^2]} \quad \cdots \cdots (E.35)$$

E. 3. 2 当刚性桩桩身埋置于土层或软岩，底部埋入完整、坚硬岩层的表面，可视桩底支承条件为铰支。桩身锚固段任一截面 y 处的水平位移 x 、弯矩 M 、剪力 Q 及桩周岩土侧向应力 σ_r 按(E. 24)~(E. 27)计算。此时 $y_0=h_2$ ， $\Delta\varphi$ 和桩底铰支点地基反力根据静力平衡条件计算。

附录 F
(资料性附录)
锚拉桩计算方法

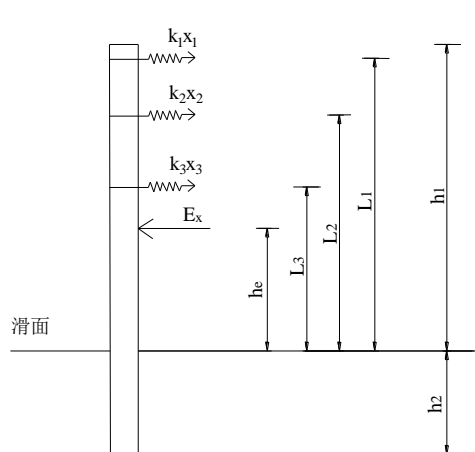
采用结构力学法计算锚拉桩的简图如图F.1所示, 设第*i*根锚索作用点距滑面距离为 L_i , 锚索拉力 T_{Ai} 在水平方向上的分力为 P_{xi} , 锚索的弹性刚度为 k_i , 抗滑桩的抗弯刚度为 EI , 桩在滑面以上的长度为 h_i , 下滑力合力作用点到滑面距离为 h_e , 滑面以下嵌固段长度为 h_2 。

F.1 单根锚索作用时的锚拉桩计算

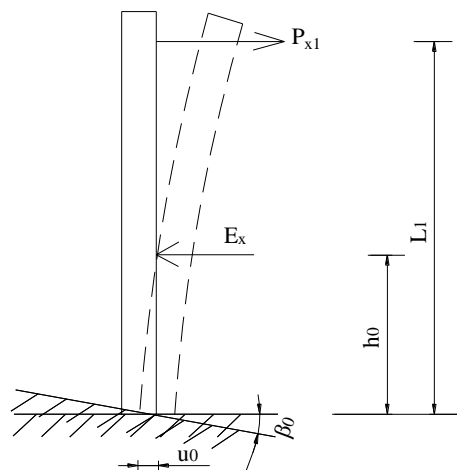
设锚索作用点距滑面距离为 L_1 , 锚索拉力 T_{A1} 在水平方向上的分力为 P_{x1} , 锚索的弹性刚度为 k , 抗滑桩的抗弯刚度为 EI , 桩在滑面以上的长度 L_1 。

取上部桩的基本结构如图F.2所示, 根据结构力学中的力法, 得到以下力法方程:

$$A_{11}P_{x1} + A_{1P} = 0 \quad \dots\dots\dots (F.1)$$



图F.1 锚拉桩的计算简图



图F.2 单锚作用下的上部桩计算简图

其中系数 A_{11} 和 A_{1P} 分别由式(F.2)和式(F.3)计算

$$A_{11} = d_{11} + L_1^2 \overline{b_1} + \overline{u_1} + \frac{1}{k} \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

$$A_{1P} = D_{1P} + L_1 M_P^0 \overline{b_1} + Q_P^0 \overline{u_1} \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

M_P^0 ——滑坡剩余下滑力在嵌固段桩顶产生的力矩(kN·m);

Q_P^0 ——滑坡剩余下滑力在嵌固段桩顶产生的剪力(kN);

$\overline{b_1}$ ——嵌固段桩顶作用单位力矩 $M=1$ 时引起该段桩顶的角变位;

$\overline{u_1}$ ——嵌固段桩顶作用单位力 $Q=1$ 时引起该段桩顶的水平位移(m)。

其中, $\overline{b_1}$ 和 $\overline{u_1}$ 可根据地层情况, 选用“*K*”法或“*m*”法求得。

锚索的弹性系数 k 可由式 (F. 4) 求出

$$k = \frac{E_s A_s}{L_s} \dots\dots\dots (F. 4)$$

式中:

E_s ——锚索的弹性模量 (kPa);

A_s ——锚索的截面面积 (m²);

L_s ——锚索自由段的长度 (m)。

单位变位 δ_{11} 和载变位 Δ_{1P} 可由下列公式求得:

$$\delta_{11} = \int_0^L \frac{\overline{M}_1^2}{EI} ds = \frac{L_1^3}{3EI} \dots\dots\dots (F. 5)$$

$$\Delta_{1P} = \int_0^L \frac{\overline{M}_1 M_P}{EI} ds = -\frac{E_s h_e^2}{6EI} (3L_1 - h_e) \dots\dots\dots (F. 6)$$

解方程 (F. 1) 得到

$$P_{x1} = -\frac{A_{1P}}{A_{11}} \dots\dots\dots (F. 7)$$

抗滑桩在滑面处的弯矩 M_0 和 Q_0 可由叠加法得到:

$$M_0 = P_{x1} L_1 + M_P^0 \dots\dots\dots (F. 8)$$

$$Q_0 = P_{x1} + Q_P^0 \dots\dots\dots (F. 9)$$

桩在滑面处的位移 u_0 和转角 β_0 据变形协调条件, 由嵌固段的桩顶变位得到:

$$u_0 = y_0; \quad \beta_0 = \theta_0 \dots\dots\dots (F. 10)$$

y_0 、 θ_0 可根据其桩底的边界条件由悬臂抗滑桩计算公式求得。

当求出未知力 P_{x1} 后, 对滑面上下的桩体分别计算变位及内力, 据其内力值就可以进行桩的设计。

锚索的拉力 T_{A1} 由下式求解:

$$T_{A1} = P_{x1} / \cos \alpha_1 \dots\dots\dots (F. 11)$$

其中:

α_1 ——锚索与水平面之间的夹角。

据公式 (F. 11), 就可以进行锚索的设计, 并采用与悬臂抗滑桩相同的方法进行桩体设计。

F. 2 多根锚索时的锚拉桩计算

以三根锚索为例, 滑面以上及嵌固段桩的计算简图分别如图 F. 3 和图 F. 4 所示, 据此可建立起三根锚索作用时的力法方程:

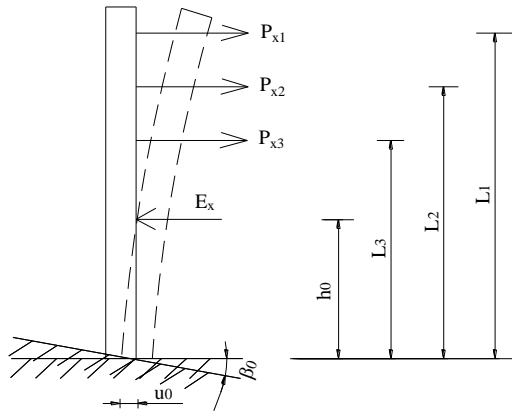


图 F. 3 滑面上部桩的计算简图

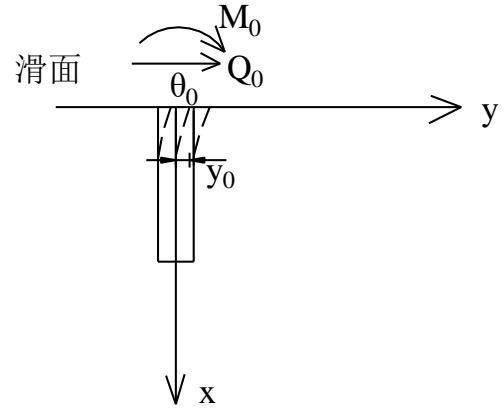


图 F. 4 嵌固段桩计算简图

$$A_{11}P_{x1} + A_{12}P_{x2} + A_{13}P_{x3} + A_{1P} = 0$$

$$A_{21}P_{x1} + A_{22}P_{x2} + A_{23}P_{x3} + A_{2P} = 0 \quad \dots\dots\dots (F. 12)$$

$$A_{31}P_{x1} + A_{32}P_{x2} + A_{33}P_{x3} + A_{3P} = 0$$

其中各系数分别由式 (F. 13) 计算

$$A_{11} = \delta_{11} + L_1^2 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1 + k_1$$

$$A_{12} = A_{21} = \delta_{12} + L_1 L_2 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1$$

$$A_{13} = A_{31} = \delta_{13} + L_1 L_3 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1$$

$$A_{22} = \delta_{22} + L_2^2 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1 + k_2$$

$$A_{23} = A_{32} = \delta_{23} + L_2 L_3 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1 \quad \dots\dots\dots (F. 13)$$

$$A_{33} = \delta_{33} + L_3^2 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1 + k_3$$

$$A_{1P} = \Delta_{1P} + L_1 M_P^0 \bar{\beta}_1 + Q_P^0 \bar{u}_1$$

$$A_{2P} = \Delta_{2P} + L_2 M_P^0 \bar{\beta}_1 + Q_P^0 \bar{u}_1$$

$$A_{3P} = \Delta_{3P} + L_3 M_P^0 \bar{\beta}_1 + Q_P^0 \bar{u}_1$$

单位变位 δ_{ij} 和载变位 Δ_{iP} 由式 (F. 14) 计算.

$$\delta_{ij} = \frac{L_j^2}{6EI} (3L_i - L_j);$$

$$\Delta_{iP} = -\frac{E_x h_e^2}{6EI} (3L_i - h_e) \quad (i=1, 2, 3; \quad j=1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (F. 14)$$

各根锚索的弹性系数 k_i 可由下式求出

$$k_i = \frac{E_s A_{si}}{L_{si}} \dots\dots\dots (F. 15)$$

式中:

E_s ——锚索的弹性模量 (kPa) ;

A_{si} ——第 i 根锚索的截面面积 (m^2) ;

L_{si} ——第 i 根锚索自由段的长度 (m) 。

解式 (F. 12) 方程组, 即可得到未知力 P_{x1} 、 P_{x2} 、 P_{x3} 。嵌固段顶面 (滑面) 的桩体弯矩和剪力可由叠加法得到:

$$M_0 = P_{x1}L_1 + P_{x2}L_2 + P_{x3}L_3 + M_p^0 \dots\dots\dots (F. 16)$$

$$Q_0 = P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + Q_p^0 \dots\dots\dots (F. 17)$$

其他两个初参数据滑面处的变形协调条件得到:

$$u_0 = y_0; \quad \beta_0 = \theta_0 \dots\dots\dots (F. 18)$$

以上计算公式可以推广到多根锚索的计算中, 将其写成矩阵形式即为

$$\{A_{ij}\}[P_{xi}] + \{\Delta_{ip}\} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (F. 19)$$

其中:

$$A_{ii} = \delta_{ii} + L_i^2 \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1 + \frac{1}{k_i};$$

$$A_{ij} = \delta_{ij} + L_i L_j \bar{\beta}_1 + \bar{u}_1; \quad (i \neq j) \dots\dots\dots (F. 20)$$

$$A_{ip} = \Delta_{ip} + L_i M_p^0 \bar{\beta}_1 + Q_p^0 \bar{u}_1;$$

而 y_0 、 θ_0 与单桩时的计算相同, 可据其桩底的边界条件求得。当求出未知力 P_{xi} 后, 对于滑面上下的桩体分别计算变位及内力, 据其内力值进行桩的设计。锚索的拉力 T_{Ai} 可以由下式求得:

$$T_{Ai} = P_{xi} / \cos \alpha_i \dots\dots\dots (F. 21)$$

其中:

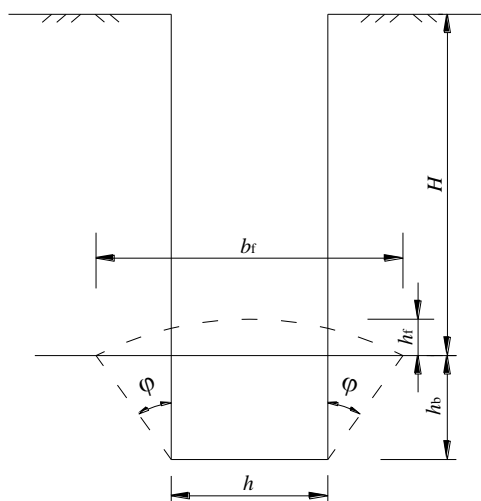
α_i ——第 i 根锚索与水平面之间的夹角。

据公式 (F. 21), 就可以进行各根锚索的设计。抗滑桩的设计与悬臂抗滑桩相同。

附 录 G
(资料性附录)
护壁内力计算方法

G.1 护壁侧压力计算

根据上述土拱效应,护壁岩土侧压力计算公式可采用库伦主动土压力公式计算,其护壁承受的岩土侧压力沿深度呈梯形分布,距地面一定临界深度范围内按三角形分布,临界深度以下视为常数(图 G.1)。



图G.1 护壁开挖形成土拱形成示意图

当 $H < 2h_f$ 时,此时没有形成土拱,护壁侧压力 E_a 表述为:

$$E_a = \gamma(H + h_b) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (G.1)$$

当 $H > 2h_f$ 时,此时已形成土拱,护壁侧压力 E_a 表述为:

$$E_a = \gamma(h_b + h_f) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (G.2)$$

式中:

h_f —— $h_f = b_f / 2f_k$;

H ——桩截面长边长度;

b_f ——土拱长边长度, $b_f = h + 2h_0 \times \tan^2 (45^\circ - \varphi/2)$;

h_b ——每节护壁的高度;

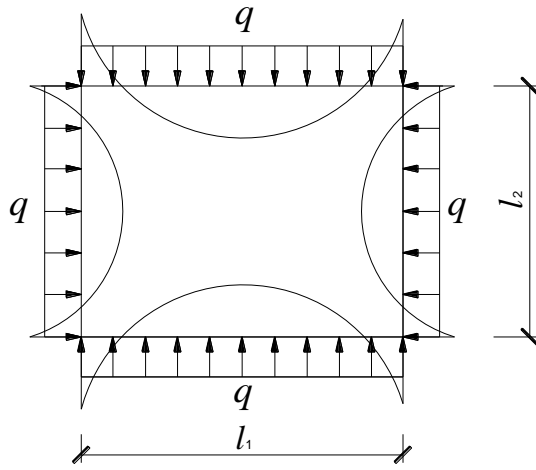
f_k ——土层或岩层的坚固系数,一般土层取 $f_k \approx \tan \varphi$,岩层取 $f_k = R_c / 100$;

R_c ——岩石的单轴抗压强度;

φ ——开挖土层的内摩擦角。

G.2 护壁结构内力计算

由于护壁在施工过程中分节开挖,故按照板结构来进行护壁结构内力计算。矩形护壁结构受侧向压力(俯视图)如图 G.2 所示。



图G.2 护壁结构内力及荷载分布

从受力均匀和合理利用材料的角度考虑，宜将护壁结构设计成节点嵌固的水平框架，由力学知识可知节点的弯矩为：

$$M_b = \frac{1}{12} \times q \times \frac{i_1 \times l_1^2 + i_2 \times l_2^2}{i_1 + i_2} \dots\dots\dots (G.3)$$

式中：

i_1 、 i_2 ——分别为长短边两个方向的线刚度。

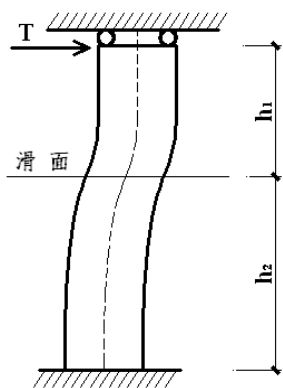
考虑节点施工时的不利因素，在计算板跨中弯矩时，宜将节点弯矩乘以折减系数 0.8，即：

$$(\text{长边跨中弯矩}) M_{k1} = 0.125 \times q l_1^2 - 0.8 M_b \dots\dots\dots (G.4)$$

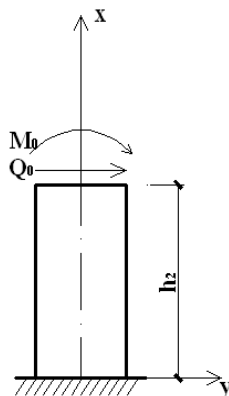
$$(\text{短边跨中弯矩}) M_{k2} = 0.125 \times q l_2^2 - 0.8 M_b \dots\dots\dots (G.5)$$

附 录 H
(资料性附录)
微型桩单桩计算公式

a) 计算简图



(a) 微型桩计算模型



(b) 嵌固段计算简图

图H. 1

图中的 M_0 和 Q_0 分别为微型桩在滑面处的弯矩和剪力。

b) 变形及内力计算公式应根据式 (H. 1) ~ 式 (H. 4) 确定

1) 位移计算公式

$$y = -\bar{m}_0 \frac{2\alpha^2}{K} \varphi_3 - \bar{q}_0 \frac{\alpha}{K} \varphi_4 \quad \dots\dots\dots (\text{H. 1})$$

2) 转角计算公式

$$\theta = -\bar{m}_0 \frac{2\alpha^3}{K} \varphi_2 - \bar{q}_0 \frac{2\alpha^2}{K} \varphi_3 \quad \dots\dots\dots (\text{H. 2})$$

3) 弯矩计算公式

$$M = \bar{m}_0 \varphi_1 + \bar{q}_0 \frac{1}{2\alpha} \varphi_2 \quad \dots\dots\dots (\text{H. 3})$$

4) 剪力计算公式

$$Q = -\bar{m}_0 \alpha \varphi_4 + \bar{q}_0 \varphi_1 \quad \dots\dots\dots (\text{H. 4})$$

其中:

$$\bar{m}_0 = \frac{M_0 \varphi_{1(ah_2)} - Q_0 \frac{1}{2\alpha} \varphi_{2(ah_2)}}{\varphi_{1(ah_2)}^2 + \frac{1}{2} \varphi_{2(ah_2)} \varphi_{4(ah_2)}} ;$$

$$\bar{q}_0 = \frac{M_0 \alpha \varphi_{4(\alpha h_2)} + Q_0 \varphi_{1(\alpha h_2)}}{\varphi_{1(\alpha h_2)}^2 + \frac{1}{2} \varphi_{2(\alpha h_2)} \varphi_{4(\alpha h_2)}};$$

$$\alpha \text{——微型桩的弹性标值,} \quad \alpha = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}};$$

K ——滑床的地基系数;

$$\begin{cases} \varphi_1 = chax \cos ax \\ \varphi_2 = chax \sin ax + shax \cos ax \\ \varphi_3 = shax \sin ax \\ \varphi_4 = chax \sin ax - shax \cos ax \end{cases}$$

$\varphi_1 \sim \varphi_4$ 为双曲线三角函数, 可以从相关的设计手册中查到。

根据试验结果及理论分析, h_1 、 h_2 的取值只影响到弯矩值的大小, 对剪力无影响。为简化计算, 建议在黄土滑坡中, 取 $h_1=h_2=3\sim 5d$ (d 为桩径), 其计算结果是可以满足设计要求的。

附 录 I
(规范性附录)
设计书主要章节

- a) 工程概况;
- b) 工程地质及水文地质条件简述;
- c) 稳定性验算结论;
- d) 设计原则及依据;
- e) 设计措施说明: 按单位工程→分部工程→分项工程分类叙述;
- f) 施工技术要求: 按分项工程分类叙述;
- g) 监测工程: 重要工程需做专项设计;
- h) 图件: 平面布置图、立面图、剖面图、结构详图、监测工程设计图等。

附 录 J
(规范性附录)
设计计算书主要格式

- a) 滑坡推力计算
格式依据附录 D: 滑坡稳定性评价和推力计算公式。
- b) 单桩内力及位移计算
格式依据附录 F: “K 法”计算单桩内力及位移, “m 法”计算单桩内力及位移, 刚性锚固段内力及位移计算。
- c) 单桩及锚索(杆)承载力验算。

附 录 K
(资料性附录)
砂浆与岩土体粘结强度表

表K.1 岩石与锚固体粘结强度特征值

岩石类别	E_{rb} 值 (kPa)	岩石类别	E_{rb} 值 (kPa)
极软岩	135~180	较硬岩	550~900
软岩	180~380	坚硬岩	900~1300
较软岩	380~550		

注1: 表K.1中数据适用于注浆强度等级为M30;

注2: 表K.1中数据仅适用于初步设计, 施工时应通过试验检验;

注3: 岩体结构面发育时, 取表中下限值;

注4: 表K.1中岩石类别根据天然单轴抗压强度 E_r 划分: $E_r < 5\text{MPa}$ 为极软岩; $5\text{MPa} \leq E_r < 15\text{MPa}$ 为软岩; $15\text{MPa} \leq E_r < 30\text{MPa}$ 为较软岩; $30\text{MPa} \leq E_r < 60\text{MPa}$ 为较硬岩; $E_r \geq 60\text{MPa}$ 为坚硬岩。

表K.2 土体与锚固体粘结强度特征值

土层种类	土的状态	E_{rb} 值 (kPa)
粘性土	坚硬	32~40
	硬塑	25~32
	可塑	20~25
	软塑	15~20
砂土	松散	30~50
	稍密	50~70
	中密	70~105
	密实	105~140
碎石	稍密	60~80
	中密	80~110
	密实	110~150

注1: 表K.2中数据适用于注浆强度等级为M30;

注2: 表 K.2 中数据仅适用于初步设计, 施工时应通过试验检验。