CECS CECS XXX:202X

|  |
| --- |
| 中国工程建设协会标准  **柔性棚洞防护结构技术规程**  Technical specification for flexible shed  （征求意见稿）  20XX年月 |

前 言

本规程是根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2017年第二批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字﹝2017﹞031号）的要求，由西南交通大学会、中冶建筑研究总院有限公司会同有关单位共同编制完成。本规程在编制过程中，规程编制组经广泛调查研究，认真总结科研成果和工程实践经验，参考了国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为8章和5个附录。主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、勘查、工程设计、质量检验、运输、安装及验收、保养和维修等。

本规程由中国工程建设标准化协会结构焊接专业委员会归口管理，由西南交通大学负责解释。在执行过程中，如发现需要修改和补充之处，请将意见和建议寄至解释单位（地址：四川省成都市二环路北一段111号，邮政编码：610031，E-mail：[xuhu@swjtu.edu.cn](mailto:qixin@swjtu.edu.cn)）。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 主编单位： | 西南交通大学  中冶建筑研究总院有限公司 |  |
| 参编单位： | 成都西南交通大学设计研究院有限公司  中铁第一勘察设计院集团有限公司  中铁第五勘察设计院集团有限公司  香港理工大学  四川省华地建设工程有限责任公司  四川省地质工程勘察院集团有限公司  中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司  贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司  广西交通规划勘察设计研究院有限公司  山东省交通规划设计院  浙江省工程勘察设计院集团有限公司  中国水利水电第七工程局有限公司  [中国国际工程咨询有限公司](http://www.baidu.com/link?url=QRrmlZjWPc8WlbmsN6BI2yLBQYGUfTfjYaVei_KFMWya6gJSo0eNwPJFcnokcw6W" \t "https://www.baidu.com/_blank)  四川藏区高速公路有限责任公司  四川省公路规划勘察设计研究院有限公司  四川省交通运输厅交通勘察设计研究院有限公司  四川省交通运输厅公路局  四川省交通运输厅质监局  四川奥思特边坡防护工程有限公司  中交铁道设计研究总院有限公司  中交公路规划设计院有限公司  广西交通科学研究院有限公司  湖南省交通规划勘察设计院有限公司 |  |
| 主要起草人： | 余志祥 齐 欣 傅彦青 许 浒 韩祥森 赵 雷 张一帆 赵世春 余正良 袁 松 龙万学 程 强 刘耀鹏 王希宝 马计平 岳 超 杨少军 张丽君 金云涛 骆丽茹 秦中平 赵松江 张 东 李正兵 李永林 陈 广 高艳龙 左雅娅 王华俊 郭绍影 吴焕恒 谭 恳 陈 勇 程 炜 贾 亮 张 方 刘 琛 唐世雄 蒋建良 张红日 刘峥嵘 |  |
| 主要审查人： |  |  |

中国工程建设标准化协会

202x年x 月x

目  次

[1 总则 1](#_Toc52138318)

[2 术语和符号 2](#_Toc52138319)

[2.1 术语 2](#_Toc52138320)

[2.2 符号 3](#_Toc52138321)

[3 基本规定 4](#_Toc52138322)

[4 勘查 6](#_Toc52138323)

[4.1 一般规定 6](#_Toc52138324)

[4.2地质勘查要求 6](#_Toc52138325)

[4.3 危岩（落石）特征分析 7](#_Toc52138326)

[5 工程设计 8](#_Toc52138327)

[5.1 一般规定 8](#_Toc52138328)

[5.2 设计原则 8](#_Toc52138329)

[5.3 结构设计 13](#_Toc52138330)

[5.4 构造要求 21](#_Toc52138331)

[5.5 基础设计 22](#_Toc52138332)

[6 质量检验 24](#_Toc52138333)

[6.1 一般要求 24](#_Toc52138334)

[6.2 质量证明 24](#_Toc52138335)

[6.3 材料、部件及整体性能检验 24](#_Toc52138336)

[7 运输、安装及验收 25](#_Toc52138337)

[7.1包装、运输、贮存 25](#_Toc52138338)

[7.2 安装 25](#_Toc52138339)

[7.3工程验收 26](#_Toc52138340)

[8 保养和维修 28](#_Toc52138342)

[附录A：危岩体稳定性分析方法与评价 30](#_Toc52138343)

[附录B：危岩落石计算分析方法 35](#_Toc52138347)

[附录C: 材料性能检验 39](#_Toc52138350)

[附录D: 部件性能检验 41](#_Toc52138354)

[附录E: 整体性能检验 48](#_Toc52138358)

[本规程用词说明 54](#_Toc52138365)

[引用标准名录 55](#_Toc52138366)

CONTENTS

[1 General Provisions 1](#_Toc52138318)

[2 Terms and Symbols 2](#_Toc52138319)

[2.1 Terms 2](#_Toc52138320)

[2.2 Symbols 3](#_Toc52138321)

[3 General Requirements 4](#_Toc52138322)

[4 Prospecting 6](#_Toc52138323)

[4.1 General Requirements 6](#_Toc52138324)

[4.2 Geological Exploration Requirements 6](#_Toc52138325)

[4.3 Analysis on Characteristics of Dangerous Rock (Rockfall) 7](#_Toc52138326)

[5 Engineering Design 8](#_Toc52138327)

[5.1 General Requirements 8](#_Toc52138328)

[5.2 Design Principles 8](#_Toc52138329)

[5.3 Structural Design 13](#_Toc52138330)

[5.4 Construction Requirements 21](#_Toc52138331)

[5.5 Foundation Design 22](#_Toc52138332)

[6 Quality Inspection 24](#_Toc52138333)

[6.1 General Requirements 24](#_Toc52138334)

[6.2 Quality Certificate 24](#_Toc52138335)

[6.3 Material, Component and Overall Performance Inspection 24](#_Toc52138336)

[7 Transportation, Installation and Acceptance 25](#_Toc52138337)

[7.1 Packaging, Transportation and Storage 25](#_Toc52138338)

[7.2 Installation 25](#_Toc52138339)

[7.3 Acceptance of Construction Quality 26](#_Toc52138340)

[8 Maintenance 28](#_Toc52138342)

[Appendix A Stability Analysis Method and Evaluation of Dangerous Rock 30](#_Toc52138343)

[Appendix B Calculation and Analysis Method of Rockfall 35](#_Toc52138347)

[Appendix C Material Performance Tests 39](#_Toc52138350)

[Appendix D Component Property Tests 41](#_Toc52138354)

[Appendix E Overall Performance Tests 48](#_Toc52138358)

[Explanation of Wording In this Specification 54](#_Toc52138365)

[List of Quoted Standard 55](#_Toc52138366)

**1 总则**

**1.0.1** 为了在柔性棚洞设计中，做到安全适用、技术先进、经济合理、节约能源、质量可靠、生态环保，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于城镇建设、铁路、公路、水利、水电、国土资源、矿山、军事洞库区等领域边坡落石、崩塌体等地质灾害防护中采用的柔性棚洞的勘查、设计、施工及维护。

**1.0.3** 柔性棚洞可作为边坡落石防护工程的一部分，与其他工程措施配合使用，也可独立使用，使用时应明确柔性棚洞的使用年限。

**1.0.4** 设计柔性棚洞和选择结构方案时，应同时考虑钢结构制作、运输、安装和混凝土浇筑、施工以及建成后的环境影响、维护保养等问题。

**1.0.5** 柔性棚洞工程勘查、设计、施工及维护，除遵照本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

**2 术语和符号**

**2.****1** 术语

**2.1.1** 柔性棚洞flexible shed

以钢材或其他材料作为支撑结构，以柔性网、缓冲单元和附加支撑构件作为柔性缓冲层形成缓冲系统，以及基础组合而成的用于拦截崩塌落石的结构系统。

**2.1.2** 正常服役防护能级service protective energy（SEL）

柔性棚洞在正常工作状态下能够承受连续冲击的落石能量。

**2.1.3** 极限防护能级 maximum protective energy（MEL）

柔性棚洞能够成功拦截的落石最大冲击能量。

**2.1.4** 安全等级protection grade

根据柔性棚洞在防护工程中的作用、保护对象的重要性、结构破坏的危害程度、维护的难易程度以及经济性等因素，所确定的防护设防等级。

**2.1.5** 落石rockfall

在重力或其他外力作用下突然从斜坡上向下坠落或滚落的岩石块体。

**2.1.6** 缓冲系统buffer structure

由柔性网，缓冲单元、钢丝绳和其他钢构件组成，用于拦截落石，并将作用力传递至支撑结构。

**2.1.7** 支撑结构support structure

由钢材或其他材料制成的结构，用于支撑柔性缓冲层，并固定于基础。

**2.1.8** 缓冲单元energy dissipating device

配置于结构上的用于吸收冲击能量的装置。

**2.1.9** 柔性网flexible net

用钢丝绳、钢丝编制或缠绕形成的金属网。

**2.1.10** 缓冲距离buffer elongation

柔性棚洞拦截落石过程中，缓冲系统沿冲击方向的最大变形。

**2.1.11** 直接分析设计法 direct analysis method of design

直接考虑对结构稳定性和强度性能有显著影响的初始几何缺陷、残余应力、材料非线性、节点连接刚度等因素，以整个结构体系为对象进行二阶非线性分析的设计方法。

**2.2** 符号

**2.2.1** 作用和作用效应

——柔性棚洞结构极限防护能级；

**——落石最大冲击能量；

**——缓冲系统中柔性网最大拉力；

**——钢丝绳最大拉力；

*Pn,max*——网片的冲击作用力设计值

**——钢构件轴心压力；

**，**——同一截面处绕x轴和y轴的弯矩。

**2.2.2** 计算指标

**——缓冲系统在遭受其极限防护能级相应的落石冲击时的最大缓冲位移标准值；

**——缓冲单元的工作内力；

**——单个缓冲单元最大变形量；

**——缓冲单元静态启动力；

*F*dt——缓冲单元动态启动力；

——网片承载力；

——钢丝绳的拉力设计值；

**——钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

**——钢丝绳的抗拉设计强度；

**——跨度；

**——钢构件的毛截面面积；

**——对x轴和y轴的净截面模量；

**——在弯矩作用平面内较大受压纤维的毛截面模量；

**——整体结构中网片的耗能比例系数；

**——网片承载力变异系数；

**——钢丝绳承载力储备系数；

**——截面塑性发展系数；

——钢构件稳定设计计算参数；

** ——构件截面对y轴的长细比；

** ——弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定系数；

k ——安全系数。

**3 基本规定**

**3.0.1** 柔性棚洞主要应包含支撑结构、缓冲系统、基础。

**3.0.2** 柔性棚洞按照支撑结构形式可分为拱形柔性棚洞、框架式柔性棚洞、悬挑式柔性棚洞（图3.0.2）。

**缓冲系统**

**支撑结构**

**基础**

**缓冲系统**

**支撑结构**

**基础**

**基础**

**支撑结构**

**缓冲系统**

（a）拱形柔性棚洞 （b） 框架式柔性棚洞 （c） 悬挑式柔性棚洞

图3.0.2 常见柔性棚洞形式

**【条文说明】：3.0.2**柔性棚洞按照主要根据支撑结构形式进行划分，可分为拱形柔性棚洞、框架式柔性棚洞、悬挑式柔性棚洞等，亦可采用上述三种形式组合。支撑结构材料可采用钢材、钢筋混凝土或其他材料。

**3.0.3** 柔性棚洞缓冲层按照其工作原理可分为抛出式和拦截式（图3.0.3）。

**【条文说明】：3.0.3**根据柔性棚洞缓冲系统的受力特征和防护效果，可分为抛出式棚洞和拦截式棚洞。抛出式棚洞的主要防护特征为落石弹出防护区域，拦截式棚洞的防护特征为落石落入缓冲系统后仍保留在系统中，两种结构的工作机理如下图所示：

抛出式 拦截式

图3.0.3柔性棚洞缓冲层

**3.0.4** 柔性棚洞极限防护能级不宜超过2000kJ，极限防护能级超过2000kJ时应进行专项设计。

**3.0.5** 柔性棚洞在进行设计时，应根据被保护物的重要性、结构破坏可能产生的后果（危及人的生命、产生社会影响）、更换维护的难易程度以及经济性等因素，采用不同的安全等级，柔性棚洞结构的安全等级划分应符合表3.0.5的规定。

表3.0.5 柔性棚洞结构安全等级划分

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 安全等级 | 危害程度 | 破坏后果 | 常见对象 |
| 一级 | 高 | 车辆倾覆，桥梁、隧道洞口等构造物、路面、路基及重要建筑物严重受损，人员伤亡严重 | 轨道交通工程，高速公路和一级公路 |
| 二级 | 中 | 桥梁、隧道洞口等构造物、路面、路基受损，人员伤亡少 | 二级及以下公路 |
| 三级 | 低 | 桥梁、隧道洞口等构造物、路面、路基轻微受损，几乎无人员伤亡 | 非干线交通工程、临时工程 |

注：1.当满足破坏后果和对象任一条件时，按安全等级较高设定。

2.当临时工程中保护对象有较高要求，或临时工程受损可能造成较大人员伤亡和财产损失时，应提高危害程度划分等级；

3.表中未提及的防护对象，可由设计单位或建设单位根据工程实际情况确定其安全等级分类，且不应低于本条要求。

**3.0.6** 一般情况下，柔性棚洞设计使用年限，安全等级为一级不应低于50年，安全等级为二级不应低于25年，安全等级为三级不应低于5年。

**3.0.7** 柔性棚洞在规定的设计使用年限内应具有足够的可靠度，结构可靠度计算应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153的规定。

**3.0.8** 柔性棚洞在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求：

1 在正常施工和工作时，应能承受可能出现的各种设计荷载作用。

2 在正常维护下应具有耐久性能。

3 在设计规定的偶然事件发生时及发生后，应能保持必须的整体性。

**3.0.9** 柔性棚洞应根据其防护要求和耐久性要求进行材料选用。

**【条文说明】：3.0.9** 作为长期暴露于自然环境中的工程结构，设计时应合理选用材料。防护要求包含安全等级、极限防护能级等，根据防护能级应充分考虑材料的力学性能。根据耐久性要求，充分考虑材料的化学性能，包括自然条件、工作环境等。

**4 勘查**

**4.1** 一般规定

**4.1.1** 本规程规定的勘查方法适用于柔性棚洞上部边坡危岩（落石）及棚洞基础的工程地质勘查。

**4.1.2** 危岩（落石）工程地质勘查应查明建设区边坡的工程地质条件，分析影响危岩（落石）稳定性的工程地质因素，评价危岩（落石）稳定性现状，分析危岩（落石）失稳运动特征。为柔性棚洞工程的设计提供地质资料，参与危岩（落石）治理方案的设计研究和治理效果的检验。

**4.1.3** 棚洞基础的工程地质勘查应查明棚洞结构基础范围及其附近的工程地质条件，提供岩土体结构组成、岩土体物理力学性能、地下水特征、地基承载力等参数，为柔性棚洞基础设计提供地质依据。

**4.1.4** 本规程规定的工程地质勘查可结合建筑物区工程地质勘查进行，当存在对工程有影响的失稳或潜在失稳危岩（落石），应进行专门性勘查。

**4.2**柔性棚洞工程地质勘查要求

**4.2.1** 柔性棚洞工程勘查前除应收集边坡及邻近边坡的工程地质资料外，尚应取得下列资料：

**1** 拟建建筑物区边坡的总平面布置图；

**2** 拟建场地的整平高程和挖方、填方情况；

**3** 工程区域的相关气象资料；

**4** 工程区域相关的水文资料；

**5** 对工程产生影响的工业和市政管线、电力及通讯线缆等人类工程活动资料。

**4.2.2** 柔性棚洞工程地质勘查应包括下列内容：

**1** 场地地形和场地所在地貌单元；

**2** 场地附近区域地质构造与地震；

**3** 岩土时代、成因、类型、性状、覆盖层厚度、基岩面的形态和坡度、岩石风化和完整程度；

**4** 岩土体物理力学性能；

**5** 主要结构面特别是软弱结构面的类型、产状、发育程度、延伸程度、结合程度、充填状况、充水状况、组合关系、力学属性和临空面的关系；

**6** 地下水水位、水量、类型、主要含水层分布情况、补给及动态变化情况；

**7** 岩土的透水性和地下水的出露情况；

**8** 地下水、土对支挡结构材料的腐蚀性；

**9** 危岩（落石）的分布、规模、控制性结构面、历史运动路径、威胁范围等特征；

**10** 植被发育分布特征。

**4.2.3** 柔性棚洞工程地质勘查应进行地质测绘和调查，并符合下列规定：

**1** 地质测绘和调查的范围，应包括工程所涉及的边坡及可能对建筑物安全有影响的地段；

**2** 地质测绘可根据地形地貌条件选用人工测绘、无人机航测、三维激光扫描等手段进行；

**3** 地质测绘的比例尺，可根据边坡的规模、地形地质条件确定，平面测绘应为1:500～1:1000，剖面测绘应为1:200～1:500，规模较大危岩体剖面测绘比例不应小于1：200。

**4.2.4** 柔性棚洞工程地质勘查应进行地质勘探：

**1** 勘探范围应包括坡面区域和坡面外围一定的区域。边坡上部勘探范围应延伸至改段斜坡的分水岭附近，下部范围应包括受威胁对象，横向应包括可能影响建筑物区的范围并适当外扩；

**2** 勘探可采用坑（井）探、槽探、钻探和物探等方法；

**3** 勘探线应沿危岩可能崩塌方向布置，从危岩后缘稳定区域一定范围到崩塌可能威胁范围，且尽量通过危岩的重心。

**4.2.5** 柔性棚洞工程地质勘查应进行取样试验，并符合下列规定：

**1** 试验样品应在母岩及治理工程可能涉及范围内采取；

**2** 优先在探槽、探坑（井）中采集原状试样，尽可能采集软弱夹层原状试样；

**3** 采样测试应符合国家现行标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266、《土工试验方法标准》GB/T 50123》的规定。

**4.3** 危岩（落石）分析

**4.3.1** 危岩（落石）应根据危岩体块体形态、结构面边界条件，进行成因机制分析，判断危岩体可能的失稳破坏模式（滑移、倾倒、坠落）；

**4.3.2** 危岩（落石）应采用定性分析结合定量计算的方法进行稳定性分析，可采用赤平投影、块体理论等，考虑降雨工况、地震工况，分析计算危岩体的稳定性；危岩体稳定性分析方法见本规程附录A；

**4.3.3** 危岩（落石）应进行运动特征分析，根据历史落石事件或危岩落石试验的规模、形态、运动路径、停积位置等，计算或模拟危岩落石的运动轨迹、冲击动能和弹跳高度等运动参数，运动特征分析宜采用三维落石数值仿真分析，并采用二维落石数值分析进行复核；危岩落石计算分析方法见本规程附录B。

**5 工程设计**

**5.1** 一般规定

**5.1.1** 柔性棚洞的工程设计应根据地质勘查结果，开展设计，保证结构可靠性。

**5.1.2** 柔性棚洞设计应满足采购、质量检验、施工安装、工程验收和后期维护的需要，设计文件应包括设计说明和柔性棚洞布置图等相关图件，应包括下列内容：

**1** 场地工程地质条件，冲击能量分析结果；

**2** 柔性棚洞选型与布置；

**3** 结构设计；

**4** 基础设计；

**5** 材料、构件及结构检验；

**6** 保养和维护要求；

**7** 施工安装方法。

**5.1.3** 柔性棚洞设计选用的材料或构件应满足结构承载力相关技术要求，对于尚无现行标准规定试验方法的，设计宜指定专用试验方法。

**5.1.4** 柔性棚洞所用材料或构件的防腐蚀设计应满足相关规范使用年限要求。

**5.2** 设计原则

**5.2.1** 柔性棚洞设计应确定布设位置和范围、正常服役防护能级、极限防护能级、结构形式、棚洞横断面及建筑限界、棚洞基础等。

**【条文说明】：5.2.1**对于选用定型产品的工程，应根据实际勘查、评估结果进行分析设计，确定其可靠性和适用性。

**5.2.2** 应在分析预测坡面滚石运动轨迹基础上，结合被保护对象位置和特点，并按以下原则选择柔性棚洞形式：

1 临谷、临海线路宜选择抛出式柔性棚洞；

2 盘山线路等宜选择拦截式柔性棚洞；

3 其他位置可根据场地条件选择合适柔性棚洞形式。

**5.2.3** 柔性棚洞内轮廓应考虑缓冲系统在设计能级下的缓冲变形侵界影响，保证不侵入建筑限界。

**【条文说明】：5.2.3**柔性棚洞横断面不但要考虑车辆行使的空间要求，还要考虑车辆行驶的安全、快捷、舒适和防灾。柔性棚洞建筑限界由车道（轨道）宽度、侧向宽度、余宽、检修道或人行道组成。棚洞内轮廓设计依据建筑限界，在内轮廓不侵入建筑限界的原则下，还应考虑棚洞路面、排水、检修、方便棚洞可能有的机电交通工程设施布置，还要根据棚洞结构形式和施工方法确定安全、经济、合理的断面形式和尺寸。一般在建筑限界的基础上适当增大不小于50cm为宜。

柔性棚洞结构系统依靠缓冲系统消耗落石冲击动能，但在成功拦截落石情况下，若系统变形过大，造成侵界，仍有可能构成威胁，因此在设计时应首先考虑侵界安全距离，同时控制缓冲系统最大冲击变形量。柔性棚洞在遭受动能等于其极限设计能级的落石冲击时所发生的最大缓冲位移标准值可通过有限元计算或冲击定型试验得到。

**5.2.4** 结构设计时，应分别考虑正常服役防护能级和极限防护能级两种设计状态。在正常服役防护能级作用下，除缓冲单元外，结构各构件应处于弹性工作状态；在极限防护能级作用下，可采用弹塑性分析设计，但应保证系统的整体性。

**5.2.5** 柔性棚洞结构的正常服役防护能级和极限防护能级应根据安全等级按下式确定：

*E*s=*kE*k （5.2.5-1）

*E*u=3*E*s （5.2.5-2）

式中：*E*s ——柔性棚洞结构正常服役防护能级（kJ）；

*E*u ——柔性棚洞结构极限防护能级（kJ）；

——落石最大冲击能量（kJ）；

*k* ——安全系数，安全等级为一级、二级、三级时，分别取1.2、1.1和1.0。

**5.2.6** 柔性棚洞可采用有限元方法进行设计，计算分析应符合下列规定：

**1** 柔性棚洞结构的计算分析应在初始外形与初始应力分布的基础上进行；

**2** 应考虑支撑结构、缓冲系统的空间协同工作；

**3** 计算时宜采用动力学方法；

**4** 采用静力学方法时，应考虑动力冲击影响系数；

**5** 柔性棚洞的结构和构件应考虑结构的几何非线性和材料非线性，宜考虑结构和构件的初始缺陷采用直接分析设计法进行分析与设计；

**6** 支撑结构分析计算时宜采用具有压弯特性的空间梁单元；

**7** 缓冲系统可采用索单元、梁单元、桁架单元或其他等效力学模型；

**8** 缓冲单元的P-Δ关系应有试验测试依据，测试方法可参考本规程附录D.1.3~D.1.4；

**9** 结构构件的边界条件应与实际相符。

**【条文说明】：5.2.6**

1、根据大量国内外柔性棚洞结构工程的现场调查和试验研究发现，整体结构和各部件的承载力只是满足设计要求的基本因素，其关键因素在于各部件的组配方式是否足够合理，即通过承载力、变形设计及连接、构造措施是否能保证各部件间充分协同工作。采用有限元计算方法时，选用的计算程序应能满足柔性棚洞结构在高速冲击作用下的大变形、大位移、不均匀连接滑移等非线性问题的分析要求。

2、采用有限元计算时，计算程序应能完整再现整个冲击过程，其技术条件应符合本规程和国家现行有关标准的规定。柔性棚洞结构的有限元方法设计应通过整体结构分析明确各部件的耗能、内力和变形。

网片可简化为正交索网、斜交索网、离散梁单元或膜单元；应考虑与支座、网片的接触滑移影响。

其基本设计工况宜采用中心点施加冲击荷载作用，在此基础上，根据不同安全等级，再选择分别进行承载力校核、变形验算、不同冲击工况，包括：垂直冲击、斜向冲击及不同冲击位置条件下的设计计算。

4、动力冲击影响系数可采用动量定理计算，冲击作用时间不宜大于0.2s。

也可采用如下方法换算：

借助Hertz碰撞理论近似估算冲击力*P*为：

 （5.2.6-1）

 （5.2.6-2）

 （5.2.6-3）

 （5.2.6-4）

式中：*E*eq为等效模量，*E*1、*E*2分别为两个碰撞体的弹性模量；、分别为两个碰撞物体的泊松比；*δ*为总变形量，*δ*1、*δ*2分别为两个碰撞物体的变形量。

根据Hertz理论，假设落石碰撞防护系统为一个质量为*m*1的小球以*v*1的速度撞击一个质量为*m*2、*r*2>>*r*1，速度=0的球体。由牛顿第二定律：

 （5.2.6-5）

根据式（5.2.6-5）得：

 （5.2.6-6）

 （5.2.6-7）

 （5.2.6-8）

考虑网片的非弹性变形的影响，可将冲击作用下柔性网的刚度进行修正得到其等效模量。将网片的刚度进行膜单元化处理[20]，得网片最大刚度为：

**** （5.2.6-9）

其中，*a*，*b*为常系数；为单元*f*中与节点*e*相交的四个边线的边长；为四条边线上的拉力；为单元对节点*e*的弹性刚度。

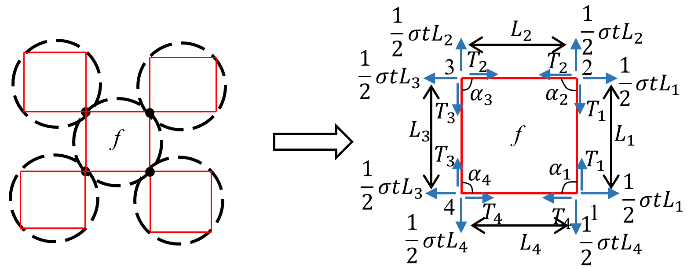


图5.2.6-1 单元内力

据此，网片的最大模量为：

 （5.2.6-10）

其中，*A*为网片横截面等效面积。据此，式（5.2.6-2）中的等效模量*E*eq修正为：

 （5.2.6-11）

5、结构的初始缺陷包含结构整体的初始几何缺陷和构件的初始几何缺陷、残余应力及初偏心。结构的初始几何缺陷包括节点位置的安装偏差、杆件的初弯曲、杆件对节点的偏心等。一般，结构的整体初始几何缺陷的最大值可根据施工验收规范所规定的最大允许安装偏差取值或最低阶屈曲模态分布。

钢构件宜按下式考虑初始缺陷，该缺陷值包含了残余应力的影响：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.2.6-12） |

式中： ——离构件端部x处的初始变形值（mm）；

——构件中点处的初始变形值（mm）；

——离构件端部的距离（mm）；

——构件的总长度（mm）；

构件初始弯曲缺陷值，可按本规程表5.2.6-1取构件综合缺陷代表值。当允许材料的弹塑性发展和内力重分布时，除应按本条规定考虑构件初始缺陷外，还应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017的相关规定，构件截面应为双轴对称截面或单轴对称截面，塑性铰处截面板件宽厚比等级应为S1、S2级，其出现的截面或区域应保证有足够的转动能力。

表5.2.6-1 构件综合缺陷代表值

|  |  |
| --- | --- |
| 对应于GB50017-2017中表7.2.1-1和表7.2.1-2中的柱子曲线 | 二阶分析采用的值 |
| a类 | 1/400 |
| b类 | 1/350 |
| c类 | 1/300 |
| d类 | 1/250 |

7、膜单元的等效可采用以下方法，等效薄膜单位面积的质量与相应规格金属环形网片保持一致，密度ρ同样取金属环形网钢丝密度7850kg/m3。则薄膜厚度t0根据质量一致原则确定：

 （5.2.6-13）

式中mn为n圈规格环形网每平米质量。则每种规格网片相应的等效薄膜厚度如本规程

表5.2.6-2。

表5.2.6-2 不同规格网片对应的薄膜厚度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 网片规格 | 等效厚度（mm） | 网片规格 | 等效厚度（mm） |
| R5/3/300 | 0.42 | R12/3/300 | 1.00 |
| R7/3/300 | 0.60 | R16/3/300 | 1.33 |
| R9/3/300 | 0.76 | R19/3/300 | 1.58 |

等效膜单元的本构关系

采用多段线性方式拟合等效膜单元的应力应变曲线，第一线性段终点的横坐标定义为“零刚度应变”，如图9所示。的大小只与不同规格的网环圈数有关。

 （5.2.6-14）

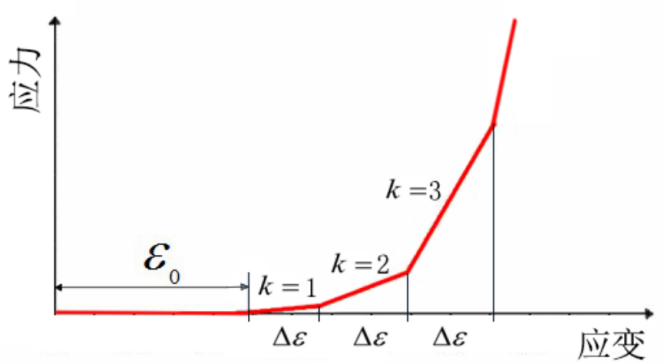


图5.2.6-2 等效应力应变曲线

为除曲线水平段外的第线性段，以此类推。为每一线性段的应变增量，。每一线性段的斜率即切线模量的计算公式为指数函数：

 （5.2.6-15）

此外，弹性模量取值，泊松比取值。

8、宜采用动力测试试验数据，试验条件有限时，可通过对静力试验数据进行合理等效。

**5.2.7** 柔性棚洞的设计时，应考虑支撑结构直接承受冲击作用，在该工况下柔性棚洞结构应保持整体性。

**【条文说明】：5.2.7** 从既有研究来看，支撑结构立柱受到冲击时，易导致支撑结构破坏。虽然这种工况发生概率较小，但实际仍然存在，因此要求设计时应考虑这一不利作用。当考虑这种作用时，允许柔性棚洞结构发生破坏，但不应出现解体崩溃。

**5.2.8** 9度区柔性棚洞，应考虑地震作用下的落石堆载和抗倒塌验算。

**【条文说明】：5.2.8** 9度区柔性棚洞，在地震作用下，落石会产生堆积，因此除了服役能级作用下的连续冲击验算和最大能级冲击验算外，还需要验算多体落石的堆载。柔性棚洞大多修建于山区铁路、公路干线等生命线工程，地震作用下，承担着灾区救援和物质运输的路线保通的重要功能，因此柔性棚洞需要保持结构体系的完整性，需要开展地震作用下的抗倒塌验算。

堆载质量按照极限能级采用式（5.2.16-16）进行换算，应用集中质量法，将集中质量布置于最不利点位，开展地震作用下的抗倒塌验算，抗倒塌验算方法参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010：

集中质量： （5.2.16-16）

式中：*ν* 为等效冲击速度，宜取15m/s.

**5.3** 结构设计

**5.3.1** 柔性棚洞结构设计应包括缓冲系统设计和支撑结构设计。

**5.3.2** 缓冲系统中的网片承载力应满足下式的要求：

[*R*n]/*α*m≥*P*n,max （5.3.2-1）

式中：*P*n,max —— 网片的冲击作用力设计值；

[*R*n ] —— 网片承载力；可参考表5.3.2。

*α*m——承载力变异系数，可取1.2。

表：5.3.2 网片承载力参考值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 圈数  网片承载力  长宽比 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 |
| 3 | 155 | 74 | 68 | 67 | 64 |
| 5 | 265 | 126 | 116 | 114 | 110 |
| 7 | 380 | 182 | 166 | 163 | 158 |
| 9 | 500 | 239 | 218 | 215 | 208 |
| 11 | 626 | 299 | 273 | 269 | 260 |
| 13 | 757 | 362 | 330 | 326 | 315 |

**【条文说明】：5.3.2** 网片承载力可采用试验测定和理论计算两种方法。

试验测定：试验方法可参考本规程附录D.1.1，并保证网片几何参数、材料参数，边界条件与实际条件保持一致。

理论计算方法：计算示意图及拉力—位移曲线如本规程图5.3.2-1所示。

1. 几何参数：长宽尺寸分别为，；网环圈数为，网环内径为*d*，钢丝直径为，加载区域半径为*R*p，*s*0为加载区域边缘距网片边界的最小距离；
2. 强度参数：钢丝屈服强度为*σ*y，环链拉伸两阶段轴向力发展程度分别为，，等效纤维应力分别为，；等效纤维应变分别为，；
3. 刚度参数：环链拉力位移曲线两阶段刚度分别为*k*1，*k*2，边界刚度为*k*s

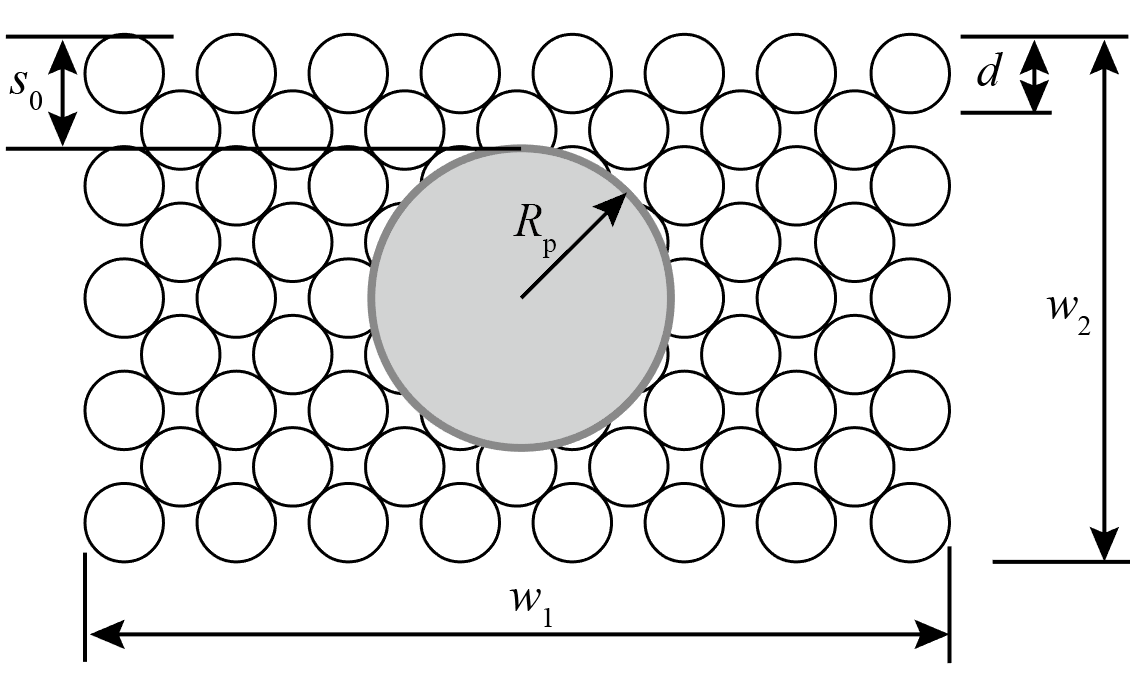
 

图5.3.2-1 计算示意图及拉力—位移曲线

承载能力：

 （5.3.2-2）

其中：

 （5.3.2-3）

*L*0为纤维单元初始长度，可通过勾股定理计算：

 （5.3.2-4）

边界刚度的取值需通过边界允许的最大变形确定，当*k*s取值大于5000kN/mm及以上时，环形网片边界可视为刚性边界。

 （5.3.2-5）

环链拉伸两阶段轴向力发展程度分别为*γ*N1，*γ*N2：

 （5.3.2-6）

**5.3.3** 缓冲系统中的钢构件应按下列公式进行承载力和稳定性验算：

**1** 除圆管截面外，弯矩作用在两个主平面内的拉弯构件和压弯构件，其截面强度应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.3.3-1） |

弯矩作用在两个主平面内的圆形截面拉弯构件和压弯构件，其截面强度应按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.3.3-2） |

式中： ——同一截面处轴心压力设计值（N）；

 ——分别为同一截面处对x轴和y轴的弯矩设计值（N·mm）；

 ——截面塑性发展系数，按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017相关规定取值；

 ——截面塑性发展系数修正值，正常服役防护能级和极限防护能级，分别取1和1.2

——圆形构件的截面塑性发展系数，按现行国家标准《钢结构设计标准》 GB 50017相关规定取值；

——圆形构件的截面塑性发展系数修正值，正常服役防护能级和极限防护能级，分别取1和1.2

——构件的净截面面积（mm2）；

 ——构件的净截面模量（mm3）。

**2** 当钢构件不考虑初始缺陷时，应按下列公式进行整体稳定验算：

对于双向压弯圆管，当柱段中没有很大横向力或集中弯矩时其整体稳定按下列公式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.3.3-3） |
|  |  | （5.3.3-4） |
|  |  | （5.3.3-5） |
|  |  | （5.3.3-6） |
|  |  | （5.3.3-7） |
|  |  | （5.3.3-8） |

式中：  —— 轴心受压构件的整体稳定系数，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》 GB

50017的相关规定，此时构件的计算长度系数取1.0；

 —— 计算双向压弯圆管构件整体稳定时采用的弯矩值；

 —— 为构件A端关于x、y轴的弯矩（N·mm）；

 —— 为构件B端关于x、y轴的弯矩（N·mm）；

 —— 计算双向压弯整体稳定时采用的等效弯矩系数；

 —— 为x轴端弯矩（N·mm）；构件无反弯点时取同号，构件有反弯点时取异号；

；

 —— 为y轴端弯矩（N·mm）；构件无反弯点时取同号，构件有反弯点时取异号；

；

 —— 根据构件最大长细比计算的欧拉力。

对于双轴对称实腹式工字形和箱形截面的压弯构件，其稳定性应按下列公式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.3.3-9） |
|  |  | （5.3.3-10） |
|  |  | （5.3.3-11） |

式中：—— 对强轴x-x和弱轴y-y的轴心受压构件整体稳定系数，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》 GB 50017的相关规定，此时构件的计算长度系数取1.0；

 —— 均匀弯曲的受弯构件整体稳定性系数，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》 GB 50017的相关规定；

 —— 所计算构件段范围内对强轴和弱轴的最大弯矩设计值（N·mm）；

 —— 对强轴和弱轴的毛截面模量（mm3）；

 —— 等效弯矩系数，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017的相关规定；

 —— 等效弯矩系数，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017的相关规定。

**3** 当钢构件考虑初始缺陷时，仅需按本条规定进行截面强度验算：

非圆管截面：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 有足够侧向支撑： |  | （5.3.3-12） |
| 无足够侧向支撑： |  | （5.3.3-13） |

圆管截面：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5.3.3-14） |

**5.3.4** 柔性棚洞中钢丝绳的承载力，应满足下式的要求:

[*T*r] /*α*m,r≥*T*r,max （5.3.4）

式中： **——钢丝绳拉力设计值；

** —— 钢丝绳破断拉力值，应符合现行国家标准《钢丝绳通用技术条件》 GB/T 20118的相关规定；可按本规程附录D中D.1.2条确定；

*α*m,r ——钢丝绳承载力储备系数，可取2.0。

**5.3.5** 柔性棚洞的极限防护能级高于250kJ时，系统中需设置缓冲单元。

**5.3.6** 缓冲单元应按以下原则进行设置：

**1** 结构构件不应阻碍缓冲单元的变形和相连钢丝绳的滑移

2 缓冲单元应与钢丝绳直接相连，宜布置在锚固端附近

3 缓冲单元拉伸变形量不宜小于1m，不宜大于4m

**5.3.7** 设置于连接钢丝绳上的缓冲单元可采用串联、并联和串并结合的配置方式.

**【条文说明】：5.3.7**若采用串联方式导致变形量过大时，可采用并联方式，并联后启动力可取各并联缓冲单元启动力之和。

**5.3.8** 需要设置缓冲单元的柔性钢棚洞结构，缓冲单元吸能比例不宜小于70%。

**5.3.9** 设置于钢丝绳上的缓冲单元数量可按下式确定：

 （5.3.9）

式中： *η* —— 吸能比例系数，可取0.7；

** —— 考虑缓冲单元未完全工作的调整系数，宜取1.3；

—— 单一缓冲单元的耗能能力，缓冲单元耗能能力参考本规程附录D.1.3.

**5.3.10** 缓冲单元的启动力与钢丝绳拉力设计值应满足下式要求：

0.2*T*r,max≤*F*st ≤ 0.5*T*r,max （5.3.10-1）

*F*dt ≤ 0.7 *T*r,max （5.3.10-2）

式中：**——缓冲单元静态启动力；

**——缓冲单元动态启动力。

**【条文说明】：5.3.10** 缓冲单元应有合适的启动力以保证在结构受到冲击时能够启动工作，同时应具备足够的行程以满足最小耗能需求。经试验证明，缓冲单元在动力冲击作用下的启动力和峰值工作内力均明显大于静力试验结果，因此，在设计时应采用相应的动力力学性能指标作为设计依据。

**5.3.11** 支撑结构用于支撑上部缓冲系统、保证结构的整体性能。支撑结构可采用钢结构、混凝土结构或其他结构形式，其结构设计应进行承载力、稳定和变形验算。支撑结构构件的计算，应按我国现行设计规范《混凝土结构设计规范》GB50010和《钢结构设计标准》GB50017的规定执行。

**5.3.12** 支撑结构宜与缓冲系统采用整体协同计算。

**5.3.13** 当支撑结构与缓冲系统单独计算时，应以缓冲系统的传递荷载、边界条件作为设计依据。

**5.3.14** 抛出式柔性棚洞应进行落石抛出控制计算。

【条文说明】：5.3.14 落石抛出控制计算可采用有限元数值计算，亦可采用如下理论计算：

**落石抛出运动控制计算方法**

当落石与倾角为*θ*的系统网面发生碰撞时，假定碰撞加速度为，经分解后，落石沿网片切向加速度为，法向加速度为（见图4）：

 （5.3.14-1）

 （5.3.14-2）



图5.3.14-1 落石碰撞回弹

发生回弹后，定义落石加速度方向与网面的法向夹角为，大小为*a*2，沿拦截网面切向的落石加速度分量为*a*2*τ*，沿法向的加速度分量为*a*2*n*，在平面坐标系中，落石在*y*轴向的加速度为*a*2*y*，落石在*z*轴向的加速度为*a*2*z*。其公式为

 （5.3.14-3）

 （5.3.14-4）

 （5.3.14-5）

 （5.3.14-6）

根据牛顿第二定律，落石碰撞产生的*y*向加速度使得落石受到*y*方向抛掷力，当该力足够大时，可让落石外抛出一定距离，提高落石抛出能力。

在常见的Hertz碰撞问题中，由于接触碰撞面不会发生大变形，因此易知随着靶面倾角增加，法向冲击力降低，切向冲击力逐渐加大。但是，落石与柔性网的冲击接触与一般的Hertz接触不同，主要原因是网片遭受落石冲击作用时会发生非常显著的大变形，容易对落石形成“包裹”作用，网片与落石的接触作用具有复杂的三维空间分布特征。随着倾角的增加，总体来看网片遭受的切向冲击力会趋于增加，但由于“包裹效应”影响，使得落石底面的法向接触力始终处于控制地位。



（a） 网片垂直冲击极限变形[15]



（b） 网片斜冲极限变形

图5.3.14-2 落石抛掷轨迹

Fig.5.3.14-2 Trajectory of rockfall

将落石的外抛轨迹假定为抛物线，为了保证落石抛出，落石需要充分的水平外抛距离*l*/2和最大回弹高度*H*（见图5）。同时，为了保证系统具有可恢复性，还须抑制系统的非弹性变形，即冲击拦截完成后，系统需要有足够的弹性势能储备能力，并在落石回弹抛出过程中转换为抛掷动能。图5中，点*D*为落石与网片的初始接触点，位于网片中央；点*A*为钢柱支承端，点*C*为钢柱悬挑端，*AC*为钢柱长度*l*，*CJ*为*l*/2；*BC*为网片理论长度*l*0；∠*θ*为网片与支撑钢柱倾角；点*E*为网片最大变形时落石位置，*DE*为最大冲击变形*h*；点*C*为简图坐标原点。根据图5，当落石回弹高度*h*g＞Δ*h*，便可控制落石外抛。

根据Z. X. Yu等[16]可得垂直冲击作用下，网片极限变形Δmax（见图5（a））为

 （5.3.14-7）

 （5.3.14-8）

 （5.3.14-9）

式中：*l*i为最大冲击变形时，非接触区网片长度；为落石的外包直径；*h*R为残余拦截高度；*h*c为落石与网片的接触高度；*l*i0为网片初始拦截高度，理论值取*l*0；*ny*为*y*方向网环行数；为接触区网环行数；为接触区网环行数理论值；*D*为网环直径；为挠度系数，其取值按经验统计为0.55～0.9。

当落石冲击斜置网片至最低点时（见图5.3.14-2），由于滑轮效应，可假定网片拉力*T*1和*T*2相等，且等于网片的张力*T*，由于图5.3.14-2 （a）和图5.3.14-2 （b）两种冲击状态下网片的极限伸长量一定，根据椭圆第一定义，以点*D*为原点建立局部坐标系，以点*B*和点*C*为焦点，可建立点*E*的椭圆轨迹方程

 （5.3.14-10）

*h*与Δmax的夹角为*θ*，即*h*所在直线方程为

 （5.3.14-11）

根据椭圆轨迹方程和直线方程可求得*h*：

 （5.3.14-12）

即Δ*h*为

 （5.3.14-13）

此时网片的伸长量Δ*l*0为



（5.3.14-14）

在拉伸试验中，网环塑性变形量小[16]，故本文假设忽略网片的塑性伸长量，此时的网片变形遵循胡克定律，即网片张力*T*为

 （5.3.14-15）

式中：*k*为网片的等效刚度。

根据式（16）-（17），可确定*α*和*β*的角度：

 （5.3.14-16）

 （5.3.14-17）

对力进行分解，得到：

 （5.3.14-18）

 （5.3.14-19）

式中：*m*为落石质量，*g*为重力加速度。

根据能量守恒定律，得*E*点落石的速度*v*为

 （5.3.14-20）

式中：为耗能系数，根据数学统计取值范围为0.65～0.8；*I*d为设防冲击能量。

假设在最低点处，落石运动方向与合力方向一致，则落石速度*y*向分量和*z*向分量为

 （5.3.14-21）

 （5.3.14-22）

根据几何解析，当落石被抛至系统边缘位置时，落石回弹的高度*h*g和*H*的计算方法为

 （5.3.14-23）

 （5.3.14-24）

式中：*t*为落石被抛至系统边缘位置的时间，*t* = *l*/2*vy*。

式（7）～（24）可编程循环迭代计算，获得满足*h*g＞Δ*h*的*h*g临界值及与之相应的临界倾角*θ*。

现行行业标准《公路工程技术标准》JTG B01中对公路净高有严格的规范要求，为了保证高能级冲击下系统变形不侵界，防护系统铺设高度*H*s应通过计算分析予以确定，计算方法见下式：

 （5.3.14-25）

式中：*h*为网片最大冲击变形，可由计算或者足尺试验确定；为经验系数，可取1.1～1.2，用于考虑实际安装条件影响或者理论计算的误差对冲击变形的影响；*H*r为公路净高，根据现行《公路工程技术标准》JTG B01取值。

**5.4** 构造要求

**5.4.1** 柔性棚洞的构造设计应符合下列规定：

**1** 应确保结构各部件之间具备可靠连接；

**2** 应满足支撑绳与立柱之间的相对滑移要求，同时保证缓冲单元的充分启动；

**3** 应确保冲击荷载作用能够充分有效地传递至基础；

**4** 网片与支撑绳之间的连接应能满足网片沿钢丝绳的滑移要求；

**5** 钢丝绳在立柱两端部位应有可靠支撑，并应保证自由滑动，钢丝绳与支撑点接触处的转弯半径不应小于钢丝绳直径的5倍。

**【条文说明】：5.4.1**  钢丝绳的最小破断力随着其弯折角度的大小而变化明显。为保证结构在正常工作状态中，钢丝绳有足够的承载力储备，应尽量增大与钢丝绳接触位置支座的转弯半径。

**5.4.2** 柔性棚洞结构选型应使传力明确，并尽量减小次应力影响，节点处各构件的内力宜交汇于一点，其节点构造应简单紧凑。

**5.4.3** 主要受力构件及其连接件宜符合下列要求：

**1** 钢板厚度不应小于5mm；

**2** 角钢截面不应小于45×4；

**3** 圆钢直径不应小于16；

**4** 钢管壁厚不应小于4mm。

**5.4.4** 钢丝绳夹应符合现行国家标准《钢丝绳夹》GB/T 5976的有关规定。

**5.4.5** 钢丝绳铝合金压制接头应符合现行国家标准《钢丝绳铝合金压制接头》GB/T 6946的有关规定。

**5.4.6** 卸扣应符合现行国家标准《一般起重用D形和弓形锻造卸扣》 GB/T 25854的有关规定。

**5.5** 基础设计

**5.5.1**基础包括钢丝绳的基础以及支撑结构的基础。

**5.5.2** 基础设计之前应开展工程地质调查及勘查工作，查明地基工程地质条件，确定设计参数。

**5.5.3** 支撑结构基础应符合下列规定：

1 基础埋深应超过冻土深度且不宜小于0.5m，并应满足稳定性和承载能力的要求。当地基为不易风化的完整基岩时，应采用钻孔锚杆基础，否则应采用混凝土基础，并应根据承载力和稳定性要求确定基础的埋深和尺寸；

**2** 基础混凝土的强度等级不应低于C25。当地下水有侵蚀性时，水泥应按有关规定选用；

**3** 基础纵向受力钢筋直径不应小于16mm，净距不宜小于120mm。当用束筋时，每束不宜多于3根。混凝土必须填筑密实，钢筋保护层厚度应满足现行国家标准《混凝土结构耐久性标准》 GB/T 50476中相关要求；

**4** 纵向受力钢筋的截断点应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定计算；

**5** 箍筋宜采用封闭式，直径不宜小于14mm，间距不应大于200mm；

**6** 基础两侧及受压边应配置纵向构造钢筋，其间距宜为200mm～400mm，直径不宜小于14mm；

**7** 地脚螺栓锚杆外露段以及与其相邻的埋入地层的不小于100mm区段表面应采用热浸镀锌处理，镀层厚度不应小于55µm；

**8** 混凝土基础开挖不宜采用爆破作业。

**5.5.4**钢丝绳锚杆基础应符合下列规定：

**1** 钢丝绳锚杆位置的地基条件可以满足设计锚固力要求时，所需锚杆根数及长度应根据基础设计内力值确定；若地基条件不能满足设计锚固力要求时，可考虑采用混凝土基础，其尺寸和埋深应满足稳定性和承载能力的要求，基础混凝土强度等级不应低于C25；

**2** 钢丝绳锚杆锚固段长度不宜小于2.5m。单根钢绳锚杆不能满足要求时，应增加锚绳根数，设计计算需要时，应增加压力注浆锚杆，将钢绳锚杆固定在压力注浆锚杆上，提高钢绳锚杆的锚固力和稳定性；

**3** 钢丝绳锚杆孔径不应小于42mm；

**4** 锚绳锚杆钻孔注浆材料宜采用水泥浆或水泥砂浆，其强度不宜低于25MPa。注浆采用孔底返浆法，注浆压力宜为0.2MPa～0.4MPa；

**5** 钢绳锚杆和压力注浆钢筋锚杆施工完成后应按总数的5%随机抽样进行抗拔力检测，当有特殊要求时，可适当增加；

**6** 钢绳锚杆混凝土基础不宜采用爆破作业。

**5.5.5** 不同极限防护能级的柔性棚洞缓冲系统内的立柱、钢丝绳、网片设计内力应在专项设计报告中提供，并应根据试验对设计值进行校核。

**【条文说明】：5.5.5** 当连接内力较大时，可以采用多根钢丝绳，或每根钢丝绳上面连缓冲单元的位置再并联出多根绳子，端部再增设相应设计拉力的锚杆，以确保达到基础设计内力最小值的要求。

柔性棚洞结构的拉锚系统必须经过严格的设计计算，对于拉力较大的基础需要将钢丝绳锚杆替换为压力注浆钢筋锚杆。本节锚杆设计部分涉及的注浆体与锚孔壁的粘结强度、锚杆与注浆体的粘结强度及锚杆强度计算采用的是传统意义的安全系数法计算，主要参考现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086的有关规定。

**6 质量检验**

**6.1** 一般要求

**6.1.1** 质量检验包括核查厂家提供的质量证明文件，进行材料性能检验、部件性能检验和整体性能检验。

**6.1.2** 部件性能检验和材料性能检验应覆盖柔性棚洞防护结构的所有部件和材料。抽查数量应按工程设计要求，工程设计无具体要求时可按现行国家标准《计数抽样检验程序》GB/T 2828的规定进行抽样。

**6.2** 质量证明

**6.2.1** 厂家提供的质量证明文件应包括部件生产加工合格证明、出厂检验证明、原材料材质证明、盐雾试验报告、柔性棚洞防护结构产品试验报告。

**6.2.2** 柔性棚洞防护结构产品试验报告应包括产品体系配置、钢结构可靠性计算结果、网片抗顶破力试验报告、缓冲单元启动力和耗能值试验报告等。

**6.3** 材料、部件及整体性能检验

**6.3.1** 柔性棚洞防护结构应按本规程附录C进行材料性能检验、按本规程附录D部件性能检验、按本规程附录E进行整体结构性能检验。

**7 运输、安装及验收**

**7.1**包装、运输、贮存

**7.1.1** 每件产品包装上应带有一个标签，其内容包括：

**1** 制造单位名称或代号；

**2** 产品自检合格证号；

**3** 生产日期（年、月）；

**4** 产品型号、规格；

**5** 检验员工号；

**6** 出厂检验结果。

**7.1.2** 产品包装应具有足够强度，保证产品能够经受多次装卸、运输无损伤、变形、降低精度、残失，能够安全可靠地运抵目的地：

**1** 构件装运使用卡车、平板车等运输工具。

**2** 装车时构件与构件应整齐堆码，构件与车辆之间应妥善捆扎，避免车辆颠簸而发生构件散落；

**3** 装车和运输过程中应注意保护构件，特别是一些较薄的连接板，应尽量避免与其他构件直接接触；

**4** 搬运时应避免拖挂，不应抛卸；

**5** 连接板应用临时螺栓拧紧在构件本体上与构件一同发运。

**7.1.3** 对于柔性网片，包装形式应采取单张网成卷捆扎裸装，每卷至少应用铁丝扎紧三处。如用户需要其他包装方式，经双方协商，也可按其要求包装交货。

**7.1.4** 产品应贮存在整洁、干燥通风和无腐蚀物侵蚀的地方，宜与地面隔离堆放，堆码高度不宜超过3m。

**7.2** 安装

**7.2.1** 柔性棚洞防护结构的安装应符合设计文件和生产厂家的安装指导手册的相关规定。

**7.2.2** 柔性棚洞防护工程施工应充分考虑与其它工序的合理规划，精细组织，编制合理可行的施工组织设计，并符合下列规定：

**1** 柔性防护棚洞工程施工前应检查进场原材料、构件及施工设备的技术性能是否符合设计要求。

**2** 柔性防护棚洞工程施工安装时，不得改变设计规定的各类构件的安装位置及其连接关系、连接程度。

**3** 柔性防护棚洞工程施工应按坡面准备与施工放线、锚杆与基础施工、支撑结构安装、缓冲系统安装的顺序组织施工。一个连续布置的柔性棚洞或一组相互关联的柔性棚洞，宜在完成全部锚杆或基础放线定位后，再开始锚杆与基础的施工作业。

**4** 应合理规划和修建便于施工人员行走、材料搬运的坡面施工通道，并尽量结合后期检查维护通道。

**7.2.3** 柔性棚洞防护结构布置应符合设计要求，当需适应现场工程条件对柔性棚洞防护工程的布置进行适当调整时，除满足设计文件中相关规定外，还应符合下列规定：

**1** 局部调整锚杆或混凝土基础位置时，不应减少设计要求的锚杆或混凝土基础数量。

**2** 两相邻支撑结构基座间距离调整量不应大于设计值的20%，且一榀的总长度正负误差不应超过0.2m，且这种调整不导致基座间连线走向的变化。

**3** 同一基座的间距和相对方位误差应严格控制在能顺利安装基座的范围内。

**7.2.4** 锚杆施工应符合现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086及设计文件的规定。

* + 1. 柔性棚洞的安装，除满足设计文件的规定外，还应符合下列规定：

**1** 拍盘出口部位钢结构部分拱架应采用分段吊装方式进行安装，先安装拱架柱脚立柱部分，再在地面将弧形梁部分三段整体拼好后吊装，与立柱合拢。每安装完成两榀拱架后，立即将拱架之间的系杆和支撑安装完成；

**2** 拍盘中间部位钢结构部分拱架应采用整体吊装方式进行安装，在地面将拱架分三段整体拼好后吊装。每安装完成两榀拱架后，应立即完成拱架之间的系杆和支撑的安装；

**3** 钢丝绳类构件带有缓冲单元时，应与钢丝绳构件同时安装；

**4** 采用地层钻孔锚杆固定的基座，宜用砂浆找平安装处地面；

**5** 包含格栅网时，在承载网的上坡侧铺挂格栅网片并进行各网片边缘间以格栅网与承载网间的扎结；

**6** 各柔性网片间及其与支撑绳间的缝合连接应确保每一个边缘网孔都被连接。

**7.3**工程验收

**7.3.1** 公路柔性棚洞工程应按照现行行业标准《公路工程质量检验评定标准》JTG F80/1规定的方法进行质量检验评定。

**7.3.2** 柔性棚洞的验收应符合下列规定：

**1** 柔性棚洞防护工程应满足设计文件的要求；

**2** 柔性棚洞防护工程各部件规格、数量以及各部件之间的连接方式应与整体性能检验报告或整体性能证明报告中的规定一致；

**3** 柔性棚洞防护工程材料以及构件的物理、化学性能检验，减压环力学性能，锁紧扣件力学性能等应符合本规程第6章质量检验的要求并经抽检，合格后方可使用；

**4** 柔性棚洞基础混凝土所用的水泥、砂、石、水和外掺剂的规格和质量必须符合有关标准的要求，按规定的配合比施工；基础结构几何尺寸，埋置深度，强度，预埋件位置深度等应符合设计和规范要求；地基强度应符合设计要求；

**5** 钢筋锚杆与钢丝绳锚杆插入孔内的长度不得短于设计长度的95%。根数不得少于设计数量；

**6** 现场锚杆试验结果应满足钢筋锚杆与钢丝绳锚杆设计拉应力要求。

**7.3.3** 构件及基础实测项目应符合表7.3.3的规定：

表7.3.3 构件及基础实测项目

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项次 | 检查项目 | 规定值或允许偏差 | 检查方法和频率 | 权值 |
| 1 | 防护网孔间距（mm） | ±30 | 直尺、塞尺：抽检1% | 2 |
| 2 | 环网钢丝股数 | 0 | 抽检10% | 2 |
| 3 | 钢拱柱高度（mm） | ±50 | 全检 | 1 |
| 4 | 立柱脚中距 | ±200 | 全检 | 1 |
| 5 | 镀锌层厚度（μm） | 钢柱≥85 | 测厚仪：抽检5% | 2 |
| 紧固件≥50 |
| 镀锌钢丝≥33 | 试验室：抽检1% |

**7.3.4** 柔性棚洞外观鉴定应符合下列规定：

**1** 基础混凝土应密实平整，无裂缝、翘曲、蜂窝、麻面等缺陷。不符合要求时每处减

1分。

**2** 金属构件表面不得有锈蚀、漏镀等缺陷。不符合要求时，每处减1分。

**3** 防护网片应与缝合绳连接牢靠，不得漏缝空格，钢拱柱、横向支撑钢管与基础连接正确，不符合要求时每处减2分。

**4** 钢结构上铺设的防护网片整体上不应有明显的个别凹凸现象，曲线段应圆滑顺畅。不符合要求时每处减2分。

**5** 紧固件固定牢固，减压环、钢丝绳数量、位置正确。不符合要求时每处减2分。

**7.3.5** 柔性棚洞防护结构工程项目应根据使用场景分别按《公路工程竣（交）工验收办法》（交通部2004年第3号令）和《铁路建设项目竣工验收交接办法》（铁道部2008年第23号令）的规定进行竣（交）工验收。

**8 保养和维修**

**8.0.1** 柔性棚洞防护结构保养和维修应根据保养维修手册进行。

**【条文说明】：8.0.1**维修保养手册可由承包商会同材料供应商和生产安装厂家、设计院提供，承包商应就其要求向业主方或管理方说明和指导。保养维修工作宜委托专业公司专业队伍进行。

**8.0.2** 维修管理责任方必须对维修保养计划书、检修记录、检修报告书、修改记录的文档进行保管。

**8.0.3** 每年一次的日常检查宜在初冬进行，每年两次的日常检查则宜分别在初冬和春末进行。当遭遇当地十年一遇或几十年一遇的暴风雨或风暴袭击后，或者是发生地震后，应增加进行日常检查。

**8.0.4** 缓冲系统是柔性棚洞的主要耗能结构，需要在使用过程中定期维护、清洁、保养，及早替换和处理有缺陷的构件与节点，保证柔性棚洞的正常使用。缓冲系统的检查维护主要项目为：

**1** 检查钢结构是否有变形、开裂、破坏：钢结构整体有变形情况出现，应对相应部件进行更换；有局部开裂、破坏，应先评估破坏程度，分析破坏原因和该部分的受力情况，若修补后能够达到结构要求则现场修补并做好防腐措施，若破坏结构对系统性能有较大影响则须更换该部件；

**2** 检查钢结构表面是否有锈蚀：棚洞钢架中若出现锈斑应及时查明诱因并记录，人工除锈后用热镀锌修补液修复局部防腐层；

**3** 检查焊缝质量问题：焊缝开裂，可直接进行补焊；焊缝有未焊透、夹渣、气孔等缺陷是，应重焊；焊缝有咬边、弧坑时，应重焊；焊瘤处应彻底铲除重焊。

**8.0.5** 对于有裂纹或已经断裂的螺栓，应查明破环原因，作详细记录并及时更换。对于松动的螺栓在检查时上紧。如果需拧紧的是高强度螺栓，还应根据螺母的类型（摩擦型或承压型）及强度等级的要求，用示功扳手将螺栓拧至规定的力矩。为了避免引起其他螺栓超载，更换螺栓时应每个进行。如果螺栓损害程度大，需更换的数量较多，为确保安全，修复时，应在卸载状态下进行。

**8.0.6** 缓冲系统中的柔性网片是柔性棚洞的主要拦截构件，网片不平整应及时整理；配件（如扣件、螺栓、垫片等）若出现松动偏移，须及时紧固并进行记录，同时扩大检测范围，确保连接紧固；配件断裂应查明并记录原因然后更换；轻度起锈可做防锈处理，锈蚀严重或断裂应更换新品。

**8.0.7** 缓冲单元元件需要在使用过程中定期维护、清洁、保养，及早替换和处理有缺陷的构件与节点，保证柔性棚洞的正常使用。缓冲单元若有启动痕迹，应判断是否达到其工作消能的程度，从外观判断，若其启动后的直径缩小至原来直径的2/3，应更换新的缓冲单元；若缓冲单元启动，未达到正常工作能级，但出现损坏、偏移等现象，应更换新的缓冲单元；缓冲单元贯穿的拦截钢绞线，应处于紧绷状态，若未达到要求，应调节，并给予一定的张紧力，张紧力不宜小于5kN。

**8.0.8**常规巡检中应及时清理发现的细小落石。若有较大落石造成网片破坏，甚至钢架变形、破坏等严重情况，必须立即通知相关部门并着手准备清理并恢复钢架及网片，确保棚洞的有效防护。对于落石情况，应详细记录发生的时间及落石数量，并保存冲击后棚洞、落石状态的照片，便于评估系统防护性能和棚洞安装位置的落石危害情况。

**附录A** **危岩体稳定性分析方法与评价**

**A.1 一般规定**

**A.1.1** 危岩体稳定性计算所采用的荷载为危岩体自重、裂隙水压力和地震力。

**A.1.2** 危岩体稳定性计算所采用的工况可分为下列三种情形，各工况考虑的荷载组合应符合下列规定：

**1** 工况1，现状工况：考虑危岩体自重和裂隙水压力，对坠落式危岩不考虑裂隙水压力；

**2** 工况2，暴雨工况：考虑危岩体自重和暴雨时裂隙水压力；

**3** 工况3，地震工况：考虑危岩体自重、现状时裂隙水压力和地震力，对坠落式危岩不考虑裂隙水压。

**A.2 危岩体稳定性计算**

**A.2.1** 危岩的稳定性应根据危岩范围、规模、危岩破坏模式及已经出现的变形破坏迹象，采用工程类比法进行定性判断。当危岩破坏模式难以确定时，应同时进行各种可能破坏模式的危岩稳定性计算。

**A.2.2** 危岩稳定性计算中，裂隙水压力可按下式计算:

 （A.2.2）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*V* | —— | 裂隙水压力（kN/m）； |
| *h*w | —— | 裂隙充水高度（m），对于危岩体后缘裂隙排水不畅的，在现状工况时按实际调查取值，在暴雨工况时可取裂隙深度的1/3～2/3。 |

**A.2.3** 危岩稳定性计算中，地震力方向可视为水平，地震力大小可按下式计算：

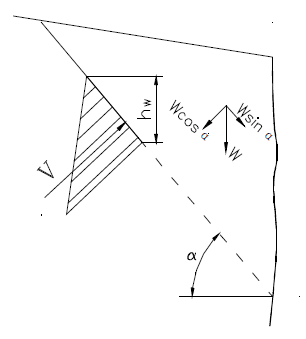
 （A.2.3）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*Q* | —— | 作用于危岩体上的地震力（kN/m）； |
| *W* | —— | 危岩体自重（kN/m）； |
| *ζ*e | —— | 地震系数，取0.05。 |

**A.2.4** 滑移式危岩体稳定性计算模型如图A.2.4所示，危岩体稳定性系数应按下式计算：

 （A.2.4）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*V* | —— | 裂隙水压力（kN/m），根据不同工况按式（A.2.2）计算； |
| *Q* | —— | 地震力（kN/m），根据式（A.2.3）计算； |
| *F* | —— | 危岩体稳定性系数； |
| *C* | —— | 后缘裂隙粘聚力标准值（kPa），当裂隙未贯通时，取贯通段和未贯通段粘聚力标准值按长度加权的平均值，未贯通段粘聚力标准值取岩石粘聚力标准值的0.4倍； |
| *φ* | —— | 后缘裂隙内摩擦角标准值（°）； |
| *α* | —— | 滑面倾角（°）。 |



图A.2.4 滑移式危岩体稳定性计算模型

**A.2.5** 倾倒式危岩体稳定性计算应符合下列规定：

**1** 由后缘岩体抗拉强度控制时，计算模型如图A.2.5-1，危岩体稳定性系数按下列公式计算：

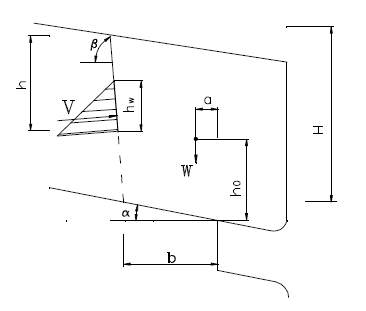
危岩体重心在倾覆点之外时：

 （A.2.5-1）

危岩体重心在倾覆点之内时：

 （A.2.5-2）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*h* | —— | 后缘裂隙深度（m）； |
| *H* | —— | 后缘裂缝上端到未贯通段下端的垂直距离（m）； |
| *a* | —— | 危岩体重心到倾覆点之间的距离（m）； |
| *b* | —— | 后缘裂隙未贯通段下端到倾覆点之间的水平距离（m）； |
| *h*0 | —— | 危岩体重心到倾覆点的垂直距离（m）； |
| *f*lk | —— | 危岩体抗拉强度标准值（kPa），根据岩石抗拉强度标准值乘以0.4的折减系数确定； |
| *α* | —— | 危岩体与基座接触面倾角（°）； |
| *β* | —— | 后缘裂隙倾角（°）。 |

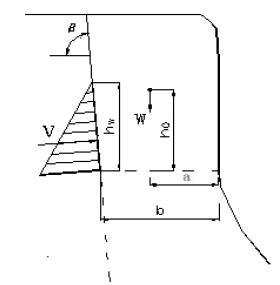


图A.2.5-1 倾倒式危岩体稳定性计算模型（后缘岩体抗拉控制）

**2** 由底部岩体抗拉强度控制时，计算模型如图A.2.5-2，危岩体稳定性系数按下列公式计算：

 （A.2.5-3）

式中各符号意义同前。



图A.2.5-2 倾倒式危岩体稳定性计算模型（底部岩体抗拉控制）

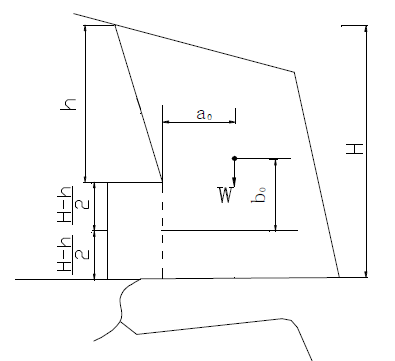
**A.2.6** 坠落式危岩体稳定性计算应符合下列规定：

**1** 对后缘有陡倾裂隙的悬挑式危岩计算模型如图A.2.6-1，按下列公式计算，取两种计算结果中较小值：

 （A.2.6-1）

 （A.2.6-2）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*ζ* | —— | 危岩抗弯力矩计算系数，依据潜在破坏面形态取值，一般取1/12～1/16，当潜在破坏面为矩形时可取1/16； |
| *a*0 | —— | 危岩体重心到潜在破坏面的水平距离（m）； |
| *b*0 | —— | 危岩体重心到过潜在破坏面形心的铅垂距离（m）； |
| *f*lk | —— | 危岩体抗拉强度标准值（kPa），根据岩石抗拉强度标准值乘以0.2的折减系数确定； |
| *C* | —— | 危岩体粘聚力标准值（kPa）； |
| *φ* | —— | 危岩体内摩擦角标准值（°）； |



图A.2.6-1 坠落式危岩体稳定性计算模型（后缘有陡倾裂隙）

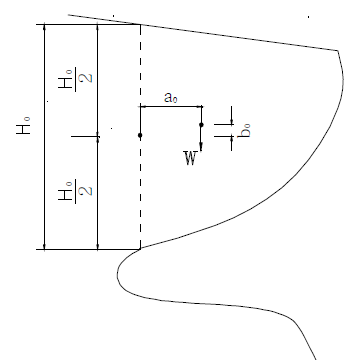
**2** 对后缘无陡倾裂隙的悬挑式危岩计算模型如图A.2.6-2，按下列公式计算，取两种计算结果中较小值：

 （A.2.6-3）

 （A.2.6-4）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*H*0 | —— | 危岩体后缘潜在破坏面高度（m）； |
| *f*lk | —— | 危岩体抗拉强度标准值（kPa），根据岩石抗拉强度标准值乘以0.3的折减系数确定； |

其它符号意义同前。



图A.2.6-2 坠落式危岩体稳定性计算模型（后缘无陡倾裂隙）

**A.3** 危岩体稳定性评价

**A.3.1** 危岩体稳定状态应根据稳定系按表A.3.1确定。

表A.3.1 危岩体稳定状态

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 危岩稳定性系数*F* | | 危岩稳定状态 | | |
| 不稳定 | 基本稳定 | 稳定 |
| 危岩类型 | 滑塌式危岩 | *F*<1.0 | 1.0≤*F*<1.3 | *F*≥1.3 |
| 倾倒式危岩 | *F*<1.0 | 1.0≤*F*<1.5 | *F*≥1.5 |
| 坠落式危岩 | *F*<1.0 | 1.0≤*F*<1.5 | *F*≥1.5 |

**A.3.2** 当某一工况危岩体稳定系数大于或等于安全系数时，危岩在该工况下的稳定性可视为满足要求。

**A.3.3** 危岩稳定性安全系数应根据危岩防治工程等级和危岩类型，按表A.3.3确定。

表A.3.3 危岩体加固设计安全系数取值建议

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 危岩类型 | 危岩防治工程安全等级 | | | | | |
| 一级 | | 二级 | | 三级 | |
| 工况1、2 | 工况3 | 工况1、2 | 工况3 | 工况1、2 | 工况3 |
| 滑移式危岩 | 1.4 | 1.15 | 1.3 | 1.10 | 1.20 | 1.05 |
| 倾倒式危岩 | 1.5 | 1.20 | 1.4 | 1.15 | 1.30 | 1.10 |
| 坠落式危岩 | 1.6 | 1.25 | 1.5 | 1.20 | 1.40 | 1.15 |

**附录B** **危岩落石计算分析方法**

B.1 崩塌危岩落石冲击力

**B.1.1** 崩塌危岩落石冲击力可按下列公式计算：

垂直向：

 （B.1.1-1）

水平向：

 （B.1.1-2）

 （B.1.1-3）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*q*Xmax、*q*Ymax | —— | 分别为水平向和垂直向最大分布荷载（kPa）； |
| *G* | —— | 危岩落石质量（t）； |
| *kn、kt* | —— | 法向恢复系数、切向恢复系数，具体取值详见表B.1； |
| *λ* | —— | 拉梅系数（kN/m2），建议取1000； |
| *H* | —— | 危岩落石至碰撞点高度（m）； |
| *h* | —— | 结构缓冲土层厚度（m）； |
| *ε* | —— | 冲击力缓冲土层扩散角（°），按式（B.1-3）计算； |
| *φ* | —— | 冲击力缓冲土层内摩擦角（°）； |
| *R* | —— | 危岩落石等效半径高度（m）； |
| *β* | —— | 冲击力入射角（°）。 |

当危岩落石沿坡面滚动时，冲击力入射角*β*取坡面与缓冲层顶面相交处切线夹角；当危岩落石沿坡面弹跳时，冲击力入射角*β*取危岩落石坠入缓冲层时速度方向与缓冲层顶面的夹角。崩塌危岩落石法向恢复系数、切向恢复系数可按表B.1.1取值。

表B.1.1 法向恢复系数和切向恢复系数取值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 坡面覆盖层特征及场地描述 | kn | kt |
| 极软：以拳击易被打入几英寸 | 0.10 | 0.50 |
| 软：拇指易压入几英寸 | 0.10 | 0.55 |
| 坚实：一般用力下拇指可压入几英寸 | 0.15 | 0.65 |
| 坚硬：拇指易压出痕迹，但需极用力才可压入 | 0.15 | 0.70 |
| 极坚硬：易被拇指指甲划伤 | 0.20 | 0.75 |
| 坚固：难于被拇指指甲划伤 | 0.20 | 0.80～0.85 |
| 极软岩：可被拇指指甲划伤 | 0.15 | 0.75 |
| 较软岩：地质锤尖击打可破碎，易被小刀切削 | 0.15 | 0.75 |
| 软岩：难被小刀切削，可被地质锤击打出浅坑 | 0.20 | 0.80 |
| 中等岩：小刀不能切削，可被地质锤一下击碎 | 0.25 | 0.85 |
| 硬岩：试件需要不止一下才可击碎 | 0.25～0.30 | 0.90 |
| 较硬岩：试件需要多次才能击碎 | 0.25～0.30 | 0.90～1.0 |
| 极硬岩：试件仅能被地质凿切割 | 0.25～0.30 | 0.90～1.0 |
| 基岩裸露 | 0.5 | 0.95 |
| 块石堆积层 | 0.35 | 0.85 |
| 岩屑堆积层 | 0.30 | 0.70 |
| 土层 | 0.25 | 0.55 |

B.2 危岩落石弹跳运动轨迹

**B.2.1** 危岩落石最大弹跳高度应按下列公式计算：

 （B.2.1-1）

 （B.2.1-2）

 （B.2.1-3）

 （B.2.1-4）

 （B.2.1-5）

 （B.2.1-6）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：*H*max | —— | 危岩落石最大弹跳高度（m）； |
| *s* | —— | 危岩落石弹跳最高点距离起跳点的水平距离（m）； |
| *v’i* | —— | 危岩落石碰撞坡面后的反弹速度（m/s）； |
| *vi* | —— | 危岩落石碰撞坡面后的入射速度（m/s）； |
| *v*0*x* | —— | 危岩落石脱离母岩后沿*x*轴的初速度（m/s）； |
| *v*0*y* | —— | 危岩落石脱离母岩后沿*y*轴的初速度（m/s）； |
| *g* | —— | 重力加速度（m/s2）； |
| *t* | —— | 危岩落石坠落时间（s），由坠落初速度及具体地形按自由落体的公式试算得出； |
| *kn、kt* | —— | 岩块法向恢复系数与切向恢复系数由表B.2.1确定； |
| *α* | —— | 斜坡坡角（°）； |
| *β* | —— | 危岩落石运动方向与水平面的夹角（°）； |
| *θ* | —— | 危岩落石反弹方向与坡面的夹角（°）。 |

表B.2.1 岩块恢复系数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 恢复系数 | 地面岩性 | | | | |
| 硬岩 | 软岩 | 硬土 | 普通土 | 松土 |
| 法向恢复系数*en* | 0.40 | 0.35 | 0.30 | 0.26 | 0.22 |
| 法向恢复系数*et* | 0.86 | 0.84 | 0.81 | 0.75 | 0.65 |

**B.2.2** 危岩落石最大滚落距离应按下列公式计算：

 （B.2.2-1）

 （B.2.2-2）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 式中：tan*φ*d | —— | 滚动阻力系数，按表B.2.2取值； |
| *v’it* | —— | 危岩落石碰撞坡面后沿坡面的反弹速度，即初始滚动速度（m/s）； |
| *vi* | —— | 危岩落石碰撞坡面的入射速度（m/s）； |
| *kt* | —— | 岩块切向恢复系数，按表B.2.1取值； |
| *S*max | —— | 危岩落石最大滚动距离（m）。 |

表B.2.2 岩块滚动阻力系数

|  |  |
| --- | --- |
| 坡面特征 | 滚动阻力系数 |
| 光滑岩面、混凝土表面 | 0.30～0.60 |
| 软岩面、强风化硬岩面 | 0.40～0.60 |
| 堆石堆积坡面 | 0.55～0.70 |
| 密实碎石堆积坡面、硬土坡面、植被（灌木丛为主）发育 | 0.55～0.85 |
| 密实碎石堆积坡面、硬土坡面、植被不发育或少量杂草 | 0.50～0.75 |
| 松散碎石坡面、软土坡面、植被（灌木丛为主）发育 | 0.50～0.85 |
| 软土坡面、植被不发育或少量杂草 | 0.50～0.85 |

**附录C 材料性能检验**

**C.1** 检验内容与方法

**C.1.1** 外观检查及尺寸测量应符合下列规定：

**1** 外观质量应用手感和目测检查；

**2** 钢丝绳、钢丝的直径测量应按现行国家标准《钢丝绳通用技术条件》 GB/T 20118和现行行业标准《制绳用圆钢丝》YB/T 5343的有关规定进行；

**3** 钢丝绳、钢丝直径应采用满足精度要求的检定合格的千分尺、游标卡尺等进行测量。除此之外的材料及构件外形尺寸（长、宽、高、厚、直径）可用普通量尺测量。

**C.1.2** 材料力学性能检验应符合下列规定：

**1** 钢丝、钢丝绳、立柱、钢筋锚杆等构件材质通过检查原材料合格证及检验报告来验证，有疑问时可按相应原材料采用标准规定的方法检验；

**2** 钢丝绳破断拉力测定应按现行国家标准《钢丝绳通用技术条件》GB/T 20118规定的整绳破断拉力测定方法进行；

**3** 钢丝抗拉强度试验应按现行行业标准《制绳用圆钢丝》 YB/T 5343的有关规定进行；

**4** 钢柱构件钢材的性能测定应按现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700的有关规定进行。

**C.1.3** 防腐检验应符合下列规定：

**1** 镀层厚度应按现行国家标准《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912规定的磁性法测量；

**2** 钢丝绳、钢丝的锌层重量测定应按现行国家标准《钢丝绳通用技术条件》GB/T 20118和现行行业标准《制绳用圆钢丝》YB/T 5343的有关规定进行；

**3** 钢丝的锌铝合金镀层重量测定应按现行国家标准《锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线》GB/T 20492的有关规定进行;

**4** 裹塑层厚度应按含裹塑层的钢丝绳直径与金属绳体直径之差的50%确定；

**5** 应采用中性盐雾试验验证构件和材料预期使用寿命，试验方法应按现行国家标准《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》GB/T 10125的有关规定进行。

**C.2** 批次与抽样

**C.2.1** 外观检查和尺寸测量应符合下列规定：

**1** 以一个供货合同中同一型号的为一批。

**2** 外观质量应逐个进行检验，几何尺寸应按同批产品中取3件进行随机抽样检验，网孔尺寸检验应对每个检样进行不少于5个网孔的随机检验。

**C.2.2** 材料力学性能和防腐检验应符合下列规定：

**1** 以同一规格的同类原材料或构件的一次采购量或上道工序生产量为一批

**2** 应在每批中随机抽取试样各一组三个试件。

**C.3** 结果评判

**C.3.1** 检验结果应符合下列规定：

**1** 如果所有检验结果均符合本规程规定，则判定该批产品合格；

**2** 若有不合格项，则加倍抽样对不合格样进行复验。若复验合格则判定为合格，若复验仍不合格则判定为不合格。

**附录D 部件性能检验**

**D.1** 检验内容与方法

**D.1.1**缓冲系统中网片力学性能测试应符合下列规定：

**1** 通过半球形的压力加载装置对网片施加垂直于网片平面的力，加载位置应位于网片中心处。

**2** 压力装置应由耐用的材料如混凝土或钢材制成，表面光滑且无棱角，安装在装置表面上的其他物件不应干扰网片的顶破测试。

**3** 压力装置的几何特征如下，如图D.1.1-1所示：

1）曲率半径为1200mm；

2）装置在平面上投影的最大直径为1000mm；

3）周边的曲率半径为50mm。

**4** 网片的加载位置应位于网片的中心处，加载速度不应大于10mm/s。

**5** 试验过程中可以中断加载来重新调整推力装置的行程。

**6** 测试样品为矩形，边长3m（平均值-容许值±20%）。为使该系统便于安装，送检单位应向试验室提供测试尺寸大小或比测试尺寸更大的样品，然后试验室进行取样。样品在材料和施工方法上应具有代表性。

**7** 试验应在环境温度下进行，并符合相关材料试验规范或标准。

**8** 将网片固定在刚性框架后进行顶破试验，以测量垂直于网片平面的压力装置中心点处力-位移曲线。试验过程中允许试样发生破坏，当施加于网片的力不能再增加时，认为网片发生破坏。因此，网片的顶破力是指网片在测试过程中所能承受的最大力。

**9** 试验也可以在网片未发生破坏的情况下进行，在这种情况下，认为顶破力等于试验过程中能达到的最大力。

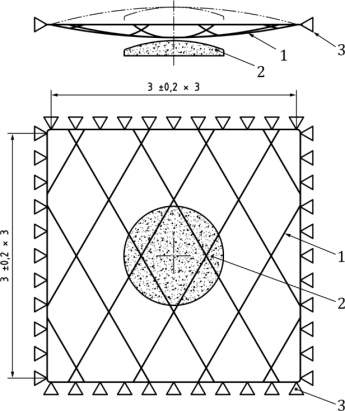
**10** 试验架采用刚性矩形或正方形结构，尺寸应符合网片和连接构件的安装要求，如图D.1.1-2所示。刚性框架和网片的距离（即连接构件所占空间）不得大于网片平均边长的15%。



R 50

R 1200

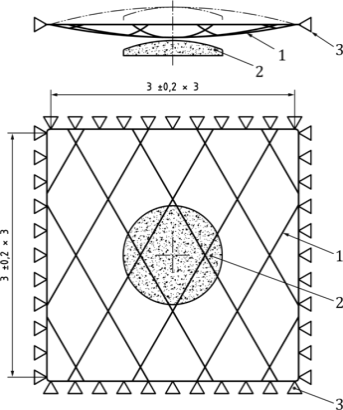
1000



1

3

2



3±0.2×3

1

2

3

3±0.2×3

图D.1.1-1 压力装置几何特征 图D.1.1-2 试验架

1——网片；2——连接构件；3——刚性框架

**11** 网片安装在框架中心处，应沿框架每侧的中心线测量连接区域的宽度a。

**12** 网片四周的所有网环通过连接构件（如卸扣、缝合绳、连接锁扣或其他送检单位与试验方商定的符合试样结构特点的连接方法，但是选取的连接构件不得妨碍试验样品的结构响应以及网片平面尺寸的测定）固定在框架上。

**13** 以框架的四个边指定参考平面，试验开始前网片应处于张紧状态，当中心处的最大凹陷小于试样最小长度的20%时，认为网片达到张紧状态，如图D.1.1-3所示。

1

2

3

图D.1.1-3 网片张紧状态

*a—*连接区域 a＜0.15×L；b＜0.2×L；L=3.0±0.2×3m；

1—网片；2—连接构件；3—刚性框架

**14** 试验过程中应连续测量压力装置作用在网片上的力和压力装置相对于参考平面的位移。

图D.1.1-4力-位移曲线

Y—负载； X—垂直于试件中心变形

**15** 试验报告应提供以下信息，并对送检单位所要求的试验进行准确描述（建筑材料、相对强度、结构特征、网的几何特征和技术细节等）：

1）试样的标称尺寸和试验条件下的实际尺寸；

2）试验过程中使用的仪器和温度；

3）试样连接情况的详细说明，并附照片；

4）在能够测量的情况下，测量试验前网片的最大下垂度；

5）四周连接区域的平均尺寸a；

6）对破坏的一般性描述；

7）实际破坏荷载和相对应的行程；

8）力-位移图，如图D.1.1-4所示；

9）试验前后的照片。

**D.1.2** 钢丝绳破断拉力应符合下列规定：

**1** 试样具体制备方法应符合现行国家标准《钢丝绳 实际破断拉力测定方法》 GB/T 8358的有关规定；

**2** 一般情况下，试验可在室温10℃～35℃范围到内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为23℃±5℃；

**3**在试验机上安装试样时，应保证试样轴线与试验机夹头轴线重合；

**4** 对于熔融金属和树脂浇铸法拉伸试样，应采用立式拉力试验机试验时，将试样的一端置于上钳口座内，调整试验机零点，再实施拉伸试验；

**5** 对于直接夹持法，应采用合适的夹具，必要时可以在试样与夹具间衬垫沾有金刚砂的铝箔，避免夹具夹伤试样表面；

**6** 试验过程中应采取有效措施，防止钢丝绳试样发生旋转；

**7** 试验过程中应平稳加载。当施加的试验力值不大于钢丝绳最小破断拉力的80%时，试验力可以较快的速率施加；当试验力值超过钢丝绳最小破断拉力的80%时则应缓慢加载，力值增加的速率每秒应不超过最小破断拉力的0.5%；

**8** 在规定拉力下的伸长率、断后伸长率和第一次断丝时的力等特征可根据要求进行监测；

**9** 如果钢丝绳试样在距离夹头6d范围内破断，且没有达到最小破断拉力时，该试验无效，应重新取样进行试验。

**D.1.3** 缓冲单元静力力学性能应符合下列规定：

**1** 每组试验的试样数量为三件，由缓冲单元和一段钢丝绳组成，一端拉伸，一端固定，规格如图D.1.3-1所示。

**2** 试验在拉力试验机上进行。试验时应沿图D.1.3-2箭头所示方向施加拉力，加载速度不应大于2kN/s，并测定试验全过程的荷载-位移（）曲线，如图D.1.3-3所示，直到试样不能再伸长或者拉力突然明显增大或减压环破裂失效。对于拉伸空间有限的试验机，可当减压环伸长到一定长度后锯掉一段再次拉伸，分段拉伸完成。

(a) 初始状态

(b) 最终状态

1

3

2

F

图 D.1.3-1 缓冲单元力学性能试样

1——锚固点；2——钢丝绳；3——缓冲单元

300mm

300mm

P

s

O

P1

A

P2

图D.1.3-2 减压力学性能试验试样图 D.1.3-3 减压环荷载－变形位移（*P*-*S*）关系

**3** 减压环的能量吸收能力用试验过程中它所吸收的最大变形能来表示，其大小等于试验机对减压环所做的功，即图D.1.5-3中荷载（*P*，单位kN）与位移（*S*，单位m）增量的乘积累计值（单位kJ）或曲线与*S*轴所形成的包络区域OP1P2A的面积（分段拉伸时为各包络面积之和）。

**4** 启动力为减压环在经过初始非弹性变形、弹性变形（曲线近似为直线）阶段后开始以塑性变形方式大量吸收变形能时的拉力，对应于图D.1.3-3中。最大工作内力为减压环的能量吸收能力计算用曲线段内的最大拉力，对应于图D.1.3-3中。

**5** 将P-S曲线中的第一个峰值标定为缓冲单元的启动力，启动力、工作内力、变形缓冲单元值等力学性能指标均取三件试样测定结果的算术平均。当一组试样中最大启动力或最小启动力与中间值之差超过中间值的10%时，取中间值作为该组试件的启动力代表值。当一组试样中最大启动力或最小启动力与中间值之差均超过中间值的15%时，这组试件的启动力不应作为评定依据。

**6** 其他类型的缓冲单元可参考减压环试验方法进行力学性能检验。

**D.1.4** 缓冲单元动力力学性能检验应符合下列规定：

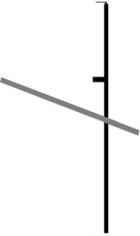
**1** 缓冲单元除进行静力力学性能检验外，还宜进行动力力学性能检验，试验方法如本规范图D.1.6所示。试样数量至少为三件，每个试样两端伸出的连接钢丝绳长度应保持一致，每次试验前后应测量试样及连接钢丝绳的总长度（精确至1cm）。

2



3

1



1

2

3

（a） 试验方法一 （b） 试验方法二



1

3

2

*Δ*

*t*

0

*Δ*d

*t*d

0

*F*

*t*

*F*max

*F*0

*F*dt

*t*d

（i）*F*-*t*曲线

（ii）*Δ*-*t*曲线

（c）试验方法三 （d）缓冲单元试验数据

图D.1.4 冲击试验过程示意及缓冲单元试验数据

1——缓冲单元；2——拉力传感器；3——冲击试块

**2** 利用试验方法一试验时，如图D.1.4（a）所示，缓冲单元应悬挂于某高处，缓冲单元与悬挂固定端之间应布设拉力传感器（采样频率不应低于1000Hz），试样另一端则与冲击试块相连。选取合适的冲击试块提升至一定高度，释放冲击试块使其自由下落，从而启动与之相连的缓冲单元试样，并记录试验过程中试样内的拉力值。

利用试验方法二试验时，如图D.1.4（b）所示，缓冲单元连接在钢丝绳上并将钢丝绳两端锚固，在钢丝绳上布设拉力传感器，将冲击试块悬挂于门式架上，选取合适的试块提升至一定高度，释放冲击试块使其自由下落，从而启动与之相连的缓冲单元试样，并记录试验过程中试样内的拉力值。

利用试验方法三试验时，如图D.1.4（c）所示，缓冲单元与连接钢丝绳连接交叉布置在试验架上，缓冲单元与固定端之间应布设拉力传感器。选取合适的冲击试块冲击钢丝绳的交叉点，从而启动与之相连的缓冲单元试样，并记录试验过程中试样中的拉力值。

**3** 缓冲单元启动时应根据加载速度和连接绳的长度计算提升高度。

**4** 试验时能直接得到缓冲单元的拉力时程曲线（曲线），如图D.1.4（d）（ⅰ）所示。再通过耗缓冲单元在试验前后的最大变形量**和拉力传感器测得的作用时间，得到近似的变形时程曲线（曲线），如图D.1.4（d）（ⅱ）所示。从而得到缓冲单元在动力冲击作用下力-变形曲线（曲线），通过计算曲线的包络面积**求得缓冲单元的能量吸收值。此外，曲线中的第一个峰值为缓冲单元的动态启动力**，曲线中最大拉力为缓冲单元的动态峰值荷载**，曲线的包络面积**与最大变形量**的比值为缓冲单元的动态工作内力。

**5** 以三个试样的平均值作为试验结果，当某个指标的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的20%时，取中间值作为该指标试验结果；如有两个测值与中间值的差值均超过中间值的20%时，则该组试样的试验结果无效。

**D.2** 批次与抽样

**D.2.1** 以同一规格的同类原材料或构件为一批次，每批次部件的数量不应超过1000个，随机抽取3个部件作为一组试样进行部件性能试验。

**D.3** 结果评判

**D.3.1** 判定规则与复验应符合下列规定：

**1** 若三个试样检验结果均符合本规程规定，则判定该批次部件力学性能合格；

**2** 若有一个试样检验不合格，则应在该批次中重新随机双倍抽样进行不合格项目的复验，复验结果合格时，则判定该批次部件力学性能合格。如复验结果仍有不合格项，则判定该批次部件力学性能为不合格。

**D.3.2** 缓冲单元力学性能应符合下列规定：

**1** 分别通过静力试验和动力试验得到的能量吸收值，应取其中的较小值作为检验该缓冲单元的评判参数；

**2** 分别通过静力试验和动力试验得到的启动力，应取其中的较大值作为检验该缓冲单元的评判参数；

**3** 常用减压环的力学性能指标应符合表D.3.2中的规定。

表**D.3.2** 减压环力学性能指标

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 减压环型号 | GS-8000 | GS-8001 | GS-8002 |
| 能量吸收能力（kJ） | ≥30 | ≥50 | ≥90 |
| 启动及最大工作内力（kN） | 17～80 | 30～120 | 47～150 |
| 最大变形量（mm） | 850 | 1000 | 1100 |
| 同一批减压环启动力差（kN） | ≤7 | ≤10 | ≤10 |
| 配套钢丝绳直径（mm） | 12～14 | 16～18 | 20～22 |

**附录E 整体性能检验**

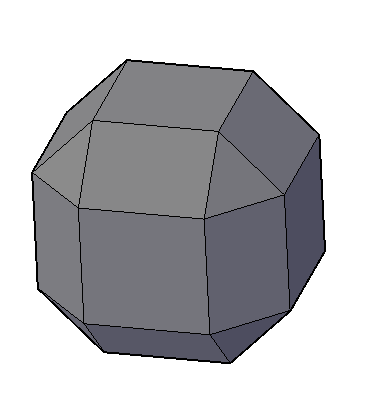
**E.1** 冲击检测内容与方法

**E.1.1** 柔性棚洞极限防护能级、侵界距离、最大变形等整体性能，应采用冲击试块自由下落的方式对柔性棚洞结构进行直接冲击作用。

**E.1.2** 采用可靠的方法将支撑结构等效简化后，可仅进行缓冲系统子结构直接冲击检验。

**E.1.3** 试验时，冲击试块在接触到防护网前1m距离范围的平均速度不应小于15m/s。

**E.1.4** 冲击试块可由普通钢筋混凝土制作而成，其形状宜为多面体或球体，如图E.1.4所示，且最大尺寸应小于试验所用柔性棚洞平面投影最小长度的三分之一。



d/2

d

d

图E.1.4 冲击试块形状

**E.1.5** 冲击试块的密度应在2500 kg/m3～3000kg/m3之间。如增加钢含量，则钢材应均匀地分布在冲击试块之内，保持冲击试块的质心和形心一致。

**E.1.6** 采用自由下落冲击方式时，最大变形量是在冲击位置沿竖直方向测得。测量时需考虑到柔性网的最大初始挠度，使用摄像机记录。测量的结果应四舍五入，单位精确到cm。

**E.1.7**冲击试块的冲击动能*E*应按下列公式计算：

自由下落冲击

** （E.1.7-1）

边坡滚落冲击

** （E.1.7-2）

式中：*m* ——冲击试块的质量；

*g* ——重力加速度；

*h* ——试块的下落高度。

*v*——通过落石轨迹模拟得到的冲击时试块的速度；

*r*——通过落石轨迹模拟得到的冲击时试块的滚动角速度；

**E.1.8** 柔性棚洞的冲击试验应按拦截式棚洞和抛出式棚洞分别开展。并分别按两个不同工况依次进行：正常服役防护能级（以下简称SEL）冲击工况和极限防护能级（以下简称MEL）冲击工况。

**E.1.9** 拦截式棚洞SEL冲击工况中应包含两次连续冲击，冲击试块分别以相同的动能落入缓冲层。

**E.1.10** 拦截式棚洞SEL冲击工况中第一次冲击的位置应为缓冲系统的中心，如图E.1.10所示。

图E.1.10 SEL 冲击工况中第一次冲击位置

**E.1.11**拦截式棚洞SEL冲击工况中第一次冲击后，应仅移走冲击试块，在不更换任何构件和不进行任何维护的情况下进行第二次冲击，冲击的位置仍位于柔性缓冲层中心，该位置应在第一次冲击后可以获得，如图E.1.11所示。

图E.1.11 SEL 冲击工况中第二次冲击位置

**E.1.12** 拦截式棚洞第二次冲击的动能参数（冲击试块速度和质量）应与第一次冲击相同。

**E.1.13** 拦截式棚洞MEL冲击工况的试验模型与SEL冲击工况所使用的试验模型相同。可以对SEL冲击工况中的试验模型进行修理或者更换受损构件后，进行MEL冲击工况试验；也可使用新的被动防护网模型进行MEL冲击工况试验。

**E.1.14** 拦截式棚洞MEL冲击工况的冲击位置为缓冲系统的中心。

**E.1.15** 抛出式棚洞SEL冲击工况中应包含两次连续冲击，冲击试块分别以相同的动能冲击结构并弹出。

**E.1.16** 抛出式棚洞SEL冲击工况中第一次冲击的位置为悬挑网面的中心点，如图E.1.16所示。

图E.1.16 SEL冲击工况中第一次冲击位置

**E.1.17** 抛出式棚洞SEL冲击工况中第一次冲击后，应仅移走冲击试块，在不更换任何构件和不进行任何维护的情况下进行第二次冲击，冲击的位置仍位于柔性缓冲层中心，该位置在第一次冲击后可以获得，如图E.1.17所示。

图E.1.17 SEL冲击工况中第二次冲击位置

**E.1.18** 抛出式棚洞第二次冲击的动能参数（冲击试块速度和质量）与第一次冲击相同。

**E.1.19** 抛出式棚洞MEL冲击工况的试验模型与SEL冲击工况所使用的试验模型相同。可以对SEL冲击工况中的试验模型进行修理或者更换受损构件后，进行MEL冲击工况试验；也可使用新的被动防护网模型进行MEL冲击工况试验。

**E.1.20** 抛出式棚洞MEL冲击工况的冲击位置为弹跳棚洞悬挑网面平面的中心。

**E.2** 批次与抽样

**E.2.1** 组批与抽样应符合下列规定：

以同一型号柔性棚洞应为一个批次，每批次制作一个试验模型进行性能试验检验。

**E.3** 结果评判

**E.3.1** 应根据不同的安全等级对整体冲击性能检验的结果进行判定，明确给出成功或失败的结论，判定标准应符合表E.3.1的规定。

表E.3.1试验结果判定标准

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 安全等级 | 冲击工况 | 试验成功 | |
| 一级 | SEL | 各工况冲击加载完成后，落石被成功拦截后静止于缓冲系统中或被完全弹出结构范围，任意构件不得出现破坏，仅需更换缓冲单元、网片后，便可继续工作 | 第一次冲击后冲击位移不应大于限界高度的50%；第二次冲击后冲击位移不应大于限界高度的70% |
| MEL | 冲击后冲击位移不应大于限界高度80% |
| 二级 | SEL | SEL工况加载完成后，落石被成功拦截后静止于缓冲系统中或被完全弹出结构范围，各部件间未出现明显分离，钢丝绳未发生拉断破坏，经更换破坏网片和缓冲单元后可继续进行MEL工况冲击加载。MEL工况加载完成后，落石被成功拦截或被完全弹出结构范围，允许结构出现破坏 | 第一次冲击后冲击位移不应大于限界高度的60%；第二次冲击后冲击位移不应大于限界高度的80% |
| MEL | 冲击后冲击位移不应大于限界高度90% |
| 三级 | SEL | 各工况冲击加载完成后，未出现由于构件破坏（网片被击穿、钢丝绳被拉断等情况）、落石静止于缓冲系统中或被完全弹出结构范围。 | 第一次冲击后冲击位移不应大于限界高度的80%；第二次冲击后冲击位移不应大于限界高度的90% |
| MEL | 冲击后冲击位移不应大于限界高度 |

**E.4** 试验数据记录

**E.4.1** 对SEL冲击工况和MEL冲击工况的每次冲击试验，应记录冲击前、冲击中和冲击后的数据。

**E.4.2** 冲击前的数据应包括下列内容：

**1** 冲击试块的质量；

**2** 柔性棚洞模型或缓冲系统模型的位置和安装后的照片；

**3** 柔性棚洞模型或缓冲系统模型的几何特性；

**4** 柔性棚洞模型或缓冲系统模型构件的规格和数量；

**5** 柔性棚洞模型或缓冲系统模型构件的力学和物理学特性。

**E.4.3** 冲击中的数据应包括下列内容：

**1** 试块的冲击下落高度；

**2** 在冲击试块接触缓冲系统时的冲击试块速度；

**3** 冲击试块的冲击轨迹；

**4** 柔性棚洞或缓冲系统的最大变形；

**5** 用于完整记录柔性棚洞或缓冲系统行为的照片，包括变形、挠度、冲击停止时间等；

**E.4.4** 冲击后的数据应包括下列内容：

**1** 柔性棚洞或缓冲系统静止后的最大变形及几何形状；

**2** 各主要构件的变形及破坏情况的描述和照片。

**E.4.5** 冲击试块速度的测量应通过高速摄像测量设备，每秒不小于500帧的拍摄速度进行测量，或适用其他具有相同精度的设备进行，且应具有充足的参照长度。

**E.4.6** 应设置足够数量的摄像或摄影机以便清楚地在测试前和测试中描述柔性棚洞行为和冲击试块运动。至少应使用一台高速摄影机用于测量速度。

**E.4.7** 应考虑到需要将额外的摄像机布置在现场，涵盖每一个需要关注的区域。

**E.4.8** 应在试验过程中测量关键构件的受力大小，至少应在与主钢丝绳上进行测量。应提供峰值内力和时间-受力时程曲线图，记录受力频率不应低于1000Hz。

**E.4.9** 高度测量应采用地形测量系统（非接触光学测量）或测量带。对于冲击中的最大变形，可使用影像测量的方式。

**E.4.10** 冲击试块的质量和尺寸应在每次试验之前测量，并应对冲击试块拍摄照片资料。

**E.5** 精度和公差

**E.5.1** 冲击试块的冲击作用点以其质心位置为参考点，冲击作用点的精度不宜超过以网片中心点周围直径1m的圆周误差范围。

**E.5.2** 质量测量的最小精度应为±3%。

**E.5.3** 速度测量的总体精度应为±5%。

**E.5.4** 测试步骤应允许给出精确地在±7%的测量值。

**E.5.5** 受力测量的仪器应每年校准一次。

**E.5.6** 所有距离静态测量精度应为±1%，动态测量精度应为±5%。

**E.6** 检验试验报告

**E.6.1** 冲击检验试验报告应包含封面、试验报告总表、试验模型说明表、检测设备说明表、试验记录表。

**E.6.2** 试验报告封面应包含试验名称（实际工程或专项设计）、送检单位名称、检测机构名称、试验日期等内容。

**E.6.3** 试验报告总表应包含下列内容：

**1** 基本信息：项目名称（实际工程或专项设计）、产品名称（规格型号）、产品极限防护能级、产品重要性等级、送检单位名称、生产厂家名称、检测机构名称、试验日期、试验地点、备注等。

**2** 试验评价：送检产品与设计图纸的一致性评价、安装质量合格性评价、SEL冲击工况试验结果评价、MEL冲击工况试验结果评价、试验结论。

**3** 人员信息：试验负责人、报告撰写人、报告审核人。

**E.6.4** 试验模型说明表应包含下列内容：

**1** 系统构件配置单：构件名称、材料、规格型号、实测尺寸、数量等。

**2** 系统安装说明：跨度、主要构件间的连接方式等。

**3** 系统布置图：系统平面布置设计图、系统立面布置设计图；试验模型正视图、试验模型侧视图。

**E.6.5** 检测设备说明表应包含下列内容：

**1** 冲击试块：实际重量、试块形状、尺寸、照片。

**2** 起重设备：起吊高度、照片。

**3** 影像采集设备：型号、主要性能参数。

**4** 力测量设备：型号、主要性能参数。

**E.6.6** 试验记录表应根据各冲击工况中的每一次冲击试验单独记录（SEL冲击工况记录两次，MEL冲击工况记录一次），每次记录应包含下列内容：

**1** 测试方法：冲击试块的运动轨迹、冲击位置、冲击动能。

**2** 检验结果（文字描述及照片说明）：冲击试块拦截结果或弹跳结果、冲击后的网片变形结果、立柱冲击前后对比、各个耗能元件启动情况、构件、网片破损情况。

**3** 测得的检验结果：冲击试块的速度、钢丝绳受力、最大变形、最终变形。

**本规程用词说明**

**1** 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

**1）**表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

**2）**表示严格，在正常情况均应这样做的：

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”或“应按……执行”。

**引用标准名录**

《混凝土结构设计规范》GB 50010

《钢结构设计标准》GB 50017

《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086

《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205

《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300

《钢结构工程施工规范》GB 50755

《碳素结构钢》GB/T 700

《低合金高强度结构钢》GB/T 1591

《计数抽样检验程序》GB/T 2828

《钢丝绳夹》GB/T 5976

《钢丝绳铝合金压制接头》GB/T 6946

《钢丝绳 实际破断拉力测定方法》GB/T 8358

《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》GB/T 10125

《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912

《钢丝绳通用技术条件》GB/T 20118

《锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线》GB/T 20492

《一般起重用E形和弓形锻造卸扣》GB/T 25854

《一般用途低碳钢丝》YB/T 5294

《制绳用圆钢丝》YB/T 5343

《混凝土结构耐久性标准》GB/T 50476

《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类》GB/T 19292