

ICS 27.140
CCS P 59

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5826—2021

水电水利地下工程施工安全评估导则 围岩稳定

Guide for safety assessment of hydropower and water
resources underground engineering construction —
Surrounding rock stability

2021-04-26 发布

2021-10-26 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国电力行业标准

水电水利地下工程施工安全评估导则
围岩稳定

Guide for safety assessment of hydropower and water
resources underground engineering construction —
Surrounding rock stability

DL/T 5826—2021

主编机构：中国电力企业联合会
批准部门：国家能源局
施行日期：2021年10月26日

中国电力出版社

2021 北京

国家能源局

公 告

2021 年 第 3 号

国家能源局批准《水电工程建设征地企业处理规划设计规范》等 282 项能源行业标准（附件 1）、*Code for Buildings Design of Wind Power Projects* 等 19 项能源行业标准外文版（附件 2），现予以发布。

- 附件：1. 行业标准目录
2. 行业标准外文版目录

国家能源局
2021 年 4 月 26 日

DL/T 5826—2021

附件 1

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
...							
242	DL/T 5826—2021	水电水利地下工程施工安全评估导则 围岩稳定			中国电力出版社	2021-04-26	2021-10-26
...							

附件 2 行业标准外文版目录（略）

前 言

本导则根据《国家能源局关于下达 2013 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知（国能科技〔2013〕235 号）》的要求制定。

本导则在制定过程中，编制组经调查研究，总结工程实践经验，并在征求意见的基础上，完成编制。

本导则主要技术内容包括基本规定、评估内容与方法、现场调查、安全监测、试验与检测、数值分析、工程类比、评估报告等。

本导则由中国电力企业联合会提出。

本导则由中国电力行业水电施工标准化技术委员会（DL/TC 29）归口。

本导则主编单位：中国长江三峡集团有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

本导则参编单位：中国水利水电第十四工程局有限公司

浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司

中国科学院武汉岩土力学研究所

河海大学

天津大学

本导则主要起草人：汪志林 徐建荣 陈建林 何 炜

陈文夫 和孙文 荣跃久 万祥兵

方 丹 李良权 任大春 洪望兵

段 杭 李 毅 王孝海 段兴平

褚卫江 唐鸣发 江 权 陈平志

王 玮 周孟夏 向 欣 徐 磊

张社荣

DL/T 5826—2021

本导则主要审查人：梅锦煜 席 浩 宗敦峰 许松林
汪 毅 楚跃先 吴新琪 郭光文
余 英 朱明星 陆采荣 钱文勋
孙来成 张利荣 张建华 林 鹏
李志刚 罗维成 王鹏禹 李克信
吴高见 杨成文 叶 明 向 建
于永军 王 军 陈 茂 杨和明
沈仲涛 杨 涛 和孙文 何小雄
吴秀荣 肖恩尚 李虎章 程志华
李光伟 李新宇

本导则在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

目 次

1	总则	1
2	基本规定	2
3	评估内容与方法	4
3.1	评估内容	4
3.2	评估方法	4
4	现场调查	6
5	安全监测	7
5.1	监测项目和内容	7
5.2	监测布置	7
5.3	监测分析与评估	7
6	试验与检测	9
7	数值分析	10
8	工程类比	11
9	评估报告	12
	本导则用词说明	13
	引用标准名录	14
	附：条文说明	15

Contents

1	General Provisions	1
2	Basic Requirements	2
3	Assessment Content and Method	4
3.1	Assessment Content	4
3.2	Assessment Method	4
4	Site Investigation	6
5	Safety Monitoring	7
5.1	Monitoring Item and Content	7
5.2	Monitoring Arrangement	7
5.3	Monitoring Analysis and Assess	7
6	Testing and Examining	9
7	Numerical Analysis	10
8	Engineering Analogy Method	11
9	Assessment Report	12
	Explanation of Wording in this Guide	13
	List of Quoted Standards	14
	Additions: Explanation of Provisions	15

1 总 则

1.0.1 为规范水电水利地下工程施工围岩稳定安全评估，提高风险控制水平，制定本导则。

1.0.2 本导则适用于水电水利地下工程。

1.0.3 水电水利地下工程施工围岩稳定安全评估，应积极采用新方法、新技术、新设备进行安全评估。

1.0.4 水电水利地下工程施工围岩稳定安全评估，除应符合本导则外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 基本规定

2.0.1 水电水利地下工程施工应进行围岩稳定安全评估，并及时反馈指导设计、施工。

2.0.2 地下工程施工围岩稳定安全评估可采用现场调查、安全监测、试验与检测、数值分析和工程类比等一种或多种方法联合进行评估。

2.0.3 地下工程施工围岩稳定安全评估应考虑建筑物级别、工程与水文地质、洞室布置、结构尺寸、开挖支护方法等因素。

2.0.4 地下工程施工围岩稳定安全评估，应遵循以下基本程序：

- 1 收集分析评估资料；
- 2 明确围岩稳定评估的范围与重点；
- 3 选择评估方法；
- 4 确定围岩稳定安全评估标准；
- 5 评估地下工程围岩稳定安全性；
- 6 编制评估报告。

2.0.5 安全评估应收集资料，主要包括以下内容：

- 1 工程场址内的地形、地貌资料；
- 2 工程地质资料；
- 3 水文地质资料；
- 4 地下洞室布置、断面形式及尺寸等布置设计资料；
- 5 支护参数、支护顺序与支护时机等支护设计资料；
- 6 施工方法、开挖程序及施工进度计划等施工资料；
- 7 现场调查资料；
- 8 安全监测方案及监测资料；
- 9 试验与检测资料；

10 类似工程资料。

2.0.6 收集的资料不能满足地下工程围岩稳定安全评估要求时，应进一步开展针对性的补充工作。

2.0.7 复杂地质条件的地下工程或大型地下洞室（群），应进行围岩稳定的数值分析。

3 评估内容与方法

3.1 评估内容

3.1.1 地下工程施工围岩稳定安全评估可按照表 3.1.1 确定评估内容。

表 3.1.1 围岩稳定安全评估内容

评估项目	项目内容
地质条件复核	岩性及分布、地质构造、围岩类别、岩体及结构面物理力学参数、地应力、块体稳定性、地下水、岩溶等
地质现象调查	围岩塌滑、松弛、破裂、岩爆、地下渗水、锚杆（索）钻孔塌孔等
围岩松弛及变形分析	围岩松弛检测、围岩变形及收敛监测等
支护结构损伤分析	喷层开裂、衬砌裂缝、锚杆（索）失效等
锚杆（索）荷载分析	锚杆应力计、锚索测力计测值等
结构受力分析	钢筋计、应力计、应变计、测缝计测值等
数值分析	地应力场、围岩应力、围岩变形、塑性区、支护结构受力等
施工方法评判	开挖程序、开挖分层分区、开挖方式、爆破方案、支护方式及时机等

3.1.2 大型地下洞室群或特殊布置的洞室群开挖期间，应评价洞室的相互影响。

3.2 评估方法

3.2.1 永久性建筑物宜根据其级别按表 3.2.1 选择评估方法。

表 3.2.1 永久性建筑物安全评估方法

建筑物级别	现场调查	安全监测	试验与检测	数值分析	工程类比
1	√	√	√	√	√
2	√	√	√	√	√
3	√	√	○	○	√
4	√	√	○	○	√
5	√	√	○	○	√

注：“√”为应选项；“○”为可选项。

3.2.2 临时性建筑物宜根据其级别按表 3.2.2 选择评估方法。

表 3.2.2 临时性建筑物安全评估方法

建筑物级别	现场调查	安全监测	试验与检测	数值分析	工程类比
3	√	√	○	—	○
4	√	√	○	—	○
5	√	—	—	—	○

注：“√”为应选项；“○”为可选项；“—”为不做要求项。

3.2.3 复杂地质条件的大型地下洞室（群）宜增加专家咨询论证评估。

3.2.4 安全评估应以现场调查和安全监测为主，结合数值分析、试验与检测、工程类比等方法进行综合评价。

4 现场调查

4.0.1 现场调查可采用地质观察、素描、实测、摄影和录像等方法，宜随工程进展进行。

4.0.2 根据现场调查资料，进行地质条件复核。发现新的地质问题，应进行专项研究或工程地质补充勘察。

4.0.3 对开挖过程中的岩爆、软岩大变形、不稳定块体、地下水、岩溶等情况应进行记录。

4.0.4 对发生的喷护（衬砌）混凝土开裂，钢筋网片（配筋）的弯曲、拉缩，管棚、钢支撑变形等破坏现象应进行记录。

4.0.5 地质编录应随开挖及时完成。

4.0.6 根据现场调查情况，可按照表 4.0.6 评估标准对地下工程进行安全评估。

表 4.0.6 现场调查安全评估标准

评估项目及状态			状态评估	建议措施
围岩	喷锚支护	衬砌支护		
正常	正常	正常	安全	定期巡视检查
表面局部开裂	局部喷层开裂	衬砌裂缝	关注	分析评估
局部掉块	局部喷锚破坏	局部衬砌破坏	预警	加密监测 针对性补强支护
较大面积崩塌	支护失效	衬砌失效	危险	应急补强支护 或其他措施

5 安全监测

5.1 监测项目和内容

5.1.1 地下工程安全监测项目和内容应根据建筑物级别、地质条件确定，安全监测项目宜包括变形监测、支护结构受力监测、渗流渗压监测等，主要安全监测内容可按表 5.1.1 确定。

表 5.1.1 主要安全监测内容

监测项目	监测内容
变形监测	围岩内部变形、围岩表面变形、地质结构面张开或错动变形、支护结构变形、沉降变形等
支护结构受力监测	锚杆应力、锚索荷载、结构受力等
渗流渗压监测	渗透压力和渗流量等

5.1.2 安全监测应以监控围岩稳定状态和结构安全为主，具有代表性和重要的施工期安全监测项目应延续至运行期。

5.2 监测布置

5.2.1 除永久性系统监测设施外，对围岩变形异常部位、高地应力部位、洞室交叉口、软弱破碎带及其他特殊部位应设置针对性的监测设施。

5.2.2 监测设施应提前预埋并及时取得初始值。

5.3 监测分析与评估

5.3.1 安全监测应对设计资料、现场埋设资料、仪器参数、原始观测数据、开挖支护等资料内容及时进行整编分析。

5.3.2 当监测成果异常及遇其他特殊情况时，应及时复测、加密观测，并根据要求进行预警预报。

5.3.3 安全监测除分析各仪器监测成果的历时变化过程线外，还应重点关注监测值异常、超限及突变、变化趋势等。

5.3.4 监测数据出现较大值或异常值时应结合地质条件、结构形式、开挖支护措施等因素进行综合分析。

5.3.5 对建筑物进行工作性态安全评价时，应综合分析各项监测成果分部位进行评价。

5.3.6 安全监测应以变形监测为主，结合其他监测项目，按照表 5.3.6 进行综合安全评估。

表 5.3.6 安全监测评估标准

评估项目及状态			状态评估	建议措施
变形监测	锚索（杆）荷载	其他监测		
正常	正常	正常	安全	定期监测
局部异常	局部异常	局部异常	关注	局部加密监测
增长	增长、异常突变	增长、异常突变	预警	加密监测
异常突变、加速增长	失效	失效	危险	加密监测并补强支护

6 试验与检测

6.0.1 围岩松弛检测宜采用钻孔声波测试、钻孔全景数字成像，必要时可采用压水试验、声发射、地质雷达等方法。

6.0.2 围岩松弛发展过程宜根据多期检测成果确定。

6.0.3 围岩松弛层厚度可按表 6.0.3 确定。

表 6.0.3 围岩松弛层厚度

检测方法	钻孔声波测试	钻孔全景数字成像	压水试验
松弛层厚度	波速曲线突变或平均波速差值大于 15%	存在新增可见密集裂缝	渗透系数增大 10 倍以上

6.0.4 松弛岩体的变形模量可由钻孔弹模测试、刚性承压板法试验获得。

6.0.5 爆破监测项目应根据建筑物级别、工程地质条件、爆破规模、保护对象等因素设置，爆破监测方法和评判标准应符合《水电水利工程爆破安全监测规程》DL/T 5333 的规定。

7 数值分析

7.0.1 水电水利地下工程的数值分析宜采用有限元方法、有限差分方法或离散元方法。

7.0.2 数值分析应贯穿水电水利地下工程的施工全过程。

7.0.3 数值分析应采用合理的地应力场和岩体力学参数，应考虑开挖爆破导致的围岩损伤。

7.0.4 数值分析模型应与地下工程实际开挖体形相一致，应考虑实际开挖方案和锚杆、锚索、喷层等支护结构。

7.0.5 数值分析的成果应包括围岩塑性区范围、变形、应力及支护结构受力特征。

7.0.6 数值分析应按照表 7.0.6 进行安全评估。

表 7.0.6 数值分析安全评估标准

评估项目及状态				状态评估	建议措施
变形	应力	塑性区	其他		
正常	正常	正常	正常	安全	
局部大变形	局部应力异常	局部贯通	异常	关注	评估局部补强措施的效果
大变形	应力异常	贯通	异常	预警	研究补强加固或其他措施

8 工程类比

8.0.1 工程类比宜选择与评估工程地质条件相似、建筑物规模形式相当的工程进行对比分析。

8.0.2 工程类比宜包括以下主要内容：

- 1 地下工程围岩类别、围岩主要工程地质特征、地应力；
- 2 洞室规模和尺寸；
- 3 支护形式与参数；
- 4 施工方案；
- 5 监测方法与数据。

8.0.3 工程类比可采用工程地质类比和经验公式等方法。

9 评 估 报 告

9.0.1 地下工程施工围岩稳定安全评估成果应形成评估报告。

9.0.2 地下工程施工围岩稳定安全评估报告应包括以下主要内容：

- 1 工程概况；
- 2 评估范围；
- 3 基本资料；
- 4 评估内容、方法、标准；
- 5 评估分析；
- 6 综合评估；
- 7 结论和建议。

本导则用词说明

1 为便于在执行本导则条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《水电水利工程爆破安全监测规程》 DL/T 5333

中华人民共和国电力行业标准

水电水利地下工程施工安全评估导则
围岩稳定

DL/T 5826—2021

条 文 说 明

制 定 说 明

《水电水利地下工程施工安全评估导则 围岩稳定》(DL/T 5826—2021), 经国家能源局 2021 年 4 月 26 日以第 3 号公告批准发布。

本导则制定过程中, 编制组总结了水电水利地下工程施工围岩稳定安全评估的实践经验, 并进行了广泛的调查研究, 充分征求行业专家意见, 同时参考了相关技术法规、技术标准。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本导则时能正确理解和执行条文规定, 《水电水利地下工程施工安全评估导则 围岩稳定》编制组按章、节、条顺序编制了本导则的条文说明, 对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是, 本条文说明不具备与导则正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

2	基本规定	18
3	评估内容与方法	19
3.1	评估内容	19
3.2	评估方法	20
4	现场调查	22
5	安全监测	23
5.1	监测项目和内容	23
5.2	监测布置	23
5.3	监测分析与评估	24
6	试验与检测	26
7	数值分析	28
8	工程类比	31
9	评估报告	33

2 基本规定

2.0.1 在地下工程施工前需对围岩稳定安全进行预判，梳理风险点，指导设计；在施工期，随开挖进行围岩稳定安全评估，及时反馈指导设计、施工，以动态调整设计参数和施工方案。

2.0.2 根据工程的重要性的特点合理选用安全评估方法，选用的方法可以是直接评估或者辅助评估。

2.0.5 现场调查资料主要指洞室开挖现场的宏观调查资料，主要包括工程地质条件，工程地质问题、支护破坏情况的状态和发展过程等。

2.0.6 补充工作主要指进一步详细调查与专项研究、补充地质勘察、增加试验与检测等。

2.0.7 重要的地下工程、复杂地质条件的地下工程或大型地下洞室群，施工期需开展数值反馈分析，白鹤滩、锦屏二级、溪洛渡等大型水电工程在施工期均开展了开挖跟踪数值反馈分析，对地下工程安全评估提出了指导性意见。

3 评估内容与方法

3.1 评估内容

3.1.1 水电水利地下洞室的种类有很多，如水电站地下厂房、输水隧洞、泄洪隧洞、导流隧洞、交通及出线等辅助洞室等。白鹤滩水电站左、右岸均布置了庞大的地下洞室群，总长度超过200 km。如此纷繁复杂的地下洞室，其安全性的评估内容，不同工程不同功能的洞室区别对待，需根据各建筑物级别、使用年限、洞室功能等综合考虑。

地质条件是地下工程安全评估的基础性资料，评估前需进行复核。地下工程施工开挖后，其地质条件全面揭露，进行详细的素描，并与前期的地质成果进行对比和复核，获取更为准确的地质资料，为地下工程的安全评估提供重要的基础支撑。地质条件的复核主要包括岩性及分布、地质构造、围岩类别、岩体及结构面物理力学参数、地应力、块体稳定性、地下水（泥）、有毒气体等。当地质条件变化较大时，推荐进行补充勘察、检测和试验等。

地下工程开挖后，可能出现一系列的地质现象，如围岩塌滑、松弛、破裂、岩爆、地下渗水、锚杆（索）钻孔塌孔等。对地质现象的现场调查、统计和分析，有助于对复杂地质条件的深入认识。

对于重要的地下工程、复杂地质条件的地下工程或大型地下洞室群，施工期需进行围岩稳定数值分析，复核施工期地质条件，对比各项监测数据与数值分析成果，评价地下工程的围岩稳定性、支护结构的有效性、及施工方案的合理性，综合评判地下工

程的安全性。白鹤滩水电站地下厂房洞室群开挖施工期间，委托两家科研院校平行开展地下厂房洞室群施工期快速监测与反馈分析，每一层均进行开挖跟踪数值分析，评价围岩稳定性，并预测下一层开挖后的围岩状态和支护体系受力情况，取得了良好的效果。

地下工程的施工程序及方法是影响洞室围岩稳定的重要因素之一。洞室群之间不同的开挖程序，洞室不同的开挖分层分区方案，使洞室围岩在开挖过程中经历不同的应力路径；不同的爆破方式会造成围岩不同程度的爆破损伤，相同的爆破方法，对不同条件的围岩造成的影响也有区别；良好的支护时机选择，促进洞室围岩状态和支护状态和谐统一，保证地下工程的整体安全性。因此，在施工期间，需结合地质条件复核、监测数据分析、数值分析，从洞室群开挖程序、洞室开挖分层分区、爆破方式、支护时机等方面，对施工程序及方法进行评判。

3.1.2 复杂地质条件下的大型地下洞室群（如白鹤滩水电站地下厂房洞室群）及特殊布置的洞室群（布置特别紧凑的洞室群，如向家坝、白山水电站地下洞室，间距偏小），在洞室开挖期间，具有一定的洞室群效应，需根据洞室群布置、地质条件、施工程序、监测数据、数值分析、工程类比等，评价洞室的相互影响。

3.2 评 估 方 法

3.2.1~3.2.4 地下工程的安全评价，通常是多种方法的综合性评价。可根据工程具体情况增加评估手段，力求评估效果的全面、准确。对于重要的地下工程或地质条件复杂的地下工程，可视需要增加专家咨询论证评估。例如，白鹤滩水电站地下厂房在施工期间开展了 11 次围岩稳定专家咨询。

现场调查需先于其他方法首先开展。现场安全检查除目视检查外，必要时还可以辅助简单的测量、测试。现场检查的项目一般包括：

- (1) 围岩岩性、岩体质量、结构特征、岩体裂隙发育情况等；
- (2) 岩体开挖质量、成型质量等；
- (3) 围岩屈服破坏、围岩变形等；
- (4) 喷层、锚杆、锚索、衬砌等支护结构破坏情况。

安全监测资料分析需在掌握比较全面的基础资料的基础上开展，结合地质条件、开挖施工情况、支护设计等进行综合分析。重点分析围岩变形、支护结构受力与地质条件、开挖施工方案及支护设计之间的关系。安全监测资料分析是地下工程安全评价最为重要的手段。

试验与检测是进一步获取评价基础资料的较常用方法，尽量采用无损伤的检测方法，如声波测试、地质雷达等。当需要采用有损伤试验与检测时，首先评估试验与检测对工程安全性的影响。在影响可控的情况下，完成试验与检测后，需立即修复，消除或降低损伤对工程的影响。

数值分析可以拟合和预测地下工程围岩开挖响应特征，被广泛用于地下工程的安全评价，有限元和离散元法是最为常用的两种数值分析方法。数值分析中，选用的参数、界定的边界条件及不同数值分析方法对结果有很大的影响。因此，根据地下工程围岩、结构面特性，以及开挖支护方案，选用合适的数值分析方法和正确的参数，设置与实际符合的边界条件，在对数值分析结果的可信性进行判断后，预测地下工程围岩开挖响应、支护结构受力等。

在相近或相似的地质条件、建筑物规模、施工方法和支护参数的情况下，进行类比，以增加工程类比的可信度。

4 现场调查

4.0.2 建立地质值班制度，施工地质人员需常驻项目现场。由于地质条件的复杂性，人们受技术、社会环境等因素影响，对具体地质条件的认识需要逐步深化和完善，施工过程中揭露前期没有预测到的问题属正常现象，要及时发现，评价其影响；施工开挖揭露的一般性不良地质问题和不良地质现象，可通过日常施工地质工作与设计配合、结合施工开挖研究处理，但若导致建筑物位置移动、建筑物结构调整，或围岩的设计处理措施和处理工程量发生较大变化，或危害结构安全等问题，需进行专项研究或专门性工程地质勘察。

4.0.3~4.0.4 围岩和支护系统的破坏特征、变化过程需详细记录，同时需调查记录周边洞室的开挖、爆破等影响因素。

4.0.5 尽量在开挖完成后的 2 天内完成地质编录。建议对发展变化较快的问题巡视间隔时间不超过一周，围岩基本稳定、破坏无明显变化的巡视间隔时间不超过 15 天，连续 3 个月无明显变化的可 30 天巡视一次。发生 5.0 级以下地震后，视情况对重点部位进行巡视。

4.0.6 现场调查是最直观的评估地下工程安全的方法之一，在进行工程安全评估时优先采用。

5 安全监测

5.1 监测项目和内容

5.1.1 根据建筑物级别、地质条件确定地下工程安全监测项目和内容，见表 5-1。

表 5-1 监测项目和监测内容选择表

序号	监测项目	监测内容	建筑物级别				
			1	2	3	4	5
1	变形	围岩表面变形	√	√	√	√	○
		围岩内部变形	√	√	√	√	○
		地质结构面变形	√	√	○	○	○
		支撑结构变形	√	√	○	○	○
		地表沉降	○	○	○	○	○
2	应力应变	锚杆应力	√	√	√	○	○
		锚索荷载	√	√	○	○	○
		支撑结构受力	√	○	○	○	○
3	渗流渗压	渗流量	√	√	√	○	○
		渗透压力	√	√	○	○	○

注：“√”为应选项；“○”为可选项。

5.2 监测布置

5.2.1 安全监测布置包括监测断面部位选择、测点数量、监测深度等，考虑地质条件、围岩特性、结构状态、建筑物级别、施工

方法（开挖、支护）等因素确定，监测断面布置可参考表 5-2。

围岩表面变形通常由洞室收敛计测量和多点位移计监测，以建立收敛三角形为基本的监测单元，1、2 级建筑物地下工程需根据洞室跨度和高度确定测点数量。围岩内部变形通常由多点位移计监测，1、2 级建筑物地下工程每个监测断面不少于 5 套仪器，特大型地下厂房（白鹤滩、溪洛渡、乌东德、向家坝等水电站）则根据洞室跨度和高度增加多点位移计数量，监测断面的顶拱中心、拱脚和岩台梁部位布置多点位移计，上下游边墙每 10 m~20 m 高度布置多点位移计。支护应力监测仪器布置需与围岩变形监测结合布置，锚杆应力计钢筋直径与锚杆直径匹配；预应力锚索监测建议对各种吨位、长度的锚索抽样进行，锚索测力计量程不小于锚索设计吨位。

表 5-2 监测断面间距表

序号	围岩类别	监测断面间距 (m)				
		1 级建筑物	2 级建筑物	3 级建筑物	4 级建筑物	5 级建筑物
1	I	100~200	200~300	300~500	—	—
2	II	80~150	100~200	200~300	—	—
3	III	60~120	80~150	100~200	200~300	300~400
4	IV	40~80	60~120	80~150	100~200	200~300
5	V	20~40	40~80	60~120	80~150	100~200

5.3 监测分析与评估

5.3.1 现场安装资料包括监测仪器安装部位信息、钻孔深度和角度、是否有特殊地质构造、仪器安装前后读数、初始值及相关的环量信息。

5.3.2 建立监测资料定期整编和异常情况预警预报制度，根据日常监测资料定期整编安全监测周报、月报等，特殊情况或者监测成果异常时需整编监测简报或快报，及时预警预报。

5.3.5 建筑物工作性态安全评价需综合分析变形监测、支护结构受力监测和渗流渗压监测等各项成果，以变形监测成果为主要分析评价项目。状态评估分为安全、关注、预警和危险四级，对应的建议措施为常规定期监测、局部加密监测、整体加密监测并及时反馈、加密监测反馈并补强支护。

5.3.6 安全监测是可以量化评估地下工程安全的方法之一，需对监测资料的准确性和合理性进行分析，并注意区分预先埋设仪器和即埋仪器数据的差别。当采用新方法、新技术、新设备时，需由专门技术人员做好与常规监测成果的对比分析。

6 试验与检测

6.0.1 常用的钻孔声波测试可分为单孔声波测试、穿透声波测试。单孔声波测试用于洞室松弛深度和程度、开挖爆破影响深度、软弱夹层和岩体破碎带探测，岩体质量、混凝土质量和灌浆质量检测等，松弛测试一般选用单孔声波法；穿透声波测试可用于混凝土裂缝深度和混凝土结构或构件内部缺陷检测等。

钻孔电视可分为钻孔全景数字成像、钻孔摄像。钻孔全景数字成像常用于岩性、软弱夹层、地质构造发育情况详查；钻孔摄像一般用于动态观察孔内地质现象（如地下水流动）。

检测、试验孔优先选用回转方式钻进，能最大限度减少对地层的扰动，保证孔壁的完整。声波测试长期观测孔孔径一般不小于 76 mm，建议从孔底向孔口方向逐点测试，点距一般为 0.2 m，每测试 2 m 需核对一次孔深；爆前与爆后测试一般在原孔进行，如不具备条件，爆后测试孔需选择爆前测试孔邻近孔，孔内各测点高程需保持相同。钻孔电视测试孔孔径一般为 56 mm~130 mm，优先选择清水钻进；测试孔段需要是干孔或孔液为清水，孔壁干净；当孔液浑浊不清、影响成像质量时，采取投放沉淀剂澄清、清水冲洗等措施，沉淀剂提前投放时间一般不少于 4 h。

6.0.2 多期钻孔声波测试结果对比可研究洞室松弛深度的变化与发展趋势，可用于辅助评价围岩的松弛深度、变形收敛情况及洞群塑性区连通情况。多期钻孔全景数字成像对比可研究新增裂缝、孔壁岩体（混凝土）破坏的发展与变化，可用于辅助评价围岩、衬砌的破坏情况及发展趋势。多种测试方法、多期测试，推荐选用同一测试孔，或条件相近的测试孔。长期观测孔需做好孔口保护。

6.0.3 根据平均波速确定围岩松弛层厚度，一般以平均波速差10%~20%为依据，可根据波速曲线形态、多孔测试成果等，综合确定项目标准。

6.0.4 钻孔弹性模量测试是在岩体钻孔中的一有限长度内对孔壁施加压力，同时量测孔壁的径向变形，按弹性理论解求得岩体变形参数。承压板法岩体变形试验是通过承压板施力于半无限空间岩体表面，量测岩体变形，按弹性理论公式计算岩体变形参数；无法利用洞室岩壁作为反力座时，反力装置可采用地锚法或压重法提供反力。

7 数值分析

7.0.1 在水电水利地下工程围岩稳定性数值分析中，可根据施工过程中所关心的技术问题合理选择数值分析方法，包括有限元方法、有限差分方法和离散元方法等。

(1) 有限元方法和有限差分方法基于连续介质力学原理，是地下工程中被广泛应用的数值分析方法。

(2) 离散元方法基于非连续介质力学原理，与连续数值分析方法相比，除具备连续数值分析方法的基本功能之外，其优势在于可模拟大量结构面（断层）导致的非连续变形，如块体分离脱落全过程。因此特别适用于直接模拟大量非连续结构面导致的工程问题，如定位、半定位结构面导致的潜在块体问题，以及块体安全系数等工程问题。

(3) 建议选用行业认可度高的软件或程序，确保数值计算结果被相关人员接受和第三方重复再现。数值计算程序选择需考虑计算输入参数获取的可行性、便捷性，从而支撑工程围岩稳定性的安全评价。

数值分析是能够量化评估地下工程安全的方法之一，需研究本构模型、数值分析方法对于工程的适用性。对于特别重要的工程，建议由多家单位、多种数值分析方法进行分析比较。

7.0.3 岩体初始地应力场通常采用反演回归的方法获得，即首先对实测地应力场的的数据质量进行甄别，然后选择可靠程度高的实测数据反演回归确定地下工程区的初始应力场。反演得到三个方向的正应力计算值和实测值之间宜控制在实测值的 $\pm 20\%$ 以内。

当数值分析成果与现场的监测数据存在较大的差异时，根据监测数据开展反馈分析工作，获得更符合现场开挖实际的地应力

和岩体参数，以更好地评估地下工程的围岩稳定性。可选择围岩变形作为反馈分析的主要目标函数，锚杆应力、锚索荷载等作为辅助判别依据。对于预埋变形监测设备的监测成果，可采用考虑损失位移的全量位移反馈分析法，对于即埋变形监测设备的监测成果，采用增量位移反馈分析法。

7.0.4 数值分析模型需完整反映地下工程的主体洞室结构及尺寸。

数值分析模型的外边界与地下洞室开挖边界距离一般大于主要洞室等效跨度或高度的5倍。数值分析模型的单元网格在邻近洞室开挖边界划分相对较密，网格相对较小，在远离洞室开挖边界划分的网格相对较疏，尺寸逐步变大。根据实际约束情况合理选择数值分析模型的边界约束，如位移约束边界条件、应力边界条件、混合边界条件。

当网格尺寸精细度不足而制约局部工程关键部位围岩稳定性分析时，可建立基于子结构的数值分析模型，进行围岩局部稳定性分析。

数值分析模型需包含对围岩稳定性影响较大的主要岩层、地质构造等。地下洞室开挖断面尺寸一般为几米至几十米，数值分析模型宜包含Ⅲ级及以上结构面或裂隙面实体，而对于岩体中的Ⅳ级及以下优势节理与裂隙组推荐采用等效概化形式处理。

工程岩体中若存在不良地质体，如溶洞、透镜体夹层等，数值分析模型建议适当包含这些对围岩局部稳定性影响较大的不良地质体。

由于地下工程岩体结构的隐蔽性，很多影响围岩稳定性的不利地质构造无法事先获知。随着开挖过程中地质条件的逐步揭露，数值分析模型需根据新揭露的不利地质构造进行动态更新。

不同性状岩体变形破坏过程通常表现不同的弹性、非线性、弹塑性、弹脆性、黏弹塑性、各向异性等力学行为，因此推荐根据工程岩体试验结果选择合适的材料本构模型。此外，针对不同

的围岩稳定问题，如大变形、塌方、剪切滑移、动力破坏等，建议选择相应的材料本构模型。本构模型选取的原则如下：

- (1) 计算中一般采用弹塑性力学模型；
- (2) 对于具有明显流变性质的围岩，建议采用黏弹塑性力学模型；
- (3) 层状岩体或柱状节理岩体建议采用各向异性力学模型；
- (4) 高地应力条件下一般采用体现岩体峰后强度衰减和时效变形特征的力学模型；
- (5) 卸荷破裂劣化岩体可选用劣化准则与对应的力学模型。

7.0.6 地下洞室围岩整体稳定性建议依据围岩的变形、应力、塑性区及能量变化等状况，从强度准则、能量判据和临界变形警戒值等进行广角度评判。数值分析成果辅以监测数据和工程实例的检验，可有效提高计算成果的可信度和适用性。

地下工程开挖过程改变了工程围岩稳定性状态，一般可通过围岩变形特征、重分布应力特征、屈服或破损区深度等方面反映；对于高应力硬岩地下工程，建议从围岩能量聚集、转移角度分析围岩动力型破坏风险，如岩爆风险。

数值分析若揭示局部位置出现大变形、局部应力异常或局部塑性区贯通，宜结合监测数据开展局部精细模拟和分析，找出原因，并采用数值分析方法评估局部补强的效果。

8 工程类比

8.0.1 工程类比法是一种定性分析方法，将所研究洞室与已经研究过的或已有经验的洞室进行类比，以评价其安全性。

8.0.2 地下厂房厂区主体洞室（主厂房、主变压器室和调压室等）地质条件及洞室尺寸直接关系到洞室群的成洞条件、支护措施和工程造价。用围岩类别及相应的地质特征、洞室尺寸等来评价围岩的稳定性，并可作为确定支护类型的基础。变形量一般与围岩类别成正比；变形量也与地应力水平成正比，当地应力水平升高时，变形量随之增加；变形量也基本上与洞室的宽度和高度成正比，当洞室尺寸增加时，变形量随之增加。

8.0.3 工程地质类比是一种工程地质问题的定性分析方法，通过本工程的工程地质条件与类似工程地质条件的对比分析，进行工程问题的分析及解答。

由于地下洞室的变形严重依赖于具体的工程地质条件和开挖支护施工过程，对于地下洞室允许变形的估计，目前尚没有十分有效的方法。采用经验公式可以对厂房允许变形进行估计，这种方法的取值存在较为粗糙的缺点，计算结果仅供参考。

本导则提供以下经验公式进行粗略估计，该经验公式为苏联学者通过对大量观测数据的整理，得出了用于计算洞室周边容许最大变形值的近似公式：

$$\left. \begin{aligned} \delta &= 12.0B / f_k^{3/2} \\ \delta &= 4.5H^{3/2} / f_k^2 \end{aligned} \right\} (\text{mm})$$

$$f_k = \alpha \frac{R_b}{10}$$

DL/T 5826—2021

式中： B ——洞室跨度（m）；

H ——边墙自拱脚至底板的高度（m）；

f_k ——普氏系数，无量纲；

α ——普氏修正系数；

R_b ——岩体单轴饱和抗压强度（MPa）。

9 评 估 报 告

9.0.2 地下工程安全性评估尚无统一标准，不同评估方法的评估内容存在差异，相应的安全评估标准也由多项判别指标综合分析后确定。因此，地下工程的安全性，由多方法评估结果综合确定，综合评估地下工程施工围岩稳定安全。