**工程地质**

1.1 勘察工作简况

本工程可行性研究阶段地质勘察工作，于2023年5月外业进点，在预可阶段勘察成果的基础上，根据可研勘察任务书和相关规程规范，结合枢纽设计布置以及预可研阶段审查意见布置勘察工作，主要采用洞探、钻探、现场原位试验、物探、室内试验及野外地质测绘等勘察手段进行勘测，2023年12月初完成外业工作，于2023年12月中旬编制完成本报告工程地质章节。主要完成了地形图测量，比例尺分别为1:1000、1:2000、1:5000，面积分别为10.9km²、31.1km²、40.0km²；工程地质测绘比例尺分别为1:1000、1:2000、1:5000，面积分别为10.75km²、15.8km²、30.0km²；钻孔合计332孔，总进尺13263.4m，地下厂房勘探平洞合计3条，总深度933m，

1.2 区域构造稳定性

工程区域位于华南褶皱系东部的平潭－东山剪切构造带和闽东火山断坳带分界线附近； 地处东南沿海地震带南部，地震活动的强度和频度比较高，区域断裂构造发育，其中滨海断裂带在晚第四纪时期活动强烈，是大震发震构造，与工程场址最小距离为96km，历史上沿断裂发生过多次强震，对工程场址影响烈度最高可能达到Ⅶ度，未来存在发生6级左右的中强震的可能。

工程场址内的构造较简单，断层规模小，未发现晚更新世以来活动的断裂地质、地貌证据，现代小震活动频度较低，强度也较弱，因此工程场址构造稳定。

据《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015），本区基本地震动峰值加速度值0.1g，Ⅱ类场地地震动反应谱特征周期为0.45s。根据《福建省南安抽水蓄能电站工程场地地震安全性评价报告》评价成果，工程场址区50年超越概率63%、10%、5%、2%和100年超越概率2%的地震基岩水平动峰值加速度（规准后）分别为39、115、150、210、250gal，场地地震基本烈度为Ⅶ度。按照《水电工程区域构造稳定性勘察规程》（NB T 35098-2017）中关于“区域构造稳定性分级”的规定，判定本工程区区域构造稳定性较好。

工程区不具备水库诱发地震的条件，水库建成后诱发破坏性地震的可能性极小。

1.3 上水库（坝）工程地质

上水库为由东部和西部两个小盆地和中部剥蚀残余丘陵山包构成，地形条件一般，库周山体多较雄厚，西~西南库岸山体稍显单薄，西库岸及库周南部垭口、东部溪谷地形低矮需要建副坝；出露地层岩性主要为含黑云母花岗岩，次为侵入的辉绿脉岩，第四系覆盖层广泛分布，主要为残坡积砾砂质粘性土；地质构造主要为断层、节理及裂隙，断层共揭露13条，走向以NW和NE向陡倾角为主，节理裂隙密集带共揭露9条，走向以NNW～NNE向和近EW向陡倾角为主；地下水类型主要为基岩裂隙性潜水和孔隙性潜水，裂隙性潜水多分布于基岩裂隙及断层破碎带中，孔隙性潜水主要赋存于库盆覆盖层及全风化层内。

（1）上水库库区

1）水库渗漏

库区为致密坚硬的含黑云母花岗岩组成，岩体较完整，透水性微弱；地质构造简单，断层较发育，但规模不大，深部多呈弱微透水性，库盆底部封闭性好，垂直渗漏问题小；库周山体相对较雄厚，弱风化基岩面、地下水位及相对隔水层顶板大部分高于正常蓄水位较多，库岸渗漏范围较小，存在渗漏问题的地段主要分布在山脊单薄，地势较低矮的北库岸西段（主坝右坝肩～钻孔ZKS112）、东南库岸（钻孔ZKS30～东副坝段及钻孔ZKS30~ZKS31山脊段），需要防渗处理；另外f106断层沿北库岸垭口通向库外，蓄水后沿断层可能产生渗漏问题，建议对该断层进行防渗处理。

2）库岸稳定

上水库库周覆盖层分布广泛，地表植被发育，基岩风化总体较深，以土质边坡为主，坡度总体较缓，库岸整体稳定较好，蓄水后受库水浸泡及水位频繁变动的影响，部分坡度陡的岸坡易发生塌岸，需结合库盆扩挖、清库采取削坡、护坡等工程处理措施。

库外边坡根据地形地质条件分析，北库岸东段和东南库周山体总体较雄厚，不存在库外边坡稳定问题。西南库岸山体相对较单薄，但山脊位置弱风化基岩面、地下水位及相对隔水层顶板大多高于设计正常蓄水位，水库蓄水后不会改变库外边坡水文地质条件，对库外边坡稳定影响小，库外边坡整体稳定。北库岸西段（主坝近坝右库岸）和西库岸（西副坝）山脊单薄，库外地形呈斜坡下降，坡度较陡，岩体风化较深，其山脊地下水位及相对隔水层顶板高程均低于设计正常蓄水位，水库蓄水后地下水位抬升会对库外边坡造成一定的不利影响，通过库岸和坝基防渗处理，可以减小对库外边坡产生的不利影响。

3）固体径流

上水库区为兰溪小支流源头，冲沟延伸不长，库区集水面积区域内山坡多为残坡积层及全风化土覆盖，植被茂密，山坡总体较缓，冲沟内未发现规模较大的松散堆积物，冲沟两侧植被发育，沟底水流清澈，固体迳流来源少，库区无大的固体径流问题。库区正常蓄水位以下残坡积土及表部疏松的全风化土在清库扩容后已挖除，并将采取坡面防护措施。建库蓄水后，库岸边坡基本稳定，正常蓄水位以上沟长短，固体径流来源有限，对上水库淤积影响小。

4）淹没与浸没：上水库仅淹没凤巢村少量农田，库区内无具开采价值的矿产分布，无重要的城镇及居民集中地。库周均为山坡地，无浸没问题。

综上所述，库区为致密坚硬透水性微弱的含黑云母花岗岩组成，地质构造简单，库岸整体稳定较好；库周山体多较宽厚，库岸渗漏范围较小，不存在大的渗漏通道，库盆底部封闭性好，垂直渗漏问题小，不存在固体径流问题，未发现具有工业有开采价值的矿产，建库条件较好。

（2）坝址

1）受地形条件限制，上水库主坝坝址和坝线具有唯一性；主坝坝址地形宽阔，两岸山体较单薄，基岩为含黑云母花岗岩，两岸全风化较深，局部存在全、强风化深槽，河床坝线及下游侧弱风化基岩裸露，岩质坚硬，岩体以较完整为主，岩体透水性弱。地质构造较简单，节理以NE和NW~NNW向陡倾角为主，主要发育断层f100、f103，为Ⅱ级结构面，与坝轴线呈大角度相交，工程地质条件适宜建当地材料坝，坝基稳定性条件总体较好，全风化土层的不均匀性， 以及断层破碎带、全风化深槽建基面起伏大及基岩风化突变的部位，存在不均匀沉降问题，需采取必要的处理措施。

2）本阶段拟采用面板堆石板和沥青混凝土心墙堆石坝两种坝型进行比较，两种坝型的基本地质条件相同，对地基、地形适应性均较强，从地形地质条件上分析，两方案均成立。从工程地质角度上，心墙坝工程地质条件优于面板坝，经综合比较，本阶段上水库大坝推荐采用沥青混凝土心墙堆石坝。

3）推荐沥青混凝土心墙堆石坝的地基，按设计方案开挖，河床段及右岸低高程部位心墙基础置于强~弱风化岩体上，地基开挖后建基面岩体以较完整为主，局部完整性差~破碎，岩体质量主要为Ⅲ2A、Ⅲ1A类，局部为Ⅳ类； 左岸及右岸高高程部位基础置于下部密实全风化土层（标准贯入击数大于30击，下同）上，建基面岩体质量Ⅴ类，其下设置混凝土防渗墙，其基础置于强~弱风化岩层上，工程地质条件一般。全风化土层地基需进行加固处理，强~弱风化基岩地基应全面进行固结灌浆处理。

坝址两岸堆石区坝基两岸以全风化土层为主，河床以强~弱风化基岩为主，开挖形成的边坡高度较低，边坡坡度缓，稳定性好，心墙地基部分挖较深，边坡以覆盖层及全风化土质边坡为主，稳定性较差，建议进行放坡分级开挖并及时支护处理。 。

主坝左岸坝肩为较单薄山包，右岸坝肩山脊外侧为陡崖，两坝肩地下水位和岩体相对隔水层顶板（q≤3Lu）低于正常蓄水位，存在坝基和绕坝渗漏问题，须进行防渗处理，节理、裂隙密集带及断层带部位加深加强处理。

4）西副坝沿西库岸山脊布置，山脊单薄，库外地形较陡，坝线较长，覆盖层及全风化层总体较厚，节理以NE和NNW向陡倾角为主，断层较不发育，规模不大，与坝轴线多呈大角度相交，工程地质条件适宜沥青心墙堆石坝，坝基稳定性条件总体较好。设计心墙基础大部分置于下部密实全风化土层上，建基面为Ⅴ类岩体，应对地基进行加固处理，下部设置混凝土防渗墙基础置于强~弱风化岩层上；垭口及局部冲沟风化较浅，设计心墙基础置于强~弱风化基岩上，建基面岩体以Ⅳ、Ⅲ2A、Ⅲ1A类为主，对基岩段的心墙地基应进行固结灌浆处理。堆石区坝基以全风化土层为主，局部为强~弱风化基岩，开挖形成的边坡高度较低，边坡坡度缓，稳定性好，心墙地基部分挖较深，主要为土质边坡为主，建议及时支护处理。坝基、坝肩存在渗漏问题，可结合库岸进行防渗处理。

5）南副坝和东副坝为分区土石坝，高度低，清除覆盖层及全风化层上部松散土体，经适当工程措施处理后可作为分区土石坝的坝基，应注意防止土体压缩变形引起的沉降问题。坝基、坝肩均存在渗漏及绕坝渗漏问题，可结合库岸进行防渗处理。

1.4下水库（坝）工程地质

下水库位于兰溪桃园村上游河段上。库区为强烈切割中低山陡坡地貌，库周山体雄厚，整体呈南高北低趋势。坝址所处沟谷呈较开阔的“V”型谷，两岸地形较对称，左岸山体较单薄，右岸山体相对较雄厚，两岸山坡基本上为第四系地层覆盖，左岸公路边坡及局部河床等有大片基岩出露；出露地层岩性主要为含黑云母花岗岩，局部为辉绿岩、花岗斑岩岩脉等，均属坚硬岩；地质构造主要为断层、节理、裂隙，断层共揭露8条，走向以NNW~NW向陡倾角为主，规模较小，节理裂隙密集带共揭露17条，走向以NNW向和NE向陡倾角为主，主要分布于库区及枢纽区各沟谷。地下水类型主要为基岩裂隙性潜水和孔隙性潜水，裂隙性潜水多分布于基岩裂隙及断层破碎带中，孔隙性潜水主要赋存于库盆覆盖层及全风化层内。

（1）下水库库区

1）水库渗漏

下水库库周山体雄厚，组成库岸的基岩透水性微弱，无低于正常蓄水位的垭口和低邻谷，两岸正常蓄水位处分水岭宽度均大于400m，库周地形分水岭的地下水位均远高于下水库正常蓄水位。库区虽发育一些小断层，但断层均未通向库外低临谷。下水库不存在水库渗漏问题。

2）库岸稳定

两岸近坝库岸及中部右库岸地形较陡，中部左库岸地形较缓，地形完整性较差，冲沟发育，地表覆盖层及全风化土厚度较大，以土质边坡为主，自然边坡天然条件下整体稳定。根据库岸稳定性分析，库岸以稳定性差~基本稳定为主，蓄水后受库水浸泡及水位频繁变动的影响，部分坡度陡的岸坡易发生塌岸，存在水库塌岸问题。局部岩质边坡整体基本稳定。

库区尾部地形完整性较好，两岸地形坡度较陡，局部为悬崖陡壁，岸坡大部分为含黑云母花岗岩裸露，自然边坡天然条件下整体稳定。水库蓄水后，库岸局部土质边坡和卸荷松动岩块会产生少量滑塌现象，但其塌岸范围很小，不会影响水库的正常运行。

3）水库浸没与固体径流

下库区两岸地形坡度较陡，库周无农田、村庄，不存在浸没问题。

区间库区集水面积区域内山坡多有残坡积层及全风化土覆盖，但植被茂密，山坡总体较缓，未发现大的滑坡、崩塌、泥石流等不良物理地质现象，库区无大的固体径流问题。库区正常蓄水位以下残坡积土及全风化土边坡稳定性差，水库建设中已做削坡处理或进行工程防护，水库蓄水后，库岸基本稳定，采取边坡防护措施后，正常蓄水位以上，固体径流来源少，对下水库淤积影响小。但水库库尾上游河道比降较陡，主要为漂卵石覆盖， 两岸冲沟发育，沟底多分布有少量的滚石、碎石、泥砂等，洪水季节可能搬运淤积到库区，现库尾河道分布有滚水坝，具有一定程度的挡渣作用，建议根据工程运行实际情况对淤积物进行清理，另库区区间内各冲沟的沟水会携带少量泥砂、碎石等入库，建议在冲沟入库前设置适当的拦渣措施。

（2）坝址

1）下水库从地形条件分析，坝址位置地形是唯一能满足工程需要的，本阶段从地形条件、岩石风化深度等方面分析，对坝轴线进行局部优化调整，主要是考虑到右岸趾基上游侧开挖高边坡稳定问题，设计调整方案为左岸不变，右岸坝肩往下游偏移16m左右，坝轴线方向NE62°，作为下水库坝址推荐坝轴线。

2）坝址地形较宽阔，两岸岩体风化较深，不适宜修建重力坝，拟采用混凝土面板堆石坝和沥青混凝土心墙堆石坝两种坝型进行比较，综合分析，坝线均具备建造两种坝型的工程地质条件，两种坝型的工程地质条件相差不大，结合施工、环保、投资等专业综合比较，下水库大坝推荐采用混凝土面板堆石坝。

3）推荐坝线左岸山体较单薄，右岸山体相对较雄厚，地形较宽阔对称，覆盖层均较薄，两岸高高程位置岩体风化较深，低高程位置岩体风化总体较浅，河床强～弱风化基岩大片裸露，基岩主要为含黑云母花岗岩，局部为辉绿岩脉，透水性微弱，坝址区地质构造较简单，断层规模小，工程地质条件较好。趾板建议利用弱风化岩体作为建基面，岩体以较完整为主，岩体质量Ⅲ1A、Ⅲ2A类，局部为ⅡA、Ⅳ类，趾板地基岩体需进行固结灌浆处理。堆石区河床及两岸低高程部位挖除覆盖层和全风化层，利用下伏的强、弱风化基岩作为堆石体地基；两岸高高程部位建议清除全风化层上部较松散土层，利用全风化层中下部土体作为堆石体坝基。趾板开挖边坡较高，土质边坡为主，稳定性较差，需要防护处理。

开挖后坝基相对隔水层顶板（q≤3Lu）埋深较浅，基岩透水性弱，渗漏问题较小，趾板基础主要沿断层、节理及裂隙密集带渗漏，基础需全面进行帷幕灌浆，在构造破碎带附近应适当加深加密帷幕灌浆。两岸地下水位及相对隔水层顶板高程在坝头衔接部位均低于正常蓄水位，存在绕坝渗漏问题，需对坝头进行防渗处理，建议左岸坝头防渗沿山脊延伸至正常蓄水位线与相对隔水层顶板（q≤3Lu）线相交处；右岸坝头防渗沿山脊延伸至正常蓄水位线与枯水期地下水位线相交处。

4）推荐的左岸竖井溢洪洞方案工程地质条件较好，隧洞以基本稳定～局部稳定性差的Ⅱ、Ⅲ类围岩为主，成洞条件较好，过断层、浅埋冲沟及出洞口段为不稳定～极不稳定性的Ⅳ、Ⅴ类围岩为主，需加强支护处理。竖井分流堰开挖后，上部为覆盖层及全～强风化岩体边坡，边坡稳定性差，需进行支护处理，下部为弱风化岩质边坡，边坡基本稳定。

5）推荐的右岸泄洪放空洞方案工程地质条件总体较好，隧洞以基本稳定～局部稳定性差的Ⅱ、Ⅲ类围岩为主，成洞条件较好，隧洞出口段埋深浅，风化较深，以及过断层带部位为不稳定～极不稳定性的Ⅳ、Ⅴ类围岩为主，需加强支护处理。隧洞进出口边坡，均为土质边坡，边坡稳定性差，需及时支护处理。

1.5 输水发电系统工程地质

（1）本阶段根据上、下水库之间的地形、地质条件，结合工程总体布置，输水发电线路拟定了二个方案进行比选，简称北线方案和南线方案。综合分析，两个方案均具备修建大型地下洞室群的工程地质条件，两方案相距近，地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件基本相同。但南线方案引水上平段上覆山岩厚度比北线方案小，从地形条件比较，北线方案优于南线方案；南线方案下库进/出水口工程开挖量大，边坡高，主要为土质边坡，从地质条件比较，北线方案优于南线方案；因此，从地形条件和工程地质条件比较，北线方案优于南线方案，经各专业综合比较，本阶段设计推荐北线方案。

（2）推荐的北线输水发电系统线路方案山体较雄厚，围岩主要为微风化～新鲜含黑云母花岗岩，致密坚硬，岩体多较完整，地质构造和水文地质较简单，没有发现大的断层破碎带，围岩以Ⅲ、Ⅱ类，块状～次块状结构为主，成洞工程地质条件较好，局部断层破碎带属Ⅳ、Ⅴ类稳定性差须要及时工程处理。引水隧洞下平段至岔管段岩体覆盖厚度不满足钢筋混凝土衬砌方案的设计要求，断层及局部节理在高压内水的作用下存在渗漏及渗透稳定问题，采取钢筋混凝土衬砌方案存在较大的技术难度及风险，因此从工程地质条件分析和保障工程运行安全出发，推荐引水隧洞该部位采用钢板衬砌。

（3）上水库竖井式进/出水口地形较缓，全风化厚度较大，设计布置的竖井井身基本位于弱～微风化岩体内，成井条件总体较好；结合库盆开挖后井口平台周边开挖坡不高，边坡基本稳定，但需支护处理。

上库闸门井位于主坝左岸坝头山包，设计平台高程619m，开挖后基本与坝顶齐平，无边坡稳定问题；井身上部围岩全～强风化岩体内，井壁稳定性差，需加强支护处理，中下部围岩弱～微风化岩体内，成井条件总体较好。

下水库进/出水口地形较陡，设计进洞口位置弱风化基岩裸露，成洞条件较好，闸门井平台高程以上全风化厚度大，开挖后边坡主要为土质边坡，稳定性较差，需及时支护，局部为弱风化岩，边坡基本稳定性。

（4）本阶段拟定了尾部和中部两个开发方案进行比选，两方案地下厂房之间相距约520m，中部方案厂房上覆岩体较尾部方案厚100~180m左右，其工程地质条件、水文地质条件相近，结构面、地应力与洞轴线关系总体相似，围岩类别为Ⅲ、Ⅱ类，局部断层破碎带为Ⅳ类，均具备修建大型地下洞室群的工程地质条件，地质上不存在方案选择的制约性因素，具体选择须结合水工枢纽布置、经济比较综合考虑，经过比较设计本阶段推荐尾部开发方案。

（5）推荐的尾部开发方案地下厂房洞室深埋于微风化～新鲜岩体内，设计推荐的厂房位置和轴线方向是合适的，未发现大的断层带通过，岩石坚硬，岩体以较完整～完整为主，块状～次块状结构，局部完整性差，岩体透水性微弱，水文地质条件简单，洞室围岩类别以Ⅲ、Ⅱ类为主，修建大型地下洞室的工程地质条件较好，地应力量级属中等，围岩基本稳定，局部稳定性差，洞室开挖后需及时支护处理。

（6）500kV开关站布置共两个比较方案，工程地质条件均可满足要求，本阶段设计选择位于下水库库内右岸的方案一作为可研阶段推荐开关站。推荐方案站址区覆盖层较薄，但全、强风化厚度大，建基面为全风化、强～弱风化岩体，其强度可基本满足上部建筑物的承载及变形稳定要求，地基不均沉降问题不突出，建议基础进行工程处理。后缘开挖边坡主要为土质边坡，局部为强风化边坡，边坡整体稳定性差，应采取全坡面支护处理，并做好排水措施。

500kV出线竖井井口段覆盖层及全风化厚度较大，井口围岩主要为Ⅵ类围岩，开挖边坡主要为覆盖层及全风化的土质边坡，稳定性差，需进行工程支护处理；隧洞（井身）围岩以Ⅲ、Ⅱ类为主，局部Ⅳ类，洞（井）室围岩基本稳定，局部稳定性差，需及时进行支护处理。

(7)推荐的进厂交通洞和通风兼安全洞相距近，工程地质条件相当，进洞口段围岩为Ⅴ、Ⅳ类，成洞较为困难，边坡为土质边坡，稳定性差，必须采取强支护措施，争取早进洞，确保围岩稳定及施工安全。隧洞段岩脉及断层、节理较发育，围岩以Ⅱ、Ⅲ类为主，断层破碎带及其影响带为Ⅳ类；洞室多位于地下水位线以下，沿线地下水较活跃，需采取抽排水措施。

1.6 弃渣场

上、下库弃渣场地形地貌上为山区沟谷，场地植被发育，自然边坡稳定性较好，无大的崩塌、滑坡、泥石流等不良物理地质现象，不存在影响渣场稳定性的大的软弱土层，工程地质条件较好。渣场堆渣高度大，属大型渣场，堆渣成分以土为主，力学强度低，堆填土高边坡稳定性差，易产生滑塌，甚至引发泥石流地质灾害，危害性大，因此渣场应做好排水设施，应对渣土高边坡进行加固（如碾压）等专项设计与治理。

1.7天然建筑材料

（1）工程区天然砂砾料缺乏，工程所需混凝土骨料建议采用人工轧制石料代替。

（2）上、下水库石料场均位于库内，运距近，开采运输方便；岩性主要为含黑云母花岗岩，为非活性骨料，作为大坝堆石料和人工骨料，其质量、储量均满足规范要求，但均存在无用层厚度大、弃渣量大的问题。

（3）地下洞群开挖料、上下水库明挖料的岩性主要为含黑云母花岗岩，质量好，可充分利用。通过探洞洞渣人工骨料（细、粗骨料）轧制试验成果表明，混凝土人工粗骨料除堆积密度略微小外，其余指标基本基本满足NB/T10235-2019“人工轧制混凝土细、粗骨料质量技术指标”的相关要求。

（4）上、下水库库内石料场覆盖层及全风化层较厚，土料场储量丰富，成分以砾、砂质粉质粘土～粉土为主，可作为土料使用，除个别试验指标外，储量、质量可满足规范要求。

（5）沥青混凝土心墙需要碱性骨料，工程区周边无沥青心墙所需的碱性骨料料源分布，需外购，唯运距远。