

长江下游地区超超临界发电机组引水盾构隧道工程地质论证

孙茜^{1,2}, 阎长虹¹, 袁裕财³, 许宝田¹, 刘经纬³

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210046;

2. 南京理工大学紫金学院, 南京 210023;

3. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250014)

摘要: 发展高能效超超临界发电机组已成为当今世界火力发电的重要趋势。长江下游地区经济发达、需电量大, 而且具有得天独厚的水资源环境。近年来, 沿江两岸相继建设一些超超临界发电机组, 其中循环冷却水系统是超临界机组的关键工程之一。本文针对长江下游地区发电厂超超临界发电机组引水工程问题进行相关研究, 分析了隧道引水相比于明渠引水的优势, 以及长江下游地区深水隧道施工和运营面临的主要工程地质问题。结合苏南某发电厂扩建工程兴建的 2×1000MW 燃煤机组隧道引水工程, 从引水工程方案选择、隧道风险因素分析、盾构隧道空间优化分析三个方面进行施工方案论证, 并论述了盾构隧道穿越长江大堤和江底复杂地层施工需要注意的问题。这一研究成果对类似工程具有示范意义。

关键词: 工程地质学; 超超临界机组; 长江下游地区; 引水隧道; 方案论证

中图分类号: TU411.5

Engineering geological assessment of diversion tunnel shield of ultra-supercritical generating units in the lower reaches of the Yangtze river

Sun Qian^{1,2}, Yan Changhong¹, Yuan Yucan³, Xu Baotian¹, Liu Jingwei³

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046;

2. Nanjing University of science & technology ZiJin college, Nanjing 210023;

3. China Railway 14th Construction Bureau Corporation Limited, Jinan 250014)

Abstract: Ultra-supercritical generating units has become an important trend in the development of thermal power in today's world. The lower reaches of the Yangtze River is a developed area with large electricity demand, and has a unique water resources environment. In recent years, along the sides have been building a number of ultra-supercritical generating units, which circulating cooling water system is one of the key projects of supercritical units. In this paper, related research about diversion project of ultra-supercritical power plants in the lower reaches of Yangtze River is did. The advantages of diversion tunnel compared to Engineering geological assessment of diversion tunnel shield of ultra-supercritical generating units in the lower reaches of the Yangtze river the open channel and the main engineering geological problems of construction and operation of deep water Tunnel in the lower reaches of the Yangtze River is analyzed. Combined with a diversion tunnel project of 2 × 1000MW coal-fired units built in a power plant expansion project in the south of Jiangsu province, demonstrate the program from three aspects: the selection of diversion works, risk factors of tunnel and space optimization analysis of shield tunnel, and discuss the problems that need attention of the shield structure tunnel crossing the Yangtze River embankment and river bottom stratum complex construction. The results have implications for similar projects.

Keywords: geological engineering; ultra-supercritical unit; the lower reaches of the Yangtze River; diversion tunnel; scheme demonstration

基金项目: 教育部博士点基金项目 (编号 20130091110020); 江苏科技厅社会发展支撑项目 (编号 BE2015675)。

作者简介: 孙茜 (1983-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 工程地质学

通信联系人: 阎长虹 (1959-), 教授、博导, 主要研究方向: 环境岩土工程. E-mail: yanchh@nju.edu.cn

0 引言

目前,在我国整个电网中,燃煤火力发电占 70%左右,电力工业以燃煤发电为主的格局在未来一段时期内难以改变。但是,燃煤发电在创造优质清洁电力的同时,会产生大量的污染排放。如何提高煤炭能源的利用率,改善环境质量成为世界各国面临的迫切问题。国内外成功运行的实例证明,发展大容量、高能效的超(超超)临界机组是当今世界火电发展的重要趋势之一^[1-2]。

超超临界发电机组运行过程中需要大量循环冷却水,因此需要配套引水设施。常见的引水方式主要有明渠引水和隧道引水两种。明渠引水工艺简单,但存在泥沙淤积问题,不少学者开展了相关研究,徐啸等^[3]对核电厂引水明渠进行泥沙回淤分析;徐霖玉等^[4]通过物理模拟试验研究无坝引水明渠淤积成因;张旭滨等^[5]针对某水厂引水口淤砂严重问题进行研究,提出对引水口进行机械排砂设计方案。而对于引水隧道的变形和受力状况以及下穿建筑物的影响,众多学者亦已进行了一些研究,如朱苦竹等^[6]对某水电站引水隧道进行三维粘弹塑性限元分析,分析了围岩结构的受力、变形演化状况;张忠苗等^[7]分析过江盾构隧道穿越大堤段地表沉降问题,给出了泥水平衡盾构穿越大堤控制地表沉降的措施;原华等^[8]对大直径越江盾构隧道进行了各向异性渗流应力耦合分析。

长江下游地区由于其特殊的地质环境和自然环境,引水方案的选择具有其特殊性。苏南某发电厂扩建 2×1000MW 燃煤机组的引水隧道工程是我国首座长江下游深水区特大型取水隧道。盾构机先后穿越长江大堤和复杂的地质环境地段。隧道穿越区地层富含沼气,岩性为淤泥质软土及松散粉细砂地层,地层呈现上软下硬特征,工程地质条件非常复杂。隧道施工技术难度大,工程风险高,在我国水下引水隧道建设中极为罕见。本文结合这一发电厂引水隧道工程,对长江下游超超临界发电机组引水方式和施工方法进行了论证,并分析穿越长江大堤和穿越江底复杂地层盾构施工技术,该研究成果对类似工程具有积极示范作用。

1 长江下游超超临界发电机组主要引水方式

长江下游地区经济发达,需电量大,而且长江下游沿线两岸具有得天独厚的引水优势,是许多发电厂的首选地点,沿江平均每十几公里就有一个发电厂。尤其近十几年来,长江下游地区建成多个超超临界发电机组,均采用直流供水方式。长江下游地区主要超超临界发电机组分布见图 1。

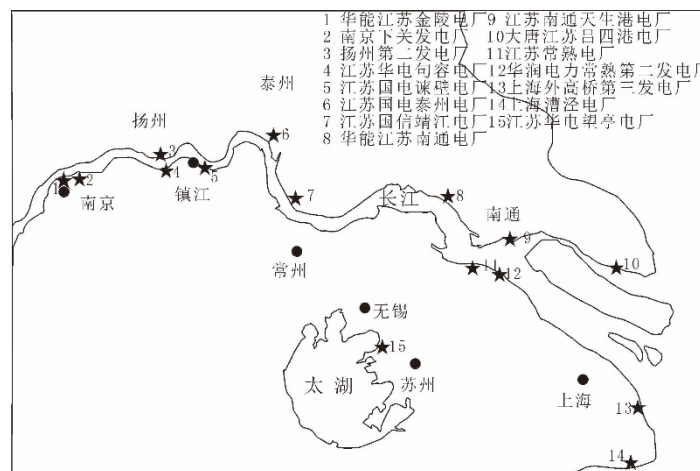


图 1 长江下游主要超超临界机组分布图

Fig.1 layout of main ultra-supercritical generating units in the lower reaches of the Yangtze river

图 1 所示 15 家长江下游发电厂超超临界发电机组, 其中 11 家采用隧道引水, 两家采用明渠引水(浅取浅排), 两家采用深取浅排方式进行取排水。隧道引水占总引水方式的 73.3%。长江下游发电厂超超临界发电机组大多采用隧道引水的方式, 主要有以下三个方面原因:

(1) 引水口泥沙淤积问题。对于超超临界发电机组的循环冷却水来说, 引水的基本原则是要保证设计要求的引水流量和引水的保证率, 防止口门前的淤堵和大量泥沙进入引水口, 确保引水口能够满足在设计要求的工况下长期正常运行。长江水流夹带的大量泥沙进入下游, 而且下游江面宽水深, 江底高低不平, 容易发生漩涡浊流, 特别时在汛期, 水位较高, 江水含泥沙量大, 进入下游水流速度下降, 冲淤平衡遭到破坏, 许多地段发生淤积。在江边开挖明渠, 易引起引水口淤积, 国内有很多火电厂采用明渠引水在投产运行不久即发现引水口出现大量淤积, 如镇江某电厂每年都要花费大量人力物力进行疏浚。而隧道引水进入长江深水区从江底对接引水立管引水, 则避免了泥沙淤积问题。

(2) 对周围航道及港口的影响。长江是世界上运输最繁忙、运量最大的通航河流之一。明渠引水设施的施工会影响来往航运, 且影响地面已建和后建构筑物的布局及运营。同时, 航运引起的波浪也会影响明渠进水的波动幅度, 对于明渠引水来说是不利的。而隧道引水则可以避免这些不足, 既不影响江面通航及周边建筑物的布局及运营, 且不受天气因素的影响。

(3) 对水质水温的要求。长江沿岸的地质条件差, 地下水位高。相比于明渠引水, 盾构隧道引水属于深水区引水, 水质更容易得到保障。另外, 超超临界机组循环冷却水用来冷却凝汽器里的水蒸汽, 循环冷却水水温越低, 冷却效率越高。长江下游取排水口及码头构筑物密集, 引水明渠往往紧邻排水明渠下游, 导致热回归现象突出, 大大降低了冷却效率。研究表明: 镇江某电厂 4, 5 期引水明渠紧邻排水明渠下游, 热回归现象突出^[9]。

2 长江下游深水隧道主要工程地质问题

隧道开挖后, 隧道管片通过环间的螺栓相连。在沿隧道长度方向相当于一个埋置于地下的刚性管状结构, 在土压力、水压力、地基抗力等多重外力作用下处于平衡状态。由于长江下游地区特殊的不良工程地质条件, 使得隧道易发生不均匀变形、管片间张应力增大, 甚至导致隧道破坏并引发一系列环境岩土工程问题。从目前长江下游江底隧道施工中所出现的主要环境工程地质问题, 可以初步总结如下几个方面:

(1) 深厚软土层不均匀分布

长江下游地区土的成因为河流冲积相, 软土分布广泛, 其孔隙比和含水量高、压缩性高、易发生流动变形, 工程性质较差^[10-11]。由于土层分布不均匀, 其间多有软土层分布, 而隧道较长, 可能穿越不同土层。隧道在不同性质的地层围岩介质中会产生不同变形, 当地层差异变形达到一定程度时, 会导致隧道结构发生扭剪, 隧道的衬砌接头产生裂隙, 不仅危及隧道自身安全, 而且影响周围建筑物、构筑物安全。上海黄浦江某越江隧道江中段和浦东段, 其下卧层为粘质粉土或粉砂与淤泥质粘土互层(接近砂性土) 的土层, 投入运行后的十几年来, 沉降增量为 40~50mm, 而浦西段隧道下卧层为松软的淤泥质粉质粘土, 最大沉降增量达 120mm, 出现严重的纵向不均匀沉降, 成为隧道结构的薄弱环节^[12]。

(2) 多层承压水

长江下游河流相二元结构的上部土层为细粒土不透水层, 而下部为利于地下水的径流和富集的粗粒土, 从长江中游到下游, 含水层颗粒由粗变细, 承压含水层层厚变大, 且长江下游含水层具有多层承压含水层的特点。以上海为例, 上海在 30m 以下包括 5 层承压含水层,

含水层总厚度较大,水量丰富。其中对工程施工影响最大的含水层为第一、二层承压含水层,第一层承压含水层埋深 28~42m,厚度为 10~22m,水头呈周期性变化,岩性为粉细砂;第二层承压含水层埋深 65~81m,厚度为 10~27m,岩性为中粗砂^[13]。

在隧道施工中,承压水易诱发管涌、突涌、渗流等环境岩土工程问题。在隧道掘进过程中,隧道内外水压差很大,在承压水渗透力作用下,砂层极易发生管涌破坏现象。当隔水层上部压力减小,上覆土体压力小于承压水的水压力时,承压水可能冲破隔水层涌出,发生突涌事故。而与陆地隧道不同,深水隧道施工区地表为滔滔东流的长江,承压含水层与长江水有着密切的水力联系,水位波动受长江水位及潮汐作用影响较大。隧道部分位于承压含水层中,承压水水位变化隧道发生整体隆沉外,还将导致自身产生较大的竖向压缩、水平伸长变形^[14]。

(3) 浅层气

浅层气一直是隧道施工过程中比较危险的因素。浅层气的危害主要体现在一下两个方面:首先,易燃易爆。浅层气的主要成分为甲烷,属于易燃易爆的有毒气体,其盾构机作为高度机电一体化机械设备,很难做到完全防爆,一旦局部沼气浓度汇聚到一定程度,容易产生爆炸,带来危害。其次,与高压地下水共同作用引起气液喷涌。在隧道掘进过程中隔水层上部压力减小,气体释放,气囊压力减小,在浅层气(气团)、腐植质及下层土承压水共同作用下,周围土体涌向原有气囊的空腔,可能会导致盾构管片破裂、隧道空间扭曲甚至坍塌损毁。

(4) 河流演变

引水隧道是一项投资巨大的大型工程,建成后需要运营六十年甚至更长时间。因此,不仅要考虑隧道施工期间的稳定性,还要保证其具有长期稳定性。江底隧道需要考虑河流的侵蚀、江底泥沙的运动状况、长江深槽的变迁对隧道长期稳定性带来的影响。隧道所处泥沙的运动状况使河床处于淤积或冲刷的状态,河流侵蚀会导致隧道上覆应力减小,垂直和侧向土压力都相应减少,隧道所受的浮力和隧道底部周围的地应力释放将迫使隧道向上位移。由于河床冲刷的非均匀性和隧道衬砌结构纵向刚性的非均匀性,所以管片的沉降也呈现纵向非均匀性,相邻管片之间的剪切力和张拉力将会增大,管片之间会发生错位和环缝张开变形。

深槽系河床中相对低洼的顺河分布的槽状地形。长江中下游九江-大通间河床出现几十处河床地貌概念中的深槽,一般水深达10~15m。除处在原先横截古山系、嵌在断裂构造中的古深槽,河宽缩减段、弯道凹岸部位、支流汇入口部位易发育深槽^[15]。随着经年河道冲刷变迁,长江深槽的位置和深度也会发生变化,从而打破邻近深槽隧道的平衡状态。

3 苏南某发电厂引水隧道工程场区环境地质条件

3.1 工程背景及场地周围环境

苏南某发电厂扩建的 2×1000MW 燃煤机组为超超临界发电机组,是国家“八五”期间的重点建设项目。项目投产后,该电厂总装机容量从 1200MW 跃升到 3200MW,将大大缓解江苏电网供电紧张的状况。由于该机组用水量,需要进行引水工程建设。

场区周围建筑物密集,环境地质条件复杂,处于已建或在建构筑物的包围中,上游有在建码头、临近徐六泾河航路,下游仅距输煤栈桥防撞桩 40m,而且紧靠电厂的排水口,见图 2。同时场区位于长江与徐六泾河河流交汇处,江面宽,水流量大,受潮汐作用强烈。



图2 拟建引水工程周围环境图

Fig.2 surroundings of the proposed diversion project

3.2 工程地质及水文地质条件

本工程地处长江下游平原近入海口，位于电厂一期码头靠近徐六泾河一侧。地势平坦开阔，为冲积形成的河漫滩地质地貌，地层具有典型二元结构特征。其水下地貌呈西高东低，南高北低的趋势，地形起伏变化不大。场地地层主要由第四纪全新统冲、湖积物（ Q^{4al+1} ）和上更新统冲积物（ Q^{3al} ）组成，地层分布基本稳定，地层纹层理发育，软土与粉土、粉砂、细砂互层。具体地层岩性描述如下：①粉砂夹粉土：灰～青灰色，饱和，稍密；②淤泥质粉质粘土：灰色，软塑，土质不均匀；③粉质粘土夹粉砂：灰色，土质不均匀，很湿，软塑～可塑，含有腐植质，含泥质结核，具气孔，此层中局部浅层气（沼气）富集。粉砂薄层一般稍密，很湿，多以透镜体产出；④粉土：灰色，土质不均匀，中密，很湿，含云母，夹粉砂和薄层粉质粘土；⑤粉质粘土：灰色，可塑，夹粉土和薄层粉砂；⑥粉砂：灰色，不均匀，中密～密实，局部为中粗砂。

场区内 50m 以浅分布有第四系全新统冲积形成的含水层组，主要有两层含水层，富水性都较好。④层粉土为第一层承压含水层，⑥粉砂为第二层承压含水层。两层承压含水层在场区内均广泛分布，但是在不同地区两层含水层的厚度不尽相同，第一层承压含水层的平均厚度为 11.5m，第二层承压含水层的平均厚度为 8.2m。

历年平均高潮位 2.041 m，低潮位 -0.399 m；历年涨潮最大潮差 3.411 m；涨潮最小潮差 0.461 m；历年落潮最大潮差 3.361 m，落潮最小潮差 0.1911 m。场区长江水域流速特征值：涨潮平均流速 0.55 m/s 涨潮最大流速 3.12m/s，落潮平均流速 0.98 m/s，落潮最大流速 2.78 m/s。

4 施工方案论证

4.1 引水方案及施工方法选择

苏南某发电厂引水工程位于长江入海口，受长江下游下泻超大流量江水和潮汐双重作用，如果采用明渠引水，对长江河势稳定影响大，不利于长江大堤的安全，影响地面已建和后建构筑物的布局及运行。同时，明渠引水占地面积大，涉及拆迁等问题，投资费用高，工程量，工期长。河床渗漏对附近水环境影响大，存在防洪问题，后期维护易受环境条件和

极端气候的影响,容易混入泥沙、杂物,水处理难度大、费用高,经多方论证决定采用地下隧道引水方案。

由于工程区地质条件差,地下水位高、承压水量大,且需要穿越长江大堤进入长江深水区,工程区构筑物及环境对隧道施工要求较高,盾构法在此输水隧道工程中有较高的技术经济优越性,宜采用盾构法施工。

4.2 盾构隧道风险因素分析

(1) 隧道施工期间风险

引水隧道处于长江江底以下软土与粉土、粉砂、细砂土层交互分布区,上软下硬,地层厚度分布不均。盾构推进初始阶段主要穿越①粉砂夹粉土层,后续穿越②淤泥质粉质粘土层、③粉质粘土夹粉砂层,隧道底部④粉土层为承压含水层,不均匀分布的软土层极易导致盾构隧道发生差异变形。盾构穿越地层剖面见图3。

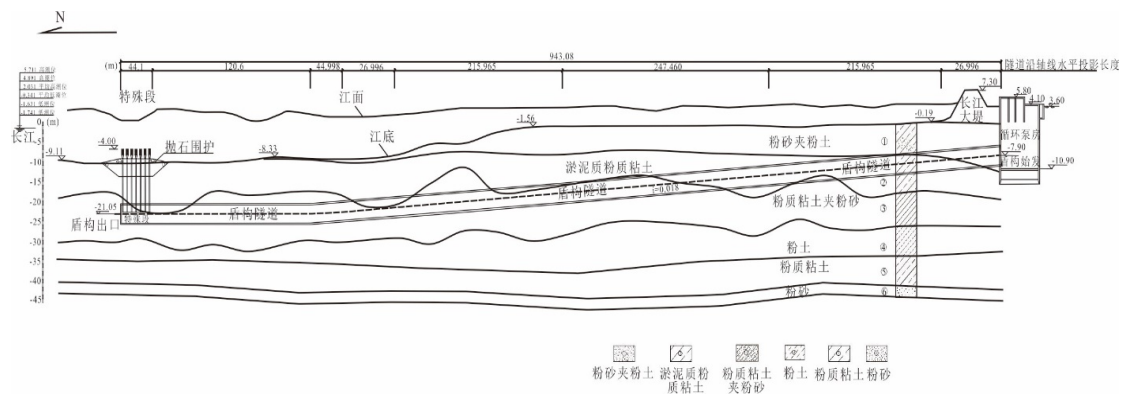


图3 盾构穿越地层剖面图

Fig.3 sectional view of stratus crossed by shield tunnel

另外,③层粉质粘土夹粉砂,含有腐植质,含泥钙质结核,局部含有浅层气(沼气)富集,④粉土为承压含水层,在隧道掘进过程中隔水层上部力减小,气体释放,气囊压力减小,在浅层气(气团)、腐植质及下层土承压水共同作用下,周围土体涌向原有气囊的空腔,可能会导致盾构管片破裂、隧道围岩下部发生脱空,引发隧道坍塌损毁。

(2) 隧道运营期间长期风险分析

本文主要从长江深槽及江底泥沙运移两个方面来分析隧道运营期间的长期风险问题。二十世纪五十年代以来,长江徐六泾段因农场的修建,水域宽度缩减至6km左右。此后由于滩面加高,长江深槽向深处发展。图4为现阶段长江徐六泾段横断面剖面图。从图中可以看出,长江深槽深度达到40多米,相距常熟电厂所修建的输水隧道相距有800m左右。深槽坡度约为10%,坡度较为平缓,由于在距离隧道相距较远,长江下游江水流速缓慢,深槽位置变化不大,在工程使用期内不会对隧道稳定性产生影响。

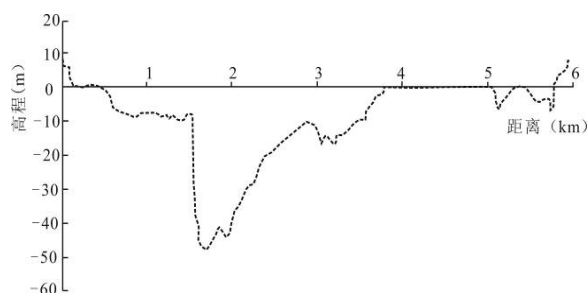


图4 徐六泾段断面形态

Fig.4 section configuration of Xuliujing

此外,本段河床的塑造主要受落潮流的控制,根据有关研究资料^[16-17]得知,徐六泾和附近的泥沙起动流速见表1所示,江底泥沙的起动速度为0.79m/s左右。很显然涨潮期间由于水流速度小于泥沙的启动速度,故在涨潮阶段泥沙处于淤积状态;落潮阶段,由于流速较大,大于泥沙的启动速度,河床呈冲刷状态。由于长江中上游的工程建设,使得长江下游地区的含沙量处于一个下降的状态,涨潮平均含沙量为1.76kg/m³,落潮平均含沙量为1.50kg/m³。

因长江徐六泾段处于长江潮流作用为主向径流作用为主转化的过渡地带,苏南某发电厂输水隧道工程并未延伸到受冲刷较为严重的长江深槽之中,场区河水的泥沙量在整体处于一个相对稳定的状态。河床在隧道工程运营期间处于稳定状态,并不会对工程造成影响。

4.3 隧道空间布局优化分析

在平面位置上,若从目前工作井(循环水泵房)西侧新建引水隧道则需穿越徐六泾河河堤进入河底、再进入长江至在建的码头上游深水区取水,盾构引水隧道总长近3公里。若在东侧新建引水隧道,需穿越老厂区诸多构筑物,在障碍物繁多的情况下一直顺沿长江大堤内侧边延伸,对长江大堤安全造成影响,穿越长江大堤至长江深水区取水,盾构引水隧道总长近2km以上;往东往西新建改线隧道都有长距离盾构推进,需增加多个工作竖井,距离长江很近,危险源增加,风险加大,需要加强防护措施,投入的成本将成数倍增大。很难在有限的工期内完成工程建设,满足设计投产引水需求。

在深度上,如果对盾构隧道出洞工作井(循环水泵房)进行加深处理(见图5),需至少加深8m以上才能避开越过②淤泥质粉质粘土和③粉质粘土夹粉砂地质层,如果盾构隧道推进线路避开②淤泥质粉质粘土和③粉质粘土夹粉砂层浅层气团,加深至④⑤层交界,其投入成本也将增加很大,而且东北角与长江大堤内侧仅12m距离,循环水泵房下沉对长江大堤采取的保护加固措施同样代价很大,相应的风险更大。

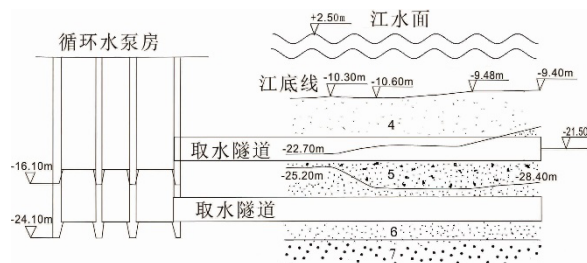


图5 隧道剖面布置图

Fig.5 sectional layout of tunnel

再者,加深工作井(循环水泵房)8m以上对盾构管片设计要求更高,在此层地质有较强承压水的不良地层现象,在特殊段的垂直顶升关键工序工艺施工时风险也增大,垂直顶升的引水立管管节(13节)施工要经过承压水层、浅层气(沼气团)层顶升至长江江底面以上2-3m水中,其风险非常大。加深盾构推进土层虽然避开浅层气团层,但隧道特殊段的7个引水立管很难选择位置,经过这些不良地层其风险同样很大。若打孔太多顶升时将产生对土体的扰动,长江水、承压水都有渗漏透入隧道内的风险,垂直顶升的工序工艺可能无法实施。因此,鉴于现场实际情况和工程勘察资料分析,目前设计方案在现有的特殊地质环境下是优化可取的,但施工中的风险较高、施工难度极大,从隧道位置空间分析来看,没有选择余地。

鉴于以上分析,引水工程设计方案将采用两条平行的江底输水隧道和7×2根取水立管,

江底隧道起始于电厂扩建工程西北的循环水泵房，即循环水泵房进水间作为盾构始发工作井。两条隧道轴线间距 21.6m（净间距 16.8m），隧道总长度 957m，其中长江大堤外 12m，穿越长江大堤段 75m，江中水域段约 870m。

4.4 盾构隧道管片设计及施工技术要求

盾构管片采用 C50 强度，抗渗等级 S8 的高强度预应力混凝土管片。每环由 6 个管片构成，包括 1 块封顶块，2 块邻接块，3 块标准块。封顶块管片圆心角为 50°，邻接块管片圆心角为 50°，标准块管片圆心角为 70°。管片宽度 0.9m，管片厚度 0.3m，盾构横截面见图 6。

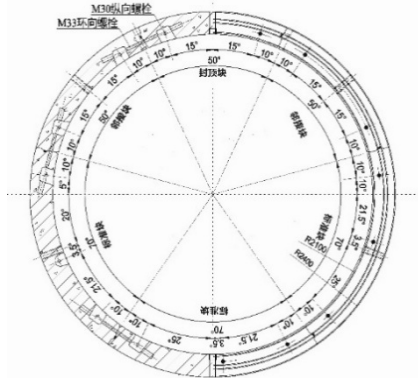


图 6 盾构横截面
Fig.6 transverse section of shield

盾构隧道先后穿越长江大堤，穿越江底富含沼气、岩性为淤泥质软土及松散粉细砂的复杂地

层，工程地质条件非常复杂，施工难度很大。在施工中注意以下几点：

(1) 土层渐变区域：①粉砂夹粉土层到②淤泥质粉质粘土层，②淤泥质粉质粘土层到③粉质粘土夹粉砂层，应及时调整盾构施工参数以适应不同地层。在④淤泥质土层中推进过程中应注意动态平衡，防止盾构机发生俯仰、偏转及横向偏移。

(2) 通过深井降水，降低⑥粉土层承压含水层水头，将承压水位降深控制在隧道顶部以上土层，同时释放⑤灰色粉质粘土夹粉砂中的沼气。

(3) 盾构穿越长江大堤时，因上覆土厚度发生变化，应保持合理的泥水压力，以避免开挖面土体失稳。适当提高注浆量，合理设定注浆压力，及时、同步注浆；盾构通过后，沿环片一周 2.5m 范围内对衬砌周围土体进行二次压注水泥浆，加固扰动土体。加强盾构姿态的测量和地面的监控测量，建立长江大堤沉降监测系统，以此指导施工，大堤的允许沉降量必须满足二级堤防沉降要求。

5 结论

(1) 针对长江下游沿线建设超超临界发电机组引水工程问题，从水文、环境、周围航道及港口、水质水温、地质条件等方面对明渠取水和隧道引水方案进行对比分析。结果显示采用盾构隧道引水具有显著优势。

(2) 长江下游深水隧道由于其特殊的工程地质特征，面临的主要工程地质问题有：深厚软土层不均匀分布、多层承压水、浅层气和河流演变。

(3) 苏南某发电厂输水盾构隧道位于长江下游江底深水处，可能存在软土、浅层气、长

江深槽、泥沙运动等不良地质作用,对隧道施工安全影响较大。

(4) 针对苏南某发电厂输水盾构隧道施工面临不利的水文、环境和地质条件,给出盾构隧道施工过程中应采取的工程措施。

275

[参考文献] (References)

280

285

290

295

- [1] 乌若思.超超临界发电技术研究与应用[J].中国电力, 2006, 39 (6): 34-37.
- [2] 冯伟忠.欧洲超超临界机组发展的特点和启示[J].华东电力, 2008, 36 (2): 127-132.
- [3] 徐啸.核电厂引水明渠泥沙回淤分析[J].海岸工程, 1998, 17 (4): 5-12.
- [4] 徐霖玉.无坝引水明渠淤积成因物理模拟试验研究[J].水电能源科学, 2015, 33 (1): 108-110.
- [5] 张旭滨.水厂引水工程明渠排砂设计[J].中国给水排水, 2008, 24 (4): 44-46.
- [6] 朱苦竹.某水电站引水隧道三维粘弹塑性有限元分析[J].地下空间与工程学报, 2005, 1 (5): 717-724.
- [7] 张忠苗.过江盾构隧道穿越大堤的地层沉降分析及控制[J].岩土工程学报, 2011, 33 (6): 977-984.
- [8] 元华.大直径越江盾构隧道各向异性渗流应力耦合分析[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27 (10): 2130-2137.
- [9] 徐世凯, 朱进国.谏壁电厂"以大代小"改建工程取排水口水工布置[J].河海大学学报(自然科学版), 2007, 35 (5): 581-586.
- [10] 阎长虹, 夏文俊, 董平等.长江下游地区软土工程地质特征及其成因类型分[J].工程地质学报, 2007, 15: (增刊): 142-145.
- [11] 阎长虹, 吴焕然, 许宝田等.不同成因软土工程地质特性研究-以连云港、南京、吴江、盱眙等地四种典型软土为例[J].地质论评, 2015, 61 (3): 561-569.
- [12] 郑永来, 韩文星, 童琪华, 等.软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24 (24): 4552-4558.
- [13] 刘军, 潘延平.轨道交通工程承压水风险控制指南[M].上海: 同济大学出版社, 2008.
- [14] 郑刚, 邓旭, 刘庆晨.承压含水层减压降水对既有盾构隧道影响研究[J].岩土力学, 2015, 36(1): 178-188.
- [15] 杨达源.长江地貌过程[M].北京: 中国地质出版社, 2006.
- [16] 李键庸.长江大通-徐六泾河段水沙特征及河床演变研究[D].南京: 河海大学, 2007.
- [17] 杨欧.长江口北支沉积物粒径趋势及泥沙来源研究[J].水利学报, 2002, 2: 79-84.