

# 综合技术在北运河杨洼船闸 勘察中的应用<sup>\*</sup>

杨良权，张琦伟，刘爱友，晋凤明，王彪，汪琪

(北京市水利规划设计研究院，北京 100048)

**摘要：**针对北运河杨洼船闸渗透变形破坏、地震液化、地下水控制及天然建筑材料平衡、水环境亲水安全等问题，采用综合地质测绘、综合工程物探、地质钻探、原位测试、水文地质试验、室内试验、水环境质量调查、BIM 等技术对建设场地进行勘察，并对主要工程地质问题进行深入研究。结果表明，采用标准贯入和静力触探综合确定了场地地震液化下限，原状砂土的室内试验确定基础持力层的物理力学性质及其渗透变形等参数；现场抽水试验提出船闸基坑地下水控制的水文地质参数；BIM 对开挖弃土工程量进行精细计算；水质的全分析确定水体对人体不会造成健康风险，勘察效果良好。

**关键词：**工程地质钻探；综合工程物探；水文地质试验；室内试验；水环境质量评价；BIM

中图分类号：U 641；TV 691

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)08-0179-07

## Application of comprehensive technology in Yangwa ship lock investigation of China's North Canal

YANG Liang-quan, ZHANG Qi-wei, LIU Ai-you, JIN Feng-ming, WANG Biao, WANG Qi

(Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In view of the problems including seepage deformation, seismic liquefaction, groundwater control, natural building material balance, and hydrophilic safety in the water environment of Yangwa ship lock of China's North Canal, this paper uses comprehensive geological mapping, comprehensive engineering geophysical prospecting, geological drilling, in-situ test, hydrogeological test, laboratory test, water environment quality survey, BIM, and other technologies to investigate the construction site and conducts in-depth research on main engineering geological problems. The results show that the standard penetration and static cone penetration determine the lower limit of seismic liquefaction in the site, and the laboratory test of undisturbed sand obtains the physical and mechanical properties and seepage deformation parameters of the foundation bearing stratum. The field pumping test reveals hydrogeological parameters of groundwater control in the ship lock foundation pit. BIM finely calculates the amount of excavated spoil. The comprehensive analysis of water quality confirms that the water will pose no health risks to humans, and the investigation yields favorable results.

**Keywords:** engineering geological drilling; comprehensive engineering geophysical prospecting; hydrogeological test; laboratory test; water environment quality evaluation; BIM

收稿日期：2021-12-15

\*基金项目：北京市重点工程项目(2021-YWCZ-KC01)；北京市水利规划设计研究院科研专项(SG2020059)；北京市科研项目(XM-0000152102170227021)

作者简介：杨良权(1986—)，男，硕士，高级工程师，从事岩土工程及工程地质勘察工作与研究。

改革开放以来，我国水利水电行业的勘察技术水平得到了极大提升，勘察方法和手段也有很大程度的创新和发展。尤其是近几十年，随着计算机水平不断提高，多种先进的方法在水利勘察中得到广泛应用，如郑智杰等<sup>[1]</sup>采用综合物探技术查明洛潭水库的岩溶渗漏及裂隙渗漏问题；刘海心等<sup>[2]</sup>利用高密度电法在水库大坝渗漏探测上取得良好效果；付代光等<sup>[3]</sup>将综合地球物理测井技术应用到滇中引水隧洞勘察中，为岩体完整性的准确判断提供了数据支撑；林剑锋等<sup>[4]</sup>采用钻孔剪切试验、管波探测、孔内电视等新技术对北江蒙里船闸进行勘察，得出山体边坡稳定计算的抗剪参数以及岩溶发育强度特征等成果。

当水利工程场地地质条件复杂时，须采用综合勘察方法进行勘探，从而保证成果的全面性与有效性。随着时代进步，新水利勘察不再单纯地仅从一个方面出发，水环境及水安全也是勘察的重点内容<sup>[5-6]</sup>，而该方面的勘察研究相对较少，本文结合北运河杨洼船闸建设工程，对包含水环境在内的综合勘察进行深入研究。杨洼船闸属北京地区最大规模的船闸，该场地地下水位高、砂土松散，工程地质问题复杂，为了保障杨洼船闸能够顺利实施，本文综合利用工程地质测绘、综合物探、工程地质钻探与坑探、原位测试、水文地质试验、室内试验、水环境质量调查及建筑信息模型（building information modeling，BIM）等多种方法对杨洼船闸建设场地进行综合勘察。

## 1 工程概况

京杭大运河全长 1 794 km，其中北京段总长 89 km，在北关闸以上河道称为温榆河、以下称为北运河。北运河在北京境内河道沿线共规划有北关、甘棠、榆林庄、杨洼 4 座船闸。杨洼船闸建设工程是实现北运河京冀通航的关键性节点工程，杨洼船闸建成后可打通河道通航断点，实现京冀航道互连互通。拟建杨洼船闸位于北运河右

岸河漫滩，现状杨洼闸东南侧 35 m 处，建设内容为 1 座双线船闸（图 1），闸室有效尺寸为 65 m×10 m×2.5 m（长×宽×门槛水深），新挖长约 0.79 km 航道，新建 1 座航道桥、1 处 390 m<sup>2</sup> 管理设施、长 590 m 滨水护河通道，改移纪西路长约 400 m 等。



图 1 北运河杨洼船闸

## 2 主要工程地质问题

### 2.1 渗透变形破坏

船闸基底以下土层主要为粉细砂和细砂，砂土抗渗透变形能力较差。建闸后，在水头作用下，易产生渗透变形破坏，砂土允许水力比降值直接影响到设计渗流稳定方案，因此渗透变形是勘察的重点内容之一。

### 2.2 地震液化

北运河（通州段）为现代河道，上部土体为新近沉积的砂层及黏性土，砂土易液化，1976 年唐山地震时，在北运河的河漫滩多处出现喷水冒砂，形成地表塌陷和地裂缝，北运河堤基液化，造成河岸坍塌。杨洼船闸均位于河漫滩处，存在地震液化问题。

### 2.3 地下水控制

北运河河道常年流水，水深 2~3 m，杨洼船闸位于北运河右岸河漫滩处，基坑开挖深度约 10 m，底板低于现状地下水位，存在地下水控制问题。北运河（北京段）通航运行期及汛期时，河道高水位对工程安全施工产生很大影响，故地下水控制的研究至关重要。

### 2.4 天然建筑材料平衡问题

新挖航道产生开挖弃土，为了保持建设场区

内的土方平衡, 需进行建筑弃土再利用, 拟采用新挖航道范围的弃土作为墙后回填土。所以, 查明船闸场区新挖航道范围的开挖弃土的不同岩性土层的储量十分必要。

## 2.5 水环境亲水安全

北运河经过多年治理, 水质有了较大改善, 但是开展亲水活动是否对身体产生危害, 仍然是一个亟需要确定的问题, 所以开展水环境质量评价, 通过测试数据来明确亲水活动的安全性十分必要。

## 3 综合勘察技术应用及成果

### 3.1 综合地质测绘

在场区内进行的综合地质测绘是在已有地质测绘成果和遥感影像成果的基础上, 进行工程地质、水文地质及水环境的地质测绘工作。杨洼船闸的工程地质测绘工作重点是调查地形地貌、地层岩性(特别是特殊性土)、物理现象等3方面; 水文地质测绘的工作重点是地形地貌、地层岩性、地表水体、水井、包气带、地下水化学成分的变化规律等6方面; 而水环境质量调查的重点是地形地貌、地下水防护条件、周边潜在污染源等3方面。

### 3.2 综合工程物探

#### 3.2.1 工作布置

为了初步查明场区岩层的分布及特殊岩土的分布情况, 特别是场区内分布的第一个稳定隔水层的分布、埋深及物理力学性质, 为岩土设计(围封、防渗墙等)提供基础依据。根据场地的地层物理特性, 物探工作布置等瞬变电磁剖面25条(纵向20条、横向5条), 瞬变电磁点距5~10 m, 异常处加密点距; 在瞬变电磁横向剖面处布设高密度电法剖面, 高密度电法极距2~5 m; 天然源面波法布置面波点100个, 点距20 m。

#### 3.2.2 综合物探成果分析

通过瞬变电磁和高密电法的探查, 初步确定场区地面以下15~18 m深度范围存在一层厚度不

大的相对隔水层, 该层的瞬变电磁的视电阻率为350~400  $\Omega \cdot \text{m}$ , 高密度电法的视电阻率为10~30  $\Omega \cdot \text{m}$ , 整体上层分布较为连续, 典型解译剖面如图2所示。

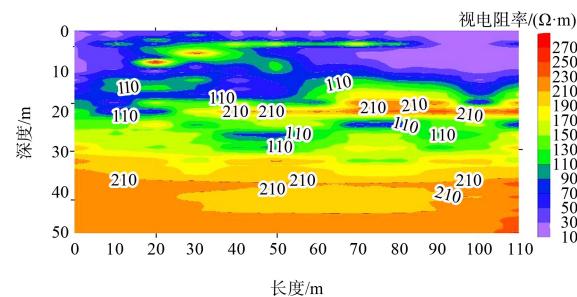


图2 瞬变电磁法典型剖面

### 3.3 工程地质钻探

#### 3.3.1 工作布置

在综合地质测绘及综合物探成果的基础上, 结合地下水位高、砂土松散的两大突出的场地特征, 针对船闸结构特征及地基处理方案布置精细钻探工作。船闸的停泊靠船段、调顺导航段均为挡墙结构, 钻孔间距30 m, 钻孔深度控制船闸底板以下持力层10~15 m, 钻孔孔深20~25 m; 上闸首、闸室段、下闸首均为钢筋混凝土船坞结构, 钻孔间距20 m, 钻孔深度控制船闸底板以下1.0~1.5倍闸底宽, 且进入相对隔水层5~10 m, 钻孔孔深25~40 m。钻探的布置还充分考虑防渗处理的要求。

#### 3.3.2 钻探成果

场区地面以下40 m深度范围内, 自上而下大致可分为6层, 属于第四系全新统中晚期冲积层( $Q_4^{2al}$ )的有: ②砂质粉土层, 褐黄色, 稍湿, 中密。该层为中高压缩性土, 分布有粉质黏土、黏土透镜体等, 揭露厚度1.5~3.0 m。③粉细砂层, 褐黄色, 湿-饱和, 稍密为主。该层分布有粉质黏土和砂质粉土透镜体, 分布稳定连续, 层厚3~7 m。属于第四系全新统早期冲积层( $Q_4^{1al}$ )的有: ④细砂层, 灰色, 饱和, 中密-密实为主。该层分布有中砂, 揭露层厚10.0~13.5 m。属于第四系上更新统冲积层( $Q_3^{al}$ )的有: ⑤重粉质黏土层, 灰

色, 很湿, 可塑。该层分布有机质黏土和黏质粉土, 局部含少量白色螺壳。该层整体上分布连续, 但局部相对较薄, 揭露该层厚度为 0.2~4.3 m。

⑥中细砂层, 灰色, 饱和, 密实。揭露层厚 10~12 m。⑦重粉质黏土层, 灰色, 很湿, 可塑。钻孔未揭穿。典型工程地质剖面如图 3 所示。

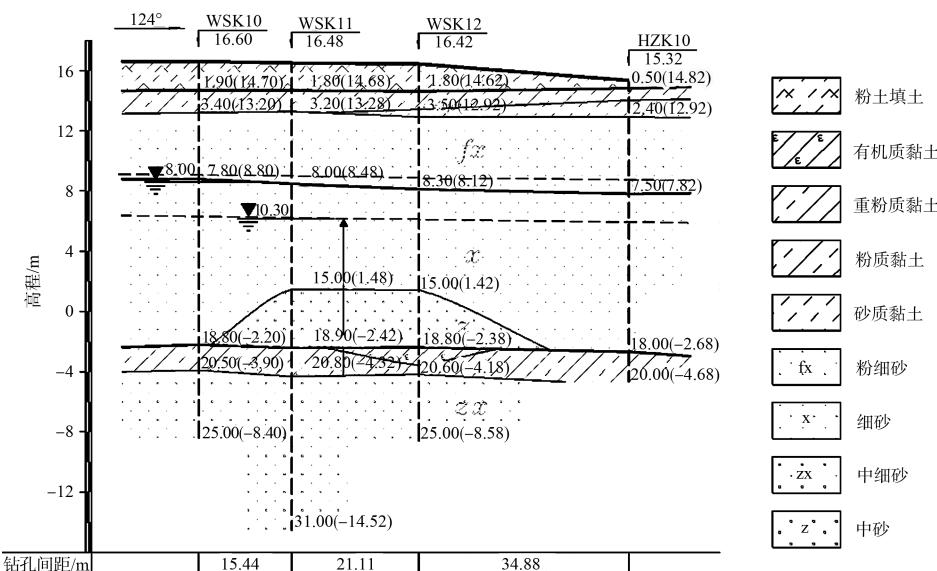


图 3 场区典型工程地质剖面

### 3.4 原位测试

#### 3.4.1 工作布置

为了查明松散砂土地震液化是否为北运河沿线最为突出的地质问题, 除了采用标准贯入试验传统测试手段外, 还增加了剪切波速测试与静力触探试验进行地震液化判断。共布置 50 个标准贯入试验孔, 测试孔深 20~30 m, 测试点间距 1.0~1.5 m; 3 个孔内剪切波速测试孔, 每孔测试深度

25~30 m; 6 个静力触探孔, 每孔测试深度 20 m。

#### 3.4.2 原位测试成果

限于篇幅, 本文仅选取标准贯入试验和静力触探部分试验成果。

1) 标准贯入锤击数法。依据《水利水电工程地质勘察规范》<sup>[7]</sup> 的液化公式进行计算, 本文仅以 WZK4 钻孔为例(部分成果), 液化计算结果见表 1。

表 1 WZK4 钻孔液化计算结果

层号	地层岩性	标贯击数 N/击	试验深度		黏粒含量 $p_c/\%$	运行深度		$d_s$ 计算取值/m	标贯击数校正值/击	临界击数 $N_{cr}/$ 击	液化判断
			$d_s/m$	$d_w/m$		$d_s/m$	$d_w/m$				
③	粉细砂	20	6.65	3.9	3	3	0	5	5.9	14	液化
③	粉细砂	14	8.45	3.9	3	4	0	5	5.5	14	液化
④	细砂	20	10.7	3.9	3	7	0	7	9.7	16	液化
④	细砂	21	12.5	3.9	3	8	0	8	11.4	17	液化
④ <sub>1</sub>	中砂	38	14.7	3.9	3	11	0	11	22.6	20	不液化

注:  $d_s$  为标准贯入点在当时地面以下的深度(m);  $d_w$  为地下水位在当时地面以下的深度(m)。

在地震动峰值加速度 0.20g 时, 地下水位按船闸运行时通航最高水位考虑, 在近震条件下, 场区地面以下 15.0 m 深度范围内粉土、砂层存在

地震液化问题。其中, 上游停泊靠船段及导航调顺段场区液化层底高程为 1.2~3.3 m, 上闸首、闸室及下闸首场区液化层底高程为 1.2~2.8 m,

下游导航调顺段及停泊靠船段场区液化层底高程为 1.8~5.2 m。

2) 静力触探试验法。采用静力触探试验(双桥)对地面下 15 m 深度范围内的饱和砂土和饱和粉土进行液化判别, 可按式(1)计算。当实测值小于临界值时, 可判别为液化土。

$$q_{cer} = q_{c0} a_w a_u a_p \quad (1)$$

式中:  $q_{cer}$  为饱和土液化静力触探锥尖阻力临界值(MPa);  $q_{c0}$  为饱和液化判别锥尖阻力基准值(MPa);  $a_w$  为地下水位埋深影响系数;  $a_u$  为上覆非液化土层厚度影响系数;  $a_p$  为与静力触探摩阻比有关的土性修改参数。

表 2 静力触探液化判别参数选取

土类	$d_w/m$	$d_u/m$	$a_w$	$a_u$	$a_p$	$q_{c0}/MPa$
砂土	4	0	0.87	1.1	1.00	11.8
粉土	4	0	0.87	1.1	0.45	11.8

对 WZK4 静力触探孔的成果进行解译: 场区地面以下 15 m 深度范围内饱和砂土、粉土的静力触探锥尖阻力临界值  $q_{cer}$  分别为 10.27、4.62 MPa, 见表 3。

表 3 WZK4 静力触探孔液化判别成果

地层年代	地层	统计项目	实测锥尖阻力 $q_c$	侧摩擦力 $f_s$	摩阻比 $R$	锥尖阻力临界值 $q_{cer}$	液化判别	层底高程/m
$Q_4^{2al}$	③粉细砂	平均值	9.10 MPa	77.83 kPa	0.90	10.27 MPa	液化	6.41
		标准差	2.24 MPa	6.54 kPa	0.19	0.00 MPa		
		变异系数	0.25	0.08	0.21	0.00		
		组数	8	8	8	8		

经计算并分析, 船闸场区 15 m 深度范围内②砂质粉土、③粉细砂及上部④细砂层静力触探锥尖阻力实测值  $q_c$  小于临界值  $q_{cer}$ , 均为液化土层, 其中上游停泊靠船段及导航调顺段场区液化下限高程 4.6~5.4 m, 上闸首、闸室及下闸首场区液化下限高程 2.0~2.2 m, 下游导航调顺段及停泊靠船段场区液化下限高程 1.0~4.3 m。

3) 地震液化综合评价。场区地面以下 15 m 深度范围内②砂质粉土、③粉细砂、④细砂层上部存在地震液化问题, 其中上游停泊靠船段及导航调顺段场区液化下限高程约 1.5 m, 上闸首、闸室及下闸首场区液化下限高程约 1.0 m, 下游导航调顺段及停泊靠船段场区液化下限高程约 2.0 m。

### 3.5 水文地质试验

#### 3.5.1 工作布置

为了获取符合实际情况水文地质参数, 布置 1 项抽水试验和 12 个长期观测孔, 其中抽水试验

有 1 个主孔和 6 个观测孔。

#### 3.5.2 抽水试验成果

1) 抽水试验场区条件。场区 40 m 深度范围揭露 2 层地下水, 其中第 1 层地下水主要赋存于③粉细砂、④细砂层中, 为孔隙潜水, 埋深约地面以下 5.0 m; 第 2 层地下水主要赋存于⑥中细砂层中, 为承压水, 承压水头 11~12 m。杨洼船闸设计闸底高程为 5~6 m, 针对潜水含水层开展 1 次降深抽水试验, 抽水试验后进行恢复试验。

2) 抽水试验概化模型。将③粉细砂、④细砂视为抽水试验的对象含水层, 埋深约 30 m 的⑤重粉质黏土视为隔水底板, 底板以下的⑥细砂视为承压含水层, 埋深约 38 m 的⑦重粉质黏土可看作承压含水层的隔水底板。为便于计算, 将试验段的含水层概化成均质等厚, 概化后计算模型如图 4 所示。

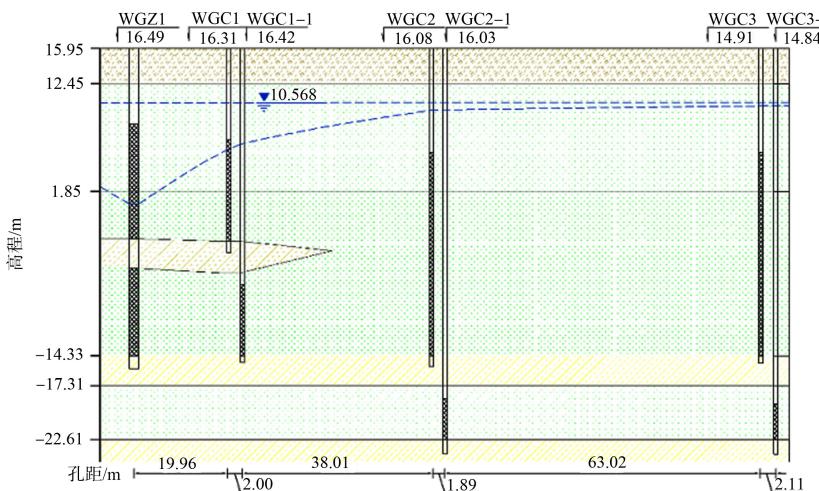


图 4 杨洼闸场区抽水试验水文地质概化模型

3) 试验资料整理及计算。抽水试验历时 148 h (抽水 70 h、恢复 78 h)。抽水过程中流量在 130.9~139.0 m<sup>3</sup>/h 内波动, 呈衰减趋势, 但流量在局部时段较稳定。利用非稳定流直线法和直线补给边界附近的非稳定井流公式(镜像法)同时求解参数, 并结合工程设计, 从工程安全及参数实际应用角度考虑, 确定渗透系数建议值取 13.5 m/d、影响半径建议值为 395 m。

### 3.6 室内试验

#### 3.6.1 工作布置

结合船闸工程建设特点及场区的地质条件,

为了更能反映场地主要地层的力学性质, 在常规土工试验基础上针对砂土取原状样进行室内试验, 进行的试验项目主要为: 天然含水量、天然密度、相对密度、颗粒级配、渗透、常规压缩-固结、直剪等。

#### 3.6.2 原状砂的物理力学试验成果

杨洼船闸重要结构的主要持力层为砂土, 砂土的力学性能对地基方案设计具有直接影响, 所以原状砂的物理力学性质亟需查清。本文仅介绍原状砂土的物理力学试验成果。杨洼船闸共完成原状③粉细砂、④细砂土工试验 103 组, 成果见表 4。

表 4 杨洼船闸场区主要土层的物理力学性质统计值

地层	统计项目	天然含水率	天然密度	相对密度	饱和度	孔隙比	压缩模量 E <sub>s</sub>	黏聚力	内摩擦角
③粉细砂	平均值	13.90%	1.58 t·m <sup>-3</sup>	2.68	0.41	0.93	10.10 MPa	6.90 kPa	30.30°
	最大值	28.60%	1.95 t·m <sup>-3</sup>	2.68	0.91	1.10	15.00 MPa	9.70 kPa	35.10°
	最小值	2.70%	1.26 t·m <sup>-3</sup>	2.68	0.07	0.77	4.70 MPa	3.10 kPa	24.50°
	标准差	8.04%	0.21 t·m <sup>-3</sup>	0.00	0.28	0.09	3.49 MPa	1.68 kPa	2.08°
	变异系数	0.58	0.13	0.00	0.68	0.10	0.35	0.24	0.07
	组数	50	48	50	48	36	35	45	45

#### 3.6.3 砂土的临界水力比降及允许水力比降计算

流土型土层的临界水力比降计算公式为:

$$J_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) \quad (2)$$

式中:  $J_{cr}$  为土的临界水力比降;  $G_s$  为土粒相对密

度;  $n$  为土的孔隙率。各土层的临界水力比降计算值见表 5。再以土的临界水力比降除以 2.5 安全系数, 确定允许水力比降计算值。

表 5 杨洼船闸基底土层允许水力比降计算值

土层	土粒相对密度 $G_s$	孔隙比 $e$	孔隙率 $n$	临界水力比降 $J_{cr}$	允许水力比降计算值 $J_{allow}$	允许水力比降建议值
③粉细砂	2.68	0.64~1.40	0.39~0.58	0.70~1.02	0.28~0.41	0.25
④细砂	2.68	0.57~1.11	0.36~0.53	0.80~1.07	0.32~0.43	0.30

### 3.7 BIM技术

#### 3.7.1 工作布置

船闸开挖深度大、弃土量大,为了保障土方平衡,对各类土层开挖量的计算精度要求高。采用BIM精细计算可用各类土层及弃用各类土层的开挖土量。根据工程需求,杨洼船闸设计地形模型范围为1 000 m×400 m(长×宽)、地层模型尺寸为1 000 m×300 m×60 m(长×宽×深)、地下水模型范围为1 000 m×300 m(长×宽)。

#### 3.7.2 成果分析

根据场区地形地貌、航道开挖基底线以及地层岩性,采用三维地质建模对开挖弃土储量进行计算(图5)。模型计算结果为:开挖范围内填土5.38万m<sup>3</sup>,砂层储量约15.62万m<sup>3</sup>,粉土及其夹层合计约7.30万m<sup>3</sup>。

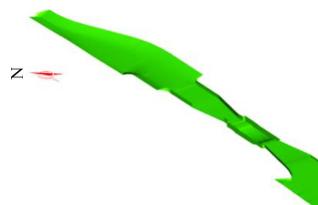


图5 船闸开挖三维模型

## 4 结语

1)利用工程地质钻探、综合物探、坑探等技术手段可以查明场区内地层结构及分布特征;采取原状砂样进行室内试验可以科学获取砂土的物理力学指标,以此计算出符合实际的临界水力比降值,为水工设计提供了科学的计算参数,取原状砂样的做法应该得到推广。

2)在土层松散、地下水位高的地区采用标准

贯入和静力触探试验综合判定砂土地震液化问题具有明显的优势,划定的液化下限深度精度较高,可在类似条件的工程中推广应用。

3)BIM技术可以对开挖弃土各土层的土量进行精细计算,为工程设计提供精准的设计参数。

4)综合勘察技术的运用能够在工期紧、任务重的情况下较准确地查清工程地质问题,并提供真实可靠的地质参数。本文的研究方法可为其他工程提供参考,但在推广应用中要结合工区地质特点,采用更适宜的勘察手段。

## 参考文献:

- [1] 郑智杰,张伟,曾洁,等.综合物探方法在碳质灰岩区岩溶渗漏带调查中的应用研究[J].地球物理学进展,2017,32(5):2268-2273.
- [2] 刘海心,朱瑞,王文甫,等.高密度电法在水库大坝渗漏勘察中的应用[J].人民黄河,2018,40(10):99-103.
- [3] 付代光,周黎明,肖国强,等.综合地球物理测井技术在滇中引水隧洞工程勘察中的应用[J].长江科学院院报,2016,33(4):67-70,77.
- [4] 林剑锋,程新生,夏凤兴.综合勘察技术在北江蒙里船闸工程中的应用[J].水运工程,2018(8):165-170.
- [5] 刘园.流域水环境的污染源调查[J].水力发电,2020,46(9):23-27,36.
- [6] 潘畅,陈建湘,黄长红,等.洞庭湖区水环境现状调查与分析[J].人民长江,2018,49(8):20-24,48.
- [7] 水利部水利水电规划设计总院,长江水利委员会长江勘测规划设计研究院.水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S].北京:中国计划出版社,2009.

(本文编辑 王璁)

## ·消息·

### 三航院中标浙江宁波舟山港基础设施重点项目数字管理系统工程

近日,三航院中标浙江宁波舟山港基础设施重点项目数字管理系统工程,工期5年。将以BIM(建筑信息模型)+GIS(地理信息科学)+IOT(物联网)+大数据+云计算等数字化技术手段,提供基于BIM的数字化技术服务,实现项目进度、数字资产维护等重要数字化建设相关功能需求。系统建成后,将为水运工程实现全生命周期设计、施工、监理和建设管理等各方的数字化技术应用提供重要技术支撑。