

文章编号:1006-2106(2011)12-0015-06

# 原位测试技术在空客 A320 总装线项目勘察中的应用\*

高秀梅\*\*

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

**摘要:**研究目的:目前我国大部分平原地区岩土勘察中采用的常规触探设备对于比贯入阻力 40~50 MPa 的硬土层很难穿透,孔深仅能达到 25~40 m,触探深度已经不能满足现阶段的高层、高速铁路及高速公路等工程勘察需要,这个问题已引起岩土工程界的普遍重视。

**研究结论:**(1)采用双桥静力触探、三桥旋转触探、钻探取样、平板载荷试验、剪切波测试等多种原位测试手段,其中所采用的三桥旋转触探技术是一种全新的深层原位测试方法,在本场地触探深度达到了 60 m,有效解决了常规的静力触探孔不能穿透硬层、测试深度不足的问题;(2)通过采用对比分析和相互验证的方法,查明了场地范围内地基土时代成因、岩性特征及其分布规律;(3)达到了提高勘探质量、缩短勘测周期和降低成本的目的,为工程设计提供了可靠的设计参数及切实可行的地基基础设计建议。

**关键词:**原位测试;场地地基;浅基础;桩基础

**中图分类号:**TU413 **文献标识码:**A

## Application of Situ Tests in Geological Exploration of the Airbus A320

GAO Xiu - mei

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract; Research purposes:** At present in our country, geotechnical investigation uses the conventional sounding equipment in the plain, and it is difficult to penetrate hard soil which penetration resistance is 40~50 MPa, and borehole depth can only achieve 25~40 m. Sounding depth can not satisfy the need of engineering investigation for the high-rise building, high-speed railway and highway. The problem has caused wide attention in geotechnical engineering field.

**Research conclusions:** (1) This paper adopts several in-situ testing methods such as double bridge cone penetration test, three bridge rotating penetration test, sample drilling, slab loading test, shear wave test. The three bridge rotating penetration test technology is a new species of in-situ test techniques which overcome the problem as conventional sounding can not penetrate the hard layer and the test depth inadequate, and its penetration depth can reach 60 m in this field. (2) This paper use the method of contrast analysis and mutual verification find out the cause of foundation soil era, lithologic features and its distribution law. (3) Thus improved the quality of exploration, shorten the cycle of survey and lower the cost, provides a reliable design parameters and practical foundation design suggestions for engineering design.

**Key words:** in-situ tests; site foundation; shallow foundation; pile foundation

1932年荷兰工程师 P. Barentsen 进行了世界上第一次静力触探试验,1964年王钟琦等成功地研制出我

国第一台电测式触探仪,铁三院也于1966年开始研究和应用。静力触探技术因其具有试验速度快、而且可

\* 收稿日期:2011-08-15

\*\* 作者简介:高秀梅,1962年出生,女,工程师。

以直接连续得到土层的强度等信息的优点逐步得到了广泛应用和发展<sup>[1]</sup>。但目前我国主要使用的是“单桥”探头和“双桥”探头,难以穿透浅层的密实粉土及砂土层,测试深度较浅,常规的静力触探设备孔深仅能达到25~40 m。随着我国楼房越盖越高基坑越挖越深、高速铁路与高速公路的沉降要求越来越严格,传统的触探技术所能达到的最大孔深已经不能满足现阶段的勘察与设计需要。铁三院经过近几年的研究开发与对比试验,在无搅静力触探的基础上开发出具有旋转和给水功能的旋转触探工法及相应的仪器设备,很好地解决了静力触探深度不足问题。本文结合三桥旋转触探在工程中的应用,对该问题进行了试验和对比分析。

### 1 概况

空客 A320 飞机总装线项目位于天津滨海国际机场东侧,京津塘高速公路西南侧。主要详细勘察为总装厂房、后装配线库等共计 21 个单体工程,主要结构形式为大跨度钢结构。本工程重要等级为一级工程,岩土工程勘察等级为甲级。在本工程中采用了常规的双桥静力触探、新型的旋转触探、钻探取样、平板载荷试验、剪切波测试等综合勘察手段。其中采用的新型旋转触探测试方法<sup>[2]</sup>是一种适用于黏性土、砂类土、测试精度可靠的深层原位测试新技术,通过测定

地层对探头的压力、扭矩、水压力等参数,准确地进行地质分层,既保留了双桥静力触探原位测试的优点,又攻克了原来双桥触探难以穿透较硬土层的难题。

## 2 场地土工程地质条件

### 2.1 地层的分布规律及地基土特征

本场地地表以下 45 m 范围内,地基土按成因及时代可分为 7 层,按土的物理力学特征可分为 21 个亚层。场区地层主要有 7 层<sup>[3]</sup>:①第四系全新统人工填土层(人工堆积层 Q<sub>ml</sub>),素填土,以粉质黏土为主,含少量碎石;②第 I 陆相层(第四系全新统河床~河漫滩相沉积 Q<sub>1al</sub>),主要为黄褐色黏土;③第 I 海相层(第四系全新统中组浅海相沉积 Q<sub>2m</sub>),主要为粉质黏土、淤泥质黏土与黏土;④第 II 陆相层(第四系全新统下组沼泽相沉积 Q<sub>4h</sub> 及河床~河漫滩相沉积 Q<sub>4al</sub>),主要为粉质黏土与粉土;⑤第 III 陆相层(第四系上更新统五组河床~河漫滩相沉积 Q<sub>3al</sub>),主要为粉质黏土与黏土;⑥第 II 海相层(第四系上更新统四组滨海~潮汐带相沉积 Q<sub>3mc</sub>),主要为粉质黏土;⑦第 IV 陆相层(第四系上更新统三组河床~河漫滩相沉积 Q<sub>3al</sub>),主要为粉质黏土、粉土,下部为粉细砂。根据资料整理结果分析场区内地层较为稳定,呈水平状分布,但局部多有起伏和岩性的相变关系。典型工程地质剖面图如图 1 所示;三桥旋转触探钻孔柱状图如图 2 所示。

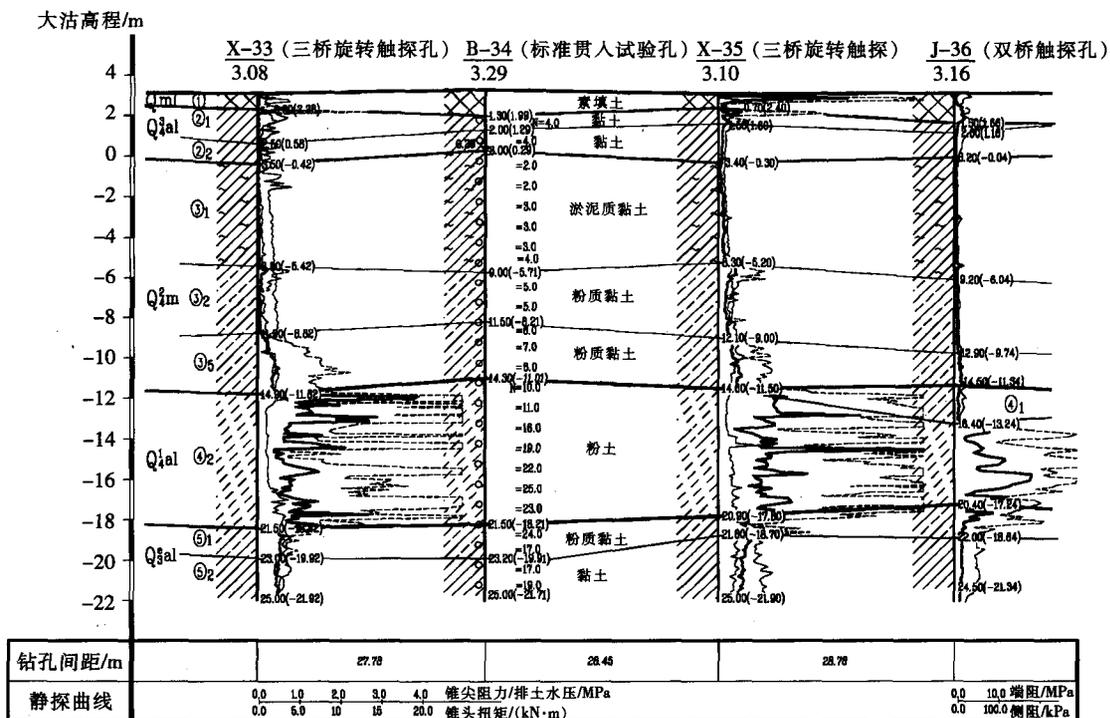


图 1 典型工程地质剖面图

注: [Symbol] 静探锥尖阻力曲线; [Symbol] 排水水压曲线; [Symbol] 静探侧阻曲线(双桥)/旋转触探锥头扭矩曲线(三桥)

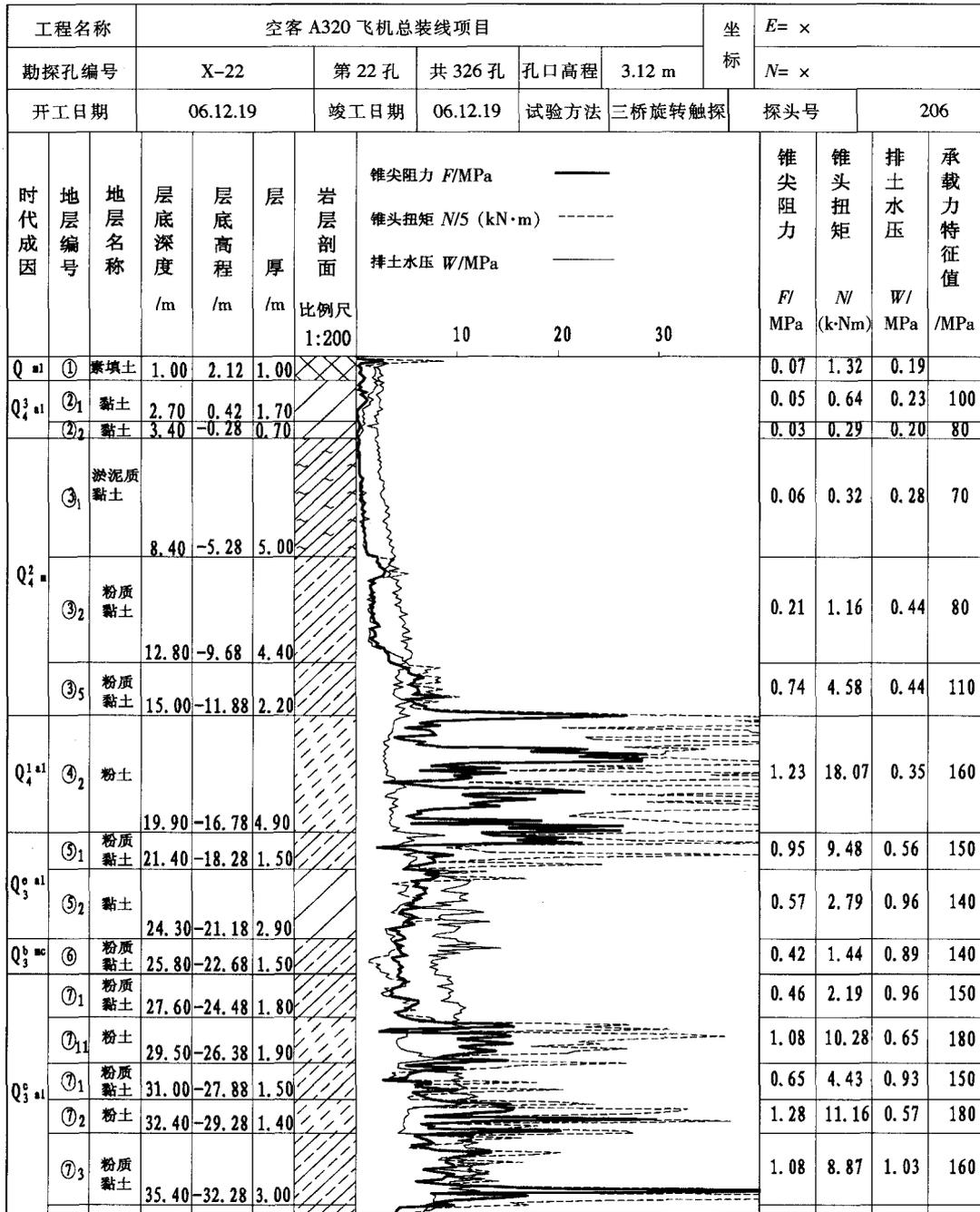


图 2 旋转触探孔地质柱状图

从图 1、图 2 可以看出旋转触探曲线反应出的不同地层特点:对于饱和的粉土及砂类土地层,连续贯入的压力  $F$ 、旋转扭矩  $N$  值较高,  $F$ 、 $N$  曲线呈密集尖峰状,但给水压力  $W$  相对较低,  $W$  曲线近似呈直线状;对于粘性土地层,  $F$ 、 $N$  曲线有起伏且有尖齿,  $F$ 、 $N$  较低,但  $W$  相对较高;对于淤泥质土地层,  $F$ 、 $N$  曲线同步靠拢,  $F$  及  $N$  值均低,虽  $W$  相对较高,但三条曲线近似呈直线状且平行。故可根据旋转触探关系曲线中  $F$ 、 $N$ 、 $W$  三个参数的数值沿深度变化的特点,用来对场地

土进行分层。

### 2.2 地基土物理力学指标、参数的分析及评价

经对现场原位测试及室内土工试验结果进行统计分析<sup>[4]</sup>,其物理力学试验指标如表 1 所示;双桥触探、三桥旋转触探原位测试数据及标贯锤击数统计如表 2 所示(仅列举试验结果的平均值)。从统计结果可以看出三桥旋转触探试验与常规双桥静力触探的分层数据相对应。

表1 主要土层的物理力学试验指标统计结果

层号	岩土名称	层厚/m	天然含水量 $w/\%$	重力密度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_s$ (0.1~0.2) /MPa	天然快剪 $c/\text{kPa}, \varphi/(\circ)$	固结快剪 $c/\text{kPa}, \varphi/(\circ)$	三轴固结 不排水剪 $C_u$ $c/\text{kPa}, \varphi/(\circ)$
② <sub>1</sub>	黏土	0.5~2.5	29.8	19.1	0.867	18.8	0.4	4.59	43.3,12.0	39.0,21.9	20.5,17.9
② <sub>2</sub>	黏土	0.7~3.5	37	18.6	1.032	19.4	0.72	3.57	26.0,6.9	32.4,16.8	15.4,19.1
③ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	3.0~7.4	50.4	17.2	1.405	19.4	1.42	2.6	10.8,2.6	20.0,9.2	14.6,18.2
③ <sub>2</sub>	粉质黏土	1.6~7.4	32.4	19	0.893	12.3	1.12	4.05	20.1,5.2	28.3,16.3	15.1,24.5
③ <sub>3</sub>	粉质黏土	0.7~5.3	29.8	19.3	0.825	12.1	0.99	5.42	28.8,11.2	30.8,18.4	20.3,22.3
④ <sub>2</sub>	粉土	1.2~7.5	22.7	20.3	0.628	8	0.67	10.68	29.8,27.1	26.4,31.4	36.5,28.8
⑤ <sub>1</sub>	粉质黏土	0.5~4.1	29.5	19.5	0.811	13.7	0.71	6	40.4,15.1	49.7,17.0	-
⑤ <sub>2</sub>	黏土	1.0~3.9	32.5	19.2	0.894	18.7	0.56	6.16	47.6,15.4	60.5,18.6	-
⑥	粉质黏土	0.6~4.4	24.7	20.2	0.68	12.2	0.72	6.12	34.1,14.4	44.8,21.2	-
⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土	0.5~7.0	23.5	20.3	0.654	12.8	0.48	6.26	39.2,16.7	50.3,23.0	-
⑦ <sub>2</sub>	粉土	0.5~4.7	23.5	20.3	0.645	8.4	0.64	11.82	27.8,27.1	23.5,36.3	-
⑦ <sub>3</sub>	粉质黏土	0.6~7.3	24.2	20.1	0.678	12.7	0.46	6.59	42.9,18.0	49.4,29.8	-
⑦ <sub>4</sub>	粉砂	0.5~9.9	22.7	19.8	0.652	-	-	16.58	27.6,29.4	9.8,35.6	-
⑦ <sub>5</sub>	粉质黏土	1.4~6.2	25.6	20	0.713	12.8	0.56	6.69	42.9,17.0	56.6,22.1	-

表2 主要原位测试试验数据的统计结果

层号	岩土名称	层厚/m	三桥旋转触探			双桥触探			标贯试验 锤击数/击
			锥尖阻力 $F/\text{MPa}$	锥头扭矩 $N/(\text{kN}\cdot\text{m})$	排土水压 $W/\text{MPa}$	锥头阻力 $q_c/\text{MPa}$	侧阻力 $f_s/\text{kPa}$	摩阻比/ $\%$	
② <sub>1</sub>	黏土	0.5~2.5	0.11	2.49	0.26	2.4	120.6	6.6	6.2
② <sub>2</sub>	黏土	0.7~3.5	0.04	0.47	0.21	0.39	22.5	5.5	4.3
③ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	3.0~7.4	0.06	0.46	0.28	0.34	7.3	2.2	2.5
③ <sub>2</sub>	粉质黏土	1.6~7.4	0.17	1.48	0.41	0.62	11.1	1.8	5.5
③ <sub>3</sub>	粉质黏土	0.7~5.3	0.50	5.56	0.41	1.58	25.9	1.9	8.9
④ <sub>2</sub>	粉土	1.2~7.5	1.23	21.33	0.36	12.32	196.1	2	24.7
⑤ <sub>1</sub>	粉质黏土	0.5~4.1	0.74	7.20	0.67	2.93	96.9	3.6	18.3
⑤ <sub>2</sub>	黏土	1.0~3.9	0.55	2.63	0.82	1.71	44.6	2.6	15.3
⑥	粉质黏土	0.6~4.4	0.43	2.21	0.76	1.56	36.3	2.3	17.7
⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土	0.5~7.0	0.59	7.38	0.79	2.43	73.8	3.2	15.9
⑦ <sub>2</sub>	粉土	0.5~4.7	1.40	16.75	0.48	13.56	226.6	2.7	47.8
⑦ <sub>3</sub>	粉质黏土	0.6~7.3	0.99	13.25	1.08	2.75	103.3	3.9	21.9
⑦ <sub>4</sub>	粉砂	0.5~9.9	0.94	10.14	0.51	19.8	243.8	1.6	>50
⑦ <sub>5</sub>	粉质黏土	1.4~6.2	0.72	5.47	0.91	2.71	89.8	3.6	28.5

### 3 地基基础评价

#### 3.1 天然地基评价

##### 3.1.1 载荷试验

为论证采用天然地基的可行性,在场内地内选择3处做了浅层平板载荷试验。综合触探、钻探、标贯试验及室内试验考虑,②<sub>1</sub>层黏土层承载力特征值为100 kPa,变形模量  $E_0$  为6.74~11.63 MPa;②<sub>2</sub>层黏土承载力特征值为80 kPa,变形模量  $E_0$  为3.11~6.74 MPa<sup>[5]</sup>。

载荷试验  $P \sim S$  曲线成果如图3所示,浅层平板

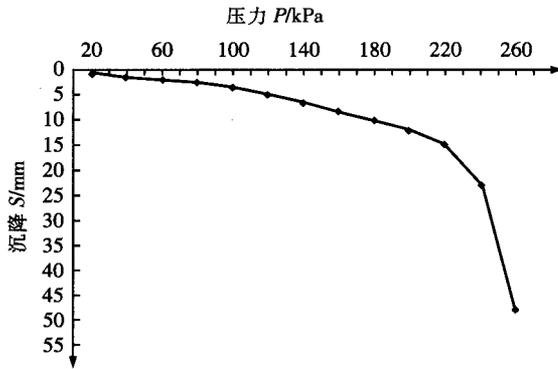
载荷试验的变形模量  $E_0$  (MPa) 计算公式为  $E_0 = I_0(1 - \mu^2)pd/s$ ,结果如表3所示。

表3 浅层平板载荷试验的变形模量  $E_0$ 

参数	载荷试验一	载荷试验二	载荷试验三
$I_0$	0.785	0.785	0.785
$p/s$	25.9	20.57	7.5
$1 - \mu^2$	0.823 6	0.823 6	0.823 6
$d$	0.83	0.83	0.83
$E_0/\text{MPa}$	13.89	11.04	4.02

##### 3.1.2 采用天然地基可能性结论

人工堆积素填土普遍在场地表层分布,填筑时间

图 3 载荷试验  $P \sim S$  曲线

短,为近期填筑,松散且厚度不一,不能作为天然地基基础持力层,需挖除。②<sub>1</sub> 层黏土层厚较薄虽然强度较低,但比其下伏②<sub>2</sub> 黏土及③<sub>1</sub> 淤泥质黏土强度稍高,为一相对硬壳,压缩系数范围值  $a_{1-2} = 0.27 \sim 0.56$ ,属于中~高压缩性土。其下伏②<sub>2</sub> 黏土及③<sub>1</sub> 层淤泥质黏土均为软弱地层。从本场地地基土的工程特性及其拟建建筑物的荷载情况分析,②<sub>1</sub> 及②<sub>2</sub> 层不宜直接作为天然基础持力层。

### 3.2 桩基础评价

通过分析钻探化验成果、双桥触探及三桥旋转触探曲线变化特征<sup>[6]</sup>,该场地在埋深 35 m 范围有两个良好的桩端持力层,从上到下分述如下:

第一桩端持力层:④<sub>2</sub> 粉土层:密实,湿,层位分布较稳定,层顶高程平均 -13.37 m,平均厚度 4.48 m;天然含水量标准值  $w = 23.2\%$ ,孔隙比标准值  $e_0 = 0.644$ , $E_s(0.1 \sim 0.2) = 10.33$  MPa,三桥旋转触探锥头阻力  $F = 1.23$  MPa,双桥触探锥尖阻力  $q_c = 12.32$  MPa,平均标贯击数为  $N = 24.7$  击;物理力学性质及强度较好,为本次勘察桩基础良好的桩端持力层<sup>[7]</sup>。如选用④<sub>2</sub> 层作为桩端持力层,桩型可选择预制桩。假设桩顶高程 +2.00 m;桩端置于高程 -15.00 m 左右;有效桩长 17.0 m。建议优先采用此层作为本工程建筑物的桩端持力层。

第二桩端持力层:⑦<sub>1</sub> 粉质黏土与⑦<sub>1-1</sub> 粉土联合作为第二桩端持力层:⑦<sub>1</sub> 粉质黏土:可塑~硬塑,含少量姜石,分布较稳定,层顶高程平均 -24.13 m,平均厚度 3.70 m;压缩模量标准值  $E_s(0.1 \sim 0.2) = 6.04$  MPa,三桥旋转触探锥头阻力  $F = 0.59$  MPa,双桥触探锥尖阻力  $q_c = 2.43$  MPa;物理力学性质及强度较好;因⑦<sub>1</sub> 粉质黏土局部层较薄,而其下⑦<sub>1-1</sub> 为密实,湿的粉土,故将⑦<sub>1</sub> 粉质黏土与⑦<sub>1-1</sub> 粉土作为联合持力层是桩基础较好的桩端持力层。假设桩顶高程 +2.00 m;桩端置于高程 -25.00 m 左右;有效桩长 27.0 m。

桩基础结论:根据本工程工期、建筑物特性及本地区经验,按常规可能采用的桩型就是预制管桩和钻孔灌注桩两种,而大部分采用钻孔灌注桩的施工质量很难满足技术标准且工期不能保证,预应力管桩具有强度高、承压性能好、环保、施工速度快等特点,建议优先采用预制管桩<sup>[8]</sup>。

## 4 结论

该项目建成后经过近 5 年运营检验,沉降稳定,表明在本工程中采用钻探取样、三桥旋转触探与双桥触探等多种原位测试相结合的综合勘察手段可行,采用的旋转触探新技术很好地解决了常规静力触探不能穿透硬层,测试深度浅的难题,准确地查明场地的工程地质及水文地质条件,提出的地基基础设计参数及建议合理。建议在天津及其他沿海平原城市适宜地区的岩土工程勘察中大力推广三桥旋转触探原位测试技术,逐步实现以原位测试为主,钻探为辅的综合勘探手段,缩短勘察设计周期,降低成本。但该技术还需进一步加强触探土力学及工艺研究,并结合具体工程勘察,进行大量的对比试验,改变仅单桥静力触探拥有我国各种有关规范及各地区规定经验公式的单一局面<sup>[9]</sup>,总结出旋转触探三个参数与地基承载力、桩基承载力的相关经验公式及用触探成果估算地基、桩基沉降的经验公式,最后形成触探土力学技术体系和标准。

## 参考文献:

- [1] 刘松玉,吴燕开.论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J].岩土工程学报,2004(4):553-556.  
Liu Songyu, Wu Yankai. On the State - of - art and Development of CPT in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(4):553-556.
- [2] 赵凤林,陈新军,叶启民.岩土工程原位测试旋转触探的测试方法及其专用设备:中国,ZL2006100143157[P].  
Zhao Fenglin, Chen Xinjun, Ye Qimin. Testing Method for Geotechnical In - situ Rotary Sounding and Its Equipment: Chinese, ZL2006100143157 [P].
- [3] DB/T 29—191—2009,天津市地基土层序划分技术规程[S].  
DB/T 29—191—2009, Technical Specification for Division of Subsoil Sequence in Tianjin [S].
- [4] 高颂东.静力触探参数与地基土物理力学指标(天津地区)相关分析研究[J].岩土工程界,2003(7):75-77.  
Gao Song - dong. Correlation Analyses of Static Sounding Parameters and the Physical - mechanic Indexes of Foundation Soil (Tianjing area) [J]. Geotechnical Engineering World, 2003(7):75-77.

- [5] GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].  
GB 50021—2001, Code for Investigation of Geotechnical Engineering [S].
- [6] Xinjun Chen, Shuli Sun & Xiaoli Pu. A New Rotary Penetration Sounding Device and Its Testing Method [M]. *Geomechanics and Geotechnics: From Mico to Macro*. CRC press, 2011: 1073 - 1079.
- [7] JGJ 94—94, 建筑桩基技术规范[S].  
JGJ 94—94, Technical Code for Building Pile Foundations[S].
- [8] 刘永超, 许再良, 张劲松, 等. 客运专线路基工程中管桩应用机理研究[J]. 铁道工程学报, 2001(2): 44 - 51.
- Liu Yongchao, Xu Zailiang, Zhang Jinsong, etc. Research on Applicable Mechanism of Pipe Pile in Subgrade Engineering of Passenger Dedicated Line[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2001(2): 44 - 51.
- [9] 孟高头, 曹恺, 陈亮. 关于静力触探的国际化问题[J]. 岩土工程学报, 2001(3): 383 - 384.
- Meng Faotou, Cao Kan, Chen Ling [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001(3): 383 - 384.

(编辑 曹淑荣)

(上接第3页)

## 4 结论

本文阐述了我国重载路网的发展规划情况, 提出了重载运输通道规划所应遵循的原则。以铁路部门收益最大为目标函数, 以线路通过能力和投资金额上限为约束条件, 建立了基于径路的重载线路投资决策与货流分配模型, 限于篇幅原因, 本文未列出详细的求解方法和模型算例, 相关内容可参见文献[8]。

## 参考文献:

- [1] 安路生. 中国铁路运输新实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.  
An Lusheng. *New Practice of Railway Transpiration in China*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [2] 耿志修. 大秦铁路重载运输技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.  
Geng Zhixiu. *Datong - Qinhuangdao Heavy Haul Transportation Technology*[M]. Beijing: China Railway Press, 2009.
- [3] 朱晓宁. 集装箱多式联运通道规划理论与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.  
Zhu Xiaoning. *Planning Theory and Application of Container Multi - modal Transport Corridor* [M]. Beijing: China Railway Press, 2002.
- [4] 洪雁. 铁路集装箱运输系统规划若干问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.  
Hong Yan. *Research on Several Problems in System Planning of Railway Container Transportation* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [5] 彭其渊, 闫海峰, 魏德勇. 集装箱班列运输组织[M]. 四川: 四川科学技术出版社, 2005.  
Peng Qiyuan, Yan Haifeng, Weideyong. *Transportation Organization of Container Train* [M]. Sichuan: Sichuan Science Press, 2005.
- [6] 苏勇. 探讨重载铁路的运输组织及线路加强模式[J]. 铁道工程学报, 2006(7): 21 - 23.  
Su Yong. *Discussion on Modes of Heavy Haul Transport Organization and Railway Track Improvement* [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2006(7): 21 - 23.
- [7] 袁新生, 邵大宏, 郁时炼. Lingo 和 Excel 在数学建模中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
Yuan Xinsheng, Shao Dahong, Yushilian. *The Application of Lingo & Excel in Mathematic Modeling*. [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [8] 宁超. 铁路既有线重载化改造相关问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
Ning Chao. *Research on the Heavy Haul Transformation of Existing Railway and Its Correlative Issues* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

(编辑 赵立兰)