



# 国内外标准中砂性土内摩擦角确定方法对比

刘 宁, 刘 杰

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 内摩擦角是土体的抗剪强度指标之一, 反映了土体的摩擦特性, 是岩土(尤其砂性土)工程设计的重要参数。在大量的室内和原位试验、分析研究和工程实践基础上, 国内外标准提供了较多针对砂性土内摩擦角的经验取值和理论计算方法。通过对国内相关标准、国外常用的美国标准 API 和 *Engineer Manual*、欧洲标准 *Eurocode* 和 BS 6349 以及一系列研究中关于砂性土内摩擦角的确定方法, 系统总结各方法的差异性。分析认为在无室内试验情况下通过原位试验确定砂性土内摩擦角的方法技术合理、操作可行, 为国内和海外工程设计中砂性土内摩擦角的选取提供一定参考。

**关键词:** 砂性土; 内摩擦角; 国内外标准; 原位试验

中图分类号: U 652; TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0042-06

## Comparison of methods for determining internal friction angle of sand by domestic and foreign standards

LIU Ning, LIU Jie

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** The internal friction angle is one of the soil shear strength indexes which reflects the friction characteristics of soil, and is an important input parameter in geotechnical engineering design, especially for sand. Based on a mass of laboratory tests, in-situ tests, research studies and engineering practices, many empirical values and theoretical calculation formulas for the internal friction angle of sand are presented in domestic and foreign standards. By comparing the determination methods in domestic standards, American standards API & *Engineer Manual*, European standards *Eurocode* & BS 6349 and a series of international literature, the differences of various methods have been summarized. It is concluded that in the absence of laboratory test results, in-situ testing method to determine the internal friction angle is reasonable and feasible, which can provide some reference for related design work in domestic and overseas projects.

**Keywords:** sand; internal friction angle; domestic and foreign standards; in-situ test

内摩擦角是土体的抗剪强度指标之一, 在地基处理、边坡稳定性、桩基础设计等岩土工程设计中, 土体(尤其是砂性土)内摩擦角的大小往往直接影响设计方案的主要参数, 如地基处理指标、边坡坡比和桩长等, 进而影响工程安全和造价, 因此需要科学、合理地确定。工程上直接测定砂土内摩擦角的试验方法主要是室内试验, 如直剪试验和三轴剪切试验等。但由于砂性土的取样容

易受到扰动, 土样也很难重现原始地应力的边界条件, 且同时受到试验仪器的种类和试验方法不同的影响, 试验结果存在较大的不确定性。

国内外在大量的室内试验、原位试验和工程实践的基础上, 进行了较多的分析研究, 总结了一系列砂性土内摩擦角的经验取值和理论计算方法。随着中国企业参与海外交通基础设施建设的深入, 涉及到砂性土的岩土设计问题也越来越多。在无室内

试验支撑下,工程设计人员掌握国内外标准内摩擦角确定方法的必要性逐步显现。本文整理、对比了中美欧标准及相关文献的砂性土内摩擦角确定方法,归纳总结出了较为实用的方法,可为国内工程师在参与国内外工程设计时提供一定参考。

## 1 中国标准关于砂性土内摩擦角的相关规定

GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》<sup>[1]</sup>规定,砂土为粒径大于2 mm的颗粒含量不超过全部质量50%、粒径大于0.075 mm的颗粒超过全部质量50%的土;砂土的内摩擦角可采用原状土室内剪切试验等方法测定。当采用室内剪切试验确定时,宜选择三轴压缩试验的自重压力下预固结的不固结不排水试验。每层土的试验数量不得少于6组,并通过变异系数计算内摩擦角的统计修正系数,对内摩擦角试验平均值进行修正后得到砂性土内摩擦角标准值。

JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[2]</sup>规定,填料的内摩擦角标准值宜通过试验确定,如直剪和三轴压缩试验等。当无实测资料时,对于粒径小于0.1 mm的细颗粒含量不超过10%的砂性土,密度和内摩擦角标准值推荐采用表1中的数值,并对水上和水下指标进行区分。

表1 《码头结构设计规范》砂性土密度和内摩擦角的标准值

| 砂土类型 | 密度标准值/(t·m <sup>-3</sup> ) |         | 内摩擦角标准值/(°) |    |
|------|----------------------------|---------|-------------|----|
|      | 水上(湿密度)                    | 水下(浮密度) | 水上          | 水下 |
| 细砂   | 1.80                       | 0.90    | 30          | 28 |
| 中砂   | 1.80                       | 0.95    | 32          | 32 |
| 粗砂   | 1.80                       | 0.95    | 35          | 35 |
| 砾砂   | 1.85                       | 1.00    | 36          | 36 |

《工程地质手册》<sup>[3]</sup>根据大量的室内试验总结出了砂性土孔隙比、天然含水量与内摩擦角的对应指标,见表2。并建议当用以计算地基承载力时,采用内摩擦角的计算值低于推荐值2°。

表2 《工程地质手册》砂性土物理、力学性质指标

| 砂土类型 | 孔隙比 $e$ | 天然含水量w/% | 内摩擦角标准值/(°) |
|------|---------|----------|-------------|
| 粉砂   | 0.5~0.6 | 15~18    | 36          |
|      | 0.6~0.7 | 19~22    | 34          |
|      | 0.7~0.8 | 23~25    | 28          |

续表2

| 砂土类型 | 孔隙比 $e$ | 天然含水量w/% | 内摩擦角标准值/(°) |
|------|---------|----------|-------------|
| 细砂   | 0.4~0.5 | 15~18    | 38          |
|      | 0.5~0.6 | 19~22    | 36          |
|      | 0.6~0.7 | 23~25    | 32          |
| 中砂   | 0.4~0.5 | 15~18    | 40          |
|      | 0.5~0.6 | 19~22    | 38          |
|      | 0.6~0.7 | 23~25    | 35          |
| 粗砂   | 0.4~0.5 | 15~18    | 42          |
|      | 0.5~0.6 | 19~22    | 40          |
|      | 0.6~0.7 | 23~25    | 38          |

## 2 美国规范关于砂性土内摩擦角的相关规定

美国标准 API recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design (简称 API RP2A-WSD)<sup>[4]</sup>综合考虑室内试验结果和静力触探试验(CPT)结果与内摩擦角的对应关系,给出了砂性土的内摩擦角以及桩土间摩擦角取值,见表3。

表3 API RP2A-WSD 砂性土内摩擦角及桩土间摩擦角取值

| 密实度   | 砂土类型 | 内摩擦角标准值/(°) | 桩土间摩擦角取值/(°) |
|-------|------|-------------|--------------|
| 非常松散的 | 砂    | 20          | 15           |
| 松散的   | 砂质粉土 |             |              |
| 松散的   | 砂    | 25          | 20           |
| 中等密实的 | 砂质粉土 |             |              |
| 中等密实的 | 砂    | 30          | 25           |
| 密实的   | 砂质粉土 |             |              |
| 密实的   | 砂    | 35          | 30           |
| 非常密实的 | 砂质粉土 |             |              |
| 密实的   | 砾砂   | 40          | 35           |
| 非常密实的 | 砂    |             |              |

注:表中砂质粉土指的是砂土和粉土各占一定比例的土体,当砂土含量占比增大时,摩擦角取值可相应提高;当粉土含量占比增大时,摩擦角取值应进行一定折减。

美国陆军工程师兵团标准 Engineer manual-bearing capacity of soils (EM1110-1-1905)<sup>[5]</sup>规定,在无室内试验结果时,用于承载力分析的砂土强度指标应基于原位试验和经验公式确定;考虑到砂性土用于室内试验的无扰动取样难度较高,其内摩擦角往往通过原位试验推算。结合砂性土的相对密度和现场原位试验结果,给出了对应的砂性土内摩擦角的取值范围,见表4。

表 4 EM1110-1-1905 砂性土内摩擦角取值

| 砂土类型  | 相对密度/% | SPT 值       | CPT 值      | 内摩擦角标准值/(°)             |                    |
|-------|--------|-------------|------------|-------------------------|--------------------|
|       |        | $N_{60}$ /击 | $q_c$ /ksf | Meyerhof <sup>[6]</sup> | PHT <sup>[7]</sup> |
| 非常松散的 | <20    | <4          | -          | <30                     | <29                |
| 松散的   | 20~40  | 4~10        | 0~100      | 30~35                   | 29~30              |
| 中等密实的 | 40~60  | 10~30       | 100~300    | 35~38                   | 30~36              |
| 密实的   | 60~80  | 30~50       | 300~500    | 38~41                   | 36~41              |
| 非常密实的 | >80    | >50         | 500~800    | 41~44                   | >41                |

注：1.  $N_{60}$ 为以基准的应力波能量比为 60% 将实测  $N$  值修正后得到的标准锤击数；2. 1 ksf=47.88 kPa。

### 3 欧洲规范关于砂性土内摩擦角的相关规定

欧洲标准 Eurocode 7-Geotechnical design-Part 2: Ground investigation and testing(简称 EC 7-2)<sup>[8]</sup> 基于静力触探试验(CPT)分析得到了石英和长石砂土内摩擦角和杨氏模量取值，见表 5。

表 5 EC 7-2 砂性土内摩擦角及弹性模量取值

| 砂土密实度 | CPT 值 $q_c$ /MPa | 内摩擦角<br>标准值/(°) | 杨氏模量/<br>MPa |
|-------|------------------|-----------------|--------------|
| 非常松散的 | 0.0~2.5          | 29~32           | <10          |
| 松散的   | 2.5~5.0          | 32~35           | 10~20        |
| 中等密实的 | 5.0~10.0         | 35~37           | 20~30        |
| 密实的   | 10.0~20.0        | 37~40           | 30~60        |
| 非常密实的 | >20.0            | 40~42           | 60~90        |

注：表中取值仅针对砂性土，当砂性土中含有一定粉土时，内摩擦角可按对应降低 3° 取值，当土体中含有砾砂时，内摩擦角可按对应提高 2° 取值。

欧洲标准 EC 7-2 同时也给出了由 CPT 检测获得的锥尖阻力值计算砂性土内摩擦角的经验公式：

$$\varphi' = 13.5 \lg q_c + 23 \quad (1)$$

式中： $\varphi'$  为砂性土的内摩擦角(°)； $q_c$  为 CPT 检测获得的锥尖阻力(MPa)。

此公式由原位 CPT 与实验室三轴试验结果综合分析而得到，适用于级配较差的水上砂性土(土体不均匀系数  $C_u < 3$ )，且适用的锥尖阻力范围为  $5 \text{ MPa} \leq q_c \leq 28 \text{ MPa}$ 。

欧标中常用的 BS 6349 Part 1-3: General-code of practice for geotechnical design<sup>[9]</sup> 规定，砂性土的内摩擦角宜采用静力触探(CPT)结果或标准贯入试验(SPT)结果与内摩擦角间的经验公式来计算，并绘制了两种原位试验结果与内摩擦角的关系曲

线供工程师使用。同时，该标准认为由于 CPT 对原状砂土扰动最小，其推算的内摩擦角更为可靠。

### 4 原位试验指标计算砂性土内摩擦角的经验公式

土体的原位试验已经经历了半个多世纪的工程实践与发展，试验方法和仪器本身已基本标准化，是一种简便可行和有效解决工程问题的方法。国内针对砂性土内摩擦角与原位试验之间联系的研究较少、系统性不强，蒋敏敏<sup>[10]</sup> 在总结前人研究成果的基础上，对砂土原位试验理论进行了研究和试验；林之恒<sup>[11]</sup> 结合工程实践，研究砂土内摩擦角与静探锥尖阻力的相关性等。而国外工程实践中，针对砂性土静力触探试验(CPT)和标准贯入试验(SPT)结果与内摩擦角的关系进行了大量的分析研究，得到了一系列理论计算公式。

#### 4.1 CPT 计算砂性土内摩擦角公式

静力触探在现场进行试验，将静力触探所得锥尖阻力  $q_c$  与室内试验获得的土工指标进行回归分析，可以得到适用于一定地区或一定土性的经验公式。国外工程师针对砂性土的静力触探试验进行了理论模型研究，一些理论模型可以很好地解释试验过程中出现的一些重要的土体特性。但就工程而言，现场原位试验结果与室内试验指标间建立经验性的对应公式仍然是目前最常用的方法。

Robertson 等<sup>[12]</sup> 基于大量室内和原位试验结果，给出了针对未胶结、未老化、中等密实的砂性土内摩擦角计算公式：

$$\varphi' = \arctan \left[ 0.1 + 0.38 \lg \left( \frac{q_c}{\sigma'_{v_0}} \right) \right] \quad (2)$$

式中： $\sigma'_{v_0}$  为有效上覆应力。

本公式应用较为广泛，美国公路合作研究组织标准 NCHRP Report 368: Cone penetration testing<sup>[13]</sup> 以及沙特阿美石油公司企业标准 SAES-A-113: Onshore geotechnical engineering requirements<sup>[14]</sup> 都将本公式列为推荐公式。对密实度较高的砂性土，如碳酸盐含量或者云母含量较高的砂土，此公式计算的内摩擦角则偏于保守。

Kullhawy 等<sup>[15]</sup> 通过对一系列高质量的原位试

验数据分析, 针对杂质较少、颗粒状无胶结的石英砂土, 提出了另外一种经验公式:

$$\varphi' = 17.6 + 11 \lg Q_{\text{tn}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{tn}} = \left( \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{P_{a2}} \right) \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (4)$$

式中:  $Q_{\text{tn}}$  为无量纲的锥尖阻力;  $n$  为应力指数;  $\sigma'_{v0}$  和  $\sigma'_{v0}$  分别为总上覆应力和有效上覆应力;  $P_a$  为与  $\sigma'_{v0}$  相同单位的大气压强 (如  $\sigma'_{v0}$  单位为 kPa, 则  $P_a = 100$  kPa);  $P_{a2}$  为与  $\sigma'_{v0}$  相同单位的大气压强 (如  $\sigma'_{v0}$  单位为 MPa, 则  $P_{a2} = 0.1$  MPa)。

Jefferies 等<sup>[16]</sup>的研究表明, 砂性土的内摩擦角  $\varphi'$  与土体状态系数  $\psi$  之间存在着非常紧密的联系:

$$\varphi' = \varphi'_{cv} - 48\psi \quad (5)$$

$$\psi = 0.56 - 0.33 \lg Q_{\text{tn},cs} \quad (6)$$

$$Q_{\text{tn},cs} = K_c Q_{\text{tn}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_c = 1.0 & (I_c \leq 1.64) \\ K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 & (I_c > 1.64) \end{cases} \quad (8)$$

$$I_c = [(3.47 - \lg Q_{\text{tn}})^2 + (1.22 + \lg F_r)^2]^{0.5} \quad (9)$$

$$F_r = [f_s / (q_c - \sigma'_{v0})] \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $\varphi'_{cv}$  为砂性土的临界内摩擦角, 通常情况下对石英砂取  $33^\circ$ , 但对长石砂或含有碳酸盐的砂性土临界值最高可取到  $40^\circ$ ;  $\psi$  为土体状态系数;

$Q_{\text{tn},cs}$  为等效锥尖阻力;  $K_c$  为修正系数;  $I_c$  为土体类型系数;  $F_r$  为无量纲的摩擦系数 (%);  $f_s$  为 CPT 试验的套筒摩擦系数。

式(5)给出的关系与 Kullhawy 等的研究成果有类似之处, 但该公式的优势在于考虑了土体状态系数  $\psi$ , 即考虑了由  $\varphi'_{cv}$  所代表的土体颗粒特性和通过  $Q_{\text{tn},cs}$  所体现的土体类别。根据过往经验, 石灰质的砂土往往拥有较高的内摩擦角, 但现场实测的 CPT 值却较低, 这种情况下可采用本公式计算内摩擦角, 计算结果与实际值较为接近。

Senneset<sup>[17]</sup>针对正常及部分超固结状态的细颗粒含量较高的砂性土提出了简化的内摩擦角计算公式:

$$\varphi' = 29.5 \cdot B_q^{0.121} (0.256 + 0.336 \cdot B_q + \lg Q_t) \quad (11)$$

$$Q_t = (q_c - \sigma'_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (12)$$

式中:  $B_q$  为孔隙水压力系数, 可从 CPT 试验中获取;  $Q_t$  为考虑上覆压力的无量纲锥尖阻力值。公式适用于  $20^\circ \leq \varphi' \leq 40^\circ$ ,  $0.1 \leq B_q \leq 1.0$ 。

## 4.2 SPT 计算砂性土内摩擦角公式

标准贯入试验 SPT 是动力触探的一种, 是在现场原位测定砂性土或者黏性土的工程特性的一种方法。国外工程师通过一系列的 SPT 原位测试与室内试验结果对比, 建立起砂性土内摩擦角与考虑上覆应力修正后的 SPT 结果 ( $N_1$ )<sub>60</sub> 之间的经验公式, 见表 6。

表 6 砂性土内摩擦角与修正 SPT 值 ( $N_1$ )<sub>60</sub> 的经验公式

| 文献  | 经验公式  | 公式编号 |
|---|---|------|
| PHT(1974)<br>Kulhawy and Mayne (1990)   | $\varphi' = 54^\circ - 27.6034 \cdot \exp[-0.014(N_1)_{60}]$                                | (13) |
| Hatanaka 和 Uchida (1996) <sup>[18]</sup>  | $\varphi' = [20(N_1)_{60}]^{0.5} + 20^\circ$<br>$3.5 \leq (N_1)_{60} \leq 30$               | (14) |
| PHT (1974) 和 Wolff (1989) <sup>[19]</sup>   | $\varphi' = 27.1^\circ + 0.3 \cdot (N_1)_{60} - 0.00054(N_1)_{60}^2$                        | (15) |
| Mayne et al. (2001) <sup>[20]</sup><br>Hatanaka and Uchida (1996) <sup>[21]</sup> | $\varphi' = [15.4(N_1)_{60}]^{0.5} + 20^\circ$  | (16) |
| Specifications for Highway<br>Bridges Japan, JRA (1996) <sup>[22]</sup>           | $\varphi' = [15(N_1)_{60}]^{0.5} + 15^\circ$<br>$(N_1)_{60} > 5$ 且 $\varphi' \leq 45^\circ$ | (17) |

注:  $(N_1)_{60} = (P_a / \sigma'_{v0})^{0.5} N_{60}$ 。

国外学者根据大量的工程实际, 对比了以上公式的适用性。当  $27 \leq (N_1)_{60} \leq 70$  时, 式(13)计算的内摩擦角结果最为保守, 但在实际工程中采

用较多; 式(13)与式(14)计算结果相比, 平均偏差值和离散性较大; 式(15)被广泛认为是比较合理的通过实测 SPT 值推导内摩擦角的公式, NCHRP

Report 651: LRFD Design and construction of shallow foundations for highway bridge structures<sup>[23]</sup> 和沙特阿美石油公司企业设计标准 SAES-A-113 也都将其作为推荐公式。

## 5 砂土内摩擦角确定方法的对比

对国内外标准及相关研究推荐的砂性土内摩擦角确定方法进行对比分析，可以发现以下几点：

1) 由于缺少大量的室内试验和原位试验对比研究成果，中国标准更重视室内试验确定砂土内摩擦角的方法，其推荐的取值主要是基于室内试验结果总结积累。《建筑地基基础设计规范》推荐采用三轴压缩试验的自重压力下预固结的不固结不排水试验方法确定内摩擦角；《工程地质手册》结合土体物理特性，将砂性土细致分类，并给出了较为精确的内摩擦角推荐取值；《码头结构设计规范》针对水上、水下不同区域给出了砂性土的内摩擦角取值，但取值较《工程地质手册》更加保守。

2) 美国标准 API RP 2A-WSD 主要针对桩基础设计，给出的内摩擦角取值较为保守。EM 1110-1-1905 结合土体的相对密度和 SPT 及 CPT 等现场原位试验结果给出内摩擦角取值范围，具有较强的实用性和灵活性。

3) 欧洲标准 EC 7-2 中砂性土内摩擦角推荐值与美标 EM 1110-1-1905 相似，均对应了静力触探 (CPT) 检测结果，且欧标 EC 7-2 中取值范围更加精确，同时也给出了一种由 CPT 检测获得的锥尖阻力值计算砂性土内摩擦角的经验公式；BS 6349 同样也是更推荐建立 CPT 与内摩擦角的对应关系来确定砂性土内摩擦角。

4) 对比中美欧各国家标准可以发现，中国标准建议通过室内试验确定内摩擦角，而欧美国家由于积累了大量的室内试验和原位试验的对比分析成果，更多的是结合内摩擦角与 SPT 及 CPT 等现场原位试验结果的对应关系，给出内摩擦角取值范围。

5) 基于静力触探 CPT 检测结果获得砂性土内

摩擦角的公式众多，Robertson 等的研究成果考虑了上覆压力因素的影响，结合多组试验数据拟合而来，适用范围较广，被多个欧美标准采纳作为推荐公式。

6) 基于标准贯入试验 SPT 检测结果获得砂性土内摩擦角的公式主要聚焦在修正的 SPT 值 ( $N_1$ )<sub>60</sub> 与内摩擦角的拟合关系上，离散性较大，PHT 的研究成果适用范围较广，被多个欧美标准采纳作为推荐公式。

7) 采用 CPT 及 SPT 等原位测试结果获得砂性土内摩擦角的方法经过大量试验验证，与规范标准中给出的推荐值表相比，取值依据充分、计算精确，因此在国外工程设计中应用更为广泛。

## 6 结论

1) 砂土的内摩擦角与土体类型、含水量、密实度、相对密度、上覆压力等多种因素紧密相关，理论模型难以给出准确的确定方法。国内外标准给出的方法均基于大量的室内试验结果和现场原位试验结果总结归纳而来。

2) 原位试验和常规的钻探、取样、室内试验等勘探相比，具有扰动小、快速、精确、经济和节省人力等特点。当实际工程缺乏室内试验结果时，可采用原位测试结果与内摩擦角的经验公式计算内摩擦角值。

3) 由于建立在大量的对比分析成果上，欧美标准采用砂性土原位试验结果推算内摩擦角的方法应用较为成熟、广泛，建议国内工程师在国内外工程设计时可参考借鉴。

## 参考文献：

- [1] 中国建筑科学研究院.建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [3] 工程地质手册编写委员会.工程地质手册[M].3 版.北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

- [4] American Petroleum Institute. API recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. Washington DC: API Publishing Services, 2005.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers. EM 1110-1-1905: Engineering and design bearing capacity of soils[S]. Washington, DC, U.S. Government Printing Office, 1992.
- [6] MEYERHOF G G. Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay [J]. Canadian geotechnical journal, 1974, 11(2): 223-229.
- [7] PECK R P, HANSON W E, THORNBURN T H. Foundation engineering[M]. 2nd ed., New York: Wiley, 1974.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode 7-Geotechnical design-Part 2: Ground investigation and testing [S]. London: Standards Policy and Strategy Committee, 2007.
- [9] British Standards Institution. Maritime works Part 1-3: General-Code of practice for geotechnical design [S]. London: BSI Standards Limited, 2012.
- [10] 蒋敏敏.砂土原位测试理论研究和试验[D].南京:河海大学, 2007.
- [11] 林之恒, 冯涛, 孟少伟, 等.砂土内摩擦角与静探锥尖阻力的相关性研究[J].地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 639-644.
- [12] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Interpretation of cone penetration tests-Part I (sand) [J]. Canadian geotechnical journal, 1983, 20(4): 718-733.
- [13] NOWAK A. NCHRP Report 368: Cone penetration testing[R]. Washington D C: National Research Council, 1999.
- [14] Geotechnical Standards Committee. SAES-A-113: Onshore geotechnical engineering requirements[S]. Riyadh: Saudi Aramco, 2017.
- [15] KULHAWY F H, MAYNE P H. Manual on estimating soil properties for foundation design, Report EL-6800[R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1990.
- [16] JEFFERIES M, BEEN K. Soil liquefaction[M]. New York: Taylor & Francis, 2006.
- [17] SENNESET K, SANDVEN R, LUNNE T. Piezocone tests in silty soils[C]//Proc 1st International Symposium on Penetration Testing. Rotterdam: A A Balkena, 1988: 955-966.
- [18] HATANAKA M, UCHIDA A. Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soil[J]. Soils and foundations, 1996, 36(4): 1-9.
- [19] THOMAS W F. Pile capacity prediction using parameter functions[C]//Proc. Symp. on Predicted & observed axial behavior of piles 1989. New York: ASCE, 1989.
- [20] MAYNE P W, CHRISTOPHER B R, DEJONG J. Manual on subsurface investigations [M], . Washington D C: National Highway Institute and FHWA, .2001.
- [21] HATANAKA M, UCHIDA A. Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils[J]. Soils and foundations, 1996, 36(4): 1-9.
- [22] JRA. Specifications for highway bridges IV: substructures (SHB) [S]. Tokyo: Japan Road Association, .1996.
- [23] NOWAK A. NCHRP Report 651: LRFD design and construction of shallow foundations for highway bridge structures[R]. Washington, DC: National Research Council, 1999.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消息 ·

### 江西虎山嘴枢纽通过阶段验收

12月23日, 中交水运规划设计院有限公司主持设计的八字嘴航电枢纽工程虎山嘴枢纽工程, 顺利通过江西省港航建设投资集团有限公司在江西省余干县组织的水库蓄水前、通航前阶段验收。江西省交通厅、省港航局、省交通质监局、省港投集团、信江船闸通航中心以及工程建设、运行、设计、施工、监理等单位代表参加了会议。验收委员会听取了建设、设计、监理、施工单位、第三方检测单位的阶段验收工作报告和质量监督部门的质量核验意见, 对工程实体进行了现场查验, 审阅了内业资料。经审议, 验收委员会一致同意虎山嘴枢纽工程通过水库蓄水前、通航前阶段验收。