

浅谈旁压试验在西非项目深基础设计中的应用

Application of Pressuremeter Test in Deep Foundation Design of West Africa Project

叶潘 康浩

Pan Ye Hao Kang

中咨盛裕交通设计研究有限公司 中国·北京 100048

Zhongzi Shengyu Traffic Design and Research Co., Ltd., Beijing, 100048, China

摘要: 论文依托科特迪瓦公路项目,介绍了在法国规范体系下,西非项目中如何利用旁压试验获取必要的计算参数进行桩基础的设计和验算,总结了桩长和沉降计算的方法,分析了与中国桩基计算的区别,结论可供西非地区类似项目设计参考。

Abstract: Relying on the Ivory Coast highway project, the paper introduces how to use pressuremeter test to obtain necessary calculation parameters for pile foundation design and checking calculation in West Africa projects under the French standard system, summarizes the method of pile length and settlement calculation, analyzes the difference between pile foundation calculation and that in China, and the conclusions can be used as a reference for similar projects in West Africa.

关键词: 旁压试验; 桩基; 设计; 沉降

Keywords: pressure meter test; pile foundation; design; settlement

DOI: 10.12346/etr.v4i10.7203

1 引言

深基础也常称为桩基础,其长度受多种因素决定,其中地质条件对于桩基的选择和设计起决定性作用。西非国家科特迪瓦公路项目设计采用法国标准,利用旁压试验确定地土体各层的计算参数。

在科特迪瓦的桥梁设计过程中,为了合理选用桩基方案,保证结构安全的同时优化造价,设计者结合桥位所处的地质条件、钻孔的布置位置以及试验数据等情况,逐孔对计算结果进行分析和研究,同时类比中国桥型,与中国规范计算的桩长进行对比,桥梁桩径和桩长均在合理的范围,得到了外方业主和监理的认可。

2 设计规范的选用

科特迪瓦项目主要采用欧洲法国规范,并结合西非当地的设计习惯,主要采用了法国规范 CCTG 第 62 分册第 V 章和 BAEL 91.MOD.99。

3 桩基设计验算方法

法国规范体系下桩基础设计验算主要包括承载力验算和沉降验算,两部分内容均要利用旁压试验所得的各层土体参数。法规中对于如何利用旁压数据进行桩基础的验算有详细的要求,主要步骤为通过旁压试验获得净极限压力和净弹性模量—桩端承载力的计算—侧向摩擦力的计算—计算设计桩顶荷载—桩基沉降验算—桩长验算。

3.1 旁压试验

旁压试验钻孔和压力计测试执行法国标准 NF EN ISO 22476-4 May 2015,主要通过确定施加的压力与探头壁位移之间的关系,确定各层土体的性质,提供基础计算所需的参数:净极限压力(P_l)和净弹性模量(E)^[1]。

3.2 桩端承载力的计算

桩基的桩端承载力通过以下公式计算:

$$Q_{pu} = A \times q_u \quad (1)$$

式中: Q_{pu} 为桩端承载力; q_u 为桩端持力层的极限承载力; A 为桩端截面面积。

桩端持力层的极限承载力计算公式如下:

【作者简介】叶潘(1990-),男,中国河南驻马店人,硕士,工程师,从事桥涵设计研究。

$$q_u = k_p \times p_l^* \quad (2)$$

式中： k_p 为承载力系数，对于不同的土质，规范中给出了详细的取值； p_l^* 为桩端下的等代净极限压力。

计算公式如下：

$$p_l^* = \frac{1}{b + 3a} \int_{b-a}^{b+a} p_l^*(z) dz \quad (3)$$

式中： D 为桩长； h 为桩基进入持力层的深度； a 为桩径，若大于 1 m， a 取桩径的 1/2，反之取 0.5 m。

3.3 侧向摩擦力的计算

西非地区桥梁桩基的侧向摩擦力通过以下公式计算：

$$Q_{su} = P \cdot \int_0^D q_s(z) \cdot dz \quad (4)$$

式中： Q_{su} 为侧向摩擦力； $q_s(z)$ 为不同深度的单位侧摩擦力，对于不同土质，规范中给出了对应的参数曲线（如图 1 所示）。

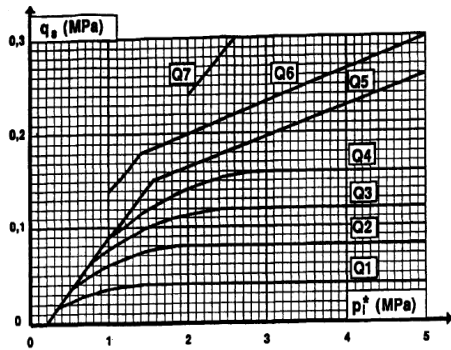


图 1 单位侧摩擦力曲线

图中曲线的表达式如下：

Q₁ 到 Q₄ 曲线：

$$q_s = q_{sn} \frac{p_l}{p_n} \left(2 - \frac{p_l}{p_n} \right) \quad (5)$$

式中： $\frac{p_l}{p_n} \leq 1$ 。

$$q_s = q_{sn} \quad (6)$$

式中： $\frac{p_l}{p_n} \geq 1$ 。

其中： $q_{sn} = 0.04n$ (MPa)， $p_n = (1 + 0.5n)$ (MPa)，这些曲线的上限均不超过 Q₅ 曲线。

$$Q_5: q_s = \min \left(\frac{p_l - 0.2}{9}; \frac{p_l + 3.3}{32} \right), q_l \geq 0.2 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$Q_6: q_s = \min \left(\frac{p_l + 0.4}{10}; \frac{p_l + 4.0}{30} \right), q_l \geq 1.0 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$Q_7: q_s = \frac{p_l + 0.4}{10}, q_l \geq 2.5 \text{ MPa} \quad (9)$$

3.4 设计桩顶荷载

西非地区结构物需进行 ELU（承载能力极限状态）和 ELS（正常使用极限状态）设计，根据 BAEL 91.MOD.99，

分别计算以下几种极限荷载，并进行组合^[2]。表 1 为桩基承载力荷载组合。

桩基受压极限荷载：

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su} \quad (10)$$

桩基受拉极限荷载：

$$Q_{tu} = Q_{su} \quad (11)$$

桩基受压屈服荷载：

$$Q_c = 0.5Q_{pu} + 0.7Q_{su} \quad (12)$$

桩基受拉屈服荷载：

$$Q_{tc} = 0.7Q_{su} \quad (13)$$

表 1 桩基承载力荷载组合

组合形式	Q_{min}	Q_{max}
基本组合	$-\frac{Q_{tu}}{1.40}$	$\frac{Q_u}{1.40}$
偶然组合	$-\frac{Q_{tu}}{1.30}$	$\frac{Q_u}{1.20}$
少见组合	$-\frac{Q_{tc}}{1.40}$	$\frac{Q_c}{1.10}$
准永久组合	$0(*)$	$\frac{Q_c}{1.40}$

3.5 桩基沉降验算

对于项目所设桩基因地质条件未深入岩层，需验算单桩沉降。科特设计习惯，桩基的沉降控制在 0.003 B 和 0.01 B 之间，其中 B 为桩基直径。

桩基沉降验算主要根据法国规范 62 分册第 V 卷，利用荷载传递理论（FRANK 和 ZHAO 本构关系）进行计算。FRANK 和 ZHAO 提出的本构关系（桩尖移动规律和桩的侧向力）取决于土壤的类型，细土和粒状土有所区别^[3]，桩端沉降和每层土的桩侧向摩擦力关系如图 2 所示。

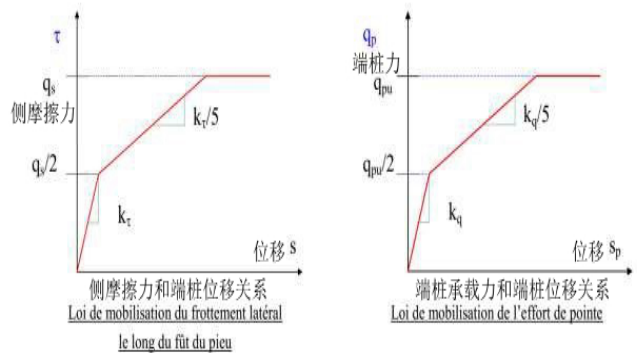


图 2 本构关系图

其中： q_u 为破坏应力； $q_u = k_p P_{le}^*$ ； P_{le}^* 为等效净极限压力； k 为承载力系数，取决于土壤类别和桩的类型，其取值如表 2 所示； E_M 为压力模量； B 为桩基直径。

表 2 承载力系数表

土质	沙土类	碎石土类
k_r	$k_r = 2 \frac{E_M}{B}$	$k_r = 0.8 \frac{E_M}{B}$
k_q	$k_q = 1 \frac{E_M}{B}$	$k_q = 4.8 \frac{E_M}{B}$

整理公式可得，对于桩基的应力 q ，其对应的沉降 S_p ，计算公式如表 3、表 4 所示。

表 3 桩顶沉降与应力关系计算表

桩顶沉降和桩端应力的关系	
$0 < q < \frac{q_u}{2}$	$s_p = \frac{q}{k_q}$
$\frac{q_u}{2} < q < q_u$	$s_p = \frac{(5q - 2q_u)}{k_q}$

表 4 桩顶沉降与侧向摩擦力的关系

$0 < s < \frac{q_s}{2k_r}$	$\tau = k_r s$
$\frac{q_s}{2k_r} < s < \frac{3q_s}{k_r}$	$\tau = \frac{2q_s + k_r s}{5}$

3.6 桩长验算

若通过验算，桩基承载力或者沉降不能满足要求，需要调整桩长，重新验算。

4 桩基设计实例

卡巴拉—萨隆库哈尼公路项目是西非国家科特迪瓦地区北部的交通要道，项目 PK24+967 跨越河流 Somokoro，桥梁为 6×18.8 m 简支 T 梁桥，肋板台，柱式墩，桩基础。以

下取一个桥墩和桥台为例，展示计算结果。

4.1 桩长计算

按照法国规范整体建模，计算得出设计桩顶反力，计算结果如表 5 所示。

各墩台地基基础指标如表 6 所示。

为了控制造价，优化成本，选用最优方案，分别对桩径为 1 m 和 1.2 m 两种形式进行了验算，其桩基承载力计算结果见表 7，桩基沉降验算结果如表 8 所示。

4.2 计算结果分析

分析 PK24+967 桥梁桩基长度，若采用桩径为 1 m，全桥桩基桩长变化范围在 25~30 m，若桩径为 1.2 m，桩长变化范围为 21~24 m。两种情况桩基均入土较深，从各层地基的力学特性分析，桥梁桩基按摩擦桩设计，桩长在合理的长度范围，且比较符合以往的工程经验。横向对照中国规范的计算结果，基本一致。综合考虑全桥构造尺寸，最终选用桩径 1.2 m 进行设计。

中国和其他国家的桩长计算公式，均是建立在桩基支承的原理之上，区别在于用于计算的试验参数获取方式有所不同，但均符合桩长控制思路，计算结果也都得到了大量工程实践的检验，计算结果安全可靠，计算方法得到了验证。

桩长设计的地基力学参数，一般都是通过原位试验取得，在西非地区，旁压试验是最为常用的方法。与中国一般采用的原位钻探，室内试验等方法相比，旁压试验更能直观准确地反映地基土体的实际特性，分层测试的成果也更为可靠，精度也更高，通过这种方法计算控制桩长也更为可靠精确。需要注意的是，利用旁压试验进行验算，所采用的计算参数会根据土体性质的不同而变化，为了更加准确地命名分类土体，多补增一个原位取样孔进行室内实验，确保试验参数的精确可靠。

表 5 桩顶反力计算表

墩号	ELU (基本组合)		ELU (偶然组合)		ELS (极少组合)		ELS (准永久组合)	
	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}	Q_{min}
0 号台	3442	2133	2551	1751	2549	1575	1890	1808
1 号墩	4461	2184	2632	1629	3309	1618	1949	1662

表 6 地基基础指标

钻孔	深度 (m)	粒径分析	液塑限			表密度	含水率	剪切指标	
		(% 细料)	LL	LP	IP	(t/m^3)	W (%)	C (kPa)	Φ (°)
SDT1	6.00	66.39	27.83	14.38	13.46	2.49	28.52	40	9
	12.00	57.67	46.87	24.46	22.41	2.58	31.17	12	13
SDT2	6.00	40.17	25.67	13.56	12.11	2.58	20.98	42	9
	12.00	50.98	40.18	20.46	19.72	2.51	26.96	20	28

表 7 桩基承载力验算表

位置	桩径 (m)	桩长 (m)	Q _{max} (t)			
			ELS	ELS	ELU	ELU
			准永久组合	极少组合	偶然组合	基本组合
0 号台	1.00	27.00	203.60	259.13	347.60	781.39
	1.20	23.00	210.46	267.85	358.01	417.67
1 号墩	1.00	28.00	197.53	343.08	468.13	392.43
	1.20	22.00	268.23	341.38	468.79	546.93

表 8 桩基沉降验算表

位置	QTmin (t)	QELS (t)	Observation	沉降 t (mm)
0 号台	381.98	315.60	QT min< QELS	1.0~2.0
1 号墩	288.87	307.23	QT min< QELS	1.0~2.0

5 结语

中国公路建设经过几十年的发展,已经得到了长足的进步,中国的公路总里程数也位于世界的前列,各个设计单位也都积累了丰富的经验,随着“一带一路”计划的实现,越来越多的中国企业走出国门,面向世界,而非洲作为新兴的市场,大力发展基础产业,受历史原因的影响,西非地区多采用法国标准,这种情况下,了解当地的设计习惯,掌握当地的设计规范,有利于我们开拓国际市场,同时对比不同方

法的计算,也利于我们加强对于计算结果的把控,确保设计的安全,优化设计方案。

参考文献

- [1] NF EN ISO 22476-4 May 2015[S].
- [2] BAEL 91.MOD.99[S].
- [3] CCTG第62分册第V章.法国住宅和交通部 土工工程基础设计和计算技术规定[S].