

DOI: 10.11779/CJGE2017S1024

基于原位旁压试验的切线模量法及其初步验证

温 勇^{1, 2, 3}, 杨光华^{2, 3, 4}, 汤连生^{*1}, 李志云⁴, 黄致兴⁴, 张玉成^{2, 3}

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610;

3. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610; 4. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 切线模量法根据原位压板载荷试验求取不同荷载水平下土体的切线模量, 并将其应用于分层总和法进行地基沉降计算, 较好地克服了通常取样扰动的不利影响, 并能够反映地基沉降的非线性, 是目前地基沉降计算中较实用有效的方法之一。而其不足之处则是原位压板试验工作量大、时间长, 且难以反映深部土体的特性; 相比而言, 旁压试验设备轻便、测试时间短, 且可在不同深度的土层进行测试, 可以算是一种简单实用的原位试验。因此, 为了进一步发展和完善切线模量法, 本文探讨了利用原位旁压试验获取切线模量法计算参数的方法, 并通过位于美国 Texas A&M University 河滨校区的粉细砂地基上 4 个不同压板尺寸载荷试验结果, 检验了其可行性。结果表明: 4 个不同压板尺寸载荷试验的沉降计算结果与试验结果具有较好的一致性, 初步验证了基于原位旁压试验的切线模量法的可行性。

关键词: 地基沉降; 切线模量法; 原位旁压试验; 砂土地基

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0121-05

作者简介: 温 勇(1987-), 男, 江西吉安人, 博士后, 高级工程师, 主要从事土的本构理论、土的原位测试、地基基础工程等方面的研究工作。E-mail: wy876633@163.com。

Tangent modulus method based on in-situ pressuremeter tests and its preliminary validation

WEN Yong^{1, 2, 3}, YANG Guang-hua^{2, 3, 4}, TANG Lian-sheng¹, LI Zhi-yun⁴, HUANG Zhi-xing⁴, ZHANG Yu-cheng^{2, 3}

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Research Institute of Water

Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou

510610, China; 4. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The tangent modulus method is a method which is based on the plate loading tests to obtain the tangent modulus of the soil under different load levels, and uses the tangent modulus into the layer-wise summation method for calculating foundation settlement. It is one of the best methods for settlement calculations at present, which can overcome the adverse effects of sampling disturbance and reflect the nonlinearity of foundation settlement. However, the deficiency of the tangent modulus method based on the plate loading tests is that the plate loading tests need a heavy workload and cannot reflect the characteristics of soil in deep layers. While, compared with the plate loading tests, the pressuremeter tests take the advantages of simple operation and can test the soil with different depths, which can be said as simple and practical in-situ tests. Therefore, in order to further develop the tangent modulus method, one method in which the pressuremeter tests are used to obtain the parameters of the tangent modulus method is studied, and its feasibility is verified by the results of four plate loading tests with different sizes, which are tested in one fines sand foundation of Texas A&M University riverside campus. The results show that the calculated results of settlement curve of four plate loading tests with different sizes agree with the experimental ones, which preliminarily verifies the feasibility of the tangent modulus method based on the in-situ pressuremeter tests.

Key words: foundation settlement; tangent modulus method; in-situ pressuremeter test; sand foundation

0 引言

地基沉降计算是经典土力学研究中的一个基本而又未能很好解决的问题, 常用的地基沉降计算方法多是由现场取样经室内土样压缩试验, 将所得的参数用于沉降计算。这种方法虽然比较简单实用, 但仍存在

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378131, 41572277); 广东省自然科学基金项目(2015A030313118); 广东省岩土工程技术研究中心开放基金项目(201404002)

收稿日期: 2016-11-28

*通讯作者(E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn)

两个不足：①取土时会产生扰动，②试验的应力、变形条件与实际地基的受力状态不尽相同，这就使得计算误差难以估计。针对传统沉降计算方法的优点和不足，文献[1~9]开展了新的地基沉降计算方法的研究，提出了基于原位压板载荷试验来确定计算参数的切线模量法。该方法根据原位压板试验求取不同荷载水平下土体的切线模量，并将其应用于分层总和法进行沉降计算，较好地克服了通常取样扰动的不利影响，并能够反映地基沉降的非线性，是目前地基沉降计算中较实用有效的方法之一。但其不足之处则是原位压板试验工作量大、时间长，且难以反映深部土体的特性。因此，为了发展和完善切线模量法，有必要进一步研究利用其它简单原位试验确定切线模量法计算参数的方法。

近年来，原位测试技术在国内外发展很快，已成为工程勘察中不可或缺的手段，旁压试验是其中之一。旁压试验是利用圆柱形旁压器外的弹性膜在土中的扩张对周围土体施加均匀压力，测得压力与径向变形的关系，从而估算地基土的强度、变形等岩土工程参数的一种原位测试手段。自 1956 年 Menard 旁压仪问世以来，旁压试验技术无论在实践上还是理论上都已积累了相当丰富的经验和成果^[10-16]。此外，旁压试验测试方法简便、迅速，拥有自身突出的优点，例如：与室内土工试验相比，它没有取土的扰动过程；与触探等原位测试方法相比，它能获得柱状孔穴在膨胀的整个过程中压力和体积变化的关系；与压板载荷试验相比，它能探查不同深度土层的力学性质。

因此，为了进一步发展和完善切线模量法，本文将探讨利用原位旁压试验获取切线模量法计算参数的方法，并将其应用于美国 Texas A&M University 河滨校区的粉细砂地基上几个不同压板尺寸载荷试验沉降结果计算中，验证该方法的合理性和可行性。

1 切线模量法

切线模量法^[9]依据原位土的压板载荷试验曲线通过建立力学模型求取不同荷载水平下土体的非线性切线模量，将其应用于分层总和法进行地基沉降计算。该方法所需参数简单，只需黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和变形模量 E_{t0} 3 个土性参数，且理论基础较充实，目前已得到广泛应用。切线模量计算公式如下：

$$E_t = \left(1 - \frac{p}{p_u}\right)^2 \cdot E_{t0} \quad , \quad (1)$$

式中， E_t 即为不同荷载水平下土体的切线模量， p/p_u 为土层所受压力 p 与极限荷载 p_u 的比值，反映了土体荷载水平对土体切线模量的影响， p_u 利用土的强度指标黏聚力 c 、内摩擦角 φ 根据压板或基础尺寸来计算；

E_{t0} 为初始切线模量，根据试验由弹性力学的 Boussinesq 解反求。这些参数与试验尺寸的关系已解除，从而可以用于不同基础尺寸的沉降计算，克服尺寸效应的影响。

2 基于原位旁压试验的切线模量法

前面一节介绍了基于原位压板载荷试验来确定计算参数的切线模量法，该方法较好地克服了通常取样扰动的不利影响，并能够反映地基沉降的非线性；此外，所需的土层参数仅为土的强度指标 c 、 φ ，以及土的初始切线模量 E_{t0} 这 3 个参数，参数简单。不足之处则是，原位压板试验工作量大、时间长，且难以反映深部土体的特性。因此，有必要进一步发展由其它简单原位试验确定切线模量法计算参数的方法，使切线模量法得到更好地推广应用。

相比原位压板载荷试验而言，旁压试验设备轻便、测试时间短，且可在不同深度进行测试，可以算是一种简单实用的原位试验。此外，近年来旁压试验技术无论在实践上还是理论上都已积累了相当丰富的经验和成果^[10-16]。因此，为了进一步发展和完善切线模量法，本节将探讨基于原位旁压试验的切线模量法，而其关键则是要建立旁压试验测试结果与切线模量法所需计算参数的关系。

2.1 由旁压试验确定土体的强度指标 c 和 φ

目前，采用旁压试验同时确定土的强度参数 c 、 φ 还没有较好的理论方法，仍处于探索阶段^[9]。本小节将根据旁压试验确定地基承载力的经验公式，反算土体的强度参数 c 、 φ 。

根据旁压试验的基本原理可知^[13]，旁压试验是利用圆柱形旁压器外的弹性膜在土中的扩张对周围土体施加均匀压力，测得压力与径向变形的关系，由此可获得土体的旁压模量 E_m 、静止侧压力 p_0 、临塑压力 p_f 和极限压力 p_L 等特征参数。而大量的测试资料又表明，用旁压试验得到的临塑压力 p_f 减去土层的静止侧压力 p_0 ，所确定的承载力与载荷试验得到的特征承载力基本一致。国内在应用旁压测试确定地基承载力特征值时，一般采用下式：

$$f_k = p_f - p_0 \quad . \quad (2)$$

而地基规范中^[17]提供了从载荷试验或其它原位试验、经验值等确定地基承载力特征值 f_k 的经验方法，实际基础下地基的承载力特征值则为：

$$f = f_k + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_0 (d - 0.5) \quad . \quad (3)$$

式中 b 为实际基础的宽度，当 $b \geq 6$ m 时，取 $b=6$ m；当 $b \leq 3$ m 时取 $b=3$ m。 d 为基础的埋深； γ 为基底下土的重度； γ_0 为基础底面以上土的加权平均重度； η_b 、

η_d 分别为基础宽度和埋置深度的地基承载力修正系数。

另一方面, 若已知土的抗剪强度参数 c , φ 值, 则根据地基临界强度公式, 按 c , φ 值计算确定的地基承载力特征值为^[17]:

$$f = M_\gamma \cdot \gamma b + M_q \cdot \gamma_0 d + M_c \cdot c , \quad (4)$$

式中, M_γ , M_q , M_c 根据 φ 值确定。

由式(3)可知, 若 $b=3\text{ m}$, $d=0.5\text{ m}$, 则 $f=f_k$, 此时式(4)可写成为

$$f_k = 3M_\gamma \cdot \gamma + 0.5M_q \cdot \gamma_0 + M_c \cdot c . \quad (5)$$

若根据压板载荷试验或其它原位试验得到地基承载力特征值 f_k , 则对于砂土, 由于 $c=0$, 此时根据式(5)可以较准确地反算出 φ 值; 对于一般黏性土, 则需结合一定的工程经验, 先假设 c 值或者 φ 值, 然后根据式(5)反算出另外一者。

本文采用旁压试验确定地基承载力特征值 f_k , 则根据式(2)及式(5), 有

$$(p_f - p_0) - (3M_\gamma \times \gamma + 0.5M_q \times \gamma_0 + M_c \times c) = 0 . \quad (6)$$

这样, 根据式(6), 由旁压试验就可以反算得到土体的强度指标 c 和 φ 。

2.2 由旁压试验确定土体的初始切线模量 E_{t0}

工程中常用的地基变形参数为压缩模量 E_s 和变形模量 E_0 , 分别由室内压缩试验和压板载荷试验中获得, 而初始切线模量 E_{t0} 不能从工程资料中直接获得。本小节将从旁压试验 $p-V$ 曲线和压板载荷试验 $p-s$ 曲线相似的特点(即符合双曲线方程)出发, 由旁压试验确定土体的初始切线模量 E_{t0} 。

若令 $p-s$ 曲线中区间 (p_0, p_1) 上的弦线模量为 E , 则由 Boussinesq 解得到 $\Delta p=p_1-p_0$ 产生的基础沉降为

$$\Delta s = \frac{(p_1 - p_0)B(1-\nu^2)}{E} \omega . \quad (7)$$

又由于:

$$\Delta s = \int_{p_0}^{p_1} \frac{B(1-\nu^2)\omega}{E_t} dp = B(1-\nu^2)\omega \int_{p_0}^{p_1} \frac{1}{E_t} dp . \quad (8)$$

将式(1)代入上式并积分得

$$\Delta s = \frac{B(1-\nu^2)\omega}{E_{t0}} \cdot \frac{p_u^2(p_1-p_0)}{(p_u-p_0)(p_u-p_1)} . \quad (9)$$

比较式(7)与式(9)可得

$$E_{t0} = \frac{p_u^2}{(p_u-p_0)(p_u-p_1)} \cdot E , \quad (10)$$

式中, E 为曲线上的弦线模量, 若令 $p_0=0$, 则 E 为割线模量, 即载荷试验中确定的变形模量 E_0 , 此时式(10)变为

$$E_{t0} = \frac{p_u}{(p_u-p_1)} \cdot E_0 . \quad (11)$$

除载荷试验外, 也可以利用旁压试验结果根据式

(11) 计算 E_{t0} 值。研究表明^[9], 旁压试验典型 $p-V$ 曲线和载荷试验 $p-s$ 曲线形状具有类似的特点, 若从旁压曲线直线段的起点算起, 如图 1 所示, 则两者都可分为类弹性区、塑性发展区和塑性区 3 个变形阶段。

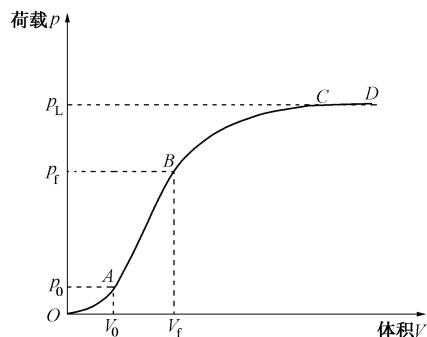


图 1 旁压试验典型 $p-V$ 曲线

Fig. 1 Typical $p-V$ curve of pressuremeter tests

因此, 根据土体压板试验 $p-s$ 曲线一般符合双曲线模型的特点, 可假设旁压曲线(图 1 中的 ABCD 段)也符合双曲线模型, 则式(11)对旁压曲线也适用, 其中的压力指标取相对于初始压力 p_0 的附加压力。旁压模量 E_m 实际上是旁压曲线中 AB 段的割线模量(A 点为起点), 由于初始压力 p_0 较小, 认为其对应的切线模量即为初始切线模量 E_{t0} ; 式(11)中的 p_L 相当于曲线中 B 点对应的压力 (p_f-p_0) , p_u 相当于 (p_L-p_0) 。因此, 根据旁压试验结果, 初始切线模量可由下式确定:

$$\begin{aligned} E_{t0} &= \frac{(p_L - p_0)}{(p_L - p_0) - (p_f - p_0)} \cdot E_m \\ &= \frac{(p_L - p_0)}{(p_L - p_f)} \cdot E_m . \end{aligned} \quad (12)$$

至此, 根据旁压试验结果获得了切线模量法所需的 3 个计算参数 c , φ 及 E_{t0} , 即建立了基于原位旁压试验的切线模量法。

3 试验验证

为了检验基于原位旁压试验的切线模量方法的可行性, 利用其对 Briaud J L 等^[18]在 Teaxas A & M University 河滨地区粉细砂土地基上进行的 4 个不同尺寸压板试验 $p-s$ 曲线进行计算。试验场地地基 0~10.5 m 深为粉细砂土, 下层为黑色硬黏土, 室内测定的粉细砂的主要物理力学指标值如表 1 所示。除压板试验(埋深为 0.76 m)外, 在试验场地内还进行了原位旁压试验, 试验布置示意图如图 2 所示(pmt-2 代表旁压试验)。

表 1 粉细砂地基土物理力学指标值

Table 1 Physical and mechanical indexes of ground soil

γ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	w %	G_s	e	c $/\text{Pa}$	φ $(^\circ)$
15.65	5.0	2.66	0.75	0	36.4

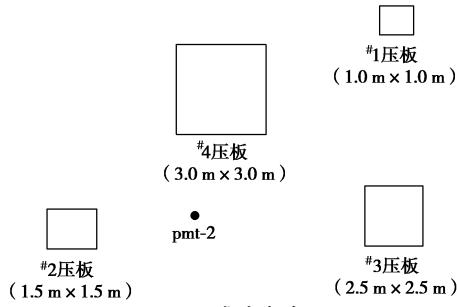


图 2 试验点布置

Fig. 2 Distribution of test points

下面根据前面介绍的方法, 基于旁压试验测试结果确定切线模量法所需的计算参数 c , φ , E_{t0} 。根据美国 Texas A & M University 河滨地区压板试验场地的典型旁压试验曲线(pmt-2, 试验执行文献[19]的标准方法), 取 $p_L=400 \text{ kPa}$, $p_f=280 \text{ kPa}$, $p_0=20 \text{ kPa}$, 代入式(12)中, 则有:

$$E_{t0} = \frac{(400 - 20)}{(400 - 280)} \cdot E_m = 3.2 E_m \quad (13)$$

而根据 pmt-2 旁压试验结果, 可得到不同深度处砂土的旁压模量 E_m , 由式(13)可计算得到相应的初始切线模量 E_{t0} , 结果如表 2 所示。

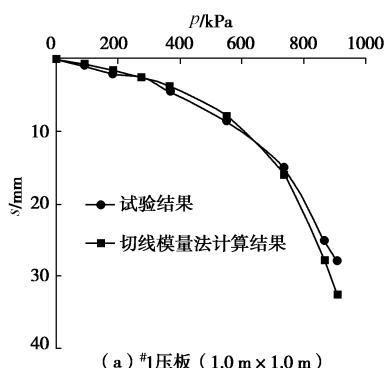
表 2 由旁压试验确定的初始切线模量

Table 2 Initial tangent modulus determined by pressuremeter tests

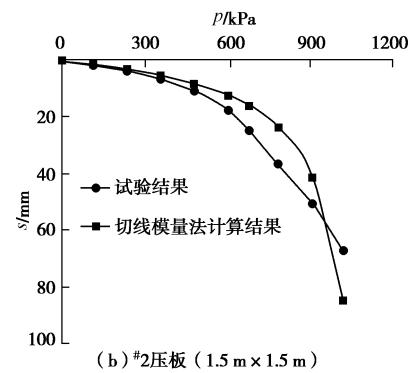
地层深度/m	E_m/MPa	E_{t0}/MPa
1.25	48.96	156.7
2.25	57.58	184.2
3.25	54.85	175.5
4.25	67.19	215.0
5.25	84.93	271.8
6.25	68.76	220.0
7.25	29.33	93.9

又由于试验场地为粉细砂土地基, 因此可取 $c=0$, 再根据式(6), 及 $p_f=280 \text{ kPa}$, $p_0=20 \text{ kPa}$, 可反算得到 φ 值为 36° 。

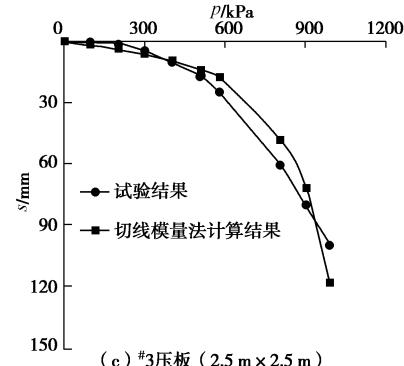
由此, 基于旁压试验成果得到了切线模量法所需的计算参数 c , φ , E_{t0} 。利用这 3 个参数, 采用切线模量法对 4 个不同尺寸压板试验的 $p-s$ 曲线进行计算, 并与试验结果对比, 如图 3 所示。由图 3 可知: 4 个不同压板尺寸的 $p-s$ 曲线计算结果与试验结果具有较好的一致性, 初步表明了本文由原位旁压试验确定切线模量法所需计算参数的方法是可行的。



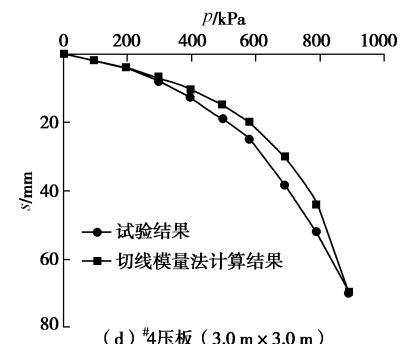
(a) #1压板 (1.0 m × 1.0 m)



(b) #2压板 (1.5 m × 1.5 m)



(c) #3压板 (2.5 m × 2.5 m)



(d) #4压板 (3.0 m × 3.0 m)

图 3 不同尺寸压板试验 $p-s$ 曲线计算结果与试验结果的对比Fig. 3 Comparison between predicted $p-s$ curves and test results of four plate loading tests with different sizes

4 结语

为了进一步发展和完善切线模量法, 弥补原位压板试验工作量大、时间长, 且难以反映深部土体特性等不足, 本文探讨了基于原位旁压试验的切线模量法, 并通过位于美国 Texas A&M University 河滨校区的粉细砂地基上 4 个不同压板尺寸载荷试验结果, 检验了其可行性。计算结果表明: 4 个不同压板尺寸的 $p-s$ 曲线计算结果与试验结果具有较好的一致性, 初步证明了本文由原位旁压试验确定切线模量法所需计算参数的方法是可行的。

参考文献:

- [1] 杨光华. 基础非线性沉降的双曲线模型法[J]. 地基处理,

- 1997(1): 50 - 53. (YANG Guang-hua. The hyperbolic model for estimating nonlinear settlement of foundation[J]. *Ground Improvement*, 1997(1): 50 - 53. (in Chinese))
- [2] 杨光华. 残积土上基础非线性沉降的双曲线模型的研究 [C]// 第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 大连, 2001: 168 - 171. (YANG Guang-hua. A study on hyperbolic model for estimating nonlinear settlement of foundation on residual soil[C]// Proceeding of the Seventh National Conference on Numerical Analytical Methods in Geomechanics, Dalian, P.R. China. Dalian, 2001: 168 - 171. (in Chinese))
- [3] 杨光华. 软土地基非线性沉降计算的简化法[J]. 广东水利水电, 2001(1): 3 - 5. (YANG Guang-hua. The simplified nonlinear settlement computation method for soft foundation[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2001(1): 3 - 5. (in Chinese))
- [4] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 1927 - 1931. (YANG Guang-hua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1927 - 1931. (in Chinese))
- [5] 杨光华, 王鹏华, 乔有梁. 地基非线性沉降计算的原状土割线模量法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 49 - 52. (YANG Guang-hua, WANG Peng-hua, QIAO You-liang. An undisturbed-soil secant modulus method for calculation of nonlinear settlement of soil foundations[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(5): 49 - 52. (in Chinese))
- [6] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(4): 679 - 686. (YANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlements[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2008(4): 679 - 686. (in Chinese))
- [7] 彭长学, 杨光华. 软土 $e - p$ 曲线确定的简易方法及在非线性沉降计算中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1706 - 1710. (PENG Chang-xue, YANG Guang-hua. A simplified method for determining $e-p$ curve of soft soil and its application to analyzing nonlinear settlement of foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1706 - 1710. (in Chinese))
- [8] 杨光华, 王俊辉. 地基非线性沉降计算原状土切线模量法的推广和应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 33 - 37. (YANG Guang-hua, WANG Jun-hui. Application of undisturbed soil tangent modulus method for computing nonlinear settlement of soil foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 33 - 37. (in Chinese))
- [9] 杨光华. 地基沉降计算的新方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (YANG Guang-hua. The new method to calculate the settlement of the foundation and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [10] BAGUELIN F, JEZEQUEL J F, SHIELDS D H. The pressuremeter and foundation engineering[M]. Clausthal: Trans-portaion Technical Publications, 1978.
- [11] HOULSBY G T, WITHERS N J. Analysis of the cone pressuremeter test in clay[J]. *Géotechnique*, 1988(38): 575 - 587.
- [12] 黄熙龄, 张世浩, 等. 旁压试验及黏性土变形模量的测定 [C]// 第一届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京, 1964. (HUANG Xi-ning, ZHANG Shi-hao. The pressuremeter test and the test the deformation modulus of clayey soil[C]// The Selected papers of the first soil mechanics and foundation engineering academic meeting of China. Beijing, 1964. (in Chinese))
- [13] 赵善锐. 旁压试验及其工程应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1987. (ZHAO San-rui. The pressuremeter test and its engineering application[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1987. (in Chinese))
- [14] 沈国荣. 旁压结果预估基础沉降和承载力[D]. 成都: 西南交通大学, 1987. (SHEN Guo-rong. Using the result of pressuremeter test to predict the settlement and bearing capacity[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1987. (in Chinese))
- [15] 王长科. 用旁压试验原位测定土的强度参数[J]. 勘察科学技术, 1992: 1 - 3. (WANG Chang-ke. The method of in-situ determination of the strength parameters of soil by using pressuremeter[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1992: 1 - 3. (in Chinese))
- [16] 郝冬雪. 孔扩张理论研究及自钻式旁压试验数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (HAO Dong-xue. Study on cavity expansion theory and numerical analysis of self-boring pressuremeter test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [17] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [18] BRIAUD Jean-Louis. Predicted and measured behavior of five spread footings on sand[M]. USA: Jean-Louis Briaud, 1994.
- [19] ASTM_D_4719-00 Standard test method for prebored pressuremeter testing in soils[S]. 2000.