

CPTU 试验在土体动力学参数计算中的应用研究

李小雪, 彭祖武, 滕伟福

(中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为探讨孔压静力触探(CPTU)数据能否在土体动力学参数计算中进行应用, 结合港珠澳大桥补充勘察项目 CPTU 及波速测试资料, 利用 SPSS 和 OriginPro 软件对比分析前人研究成果, 提出了更适合于计算研究区波速(V_p 、 V_s)的经验拟合公式, 公式考虑了深度影响, 计算结果优于前人经验公式, 尤其是当土层埋深大于 30m 时。基于此, 对 CPTU 数据在土体动力学参数 E_d 、 G_d 及 μ_d 计算方面进行了对比分析研究, 提出了研究区土体动力学参数计算公式, 公式计算偏差均在可接受范围之内。同时发现土层深度及修正锥尖阻力的负指数形式在拟合土层纵、横波速 V_p 、 V_s 时具有重要意义。

关键词: 孔压静力触探; 土体动力学参数计算; 波速拟合; 对比分析

中图分类号: TU315.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)03-0084-05

孔压静力触探(CPTU)在土体原位测试方面, 已成功的进行了大量工程应用, 其实用性、简便性及经济性得到了工程界的认可。为充分挖掘 CPTU 数据的用途, 根据已有的成果, 前人总结了大量的经验拟合公式, 这些经验公式为工程建设带来了巨大的经济效益。在土体变形参数计算方面, 国内外都进行了大量的应用研究且取得了较大成果^[1-3], 国外有 Sanglerat (1976)^[2]、Lunne & Christophersen (1983)^[2]、Kulhawy & Mayne (1990)^[2]、Mayne & Rix (1993) 及 Robertson (2009)^[4] 等; 国内有同济大学、铁四院、辽宁煤矿院及武汉联合试验组^[3, 5-7] 等。在土体变形参数里, 土动力学参数(主要包括土体的动弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 、动泊松比 μ_d)的重要性越来越明显^[8]。本文依托港珠澳大桥补充勘察项目, 通过对同一土层进行原位孔压静力触探试验和波速测试试验, 对 CPTU 数据与土体动力参数作相关性分析, 得出适合于场地土体动力学参数计算的拟合公式。

1 试验概况

1.1 试验设备

本次孔压静力触探试验(CPTU)采用海床式静力触探系统, 由荷兰 Fugro 公司产的 Seacalf 设备完成。

Seacalf 系统有 4 只转轮, 可将探杆和套管夹住, 通过转轮的转动驱动探杆和套管以 2cm/s 的匀速率贯入, 其水下总重量接近 20t, 可提供 100kN 的贯入反力。所使用的探头是截面积为 15cm² 的三桥探头, 可以同时测量锥尖阻力 q_t 、侧摩阻力 f_s 以及孔隙水压力 u_2 。土体动力学参数由悬挂式 P-S 波速试验(图 1)计算得到, 其可以获得地层的压缩波速和剪切波速并计算出动弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 、动泊松比 μ_d 。

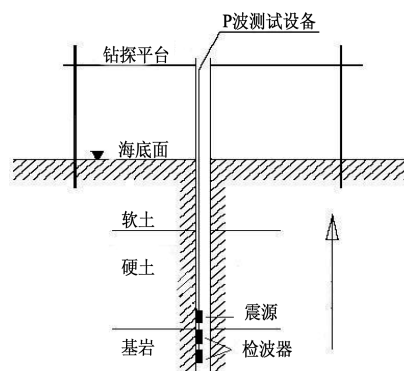


图 1 悬挂式 P 波波速试验示意图

Fig.1 Schematic diagram showing suspension P-wave velocity test

1.2 场地地层

试验场地位于珠江三角洲伶仃洋海域, 地层为海陆相沉积地层。试验所涉及的地层有(从上往下)共有 8 层, 各土层试验和计算参数见表 1。

2 数据处理及分析

2.1 数据选取

研究数据采自孔 GITB07、GITB12、GITB16、

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-10-08

作者简介: 李小雪(1987-), 女, 硕士研究生, 从事环境工程地质、地质灾害防治及岩土体原位测试研究。

通讯作者: 滕伟福(1963-), 男, 副教授, 从事环境工程地质、地质灾害评估与防治研究。

E-mail: tengwf@tom.com

表 1 土层试验和计算参数
Table 1 Soil testing and calculating parameters

层号	土层类别	h (m)	q_c (MPa)	f_s (kPa)	u_2 (kPa)	q_t (MPa)	R_f (%)	μ_d	G_d (MPa)	E_d (MPa)
11	淤泥—淤泥质土	7.8	0.27	6.77	195.05	0.35	2.14	0.496	27.3	81.7
21	粘土	11.8	1.05	31.81	370.47	1.2	2.6	0.492	73.26	218.47
31	粘土	18.7	1.47	32.29	1036.92	1.9	1.71	0.49	100.61	299.66
32	粘土夹砂	27.0	3	79.09	796.37	3.33	2.37	0.489	125.33	373.19
33	粉细砂	22.3	6.02	101.39	208.28	6.11	1.9	0.493	88.78	264.54
34	中砂	30.0	8.06	88.91	163.7	8.14	1.22	0.489	120.87	359.81
42	粉细砂	33.0	13.33	100.5	321.33	13.46	0.84	0.483	202.49	600.55
44	中砂	31.2	17.36	84.57	363.64	17.51	0.49	0.484	220.79	654.92

注:表中所使用的数据均为各土层统计平均值。

GITB21、GITB28 及 GITB31 等 6 个波速测试孔。另外,在波速测试孔孔位 5m 范围之内均有 CPTU 孔和钻探孔,充分保证了土层划分的可靠性及 CPTU 数据与波速测试数据进行对比研究的可行性。

2.2 数据相关性分析

以纵波波速 V_p 和横波波速 V_s 为横坐标,以孔深 h (基准点为水土接触面)、锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 、孔压 u_2 、修正侧壁摩阻力 q_t 和摩阻比 F_r 为纵坐标作散点图(图 2)。同时,利用 SPSS 软件对波速与各参数间进行 pearson 线性相关分析,结果见表 2。

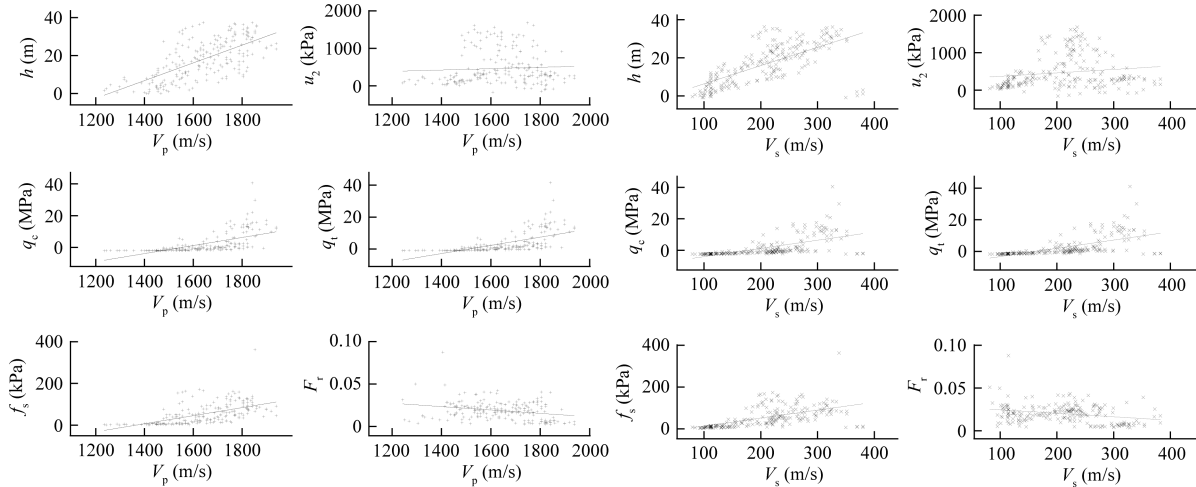


图 2 波速与 CPTU 试验参数散点图
Fig. 2 Correlation between wave velocities and CPTU parameters

表 2 波速与 CPTU 参数间 Pearson 相关性表 Table 2 Pearson correlation between wave velocities and CPTU parameters						
相关双变量	$V_s \sim h$	$V_s \sim q_c$	$V_s \sim q_t$	$V_s \sim f_s$	$V_s \sim u_2$	$V_s \sim F_r$
Pearson 相关系数	0.675	0.608	0.615	0.565	0.154	-0.281
相关双变量	$V_p \sim h$	$V_p \sim q_c$	$V_p \sim q_t$	$V_p \sim f_s$	$V_p \sim u_2$	$V_p \sim F_r$
Pearson 相关系数	0.674	0.612	0.617	0.588	0.062	-0.274

注:Pearson 相关系数表征的是变量间的线性相关程度

从图 2 及表 2 中可以看到, V_p (V_s) 与 q_t (q_c) 及 h 具有较好的相关性(线性系数均大于 0.6)。选取 V_p (V_s) 与 q_t 和 h 进行拟合分析,发现在所研究的深度内 ($h \leq 40\text{m}$) 较好的相关性(图 3),拟合公式如下:

以纵波波速 V_p 和横波波速 V_s 为横坐标,以孔深 h (基准点为水土接触面)、锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 、孔压 u_2 、修正侧壁摩阻力 q_t 和摩阻比 F_r 为纵坐标作散点图(图 2)。同时,利用 SPSS 软件对波速与各参数间进行 pearson 线性相关分析,结果见表 2。

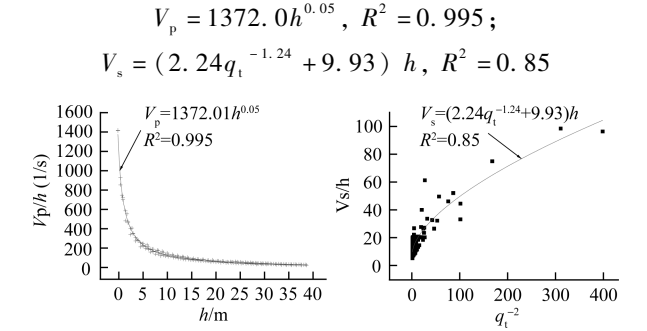


图 3 V_p 、 V_s 与 q_t 、 h 间拟合关系
Fig. 3 Fitting correlations of V_p , V_s , q_t and h

2.3 V_p 和 V_s 拟合方程在研究区适用性分析

2.3.1 V_s 拟合方程适用性分析

对于 V_s 的拟合,前人已做了大量的研究(表 3),

可以发现前人均未考虑深度的影响,拟合公式中也未出现 q_t 负指数形式。

表 3 波速计算经验公式^[1~7,9]

Table 3 Empirical formula of wave velocity calculation

评估方法	经验公式	来源	适用性
① - 1	$V_s = 277(q_t)^{0.13}(\sigma_{v0}')^{0.27}$	Baldi et al. (1989)	非胶结新近沉积砂层
① - 2	$V_s = 1.75(q_t)^{0.627}$	Mayne&Rix (1995)	粘性土层
②	$V_s = [10.1 \cdot \log q_t - 11.4]^{1.67} [f_s/q_t \cdot 100]^{0.3}$	Hegazy&Mayne (1995)	所有土层
③	$V_s = 118.8 \log(f_s) + 18.5$	Mayne (2006)	所有土层
④	$V_s = [10^{(0.55I_c+1.68)}(q_t - \sigma_{v0})/P_a]^{0.5}$	Robertson (2010)	非胶结的全新世~更新世土层

注: σ_{v0}' 为上覆有效土压力; I_c 为土体类型指标。

应用以上 4 种经验公式①、②、③、④及本文提出的拟合公式对 V_s 进行计算(图 4)。从图 4 中可以看到,较经验公式①、②、③、④计算结果,本文方法所计算平均值较好逼近了土层实测横波波速平均值,同时其计算均值变化趋势与土层实测波速均值(随深度或修正锥尖阻力)保持着很好的同步性和一致性。而其他 4 种经验公式所计算均值都与实测均值偏差较大,尤其在计算埋深达到(含超过)30m 或修正锥尖阻力大于 8MPa 土层的横波波速均值时,效果更差。前人研究的数据基本上来自埋深小于 30m 的土层^[10]。这表明,前人经验公式确实不适合埋深超过 30m 的土层参数计算。另外,在本研究区(土层埋深 $h \leq 40$ m) q_t 与 h 存在很好的函数关系,即 $q_t = 0.17e^{0.13h}$ ($R^2 = 0.90$);将 $h = 30$ m 代入,得 $q_t = 8.34$ MPa,再一次印证了前人经验公式不适用于埋深大于 30m 的土层。

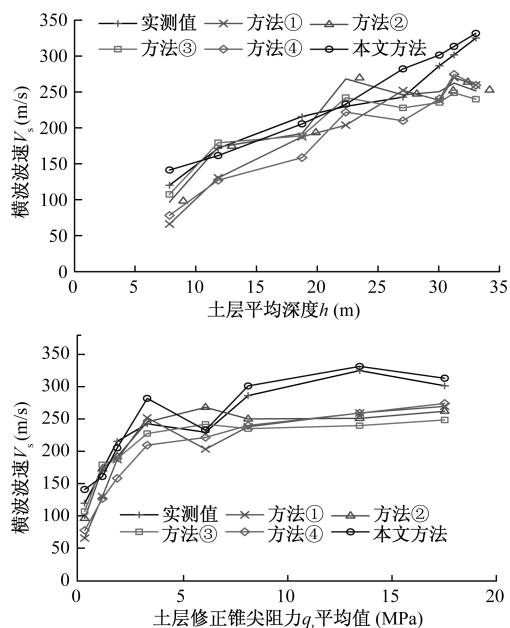


图 4 经验公式计算 V_s 值与实测 V_s 值之关系

Fig. 4 Relationship between empirical calculation values and measured V_s

从图 4 中还可以发现,本文考虑深度 h 的影响,效果较好,因为 h 影响着土体的密度和孔隙比,这些都对波速传播及其数值大小有着非常重要的影响。

2.3.2 V_p 拟合方程适用性分析

V_p 是计算土体动力学参数 E_d 、 G_d 及 μ_d 不可或缺的参数,据现有资料未发现利用 CPTU 数据拟合 V_p 的资料。本研究中,利用丰富的 CPTU 原位测试数据和波速测试数据拟合 $V_p = 1372.0h^{0.05}$,其相关系数 $R^2 = 0.995$ (图 3),拟合效果较好,而通过其他 CPTU 参数拟合 V_p 值均未能如此。分析认为土层中的许多参数,如土体密度、孔隙比、超固结比、土体刚度等,都与深度(即上覆土体自重)有一定关系。虽然 CPTU 所测参数如锥尖阻力 q_t 、侧摩阻力 f_s 以及孔隙水压力 u_2 也与这些因素或多或少有着关联,但这些参数本身就受深度(即上覆土体自重)的影响,所以深度综合了更多的影响效果,这也解释了为什么单纯考虑深度 h 的影响就能达到较好的拟合效果的问题。

另外,本文公式计算的纵波波速值 V_p 残差与实测值之比最小不超过 -10%,最大不超过 2%,误差是可以接受的。

3 土体动力学参数计算

利用静力触探数据来计算土体动力学参数 E_d 、 G_d 及 μ_d ,也属于一种新的尝试。前人工作大部分只涉及到运用静力触探数据来计算土体静力学变形参数研究。如 Mayne 和 Rix (1993)^[6] 提出评估粘性土 G_0 的经验公式、Robertson (2009)^[4] 提出了评估新近沉积非胶结石英砂弹性模量 E 的公式。本研究结合项目中 6 个钻孔的 CPTU 数据,将上述不同经验公式(方法①、②、③、④及本文方法)所计算的波速值代入动力学参数计算公式进行计算(因 V_p 值计算的公式不多,同时本文所拟合的 V_p 计算公式拟合度非常高,所以计算中全部采用该公式计算 V_p):

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$$

$$G_d = \rho V_s^2$$

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

通过经验公式计算所得的土体动力学参数值与经波速测试实测值计算的 E_d 、 G_d 及 μ_d 值随土体埋深及修正锥尖阻力变化关系见图 5。

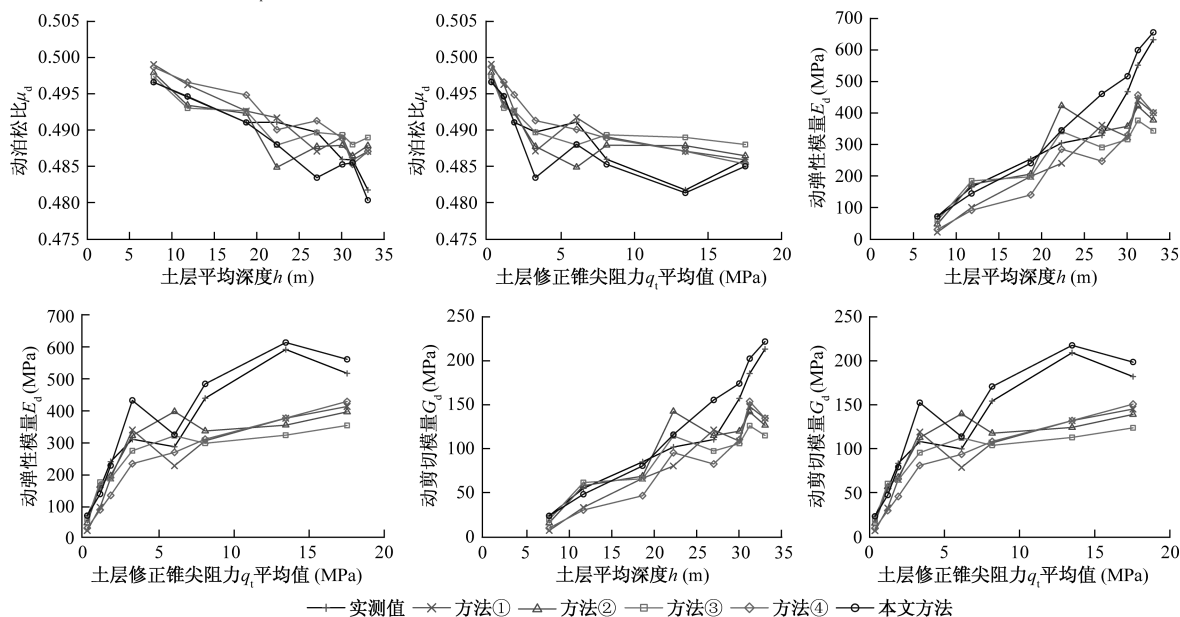


图 5 用经验公式计算的 μ_d 、 E_d 、 G_d 值与用实测数据计算的 μ_d 、 E_d 、 G_d 值间关系图

Fig. 5 Relationship between empirical formula calculation μ_d , E_d , G_d and measured μ_d , E_d , G_d

从图 5 中可以看到,利用经验公式及本文提出的方法来估算土体动力学参数值是可行的;而且较经验公式①、②、③、④,本文方法计算值与用实测数据所计算值符合较好;其计算的 μ_d 值与实测数据计算值偏差小于 $\pm 1.1\%$, E_d 偏差小于 $\pm 30\%$, G_d 值偏差小于 $\pm 35\%$,计算结果可以接受。同时,当土层埋深大于 30m 或修正锥尖阻力大于 8MPa 时,其他计算公式较本文方法所得偏差均较大,这不仅再次说明了前人经验公式的局限性(因其所用数据基本上来自埋深小于 30m 的土层^[10]),也证明了考虑深度 h 的重要性。因此,建议本研究区采用下列公式计算土体动力学参数值:

$$E'_d = \frac{\rho V_s'^2 (3V_p'^2 - 4V_s'^2)}{V_p'^2 - V_s'^2}, G'_d = \rho V_s'^2,$$

$$\mu'_d = \frac{V_p'^2 - 2V_s'^2}{2(V_p'^2 - V_s'^2)}$$

式中: ρ ——土体干密度, kg/cm^3 ;

$V_p' = 1372.01h^{0.05}$, 为经验公式计算纵波波速值, m/s ;

$V_s' = (2.24q_t^{-1.24} + 9.93)h$, 为经验公式计算横波波速值, m/s ;

q_t ——修正锥尖阻力, MPa ;

h ——土体深度, m 。

4 结论及建议

(1)深度 h 值在计算纵、横波波速值时具有重要的意义。考虑深度进行拟合波速值的效果优于前人提出的计算横波波速值的经验公式,尤其是纵波波速值的拟合效果较好,相关系数平方达到 0.995。

(2)提出了适合研究区的纵、横波波速值计算公式,可以将其应用于场地土层动力学参数计算,并提出了研究区土层动力学参数计算公式。

(3)前人经验公式所用数据均来自埋深小于 30m 的土层,在计算埋深大于或等于 30m 的土层时,具有很大的局限性。

(4)与前人研究成果对比发现,深度 h 和修正锥尖阻力 q_t 负指数形式对研究区波速拟合具有重要的意义,建议在进行相关研究时加以考虑。

参考文献:

- [1] Sanglerat G. The penetrometer and soil exploration.

- Interpretation of penetration diagrams-theory and practice. [M]. Amsterdam: Elsevier Pub. Co., 1972: 464.
- [2] U S Department Of Trasportation Federal Highway Administrator. The Cone Penetration test [M]. Publication NO FHWA-SA-91-04, 1992.
- [3] 孟高头. 土体原位测试机理方法及其工程应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 6-53. [MENG G T. Mechanism, Method & Engineering Application of in Situ Test [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 6-53. (in Chinese)]
- [4] P K Robertson. Interpretation of cone penetration test-a unified approach[J]. Can. Geotech. J., 2009, 46: 1337-1355.
- [5] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册[M]. 3 版. 北京: 中工业出版社国建筑, 1992: 246-268. [Engineering Geology Handbook Compile Committee. Engineering Geology Handbook [M]. 3rd Ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992: 246-268. (in Chinese)]
- [6] 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, 26(4): 553-556. [LIU S Y, WU Y K. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 553-556. (in Chinese)]
- [7] 唐贤强, 谢瑛, 谢树彤, 等. 地基工程原位测试技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993: 1-191. [TANG X Q, XIE Y, XIE S T, *et al.* Technology in Situ Test of Foundation Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993: 1-191. (in Chinese)]
- [8] 谢定义. 土动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 172-182. [XIE D Y. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 172-182. (in Chinese)]
- [9] Lunne T R P. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice [M]. London, UK: Blackie Academic and Professional, 1997.
- [10] P K Robertson. Soil classification using the cone penetration test [J]. Can. Geotech. J., 1990, 27: 151-158.

Analyses of calculating soil kinetic parameters with CPTU testing

LI Xiao-xue, PENG Zu-wu, TENG Wei-fu

(China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to discuss whether the CPTU data can be used in soil kinetic parameters computation, the SPSS and OriginPro software are applied to comparatively analyze previous research results and proposed a more suitable formula for calculating the wave velocities (V_p and V_s) of the study area, on the basis of CPTU data and wave velocity testing data of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge supplementary investigation project. Depth is considered in the formula that is proposed in the article. The results show that the formula is superior to precursors' empire formulas, especially when buried depth is greater than 30m of soil mass. The calculations of soil kinetic parameters E_d , G_d and μ_d are comparatively analyzed. A formula for calculating the soil kinetic parameters in the study area is proposed and the calculation deviation can be tolerated. The results show that calculating soil kinetic parameters with CPTU data are feasible and calculating effects of the method proposed in this article is the best. Meanwhile, it is found that soil depth and correction static point resistance's negative-index form play an important role in fitting P-wave velocity V_p and shear wave velocity V_s .

Key words: CPTU; soil kinetic parameters calculation; wave velocity fitting; comparative analysis

责任编辑: 张明霞