

大直径扩底灌注桩的沉降计算方法修正

高 盟^{1,2}, 晁明颂^{1,2}, 张继严^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要:基于压缩模量随深度而增大的事实,取土体微单元进行受力分析,引入深度对压缩模量的影响,建立室内压缩模量与变形模量的关系,代入扩底桩沉降计算公式,得出扩底桩沉降计算修正公式,用于工程实例的沉降计算。与修正前的沉降计算公式相比,修正公式所得结果与工程实测沉降更吻合。数值计算结果也表明,考虑压缩模量深度效应的计算结果与实测结果更接近。说明提出的扩底桩沉降计算修正公式更合理、适用。

关键词:扩底灌注桩;深度效应;压缩模量;沉降;计算方法

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2017)03-0057-06

A Modified Settlement Calculation Method of Large-diameter Belled Cast-in-place Piles

GAO Meng^{1,2}, CHAO Mingsong^{1,2}, ZHANG Jiyuan^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of
Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the fact that the compression modulus increases with depth, the existing settlement calculation formula of large-diameter belled cast-in-place piles was modified. The relationship between compression modulus and deformation modulus was established by taking the differential element of soil for stress analysis and introducing the effect of depth on compression modulus. By substituting it into the existing settlement calculation formula, a modified settlement calculation formula was obtained and was applied to the calculation of engineering project. Compared with the existing settlement calculation formula, the results of the modified settlement calculation model showed great agreement with the settlement in an actual project engineering. Numerical results also show that the settlement value considering depth effect of compression modulus is more consistent with the measured results, suggesting that the modified settlement calculation method of is more reasonable and applicable.

Key words: enlarged base filling pile; depth effect; compression modulus; settlement; calculation method

研究^[1-4]表明,大直径扩底桩的沉降变形机理、承载能力、破坏形状等与等直桩有很大差异。因此构建一种适用于大直径扩底桩的沉降计算方法,具有重要工程意义。扩底桩等深基础的沉降计算通常基于 Mindlin 基本解进行解答,而变形模量决定了计算结果的准确性。顾宝和^[5]提出桩端土体的变形模量可采用深层平板载荷试验测求。若对所有的桩都进行深层载荷试验,费时久、工作量大,不易实现。高盟等^[6]根据扩底桩的具体工程实例,建立室内土工试验压缩模量与计算变形模量的关系,并基于 Mindlin 基本解给出扩底桩的沉降公式。然而对于荷载水平较高、变形计算深度较深的高层、超高层建筑而言,室内土工试验所

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: 山东科技大学科研创新团队项目(2015KYTD104)

作者简介: 高 盟(1974—),男,山东临沂人,副教授,主要从事岩土动力学及桩基工程学的研究。E-mail: mega2328@hotmail.com

确定的压缩模量偏小^[7], 容易引起较大误差。另外, 室内土工试验操作过程中造成的有效应力损失也会进一步增大误差。为此, 董炳炎等^[8]提出压缩模量补偿系数, 以弥补有效应力损失, 但压缩模量值仍然是定值。事实上, 压缩模量在竖直方向是不断变化的, 其值应随深度增大而增大。周翠英等^[9]对工程中的淤泥质土进行室内固结实验, 得出压缩模量会随压力和时间的增加而增大, 并给出相应的微观解释。陈仁朋^[10]结合实际工程, 建立了压缩模量与土体自重应力函数关系; 陈福江等^[11]运用神经网络对试验和现场测试数据进行反演分析, 建立了压缩模量与土层深度的公式。

上述确定压缩模量的理论和方法都是通过实际工程或数据拟合得出的, 缺乏工程实用性。本研究首先基于压缩模量与自重应力的关系, 对室内压缩模量进行修正。对土微单元体进行受力分析, 将桩端上部荷载考虑在内, 建立了压缩模量与变形模量之间的关系; 根据具体的工程实例, 对修正后的扩底桩沉降计算方法进行验证。

1 压缩模量的修正

通常通过室内固结试验得出 $e \sim p$ ($e \sim \lg p$) 压缩曲线, 然后取某一压力段 (通常为 0.1~0.2 MPa) 的曲线来确定压缩模量:

$$E_s = \frac{\Delta P}{(e_1 - e_2)/(1 + e_1)} = \frac{1 + e_1}{a}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\Delta e}{\Delta P} = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} \\ C_c &= \frac{\Delta e}{\lg P_2 - \lg P_1} \end{aligned} \right\} \circ \quad (2)$$

式中: a 为压缩系数, C_c 为压缩指数, P_1 为地基土某深度处土中竖向自重应力, P_2 为地基土某深度处土中竖向自重应力与附加应力之和, e_1, e_2 为相应的孔隙比。

式(1)广泛适用于岩土工程领域, 但由于土体具有压硬性, 随着深度的增加, 压缩模量会逐渐增大, 式(1)所计算的压缩模量与实际情况偏差较大。因此需考虑固结压力的影响^[12], 建立修正公式:

$$E_s = 2.3 \frac{1 + e_1}{C_{c0.1-0.2}} P_1 \circ \quad (3)$$

在 0.1~0.2 MPa 的压力段, 联立式(2)可得:

$$C_{c0.1-0.2} = \frac{0.1a_{0.1-0.2}}{\lg 2} \circ \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)有:

$$E_s = \alpha E_{s0.1-0.2} \circ \quad (5)$$

式中: $\alpha = 6.93P_1$; $P_1 = \gamma_G h$; γ_G 为桩与桩周土的平均重度; h 为桩顶到计算点深度。

2 弹性模量及沉降公式的求解

现从土中取一微单元体(图 1)进行分析。

x, y, z 坐标方向的应变为:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu \frac{\sigma_z}{E_z}, \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu \frac{\sigma_z}{E_z}, \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E_z} - \mu \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu \frac{\sigma_x}{E_x} \circ \end{aligned} \quad (6)$$

式中: μ 为泊松比。 $E_x, E_y, E_z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 x, y, z 方向的变形模量和应力。

根据体应变公式 $\theta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$, 有

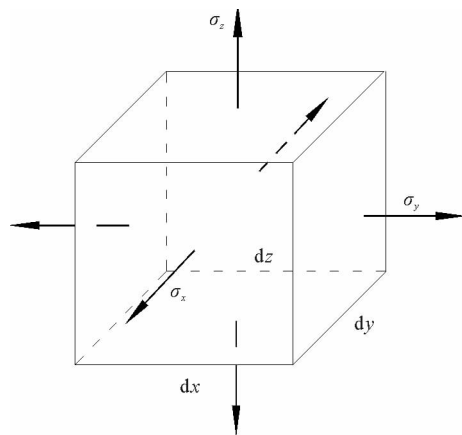


图 1 土微单元体

Fig. 1 Differential element of soil

$$\frac{1-2\mu}{E_x}\sigma_x + \frac{1-2\mu}{E_y}\sigma_y + \frac{1-2\mu}{E_z}\sigma_z = \theta \quad (7)$$

将 $\sigma_x = K_0\sigma_z$ 代入式(7)得

$$(1-2\mu)K_0\sigma_z\left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y}\right) + \frac{1-2\mu}{E_z}\sigma_z = \theta \quad (8)$$

体应变与体积的乘积即为体积改变量,可得

$$\theta(1+e_1) = \Delta e \quad (9)$$

将式(1)代入式(9)有

$$\theta = \Delta P/E_s \quad (10)$$

室内固结试验在侧限条件下完成,故联立侧限条件 $\epsilon_z = \sigma_z/E_s$ 和式(6)第三式可得

$$\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} = \frac{E_s - E_z}{\mu k_0 E_s E_z} \quad (11)$$

将式(10)~(11)代入式(8),并化简可得

$$E_z = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)\sigma_z E_s}{(1-2\mu)\sigma_z + P_1 \mu} \quad (12)$$

其中: σ_z 为桩端总均布压力, $\sigma_z = q + P_1$, q 为上部荷载在桩端处的均布荷载, P_1 为桩与扩大端直径范围内桩周土的平均自重应力 $P_1 = \gamma_c h$,为使符号统一将 E_z 改写为 E_0 。

令 $\beta = (1+\mu)(1-2\mu) / ((1-2\mu) + \mu P_1 / \sigma_z)$,结合式(5)得变形模量与室内压缩模量的关系为

$$E_0 = \alpha \beta \cdot E_{s0.1-0.2} \quad (13)$$

扩底桩基础作用在地基内部的是均布荷载,无法直接应用 Mindlin 解,可通过对均布荷载取微分,等效为集中力,然后积分,最后得出了扩底桩桩端沉降公式^[6]:

$$w_z = I_p q a / E_0 \quad (14)$$

式中: q 为均布荷载, a 为扩底桩半径,

$$I_p = \frac{1+\mu}{4(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu a}{\sqrt{a^2+(z-h)^2+(z-h)}} + \frac{(z-h)a}{\sqrt{a^2+(z-h)^2} [\sqrt{a^2+(z-h)^2+(z-h)}} \right] + \frac{(5-12\mu+8\mu^2)a}{\sqrt{a^2+(z+h)^2+(z+h)}} + \frac{[(3-4\mu)(z+h)^2-2hz]a}{(z+h)\sqrt{a^2+(z+h)^2} [\sqrt{a^2+(z+h)^2+(z+h)}} + \frac{2hz\{[a^2+(z+h)^2]^2 + [a^2+(z+h)^2](z+h)^2 + (z+h)^4\}a}{(z+h)[a^2+(z+h)^2]^{3/2} \cdot \{[a^2+(z+h)^2]^{3/2} + (z+h)^3\}}$$

3 实例分析

3.1 工程实例 1^[6]

合肥炮兵学院研究生楼为 15 层的框架剪力墙结构,位于南淝河 II 级阶地处,原地貌是坳沟与水塘,场地共分 7 层。上部土层主要为淤泥质土和软土层,不可作为持力层,坚硬状态的黏土层可作为持力层,但分布较深。从造价上考虑,对软土层换填垫层的费用要高于桩基,因此采用后者。扩底桩和土体的材料参数如表 1 所示,对 61 号桩的沉降观测结果如表 2 所示。

表 1 相关参数

Tab. 1 Related parameters

桩身重度/ (kN/m ³)	桩身长度 /m	桩身直径 /m	扩底直径 /m	扩大端 高度/m	土体重度/ (kN/m ³)	土体 泊松比
24	13.01	1.2	2.4	2	19.7	0.3
土体压缩 模量/MPa	单桩荷载 /kN	平均重度/ (kN/m ³)	α	β	I_p	
16	2 200	21.27	1.92	1.025	0.625	

表 2 61# 桩沉降观测结果

Tab. 2 Observed settlements of pile No. 61

时间	2005-05-29	2005-06-03	2005-06-15	2006-06-22	2005-07-10	2005-07-18	2005-09-02	2005-10-10	2005-12-10	2006-03-10
工程进度	四层顶	五层顶	七层顶	九层顶	十三层顶	十五层顶	填充墙砌筑结束	竣工	竣工后两个月	竣工后五个月
观测值/m	1.495 7	1.478 5	1.478 5	1.478 5	1.474 5	1.478 5	1.473 5	1.471 5	1.469 0	1.469 0
变化量/mm	—	1.0	0	0	4.0	0	1.0	2.0	2.5	0
累计/mm	—	1.0	1.0	1.0	5.0	5.0	6.0	8.0	10.5	10.5

经计算,最终沉降量 $s=10.74$ mm,与观测的沉降结果 10.5 mm 相比,误差仅为 2.3%,说明提出的沉降计算方法是合理的。

3.2 工程实例 2^[6]

考虑到扩底桩的单桩承载力较高,国家机械委四院情报楼亦采用大直径扩底桩基础。经勘察,该场区土层共分 6 层,选择黄土状粉土层为持力层。具体岩土工程地质以及扩底桩分布情况如图 2 所示。

根据场地条件,该场地共布设 10 个沉降观测点。现从已有的沉降观测结果中选择三个测点(6 号、8 号、10 号测点)进行计算对比。以 3 号孔(10 号测点)为例对桩基础的沉降计算。扩大端半径 $a=1.6$ m, $I_p=0.639$, $q=485.8$ kPa, $\gamma_G=20$ kN/m³, $E_s=11.2$ MPa, 泊松比 $\mu=0.35$, 系数 $\alpha=2.01$, $\beta=0.94$ 。将数据代入沉降公式(14),可求出该扩底桩最终沉降量 $s=23.5$ mm。将观测点的计算结果,文献[6]的计算结果以及实测值统计于表 3,进行对比分析。

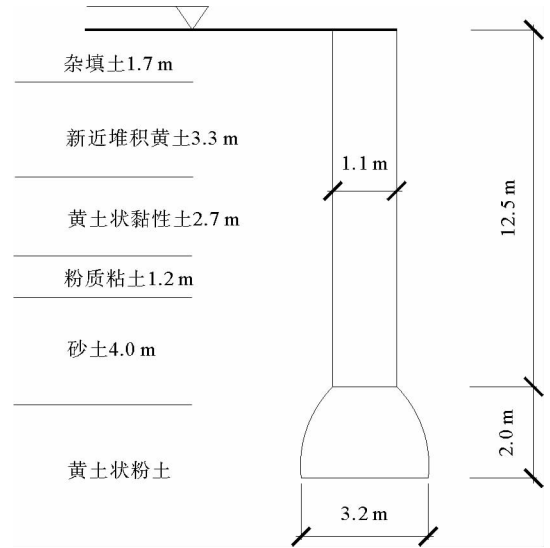


图 2 各土层分布

Fig. 2 Section of soil strata

表 3 沉降实测与计算值对比

Tab. 3 Comparison between measured and calculated settlements

观测点号	桩身直径 /m	桩身长度 /m	扩底直径 D/m	单桩荷载 /kN	实测沉降 /mm	文献[6] 计算值/mm	本文 计算值/mm	文献[6] 误差/%	本文 误差/%
6	0.8	13.6	2.1	1 500	12.4	17.2	13.0	38.71	4.83
8	1.0	14.5	2.7	2 600	19.5	20.5	17.7	5.13	9.23
10	1.1	14.5	3.2	4 020	24.1	30.8	23.5	27.80	2.50

由对比分析可知,提出的沉降计算值比文献[6]所提出的沉降计算值更吻合于实测值。文献[6]的最大计算误差为 38.71%,而本文的最大计算误差为 9.23%,平均误差为 5.52%。由此可见,考虑深度影响而对变形模量的修正可大大减小误差。

3.3 数值计算

为进一步验证扩底桩沉降计算方法的准确性,建立 FLAC^{3D}模型,对国家机械委四院情报楼 3 号桩扩底桩进行 2 次数值模拟计算。计算 1 中按本文的方法考虑土体压缩模量 E_s 的深度效应,计算 2 不考虑土体压

缩模量 E_s 的深度效应。土体采用 Mohr-Coulomb 模型, 桩体采用线弹性模型。土体单元: 泊松比 $\mu=0.35$, 摩擦角 $\varphi=12^\circ$, 容重 $\gamma=17.8 \text{ kN/m}^3$, 内聚力 $c=10 \text{ kPa}$, 压缩模量 $E_{s,0.1-0.2}=11.2 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E_0=a\beta E_{s,0.1-0.2}$ 。桩体单元: $\mu_p=0.2, \rho=2500 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E_p=3.15 \times 10^4 \text{ MPa}$, 扩大端直径 $D=3.2 \text{ m}$, 桩身直径 $d=1.1 \text{ m}$, 扩底高度 $h_0=2.0 \text{ m}$, 桩体总长度 $h=14.5 \text{ m}$ 。计算范围取 6 倍扩大端直径, 即 $18 \text{ m} \times 18 \text{ m}$; 计算深度 34.5 m , 持力层取 $2.5D$, 即 8 m , 下卧层 12 m 。考虑对称性, 取 $1/4$ 模型计算, 模型如图 3。

两次数值计算结果与实测沉降的对比如图 4 所示。由图可知, 由于数值计算 1 中考虑了土体压缩模量的深度效应, 计算结果更接近实测沉降。说明考虑土体压缩模量 E_s 深度效应的扩底桩沉降计算方法更合理、适用。

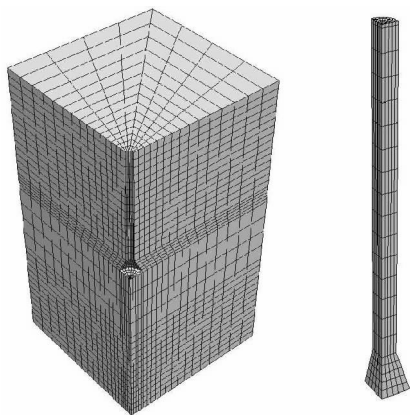


图 3 数值模拟分析模型

Fig. 3 Numerical simulation analysis model

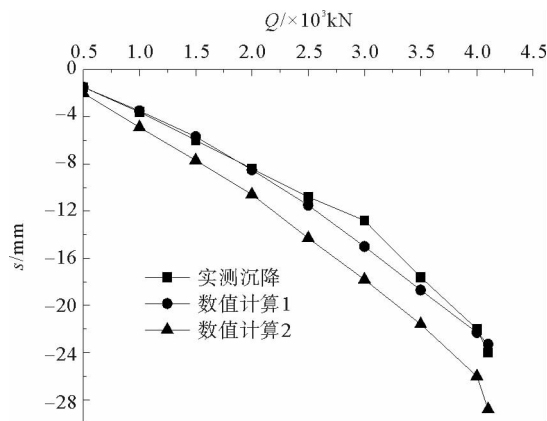


图 4 沉降曲线

Fig. 4 Settlement curves

4 结论

考虑压缩模量的深度效应, 在已有的扩底桩沉降计算公式的基础上, 推导出扩底桩沉降计算修正公式。扩底桩的工程实例表明, 提出的扩底桩沉降计算修正公式的计算结果与实测沉降数据吻合更好; FLAC^{3D} 的数值计算结果也说明, 考虑压缩模量深度效应的计算结果更接近实测沉降值, 提出的扩底桩沉降计算修正公式更适用于实际工程。

参考文献:

- [1] 高广运, 蒋建平, 顾宝和. 同场地扩底桩和直桩的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 502-506.
GAO Guangyun, JIANG Jianping, GU Baohe. Comparative study on belled and equal-diameter piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 502-506.
- [2] 张蕾, 高广运, 高盟. 一种确定大直径扩底桩地基土变形模量的方法[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增2): 285-291.
ZHANG Lei, GAO Guangyun, GAO Meng. A method of determining the deformation modulus of large diameter belled pile [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S2): 285-291.
- [3] 黄广龙, 惠刚, 梅国雄. 钻孔扩底桩原型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1922-1926.
HUANG Guanglong, HUI Gang, MEI Guoxiong. Comparative experiment study on pedestal piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1922-1926.
- [4] 高广运, 蒋建平, 顾宝和. 砂卵石层上大直径扩底短墩竖向承载性状[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 359-362.
GAO Guangyun, JIANG Jianping, GU Baohe. Vertical bearing behavior of large diameter short-belled pier in sand-cobble layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 359-362.
- [5] 顾宝和. 根据变形确定扩底墩的轴向承载力[C]// 第三届工程勘察学术交流会议. 北京, 1987: 1-5.
- [6] 高盟, 高广运, 顾宝和. 一种大直径扩底桩的沉降计算实用方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1448-1452.
GAO Meng, GAO Guangyun, GU Baohe. Practical method for settlement calculation of large-diameter belled piles[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1448-1452.

- [7] 孙训海, 雷晓雨, 佟建兴. 土层压缩模量的选取对地基变形计算的影响[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 40-43.
SUN Xunhai, LEI Xiaoyu, TONG Jianxin. Effect of modulus selection on the deformation of foundation soil[J]. Building Science, 2010, 26(9): 40-43.
- [8] 董炳炎, 甘德福. 论上海软土地基⑦⑧⑨层压缩模量 E_s 的定值问题[J]. 水文地质工程地质, 2003(4): 59-62.
DONG Bingyan, GAN Defu. Value determination problem of compressive modulus E_s of soil layers ⑦, ⑧ and ⑨ in Shanghai soft soil foundation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003(4): 59-62.
- [9] 周翠英, 林春秀, 林鲁生. 外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2040-2044.
ZHOU Cuiying, LIN Chunxiu, LIN Lusheng. Research on dynamic evolution law of compression modulus of soft clay under external loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2040-2044.
- [10] 陈仁朋. 软弱地基中桩筏基础工作性状及分析设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [11] 陈福江, 马建林, 朱林. 考虑压缩模量深度效应的深厚软土桩基沉降计算[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 167-172.
CHEN Fujiang, MA Jianlin, ZHU Lin. Settlement calculation of pile foundation in deep-soft soil considering depth effect of compression modulus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 167-172.
- [12] 梅国雄, 宰金珉, 赵维炳. 土体侧限压缩模量简易计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1057-1059.
MEI Guoxiong, ZAI Jinmin, ZHAO Weibing. A simplified calculation method of oedometric modulus of soil and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1057-1059.

(责任编辑: 吕海亮)

(上接第 49 页)

- [4] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1557-1565.
SHI Danda, ZHOU Jian, LIU Wenbai, et al. Exploring macro- and micro-scale responses of sand in direct shear tests by numerical simulations using non-circular particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1557-1565.
- [5] 蒋明镜, 王富周, 朱合华, 等. 松砂直剪试验中的经典与非经典场量数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 960-965.
JIANG Mingjing, WANG Fuzhou, ZHU Hehua, et al. Classical and non-classical variables analysis of loose sand in direct shear test by discrete element method analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 960-965.
- [6] 路德春, 程星磊, 杜修力. 部分排水条件下饱和砂的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2263-2269.
LU Dechun, CHENG Xinglei, DU Xiuli. Mechanical properties of saturated sand under partial drainage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2263-2269.
- [7] 陈立平, 张顶立, 房倩, 等. 基于细观统计的砂土摩擦特性与破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3471-3478.
CHEN Liping, ZHANG Dingli, FANG Qian. Research on friction characteristics and failure mechanism of anisotropic sand based on micro-statistics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3471-3478.
- [8] 冯磊. 青岛黄海海砂的力学性质试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2013.
- [9] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密度对砂土强度特性影响的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 1671-1775.
XU Riqing, WANG Xingchen, ZHU Jianfeng, et al. Experiment of initial relative density effects on sand strength[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 1671-1775.

(责任编辑: 吕海亮)