



土与结构物半模直剪试验的颗粒流数值模拟*

杜强, 刘文白

(上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 201306)

摘要: 使用自主改造的半模直剪仪进行土与钢板、石板的半模直剪试验, 竖向荷载分级施加, 分别为50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa。应用颗粒流离散元程序——PFC2D对土与结构物在不同法向应力条件下相互作用的半模直剪试验进行数值模拟, 研究土与结构物相互作用时接触面土体变形及剪应力的变化情况。分析得出土与结构物相互作用时, 土体会呈现出硬化现象。随着法向应力的增加, 土的剪应力会升高。在土与结构物的接触面上, 形成了一定厚度的剪切带, 说明土与结构物的相互作用并不只局限于接触面, 而对接触面以上一定厚度内的土体也有影响, 但影响范围不大, 约为5倍的粒径。土与结构物相互作用时, 结构物的性质对土体剪应力的变化影响不大。

关键词: 土与结构物;半模直剪试验;PFC2D数值模拟

中图分类号: O 346;TB 114

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0160-06

Particle flow code numerical simulation of half mould direct shear test between soil and structure

DU Qiang, LIU Wen-bai

(College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Using self-developed half mould direct shear apparatus, this paper carries out the direct shear test between soil and steel or stone. Different vertical load varies from 50kPa to 200 kPa. Through numerical simulation of shear test of soil and structure under different conditions of stress via PFC2D, this paper studies the shear stress variation and deformation of soil at the interface with the structure. It is concluded that strain softening occurs to soil in the process of shear and the shear stress of soil which rises as vertical stress grows. Shear zone of some thickness appears at the interface when soil and structure interact with each other, which means that the interaction zone covers not only the contact surface but also the soil off the surface to some extent, the range of action in soil extents 5 times' particle size away from the interface. The surface roughness of structure imposes slight effects upon the change of shear stress.

Key words: soil and structure; half mould direct shear test; PFC2D numerical simulation

结构物与土体之间相互作用的问题一直是岩土工程界研究的重要课题。正确地分析接触面上的受力变形机理和剪切破坏的发展, 是至关重要的。目前研究接触面力学特性的常用试验主要是直剪试验。直剪试验是通过将直剪仪的下盒填放

结构材料或者直接换成结构面材料, 施加水平剪应力, 来量测上下盒相对位移, 建立剪切应力应变关系, 反映接触面的力学特征的。Potyondy^[1]利用应力控制式和应变控制式直剪仪研究了多种土料与结构物材料接触面的力学特性。Clough^[2]等利

收稿日期: 2012-04-28

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51078228), 上海海事大学科研项目(20110005), 上海海事大学校级重点学科建设项目(20100010), 海洋公益性行业科研专项经费项目(201105024-5), 上海海事大学研究生创新基金项目(yc2011016)

作者简介: 杜强(1987-), 男, 硕士, 主要研究方向为港口海岸及近海工程结构与岩土工程。

用直剪试验研究土与混凝土接触面的力学特性, 认为接触面剪应力与相对剪切位移为双曲线关系。卢廷浩^[3]对土与结构接触界面改进直剪试验进行研究, 总结了土与结构接触面力学特性的研究现状, 并作出展望^[4]。殷宗泽^[5]等进行了土与混凝土接触面的大尺寸试样直剪试验, 通过埋设在混凝土试样中的微型“潜望镜”装置直接观察相对位移沿接触面的分布, 并提出了刚塑性变形观点和一种有厚度的接触面单元。张嘎等^[6-7]使用大型土与结构接触面循环加载剪切仪, 对粗粒土与人工粗糙钢板接触面在单调荷载作用下的力学特性进行了较系统的试验研究。李邵军等^[8]对土与结构相互作用的可视化剪切试验装置进行了研制及应用。李登华等^[9]研制了土与结构接触面试验仪, 并应用该仪器对土与混凝土结构接触面力学特性进行了试验研究。袁运涛等^[10]对土与结构界面位移特性静动力单剪试验进行了研究。胡黎明^[11]利用改进的直剪仪进行了砂土与结构物的接触面剪切试验, 研究了不同接触面相对粗糙度对接触面物理力学性质的影响和变形机理。普通直剪试验的细观和微观分析未展开深入研究, 直剪试验是封闭性试验, 观测土体内部结构变化困难。针对土体内部观测面的分析技术和分析方法欠缺, 采用自主改进的半模直剪仪解决了土体内部剪切面的观测问题^[12]。针对这样的土与结构物相互作用的剪切试验, 应用颗粒流程序数值模拟进行变形及应力分析。

细观力学的颗粒流程序PFC2D, 是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用。周健等应用颗粒流程序数值模拟研究了砂土的工程力学性质^[13-15]。本文通过PFC2D数值模拟土与结构物在不同条件作用下的剪切试验, 分析土与结构物接触面土体的变形及剪应力变化情况。为进一步研究土与结构物的相互作用提供理论依据。

1 试验

1.1 试验设备及土的性质

试验设备(图1,2)的试样盒为半径为3.09 cm的半圆形, 分上、下两部分。试样盒上盒装土样并固定, 下盒填充钢板或石板后, 放在钢珠上, 可以在水平方向滑动。试验设备的其余部分包括: 百分表(用以量测水平位移变形)、加

荷框架(采用杠杆传动的加荷方法, 杠杆比为1:10)、推动座、测力计(亦称应力环)等。

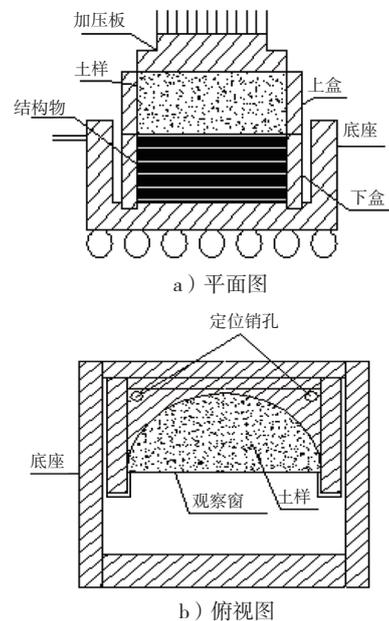


图1 半模直剪试验仪



图2 半模直剪试验仪

1.2 试验步骤

土与结构物半模直剪试验采用等速剪应变, 当剪应力量力环中的表针不再增大, 认为试样已剪切破坏, 测定其相应的剪应力。试验时, 采用杠杆系统通过加压活塞对试验施加某一级垂直压力 P , 然后等速推动下盒, 水平(推力) T 则由轮轴推动的下盒施加给砂样, 在施加每一级法向应力后, 逐步增加剪切面上的剪应力, 使试验在沿上下盒之间的水平面上受剪直到破坏, 水平剪力 T 大小可借助与上盒接触的量力环测定, 剪切变形由百分表测定, 若 A 为试验剪切面的面积, 则法向应力 $\sigma = \frac{P}{A}$, 剪应力 $\tau = \frac{T}{A}$ 。

具体试验步骤如下：1) 砂样选择标准砂，采用中砂，粒径级配数据见表1；2) 进行半环刀切土夯实，取出试验砂样；3) 在下盒安装结构物（钢板、石板）；4) 在上盒进行砂样的半模直剪试验安装；5) 垂直荷载的加荷，分级采用 $\sigma=50$ kPa, $\sigma=100$ kPa, $\sigma=150$ kPa, $\sigma=200$ kPa的压力；6) 等速水平加荷，进行半模直剪试验；7) 量力环数据的读数，剪应力的计算。

表1 试验砂样基本物理性质

D_{50}/mm	$\rho_s/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	C_u	C_c	e_{\max}	e_{\min}	$\phi_r / (^\circ)$
0.76	1.72	1.4	0.92	1.024	0.766	33.5

2 数值模拟

2.1 数值模拟模型的建立

利用颗粒流程序PFC2D，以4道刚性墙体分别来模拟结构物（钢板、石板）和试样盒，并使顶部的墙体以一定速率向下移动来实现施加荷载；以具有一定刚度和粗糙度的圆盘来模拟土颗粒；对不同应力条件下土与结构物剪切作用破坏时土颗粒的分布变化情况、速度场和位移场进行分析。

首先定义4道墙体。其中，顶部墙体可以在竖直方向上下移动，模拟法向加载板；侧面的两道墙体不移动，模拟试样盒上盒。底面墙具有一定的粗糙度，并可以在水平方向以一定的速率运动，用来模拟结构物（钢板或石板）。同时，底面墙体的宽度要比土样的宽度略大，以保证在剪切过程中剪切面积保持不变。墙体的刚度都很大，模拟刚性加载。土与结构物剪切作用试验模

型见图3。

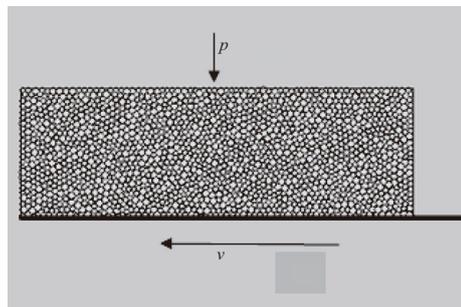


图3 土与结构物剪切作用试验模型

然后在墙体范围内生成颗粒，土颗粒由单位厚度的圆盘模拟，最小颗粒半径 $R_{\min}=0.02$ mm，最大颗粒半径为 $R_{\max}=0.03$ mm，密度为 $2\ 000$ kg/m³。颗粒半径随机分布，共计1 800颗。经过反复试算，确定颗粒的法向刚度为 $K_n=10$ MN/m，切向刚度为 $K_s=10$ MN/m，颗粒间滑动摩擦系数为 $\mu=10$ ，放大系数为1.8。经过1 000步放大循环达到设计需要的孔隙比，生成砂土颗粒模型。施加重力加速度模拟自重状态下的砂土沉降过程，当最大不平衡力/最大接触力=0.000 1或者平均不平衡力/平均接触力=0.000 1时判定基本符合砂土的天然状态。经模型试验反复试算，确定墙体的切向刚度和法向刚度相等均为 1×10^9 MN/m，底部墙体的摩擦系数为 $\mu_{\text{钢板}}=1\ 000$, $\mu_{\text{石板}}=3\ 000$ ，其余3道墙体认为是光滑的($\mu=0$)。

表2所列颗粒刚度、摩擦系数、密度以及墙体的刚度和摩擦系数等指标，均为颗粒流数值模拟的自定义指标。

表2 PFC2D框架基本参数

模型	法向刚度/(MN·m ⁻¹)	切向刚度/(MN·m ⁻¹)	密度/(t·m ⁻³)	颗粒半径/mm	放大系数	摩擦系数
土样	1×10	110	2	0.02,0.03	1.8	10
墙体	1×10^9	1×10^9				
结构物	1×10^9	1×10^9				1 000 (3 000)

2.2 数值模拟的应力施加原理

在颗粒流数值模拟中，分别赋予墙体不同的速度，使试样受应力作用。在PFC2D中，墙的移动速度 $\dot{u}^{(w)}$ 满足以下公式：

$$\dot{u}^{(w)} = G(\sigma^{\text{measured}} - \sigma^{\text{required}}) = G\Delta\sigma \quad (1)$$

式中： σ^{measured} 为系统实时测得的应力； σ^{required} 为预设

需达到的应力； G 为计算系数。

在一个时步内因墙的运动而在墙上产生的接触力的最大增量为 $\Delta F^{(w)}$ ：

$$\Delta F^{(w)} = k_n^{(w)} N_c \dot{u}^{(w)} \Delta t \quad (2)$$

式中： N_c 为颗粒与墙的接触总数； $k_n^{(w)}$ 为颗粒与墙接触的平均接触刚度。因此，墙上的平均应力变

化为:

$$\Delta\sigma^{(w)} = \frac{k_n^{(w)} N_c u^{(w)} \Delta t}{A} \quad (3)$$

式中: A 为墙体面积。

通过上述公式, 可以根据墙体施加速度的大小换算出施加应力的大小。

通过对顶面墙体施加不同的速度, 并使底面的墙体以一定的速率水平移动, 来模拟不同法向应力条件下, 土与结构物的相互剪切作用。其中, 法向荷载分级施加, 分别为 50, 100, 150, 200 kPa。

2.3 土与结构物半模直剪试验数值模拟结果分析

在数值模拟试验过程中, 通过软件可以得到不同法向应力条件下破坏时土体的颗粒位移矢量图、颗粒剪应力图、颗粒速度分布图等, 用来分析不同法向应力条件下的颗粒分布变化及其细观结构变化。

2.3.1 法向应力对接触面剪应力的影响

根据上文所述原理, 通过对顶面墙体施加不同的速度, 来模拟施加不同的法向应力。以一定的速度控制底面墙体移动, 使土与结构物相互剪切作用。法向应力分级施加, 分别为 50, 100, 150, 200 kPa。由于侧面的墙体不移动, 所以土体侧向没有变形, 只在竖直方向压缩。

控制结构物以 0.001 m/s 的速率水平运动, 使土与结构物产生相对的剪切作用。当结构物位移达到 4 mm 时, 停止运动, 得到不同法向应力条件下土体的剪应力-位移关系曲线、颗粒分布图、速度分布图、位移矢量图、颗粒剪应力图等。

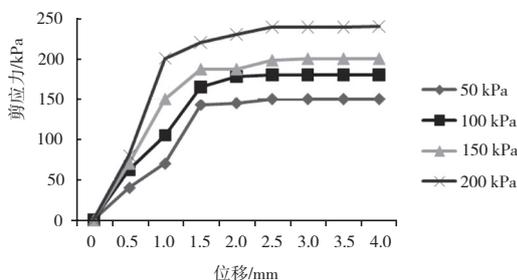


图4 不同法向应力作用下土体剪应力-位移关系曲线

由图4所示不同法向应力条件下的剪应力-位移关系曲线可以看出, 土与结构物接触面剪应力随着土与结构物间相对位移的增加而逐渐增大, 在初始阶段增加幅度很大, 但剪应力的最大

小会随着位移的增加而逐渐趋于稳定。由此可以得知, 土与结构物在相互剪切作用时, 接触面土体会呈现出加工硬化的状态, 即土体的剪应力随着结构物位移的增加而增大。曲线形状接近于双曲线。

对比图4中不同法向应力作用下, 土体剪应力-位移关系曲线, 可以得出法向应力对土与结构物相互剪切作用接触面变形及应力变化的影响主要表现为:

1) 接触面的剪应力随着法向应力的增加而增加, 法向应力越大, 土体的剪应力越大。在法向应力 $\sigma=50$ kPa 时, 最大剪应力为 150 kPa; 法向应力 $\sigma=100$ kPa 时, 最大剪应力为 180 kPa; 法向应力 $\sigma=150$ kPa 时, 最大剪应力为 200 kPa, 法向应力 $\sigma=200$ kPa 时, 最大剪应力为 240 kPa。

2) 剪切引起土体的应力应变关系呈现出加工硬化的状态, 剪应力随着位移的增加而增加, 最后趋于稳定。

3) 法向应力对结构面附近的土颗粒位移以及接触面厚度有一定影响, 但影响程度不大。

2.3.2 不同结构物性质对接触面剪应力的影响

选择不同的结构物粗糙程度, 摩擦系数分别为 $\mu_{\text{钢板}}=1\ 000$ 和 $\mu_{\text{石板}}=3\ 000$, 在相同的速率 $v=0.001$ m/s 下使底部结构物移动, 进行土与结构物的剪切试验 (图5)。

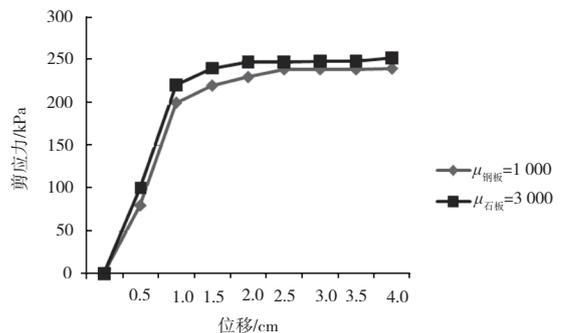


图5 不同摩擦系数剪应力-位移的相互关系曲线

由图5可以看出, 在结构物摩擦系数改变的情况下, 土体与结构物相互剪切作用时, 剪应力与位移的相互关系曲线的趋势基本一致, 都表现出加工硬化的现象, 强度趋于一致, 较粗糙的结构面剪应力略大。可以看出, 结构物表面的粗糙程度, 对土体剪应力的影响不大。在半模直剪试验

中, 通过使用不同粗糙程度的钢板和石板, 也得到了相似的结论。

2.3.3 接触面剪切带颗粒细观分析

由图6~8可以观察到, 土与结构物在相互剪切作用时, 土体的应力、速度、位移等物理量都是集中在土体与结构物相互作用接触面附近的一定范围内, 并没有扩散到整个土体。这说明接触区域是主要受剪区域, 即剪切带, 剪切带内土体的力学性质与周围土体有很大差异。由于结构物的移动, 使得与结构物表面直接接触的土体产生相对位移, 这时土颗粒会通过平移和转动来传递剪应力, 土颗粒的运动使得原本咬合的颗粒相互错动, 颗粒间的孔隙变大, 剪切带局部土体体积变大, 引起剪切带内土体的剪胀。而有些区域孔隙率减小, 土体变密, 说明在剪切过程中, 土体产生剪胀后, 土颗粒会重新排列咬合, 使得局部土体密实。在土与结构物剪切过程中, 应力场在接触面的左边边缘端部出现应力集中, 然后逐步向接触面的中部发展; 同时在垂直方向上应力场在剪切带中部的应力很大, 应力场成明显的消散式分布。

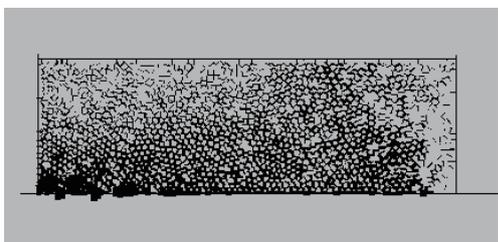


图6 土体剪应力

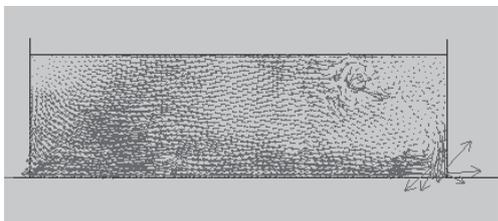


图7 土体速度分布

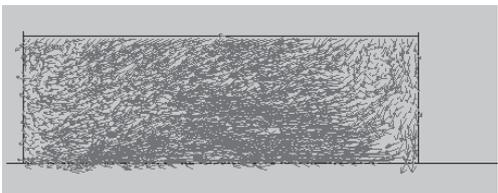


图8 土体位移矢量

在距接触面约5倍颗粒粒径的范围内, 土颗粒在结构物运动的带动下, 会发生明显的平动和转动, 距离结构物越近, 土颗粒的位移就越大。特别是水平位移具有明显的方向性, 与结构物运动方向一致, 但位移量要小于结构物的相对位移。当土与结构物发生相对位移时, 除了在接触面上的土颗粒发生明显的滑移变形外, 接触面附近的土颗粒受到结构物的约束作用也出现较大的位移。滑移变形和土颗粒位移是同时发生的。在土与结构物相互剪切过程中, 土颗粒之间互相影响, 发生相对错动、翻转等现象, 导致颗粒运动的不一致。在距接触面5倍粒径以外处, 土颗粒的位移和转角已很小, 因此可以认为土与结构物相互剪切引起的土颗粒运动大约局限在距接触面5倍粒径的范围内, 剪切带是有厚度的。

3 结论

1) 土与结构物在相互剪切作用时, 接触面土体会呈现出加工硬化的状态, 即土体的剪应力随着结构物位移的增加而增大。曲线形状接近于双曲线。

2) 土与结构物相互作用时, 随着法向应力的增加, 土的剪应力也会增加。在法向应力 $\sigma=50$ kPa时, 最大剪应力为150 kPa; 法向应力 $\sigma=100$ kPa时, 最大剪应力为180 kPa; 法向应力 $\sigma=150$ kPa时, 最大剪应力为200 kPa, 法向应力 $\sigma=200$ kPa时, 最大剪应力为240 kPa。

3) 结构物的性质, 对土体剪应力的影响不大。与不同结构物相互作用, 土体抗剪强度差别不大。

4) 土与结构物的相互作用的剪切带在接触面, 且对接触面以上一定厚度内的土体也有影响。但影响范围不大, 约为5倍的粒径。

参考文献:

- [1] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [2] Clough G W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division: ASCE, 1971, 97(12): 1 657-1 673.
- [3] 卢廷浩, 王伟, 王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪

- 试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2006, 22(1):82-85
- [4] 周爱兆, 卢廷浩, 刘尧. 土与结构接触面力学特性研究现状与展望[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2007, 35(5):524-528.
- [5] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3):14-22.
- [6] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1):21-25.
- [7] 张建民, 侯文峻, 张嘎, 等. 大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6):889-894.
- [8] 李邵军, 孟凡震, 陈静, 等. 土与结构相互作用的可视化剪切试验装置研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1):180-188.
- [9] 李登华, 郇能惠. 土与结构接触面试验仪的研制与应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2010, 43(3):390-393.
- [10] 袁运涛, 施建勇. 土与结构界面位移特性静动力单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6):1 707-1 712.
- [11] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4):431-435.
- [12] 张辉. 单调加荷条件下砂土剪切试验的宏微观力学性质研究[D]. 上海:上海海事大学, 2009.
- [13] 周健, 池永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及PFC2D程序[J]. 岩土力学, 2000, 21(3):271-274.
- [14] 周健, 池永. 颗粒流理论模拟砂土的力学性质[J]. 岩土工程师, 2002, 14(3):1-6.
- [15] 周健, 苏燕, 池永. 颗粒流模拟土的工程性质[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3):390-396.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

( 上接第 159 页 )

为了验证前期沉降缺失时三点法的正确性。假设填土 2.6 m 后、开工 44 d ( 已发生沉降 97 mm ) 时才设置沉降板并进行沉降监测, 则需要将开工 44 d 后的实测沉降数据全部减去 97 mm 作为实测沉降  $S'_t$ 。利用  $S'_t$  由式 ( 12 ) 推算得到  $S'_\infty = 1.112$  m, 与 97 mm 之和为 1.209 m, 与前期沉降不缺失时推算得到的最终沉降相等; 利用  $S'_t$  由式 ( 13 ) 得到  $\beta = 0.016 25 d^{-1}$ , 与前期沉降不缺失时推算的  $\beta$  基本相等。

由式 ( 18 ) 得  $t'_0 = 98.6$  d, 由式 ( 9 ) 得  $S'_a = 79$  mm, 按照式 ( 19 ) 和式 ( 20 ) 得的总的瞬时沉降为 126.8 mm, 总沉降为 1.324 m, 与包括前期沉降的推算结果基本一致。工程实例也说明了本文方法的正确性。

## 5 结语

理论分析表明分级加载时三点法推算沉降仍然适用。等沉降法修正时间起点可以合理预测瞬时沉降。越大, 中点加权法确定  $t_0$  和  $S_a$  的误差  $\beta$  越大。前期沉降缺失时三点法仍然适用。

## 参考文献:

- [1] 曾国熙, 杨锡龄. 砂井地基沉降陷分析[J]. 浙江大学学报, 1959(3):1-7.
- [2] 曾国熙, 卢肇钧, 蒋国澄, 等. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993:71-86.
- [3] 杜海伟, 张建军, 李新生. 地基沉降计算指数曲线配合法及其应用[J]. 土工基础, 2005(1):14-16.
- [4] 潘作棉. 软土地基沉降预测的曲线拟合法[J]. 山西建筑, 2008(20):81-82.
- [5] 李琦. 深港旅检大楼最终沉降量的推算[J]. 铁道建筑, 2005(5):22-24.
- [6] 李福民, 赵有明. 深圳软土地基处理中Asaoka 法的应用[J]. 中国铁道科学, 2002(4):7-9.
- [7] 谢何铭, 施齐欢. 某围垦工程软土地基最终沉降量的推算[J]. 浙江水利科技, 2006(3):17-19.
- [8] 吴军. 线路软土地基沉降预测方法对比分析[J]. 山西建筑, 2007(28):70-72.
- [9] 张小平, 刘吉福, 李翔. 软基路堤高度与沉降的关系[J]. 路基工程, 2008(2):60-62.
- [10] 刘吉福. 堆载预压法处理高速公路路基的卸载时机研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 103-115.

( 本文编辑 武亚庆 )