

文章编号: 1000-7598 (2009) 07-2005-06

搅拌桩加固挤土效应及在地铁隧道保护中的应用

付艳斌^{1,2}, 廖少明², 朱合华²

(1. 深圳大学 土木工程学院, 深圳 518060; 2. 同济大学 地下建筑与工程系 / 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 在减小地基变形进行的深层搅拌桩加固时, 加固本身的挤土效应对隧道变形产生了影响。为此, 模拟了搅拌桩 (DCM) 侧向挤土效应的 4 种荷载模式, 结合实测资料并采用数值试验验证了侧向挤土荷载模式的合理性。进一步应用该模式, 通过有限元模拟了搅拌桩的加固挤土效应, 分析讨论了不同加固顺序对地面变形, 隧道变形以及长期蠕变变形的影响, 结论表明, 搅拌桩加固对地面环境影响是不可忽略, 隧道周围搅拌桩施工顺序对隧道变形影响较大, 搅拌桩加固后长期蠕变效应相对加固过程的变形很小。

关 键 词: 深层搅拌桩; 侧向荷载模式; 挤土效应; 地铁隧道

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Soil squeezing effect of DCM pile and its application to subway tunnel

FU Yan-bin^{1,2}, LIAO Shao-ming¹, ZHU He-hua¹

(1. College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Department of Geotechnical Engineering of Tongji University, Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Education Ministry, Shanghai 200092, China)

Abstract: Soil squeezing effect induced by DCM (deep cement mixing) pile has an impact on tunnel deformation while the cement mixing pile is used to strengthen the ground around tunnel. Four lateral load models are proposed and verified based on numerical simulation and measured data. Soil squeezing effect is simulated by the finite element method using the lateral load model. The ground deformation, tunnel deformation concerning creep effect are analyzed with respect to different construction sequences. The results show that construction sequences have a great effect on ground deformation and the deformation of the tunnel when DCM pile is constructed, but tunnel deformation concerning creep effect is small.

Key words: deep cement mixing pile; lateral load model; soil squeezing effect; subway tunnel

1 引 言

水泥土搅拌桩是一种处理软土地基的常用桩型, 对于搅拌桩的研究目前主要集中在受荷状态下桩的荷载传递机制及其变形控制^[1-2]。Dong, et al^[3]介绍了一种新的复合地基施工工法: 深层搅拌桩内插预制混凝土桩, 并使用静载试验和有限元模拟桩的竖向承载机制和地面沉降, 研究表明这种桩实际上是一种摩擦桩。Wang, et al^[4]在分析饱和复合地基竖向振动问题时, 提出了轴对称无限元的分析公式, 使用所提出的有限-无限元方法, 干土和渗透性很差的饱和土的地面沉降和单一介质弹性问题理论解相吻合。以上研究主要针对搅拌桩加固体形成后的力学性能和受力作用机制, 但对加固过程中导致

的侧向挤土作用机制则研究较少。

随着城市建设项目的数量和规模迅速增大, 常常会出现基坑工程骑跨于已运行地铁区间隧道之上这一新问题。而地铁隧道的变形要求极其严格, 绝对最大位移不能超过 20 mm, 回弹变形不超过 15 mm, 日变形量必须小于 0.5 mm, 因此, 常用坑内搅拌桩加固来减小基坑下方隧道的变形。由于施工工期和施工场地的局限性, 在限定时间内, 用大面积搅拌桩施工对隧道挤土效应最小化实际上是一个施工优化过程。本文从工程试桩资料出发, 通过数值试验确定水泥土搅拌桩的侧向挤土荷载模式, 并以上海地铁一号线隧道上方某基坑工程大面积深层搅拌桩加固为例, 采用侧向挤土荷载模式对施工方案做了优化分析和比较。

收稿日期: 2007-12-04

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (No. 2006AA11Z102); 深圳市科技计划项目 (No. SY200806270077A)。

第一作者简介: 付艳斌, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要从事隧道及地下工程的教学与科研工作。E-mail: fuyanbin999@163.com

2 搅拌桩侧向挤土荷载模式

2.1 侧向挤土荷载模式

水泥土搅拌桩加固的基本原理是：水泥在有一定活性的土中发生水解和水化反应。水泥土硬化速度缓慢，且作用复杂，目前水泥土侧向挤土作用机制仍不清楚。假设水泥土搅拌桩侧向挤土荷载模式有 4 种情况，即 4 种荷载模式，

荷载模式 a:

$$\left. \begin{aligned} P_{ay} &= Ky, (y \leq H/2); \\ P_y &= KH/2, (y > H/2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

荷载模式 b:

$$p_{by} = Ky, (y \leq H) \quad (2)$$

荷载模式 c:

$$p_{cy} = KH/2, (y \leq H) \quad (3)$$

荷载模式 d:

$$p_{dy} = K(H-y), (y \leq H) \quad (4)$$

式中： K 为侧向变形系数 (kPa/m)； H 为搅拌桩桩长 (m)； y 为桩从地面起计算高度； P_{ay} 、 P_{by} 、 P_{cy} 、 P_{dy} 分别为 4 种假设荷载模式下的侧向荷载。

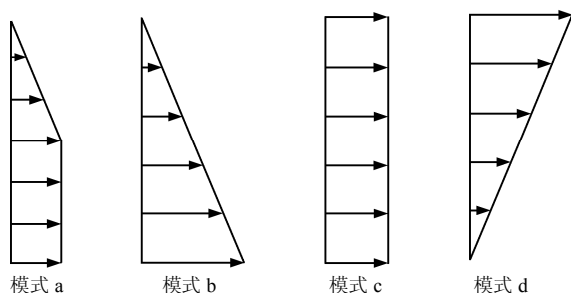


图 1 搅拌桩侧向挤土荷载模式
Fig.1 Lateral load model of DCM pile

2.2 工程试桩

地铁隧道对变形要求极为严格，为了掌握搅拌桩施工对周边环境的影响程度进行了试桩。试桩采用 $\phi 700$ mm 双头水泥土搅拌桩，桩中心距 500 mm，桩长 13 m，如图 2 所示。施工采用双头搅拌桩机，水泥占 13%，水灰比为 0.45，钻进速度为 0.25 m/min，提升速度为 0.5 m/min，浆压为 0.1~0.2 MPa。试桩地面变形如图 3 所示。

2.3 搅拌桩侧向挤土荷载模式数值试验

采用大型有限元程序 MARC 对搅拌桩试桩进行有限元分析。以搅拌桩中心为对称轴，取其 1/2 进行分析。网格剖分如图 4 所示。左侧以搅拌桩中心为水平边界，右侧取 5 倍桩长 (65 m) 模拟搅拌桩的加固影响范围。上表面取自天然表面，底部边

界取至 4 层土顶部，距地面 26 m。水平向为 x 向，竖直向为 y 向，且对 x 边界施加 x 向位移约束， y 边界施加 y 向约束。采用等参四边形单元模拟土体和水泥土搅拌桩。假定桩与桩周土侧向位移一致。

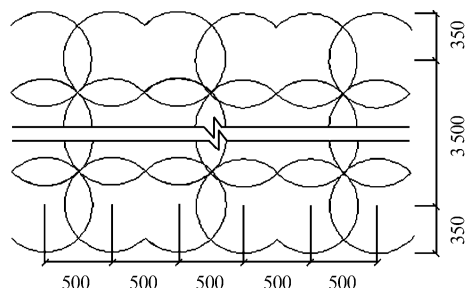


图 2 搅拌桩试桩平面图(单位: mm)
Fig.2 Plane of DCM pile (unit: mm)

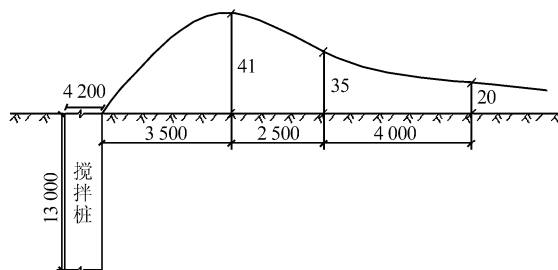


图 3 试桩实测变形资料(单位: mm)
Fig.3 Measured deformation data of trial pile (unit: mm)

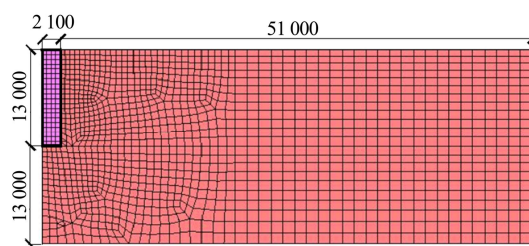


图 4 试桩网格平面图(单位: mm)
Fig.4 Plan of trial pile mesh(unit: mm)

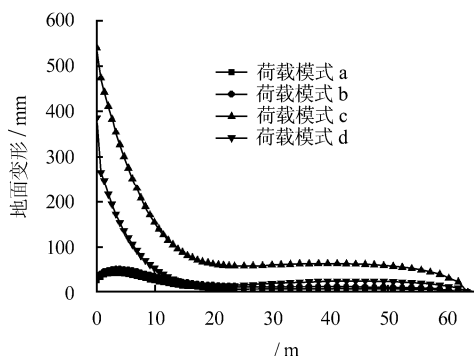
本构模型及材料参数假定：由于试桩时间较短，不考虑土体时间效应，故假定搅拌桩和土体均为弹性状态，搅拌桩弹性模量为 160 MPa，土体重度为 17.1 kN/m³，土的弹性模量为 12.38 MPa^[6]。

2.4 数值试验结果

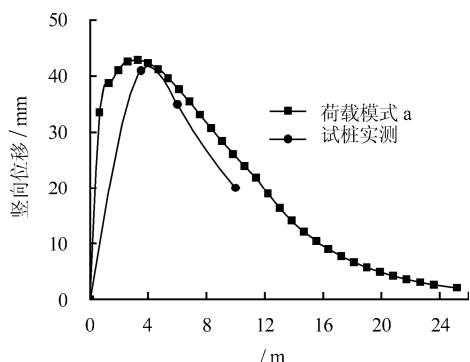
从图 5(a)可以看出，荷载模式 c、d 计算下的周边隆起量远大于荷载模式 a、b 的隆起量，且荷载模式 c、d 下的变形特征为搅拌桩周围地面隆起量最大，影响距离比较远。对照图 3 可知，荷载模式 a、b 变形特征与实测比较接近，比较可知，当理论上桩为无限长时，荷载模式 b 的侧压阻力为无限大；

当桩超过一定深度时, 桩侧阻力基本保持不变, 故荷载模式 a 较为合理。

采用荷载模式 a 及不同的侧向变形系数 K 进行反演计算, 当取 K 为 60 kPa/m 时, 计算和实测比较吻合 (图 5(b)), 搅拌桩加固的影响范围可以达到 $2H$, 而在 $H/3$ 距离以外, 加固引起的变形显著降低。故采用荷载模式 a 时, 其参数 $P_{ay} = 60y \text{ kPa}$, $y \leq H/2$; $P_{ay} = 30H \text{ kPa}$, $y > H/2$ 。



(a) 搅拌桩加固后的地面变形



(b) 计算和实测对比

图 5 荷载模式的应用

Fig.5 Application of load mode

3 荷载模式在隧道上方加固中的应用

3.1 工程概况

某软土基坑横跨在运营地铁隧道上方, 为减少基坑开挖坑底反弹对隧道的影响, 在地铁隧道上方进行搅拌桩满堂加固, 以保证区间隧道隆起变形在允许范围之内。隧道外径为 6.2 m , 隧道上方全部采用 $\phi 700 \text{ mm}$ 双头水泥土搅拌桩加固, 加固形状呈“M”状 (图 6)。图中 B1、B2、B3 为隧道两侧加固, 桩长 16 m 。C1、C2 为基坑开挖区域加固, 桩长 6 m 。由于隧道对变形要求极为严格, 考虑到施工工期和施工场地的局限性, 为保证搅拌桩施工对隧道影响最小, 提出如下 3 种施工方案进行数值模拟 (图 7), 图中 B1、B3 视为同时施工, 工期为 30

d, B2 施工工期为 15 d , C1、C2 同时施工, 工期为 30 d 。

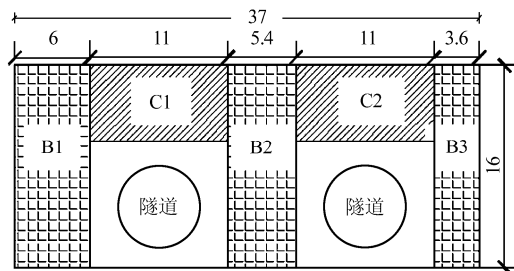


图 6 搅拌桩加固剖面图 (单位: m)

Fig.6 Section of DCM piles (unit: m)

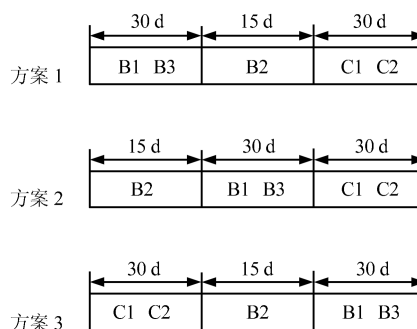


图 7 搅拌桩加固方案

Fig.7 Scheme of DCM piles

3.2 计算模型以及计算参数

计算模型深度取 3 倍桩长 (48 m), 水平向为加固区域左右各取 3 倍桩长 (48 m), 水平向共 134 m 。模型两侧采用水平铰支约束, 下端边界采用固定约束。隧道管片厚 350 mm , 视为等效连续梁, 采用梁单元模拟, 搅拌桩和土体采用等参四边形模拟。搅拌桩和隧道管片均采用线弹性模型, 弹性模量分别取为 160 MPa 和 31 GPa , 泊松比分别取 0.3 和 0.2 。

在上海地区, 地铁隧道基本位于饱和含水的流塑或软塑黏性土层。这类土层扰动后强度明显降低, 且在长达数年的时间内发生固结和次固结。该层淤泥质黏土为线性黏弹性特性, 土体的蠕变一般是衰减稳定的, 可用广义 Kelvin 模型 (图 8) 表示^[7]。

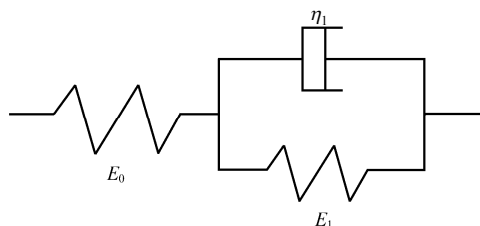


图 8 Kelvin 模型

Fig.8 Kelvin model

广义 kelvin 模型由一个弹簧和 kelvin 体串联组成。 E_0 表示弹簧体的弹性模量； E_1 、 η_1 分别为 kelvin 体的弹性模量和黏滞系数，其应力-应变关系为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1(1 - \exp(-E_1 t / \eta_1))} \quad (5)$$

根据上海典型土层试验参数^[7]，取 $E_0 = 13.47 \text{ MPa}$ ， $E_1 = 74.6 \text{ MPa}$ ， $\eta_1 = 68\,787 \text{ MPa} \cdot \text{min}$ 。

4 加固过程的数值模拟与优化

4.1 加固方案对地面环境的影响

图 9 为 3 种方案施工 75 d 后的地面变形图。从图中可以看出，3 种加固方案中搅拌桩加固的挤土效应均引起隧道外侧隆起，导致隧道上方地面沉降。方案 1 导致地面隆起最大，达 13.8 mm，两个隧道中心线所处地面沉降最大，达 40.8 mm。对比 3 种方案，方案 1 对地面环境影响最大，方案 3 影响最小。

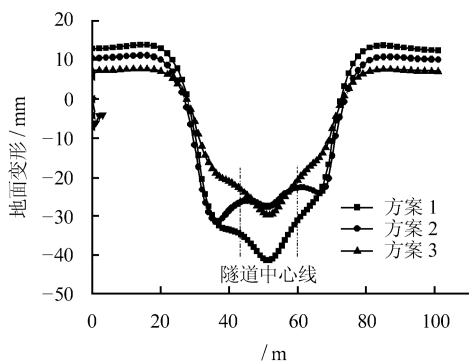


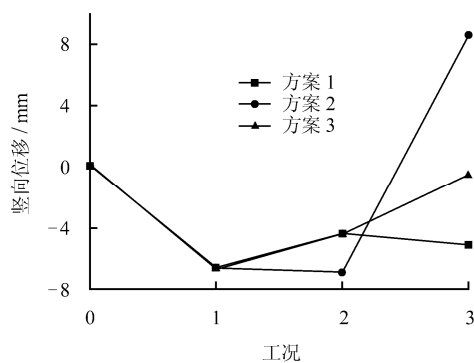
图 9 加固地面变形图

Fig.9 Strengthened ground deformation

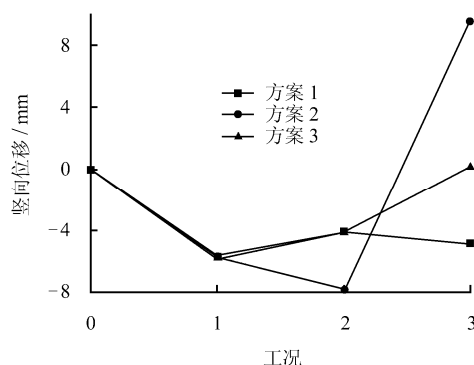
4.2 加固方案对隧道的影响

取左右隧道的上下左右 4 个顶点在 3 种方案 3 个工况进行分析。图 10 为左右隧道上下顶点对 3 种施工方案的竖直位移变化曲线，可见施工方案 1 隧道竖直方向变形较小，而方案 2、3 隧道顶点变形波动较大。

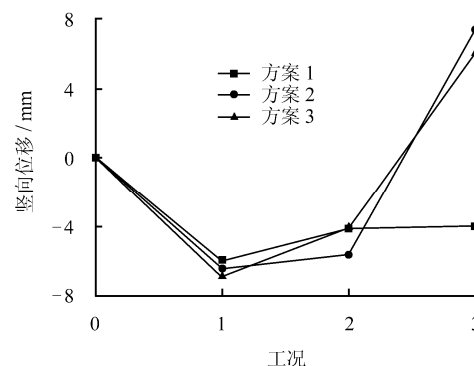
图 11 为两个隧道左右顶点对 3 种施工方案的水平位移过程图，可见方案 1 较方案 2、3 随施工过程变形波动较小，绝对变形也较小。综合竖直位移和水平位移，方案 1 对隧道的影响均比方方案 2、3 影响较小。取方案 1 整个施工过程对左侧隧道底部进行分析，如图 12 所示。加固施工步可视为瞬间加载，加固瞬间对隧道有显著的沉降或隆起变形。隧道在整个施工蠕变过程中均为缓慢下沉，且蠕变速度呈衰减趋势。



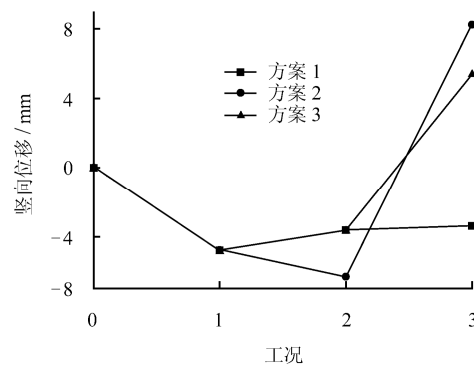
(a) 左侧隧道顶点



(b) 左侧隧道底部

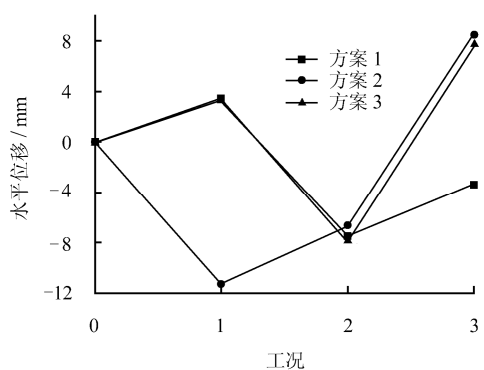


(c) 右侧隧道顶点

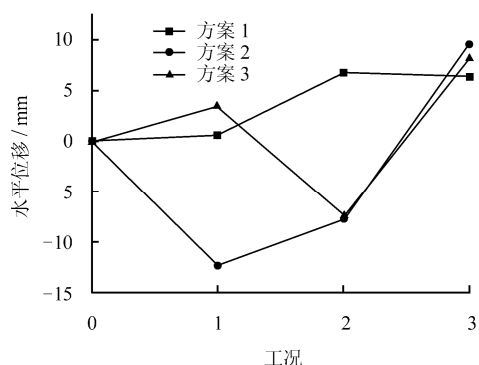


(d) 右侧隧道底部

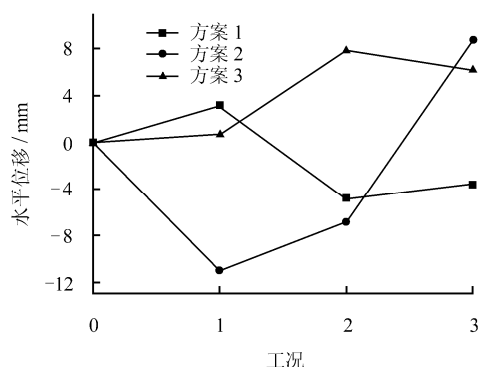
图 10 3 种方案各工况下竖向位移变化曲线
Fig.10 Curves of vertical displacement
in 3 schemes



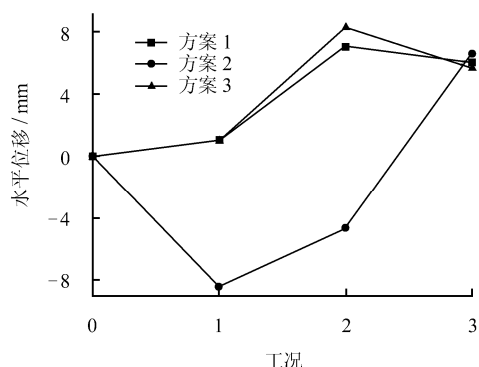
(a) 左侧隧道左边顶点



(b) 左侧隧道右边顶点



(c) 右侧隧道左边顶点



(d) 右侧隧道右边顶点

图 11 隧道对 3 种施工方案的水平位移过程图

Fig.11 Curves of horizontal displacement in 3 schemes

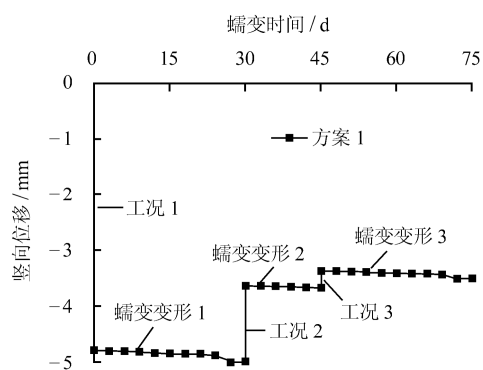


图 12 左侧隧道顶点位移随时间变化曲线

Fig.12 Displacement-time curve of vertex of left tunnel

5 结 论

本文对水泥土搅拌桩侧向挤土效应荷载模式进行探索, 提出 4 种荷载模式, 采用有限元方法, 并对照搅拌桩工程试桩实测资料对比分析。然后, 将其应用到地铁隧道保护中, 对地铁隧道地面沉降、隧道位移以及长期蠕变影响进行了分析, 得出了如下结论:

(1) 建议了 4 种水泥土搅拌桩侧向挤土荷载模式, 确定上部呈三角形分布, 下部呈矩形分布的荷载模式较合理。

(2) 搅拌桩加固对地面环境影响是不可忽略的。地面变形特征为隧道外侧隆起, 而双线隧道中心所对应地面沉降最大。先加固隧道上方, 再加固中间, 最后加固隧道左右对地面的影响最小。

(3) 隧道周围搅拌桩施工顺序对隧道变形影响较大。先加固隧道两侧, 再加固中间, 最后加固上方对隧道影响最小。

(4) 通过数值模拟发现, 双头搅拌桩机对隧道影响比较大, 建议对敏感性构筑物 and 地铁隧道慎重采用双头搅拌机。

(5) 搅拌桩加固后长期蠕变效应相对加固过程的变形很小, 可忽略不计。

参 考 文 献

- [1] 冯卫星, 韩文忠, 丁维利. 广州地铁三号线大——沥盾构区间桩基加固处理[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 486—489.
FENG Wei-xing, HAN Wen-zhong, DING Wei-li. Pile foundation treatment for interval shield tunneling from Datang station to Lijiao station of No.3 Guangzhou subway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(3): 486—489.
- [2] 杨挺, 王心联, 许琼鹤, 等. 箱形隧道基坑下已建地铁

盾构隧道隆起位移的控制分析与设计[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 187—192.

YANG Ting, WANG Xin-lian, XU Qiong-he, et al. Analysis and design aiming at control of upwarping deformation of existed tunnel under new tunnel's excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.): 187—192.

- [3] DONG Ping, QIN Ran, CHEN Zheng-zhou. Bearing capacity and settlement of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2004, 22: 105—119.

- [4] WANG Guo-cai, CHEN Long-zhu, SONG Chun-yu. Finite-infinite element for dynamic analysis of

axisymmetrically saturated composite foundations[J].

International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 67: 916—932.

- [5] 吉茂杰. 搅拌桩加固施工对基坑位移影响分析[J]. 地下工程与隧道, 2005, (2): 26—29.

Ji Mao-jie. Analysis on how cement soil mixing pile construction influence the displacement of excavation pit[J]. **Underground Engineering and Tunnel**, 2005, (2): 26—29.

- [6] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册[M](第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 428—430.

- [7] 孙均. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 123—124.

上接第2004页

(3) 剪切速率对超固结黏土的抗剪强度特性有着重要的影响。剪切速率越大, 峰值强度随之增大, 达到稳定残余强度的剪切位移也随之相应地增加, 但其对残余强度几乎没有影响。

(4) 在循环荷载作用下, 残余强度出现了不同程度的降低, 最大降低幅度达 12.2 %。当土体剪切面为不规则的剪切带时, 残余强度则出现上升现象。

参考文献

- [1] 洪勇, 孙涛, 栾茂田, 等. 土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 628—634.

HONG Yong, SUN Tao, LUAN Mao-tian, et al. Development and application of geotechnical ring shear apparatus: an overview[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 628—634.

- [2] 戴福初, 王思敬, 李焯芬. 香港大屿山残坡积土的残余强度试验研究[J]. 工程地质学报, 1998, (3): 223—229.

DAI Fu-chu, WANG Si-jing, LEE C F. The drained residual strength of volcanics-derived soil sampled on Iantau Island, Hong Kong[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1998, (3): 223—229.

- [3] BISHOP A W, et al. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength[J]. **Geotechnique**, 1971, 21(4): 273—328.

- [4] CHANDLER R J. Recent European experience of landslides in overconsolidated clays and soft rocks[C]// Proc. 4th Int. Symp Landslides. Toronto: [s. n.], 1984: 61—81.

- [5] LAMBE T W. Amuay landslides[C]//Proc. 11th Int. Conf. SMFE. San Francisco: Golden Jubilee volume, 1985: 137—158.

- [6] LUPINI J F, et al. The drained residual strength of cohesive soils[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(2): 181—213.

- [7] 刘小丽, 邓建辉, 李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1849—1854.

LIU Xiao-li, DENG Jian-hui, LI Guang-tao. Shear strength properties of slip soils of landslides: an overview[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1849—1854.

- [8] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. **Geotechnique**, 1986, 35(1): 3—18.

- [9] LEMOS L J L, SKEMPTON A W, VAUGHAN P R. Earthquake loading of shear surfaces in slopes[C]//Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. [S. l.]: [s. n.], 1985: 1955—1958.

- [10] TIKA TH E, HUTCHINSON J N. Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(1): 59—74.

- [11] 任惠芳. 浅析滑坡土的残余强度[J]. 青海地质, 1995, (2): 71—74.

REN Hui-fang. Preliminary analysis of residual strength of landslide earth[J]. **Qinghai Geology**, 1995, (2): 71—74.

- [12] SKEMPTON A W. First-time slides in over-consolidated clays[J]. **Geotechnique**, 1970, 20(3): 320—324.