

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.022

考虑各向异性对软土隧道沉降的影响

张浩, 王建华, 尹振宇, 朱雁飞

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘要:采用不同本构模型对盾构开挖第4阶段的沉降进行了模拟,模型分别为考虑各向异性的本构模型(EVP-SCLAY1模型)和各向同性模型(MC模型和MCC模型),将这3个模型的计算结果与实测数据之间进行了对比,结果显示,在模拟盾构开挖引起的沉降范围以及地表沉降时,各向异性模型模拟结果与实测结果更加吻合,而MC模型预测结果最差。

关键词:各向异性;软土;影响范围;最大沉降

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0096-04

Effect of Considering Anisotropy on the Settlement of Tunnel in Soft Soil

Zhang Hao, Wang Jianhua, Yin Zhenyu, Zhu Yanfei

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China)

Abstract: Using different constitutive model to simulate the settlement of the fourth stage of shield excavation respectively, the models used were the anisotropic constitutive model (EVP-SCLAY1 model) and the isotropic models (MC model and MCC model), then the results with the three models and the measured datas were compared. The results show that the simulation result with the anisotropic model is more consistent with the measured results in simulating the settlement rang and surface settlement of shield excavation, and MC model prediction results are the worst.

Key words: anisotropy; soft soil; influence range; largest settlement

随着经济的飞速发展,中国大型土木工程建设项目不断增多,有些隧道受制于客观条件的限制,经常需要通过软土地区。由于软土本身所具有物理力学性质较差,经常给工程项目带来不利影响,其中最显著的就是软土的沉降问题,如何预测沉降并且通过合理有效的手段来控制 and 减小沉降一直是工程建设中亟待解决的一大技术难题。

从已有的研究成果来看,目前对隧道开挖引起地层变形的计算方法可以分为经验法、解析法和数值分析法。在经验法方面主要有:Peck^[1]通过对数据进行总结,并进行相关假定,提出了隧道横向沉降的计算公式。O'Teilly等^[2]在Peck公式的基础上通过统计各种地质条件下隧道开挖时的地面沉降数据,得到了相关沉降槽宽度的经验系数。由于经验法存在应用范围较窄,不具有广泛性等缺点,各种解析法又相继出现。Sagaseta^[3]在假设土体为初始各向同性、均质的条件下,获得了在考虑近地表地层损失情况下不可压缩土体中的应变场闭合解。Verruijt等^[4]提出了弹性半空间内隧道开挖引起的地层沉降解析公式。Loganathan等^[5]考虑土体间隙参数和地层损失参数,将Verruijt等提出的解析公式进行了修正,使结果更加准确。Ch^[6]将间隙参数和沉降影响角作为沉降曲线的主要参数,提出了以优化反分析的方法确定地层损失参数以及沉降槽的形态。施建勇^[7]采用沿着轴向和横向解析、竖向离散的半解析方法求解隧道施工引起的土

体变形问题,建立了土体和衬砌的半解析函数。姜忻良和赵志民^[8]根据地层损失的空间分布规律,应用镜像法原理,采用数值积分方法,对隧道推进过程中由地层损失产生的位移场进行空间分析,得到了隧道周围土体的位移场分布规律。由于岩土材料本身的复杂性,要想获得解析解或者半解析解有时非常困难,90年代以来随着计算技术的飞速发展,数值分析方法开始涌现。

Oettle^[9]采用D-PMC模型和修正的D-P模型分别模拟了隧道的开挖过程。Chungsik等^[10]对采用Diana软件分析了不同边界条件下隧道面的三维变形特性,重点研究了不同长度和刚度的钢筋对隧道面稳定性的影响。Finno等^[11]经现场测试提出可以分别采用纵横向两个方向的二维平面有限元模型来模拟土压平衡式盾构隧道的开挖过程及地表移动。Swobada等^[12]利用三维分析软件模拟了盾构掘进、注浆和衬砌过程,分析了超空隙水压的变化和泥浆及注浆压力对超空隙水压的影响。季亚平^[13]采用平面有限元分析了注浆体厚度、土质条件、衬砌刚度、隧道相对埋深对地层位移和衬砌压力分布的影响。刘洪洲等^[14]等针对软土隧道盾构法施工中影响地面沉降的因素,采用三维有限元方法进行了数值模拟方法,为施工和设计提供了参考依据。冯建中等^[15]利用有限元方法对盾构隧道施工引起的地表变形进行数值模拟与分析,与经验公式计算结果进行比较,验证了有限元数值

收稿日期:2013-03-02

作者简介:张浩(1979-),男,博士生,主要从事土的本构模型研究,(E-mail)zhanghao800329@163.com。

分析模型的合理性,同时分析了隧道周围土体移动规律和地表沉降规律。卢瑾^[16]以某软土地层中开挖的隧道为例,对开挖过程进行了动态模拟,分析了盾构推进过程中地表的沉降分析及特点,并与采用 Peck 法计算得到的结果进行了比较。

1 各向异性对地表沉降的影响

目前,对盾构隧道施工引起的地表沉降分析大部分都假定土体为各向同性,但实际上经过长期的沉降作用,土体颗粒的排列具有一定的方向性,形成固有各向异性,同时土体开挖过程造成后期的应力路径发生变化,也会改变土体的各向异性特征,在数值分析中,不考虑土的各向异性有时会导致结果产生较大的差异^[17-21]。

根据连续介质理论,假设开挖隧道的几何尺寸及沉降影响范围如图 1 所示:

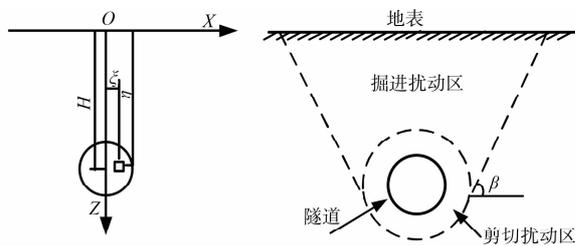


图 1 隧道开挖示意图

单元 $d\xi d\eta$ 开挖造成距离单元中心为 X 的地表处沉降值为^[22]:

$$W_e(X) = \frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(\eta)} X^2\right] d\xi d\eta \quad (1)$$

其中, $r(\eta)$ 表示单元体开挖在地表面上主要影响范围,与地层主要影响角度 β 之间的关系可以采用式(2)表示:

$$\beta = (\pi + 2\varphi)/4 \quad (2)$$

$$r(\eta) = \frac{\eta}{\text{tg}\beta} \quad (3)$$

将式(1)在整个断面开挖范围内进行积分,得到地表下沉值:

$$W(X) = \iint_n \frac{\text{tg}\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \text{tg}^2\beta}{\eta^2} (X - \xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (4)$$

$\text{tg}\beta$ 值取决于开挖所处地层条件,在 $X = 0$ 处,沉降取得最大值:

$$W(0) = \text{tg}\beta \iint_n \frac{1}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \text{tg}^2\beta}{\eta^2} \xi^2\right] d\xi d\eta = \frac{4\pi \text{tg}^3\beta H e^{\beta^3} r}{3(H+r)^2(H-r)^2} \quad (5)$$

初始各向异性参数 K_0 值按照式(6)取值:

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \quad (6)$$

联合式(2)和式(6),得到:

$$\text{tg}\beta = \sqrt{\frac{2-K_0}{K_0}} \quad (7)$$

将(7)代入(4)得到:

$$W(0) = \frac{4\pi H e^{\beta^3} (2-K_0)^3}{3(H+r)^2(H-r)^2 K_0^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,考虑 K_0 值的变化对结果有较大影响, K_0 的取值范围一般为 0.40~1.0,当 K_0 值取 1,即土体为各向同性。

2 工程概况

古北路站—中山公园站区间隧道工程是上海轨道交通 2 号线延伸工程的一个重要组成部分,盾构推进起始于古北路站东端头,止于中山公园站,盾构穿越范围内,暗浜广泛分布,沿线经过的需要重点保护的构筑物 and 建筑物较多,需要对地表的沉降进行严格监测。隧道通过区域最大覆土厚度约为 22.4 m,线路通过土层为第四纪松散沉积层,属第四系河口、滨海、浅海相沉积层,施工段土层分别为:淤泥质粉质黏土、灰色淤泥质黏土、粉质粘土、灰色粉质粘土、暗绿色粘土、草黄色粘质粉土,各地层特征见表 1。

表 1 地层参数值

类别	土层厚度/m	重度/($\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比	压缩模量/MPa	泊松比	粘聚 C/kPa	内摩擦角 φ
①	7.5	17.4	1.22	2.58	0.30	14.0	30.6
②	9.0	16.8	1.40	2.26	0.30	14.0	31.3
③	7.5	17.4	1.18	2.76	0.35	18.0	29.3
④	13.0	17.7	1.04	3.47	0.36	19.0	27.4
⑤	15.0	17.8	1.00	4.17	0.36	19.0	28.3

沉降观测断面沿中线垂直布置,共设置 6 个观测断面,每个观测断面设 13 个观测点,中心点设置 1 个观测点,左右两侧各 2 个观测点,本文选取的分析对象为在 K9+100 处的观测断面测得的数据。

按照盾构在不同推进工况下地面沉降的发展情况,可将盾构施工引起的沉降分为 5 个阶段,分别是未到达时引起的地表沉降,盾构通过时引起的地表变化,盾构通过以后盾尾空隙的闭合引起的地面沉降,壁后注浆和受扰动土体的固结引起的地面沉降以及受扰动土体的二次固结引起的地面沉降。一般来说,壁后注浆和受扰动土体的固结引起的沉降占最终沉降量的比重最大,最高甚至达到 80%,本文主要针对

该阶段地表沉降采用弹塑性模型进行数值分析,然后与实测结果进行对比。

3 数值分析

在对盾构隧道施工进行开挖模拟的方法中,一类是按照盾构施工的工序进行模拟,但是这类模型通常计算非常复杂,要考虑的因素很多,有时结果与实际之间存在较大差异。第二类方法是宏观与微观相结合的方法,通过输入初始应力场,通过试验确定土体的各项参数,选择适当的土体本构模型,来计算土体在盾构施工过程中的位移变化。同时在影响地面总体沉降的 5 个阶段中,第 4 阶段中注浆体和受扰动土

体的固结沉降量占总沉降的绝大部分^[31],因此本文通过输入初始应力场,选择考虑各向异性的 EVP-SCLAY1 本构模型^[23]来模拟该阶段盾构施工引起的地表沉降。

3.1 各向异性本构模型

土体本构模型采用 EVP-SCLAY1 模型,该模型是主要针对软黏土开发的综合性弹粘塑性模型,同时考虑了软土的三大特性(黏性、各向异性及结构性),模型将应变划分为弹性应变和塑性应变,其中弹性应变考虑为各向同性,采用胡克定律表示,塑性应变考虑为各向异性,通过采用屈服面的初始角度及后续屈服面的旋转来表示,初始屈服面的倾角与 η_{K_0} 之间的关系采用式(9)表示:

$$\alpha_0 = \eta_{K_0} - \frac{M^2 - \eta_{K_0}^2}{3} \quad (9)$$

其中 η_{K_0} 和 M 分别为 K_0 与 CSL 线对应的 q 值与 p 值之比,分别采用式(10)表示:

$$\eta_{K_0} = \frac{3 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (10)$$

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (11)$$

后续屈服面的旋转通过参数 ω 和 ω_d 表示,分别采用式(12)和式(13)表示:

$$\omega = \frac{1 + e_0}{\lambda_i - k} \ln \frac{10M^2 - 2\alpha_{k_0} \omega_d}{M^2 - 2\alpha_{k_0} \omega_d} \quad (12)$$

$$\omega_d = \frac{3(4M^2 - 4\eta_{K_0}^2 - 3\eta_{K_0})}{8(\eta_{K_0}^2 + 2\eta_{K_0} - M^2)} \quad (13)$$

针对上海软土,模型包含的次固结参数 C_{ae} 与压缩指数 C_c 之间的关系可以采用式(14)表示^[24]:

$$C_{ae} = 0.0336 \times C_c \quad (14)$$

该本构模型中,土体渗透系数与孔隙比之间的关系,采用式(15)表示:

$$k = k_0 \times 10^{(e - e_0)/c_k} \quad (15)$$

式中, C_k 为表示渗透系数随孔隙比变化的参数,同时文献[25]对上海原状软土进行了渗透试验,通过试验拟合了渗透系数与孔隙比之间的关系,见式(16):

$$k = a \times e^{b \times e} \quad (16)$$

联合式(15)和式(16),可得描述渗透系数的参数 C_k 如式(17)所示:

$$c_k = \ln 10 / b \quad (17)$$

b 为试验参数,对于不同性质的土可以通过渗透试验确定,对于上海分层软土, b 的取值见文献[25]。本项目最后需要输入模型的参数见表 2:

表 2 输入模型的参数值

类别	M	K_0	κ	λ_i	C_{ae}	α_0	ω_d	ω	$k_v / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$k_h / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	c_k
①	1.32	0.46	0.020	0.130	0.010	0.50	1.00	62	2.80×10^{-2}	1.50×10^{-2}	0.23
②	1.26	0.48	0.022	0.135	0.010	0.48	1.00	67	1.49×10^{-4}	1.94×10^{-4}	0.25
③	1.22	0.49	0.019	0.113	0.009	0.48	1.02	75	5.20×10^{-2}	1.08×10^{-1}	0.26
④	1.08	0.54	0.019	0.115	0.009	0.42	1.00	36	5.57×10^{-3}	7.49×10^{-3}	0.29
⑤	1.19	0.53	0.019	0.112	0.009	0.43	1.01	38	4.98×10^{-3}	5.01×10^{-3}	0.28

3.2 隧道开挖有限元模型

模型宽度和高度分别为 45 m 和 52 m,隧道埋深 19.5 m,地下水位线-3.0 m,隧道外径 6.2 m,内径 5.5 m,管片厚度为 0.35 m,本构模型采用线弹性模型,横向抗弯刚度折减系数取 0.7^[27],折减后弹性模量为 24.85 GPa,径向收缩率采用 1%。由于隧道为对称结构,选取右半部分进行分析,计算过程采用平面应变模型,模型采用 15 节点三角形单元,有限元模型见图 2 所示。

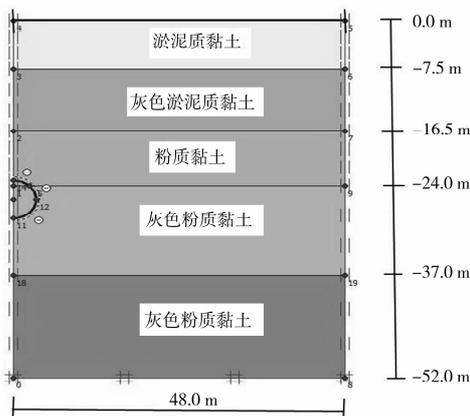


图 2 有限元模型图

本文在计算过程中,首先输入初始应力场,然后再选取土体本构模型来模拟隧道开挖引起的地表沉降槽曲线,选取的模型分别为 MC 模型、MCC 模型和 EVP-SCLAY1 模型,其中 MC 模型和 MCC 模型为各向同性模型,最后将数值分析结果与实测结果进行比较,图 3 为盾构开挖影响范围图,由图 3 可以看出,采用 EVP-SCLAY1 模型得出的地表沉降影响范围介于 MC 模型与 MCC 模型得出的地表沉降影响范围之间,比实测影响范围大 1.82 m, MCC 模型预测影响范围比实测影响范围小 5.5 m,而 MC 模型预测结果与实测结果之间误差较大,两者之间相差达到了 6.62 m。

图 4 为不同模型分析结果与实测数据之间的对比,由图 4 可以看出,MC 模型预测结果与实测结果之间相差较大,实测结果最大 54.12 mm,而 MC 模型预测为 33.05 mm,误差达到了 39%,相对 MCC 模型与 MC 模型,各向异性 EVP-SCLAY1 模型预测结果与实测数据最为接近,这在验证模型适用性的同时,也表明了各向异性是在预测软土沉降时需要重点考虑的一个因素。

4 结论

本文以实际工程为研究对象,采用能描述土体各向异性特性的本构模型与各向同性模型同时预测了盾构开挖对地表沉降的影响范围与中心线最大地表沉降,并将结果与实际

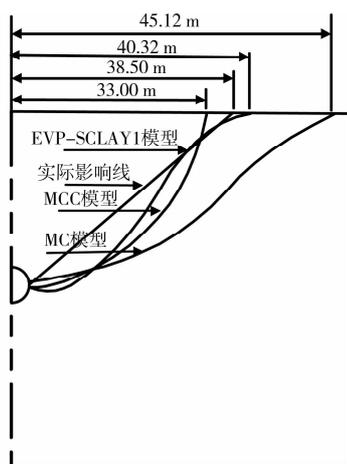


图 3 盾构开挖影响范围图

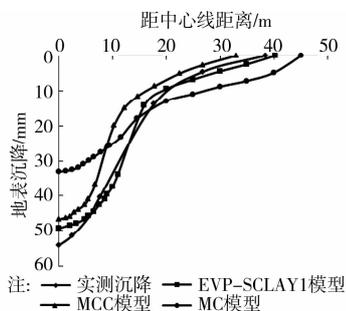


图 4 地表沉降图

观测数据进行比较,结果显示,在预测开挖影响范围与最大地表沉降方面,各向异性模型具有较大优势,预测结果更加接近实际。

分析对初始 K_0 固结状态的软粘土采用各向同性本构模型产生较大偏差的原因在于平均正应力不变,偏应力减少时,应力轴发生偏转,应力应变关系随之发生变化,而各向同性模型没有考虑到这一点,导致结果会出现一定的误差,因此在综合评价盾构开挖对土体造成的影响时,土体的各向异性也是其需要重点考虑的一个因素。

参考文献:

- [1] Peck RB. Deep excavation on sand tunneling in soft ground [C]//Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanical and Foundation Engineering, Mexico City, 1969: 225-290.
- [2] O'Teilly MP, New BM. Settlements above tunnel in the United Kingdom—their magnitude and prediction [C]//Proceedings of Tunneling'82 Symposium, London, 1982: 137-181.
- [3] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [4] Verrujit A, Booker J R. Surface settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half plane [J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753-756.
- [5] Loganathan, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnique and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.
- [6] Chi S Y, Chern J C, Lin C C. Optimized back-analysis for

tunneling-induced ground movement using equivalent ground loss model [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16: 159-165.

- [7] 施建勇,张静,俞才高. 隧道施工引起的土体变形的半解析分析 [J]. 河海大学学报, 2002, 30(6): 48-51.
Shi J Y, Zhang J, She C G. Semi-analysis of soil deformation caused by tunnel construction [J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(6): 48-51.
- [8] 姜忻良,赵志民. 镜像法在隧道施工土体位移计算中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(6): 801-803.
Jiang X L, Zhao Z M. Application of image method in calculation tunneling-induced soil displacement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(6): 801-803.
- [9] Oettle G, Stark R F, Hofstetter G. A comparison of elastic-plastic soil models for 2D FE analysis of tunneling [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 23(6): 69-67.
- [10] Chungsik Y. Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 73-94.
- [11] Finno R J, Clough G W. Evaluation of soil response to EPB shield tunneling [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 157-173.
- [12] Swoboda G, Abukrisha. Three-dimensional numerical modeling for TBM tunneling in consolidated clay [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1999, 14(8): 327-333.
- [13] 季亚平. 考虑施工过程的盾构隧道地层位移与土压力研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [14] 刘洪洲,孙钧. 软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究 [J]. 现代隧道技术, 2001, 38(5): 24-28.
Liu H Z, Sun J. Numerical simulation study on surface settlement factors during shield driving [J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(5): 24-28.
- [15] 冯建中,吴辉,金建峰. 盾构隧道施工地表变形分析的有限元数值模拟 [J]. 浙江水利科技, 2007, 4(32): 33-38.
Feng J Z, Wu H, Jin J F. Ground surface settlement of fish-scale dam due to shield construction in Qiantang River [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2007, 4: 32-33.
- [16] 卢瑾. 软土地层中盾构法开挖三维有限元模拟 [J]. 水利学报, 2007(Sup): 706-710.
Lu J. Three-dimensional finite element simulation of shield excavation in soft soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Sup): 706-710.
- [17] Franzius J N, Potts D M, Burland J B. The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation [J]. Geotechnique, 2005, 55(3): 189-195.
- [18] Lee K M, Rowe R K. Deformations caused by surface loading and tunneling the role of elastic anisotropy [J]. Geotechnique, 1989, 39(1): 125-140.
- [19] Kwast A, Bakker K J, Broere W, et al. Numerical analysis of settlements related to tunneling the role of stress-induced anisotropy and structure degradation in fine-grained soils [C]//Proceeding of 5th International Symposium TC28, Amsterdam, 2005: 15-17.
- [20] Weng M C, Tasi L S, Liao C Y. Numerical modeling of tunnel excavation in weak sandstone using a time-dependent anisotropic degradation model [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(3): 397-406.

- Research, 2004, 34: 109-117.
- [4] 李丽娟,陈智泽,谢伟锋,等. 橡胶改性高强混凝土基本性能的试验研究[J]. 混凝土, 2007(5): 60-63.
Li L J, Chen Z Z, Xie W F, et al. Experimental study of performance of high strength concrete modified by recycled rubber powder[J]. Concrete, 2007(5): 60-63.
- [5] 谢伟锋,李丽娟,刘锋,等. 橡胶粉改性高强混凝土高温前后性能研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007(S1): 11-15.
Xie W F, Li L J, Liu F, et al. Research on high temperature property of rubber powder modified high strength concrete[J]. Concrete, 2007(Sup1): 11-15.
- [6] 申俊敏,李银榜. 重载旧水泥混凝土路面损坏调查与评价[J]. 山西交通科技, 2012(1): 15-17.
Shen J M, Li Y B. The damage survey and evaluation of old cement concrete pavement under heavy-load[J]. Shanxi science & technology of communication, 2012(1): 15-17.
- [7] 李红燕. 橡胶改性水泥基材料的性能研究[D]. 南京:东南大学, 2004, 03.
- [8] 张伟,孙道胜,王爱国. 外掺橡胶粉改性水泥砂浆的物理力学性能研究[J]. 混凝土, 2009(7): 99-102.
Zhang W, Sun D S, Wang A G. Phys ico-mechanical properties of the mortar added with crumb rubber[J]. Concrete, 2009(7): 99-102.
- [9] 滕达,凌建明,袁捷. 聚合物改性水泥基材料对沥青路面面层疲劳性能的改善[J]. 公路工程, 2012, 37(2): 167-170.
Teng D, Ling J M, Yuan J. The effect of polymer modified cement based composite material on the fatigue performance of asphalt mixtures [J]. Highway Engineering, 2012, 37(2): 167-170.
- [10] 郑莉娟,余其俊,韦江雄. 废橡胶粉的改性及其对水泥砂浆性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(1): 52-54, 74.
Zhang L J, Yu Q J, Wei J X. Surface modification of pulverized waste rubber and its effect on the properties of portland cement mortar [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(1): 52-54, 74.
- [11] 张志刚. 橡胶粉水泥砂浆性能试验研究[J]. 西部交通科技, 2007(4): 37-40, 55.
Zhang Z G. Experimental Study on the Performance of Rubber Cement Mortar [J]. Western Traffic Science & Technology, 2007(4): 37-40, 55.
- [12] Albano C, Camacho N. Influence of scrap rubber addition to portland concrete composites: destructive and non-destructive testing[J]. Composite Structures, 2005, 71(3): 439-446.
- [13] 郭海龙. 橡胶粉水泥砂浆的性能研究[J]. 科学之友, 2012(8): 41-43.
Guo H L. The performance of rubber cement mortar[J]. Friend of Science Amateurs, 2012(8): 41-43.
- [14] 郑莉娟,余其俊,韦江雄,等. 废橡胶粉的改性及其对水泥砂浆性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2008(1): 52-54, 74.
Zheng L J, Yu Q J, Wei J X, et al. Surface modification of pulverized waste rubber and its effect on properties of portland cement mortar[J]. Journal of Wuhan University of technology, 2008(1): 52-54, 74.
- [15] 黄少文,徐玉华. 废旧轮胎胶粉对水泥砂浆力学性能的影响[J]. 南昌大学学报:工科版, 2004(4): 53-55.
Huang S W, Xu Y H. Influence of scrap tire rubber powder on the mechanical properties of cement Mortar [J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2004(4): 53-55.

(编辑 张 苹)

(上接第 99 页)

- [21] Ng C W, Leung E H Y, Lau C K. Inherent anisotropy stiffness of weathered geomaterial and its influence on ground deformations around deep excavations [J]. Geotechnical, 2004, 41: 12-24 .
- [22] 阳军生. 城市隧道施工引起的地表变形 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [23] Karstunen M, Yin Z Y. Modelling time-dependent behavior of Murro test embankment [J]. Geotechnique, 60(10): 735-749.
- [24] 孙德安,申海娥. 上海软土的流变试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 74-78.
Sun D A, Shen H E. Study on rheological of soft soil in Shanghai [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2010, 37(3): 74-78.
- [25] 王结虎. 上海软土的渗透性试验研究 [D]. 上海: 上海大学, 2004.

(编辑 郭 飞)