

文章编号: 1000-7598(2011)02-0411-06

小应变条件下隧道开挖引起的横向沉降槽分析

张培森^{1,2,3}, 施建勇², 颜 伟^{1,3}

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;
3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘 要: 利用配备有局部高精度位移传感器 STDTTS+UNSAT 型号的高级应力路径三轴测试系统, 对小应变条件下的土体进行了试验。采用三维数值分析方法和应用小应变模型及摩尔-库仑模型, 分别对隧道施工引起横向沉降槽的影响展开了研究。结果表明, 在小应变条件下土体表现出高模量以及模量随应变增加而衰减的特性, 且当剪切应变应用对数坐标 (\lg) 表示时, 剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律可以表示为带有 2 个拐点的反 S 型曲线, 同时, 利用式 (1) 对其进行很好地模拟; 两类模型计算结果的规律性是相似的, 采用小应变模型所得到的最大下沉位移符合工程实际, 且横向沉降槽的宽度也能符合现场实测, 即能够适当地解决采用一般模型所得到的最大下沉位移合理, 而横向沉降槽的宽度过宽, 或者横向沉降槽宽度合理, 而最大下沉位移过小, 两者间存在对立的问题。通过计算结果对比进一步验证了考虑小应变条件下土体特性的必要性以及二次开发所得到的模型的合理性与可适用性。

关 键 词: 小应变; 二次开发; 高模量; 非线性; 横向沉降槽

中图分类号: U 455

文献标识码: A

Analysis of tunneling-induced traverse settler under small strain

ZHANG Pei-sen^{1,2,3}, SHI Jian-yong², YAN Wei^{1,3}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;

2. MOE Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control of Education Ministry, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: The soil properties under small strain are tested through advanced stress path triaxial test system (STDTTS+UNSAT) equipped with high precision local displacement tensor. Using three dimensional numerical simulations, the influence of tunneling on traverse settler was studied by the models of small strain and Mohr-Coulomb separately. Some conclusions are drawn. Firstly, there is high modulus of soil under small strain and modulus degrades with the increase of strain. When logarithm coordinates are applied to describe shear strain, the rule of shear modulus decaying with shear strain can be expressed by reversed S-shaped curve with two inflexion points; and the function of the curve is deduced. Secondly, rules of the results by both models are similar. Finally, both the maximum subsidence displacement and the width of traverse settler by using small strain model are accorded with practical project. While there is an incompatible problem by using the common models, that is, only the maximum subsidence displacement or the width of traverse settler is reasonable. The comparative analysis is made to validate the indispensability of small strain consideration, as well as the reasonability and feasibility of the second development model.

Key words: small strain; second development; high modulus; nonlinearity; traverse settler

1 引 言

随着城市建设的高速发展, 地下空间资源越来越紧张, 地面构筑物及地下管线越来越密集, 正确预测城市地下工程施工对周围环境及已有构筑物的

影响显得异常重要^[1-3]。尽管目前地下工程施工技术日趋成熟, 但其理论研究明显滞后于工程实践, 施工大多仍依赖于经验, 因此, 近年来国内外学者逐步开展针对城市地下工程施工引起地表变形问题的研究。璩继立等^[4]根据某区间隧道现场实测资料,

收稿日期: 2010-02-25

基金项目: 中国博士后基金资助项目 (No. 20090461257); 山东科技大学春蕾计划项目 (No. 2009AZZ180); 中国教育部博士点新教师基金项目资助 (No. 20093718120001); 山东科技大学科研创新团队支持技术项目 (No. 2010KYTD106)

第一作者简介: 张培森, 男, 1977 年生, 工学博士, 主要从事地下空间开发与利用及数值计算等教学及科研工作。E-mail: peisen_sky@163.com

分析了埋深对地表沉降槽的形状、影响范围、宽度系数及最大沉降量出现位置的影响；张云等^[5]采用等代层概念对盾构施工过程中的盾尾空隙大小、注浆充填密实程度、隧道周围土体的扰动程度及范围对地表沉降影响程度进行分析；李曙光等^[6]结合现场实测对盾构施工工序、地下水位、土仓压力和注浆等因素对地表变形进行了模拟分析，得出横向地表沉降主要分布在隧道中心线两侧各 5~7 m 的范围内，地表距中心线 20 m 以外几乎不受影响；Manuel Melis 等^[7]在系统地总结不同经验公式的基础上，采用多种方法分析了 Madrid 地铁延伸段工程施工对地表位移的影响。以上研究都没有考虑到小应变条件下的土体特性，而现场大量实测数据表明，实际工程诸如地铁、地基变形以及基坑等中岩土体应变都很小，主要集中在 0.01%~0.3% 之间^[8-11]，土体在小应变条件下表现出高模量、非线性以及模量衰减性^[12-15]。Rowe 和 Lee^[16-17]指出，利用各向同性弹性-理想塑性土体本构模型计算得到的地面沉降槽宽度比实测数据宽得多，因此，如何反映小应变下土体的固有特性对能否正确预测地下工程施工对周围环境的影响起到至关重要的作用。

2 小应变条件下土体模量变化的试验研究

2.1 试验仪器

本次采用的试验仪器为英国 GDS 公司生产的 STDTS+ UNSAT (7kN/1700kPa) 型号的高级应力路径三轴测试系统，与常规三轴仪相比，该系统的主要优点有：配备高精度局部霍尔效应传感器（1 个径向、2 个轴向），即通过将常规三轴试验仪器中采用压力室外部位移传感器量测土样变形的办法，改变为在压力室内部将传感器直接附着于试样上的方法来测量试样的局部变形，消除了试验时由于试样的端部约束、加载系统自身和试样与压力传感器的不良接触等产生的误差，以达到更准确研究小变形条件下土体的力学行为的目的；配备先进的压力与体积控制器，使传统的三轴测试实现了加载与量测的自动化；荷载传感器内置保证了垂直和水平应力变化的复杂荷载能同时施加，可以模拟实际的地质、施工和现场条件。该系统无论是自动化程度、测量精度还是控制方式都有常规三轴仪无法比拟的优势，可以实现低频周期荷载、高级应力路径、 K_0 固结及常规三轴试验。

2.2 试样制备

试验用土为粉质黏土，基本物理指标：天然含

水率为 26.4%，孔隙比为 0.766，土粒相对密度为 2.72，液限为 31.4%，液性指数为 0.60，干密度为 1.54 g/cm³，塑限为 18.8%。

试验在恒湿及恒温条件下进行。根据设计的试样干密度算出一个土样所需的湿土重，等分 5 份，在试样模中分层压实，每层高度用套在试样模活塞上的钢环控制。试样的直径和高度分别为 39.1 mm 和 80 mm，控制初始含水率和干密度分别为 12% 和 1.54 g/cm³。

2.3 试验结论

本次试验共做了 10 个不同应力路径，具体试验路径如图 1 所示。

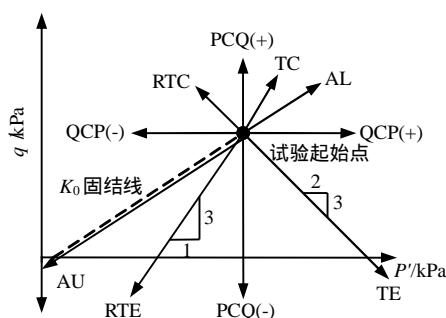


图 1 初始应力状态下试验应力路径示意图

Fig.1 The sketch of trial stress paths under initial stress state

由试验结果分析可知，土体在小应变条件下剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律是一致的，故图 2 中仅给出某一路径下土体在小应变条件下剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律，从图 2 中可以看出，在小应变条件下土体表现出很高的剪切模量，由于试验仪器精度的限制，采用常规三轴仪对土体进行试验分析时是难以发现此现象^[18-19]。为了更加清晰地描述试验结果，剪切应变应用对数坐标 (lg) 表示，当剪切应变处于 0.001%~1% 之间，剪切模量表现出高度非线性特性。同时，剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律可以表示为带有 2 个拐点的反 S 型曲线^[20]，经分析得出剪切模量与剪切应变之间存在的函数关系为

$$G = G_{\max}^0 \frac{1}{1 + a \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sref}} \right)^b} \quad (1)$$

式中： G_{\max}^0 为剪切模量的初始值， $G_{\max}^0/p_r = A(p'/p_r)^n$ ， A 、 n 均为无单位土体参数，分别由土体的自然状态及当前应变水平确定； p_r 为参考应力，通常取 1 kPa； $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$ ； ε_s 为剪切

应变, $\varepsilon_s = 2(\varepsilon_a - \varepsilon_r)/3$, ε_a 为轴向应变, ε_r 为径向应变; a 、 b 分别为土体常数, 由试验确定; ε_{sref} 为参考剪切应变, 具体值由土体性质决定, 针对本次试验参考剪切应变 ε_{sref} 的大小为当前剪切模量为最大剪切模量 G_{max}^0 的 10% 时所对应的剪切应变值。

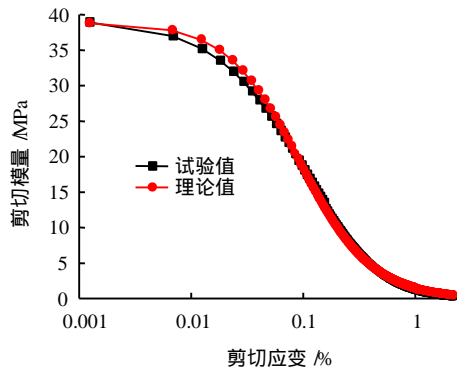


图 2 理论与试验值对比关系

Fig.2 Contrast relationship between theoretical and examination values

图 2 中, a 与 b 取值分别为 9.2 及 1.34, 拟合相关系数为 0.997, 从对比结果可见, 式 (1) 可以很好地反映剪切模量随剪切应变增加而衰减的变化规律。

3 计算条件

3.1 几何模型

根据某隧道的实际情况, 上覆土体的平均厚度取为 17.7 m。为消除边界影响, 计算模型的几何尺寸为: 走向 (Y) 取 160.0 m, 深度 (Z) 取 140.0 m, 倾斜方向 (X) 取 124.0 m, 隧道半径 (R) 取 1.0 m, 地层损失率为 3%。局部计算范围和网格划分详见图 3 模型共包括 62 080 个单元以及 66 174 个节点。

3.2 计算模型

由上述的试验结果可知, 土体在小应变条件下剪切模量随剪切应变增加而衰减, 但在 FLAC3D 中, 土体的剪切模量在计算过程中都是保持不变的, 因此无法反映小应变条件下的土体特性。本文把可以考虑小应变条件下土体的模型称为 小应变模型, 利用 Visual C++ 6.0 根据 FLAC3D 中提供的 2 次开发平台进行 2 次开发, 为了验证所开发的小应变模型的正确性, 与固有的 Mohr (摩尔-库仑模型) 模型进行计算对比。

为了更加真实地反映土体与衬砌之间的共同作用对地表变形的影响, 对衬砌采用壳单元 (Shell 单元), 对土体与衬砌结构之间的接触面采用 Interface 单元。为了更好地反映工程实际, 本文同时考虑了

盾构施工的动态推进过程及注浆的密实程度对地表下沉位移的影响。

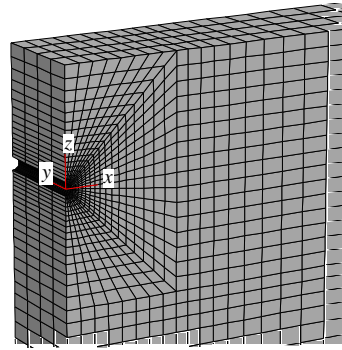


图 3 计算模型示意图

Fig.3 Sketch of 3D model

3.3 计算参数

为了避免多层土体相互交叉影响, 更好地分析小应变模型对隧道施工引起地表下沉影响, 把计算区域内的土体作为单一介质, 具体考虑小应变条件下土体特性的基本参数如表 1 所列。

表 1 土体基本物理参数

Table 1 Physical parameters of soil

剪切模量	体积模量	黏聚力	内摩擦角	密度	小应变参数		
G/MPa	B/MPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	a	b	ε_{sref}
40	70	22	30	1.90	9.2	1.34	0.4

3.4 计算方案

本次计算分析中采用 2 个计算模型, 即小应变模型与摩尔-库仑模型, 共设计 5 个计算方案。方案 1 为利用小应变模型及表 1 中土体参数进行计算分析, 方案 2~4 都采用摩尔-库仑模型, 同时其剪切模量及体积模量分别为表 1 中相应值的 1/5、1/10、1/20 以及 1/30。

4 计算结果与分析

4.1 周围土体位移分析

图 4 为采用小应变模型的计算结果, 图 5 为剪切模量及体积模量同时为表 1 中相应值的 1/20 条件下采用摩尔-库仑模型所得到的计算结果。比较图 4、5 可以看出, 两种模型的计算差别仅在于所得到的隧道周围土体的下沉位移值不同, 比较而言, 采用小应变模型得到的下沉位移值大于采用摩尔-库仑模型所得到的, 但其规律性是一致的, 即在隧道上方土体表现为下沉, 越靠近隧道轴线, 沉降量越大, 而下部土体表现出上鼓现象, 同时距离隧道轴线越远, 上浮值越小。

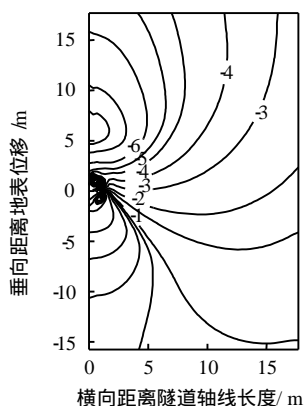


图4 小应变模型的计算结果

Fig.4 Computed results of small strain model

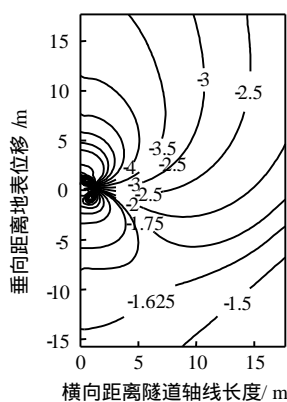


图5 摩尔-库伦模型计算结果

Fig.5 Computed results of Mohr-Coulomb model

4.2 横向地表沉降槽分析

图6为采用小应变模型与摩尔-库伦模型计算得到的地表下沉位移的计算结果。从图中可以看出,采用摩尔-库伦模型时,随着剪切模量的减小,其最大下沉位移以及横向地表沉降槽的宽度都逐渐增大,但相对而言,小应变模型所得到的地表最大下沉位移最大,横向地表沉降槽的宽度相对较窄。通过计算得知,5个方案所得到的横向地表沉降槽的体积与隧道开挖体积的比值分别为3.76%、2.11%、2.81%、3.51%和4.16%。Palmer对Thunder Bay隧道一处的监测结果可知,沉降槽的体积为隧道开挖体积的5.0%~7.5%;Mair总结钻孔隧道引起地表沉降位移后给出,当采用土压平衡式或泥水加压式盾构修建隧道时软黏土中地层损失率在1%~2%之间;李曙光等^[6]通过现场实测给出地表距中心线20 m以外几乎不受影响。根据以上研究结论以及图6可知,在采用摩尔-库伦模型对隧道施工引起地表下沉位移进行分析时,为了得到合适的最大下沉位移值,就必须降低土体参数值,但同时带来横向沉降槽的宽度增加,最终导致横向地表沉降槽的体积与

隧道开挖体积的比值以及地层损失率较大,而不符合工程实际;而采用可以考虑小应变条件下土体模量随应变增加而衰减及高模量的本文模型,在相同的地铁施工条件下得到的计算结果不仅地表最大沉降值较大,同时横向沉降槽宽度也相对较小。

为了进一步分析不同模型对横向沉降槽形态的影响,采用归一化方式进行了分析,图7为不同模型计算结果及实测数据的地表最大沉降归一化比较,其中采用的实测数据为伦敦Green Park地铁的实测数据,该地铁的地层损失率为1.2%,周围土体的部分力学参数分别为 $E_u = 10 \text{ MPa}$, $c_u = 40 \text{ kPa}$, $K_0 = 1$, $\gamma = 1.80 \text{ g/cm}^3$,限于篇幅,具体参见文献[21-22]。

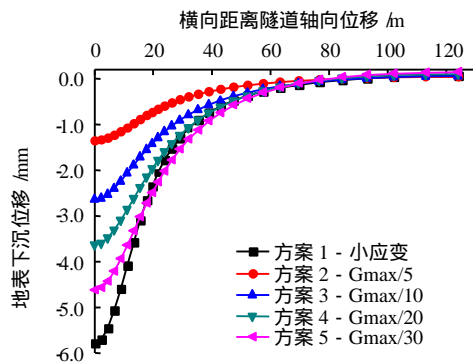


图6 小应变模型与摩尔-库伦模型地表下沉位移的计算结果对比

Fig.6 Comparison of surface subsidence computed by small strain model and Mohr-Coulomb model

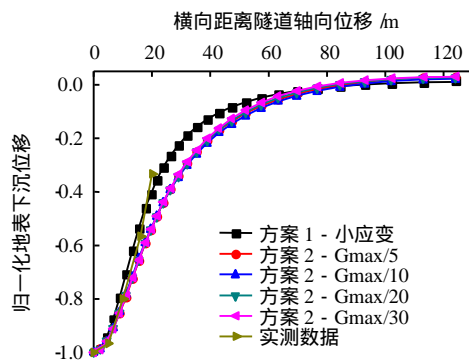


图7 小应变模型与摩尔-库伦模型归一化最大地表沉降与实测数据的关系

Fig.7 Comparison of surface subsidence computed by small strain model and Mohr-Coulomb model

从图7可以看出,采用摩尔-库伦模型时,无论其相应的模量如何变化,横向沉降槽的归一化形态都是一致的,与小应变模型及实测数据比较存在共同的特性,即横向沉降槽宽度存在明显的增大趋势。从图6、7可以综合看出,采用可以考虑小应变条件

下土体模量随应变增加而衰减及高模量的本文模型而得到的计算结果, 不仅地表最大沉降值较大, 而且归一化的横向沉降槽形态也比较符合工程实际, 因此, 验证了考虑小应变条件下土体特性的合理性与必要性, 同时也进一步验证了本文模型的可适用性及有效性。

5 结 论

(1) 在小应变条件下土体表现出高模量以及模量随应变增加而衰减的特性, 且当剪切应变应用对数坐标 (\lg) 表示时, 剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律可以表示为带有 2 个拐点的反 S 型曲线, 同时可以利用式 (1) 对其很好的反映。

(2) 采用小应变模型与摩尔-库仑模型得到的隧道开挖引起的地表变形规律是一致的, 验证了 2 次开发所得到的模型的合理性及可适用性。

(3) 采用小应变模型计算, 不仅最大下沉位移符合工程实际, 横向沉降槽的宽度也能符合现场实测, 即能够适当地解决采用一般模型所得到的最大下沉位移合理, 而横向沉降槽的宽度过宽; 或者横向沉降槽宽度合理, 而最大下沉位移过小, 两者间存在对立的问题。进一步验证了考虑小应变条件下土体特性的合理性、必要性以及重要的工程实用性。

参 考 文 献

- [1] SOU S L, HSIEN C L. Neural-network-based regression model of ground surface settlement induced by deep excavation[J]. **Automation in Construction**, 2004, 13: 279 - 289.
- [2] 缪林昌, 王非, 吕伟华. 城市地铁隧道施工引起的地面沉降[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 293 - 297.
MIAO Lin-chang, WANG Fei, LÜ Wei-hua. Ground surface settlement due to urban tunnel construction[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2008, 38(2): 293 - 297.
- [3] 廖少明, 余炎, 白廷辉, 等. 盾构隧道叠交施工引起的土层位移场分布规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 485 - 490.
LIAO Shao-ming, YU Yan, BAI Ting-hui, et al. Distribution of ground displacement field owing to two overlapped shield tunneling interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(4): 485 - 490.
- [4] 璩继立, 许英姿. 盾构施工引起的地表横向沉降槽分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 313 - 322.
QU Ji-li, XU Ying-zi. Analysis of ground traverse settlement trough caused by shield construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 313 - 322.
- [5] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388 - 392.
ZHANG Yun, YIN Zong-ze, XU Yong-fu. Analysis of three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 388 - 392.
- [6] 李曙光, 方理刚, 赵丹. 盾构法地铁隧道施工引起的地表变形分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 87 - 92.
LI Shu-guang, FANG Li-gang, ZHAO Dan. Analysis on the ground deformation of subway tunnel induced by shield construction[J]. **China Rail Way Science**, 2006, 27(5): 87 - 92.
- [7] MANUEL M, LIUIS M, JOSE MR. Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunneling in the Madrid Metro extension[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39: 1273 - 1287.
- [8] BURLAND J B. Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1989, 26: 499 - 516.
- [9] PUZIRIN A M, BURLAND J B. Non-linear model of small-strain behavior of soils[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(2): 217 - 233.
- [10] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: Application to tunnels and deep excavations[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers. [S. l.]: [s. n.], 1993: 27 - 41.
- [11] 刘元雪, 施建勇, 许江, 等. 盾构法隧道施工数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 239 - 243.
LIU Yuan-xue, SHI Jian-yong, XU Jiang, et al. Numerical simulation of excavation of shield tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 239 - 243.
- [12] PUZIRIN A M, BURLAND J B. A logarithmic stress-strain function for rocks and soils[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(1): 157 - 164.
- [13] LEHANE B, COSGROVE E. Applying triaxial compression stiffness data to settlement prediction of shallow foundations on cohesionless soil[J]. **Geotechnical Engineering**, 2000, 143: 191 - 200.
- [14] ATKINSON J H. Non-linear soil stiffness in routine design[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(5): 487 - 508.

- [15] 于小军, 施建勇, 徐杨斌. 考虑各向异性的软黏土扰动状态本构模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3307 - 3312.
YU Xiao-jun, SHI Jian-yong, XU Yang-bin. Modelling disturbed state and anisotropy of natural soft clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3307 - 3312.
- [16] LEE K M, ROWE R K. Effects of undrained strength anisotropy on surface subsidences induced by the construction of shallow tunnels[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1989, 26: 279 - 291.
- [17] LEE K M, ROWE R K. Deformations caused by surface loading and tunnelling: The role of elastic anisotropy[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(1): 125 - 140.
- [18] WANG Y, NG C W W. Effects of stress paths on the small strain stiffness of completely decomposed granite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42: 1200 - 1211.
- [19] CALLISTO L, RAMPELLO S. Shear strength and small strain stiffness of a natural clay under general stress conditions[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(8): 547 - 560.
- [20] 张培森, 施建勇. 小应变原岩状态下应力路径旋转对剪切模量影响[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 379 - 383.
ZHANG Pei-sen, SHI Jian-yong. Effect of stress path circumgyration on shear modulus under small strain and initial stress state[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 379 - 383.
- [21] ATTEWELL P B, FARMER I W. Ground deformations resulting from shield tunneling in London clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1974, 11: 380 - 395.
- [22] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 1998, 124(9): 846 - 856.

上接第 402 页

参 考 文 献

- [1] OCHIAI H, OKADA Y, FURUYA G, et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. **Landslides**, 2004, 1(3): 211 - 219.
- [2] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure process in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator[J]. **Landslides**, 2004, 1(4): 277 - 288.
- [3] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732 - 736.
WU Jun-jie, WANG Cheng-hua, LI Guang-xin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 732 - 736.
- [4] 油新华, 李晓. 国外离心模型试验技术在边坡工程中的应用现状与展望[J]. 工程地质学报, 2000, 8(4): 442 - 445.
YOU Xin-hua, LI Xiao. Current status and prospect of application of centrifugal model test to slope engineering[J]. **J. Eng. Geology**, 2000, 8(4): 442 - 445.
- [5] WILLIAM H. Craig. Centrifuge modeling for site-specific prototypes[C]//Centrifuge'88. Rotterdam: Balkema, 1988: 485 - 494.
- [6] MYOUNG MO KIM, HON YIM KO. Centrifugal testing of soil slope models[J]. **Tran. Res. Rec.**, 1982, 872: 7 - 14.
- [7] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机制离心模型研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 64 - 68.
YAO Yu-chun, YAO Ling-kan, YUAN Bi-yu. Analysis of a centrifugal model of slope damage mechanism during rainfall[J]. **China Railway Science**, 2004, 25(4): 64 - 68.
- [8] 徐光明, 王国利, 顾行文, 等. 雨水入参与膨胀性土边坡稳定性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 270 - 273.
XU Guang-ming, WANG Guo-li, GU Xing-wen, et al. Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(2): 270 - 273.
- [9] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 903 - 910.
LIU Jun-xin, LIU Yu-tian, Hu Qi-jun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 903 - 910.
- [10] ZHANG Ga, HU Yun, ZHANG Jian-min. New image-analysis-based displacement-measurement system for centrifuge modeling tests[J]. **Measurement**, 2009, 42(1): 87 - 96.