

DOI: 10.11779/CJGE201403021

回填软土中管道上浮力测试及计算方法

倪伟杰^{1,2}, 朱斌^{1,2}, 陈仁朋^{1,2}, 周建^{1,2}, 黄博^{1,2}

(1. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学土木工程系, 浙江 杭州 310058)

摘要: 管道已成为中国油气等流体输送的重要方式, 在沿海软土地区中浅埋管道上浮事故屡有发生, 严重威胁着能源生命线工程的安全。研发了一套回填软土中浅埋管道上浮力测试的装置及方法, 针对常用输气管道开展了足尺模型试验, 获得了不同扰动程度软土中的管-土相互作用及管道上浮力, 揭示了回填软土中管道的上浮机理。基于多批次不同扰动程度软土中管道上浮力的测试结果, 提出了与回填软土不排水剪强度相关的管道上浮力计算方法。

关键词: 模型试验; 管道; 浮力; 软土

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0569-05

作者简介: 倪伟杰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事管道工程等方面的研究。E-mail: niweijie89@163.com。

Tests and methods for buoyancy of pipelines in backfill soft clay

NI Wei-jie^{1,2}, ZHU Bin^{1,2}, CHEN Ren-peng^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, HUANG Bo^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The pipeline has become an important way for the transmission of oil, gas and other fluid in China. However, floating accidents of shallow pipelines often occur in coastal soft clay areas, which seriously threaten the security of energy lifeline engineering. A set of test devices and methods for buoyancy of pipeline are proposed. Full scale model tests on commonly-used gas pipeline are carried out to get pipe-soil interaction and pipeline buoyancy in soft clay with different disturbance degrees, and then the mechanism of pipeline floating is revealed. Furthermore, a calculation method for prediction of buoyancy of pipelines, which is related to the undrained shear strength of backfill soft clay, is proposed based on the test results of buoyancy of pipelines in several batches of backfill soft clay with different disturbance degrees.

Key words: model test; pipeline; buoyancy; soft clay

0 引言

管道由于运输量大、迅速、连续、经济、平稳、安全、可靠以及占地少、投资少、费用低等特点, 已成为石油、天然气等流体输送的重要方式。我国沿海经济发达地区已初步建成完善的油气输送网络。这些地区广泛分布软黏土, 地基地下水位高, 天然气等输送介质重度小于水因而管道受到地下水浮力作用经常产生上浮现象, 严重威胁着能源生命线的安全。我国现有规范采用阿基米德定律计算饱和软土中管道的上浮力, 与流塑状软土中管道的实际上浮力可能存在较大差别, 是导致管道上浮事故屡次发生的重要原因之一。

地下结构上浮力计算是地下工程设计中的一个较重要课题^[1-3]。李广信等^[4]认为物体所受地下水浮力应通过渗流分析确定。部分学者^[5-8]认为黏性土中浮力应进行折减。然而, 崔岩等^[9-10]及向科等^[11]通过黏土和

砂土中的模型试验认为水浮力不应进行折减。实际工程中土层性质和地下水赋存形式多样, 饱和土中物体的上浮力可能也存在较大差异^[12]。

以上研究所针对的地基土是强度相对较好的黏性土或无黏性土。软土在管道开挖回填施工后, 受到了较大的扰动, 往往呈流塑状, 强度大幅降低, 且强度在短期内难以恢复。此外, 回填软土由大小不一的块状土组成, 其整体力学性能也不如均匀软土地基。因而, 需对回填软土中浅埋管道的上浮力开展研究, 为管道设计提供科学支撑。

通过足尺模型试验测试回填软土中管道的上浮力, 并获得管-土相互作用力, 揭示回填软土中管道的上浮机理。最终提出回填软土中管道的合理上浮力

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179169, 51225804, U1234204, 51178427); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012FZA019)
收稿日期: 2013-04-07

计算公式。

1 试验方案

1.1 试验装置

影响管道上浮力的因素很多，仅针对软土地基中开挖回填法施工的浅埋管道。管道模型试验图如图 1 和 2 所示，模型槽有效尺寸为 2.5 m(长)×1.195 m(宽)×3 m(高)。模型槽前侧面为有机玻璃，可观测管道与土体的变形状况，其余侧面均为 5 mm 厚的钢板，其中右侧面可拆卸，以便于土体的填筑和开挖。

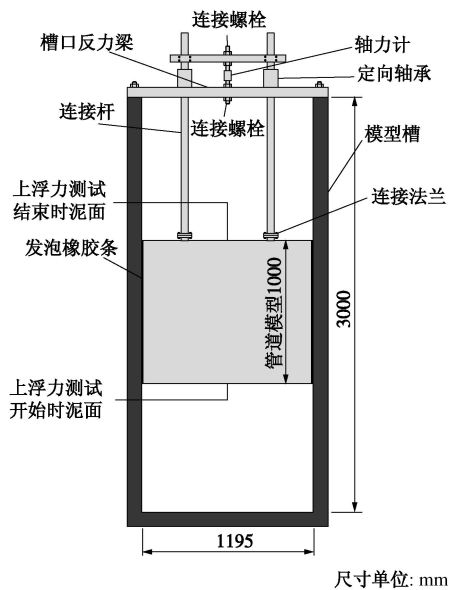


图 1 模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model tests



(a) 反力架



(b) 管道模型

图 2 试验布置图

Fig. 2 Test arrangement

管道模型为一有缝钢管，直径 1 m、长 1.191 m、壁厚 0.005 m，对应于原型 1.016 m 直径的输气管道。模型管道两端用钢板焊接密封。管道模型两侧设置环状发泡橡胶条，以减小管道侧壁与模型槽侧壁之间的摩擦力。管道模型通过连接法兰与两根连接杆相接，再通过连接横梁接轴力计。试验过程中，通过分别测试地基表面位于管道底部及管道顶面时的轴力计值，再取其差值得到管道在回填软土中的上浮力。管道正中截面上安装有 8 个微型压力传感器 (CYG712)，均匀布置，如图 3 所示，用于测试管道表面的水土压力。微型压力传感器首先密封内嵌在一环氧树脂块中 (见图 4)，该环氧树脂块表面弧度与管道表面弧度一致，再将该环氧树脂块嵌入管道预留孔洞内，并保证管道、环氧树脂块和微型压力传感器的表面一致。

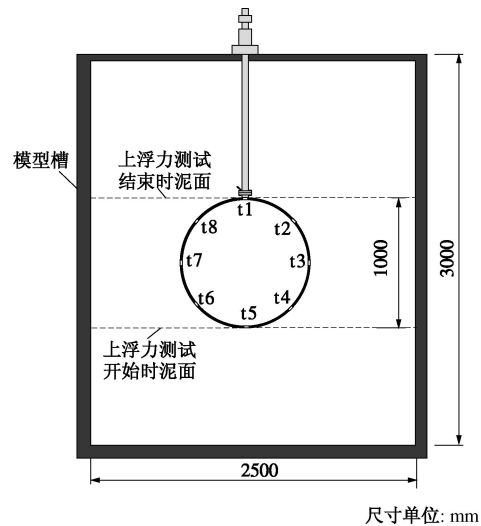


图 3 压力计布置图

Fig. 3 Arrangement of pressure meters



图 4 压力计实物图

Fig. 4 Photo of pressure meter

1.2 地基土制备

如表 1 所示，模型试验地基土分别取自杭州 3 个不同的软土基坑，共 3 个批次 (S1T1-S1T3、S2T1-S2T4 及 S3T1-S3T3)，每批次地基土在模型槽中反复填筑、试验和开挖 3~4 次，使得软土的扰动程度不断加剧、

强度不断降低、流动性也不断增强, 以实现在不同强度回填软土地基中的管道上浮试验。块状软土地基在水下进行分层填筑, 每层填土厚度约 0.3 m, 填筑完成后采用平均 15 kPa 压重消除大孔隙, 槽中水位最终高于模型地基表面 0.02 m。

每次试验在上浮力测试完成后, 立即进行十字板剪切试验, 获得地基土的不排水剪强度参数。十字板剪切试验孔位布置如图 5 所示。以 S3T3 试验为例, 其十字板剪切试验结果如图 6 所示, 由于块状软土回填地基均匀性差, 取管顶至管底之间所有测试点的平均值作为该次试验地基土的不排水剪强度值。

表 1 土样基本物理和力学性质

Table 1 Basic physical and mechanical properties of soils								
试验 编号	密度 (g·cm ⁻³)	含水 率/%	十字板 试验强 度/kPa	无侧限 抗压 试验强 度/kPa	塑 限 /%	液 限 /%	塑性 指数	液性 指数
S1T1	—	—	6.9	—	26	48	22	—
S1T2	—	—	5.3	—	26	48	22	—
S1T3	1.63	56.8	3.6	2.2	26	48	22	1.4
S2T1	1.82	41.3	12.0	8.2	24	43	19	0.91
S2T2	—	—	6.0	—	24	43	19	—
S2T3	—	—	3.9	—	24	43	19	—
S2T4	1.73	50.9	2.9	2.6	24	43	19	1.42
S3T1	1.78	45.3	13.0	10.3	26	51	25	0.77
S3T2	—	—	7.0	—	26	51	25	—
S3T3	—	—	3.8	—	26	51	25	—

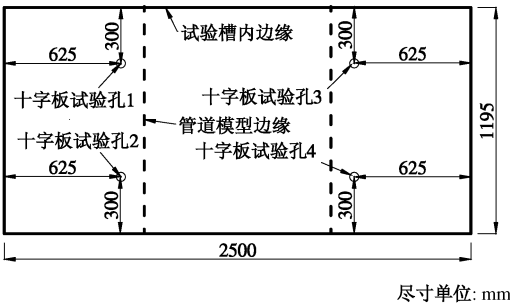


图 5 十字板剪切试验孔位布置图

Fig. 5 Pore positions of vane shear tests

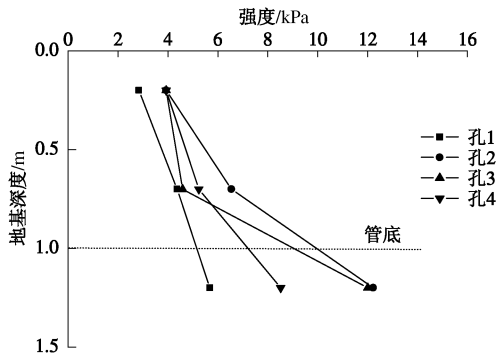


图 6 S3T3 十字板剪切试验结果

Fig. 6 Results of vane shear tests of S3T3

1.3 试验内容

如表 1 所示, 共针对 3 个不同批次的软土, 获得了 10 个不同强度的回填软土地基条件, 进行了相应的管道上浮力测试。软土基本物理力学性质如表 1 所示。每组试验的具体过程如下:

(1) 先填筑底层土并压实, 用来模拟开挖沟槽槽底土层, 并且在本批次软土的试验中不再开挖该部分土层。

(2) 吊装模型管道, 使模型管道底与土层表面处于同一标高, 并安装相应测试装置, 具体如图 1~3 所示, 开始记录轴力计读数。

(3) 继续填土至泥面与模型管道顶部标高一致, 结束管道上浮力的测试。

2 试验结果

2.1 管道水浮力试验

在回填软土中管道上浮力试验之前, 先进行水浮力测试, 以标定管道所受水浮力, 并检验试验装置和传感器的性能。首先, 初始水位位于管道模型底部; 然后, 往模型槽内加水, 提升水位至管道模型顶部以上。监测轴力计读数如图 7 所示。测试管道所受水浮力为 9.01 kN, 按阿基米德定律计算的理论值为 9.16 kN, 两者误差仅为 1.6%, 可能与连接杆与定向轴承之间的摩擦力有关。

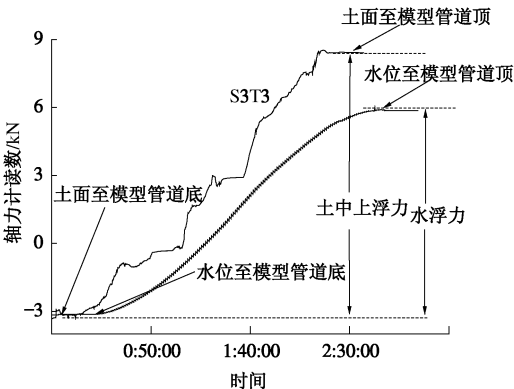


图 7 S3T3 试验轴力计读数

Fig. 7 Readings of axial force meters of S3T3

2.2 回填软土中管道上浮力试验

回填软土中管道上浮力与水浮力之间存在显著差别。以软土强度相对较低的 S3T3 试验为例 (见图 7), 其上浮力较水浮力大 29.4%, 若采用我国目前相关规范进行回填软土中管道抗上浮验算将偏不安全。将所有 10 组实验的上浮力测试结果进行无量纲化, 得到管道无量纲上浮力与软土无量纲十字板抗剪强度之间的关系如图 8 所示。当软土十字板抗剪强度较大时, 回填软土中管道的上浮力实测值小于按阿基米德定律计算的水浮力值; 反之, 前者大于后者。由图 8 可以

发现，管道无量纲上浮力与软土无量纲十字板抗剪强度近似呈线性关系。建议回填软土中管道上浮力计算公式为

$$\frac{F_s}{\gamma_w \pi D^2 / 4} = 0.25 \gamma' D / c_u + 0.78 \quad , \quad (1)$$

若 $\frac{F_s}{\gamma_w \pi D^2 / 4} < 1$ ，取 $\frac{F_s}{\gamma_w \pi D^2 / 4} = 1$ ；若 $\frac{F_s}{\gamma_w \pi D^2 / 4} > \gamma_{sat} / \gamma_w$ ，取 $\frac{F_s}{\gamma_w \pi D^2 / 4} = \gamma_{sat} / \gamma_w$ 。式中， F_s 为单位长度管段在土中所受上浮力， c_u 为扰动后当前软土的十字板抗剪强度， γ' 为扰动后当前软土的浮重度， γ_w 为水的重度， D 为管道外径。

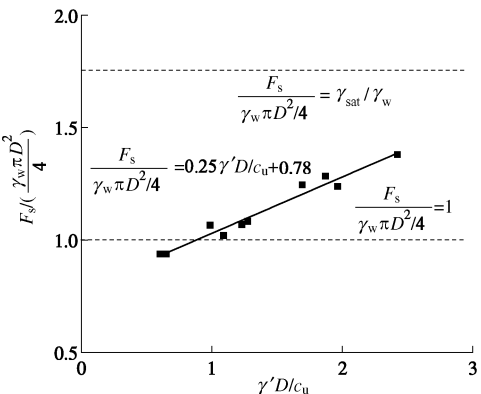


图 8 上浮力与强度无量纲化关系

Fig. 8 Dimensionless relationship between buoyancy and strength

2.3 回填软土中管周压力

以 S3T2 试验为例，在模型地基填筑过程中管周土压力随时间变化曲线如图 9 所示。S3T1-S3T3 试验中地基填筑完成后的管周土压力及理论静水压力如图 10 和 11 所示。对于不同强度软土中的管道，其表面土压力分布有显著差异。软土强度较高的 S3T1 试验的管底最大压力值基本与水压力值相同，也就是说管底土体能够自稳，对管道基本无向上土压力作用。而软土强度较低的 S3T3 试验则明显不同，管道下表面压力明显大于水压力，说明管道受到底部土体向上隆起的作用力，即管道所受的上浮力值不仅仅为水浮力。由于 S3T3 试验中软土的流塑性强，管周土压力随深度近似呈线性关系（见图 11）。将图 10 所示的管周土压力分解至竖向力方向，再沿圆周作线性叠加，可获得管道的竖向应力合力，与实测管道上浮力相比误差在 10% 以内。

3 管道上浮力作用机理

地下水位以下的浅埋管道，受到上浮力的作用，可能会出现上浮现象。对于一般浅埋管道，若地下水位位于管底以下，则管周只受到土压力作用。当地下

水位升高至管顶以上时，由于上浮力作用管道将产生向上位移趋势，即管道与底部土体有脱离的趋势。

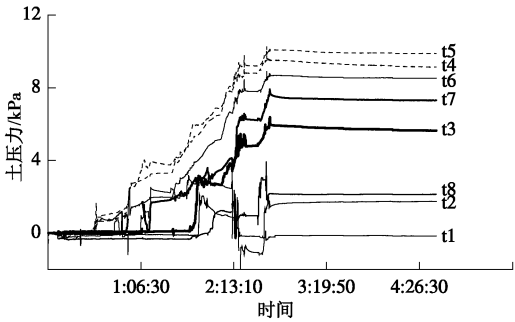


图 9 S3T2 试验压力计读数

Fig. 9 Readings of pressure meters of S3T2

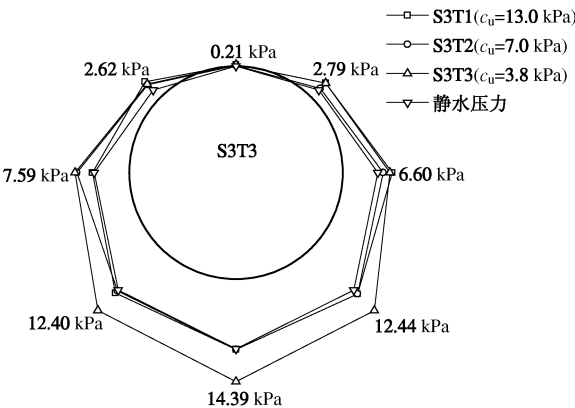


图 10 管道模型表面压力分布图

Fig. 10 Pressure distribution around pipeline

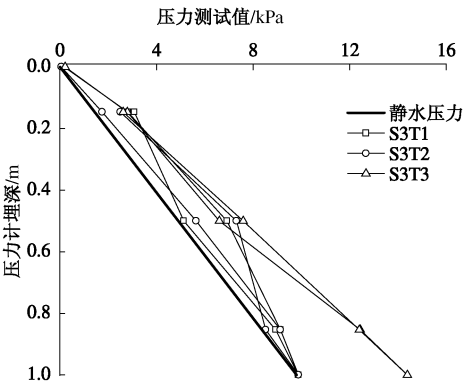


图 11 管道模型表面压力随埋深变化

Fig. 11 Variation of pressure around pipeline with depth

对于强度较高的地基土，管道底部土体因抗剪强度和模量较大，能保持稳定，则管道底部有效土压力减小甚至为零。此种情况下，管道若上浮，其底部土体往往能够自稳并与管道脱离，即管道下表面压力最终减小为孔隙水压力，其上浮力可考虑为水浮力。

但当地基土强度较低时，尤其是流塑性大、强度很低的软土，管道底部土体能够随管道一起流动，即管底有效土压力并不会降低太多。最极端的例子是，当结构性很强的回填软土充分扰动后呈泥浆状态时，应按泥浆重度而非水重度计算上浮力。

试验结果表明,地基土强度对管土相互作用影响明显。强度较高地基土中管道底部压力与静水压力接近,即其有效土压力基本为零,但随着地基土强度的降低,管道底部有效土压力增加,从而对管道产生水浮力之外的向上作用力。因此,对于管底土体往往不能自稳的回填软土地基中的管道,其上浮力并不是简单的水浮力,应考虑因管底土体对管道向上作用力而引起的额外上浮力。

4 结论与建议

通过开展一系列足尺模型试验研究了不同强度回填软土中管土相互作用与管道上浮力,得出如下结论与建议:

(1) 强度很低的扰动回填软土中,实测管道底部表面的压力值明显大于静水压力值,说明管道底部受到了水压力以外的有效土压力作用。

(2) 强度很低的回填软土中,管道实测上浮力明显大于水浮力,按目前国内外规范中管道水浮力计算方法进行回填软土地基中的管道抗上浮验算偏不安全。

(3) 回填软土中管道上浮力与软土强度密切相关。基于试验结果,拟合得到了软土回填至管顶时的管道上浮力计算公式。

(4) 影响软土地基中管道上浮力的因素甚多,如埋深、填土方式等;另外,地基对管道的抗浮承载力也是决定管道是否上浮的另一重要因素。这些问题均需开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 梅国雄, 宋林辉, 宰金珉. 地下水浮力折减试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(9): 1476 - 1480. (MEI Guo-xiong, SONG Lin-hui, ZAI Jin-min. Experimental study on reduction of groundwater buoyancy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1476 - 1480. (in Chinese))
- [2] 崔红军, 陆士强. 基坑围护结构承受的水压力计算理论的试验验证和分析[J]. 武汉大学学报, 2001, **34**(1): 45 - 48. (CUI Hong-jun, LU Shi-qiang. Test verification and analysis of calculation theory of water pressure on bracing construction of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2001, **34**(1): 45 - 48. (in Chinese))
- [3] 张彬, 李广信, 杨俊峰. 地下水浮力作用机理模型试验设计与实施[J]. 岩土工程技术, 2006, **20**(3): 128 - 131. (ZHANG Bin, LI Guang-xin, YANG Jun-feng. The design and actualization for the model experiment on underground water uplift action mechanism[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006, **20**(3): 128 - 131. (in Chinese))
- [4] 李广信, 吴剑敏. 浮力计算与黏土中的有效应力原理[J]. 岩土工程技术, 2003(2): 63 - 66. (LI Guang-xin, WU Jian-min. Calculation of uplift pressure on underground construction and effective stress principle in clay[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(2): 63 - 66. (in Chinese))
- [5] 黄志仑. 关于地下建筑物的地下水扬力问题分析[J]. 岩土工程技术, 2002(5): 273 - 274. (HUANG Zhi-lun. Analysis of ground water's uplift pressure on underground construction[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002(5): 273 - 274. (in Chinese))
- [6] 张旷成, 丘建金. 关于抗浮设防水位及浮力计算问题的分析讨论[J]. 岩土工程技术, 2007, **21**(1): 15 - 20. (ZHANG Kuang-cheng, QIU Jian-jin. Analysis and discussion on water level for prevention of up-floating and calculation of uplift pressure[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, **21**(1): 15 - 20. (in Chinese))
- [7] 周朋飞. 城市复杂环境下地下水浮力作用机理试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006. (ZHOU Peng-fei. Groundwater uplift mechanism under complex urban environment[D]. Beijing: China Geologic University, 2006. (in Chinese))
- [8] 张乾, 宋林辉, 梅国雄. 黏土地基中的基础浮力模型试验[J]. 工程勘察, 2011(9): 37 - 41. (ZHANG Qian, SONG Lin-hui, MEI Guo-xiong. Model experiment on foundation buoyancy in clay[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011(9): 37 - 41. (in Chinese))
- [9] 崔岩, 崔京浩, 吴世红. 地下结构浮力模型试验研究[J]. 特种结构, 1999, **16**(1): 32 - 36. (CUI Yan, CUI Jing-hao, WU Shi-hong. Model test of underground structure buoyancy[J]. Special Structures, 1999, **16**(1): 32 - 36. (in Chinese))
- [10] 崔岩, 崔京浩, 吴世红, 等. 浅埋地下结构外水压折减系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(1): 82 - 84. (CUI Yan, CUI Jing-hao, WU Shi-hong, et al. Testing study of reduction factor for the pore water pressure of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(1): 82 - 84. (in Chinese))
- [11] 向科, 周顺华, 詹超. 浅埋地下结构浮力模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(3): 346 - 352. (XIANG Ke, ZHOU Shun-hua, ZHAN Chao. Model test study of buoyancy on shallow underground structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, **38**(3): 346 - 352. (in Chinese))
- [12] WONG I H. Methods of resisting hydrostatic uplift in substructures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, **16**(1): 77 - 86.