

# 盾构隧道施工期间土体沉降计算分析

刘阳<sup>1</sup>, 任青<sup>1</sup>, 喻孟初<sup>1</sup>, 颜超<sup>2</sup>, 马荣全<sup>3</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200433;  
3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135)

**摘要:** 对重塑饱和砾质黏土进行室内动三轴试验。综合考虑土体固结围压、循环荷载幅值、加载频率 3 种因素共同作用下的循环累积塑性变形模型和循环累积孔压模型; 基于试验结果讨论了应变沉降指数  $b$  值与孔压沉降系数  $N^\beta$  值随着循环次数的变化规律。试验结果表明: 前 10000 次循环  $b$  值与  $N^\beta$  值的变化较大, 且在前 1000 次变化最为显著; 随着循环次数增加,  $b$  值呈现出递减的规律, 而  $N^\beta$  与之相反; 十万级循环次数下  $b$  值与  $N^\beta$  值逐渐趋于稳定。对某隧道区间进行施工沉降计算发现与实测沉降范围吻合较好; 建议施工期间的土体沉降预测根据循环加载的次数来确定  $b$  值和  $N^\beta$  值, 预测隧道的长期沉降时取稳定后的  $b$  值与  $N^\beta$  值计算。研究成果为预测隧道施工期间土体沉降提供了有价值的参考。

**关键词:** 动三轴试验; 循环加载; 施工沉降; 应变沉降指数; 孔压沉降系数; 沉降计算

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)01-0214-06

## Analysis of soil settlement calculation during the construction of shield tunnel

LIU Yang<sup>1</sup>, REN Qing<sup>1</sup>, YU Mengchu<sup>1</sup>, YAN Chao<sup>2</sup>, MA Rongquan<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd. Shanghai 200433, China;  
3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd. Shanghai 200135, China)

**Abstract:** The indoor dynamic triaxial tests were conducted for remodeling gravelly clay saturated gravelly clay comprehensively considering of the cumulative plastic deformation model and circulation cumulative pore pressure model under the combined action of three factors, i. e., soil confining pressure, cyclic loading amplitude, and loading frequency, based on the tested results, the variations of strain settlement index  $b$  and pore pressure settlement coefficient  $N^\beta$  with the change rule of cycles were discussed. The results showed that, the large changes of the values of  $b$  and  $N^\beta$  mainly occurred in the first 10000 rounds of cycles, and the most significant changes occurred in the previous 1000 rounds of cycles. With the increase of cycling times, the values of  $b$  decreased, but the value of  $N^\beta$  increased. The values of  $b$  and  $N^\beta$  kept stable gradually after one hundred thousand cycles. The settlement calculation results of a tunnel during construction were in good agreement with the measured values. It was suggested that the values of  $b$  and  $N^\beta$  were determined by the number of loading cycles for the soil mass subsidence prediction of the period of construction. The stable values of  $b$  and  $N^\beta$  were used in prediction of tunnel long-term settlement. This research results provided valuable references for predicting subsidence of soil during the tunnel construction.

**Key words:** dynamic triaxial test; cyclic loading; construction settlement; strain settlement index; pore-pressure settlement coefficient; settlement calculation

## 1 研究背景

近年来随着我国经济的高速发展,城市化进程的推进,城市交通也有了巨大的发展。地铁作为一种便捷交通工具,因其运量大、快速、少污染、低能耗等优点,常被称为“绿色交通”。地铁在很大程度上缓解了城市的交通压力,为人们的日常出行提供了很大的便利,同时地铁在施工和运营期都会对周边的环境产生一定的影响。在盾构隧道的施工过程中,随着盾构机的掘进会对土体有很大的扰动,每次盾构机向前掘进一段距离,隧道施工沉降都会对隧道周围土体的稳定性有一定程度的影响。在盾构隧道施工中,隧道周围土体的沉降可以分为横向沉降与纵向沉降,其中纵向沉降是造成隧道的不均匀沉降以及周围土体隆起的主要原因。隧道的沉降受到多种因素的相互作用,呈现出随机性、非线性、不确定性等特点。目前国内外学者针对沉降的预测问题通常借助传统理论分析、人工神经网络、以及多核模式<sup>[1]</sup>等方法。魏刚等<sup>[2]</sup>认为施工期间隧道沉降占隧道总沉降的一半左右,并收集国内外 19 座沉管隧道的实际监测数据进行分析,得出施工期间、工后沉降及总沉降之间的关系。

另一方面,交通荷载又是引起地铁沉降的主要因素之一。计算交通荷载作用所产生土体的塑性沉降主要有以下两种方法:一是复杂弹塑性分析<sup>[3]</sup>,该方法在计算数十万次上百万次的循环次数时计算十分繁琐复杂。二是将分层总和法与拟合经验公式相结合的一种方法,该法把由交通荷载引起的长期沉降分为两部分,有累积应变引起的沉降和不排水孔压消散引起的沉降。针对交通荷载引起的隧道长期沉降国内外学者进行了大量的试验和理论研究。此后 Li Dingqing 等(1996)<sup>[4]</sup>以及 Chai Jinchun 等(2002)<sup>[5]</sup>将计算简便的指数模型作了进一步的修正。国内学者李进军,刘明、黄茂松、姚兆明等<sup>[6-10]</sup>通过大量的试验、监测数据和理论模型相结合,引入相对偏应力水平的概念考虑土体的初始应力状态。

本文在此基础上考虑了激振频率,围压,应力幅值 3 种因素共同作用下的拟合公式,引入了应变沉降指数  $b$  及孔压沉降系数  $N^b$  的概念,并对二者进行了深入的探讨。为方便讨论,下文均称为  $b$  值及  $N^b$  值。

## 2 试验概况

### 2.1 试验土样

本次试验土样取自深圳地铁九号线 6-1 层土,

土样为砾质粘性土,天然含水量  $w = 26.5\%$ ,质量密度  $\rho = 1.99 \text{ g/cm}^3$  天然孔隙比  $e = 0.615$ 。按照《公路土工试验规程》JTG E40-2007,土体制备成直径 39.1 mm、高 80 mm 的试样。

### 2.2 试验方法

土样的制备与固结标准参照《公路土工试验规程》JTG E40-2007 采用双面排水固结,在试样制备完成后采用抽真空饱和,并静置 48 h 后进行试验。试验仪器采用西安力创电液伺服土动三轴试验机,波形为正弦波。文中考虑了围压、激振频率、振动幅值三种因素下累积塑性土体的应变与累积孔压的增长情况。每组采用 3 个土体试样,为了减少试验仪器和人工的操作误差每组试验均重复 1-2 个试样。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 不排水累积变形引起的沉降计算

本文通过对大量试验结果的统计并结合临界理论状态,得出第 1 次塑性应变与相对偏应力水平的关系式如下式表示:

$$\varepsilon_1 = aD^{*m} \quad (1)$$

式中:  $a$  和  $m$  为试验参数;  $D^*$  为相对偏应力水平;  $\varepsilon_1$  为第 1 次循环应变。

在工程中可用简单的指数形式:

$$\varepsilon^p = aD^{*m}N^b \quad (2)$$

式中:  $b$  为应变沉降指数;  $N$  为循环次数。

$$D^* = (D_p - D_s)/(D_{\max} - D_s) \quad (3)$$

式中:  $D_{\max}$  为可能达到的最大偏应力水平,通常取  $D_{\max} = 1$ ;  $D_s$  为静偏应力水平;  $D_p$  为峰值偏应力水平。

图 1 为饱和砾质粘性土相对偏应力水平和第 1 次循环塑性应变关系曲线。综合考虑激振频率、不同围压、不同动应力比 3 种因素,较好地拟合得到指数型曲线函数,并由此得到参数  $a$  和  $m$ 。

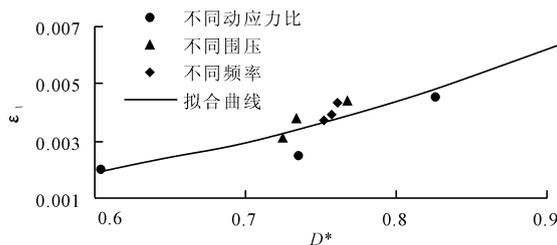


图 1 相对偏应力水平与第 1 次累积应变关系

对累积循环塑性应变与第 1 次塑性应变之间的拟合公式进行分析有:

$$\varepsilon^p = \varepsilon_1 N^b \quad (4)$$

由式(4)可以看出: $\varepsilon^p$ 与 $\varepsilon_1$ 之间呈现出线性关系,经拟合得到 $b$ 值。

表1 不同循环次下的累积塑性应变

第1次 累积应变	10次 累积应变	100次 累积应变	1000次 累积应变	10000次 累积应变	20000次 累积应变	50000次 累积应变
0.0043	0.0142	0.0245	0.0289	0.0318	0.0338	0.0357
0.0031	0.0074	0.0219	0.0267	0.0310	0.0310	0.0319
0.0037	0.0141	0.0260	0.0310	0.0380	0.0402	0.0409
0.0009	0.0024	0.0043	0.0055	0.0064	0.0068	0.0074
0.0025	0.0090	0.0168	0.0211	0.0244	0.0254	0.0257
0.0045	0.0134	0.0260	0.0317	0.0370	0.0399	0.0445
0.0009	0.0025	0.0043	0.0055	0.0064	0.0067	0.0074
0.0043	0.0116	0.0218	0.0272	0.0339	0.0359	0.0379
0.0007	0.0018	0.0036	0.0053	0.0063	0.0064	0.0074

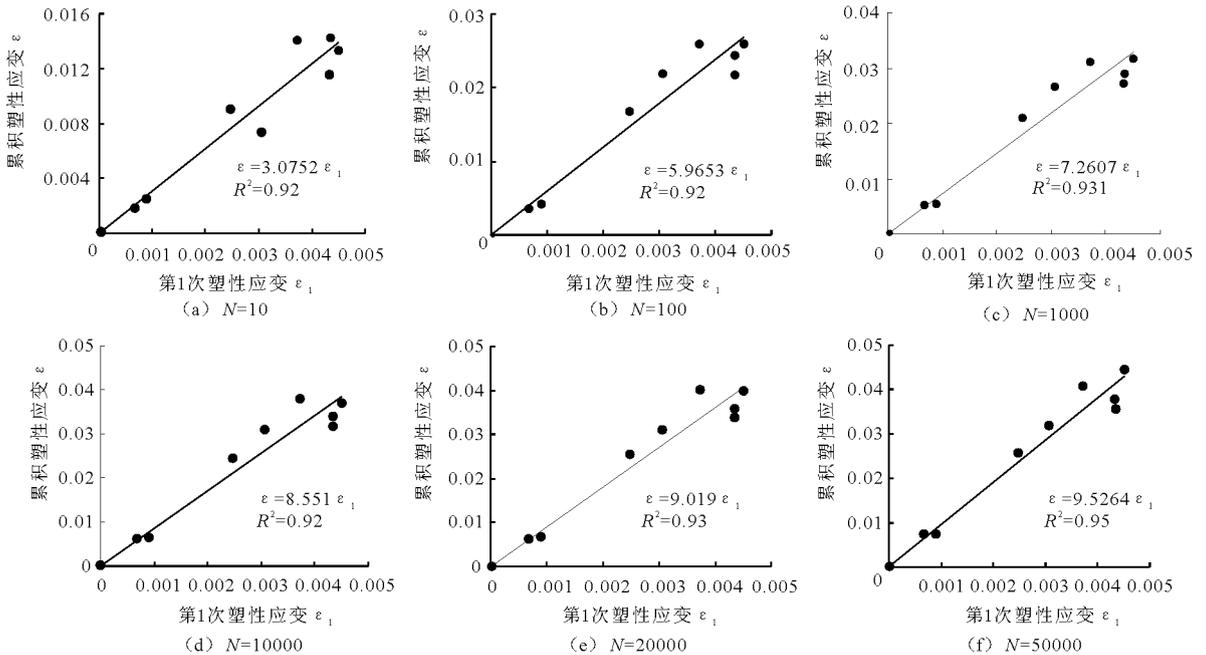


图2 第1次塑性应变与累积应变关系( $N$ 为循环次数)

表2 不同循环次数下的 $b$ 值

$N$	10	100	1000	10000	20000	50000
$b$ 值	0.4878	0.3878	0.2870	0.2330	0.2220	0.2100

由公式(2)对沉降指数 $b$ 进行计算,结果如上表2所示。由表2可以看出:

(1) $b$ 值随着循环次数呈现出递减的规律,在10000次循环过后, $b$ 值逐渐趋于稳定。可以预测在数十万以及上百万级循环次数后 $b$ 值的变化幅度不会太大。此时对于长期累积应变的计算产生的误差会比较小。

(2)前10000次循环 $b$ 值的变化比较大,尤其是前1000次 $b$ 值的变化最为显著,因此在计算土体累

积应变时不能取一个相同的 $b$ 值。

由于在隧道施工期间的施工沉降中渣土的运输次数不会有很大的数量级,因此在预测隧道施工期间的土地累积应变时 $b$ 值的选取不能选取长期累积应变计算中的 $b$ 值,而应根据循环次数确定 $b$ 值得大小。

### 3.2 循环荷载下累积孔压计算模型

隧道开挖卸载过程中土体存在应力释放现象,且土体的孔压会有一部分的消散;而当土体受到施工期间交通荷载时土体也会产生孔隙水压力,孔隙水的消散仍然会引起土体的塑性变形。本文着重研究土体施工期间在交通荷载作用下累积孔压消散引起的塑性变形。

类似于累积应变,累积孔压与循环次数之间的关系同样可以用下式(5)表示:

$$\frac{u}{p_c} = \alpha N^\beta \quad (5)$$

式中:  $u$  为累积孔压, kPa;  $\alpha$  和  $\beta$  为试验常数;  $\alpha$  为第 1 次累积孔压, kPa。通过室内三轴试验与理论推导相结合得到  $\alpha$  与  $D^*$  有以下关系:

$$\alpha = \xi D^* \quad (6)$$

$$\frac{u}{p_c} = \xi D N^\beta \quad (7)$$

图 3 为饱和砾质粘性土相对偏应力水平和第 1 次循环孔压关系曲线。综合考虑激振频率、不同围压、不同动应力比 3 种因素,并较好地拟合得到指数型曲线函数,并由此得到参数  $\xi$  和  $n$ 。

图 4 为第 1 次累积孔压与  $u/p_c$  关系。在综合考虑

了循环荷载的幅值、土体初始应力状态以及激振频率等因素的基础上,对系数  $\alpha$  与  $u/p_c$  进行线性拟合。从图 4 可以看出:3 种因素下直线依然能够较好的拟合,说明显示模型依然能够很好的模拟土体实际的初始应力状态以及多种因素共同作用下的土体动力特性。不同循环次数下的拟合曲线斜率如表 4 所示。

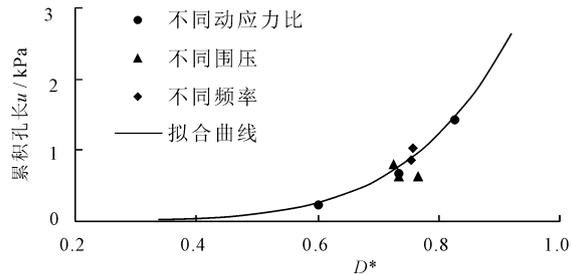


图 3 相对偏应力水平与第 1 次累积孔压关系

表 3 第 1 次累积孔压与不同循环次数  $u/p_c$  关系

第 1 次累积孔压/kPa	10 次循环 $u/p_c$ 值	100 次循环 $u/p_c$ 值	1000 次循环 $u/p_c$ 值	10000 次循环 $u/p_c$ 值	20000 次循环 $u/p_c$ 值	50000 次循环 $u/p_c$ 值
0.6407	0.0230	0.1268	0.4184	0.4293	0.4693	0.5365
0.8038	0.0261	0.1531	0.5092	0.6146	0.5946	0.6030
0.6281	0.0207	0.0884	0.3828	0.4530	0.4530	0.4936
0.1420	0.0094	0.0503	0.1034	0.1307	0.1407	0.1474
0.3281	0.0133	0.0737	0.1858	0.2196	0.2196	0.2002
1.4375	0.0411	0.2753	0.7218	0.9715	0.9046	0.9430
1.0375	0.0341	0.2053	0.5922	0.5146	0.7146	0.7430
1.2344	0.0374	0.1874	0.5734	0.8091	0.8091	0.8034
0.4687	0.0103	0.0624	0.1940	0.2887	0.2387	0.2020

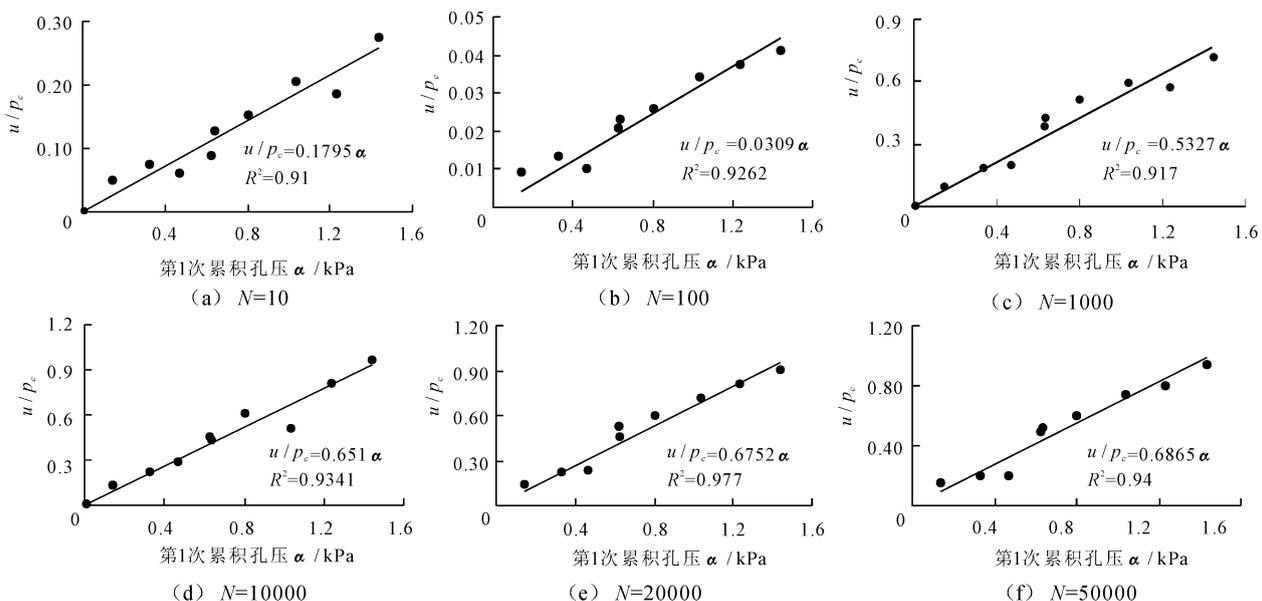


图 4 第 1 次累积孔压与  $u/p_c$  关系 ( $N$  为循环次数)

表4 循环次数与  $N^\beta$  关系

$N$	10	100	1000	10000	20000	50000
$N^\beta$ 值	0.031	0.179	0.5327	0.651	0.673	0.687

由表4可看出:

(1)  $N^\beta$  值随着循环次数呈现出递增的规律,在10000次循环加载后  $N^\beta$  值的变化逐渐趋于稳定。同样的,可以预测在数十万以及上百万级循环次数后  $N^\beta$  值的变化幅度不会太大。由此对于长期累积孔压的沉降计算产生的误差会比较小。

(2) 前10000次循环  $N^\beta$  值的变化比较大,尤其是前1000次  $N^\beta$  值的非线性递增最为显著;因此在计算土体由于不排水循环荷载作用下累积孔压值时,要根据不同的循环加载次数进行拟合得到  $N^\beta$  值的范围。

隧道施工期间的施工沉降对于隧道的安全性、耐久性、使用性能有着重要的影响;而隧道盾构机的掘进对地表土层、周围土层影响较大,因此其对于施工期间的沉降极为重要。本文综合第一次累积孔压与累积塑性应变关系及第1次累积孔压与  $u/p_c$  关系。在不同循环次数下进行公式拟合,充分考虑了拟合直线斜率的变化规律。

### 3.3 土体累积沉降计算

为了计算累积应变引起的沉降,在得到每层土的不排水累积变形后,采用分层总和法计算最终的不排水累积沉降值  $S_d$ :

$$S_d = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^p h_i \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_i^p$  为第  $i$  层土的累积塑性应变;  $h_i$  为  $i$  层土的厚度。

依据分层总和法对土体进行分层,取每一土层的中点孔压作为该层土的孔压,采用太沙基一维固结理论进行计算得到整个土层的沉降。

$$S_v = \sum_{i=1}^n m_{vi} h_i u_i U \quad (9)$$

其中:  $n$  为总压缩层分层数;  $h_i$  为第  $i$  层的厚度;  $u_i$

为第  $i$  层的不排水循环累积孔压;  $m_{vi}$  为第  $i$  层的体积压缩系数;  $U$  为第  $i$  层土的固结度。

因此,总沉降计算是由累积应变引起的沉降和不排水孔压消散引起的固结沉降的总和。

$$S = S_d + S_v \quad (10)$$

## 4 隧道水平掘进土体沉降计算

地铁的沉降主要分为施工沉降与长期沉降,施工沉降对于施工质量的控制以及对周围建筑物的影响有着显著影响,而长期沉降则对于地铁的运营有着决定性作用。下面取某个隧道一个区间站点对其施工期间的土体沉降进行计算,其区间长1252.670m。取200m为一节进行掘进计算,得到施工期间交通荷载的  $b$  值、 $N^\beta$  值,如下表5所示。

表5 掘进计算中  $b$  值与  $N^\beta$  值

节数	1	2	3	4	5	6
$N$	3695	3083	2471	1859	1247	625
$b$ 值	0.254	0.256	0.259	0.264	0.274	0.28
$N^\beta$ 值	0.399	0.441	0.464	0.491	0.513	0.547

由图5(a)、5(b)、5(c)可知,累积应变所产生的沉降是累计孔压产生沉降的3倍左右,但是同样累积孔隙水消散所引起的沉降在隧道的沉降计算中是不可忽略。需要说明的是,在掘进距离为600m时产生沉降突变,这是由于此处有个人工湖,其土质条件较差导致。而基本上,隧道的沉降会随着掘进距离的增大有一定程度的减少。

由图5(a)、5(b)比较可知,累积应变沉降曲线与累积孔压曲线的基本趋势相似,即土层同一点的累积应变沉降越大其累积孔压沉降也就较大。

由图5(c)可知,隧道掘进的总沉降计算值与实测值符合较好。需要说明的是:该法计算隧道的施工期间的土体沉降时  $b$  值与  $N^\beta$  是根据循环加载的次数来确定,而非最终稳定后的常数值。这样取值更加符合实际工况。

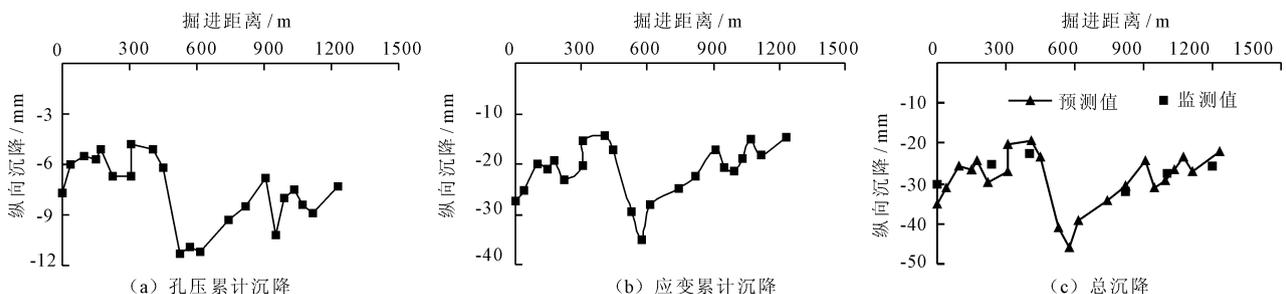


图5 隧道掘进沉降图

## 5 结 论

(1) 本文对重塑饱和砾质黏土进行室内动三轴试验,综合考虑激振频率、动荷载幅值、土体固结围压三者相互作用下的显示模型,通过拟合发现其能较好地反映土层的实际应力状态。

(2) 累积应变显示模型中的应变沉降指数  $b$  随着循环次数呈现出递减的规律,在 10000 次循环过后, $b$  值逐渐趋于稳定。可以预测在数十万以及上百万级循环次数后, $b$  值的变化幅度不会太大。此时对于长期累积应变的计算产生的误差会比较小。而前 10000 次循环  $b$  值的变化比较大,尤其是前 1000 次  $b$  值的变化最为显著,因此在计算土体累积应变时不能取一个相同的  $b$  值。

(3) 累积孔压显示模型中  $N^b$  与累积应变模型中  $b$  值存在同样的变化趋势,建议在计算隧道的施工期间的土体沉降时, $b$  值与  $N^b$  不能用长期沉降的值,必须根据循环加载的次数来确定  $b$  值和  $N^b$  值。

(4) 本文着重考虑盾构隧道施工期间交通荷载引起的隧道沉降,而并未考虑开挖卸载引起的沉降,这将在以后的研究中进一步讨论。

### 参考文献:

[1] 范思遐,周奇才,熊肖磊,等. 基于多核模式的隧道沉

降预测[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 291 - 298.

- [2] 魏 纲, 裘慧杰, 魏新江. 沉管隧道施工期间与工后长期沉降的数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3413 - 3420.
- [3] 李进军. 交通荷载作用下饱和软黏土长期沉降分析[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [4] LI Dingqing, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006 - 1013.
- [5] Chai Jinchun, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907 - 916.
- [6] 李进军, 黄茂松, 土育德. 交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 1 - 5.
- [7] 刘 明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1703 - 1709.
- [8] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891 - 895.
- [9] 姚兆明. 饱和软土循环累积变形与交通荷载引起的长期沉降[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [10] 刘 明. 饱和软粘土动力本构模型研究及地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.

(上接第 213 页)

- [7] 高德彬, 倪万魁, 杨泓全. 高速公路黄土路堑高边坡现场冲刷实验研究[J]. 中外公路, 2007, 27(3): 199 - 201.
- [8] Seedsman R. The behavior of clay shales in water[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(1): 18 - 22.
- [9] Ojo O, Brook N. The effect of moisture on some mechanical properties of rock[J]. Mining Science & Technology, 1990, 10(2): 145 - 156.
- [10] Karfakis M G, Akram M. Effects of chemical solutions on rock fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 1253 - 1259.
- [11] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效

应的实验研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335 - 342.

- [12] 李炳乾. 地下水对岩石的物理作用[J]. 地震地质译丛, 1995(5): 32 - 37.
- [13] Ulusay R. The present and future of rock testing: Highlighting the ISRM suggested methods[M]. West Berlin: Springer International Publishing, 2012: 1 - 22.
- [14] 张季如, 祝 杰, 黄 丽, 等. 土壤微观结构定量分析的 IPP 图像技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4): 90 - 93.
- [15] 綦建峰, 隋旺华, 张改玲, 等. 基于 SEM 图像处理红层砂岩孔隙度及分维数计算分析[C] // 全国工程地质学术大会, 2014.