

地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的 三维有限元模拟

张海波, 殷宗泽, 朱俊高

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 在全面分析土压平衡式盾构施工过程中影响周围土体变形各主要因素的基础上, 提出一种能够综合考虑各种因素的盾构施工三维非线性有限元模拟方法, 通过对某地铁隧道盾构施工过程的模拟, 分析了盾构推进过程中隧道周围及地表处土体的位移和变形以及横断面不同深度上的沉降分布规律, 计算得到的隧道纵向地面沉降分布曲线与实测数据非常接近, 计算结果表明所提出的盾构施工模拟方法是有效可行的。

关键词: 隧道工程; 地铁隧道; 盾构法; 三维有限元法; 地层变位

中图分类号: U 455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)05-0755-06

3D FINITE ELEMENT SIMULATION ON DEFORMATION OF SOIL MASS DURING SHIELD TUNNELING

ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao

(*Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on the comprehensive analysis on the primary components of ground movement associated with earth pressure balance (EPB) shield tunneling, a three-dimensional nonlinear finite element model for simulating EPB shield tunneling is proposed. The proposed numerical procedure can simulate the full excavation sequence and consider factors such as jack force behind the machine, earth pressure on tunneling face, excavation, advancing of shield, installation of lining, and backfill grouting. The proposed modeling techniques are applied to simulate a tunneling project in Shanghai. The distributions of soil displacement around the tunnel and on the ground surface associated with the shield tunneling operation are analyzed in detail. According to the comparisons of numerical results with field measurements, the proposed numerical procedure is found to be an effective approach for predicting the deformation due to EPB shield tunneling.

Key words: tunneling engineering; metro tunnel; shield tunneling method; 3D FEM; deformation of soil mass

1 引言

随着盾构施工技术的不断完善, 盾构法在地下铁道施工中得到广泛的应用。由于地质条件和施工工艺的限制, 盾构推进对周围土体的扰动影响仍是

不可避免的。如何预测盾构穿越所引起的地层位移, 确保已有建(构)筑物正常使用和盾构的顺利掘进, 是盾构隧道设计与施工中非常关键的问题。

目前工程中用于预测隧道施工引起的土体变形的的主要方法是建立在现场实测资料基础上的经验公式法, 提供的信息大都限于地表面处的位移, 很难

收稿日期: 2003-11-17; **修回日期:** 2004-01-02

作者简介: 张海波(1977-), 男, 2000年毕业于烟台大学结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土数值模拟研究方面的研究工作。E-mail: zhbhhu@126.com。

满足实际需要，因而在应用上具有很大的局限性。有限元法能更充分地反映土体性质的影响，可以考虑地层损失及土与衬砌的相互作用。有限元法不仅能够计算地面沉降，还可得到盾构推进过程中的沉降变化情况，不同深度处的沉降、侧向位移，地层应力变化以及对临近建筑物的影响。有限元法在盾构隧道施工分析中得到越来越广泛的应用。

盾构隧道掘进尤其是靠近盾构所在位置及其前方土体的位移是一个三维问题^[1~3]，平面有限元分析无法模拟盾构推进的实际情况，无法模拟开挖面周围土体的三维移动，也无法反映在到达平面应变状态之前盾构周围土体所经历的应力路径，计算结果与实际应力、位移有较大差异。尽管人们都认识到这一点，但是盾构隧道施工对周围土体的影响因素很多，已有的盾构施工三维有限元模拟方法大都作了较多的简化：文[4~7]开发了一种三维弹塑性有限元技术对浅埋隧道无衬砌和完全衬砌 2 种极限情况下隧道周围土体不排水情况下的应力场和位移场进行了计算，并根据三维有限元计算结果提出用间隙系数 G 来反映盾构施工引起的地层损失；文[8]在模拟盾构推进时在开挖面前方设置开挖单元，并考虑了盾构自重、千斤顶推力、土压仓压力等因素，但没有考虑盾构刀盘超挖和盾尾脱空引起建筑空隙的闭合以及盾尾注浆的影响；文[9]在对土压平衡式盾构推进的三维模拟时考虑了开挖面土压力、盾尾空隙闭合、盾尾注浆等因素，但没有考虑盾构自重、千斤顶推力的影响；文[10]用刚度迁移法模拟盾构推进，采用权刚度修正 Goodman 单元处理存在两种

材料的混合接触刚度，提出了分 3 步模拟盾构前行一个单元距离的模拟步骤。

本文在前人工作的基础上，提出一种盾构施工三维有限元模拟方法，综合考虑盾构推进、开挖面前方及隧道壁面土体的剪切扰动、盾构刀盘超挖空隙和盾尾空隙的闭合、盾尾注浆等因素。

2 盾构施工引起土层移动的主要因素及其三维有限元模拟方法

隧道盾构施工中盾构机渐进向前，周围土体则是相对静止的。有限元法难以做到完全模拟盾构的连续推进过程，必须作一定的简化。通常将盾构推进作为一个非连续的过程来研究，假设盾构一步一步跳跃式向前推进，每次向前推进的长度(纵向)恰好为一个衬砌单元宽度，用改变单元材料类型的方法(刚度迁移法)来反映盾构的向前，而一次向前的过程中盾构周围土体受力状态也发生变化，将这种变化转化为相应的结点荷载作用于结点，进行有限元计算。这与在模拟基坑开挖时每一级开挖掉一层网格以及模拟土石坝、路堤填筑时每一级荷载增加一层网格的处理方法是相似的。

本文所考虑的盾构施工过程中引起土层移动的主要因素有以下 6 个部分(如图 1(a)所示)：

(1) 开挖面土体开挖应力释放

土压平衡式盾构开挖面支护压力难以和土体原位土压力达到完全平衡，当支护压力小于原位土压力时，开挖面前方土体向土压舱位移；反之，前方

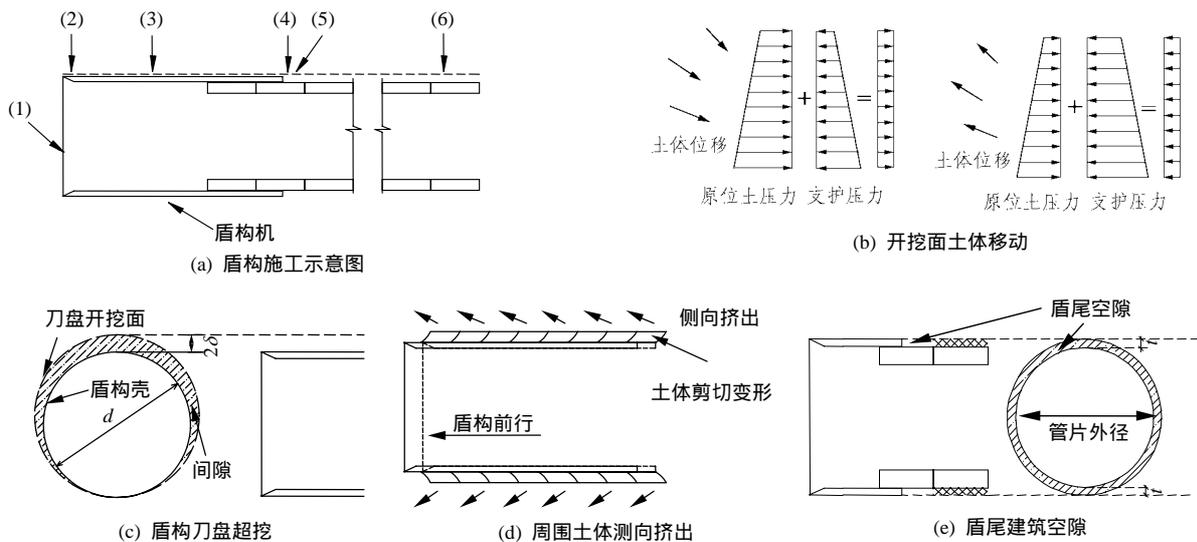


图 1 盾构施工过程中引起土体变形的主要因素

Fig.1 Primary components of ground movement associated with shield tunneling

土体远离土压舱位移(图 1(b))。

由于盾构施工中开挖面存在支护力,因而不能像模拟基坑开挖那样用上一步得到的单元应力直接计算新开挖面处的开挖释放荷载。常用的方法是每向前开挖一步将开挖面处的土体原位土压力与土压舱支护压力的差值作用在开挖面结点上,实际上这种处理方法并不合理,因为它使得开挖面结点荷载沿纵向(沿推进方向)的总和与每一步推进的距离有关,即在模拟盾构前进相同距离的情况下,每一步推进距离越小推进步数越大,开挖面结点荷载沿纵向总和也随之增加,这显然与实际不符。

本文建议根据开挖面处单元应力改变量 $\{\Delta\sigma\}$ 计算相应的结点荷载,即

$$\{\Delta F\}^e = \iiint [B]^T \{\Delta\sigma\} dx dy dz \quad (1)$$

这样处理后,不论每一步推进距离多少,盾构前进相同距离时开挖面结点荷载沿隧道纵向的总和保持不变。由于开挖面处土体受到盾构刀盘的搅动,开挖面上土体状态可以近似认为由原来的静止土压力状态变为各向等压状态(等于土压舱压力),由此来计算单元应力改变量。

(2) 刀盘超挖引起的间隙

为了减小盾构壳上的摩擦阻力以使盾构能够顺利前行,通常盾构的刀盘外径要大于盾构壳的外径,从而在盾构壳外围产生一定厚度的间隙 δ ,盾构机由于自重发生下沉到底部,在横断面上形成超挖间隙 2δ ,随后周围土体由于填充超挖间隙而产生指向盾构内部的径向位移(图 1(c))。

(3) 盾构与周围土体的错动

盾构向前掘进时盾构壳与周围土体之间发生错动,周围土体对盾构产生摩擦力,同时盾构也对周围土体施加指向盾构推进方向的摩擦力,周围土体受到盾构壳的剪切和挤压作用向前方和远离盾构的方向移动(图 1(d))。盾构推进时与周围土体之间发生错动,因此需要在盾构壳单元与外围土单元之间设置接触面单元,用接触点对间的相对位移来模拟盾构与土体间的错动。空间接触面采用 Goodman 三维接触面单元。

(4) 盾构前行产生盾尾空隙

盾构前行时由于不能做到完全同步注浆而在盾尾产生建筑空隙(图 1(e)),图中 t 为盾构壳的厚度,空隙所对应的衬砌管片由于受到前后衬砌螺栓的固定作用不能下沉,因而形成图示的盾尾建筑空隙。

本文利用有限元模拟上面图 1(c)中的超挖间隙

和图 1(e)中的建筑空隙时,首先将相应位置的盾构壳单元和衬砌单元用刚度极小的软材料代替(活化减退),给外围土体施加如图所示的已知径向位移,当土体接触到盾构壳或者衬砌外壁时再将盾构壳和衬砌单元重新激活使它们与土体共同作用。

(5) 盾尾注浆

盾构通过的同时向盾尾建筑空隙压注混凝土浆液,注浆压力一般均大于隧道上覆土压力,使隧道周围的土体向远离隧道的方向移动,抵消上部土体的部分沉降,当注浆量较大时也可能引起盾构上方土层的隆起。有限元模拟时对于盾尾处盾构壳外围的土体单元施加远离隧道中心的结点荷载,其数值由注浆压力计算得到。

(6) 衬砌变形

盾构隧道衬砌在上覆土体压力及注浆压力的作用下发生变形,进而引发一定量的地层位移和地表沉降。

3 三维有限元模拟盾构施工的步骤

三维有限元模拟盾构施工的计算流程图如图 2 所示。具体的模拟步骤如下:

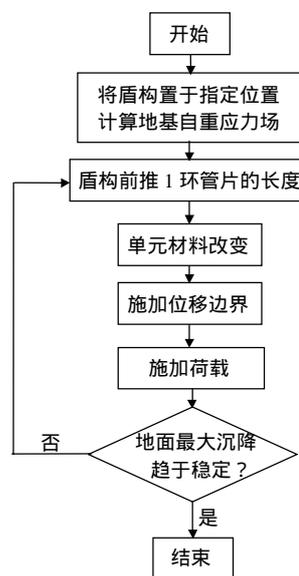


图 2 三维有限元模拟盾构施工计算流程图

Fig.2 Flow chart of 3D computation scheme of shield tunneling

第 1 步: 计算地层初始应力。

第 2 步: 盾构机每向前推进 1 环管片作如下变化:

(1) 单元材料变化

将开挖面向前推进 1 环管片的距离，同时变换单元材料，单元材料变化情况如图 3 所示，图中虚线表示被挖掉的土单元。

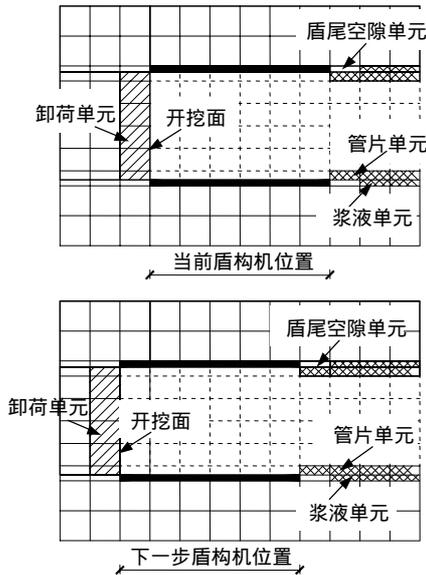


图 3 单元材料随盾构推进的变化情况

Fig.3 Element material changing with tunnel advancing

(2) 荷载的模拟

位于新开挖面前方的一层土单元应力由静止土压力状态 $\{k_0\sigma_z, k_0\sigma_z, \sigma_z\}^T$ 变为各向等压状态 $\{\sigma_s, \sigma_s, \sigma_s\}^T$ ，其中 k_0 为静止土压力系数， σ_s 为土压舱压力。根据式(1)计算由应力变化产生的结点荷载，并将其作用在单元结点上。

使开挖面上隧道外围的一层土单元结点上发生如图 1(c)所示的位移，盾尾衬砌外围土单元结点发生如图 1(e)所示的位移。当土体接触到盾构壳或者衬砌外壁时，再将盾构壳和衬砌单元激活，使它们与土体共同作用。

在浆液单元外围结点上加远离盾构中心方向的注浆压力。

在盾构壳后部单元结点上加指向盾构推进方向的结点力，同时在其后部的管片单元结点上加反向的结点力，前后结点力的总和相等，且等于千斤顶推力的总和。

在盾尾后 1 环管片结点上加竖直向上的结点力，总和等于 1 环管片内部挖去土体的重量，模拟开挖土体引起的竖向卸荷。

重复第 2 步直到计算结束。

4 有限元分析模型及其参数

某盾构隧道采用土压平衡式盾构。盾构机长

8.0 m，盾构外径 6.34 m，盾构壳厚 7 cm，盾构刀盘外径比盾构壳外径大 1 cm；管片宽 1 m，厚 35 cm。千斤顶总推力 14 000 kN。地基土层自上而下依次为：杂填土(0~3.0 m)、粘质粉土(3.0~9.0 m)、淤泥质粘土(9.0~14.0 m)、粉质粘土(14.0~28.0 m)、砂质粘土(28.0~38.0 m)、粉砂(38.0 m 以下)。隧道中心线埋深 20 m(位于粉质粘土层中)。有限元计算网格如图 4 所示，分析区域竖向深 50 m，宽 60 m，沿隧道纵向长 150 m。共 5 040 个单元，6 105 个节点。

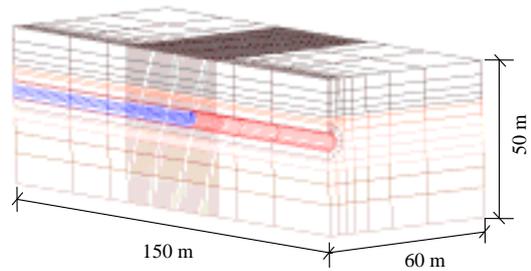


图 4 盾构隧道三维有限元计算网格

Fig.4 Finite element mesh used in calculation

计算中土体采用邓肯-张 $E-v$ 模型，盾构壳和管片采用线弹性材料，各层土的基本物理力学指标及邓肯-张 $E-v$ 模型参数见表 1，2。

表 1 地基土层基本物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	天然含水量 /%	重度 /kN·m ⁻³	孔隙比	液性指数	压缩系数 /MPa ⁻¹	粘聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
粘质粉土	36.2	18.4	1.415	0.93	0.19	6.0	30.0
淤泥质粘土	52.5	16.9	1.468	1.28	0.79	14.0	9.0
粉质粘土	36.7	17.7	1.060	1.27	0.50	14.0	20.5
砂质粘土	28.0	19.2	0.770		0.10	3.0	35.0
粉砂	27.2	19.7	0.670	-	0.10	3.0	36.0

表 2 土体邓肯-张 $E-v$ 模型参数

Table 2 Parameters of Duncan-Chang $E-v$ model of soil

土层名称	K	N	R_f	G	F	D
杂填土	150.0	0.30	0.80	0.30	0.01	2.0
粘质粉土	89.0	0.84	0.66	0.27	0.45	6.0
淤泥质粘土	28.4	1.00	0.80	0.29	0.01	1.2
粉质粘土	90.4	0.63	0.76	0.35	0.18	1.8
砂质粘土	283.0	0.00	0.66	0.17	0.01	6.7
粉砂	300.0	0.30	0.80	0.30	0.01	2.0

5 有限元分析计算结果

按照上述模拟方法对河海大学岩土工程研究所开发的 TDAD(three dimensional analysis for rock-fill dam)三维非线性有限元程序进行了修改, 修改后的程序能够综合反映盾构的推进、盾尾的空隙与压浆等因素的影响。对上述模型进行了计算, 盾构共推进了 22 步。得到以下的计算结果:

5.1 周围土体位移

隧道基本达到平面变形状态时, 横断面及沿隧道轴线的纵断面的土体位移矢量图如图 5, 6 所示。从图中可以看出:

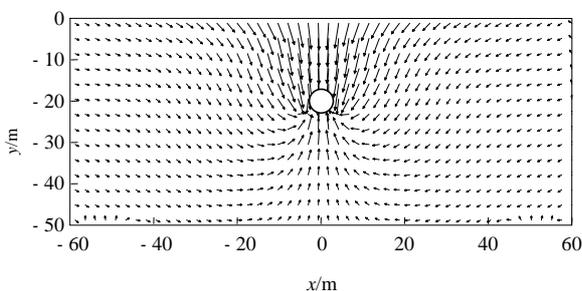


图 5 横断面位移矢量图

Fig.5 Displacement vectors in transverse section

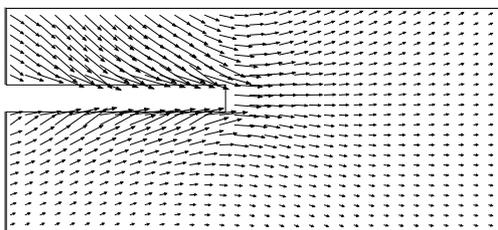


图 6 纵断面位移矢量图

Fig.6 Displacement vectors in longitudinal section

(1) 横断面上隧道左右土体发生趋近隧道的水平位移; 隧道上方土体由于填充建筑空隙而下沉; 隧道开挖, 土体自重减小引起土体竖向的卸荷, 隧道下部土体发生一定量的上浮。

(2) 纵断面上隧道周围土体发生沿隧道推进方向的水平位移, 开挖面后方隧道周围土体向隧道处移动; 开挖面前方, 土体向前方和周围挤出。这是因为, 虽然开挖面卸荷会使开挖面前方一定区域土体向开挖面处移动, 但盾构推进过程中对周围土体的摩擦和挤压作用导致在盾构到达之前土体已经有了向前的位移, 使得最终开挖面处土体的水平位移仍是向前的, 隧道中心线上、下土体分别向上、下

移动。

5.2 地表位移

计算得到的横断面沉降、水平位移分布曲线如图 7 所示。最大沉降为 1.67 cm, 发生在隧道轴线正上方地表面处; 地表面最大水平位移为 0.42 cm(正值表示位移方向指向隧道中心线正上方地表位置)。地面沉降在横断面上的分布呈近似正态分布曲线, 沉降槽宽度约等于隧道埋深的 0.57 倍(11.4 m), 发生地表最大水平位移与地面沉降分布曲线反弯点位置对应。

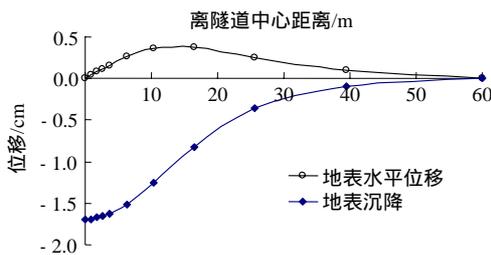


图 7 隧道横断面地面位移曲线

Fig.7 Displacement curves of ground surface above tunnel in transverse section

隧道纵断面计算与实测地面沉降分布曲线比较情况如图 8 所示, 从图中可以看出有限元计算结果与实测数据非常接近, 有限元计算中考虑了盾构前方土体受到盾构推进的挤压作用, 计算得到的前方地表处出现微小的隆起, 计算得到的盾构开挖面处地表面土体的沉降占地面最大沉降的 20%左右, 大部分地面沉降是由盾构后部的建筑空隙引起的。地面点的沉降随离盾构开挖面距离的增加逐渐趋于稳定, 在盾构开挖面后方 30 m 左右的位置, 地基达到平面变形状态。

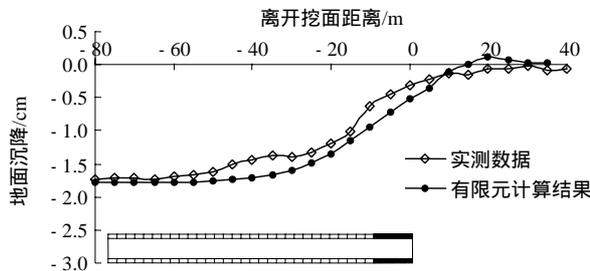


图 8 隧道纵断面计算与实测地面沉降曲线

Fig.8 Longitudinal ground surface settlement by calculation and measurement

5.3 不同深度处的沉降分布

横断面上不同深度处土体沉降分布曲线如图 9 所示,从图中可以看出隧道中心上方的土体沉降随着深度的增加而增加,而沉降槽宽度逐渐减小,向隧道轴线位置处集中。

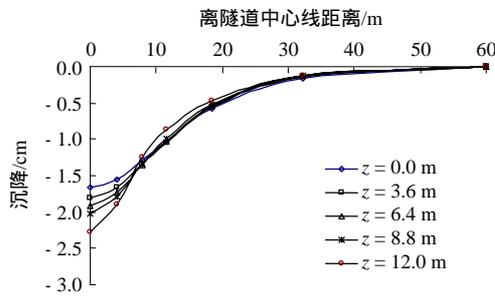


图 9 隧道横断面不同深度处的沉降曲线

Fig.9 Settlement curves of different depths above tunnel in transverse section

6 结 论

(1) 盾构法隧道施工过程中周围土体变形受到开挖面前方土体的扰动、建筑空隙的闭合、盾尾注浆等多种因素的影响,运用三维有限元模拟盾构施工时必须全面考虑各种因素的影响才能得到合理的结果。

(2) 本文提出了各种影响因素的模拟方法和综合考虑各种因素影响的三维非线性有限元模拟步骤。通过计算得到了盾构推进过程中周围土体的位移场和隧道纵、横断面地面沉降曲线,并与实测纵断面沉降数据进行比较,结果表明本文提出的三维有限元模拟盾构法施工的方法是可行的,由此得到的计算结果是合理的。

(3) 计算结果表明:由于盾构法隧道在开挖面处有良好的支护,由开挖引起前方土体卸荷导致的地面沉降并不大,只占总地面沉降的 20%左右,大部分沉降是由于盾尾空缺引起的;随着深度的增加,横断面最大沉降量不断增大,沉降槽宽度逐渐减小,沉降向隧道轴线位置处集中。

参考文献(References):

[1] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1991.

329-369.(Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Shield Driven Tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. 329-369.(in Chinese))

[2] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A. C., 1969. 225-290.

[3] Mair R J, Taylor R N. Bored tunnelling in the urban environment[A]. In: Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering(Vol.4)[C]. Hamburg: Balkema, 1997. 2 353-2 385.

[4] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soils: part I—methods of analysis[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 2(2): 87-110.

[5] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soils: part II—results[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 2(2): 111-138.

[6] Lee K M, Rowe R K, Lo K Y. Subsidence owing to tunnelling. I. estimating the gap parameter[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(1): 929-940.

[7] Lee K M, Rowe R K, Lo K Y. Subsidence owing to tunnelling. II. evaluation of a prediction technique[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(1): 941-953.

[8] Komiya K, Soga K, Akagi H, et al. Finite element modelling of excavation and advancement process of a shield tunneling machine[J]. Soils and Foundations. 1999, 39(3): 37-52.

[9] Lin D G, Tseng C T, Phienweij N, et al. 3D deformation analysis of earth pressure balance shield tunnelling in Bangkok subsoil[J]. Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, 2002, (1): 13-27.

[10] 王敏强,陈胜宏. 盾构推进隧道结构三维非线性有限元仿真[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 228-232.(Wang Minqiang, Chen Shenghong. 3-dimensional non-linear finite element simulation of tunnel structure for moving-forward shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 228-232.(in Chinese))