

地下隧道软土地层变形研究综述

(8)
25-78

张云

殷宗泽

U451.1
T664.78

(南京大学地球科学系 南京 210093) (河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

摘要 在综述已有文献的基础上,将隧道施工引起软土地层变形的研究方法分为不考虑施工过程的方法和部分考虑施工过程的方法两大类。由施工中的观察结果提出的较为简单的经验公式及弹性、弹塑性和粘弹性解析解法是不考虑施工过程对地层变形的影响的,而各种数值计算方法以其灵活性在计算时可以部分考虑施工过程对地层变形的影响。由于隧道施工的复杂性及一些不确定因素的影响,要在理论分析中精确模拟施工过程还有一定的难度。文中论述了每类方法的最新研究水平及存在的问题,指出了尚需进一步研究的课题。

关键词 隧道;软土;地层变形;综述;地表沉降

在软土地层中建造隧道,改变了原地层的边界,必然会引起或多或少的地层位移和地表沉陷,它将影响到邻近建筑物及地下管线的安全,影响周围的环境。因此,合理地预测由隧道施工引起的地层变形已引起隧道设计人员的高度重视,并成为隧道可行性研究的重要内容。在人口密集的城市中,这方面的问题显得尤为重要。

针对这一课题,国内外都进行了较为深入的研究,提出了一些分析方法。目前,就引起地层变形的基本原因,研究人员已基本达成共识,即隧道施工中的地层损失及隧道周围土体受扰动产生的再固结。地层损失是隧道施工中实际开挖土体体积和竣工后隧道体积之差,引起地层损失的主要原因可归纳为:①开挖面土体的移动。当隧道掘进时,若开挖面土体受到的水平支护应力小于原始侧压力,则开挖面土体向隧道内移动,引起开挖面上方地面沉降;若大于原始侧压力,则正面土体向上前方移动,导致开挖面上前方土体的隆起。②土体挤入盾尾空隙。初始衬砌脱离盾尾后,在隧道开挖壁面和衬砌外周间形成一环形空隙,对饱和软粘土而言,这一空隙将被土体很快充填,从而引起地面沉降。③土体与衬砌的相互作用。在周围土体压力作用下,衬砌要产生变形,同时衬砌对周围土体产生相反方向的作用力,地层变形是土体与衬砌共同作用的综合表现。④改变推进方向。掘进机偏离设计轴线向上或向下倾斜,使多余的土体被挖去,它所引起的地层位移与施工质量有关。受扰动土体的固结是地层变形的另一主要原因,盾

构在地层中推进及土体向盾构空隙挤入,必然使周围的土层受到扰动,在隧道周围形成超孔隙水压力区,随着开挖面的推进,土体表面应力释放,孔隙水压力下降,地层发生排水固结,引起固结变形。地层变形的大小则取决于土层和地下水条件、隧道直径、埋深及施工方法和质量等。

纵观隧道掘进引起的地层变形的研究方法,可将其分为两大类,即不考虑施工过程的方法和部分考虑施工过程的数值模拟法。

1 不考虑施工过程的方法

依其所采用的理论基础的不同,有经验法和理论解析法之分。

1.1 经验法^[1]

根据施工中的观察结果,提出一些较为简便的计算公式,如派克法(Peck)。Peck认为,施工中引起的地面沉降是在不排水情况下发生的,所以沉降槽的体积应等于地层损失的体积,据此,他于1969年在墨西哥土力学及基础工程国际会议上提出了盾构隧道施工阶段的地面沉降的估算公式:

$$S(x) = \frac{V_l}{\sqrt{2\pi i}} \left(-\frac{x^2}{2i^2} \right) \quad (1)$$

式中: i 为沉降槽宽度系数,即隧道中心至沉降曲线反弯点之间的距离; V_l 为盾构隧道单位长度的地层损失量, m^3/m ; x 为所求沉降点至隧道中心的水平距离, m 。

派克法成了后来研究地面沉降的基础,Attewell

假定沉降槽的曲线形式为正态分布曲线,并于1982年提出了计算最大沉降量的公式:

$$S_{\max} = \frac{V}{\sqrt{2\pi}i} \quad (2)$$

$$i = R \cdot K \left(\frac{z}{2R} \right)^n \quad (3)$$

式中: K, n 对某一种土来说,为一定的常数; R 为隧道半径; i 意义同式(1); z 为隧道埋深; V 为沉降槽的横断面面积, V 的取值依土类而定,变化范围很大,所以此法预测的精度并不好.1982年, O'Reilly-New 也假定沉降槽的曲线形式为正态分布曲线,并按粘性土和砂性土地层分别统计出 i 与 z 之间的相关关系,并认为 i 值与隧道直径几乎无关,运用时,只要知道 z ,即可求出 i ,再利用式(2)求出最大沉降量.

半谷于1977年根据隧道开挖面及隧道上的覆盖层条件给出了最大的地面沉降范围.1982年,藤田研究了不同形式的盾构对地层变位的影响,根据围岩的种类、盾构形式及辅助工法的不同,分类预测了最大沉降量,并用表格给出预测值.1994年,方晓阳等^[2]在派克法和藤田法基础上提出了估算不同类型盾构法隧道地面沉降量大小和分布范围的 Peck-Fujita 法,给出了最大和最小沉降曲线,但各类地层的最大和最小沉降曲线有时相差很大.经验法只是大致地给出地表沉陷的计算方法,它无法考虑地层的详细条件,更无法考虑施工条件、衬砌刚度、衬砌与土层的相互作用及施工中采取的一些辅助措施.因此,一般情况下计算结果与实测结果均相差很大,它们的应用可能性受到不同隧道几何形状、地层条件和施工技术的限制.

1.2 弹性、弹塑性和粘弹性理论解析方法

随着对地层变形研究的深入,许多学者将相关学科的研究成果引入到隧道的软土地层变形研究中,考虑地基土层的变形特点,将地基土作为弹性、弹塑性和粘弹性体考虑.陶履彬、侯学渊^[3]用轴对称的平面应变弹性理论分析了圆形隧道的应力场和位移场,日本的久武胜保^[4]研究了圆形隧道的非线性弹塑性的理论解,将土体作为弹塑性和粘弹性材料,反映了土体的非弹性性质,并考虑了地层位移与时间的相关性.由于受计算条件的限制,只能对较简单的边界条件和初始条件求出解答,所以这些方法几乎无一例外地将地层假定为均匀的、轴对称的平面应变问题,使其应用受到极大的限制,更无法考虑施工条件对地层位移的影响.

2 部分考虑施工过程的数值模拟法

人们通过大量的工程实践逐步认识到,地层移

动不仅与土性有关,而且与施工方法、衬砌形式等有关,解析法只能考虑较为简单的定解条件,而数值计算方法的发展,使得复杂定解条件的处理成为可能,在分析隧道开挖引起的地层位移时,可以对施工过程进行程度不同的模拟.在这方面,有限元以其特有的灵活性得到了广泛的应用.

2.1 二维平面应变分析方法

取隧道的横截面按平面应变问题进行分析,80年代,同济大学岩土工程系对上海饱和软粘土中地铁盾构隧道试验段进行了平面应变的有限元分析,并与现场测试结果进行分析对比,提出了考虑施工因素和固结因素的派克修正公式:

$$\delta_{(x,t)} = \frac{V_l + H \cdot K_x \cdot t}{\sqrt{2\pi}i} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (4)$$

式中: V_l 为施工引起的单位长度的地层损失, m^3/m ; K_x 为隧道顶部土体加权平均的渗透系数, m/d ; H 为隧道埋深, m ; $\delta_{(x,t)}$ 为地面沉降值, m ; x 为沉降点与隧道轴线的水平距离, m ; t 为时间, d .

大西有三和岸本英明^[5]提出一种单元重积分法来考虑开挖面位置的影响,并假定隧道始终处于平面状态,通过改变单元的弹性参数模拟被挖去的单元,开挖的外力以反向加在周围结点上,如此反复操作,模拟开挖面的不断推进.

用二维平面应变分析方法只能有限地反映横截面上的部分特征,几乎无法反映出隧道的施工过程对地层位移的影响,尤其是靠近开挖面附近处.

2.2 纵、横剖面的平面应变分析方法

a. Resendiz 和 Romo^[6]对盾构法隧道的纵、横剖面作了平面应变的非线性有限元分析.为计算由于工作面开挖引起的竖向位移,将隧道表示成一个水平槽,除工作面外,在隧道边界上任何地方土体的位移均被限制.通过纵剖面的平面应变有限元法分析了开挖面应力释放及开挖面移动时,隧道轴线上方不同深度 z 处的土体竖向位移 λ_B ,对计算结果进行曲线拟合后,得到 λ_B 的计算公式:

$$\frac{\lambda_B}{z + D} = (0.0083 - 0.0025 \frac{z}{H})(\sigma_n^0 - p_i) \frac{\epsilon_f}{\sigma_f} F_1 \quad (5)$$

式中: D 为隧道直径, m ; H 为隧道拱顶的埋深, m ; σ_n^0 为隧道轴线处地层水平应力, kPa ; p_i 为隧道开挖面上的液体压力, kPa ; ϵ_f, σ_f 分别为隧道仰拱至地面土体破坏时的轴向应变及应力, kPa ; F_1 是与 $\frac{x_1}{z + D}$ 有关的函数, x_1 为 B 点与开挖面起始点 A 的距离, m .然后,在横剖面中,首先考虑开挖面周围轴对称的应力释放引起土体的竖向位移的大小,并根据计算结

果进行曲线拟合,得到过 B 点的横剖面上距隧道轴线距离为 y 处的位移 λ_y 的计算公式:

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_B} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y'}{W + 0.18y'}\right)^2\right) \quad (6)$$

式中: $W = 1.45 - 1.15 \frac{z}{H}$, $y' = \frac{y}{z + D}$.

为考虑土体和初始衬砌间的环形空隙的闭合及隧道周围扰动土体的固结引起的地层位移, Resendiz 等假设隧道的内边界产生一均匀向内的位移 δ , 并以此作为内边界条件, 进行平面应变的非线性有限元分析, 对分析结果进行曲线拟合, 得到 y 处的竖向位移 λ_y' 计算公式:

$$\frac{\lambda_y'}{\lambda_0'} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y'}{0.23 + 0.43y'}\right)^2\right) \quad (7)$$

其中 $\frac{\lambda_0'}{\delta} = \left[1 + \left(\frac{z}{D}\right)\epsilon_f\right]^{-2.4}$

式中 λ_0' 是由于均匀向内的径向位移 δ 引起的隧道轴线上方的沉降量, 其它符号意义同前.

于是, 由于工作面的应力释放和盾尾空隙的闭合及隧道周围扰动土体的固结造成的总的地层竖向位移可通过将式(6)和式(7)叠加来计算. 因此, 可以在一个较为广泛的几何范围内计算隧道掘进引起的地层位移, 但在分析中参数 δ 只能依经验估算, 另外, 隧道开挖面应力释放引起的横剖面位移的计算方法的物理意义十分模糊. Rodriguez 和 Ruelas^[7]用这种方法对墨西哥城的盾构法污水隧道的沉降作了预测, 与观测值相比, 计算值明显偏大.

b. Finno 和 Clough^[8]分别取纵、横剖面分析了美国旧金山第一座土压平衡盾构隧道, 分阶段模拟了隧道的施工过程. 他们将隧道的开挖过程分为五个阶段, 第一阶段用纵剖面的平面应变有限元分析盾构面的推力使盾构前方土体产生的变形; 第二阶段将一个向外的椭圆分布的径向压力施加到未衬砌隧道的周边上, 模拟盾构通过的鼓起作用; 第三阶段则在隧道周边施加一均匀向内的径向的压力, 模拟盾尾空隙的闭合, 当拱顶向内位移等于盾尾空隙的理论尺寸时, 即认为空隙闭合, 进入第四阶段, 考虑衬砌的安装; 第五阶段考虑孔隙水应力消散引起的固结作用. 其中第二阶段的椭圆形径向压力是由经验确定的, 曾采用一种调节鼓起压力, 使计算得到的侧向变形与实测变形吻合的经验方法, 但需事先设定起拱线与拱顶处的压力比. 该方法的最大特点是能直接确定扰动带的范围和模拟这部分土体后来的固结.

以上所述的方法均假定纵横剖面保持为平面应变状态, 因此, 在隧道施工中主应力方向的变化是无法反映的.

3 三维分析与二维横剖面分析相结合

实际上, 隧道掘进是一个三维问题, 尽管人们都认识到这一点, 但要直接模拟隧道掘进产生的三维效应(包括应力及地层位移, 尤其是靠近开挖面前方的位移)是非常困难的, 从目前的研究水平来看, 还没有一个完全模拟隧道施工的三维非线性弹性及弹塑性分析方法, 国外学者多将三维分析和二维分析结合起来考虑.

a. Ito 和 Hisatake^[9]用三维常量边界元分析了均质线弹性地层中的浅埋隧道在开挖面瞬时到达某一位置且隧道周边应力完全释放时, 地面沉降的特征曲线 $f_0(x_3)$. 然后, 将衬砌作为刚性边界, 对隧道横剖面作二维粘弹性分析, 设 t 时刻地面沉降为 $u_2^0(x_1 = 0, x_2 = h, t)$, 则三维粘弹性地面沉降为

$$u_2(0, h, x_3, t) = u_2^0(0, h, t)f_0(x_3) \quad (8)$$

该方法对盾尾空隙作了两种极端情况处理, 一种认为注浆完全充填空隙, 开挖面通过后, 隧道周边位移不发展; 另一种则完全忽略回填, 认为土层在自然充满空隙前, 土层与衬砌不接触, 当土层填满空隙后, 土层与衬砌接触, 位移不再发展. Hisatake 和 Ito^[10]将该方法应用于两座平行隧道引起的地面沉降的预测, 结果表明当假设盾尾空隙被迅速充填, 壁面无位移时, 计算结果与实测结果较接近. Hisatake 等^[11,12]用上述方法分析了隧道几何参数、地层弹性参数及垂直、轴向应力释放等对地面沉降的影响. 该方法考虑了隧道开挖面的三维效应, 但对衬砌及盾尾空隙的处理过于简化, 没有考虑衬砌刚度对地层位移的影响. 另外, 它只计算地表沉降, 而对地层内部的变形无法计算, 也无法计算固结变形.

b. Lee 和 Rowe^[13]假定土体具有弹性-完全塑性的关系, 用三维弹塑性有限元分析了加拿大安大略省的桑德贝隧道, 引入总间隙参数反映隧道开挖面推进和隧道施工引起的地层损失, 总间隙参数 G 的定义式为

$$G = U_{3D}^* + w + 2\Delta + \delta \quad (9)$$

式中: U_{3D}^* 为开挖面推进引起的等效三维径向位移; Δ 为盾尾壁厚; δ 为拼装衬砌的空间; w 是与施工质量有关的参数.

采用两阶段分析来模拟开挖面的连续推进, 首先设开挖面处的轴向压力被完全释放, 而隧道周边的径向压力直到隧道拱顶仰拱处的径向总收敛值相应于物理间隙, 即 $2\Delta + \delta$ 时才释放, 这样用三维弹塑性有限元确定开挖面前方土体向已开挖部位的三维运动, 估算 U_{3D}^* , 从而计算总间隙参数 G , 然后进

行第二次三维近似计算,模拟整个隧洞的开挖过程。允许隧道周边土体自由地向已开挖区内变形,一旦土体径向收敛达到总间隙参数,环状衬砌单元就开始起作用,且假定土体与衬砌完全接触,并达到平面应变状态。该方法中等效三维径向位移的物理意义较为含糊,且由于三维计算的复杂性,对软土地层的扰动及固结特性均无法考虑。

4 结 语

自从派克法提出以来,关于隧道掘进时软土层位移的分析方法有了许多发展,从不考虑施工方法的经验法、解析法发展到利用数值方法部分地模拟施工过程和地层特性的方法。虽然大量的观察均已证明了地层位移的三维特性,但由于隧道施工的复杂性及一些不确定因素的影响,使兼顾到隧道施工及地层特征的模型不易建立。就隧道软土地层变形分析而言,以下几方面的问题有待作进一步深入的研究:①如何在分析中反映土体的应力路径,合理地选用土体的本构模型;②如何在分析中恰当地反映施工过程,并建立相关的计算模型;③由于土体及施工过程的复杂性,要从理论上完全反映这些还很难,因此,模型试验的研究是非常必要的;④多积累现场量测数据,为理论分析提供充分的论据,实测数据是现场各影响因素的综合反映,要对其中的主要影响因素进行有针对性的探讨;⑤由于三维分析的复杂性,如何在二维分析中恰当地反映出问题的三维特性,是具有很大实用价值的课题,值得深入研究。

参考文献

- 1 Attewell P B. Engineering contract, site investigation and surface movements in tunnelling works. In: Balkema A A ed. Soft-ground tunnelling-failures and displacement, Rotterdam, 1981. 5 ~ 12
- 2 Fang Y S, Lin J S, Su C S. An estimation of ground settlement due to shield tunnelling by the Peck-Fujita method. Can Geotech

- J, 1994, 31: 431 ~ 443
- 3 陶履彬, 侯学渊. 圆形隧道的应力场和位移场. 隧道及地下工程, 1986, 7(1): 9 ~ 19
- 4 久武胜保. 软岩隧道的非线性弹塑性状态. 隧道译丛, 1992(1): 11 ~ 18
- 5 大西有三, 岸本英明. 近似地考虑隧道开挖面推进影响的二维有限元分析法. 隧道译丛, 1984(7): 9 ~ 14
- 6 Resendiz D, Romo M P. Soft-ground tunnelling. In: Balkema A A ed. Soft-ground tunnelling-failures and displacement, Rotterdam, 1981. 65 ~ 74
- 7 Rodriguez L B, Ruelas S A. Ground settlements from the excavation of tunnels in soft-ground tunnelling. In: Balkema A A ed. Soft-ground tunnelling-failures and displacement, Rotterdam, 1981. 57 ~ 64
- 8 Firno R J, Clough G W. Evaluation of soil response to EPB shield tunnelling. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 155 ~ 173
- 9 Ito T, Hisatake M. Three dimensional surface subsidence caused by tunnel driving. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics Vol. 2, 1982. 551 ~ 559
- 10 Hisatake M, Ito T. Prediction of surface settlements due to parallel shield tunnels. In: The Technical Sessions and Publications Subcommittee of the Organizing Committee for the Eighth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering ed. Proceedings of the Eighth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Kyoto, Japan, 1987. 293 ~ 296
- 11 Hisatake M. Ground surface settlements due to shield tunnelling with face pressure. Proc Int Symp Numerical Models in Geomech, 1989. 549 ~ 556
- 12 Hisatake M. Ground surface settlements due to shield tunnels soil-structure interaction: numerical analysis and modelling. In: Bull J W ed. Soil-structure interaction numerical analysis and modelling, UK: E&FN Spon, 1994. 647 ~ 672
- 13 Lee K M, Rowe R K. Analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay Tunnel. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 25 ~ 41

(收稿日期: 1998-02-17 编辑: 熊水斌)

(上接第8页)

彻底改变在水利上, 只算小账, 不算大账, 舍不得花小钱去修工程, 而把大把的钱不断地扔进水里了。进入90年代后, 从1991年到1998年, 我国相继发生了5次大洪水, 1991年经济损失800多亿元, 死亡5113人; 1994年经济损失1700多亿元, 死亡5340人; 1995年经济损失1500多亿元, 死亡3852人; 1996年经济损失2200多亿元, 死亡5840人; 1998年的损

失是2642亿元, 死亡3656人。5年共计经济损失8842亿元, 这笔庞大的经济损失, 可用来修几个三峡或南水北调工程? 仅1998年损失的2642亿元, 相当于一个三峡工程和南水北调中线工程的总投资, 而这些钱在两个多月的时间里, 即付之东流了。这些沉痛教训, 是很值得我们沉思的。

(收稿日期: 1998-12-01 编辑: 马敏峰)