

盾构隧道施工引起地面最大沉降探索

魏新江^{1,2}, 张金菊¹, 张世民²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江大学 城市学院, 杭州 310015)

摘 要: 基于弹性半空间的 Boussinesq 解, 建立在半径为 a 的圆平面上作用一锥形扰动荷载的简化模型, 推导出盾构隧道施工阶段引起的地面沉降最大值 $S_{\max}$ 的简化公式, 并对式中两个重要参数进行探讨。结合实例, 比较了 Peck 法, 实测值与文中公式三者的结果, 认为在不考虑土体蠕变时其解析解与实测值较为接近。

关 键 词: 盾构隧道; 横向最大沉降值

中图分类号: U 457

文献标识码: A

Grope for shield tunnel construction induced ground maximal settlement

WEI Xin-jiang^{1,2}, ZHANG Jin-ju¹, ZHANG Shi-min²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. City College of Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Based on the solution of Boussinesq, a model is established; and the model assumes that a cone-shaped load acts on the circular plane while its radius of a . Then a shield tunnel ground maximum settlement formula during constructions, is derived. The two important parameters are probed into. Then the three results of the Peck method, the formula in this paper and the true value are compared by a real example. Without considering creep of soil, the formula in this paper is closest to the true value.

Key words: shield tunnel; maximum settlement

1 引 言

盾构法施工技术的日益成熟, 盾构施工隧道也越来越多, 然而, 盾构法不可避免地扰动了土层原来的状态, 造成了一定程度的地面沉降, 对地表建筑物带来不良影响。尤其在软土层开挖, 软土灵敏度高, 稍经扰动就会丧失承载力, 且要经过很长的时间才能稳定下来。所以能准确地估计地表沉降具有重要的现实意义。基于对隧道表面沉降槽形状的观察及大量实测值数据, peck^[1]1969 年在墨西哥土力学及基础工程国际会议上首次提出了盾构隧道施工阶段的地面呈正态分布的沉降经验公式:

$$\left. \begin{aligned} s(x) &= S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i}\right); S_{\max} = \frac{v_s}{\sqrt{2\pi i}}; \\ V_s &= V_f \pi r^2; i = R\left(\frac{z}{2R}\right)^{0.8} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $S_{\max}$ 为横向最大沉降量; $s(x)$ 为地面沉降量 (mm) 沿横向 x 的分布; x 为所求沉降点至隧道中

心的水平距离 (m); 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 (m); v_s 为盾构隧道单位长度的地层损失量 (m^3/m)。

后来式 (1) 得到广泛的应用和讨论, 实践已证明盾构隧道施工阶段引起的地面横向沉降形状呈正态分布, 但至今为止, 很少有人对此经验公式寻求理论根据。本文从理论方面寻求横向最大沉降值的解析解。

2 沉降过程及机制

就盾构上方某一点的位移变化而言, 根据盾构在不同推进工况下地面沉降的发展情况, 可将盾构推进引起的地面沉降分为 5 个阶段: ①盾构未到达时, 由于盾构推进引起的地表变化。此时, 地表变化可能表现为沉降, 也可能表现为上抬, 这主要是取决于盾构前方的正面推力和前方土压力的相对大小; ②盾构通过时引起的地表变化, 这一阶段盾构超挖则可能引起地表沉降, 地表欠挖就可能引起地表隆起; ③盾构通过的后尾空隙闭合引起的地面沉

降;④壁后注浆和受扰动土体固结引起的地面沉降;
⑤受扰动土体的二次固结引起的地面沉降。

通过对上海地铁 2 号线的现场测量^[2]发现,第一、二阶段和第五阶段的地表沉降较小,均小于 8%,第三阶段的地面沉降约占最终沉降的 20%左右,而第四阶段中注浆体和受扰动土体的固结沉降约占最终沉降的 50%,甚至 80%。

以上资料显示,盾构隧道产生的主要原因有:

(1) 由于开挖卸荷,建筑空隙使上覆土在某一时间段上失去支撑,从而产生一定沉降。(2) 隧道掘进和注浆时的扰动,打破土体原来的平衡,再次固结从而产生的沉降。从广义上讲,开挖卸荷也是对上覆土产生扰动,也可看作广义扰动荷载。所以可以将隧道沉降看成在广义的扰动荷载作用下产生的。

3 建模及求解

3.1 建模

开挖卸荷产生沉降的扰动荷载显然是竖直向下的,隧道掘进和注浆时的扰动荷载也可以看作是竖向的,这里将开挖卸荷的扰动荷载和隧道掘进和注浆时的扰动荷载总称为扰动荷载。轴线上的某一点的最大沉降,是由上覆土在竖向扰动荷载作用下产生的。为简化研究,假设:土体为均质的弹性半无限体,并不考虑排水固结;扰动荷载为一锥形荷载,其最大值是 p_0 ,底面圆的半径为 a 。图 1 和图 2 分别为盾构隧道横、纵截面荷载示意图。

由弹性半空间表面上作用一个集中力时半空间内任意点 $M(x, y, z)$ 处所引起的竖向位移的弹性力学解答^[3]为

$$w = \frac{p(1+u)}{2\pi E} \left[\frac{z^2}{R^3} + 2(1-u) \frac{1}{R} \right] \quad (2)$$

取 M 的坐标为 $z = 0$, 则得半空间表面任意点的竖向位移 $(x, y, 0)$ 就是地面的沉降:

$$s = w(x, y, 0) = \frac{p(1-u^2)}{\pi E r} \quad (3)$$

显然,中心点处对应的沉降值即为沉降的最大值 $S_{\max}$ 为

$$S_{\max} = \iint_D \frac{p_x(1-u^2)}{\pi E r} d_x d_y \quad (4)$$

式中:积分范围 D 即扰动荷载作用范围的投影,为半径为 a 的圆平面。

为了方便计算,把荷载分成两部分计算:荷载

1 是圆柱形扰动荷载,荷载 2 是圆柱形扰动荷载减去锥形荷载。

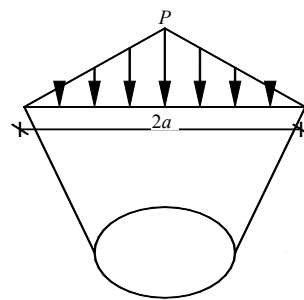


图 1 隧道横截面荷载示意图

Fig.1 Chart of loading of tunnel lateral section

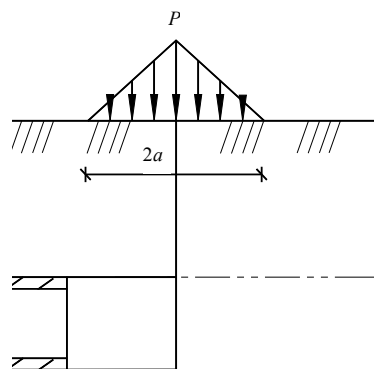


图 2 隧道纵截面荷载示意图

Fig.2 Chart of loading of tunnel lengthways section

在荷载 1 的作用下,

$$S_1 = \frac{P_0(1-u^2)}{\pi E} \iint_D \frac{1}{r} r dr d\theta = \frac{P_0(1-u^2)}{\pi E} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a dr = \frac{2P_0a(1-u^2)}{E} \quad (5)$$

在荷载 2 的作用下,有荷载 $P = \frac{r}{a} P_0$,

$$S_2 = \frac{P_0(1-u^2)}{a\pi E} \iint_D \frac{r}{r} r dr d\theta = \frac{P_0(1-u^2)}{a\pi E} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a r dr = \frac{P_0a(1-u^2)}{E} \quad (6)$$

则最大沉降值为

$$S_{\max} = S_1 - S_2 = \frac{P_0a(1-u^2)}{E} \quad (7)$$

3.2 参数 p_0 的确定

3.2.1 总间隙参数 g 及其确定

隧道产生沉降是由建筑空隙及施工扰动引起的,则荷载 p_0 源于总间隙部分的重力。Lee 和

Rowe^[4]假定土体具有三维弹塑性关系,用有限元分析了加拿大略省桑德贝隧道,引入了总间隙,反映隧道开挖推进和隧道施工引起的地层损失,总间隙参数 g 定义为

$$g = G_p + U_{3D} + w \quad (8)$$

式中: G_p 为物理间隙 (m), $G_p = 2\Delta + \delta$, 其中 Δ 为盾尾壁厚, δ 为拼装衬砌空间; U_{3D} 为等效三维径向位移; w 为与施工质量有关的参数。

一般地, $G'_p = \alpha G_p$, G'_p 考虑到注浆填充,对黏土 $\alpha = 0.116 (h/2R) - 0.042$; U_{3D} 可按式估算: $U_{3D} = 0.5 k \delta_x$, k 为土体切割阻力系数,对一般土, $k = 0.7 \sim 0.9$, δ_x 为土体开挖面上平均轴向挤入位移, $\delta_x = \Omega RP/E$, Ω 为无量纲位移因子,可取 1.12; E 为不排水变形模量; P 为开挖面上应力解除总量, $P = K'_0 P'_0 + P_w + P_i$; K'_0 为有效静止土压力系数, P'_0 为隧道起拱线的垂直有效应力; P_w 为掘进前孔隙水压力; P_i 为开挖面支护压力, $P_i = \gamma h - NC_u$, γ 为土的重度; N 为安全系数,软土地基可取 2.5; C_u 为不排水剪切强度; w 为施工因素,可取 $0.6 G'_p$ 。

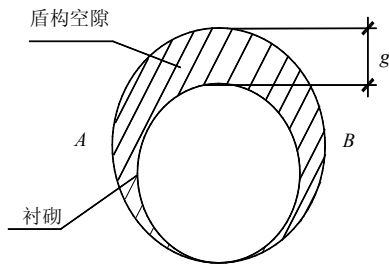


图3 间隙参数的定义

Fig.3 Definition of parameter of space

3.2.2 参数 p_0 的确定

p_0 与土质条件与施工因素有关,主要影响因素有: γ 、 g 、 S_r 、 D/H 和 ϕ , 可用函数表示为

$$p_0 = \gamma(-\ln g) \sqrt{S_r} (D/H) 2^{1-\phi^2} \quad (9)$$

式中: γ 为土的重度; g 为总间隙参数, S_r 为土体的灵敏度; D/H 为盾构直径与埋深的之比。一般的, D/H 越大,则盾构法施工引起的地表横向沉降值 $S_{\max}$ 越大; ϕ 为注浆充填率,其范围认为在 100%~200%。理由为:当 ϕ 小于 100% 则会引起较大的沉降,一般来讲, ϕ 越大,则沉降值越小,但当 $\phi > 200\%$ 时地表沉降量随注浆量的变化不是很大,因此工程中也没必要盲目地提高注浆量,以免浪费材料。

3.3 参数 a 的确定

p_0 是由于间隙部分土体的重力产生的,在 p_0 的作用范围是存在间隙的土体部分。如图 3 所示,在临近盾构边缘的 A、B 点处仍存在间隙,为简化计算,近似认为 $a = 1.4R$ (R 为盾构外半径)。

综上可知,沉降最大值的计算公式为

$$S_{\max} = \frac{p_0 a (1-u^2)}{E} = \frac{1.4R \sqrt{S_r} (-\gamma \ln g) (1-u^2)}{2^{\phi^2-1} E} \left(\frac{D}{H} \right) \quad (10)$$

4 实例计算

上海某隧道采用土压平衡盾构施工,隧道中心线埋深为 22 m,上覆土厚 19 m,依次为杂填土厚 0~2 m,粉质黏土厚 2~14 m,淤泥质黏土厚 14~19 m。盾构外径为 6.34 m,衬砌外径为 6.20 m,内径为 5.50 m,管片宽 1.0 m。对土的模量和重度均取上覆土厚度加权平均值,可得 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $E = 4.2 \text{ MPa}$ 。

(1) Peck 法计算

对 peck 公式的计算,主要是确定两个重要的参数:单位长度地层损失 V_s 及沉降槽宽度系数 i ,取体积损失率 $V_l = 1.0\%$ 。可分别用式(1)中第 3、4 来求解, $V_s = V_l \pi r^2 = 0.3155 \text{ m}^3/\text{m}$, $i = R \left(\frac{z}{2R} \right)^{0.8} = 8.54 \text{ m}$,其中 R 为衬砌半径。

将式(10)和 V_s 代入 Peck 公式,则 $S_{\max} =$

$$\frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} = \frac{V_l \pi r^2}{\sqrt{2\pi i}} = 14.72 \text{ mm}。$$

(2) 简化公式计算

在闭胸土压平衡盾构中, $U_{3D} = 0$,其中间隙参数 g 可通过式(11)得出,为 0.21 m,充填率 $\phi = 1.43$,则 $2^{\phi^2-1} = 2^{1.0449} = 2.063$,灵敏度 $S_r = 4.0$,土的泊松比 $u = 0.35$,将相关数据代式为式(13),得到 $s = 13.8 \text{ mm}$ 。

(3) 实测值经实测数据,此点的沉降值为 13.7 mm。

5 结 论

基于弹性半空间的 Boussinesq 解,建立在半径为 a 的圆平面上作用一锥形扰动荷载的简化模型,推导出盾构隧道施工阶段引起的地面沉降最大值 $S_{\max}$ 的简化公式,并对式中两个重要参数进行探讨。结合实例,比较了 Peck 法、实测值与本文公式三者的结果,计算结果表明,在不考虑土体长期蠕变的

影响时,本解析解与实测值十分接近。对于 Peck 公式,关键是确定地层损失 V_s ,此物理量是一个经验参数,施工前很难确定,只有通过反算和合理假设才能得到。

参考文献

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft grounds[C]// Proceedings of the 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A.C.,1969: 225—290.
- [2] LEE K M, JI H W, SHEN C K, LIU J H, BAI T H, Ground response to the construction of Shanghai metro tunnel-line 2[J]. *Soils and Foundations* 1999, 39(3):113—134.
- [3] 华南理工大学、东南大学、浙江大学,等.地基及基础工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1997,47—48.
- [4] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling I: estimating the gap parameter [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29: 929—940.

国家拟开凿运河连通渤海和黄海

虽然离项目落地还相距甚远,但胶莱海河还是迈出了重要一步:国家拟将与胶莱海河有关的研究纳入渤海环境保护“十一五”国家级战略行动规划。

上升到“国家层面” 《第一财经日报》从2007年11月21日在济南召开的胶莱人工海河座谈会上了解到,目前,国家拟将“开展莱州湾水体交换率的定量评估、开展人类活动对莱州湾水体交换能力影响评估”作为渤海环保科技支撑体系建设的重点之一,纳入渤海环境保护“十一五”国家级战略行动。中国环境科学院院长、《渤海环境保护总体规划》编制组组长夏青研究员昨天在座谈会上说,包括上述“评估”在内的《渤海环境保护总体规划》已经国家11个相关部委中的10个部委签字同意。国家将为上述“评估”研究提供500万元的资金支持。夏青透露,由于胶莱人工海河项目尚未进行过预研和可行性研究,因此不能以胶莱人工海河名义列入《渤海环境保护总体规划》。以“水体交换率评估”名义列入总体规划是采取了“曲线救国”的方式,实质上是对胶莱人工海河的相关研究。一直致力于推动胶莱人工海河项目的山东省海洋与渔业厅副厅长王诗成告诉《第一财经日报》,列入上述总体规划标志着胶莱人工海河项目取得了重大进展,不再像以前局限在专家学者层面上。山东省发改委相关人士则表示,下一步,山东省将积极配合国家和省直有关部门做好包括人工胶莱海河水动力研究在内的莱州湾污染机理与水动力学研究,以及人工胶莱海河工程流路选线和经济、社会、生态效益评估等前期预工作。

项目匡算投资1000亿元 王诗成介绍说,胶莱人工海河是从渤海的莱州湾至黄海的胶州湾之间开通一条宽200米、深10米的人工海河,可双向并行四艘船只,投资约1000亿元。可以有两个备选方案:两湾直线开通,形成长110多公里的人工海河;利用发源于青岛的胶莱河,将其拓宽拓深,形成一个曲线距离约130公里的人工海河。王诗成告诉《第一财经日报》,国家开发银行一直对此项目非常关注。关于项目投资,国开行高层明确表示,人工海河初步匡算的1000亿元项目投资可全部作为国家重点专项投资。项目预研和可行性研究的1亿元可作为风险资金投入。香港六大财团也已关注海河建设,一旦进入市场化运作,将抢滩投资。王诗成强调,这只能说明国家和社会对此项目的看重。至于项目落地,还有很长的路要走。人工海河是一个“世纪宏图”。

项目存在争议 王诗成介绍说,开凿胶莱人工海河的重要目的是为了实现渤海和黄海之间的水体交换,解决渤海的污染问题。他说,渤海的环境污染到了临界点,即便是达标排放,由于渤海是半封闭海湾,水体交换太差,全部交换一次也要30年。而位于黄海的胶州湾也由于半封闭的湾体形状以及陆源排污严重,同样存在生态退化、生物减少等问题。胶莱人工海河的设想甫一提出就有支持和反对的两种声音:投资千亿开凿一条区域性的“小运河”是否值得,毕竟胶莱海河和巴拿马运河、苏伊士运河无法相提并论;再就是开凿此河可能不会带来环境效益,还可能形成环境危害。除了是否能够实现设想中的利用潮汐的力量进行两海之间的海水交换之外,有的学者也提出,海河开通后,如果防渗措施不当或防渗措施遭受破坏,都将导致海河两岸发生海水入侵灾害。山东省原省长韩寓群此前在听取王诗成相关汇报时也提出:“人工海河建设,我最担心的是土地盐碱化问题。”而在11月21日的座谈会上,中国科学院文圣常院士也提出,如果可以顺利实现海水交换,那莱州湾的污染是否会带到胶州湾。这都进一步需要研究。

(信息来源:环境岩土工程在线,编辑部编辑)