

DOI: 10.11779/CJGE20230151

复合成层地层盾构隧道施工引起土体变形计算研究

魏 纲^{1,2}, 朱德涵³, 王 哲³, 齐永洁⁴, 姜海波^{5,6}, 项鹏飞⁶

(1. 浙大城市学院浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 浙江 杭州 310015; 2. 浙大城市学院城市基础设施智能化浙江省工程研究中心, 浙江 杭州 310015; 3. 浙江工业大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 5. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 6. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘 要: 为解决盾构上部多层水平覆土且开挖面内上下水平分层的复合地层条件下盾构施工引起的土体变形问题, 在统一土体解析解法的基础上对其中土质条件影响参数进行修正, 使其可以进行复合地层条件下的土体变形计算, 并对土体移动焦点范围进行了重新的划分。将修正后的统一土体解析解法与类随机介质理论相结合, 得到可以解决盾构开挖面上存在多种土层情况的计算方法, 并且可适用于任意开挖面形状的盾构施工。研究表明: 经过多组工程案例验算, 验证了方法的可行性; 开挖面上某一土层厚度等量增加会使土体变形发生非线性变化; 由于土体损失比变形传递路径对土体变形的影响更大, 相同洞径比下的土体变形可能存在差异。

关键词: 复合地层; 盾构施工; 土体变形; 统一土体解析解法; 类随机介质理论

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)05-0919-08

作者简介: 魏 纲(1977—), 男, 浙江杭州人, 博士, 教授, 主要从事城市地下隧道和岩土工程的方向的研究工作。

E-mail: weig@hzcu.edu.cn.

Calculation of soil deformation caused by construction of shield tunnels in composite layered strata

WEI Gang^{1,2}, ZHU Dehan³, WANG Zhe³, QI Yongjie⁴, JIANG Haibo^{5,6}, XIANG Pengfei⁶

(1. Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnels of Zhejiang Province, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 2. Zhejiang Engineering Research Center of Intelligent Urban Infrastructure, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China; 6. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to solve the problem of soil deformation caused by shield construction under the condition of multi-layer horizontal soil covering on the upper part of the shield and the upper and lower horizontal layers in the excavation face, on the basis of the unified analytical method for soils, the influence parameters of soil conditions are modified so that the soil deformation can be calculated under composite strata, and the focus range of soil movement is re-divided. By combining the modified unified soil analytical method with the analogous stochastic medium theory method (ASMTM), a method can be obtained to solve the problem of multiple soil strata on the shield excavation surface, and can be applied to the shield construction with any shapes of excavation surface. The results show that the feasibility of the proposed method is verified through several engineering cases. The nonlinear change of soil deformation occurs when the thickness of a certain soil layer increases by the same amount. Since the soil loss has more influences on the soil deformation than the deformation transfer path, the soil deformation may be different under the same cavity diameter ratio.

Key words: composite stratum; shield construction; soil deformation; unified soil analytical method; analogous stochastic medium theory method (ASMTM)

0 引 言

由于自然地层的成层性, 盾构隧道不可避免的会穿越复合地层, 相较于均质地层, 复合地层条件下盾

构施工更易发生地表塌陷等工程问题。2022 年 10 月 1

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178399)

收稿日期: 2023-02-22

日南京地铁 6 号线施工区段上方路面发生局部塌陷, 经分析是由于复合地层的复杂地质加上长时间连续施工引起的地层扰动。类似的事例案例时有发生, 若不能准确预测土体变形, 施工过程将会存在巨大的安全隐患。因此对复合地层条件下盾构施工引起土体变形展开研究具有实际的工程意义。

目前针对上下水平分层的复合地层条件下盾构施工引起的土体变形研究主要包括数值模拟、模型实验和理论研究。数值模拟方面, 郭朝^[1]、刘重庆等^[2]、李玉盟^[3]分别对复合地层条件下土层分布、硬岩比以及盾构参数对土体变形的影响进行了研究。模型试验方面, Hagiwara 等^[4]采用离心试验研究了砂层覆盖黏土的双层地层的盾构施工土体变形特点, 王俊^[5]对上层为砂土、下层为硬岩的上软下硬复合地层进行了盾构施工的模型实验研究。在理论研究方面, 目前主要的研究思路可分为两种: ①采用当层法, 将隧道上覆不同材料的弹性模量等效为均质地层后进行计算。艾传志等^[6]采用当层法, 将公路路基和下层岩土材料转化为统一弹性模量的单一土层, 再采用镜像法对开挖引起的地表沉降进行计算; 王剑晨等^[7]在此基础上对当层法进行了 3 层材料的推导; 傅鹤林等^[8]推导了复合地层中浅埋盾构隧道开挖引起地层位移及应力的表达式; 曹利强^[9]利用当层法针对盾构开挖面上存在多种土层的情况提出了土体变形的计算公式。②在原有盾构施工引起土体变形理论公式的基础上, 对公式中考虑土质条件的参数进行修正, 使公式可以应用于特定复合地层条件下的土体变形计算。New 等^[10]针对 Peck 公式中的沉降槽宽度系数, 提出了分层土体条件下的表达式; 邓巍等^[11]将此公式应用于砂黏复合地层的土体变形计算中; 王天佐^[12]利用土层变形的传递性对随机介质理论中的影响角进行修正, 提出了适用于复合地层中的综合影响角; 齐永洁等^[13]以此为基础对上软下硬地层盾构施工土体变形进行了研究, 并对随机介质理论进行了简化。总的来说, 相关学者对于复合地层条件下盾构施工引起的土体变形已有一定的研究, 但目前多数研究仅针对如上软下硬、砂黏复合该类特定工况, 缺少普遍性, 无法直接应用于土层数量较多、土质差异较大的情况, 且目前对于开挖面上存在多种土层情况的理论方法较为单一。因此有必要提出一种能普遍适用于各类土质条件, 且能解决开挖面上存在多层土体工况下盾构施工引起土体变形的计算方法。

利用当前主要理论研究中的第②类研究思路, 将统一土体解析解法^[14]中考虑土质条件的参数进行修正, 推导得出适用于复合地层条件下的统一解法, 再将其与类随机介质理论^[15]相结合, 最终得到能解决开挖面上存在多种土层情况下盾构施工引起的土体变形计算, 且该方法可以适用于各类复合地层条件下各种

形状开挖面的土体损失变形计算。

1 本文方法

1.1 现有理论的不足之处

魏纲^[14]基于 N Loganathan 等的研究方法, 通过对 Verrijt 计算公式进行修正, 推导得到盾构施工引起土体变形的统一解计算公式。统一土体解析解法考虑了土体损失与土质条件两个影响土体变形的主要因素, 可以广泛且有效的分析不同工况下隧道施工引起的土体变形规律, 既可对地表沉降进行计算, 也可用于深层土体的水平与竖向变形计算。但仍存在以下不足:

(1) 统一解的计算公式是根据均质地层建立的, 无法直接应用于复合地层条件下盾构施工引起的土体变形计算, 因此需对原式进行修正。

(2) 目前针对开挖面上存在多层土层情况下土体变形的解析解法尚为单一, 仅有曹利强^[9]提出了利用当层法对土体损失区域的边界进行等效转换后的计算方法, 但计算过程较为复杂。因此有必要提出一种普遍适用各类地层且能解决该工况的理论解法。

1.2 针对不足的改进说明

(1) 笔者分析认为, 土质条件是复合地层与均质地层之间最主要的差别, 因此对统一解中土质条件参数的取值进行修正, 便可使统一解适用于复合地层条件下的土体变形计算。

(2) 曾彬等^[15]提出了可利用定积分计算各类形状开挖面的类随机介质理论方法, 由于该方法可以通过改变边界条件对某一区域土体损失引起的土体变形进行单独计算, 因此笔者认为可以将其与修正后的统一解进行结合, 以解决开挖面上多层土体的情况。

1.3 土体移动焦点参数修正

统一解的土体移动模型假定土体有向一点移动的趋势, 该点称之为焦点, 如图 1 所示, 由于对称性, 焦点位于隧道横截面的纵向对称轴上, 土体移动焦点的范围一般被认定在隧道轴线处到开挖半径底部, 焦点与实际开挖面中点的距离用 d 表示 (焦点在隧道圆心下方, d 值为正), 通过 d 值的变化可以表达土质条件对土体变形的影响。

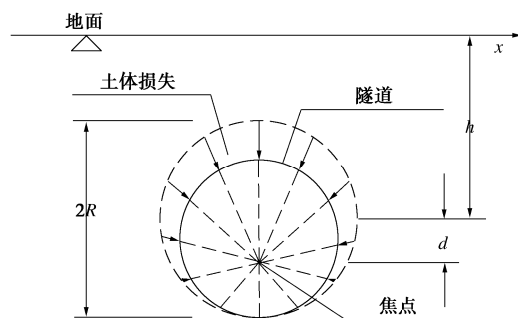


图 1 统一解土体移动模型

Fig. 1 Unified solution soil movement model

为使统一解适用于复合地层的计算中, 对公式中考虑土质条件的参数 d 进行修正, 提出考虑复合地层土质条件下的综合移动焦点 $d_{\text{合}}$, 具体推导过程如下: 文献[16]中建立的 d 与沉降槽宽度系数 K 的转化公式为

$$\frac{h+d}{R+d} - \sqrt{\left(\frac{h+d}{R+d}\right)^2 - \varepsilon} = \frac{R\varepsilon\sqrt{\pi}}{4Kh\sqrt{2}} \quad (1)$$

式中: h 为隧道轴线埋深; R 为隧道开挖半径; ε 为土体损失率。在同一工况下, 以上 3 个参数已知时, 若知道复合地层条件下的综合沉降槽宽度系数 $K_{\text{合}}$, 便可求得相同土质条件下的综合土体移动焦点 $d_{\text{合}}$:

$$\frac{h+d_{\text{合}}}{R+d_{\text{合}}} - \sqrt{\left(\frac{h+d_{\text{合}}}{R+d_{\text{合}}}\right)^2 - \varepsilon} = \frac{R\varepsilon\sqrt{\pi}}{4K_{\text{合}}h\sqrt{2}} \quad (2)$$

接着需对综合沉降槽宽度系数 $K_{\text{合}}$ 进行推导。韩煊等^[17]利用随机介质理论与 Peck 公式之间的联系, 建立了影响角 β 和沉降槽宽度系数的关系:

$$\tan \beta = \frac{1}{K\sqrt{2\pi}} \quad (3)$$

文献[12]利用影响角的传递性推导出复合地层条件下综合影响角 $\beta_{\text{合}}$ 的求解公式, 即

$$\tan \beta_{\text{合}} = \frac{(h_1 + h_2 + \dots + h_i + \dots + h_n)}{K_1 h_1 \sqrt{2\pi} + K_2 h_2 \sqrt{2\pi} + \dots + K_i h_i \sqrt{2\pi} + \dots + K_n h_n \sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

式中: $K_i = 1 - 0.02\varphi_i$, K_i , φ_i , h_i 分别为从地表向下第 i 层地层的沉降槽宽度系数、内摩擦角和厚度, $i=1, 2, \dots, n$ 。将式(4)代入式(3)可得

$$\tan \beta_{\text{合}} = \frac{1}{K_{\text{合}}\sqrt{2\pi}} = \frac{(h_1 + h_2 + \dots + h_n)}{K_1 h_1 \sqrt{2\pi} + K_2 h_2 \sqrt{2\pi} + \dots + K_n h_n \sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

由式(4)推得复合地层下的综合沉降槽宽度系数 $K_{\text{合}}$ 为

$$K_{\text{合}} = \frac{K_1 h_1 \sqrt{2\pi} + K_2 h_2 \sqrt{2\pi} + \dots + K_n h_n \sqrt{2\pi}}{(h_1 + h_2 + \dots + h_n)\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

将 $K_{\text{合}}$ 代入式(2)中, 根据对应工况以及各层土体的沉降槽宽度系数或内摩擦角的取值便可求得对应 $d_{\text{合}}$ 的大小。为了方便计算, 令 $d_{\text{合}} = \alpha R$, 其中 α 为综合土体移动焦点参数, 是移动焦点离隧道轴线距离与隧道外半径之比(为无量纲参数), α 的取值也直接反映了土质条件的好坏, 当其他条件不变时, 土质越好, α 越大, 土质越差, α 越小。

文献[16]收集了 27 个案例, 对 h/R 在 2.5~16.48 内的 K 值与对应 α 的取值进行了初步归纳, 将 α 的取值范围规定为 0~1, 所对应的 K 值分别为 0.626, 0.332。但当 K 值超过该范围时, α 值就超出了 [0, 1] 的取值范围, 结合国内外的工程案例数据, 显然在实际工程中 K 的取值存在超出该范围的情况, α 的取值

范围也会大于 [0, 1], 说明统一土体移动模型确立的求解范围要小于实际工程中存在的取值范围, 因此需对 α 的取值范围重新确定。

范围推导思路: 重力作用和土质条件两个因素共同决定了土体移动焦点的位置, 在常规洞径比(h/D)的工况下, 不考虑其他外力时, 重力作用决定了土体必将向土体损失空隙弧顶下方移动, 因此土体移动焦点与地表距离会大于土体损失空隙到地表的距离, 即 $h+d > h-R$; 根据魏纲等^[16]对土体移动焦点的取值研究可以确定, 土质越软, d 值越小; 土质越硬, d 值越大, 假定土质条件极为坚硬, 土体仅能发生整体竖向滑移, 则土体移动焦点将会接近于无穷远处, 即 $h+d$ 趋向 $+\infty$ 。因此综合分析 $h+d$ 的取值范围为 $(h-R, +\infty)$, 则 d 的范围为 $(-R, +\infty)$, 如图 2 所示。

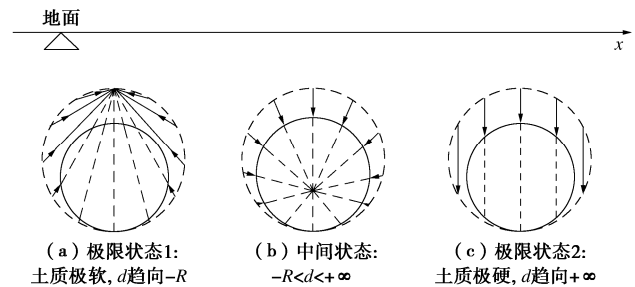


图 2 土体移动焦点边界状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of boundary state of soil movement focus

焦点在隧道圆心时, d 值为 0; 在圆心上方为负, 下方为正。当土质条件较差, 土体松软时, 土颗粒会迅速坍落, 土体移动焦点向 $-R$ 靠近; 当土质较好, 土体坚硬时, 土体偏向于整体滑移, 移动焦点又向 $+\infty$ 靠近。显然在实际工程中 d 的取值范围会小于仅考虑重力作用和土质条件极好时的范围。由于篇幅有限, 本文将上述理想状态下 d 的范围作为统一土体移动焦点的初步取值范围, 则 α 的取值范围为 $(-1, +\infty)$, 当土体移动焦点在隧道圆心上方时, α 小于 0; 当土体移动焦点位于隧道底部切点下方时, α 大于 1。修正前后的 d 和 α 的取值范围如图 3 所示, 其中 G 为土体损失空隙到衬砌顶部的距离。

用综合土体移动焦点 $d_{\text{合}}$ 替换统一解中的土体移动焦点 d , 并用 αR 表示, 得到适用于复合地层条件下土体损失引起土体变形的计算公式:

$$w(x, z) = \frac{4RG - G^2}{8} B \left\{ \frac{h-z}{x^2 + (h-z)^2} + \frac{h+z}{x^2 + (h+z)^2} - \frac{2z[x^2 - (h+z)^2]}{[x^2 + (h+z)^2]^2} \right\} \exp \left[\frac{x^2 \ln \lambda}{(h+R)^2} + \frac{z^2 (\ln \lambda - \ln \delta)}{(h+\alpha R)^2} \right] \quad (7)$$

式中:

$$B = \frac{4h \left[h + \alpha R - \sqrt{(h + \alpha R)^2 - \varepsilon(R + \alpha R)^2} \right]}{R\varepsilon(R + \alpha R)};$$

$$\delta = \frac{1}{2} - \frac{G}{\pi R^2 \varepsilon} (R - G/4) \arcsin \left(\frac{\alpha R}{R - G/4} \right);$$

$$\lambda = \frac{1}{4} - \frac{G}{\pi R \varepsilon} \left[\arcsin \left(\frac{\alpha R}{R - G/2} \right) + \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha R}{R - G/2} \right)^2} - 1 \right];$$

$$G = 2R(1 - \sqrt{1 - \varepsilon})^\circ$$

式中: x, z 分别为计算点处土体与隧道轴线的水平距离和到地面的垂直距离, 以地面向下为正; B, δ, λ 为分步计算的表示符号。为方便计算作以下假定: ①土体变形量由土体损失产生, 不考虑隧道变形、注浆等其他因素; ②各地层均为水平层状, 且土质均匀; ③盾构水平推进。

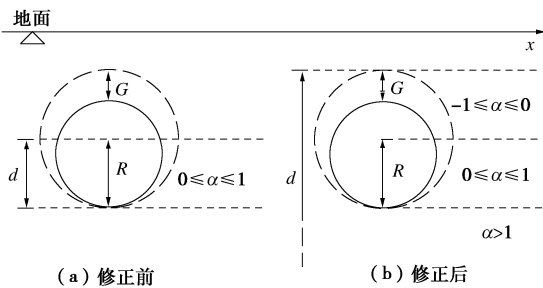


图3 土体移动焦点取值范围示意图

Fig. 3 Schematic diagram of range of values for soil movement focus

1.4 总计算公式推导

式(7)可以解决复合地层条件下盾构隧道开挖面处在单一地层中的情况, 但还不能解决开挖面上存在多层土层的情况, 如图4所示。

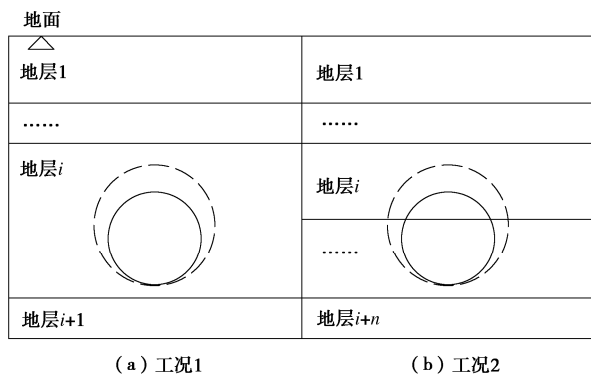


图4 开挖面上土层分布情况示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distribution of soil strata on excavation surface

根据分析, 利用类随机介质理论^[15]对式(7)进行修正, 类随机介质理论是将随机介质理论的思想引入到解析解的一种计算方法, 把盾构开挖引起的土体损失视为无数个单位土体损失, 总的土体变形便等于所有单位土体损失引起土体变形的总合; 将原解析解

中各参数缩小至引起单位土体损失时的参数取值, 再根据实际土体损失区域对缩小后的解析解进行定积分求解, 可求出对任意土体损失形状下的土体变形。因此借助随机介质理论的思想可根据土质条件的不同将土体损失区域划分后进行分步积分再求和, 最终可以解决工况2情况下的土体变形计算。

理论方法计算模型如图5所示, 公式推理具体分3个步骤。

(1) 令土体损失量 $V_{\text{loss}} = 1 \text{ mm}^3/\text{mm}$, 则土体损失率 ε 为

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{loss}}}{\pi R^2} = \frac{1}{\pi r^2} \quad (8)$$

式中: R 为实际隧道开挖半径; r 为引起单位土体损失量所对应的隧道半径,

$$r = \frac{1}{\sqrt{\pi \varepsilon}} \quad (9)$$

(2) 将 r 替换式(7)中的 R , 并将式(7)中的土体损失率用式(8)中的表达式代替, 得到(0, h)处单位土体损失引起的土体变形公式, 此时发生单位土体损失的土体损失空隙为 g , 再用 z_0 代替 h , $x - x_0$ 代替 x , 得到(x_0, z_0)处的单位土体损失引起的(x, z)处的土体竖向变形量 $w(x, z)$:

$$w(x, z) = \frac{4rg - g^2}{8} B \left\{ \frac{z_0 - z}{(x - x_0)^2 + (z_0 - z)^2} + \frac{z_0 + z}{(x - x_0)^2 + (z_0 + z)^2} - \frac{2z[(x - x_0)^2 - (z_0 + z)^2]}{[(x - x_0)^2 + (z_0 + z)^2]^2} \right\} \cdot \exp \left[\frac{(x - x_0)^2 \ln \lambda}{(z_0 + r)^2} + \frac{z^2 (\ln \lambda - \ln \delta)}{(z_0 + \alpha r)^2} \right], \quad (10a)$$

$$B = \frac{4\pi r z_0 \left[z_0 + \alpha r - \sqrt{(z_0 + \alpha r)^2 - \frac{(r + \alpha r)^2}{\pi r^2}} \right]}{r + \alpha r}, \quad (10b)$$

$$\delta = \frac{1}{2} - g(r - g/4) \arcsin \left(\frac{\alpha r}{r - g/4} \right), \quad (10c)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} - gr \left[\arcsin \left(\frac{\alpha r}{r - g/2} \right) + \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha r}{r - g/2} \right)^2} - 1 \right], \quad (10d)$$

$$g = 2r(1 - \sqrt{1 - \varepsilon})^\circ \quad (10e)$$

(3) 对各个地层中土体收敛边界 Ω_i 和衬砌外边界 ω_i 范围内的 $w_i(x, z)$ 进行定积分求解, $w_i(x, z)$ 中的 α_i 为考虑了 $1 \sim i$ 层土质条件的综合土体移动焦点参数, 其余参数及表达式均与式 10(a) ~ (e) 一致, 最后将各地层中引起的土体变形进行求和, 得到复合

地层条件下土体损失引起的土体变形计算公式:

$$W(x,z)=\sum_i^n\iint_{\Omega_i-\omega_i}w_i(x,z)\,d\xi d\eta\quad。(11)$$

式中: $1\leq i<n$ 。

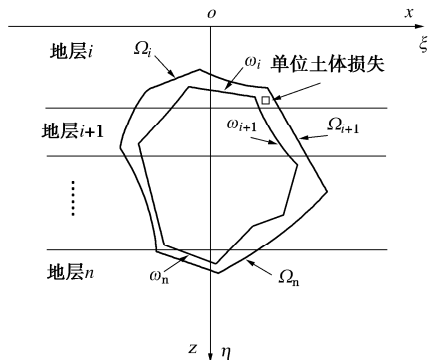


图 5 复合地层条件下类随机介质理论方法模型
Fig. 5 Model of analogous stochastic medium theory method considering composite strata

2 案例分析

2.1 案例一: 广州地铁 2 号线^[18]

广州地铁 2 号线洛溪—南浦区间采用泥水加压盾构, 盾构半径 R 为 3.15 m, 选取该工程 3 个监测断面的实测数据, 监测断面 1, 2, 3 的隧道轴线埋深分别为 16.432, 14.985, 14.166 m, 断面内各地层厚度与内摩擦角 φ 如图 6 所示, 其中地层 1, 2, 3 的土质条件分别为人工素填土、砂层和粉质黏土。

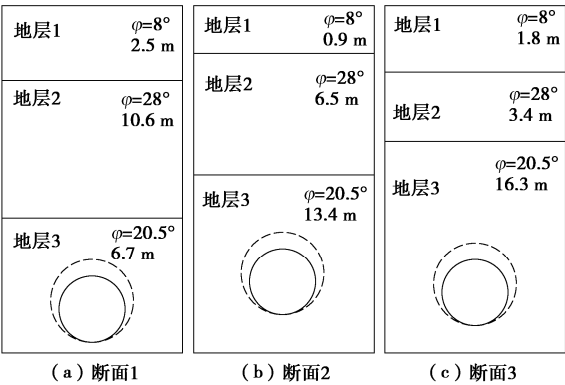


图 6 监测断面工况示意图

Fig. 6 Schematic diagram of working conditions of monitoring section

由于开挖面均处于单一地层中, 因此土体变形公式为

$$W(x,z)=\int_f^e\int_n^mw(x,z)d\xi d\eta-\int_q^p\int_t^sw(x,z)d\xi d\eta\quad。(12)$$

式中: $e=p=h+R$; $f=h-R$; $q=h-R+G$; $m=\sqrt{R^2-(h-\eta)^2}$; $n=-\sqrt{R^2-(h-\eta)^2}$; $s=\sqrt{(R-0.5G)^2-(h-\eta+0.5G)^2}$; $t=-\sqrt{(R-0.5G)^2-(h-\eta+0.5G)^2}$ 。
3 个监测断面根据内摩擦角求得盾构所在地层的 $K_{\text{合}}$

分别为 0.541, 0.549, 0.587, 根据各断面的最大沉降点的实测值, 通过反分析法反推出 ε 的取值分别为 1.43%, 0.83%, 0.7%, 比对该土体损失率取值下的计算结果与对应断面的其他检测值的差距, 即可检验本文方法的可行性。计算得出 3 个断面的 α 分别为 0.203, 0.186, 0.088。为进一步检验本文方法的可靠性, 将工程数据同时代入王天佐^[12]提出的适用于复合地层的随机介质理论进行计算, 将两种计算方法得出的结果与实测值进行比较, 各断面的土体变形量和计算值如图 7~9 所示。

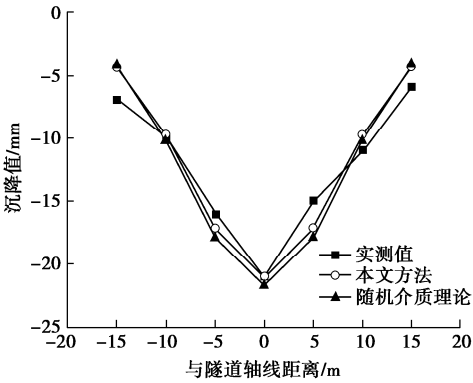


图 7 断面 1 土体变形计算值与实测值对比图
Fig. 7 Comparison of calculated and measured values of soil deformation in Section 1

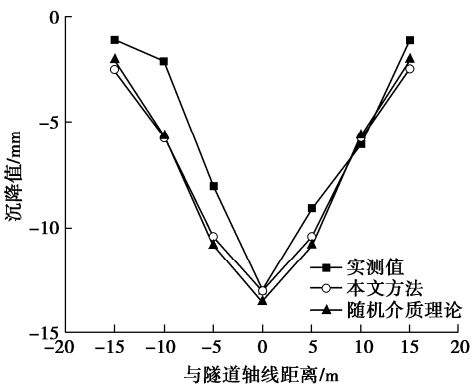


图 8 断面 2 土体变形计算值与实测值对比图
Fig. 8 Comparison between calculated and measured values of soil deformation in Section 2

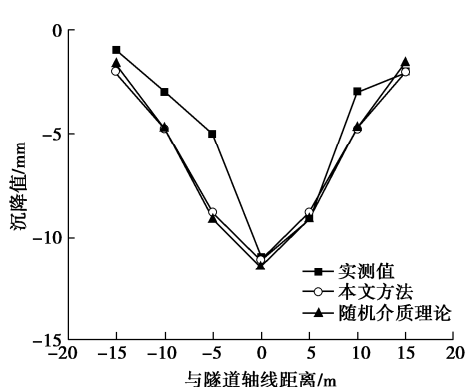


图 9 断面 3 土体变形计算值与实测值对比图
Fig. 9 Comparison between calculated and measured values of soil deformation in Section 3

通过对比,发现本文方法的计算结果与实测土体变形规律相符合,且与随机介质理论的计算值非常接近,证明了方法的可行性;本文方法在与随机介质理论精确度相差不大的情况下,还可应用于开挖面上存在多层土体的情况,适用的工程范围更广。监测面 2, 3 的实测土体变形曲线关于轴线的对称性较差,这可能是由于该监测区段为双线盾构施工导致的。

2.2 案例二：天目山路^[13]

为了检验本文方法在开挖面上存在多层土体工况下的适用性,选取了杭州环城北路—天目山路 02 标段北线先行隧道的工程案例,该工程开挖断面直径为 13.46 m,管片外径为 13 m,环宽 2 m。选取了 DBC468 和 DBC528 两个断面的监测数据,监测面上隧道轴线埋深 h 分别为 27.33, 25.52 m,土体损失率分别为 0.95%, 0.86%,土质情况如表 1 所示。

表 1 DBC468、DBC528 断面土质情况
Table 1 Soil situations of DBC468 and DBC528 sections

地层	土层厚度/m		内摩擦角/(°)
	DBC468	DBC528	
杂填土	2.50	2.70	10.0
粉质黏土①	—	1.00	12.1
粉土夹淤泥质土	2.50	0.85	25.1
淤泥质黏土	5.00	5.70	9.5
粉质黏土夹粉	12.00	7.15	11.5
粉质黏土②	—	6.70	13.8
粉质黏土③	5.00	—	15.7
含砂粉质黏土	1.00	1.30	15.3
黏土	2.50	2.80	12.9
全风化晶屑玻屑凝灰岩	0.40	—	17.3
强风化晶屑玻屑凝灰岩	1.80	2.20	20.3
中等风化晶屑玻屑凝灰岩	—	—	23.0

计算结果与土体变形的监测数据如图 10, 11 所示,从图 10, 11 中可看出实测数据较为紧密的分布在计算得出的土体变形曲线附近,且计算结果得到的地表最大沉降和沉降槽现状与实测数据基本吻合,证明了本文方法在开挖面上存在多层土体工况下的适用性。

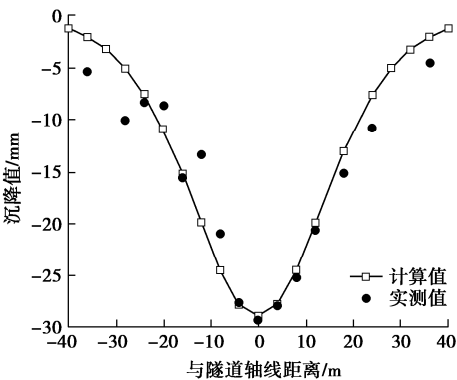


图 10 断面 DBC468 土体变形计算与实测对比图
Fig. 10 Comparison between calculated and measured values of soil deformation of Section DBC468

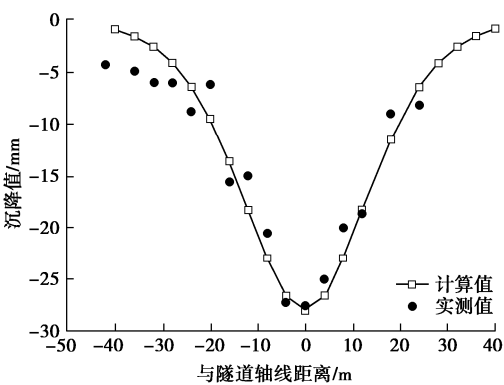


图 11 断面 DBC528 土体变形计算与实测对比图
Fig. 11 Comparison between calculated and measured values of soil deformation of Section DBC528

3 单因素分析

3.1 开挖面上软下硬地层分布

为研究开挖面上不同地层的占比对地表土体变形影响,笔者以上文广州地铁 2 号线洛溪—南浦区间,断面 1 工况为背景,建立了 5 组案例进行对比分析,如图 12 所示,令下层土体在开挖面内的厚度为 H ,开挖直径为 D ,断面 1 作为对照组,开挖面内只有一种土层,因此 H/D 为 0%,在此基础上加入了地层 4,使开挖面内存在两种土层,为上软下硬的土体分布情况,后 4 组案例中 H 与开挖直径 D 的比值分别为 25%, 50%, 75%, 100%。将 5 组土层分布情况下的土体变形进行计算,结果如图 13 所示。

计算发现随着下层硬土在开挖面内的占比增加,地表土体变形量逐渐增大,这是由于地层 4 的土质条件要优于地层 3 的土体,因此随着隧道穿越地层 4,土体的综合移动焦点也随之增加产生的结果。

3.2 开挖面上硬下软地层分布

根据上述对开挖面土层占比变化对上软下硬土体变形的影响解释可以推断,若是上硬下软地层,则随着 H/D 数值的增加,土体的变形量会逐渐减少。为验证此猜想,将上述实验组中地层 3 与地层 4 的土质条件进行调换,使开挖面上形成上硬下软地层,其他条件不变,再将 5 组案例进行计算,计算结果如图 14 所示,证明了猜想以及成因解释的正确性。

图 13, 14 中土体最大变形量呈非线性增大,这是由于底部内切的双圆土体损失模型决定的,土体损失范围为下小上大的非均匀分布,隧道上部的土体损失面积要远大于下部,因此当开挖面下部土体的厚度在开挖面内等量变化时,最终产生的土体变形也就非线性变化。

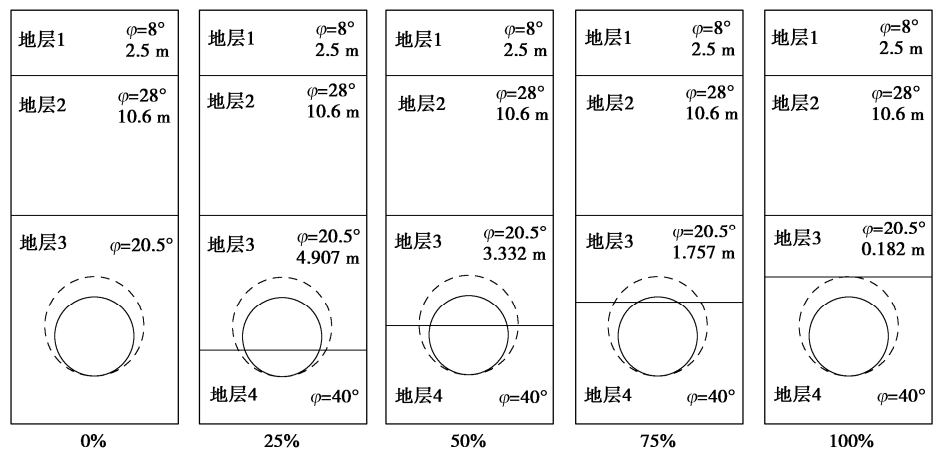


图 12 开挖面上地层分布示意图

Fig. 12 Schematic diagram of distribution of soil strata on excavation surface

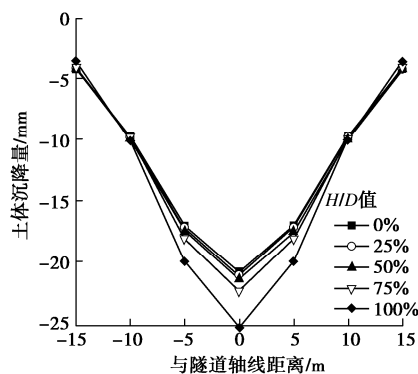


图 13 上软下硬地层分布下的地表土体变形图

Fig. 13 Deformations of surface soil under distribution of upper soft and lower hard strata

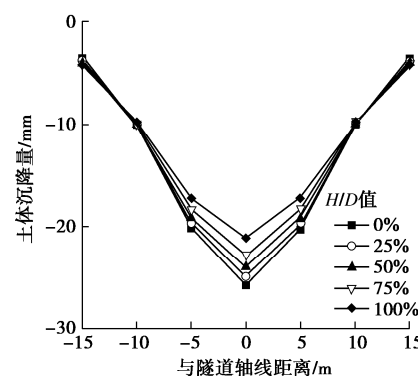


图 14 上硬下软地层分布下的地表土体变形图

Fig. 14 Deformations of surface soil under distribution of upper hard and lower soft strata

4 结 论

(1) 本文将统一土体解析解法运用到了复合地层条件下盾构施工引起的土体变形计算中。通过对参数 $d_{\text{合}}$ 进行推导, 并对土体移动焦点取值区域进行重新分析与划分, 得到了可以考虑复合地层对土体变形影响的计算公式。

(2) 为了进一步解决开挖面上存在多种土层的情况, 本文将修正后的统一解与类随机介质理论相结合,

不仅解决了盾构开挖面上存在多种土层的问题, 还可以适用于各种开挖形状的盾构隧道施工计算中。

(3) 通过单因素分析发现, 无论上软下硬地层还是上硬下软地层, 只要硬土在开挖面内的占比增加, 地表土体变形量就会逐渐增大; 开挖面上某一土层厚度等量变化会使土体变形发生非线性变化。

本文对土体移动焦点取值区域的划分仅考虑了重力作用以及极端土质条件的情况, 划分范围尚为宽泛, 若要得出更精准的土体移动焦点取值范围还应考虑实际土质条件以及土颗粒间的相互作用等因素, 这还须后续进一步的研究。

参考文献:

[1] 郭 朝. 复合地层 $\phi 7 \text{ m}$ 盾构的刀盘适应性及施工引起地层变形规律分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. (GUO Zhao. Analysis of Adaptability of Cutting Pan and Stratum Deformation Caused by Construction of $\phi 7 \text{ m}$ Shield in Compound Ground[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

[2] 刘重庆, 曾亚武, 朱泽奇, 等. 厦门地铁上软下硬地层盾构施工引起的地表沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 444-449. (LIU Zhongqing, ZENG Yawu, ZHU Zeqi, et al. Study on ground surface settlement induced by shield tunneling in upper-soft and lower-hard ground in Xiamen[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 444-449. (in Chinese))

[3] 李玉盟. 上软下硬复合土层中土压平衡盾构法施工技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020. (LI Yumeng. Research on Techniques of Earth Pressure Balanced Shield Tunneling in Upper-Soft-Low-Hard Composite Ground[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese))

- [4] HAGIWARA T, GRANT R J, CALVELLO M, et al. The effect of overlying strata on the distribution of ground movements induced by tunnelling in clay[J]. *Soils and Foundations*, 1999, **39**(3): 63-73.
- [5] 王 俊. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (WANG Jun. Study on the Disturbance Induced by EPB Shield Tunnelling in Mixed Ground With Soft Sand Lying on Hard Rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [6] 艾传志, 王芝银. 既有路基下浅埋隧道开挖引起地层的位移及应力解析解[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(2): 541-546. (AI Chuanzhi, WANG Zhiyin. An analytical solution for displacement and stress caused by shallow buried tunnel excavation under existing highway foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(2): 541-546. (in Chinese))
- [7] 王剑晨, 刘运亮, 张顶立, 等. 下穿施工影响下既有隧道和地层的位移解析解[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, **12**(增刊 2): 678-683. (WANG Jianchen, LIU Yunliang, ZHANG Dingli, et al. The displacement solution of existing tunnel and ground by traversing construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, **12**(S2): 678-683. (in Chinese))
- [8] 傅鹤林, 张加兵, 黄 震, 等. 复合地层中浅埋盾构隧道开挖引起的地层位移及应力预测分析[J]. *现代隧道技术*, 2017, **54**(4): 97-106. (FU Helin, ZHANG Jiabing, HUANG Zhen, et al. Prediction and analysis of ground displacement and stress caused by the excavation of a shallow-buried shield tunnel in a compound stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2017, **54**(4): 97-106. (in Chinese))
- [9] 曹利强. 盾构掘进影响下复合成层地层及环境的力学响应及其控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (CAO Liqiang. Mechanical Responses and Safety Control of Composite Multi-Layered Ground and Built Environment Due to Shield Tunnelling in Urban Areas[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [10] NEW B M, O' REILLY M P. Tunnelling induced ground movements: predicting their magnitude and effects[C]// Proc 4th International Conference on Ground Movements and Structures, London, 1992.
- [11] 邓 崑, 潘建平, 曾雅钰琼. 砂黏复合地层盾构隧道施工地表横向沉降分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(18): 271-275. (DENG Wei, PAN Jianping, ZENG Yuyuqiong. Analysis on the lateral subsidence of surface in shield tunneling construction of sandclay composite stratum[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(18): 271-275. (in Chinese))
- [12] 王天佐. 长春软弱泥岩中地铁隧道施工引起的地层变形研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016. (WANG Tianzuo. Study on Ground Deformation Caused by Subway Tunnel Construction in Changchun Soft Mudstone Formation[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese))
- [13] 齐永洁, 朱建才, 周 建, 等. 土岩复合地层中盾构施工引起的地表位移预测[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(5): 1054-1062. (QI Yongjie, ZHU Jiancai, ZHOU Jian, et al. Prediction of surface displacement caused by shield construction in soil-rock composite strata[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(5): 1054-1062. (in Chinese))
- [14] 魏 纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形三维解[C]//第二届全国工程安全与防护学术会议, 北京, 2010. (WEI Gang. 3-D analytical solution of ground deformation induced by shield tunneling construction[C]// The Second National Conference on Engineering Security and Protection. Beijing, 2010. (in Chinese))
- [15] 曾 彬, 黄 达, 彭 念, 等. 单圆和异形盾构隧道施工引起土体位移计算的类随机介质理论方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(增刊 2): 4356-4366. (ZENG Bin, HUANG Da, PENG Nian, et al. Analogous stochastic medium theory method(ASMTM) for predicting soil displacement induced by general and special-section shield tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(S2): 4356-4366. (in Chinese))
- [16] 魏 纲, 刘加湾. 盾构法隧道统一土体移动模型参数取值研究[J]. *铁道建筑*, 2009, **49**(2): 48-51. (WEI Gang, LIU Jiawan. Study on parameter selection of unified soil movement model for shield tunnel[J]. *Railway Engineering*, 2009, **49**(2): 48-51. (in Chinese))
- [17] 韩 焯, 李 宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(3): 594-600. (HAN Xuan, LI Ning. Comparative analysis of strata prediction models for ground movement induced by tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(3): 594-600. (in Chinese))
- [18] 邓 崑. 砂黏复合地层隧道盾构施工引起地表沉降规律研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019. (DENG Wei. Study on the Law of Soil Settlement Caused by Shield Tunneling in Sandy Clay Composite Stratum[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019. (in Chinese))