

# 复合地层盾构隧道围岩压力计算方法研究

肖明清<sup>1,2</sup>, 封坤<sup>2</sup>, 李策<sup>2</sup>, 孙文昊<sup>1</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 当前复合地层中盾构隧道的建设大量涌现, 而对于复合地层中盾构隧道围岩压力的计算尚存争议。鉴于此, 通过分析经典修正惯用法在复合地层围岩压力计算中存在的问题, 分别提出盾构隧道位于软硬土复合土层及软土硬岩复合土层的荷载计算模式, 并基于极限状态理论范畴的滑移线理论推导复合土层下部主动土压力的计算公式。最后, 针对实际工程中出现的以上2种典型复合地层, 采用提出的计算方法与修正惯用法及实测结果进行对比。结果表明: 修正惯用法的荷载模式过分夸大了隧底被动反力, 造成计算得到的围岩压力与复合地层隧底的实际受荷状态不符, 使隧道底部的变形计算结果出现向上的位移, 且所得内力与实测结果相差较大; 而采用提出计算方法得到的围岩压力与实测值更为吻合, 隧道变形计算结果更合理, 所得内力分布更符合实际, 量值与实测值偏差较小, 验证了所提计算方法的正确性及可靠性, 可为复合地层盾构隧道的设计和研究提供参考。

**关键词:** 隧道工程; 盾构隧道; 复合地层; 围岩压力计算; 滑移线理论; 现场实测

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)09 - 1836 - 12

## A method for calculating the surrounding rock pressure of shield tunnels in compound strata

XIAO Mingqing<sup>1, 2</sup>, FENG Kun<sup>2</sup>, LI Ce<sup>2</sup>, SUN Wenhao<sup>1</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** The calculation of the surrounding rock pressure of shield tunnels in compound strata is still controversial currently. Aiming at the problems of the calculation of the surrounding rock pressure in compound strata by the classic modified routine method, load calculation models of shield tunnels for two cases of the upper-soft and lower-hard mixed soil ground and the upper-soil and lower-rock mixed ground were proposed, and a formula for calculating the active earth pressure in the lower part of the mixed soil ground was derived based on the slip-line theory. Comparisons were conducted among the results of the proposed method, the modified routine method and in-situ tests against the above two kinds of typical compound strata. The results show that the passive reaction acting on the bottom of tunnels is exaggerated by the modified routine method, which leads to unrealistic surrounding rock pressure, upward deformation and greatly different internal force compared with the measured results at bottom. However, the calculation results of the surrounding rock pressure, tunnel deformation as well as the distribution and the value of the internal force by the proposed method in this paper are in good agreement with the in-situ test results. The proposed method can provide reference for the design and research of shield

**收稿日期:** 2019 - 01 - 17; **修回日期:** 2019 - 05 - 26

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0802205); 国家自然科学基金资助项目(51878569, 51578462)

Supported by the National Key Research and Development Program(Grant No. 2016YFC0802205) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos.51878569 and 51578462)

**作者简介:** 肖明清(1970 -), 男, 博士, 1992年毕业于西南交通大学地下及隧道工程专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事隧道及地下工程设计方面的研究工作。E-mail: tsyxmq@163.com。通讯作者: 封坤(1983 -), 男, 现任副教授。E-mail: windfeng813@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0045

tunnels in compound strata.

**Key words:** tunnelling engineering; shield tunnel; compound strata; surrounding rock pressure calculation; slip-line theory; in-situ tests

## 1 引言

复合地层在我国珠三角地区大量分布,在该地区 20 余年的地铁与交通隧道建设实践中,逐渐形成了对该类地层的基本认识<sup>[1]</sup>: 软硬地层变化频繁、地层组合多样,作为结构刚度较小的线状结构物,盾构隧道在该地层施工与运营存在极大的难度与安全风险。

通常,隧道工程涉及的地层宏观上可以分为两类:一类是均一地层,另一类是复合地层。均一地层一般可定义为在开挖断面范围内和开挖延伸方向上由 1 种或若干种工程特征近似的地层组成。复合地层则是在开挖断面范围内或开挖延伸方向上,由 2 种或 2 种以上工程特性差别悬殊的地层组成,如复合土层(砂-黏土地层等)、复合岩土层(上软下硬地层)等。以往盾构隧道主要适用于单一的软弱地层,且断面较小。近年来,随着我国交通隧道大型化、深层化建设的需要,盾构隧道建设断面增大、埋深增加,遭遇复合地层的案例在我国各个地区大量出现,如:我国近年来在长江、珠江流域、东南沿海一带建设的大量盾构法隧道,屡屡遭遇上软下硬复合地层。又如武汉长江隧道,主要穿越强透水砂层,局部区段穿越地层为软硬程度差异极大的砂层-泥质粉砂岩复合地层;广深港高铁狮子洋隧道,先后穿越软土、软硬不均复合地层、全断面风化岩层等;南京扬子江隧道和武汉三阳路公铁合建长江隧道,大量穿越土岩复合地层。在我国珠三角地区的广州、深圳等城市地铁的修建中,复合地层更为屡见不鲜,不但对盾构的施工造成了困难,对盾构隧道结构的设计也提出了新的要求,其中最为重要且常被忽视的便是荷载问题,无论复合土层或复合岩土层,在荷载计算时常常等效为均一地层,难以精确计量荷载,并常常夸大了基底的荷载响应,造成结构配筋设计失当,因此复合地层中盾构隧道的荷载计算方法亟待完善。

对于复合地层隧道荷载的计算问题,国内外学者开展了卓有成效的研究。王志伟等<sup>[2]</sup>提出了现有方法在上软下硬岩质地层中浅埋大跨隧道松动压力计算方面的问题,通过离散元模拟和正交试验,得

出了围岩松动区的形态。雷凯等<sup>[3]</sup>基于珠机市区一珠海机场地铁盾构工程,通过数值模拟将上软下硬复合地层中盾构隧道管片的受力与修正惯用法的计算结果进行对比,针对管片环在岩层中的地层复合比开展参数分析,发现地层复合比的增加对管片环的位移和内力有不利的影 响。张恒等<sup>[4]</sup>以深圳地铁 5 号线软硬不均地层盾构隧道施工为背景,通过对衬砌所承受的水土压力以及轴力、弯矩进行现场测试,发现试验环两侧土压力不对称、拱顶土压力比拱底压力大的特征。何川等<sup>[5]</sup>针对武汉长江隧道局部穿越的层状复合地层,分别开展了层状复合地层和单一地层条件下的管片衬砌结构的相似模型试验,对比发现处于硬岩层区域的管片体结构受力较小。

总体看来,对于复合地层中盾构隧道上部软土层荷载的计算,大多学者已形成了共识,可据埋深条件采用常用方法求解,但对于下部硬土或岩层则尚存争议,主要集中在底部围岩压力及抗力的处理上。针对隧道基底受荷问题,张顶立和陈立平<sup>[6]</sup>认为下部围岩会产生类似于边坡失稳的转移趋势,通过将围岩下部转移区与上部垮落区域叠加,得到了围岩松动边界,提出了围岩结构稳定性及其荷载效应的计算方法。付建军等<sup>[7]</sup>将转移面上底板围岩分为主动区、被动区、过渡区,建立了底脚的计算力学模型及分析简图,通过引用等效传递荷载方法推导了巷道底板塑性区发展深度的解析计算式。张翔等<sup>[8]</sup>针对浅埋隧道开挖后底部隆起变形现象,应用极限分析上限法构造了考虑底部隆起变形的围岩压力计算模型,结合线性 Mohr-Coulomb 准则等推导出极限围岩压力的理论表达式,并通过约束条件编制了围岩压力的计算程序。综上可知,复合地层中盾构隧道荷载计算及其分布与作用方式的特殊性已被试验和实测证实,但如何计算尚存争议,尚未形成系统的计算方法。

鉴于此,本文通过分析经典修正惯用法在复合地层围岩压力计算中存在的问题,分别针对上软下硬复合土层及上土下岩复合岩土层,提出了盾构隧道的荷载计算模式,并基于极限状态理论范畴的转移线理论,推导了复合土层下部主动土压力的计算公式。最后,结合 2 种典型复合地层中开展的现场

实测，将本文提出方法与修正惯用法及实测结果进行了对比分析。

## 2 复合地层采用修正惯用法存在的问题

当前我国盾构隧道管片结构计算普遍采用修正惯用法，该方法为日本土木学会提出的盾构隧道管片结构计算方法<sup>[9]</sup>，其荷载模式如图 1 所示。修正惯用法将隧道结构复杂的结构-地层界面相互作用问题剥离开来，代以地层抗力和地基反力简化分析<sup>[10]</sup>，大大提高了计算效率。然而，该简化处理方式对于均一软土地层是可行的，但在复合地层中应用则存在如下 2 个方面问题：

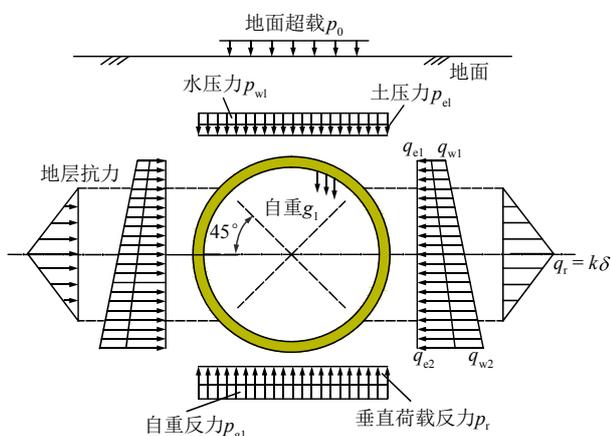


图 1 修正惯用法荷载体系

Fig.1 Loading system recommended in the modified routine method

### (1) 围岩压力的处理

根据实测复合地层衬砌基底围岩压力的分布特征发现<sup>[11-13]</sup>，复合地层中隧底实测围岩压力，与按照修正惯用法荷载体系计算出的基底反力相差较大。无论是复合土层还是复合岩土层，实测得到的下部硬土或岩层的围岩压力量值均明显小于上部软土，且分布形态也常有较大差异。该差异应为下部硬土或岩层的作用方式与软土存在差别，应从荷载计算理论上予以体现，但修正惯用法中难以表征该现象，且目前尚无合理的处理方法。

另一方面，在对基底反力的处理上，修正惯用法过于粗略，该方法假定与垂直荷载、衬砌自重及地面超载相对应的地层抗力与地层位移是相互独立的，计算时取与垂直荷载相平衡的均布反力作为地基反力。分析可知，实际隧道底部地基反力往往是

由主动力和被动抗力两部分构成的。对于复合土层，由于隧道开挖而产生的主动土压力往往很快作用在隧道底部，同时，上部荷载和管片自重引起的被动土压力也将一定时效后作用，且其方向沿隧道径向。修正惯用法采用力平衡的处理方式不但在主动力的计算中存在误差，而且夸大了底部荷载的响应，从而造成底部为硬土的复合地层中结构变形与受力出现偏差。对于复合岩土层，底部围岩强度足以承受因两侧垂直压力产生的侧鼓力，常常仅提供被动抗力，该部分被动力应采用抗力或弹性地基梁方法计量。因此，无论是复合土层还是复合岩土层，修正惯用法中对隧道底部地基反力的处理方式均值得商榷。

### (2) 地层抗力的处理

从广义上讲，隧道结构与地层间的作用主要包括径向与切向 2 个方向，抗力大小分别与隧道结构沿 2 个方向的变形成正比关系。目前，常借助数值手段，依据弹性地基梁理论采用地层弹簧模拟地层抗力。在均一软土地层，因软土变形较快、易与衬砌迎水面接触，形成接触作用后在隧道发生变形的过程中对衬砌切向变形产生抑制作用，所以通常采用的方式为沿隧道全周布置径向与切向弹簧。然而，对于岩层，由于围岩变形缓慢，不易与隧道发生接触作用，因此在隧道变形的过程中岩层不能提供抑制结构切向变形的切向力。同时，由于管片施作后无法及时握裹，在同步注浆浆液达到强度前，结构变形基本已完成，不宜设置切向弹簧。因此，在处理岩层地层抗力时，应仅采用径向弹簧而不设置切向弹簧。

基于以上分析可知，传统修正惯用法的荷载体系在复合地层中应用时并不完全适用，应据地层特性重新审视，修订上软下硬复合土层及复合岩土层的荷载计算模式，并建立复合土层对于下部硬土土压力的计算方法，从而形成适宜的复合地层盾构隧道荷载计算方法。

## 3 复合地层盾构隧道荷载计算模式

### 3.1 复合土层

针对上软下硬复合土层，认为在下覆硬土层的土体性质较差的情况下，上覆荷载有可能达到其极限承载力，导致其产生滑移，进而在下部硬土的管片区域产生主动荷载。土体性质越差，产生主动土压力的可能性也就越大。

复合土层中隧道顶部土层的竖向土压力计算依据常规方法开展。浅埋情况采用全土柱法；埋深较大时，对于砂性土和硬质黏土，当覆土厚度大于  $1D \sim 2D$  (其中， $D$  为管片环外径) 时采用太沙基公式，对于中等固结的软黏土或软黏土采用全土柱法。

软土和硬土具有不同的侧压力系数和地层抗力系数，因此在侧向土压力计算时，水平荷载的分布形态是不同的，在软硬地层交界处侧向土压力有突变。对于侧部的地层抗力，地层弹簧应分别设置不同的参数，且考虑到土层中土体对于管片结构的握裹作用而在隧道变形过程中产生切向力，应该设置径向和切向弹簧。

对于隧底土压力，只采用主动土压力，基底被动土压力通过地层弹簧考虑。得到的荷载计算模式如图 2 所示。特别地，若采用抗力的方式表示基底被动土压力，则可按“基底被动土压力 = 管片上部水土荷载 + 管片自重 - 管片底部主动土压力 - 管片底部水压力”求解。

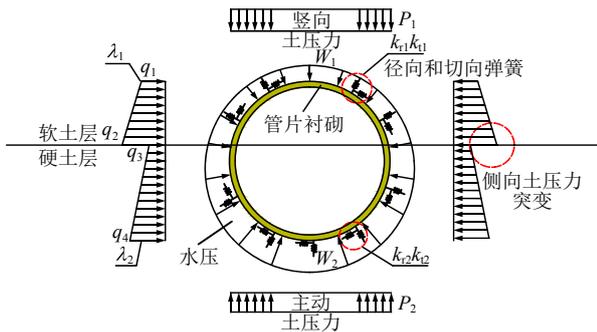


图 2 复合土层的荷载计算模式

Fig.2 Load mode of shield tunnels in soft-hard soil compound strata

### 3.2 复合岩土层

上软下硬复合岩土层中荷载计算模式的确定，关键在于下部岩层荷载的处理。据现有浅埋岩层荷载理论<sup>[14]</sup>，可将下部岩层的水平围岩压力按均布力简化考虑。由于土层需考虑侧压力梯度，且侧压力的量值通常大于岩层，因此侧向围岩压力在软硬地层交界处也有突变。

对于隧底地基反力，底部围岩强度足以承受因两侧垂直压力产生的侧鼓力，所以不考虑主动压力，仅考虑被动抗力。同时，由于岩层在隧道变形的过程中岩层不能提供抑制结构切向变形的切向力，因此计算模型中不计岩层切向力，只采用径向压缩弹簧模拟被动抗力，得到复合岩土层的荷载计算模式如图 3 所示。

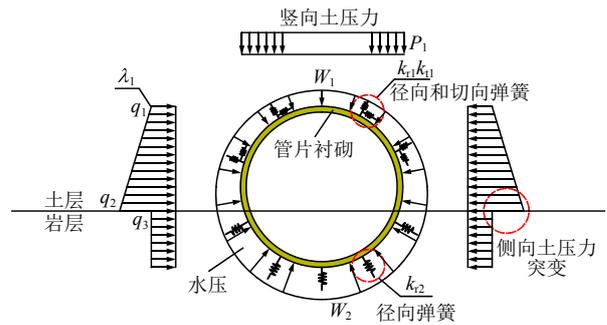


图 3 复合岩土层的荷载计算模式

Fig.3 Load mode of shield tunnels in soft soil-hard rock strata

## 4 复合土层隧底主动土压力的计算

依据节 3.1 分析，复合土层底部主动土压力的计算基于极限状态理论的滑移线场法进行，其求解过程主要包括：

- (1) 依据上软下硬复合土层的交界线位置及相关物理力学参数建立力学模型；
- (2) 求解理想刚塑性材料平面应变问题，得到变形区内的应力分布方程；
- (3) 根据平面应变问题滑移线场的性质，绘制出滑移线场，再根据力平衡和边界条件建立平衡方程；
- (4) 求解底部主动土压力。

### 4.1 力学模型的建立

模型中土体服从 Mohr-Coulomb 破坏准则，假设隧道外表面光滑，即不计隧道表面和土体之间的摩擦。当下部硬土所受上覆软土的竖向压力达到其塑性极限状态时，首先从土层与管片交界位置处进入到塑性极限状态，然后传递至整个下部土层，下部硬土产生破裂滑移的力学模型如图 4 所示。

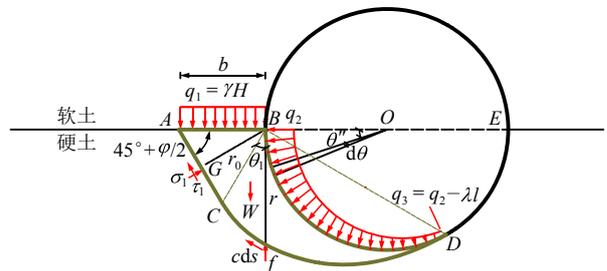


图 4 下部硬土滑移线力学模型

Fig.4 Slip line model of lower part hard soil

其中， $b$  为松动区宽度(由软硬交界地层位于隧道的位置决定)， $\varphi$  为下部围岩的内摩擦角， $\gamma$  为上部软土的平均重度， $H$  为上覆土体的高度， $\sigma$  为滑移线方向的径向应力， $\tau$  为滑移线方向的切向应力， $\theta_1$  为过渡区  $BCD$  上半径与  $r_0$  的夹角， $\theta'$  为作用在

衬砌上的径向反力与水平面的夹角。可知，AC 连线与水平方向夹角为  $\pi/4 + \varphi/2$ ，且  $AC = BC$ 。

图 4 中 ABC 区域为主动应力区，2 条滑移线 AC，BC 都为直线，根据 Hencky 第一定理<sup>[15]</sup>可知，在整个 ABC 区域内  $\sigma$  和  $\theta$  不变，为均匀应力区。由 AB 线上作用的  $\sigma_n = q_1$ ， $\tau_n = 0$ ，可计算出 AC 线上的剪应力和正应力的大小分别为

$$\tau_1 = \frac{\sin \varphi \cos \varphi (q_1 + c \cot \varphi)}{\sin \varphi + 1} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{q_1 - c \sin \varphi \cos \varphi}{\sin \varphi + 1} \quad (2)$$

进而可得到 ABC 区域中的每一点的应力状态。

BCD 区域为过渡区，属于锐化的 Riemann 问题，BC 线为对数螺旋线，可通过下式表示：

$$r = r_0 e^{\theta_1 \tan \varphi} \quad (3)$$

因对数螺旋线 BC 上每一点的半径与该半径和对数螺旋线交点处法线的夹角即为内摩擦角  $\varphi$ ，故滑动面任何一点的正向应力和摩擦力的合力  $f$  也与该点法线成  $\varphi$  角，同时该合力的方向与该点的半径方向重合。因对数螺旋线上的每一半径都通过点 B，故 CD 线上的正应力和摩擦力的合力也通过点 B。除此之外，黏聚力  $c$  的作用方向与 CD 线相切。另外，内弧线 BD 上的反力沿弧线按一定的比例呈现顶部大底部小的分布规律，可通过积分进行计算。

滑移区的重力作用：考虑重力作用对衬砌所受主动土压力的影响，重力的作用点为整个滑动体的重心，滑动体的面积为  $\Omega$ ，假设重力作用点(滑移线形式确定后，可以准确求解)与点 B 之间的距离为  $d_1$ ，滑移区的重力为

$$W = \gamma \Omega \quad (4)$$

#### 4.2 下部土层主动土压力的分布范围

本次滑移面采用 Rankin 土压力理论计算，滑移线的方向与大主应力面成  $45^\circ + \varphi/2$  夹角。据 Rankin 土压力理论，在土体中将会产生无穷多个相互平行的可能滑动面，然而实际工况中只有与隧道衬砌相切的一条滑移线。因此，需针对具体的工程情况唯一确定滑移线的形状，其关键在于确定滑移线与隧道的切点位置。随后，可通过切点位置求出松动带宽度  $b$ ，按照地层分界线与隧道位置关系可分为以下 3 种情况：

(1) 工况 1：软硬土地层分界线位于隧道中心线上方

如图 5 所示，假设直线 OB 与过圆心的水平线的夹角为  $\theta_3$ ，以 BO 直线为  $x$  轴，B 为极坐标中

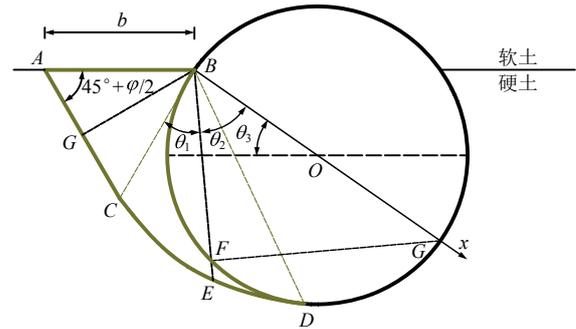


图 5 工况 1 力学模型  
Fig.5 Slip line model of case 1

心点建立极坐标，则盾构隧道结构上任意位置处的点可表示为  $r_2 = 2a \cos \theta_2$ ，其中， $a$  为隧道半径， $\theta_2$  为圆上任意位置点 F 与 B 所连直线 BF 与  $x$  轴的夹角。根据式(3)可得

$$r_1 = r_0 e^{\theta_1 \tan \varphi} \quad (5)$$

其中，

$$r_0 = b / 2 \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

因此可得

$$\theta_2 = \frac{3}{4} \pi - \frac{\varphi}{2} - \theta_1 - \theta_3 \quad (6)$$

若使螺旋线 CD 与隧道相切，则需满足如下条件：

① 长度相等， $r_1 = r_2$ ，则

$$2a \cos \left( \frac{3}{4} \pi - \frac{\varphi}{2} - \theta_1 - \theta_3 \right) = b / 2 \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\theta_1 \tan \varphi} \quad (7)$$

② 斜率相等， $\frac{dr_1}{d\theta} = \frac{dr_2}{d\theta}$ ，则

$$2a \sin \left( \frac{3}{4} \pi - \frac{\varphi}{2} - \theta_1 - \theta_3 \right) = \frac{b}{2 \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} \tan \varphi e^{\theta_1 \tan \varphi} \quad (8)$$

联立式(7)，(8)，可得

$$\theta_1 = \frac{3}{4} \pi - \frac{3\varphi}{2} - \theta_3 \quad (9)$$

在内摩擦角  $\varphi$  和土层分界线位置  $\theta_3$  确定后，即可得到切点 D 的位置，将  $\theta_1$  代入式(7)，在隧道半径  $a$  已知的情况下，可求得松动带宽度  $b$ ，进而确定出地层分界线位于隧道中心线上方时下部硬土的滑移线表达。

(2) 工况 2：软硬不均地层分界线位于隧道中心线处

如图 6 所示，工况 2 时直线 OB 与过圆心的水平线的夹角  $\theta_3$  为 0，则式(9)可简化为

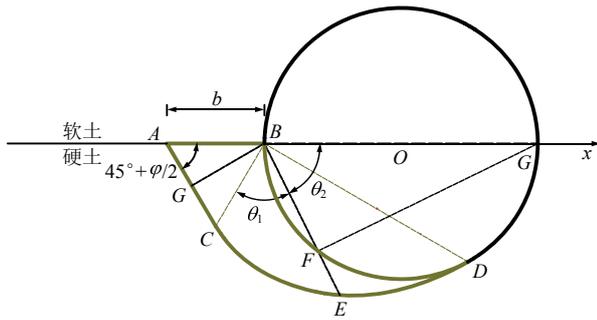


图 6 工况 2 力学模型  
Fig.6 Slip line model of case 2

$$\theta_1 = \frac{3}{4}\pi - \frac{3\varphi}{2} \quad (10)$$

可知，当内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$  时，计算得到的  $\theta_1 = 90^\circ$ ，达到对数螺旋线  $\theta_1$  的取值极限。当内摩擦角  $\varphi > 30^\circ$  时， $\theta_1 < 90^\circ$ ，如图 6 所示；当内摩擦角  $\varphi < 30^\circ$  时， $\theta_1 > 90^\circ$  达到对数螺旋线的取值极限，这时对数螺旋线还未与圆形隧道相切，该工况的讨论见下述工况 3。

(3) 工况 3：软硬不均地层分界线位于隧道中心线下方

如图 7 所示，工况 3 时直线  $OB$  与过圆心的水平线的夹角为  $\theta_3 < 0$ 。导致  $\theta_1$  偏大，易超出其取值极限，如果在达到对数螺旋线的取值极限仍未与隧道相切，则为滑移线  $DF$  与隧道相切，切点为  $E$ 。由几何关系可得切点  $E$  与隧道中心点连线  $OE$  与  $x$  轴的夹角为  $45^\circ + \varphi/2$ 。此时松动带宽度  $b$  的计算方式与对数螺旋线与隧道相切的方式不同，可通过下式求得

$$b = a \left[ \frac{1}{\sin\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} - \frac{2\sin\theta_3}{\cos\varphi} + \sin\theta_3 \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) + \cos\theta_3 \right] \quad (11)$$

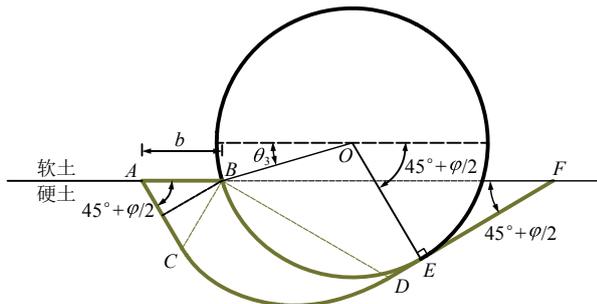


图 7 工况 3 力学模型  
Fig.7 Slip line model of case 3

从而可求得地层分界线位于隧道中心线下方且对数螺旋线不与圆形隧道相切时的下部硬土滑移线表达。

### 4.3 下部土层主动土压力反力的大小

假设土体滑动导致作用在衬砌的反力为径向荷载，作用范围为  $BD$ 。在软硬不均地层与隧道衬砌的交界点处的荷载集度最大为  $q_2$ ，向下以系数  $\lambda$  递减，隧道其他位置处的荷载集度为  $q_x = q_2 - \lambda l_x$  (其中， $l_x$  为任意位置与最大荷载集度位置的距离)。

下部主动土压力  $q_2$  的大小与地层界线的位置有关：

$$q_2 = q_1 K_a \cos\theta_3 = q_1 \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \cos\theta_3 \quad (12)$$

式中： $q_1$  为软硬地层交界处的竖向荷载， $K_a$  为主动土侧压力系数。

在地层界线与隧道的相对位置关系确定的前提下，对点  $B$  取矩  $\sum M_B = 0$ ，则

$$\sum M_B = M_{AB} + M_{AC} + M_{CD} + M_{BD} + M_W = 0 \quad (13)$$

其中，

$$M_{AB} = \frac{rHb^2}{2} \quad (14)$$

$$M_{AC} = \frac{\sigma_1(\overline{CG}^2 - \overline{AG}^2)}{2} - \tau_1 \overline{ACBG} \quad (15)$$

$$M_{CD} = -\int_0^{\theta'} dM = \frac{c}{2 \tan\varphi} (\overline{BC}^2 - \overline{BD}^2) \quad (16)$$

$$M_{BD} = -\int_0^{\theta''} (q_2 - \lambda\theta r)r^2 \sin\theta d\theta = (\cos\theta'' - 1) \cdot q_2 r^2 + \int_0^{\theta''} \lambda\theta r^3 \sin\theta d\theta = q_2 r^2 (\cos\theta'' - 1) + \lambda r^3 (\sin\theta'' - \theta'' \cos\theta'') \quad (17)$$

$$M_W = \gamma \Omega d \quad (18)$$

$$\overline{AG} = b \cos\left(45^\circ + \frac{\sigma}{2}\right) \quad (19)$$

$$\overline{CG} = \frac{b}{2} \frac{\left[\sin^2\left(45^\circ + \frac{\sigma}{2}\right) - \cos^2\left(45^\circ + \frac{\sigma}{2}\right)\right]}{\cos\left(45^\circ + \frac{\sigma}{2}\right)} \quad (20)$$

$$\overline{AC} = \frac{b}{2 \cos\left(45^\circ + \frac{\sigma}{2}\right)} \quad (21)$$

$$\overline{BG} = b \sin\left(45^\circ + \frac{\sigma}{2}\right) \quad (22)$$

联立式(1)，(2)及式(15)~(24)，可求解荷载集度的折减系数  $\lambda$ ：

$$\lambda = \left[ \frac{\tau_1 \overline{ACBG} - \frac{c(\overline{BC}^2 - \overline{BD}^2)}{2 \tan \varphi}}{\frac{\sigma_1(\overline{CG}^2 - \overline{AG}^2) + \gamma H b^2}{2} - \gamma dA + q_2 r^2 (\cos \theta'' - 1)} \right] / [r^3 (\theta'' \cos \theta'' - \sin \theta'')] \quad (23)$$

#### 4.4 下部土层主动土压力反力的求解

由于滑移线的形式根据软硬交界面的位置呈现较大的变化，当滑移线的发展超过隧道底部时，由对称性可知，左、右两侧的滑移线将出现重叠，此时重叠部分的土压力需进行叠加。

从滑移线与隧道的相切情况，可将求解分为 3 种叠加情况，即：(1) 两侧对数螺旋线相切且不重叠时，不叠加；(2) 对数螺旋线相切且重叠时，将对数螺旋线区域土压力进行叠加；(3) 非对数螺旋线相切且重叠时，对所有重叠区域土压力进行叠加。具体如下：

(1) 对数螺旋线相切且不叠加。首先根据地层分界线位于隧道的位置确定  $q_2$ ，其他位置处的主动土压力  $q_x = q_2 - \lambda l_x$ 。

(2) 对数螺旋线相切且叠加。如图 8 所示，对于非重叠区域，计算方法与前述相同；对于重叠区域，应首先计算出产生反力区域的总的弧长为  $l_{\text{总}}$ ，然后计算得到重叠区域的弧长为  $l_a$ ，根据任意位置处的主动土压力为  $q_x = q_2 - \lambda_1 l_x$ 。

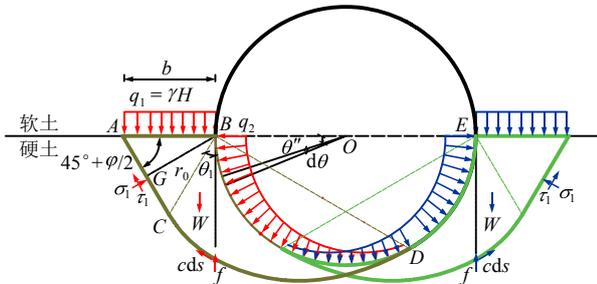


图 8 对数螺旋线相切且叠加的情况

Fig.8 A case that the logarithmic spiral of the slip-line is tangent to the tunnel and the left and right parts are superimposed

可得重叠区域的主动土压力为

$$q_x^{\text{叠}} = q_2 - \lambda_1 l_x + q_2 - \lambda_1 (l_{\text{总}} + l_a - l_x) = 2q_2 - \lambda_1 (l_{\text{总}} + l_a) \quad (24)$$

可见，叠加区域的主动土压力的集度为常量，即均布荷载。

(3) 非对数螺旋线叠加。如图 9 所示，由于 DF 线上的应力状态未知，在进行计算前需求出 DE 线上的应力，由对数螺旋线上应力关系，可得

$$\bar{P}_D = \bar{P}_C e^{(2\theta_C - 2\theta_D) \cot(2\mu)} \quad (25)$$

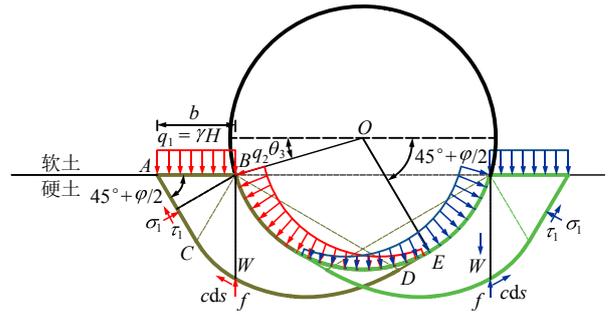


图 9 非对数螺旋线相切且叠加的情况

Fig.9 A case that non-logarithmic spiral of the slip-line is tangent to the tunnel and the left and right parts are superimposed

其中，

$$\bar{P}_C = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cot \varphi = \sigma_{C1} + \tau_{C1} \tan \varphi + c \cot \varphi \quad (26)$$

$$\sigma_{C1} = \frac{q_1 - c \sin \varphi \cos \varphi}{\sin \varphi + 1} \quad (27)$$

$$\tau_{C1} = \frac{\sin \varphi \cos \varphi (q_1 + c \cot \varphi)}{\sin \varphi + 1} \quad (28)$$

式中： $\mu$  为两组滑移线间夹角的一半， $2\mu = \frac{\pi}{2} - \varphi$ 。

将  $\theta_C = -\frac{\pi}{2}$ ， $\theta_D = 0$  代入式(25)可得

$$\bar{P}_D = \bar{P}_C e^{-\pi \cot(2\mu)} \quad (29)$$

最终可以求出 DE 线上的应力状态为

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \bar{P}_D \sin \varphi \cos \varphi \\ \tau_2 &= \bar{P}_D \cos^2 \varphi - c \cot \varphi \end{aligned} \quad (30)$$

对于非重叠区域， $q_2$  的计算方法与前述计算方法类似，如下式：

$$q_x^{\text{叠}} = q_2 - \lambda_2 l_x + q_2 - \lambda_2 (l_{\text{总}} + l_a - l_x) = 2q_2 - \lambda_2 (l_{\text{总}} + l_a) \quad (31)$$

其中，

$$\lambda_2 = \left[ \frac{\tau_1 \overline{ACBG} + \tau_2 \overline{DEBD} \cos \varphi - \sigma_2 \overline{DEBD} \sin \varphi - \frac{c(\overline{BC}^2 - \overline{BD}^2)}{2 \tan \varphi} - \frac{\sigma_1(\overline{CG}^2 - \overline{AG}^2) + \gamma H b^2}{2}}{\gamma dA + q_2 r^2 (\cos \theta'' - 1)} \right] / [r^3 (\theta'' \cos \theta'' - \sin \theta'')] \quad (32)$$

其他位置处的主动土压力为  $q_x = q_2 - \lambda_2 l_x$ 。

对于重叠区域，计算方式与“对数螺旋线相切且叠加”的情况的相同，叠加后重叠区域的主动土

压力见式(31)，可见，该情况下叠加区域的主动土压力也为均布荷载。

### 5 算例与验证

针对 2 种典型复合地层，采用本文提出的荷载模式及方法进行计算分析，并将计算结果与修正惯用法及实测结果进行比较。

#### 5.1 实测断面情况

##### (1) 复合土层

以广深港狮子洋软硬土复合地层断面为例，测试断面里程为 DIK33+900，位于左线进出洞段，距左线进口处 240 m。隧道通过层穿越淤泥质土、粉细砂、粗砾砂、中砂构成的复合地层，下卧层为中砂层，隧道埋深约 12 m。该断面地质情况如图 10 所示。

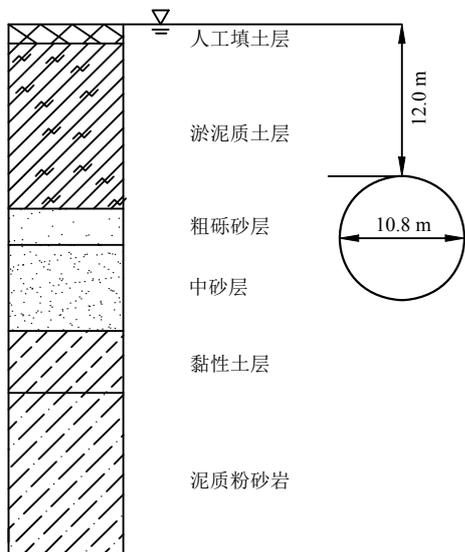


图 10 狮子洋隧道复合土层测试断面情况

Fig.10 In-situ test section of soft-hard soil compound stratum in Shiziyang tunnel

##### (2) 复合岩土层

以武汉地铁 8 号线软土硬岩复合地层为例，该断面为江中最高水头断面，隧道穿越土层为：上部为粉细砂、圆砾土，下部为强风化砾岩、弱胶结砾岩的复合岩土层。隧道下卧层为中等胶结砾岩，隧道上方长江多年平均水位为 18.97 m(吴淞高程)，覆土厚度约为 19.34 m，该断面地质剖面见图 11。

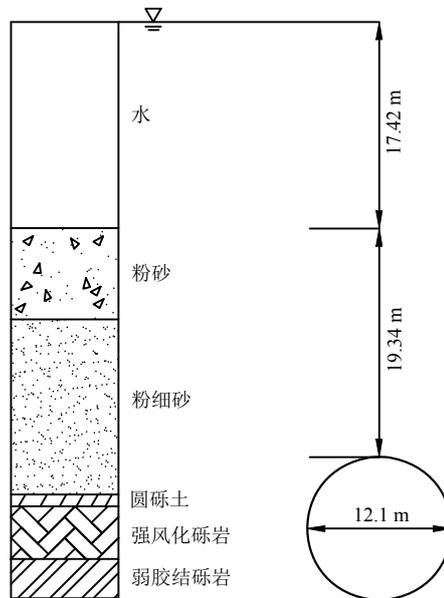


图 11 武汉地铁 8 号线复合岩土层测试断面情况

Fig.11 In-situ test section of soft soil-hard rock compound stratum in shield tunnels of Wuhan Metro Line 8

对以上 2 种复合地层断面进行围岩压力以及衬砌内力的现场实测，2 种地层的物理力学参数如表 1 所示。

#### 5.2 结果比较与分析

##### (1) 围岩压力

复合土层断面隧道基底荷载分为主动土压力和被动地层抗力两部分，前者可以通过本文提出的方

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of two tested sections

地层类型	地层	天然重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦 角/(°)	变形模量/MPa	静止侧 压力系数	基床系数水平/ ( $MPa \cdot m^{-1}$ )
复合土层(狮子洋隧道)	人工填土层	18.0	-	-	-	-	-
	淤泥质土层	16.9	11.42	7.60	2.00	0.67	3.5
	粗砾砂层	19.2	-	35.00	30.00	0.30	13.0
	中砂层	19.2	-	34.00	25.00	0.30	11.0
	黏性土层	18.8	23.47	12.56	5.00	0.50	13.0
复合岩土层(武汉地铁 8 号线)	粉砂	19.4	0	30.00	1.49	0.33	14.0
	粉细砂	19.4	0	32.00	1.49	0.35	18.0
	圆砾土	21.0	-	38.00	1.48	0.30	50.0
	强风化砾岩	23.9	-	45.00	1.47	0.30	70.0
	弱胶结砾岩	24.3	-	50.00	1.43	0.30	80.0

法计算得到，而被动地层抗力则需通过数值分析计算得到。由于修正惯用法与实测围岩压力均为总围岩压力，既包括主动土压力又含有被动地层抗力，为方便比较，本文采用梁-弹簧模型求解，将地层弹簧轴力与按照本文方法计算出的主动土压力叠加，计算出该断面隧道底部受到的总土压力，顶部土压力按照传统荷载计算方法得出。复合土层中的围岩压力的结果对比如图 12(a)所示。

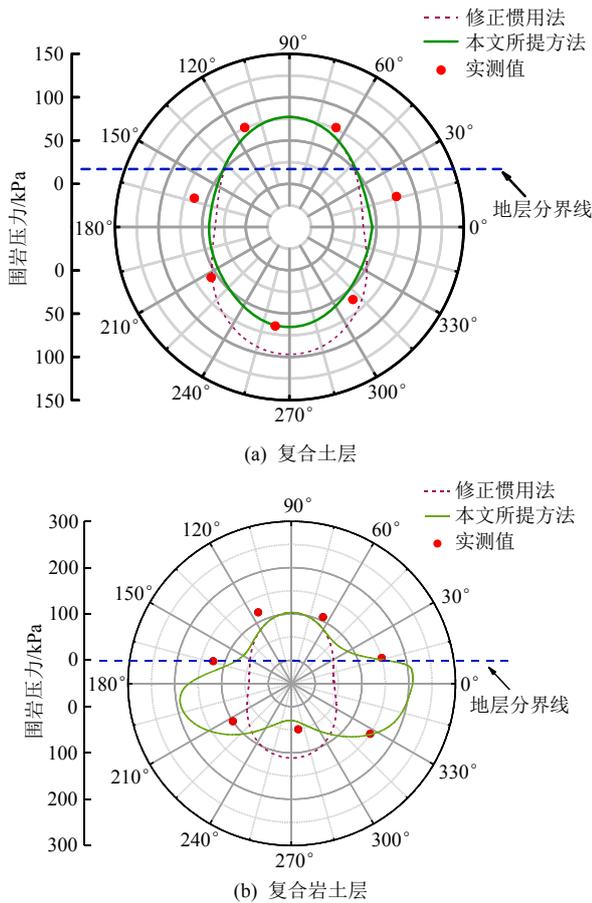


图 12 复合围岩压力对比

Fig.12 Comparison of the surrounding rock pressure

可见，修正惯用法荷载模式计算得到的径向土压力形状为竖向大两侧小的椭圆形，拱顶、上部左右拱肩(60°与 120°位置)与下部左右拱脚(210°与 330°位置)处的荷载计算值与实测值相差不大，而两侧拱腰、拱底处的荷载值相差较大，其中拱底处修正惯用法的计算值比实测值大 34.41 kPa，两者相差 34.45%。相较而言，采用本文方法计算得到的土压力与实测值更为吻合，在隧道底部处比实测土压力略大，相差仅为 3.19%，在左、右两侧的荷载值也较修正惯用法荷载模式更接近实测值。由此可知，修正惯用法的荷载模式过分夸大了基底被动反力，造成计算出的土压力与复合土层隧底实际受荷状态

不符。

采用本文针对复合岩土层提出的荷载模式，在顶部软土部分土压力采用传统方法计算，底部岩层的围岩压力通过梁-弹簧模型计算得到的地层弹簧轴力换算，得出围岩压力结果对比如图 12(b)所示。

可见，修正惯用法计算的围岩压力仅在隧道上部软土层的位置与实测值较为接近，在下部岩层中与实测值相差较大，在右侧拱腰上方差值最大达 106.08 kPa，两者相差 241.53%；在隧道底部荷载计算值比实测荷载值大 64.79 kPa，两者相差 56.44%。

相较之下，本文所提的荷载模式计算得到的径向土压力整体规律与实测土压力较为一致，左右两侧的土压力较大，基底土压较小。荷载计算值与整环管片实测值的最小误差仅为 2.74%，平均误差为 21.68%。可见，复合岩土层中修正惯用法不适用，而本文提出的荷载模式更符合实际隧道的受荷情况。

### (2) 结构变形

针对 2 种复合地层，在用梁弹簧模型进行计算时，分别采用修正惯用法与本文提出的荷载模式施加荷载，将结构位移进行对比如图 13 所示。

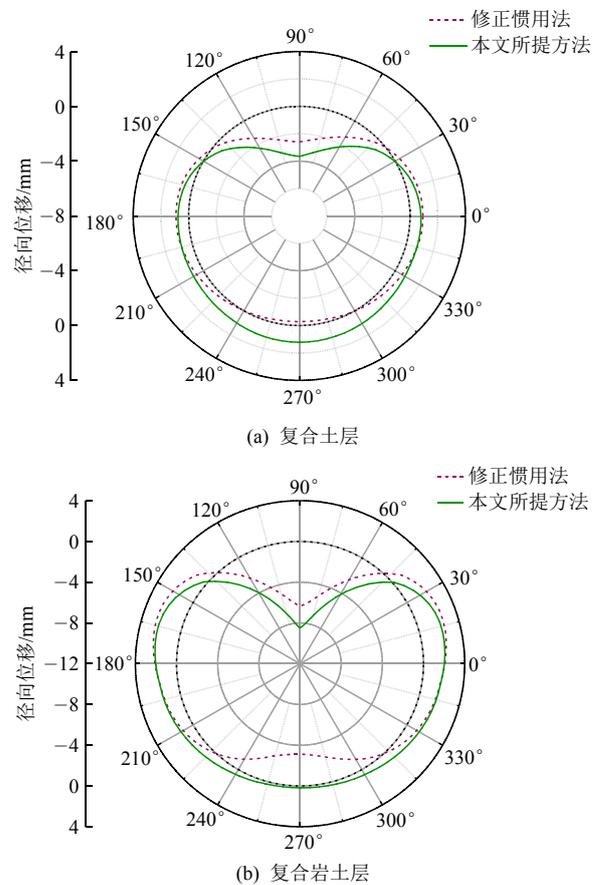


图 13 隧道变形对比

Fig.13 Comparison of the tunnel deformations

可见，修正惯用法由于过分夸大隧底主动压力，导致隧道底部出现向上的位移 0.28 mm，而采用本文提出的荷载模式计算出隧道底部发生向下位移 1.22 mm。采用本文方法得到的管片顶部变形也比修正惯用法大。分析可知，实际工程中隧道所受主动土压力是隧道结构产生向上位移的原因，而基底被动土压是隧道向下位移挤压下部土体产生的，本断面隧道埋深较小，管片底部的主动土压力不足以使隧道发生向上的变形，由此可知采用本文所提荷载模式计算得到的隧道变形结果更符合实际。

同理，在复合岩土层中，采用修正惯用法计算得到隧底向上的变形量为 2.36 mm，而采用本文提出荷载模式的计算结果为隧底向下变形 0.31 mm，根据前述岩层中主动力的作用规律可知，底部围岩不会产生向上的主动压力，因此不会造成结构产生向上的位移。

可见，修正惯用法由于夸大隧底主动压力，导致复合地层条件下计算得到的盾构隧道底部向上变形较大，与实际情况不符，同时，计算得到的顶部变形小于本文提出的计算方法。

(3) 内力比较

针对 2 种复合地层，分别采用修正惯用法和本文提出方法计算得到管片结构的内力结果与实测值进行对比分析。

由图 14 可知，采用修正惯用法计算得到的结构弯矩在隧道上部软土层与实测值的分布规律较为一致，但在下部硬土层两者差异较大，在 220° 位置处差距最大达 60.39 kN·m，在底部 180°~360° 范围平均误差为 36.31 kN·m。而采用本文提出方法计算得到的弯矩不仅在上部软土层能较好符合弯矩实测值的变化规律，在下部硬土层也较修正惯用法具有更好的精度，二者最大差值出现在 319° 位置，达

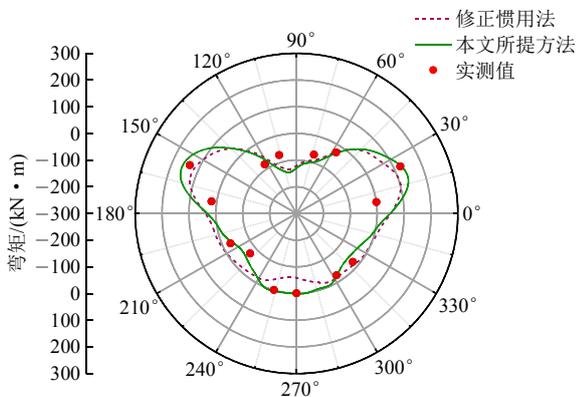


图 14 复合土层隧道结构弯矩结果对比

Fig.14 Comparison of the bending moment of tunnels in soft-hard soil compound strata

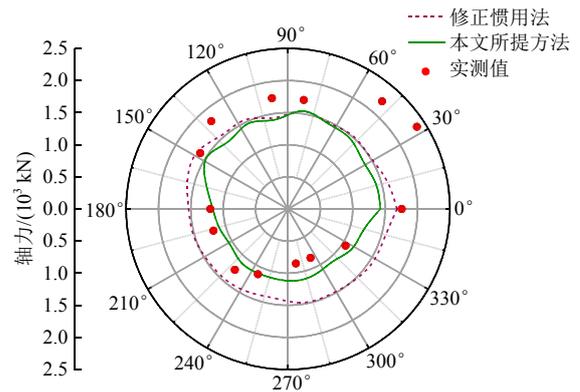


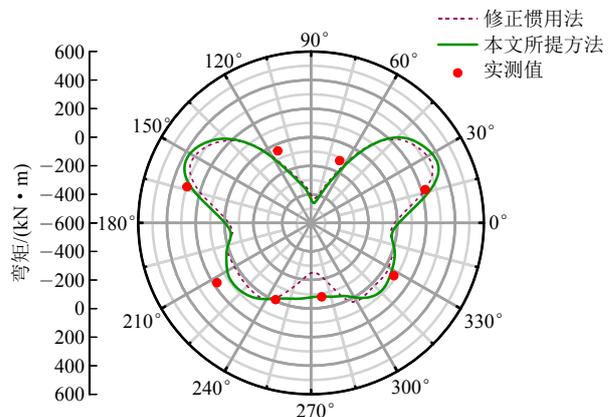
图 15 复合土层轴力结果对比

Fig.15 Comparison of the axial force of tunnels in soft-hard soil compound strata

22.99 kN·m，在隧底 180°~360° 范围的平均误差为 10.42 kN·m。

由图 15 可见，2 种荷载模式的轴力计算结果，在上部软土层中的规律基本一致，且与实测值相比均偏小。然而，两者在下部硬土层中的分布有较大的差异，修正惯用法的计算结果在隧道下部硬土层与轴力实测值相比明显整体偏大，最大差值达 660.86 kN，平均差值为 443.41 kN；而采用本文提出方法的轴力结果与实测值差值相对较小，最大差值为 291 kN，平均误差为 69.73 kN。

由图 16(a)可知，修正惯用法和本文提出方法的弯矩计算结果在隧道上部软土层中均与实测值相差较小，分布较一致。在下部岩层中，修正惯用法结果在拱底处的弯矩结果为内侧受拉，左右拱脚为外侧受拉。根据弯矩实测结果可以看出，隧道左右拱脚处为外侧受拉，在拱底一小部分为内侧受拉，虽然两者规律相同，但是在量值上修正惯用法与实测值相差较大。相较之下，本文所提方法对于隧底弯矩的计算结果与实测值符合较好。



(a) 弯矩

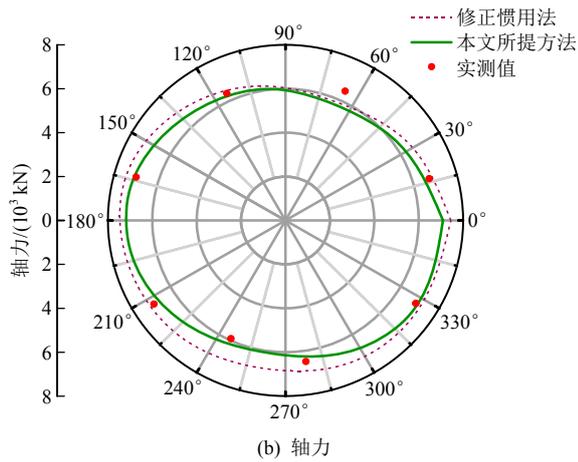


图 16 复合岩土层内力结果对比

Fig.16 Comparison of the internal force of tunnels in soft soil-hard rock compound strata

由图 16(b)可见, 2 种荷载模式的轴力计算结果的整体分布规律与实测值相同, 且分布较为均匀。修正惯用法轴力计算结果与实测值的最大差值达 1 370 kN, 平均差值为 624 kN; 而本文提出方法计算的轴力结果与实测值的最大差值为 660 kN, 平均差值为 270 kN。

由此可知, 采用修正惯用法计算得到的结构内力结果与实测结果相差较大, 而本文提出的计算方法得到的内力结果分布规律更符合实际, 量值与实测值偏差较小。

#### (4) 管片配筋比较

以复合土层的内力计算结果为例, 针对 2 种计算方法引起管片配筋的差异性进行讨论。当隧道埋深不大时(如本文狮子洋隧道 DIK33+900 断面案例), 依据修正惯用法与本文方法计算得到的配筋结果差别不大(采用构造配筋均可满足); 当隧道埋深较大时, 将造成配筋方式的差异。以狮子洋隧道 DIK34+600 断面为例, 地层分布情况见图 17, 地层参数见表 1, 计算得到内力情况如图 18 所示, 相应配筋情况见表 2。

盾构隧道采用通用楔形环错缝拼装时, 由于每块管片的拼装位置不固定, 设计时每块管片均需按照最不利工况配筋。当隧道埋深较大时, 从图 18 的计算结果可以看出, 采用修正惯用法计算得到的管片环最大正弯矩偏大、最大负弯矩偏小, 按照该内力结果进行配筋, 会造成管片内侧主筋配筋偏大、外侧主筋配筋偏小。而按照本文提出的计算方法, 总的配筋量略有减少, 计算结果与管片实际受力状态更为接近, 相应的配筋更为合理。

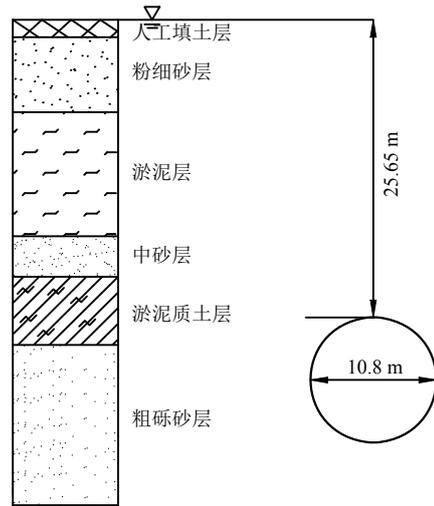
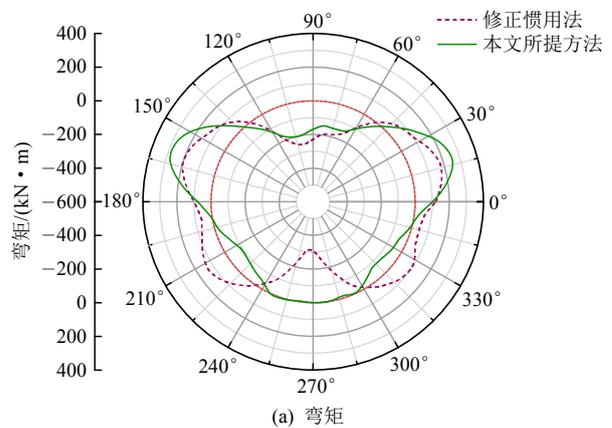
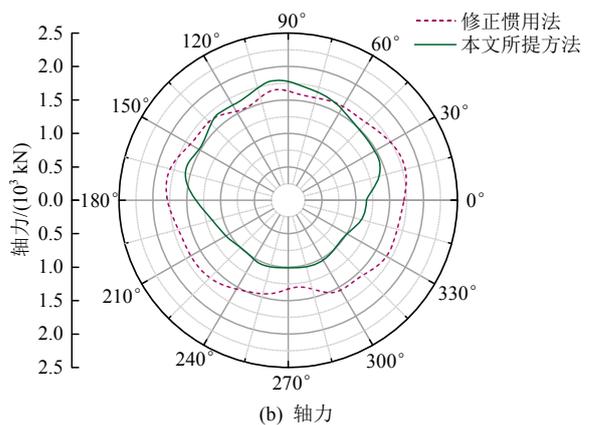


图 17 狮子洋隧道 DIK34+600 断面情况

Fig.17 Ground condition at DIK34+600 in Shiziyang tunnel



(a) 弯矩



(b) 轴力

图 18 狮子洋隧道 DIK34+600 断面内力结果对比

Fig.18 Comparison of the internal force at DIK34+600 in Shiziyang tunnel

表 2 管片主筋配筋结果对比表

Table 2 Comparison of main reinforcement design

类别	修正惯用法计算得到的配筋情况/(mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> )	本文方法计算得到的配筋情况/(mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> )
管片内侧主筋	1 885	1 000
管片外侧主筋	1 000	1 571

## 6 结 论

(1) 通过分析经典修正惯用法在复合地层围岩压力计算中存在的问题, 分别提出了上软下硬复合土层及上土下岩复合岩土层盾构隧道的荷载计算模式。

(2) 基于极限状态理论范畴的滑移线理论, 推导了上软下硬复合土层下部主动土压力的计算公式。

(3) 修正惯用法的荷载模式过分夸大了隧底被动反力, 造成计算出的土压力与复合地层隧底的实际受荷状态不符, 结构内力结果与实测结果相差较大, 并且计算得到隧道底部向上变形较大, 与实际情况不符。而采用本文的荷载计算模式得到的荷载、结构内力计算结果和变形计算结果与实际情况更加吻合, 且在埋深较大时配筋方式和配筋量较修正惯用法更为合理。

### 参考文献(References):

- [1] 竺维彬, 鞠世健. 复合地层中的盾构隧道施工技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 5 - 10.(ZHU Weibin, JU Shijian. Construction technology of shield tunnel in mix-ground[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2006: 5 - 10.(in Chinese))
- [2] 王志伟, 乔春生, 宋超业. 上软下硬岩质地层浅埋大跨隧道松动压力计算[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2 342 - 2 352.(WANG Zhiwei, QIAO Chunsheng, SONG Chaoye. Calculation method of relaxation pressure of shallow large span tunnel in up-soft/low-hard rock stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2 342 - 2 352.(in Chinese))
- [3] 雷 凯, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 上软下硬复合地层中盾构隧道管片受力变形性状研究[J]. 广东土木与建筑, 2016, 23(增 1): 52 - 56. (LEI Kai, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. Research on mechanical and deformation behaviors of shield tunnel segment under the condition of upper-soft and lower-hard composite stratum[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2016, 23(Supp.1): 52 - 56.(in Chinese))
- [4] 张 恒, 陈寿根, 陈 亮. 软硬不均地层盾构隧道管片力学行为研究[J]. 铁道标准设计, 2012, (8): 83 - 86.(ZHANG Heng, CHEN Shougen, CHEN Liang. Research on mechanical behaviour of shield tunnel segments in soft-hard uneven strata[J]. Railway Standard Design, 2012, (8): 83 - 86.(in Chinese))
- [5] 何 川, 张建刚, 杨 征. 层状复合地层条件下管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1 537 - 1 543. (HE Chuan, ZHANG Jiangan, YANG Zheng. Model tests on mechanical characteristics of segment lining structure under multi-layered strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1 537 - 1 543.(in Chinese))
- [6] 张顶立, 陈立平. 隧道围岩的复合结构特性及其荷载效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 456 - 469.(ZHANG Dingli, CHEN Liping. Compound structural characteristics and load effect of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 456 - 469.(in Chinese))
- [7] 付建军, 刘泉声, 赵海斌, 等. 煤矿深部巷道底臃发生机理及防治对策研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(5): 21 - 26.(FU Jianjun, LIU Quansheng, ZHAO Haibin, et al. Mechanism and counter measure for floor heave of deep coalmine roadways[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(5): 21 - 26.(in Chinese))
- [8] 张 翔, 李林安, 王世斌, 等. 考虑底部隆起的浅埋隧道围岩压力计算分析[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(8): 911 - 921.(ZHANG Xiang, LI Linan, WANG Shibin, et al. Limit analysis of surrounding rock pressure for shallow tunnels considering floor heave[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(8): 911 - 921.(in Chinese))
- [9] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱 伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 68 - 73.(Japan Society of Civil Engineers. Tunnel standard specification(shield) and explanation[M]. Translated by ZHU Wei. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 68 - 73.(in Chinese))
- [10] 何 川, 张 景, 封 坤. 盾构隧道结构计算分析方法研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 1 - 14.(HE Chuan, ZHANG Jing, FENG Kun. Research on structural analysis method of shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 1 - 14.(in Chinese))
- [11] 肖明清. 大型水下盾构隧道结构设计关键问题研究[博士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2013.(XIAO Mingqing. Research on key issues of segmental lining structure design for underwater shield tunnel with large cross-section[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [12] 周济民, 何 川, 肖明清, 等. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 115 - 121. (ZHOU Jimin, HE Chuan, XIAO Mingqing, et al. Field test and numerical simulation of mechanics of segment lining of shiziyang underwater shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 115 - 121.(in Chinese))
- [13] 梁敏飞, 张 哲, 李 策, 等. 盾构隧道双层衬砌结构三维力学分析模型及验证[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 892 - 899.(LIANG Minfei, ZHANG Zhe, LI Ce, et al. Three-dimensional mechanical analysis model and verification of shield tunnel with double-layer lining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 892 - 899.(in Chinese))
- [14] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003: 178 - 181.(LI Zhiye, ZENG Yanhua. Theories and methods of underground structure design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003: 178 - 181.(in Chinese))
- [15] 卡尔·太沙基, 雷尔夫·皮·泼克. 工程实用土力学[M]. 蒋彭年, 译. 北京: 水利电力出版社, 1960: 97 - 100.(KARL TERZAGHI, RALPH B. Peck. Soil mechanics in engineering practice[M]. Translated by JIANG Pengnian. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1960: 97 - 100.(in Chinese))