

非均质黏土地基隧道环向开挖面稳定上限分析

黄茂松^{1,2}, 宋春霞^{1,2}, 吕奎琳^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于多块体极限分析上限法, 推导了不排水条件下饱和黏性土地基中隧道环向开挖面稳定支护压力的计算公式。编制相应的计算程序, 优化得到了隧道环向开挖稳定的最优上限解答。通过与已有极限分析上限解答的对比, 验证了多块体极限分析上限法在隧道开挖稳定性分析的适用性。对照隧道开挖稳定的最优上限解的变化规律及相应破坏面的形状, 详细分析了隧道埋深比、土体重度及强度非均质性对开挖面极限支护压力和因隧道开挖产生的滑动面范围和位置的影响。在此基础上, 进一步基于隧道失稳的简化破坏模式推导了黏性土地基隧道开挖稳定的极限支护压力的简化上限解。通过与已有离心模型试验的对比验证, 指出本文上限解可直接用于工程中初步确定开挖面支护压力, 为隧道工程设计提供可靠的理论依据。

关键词: 多块体极限分析上限法; 隧道开挖稳定; 滑动面; 重度参数; 非均质参数; 简化上限解

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)08-1504-09

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 浙江玉环人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。

E-mail: mshuang@tongji.edu.cn

Upper bound analysis for stability of a circular tunnel in heterogeneous clay

HUANG Mao-song^{1,2}, SONG Chun-xia^{1,2}, LÜXi-lin^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The stability of a shallow circular tunnel in undrained clay layer is examined in the framework of the limit analysis by means of the limit analysis upper bound method. Rigorous upper bounds of the face collapse pressure and failure envelopes are obtained using the rigid multi-block translational collapse mechanism. The multi-block failure mechanism has significant advantages with respect to the existing limit analysis: it takes into account the effect of cover-to-diameter ratio, gravity parameter and heterogeneous parameter. And the present results of the collapse pressure significantly improve the best available solution given by the solutions of other limit analysis. It is concluded that the collapse pressure increases linearly with the increase of gravity parameter, but decreases linearly with the increase of the heterogeneous parameter. Also the configuration of failure envelopes will vary as the cover-to-diameter ratio, gravity parameter and heterogeneous parameter differ. On the basis of those results, a simplified mechanism is obtained and a simplified solution is derived from the upper bound theory of plasticity. Finally the upper bound multi-block solution for the stability of TBM excavation in clays and its simplified solution are demonstrated by comparing with the centrifuge results.

Key words: multi-block upper bound limit analysis; tunnel stability; sliding surface; gravity parameter; heterogeneous parameter; simplified solution

0 引言

在盾构隧道掘进进程中, 合理地确定开挖面支护压力是盾构掘进施工中的一项关键技术。若支护压力施加不当, 隧道工作面就可能产生较大范围的垮塌或地表的隆起等安全隐患, 或造成生命财产损失或对周围建筑环境造成不利的影响, 因此研究隧道开挖稳定性及相关问题具有重要的现实意义。

在隧道环向开挖面稳定的相关研究中, 室内模型

试验和数值模拟成为主要的研究手段。早年有Cairncross^[1]采用平面模型试验, 在试验过程中利用X-rays确定试验不同阶段的速度场、应变场, 来研究超固结高岭土中浅埋隧道在排水状态下的稳定性问

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(50825803); 上海市优秀学科带头人计划资助项目(09XD1403900); 国家自然科学基金项目(50908171)

收稿日期: 2012-11-21

题。Seneviratne^[2]采用模型试验、极限分析上下限法和有限单元法研究了正常固结黏性土地基中浅埋隧道环向变形和稳定性问题, 指出不排水条件下破坏荷载的极限分析上下限解较接近实际荷载。Mair^[3]利用剑桥大学岩土离心机, 在试验过程中监测了孔隙水压力、应变场、位移场等的变化, 详细研究了均质与非均质高岭土中隧道 2D 环向和 3D 开挖面稳定性问题, 分析了隧道开挖面极限支护压力、失稳破坏模式及破坏机理等。在数值分析方面的研究主要有: Davis 等^[4]针对黏性土的浅埋隧道, 基于极限分析原理提出了不排水条件下隧道环向开挖面稳定的简单破坏模式, 得到了隧道环向开挖稳定极限支护压力的上下限解答。Osman 等^[5]根据实际工程及离心试验中监测到的土体位移, 提出了隧道环向开挖面塑性变形模式, 通过极限分析上限法研究了开挖面破坏荷载的上限值。Sloan 等^[6]构造 7 个角度的破坏模式、同时采用极限分析有限元法研究了非均质地基中浅埋环向隧道的稳定性问题。极限分析法理论严格, 可以较好的界定真实解的范围, 但是上述学者采用的破坏模式较简单, 上下限之间范围较大有待进一步改进。极限分析有限元法^[7]既有极限分析法理论上的严格性又鉴有限单元法适用性强^[8-9]的特点可以得到较为精确的解答, 但因其网格的划分和目标函数的规划都相当复杂, 实现不易。而多块体上限法^[10]构造简单, 优化求解方便, 而且通过对比发现, 只要多块体的离散模式选择适当, 多块体的上限计算结果十分接近理论的真实解。

本文围绕盾构隧道环向开挖面稳定问题展开, 首先基于多块体极限分析上限法, 详细研究了隧道埋深比、土体重度和地基土的非均质性对开挖面极限支护压力和滑动面形状及其范围的影响; 在此基础上建立了简化的隧道支护压力上限解; 最后通过与现有离心模型试验结果的对比, 验证了多块体极限分析上限法和简化上限解的合理性。

1 多块体极限分析上限法

在盾构隧道掘进过程中, 开挖面失稳破坏主要是由地表荷载和土体重度引起的; Sloan 等^[7]指出当开挖工作段 P 较大时可简化为 2D 环向破坏模式, 如图 1 所示: 隧道直径为 D , 埋深 C ; 开挖面作用均布支护压力 σ_T ; 地表承受均布荷载为 σ_s ; 地基土重度为 γ , 在外荷载作用下地基土不排水抗剪强度 c_u 随埋深呈线性增加:

$$c_u(z) = c_{u0} + \rho z \quad (1)$$

式中, $c_u(z)$ 为深度 z 处地基土不排水抗剪强度, c_{u0} 为地表土体不排水抗剪强度, ρ 为不排水强度随深度变

化率。

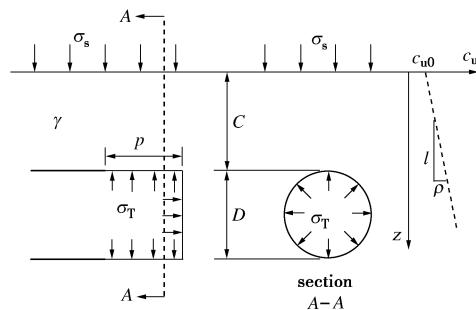


图 1 隧道简化力学模型及相应地基土非均质性

Fig. 1 Idealization model for tunnel in heterogeneous clay

选择合理的破坏模式, 从而取得最小的上限值是塑性极限分析上限法的关键。根据工程经验分析, 隧道开挖引起周围土体应力释放, 隧道顶板上方以及地表以下一定范围内的土体, 向开挖空洞挤压, 发生竖向或水平的位移。黏土地层盾构掘进隧道开挖面稳定的离心模型试验研究结果亦表明, 由于土颗粒间黏聚力的存在, 开挖破坏面表现为下部较缓、上部区域较大的盆状^[8], 滑动面为曲面, 但是并没有确定曲面的具体形状。结合上述资料, 参考 Mair^[3]试验结果及周维祥^[11]有限元分析结果, 本文采用多块体极限分析上限法对隧道开挖面稳定性问题进行研究, 提出的刚体平动多块体破坏模式如图 2 所示。

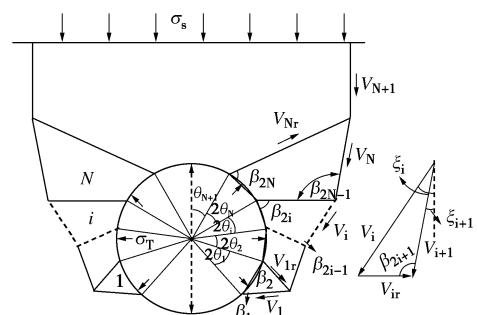


图 2 隧道环向破坏模式及相应速度场

Fig. 2 Collapse mechanism for unlined circular tunnel in pure cohesive soils and corresponding velocity field

隧道周围土体为纯黏土, 鉴于隧道失稳破坏是瞬时发生的工程事故, 故采用土体的不排水抗剪强度指标对隧道稳定进行分析; 隧道变形模式允许隧道顶部土体竖直向下移动和两侧土体向内移动, 符合实际工程状况。本节将通过不断优化隧道开挖滑动面的形状, 得到隧道稳定极限支护压力的最优上限解答, 并与现有成果进行分析比较。

1.1 上限法计算过程

隧道发生失稳破坏滑动面形状由图 2 所示的角度变量 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N+1}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{2N}$ 确定 (其中 N 为隧道两侧刚性滑块的数量)。根据刚性块体平动速度相容条

件及破坏模式所确定几何关系, 得到各速度大小如下:

$$v_2 = v_1 \frac{\sin(\pi - \beta_1 - \beta_2)}{\sin \beta_3}, \quad (2)$$

$$v_{1r} = v_1 \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2 - \beta_3)}{\sin \beta_3}, \quad (3)$$

$$v_{i+1} = v_i \frac{\sin(\pi - \theta_{i-1} - \theta_i + \beta_{2i-2} - \beta_{2i-1} - \beta_{2i})}{\sin \beta_{2i+1}}, \quad (4)$$

$$v_{ir} = v_i \frac{\sin(\theta_{i-1} + \theta_i - \beta_{2i-2} + \beta_{2i-1} + \beta_{2i} - \beta_{2i+1})}{\sin \beta_{2i+1}} \quad (i = 2, 3, \dots, N, N+1). \quad (5)$$

由地表荷载、土体重度及开挖面支护压力等外荷载所做的功为

$$P_{\text{ext}} = \sigma_s \int_{A_s} v_n^s dA - \sigma_t \int_{A_t} v_n^t dA + \gamma \int_V v_i \cos \xi_i dV. \quad (6)$$

式中 v_n^s 为地表法向向下的速度; v_n^t 为隧道开挖面外法向方向速度; A_s 为地表荷载作用面积, $\int v_n^s dA$ 表示土体沿地表内法向方向体积的变化量; A_t 为隧道开挖面发生塑性变形的土体面积, $\int v_n^t dA$ 表示土体开挖面外法向方向体积变化量, 即在外荷载作用下土体向隧道内坍塌的土体积; V 为破坏范围内土体的体积; v_i 为第 i 个块体的绝对速度; 而 ξ_i 为块体绝对速度与竖向的夹角。

饱和黏土材料内摩擦角 $\varphi = 0$, 服从塑性相关流动法则, 不排水条件下土变形前后体积不发生变化:

$$\int_{A_s} v_n^s dA = \int_{A_t} v_n^t dA, \quad (7)$$

则外荷载所做的功可以表示为

$$P_{\text{ext}} = (\sigma_s - \sigma_t) \int_{A_s} v_n^s dA + \gamma \int_V v_i \cos \xi_i dV. \quad (8)$$

沿速度间断面的内部能量耗散为

$$P_{\text{int}} = \sum_{j=1}^{2N+1} v_j \int_{\Gamma_j} c_u(z) dz, \quad (9)$$

式中, v_j 和 Γ_j 分别表示速度断面 j 的速度矢量和面积。

极限分析上限定理^[12]指出: 在满足速度边界、及相容条件的变形模式下, 由外荷载功率等于所消耗的内功率而得到的荷载不会小于实际破坏荷载。则由 $P_{\text{ext}} = P_{\text{int}}$, 并将速度矢量式 (2) ~ (5) 代入, 引入无量纲参数 C/D 、 $\gamma D/c_{u0}$ 、 $\rho D/c_{u0}$, 得到无量纲化后目标函数为

$$\frac{\sigma_s - \sigma_t}{c_{u0}} = \frac{\sum_{j=1}^{2N+1} v_j \int_{\Gamma_j} (1 + \frac{\rho z}{c_{u0}}) dz - \frac{\gamma D}{c_{u0}} \int_V \frac{v_i \cos \xi_i}{D} dV}{\int_{A_s} v_n^s dA}.$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sum_{j=1}^{2N+1} v_j \int_{\Gamma_j} dz}{\int_{A_s} v_n^s dA} + \frac{\rho D}{c_{u0}} \frac{\sum_{j=1}^{2N+1} v_j \int_{\Gamma_j} \frac{z}{D} dz}{\int_{A_s} v_n^s dA} - \frac{\gamma D}{c_{u0}} \frac{\int_V \frac{v_i \cos \xi_i}{D} dV}{\int_{A_s} v_n^s dA} \\ &= f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N+1}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{2N+1}, \frac{C}{D}, \frac{\gamma D}{c_{u0}}, \frac{\rho D}{c_{u0}}). \quad (10) \end{aligned}$$

即浅埋隧道环向稳定性问题转化为一个非线性规划问题: 通过寻求角度变量 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N+1}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{2N}$ 的临界值从而得到荷载参数 $(\sigma_s - \sigma_t)/c_{u0}$ 最小值, 并确定最优上限解所对应的破坏面形状。

具体过程为: 首先 $N=2$ 为起点, 通过 Matlab 编程, 考虑角度变量的变化范围, 采用最优化搜索算法 Genetic Algorithm 求得目标函数 (10) 的最小值 f_1 并记下对应的角度变量的值; 然后在前一次破坏模式的基础上进行插值, 隧道两侧多块体个数成倍增加变为 $N=4$, 同样的方法再次求得目标函数的最小值 f_2 及相应角度变量值, 结果表明 f_2 是比 f_1 更小的上限值, 目标函数得到进一步优化; 当第 $i+1$ 次插值 $f_i - f_{i+1} < 1 \times 10^{-6}$ 时停止搜索, 即得到足够精确的目标函数的最优上限值及相应的破坏滑动面形状。

1.2 开挖面支护压力及破坏滑动面分析

由多块体极限分析上限法得到了隧道埋深比、土体重度、以及强度非均质参数对软土隧道开挖面稳定极限支护压力的影响曲线如图 3 所示。

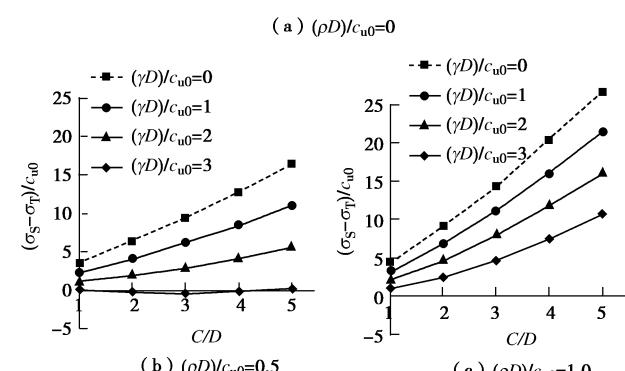
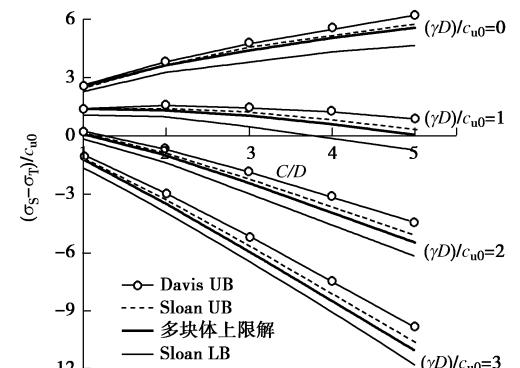


图 3 环向隧道载荷参数上限值变化曲线

Fig. 3 Stability upper bounds for circular tunnel in cohesive soils

(1) 隧道埋深比、土体重度及强度非均质性对荷载参数的影响

图 3 (a) 为均质地基中不同的土体重度条件下多块体极限分析上限解与现有开挖面稳定上限解^[4,6]的对比。由图中可以看出, 与已有的隧道环向稳定上限值相比, 多块体上限法得到了更小的荷载参数上限值, 缩小了上下限之间的差异, 可以更好地界定开挖面稳定支护压力准确解的范围, 验证了多块体极限分析上限法的适用性和优越性。图中 4 组曲线对比表明, 在隧道埋深一定时, 土体重度 $\gamma D/c_{u0}$ 越大, 则保持开挖面稳定所需的支护压力也越大; 那么在实际工程中如果不考虑土体重度将增加施工安全的风险。从图中还可以看出随着隧道埋深的增加, 上下限之间的差异略有增加, 这也说明了本文所假定的破坏模式更适宜浅埋隧道。

图 3 (b)、(c) 给出了非均质地基中 (强度非均质参数一定时) 荷载参数随隧道埋深比的变化曲线。为进一步分析各个参数对开挖面稳定的影响, 根据多块体上限结果绘出荷载参数随土体重度参数的变化曲线 (隧道埋深比和非均质参数为定值), 及荷载参数与非均质参数的关系曲线 (埋深和土体重度参数为定值) 如图 4 和图 5 所示。

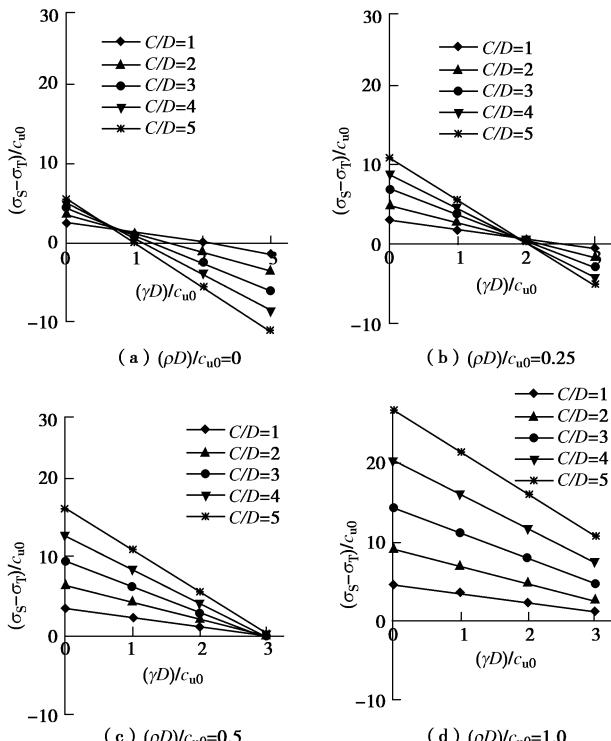


图 4 载荷参数在不同隧道埋深时随重度变化曲线

Fig. 4 Curves for load parameter vs. gravity parameter

由图 4 可知, 在隧道埋深比和强度非均质参数一定时, 开挖面稳定支护压力上限值 σ_t 与 $\gamma D/c_{u0}$ 呈线性增加关系, 而线性斜率随隧道埋深变化而与强度非均质参数无关。图 4 (a) ~4 (d) 对比可以看出: 当

$\gamma D/c_{u0}$ 小于某一定值 $(\gamma D/c_{u0})_{cr}$ 时, 隧道埋深越深, 开挖面稳定所需支护压力越小; 而当 $\gamma D/c_{u0}$ 大于 $(\gamma D/c_{u0})_{cr}$ 时, 隧道埋深越大则开挖面稳定所需支护压力也越大; 而此定值 $(\gamma D/c_{u0})_{cr}$ 则随着非均质参数 $\rho D/c_{u0}$ 的增加而变大, 亦即是说在均质地基或者是非均质地基中, 土体重度对支护压力的影响占主导地位, 而当地基土的非均质性比较明显时, $\rho D/c_{u0}$ 对支护压力的影响占主导地位。

图 5 表明在隧道埋深比和重度参数一定的情况下开挖面稳定所需的支护压力与强度非均质参数成线性递减关系, 而线性斜率也只受隧道埋深的影响。

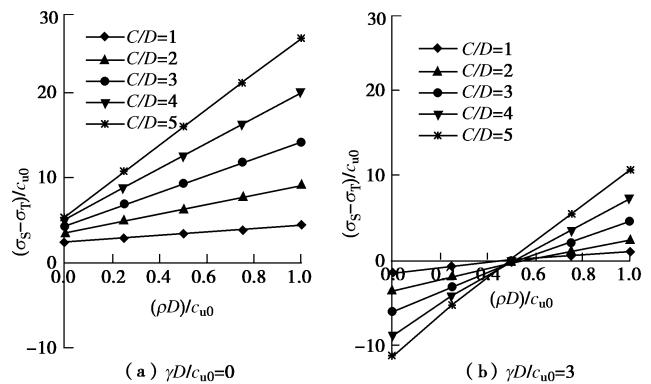


图 5 载荷参数在不同隧道埋深时随重度变化曲线

Fig. 5 Curves for load parameters vs. strength parameter

(2) 隧道埋深比、土体重度及强度非均质参数对破坏滑动面形状及范围的影响

盾构隧道掘进使开挖面附近地层的应力释放, 改变了隧道周围土体中的应力分布, 引起隧道周围一定范围的土体移动和变形, 从而形成贯穿地面的塑性滑动区。下面针对一系列隧道埋深比、土体重度及强度非均质参数, 将多块体极限分析上限法得到的最小上限解对应的破坏模式形状绘制于图 6~8 中。从图中可以看出随着隧道的埋深比、土体重度参数及非均质参数的变化, 开挖引起的土体应力释放量在隧道顶部和隧道周边土体滑动表现不同的状态。

图 6 给出了隧道埋深和强度非均质参数一定时, 重度参数变化隧道环向开挖破坏滑动面形状的影响。Sloan 等^[6]指出土体重度 $\gamma D/c_{u0}$ 对滑动面宽度无影响。但是图 6 所示优化破坏面表明: 随着 $\gamma D/c_{u0}$ 的增加, 滑动面范围变大, 隧道环向两侧土体发生滑动的位置加深向内侧的坍塌的趋势变明显。另外图 6 (a) 和 6 (b) 的对比表明, 当非均质参数增加时, 重度参数对滑动面宽度及范围的影响程度减小。

图 7 反映了隧道埋深和土体重度参数一定时, 强度非均质参数对隧道环向开挖滑动面的影响。随着 $\rho D/c_{u0}$ 的增加, 滑动面的宽度变小, 隧道环向两侧土

体发生滑动的位置上移。图 7 的对比表明, 当土体重度参数逐渐变大时, 非均质强度参数对滑动面宽度及范围的影响程度增大。

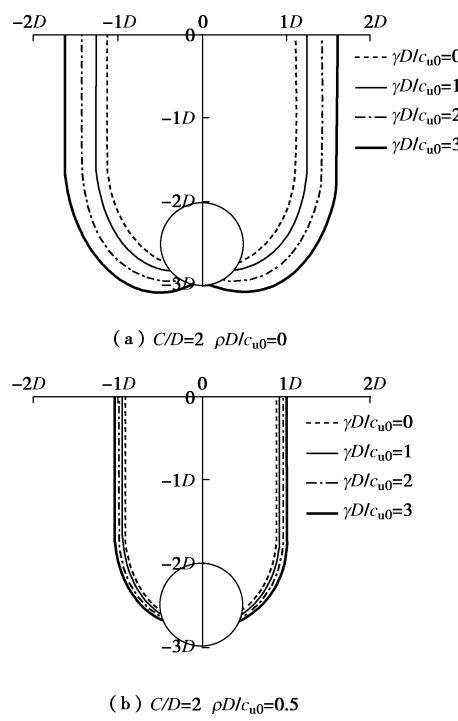


图 6 不同重度参数下破坏滑动面比较

Fig. 6 Comparison of failure surfaces under different values of $\gamma D/c_{u0}$

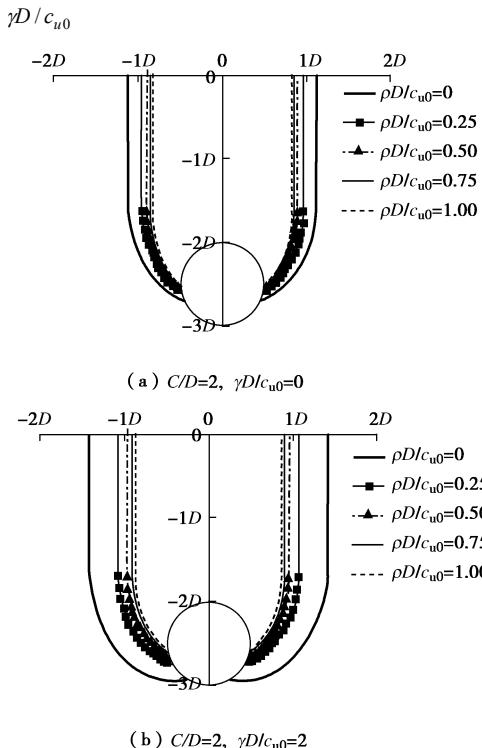


图 7 不同非均质参数下滑动面比较

Fig. 7 Comparison of failure surfaces under different values of $\rho D/c_{u0}$

当土体重度参数和强度非均质参数一定时 (任取

一组参数 $\gamma D/c_{u0} = 2$ 、 $\rho D/c_{u0} = 0.5$), 隧道埋深比对滑动面影响如图 8 所示。可以看出, 隧道埋深增加时滑动面宽度增加, 隧道两侧土体发生滑动的位置稍微下移, 范围也变大。

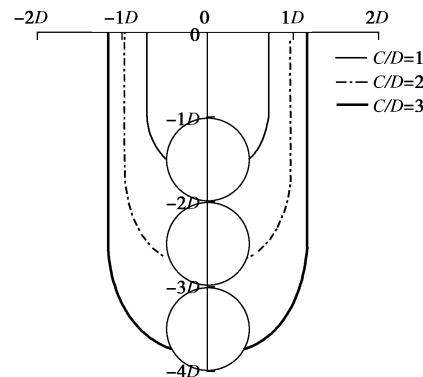


图 8 不同埋深比下滑动面比较

Fig. 8 Comparison of failure surfaces under different values of C/D

隧道开挖失稳破坏引起的延伸至地表的滑动土体的宽度随隧道埋深比、土体重度及非均质参数的变化曲线如图 9 所示。首先, 同前所述在埋深一定的情况下, 滑动土体的宽度随 $\gamma D/c_{u0}$ 的增加而变大。另外由图可以看到, 当隧道埋深一定时, 随着非均质参数 $\rho D/c_{u0}$ 变大, 土体滑动宽度随重度参数的变化曲线逐渐变平缓, 即土体重度对滑动面形状的影响变小; 而两幅图的对比也表明随着隧道埋深的增加, 不同 $\rho D/c_{u0}$ 的情况下滑动宽度与土体重度关系曲线之间的距离也逐渐加大, 即随着隧道埋深的增加 $\rho D/c_{u0}$ 对滑动面形状的影响逐渐加剧。

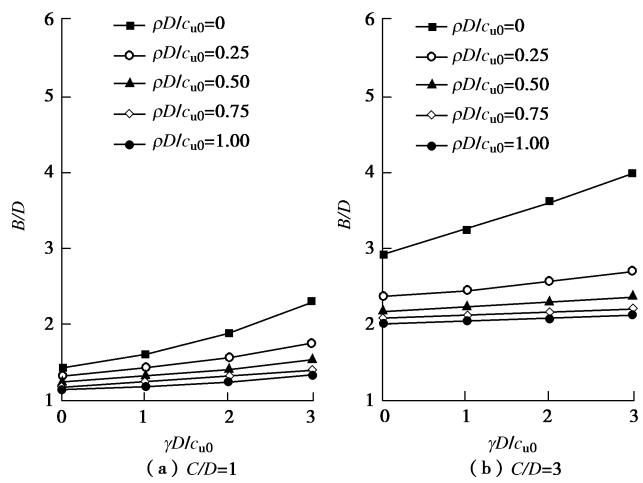


图 9 破坏滑动面贯穿地表的宽度

Fig. 9 Width of mechanism at ground surface for multi-block mechanism with different values of $\gamma D/c_{u0}$ for certain C/D and $\rho D/c_{u0}$

隧道开挖引起的破坏滑动面范围的分析, 有助于评价隧道开挖对周围建筑环境影响; 尤其是根据隧道

两侧塑性滑动范围, 可以在隧道开挖进程中确定合理的加固区域, 加强隧道开挖的稳定性。

2 简化上限解

2.1 简化上限解的建立

根据上述多块体极限分析上限结果可知, 在隧道埋深比及强度非均质参数一定的情况下, 荷载参数与重度参数呈线性关系, 而对比分析表明其线性斜率值只与隧道埋深比有关不受非均质参数的影响。引入参数 N_γ 为荷载参数与重度参数线性关系斜率值, 由图 4 得到 N_γ 随隧道埋深比的变化曲线如图 10 所示。 N_γ 反映了土体重度对荷载参数的影响。曲线拟合得到

$$N_\gamma = 1.0677(C/D) + 0.2095 \quad (11)$$

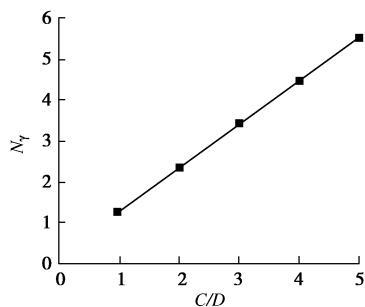


图 10 荷载参数与重度关系曲线斜率值随隧道埋深比变化

Fig. 10 Slope of curves for load parameter and gravity parameter vs. cover-to-diameter ratio C/D

多块体上限结果参数分析图 5 亦指出, 在隧道埋深比和土体重度保持一定的条件下荷载参数与强度非均质参数呈线性关系, 而其线性斜率值 N_ρ 与土体重度无关只与隧道埋深相关; N_ρ 与隧道埋深比在双对数坐标系下的关系曲线如图 11 所示。

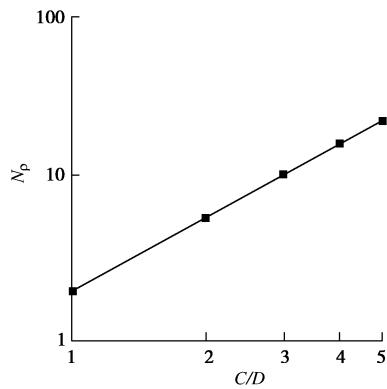


图 11 荷载参数与非均质关系曲线斜率值随隧道埋深比变化

Fig. 11 Rate of curves for load parameter and heterogeneous parameter vs. cover-to-diameter ratio C/D

图 11 所示荷载参数与土体非均质参数线性关系斜率值与隧道埋深的关系曲线, 反映了土体强度非均质对荷载参数的影响。曲线拟合得到

$$N_\rho = 1.9792(C/D)^{1.4776} \quad (12)$$

综上所述同时考虑土体重度和不排水抗剪强度的非均质性, 隧道环向开挖面稳定荷载参数上限解可以写为

$$\frac{\sigma_s - \sigma_T}{c_{u0}} = N_0 - \frac{\gamma D}{c_{u0}} \cdot N_\gamma + \frac{\rho D}{c_{u0}} \cdot N_\rho \quad (13)$$

式中 N_0 代表均质无容重条件下荷载参数的上限值; N_γ 和 N_ρ 分别代表土体重度和不排水强度非均质性对荷载参数的影响可以由图 10 和 11 或式(11)和式(12)得到。对实际工程来说, 根据工程现场条件, $\gamma D/c_{u0}$, $\rho D/c_{u0}$ 及 C/D 都是已知的, 由式 (13) 计算隧道开挖稳定极限支护压力上限值的话, 只有 N_0 是未知, 所以下节中需要给出均质无重条件下隧道开挖稳定的上限解。

2.2 简化模式的建立

在目前数值计算的极限分析法中, 主要通过不断优化破坏面的形状才能得到最佳的支护压力上限解答, 其过程相对复杂, 不能直接应用工程中支护压力的确定, 即没有明确的支护压力上限解; 因此本文在多块体上限法的基础上对隧道破坏模式进行简化, 首次得到明确的支护压力上限解。

在 Davis 等^[4]对黏性不排水情况下浅埋隧道破坏模式的基础上, 对比相应的支护压力上限解, 本文拟采用图 12 (a) 所示的简单破坏模式来推导隧道开挖稳定分析的上限解。

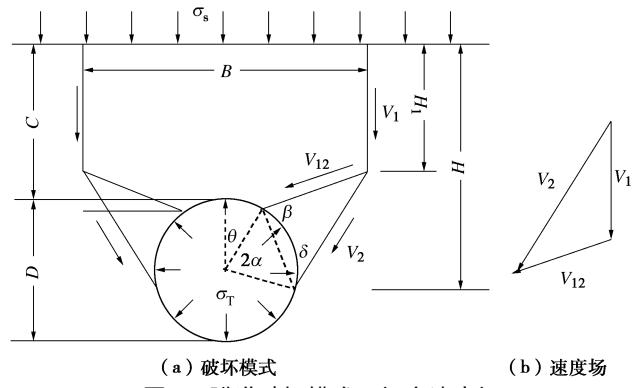


图 12 隧道破坏模式及相应速度场

Fig. 12 Collapse mechanism and corresponding velocity field

根据极限分析上限原理, 在运动许可的速度场由外荷载所做的功等于速度场内能量损耗, 详细计算过程同 1.1 节, 得到荷载参数的上限解答:

$$N_0 = \left\{ \left(\frac{C}{D} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \theta \right) \sin(\beta + \delta) - \sin \alpha \sin \delta \left[\sin(\beta - \alpha - \theta) - \frac{\cos(\alpha + \delta + \theta)}{\sin(\beta + \delta)} \right] + \sin \alpha \sin \beta \frac{\cos(\beta - \alpha - \theta)}{\sin(\beta + \delta)} \right\} / \left[\frac{\sin \theta}{2} \sin(\beta + \delta) + \sin \alpha \sin \delta \cos(\beta - \alpha - \theta) \right] \quad (14)$$

如前所述, 同样以 Matlab 编程, 考虑图 12 四个角度变量的变化范围, 采用最优化搜索算法 Genetic Algorithm 求得目标函数(14)的最小值并记下对应的角度变量的值。结果表明, 当取得荷载参数 $(\sigma_s - \sigma_t)/c_{u0}$ 的最佳上限值时, 开挖面失稳破坏模式角度变量满足 $\beta = \delta = \alpha + \theta$, 优化得到的埋深比为 1 时隧道失稳破坏面示意图如图 13 所示, 并与均质无重条件下多块体结果进行对比分析。对比表明在均质无重条件下, 由简化模式与多块体模式得到的破坏面很相近的, 地表滑动面宽度差异<6%, 所以在均质无重条件下可以用简化模式计算开挖面极限支护压力。

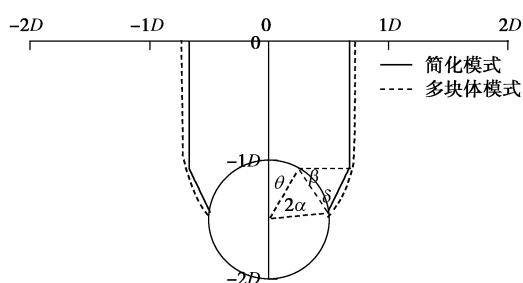


图 13 优化得到的破坏面示意图

Fig. 13 Collapse mechanism obtained by optimization

隧道开挖失稳破坏时相对应于图 13 所示的滑动塑性区形状参数 H_1 和 H 与隧道埋深关系如图 14 所示。

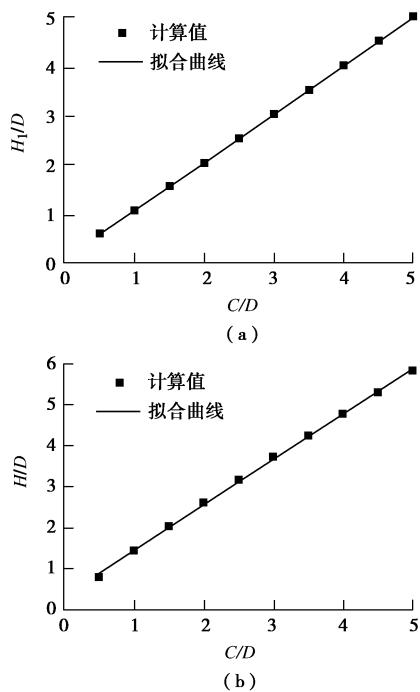


图 14 隧道开挖塑性区参数随埋深的关系

Fig. 14 Parameters H_1 and H of collapse mechanism vs.

cover-to-diameter ratio C/D

图 14 隧道发生失稳破坏时塑性区形状参数

H_1/D 和 H/D 与隧道埋深比 C/D 呈线性关系, 曲线拟合得到

$$H_1/D = 0.987(C/D) + 0.077, \quad (15)$$

$$H/D = 1.085(C/D) + 0.426. \quad (16)$$

2.3 简化上限解的提出

根据极限分析上限原理, 由式(15)、(16)确定的隧道失稳塑性区参数及图 12 所示的破坏模式, 而且最优破坏模式下 $\beta = \delta = \alpha + \theta$, 带入式(16)得到无重均质条件下隧道开挖稳定性荷载参数的上限解:

$$N_0 = \left[H_1 + \frac{D \sin \alpha \tan(\alpha + \theta)}{2 \cos(\alpha + \theta)} \right] / \left[\frac{D}{2} \tan(\alpha + \theta) \cos \theta \right], \quad (17)$$

$$\text{其中, } \theta = \arccos \left(\frac{C + D/2 - H_1}{D/2} \right), \alpha = \arcsin \sqrt{\frac{H - C}{D}} - \frac{\theta}{2}$$

由此将式(11)、(12)、(17)带入式(13)即可以计算隧道环向开挖面稳定荷载参数上限值。

多块体上限法和简化上限解得到盾构隧道环向开挖稳定荷载参数对比分析如图 15 所示。从图中可以看出, 简化上限解与多块体上限值较为接近, 尤其是在隧道埋深较浅的时候。就精度而言, 简化上限解完全可以满足岩土工程分析问题的需要, 是软黏土地基中浅埋隧道环向开挖稳定问题的实用公式。

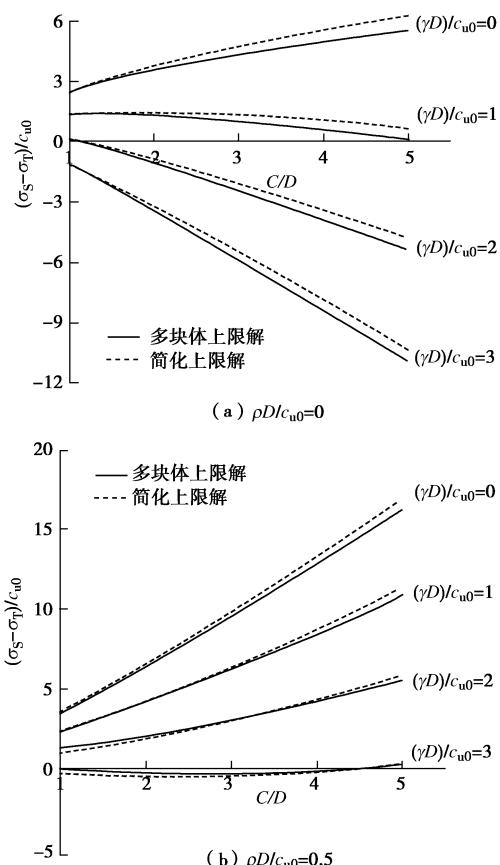


图 15 荷载参数多块体上限解与简化上限解对比

Fig. 15 Comparison of stability upper-bounds obtained from multi-block and simplified methods

3 已有文献离心试验结果的验证

为了进一步检验本文多块体极限分析上限法和简化上限解的适用性, 为正确分析评价隧道开挖面稳定提供参考依据, 下面将与一些实测资料进行对比分析。现有文献资料中由于开挖面失稳现场试验代价太大, 缺乏现场检测数据, 因此采用已有文献中的离心模型试验结果进行验证。黏土地基中隧道环向开挖面稳定性问题模型试验研究较为全面的主要有 Mair^[3]、Wu 等^[13]的离心模型试验。下面将引用其试验资料对本文的计算结果进行验证。

3.1 Mair 的离心试验验证

Mair^[3]在剑桥大学离心机模型试验中, 采用软黏土材料, 研究了均质以及非均质条件下, 2D 环向和 3D 隧道开挖面稳定性问题, 试验中埋设了位移计、孔压计等各种精密传感器。现取其 2D 试验结果来验证本文的计算结果。试验采用离心加速度为 75g; 试验隧道模型直径为 60 mm; 黏土固结压力为 171 kPa; 隧道内部均布气体压力, 在试验过程中逐步减小气体压力, 来模拟隧道开挖, 直至开挖面破坏。试验分均质和非均质两个阶段进行: 在均质条件下 ($\rho D/c_{u0} = 0$), 均匀不排水抗剪强度为 26 kPa, 土体重度参数 $\gamma D/c_{u0} = 2.6$; 在非均质条件下不排水抗剪强度 $c_u = c_{u0} + 0.39z$, 其中 $c_{u0} = 19$ kPa, 即 $\rho D/c_{u0} = 0.0874$, $\gamma D/c_{u0} = 3.5649$ 。

基于 Mair^[3]的离心试验基本参数, 采用多块体上限分析方法和简化上限解对开挖面稳定进行分析计算, 并与相应的试验结果进行分析比较。图 16 给出了由多块体上限法、简化上限解及 Mair^[3]离心试验得到的荷载参数 $(\sigma_s - \sigma_t)/c_{u0}$ 隧道埋深变化的对比关系图。

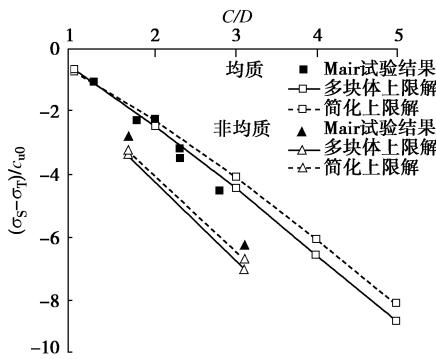


图 16 荷载参数计算结果与离心试验结果对比

Fig. 16 Comparison of load factors $(\sigma_s - \sigma_t)/c_{u0}$ obtained from numerical methods and centrifuge modeling

图 16 中均质条件下的计算结果和试验结果的对比表明, 多块体上限法的结果和试验值吻合的很好, 表明了多块体上限法的正确性。简化方法得到的上限

解虽然没有多块体上限解精确, 但是与试验结果也较为接近, 而且更因其简单实用, 可直接用于工程中初步确定开挖面支护压力, 是软黏土地基中隧道开挖稳定性问题的实用公式。

而不排水强度随深度线性增加时, 要保持开挖面稳定计算结果所需的支护压力比试验中的支护压力要大, 即计算结果较实验结果偏于保守。这是因为在试验条件下, 当土体的不排水抗剪强度随埋深增加时, 模型试验中隧道发生失稳破坏时滑动面较难延伸至地表, 而在计算过程中则是假设破坏面是延伸至地表的, 因此计算结果和试验存在一定的误差。

3.2 Wu 等的离心试验结果验证

Wu 等^[13]利用离心模型试验对均质软黏土地基中, 研究了单双隧道开挖引起的横向地表沉降和环向破坏模式; 下面取其单隧道模型试验结果进行对比分析。试验采用的离心加速度为 100g, 隧道模型直径为 100 mm。土样重度 $\gamma = 18.1$ kN/m³, 固结压力 196 kPa。隧道内部均布气体压力, 以 20 kPa/min 的速度逐渐减小来模拟隧道开挖, 直至破坏。监测数据表明在实验过程中土体孔隙水压力变化不到 1%, 即开挖破坏过程土体处于不排水状态。试验过程中不排水强度均匀分布, 土体重度参数 $\gamma D/c_u$, 试验安排及多块体上限解、简化上限解和试验结果对比详见表 1。

表 1 试验参数以及荷载参数计算结果和离心试验结果对比

Table 1 Comparison of load factors $(\sigma_s - \sigma_t)/c_u$ obtained from numerical methods and centrifuge modeling

测试	$\frac{C}{D}$	c_u	$\frac{\gamma D}{c_u}$	$(\sigma_s - \sigma_t)/c_u$		
				文献[13]	多块体 上限解	简化上 限解
Test1	1	36.9	2.94	-1.04	-1.11	-1.15
Test2	1	37.9	2.86	-1.12	-1.02	-1.05
Test3	2	30.25	3.59	-5.35	-4.81	-4.57
Test4	2	35.79	3.03	-4.15	-3.51	-3.28
Test5	3	33.3	3.26	-7.08	-6.74	-6.33
Test6	3	34	3.19	-7.26	-6.51	-6.10
Test7	4	32.17	3.37	-10.21	-10.04	-9.54

表 1 的对比分析说明再次说明了在均质条件下, 多块体上限法的结果和简化上限解与试验值吻合的很好, 表明了计算结果的正确性和计算方法的适用性。

Mair^[3]、Wu 等^[13]的离心模型试验结果与多块体上限法结果及简化上限解对比结果说明, 对于浅埋 ($C/D < 3$) 均质饱和软黏土地基, 可以直接应用本文方法分析其开挖面稳定性, 对于非均质饱和软黏土地基中隧道开挖面稳定问题, 本文方法虽然略显保守但在一定的精度范围内 (<12%)。

4 结 论

本文围绕隧道环向开挖稳定性问题的平面应变情况展开, 基于多块体极限分析上限法, 推导了相应的

计算公式, 主要分析了隧道比、土体重度、及地基土强度非均质性对开挖面极限支护压力和因隧道开挖产生的滑动面形状和范围的影响; 并在此基础上进一步得到了隧道支护压力的简化上限解, 主要研究结论如下:

(1) 荷载参数多块体极限分析上限值明显改善了已有的上限分析结果, 验证了多块体极限分析上限法的适用性。保持开挖面稳定所需支护压力与土体重度呈正比线性关系, 与非均质参数呈反比线性关系。至于隧道埋深对支护压力的影响则由于土体重度和不排水抗剪强度的共同作用在临界点前后表现为不同的趋势。

(2) 隧道开挖在土体中引起的塑性区分布情况视隧道埋深、土体重度和强度非均质性的不同而不同: 在隧道埋深及 $\rho D/c_{u0}$ 一定的情况下, 滑动面的范围随 $\gamma D/c_{u0}$ 增加而变大, 隧道两侧起始滑动位置下移, 而且当 $\rho D/c_{u0}$ 较大时 $\gamma D/c_{u0}$ 对滑动面的范围的影响减小; 在隧道埋深及土体重度一定的情况下, 滑动面范围随 $\rho D/c_{u0}$ 的增加而减小, 而且随着 $\gamma D/c_{u0}$ 的增加 $\rho D/c_{u0}$ 对滑动面的范围的影响变大; 当土体重度参数和强度非均质参数一定时, 隧道埋深增加则滑动面宽度增加, 隧道两侧土体发生滑动的位置稍微下移, 范围也变大。

(3) 基于现有极限分析上限法, 对盾构隧道环向开挖稳定问题破坏模式进行简化, 首次提出了黏性土地基隧道稳定简化上限解, 可直接用于工程中初步确定开挖面支护压力, 是软黏土地基中浅埋隧道开挖稳定性问题的实用公式。

(4) 最后通过与现有离心模型试验结果的分析检验, 验证了多块体极限分析上限法和简化上限解的正确性。

参考文献:

- [1] CAIRNCROSS A M. Deformation around tunnel heading in clay[D]. London: University of Cambridge, 1973.
- [2] SENEVIRATNE H N. Deformation and pore pressure around model tunnels in soft clay[D]. London: University of Cambridge, 1979.
- [3] MAIR R J. Centrifugal modeling of tunnel construction in soft clay [D]. London: University of Cambridge, 1979.
- [4] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J, et al. The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive materials[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 397 - 416.
- [5] OSMAN A S, MAIR R J, BOLTON M D. On the kinematics of 2D tunnel collapse in undrained clay[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(9): 585 - 595.
- [6] SLOAN S W, ASSADI A. Stability of shallow tunnels in soft ground[C]// Predictive Soil Mechanics, Proceedings of the Wroth Memorial Symposium. London: Thomas Telford, 1993: 644 - 663.
- [7] 郑颖人, 邱陈瑜, 张 红, 等. 关于土体隧道稳定性分析方法的探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 1968-1980. (ZHENG Ying-ren, QIU Chen-yu, ZHANG Hong, et al. Exploration of stability analysis methods for surrounding rocks of soil tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(10): 1968 - 1980. (in Chinese))
- [8] 黄正荣, 朱 伟, 梁精华, 等. 盾构隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(10): 112 - 116. (HUANG Zheng-rong, ZHU Wei, LIANG Jing-hua, et al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(10): 112 - 116. (in Chinese))
- [9] 乔金丽, 张义同, 高 健, 等 强度折减法在盾构隧道开挖面稳定分析中的应用[J]. 天津大学学报, 2010, **43**(1): 14 - 20. (QIAO Jin-li, ZHANG Yi-tong, GAO Jian, et al. Application of strength reduction method to stability analysis of shield tunnel face[J]. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 2010, **43**(1): 14 - 20. (in Chinese))
- [10] 秦会来, 黄茂松, 马少坤. 黏土基坑抗隆起稳定分析的多块体上限解[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 73 - 81. (QIN Hui-lai, HUANG Mao-song, MA Shao-kun. Multi-block upper bound method for basal heave stability analysis of braced excavations in clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(1): 73 - 81. (in Chinese))
- [11] 周维祥. 非均质黏土地基隧道开挖面稳定性分析[D]. 上海: 同济大学, 2012. (ZHOU Wei-xiang. Stability analysis of tunnel face in non-homogeneous clays[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))
- [12] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [13] WU B R, LEE C J. Ground movements and collapse mechanisms induced by tunneling in clayey soil[J]. *International Journal Physical Modelling in Geotechnics*, 2003, **3**(4): 13 - 27.