

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0261

# 双线盾构施工时邻近地下管线安全性判别

魏 纲<sup>1</sup>, 林 雄<sup>1</sup>, 金 睿<sup>2</sup>, 丁 智<sup>1</sup>

(1. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江省建工集团有限责任公司, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:** 研究双线盾构隧道施工时邻近地下管线的安全性判别方法。基于 Winkler 弹性地基梁模型, 考虑管土效应, 建立连续管线应变与地表沉降关系式; 假设管线位移与土体位移相同, 建立非连续管线接头转角与地表沉降关系式; 同时考虑管线老化, 定义与时间相关的折减系数, 建立一种通过测量地表沉降值即可判断管线安全性的方法。当管线应变或接头转角为安全允许值时, 对应的地表沉降即为控制值。施工时, 若地表沉降超过该值, 则表明管线存在危险。该方法将不易监测的管线状态转化为可见的地表沉降。研究结果表明: 预测值与实测值的对比说明了所提方法具有可靠性; 双线隧道水平间距  $L$  值对地表沉降控制值的影响非常大。当  $L$  较小时, 最大值出现在两隧道中轴线处; 当  $L$  较大时, 最大值出现在隧道轴线上方附近处; 随着  $L$  的增大, 最大控制值逐渐减小。

**关 键 词:** 双线盾构隧道; 地下管线; 安全性判断; 地表沉降

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0181-10

## Security discrimination of adjacent underground pipelines during the construction of twin shield tunnels

WEI Gang<sup>1</sup>, LIN Xiong<sup>1</sup>, JIN Rui<sup>2</sup>, DING Zhi<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310015, China;

2. Zhejiang Construction Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

**Abstract:** This article presents a method for security discrimination of adjacent underground pipelines during the construction of twin shield tunnel. Based on Winkler elastic foundation beam model, a relationship is established between strain of continuous pipelines and surface settlement by considering pipe-soil interaction. Assuming that displacement of pipelines and displacement of soil are the same, an expression of relationship between joint angle of discontinuous pipelines and surface settlement is derived. Considering aging of pipelines, a reduction factor related to time is defined, and a method to judge the security of pipelines by measuring surface settlement is built. When the strain or joint angle of pipeline reaches the maximum safety allowable value, the corresponding surface settlement is the controlling value. The pipelines are in danger when the value of surface settlement exceeds the controlling value during the construction stage. Surface settlement monitoring data are used in this method to assess the state of subsurface pipelines and the state is not easy to be monitored. The reliability of this method has been indicated in the comparison between predicted value and measured value, and the horizontal spacing  $L$  value of twin tunnel has a great influence on the control value of surface settlement. When  $L$  is relatively small, the maximum value appears on the axis of two tunnels; when  $L$  is relatively large, the maximum value appears on the vicinity of the tunnel axis. With the increase of  $L$ , the maximum control value is gradually reduced.

**Keywords:** twin shield tunnels; underground pipelines; security discrimination; surface settlement

## 1 引 言

地下管线(以下简称管线)是维系城市地上地下空间、保证城市整体运行的基础设施。由于地铁

属于浅埋隧道,其施工扰动会对管线安全构成威胁。随着越来越多的城市开始大规模建设地铁工程,地铁施工引发管线损坏的事故也屡屡发生。因此,建立一套管线安全判别体系具有重要意义。

收稿日期: 2016-01-27

基金项目: 浙江省科技厅公益技术研究项目(No. 2016C33051); 住房和城乡建设部 2015 年科学技术项目计划(No. 2015-K5-026)。

This work was supported by the Public Technology Project of Science Technology Department of Zhejiang Province (2016C33051), the Science and Technology Project of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China (2015-K5-026).

第一作者简介: 魏纲, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地下隧道施工对周边环境及风险评估与控制方面的研究工作。

E-mail: weig@zucc.edu.cn

通讯作者: 丁智, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事轨道交通施工及运营对周边环境及风险评估方面的教学和科研工作。E-mail: dingz@zucc.edu.cn

目前国内外对管线及其安全性的研究,内容集中在管线的力学指标及位移计算<sup>[1-5]</sup>、信息采集系统建立<sup>[6]</sup>、管土之间相互作用规律<sup>[7-9]</sup>等。针对管线安全性判别方面,Attewell等<sup>[10]</sup>提出初步评价地层运动对管线影响的最大地表沉降值,但该经验法涉及管土参数少,不能根据具体工况得出较准确的沉降值;张鹏等<sup>[11]</sup>对管线现有控制标准进行了分析,提出刚性管线弯矩、应力的破坏指标;赵智涛<sup>[12]</sup>、张彦斌<sup>[13]</sup>等考虑管土刚度,分析了地表沉降与管线沉降的关系,但未将其与管线安全判断建立联系;贾瑞华等<sup>[14]</sup>利用地层的沉降监测数据,结合位移数值分析,以地表沉降为指标对管线的安全性进行验证;马亚航<sup>[15]</sup>针对刚性管线提出允许地表沉降值评价方法,采用地表沉降代替管线沉降,通过拟合土体沉降曲线的曲率半径求出管线的变形,存在不足;段光杰<sup>[8]</sup>提出以地表最大沉降控制管线变形的思路,但计算方法需改进。综上所述,现有研究局限于单线盾构隧道施工,研究方向较分散,且研究成果偏理论和简单,较少能直接应用于实际工程。因此需作进一步研究,建立一套适用于实际双线盾构隧道工程施工的管线安全性判别方法。

本文将管线受力变形与地表沉降联系起来,分别提出双线盾构施工情况下,邻近连续管线应变与地表沉降关系式和非连续管线接头转角与地表沉降关系式,并考虑管线老化,建立一种通过测量地表沉降即可判别管线安全性的方法。

## 2 现有研究及不足之处

### 2.1 第1类方法

该方法先计算管线某点处的受力或变形,再与规范中安全允许值进行比较,判别管线是否安全。

向卫国<sup>[1]</sup>分析了土体与管线的垂直位移特性,探讨了地表与管线沉降槽曲线相互关系,得出了管线沉降分布拟合公式。已知管线沉降求得管线所受应力,最后提出管线变形系数 $\xi$ 的计算公式为

$$\xi = \sigma / [\sigma] \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为管线应力; $[\sigma]$ 为管线的允许应力。

裴超<sup>[5]</sup>提出刚性管线的允许应力 $[\sigma]$ 的计算公式为

$$[\sigma] = K\phi\sigma_s \quad (2)$$

式中: $K$ 为设计系数; $\phi$ 为焊缝系数; $\sigma_s$ 为管线最低屈服强度。

该方法根据 $\xi$ 大小反映管线的安全性,当 $\xi \geq 1$ 时管线破坏。

李兴高等<sup>[2-3]</sup>针对刚性管线<sup>[2]</sup>和柔性管线<sup>[3]</sup>的安全评价方法,提出以管线应变为控制指标,若管线的附加纵向应变小于管线纵向应变的控制标准,则管线是安全的,反之不安全;提出以管线接头转角为控制指标,若管线接头的附加转角小于管线接头的转角控制标准,则管线是安全的,反之不安全。

### 2.2 第2类方法

该方法提出将管线的受力变形与地表沉降联系起来,通过地表沉降大小来反映管线的变形或受力,从而判别管线是否安全。

周成君<sup>[4]</sup>在研究地表最大沉降值与管线变形之间的关系时,为计算管线位置处土体位移,利用前人提出的地表沉降槽宽度系数 $i(s)$ 公式,得到管线轴线平面处土体的沉降槽宽度系数 $i(p)$ 公式。

当土质为黏性土,  $3\text{ m} \leq H \leq 34\text{ m}$ 时,有

$$i(p) = 0.43(H - h) + 1.1 \quad (3)$$

式中: $H$ 为盾构轴线埋深; $h$ 为管线轴线埋深。

当土质为砂土,  $6\text{ m} \leq H \leq 10\text{ m}$ 时,有

$$i(p) = 0.28(H - h) - 0.1 \quad (4)$$

最后,通过求解相关微分方程得到管线所受弯矩 $M$ 与最大地表沉降值 $S_{\max}(0)$ 的关系式。

当 $1/[i(p)\beta] > 0.7$ 时,有

$$M = EI \frac{i(s)\beta S_{\max}(0)}{2.3[i(p)]^2} [1 - 2.3\delta i(p)\beta] \quad (5)$$

式中: $\beta = \sqrt[4]{kd/(4EI)}$ ;  $EI$ 为管线抗弯刚度; $k$ 为管线平面处的地基反力系数; $d$ 为管线外径; $\delta i(p)\beta$ 为

$$\delta i(p)\beta = \exp[-i(p)\beta] [\cos(i(p)\beta) + \sin(i(p)\beta)] \quad (6)$$

当 $1/[i(p)\beta] < 0.7$ 时,有

$$M = EI \frac{i(s)\beta S_{\max}(0)}{2.3[i(p)]^2} \quad (7)$$

该方法假设沉降槽宽度系数与土层深度呈线性关系,适用于砂性土,但不适用于黏性土。因此,在研究管线变形、位移时,应对相应的土体变形计算公式进行改进和更新。

李林<sup>[16]</sup>通过实测地表沉降数据,拟合管线挠曲线方程,再通过对挠曲线求微分得出管线曲率,

进而求得管线的应力状态；最后比较管线实际应力状态与管线的容许应力，判断其在盾构穿越条件下的安全度。该思路引入了管线处土体沉降这一指标，将管线状态与管线处土体沉降建立联系，但未推导管线状态与可见的地表沉降的直接关系式。

### 2.3 上述方法的不足之处总结

(1) 第1类方法是将隧道施工引起的管线受力变形的计算值，与规范中的安全允许值比较，以此判断管线是否安全。而实际工程中，一方面，管线埋置于地下且受力状态一直在改变，不容易及时测量其受力变形；另一方面，当通过计算发现管线存在危险时，管线可能已经破坏，因此实用性较低。

(2) 第2类方法实用性较强，因为地铁施工时必须对地表沉降进行监测。但研究成果还不成熟，不足之处主要体现在未对管线受力变形的计算公式、管线处土体沉降与地表沉降的联系公式进行更新（应采用最新研究成果），且未明确提出地表沉降与管线受力变形的计算关系式。

(3) 两类方法的研究均未考虑管线的老化。管线由于长年埋于地下，易受腐蚀，且受到地表荷载、水土流失、地下水位变化、邻近施工扰动等的作用，会产生不均匀沉降或强度降低等不利后果。随着管线使用年龄的增加，管线的状态也会愈差，抵抗受力变形的能力降低。如果不考虑管线的老化，计算结果会偏危险。因此，在实际工程中需要考虑邻近管线的使用年限，根据实际情况进行分析。

(4) 现有研究局限于单线盾构隧道施工，但实际工程往往采用双线平行盾构隧道进行施工。

(5) 李兴高等<sup>[2-3]</sup>提出管线接头不可转动的为刚性管，管线接头可以转动的为柔性管。但由于刚性、柔性往往被用于描述材料的刚度大小，该定义容易引起混淆。例如，实际情况中有管线接头可以转动的，但其材料弹性模量很大，如承插式铸铁管。

## 3 本文方法

### 3.1 本文思路及创新

针对以上方法的不足之处，本文延续第2类方法的思路，提出了相应的改进及创新：

(1) 将研究对象由单线盾构扩展到双线平行盾构，提出双线盾构施工时邻近管线的安全性评估方法。根据管线极限状态时对应的力学指标，如应变、接头转角等，反推出双线盾构施工时土体损失率的最大允许值；再根据修正的二维 Peck 公式求

出地表沉降安全控制值；最后，通过监测地表沉降来评估管线是否安全。

(2) 基于最新的双线平行盾构施工引起的土体位移计算公式，考虑管土效应及管线处土体沉降与地表沉降的关系，对管线的应变、接头转角计算公式进行改进，推导得到管线应变、接头转角与地表沉降的关系式。

(3) 根据管线的已使用年限，考虑管线老化，提出相应的安全折减系数，对不同使用年限管线的安全指标进行修正，使预测结果更符合实际情况。

(4) 为避免混淆，定义管线接头不可转动的为连续管线，管线接头可以转动的为非连续管线。

本文仅考虑管线与隧道垂直工况下，土体损失引起的管线受力或变形。管线安全性的判定方法流程见图1。针对不同类型的管线提出相应的安全性判断方法。连续管线的安全性判别指标是管体中产生的最大拉应变，非连续管线则以管线接头转角作为控制指标。具体来说，若连续（非连续）管线的应变（接头转角）小于管线应变（接头转角）的控制标准，则管线安全，反之不安全。

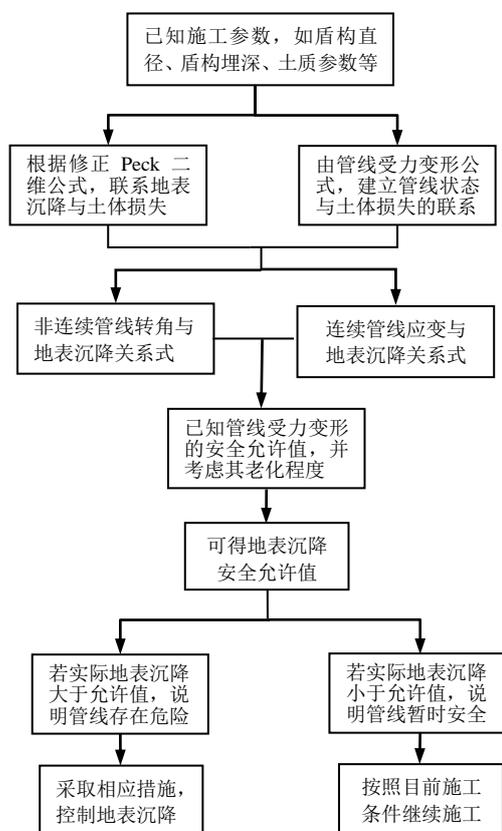


图1 管线安全性的判定方法流程

Fig.1 Flow chart of pipeline safety judgment method

基于本文判断方法，若实测地表沉降小于理论

求得的安全允许值，表明管线的应变（接头转角）未达到控制标准，即管线安全，反之不安全。

### 3.2 现有理论基础

#### 3.2.1 隧道施工引起土体沉降计算方法

大量实测结果表明<sup>[17-18]</sup>：地表以下任一土层的沉降槽形状符合正态分布曲线，沉降槽的体积等于土体损失量，如图2所示，可用公式表示为

$$i(s)\sqrt{2\pi}S_{\max}(0) = i(p)\sqrt{2\pi}S_{\max}(h) \quad (8)$$

式中： $S_{\max}(h)$ 为管线深度处土体最大沉降值。

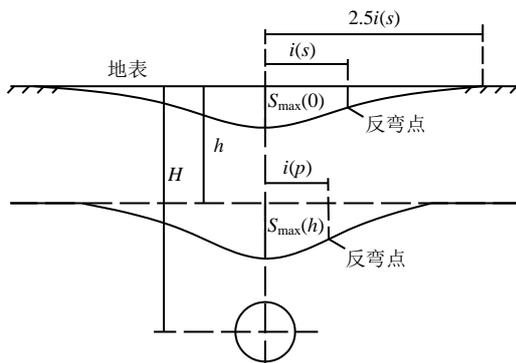


图2 隧道上方土体沉降槽曲线

Fig.2 Curve of soil settlement trough above tunnel

魏纲<sup>[19]</sup>对姜忻良<sup>[18]</sup>与孙玉永<sup>[20]</sup>等的公式进行了修正，使其适用范围更广，提出  $i(z)$  的计算公式为

$$i(z) = i(s)(1 - z/H)^n \quad (9)$$

式中： $i(z)$ 为  $z$  深度处土体沉降槽宽度系数； $n$  为与隧道半径和土质条件有关的影响系数。

在此基础上，Wei<sup>[21]</sup>建立了修正的二维Peck公式，可计算双线平行盾构施工引起的管线平面处各点土体位移。以右侧隧道先开挖为例，则土体中任意一点 $(x_0, z)$ 的沉降公式为

$$S_z(x) = \frac{S_{\max,f}}{(1 - z/H)^n} \exp\left[\frac{-(x_0 - 0.5L)^2}{2i_f^2(1 - z/H)^{2n}}\right] + \frac{S_{\max,l}}{(1 - z/H)^n} \exp\left[\frac{-(x_0 + 0.5L)^2}{2i_l^2(1 - z/H)^{2n}}\right] \quad (10)$$

式中： $S_z(x)$ 为双线盾构隧道施工引起的总的土体沉降； $x_0$ 为距双线盾构隧道中轴线的横向水平距离； $i_f$ 、 $i_l$ 分别为先行和后方隧道的地表沉降槽宽度系数； $L$ 为两条隧道轴线水平间距； $S_{\max,f}$ 、 $S_{\max,l}$ 分别表示先行隧道和后方隧道轴线正上方地表沉降值，且有

$$S_{\max,f} = \frac{\pi R^2 \eta_f}{i_f \sqrt{2\pi}}, \quad S_{\max,l} = \frac{\pi R^2 \eta_l}{i_l \sqrt{2\pi}} \quad (11)$$

式中： $\eta_f$ 、 $\eta_l$ 分别为先行和后方隧道产生的土体损失率； $R$ 为盾构开挖半径。

#### 3.2.2 弹性地基梁理论

弹性地基梁理论假设土体是土弹簧（Winkler地基模型），管线为架在其上方的长梁，见图3。模型建立过程中需要作一些基本假定，具体可参见文献<sup>[22]</sup>。限于篇幅，不再赘述。

由于双线隧道水平间距  $L$  的不同，双线盾构施工引起的土体沉降曲线可能出现 V 型或 W 型<sup>[23]</sup>。本文以较典型的 V 型沉降作为分析模型进行说明。

在盾构开挖前，管线受到上部土压力和下部土体反力作用，保持平衡；隧道开挖后，由于产生土体损失，导致隧道上方土体产生沉降。管线平面处土体产生沉降后，会使管线下部土体提供的反力减小，导致管线上方的压力大于下方压力，从而产生向下的附加荷载（见图3），其大小用公式表示为

$$P = kdS_z(x) \quad (12)$$

式中： $P$ 为管线上方产生的等效附加荷载；计算时  $z=h$ 。

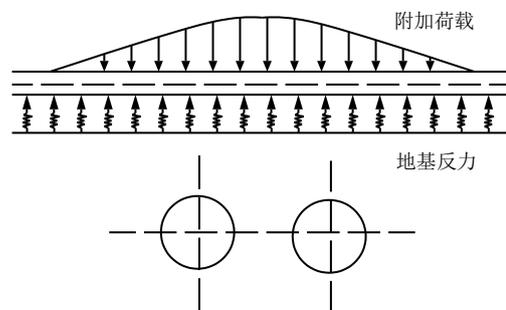


图3 弹性地基梁模型

Fig.3 Elastic foundation beam model

在附加荷载作用下，管线会产生沉降，下方土弹簧受力则相应增加。若管线刚度与土体相近，则管线沉降等于该平面处无管线时的土体沉降，从而受力平衡；若管线有一定刚度，则管线会产生抵抗弯矩，管线与土弹簧之间会产生复杂的变形协调，最终达到受力平衡，此时管线沉降要小于该平面处无管线时的土体沉降，见图4。

### 3.3 连续管线应变的安全性判断

当管土相对刚度不是非常大时，可以基于Winkler弹性地基梁模型，来计算管线的受力和变形。其中管线的弯矩  $M$  可作为一个综合性评价指

标，弯矩越大，管线遭受破坏的可能性也越大。

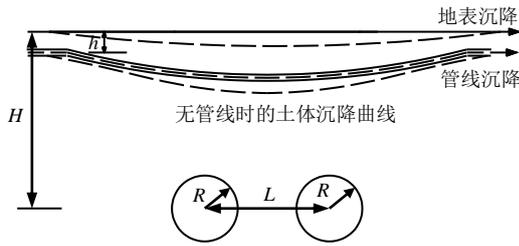


图 4 管土效应计算模型

Fig.4 Calculation model of pipe-soil effect

根据弹性地基梁理论，结合图 3，可以得到管线受隧道开挖影响的变形微分方程为

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + kdw = kS_z(x)d \quad (13)$$

式中： $w$  为管线的竖向挠度。

解微分方程，可得管线纵向中心点处受到的最大弯矩  $M_{max}$  为

$$M_{max} = \int_{-\infty}^{\infty} dM(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{kS_z(x)d}{4\beta} \exp(-\beta x)(\cos \beta x - \sin \beta x) dx \quad (14)$$

限于篇幅，推导过程见文献[22]。

利用式 (14)，笔者提出管线在隧道开挖影响范围内任意一点( $x_0, h$ )的弯矩  $M(x)$  计算公式为

$$M(x) = EI\beta^3 \frac{\pi R^2 \eta_f}{i_f \sqrt{2\pi}} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{-n} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \cos(\beta|x - 0.5L - x_0|) - \sin(\beta|x - 0.5L - x_0|) \right] \cdot \exp\left[ \frac{-(x - 0.5L)^2}{2i_f^2(1 - h/H)^{2n}} - \beta|x - 0.5L - x_0| \right] dx + EI\beta^3 \frac{\pi R^2 \eta_l}{i_l \sqrt{2\pi}} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{-n} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \cos(\beta|x + 0.5L - x_0|) - \sin(\beta|x + 0.5L - x_0|) \right] \cdot \exp\left[ \frac{-(x + 0.5L)^2}{2i_l^2(1 - h/H)^{2n}} - \beta|x + 0.5L - x_0| \right] dx \quad (15)$$

当土体沉降呈 V 型时，管线最大弯矩出现在中轴线上方，最大弯矩  $M_{max}$  为

$$M_{max} = M(0) \quad (16)$$

当土体沉降呈 W 型时，管线最大弯矩出现在左右隧道轴线上方，最大弯矩  $M_{max}$  为

$$M_{max} = M(L/2) \quad (17)$$

管线所受的最大应力  $\sigma_{max}$  计算公式为

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{32M_{max}d}{\pi(d^4 - d'^4)} \quad (18)$$

式中： $W$  为弯曲截面系数； $d'$  为管线内径。

则管线产生的最大应变  $\epsilon_{max}$  的计算公式为

$$\epsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E_p} = \frac{32M_{max}d}{\pi E_p (d^4 - d'^4)} \quad (19)$$

将式 (15)、(18)、(19) 进行变换简化，为简便计算，可设  $\eta_f = \eta_l$ 、 $i_f = i_l$ ，得到土体损失率  $\eta_f$  与管线最大应变  $\epsilon_{max}$  的关系式：

$$\eta_f = \frac{i_f (d^4 - d'^4) \sqrt{2\pi} (1 - h/H)^n \epsilon_{max} E_p}{32dEI\beta^3 R^2 (A + B)} \quad (20)$$

其中：

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \cos(\beta|x - 0.5L - x_0|) - \sin(\beta|x - 0.5L - x_0|) \right] \cdot \exp\left[ \frac{-(x - 0.5L)^2}{2i_f^2(1 - h/H)^{2n}} - \beta|x - 0.5L - x_0| \right] dx \quad (21)$$

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \cos(\beta|x + 0.5L - x_0|) - \sin(\beta|x + 0.5L - x_0|) \right] \cdot \exp\left[ \frac{-(x + 0.5L)^2}{2i_l^2(1 - h/H)^{2n}} - \beta|x + 0.5L - x_0| \right] dx \quad (22)$$

将  $\epsilon_{max}$  用规范中的管线应变安全允许值  $[\epsilon]$  代入，求出的  $[\eta_f]$  为管线安全前提下对应的土体损失率安全允许值。最后，通过修正的二维 Peck 公式建立土体损失率与地表沉降的关系：

$$[S'_{max}(x)] = \frac{\pi R^2 [\eta_f]}{i_f \sqrt{2\pi}} \exp\left[ \frac{-(x - 0.5L)^2}{2i_f^2} \right] + \frac{\pi R^2 [\eta_l]}{i_l \sqrt{2\pi}} \exp\left[ \frac{-(x + 0.5L)^2}{2i_l^2} \right] \quad (23)$$

式中： $[S'_{max}(x)]$  为地表沉降安全允许曲线。

### 3.4 非连续管线接头转角的安全性判断

考虑管土效应，则管线的真实沉降一般会小于无管线存在时的土体沉降（式 (10) 的计算结果）。理论上需要求出管线的真实沉降，来计算其真实接头转角。但由于弹性地基梁法求解管线位移比较困难，为简便计算，本文假定非连续管线沉降与无管线存在时的土体沉降一致。这种处理方法会比实际情况保守，不影响安全性判断。

若施工时土体沉降曲线呈 W 型<sup>[23]</sup>，其引起管线接头转角最大值分别出现在两条隧道轴线的正上方，计算模型见图 5。则计算先行、后行盾构隧道

轴线上方土体沉降时, 可以以单线盾构隧道为计算模型。可设  $\eta_f = \eta_1$ , 结合式 (9)、(10), 推导得管线接头转角公式:

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{S_z(0)}{i(s)\sqrt{2\pi}} \right\} \quad (24)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{\eta_f R^2 (1-h/H)^{2n}}{2[i(s)]^2} \right\} \quad (25)$$

式中:  $\theta$  为管线和隧道垂直时产生的接头转角。

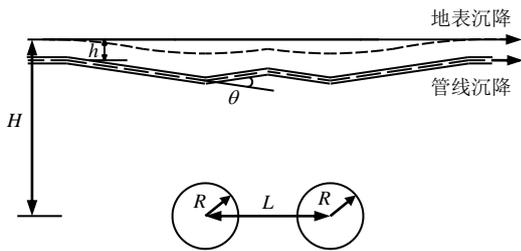


图5 非连续管线计算模型

Fig.5 Calculation model of discontinuous pipeline

将式 (25) 变换化简, 可得土体损失率  $\eta_f$  与管线接头转角  $\theta$  的关系式:

$$\eta_f = \frac{2[i(s)]^2 \tan(\theta/2)}{R^2 (1-h/H)^{2n}} \quad (26)$$

若施工中土体沉降呈 V 型<sup>[23]</sup>, 土体沉降曲线类似图 4, 其引起管线接头转角最大值出现在双线隧道正中间。为简便计算, 可设  $\eta_f = \eta_1$ 、 $i_f = i_1$ 。以  $\eta_f$  为标准, 则可得到土体损失率  $\eta_f$  与管线接头转角  $\theta$  的关系式:

$$\eta_f = \frac{[i(s)]^2 \tan(\theta/2)}{R^2 \exp \left\{ \frac{-0.25L^2}{2[i(s)]^2 (1-h/H)^{2n}} \right\}} \quad (27)$$

将  $\theta$  用规范中的管线接头转角安全允许值  $[\theta]$  代入, 则求出的  $[\eta_f]$  为管线安全前提下对应的土体损失率安全允许值。同理, 采用修正二维 Peck 公式建立土体损失率与地表沉降的关系, 公式同式 (23)。

### 3.5 考虑管线老化

由于管线埋在地下, 管线的老化程度和不均匀沉降很难评估, 而且不同管线的使用年限不同, 破损程度也相应不同, 因此不能一概而论。

为便于计算, 笔者假定管线的强度随服役时间增长呈线性下降, 提出与时间  $t$  相关的折减系数  $\alpha$ , 从而建立了一种简化计算方法。根据城市给

水排水技术规范, 地下管道结构的设计使用年限不低于 50 a, 安全等级不小于 2 级<sup>[24]</sup>。假设管线设计使用年限为 50 a, 根据工程结构可靠性设计统一标准<sup>[25]</sup>, 并结合结构可靠指标, 规定 50 a 后可靠指标不小于 0.5, 即  $\alpha$  仍有 0.5 的富余, 则有

$$\alpha = 1 - t/100 \quad (28)$$

考虑管线老化, 则地表沉降安全允许曲线的修正计算公式为

$$[S_{\max}(x)] = \alpha \frac{\pi R^2 [\eta_f]}{i_f \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(x-0.5L)^2}{2i_f^2} \right] + \alpha \frac{\pi R^2 [\eta_f]}{i_f \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(x+0.5L)^2}{2i_f^2} \right] \quad (29)$$

式中:  $[S_{\max}(x)]$  为考虑管线老化后修正的地表沉降安全允许曲线。

定义  $[S_{\max}(x)]$  中的最大值为地表沉降安全控制值, 用  $[S_{\max}]$  表示。由于  $\alpha \leq 1$ , 即考虑管线的老化和破损程度后, 地表沉降安全允许曲线值相应减小, 结果趋于保守。

## 4 算例分析

### 4.1 连续管线的安全性分析

参考孙宇坤等<sup>[26]</sup>一文中的实测数据, 对本文方法进行验证。工程概况如下: 某沿海城市软土地地区地铁隧道采用 2 台半径  $R=3.17$  m 的土压平衡盾构机, 隧道埋深  $H=15.1$  m, 隧道间距  $L=13.2$  m, 分别进行上下行线隧道施工。区间隧道穿越的管线主要分布在某交叉路口, 有多根管线。本文选择铸铁煤气管作为研究对象, 其管外径  $d=300$  mm, 内径  $d'=280$  mm, 埋深  $h=0.9$  m, 与隧道轴线的相交角为  $88^\circ$ , 可近似认为与盾构隧道呈空间垂直关系。

计算参数取值如下:  $i_f=8$  m,  $n=0.4$ ,  $EI=600$  MPa,  $\beta=0.183$ ,  $[\varepsilon]=5 \times 10^{-4}$ 。文献<sup>[26]</sup>中未提到管线使用年限, 因此不考虑管线老化。

计算得到管线平面处土体沉降曲线呈 V 型。将参数代入式 (20), 求得先行隧道的  $[\eta_f]=0.817\%$ ,  $[S_{\max}]=18.3$  mm, 即两条隧道中轴线的地表沉降超过 18.3 mm 后管线有破坏的危险。

图 6 为实测数据和本文方法计算值的比较。如图所示, 实测地表沉降曲线在本文方法计算曲线范围内, 实测最大地表沉降值 14.12 mm 也小于本文方法计算得到的  $[S_{\max}]$  值, 判断管线安全。实际工程中管线未破坏, 证明了本文方法的可靠性。

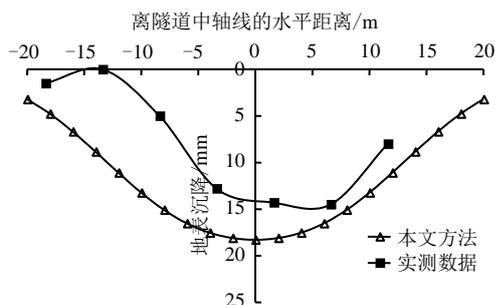


图 6 实测数据与本文方法比较

Fig.6 Comparison between measured data and data from the method of this paper

### 4.2 非连续管线安全性及影响因素分析

#### 4.2.1 案例分析

参考王雨<sup>[27]</sup>的计算数据，对本文方法进行验证。工程概况如下：某地铁双线隧道下穿 3 条接口为承插口式的非连续铸铁管，左、右线隧道轴线间距  $L=9\text{ m}$ ，且左、右线隧道设计、施工参数及周围土质情况均相同。隧道半径  $R=3\text{ m}$ ，轴线埋深  $H=10\text{ m}$ ，地表沉降槽宽度  $i_f=5\text{ m}$ ，土体损失率为 2.5%。铸铁管与隧道位置垂直，外径  $d=1\ 200\text{ mm}$ ，埋深  $h=3\text{ m}$ 。

计算参数取值： $n=0.3$ ， $[\theta]=1.5^\circ$ 。文献<sup>[27]</sup>求得地表沉降控制值为 58.2 mm，管线未破坏。

图 7 为土体损失率为 2.5%，改变  $L$  值时双线隧道施工引起的地表沉降曲线。由图可知，当  $L \leq 10\text{ m}$  时，地表沉降最大值出现在双线盾构中轴线位置( $x=0\text{ m}$ )；当  $L > 10\text{ m}$  时，地表沉降最大值开始往先行、后行盾构隧道轴线方向移动。因此在研究管线安全性时，应根据双线隧道间距大小不同，找出管线最危险点位置，再计算  $[S_{\max}]$  值。

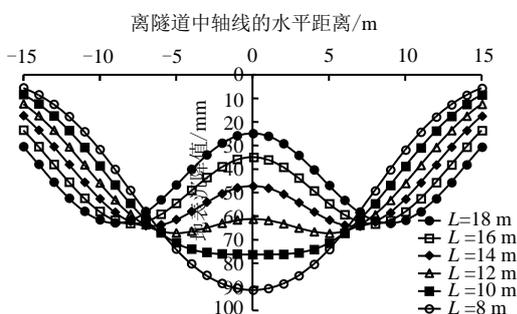


图 7 L 不同时地表沉降曲线

Fig.7 Surface subsidence curves with different L

本算例中  $L=9\text{ m}$ ，由图 7 可知，地表沉降最大值出现在双线盾构中轴线处，因此将数据代入式 (27)，求得  $[\eta_f]=6\%$ ， $[S_{\max}]=180\text{ mm}$ ，即最大地表沉降超过 180 mm 后管线有破坏的危险。考虑管线老化，假设管线使用年龄分别为 0、10、20、

30、40 a，求得对应管龄条件下的  $[S_{\max}(x)]$ ，结果见图 8。

由于参考文献无完整管线连续沉降数据，图 8 仅为本文方法求得的地表沉降安全允许曲线。如图所示，本文方法得出的地表沉降控制值大于王雨<sup>[27]</sup>求出的地表沉降控制值，且管线在此范围内未破坏。随着使用年龄的增加，管线的破损程度加深，导致  $[S_{\max}]$  值逐渐减小。

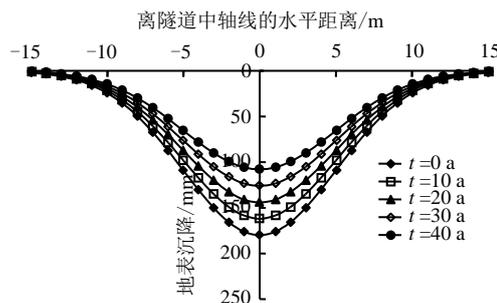


图 8 极限状态下地表沉降安全允许曲线

Fig.8 Curves of settlement under limit state of ground surface safety

#### 4.2.2 L 不同影响分析

假设管线刚刚埋设，即  $t=0$ ，令其他工况条件相同，单独改变  $L$  值，研究  $L$  不同对  $[S_{\max}(x)]$  曲线的影响。

图 9 为  $L$  不同时，根据管线最危险点求出的地表沉降安全允许曲线。分析可知：①当  $L$  不同时，由于管线接头转角的安全允许值是相同的，其对应的地表沉降允许值也是相同的，因此地表沉降控制值  $[S_{\max}]$  差距较小；②当  $L$  改变时，管线最危险点的位置也不同。当  $L \leq 10\text{ m}$  时，地表沉降呈 V 型，最大值出现在两隧道中轴线处，无极小值；当  $L > 10\text{ m}$  时，地表沉降呈 W 型，最大值出现在隧道轴线上方附近处，并且随着  $L$  增大，W 型愈加明显，土体沉降在两隧道中轴线处的共同作用减弱，相应的极小值变小。因此，根据最危险点求出的相应地表沉降安全允许曲线的极小值也不同。

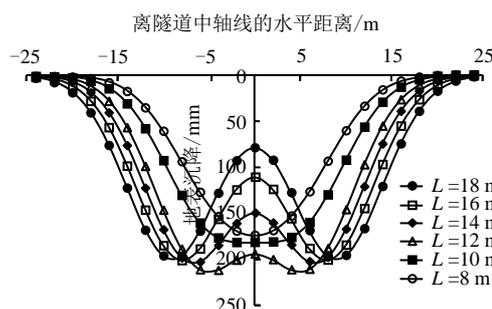


图 9 L 不同时地表沉降安全允许曲线

Fig.9 Safety curves of surface subsidence with different L

### 4.2.3 $H$ 不同影响分析

假设管线刚刚埋设, 即  $t=0$ , 令其他工况条件相同。由于  $L=9\text{ m}$ , 由图 7 可知, 地表沉降曲线呈 V 型。单独改变两隧道轴线埋深  $H$ , 研究  $H$  不同对  $[S_{\max}(x)]$  曲线的影响。图 10 为  $H$  不同时, 根据管线最危险点求出的地表沉降安全允许曲线。如图所示, 当  $H$  逐渐变大,  $[S_{\max}]$  值略微变小, 表明改变  $H$  值对  $[S_{\max}]$  值的影响不大。

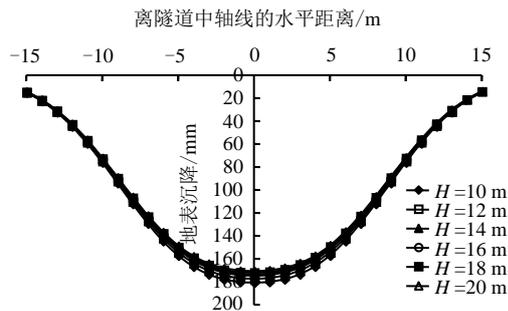


图 10  $H$  不同时地表沉降安全允许曲线  
Fig.10 Curves of safety of surface subsidence with different  $H$

## 5 结 论

(1) 本文提出把管线的受力变形与地表沉降联系起来, 通过地表沉降来判别管线是否安全。为避免混淆, 定义管线接头不可转动的为连续管线, 管线接头可以转动的为非连续管线。根据应变(接头转角)与土体损失率的关系, 建立连续管线应变与地表沉降关系式和非连续管线接头转角与地表沉降关系式。令管线应变(接头转角)达到安全允许值时, 与之对应的地表沉降为安全允许值。

(2) 首次提出应考虑管线的老化, 引入与时间有关的折减系数, 更全面地评价管线的安全性。随着使用年限的增加, 管线的破损程度加深, 导致地表沉降安全允许值减小。建议实际工程中需要考察管线的使用情况, 再进行安全性分析。

(3) 算例分析表明, 管线最危险点的位置随着  $L$  改变而改变; 当  $L$  较小时, 地表沉降曲线呈 V 型, 最大值出现在两隧道中轴线处; 当  $L$  较大时, 地表沉降曲线呈 W 型, 最大值出现在隧道轴线上附近处。 $H$  对地表沉降安全允许曲线的影响甚微, 随着  $H$  增大,  $[S_{\max}]$  值略减小。

(4) 本文方法考虑得比较全面, 但仅考虑土体损失情况下的土体沉降, 未考虑多因素(如正面附加推力、盾壳与土体间的摩擦力、注浆压力等)的影响, 同时作了较多假设, 可在此基础上进行深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] 向卫国. 隧道开挖引起地下管线变形和安全性状的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011.  
XIANG Wei-guo. Study on the deformation and safety of existing pipeline induced by the tunneling[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2011.
- [2] 李兴高, 王霆. 刚性管线纵向应变计算及安全评价[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3299—3302, 3306.  
LI Xing-gao, WANG Ting. Longitudinal strain calculation and safety evaluation of rigid pipelines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3299—3302, 3306.
- [3] 李兴高, 王霆. 柔性管线安全评价的简便方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1861—1864, 1876.  
LI Xing-gao, WANG Ting. Simple method for evaluating safety of flexible pipelines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(7): 1861—1864, 1876.
- [4] 周成君. 地铁盾构隧道施工对城市地下管线的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.  
ZHOU Cheng-jun. Study on effect of subway shield tunnel construction on adjacent buried pipelines[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [5] 裴超. 隧道施工对邻近地下管线的影响研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(12): 325—327.  
PEI Chao. Study the influence of tunnel construction on the neighboring underground pipeline[J]. *Shanxi Architecture*, 2008, 34(12): 325—327.
- [6] 任晓磊. 城市地下管线信息系统开发与研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.  
REN Xiao-lei. Development and research on city underground pipeline information system[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [7] 朱叶艇, 张桓, 张子新, 等. 盾构隧道推进对邻近地下管线影响的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 151—160.  
ZHU Ye-ting, ZHANG Huan, ZHANG Zi-xin, et al. Physical model test study of influence of advance of shield tunnel on adjacent underground pipelines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Supp.2): 151—160.
- [8] 段光杰. 地铁隧道施工扰动对地表沉降和管线变形影响的理论和研究方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2002.  
DUAN Guang-jie. The theoretical and methodical research on surface settlement and pipeline deformation

- due to construction disturbance in metro tunnel construction[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002.
- [9] 王涛, 魏纲, 徐日庆. 隧道开挖对邻近地下管线的影响预测分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 483—486.  
WANG Tao, WEI Gang, XU Ri-qing. Prediction for influence of tunneling on adjacent pipelines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp): 483—486.
- [10] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. London: Blackie and Son Ltd., 1986.
- [11] 张鹏, 韩焯. 地铁施工作用下地下管线变形损坏控制标准研究[C]//第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(上册). 北京: 中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会, 2010: 152—158.  
ZHANG Peng, HAN Xuan. Study of control standards of deformation failure for underground pipeline under the subway construction[C]//The 2nd National Engineering Safety and Protection Conference (Papers Set). Beijing: Engineering Safety and Protection Branch of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 2010: 152—158.
- [12] 赵智涛, 刘军, 王霆, 等. 地铁暗挖施工引起的管线与地层沉降关系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1159—1166.  
ZHAO Zhi-tao, LIU Jun, WANG Ting, et al. Relationship between the surface subsidence and the pipeline displacement induced by metro tunnel construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1159—1166.
- [13] 张彦斌, 杨成永, 王凯旋. 管土刚度对地下管线和地表沉降的影响分析及简易预测方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(5): 11—16.  
ZHANG Yan-bin, YANG Cheng-yong, WANG Kai-xuan. Analysis and simple prediction method of impact by pipe-soil stiffness on underground pipeline and surface subsidence[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2014, 10(5): 11—16.
- [14] 贾瑞华, 阳军生, 马涛, 等. 既有管线下盾构施工地层沉降监测和位移加载数值分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 425—430.  
JIA Rui-hua, YANG Jun-sheng, MA Tao, et al. Field monitoring and numerical analysis of shield tunneling considering existing tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(3): 425—430.
- [15] 马亚航. 隧道开挖引起的地层变形及其对地下管线的影响分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
MA Ya-hang. Effects of tunneling on ground movements and underground pipelines[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [16] 李林. 超大直径盾构穿越高危管线安全度判定方法及实测研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 134—138.  
LI Lin. The judgment method and field research regarding safety for an extra-large diameter shield passing under high-risk pipelines[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2014, 51(5): 134—138.
- [17] MOH Z C, JU D H, HWABG R N. Ground movements around tunnels in soft ground[C]//Proceedings of Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Constructions in Soft Ground. London: A. A. Balkema, 1996: 725—730.
- [18] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542—1544.  
JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1542—1544.
- [19] 魏纲. 盾构隧道深层土体沉降槽宽度系数计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(4): 110—115.  
WEI Gang. Study on calculation method of width coefficient of subsurface settlement trough in shield tunnel[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2010, 27(4): 110—115.
- [20] 孙玉永, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 500—506.  
SUN Yu-yong, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei. Distribution of deep displacement field during shield tunneling in soft-soil areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 500—506.
- [21] WEI GANG. Prediction of ground deformation induced by double parallel shield tunnelling[J]. **Disaster Advances**, 2013, 6(13): 91—98.

- [22] 魏纲, 朱奎. 顶管施工对邻近地下管线的影响预测分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 825—831.  
WEI Gang, ZHU Kui. Prediction for response of adjacent pipelines induced by pipe jacking construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 825—831.
- [23] 魏纲, 庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2563—2568.  
WEI Gang, PANG Si-yuan. Study of three-dimensional soil deformation caused by double-line parallel shield tunnel construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2562—2568.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50788-2012 城镇给水排水技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB50788-2012 Technical code for water supply and sewerage of urban[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50153-2008 工程结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB50788-2008 Unified standard for reliability design of engineering structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [26] 孙宇坤, 吴为义, 张土乔. 软土地区盾构隧道穿越地下管线引起的管线沉降分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 80—85.  
SUN Yu-kun, WU Wei-yi, ZHANG Tu-qiao. Analysis on the pipeline settlement in soft ground induced by shield tunneling across buried pipeline[J]. **China Railway Science**, 2009, 30(1): 80—85.
- [27] 王雨. 地铁隧道施工对地下管线变形的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
WANG Yu. Study on pipeline deform due to metro construction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

---

### 上接第 180 页

- [18] 裴利剑, 屈本宁, 钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3337—3341.  
PEI Li-jian, QU Ben-ning, QIAN Shan-guang. Uniformity of slope instability criteria of strength reduction with FEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3337—3341.
- [19] 刘新荣, 涂义亮, 钟祖良, 等. 基于能量突变的强度折减法边坡失稳判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2065—2072.  
LIU Xin-rong, TU Yi-liang, ZHONG Zu-liang, et al. Slope's failure criterion based on energy catastrophe in shear strength reduction method[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(6): 2065—2072.
- [20] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729—1740.  
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1729—1740.
- [21] 黎立云, 谢和平, 鞠杨, 等. 岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 35—40.  
LI Li-yun, XIE He-ping, JU Yang, et al. Experimental investigations of releasable energy and dissipative energy with rock[J]. **Engineering Mechanics**, 2011, 28(3): 35—40.
- [22] 梁昌玉, 李晓, 王声星, 等. 岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及其能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1830—1838.  
LIANG Chang-yu, LI Xiao, WANG Sheng-xing, et al. Experimental investigations on rate-dependent stress-strain characteristics and energy mechanism of rock under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(9): 1830—1838.
- [23] 年廷凯, 刘凯, 黄润秋, 等. 多阶多层复杂边坡稳定性的通用上限方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 842—849.  
NIAN Ting-kai, LIU Kai, HUANG Run-qiu, et al. A generalized upper-bound limit analysis approach for stability analysis of complex multistep and multilayer slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 842—849.