

DOI: 10.11779/CJGE20211447

隧道下穿施工引起既有隧道及地层变形预测的改进随机介质理论模型

徐 强^{1,2}, 朱永全^{*1,2}, 雷升祥^{1,3}, 刘 勇¹, 赵 伟⁴, 方智淳¹, 王 聰¹, 徐 硕¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 中国铁建股份有限公司, 北京 100855; 4. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

摘要: 新建隧道下穿既有隧道施工时, 由于传统随机介质理论无法考虑既有隧道的影响, 地层变形预测结果易出现较大误差。考虑隧道开挖后断面的非均匀收敛, 基于随机介质理论与 Peck 公式两者关键参数之间的关系, 对传统随机介质理论进行了简化和改进; 应用隧道衬砌抗弯刚度等效及当层法, 对非均质地层和既有隧道进行了等效处理, 提出了隧道下穿施工引起的既有隧道及地层变形预测模型, 结合相关典型工程验证了该理论模型的准确性。结果表明: 与传统随机介质理论相比, 预测模型对既有隧道及地层的变形预测曲线均呈“宽而浅”的特点, 与数值计算及现场实测结果的关联度更大, 具有更高的合理性和准确性, 为隧道下穿施工引起的既有隧道及地层变形预测提供了理论依据。

关键词: 下穿; 随机介质理论; 抗弯刚度等效; 当层法; 非均质地层

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)02-0301-09

作者简介: 徐 强(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: xuqiang@stdu.edu.cn。

Improved stochastic medium theoretical model for predicting deformation of existing tunnels and strata caused by excavation of new undercrossing tunnels

XU Qiang^{1,2}, ZHU Yongquan^{1,2}, LEI Shengxiang^{1,3}, LIU Yong¹, ZHAO Wei⁴, FANG Zhichun¹,
WANG Cong¹, XU Shuo¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. China Railway Construction Corporation Limited, Beijing 100855, China; 4. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: During the construction of new tunnels undercrossing the existing tunnels, the predicted results of the stratum deformation are prone to large errors since the traditional stochastic medium theory cannot consider the influences of the existing tunnel. Considering the non-uniform convergence of the tunnel section after excavation, the traditional stochastic medium theory is simplified and improved based on the relationship between the key parameters of the stochastic medium theory and those of the Peck's formula. The heterogeneous strata and existing tunnels are equated by applying the bending stiffness of an existing tunnel and the equivalent layer method. A prediction model for the deformation of the existing tunnels and strata caused by the excavation of new undercrossing tunnels is proposed, and based on the relevant typical project, its accuracy is validated. The results show that compared with those of the traditional stochastic medium theory, the predicted curves of the proposed model are “wide and shallow” and have a greater correlation with the numerical calculations and the field measurements, and they have a higher rationality and accuracy, which may provide a theoretical basis for the prediction of the deformation of the existing tunnels and strata caused by the excavation of undercrossing tunnels.

Key words: undercrossing; stochastic medium theory; equivalent bending rigidity; equivalent layer method; heterogeneous stratum

0 引言

由于城市地下空间资源的有限性和复杂性, 新建

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0808703, 2018YFC0808704); 国家自然科学基金项目(52178391); 石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2022001)

收稿日期: 2021-12-05

*通信作者(E-mail: 7935526@163.com)

隧道时常要穿越既有隧道进行施工, 既有隧道不可避免地会产生附加应力及附加变形, 产生极大的安全隐患^[1-2]。因此, 科学合理地预测下穿隧道施工引起的既有隧道及地层变形, 对下穿类隧道的设计施工及确保既有地下结构的安全性有重要的理论及工程意义。

随机介质理论由波兰学者 Litwiniszyn 在 1957 年研究采煤岩层与地表移动问题时提出, 后经中国学者刘宝琛等^[3]引入, 将该理论成功应用到矿山和地铁隧道等工程的地层位移预测中。为使随机介质理论适应更多类型的地层与工程类型, 韩煊等^[4]推导了各类断面形状在仰拱不隆起非均匀收敛模式下的随机介质理论计算公式, 并对随机介质理论与 Peck 经验公式的关系进行了研究。Cai 等^[5]考虑冻结壁的形成过程, 基于随机介质理论建立了隧道冻结施工引起地表冻胀位移的改进分析预测模型。齐永洁等^[6]引入开挖面收敛模式参数反映盾构开挖面的收敛模式, 推导了上软下硬土岩复合地层中盾构施工引起的地表位移计算公式。刘波等^[7]和伍振志^[8]将不同变形叠加的隧道断面收敛模式引入随机介质理论, 并基于反分析法在相关实际工程进行了应用和验证。虽然众多专家学者对随机介质理论进行了补充和改进, 但对地层变形进行预测时, 均不能考虑既有隧道对新建下穿隧道施工产生的影响, 且无法对地层内部的既有隧道变形进行预测。

本文以随机介质理论为研究基础, 考虑非均匀收敛计算模型对随机介质理论进行了简化, 基于 Peck 公式与随机介质理论关键计算参数之间的关系对传统随机介质理论进行了改进, 并应用刚度等效和当层法对非均质地层及既有隧道进行处理, 提出了隧道下穿施工引起的既有隧道及地层沉降变形的预测模型, 并结合数值模拟及现场实测数据对该模型的准确性进行了验证。

1 计算任意埋深地层沉降的简化随机介质理论解

1.1 考虑隧道非均匀收敛的简化随机介质理论解

随机介质理论求解隧道开挖引起的地表变形时, 将岩土体视为一种“随机介质”, 基于概率积分法和颗粒移动概率模型将开挖引起的地层下沉视为一个随机过程, 然后将整个隧道断面的开挖等效为无限多个无限小的单元开挖对上部地层影响的总和, 最后通过积分对开挖引起的地层位移进行求解。所以随机介质理论能够通过积分界限反映开挖面的形状、考虑隧道变形模式对地层位移的影响。且常见的城市隧道埋深不大, 大多处于表土或风化岩层中, 这些介质能被较好

地视为随机介质, 因此随机介质理论被广泛应用于城市隧道开挖引起的地表沉降预测^[9]。

如图 1 所示, 设在距离地面一定深度的地下开挖任意形状断面的隧道, 隧道中心埋深为 H , 开挖岩土单元采用局部坐标系 $\xi O\eta$, 隧道开挖采用全局坐标系 XOZ , 假定隧道开挖初始断面面积为 Ω , 隧道建成后开挖断面面积由 Ω 收缩为 ω 。开挖单元在不排水、不固结、密度不变化条件下, 当开挖单元完全塌落时, 上部地层的下沉 (即地表的横向沉降槽) 为

$$W_e(x) = \frac{1}{r(z)} \exp\left(-\frac{\pi}{r^2(z)} x^2\right) d\xi d\eta \quad , \quad (1)$$

式中, $r(z)$ 为开挖单元在深度为 z 的水平面上的主要影响范围, 它取决于开挖所处的地层条件, 引入地层主要影响角 β , 认为 $r(z)$ 与 z 呈线性关系, 即 $r(z)=z/\tan\beta$ 。

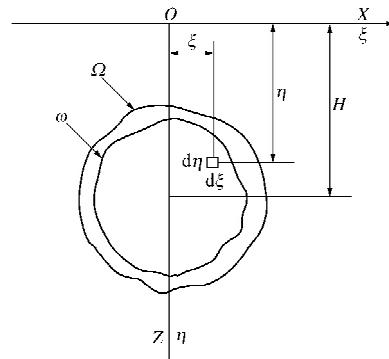


图 1 随机介质理论模型

Fig. 1 Stochastic medium theoretical model

根据叠加原理, 地表下沉 $W(x)$ 为开挖面积 Ω 引起的下沉与开挖面积 ω 引起的地表下沉之差:

$$W(x) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right] d\xi d\eta - \int_a^b \int_c^d \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right] d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad . \quad (2)$$

式中: ξ, η 分别为开挖单元的横、纵坐标; $a-d$ 为变形前隧道断面面积积分界限; $e-h$ 为变形后隧道断面面积积分界限。

其中积分界限 $a-h$ 的确定和隧道开挖后的洞周位移的收敛模式息息相关, 根据 González 等^[10]的研究, 隧道开挖后的断面收敛可以分解为以下三部分: 地层损失导致土体发生径向均匀径向变形 u_g , 即隧道均匀收敛模型; 隧道衬砌在与围岩的相互作用下会产生椭圆化变形 u_{o1} 和 u_{o2} ; 受自重影响产生的整体竖向沉降 u_v 。因此可将上述三者进行叠加后可以简化为隧道断面拱顶、仰拱和水平收敛分别为 u_1, u_2 和 u_3 的非

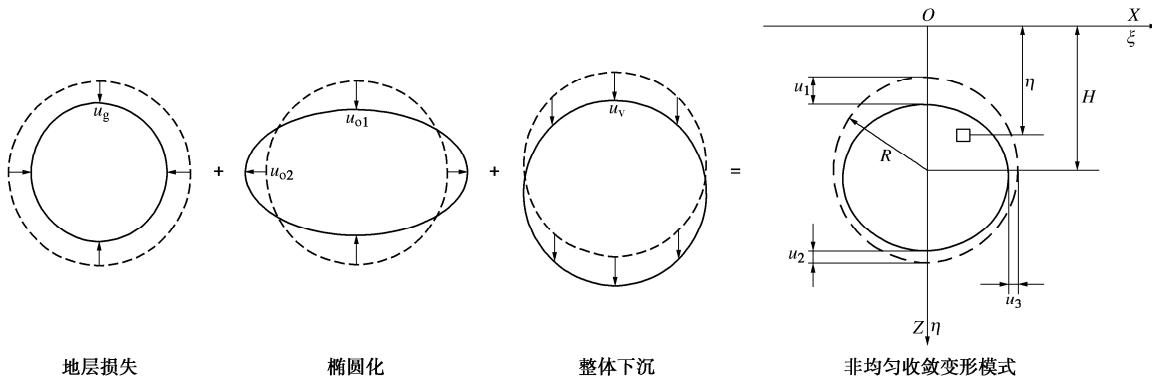


图 2 非均匀收敛计算模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of non-uniform convergence model

表 1 非均匀收敛计算模式下随机介质理论积分界限

Table 1 Integral bounds of non-uniform convergence model of stochastic medium theory

开挖变形前积分界限			开挖变形后积分界限		
<i>a</i>	$H - R$	<i>e</i>			$H + u_v - (R - u_g - u_o) = H - (R - u_1)$
<i>b</i>	$H + R$	<i>f</i>			$H + u_v + (R - u_g - u_o) = H + (R - u_2)$
<i>c</i>	$-\sqrt{R^2 - (\eta - H)^2}$	<i>g</i>	$-(R - u_g + u_o) \sqrt{1 - \left(\frac{\eta - H - u_v}{R - u_g - u_o}\right)^2}$		$-(R - u_3) \sqrt{1 - \left(\frac{\eta - H - (u_1 - u_2)/2}{R - (u_1 + u_2)/2}\right)^2}$
<i>d</i>	$-c$	<i>h</i>		$-g$	

$\frac{\pi(R - u_3) \left(R - \frac{u_1 + u_2}{2} \right) \tan \beta}{H} \exp \left(-\frac{\pi \tan^2 \beta}{H^2} x^2 \right)$
 $= \frac{\pi \left[R \left(u_3 + \frac{u_1 + u_2}{2} \right) - \frac{u_3 (u_1 + u_2)}{2} \right] \tan \beta}{H} \exp \left(-\frac{\pi \tan^2 \beta}{H^2} x^2 \right) \quad (3)$

均匀收敛计算模型, 如图 2 所示。将该非均匀收敛计算模型引入随机介质理论, 以圆形隧道对积分界限进行推导并统计如表 1 所示。

上述分析推导得到的新建隧道施工引起的地表沉降位移计算模型中被积函数皆为不可积函数, 为实现二重积分大多都采用高斯-勒让德积分法(Gauss-Legendre), 但使用该方法求解时由于函数积分区间较为复杂, 导致求解计算量比较大, 在实际工程中不能很好地运用。为此, 本文基于以上非均匀收敛模式对传统随机介质理论解进行简化, 以更好地在实际工程中进行应用。

简化随机介质理论即假设整个隧道开挖界面为一个开挖单元, 将整个隧道开挖断面面积等效为开挖单元 $d\xi d\eta$ ^[11], 结合图 1 及非均匀收敛模式下的积分界限可对地表变形预测模型式(2)作如下简化:

$$\begin{aligned}
 W(x) &= \int_a^b \int_c^d \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta - \\
 &\quad \int_e^f \int_g^h \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \\
 &= \frac{\pi R^2 \tan \beta}{H} \exp \left(-\frac{\pi \tan^2 \beta}{H^2} x^2 \right) -
 \end{aligned}$$

由于断面收敛较隧道半径小的多, 因此式中断面收敛值的乘积项可以忽略, 式(3)可继续简化为

$$W(x) = \frac{\pi R [u_3 + (u_1 + u_2)/2] \tan \beta}{H} \exp \left(-\frac{\pi \tan^2 \beta}{H^2} x^2 \right) \quad (4)$$

1.2 计算任意埋深地层沉降的随机介质理论解

隧道开挖后断面拱顶收敛值 u_1 通常会根据前期现场施工时引起的地表变形进行反演确定^[7-8], 理论上可以参考 Loganathan 等^[12]关于间隙参数 “*g*” 的确定方法, u_2 及 u_3 则按最优经验值^[13]分别取 $u_1/2$, $u_1/4$ 即可, 但上述两种方法需要大量的实测数据或者参数, 计算较为复杂。韩煊^[14]对 Peck 公式与随机介质理论之间的关系进行了研究, 并基于沉降槽宽度 *i* 对不同埋深地层位移规律进行了分析。因此可通过两者计算参数之间的关系降低本文模型参数的获取难度, 同时

建立本文模型与地层埋深之间的关系。

由于随机介质理论中断面半径收缩 ΔR 和 Peck 公式中的地层损失系率 V_l 均以某种形式反映隧道开挖后断面面积的变化情况, 因此二者可通过面积公式进行换算。地层损失率 V_l 为隧道开挖单位长度内地层损失与开挖体积的比值, 与断面半径均匀收缩 ΔR 的关系可表示为

$$V_l = \frac{\pi R^2 - \pi(R - \Delta R)^2}{\pi R^2} , \quad (5)$$

$$\Delta R = R(1 - \sqrt{1 - V_l}) . \quad (6)$$

式中: V_l 为地层损失率; R 为隧道开挖半径; ΔR 为隧道开挖后断面半径的均匀收缩。

Verruijt 等^[15]在 Sagaseta 方法^[16]的基础上, 考虑隧道开挖后地层损失为隧道断面均匀径向收缩 ΔR , 得到了地层竖向位移公式, 但是该方法得到的变形曲线比实测结果要宽, 且侧向变形要偏大。因此, Loganathan 等^[12]考虑隧道断面拱顶为 2 倍 ΔR 的非均匀收敛, 得到了修正的竖向位移公式。与 Verruijt 等^[15]的结果相比较, 他们采用修正后的隧道收敛形式得到的结果更加准确。因此, 本文预测模型中拱顶收敛 u_1 与地层损失率关系为

$$u_1 = 2R(1 - \sqrt{1 - V_l}) , \quad (7)$$

根据 Peck 公式, 有

$$S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{0.313V_lD^2}{i} . \quad (8)$$

式中: S_{\max} 为地表横向沉降槽沉降最大值; V_s 为隧道开挖方向单位长度的沉降槽体积; V_l 为地层损失率; D 为隧道开挖直径; i 为从隧道中心线对应的地面点到沉降曲线拐点处的水平距离, 一般称为“沉降槽宽度”。

联立式(7), (8), 可得隧道开挖断面拱顶收敛值:

$$u_1 = 2R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{iS_{\max}}{0.313D^2}} \right) . \quad (9)$$

同时, 随机介质理论中地层影响角 β 与 Peck 公式中沉降槽宽度 i 之间存在如下关系^[14]:

$$\tan \beta = \frac{z_0}{\sqrt{2\pi i}} , \quad (10)$$

式中, z_0 为隧道中心埋深, 同图 1 中的 H 。

针对沉降槽宽度 i , 文献[14]基于实测数据对 Mair 公式进行了修正:

$$i = K(z_0 - bz) , \quad (11)$$

$$K = 1 - 0.02\phi , \quad (12)$$

式中: K 为沉降槽宽度参数; b 为考虑地层土质情况的参数, 取值范围为 0~1, 黏性土取 0.65, 砂土取 0.5; z 为任意隧道上覆地层的埋深; ϕ 为隧道拱顶以上各层

土的内摩擦角按厚度的加权平均值。

将式(11), (12)代入式(9), (10)和式(4), 即可建立简化随机介质理论与地层埋深的关系, 计算隧道开挖引起的上覆任意埋深处地层的沉降表达式:

$$W(x) = \frac{\sqrt{2\pi}R^2}{i} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{iS_{\max}}{1.252R^2}} \right) \exp \left(-\frac{x^2}{2i^2} \right) , \quad (13)$$

$$i = (1 - 0.02\phi)(z_0 - bz) . \quad (14)$$

2 当层法在下穿隧道施工时的应用

随机介质理论对隧道开挖引起的地层位移进行计算时, 一般假设地层为均质地层, 若新建隧道所在地层存在多层参数变化的土层以及既有隧道, 则不宜近似认为是均质地层。鉴于艾传志等^[17]、欧阳文彪等^[18]以及 Zhou 等^[19]均应用当层法将地表或地下建筑物进行转化处理, 对复杂地层条件下隧道开挖引起的地层沉降进行计算。因此, 本文应用当层法对式(13), (14)进行改进, 以解决非均质地层条件下隧道下穿施工时任意埋深处的地层沉降计算问题。

2.1 既有隧道刚度等效处理

新建隧道下穿既有隧道施工时, 一般既有隧道主要发生弯曲变形, 既有隧道刚度可用结构截面的抗弯刚度表征^[19]。因此, 可考虑将既有空心隧道结构通过横截面的抗弯刚度等效考虑为等厚的实心硬质地层, 如图 3 所示, 矩形及圆形截面隧道等效为同等厚度的实心硬质地层的抗弯刚度等效公式推导如下:

$$E \frac{bh^3 - b'h'^3}{12} = E' \frac{bh^3}{12} , \quad (15)$$

$$E \frac{\pi D^4 - \pi d^4}{64} = E' \frac{D^4}{12} . \quad (16)$$

式中: E 为既有隧道衬砌的弹性模量, 对于复合式衬砌可按衬砌厚度作加权处理; b , h 和 b' , h' 分别为矩形截面隧道外、内轮廓的宽度和高度; d , D 为既有隧道衬砌的内外径, 对于马蹄形隧道, 取衬砌内外轮廓宽度和高度的平均即可; E' 为既有隧道抗弯刚度等效地层后的弹性模量。

2.2 新建隧道下穿既有隧道结构的当层法应用

当层法由巴克洛夫斯基(Покровский)提出, 最早用于处理分层地基中的附加应力计算问题。对于分层地基, 应用当层法可以将弹性参数明显分层的非均匀复合地基等效成均质地基, 从而达到复杂问题求解简单化处理的目的^[20]。

应用当层法需遵循以下假设: ①地层为均质各向同性的半无限空间线弹性体; ②既有隧道长度能覆盖整个新建隧道沉降槽的范围; ③既有隧道与相同埋深的地层变形协调, 不发生脱空。

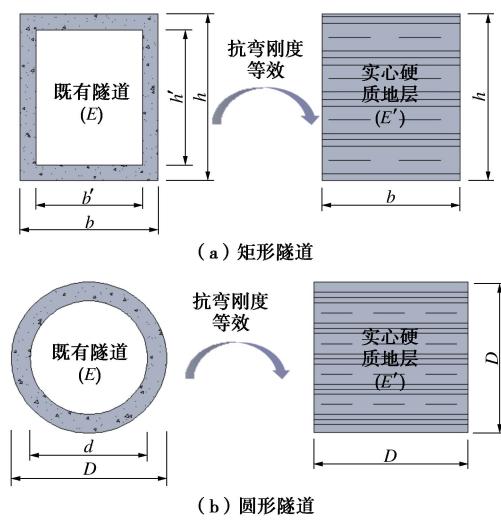


图3 既有隧道抗弯刚度等效示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equating bending stiffness of an existing tunnel

假设两层地基上层地基厚度为 h_1 , 弹性模量为 E_1 , 下地层弹性模量为 E_2 , 可应用当层法将双层地基中第一层土用厚度为 h'_1 、弹性模量为 E_2 的当层地基替换:

$$h'_1 = h_1 (E_1/E_2)^a, \quad (17)$$

式中, a 为当层指数。

现结合图 4 对多层非均质地层条件下新建隧道下穿既有隧道结构当层法的应用进行说明。

如图 4 所示, 假设既有隧道上覆土共 n 层, 厚度 $h_1 \sim h_n$, 弹性模量 $E_1 \sim E_n$; 既有隧道通过抗弯刚度等效后的硬质地层高度为 h_{n+1} , 弹性模量为 E_{n+1} ; 既有隧道下覆土到开挖隧道所在地层共 m 层, 厚度 $h_{n+2} \sim h_{n+m+1}$, 弹性模量 $E_{n+2} \sim E_{n+m+1}$; 开挖隧道所在地层上边界到新建隧道轴线距离 h_{n+m+2} , 地层弹性模量 E_{n+m+2} 。根据当层法原理, 将新建隧道转化的等效硬质地层在内的所有土层进行当层转化, 统一转化为同新建隧道所在地层相同的均质地层, 转化后的均质地层弹性模量均为 E_{n+m+2} , 坐标系为 (X, Z') , 转化后各地层厚度为

$$\left. \begin{aligned} h'_1 &= h_1 \left(\frac{E_1}{E_{n+m+2}} \right)^a, \\ &\dots, \\ h'_{n+1} &= h_{n+1} \left(\frac{E_{n+1}}{E_{n+m+2}} \right)^a, \\ &\dots, \\ h'_{n+m+1} &= h_{n+m+1} \left(\frac{E_{n+m+1}}{E_{n+m+2}} \right)^a. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

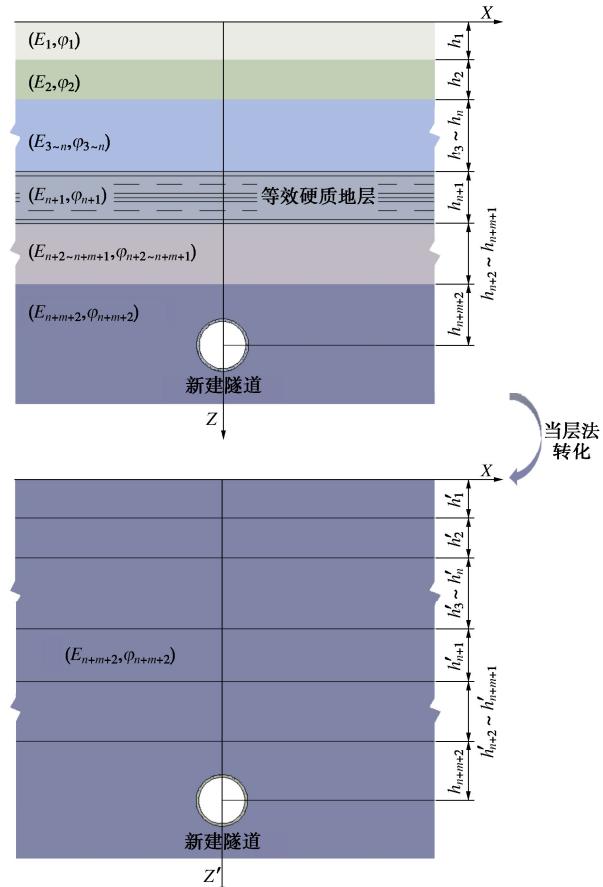


图4 非均质地层当层法应用

Fig. 4 Diagram of equivalent layered method in heterogeneous strata

因此, 若求解既有隧道底板的变形, 只需要将原坐标系下的既有隧道底板埋深 z 转化为 z' , 如式(19)所示, 将 z' 代入式(13), (14)即可, 不同埋深处的地层变形求解同理可推。

$$z' = h'_1 + h'_2 + \dots + h'_{n+1}. \quad (19)$$

此时由既有隧道抗弯刚度等效的硬质地层经当层转化为较软的地层, 弹性模量发生较大改变, 为保证当层转化后求解地层位移的准确性, 需要保持当层转化前后隧道的抗弯刚度不变, 此时当层转换前后的地层相关参数需要满足

$$E_{n+1} \frac{bh_{n+1}^3}{12} = E_{n+m+1} \frac{bh_{n+1}^3}{12}, \quad (20)$$

即

$$h'_{n+1} = h_{n+1} (E_{n+1}/E_{n+m+1})^{1/3}. \quad (21)$$

因此, 本文应用当层法时, 当层指数可按式(21)取为 $1/3$, 同时符合欧阳文彪等^[18]的反分析结果及 Zhou 等^[19]的经验取值, 这也为当层指数的确定提供了理论依据。

3 工程案例应用

本节依托某地铁区间隧道下穿既有隧道工程, 采

用有限元数值模拟对新建隧道开挖引起的既有隧道及不同埋深处的地层变形进行研究, 既有隧道及新建隧道均为典型圆形断面盾构隧道, 新建隧道埋深 18 m, 既有隧道埋深 6 m, 二者相距 6 m, 衬砌外径均为 6 m, 内径 5.4 m, 建立数值计算模型如图 5 所示, 其中地层参数及主要结构参数统计如表 2 所示。

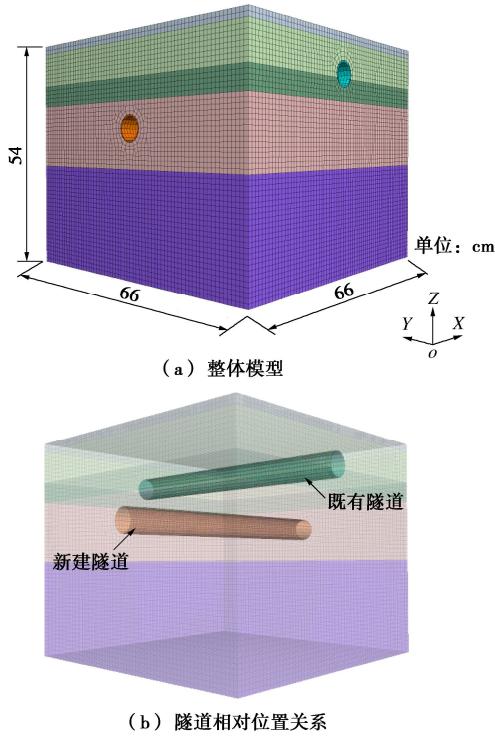


图 5 有限元模型示意图

Fig. 5 Diagram of finite element model

表 2 地层及主要结构材料参数

Table 2 Parameters of soils and structural materials in model

材料名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	弹性模 量/MPa	泊松比
回填土	18.0	15	25	10	0.42
淤泥质粉质 黏土	20.0	20	35	30	0.32
卵石	22.0	40	—	40	0.25
强风化板岩	23.6	33	60	100	0.26
中风化板岩	25.0	38	75	300	0.23
衬砌	26.0	—	—	30000	0.20
注浆参数	20.0	—	—	0.033	0.20

基于以上工程案例, 既有隧道的等效弹性模量按式 (17) 确定为 6.08 GPa, 结合相关地层参数代入式 (18), 计算得该工程案例应用当层法后新建隧道轴线埋深为 35.40 m, 既有隧道底板及顶板埋深分别为 27.2, 3.6 m。将上述参数及相关地层参数代入式 (13), (14), 即可对新建隧道施工引起的既有隧道变形及相关埋深沉降进行预测。实际工程中, 可根据前期的工

程监测得到的相关最大沉降值对相关埋深的沉降值进行预测。

为描述预测模型预测得到的沉降曲线与数值计算结果的相关程度, 采用灰色关联分析法计算关联度用 r_0 表示, 根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密, 即曲线越接近, 相应序列之间关联度就越大, 反之就越小, 其计算方法^[21]如下。

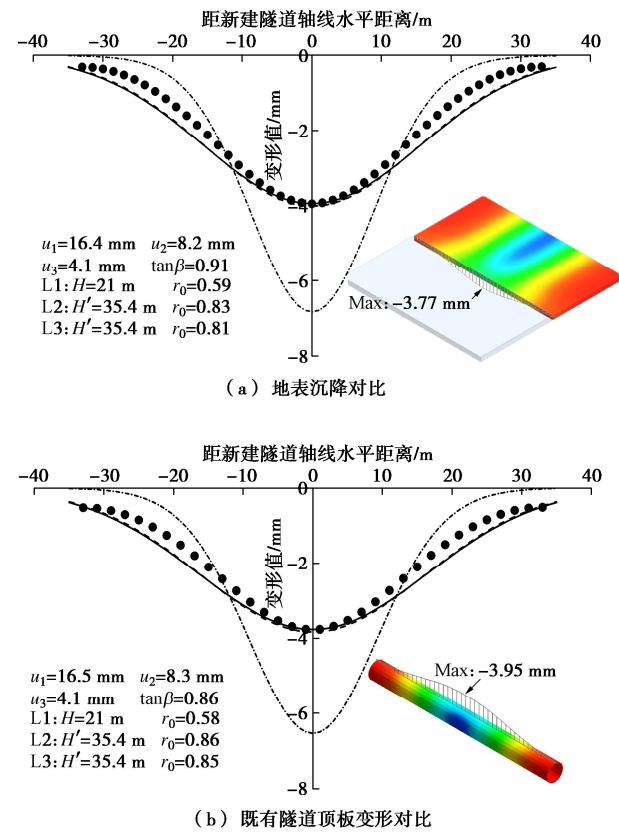
设 $x_0=\{x_0(k)\}(k=1,2,\cdots,n)$ 为参考序列, $x_i=\{x_i(k)\}(k=1,2,3,\cdots,n; i=1,2,3,\cdots,m)$ 为比较序列, 关联系数及关联度定义如下:

$$\lambda_{0i}(k)=\frac{\min_i\left\{\min_k|x_0(k)-x_i(k)|\right\}+\rho \max_i\left\{\max_k|x_0(k)-x_i(k)|\right\}}{|x_0(k)-x_i(k)|+\rho \max_i \max_k|x_0(k)-x_i(k)|}, \quad (22)$$

$$r_{0i}=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_{0i}(k) \quad (23)$$

式中: ρ 为分辨系数, r_{0i} 反映了第 i 列 $x_i(k)$ 与参考序列 $x_0(k)$ 的接近程度, r_{0i} 越大, 表示越接近参考序列, 关联性越好。

为验证本文提出的经当层法改进后的简化随机介质理论对既有隧道和地层变形预测的准确性, 现分别采用传统的随机介质理论、采用当层法改进的传统随机介质理论、采用当层法改进的简化随机介质理论对依托工程的地表、既有隧道顶板及底板的变形进行预测, 并与数值计算结果一同绘制如图 6 所示。



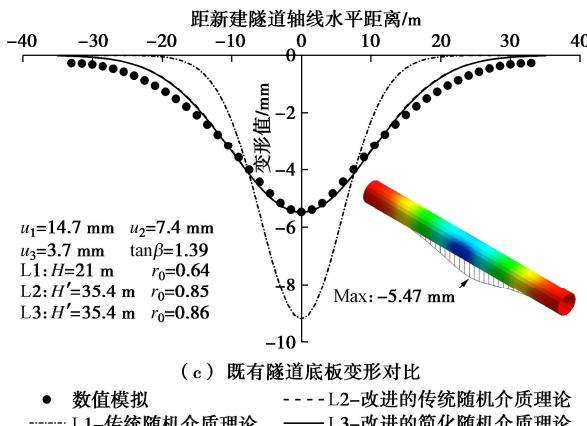
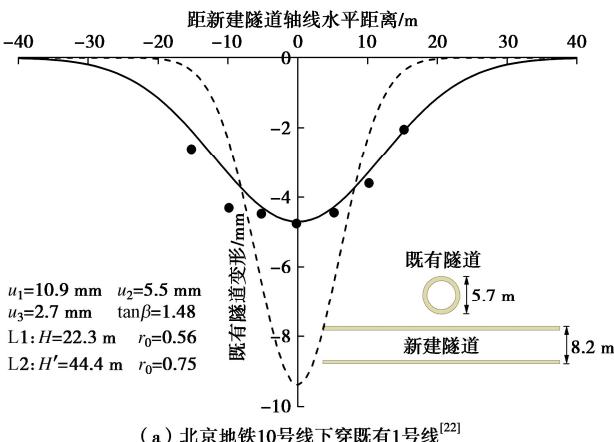
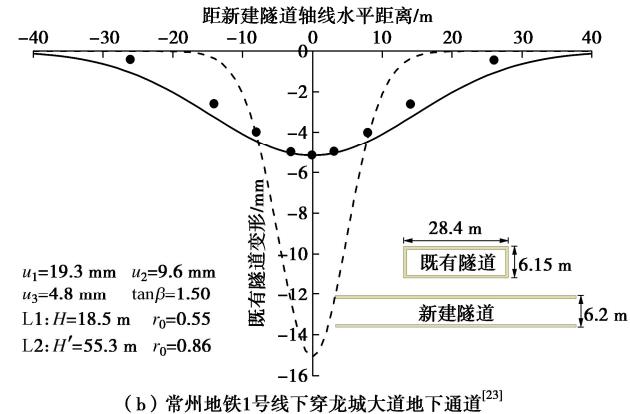


图 6 理论预测与数值计算结果对比

Fig. 6 Comparison between theoretical predictions and numerical results

通过对图 6 进行分析可知, 不同位置的地层变形相似, 传统随机介质理论(L1)预测的地表沉降槽“窄而深”, 而改进后的随机介质理论模型(L2、L3)预测的沉降曲线均“宽而浅”, 与数值模拟结果更接近, 更符合实际地层变形规律, 这主要是由于既有隧道的存在导致的, 较大的结构刚度对下方隧道开挖引起的地层变形有一定的协调、约束和屏蔽作用。另一方面, 在既有隧道上方地表、顶板及底板处, 传统随机介质理论的预测沉降曲线(L1)的关联度分别为 0.58, 0.59, 0.64, 而改进后的随机介质理论预测曲线(L2、L3)关联度均大于 0.8, 相比之下明显更接近数值模拟的结果。且简化模型的预测曲线(L2)与未简化模型预测沉降曲线(L3)的关联度误差均小于 3%, 甚至底板处要大于未简化模型的预测曲线关联度, 与计算结果更为吻合, 可见简化模型不仅能够降低计算难度, 还能够保证较高的计算精度。

为进一步验证本文预测模型的适用性及准确性, 现对相关工程现场实测数据进行调研, 并采用传统随机介质理论以及本文应用当层法改进后的简化随机介质理论预测模型对典型调研工程中既有隧道的变形进行预测对比如图 7 所示。

(a) 北京地铁10号线下穿既有1号线^[22]

• 现场实测 - - - L1-传统随机介质理论 —— L2-本文预测模型

图 7 理论预测与现场实测结果对比

Fig. 7 Comparison between theoretical predictions and measured results

通过对图 7 进行分析可知, 同前述分析一样, 本文预测模型的预测结果(L2)明显更接近实测既有隧道的变形结果, 本文预测模型明显提高了对既有隧道变形预测的准确性, 且对不同断面形状的既有隧道变形均能够保持较高的预测精度, 与现场实测的隧道变形的关联度均在 0.75 以上, 进一步验证了本文考虑既有隧道影响的预测模型的适用性和准确性。

4 结 论

本文基于断面非均匀收敛和 Peck 公式与随机介质理论关键计算参数之间的关系, 应用当层法对传统随机介质理论进行了改进, 提出了非均质地层条件下隧道下穿施工引起的既有隧道及地层变形的预测模型, 并结合相关典型工程进行了验证, 得出以下 4 点结论。

(1) 基于不同变形模式叠加的非均匀收敛模式对随机介质理论进行简化, 并结合与 Peck 公式计算参数之间的关系, 建立了随机介质理论计算参数与地层埋深的关系, 推导了计算任意埋深地层变形的简化随机介质理论解。

(2) 基于既有隧道抗弯刚度等效的思路, 将既有隧道等效成硬质地层, 并应用当层法考虑既有隧道的刚度对下穿隧道施工引起的地层变形的影响, 同时对当层指数 a 进行了解答, 提出了非均质地层条件下隧道下穿施工引起的不同埋深地层变形预测模型。

(3) 结合数值模拟及不同预测模型对依托工程的地表、既有隧道顶板及底板的变形进行研究, 传统随机介质理论预测变形曲线呈“窄而深”, 而改进后的随机介质理论模型预测的沉降曲线呈“宽而浅”, 与数值模拟结果基本吻合。

(4) 结合本文预测模型与现场实测结果进行对

比, 本文预测模型明显更接近于实测隧道变形结果, 且对不同断面形状的既有隧道均保持良好的适用性。

参考文献:

- [1] 张治国, 张成平, 奚晓广. 双线隧道不同布置方式下相互作用影响的地层位移解析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 262-271. (ZHANG Zhiguo, ZHANG Chengping, XI Xiaoguang. Closed solutions to soil displacements induced by twin-tunnel excavation under different layout patterns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 262-271. (in Chinese))
- [2] 陈仁朋, 曾巍, 吴怀娜, 等. 盾构隧道下穿引起砌体结构建筑沉降损伤实例研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(12): 2301-2307. (CHEN Renpeng, ZENG Wei, WU Huaina, et al. Case study of tunneling-induced settlement and damage of masonry buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(12): 2301-2307. (in Chinese))
- [3] 刘国琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965. (LIU Baochen, LIAO Guohua. Basic law of coal mine surface movement[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1965. (in Chinese))
- [4] 韩煊, 李宁. 隧道开挖不均匀收敛引起地层位移的预测模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 347-352. (HAN Xuan, LI Ning. A predicting model for ground movement induced by non-uniform convergence of tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 347-352. (in Chinese))
- [5] CAI H B, LIU Z, LI S, et al. Improved analytical prediction of ground frost heave during tunnel construction using artificial ground freezing technique[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **92**: 103050.
- [6] 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/OL]. 岩土工程学报, 2022: 1-10. (2022-06-20). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220616.1831.008.html>. (QI Yongjie, ZHU Jiancai, ZHOU Jian, et al. Prediction of surface displacement caused by shield construction in soil-rock composite stratum[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022: 1-10. (2022-06-20).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220616.1831.008.html>. (in Chinese))
- [7] 刘波, 杨伟红, 张功, 等. 基于隧道不均匀变形的地表沉降随机介质理论预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(8): 1943-1952. (LIU Bo, YANG Weihong, ZHANG Gong, et al. A prediction model based on stochastic medium theory for ground surface settlement induced by non-uniform tunnel deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(8): 1943-1952. (in Chinese))
- [8] 伍振志. 基于非均匀收敛模式的隧道地表变形的随机介质预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(5): 2005-2010. (WU Zhenzhi. Stochastic medium predicting model of ground movement tunneling based on non-uniform convergence mode[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(5): 2005-2010. (in Chinese))
- [9] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (YANG Junsheng, LIU Baochen. Ground Movement and Deformation Caused by Urban Tunnel Construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [10] GONZÁLEZ C, SAGASETA C. Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(6/7): 445-468.
- [11] YANG X L, WANG J M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**(3): 462-471.
- [12] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(9): 846-856.
- [13] 童磊, 谢康和, 程永锋, 等. 考虑椭圆化地层变形影响的浅埋隧道弹性解[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 393-398. (TONG Lei, XIE Kanghe, CHENG Yongfeng, et al. Elastic solution of shallow tunnels in clays considering oval deformation of ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 393-398. (in Chinese))
- [14] 韩煊. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (HAN Xuan. The Analysis and Prediction of Tunnelling-Induced Building Deformations[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [15] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1996, **46**(4): 753-756.
- [16] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Géotechnique, 1987, **37**(3): 301-320.

[17] 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))

[18] 欧阳文彪, 丁文其, 谢东武. 考虑建筑刚度的盾构施工引起沉降计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 155-160. (OUYANG Wenbiao, DING Wenqi, XIE Dongwu. Calculation method for settlement due to shield tunnelling considering structure stiffness[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 155-160. (in Chinese))

[19] ZHOU Z, CHEN Y, LIU Z Z, et al. Theoretical prediction model for deformations caused by construction of new tunnels undercrossing existing tunnels based on the equivalent layered method[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103565.

[20] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GONG Xiaonan. Soil Mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))

[21] 雷华阳, 刘 旭, 施福硕, 等. 顶管工程聚合物改性膨润土泥浆配比优化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊2): 51-55. (LEI Huayang, LIU Xu, SHI Fushuo, et al. Proportional optimization of polymer-modified bentonite slurry in pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 51-55. (in Chinese))

[22] 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))

[23] 韩文君, 严红霞, 欧建军. 富水地层盾构下穿城市快速路隧道影响分析[J]. 常州工学院学报, 2020, 33(6): 9-13. (HAN Wenjun, YAN Hongxia, OU Jianjun. An analysis of the impact of shield tunnel on silt strata under urban expressway tunnel[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2020, 33(6): 9-13. (in Chinese))

第十八届全国岩石动力学学术会议暨高端学术论坛第一号（征文）通知

中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会拟定于2023年9月在重庆市召开“第十八届全国岩石动力学学术会议暨高端学术论坛”，欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃赐稿并积极参加会议。现将有关事项通知如下：

会议主题：岩石动力学与能源开发工程

会议内容：岩石动力学专委会会议；岩石动力学学术会议。

会议专题：岩石动态力学性质与本构关系；岩体中应力波传播与衰减规律；岩石动力特性测试技术与方法；岩石动态特性数值模拟与仿真；油气开发岩石力学理论与方法；爆炸及动载破岩的理论与技术；岩爆与冲击地压的机理及防控；矿震、煤与瓦斯突出灾变机制；山区岩石工程安全与防灾减灾；其他与岩石动力学相关的研究。

会议重要时间节点：2023年1月30日发第一号通知；2023年5月31日论文全文投稿截止；2023年6月20日论文修改通知；2023年6月30日发第二号通知；2023年7月20日提交论文修改稿截止；2023年8月20日发会议报到通知。

论文电子版发送到 rockdynamics18@163.com，抄送

lxhuang@whrsm.ac.cn, 请注明岩石动力学大会征文。会议具体地址与时间详见第二号通知。

会议论文与出版：本届全国岩石动力学学术会议论文征稿截止日为2023年5月31日。论文经评审合格将择优刊登在《岩石力学与工程学报》《岩土力学》《地下空间与工程学报》等期刊，其他论文刊登在《重庆科技学院学报（自然科学版）》出版的论文集。论文格式与要求见期刊网站征稿启示。

<http://rockmech.whrsm.ac.cn/>

<http://ytlx.whrsm.ac.cn/>

<http://dxkjxb.cqu.edu.cn/>

<http://xbbjb.cqust.edu.cn/>

本次学术会议按惯例仍对优秀论文进行评奖。

主办单位：中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会；重庆科技学院。

会议联系人与方式：联系人一：赵宝云，电话：13883352946, E-mail: rockdynamics18@163.com, 邮编：401331, 地址：重庆市沙坪坝区大学城东路20号。

（会议组委会）