

文章编号: 1000-4750(2020)09-0084-10

圆形隧道横断面地震响应简化 解析方法的数值验证

赵 密¹, 邵伟昂¹, 黄景琦², 杜修力¹, 王 媛²

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 简化解析方法因在隧道初步设计中可快速估算隧道结构的地震内力及变形而得到广泛应用, 因此对简化解析方法的使用条件及精度进行评价具有重要的工程意义。该文以时域波动有限元方法的数值模拟结果为标准, 对 Wang、Bobet 和 Park 等 3 种经典的简化解析方法在不同场地土类别及不同埋深条件下的精度进行了对比验证。结果表明: 三种简化解析方法具有相同的轴力预测值, 埋深较小时解析解与数值解的误差随着柔度比的增加而逐渐减小, 但埋深较大时解析解与数值解的误差随着柔度比的增加先增加后减小; Bobet 与 Park 方法的预测弯矩相同且精度明显优于 Wang 的方法, 其精度随着柔度比的增加而具有逐渐变好的趋势; 对于软弱土、中软土、中硬土、坚硬土和岩石等五种类别的场地土, 隧道埋深分别大于 10 m、5 m、5 m、1 m 和 1 m 时, Bobet 与 Park 方法的轴力与弯矩误差均能小于 15%。

关键词: 圆形隧道; 抗震设计; 简化解析方法; 时域波动有限元; 数值验证

中图分类号: TU452 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.10.0593

NUMERICAL VALIDATION OF SIMPLIFIED ANALYTICAL METHOD FOR SEISMIC RESPONSE OF CIRCULAR TUNNELS

ZHAO Mi¹, SHAO Wei-ang¹, HUANG Jing-qi², DU Xiu-li¹, WANG Yuan²

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To provide a quick and easy calculation for the seismic design loads of tunnel lining, the simplified analytical solutions are widely employed in preliminary tunnel design. So it is very important to assess the accuracy and applicability of these analytical solutions. In this study, the time-domain finite element method is adopted to verify the accuracy of four simplified analytical solutions for different types of surrounding soil or rock and different tunnel depths. Through the numerical validation, it can be concluded that: the analytical solutions by Wang, Bobet and Park generate the same thrusts; with the increasing of flexibility ratio, the error decreases for shallow tunnels, and decreases first and then increases for deep tunnels; the Bobet's and Park's solutions generate the same bending moments, more accurate than Wang's solution; the error of Bobet's and Park's solutions decreases with the increasing of flexibility ratio; the errors of Bobet's and Park's solutions are lower than 15% for tunnel's internal forces when the tunnel depth is over 10 m, 5 m, 5 m, 1 m and 1 m, respectively for soft soil, medium soft soil, medium hard soil, hard soil or soft rock and hard rock.

收稿日期: 2019-10-12; 修改日期: 2019-12-24

基金项目: 国家 973 项目(2015CB057902); 国家自然科学基金项目(51678015, 51608015);
中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-17-074A1)

通讯作者: 黄景琦(1988—), 男, 安徽人, 讲师, 博士, 主要从事岩体隧道等地下结构抗震性能研究 (E-mail: huangjingqi11@163.com).

作者简介: 赵 密(1980—), 男, 吉林人, 教授, 博士, 主要从事重大工程抗震研究 (E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn);

邵伟昂(1994—), 男, 北京人, 硕士生, 主要从事岩体隧道等地下结构抗震性能研究 (E-mail: shaoweiang@emails.bjut.edu.cn);

杜修力(1963—), 男, 四川人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事地震工程学研究 (E-mail: duxili@bjut.edu.cn);

王 媛(1969—), 女, 江苏人, 教授, 博士, 主要从事岩土渗流及岩土工程数值分析方面的研究工作

(E-mail: wangyuanhu@163.com).

Key words: circular tunnels; seismic design; simplified analytical solutions; time-domain finite element method; numerical validation

隧道作为我国山区的生命线工程,在国家基础设施建设中占有重要作用。由于隧道埋置于土体或岩体介质中,相较于地上结构,以往的研究者认为隧道结构具有较好的抗震性能。但在近几年几次大地震中,如 Kobe(1995)、Chichi(1999)和 Wenchuan(2008) 等地震,很多的隧道结构遭受严重破坏,造成了大量的人员伤亡及财产损失^[1-3]。因此,在隧道结构安全性设计中除需考虑周围岩土体的静力荷载外,还需考虑地震带来的附加地震荷载。对隧道设计者而言,简单有效的隧道内力及变形计算方法对隧道抗震设计尤为重要^[4-5]。

目前隧道抗震设计主要有以下三种方法:数值分析方法、模型试验方法和简化解析方法。数值分析方法包括动力时程分析方法^[6-7]及拟静力简化分析方法(如整体式反应位移法^[8]、Pushover 分析方法^[9]等),其优点为可考虑众多复杂条件,但对设计者的数值计算理论和软件操作能力要求较高;模型试验^[10]通过相似比设计可很好的反应真实情况,但周期长、费用高,较难在实际工程设计中大规模采用;相较于前两种方法,简化解析方法由于能够给出隧道地震内力及变形的计算公式,可快速对隧道地震反应进行计算,因此在隧道结构的初步设计中得到广泛应用。Hoeg^[11]提出了地震荷载作用下圆形隧道轴力、弯矩和位移的解析解;Einstein 等^[12]推导了无穷远处剪应力作用下圆形地下结构的应力和变形;Wang^[13]考虑了土-结构相互作用,分别给出了圆形和矩形地下结构的内力求解公式;Penzien^[14]基于梁单元假设,提出了一种矩形隧道和圆形隧道内力及变形的解析方法;Bobet^[15-16]考虑隧道处于饱和沉积物中并受到快速加载的地震荷载,分别针对排水与不排水条件推导了圆形隧道内力的计算公式。另外, Park 等^[17]通过引入接触刚度系数,推导了能够考虑土体与地下结构不同接触条件下的静力解析解。

由于能够简便快捷的计算隧道衬砌的抗震设计内力,简化的解析方法常在初步设计中被用于估算隧道的内力与变形。然而上述各简化解析方法的求解公式并不完全相同,不同解析方法对隧道内力与变形的计算结果甚至出现相差较大的情

况。因此,需对此类简化解析公式的准确性进行必要的对比验证。Hashash 等^[18]指出在土体与结构接触完全滑动的情况下, Wang 和 Penzien 的方法计算结果一致,而当土体与结构处于完全绑定的情况下, Wang 的计算结果明显高于 Penzien 的计算结果;Sedarat 等^[19]在无滑移条件下通过将 Wang 和 Penzien 的解析解与拟静力有限元的数值结果进行对比,得出 Penzien 的解析解严重低估了隧道轴力;Kontoe 等^[20]同样通过拟静力有限元数值模拟,考虑不同的接触状态及不同的土-结构相对刚度,对 Wang、Penzien、Bobet 和 Park 等四种方法进行了较为系统的验证。在国内,晏启祥等^[21]、宾佳^[22]对简化解析方法也进行了相关的验证。上述验证工作通常采用拟静力有限元模型对简化解析方法进行数值验证,将地震荷载等效为均匀的剪应变或剪应力,并忽略结构惯性效应及隧道对地震波的散射作用。而实际地震作用下的隧道结构响应为一种动力响应过程,需考虑地震传播的时空效应、结构的惯性效应及散射场作用^[23-24]。另外,简化解析方法假定结构埋置于无限岩土体中,未考虑实际工程中地表对浅埋结构的影响。因此,采用理论上相对较为完备的近场波动有限元方法,开展不同场地土类别及不同埋深下简化解析方法对隧道内力预测精度的验证,给出简化解析方法的适用条件及计算精度具有重要的工程意义。

本文采用近场波动有限元方法对隧道地震响应进行模拟求解。其中,以黏弹性人工边界条件模拟无限域的辐射阻尼效应,以等效节点力方法模拟地震动的波动输入。最终,以数值模拟结果为标准解,对 Wang、Bobet 和 Park 等 3 种经典简化解析方法在不同的场地土类别及不同埋深下的精度及适用条件进行研究。

1 圆形隧道横断面地震响应简化解析方法

当圆形隧道横断面受竖向入射剪切波作用时,简化解析方法通常假设隧道-围岩土系统的周边远场地层处于纯剪状态,如图 1(a) 所示。圆形隧道此时的变形为一种椭圆形的剪切变形,如图 1(b)

所示。此时隧道内力取决于远场剪应力的大小及围岩土-结构的相对刚度。为描述围岩土与结构之间的相对刚度, Wang^[13] 通过采用压缩比 C 和柔度比 F 两个参数对隧道结构与周围围岩土介质的相对刚度进行量化。隧道衬砌的内力与变形是压缩比 C 和柔度比 F 的函数。压缩比 C 和柔度比 F 的表达式为:

$$\begin{cases} C = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r}{E_l t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)} \\ F = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r^3}{6E_l I(1+\nu_m)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 下标 m 和 l 分别代表围岩土和隧道衬砌; E 和 ν 分别表示介质的弹性模量与泊松比; r 和 t 分别表示隧道半径及衬砌厚度; I 为隧道衬砌的截面惯性矩。

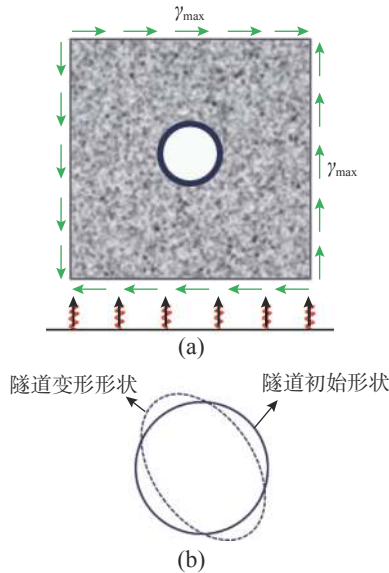


图 1 简化解析方法的分析模型

Fig. 1 Analytical model of simplified analytical method

对于围岩土与结构的接触条件, 简化解析方法中往往假定为完全无滑移和全滑移两种接触条件, 且两种接触条件预测内力的结果往往差异较大^[20]。实际工程中围岩土介质与隧道衬砌接触面较为粗糙, 不可能处于完全滑移状态, 因此全滑移接触的假设与实际情况差距较大。杜修力等^[25] 研究表明在小震情况下接触面粗糙程度对地下结构横断面地震响应影响并不显著, 因此本文仅讨论无滑移条件下简化解析方法的精度。

1.1 Wang 的解析解

Wang^[13] 给出了在完全滑移状态及无滑移状态

下圆形隧道横截面轴向力 T 、弯矩 M 的计算公式。具体表达式如下:

a) Full-slip (全滑移条件)

$$T = -\frac{1}{6}K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r \gamma_{\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (2)$$

$$M = -\frac{1}{6}K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r^2 \gamma_{\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (3)$$

式中: $\gamma_{\max}$ 为隧道周围场地的峰值剪应变; θ 表示圆形隧道衬砌的角位置; 参数 K_1 为:

$$K_1 = \frac{12(1-\nu_m)}{2F+5-6\nu_m} \quad (4)$$

b) No-slip (无滑移条件)

$$T = -K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} r \gamma_{\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (5)$$

式中, 参数 K_2 为:

$$K_2 = 1 +$$

$$\frac{F(1-2\nu_m)(1-C) - 0.5(1-2\nu_m)^2 C + 2}{F[(3-2\nu_m)+(1-2\nu_m)C] + C(2.5-8\nu_m+6\nu_m^2)+6-8\nu_m} \quad (6)$$

在无滑移条件下, Wang 未给出弯矩的公式, 但建议可采用全滑移下的弯矩公式进行求解。

1.2 Bobet 的解析解

Bobet^[15-16] 将隧道衬砌作为壳体进行分析, 考虑完全排水及完全不排水情况, 推导了隧道衬砌在完全滑移及无滑移下的内力公式。在干燥条件下, 轴力 T 、弯矩 M 可以表示为:

a) Full-slip (全滑移条件)

$$T = -\frac{12(1-\nu_m)}{3(5-6\nu_m)+(1-\nu_m)F'} \tau r \sin 2\theta \quad (7)$$

$$M = T r \quad (8)$$

式中: τ 为隧道周围场地的峰值剪应力; 参数 C_1 、 C_2 与 F' 为:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{3-(1-\nu_m)F'}{3(5-6\nu_m)+(1-\nu_m)F'} \\ C_2 = -\frac{3(1-2\nu_m)F'+(1-\nu_m)}{3(5-6\nu_m)+(1-\nu_m)F'} \\ F' = \frac{E_m r^3(1-\nu_l^2)}{E_l I_l(1-\nu_m^2)} \end{cases} \quad (9)$$

b) No-slip (无滑移条件)

$$T = -(1-C_3) \tau r \sin 2\theta \quad (10)$$

$$M = -\frac{1}{2}(1+C_3+C_4) \tau r^2 \sin 2\theta \quad (11)$$

式中, 参数 C_3 、 C_4 为:

$$\begin{cases} C_3 = \frac{(1-\nu_m)C' - 2 - C_1[(1-\nu_m)C' + 4\nu_m]}{3[(1-\nu_m)C' + 2]} \\ C_4 = -2 \frac{(1-\nu_m)^2 C' + (1-\nu_m) - [(1-\nu_m)C' + 4] \frac{3}{F'}}{(1-\nu_m)^2 C' + (1-\nu_m)(3-2\nu_m) + [(1-\nu_m)(5-6\nu_m)C' + 4(3-4\nu_m)] \frac{3}{F'}} \end{cases} \quad (12)$$

1.3 Park 的解析解

为考虑隧道衬砌与围岩土介质直接接触面粘结强度的影响, Park^[17] 采用接触系数 D 表示结构-围岩土之间的接触状态。 $D=0$ 和 $D=\infty$ 表示无滑移和全滑移两种极端条件。Park 解析解中轴力 T 与弯矩 M 的求解公式为:

$$T = \frac{-(1-\nu_m)E_m\gamma_{\max}r}{(1+\nu_m)A''} \{2F + (1-2\nu_m)C + 4 + \frac{4E_mD}{r(1+\nu_m)}\} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (13)$$

$$M = \frac{-(1-\nu_m)E_m\gamma_{\max}r^2}{(1+\nu_m)A''} \{2 + (1-2\nu_m)C + \frac{4E_mD}{r(1+\nu_m)}\} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (14)$$

其中, 参数 A'' 表达式为:

$$A'' = CF(1-2\nu_m) + F(3-2\nu_m) + C(2.5-8\nu_m + 6\nu_m^2) + 6-8\nu_m + 2D \frac{(2F+5-6\nu_m)E_m}{r(1+\nu_m)} \quad (15)$$

2 近场时域波动有限元方法

在近场时域波动有限元方法中, 通常在模型截断边界处设置人工边界条件来模拟无限域的辐射阻尼效应。相对于黏性边界^[26]与透射边界^[27-28], 黏弹性边界^[29-30]能够较好地模拟无限域地基的弹性恢复性能和辐射阻尼效应, 且在有限元软件中方便实现。另外, 地震动作为外源荷载通常采用等效节点力的方法进行施加^[31-32]。因此, 考虑人工边界条件的近场时域波动有限元的控制方程可写为^[24]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{II} & \mathbf{M}_{IB} \\ \mathbf{M}_{IB} & \mathbf{M}_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_I \\ \ddot{\mathbf{U}}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{II} & \mathbf{C}_{IB} \\ \mathbf{C}_{IB}^T & \mathbf{C}_{BB} + \mathbf{C}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_I \\ \dot{\mathbf{U}}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{II} & \mathbf{K}_{IB} \\ \mathbf{K}_{IB}^T & \mathbf{K}_{BB} + \mathbf{K}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_I \\ \mathbf{U}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_I \\ \mathbf{F}_B \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: 下标 I 和 B 分别表示内部节点和人工边界节点; $\mathbf{U}$ 、 $\dot{\mathbf{U}}$ 和 $\ddot{\mathbf{U}}$ 分别为位移、速度和加速度; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩

阵; $\mathbf{F}_B$ 为截断边界节点上的地震荷载向量; $\mathbf{F}_I$ 为内部节点上的荷载向量。子矩阵 $\mathbf{C}_B$ 和 $\mathbf{K}_B$ 为黏弹性人工边界的对角矩阵。对于人工边界上的特定节点 l , 对角矩阵 $[\mathbf{C}_B]_l$ 和 $[\mathbf{K}_B]_l$ 的对角项为黏弹性人工边界的弹簧-阻尼元件参数, 其表达式为^[29]:

$$\begin{cases} K_N = A_l \cdot \frac{1}{1+A} \frac{\lambda+2G}{R} \\ C_N = A_l \cdot B\rho c_p \\ K_T = A_l \cdot \frac{1}{1+A} \frac{G}{R} \\ C_T = A_l \cdot B\rho c_s \end{cases} \quad (17)$$

式中: 下标 N 和 T 分别表示截断边界的法线和切线方向; R 为波源与人工边界节点 l 之间的距离; λ 、 G 和 ρ 分别表示场地介质的 Lamé 常数、剪切模量和密度; c_s 为剪切波速, c_p 为压缩波速; A_l 是包含边界节点 l 的所有单元的截断边界面积; A 和 B 分别为修正系数, 其建议的取值为 0.8 和 1.1^[29]。

地震作用下节点 l 的边界节点力 $[\mathbf{F}_B]_l$ 为:

$$[\mathbf{F}_B]_l = A_l \sigma_1^f + \mathbf{K}_l \mathbf{U}_1^f + \mathbf{C}_l \dot{\mathbf{U}}_1^f \quad (18)$$

式中, $\mathbf{U}_1^f$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_1^f$ 和 σ_1^f 分别表示入射地震波引起边界结点 l 上的位移、速度和应力。

3 简化解析方法的数值验证

3.1 时域波动有限元分析模型建立

采用通用有限元程序 ABAQUS^[33], 建立圆形隧道横断面的二维有限元分析模型, 如图 2 所示, 模型宽度为 120 m。为讨论隧道埋深的影响, 隧道拱顶至地表的距离 H 分别设定为 1 m、3 m、5 m、7 m、10 m、17 m、27 m、37 m、47 m、57 m、67 m 和 77 m。隧道衬砌外半径为 3 m, 衬砌厚度为 0.3 m。在模型底部和两侧施加黏弹性人工边界条件来模拟无限域的辐射阻尼效应。具体方法为在人工边界面所有单元节点上, 分别在法向和切向上施加并联的弹簧单元与阻尼单元。弹簧单元与阻尼单元的参数通过式 (17) 进行求解。围岩土体介质及隧道衬砌均采用平面应变单元模拟。围

岩土体介质与隧道衬砌的接触面采用完全绑定约束以模拟无滑移接触条件。

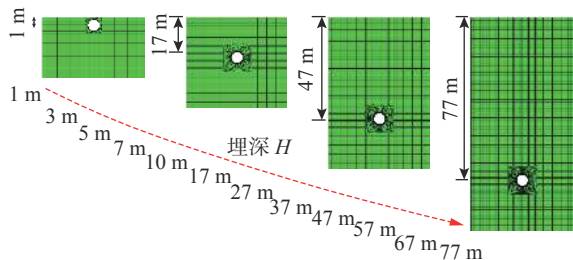


图2 计算模型

Fig. 2 Computation model

岩土体和隧道衬砌均采用线弹性本构模型，隧道衬砌密度为 2500 kg/m^3 ，泊松比为 0.2，弹性模量为 24.8 GPa。假定结构周围场地为均匀、各向同性介质。为研究场地中不同岩土体类别对简化解析方法精度的影响，参考《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909—2014)^[34]，选取软弱土、中软土、中硬土、坚硬土或软岩和岩石等五种类别的岩土体，场地密度为 2500 kg/m^3 ，泊松比为 0.25，每种岩土体类型选取 2 组参数。岩土体介质的弹性模量、剪切波速及相应的柔度比见表 1 所示。

表 1 场地岩土体参数
Table 1 Parameters of surrounding ground

场地土类别	弹性模量 E_m/MPa	剪切波速 $c_s/(\text{m/s})$	柔度比 F
软弱土($c_s \leq 150 \text{ m/s}$)	16.1	51	1.0
	35.8	76	2.2
中软土($150 \text{ m/s} < c_s \leq 250 \text{ m/s}$)	195.0	177	12.1
	350.5	237	21.7
中硬土($250 \text{ m/s} < c_s \leq 500 \text{ m/s}$)	650.0	322	40.3
	1120.0	423	69.4
坚硬土或软岩($500 \text{ m/s} < c_s \leq 800 \text{ m/s}$)	2240.0	599	138.7
	3000.0	693	185.8
岩石($800 \text{ m/s} < c_s$)	7000.0	1058	433.5
	12000.0	1386	743.2

输入地震动为 1995 年日本阪神地震中的 Kobe 波，其加速度时程曲线见图 3 所示。截取能反映 Kobe 波地震特性的前 20 s 进行输入，加速度峰值 6.114 m/s^2 。地震波作为剪切波从模型底部开始输入，传播方向沿竖向垂直传播。

3.2 简化解析方法的精度验证

3.2.1 隧道轴力 $T_{\max}$

图 4 给出了不同埋深及不同柔度比下隧道峰值轴力的数值模拟结果与各简化解析方法的计算

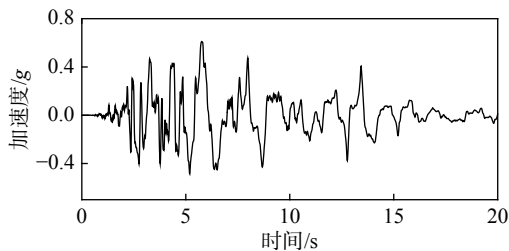


图3 输入的 Kobe 波加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time-history of the incident Kobe waves

结果。从图 4 中的数值解可以看出，随着柔度比增加，即随着场地岩土体逐渐变硬，隧道轴力具有先增加后减小的规律。

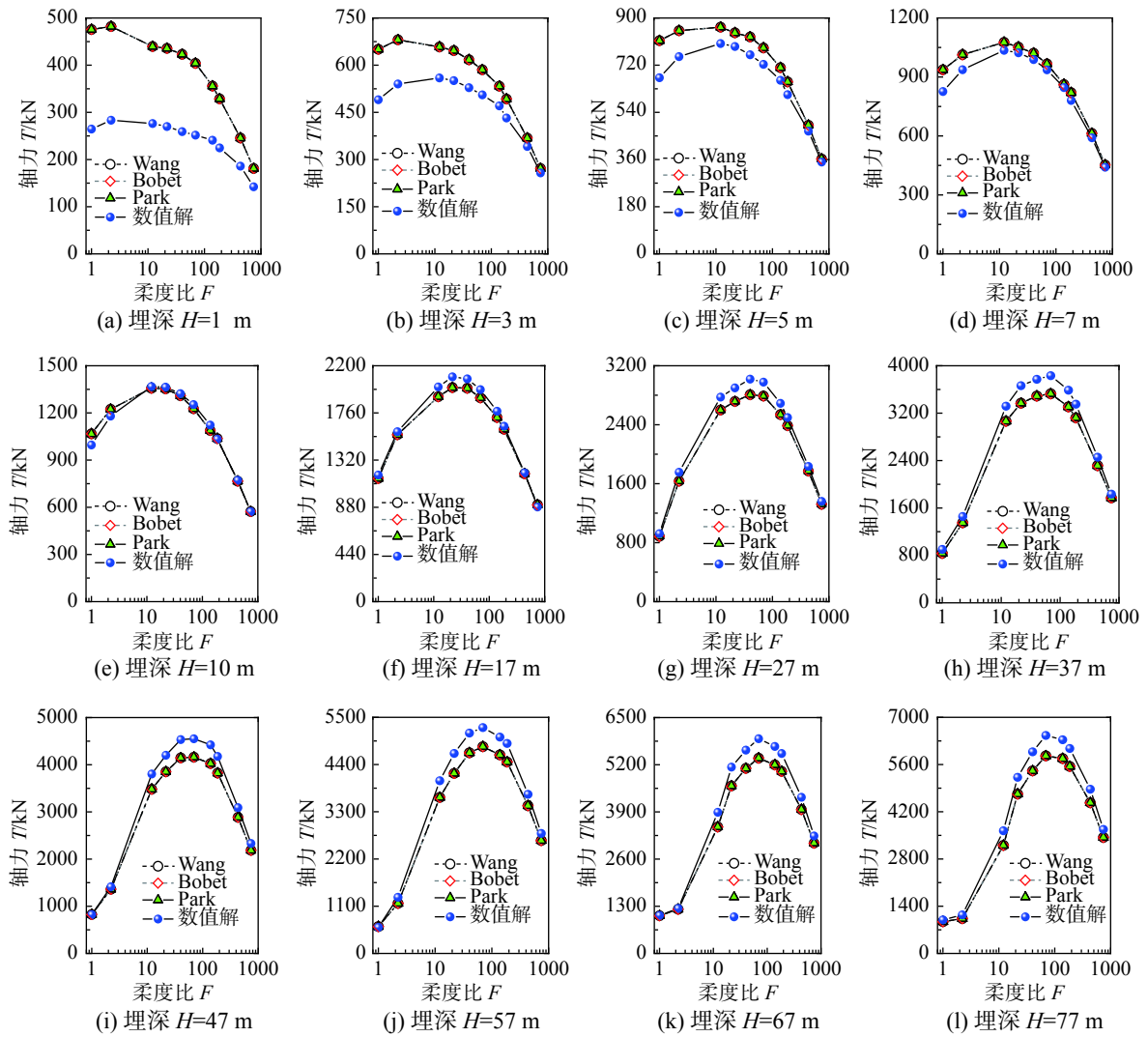
三种简化解析方法具有相同的轴力预测值，且预测结果与数值模拟结果具有相同的变化趋势。对比数值结果与三种解析结果可以看出，在埋深较浅情况下 (即 $H \leq 10 \text{ m}$)，小柔度比下的解析解与数值解差距较大，解析解严重高估了隧道轴力，但随着柔度比的增加，解析解与数值解的差距逐渐减小。对于埋深较深的情况 (即 $H > 10 \text{ m}$)，解析解的轴力小于数值结果，说明此时解析解低估了隧道轴力。另外，解析解在较小柔度比和较大柔度比情况下与数值解均吻合较为良好，但在中间柔度比下两者吻合程度稍差，即大埋深情况下，解析解与数值解吻合程度随柔度比增加具有先减小后增加的规律。

为定量描述简化解析方法预测轴力与数值解轴力之间的相对误差，现定义误差 R 如下：

$$R = \frac{|T_{\max}^A - T_{\max}^N|}{|T_{\max}^N|} \quad (19)$$

式中： $T_{\max}^N$ 为数值解； $T_{\max}^A$ 为简化解析解。

由于 Wang、Bobet 和 Park 三种方法预测轴力相同，其误差值 R 也相同。表 2 中给出了不同柔度比 (即不同的场地土类别) 及不同埋深下的轴力误差 R 。从表 2 中可以看到，当隧道埋深较浅时，解析解预测的轴力误差往往较大，且误差大小随柔度比的增加而减小，即场地土越硬则预测误差越小。当隧道埋深较深时，解析解误差明显小于埋深较浅的情况。表 2 中灰色值均为误差 R 超过 15% 的情况。若以误差小于 15% 为可接受的标准，简化解析方法在软弱土、中软土、中硬土、坚硬土或软岩和岩石五类场地土中用于预测隧道轴力的隧道埋深需分别大于 5 m、3 m、3 m、1 m 和 1 m。

图4 不同埋深 H 及不同柔度比 F 下数值解与各简化解析解的轴力Fig. 4 Tunnel thrusts by numerical modelling and analytical solutions under different depths H and flexibility ratios F 表2 不同埋深 H 及不同柔度比 F 下简化解析解的轴力误差 R

/(%)

Table 2 Errors R of these three analytical solutions for tunnel thrusts under different depths H and flexibility ratios F

埋深 H	软弱土 ($c_s \leq 150$ m/s)		中软土 (150 m/s $< c_s \leq 250$ m/s)		中硬土 (250 m/s $< c_s \leq 500$ m/s)		坚硬土或软质岩石 (500 m/s $< c_s \leq 800$ m/s)		岩石 (800 m/s $< c_s$)	
	$F=1.0$	$F=2.2$	$F=12.1$	$F=21.7$	$F=40.3$	$F=69.4$	$F=138$	$F=186$	$F=434$	$F=743$
1 m	73.2	67.7	59.1	61.4	63.2	60.5	47.6	46.2	32.0	27.3
3 m	32.7	26.0	17.6	17.3	16.8	15.8	13.3	14.0	7.8	5.5
5 m	21.0	13.1	7.8	6.6	8.9	8.7	7.3	8.0	4.8	3.3
7 m	13.4	8.2	3.9	2.8	3.3	3.2	1.9	5.1	3.8	2.6
10 m	7.1	3.7	0.8	0.7	1.1	2.1	3.3	0.4	0.7	0.4
17 m	2.7	1.7	4.6	4.8	4.2	3.8	3.3	1.7	0.7	2.3
27 m	3.9	6.9	6.3	6.3	7.0	6.3	5.7	4.4	3.4	2.8
37 m	7.4	7.2	7.6	8.1	7.5	8.0	7.8	6.9	5.8	3.4
47 m	0.2	3.7	8.5	8.3	8.5	8.6	9.0	8.4	6.6	6.2
57 m	2.7	10.8	9.7	10.0	9.0	8.4	8.2	8.8	7.2	5.9
67 m	0.7	1.8	10.3	10.1	9.0	9.0	8.9	8.9	7.9	6.1
77 m	5.3	9.7	11.9	9.5	9.4	9.4	8.8	8.8	8.3	6.5

3.2.2 隧道弯矩 $M_{\max}$

不同埋深及不同柔度比下隧道的峰值弯矩如图 5 所示。从图 5 中的数值解可以看出，隧道处于软弱土和中软土中的弯矩明显大于隧道处于岩

石场地中的情况。当埋深 $H \leq 17$ m 和 $H \geq 67$ m 时，隧道轴力随柔度比的增加而减小。而当埋深处于 $17 \text{ m} < H < 67$ m 之间时，隧道弯矩随柔度比的增加先稍许增加后快速减小。

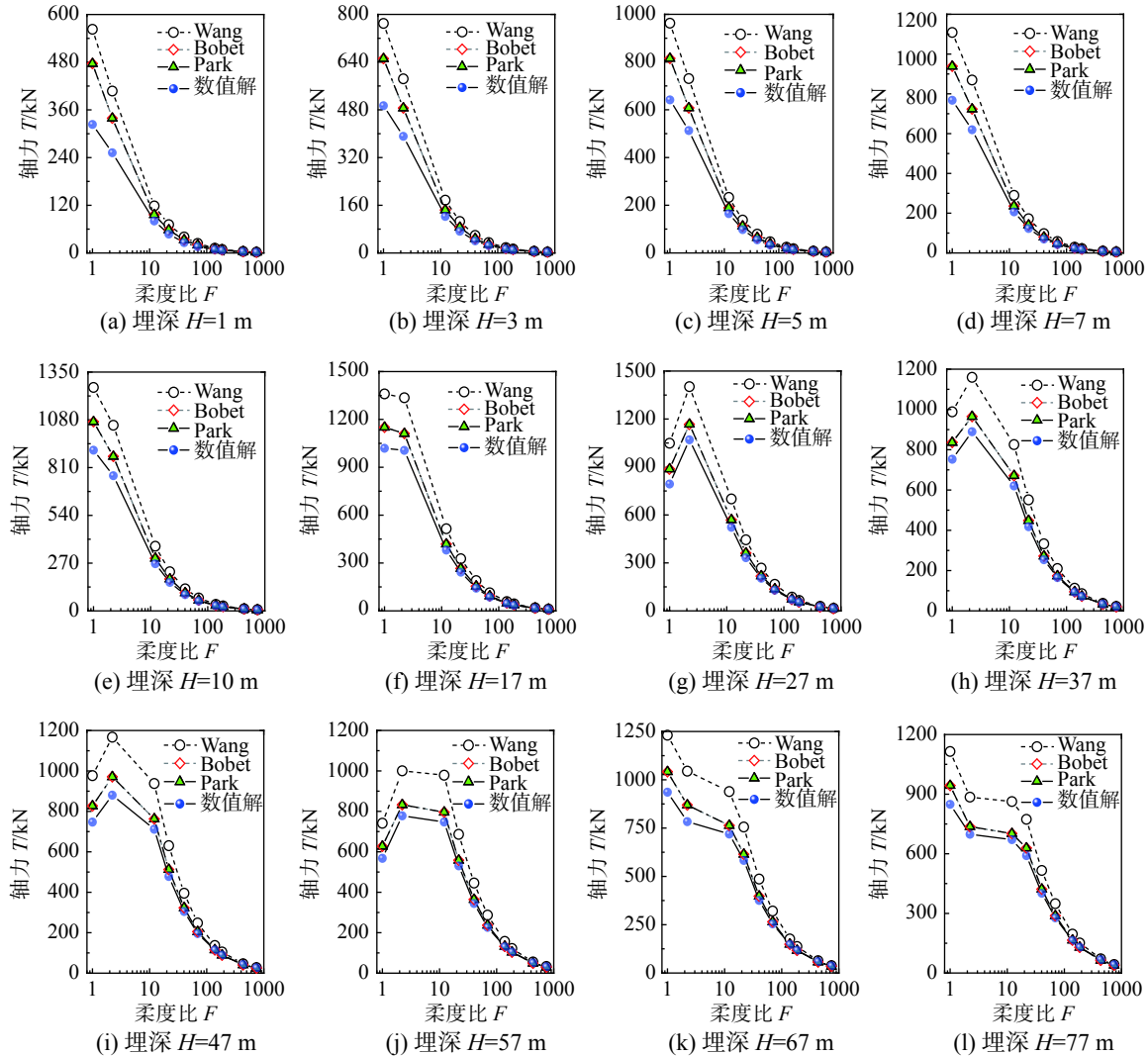


图 5 不同埋深 H 及不同柔度比 F 下数值解与各简化解析解的弯矩

Fig. 5 Tunnel bending moments by numerical modelling and analytical solutions under different depths H and flexibility ratios F

三种简化解析方法预测的隧道轴力随柔度比和埋深的变化与数值解具有相同的变化趋势。Bobet 方法与 Park 方法预测的弯矩值相同，但小于 Wang 方法的预测值。三种方法的预测弯矩均大于数值解，说明三种解析方法都高估了隧道弯矩，其中 Wang 方法对弯矩预测的偏差最为严重。另外，对于同一埋深情况，随着柔度比增加三种简化解析方法的弯矩与数值模拟结果逐渐接近。在柔度比较大的情况下，如坚硬土场地和岩石场地，简化解析解与数值解基本重合。

为定量描述简化解析方法在预测弯矩时的误

差，采用式 (19) 中定义的误差 R 进行描述。表 3 中给出了不同柔度比及不同埋深下的 Wang 方法的弯矩误差 R 。表 4 中给出了相应的 Park 方法和 Bobet 方法的弯矩误差 R 。从表 3 中可以看出，Wang 方法的误差在大多数情况下均较大，仅在岩石场地中误差相对较小。因此，在实际设计中采用 Wang 方法对弯矩进行计算并不合适。

相对于 Wang 的方法，表 4 中 Bobet 方法和 Park 方法的误差明显较小。与表 2 中轴力的规律相似，浅埋情况下的弯矩误差大于深埋的情况。随着柔度比增加，即场地土逐渐变硬时，Bobet 与

表 3 不同埋深 H 及不同柔度比 F 下各 Wang 解析解的弯矩误差 R

/(%)

Table 3 Errors R of Wang's analytical solution for tunnel bending moments under different depths H and flexibility ratios F

埋深 H	软弱土 ($c_s \leq 150$ m/s)		中软土 (150 m/s $< c_s \leq 250$ m/s)		中硬土 (250 m/s $< c_s \leq 500$ m/s)		坚硬土或软质岩石 (500 m/s $< c_s \leq 800$ m/s)		岩石 (800 m/s $< c_s$)	
	$F=1.0$ $F=2.2$		$F=12.1$ $F=21.7$		$F=40.3$ $F=69.4$		$F=138$ $F=186$		$F=434$ $F=743$	
	$F=1.0$	$F=2.2$	$F=12.1$	$F=21.7$	$F=40.3$	$F=69.4$	$F=138$	$F=186$	$F=434$	$F=743$
1 m	74.0	61.6	46.9	50.2	54.4	52.3	39.3	36.5	15.8	6.3
3 m	55.8	49.2	44.5	45.4	44.7	41.5	33.6	31.4	13.9	5.3
5 m	50.1	42.4	41.4	40.9	43.4	40.6	33.3	31.0	16.0	7.8
7 m	44.4	40.3	40.3	39.6	39.3	36.6	29.2	29.9	17.0	8.8
10 m	39.0	37.3	37.0	37.3	35.9	31.7	24.5	25.6	13.2	7.2
17 m	33.4	32.8	35.0	34.5	33.7	31.2	25.9	24.3	14.2	10.5
27 m	32.1	31.1	33.9	33.7	31.0	28.7	23.3	21.5	11.6	5.4
37 m	31.2	30.4	33.0	31.9	30.9	27.1	21.0	18.7	9.0	4.9
47 m	30.6	32.6	31.7	31.8	29.6	26.5	19.5	16.9	7.9	1.9
57 m	31.7	28.6	30.9	29.3	29.3	26.7	20.7	16.4	7.4	2.4
67 m	31.6	33.3	30.5	29.7	29.4	26.1	19.8	16.4	6.7	2.0
77 m	31.3	26.8	28.6	30.9	28.6	25.7	20.0	16.7	6.4	2.1

表 4 不同埋深 H 及不同柔度比 F 下 Bobet 与 Park 解析解的弯矩误差 R

/(%)

Table 4 Errors R of Bobet's and Park's analytical solution for tunnel bending moments under different depths H and flexibility ratios F

埋深 H	软弱土 ($c_s \leq 150$ m/s)		中软土 (150 m/s $< c_s \leq 250$ m/s)		中硬土 (250 m/s $< c_s \leq 500$ m/s)		坚硬土或软质岩石 (500 m/s $< c_s \leq 800$ m/s)		岩石 (800 m/s $< c_s$)	
	$F=1.0$ $F=2.2$		$F=12.1$ $F=21.7$		$F=40.3$ $F=69.4$		$F=138$ $F=186$		$F=434$ $F=743$	
	$F=1.0$	$F=2.2$	$F=12.1$	$F=21.7$	$F=40.3$	$F=69.4$	$F=138$	$F=186$	$F=434$	$F=743$
1 m	47.3	34.4	19.5	22.2	26.3	25.8	17.6	16.6	3.4	2.2
3 m	31.9	24.2	17.5	18.3	18.3	16.8	12.8	12.3	1.7	3.2
5 m	27.0	18.5	15.0	15.3	17.3	16.1	12.5	11.9	3.6	0.9
7 m	22.3	16.8	14.1	13.6	13.9	12.8	9.1	11.1	4.5	0.0
10 m	17.7	14.2	11.4	11.7	11.1	8.8	5.1	7.4	1.1	1.5
17 m	12.9	10.5	9.8	9.4	9.3	8.4	6.2	6.2	1.9	1.6
27 m	11.8	9.1	8.9	8.7	7.1	6.3	4.1	3.9	0.4	3.0
37 m	11.1	8.5	8.2	7.2	7.0	5.0	2.1	1.5	2.6	3.5
47 m	10.5	10.3	7.1	7.2	5.9	4.4	0.9	0.1	3.6	6.3
57 m	10.8	7.0	6.5	5.2	5.7	4.7	1.9	0.5	4.1	5.8
67 m	11.3	10.9	6.2	5.5	5.8	4.1	1.2	0.5	4.7	6.2
77 m	11.1	5.5	4.6	6.5	5.1	3.8	1.3	0.3	5.0	6.1

Park 的误差整体具有减小的趋势。在岩石类场地中,即使隧道拱顶距地表仅为 1 m 时,弯矩误差仍然处于 10% 以内。表 4 中灰色值均为误差超过 15% 的情况。同样以误差小于 15% 为可接受误差,简化解析方法在软弱土、中软土、中硬土、坚硬土和岩石等五类场土中采用 Bobet 方法或 Park 方法预测隧道弯矩,隧道埋深需要分别大于 10 m、5 m、5 m、1 m 和 1 m。

4 结论

本文采用时域波动有限元方法,研究了 3 种经典简化解析方法对圆形隧道横断面地震内力计

算的准确性。无滑移条件下,通过对不同场地土类别及不同埋深情况下的对比验证,得到如下结论:

(1) Wang、Bobet 与 Park 三种简化解析方法对隧道轴力的预测值相同。在埋深较浅情况下(即 $H \leq 10$ m),小柔度比下的解析解与数值解差距较大,解析解严重高估了隧道轴力,但随着柔度比增加,解析解与数值解差距逐渐减小。在埋深较深情况下,解析方法预测轴力小于数值计算轴力,随柔度比的增加,解析解与数值解的吻合程度具有先减小后增加的规律;

(2) Bobet 方法与 Park 方法预测的弯矩值相

同,且小于 Wang 方法预测的弯矩。三种方法预测弯矩值均大于数值解,说明三种解析方法都高估了隧道弯矩,其中 Wang 方法的预测值偏差最为严重。另外,对于同一埋深情况,随着柔度比增加三种简化解析方法预测弯矩的精度逐渐增加;

(3) 综合考虑对隧道轴力与弯矩的预测精度,相对 Wang 的方法, Bobet 与 Park 方法更适合用于隧道内力计算。对于软弱土、中软土、中硬土、坚硬土和岩石等五种类别的场地土,隧道埋深分别大于 10 m、5 m、5 m、1 m 和 1 m 时, Bobet 与 Park 方法的轴力与弯矩误差均能小于 15%。

本文数值模拟中围岩土及隧道结构均采用线弹性模型,而在强震情况下场地土及隧道结构往往会进入一定程度的非线性,对于非线性情况下的验证工作将更加具有工程价值。另外,本文针对不同场地土条件均采用同一条地震记录输入,而在实际地震中,不同场地类别的地震记录往往存在较大差异。因此,针对不同场地土类别,选用相应的地震记录作为输入地震动也将在后续工作中持续完善。

参考文献:

- [1] Chen Z Y, Shi C, Li T B. Damage characteristics and influence factors of mountain tunnels under strong earthquakes [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(2): 387 — 401.
- [2] Wang Z, Zhang Z. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 45(2): 45 — 55.
- [3] Shen Y S, Gao B, Yang X M, Tao S J. Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2014, 180: 85 — 98.
- [4] 徐琨鹏, 景立平, 宾佳. 四种地下结构抗震设计简化分析方法对比[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(2): 281 — 292.
Xu Kunpeng, Jing Liping, Bin Jia. Comparison of Four Simplified Analytical Methods for Seismic Design of Underground Structures [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2019, 14(2): 281 — 292. (in Chinese)
- [5] 陈国兴, 陈苏, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(1): 1 — 23.
Chen Guoxing, Chen Su, Du Xiuli, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(1): 1 — 23. (in Chinese)
- [6] 刘晶波, 王东洋, 谭辉, 等. 隧道纵向地震反应最不利时刻的确定及其应用[J]. *工程力学*, 2019, 36(S1): 240 — 247.
- [7] 袁勇, 申中原, 禹海涛. 沉管隧道纵向地震响应分析的多体动力学方法[J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 76 — 83.
Yuan Yong, Shen Zhongyuan, Yu Haitao. Multibody dynamics method for longitudinal seismic response analysis of immersed tunnels [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5): 76 — 83. (in Chinese)
- [8] 刘晶波, 王东洋, 谭辉, 等. 隧道纵向地震反应分析的整体式反应位移法[J]. *工程力学*, 2018, 35(10): 17 — 26.
Liu Jingbo, Wang Dongyang, Tan Hui, et al. Integral response displacement method for longitudinal seismic response analysis of tunnel structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(10): 17 — 26. (in Chinese)
- [9] 刘晶波, 刘祥庆, 薛颖亮. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 方法适用性研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(1): 49 — 57.
Liu Jingbo, Liu Xiangqing, Xue Yingliang. Study on applicability of a Pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(1): 49 — 57. (in Chinese)
- [10] 申玉生, 高波, 王峥峥. 强震区山岭隧道振动台模型试验破坏形态分析[J]. *工程力学*, 2009, 26(S1): 62 — 66.
Shen Yusheng, Gao Bo, Wang Zhengzheng. Failure mode analysis of mountain tunnel shake table test in high-intensity earthquake area [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(S1): 62 — 66. (in Chinese)
- [11] Hoeg K. Stresses against underground structural cylinders [J]. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 1968, 94(4): 833 — 858.
- [12] Einstein H H, Schwartz C W. Simplified analysis for tunnel supports [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, April, 1979, 105(GT4): 499 — 518.
- [13] Wang J N. Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach [M]. New York: Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc, 1993.
- [14] Penzien J. Seismically induced racking of tunnel linings [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29: 683 — 691.
- [15] Bobet A. Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2003, 18(4): 377 — 393.
- [16] Bobet A. Drained and undrained response of deep tunnels subjected to far-field shear loading [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, 25(1): 21 — 31.
- [17] Park K H, Tantayopin K, Tontavanich B, et al. Analytical solution for seismic-induced ovaling of circular tunnel lining under no-slip interface conditions: A revisit [J].

- Tunneling and Underground Space Technology*, 2009, 24(2): 231 — 235.
- [18] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, 16(4): 247 — 293.
- [19] Sedarat H, Kozak A, Hashash Y M A, et al. Contact interface in seismic analysis of circular tunnels [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2009, 24: 482 — 490.
- [20] Kontoe S, Avgerinos V, Potts D M. Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2014, 66: 206 — 219.
- [21] 晏启祥, 马婷婷, 吴林, 等. 圆形隧道抗震分析若干近似解析方法比较研究[J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(1): 12 — 17.
Yan Qixiang, Ma Tingting, Wu Lin, et al. Comparison Research of Some Approximate Analytical Methods for Seismic Design of Circular Tunnel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(1): 12 — 17. (in Chinese)
- [22] 宾佳. 地下结构地震作用的简化分析方法研究[J]. *国际地震动态*, 2017(5): 42 — 43.
Bin Jia. Study on the simplified analysis methods of seismic effects of underground structures [J]. *International Earthquake Dynamics*, 2017(5): 42 — 43. (in Chinese)
- [23] 杜修力, 康凯丽, 许紫刚, 等. 地下结构地震反应的主要特征及规律[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(7): 11 — 21.
Du Xiuli, Kang Kaili, Xu Zigang, et al. Main characteristics and rules of seismic response of underground structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(7): 11 — 21. (in Chinese)
- [24] 杜修力. 工程波动理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Du Xiuli. Theories and methods of wave motion for engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [25] 杜修力, 赵源, 李立云. 土体-结构界面接触对地下结构动力反应的影响[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(5): 471 — 478.
Du Xiuli, Zhao Yuan, Li Liyun. Contact effect of interfaces between soil and structure on dynamic response of underground structures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(5): 471 — 478. (in Chinese)
- [26] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 1969, 95(4): 759 — 877.
- [27] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Liao Zhenpeng. Introduction to wave motion theories for engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [28] 戴志军, 李小军, 侯春林. 谱元法与透射边界的配合使用及其稳定性研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 40 — 50.
Dai Zhijun, Li Xiaojun, Hou Chunlin. A combination usage of transmitting formula and spectral element method and the study of its stability [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 40 — 50. (in Chinese)
- [29] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. *力学学报*, 2006, 38(1): 49 — 56.
Du Xiuli, Zhao Mi, Wang Jinting. A stress artificial boundary in FEM for near-field wave problem [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1): 49 — 56. (in Chinese)
- [30] Huang J Q, Zhao M, Du X L. Non-Linear Seismic Responses of Tunnels within Normal Fault Ground under Obliquely Incident P Waves [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2017, 61: 26 — 39.
- [31] Zhao M, Gao Z D, Wang L T, et al. Obliquely incident earthquake input for soil-structure interaction in layered half space [J]. *Earthquakes and Structures*, 2017, 13(6): 573 — 588.
- [32] Huang J Q, Zhao M, Du X L, et al. Impact of Incident Angles of Earthquake Shear (S) Waves on 3-D Non-Linear Seismic Responses of Long Lined Tunnels [J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 168 — 185.
- [33] ABAQUS/Standard User's Manual (version 2017) [M]. Providence: Dassault Systemes Simulia Corp, 2016
- [34] GB50909—2014, 城市轨道交通结构抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
GB50909—2014, Code for seismic design of urban rail transit structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)