

禹海涛,杨喻声,袁勇,等.地下结构抗震分析的振动法与波动法对比研究[J].地震工程学报,2019,41(4):845-852.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.845
YU Haitao, YANG Yusheng, YUAN Yong, et al. A Comparison between Vibration and Wave Methods in Seismic Analysis of Underground Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 845-852. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.845

地下结构抗震分析的振动法与波动法对比研究

禹海涛^{1,2}, 杨喻声³, 袁 勇⁴, 段科萍⁵, 顾 全⁶

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

5. 溧阳市水利局, 江苏 常州 213300; 6. 南京市秦淮河河道管理处, 江苏 南京 210012)

摘要: 针对地下结构抗震分析中应用广泛的波动方法与振动方法,从物理方程和有限元格式出发,明确了两种方法的区别与联系。通过标准数值试验,证明了振动方法是波动方法采用下卧刚性基岩假设和地层水平无限延伸假设,仅考虑SV波垂直向上入射的一种特例。采用波动方法模拟弹性地基,对比振动方法结果,表明弹性地基和刚性地基上地表位移响应和隧道结构内力响应均有显著差异。建议应根据具体场地条件,选择振动或波动方法进行地下结构抗震设计研究。

关键词: 隧道结构; 抗震分析; 振动方法; 波动方法

中图分类号: TU92

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-0845-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.845

A Comparison between Vibration and Wave Methods in Seismic Analysis of Underground Structures

YU Haitao^{1,2}, YANG Yusheng³, YUAN Yong⁴, DUAN Keping⁵, GU Quan⁶

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

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Company Limited, Shanghai 200092, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. State Key Laboratory of Disaster Reduction of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

5. Liyang Water Resources Bureau, Changzhou 213300, Jiangsu, China;

6. Management Office of the Qinhuai River Embankment of Nanjing, Nanjing 210012, Jiangsu, China)

Abstract: The wave and vibration methods of seismic analysis are widely employed with underground structures. Comparisons between the two approaches were conducted in the paper. First, the wave method, i.e., the viscoelastic artificial boundary and pertinent equivalent nodal force method, is introduced briefly. Second, the governing equation and finite element formulation of the problem are presented to clarify the interrelation and distinction between the two methods.

收稿日期: 2018-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305, 2018YFC0809602, 2017YFC1500703); 国家自然科学基金项目(51678438, 51778487); 上海市青年科技启明星计划资助(17QC1400500); 上海市科学技术委员会(18DZ1205103, 16DZ1200302, 16DZ1201904)

第一作者简介: 禹海涛(1983—),男,工学博士,博士后,博士生导师,副教授,主要研究方向为地下结构抗震与抗爆动力学。

E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn.

On the basis of standard numerical tests, it was proved that the vibration method is only applicable to degraded cases, with assumptions of a rigid base and an SV propagating vertically upward. Then, the comparison between the rigid base and the elastic base was conducted. The rigid base was simulated through the vibration method, while the elastic base was simulated using the equivalent nodal force method. The results showed that there are significant differences between elastic and rigid bases in terms of ground surface displacement response and internal force response of tunnel structures. Therefore, the influence of different site conditions was far from negligible, and the analysis method should be carefully selected based on site conditions and whether a rigid or elastic base is incorporated into the seismic design of underground structures.

Keywords: tunnel structure; seismic analysis; vibration method; wave method

0 引言

地下结构抗震研究中,以动力时程分析为主要代表的数值方法,已经成为目前地下结构动力问题的主要研究手段之一。根据地震作用施加方式不同,可分为振动方法与波动方法两类。振动方法采用在数值模型底部输入加速度/位移时程的方式施加地震动,波动方法通常采用人工边界和节点力的方式施加地震动。

振动方法简便易行,应用广泛,众多学者采用此方法针对不同对象进行了研究^[1-3]。波动方法最具代表性的是黏弹性边界和对应的等效节点力输入^[4]。基于此类方法,杜修力、黄景琦^[5-6]对平面波斜入射作用下地铁车站、隧道进行模拟研究,分析了地震波入射角度的影响,也对含断层场地 P 波斜入射下的隧道横断面进行了模拟分析^[7]。李鹏^[8]对 P 波、SV 波和 SH 波斜入射下的隧道结构进行了三维模拟,讨论了平面波入射方向的影响。基于建立的 Rayleigh 波输入方法,刘晶波^[9-10]分析了 Rayleigh 波作用下地下结构的响应,探讨了地下结构埋深的影响。

振动方法与波动方法的对比及明确各自的适用性,是其在地下结构抗震研究中应用的基础。赵源^[11]针对地下结构进行振动输入与波动输入的对比模拟,结果表明振动输入与波动输入下地下结构动力响应有一定差别。赵武胜^[12]基于建立的无限元人工边界和节点荷载输入方法,对比底部输入加速度的方案,认为底部输入加速度时程的方法会使底部人工边界失去吸收性能,带来较大计算误差。上述研究都没有从理论本质上明确振动方法和波动方法的假设基础及适用性。

本文首先简介了黏弹性边界和对应的等效节点力输入方法。从物理方程和有限元格式出发,推导明确了振动方法与波动方法的区别,及其统一的假

设前提。然后通过标准自由场算例,验证了理论结果。在相同假设基础上,波动输入与振动输入都获得了与解析解一致的结果。最后,通过数值算例对比分析,揭示了振动方法的局限性,明确了地下结构抗震设计研究中,对不同场地条件应针对采用不同分析方法。

1 波动输入方法

波动输入方法通过选用合适的人工边界考虑近场与远场的动力相互作用,以人工边界上的位移和应力与原自由场相同为条件,确定人工边界上等效地震作用输入。具有代表性的为刘晶波^[4]提出的黏弹性人工边界及对应的等效节点力输入方法。

二维黏弹性人工边界如图 1 所示,对应的弹性元件和黏性元件参数为:

$$\begin{aligned} \text{法向: } & \begin{cases} K_N = \alpha_N \frac{G}{R} \\ C_N = \rho c_p \end{cases} \\ \text{切向: } & \begin{cases} K_T = \alpha_T \frac{G}{R} \\ C_T = \rho c_s \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

式中: K_T, C_T 和 K_N, C_N 分别为切向、法向弹性元件系数和黏性元件系数; ρ 和 G 为介质密度和剪切模

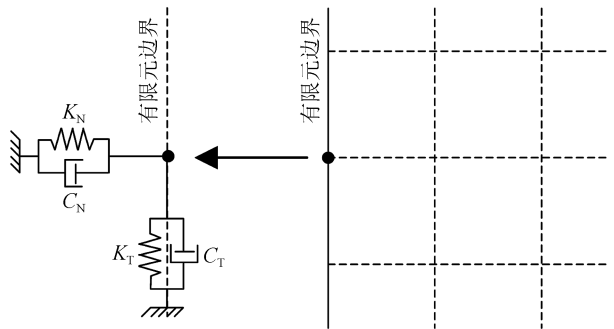


图 1 二维黏弹性边界

Fig.1 Two dimensional viscous-spring boundary

量; c_p, c_s 分别为介质 P 波和 S 波波速; R 为波源至人工边界的距离; α_N, α_T 分别为法向与切向黏弹性人工边界修正系数,建议取值 $1 \leq \alpha_N \leq 2, 0.5 \leq \alpha_T \leq 1$ 。

准确实现波动输入的条件是在人工边界上施加等效荷载 F_B ,使得人工边界处的位移和应力与原自由场相同。根据脱离体分析和黏弹性人工边界的运动方程,文献[4]推导人工边界上等效节点荷载为:

$$F_B = A(\sigma_B(t) + K_b u_B(t) + C_b \dot{u}_B(t)) \quad (2)$$

式中: A 为截断边界上节点影响面积; K_b, C_b 分别为黏弹性边界弹性元件系数和黏性元件系数; $u_B(t), \dot{u}_B(t), \sigma_B(t)$ 分别为节点处原自由场位移时程,速度时程和应力时程。

2 理论分析

2.1 物理方程

取水平为 x 轴,向右为正,竖直为 z 轴,向下为正,则竖向一维剪切波传播方程为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

式中: $u(x, z, t)$ 为质点位移; c_s 为 S 波波速; G 为介质剪切模量, ρ 为介质密度。

偏微分方程定解条件包括初始条件和边界条件,假设初始时刻土体静止,则有初始条件:

$$u(x, z, t) \big|_{t=0} = 0, \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial t} \bigg|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

地下结构抗震为外源问题,震源作用通过边界条件施加,也是振动输入方法和波动输入方法的本质差别所在。方程边界条件为:

$$\frac{\partial u(x, z, t)}{\partial n} + k u(x, z, t) \bigg|_{(x, z) \in \partial \Omega} = B(x, z, t) \quad (5)$$

式中: $\partial \Omega$ 为截断边界; n 表示边界外法向; k 为常数。需要说明的是,本文分析为一维模型,理论上边界条件只与 (z, t) 相关,而数值模拟时水平方向也需通过人工边界模拟,为下文叙述方便,边界条件写成二维形式。

2.2 有限元格式

2.2.1 振动输入

如上节所述,地下结构抗震为外源问题,内部无其他荷载作用,根据达朗贝尔原理或虚功原理可以建立体系的动力平衡方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (6)$$

式中: M, C, K 分别为分析模型的质量矩阵,阻尼矩阵和刚度矩阵; u 为绝对位移向量。

振动输入并不处理边界节点,仅在模型底部直

接输入位移时程或加速度时程,故振动输入模型体系内部和边界节点均满足式(4)。进一步分析位移输入和加速度输入的区别。将位移表示为基础位移 u_0 与相对位移 u' 之和,即:

$$u = u_0 + u' \quad (7)$$

结构弹性恢复力和阻尼力仅与相对位移 u' 有关,将式(7)代入式(6),则可得:

$$M\ddot{u}' + C\dot{u}' + Ku' = -M\ddot{u}_0 \quad (8)$$

底部输入加速度时程,计算得到的位移响应为相对值,结构的绝对位移需将相对位移和基础位移叠加。当底部输入位移时程,动力方程式(4)建立在绝对位移坐标系下,得到的位移响应为绝对值。结构内力仅与相对位移有关,底部输入加速度或位移时程计算结果相同。

2.2.2 波动输入

波动输入方法和振动输入方法主要差别在于边界条件,波动输入方法体系内部节点同样满足式(6)。波动输入方法边界节点满足动力方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F_B \quad (9)$$

式中: F_B 为人工边界上输入的等效节点力向量。显然式(9)比式(6)右端多出一项 F_B ,即为波动方法和振动方法的差异所在,当 F_B 不存在或影响不显著时,振动输入方法和波动输入方法得到统一。

2.3 振动输入和波动输入的对比

振动方法不处理底部边界,即采用下卧刚性基岩假设。输入的地震波会在模型顶部和底部,即地表和基岩面之间来回反射。同时,振动方法输入加速度/位移时程常沿水平方向,模拟 SV 波垂直向上入射的情况。波动输入可以采用弹性地基假设,考虑地表反射波的逸散^[13],也可采用下卧刚性基岩假设,考虑基岩面的地震波反射^[14]。波动方法还可以考虑地震波斜入射^[13]。

如上节所述,波动输入方法与振动输入方法统一的条件是边界等效节点力不存在或影响不显著,即地层横向无限延伸。所以,振动方法是波动方法的一种特例,即基于地层横向无限延伸假设,采用刚性地基模型,分析 SV 波垂直向上传播,如图 2 所示。

振动输入方法仅在底部输入加速度或位移,采用地层水平横向无限延伸假设,数值分析中模型两侧采用人工边界模拟。由上文分析可知,振动输入方法数值模型的截断边界处,位移和应力连续条件并未满足,地震波在边界处一定会发生反射和透射。模型两侧采用人工边界只是耗散截断边界上产生的透射波,反射波需通过截断边界至观测点间几何阻

尼或介质材料阻尼耗散。在侧边界反射波影响范围之外,振动输入和波动输入解答一致。

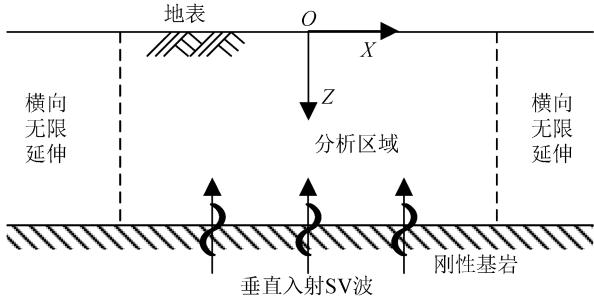


图 2 分析模型
Fig.2 Analysis model

3 数值验证

本文考虑单层均质土体,采用下卧刚性基岩假设。土层质量密度 $\rho = 2\,000\text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.25$,剪切模量 $G = 20\text{ MPa}$,则纵波波速 $c_p = 173\text{ m/s}$,剪切波速 $c_s = 100\text{ m/s}$,土层深度取 50 m 。在底部输入垂直向上入射的 SV 波,位移表达式为:

$$u(t) = \begin{cases} \sin(4\pi t) & 0 \leq t \leq 0.5 \\ 0 & 0.5 < t \leq 2 \end{cases} \quad (10)$$

网格单元尺寸取 $2\text{ m} \times 2\text{ m} (\Delta x \times \Delta z)$,满足网格尺寸小于 $1/10\lambda = 5\text{ m}$ 要求,其中 λ 为剪切波波长。计算时步取 $\Delta t = 0.01\text{ s}$,满足小于 $\min(\Delta x, \Delta z)/c_s = 0.02\text{ s}$ 要求。观测点取 $(0, 0)$ 。根据一维弹性波动理论,SV 波经过 0.5 s 到达顶面,发生自由表面反射,位移幅值放大两倍且波形不变,再经过 1 s ,经底部反射后再次到达顶面。

3.1 波动输入

由于波动方法输入在截断边界上精确满足位移和应力连续条件,故波动方法计算模型宽度取 200 m ,侧边施加黏弹性边界,输入等效节点力。法向与切向黏弹性人工边界修正系数取 $\Delta\alpha\Delta_N = 1.5$, $\Delta\alpha\Delta_T = 0.75$ 。结果如图 3 所示。

3.2 振动输入

3.2.1 自由边界条件

本文为弹性计算,并未考虑材料阻尼,故振动方法输入计算模型宽度取 $1\,000\text{ m}$,采用自由侧边界条件,计算时间 (2 s) 内侧边界反射波尚未到达观测点。结果如图 4 所示。

3.2.2 等位移边界条件

等位移边界条件能够有效模拟地层水平无限延伸假设条件^[15],故计算模型宽度取 100 m 。两侧边

等高度节点施加等位移边界条件,在底部输入加速度时程,结果如图 5 所示。

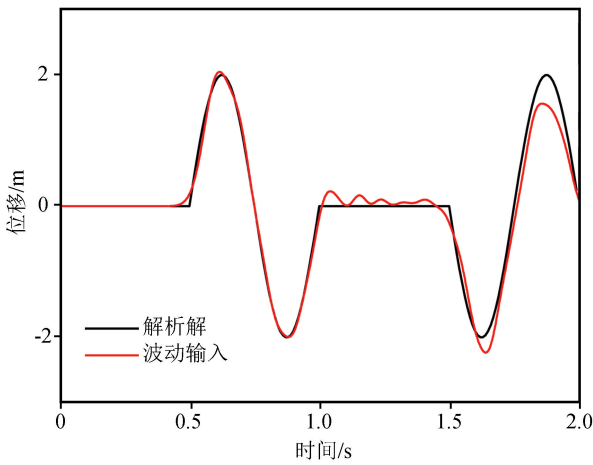


图 3 波动输入结果对比
Fig.3 Comparison of wave input results

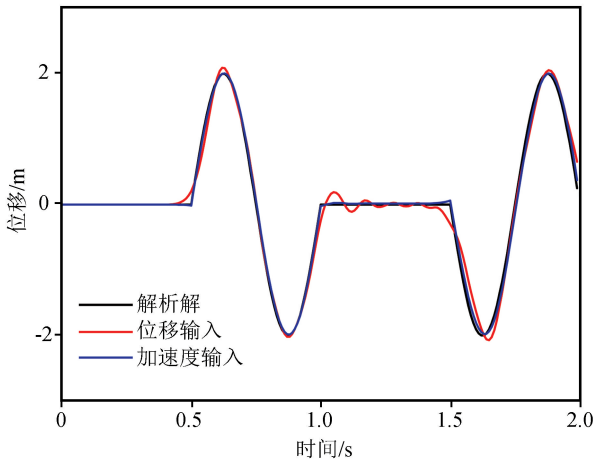


图 4 振动输入结果对比(自由边界条件)
Fig.4 Comparison of vibration input results (Free boundary)

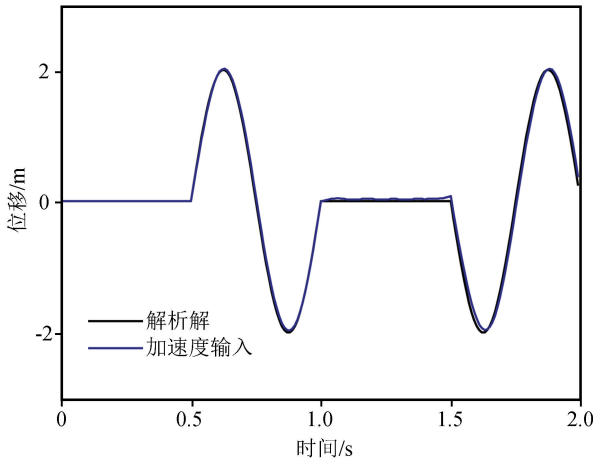


图 5 振动输入结果对比(等位移边界条件)
Fig.5 Comparison of vibration input results (repeatable boundary)

由图 3~图 5 可知,波动输入和振动输入结果都与解析解答一致,从而验证了本文理论分析结果的正确性。振动方法是波动方法的一种特例,即采用下卧刚性地基假设和地层水平无限延伸假设,SV 波垂直上传播的情况。

4 算例

4.1 分析模型及参数

如上文所述,振动方法基于下卧刚性基岩假设。针对并无基岩的场地条件,振动方法并不能有效考虑地震波经地表反射后向下逸散。上海市《地下铁道建筑结构抗震设计规范》^[16]建议动力时程分析模型深度取 70 m,而上海市场地基岩埋深约 300 m。本节采用波动方法模拟弹性地基,考虑地震波的逸散。评价采用振动方法,地震动时程在 70 m 深处

输入的计算误差。为统一计算结果,振动方法采用位移时程输入。振动输入计算模型宽度取 1 400 m,波动输入计算模型宽度取 500 m。黏弹性人工边界修正系数取 $\alpha_N=1.5,\alpha_T=0.75$ 。

将上海场地 70 m 深度范围土性参数作加权平均以简化模型,圆形隧道截面尺寸内径 5.5 m,外径 6.2 m,埋深 20 m。土体和衬砌计算参数见表 1。

表 1 模型计算参数

Table 1 Parameters of numerical model			
对象	密度/(kg·m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
衬砌	2 500	34 500	0.2
土体	1 852	338.15	0.3

选用峰值加速度 0.075g 的上海人工波(20 s),其速度时程和位移时程如图 6 所示。

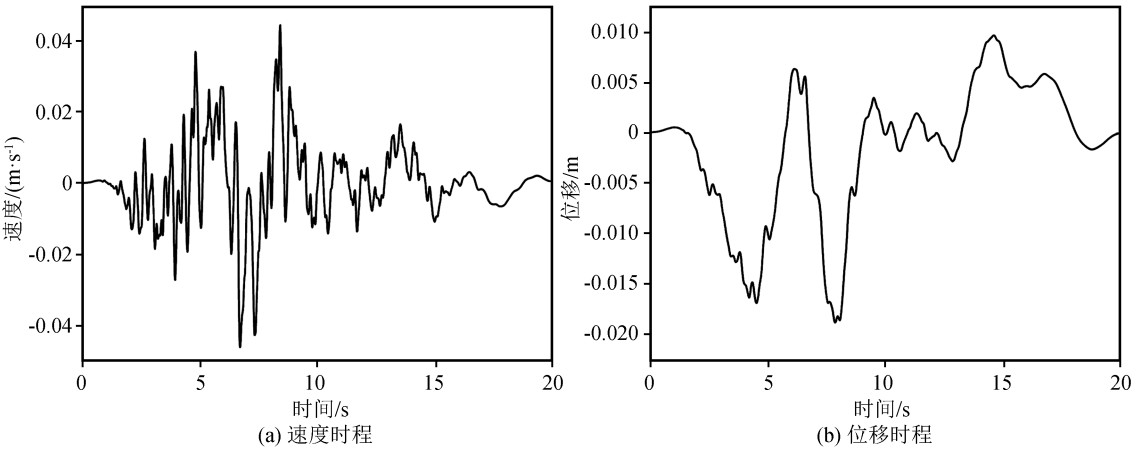


图 6 上海人工波时程
Fig.6 Shanghai acceleration timehistory

4.2 结果对比分析

4.2.1 地表位移

隧道顶部地表位移时程对比如图 7 所示。由图可知,弹性基岩波动输入结果地表位移时程与底部输入位移时程[图 6(b)]形状相似,幅值增大,说明波动输入有效考虑了经地表反射后,向下传播地震波的逸散。而振动输入结果反映了地震波在模型顶部与底部之间来回反射现象。

4.2.2 隧道衬砌内力

隧道结构斜向 45°轴力和弯矩时程,右侧剪力时程对比如图 8 所示。弹性基岩波动输入结果隧道内力在后期逐渐减小,趋近于 0,即后期地震波峰值过后,隧道结构地震响应随输入地震动的减小而降低。再次说明波动输入有效考虑了地震波的逸散。振动输入结果隧道内力往复增大,说明地震波在模

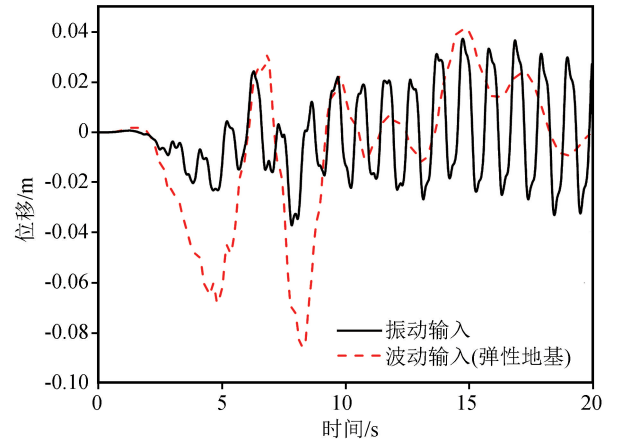


图 7 隧道顶部地表位移时程对比
Fig.7 Comparison of ground surface displacement response
型上下来回反射增大了隧道结构内力响应。充分说明刚性地基和弹性地基不同场地条件,隧道衬砌结

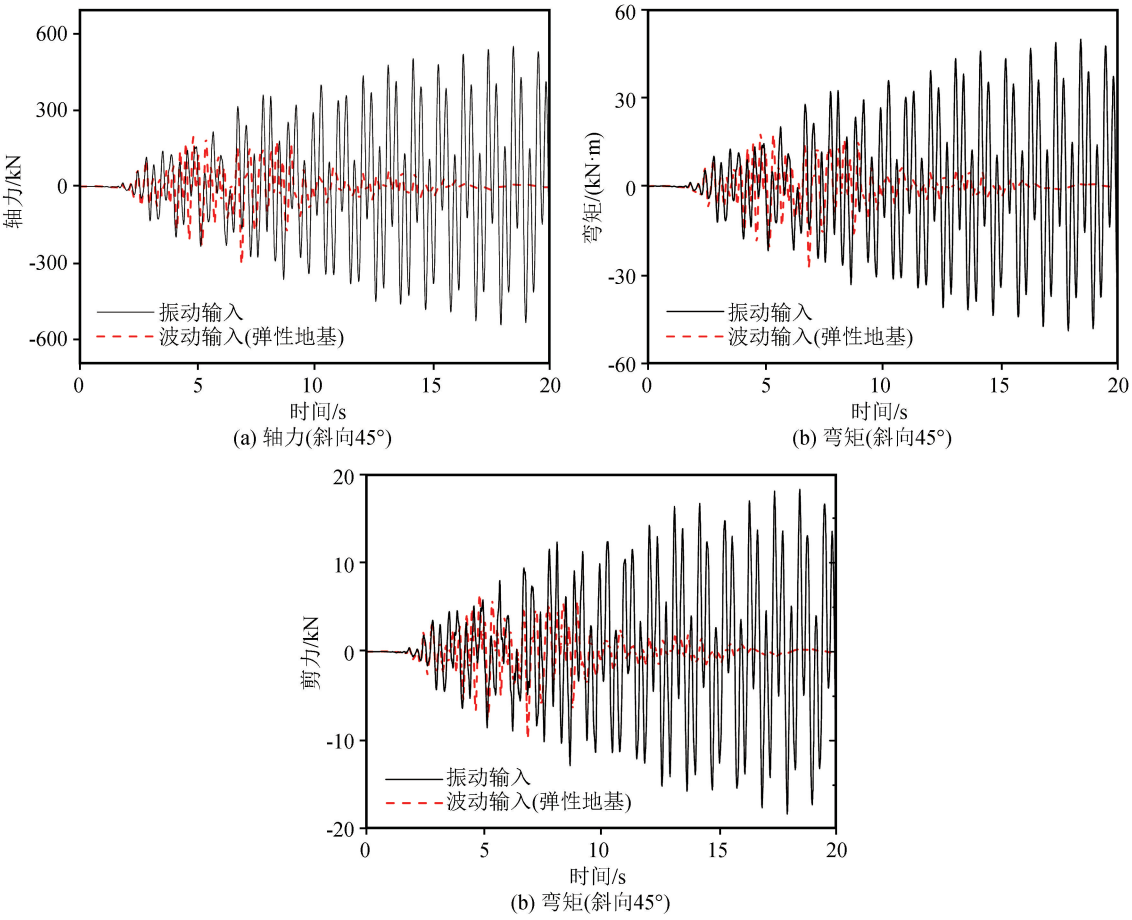


图 8 隧道衬砌内力时程对比

Fig.8 Comparison of the internal forcereponse of tunnel structure

构内力响应明显不同。
隧道结构内力包络图如图 9 所示,幅值如表 2

所列。振动输入下隧道衬砌内力比弹性地基波动输入结果明显增加,与图 8 结果吻合。

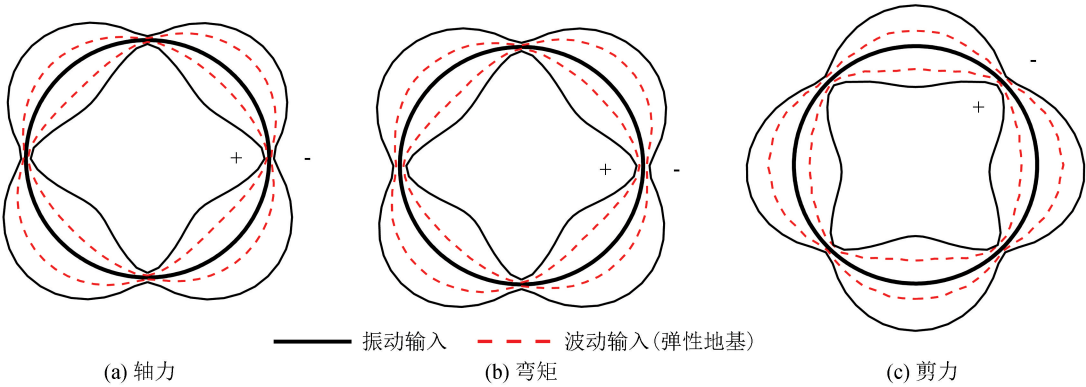


图 9 隧道衬砌内力包络图对比

Fig.9 Comparison of the internal force envelope diagram of tunnel structure

表 2 隧道衬砌最大内力幅值对比

Table 2 Comparison of the internal force amplitude of tunnel structure

	轴力/kN		剪力/kN		弯矩/(kN·m)	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
波动输入(弹性地基)	327	-327	10	-10	27	-27
振动输入	638.4	-638.4	18.6	-18.6	53.1	-53.1

由表 2 可知,弹性基岩波动输入与振动输入,隧道衬砌内力包络值接近 100% 的误差。充分说明隧道结构抗震设计应根据具体的场地条件,选择振动分析或波动分析方法,不能盲目采用简便的振动分析方法。

5 结论

本文对当前地下结构抗震研究中广泛采用的振动方法和波动方法进行对比研究,通过理论分析和数值模拟,得到以下结论:

(1) 振动方法是波动方法采用下卧刚性基岩假设和地层水平无限延伸假设,仅考虑 SV 波垂直向上入射情况的一种特例。而波动方法可以进一步考虑弹性地基和地震波斜入射,适用性更广。

(2) 刚性地基和弹性地基不同场地条件对隧道结构地震响应影响显著。弹性地基波动输入能有效考虑向下传播地震波的逸散;而振动输入,地震波在模型顶部与底部之间来回反射。对比分析结果表明,地表位移时程,隧道衬砌内力时程和包络图幅值均显著不同。地下结构抗震设计研究应根据具体场地条件,选择振动方法或波动方法,不能一概采用简便的振动分析方法和下卧刚性基岩假设。

参考文献(References)

- [1] YU H T, YUAN Y, QIAO Z Z, et al. Seismic Analysis of a Long Tunnel Based on Multi-Scale Method[J]. Engineering Structures, 2013, 49: 572-587.
- [2] 闫静茹,路德春,杜修力,等.港珠澳大桥工程人工岛三维非线性地震反应分析[J].世界地震工程,2016,32(1):161-168.
YAN Jingru, LU Dechun, DU Xiuli, et al. Three-Dimensional Nonlinear Seismic Response Analysis of Artificial Island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Project[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 161-168.
- [3] 庄海洋,龙慧,陈国兴,等.可液化地基中地铁车站周围场地地震反应分析[J].岩土工程学报,2012,34(1):81-88.
ZHUANG Haiyang, LONG Hui, CHEN Guoxing, et al. Seismic Responses of Surrounding Site of Subway Station in Liquefiable Foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 81-88.
- [4] 刘晶波,吕彦东.结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J].土木工程学报.1998(3):55-64.
LIU Jingbo, LÜ Yandong. A Direct Method for Analysis of Dynamic Soil-Structure Interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998(3): 55-64.
- [5] HUANG J Q, DU X L, ZHAO M, 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.
- [6] 杜修力,黄景琦,赵密,等.SV 波斜入射对岩体隧道洞身段地震响应影响研究[J].岩土工程学报,2014,36(8):1400-1406.
DU Xiuli, HUANG Jingqi, ZHAO Mi, et al. Effect of Oblique Incidence of SV Waves on Seismic Response of Portal Sections of Rock Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1400-1406.
- [7] HUANG J Q, ZHAO M, DU X L. Non-Linear Seismic Responses of Tunnels within Normal Fault Ground under Obliquely Incident P Waves [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 26-39.
- [8] LI P, SONG E X. Three-Dimensional Numerical Analysis for the Longitudinal Seismic Response of Tunnels under an Asynchronous Wave Input[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 229-243.
- [9] 刘晶波,李彬. Rayleigh 波作用下地下结构的动力反应分析[J].工程力学,2006,23(10):132-135,131.
LIU Jingbo, LI Bin. Dynamic Response Analysis of Underground Structures during Propagation of Rayleigh Waves[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 132-135, 131.
- [10] 刘晶波,王文晖,刘祥庆,等. Rayleigh 波作用下地下结构地震反应影响分析[J].振动与冲击,2013,32(16):95-99.
LIU Jingbo, WANG Wenhui, LIU Xiangqing, et al. Influence Analysis on Seismic Response of Underground Structures under Propagation of Rayleigh Waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 95-99.
- [11] 赵源,杜修力,赵密,等.地下结构地震响应中的地震动输入探讨[J].土木建筑与环境工程,2010,32(增刊 2):192-197.
ZHAO Yuan, DU Xiuli, ZHAO Mi, et al. Discussion on Ground Motion Input in Seismic Response of Underground Structures [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010, 32(Supp 2): 192-197.
- [12] 赵武胜,陈卫忠,郑朋强,等.地下工程数值计算中地震动输入方法选择及实现[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8):1579-1587.
ZHAO Wusheng, CHEN Weizhong, ZHENG Pengqiang, et al. Choice and Implementation of Seismic wave Input Method in Numerical Calculation for Underground Engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1579-1587.
- [13] 黄景琦.岩体隧道非线性地震响应分析[D].北京:北京工业大学,2015.
HUANG Jingqi. Study on Nonlinear Seismic Response of Rock Tunnels[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [14] 杜修力,李洋,赵密,等.下卧刚性基岩条件下场地土-结构体系地震反应分析方法研究[J].工程力学,2017,34(5):52-59.

DU Xiuli,LI Yang,ZHAO Mi,et al.Seismic Response Analysis Method for Soil-Structure Interaction System of Underlying Rigid Rock Base Soil Condition[J].Engineering Mechanics,2017,34(5):52-59.

[15] Zienkiewicz O C,Chan A H C,Pastor M,et al.Computational Geomechanic with Special Reference to Earthquake Engineering[M].Chichester:Wiley,1999.

[16] 同济大学.地下铁道建筑结构抗震设计规范:DG/TJ08-2064-2009[S].上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2009. Tongji University.Code for Seismic Design of Subway Structures:DG/TJ08-2064-2009[S].Shanghai:Shanghai Construction Building Materials Market Management Station,2009.

(上接第 839 页)

LI Yurun,ZHANG (Zhong) (LeYue),WEI Xing,et al. Research on Lateral Dynamic Responses of Pile Foundations by Using FBG Sensing System[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2013,33(2):185-191.

[12] 李雨润,张玉彬,潘鑫鑫.基于 FLAC^{3D}群桩侧向动力特性试验与数值模拟对比研究[J].地震工程与工程振动,2016,36(3): 33-39.

LI Yurun ZHANG Yubin PAN Xinxin.Test and Numerical Simulation Comparative Study for Lateral Dynamic Characteristics of Group-Pile Foundation Based on FLAC^{3D}[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2016,36(3): 33-39.

[13] 李程程,曹振中,李瑞山,等.场地液化侧移等级判别标准及其可靠性分析[J].岩土工程学报,2016,38(9):1668-1677.

LI Chengcheng,CAO Zhenzhong,LI Ruishan,et al. Assessment Criterion for Level of Liquefaction-Induced Lateral Spread and Its Reliability Analysis[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(9):1668-1677.

[14] 倪克闯.成层土中桩基与复合地基地震作用下工作性状振动台试验研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2013.

NI Kechuang.Shaking Table Test of Pile and Composite Foundations' Dynamic Behavior in Layered Soils Subjected to Earthquake Excitation[D].Beijing: China Academy of Building Research,2013.

[15] 姜忻良,徐炳伟,李竹.土-桩-结构振动台模型试验相似理论及其实施[J].振动工程学报,2010,23(2):225-229.

JIANG Xinliang,XU Bingwei,LI Zhu.Similitude Laws and Its Application in Shaking Table Test of Soil-Pile-Structure Interaction System[J].Journal of Vibration Engineering,2010,23 (2):225-229.