

Rayleigh波入射下波纹钢管廊动力响应研究

翁吉辉^{1,2}, 李永红^{1,2*}

(1. 中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙 410004;

2. 中南林业科技大学 工程流变学湖南省重点实验室, 长沙 410004)

摘要: 为研究浅埋波纹钢管廊在 Rayleigh波作用下的动力响应特点,在 ANSYS 软件中建立土-结相互作用有限元模型进行动力分析。推导近似 Rayleigh波场后采用基于黏弹性边界的 Rayleigh波输入法,模拟 Rayleigh波在土体中的传播过程,并通过一个算例来验证该方法的可靠性。进行一系列非线性时程分析,重点研究综合管廊在不同的输入激励波作用下的加速度、变形和应力等动力响应规律。研究表明:管廊结构的动力响应与输入激励波的强度呈明显的正相关;以管廊结构的竖向对称轴为分界线,靠近 Rayleigh波入射点一侧的结构加速度以竖向加速度为主,另一侧以水平加速度为主,但是也可能出现竖向加速度较大的情况;在大震作用下,管廊的变形和峰值应力依旧比较小,表现出较好的抗震性能。研究结果可为波纹钢管廊的抗震设计和工程应用提供依据。

关键词: 综合管廊; 钢波纹管; Rayleigh波; 土-结相互作用; 非线性时程分析; 黏弹性边界

中图分类号: TU325.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0076-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231017002

Study on Seismic Response of Corrugated Steel Utility Tunnels Under the Effect of Rayleigh Wave Incidence

WENG Jihui^{1,2}, LI Yonghong^{1,2*}

(1. College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Province Key Labs of Engineering Rheology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

*Corresponding author: lyhlyh0208@163.com

Abstract: A finite element model of soil-structure interaction is implemented in ANSYS to investigate the dynamic response characteristics of a shallowly buried corrugated steel utility tunnel subjected to Rayleigh waves. This paper derives the approximate Rayleigh wave field. The Rayleigh wave input method based on the viscoelastic boundary is utilized to simulate the propagation of Rayleigh wave in soil. The method's dependability is verified through an arithmetic example. The critical content of this paper is the dynamic response characteristics of acceleration, deformation and stress of the utility tunnel under different input excitation waves, which are obtained from a series of nonlinear time-history analyses. The findings indicate a positive correlation between the dynamic response of the utility tunnel and the intensity of the input excitation wave. When considering the

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 湖南省自然科学基金(2018JJ3867)

作者简介:

翁吉辉(1999—),男,硕士研究生,主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: wengjihui_zstu@163.com。

通信作者:

李永红(1979—),女,博士,副教授,主要从事实时计算方法方面的研究。E-mail: lyhlyh0208@163.com。

vertical symmetry axis of the utility tunnel as the dividing line, the acceleration near the incident point of the Rayleigh wave is primarily influenced by vertical acceleration, while horizontal acceleration dominates on the opposite side. However, there may be exceptions where vertical acceleration is more significant. Despite the impact of a strong earthquake, the deformation and peak stress of the utility tunnel is still minimal, demonstrating its exceptional seismic performance. The findings above serve as a foundation for the computation of seismic design and the practical implementation of corrugated steel utility tunnels in engineering.

Keywords: utility tunnel; corrugated steel; Rayleigh wave; soil-structure interaction; nonlinear time-history analyze; viscoelastic boundary

在地震观测中,随着时间变化向整个弹性空间传播的波统称为体波。从能量意义上来说,还存在一种只分布在分界面附近的波,统称为面波^[1]。面波中最具代表性的就是 Rayleigh 波,由英国物理学家 John William Strutt 于 1885 年首次发现。Rayleigh 波是当 SV 波大于临界角入射时,转换波 P 波和 SV 波相互干涉而形成的。Rayleigh 波的特点是它主要在自由表面传播,且振幅随着深度的增加呈指数衰减。相关研究表明^[2],Rayleigh 波占地震总输入能量的 67.3%,结合其在自由表面传播的特点,Rayleigh 波可能会成为浅埋结构动力响应的控制因素。

综合管廊作为一种浅埋地下结构,在城市建设中具有重要的作用,是城市生命线工程^[3],因此研究其抗震性能具有重要意义。岳庆霞等^[4]首次提出了近似 Rayleigh 波场的概念,研究了 Rayleigh 波沿综合管廊纵向入射时管廊的响应;庄鑫磊^[5]研究了 Rayleigh 波沿综合管廊横向入射时管廊的响应;基于岳庆霞等^[4]的研究成果,罗韬^[6]利用小波变换的多尺度技术对地震波进行了低频重构,进而得到 Rayleigh 波场;施有志等^[7-8]通过边界脉冲荷载生成 Rayleigh 波,研究了综合管廊的动力响应特征。已有研究均围绕钢筋混凝土综合管廊展开,故目前对此类结构在 Rayleigh 波作用下的破坏机理已有基本的认识。相较于钢筋混凝土结构,波纹钢管作为一种新型结构,不仅强度高、柔性好,应用于管廊建设时还具有施工快捷和无需养护等诸多优势,但目前对其抗震性能的认识还不够充分。尽管岳峰等^[9-10]针对波纹钢管廊开展了一系列振动台缩尺模型试验,但总体而言对于波纹钢管廊抗震性能的研究依旧较少,有必要开展进一步的研究。

波纹钢管廊因具有浅埋的特性, Rayleigh 波对其产生的影响不容忽视,本文利用 ANSYS 软件建立二维平面应变有限元模型,对波纹钢管廊在 Rayleigh 波作用下的动力响应进行分析。

1 Rayleigh 波输入方法

在已有的研究中,对于 Rayleigh 波场的数值模拟建立有以下方法^[11]:直接模拟法、等效荷载法、近似波场法

和地表激振法。本文采用刘晶波等^[12]提出的基于黏弹性边界的 Rayleigh 波输入法,将波动转化为作用在人工边界上的等效荷载。

1.1 Rayleigh 波场

就 Rayleigh 波的研究而言,均匀弹性半空间平面应变问题是最为简单的情况,同时它也是研究其他复杂问题的基础。本节基于该问题对 Rayleigh 波场进行求解, Rayleigh 波沿 x 轴正方向传播,如图 1 所示。

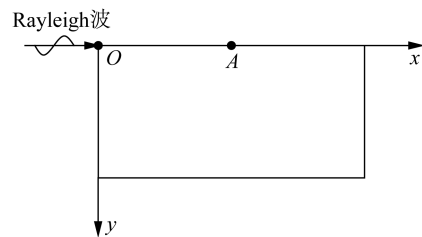


图 1 Rayleigh 波场平面应变模型

Fig. 1 Plane strain model of Rayleigh wave field

在图 1 的均匀弹性半空间中, x - y 二维平面内的 Rayleigh 波动方程为:

$$(\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} \right) + G \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$(\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + G \nabla^2 u_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中: λ 为拉梅常数; G 为剪切模量; u_x 为水平位移; u_y 为竖向位移; ρ 为介质密度; t 为时间。

引入势函数 φ 和 ψ , 势函数和位移函数的关系为:

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (3)$$

$$u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

将式(3)~(4)代入式(1)~(2)中,波动方程可化简为:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c_p^2 \nabla^2 \varphi \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c_s^2 \nabla^2 \psi \quad (6)$$

式中: c_p 为压缩波速; c_s 为剪切波速。

根据自由表面的边界条件以及位移在 $y \rightarrow \infty$ 时趋近于0的条件,式(5)~(6)的解可以写成通用的形式如下:

$$\varphi = A \exp[-aky + ik(x - ct)] \quad (7)$$

$$\varphi = B \exp[-bky + ik(x - ct)] \quad (8)$$

其中:

$$k = \omega/c \quad (9)$$

$$a^2 = 1 - c^2/c_p^2 \quad (10)$$

$$b^2 = 1 - c^2/c_s^2 \quad (11)$$

$$\left(1 - \frac{c^2}{c_s^2}\right)^2 = 4 \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_s^2}} \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_p^2}} \quad (12)$$

式中: A 和 B 为波的幅值参数; k 为波数; c 为 Rayleigh 波波速。

Rayleigh 波的波速方程如式(12)所示,其解可以近似表示为:

$$c \approx \frac{0.862 + 1.14\mu}{1 + \mu} c_s \quad (13)$$

式中: μ 为泊松比。

将式(7)、(8)代入式(3)、(4),结合自由表面的应力边界条件,并取实部,即可得到 Rayleigh 波场的位移表达式如下:

$$u_x = -Ak \left[\exp(-aky) - \frac{1+b^2}{2} \exp(-bky) \right] \cdot \sin[k(x - ct)] \quad (14)$$

$$u_y = Ak \left[-a \exp(-aky) + \frac{1+b^2}{2b} \exp(-bky) \right] \cdot \cos[k(x - ct)] \quad (15)$$

事实上,式(14)、(15)得到的是简谐 Rayleigh 波的表达式,而实际的波动则是由多个简谐波叠加而成的。故对于一般的 Rayleigh 波,其波场可以写成叠加的形式如下:

$$u_x = \sum_{n=1}^N -A_n k_n \left[\exp(-ak_n y) - \frac{1+b^2}{2} \exp(-bk_n y) \right] \cdot \sin[k_n(x - ct)] \quad (16)$$

$$u_y = \sum_{n=1}^N A_n k_n \left[-a \exp(-ak_n y) + \frac{1+b^2}{2b} \exp(-bk_n y) \right] \cdot \cos[k_n(x - ct)] \quad (17)$$

式中: A_n 为波的幅值参数; n 为采样点的序号; k_n 为波数, $k_n = \omega_n/c$, $\omega_n = n\pi/T$, T 为地震波的持续时间, ω_n 为圆频率。

现假设已知坐标原点的水平位移时程 $g(t)$,将原点坐标(0,0)代入式(16),即可得到:

$$g(t) = \sum_{n=1}^N A_n k_n \frac{1-b^2}{2} \sin(\omega_n t) \quad (18)$$

式中: N 为采样点的个数。

对式(18)进行离散正弦变换就能得到 $A_n k_n$,从而可以得到左边界 $x=0$ 处的位移如下:

$$u_x(0, y, t) = \sum_{n=1}^N A_n k_n \left[\exp(-ak_n y) - \frac{1+b^2}{2} \exp(-bk_n y) \right] \sin(\omega_n t) \quad (19)$$

$$u_y(0, y, t) = \sum_{n=1}^N A_n k_n \left[-a \exp(-ak_n y) + \frac{1+b^2}{2b} \exp(-bk_n y) \right] \cos(\omega_n t) \quad (20)$$

$x=0$ 处的位移可通过式(19)~(20)直接计算得到,也可对式(19)~(20)分别做离散逆正弦变换和离散逆余弦变换得到。考虑平面内任意一点 (x, y) 到 $(0, y)$ 处的水平距离以及由此引起的波动滞后,利用行波法即可求得 Rayleigh 波场。

1.2 人工边界及等效荷载

通过在边界节点上设置法向和切向的弹簧-阻尼器来施加黏弹性边界^[13],弹簧刚度和阻尼系数按式(21)~(22)取值。

$$\begin{cases} K_{BN} = \alpha_{BN} \frac{G}{R} \\ C_{BN} = \rho c_p \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} K_{BT} = \alpha_{BT} \frac{G}{R} \\ C_{BT} = \rho c_s \end{cases} \quad (22)$$

式中: K_{BN} 为法向弹簧刚度; K_{BT} 为切向弹簧刚度; α_{BN} 和 α_{BT} 为系数, $\alpha_{BN}=2.0$, $\alpha_{BT}=1.5$; G 和 ρ 分别为剪切模量和介质密度; R 为散射波源至人工边界点的距离。

将 Rayleigh 波场代入几何方程和物理方程,就可以得到 Rayleigh 波引起的单元应力,进而可以求出等效荷载,等效荷载的具体表达式如下:

在与 y 轴垂直的底边界上:

$$\begin{cases} F_H = K_{BT} u_x + C_{BT} v_x + \tau_{yx} \sum A_i \\ F_V = K_{BN} u_y + C_{BN} v_y + \sigma_y \sum A_i \end{cases} \quad (23)$$

在与 x 轴垂直的左侧边界上:

$$\begin{cases} F_H = K_{BN} u_x + C_{BN} v_x - \sigma_x \sum A_i \\ F_V = K_{BT} u_y + C_{BT} v_y - \tau_{xy} \sum A_i \end{cases} \quad (24)$$

式中: F_H 和 F_V 为水平方向和竖直方向的等效荷载; C_{BN} 为法向阻尼系数; C_{BT} 为切向阻尼系数; v_x 为水平速度; v_y 为竖向速度; σ_x 和 σ_y 为对应边界上的正应力; τ_{xy} 和 τ_{yx} 为

对应边界上的切应力; $\sum A_i$ 为边界节点的控制面积。

以上所有过程均通过编写 Matlab 程序完成。将等效荷载时程数据导入到 ANSYS 软件中, 再通过命令流依次施加到各个边界节点上。

2 算例验证

假定图 1 中的弹性半空间由土介质组成, $\rho = 1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_s = 1715 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\mu = 0.25$ 。计算范围为 $0 \leq x \leq 800 \text{ m}$, $0 \leq y \leq 400 \text{ m}$, 网格尺寸为 $\Delta x = \Delta y = 16 \text{ m}$, 采用二维集中黏弹性人工边界。从原点入射的 Rayleigh 波采用如式(25)所示的 δ 函数的有限差分近似。

$$\begin{cases} u(\tau) = 16 \left[G_4(\tau) - 4G_4\left(\tau - \frac{1}{4}\right) + 6G_4\left(\tau - \frac{1}{2}\right) - 4G_4\left(\tau - \frac{3}{4}\right) + G_4(\tau - 1) \right] \\ G_4(\tau) = \tau^3 H(\tau), \tau = \frac{\hat{t}}{\hat{T}} n \end{cases} \quad (25)$$

式中: \hat{T} 为脉冲持时; \hat{t} 为时间步长; $H(\tau)$ 为 Heaviside 函数。

在模型顶部取与原点 O 相距 400 m 的点 A 作为观测点, 将数值解与理论解进行对比, 结果如图 2 所示。可以看出, 观测点的位移与解析解的吻合程度良好, 表明了场求解与等效荷载计算的准确性。

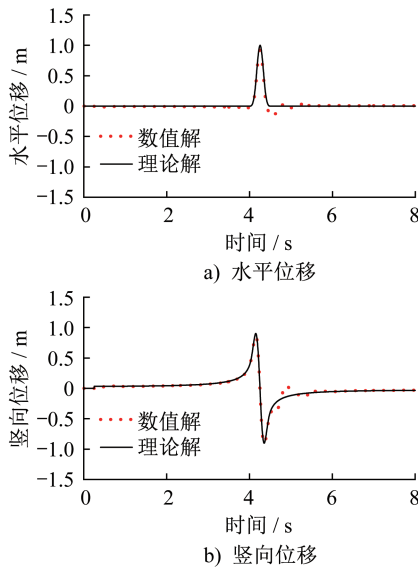


图 2 测点位移时程

Fig. 2 Displacement time-history curves of monitoring points

3 计算模型

管廊的有限元模型为外径为 4 m 的圆环, 壁厚为 6 mm , 采用理想的弹塑性本构模型, 材料选用 Q235 钢, 重力密度为 $78.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊

松比为 0.3 。土体尺寸为 $30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$, 覆土深度为 1.5 m , 选用 Mohr-Coulomb 本构模型, 可以较好地模拟土体的动力特性^[14-16], 土体的各项参数为: 重度为 $17.7 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量 $E = 20 \text{ MPa}$, 内摩擦角为 27.9° , 黏聚力为 24.4 kPa , 泊松比为 0.3 。

波纹钢管廊的三维模型如图 3a) 所示, 由于管廊属于长线形的浅埋地下结构, 在横向地震波作用下其纵向响应可以忽略, 故可将其简化为平面应变模型。曾有不少学者做过类似的简化^[16-17], 并与试验结果或现场实测数据进行对比, 验证了其合理性。

考虑土-结相互作用, 在管廊和土体之间建立接触, 认为二者产生相对滑移, 法向不考虑脱离, 切向采用库伦摩擦模型, 摩擦系数为 0.4 。不考虑地下水和砂土液化的影响。

为保证高频波动能够通过, 根据相关研究^[18], 模型的网格尺寸取为 0.3 m , 如图 3b) 所示。

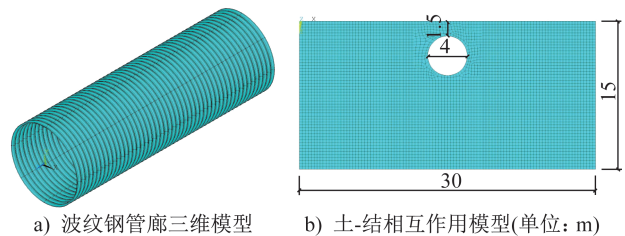


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

模型两侧设置切向约束, 底部设置固定约束, 对模型进行模态分析, 提取前 2 阶自振频率计算 Rayleigh 阻尼, 阻尼比取 0.05 。

选用 El Centro 波、Taft 波以及一条人工波作为输入波。输入波的峰值加速度分别为 $0.125g, 0.220g, 0.400g, 0.620g$ 。经基线校正和低通滤波后, 为保证在计算 Rayleigh 波场时有足够高的精度, 还需在原点处的水平位移时程曲线两端人为增加一些零点^[19]。输入波的峰值加速度为 $0.220g$ 时原点处的水平位移时程如图 4 所示。

本文对地震响应的分析包括管廊的应力、加速度和位移。模型中各测点的位置如图 5 所示。

4 结果分析

4.1 管廊加速度

各种加载工况下管廊的加速度响应如表 1 所示, 可得:

- (1) 随着输入激励波峰值加速度的增加, 管廊的峰值加速度也呈增加的趋势。
- (2) 测点 AS-2 处的水平加速度峰值普遍比测点 AS-1 处的水平加速度峰值大, 测点 AS-1 处的竖向加速度峰值

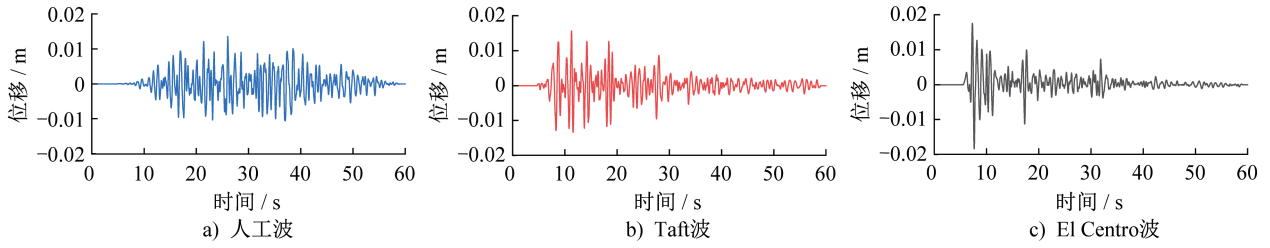


图4 原点的水平位移时程(0.220g)

Fig. 4 Horizontal displacement time-history curves of incident point (0.220g)

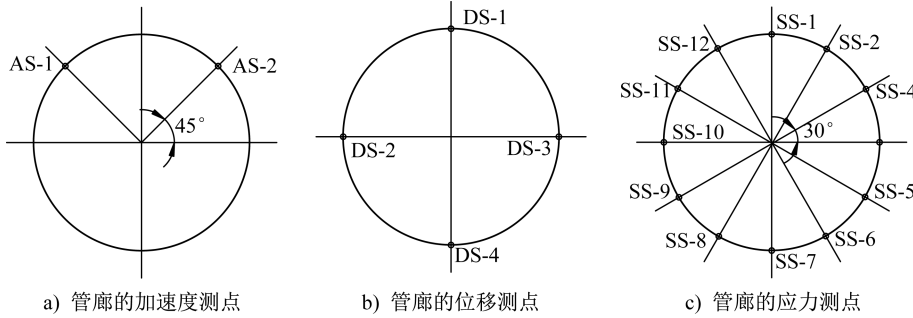


图5 各测点布置

Fig. 5 Arrangement of monitoring points

表1 Rayleigh波入射时管廊的加速度峰值

Table 1 Peak acceleration of utility tunnel under incidence of Rayleigh wave

m·s⁻²

加载工况	水平加速度				竖向加速度				
	测点 AS-1		测点 AS-2		测点 AS-1		测点 AS-2		
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	
El Centro 波	0.125g	0.749	-0.687	0.995	-0.600	1.234	-1.571	0.929	-0.647
	0.220g	1.317	-1.209	1.751	-1.057	2.172	-2.765	1.635	-1.139
	0.400g	2.395	-2.198	3.184	-1.922	3.950	-5.028	2.972	-2.071
	0.620g	3.713	-3.406	4.935	-2.978	6.122	-7.793	4.606	-3.210
Taft 波	0.125g	0.730	-0.747	0.680	-0.768	1.631	-1.581	0.954	-0.657
	0.220g	1.284	-1.315	1.196	-1.352	2.870	-2.783	1.679	-1.156
	0.400g	2.335	-2.391	2.175	-2.458	5.218	-5.060	3.053	-2.102
	0.620g	3.619	-3.706	3.372	-3.811	8.088	-7.842	4.732	-3.257
人工波	0.125g	0.730	-0.638	0.656	-0.821	1.422	-1.385	0.545	-0.681
	0.220g	1.285	-1.124	1.155	-1.445	2.503	-2.438	0.960	-1.198
	0.400g	2.336	-2.043	2.101	-2.628	4.550	-4.432	1.745	-2.178
	0.620g	3.621	-3.166	3.256	-4.074	7.053	-6.870	2.705	-3.376

普遍比测点 AS-2 处的的竖向加速度峰值大。

(3) Rayleigh波作用下,测点 AS-1 处的竖向加速度峰值普遍大于水平加速度,并且水平加速度多数情况下小于入射加速度;测点 AS-2 处的水平加速度峰值普遍大于竖向加速度,但是 Taft波作用下结构的加速度响应出现特例,测点 AS-2 处的竖向加速度峰值大于水平加速度。

以管廊结构的竖向对称轴为分界线,靠近 Rayleigh波入射点一侧的结构加速度以竖向加速度为主,另一侧以水平加速度为主,但是也可能出现竖向加速度较大的情况。此处以 Taft波(峰值加速度为 0.220g)入射为例,比较测点 AS-1 与 AS-2 处水平及竖向加速度的傅里叶谱。谱差值曲线由测点 AS-1 处的加速度傅里叶谱值与测点 AS-2 处的加速度傅里叶谱值作差获得,如图 6 所示。

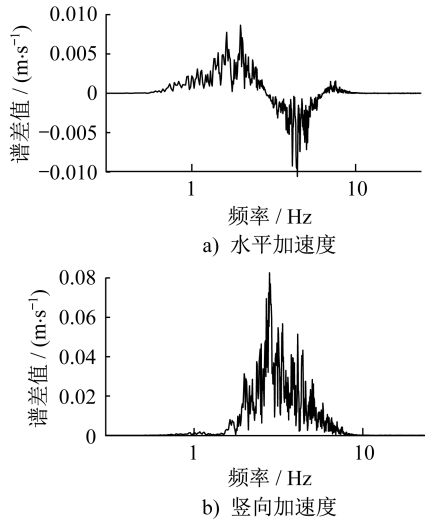


图6 Taft波(0.220g)入射时管廊的加速度谱差值
Fig. 6 Difference of fourier acceleration spectra of utility tunnel under Taft wave incidence (0.220g)

水平加速度的谱差值曲线有双峰的特点,在0.45 Hz到2.83 Hz频段内谱差值大于0,说明测点AS-1处主要受此频段水平地震动的影响,在2.85 Hz到6.33 Hz频段内谱差值小于0,说明测点AS-2处主要受此频段水平地震动的影响。在频率小于0.55 Hz的低频部分谱差值很小,几乎为0。从全频段看,谱差峰值为 $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应频率为4.42 Hz。

从竖向加速度谱差值曲线中可以看出,在1.97 Hz到5.10 Hz频段内谱差值较大,说明地下结构中靠近Rayleigh波入射点的一侧受该频段竖向地震动的影响相对于另一侧来说较大。在频率小于1.52 Hz的相对低频部分差值很小,几乎为0。从全频段看,最大谱差值为 $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应频率为2.80 Hz。

4.2 管廊位移

管廊的变形参数示意如图7a)所示,本文以拉伸为正,压缩为负。从图7b)~d)中可以看出,随着输入激励波峰值加速度的增加,管廊水平和竖直方向上的变形量也在逐渐增加;从变形峰值的角度来看,管廊结构在El Centro波激励下的变形峰值普遍大于相同峰值加速度下Taft波和人工波激励产生的变形。若输入激励波为El Centro波和Taft波,水平拉伸量 L_4 始终不小于竖向拉伸量 L_2 ,但竖向压缩量 L_1 始终大于水平压缩量 L_3 ;当输入激励波为人工波时, L_2 不小于 L_4 且 L_1 不小于 L_3 。当El Centro波入射且峰值加速度为0.620g时,管廊的变形量达到最大,其竖向压缩量为31 mm,即结构的变形与管廊直径之比为0.775%。

目前我国尚无针对波纹钢管廊的抗震设计规范,对于管廊结构变形的允许范围只能参考现有规范中类似的

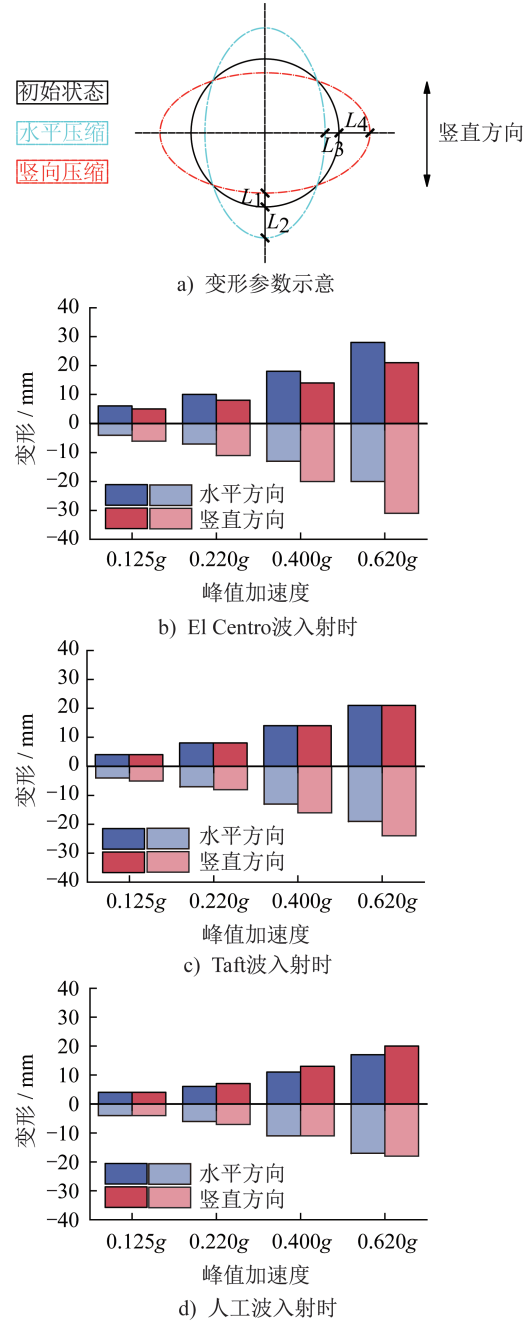


图7 管廊的变形响应

Fig. 7 Deformation responses of utility tunnels

规定。根据《公路波纹钢管(板)桥涵设计与施工规范》(DB15/T 654—2021)^[20]中的规定,波纹钢管桥涵在静载作用下的最大变形率应小于5%。

根据以上讨论可发现,即使在大震作用下,管廊的变形依旧比较小,可以满足规范的要求。

4.3 管廊应力

Rayleigh波以不同的峰值加速度入射时,管廊结构上各观测点的Von Mises应力峰值变化规律如图8所示。

由图8可知,管廊结构的应力与输入激励波的强度呈明显的正相关,即峰值加速度越大,管廊的应力越大;

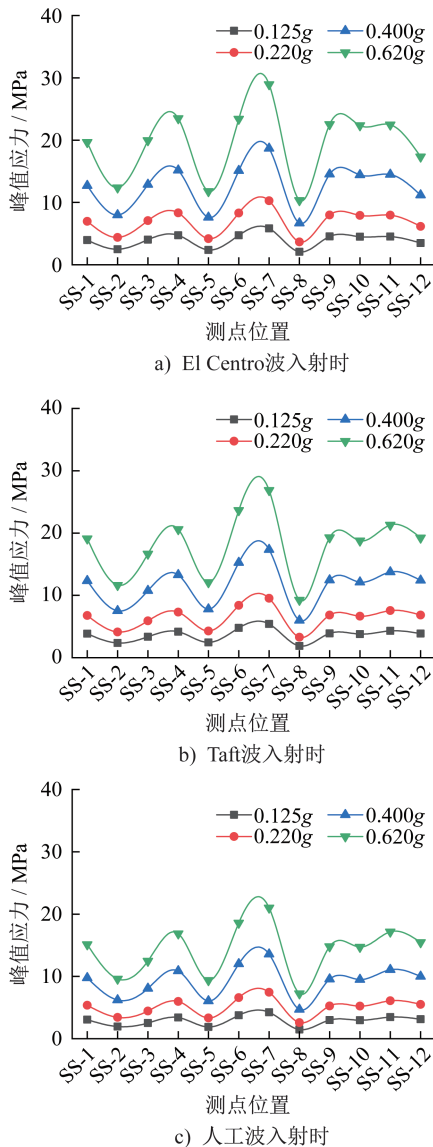


图8 Rayleigh波入射时管廊的峰值应力分布

Fig. 8 Peak stress distribution of utility tunnel under Rayleigh wave incidence

从峰值应力的角度来看,管廊结构在El Centro波激励下的峰值应力普遍大于相同峰值加速度下Taft波和人工波激励产生的峰值应力。管廊结构上各观测点应力增幅的变化规律基本一致,以管顶测点SS-1在人工波激励下产生的应力为例,当峰值加速度为0.125g时应力为3.050 MPa,峰值加速度为0.620g时应力为15.129 MPa,增幅为396%,这与入射加速度的增幅相吻合。同时,管底测点SS-7是整个管廊结构的应力最大点,因此尽管各观测点的应力增幅相同,但管底处应力的绝对增量大于其他观测点的绝对增量,表明Rayleigh波入射下,管底的受力状态对输入激励波的强度最为敏感。这主要是因为Rayleigh波在地表以垂直运动为主,对管廊的竖向位移和变形有较大的影响,而管底受到底部土体的约束,变形

的空间有限,进而导致此处的应力水平高于其他位置的应力水平。当输入激励波为El Centro波且峰值加速度为0.620g时,管底处的应力为28.984 MPa,可见此时管廊依旧处于弹性阶段(Q235钢的屈服应力为235 MPa),说明即使是在大震中,管廊破坏的可能性也非常小,具有较好的抗震性能。

5 结论

推导近似Rayleigh波场后采用基于黏弹性边界的Rayleigh波输入法,模拟Rayleigh波在土体中的传播过程,并通过一个算例验证了该方法的可靠性。在ANSYS软件中建立二维平面应变模型,研究在面波作用下管廊的动力响应,主要结论如下:

(1) 本文利用平面应变模型对波纹钢管廊进行动力时程分析,发现管廊的加速度响应与输入激励波的强度呈明显的正相关;以管廊结构的竖向对称轴为分界线,靠近Rayleigh波入射点一侧的结构加速度以竖向加速度为主,另一侧以水平加速度为主,但是也可能出现竖向加速度较大的情况。

(2) 波纹钢管廊可以通过一定程度的变形来耗散地震波的能量,且最大变形率不超过1%,并且钢波纹管还不用考虑开裂的问题,相较于钢筋混凝土管廊更有优势。

(3) Rayleigh波入射时,管底处的应力水平要高于其他位置的应力水平;即使是在9度罕遇的地震激励作用下管廊依旧处于弹性阶段,说明其具有较好的抗震性能,可以较好地保护内置的管线。

参考文献:

- [1] 尹成,田继东.弹性波动力学简明教程[M].北京:石油工业出版社,2014:113-114.
YIN Cheng, TIAN Jidong. A concise course in elastic wave dynamics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 113-114. (in Chinese)
- [2] MILLER G F, PURSEY H. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid [J]. Proceeding of Royal Society, 1955, A (233) : 55-69. DOI: 10.1098/rspa.1955.0245.
- [3] 钱七虎.建设城市地下综合管廊,转变城市发展方式[J].隧道建设,2017,37(6):647-654. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.06.001.
QIAN Qihu. To transform way of urban development by constructing underground utility tunnel [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (6) : 647-654. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.06.001. (in Chinese)
- [4] 岳庆霞,李杰.近似Rayleigh地震波作用下地下综合管廊响应分析[J].防灾减灾工程学报,2008,28(4):409-416. DOI:

- 10.3969/j.issn.1672-2132.2008.04.002.
- YUE Qingxia, LI Jie. Response analysis of utility tunnel in earthquake of approximate Rayleigh waves [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 409-416. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2008.04.002. (in Chinese)
- [5] 庄鑫磊. Rayleigh波作用下综合管廊地震响应分析[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- ZHUANG Xinlei. Seismic response analysis of utility tunnel under Rayleigh waves [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [6] 罗韬. 基于小波变换的Rayleigh地震波及地下综合管廊地震响应研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- LUO Tao. Rayleigh wave research based on wavelet transform and response of the utility tunnel [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [7] 施有志, 孙爱琴, 林树枝, 等. Rayleigh波作用下地下综合管廊动力响应三维数值分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(4): 196-210.
- SHI Youzhi, SUN Aiqin, LIN Shuzhi, et al. Three dimensional (3D) numerical analysis of dynamic response of underground utility tunnels to Rayleigh wave effects [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(4): 196-210. (in Chinese)
- [8] 施有志, 华建兵, 阮建凑, 等. 地下综合管廊地震动力响应三维数值分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 785-793. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-163.
- SHI Youzhi, HUA Jianbing, RUAN Jiancou, et al. Three dimensional numerical analysis of dynamic response of underground utility tunnels during earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 785-793. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-163. (in Chinese)
- [9] 岳峰, 刘博文, 廖凯, 等. 非液化场地和可液化场地中预制装配式钢制波纹管综合管廊抗震性能振动台试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(2): 105-110. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.011.
- YUE Feng, LIU Bowen, LIAO Kai, et al. Shaking table test study on prefabricated corrugated steel utility tunnels on non-liquefiable and liquefiable ground [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(2): 105-110. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.011. (in Chinese)
- [10] YUE F, LIU B W, ZHU B, et al. Shaking table investigations on seismic performance of prefabricated corrugated steel utility tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 105: 103579. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103579.
- [11] 白建方, 马立龙. Rayleigh波场的数值模拟及其应用[J]. 震灾防御技术, 2019, 14(2): 328-340.
- BAI Jianfang, MA Lilong. Numerical modeling techniques of Rayleigh wave field and its application [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(2): 328-340. (in Chinese)
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.10.025.
- LIU Jingbo, LI Bin. Dynamic response analysis of underground structures during propagation of Rayleigh waves [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 132-135, 131. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.10.025. (in Chinese)
- [13] 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, 31(3): 55-64.
- LIU Jingbo, LYU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64. (in Chinese)
- [14] 岳峰, 陈守一, 刘博文, 等. 预制装配式钢制波纹管地下综合管廊抗震计算方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(2): 111-120. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.012.
- YUE Feng, CHEN Shouyi, LIU Bowen, et al. Seismic calculation method of shallow-buried prefabricated corrugated steel utility tunnels [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(2): 111-120. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.012. (in Chinese)
- [15] 谷音, 邱诗榕, 熊梦婷. 地下综合管廊地震响应与地震动强度指标的相关性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 22-37. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.05.22.guy.003.
- GU Yin, QIU Shirong, XIONG Mengting. Study on the correlation between ground motion intensity indexes and seismic response of underground utility tunnel [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 22-37. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.05.22.guy.003. (in Chinese)
- [16] 陈守一. 浅埋钢波纹管城市综合管廊土-钢组合结构抗震性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- CHEN Shouyi. Research on the seismic performances of shallow-buried corrugated steel utility tunnels soil-steel composite structures [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
- [17] 王振. 覆土波纹管涵刚柔性的对比试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- WANG Zhen. Comparative experiment and study on rigidity and flexibility of buried corrugated steel pipe culverts [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [18] 廖振鹏, 刘晶波. 离散网格中的弹性波动(I) [J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(2): 1-16. DOI: 10.13197/j.eeev.1986.02.001.
- LIAO Zhenpeng, LIU Jingbo. Elastic wave motion in discrete grids [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, 6(2): 1-16. DOI: 10.13197/j.eeev.1986.02.001. (in Chinese)