

车辆荷载对软土地区海底沉管隧道的影响分析^①

魏 纲¹, 苏勤卫²

(1. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:假定软土地区海底沉管隧道地基土为 Kelvin 模型, 车辆荷载是随时间变化的波动荷载形式, 引入黏弹性地基梁模型, 利用模态叠加法给出三种情况下沉管隧道的竖向位移、弯矩和地基反力的解答。结合天津海河沉管隧道工程实例, 分析车辆速度、地基土模量对沉管隧道竖向位移及弯矩的影响。研究表明: 车辆荷载引起的管段中点振动振幅达 5 mm 左右, 振动周期为 0.25 s; 引起的管段中点弯矩为 15 500 kN·m 左右, 且车速越大, 管段振动一个周期所需时间越短, 振动越剧烈, 但对振动幅度及弯矩影响不大; 地基土模量越大, 振动幅度和弯矩越小, 但对周期影响不大。

关键词: Kelvin 模型; 沉管隧道; 车辆荷载; 位移; 弯矩

中图分类号: U459.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0094-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0094

Analysis of the Impact of Vehicle Loads on Submerged Tunnels in Areas of Soft Soil

WEI Gang¹, SU Qin-wei²

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

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: As unique underground structures, submerged tube tunnels have been subject to vehicle loads for long periods of time. As the loads change, the underwater tunnel will show cyclical changes in displacement, bending moment, and ground reaction force. These periodic changes represent a significant potential threat to the integrity of tunnel structures. The purpose of this study was to assess the impacts of vehicle load on those tunnels. The modal superposition method was used to analyze three characteristics of vertical displacement, bending moment, and ground reaction force in underwater tunnels. In this method, two conditions were assumed: (1) the underwater tunnel in soft soil areas is the foundation of the Kelvin model, and (2) vehicle loading is the fluctuation of load form changing with time. The impact of vehicle speed and the foundation soil modulus on the tunnel's vertical displacement and bending moment was analyzed. Using the Beam-On-Elastic-Foundation (BOEF) model, combined with data from the Tianjin Haihe River tunnel engineering, the results of the analysis showed that: (1) the midpoint pipe vibration amplitude induced by vehicle loads was up to 5 mm, the midpoint pipe bending moment was approximately 15 500 kN·m, and the vibration cycle was 0.25 s; (2) the higher the vehicle speed, the shorter the pipe vibration cycle time, the more intense the vibration, and the lower the effect on amplitude; and, (3) the greater the modulus of foundation soils, the smaller the amplitude of vibration and bending moment,

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51178428); 浙江省自然科学基金项目(LZ12E08001); 浙江省本科院校中青年学科带头人学术攀登项目(编号: pd2013454)

作者简介: 魏 纲(1977—), 男(汉族), 浙江杭州人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地下隧道施工对周边环境影响及风险评估与控制等方面的研究. E-mail: weig@zucc.edu.cn

and the lower the effect on the cycle.

Key words: Kelvin model; submerged tube tunnel; vehicle load; displacement; bending moment

0 引言

由于在经济、技术上的独特优点,尤其是水下连接和基础处理上的突破性进展,沉管隧道越来越受到工程界的青睐^[1]。然而作为一种特殊的地下建筑物,沉管隧道长期受到车辆荷载、波浪荷载等动荷载作用,管段随荷载的变化表现出位移、弯矩、地基反力的周期性变化。这种周期性变化对管段的安全存在非常大的潜在威胁。例如比利时的 Schelde 隧道由于受到潮汐作用,在管段中间有 10 mm 的振幅^[2]。目前在设计中对这类动荷载问题都处理为静荷载,然后分析沉管隧道受力、沉降^[3]。高峰等^[4]采用影响线的方法,按最不利情况加载,得到列车荷载对沉管隧道地基的最大反应值;朱合华等^[5]为了反映沉管结构的空间内力分布,采用墙单元和板壳单元建立沉管隧道的三维有限元分析模型,用水土分算原理确定沉管结构水土荷载,然后分析空间受力形态。刘建飞等^[6]从三维实体单元出发,对沉管隧道静力作用下的受力、位移进行模拟分析。上述分析方法均属于“化动为静”,只能得到最不利的结果,荷载变化引起的管段位移、受力的变化趋势并不能反映出来。

本文把 Kelvin 黏弹性简支欧拉梁模型^[7]引入到海底沉管隧道动力分析中,以车辆荷载为例,得到了沉管隧道在车辆荷载作用下的位移、弯矩和地基反力的动力解析解。

1 引用的模型及动力方程

海底沉管隧道动力分析简化模型见图 1,图中 x 为荷载作用位置; $\omega(x, t)$ 为管段挠度。

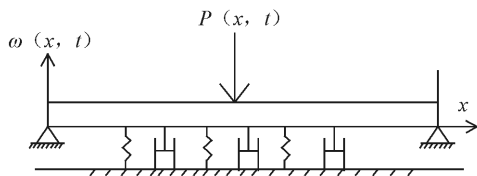


图 1 沉管隧道的 Kelvin 黏弹性地基梁动力分析模型图^[8]

Fig. 1 Kelvin dynamic analysis model of viscoelastic foundation beam of submerged tunnel^[8]

车辆荷载 $P(x, t)$ 采取随时间变化的波动荷载形式^[9],简化为:

$$P(x, t) = p + q_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t V}{12TL}\right) \quad (1)$$

式中: p 为恒载,大小为轮压; $q_{\max}$ 为车辆附加荷载的幅值; t 为时间, T 为荷载作用周期; L 为轮胎接触面积半径,一般取 15 cm; V 为车辆行驶速度。

海底沉管隧道在车辆荷载作用下的振动控制微分方程为:

$$EI \frac{\partial^4 \omega(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 \omega(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial t} + k \omega(x, t) = p + q_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t V}{12TL}\right) \quad (2)$$

式中: EI 为沉管管段刚度; m 为单位长度管段质量; c 为地基阻尼系数; k 为地基模量。

2 振动方程的求解

利用模态叠加法,设

$$\omega(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(x) Y_i(t) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),并化简可得^[10]:

$$EI \int_0^L \Phi_n(x) \frac{d^2}{dx^2} \left[\frac{d^2 \Phi_n(x)}{dx^2} \right] Y_n(t) dx + M_n \ddot{Y}_n(t) + c \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^L \Phi_n(x) \Phi_i(x) \dot{Y}_i(t) dx + k \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^L \Phi_n(x) \Phi_i(x) Y_i(t) dx = P_n(t) \quad (4)$$

笔者假设 $c = Am$, $k = Bm$,进一步化简为:

$$\ddot{Y}_n(t) + A \dot{Y}_n(t) + (\omega_n^2 + B) Y_n(t) = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad (5)$$

式中: ω_n 和 $Y_n(t)$ 分别表示第 n 阶固有频率和相应的广义坐标。 A, B 是 c, k 与质量 m 的关系系数。

梁的固有频率及相应的振型函数只与梁的边界条件有关,可通过求相同条件下的自由振动求解它们。利用复模态分析方法求解相应情况下自由振动的模态函数,推出固有频率解析式^[11]:

$$(i\omega)^2 + A(i\omega) + B - C = 0 \quad (6)$$

式中: $C = \frac{EI\lambda_n^4}{m}$,解得固有频率

$$\begin{cases} (i\omega_n)_1 = \frac{-A - \sqrt{A^2 - 4(B - C)}}{2} \\ (i\omega_n)_2 = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4(B - C)}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_n^2 = -\frac{2A^2 - 4(B - C) \pm 2A \sqrt{A^2 - 4(B - C)}}{4} \quad (8)$$

把振型函数 $\Phi(x) = C_n \sin \lambda_n x$ 代入广义质量和广义荷载的表达式中, 可得

$$\begin{cases} P_n(t) = \int_0^l \Phi_n(x) P(x, t) dx = \frac{2lC_n}{n\pi} P(x, t) \\ M_n = \int_0^l \Phi_n(x)^2 m dx = \frac{ml}{2} C_n \end{cases} \quad (9)$$

最后, 式(2)可化为:

$$\ddot{Y}_n(t) + A\dot{Y}_n(t) + (\omega_n^2 + B)Y_n(t) = \frac{4P(x, t)L}{n\pi M} \quad (10)$$

下面根据式(10)的特点分别进行讨论:

(1) $A^2 - 4(\omega_n^2 + B) > 0$ 时, 相应方程有两异实根, 此时梁的动力响应为:

$$\omega(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n e^{\frac{-A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + B_n e^{\frac{A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B}) \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (11)$$

将式(11)代入

$$M = -EI \left(\frac{d^2 \omega}{dx^2} \right) \quad (12)$$

相应条件下沉管隧道弯矩表达式为:

$$M = EI \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} (A_n e^{\frac{-A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + B_n e^{\frac{A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B}) \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (13)$$

又地基反力 $p = k\omega + c\dot{\omega}$, 得:

$$p = k \sum_{n=1}^{\infty} (A_n e^{\frac{-A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + B_n e^{\frac{A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B}) \sin \frac{n\pi}{l} x + c \frac{n\pi}{l} \sum_{n=1}^{\infty} (A_n e^{\frac{-A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + B_n e^{\frac{A + \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B}) \cos \frac{n\pi}{l} x \quad (14)$$

式中 $D = \frac{4P(x, t)}{mn\pi}$; A_n, B_n 为待定系数, 可以根据初始条件来确定, 假定初始条件为:

$$\begin{cases} \omega(x, 0) = \omega_0(x) \\ \dot{\omega}(x, 0) = v_0(x) \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)中各项展开成级数形式为

$$\begin{cases} \omega_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \sin \frac{n\pi x}{l} \\ v_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B'_n \sin \frac{n\pi x}{l} \end{cases}$$

$$\text{其中} \begin{cases} A'_n = \frac{2}{l} \int_0^l \omega_0(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx \\ B'_n = \frac{2}{l} \int_0^l v_0(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx \end{cases} \quad (16)$$

由方程两边对应项系数相等, 可求得 A_n, B_n 的值

$$A_n = A'_n + \frac{D}{\omega_n^2 + B} + \frac{(A'_n - \frac{D}{\omega_n^2 + B}) [\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)} - A] - 2B'_n}{2\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}} \quad (17)$$

$$B_n = \frac{(A'_n - \frac{D}{\omega_n^2 + B}) [\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)} - A] - 2B'_n}{2\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}} \quad (18)$$

(2) $A^2 - 4(\omega_n^2 + B) < 0$ 时, 相应方程有共轭复根, 此时梁的变形、弯矩、地基反力为:

$$\omega(x, t) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{\frac{A}{2} t} \left(A_n \cos \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t + B_n \sin \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t \right) + \frac{D}{\omega_n^2 + B} \right] \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (19)$$

$$M = EI \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{\frac{A}{2} t} \left(A_n \cos \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t + B_n \sin \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t \right) + \frac{D}{\omega_n^2 + B} \right] \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (20)$$

$$p = k \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{\frac{A}{2} t} \left(A_n \cos \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t + B_n \sin \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t \right) + \frac{D}{\omega_n^2 + B} \right] \sin \frac{n\pi}{l} x + c \frac{n\pi}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{\frac{A}{2} t} \left(A_n \cos \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t + B_n \sin \frac{\sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t \right) + \frac{D}{\omega_n^2 + B} \right] \cos \frac{n\pi}{l} x \quad (21)$$

同样利用初始条件可以解出系数。

(3) $A^2 - 4(\omega_n^2 + B) = 0$ 时, 相应方程有重根, 此时梁的变形、弯矩、地基反力为:

$$\omega(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [(A_n + B_n) e^{\frac{-A - \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B}] \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (22)$$

$$M = EI \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} [(A_n + B_n) e^{\frac{-A - \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B}] \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (23)$$

$$p = k \sum_{n=1}^{\infty} \left[(A_n + B_n) e^{\frac{-A - \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} + \frac{D}{\omega_n^2 + B} \right]$$
$$\sin \frac{n\pi}{l} x + c \frac{n\pi}{l} \sum_{n=1}^{\infty} [(A_n + B_n) e^{\frac{-A - \sqrt{A^2 - 4(\omega_n^2 + B)}}{2} t} +$$
$$\frac{D}{\omega_n^2 + B}] \cos \frac{n\pi}{l} x \tag{24}$$

同样利用初始条件可以解出系数。

3 工程实例分析

天津海河隧道处于滨海相软土地区,隧道全长 4.3 km,其中穿越海河 255 m 采用沉管法施工工艺,共有三个管节,每个管节长 85 m。管段宽度 36.6 m,高度 9.65 m,采用“两孔三管廊”结构,双向六车道设计,管段横断面见图 2。隧址范围内主要由:淤泥层、淤泥质土、黏土、粉土、粉砂、细砂等组成,隧道基底处于第Ⅱ~Ⅲ海相层上^[12]。

计算时取混凝土重度 $\gamma=2.5 \text{ t/m}^3$,弹性模量 $E=3.45 \times 10^{10} \text{ Pa}$;取地基模量 $k=0.26 \text{ MPa}$,地基阻力系数 $c=0.8$;取车速 $v=60 \text{ km/h}$,恒载 $p=0.7 \text{ MPa}$;车辆荷载 $P=(7 \times 10^5 + 1.4 \times 10^5 \sin^2 29.1^\circ t) \text{ Pa}$;管段质量 $m=3.275 \times 10^6 \text{ N/m}$,管段刚度 $EI=3.105 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。从而求出 $A=0, B=0.08 \text{ (m}^{-1}\text{)}, C=0.22 \text{ n}^4 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ 。

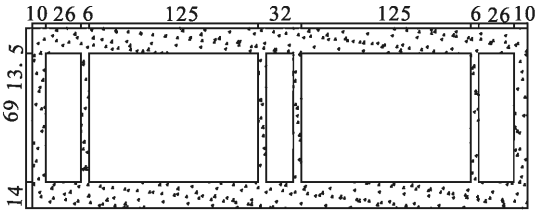


图 2 沉管管段横断面(尺寸单位:m)

Fig.2 Cross-section of the submerged tube (unit;m)

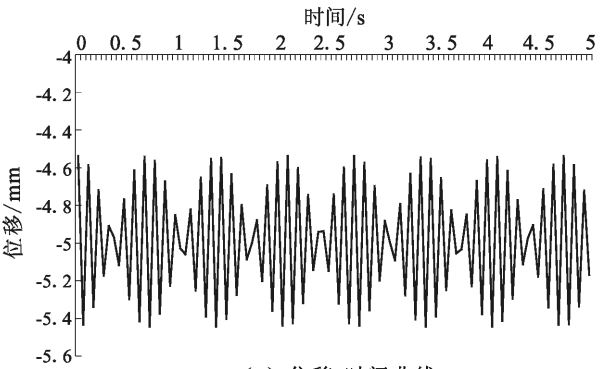
代入判别式 $A^2 - 4(\omega_n^2 + B)$,大于 0,故采用情况(1)计算管段竖向位移。最后得到管段中点位移及弯矩随时间变化曲线,如图 3 所示。

图 3(a)表明车辆荷载对管段竖向位移影响在 4.5~ 5.5 mm 范围内,管段振动比较有规律,类似正弦曲线,一个振动周期约 0.5 s。图 3(b)可以看出车辆荷载引起的管段中点弯矩在 14 000~17 000 kN·m 内变化,变化周期也为 0.5 s。

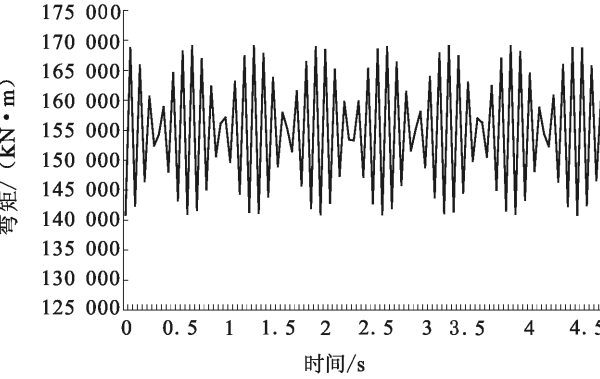
下面取不同车速、不同地基模量单独分析其对管段中点位移和弯矩的影响。

3.1 管段中点位移的分析

为了分析车辆速度对管段中点位移的影响,取车速 $v=80 \text{ km/h}, v=100 \text{ km/h}$,其他条件不变,得



(a) 位移-时间曲线



(b) 弯矩-时间曲线

图 3 $v=60 \text{ km/h}, k=0.26 \text{ MPa}$ 管段中点位移-时间曲线和弯矩-时间曲线

Fig.3 Displacement-time curve and bending moment-time curve at the midpoint of tube when $v=60 \text{ km/h}, k=0.26 \text{ MPa}$

到结果如图 4 所示。

从图 3(a)、图 4 可以看出,车速越快,管段振动越剧烈,振动周期越小,对管段的要求也就更高,但是也可以看出车速对振幅几乎没有影响。

同样取地基模量 $k=0.1 \text{ MPa}, k=0.5 \text{ MPa}$,其他条件不变分析地基模量对管段中点位移的影响,得到结果如图 5 所示。

从图 3(a)、图 5 可以看出,地基模量对管段振幅影响很大,地基模量越小,振幅越大,但是对振动周期影响很小。

3.2 管段中点弯矩的分析

为了分析车辆速度对管段中点弯矩的影响,同样取车速 $v=80 \text{ km/h}, v=100 \text{ km/h}$,其他条件不变,得到结果如图 6 所示。

从图 3(b)、图 6 可以看出,车速越快,管段振动周期越小,但对弯矩几乎没有影响。

同样取地基模量 $k=0.1 \text{ MPa}, k=0.5 \text{ MPa}$,其他条件不变,分析地基模量对管段中点弯矩的影响,得到结果如图 7 所示。

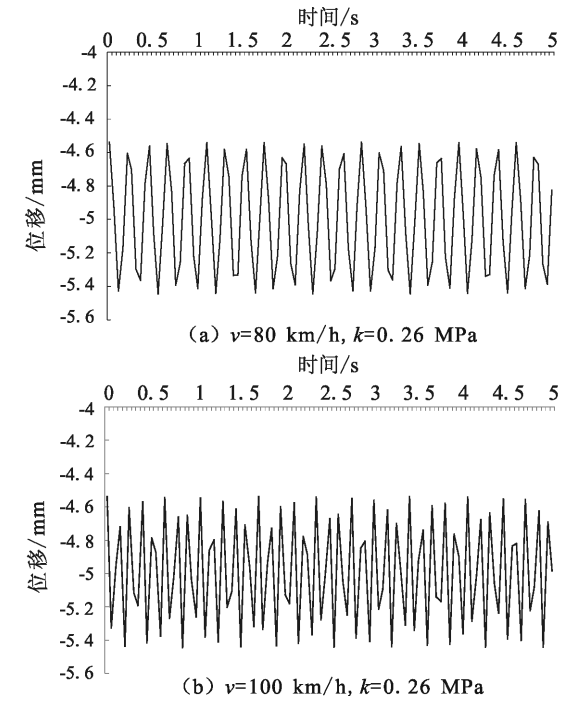


图 4 不同车辆速度时管段中点位移-时间曲线
Fig.4 Displacement-time curves at the midpoint of tube with different vehicle's speeds

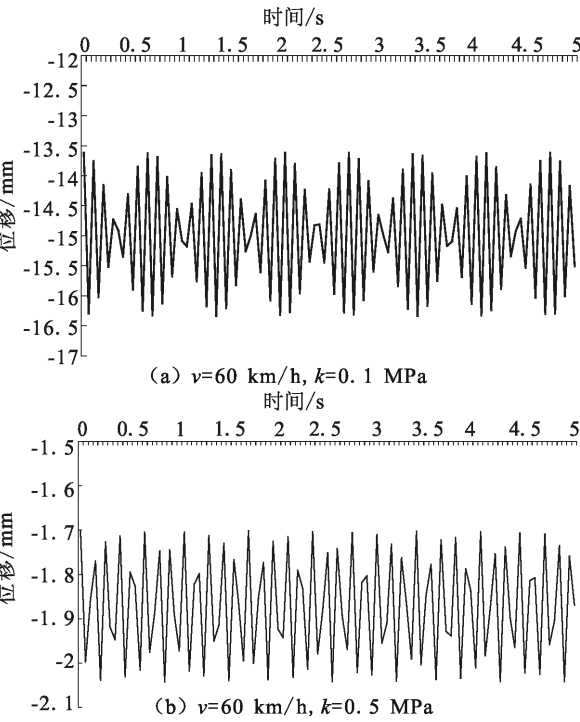


图 5 不同地基模量时管段中点位移-时间曲线
Fig.5 Displacement-time curves at the midpoint of tube with different foundation moduli

从图 3(b)、图 7 可以看出,地基模量对管段弯矩影响很大,地基模量越小,弯矩越大, k 从 0.5 MPa 减小到 0.1 MPa,管段弯矩几乎增大了 10 倍。

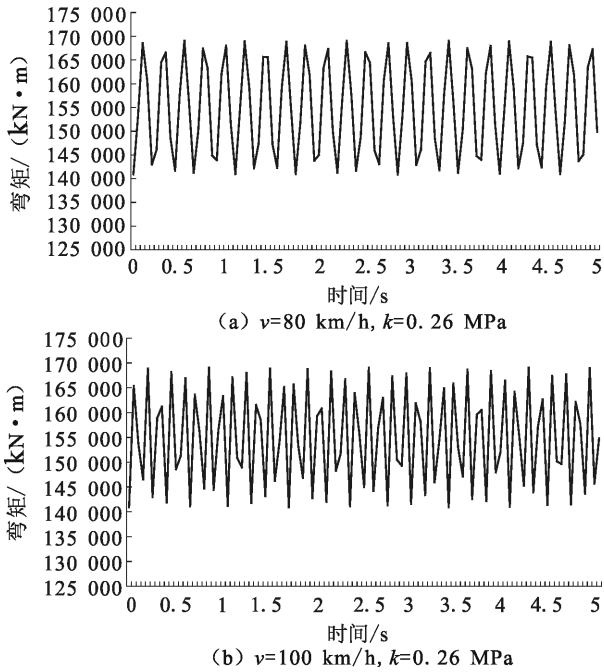


图 6 不同车辆速度时管段中点弯矩-时间曲线
Fig.6 Bending mement-time curves at the midpoint of tube with different vehicle's speeds

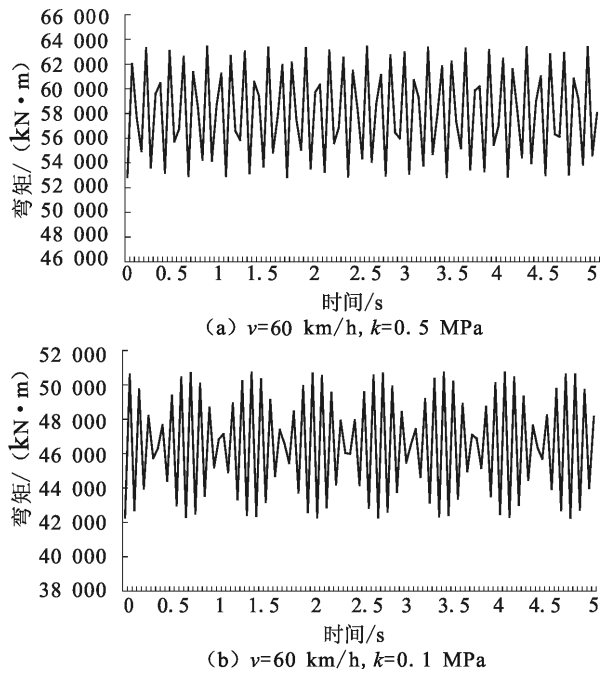


图 7 不同地基模量时管段中点弯矩-时间曲线
Fig.7 Bending moment-time curves at the midpoint of tube with different foundation moduli

但是对振动周期影响不大。

4 结论

(1) 软土地区海底沉管隧道的动力分析可以采

用 Kelvin 黏弹性地基梁模型分析,管段位移、弯矩、地基反力响应用级数解形式表示。

(2) 车速对管段振动的频率产生影响,且车速越快,振动越剧烈,但对振幅没有影响;地基模量对管段振动的振幅影响很大,且地基模量越小,振幅越大,但对振动周期没有影响。

(3) 为了更好地与工程结合,今后可以通过数值方法对振动方程进行求解,这样可以解决更复杂的结构体系。

本文是在沉管隧道接头为刚性情况下进行的分析求解,对于现在应用更多的柔性接头,可以在此基础上进行深入分析,这也是作者今后重点研究的方向。

参考文献(References)

- [1] 丁文其,朱令,彭益成,等.基于地层-结构法的沉管隧道三维数值分析[J].岩土工程学报,2013,35(增2):622-626.
DING Wen-qi,ZHU Ling,PENG Yi-cheng,et al.3D Numerical Analysis of Immersed Tunnels Based on Stratum-structure Method[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(S2):622-626. (in Chinese)
- [2] Grantz W C.Immersed Tunnel Settlements (Part2):Case Histories[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2001,16(3):203-210.
- [3] 陈绍章,陈越,张弥.沉管隧道设计与施工[M].北京:科学出版社,2002.
CHEN Shao-zhang,CHEN Yue,ZHANG Mi.Immersed Tube Tunnel Design and Construction[M].Beijing:Science Press,2002.(in Chinese)
- [4] 高峰,关宝树.列车荷载对长江沉管隧道的影响[J].铁道学报,2001,23(3):117-120.
GAO Feng,GUAN Bao-shu.Effects of Train Loads on Immersed Tunnel in Yangtze River[J].Journal of China Railway Society,2001,23(3):117-120.(in Chinese)
- [5] 陈清军,朱合华.沉管隧道结构的空问受力性态分析[J].力学季刊,2000,21(2):237-242.

- CHEN Qing-jun,ZHU He-hua.The 3D Internal Force Analysis of Immersed Tunnel Structure[J].Chinese Quarterly of Mechanics,2000,21(2):237-242.(in Chinese)
- [6] 刘建飞,贺维国,曾进群.静力作用下沉管隧道三维数值模拟[J].现代隧道技术,2007,44(1):5-9.
LIU Jian-fei,HE Wei-guo,ZENG Jin-qun.Three-dimensional Simulation for the Static Behavior of Immersed Tube Tunnels[J].Modern Tunnelling Technology,2007,44(1):5-9. (in Chinese)
- [7] 丁大钧,刘忠德.弹性地基梁计算理论和方法[M].南京:南京工学院出版社,1986.
DING Da-jun,LIU Zhong-de.Elastic Foundation Beam Theory and Calculation Methods[M].Nanjing:Nanjing Institute of Technology Press,1986.(in Chinese)
- [8] 李宏男,李忠献.结构振动与控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
LI Hong-nan,LI Zhong-xian.Vibration and Control[M].Beijing:China Building Industry Press,2005.(in Chinese)
- [9] 吴小刚.交通荷载作用下软土地基中管道的受力分析模型研究[D].杭州:浙江大学,2004.
WU Xiao-gang.Study on the Mechanical Analysis Model of Pipelines in Soft Ground Under Traffic Loads[D].Hangzhou: Zhejiang University,2004.(in Chinese)
- [10] 彭丽,陈春霞.粘弹性 Winkle 地基梁的振动特性分析[J].上海师范大学学报,2012,41(6):586-589.
PENG Li,CHEN Chun-xia.Viscoelastic Vibration Characteristics Winkler Foundation Beam Analysis[J].Journal of Shanghai Normal University,2012,41(6):586-589.(in Chinese)
- [11] 刘学山,冯紫良.黏弹性地基上弹性梁的自由振动分析[J].上海力学,1999,20(4):470-475.
LIU Xue-shan,FENG Zi-liang.Free Vibration Analysis of Viscoelastic Beam on Elastic Foundation[J].Shanghai Journal of Mechanics,1999,20(4):470-475.(in Chinese)
- [12] 李秀华.中央大道海河沉管隧道基础注浆施工技术[J].国防交通工程与技术,2013(4):55-59.
LI Xiu-hua.Grouting Construction Techniques for Large Immersed-tube Tunnel Foundation[J].Defense Traffic Engineering and Technology,2013(4):55-59.(in Chinese)