

小净距隧道扩建爆破动力响应数值模拟方法研究^①

李秀地^{1,2}, 蒋树屏³, 刘元雪^{1,2}, 黄伦海³

(1.后勤工程学院土木工程系,重庆 401311;

2.岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室(后勤工程学院),重庆 401311;

3.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400067)

摘要:以国内首次施工的大帽山四车道公路隧道扩建爆破震动控制为研究背景,介绍了爆破数值模拟分析中爆破荷载的计算原理和施加方法。从炸药直接起爆的角度,采用流固耦合多物质单元技术,利用 LS-DYNA3D 软件建立了扩建隧道爆破荷载作用下邻近运营隧道动力响应的数值计算模型。通过爆腔半径数值模拟结果与经验公式计算结果的比较,得到围岩的合理破坏应变值;对数值模拟计算结果的影响因素进行分析,结果表明材料采用理想弹塑性模型较硬化弹塑性模型的计算结果偏大;由现场实测数据拟合的经验公式验证数值模拟方法的可靠性。可为大断面小净距隧道施工及类似问题的解决提供参考。

关键词:小净距隧道;隧道扩建;爆破振动;动力有限元

中图分类号:U457⁺.6

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2014)04-0784-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0784

Numerical Simulation of Blasting Dynamic Response of Small Spacing Tunnel Expansion

LI Xiu-di^{1,2}, JIANG Shu-ping³, LIU Yuan-xue^{1,2}, HUANG Lun-hai³

(1.Department of Architectural and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2.Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironment Protection (Logistical Engineering University), Chongqing 401311, China; 3.China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: With the rapid economic development in China, an increasing number of highway tunnels require reconstruction and expansion because the road traffic volume is increasing exponentially. The original Damaoshan highway tunnel is a separated four-lane expressway located between Fuzhou city and Xiamen city, Fujian province, southeastern China. The expansion scheme of this tunnel includes new construction of a four-lane tunnel between the original two tunnels and expansion of the right-hand original tunnel into a four-lane structure. Thus, the expanded Damaoshan highway tunnel will comprise a series of closely spaced tunnels. The newly constructed four-lane tunnel, 22 m long and 255 m² wide, will be merely 5.89 m from the original tunnel. Moreover, the structure safety of the nearby original tunnel must be ensured to maintain effective traffic flow during the explosions for the construction of the new tunnel. Thus, the blasting vibration must be strictly controlled. In this study, semi-empirical theory and direct initiation method are used to determine blasting loads in numerical simulation of blasting dynamic response. With the project background of the first application of the Damaoshan highway four-lane tunnel expansion, a numerical analysis model is established using LS-DYNA3D software from the direct initiation of

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51378496);福建省交通科技发展项目(200910)

作者简介:李秀地(1970—),男,安徽宿州人,副教授,主要从事防灾减灾及防护工程研究。E-mail:lixudivip@163.com

explosives to simulate blasting effects on an adjacent operation tunnel. The numerical analysis model is based on a multi-material unit and fluid-structure interaction technique to simulate the explosive detonation and the dynamic response of the nearby structure, respectively. The element type is SOLID164, and the non-reflected boundary condition is used. Influences of the rock calculation range, mesh size, material hardening condition, and failure strain on the numerical simulation are analyzed. The rock failure strain value in this study is obtained by comparing the explosive cavity radius between the numerical simulation and experience formula. The simulation results show that the blasting effects for the ideal elastic-plastic material model are larger than that for the hardening elastic-plastic model. The maximum relative error of vibration speed is approximately 20%. Moreover, the numerical results of vibration velocity generally comply with the Sadovsk formula fitted by on-site measured data. Therefore, the results of this study are useful for tunnel constructions and similar projects.

Key words: small spacing tunnel; tunnel expansion; blasting vibration; dynamic finite element

0 引言

在一些经济发达地区,对公路隧道日交通量的要求越来越高,因此越来越多的高速公路隧道因交通量趋于饱和而被扩建为双向六车道甚至八车道公路隧道^[1]。大帽山隧道群位于福建泉厦高速公路的厦门段,距厦门市约 8 km。原有大帽山隧道为双洞分离式隧道,全长 600 m,两隧道行车道中线间距 50 m。隧道扩建方案为在原两洞之间新建一四车道隧道,并将右洞原位扩建为四车道^[2-3]。这样该隧道形成了大断面小净距隧道群,从左至右有:两车道隧道(原洞,施工期间维持通车,后废弃或为他用)、新建四车道隧道和原位扩建四车道隧道。两车道隧道与新建四车道隧道的行车道中线间距为 23.53 m,净距为 5.89 m;新建与扩建四车道隧道的行车道中线间距为 29.61 m,净距为 8.83 m。大帽山隧道扩建关系如图 1 所示。

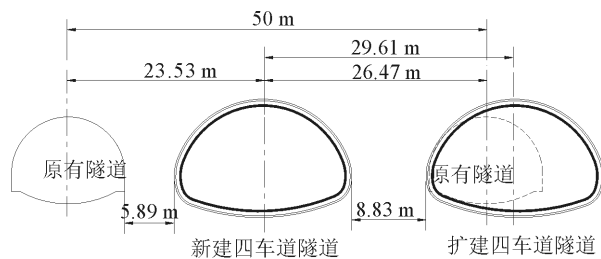


图 1 大帽山隧道扩建关系图(单位:m)

Fig.1 Expansion of Damaoshan tunnel (unit:m)

大帽山隧道扩建工程采用爆破法施工。左线隧道是在既有大帽山两条隧道中间再新建一条四车道隧道,隧道跨径 22 m,最大开挖断面 255 m²,是国内公路隧道领域首例开挖断面最大的隧道。隧道扩建爆破施工期间必须确保邻近隧道的正常交通运营

与结构安全。因此,大帽山隧道扩建工程的爆破振动控制是工程施工的重点和难点。

本文即以国内首次施工的大帽山四车道隧道扩建工程施工为背景,从炸药直接起爆的角度,利用 LS-DYNA3D 软件建立新建隧道爆破施工情况下邻近运营隧道的动力响应数值计算模型,分析小净距隧道爆破动力响应的影响因素,并由现场实测数据拟合的经验公式验证数值计算方法的可靠性。

1 爆破荷载施加方法

1.1 半经验、半理论经验公式法

这种方法先由半经验、半理论的经验公式确定爆破荷载,再将其施加在计算模型的边界上。爆破荷载一般简化为具有线性上升段和下降段的三角形荷载,同时假定均匀分布并作用在隧道开挖边界面(孔壁)上。围岩上的径向应力和切向应力由式(1)、式(2)确定^[4]:

$$\sigma_r = P_r^{-a} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = -b\sigma_r \quad (2)$$

其中,

$$P = \frac{\rho_r C_P}{\rho_r C_P + \rho_0 D_v} P_0 \quad (3)$$

$$P_0 = \frac{1}{4} \rho_0 D_v^2 \quad (4)$$

式中, σ_r 、 σ_θ 分别为径向和切向应力; P 、 P_0 分别为透射到岩石中的初始压力和炸药的爆轰压力; ρ_r 、 ρ_0 分别为岩体的密度和炸药的密度; D_v 为炸药的爆速; $\bar{r}$ 为比例距离, $\bar{r} = r/r_b$, r 为计算点距装药中心的距离, r_b 为炮孔半径; b 为侧向压力系数。

利用波的透射公式(1)~(4)计算孔壁的初始荷

载时,均假设孔壁发生弹性变形,这显然与实际不符。而且半经验、半理论的经验公式方法通常人为假定波形的上升作用时间及下降作用时间,随意性较大。

1.2 炸药直接起爆法

LS-DYNA^[5]等数值计算程序能够模拟真实世界各种复杂的高速碰撞、爆炸等非线性动力冲击问题。小净距隧道爆破振动研究涉及炸药起爆以及爆炸波的传播、反射、透射等复杂的波动现象,特别适合采用 LS-DYNA 进行数值模拟。程序采用“Programmed + beta burn”技术模拟炸药的爆轰过程,用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料表示 TNT 炸药的本构关系。炸药在装药中心起爆,每个炸药单元的点火时间由该单元形心至起爆点的距离和爆速确定。炸药点燃后通过 JWL 状态方程描述, JWL 状态方程模拟炸药爆轰过程中压力、内能和比容的关系。状态方程定义压力为

$$P=A(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V}+B(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}$$

(5)

式中, P 为压力; V 为相对体积; E 为内能密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药的常数。

对 TNT 炸药^[6]: $A=371\text{ GPa}$, $B=3.2\text{ GPa}$, $\omega=0.3$, $R_1=4.2$, $R_2=0.9$ 。

2 数值计算方法

苗增润^[7]采用半经验、半理论经验公式方法,利用 LS-DYNA3D 软件研究爆破振动对邻近隧道衬砌的影响。刘慧^[8]利用 LS-DYNA2D 软件从直接起爆炸药开始计算,对招宝山隧道在邻近爆破作用下的动态响应问题进行了研究。本文从炸药直接起爆的角度,利用 LS-DYNA3D 软件研究大帽山小净距隧道扩建爆破振动的数值模拟方法。

以大帽山新建四车道隧道扩建爆破为研究对象(图 1),在新建四车道隧道Ⅳ级围岩段选取典型计算断面。左侧原二车道隧道考虑初期支护和二次衬砌的加固作用,将炸药设置在新建隧道 CRD 法开挖左侧导坑上台阶掏槽爆破对邻近运营隧道产生最不利影响的位置。为建模方便,将等效 TNT 炸药看作立方体装药。隧道轴向使用单层网格进行计算。数值计算模型如图 2 所示。

对隧道爆破的数值模拟涉及爆轰气体与空气的混合,采用多物质单元欧拉方法(单元算法 11)模拟;冲击波与孔壁的相互作用采用流固耦合方法模

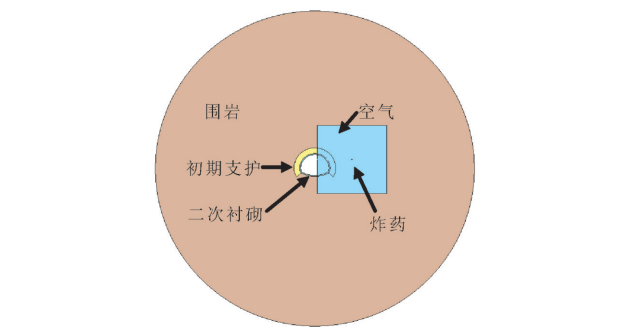


图 2 隧道计算模型
Fig.2 Numerical calculation model of tunnel

拟,而应力波在二次衬砌界面的反射与透射、二次衬砌的变形采用标准的有限元方法模拟。

对围岩、初期支护及二次支护单元界面共节点连接,采用拉格朗日算法;空气与孔壁界面处欧拉介质和拉格朗日介质的相互作用,采用约束加速度和速度方法进行流固耦合。单元类型采用 SOL-ID164,单元形状为规则四边形。为提高计算精度,所划分的单元均为规则六面体映射网格,围岩四周采用程序提供的非反射边界条件。

原洞二次衬砌厚度 0.45 m、初期支护厚度 2.5 m。初期支护参数用提高了的围岩性质表示,按其弹性模量、屈服应力及破坏应变均增大 20% 考虑^[9]。根据大帽山隧道地质勘察报告并参考《公路隧道设计规范》^[10],本文选取的围岩、二次衬砌及初期支护的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数值

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials				
材料名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa
二次衬砌	2 300	31.0	0.20	14.3
初期支护	2 300	3.6	0.30	12.0
围岩	2 300	3.0	0.35	10.0

3 影响因素分析

3.1 围岩计算范围

在其他计算条件相同的情况下,取围岩半径范围分别(以隧道断面中心为原点)为 60 m、100 m 进行计算。取隧道迎爆面墙角处的单元为比较对象,其有效应力、剪应力及 X 向振速幅值的计算结果,见表 2 所示。

计算结果表明,尽管应用了程序提供的非反射边界条件模拟围岩的无限区域,但不同的计算范围对计算结果仍有一定的影响。由表 2 可见,随着计算范围的增大数值计算结果逐渐减小。计算范围从

60 m 增大到 100 m,计算结果尽管仍有一定的差别,但最大相差在 10% 以下。为此,根据爆炸动力学问题一般的计算精度要求及本研究计算机软硬件配置情况,围岩计算范围取值为 60 m,能够满足本文计算精度要求。

表 2 围岩计算范围的影响

Table 2 Influence of calculated range of surrounding rock				
网格尺寸/cm	位移幅值/cm	有效应力幅值/MPa	剪应力幅值/MPa	振速幅值/(cm·s ⁻¹)
30	0.025	1.69	0.90	4.20
20	0.023	1.75	0.93	4.65
差值	8.7%	3.6%	3.3%	10.7%

3.2 网格尺寸的影响

在其他计算条件相同的情况下,网格尺寸分别为 20 cm 和 30 cm 两种情况下进行数值计算。取典型计算点为隧道迎爆面墙角单元,其 X 向位移、有效应力、剪应力及 X 向振速幅值计算结果见表 3。

表 3 网格尺寸的影响

Table 3 Influence of element size				
网格尺寸/cm	位移幅值/cm	有效应力幅值/MPa	剪应力幅值/MPa	振速幅值/(cm·s ⁻¹)
30	0.025	1.69	0.90	4.20
20	0.023	1.75	0.93	4.65
差值	8.7%	3.6%	3.3%	10.7%

从表 3 中位移、有效应力、剪应力、振速等幅值的计算结果表明,围岩网格尺寸从 20 cm 增大到 30 cm,计算结果最大相差(振速)约 10.7%。为此,本文取网格尺寸为 20 cm 进行计算。

3.3 材料硬化模式的影响

材料(围岩、初期支护及二次衬砌)采用理想弹塑性模型和应变硬化弹塑性模型分别进行计算。其中硬化模量值近似取为弹性模量的 0.4 倍。在其他计算条件相同的情况下,运营隧道迎爆面墙角二次衬砌单元有效应力、剪应力及 X 向振速幅值的计算结果,见表 4 所示。

表 4 材料硬化模式的影响

Table 4 Influence of material hardening mode			
	有效应力幅值/MPa	剪应力幅值/MPa	振速幅值/(cm·s ⁻¹)
硬化模型	5.44	2.89	20.9
理想模型	6.53	3.47	24.5

由表 4 可见,理想弹塑性模型的计算结果较硬化模型的计算结果偏大,其中振速幅值相差最大,约为 20%。由于振速幅值是衡量爆破振动影响大小的重要指标,为安全起见,建议隧道爆破振动数值模

拟时围岩、二次衬砌及初期支护均采用理想弹塑性模型进行计算。

3.4 围岩破坏应变的影响

初步计算表明,围岩的破坏应变大小对计算结果有显著影响。但围岩的破坏应变难以准确确定。为不失一般性,取围岩的破坏应变为 0.001、0.002、0.003 及 0.004 分别进行计算分析。通过数值模拟的爆腔大小与爆腔尺寸经验公式计算结果进行比较,确定本文计算条件下的围岩破坏应变值。爆腔数值模拟结果见图 3 所示。可见,随着围岩破坏应变的增大爆腔的半径逐渐减小。

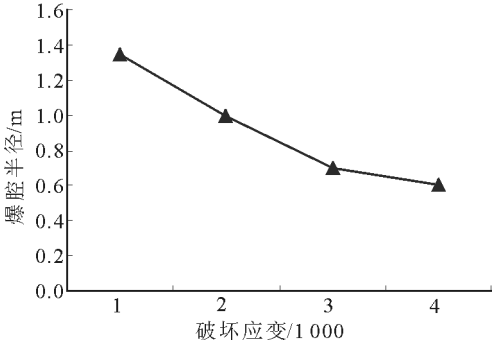


图 3 破坏应变取值对计算结果的影响

Fig.3 Influence of failure strain values

大量的试验表明,炸药在岩土材料中爆炸形成的爆腔半径可近似用式(6)表示^[4]:

$$r = m k_a \sqrt[3]{C} \tag{6}$$

式中, m 为考虑炸药埋深影响的堵塞系数,封闭爆炸时为 1.65; k_a 为介质的压缩系数,对Ⅳ级围岩近似取为 0.3; C 为炸药的 TNT 等效装药量。

将本次数值计算参数代入式(6),得爆腔半径为 1.1 m。从图 3 可以看出,当围岩的破坏应变取为 0.002 时爆腔半径的数值模拟结果约为 1.0 m,与上述经验公式计算结果最为接近。因此本文围岩的破坏应变值取 0.002 较为合理。

4 数值方法验证

采用本文建立的数值计算方法和上述影响因素分析结果,取 10 kg 等效 TNT 装药量进行数值模拟计算。由于爆破振速是隧道扩建爆破药量的重要控制依据之一,选取邻近运营小净距隧道迎爆面二次衬砌侧墙中部的振速值作为分析对象。爆破振速模拟结果如图 4 所示。可见,运营隧道二次衬砌 x 向振速幅值为 20.9 cm/s。

实际上,爆破振动传播与衰减规律普遍采用萨道夫斯基经验公式^[11-12]:

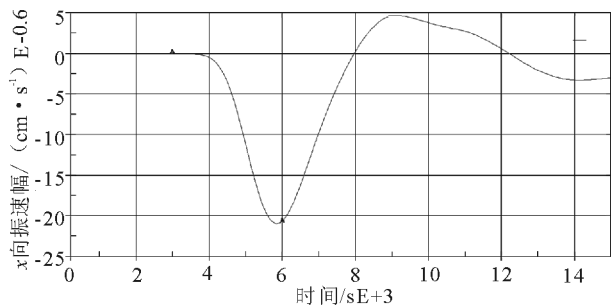


图4 运营隧道振速曲线

Fig.4 Vibration velocity curve of operating tunnel

$$V = K(Q^{1/3}/R)^a \quad (7)$$

式中, V 为振速; Q 为单段最大起爆药量; R 为测点与爆破点之间的距离; K 为场地系数; a 为衰减系数。

大帽山隧道扩建工程现场通过爆破振动监测数据拟合出了萨道夫斯基公式中的系数^[13]: $K = 209.329$, $a = 1.362$ 。本文左侧导坑上台阶爆破时的距离 $R = 12$ m(炸药中心至运营隧道迎爆面侧墙中部), 将 10 kg 等效 TNT 药量及现场实测数据拟合出的 K 、 a 系数分别代入式(7), 振速计算结果为 19.9 cm/s。这与本文数值模拟结果(20.9 cm/s)基本一致。

5 结论

本文采用流固耦合算法, 从炸药直接起爆的角度, 利用 LS-DYNA3D 软件建立了小净距隧道扩建爆破效应的数值计算方法。通过分析得到如下结论:

(1) 计算分析表明, 材料采用理想弹塑性模型的计算结果较采用硬化模型的计算结果偏大。为安全起见, 建议围岩、二次衬砌及初期支护均采用理想弹塑性模型进行数值计算。

(2) 围岩破坏应变难以准确确定。本文通过爆腔半径数值模拟结果与经验公式计算结果进行比较, 得到了本文围岩的合理破坏应变值为 0.002。

(3) 通过爆破振速数值结果与现场实测数据拟合经验公式计算结果的比较, 表明本文数值模拟方法可靠。可为大断面小净距隧道施工及类似问题的解决提供参考。

参考文献(References)

- [1] 刘帅军, 王小东, 王建华, 等. 越江隧道明洞开挖的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 330-334.
- LIU Shuai-jun, WANG Xiao-dong, WANG Jian-hua, et al. Nu-

- merical Analysis of Cut-and-cover Excavation Part of a Cross-river Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl.2): 330-334. (in Chinese)
- [2] 胡居义, 陈礼彪, 黄伦海. 二车道隧道扩建成四车道隧道扩建形式研究[J]. 公路交通技术, 2010(5): 93-97.
- HU Ju-yi, CHEN Li-biao, HUANG Lun-hai. Research on Expansion Modes of Two-lane to Four-lane Tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2010, (5): 93-97. (in Chinese)
- [3] 福建省交通规划设计研究院. 泉厦高速公路扩建工程大帽山隧道两阶段施工图设计[R]. 福州: 福建省交通规划设计研究院, 2008.
- Fujian Communications Planning and Design Institute. Two Stage Construction Design of the Damaoshan Tunnel of Quanzhou-Xiamen Broadening Highway [R]. Fuzhou: Fujian Communications Planning and Design Institute, 2008. (in Chinese)
- [4] 宁建国. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- NING Jian-guo. Explosion and Shock Dynamics [M]. Beijing: Defensive Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [5] LS-dyna Keyword User's Manual [M]. Version 970. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [6] Wang J. Simulation of Landmine Explosion Using LS-DYNA3D Software [R]. Australia: Weapons Systems Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO-TR-1168, 2001.
- [7] 苗增润. 小净距上下交叉隧道爆破振动效应数值模拟[J]. 国防交通工程与技术, 2008(6): 25-28.
- MIAO Zeng-run. Simulation of Blasting Vibration of Intersect Tunnels With Small Clear Space [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2008(6): 25-28. (in Chinese)
- [8] 刘慧. 招宝山超小净距双线隧道的安全控爆研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 49-55.
- LIU Hui. Blasting Control of Double-oriented Tunnels for Zhaobaoshan with Super Small Clear Space [J]. Blasting Engineering, 2000, 6(1): 49-55. (in Chinese)
- [9] 吴天超. 特大断面小净距隧道爆破振动控制技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(2): 232-238.
- WU Tian-chao. Technology of Blasting Vibration Control with Super Large Section and Small Clear Space [J]. Blasting Engineering, 2009, 29(2): 232-238. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范(JTGD70-2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for Design of Road Tunnel (JTGD70-2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 张国华, 刘明贵, 刘绍波, 等. 大帽山小净距隧道群爆破震动安全判据研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1039-1043.
- ZHANG Guo-hua, LIU Ming-gui, LIU Shao-bo, et al. Study of Safety Criterion for Blasting Vibration of Damaoshan Tunnel With Small Clear Space [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 1039-1043. (in Chinese)
- [12] 张国华, 陈礼彪, 钱师雄, 等. 大断面小净距大帽山隧道现场监

控量测及分析[J].岩土力学, 2010, 31(2): 489-496.

ZHANG Guo-hua, CHEN Li-biao, QIAN Shi-xiong, et al. On-site Supervision Measure and Analysis of Damaoshan Tunnels With Large Section and Small Cleardistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 489-496. (in Chinese)

[13] 陈梅初. 大帽山小间距隧道开挖爆破设计[J]. 铁道建筑技术, 2009, (6): 62-66.

CHEN Mei-chu. Blasting Techniques for Excavation of Damaoshan Closely-spaced Tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2009, (6): 62-66. (in Chinese)

(上接 777 页)

[3] Larsen C M, Koushan K, Passano E. Frequency and Time Domain Analysis of Vortex Induced Vibrations for Free Span Pipelines[C]//Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway, OMAE, 2002: 103-111.

[4] 艾尚茂, 孙丽萍. 非线性管土耦合条件下悬跨管道涡激振动响应时域预报[J]. 船舶力学, 2010, 14(11): 1297-1303.

AI Shang-mao, SUN Li-ping. Time Domain Analysis of the Free Spanning Pipeline VIV Response Under Nonlinear Pipe-soil Interaction[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(11): 1297-1303. (in Chinese)

[5] Larsen C M, Passano E, Baarholm G S, et al. Non-linear Time Domain Analysis of Vortex Induced Vibrations for Free Spanning Pipelines[C]//Proceedings of the International Conference of on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, Canada, OMAE, 2004: 207-215.

[6] 李小超. 海底管线悬跨段涡激振动响应的实验研究与数值预报[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

LI Xiao-chao. Vortex-Induced Vibrations of Submarine Pipeline Spans [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)

[7] DNV-RP-F105. Free Spanning Pipelines[S]. HØvik, Det Norske Veritas, 2006.

[8] Facchinetti M L, Langre E, de Biolley F. Coupling of Structure and Wake Oscillators in Vortex-induced Vibrations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19 (2): 123-140.

[9] Wan-hai XU, Ying-xiang WU, Xiao-hui ZENG, et al. A New Wake Oscillator Model for Predicting Vortex Induced Vibration of a Circular Cylinder[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(3): 381-386.

[10] Bakhtiary A Y, Ghaheri A, Valipour R. Analysis of Offshore Pipeline Allowable Free Span Length[J]. International Journal of Civil Engineering, 2007, 5(1): 84-91.

[11] Koushan K. Vortex Induced Vibrations of Free Span Pipelines [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2009.