

静、动水压力条件下海底隧道地震反应特性分析

刘勇¹, 陈国兴^{1,2*}, 孔梦云¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 南京工业大学城市地下空间研究中心, 江苏 南京 210009)

摘要:建立了基于 ABAQUS 软件的海水-土-隧道结构体系有限元模型, 采用 Airy 微小振幅波动理论, 对静、动水压条件下不同埋深海底隧道地震反应特性进行了比较。结果表明: 动水压力作用下隧道结构的水平向加速度及相对水平位移分别比静水压力作用下的相应值大 1.1~1.4 倍和 1.8~2.3 倍; 随着隧道埋深增加, 隧道结构的应力、水平位移逐渐减小, 动水压力影响系数 K_D 有减小的趋势, 也即达到一定埋深时, 动水压力对隧道结构的地震反应没有影响; 隧道拱肩和拱腰处的应力反应明显大于其他部位, 拱肩和拱腰处为隧道结构的最危险部位。

关键词:海底隧道; 地震反应; 静水压力; 动水压力; 埋深

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0357-06

作者简介:刘勇(1987-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事海底隧道抗震研究。E-mail: liuy37@126.com。

Seismic response of undersea tunnels to hydrodynamic and hydrostatic pressures

LIU Yong¹, CHEN Guo-xing^{1,2}, KONG Meng-yun¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Research Center of Urban

Underground Space, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Based on the theory of Airy minute amplitude of vibration, A finite element model for sea-soil-tunnel system is established on the basis of the software of ABAQUS. The seismic responses of under sea tunnels to effects analysis hydrodynamic and hydrostatic pressures under different buried depths are compared. The results show that, the horizontal acceleration and relative horizontal displacement is 1.1~1.4 and 1.8~2.3 times respectively under hydrodynamic pressure than hydrostatic pressure. With the increasing buried depth, the stress and displacement as well as the corresponding impact factor of hydrodynamic pressure K_D decrease, that is, the hydrodynamic pressure has no effect on seismic response when it reaches certain depths. The stress in spandrel and haunch is significantly larger than that in the other parts so that the spandrel and haunch are the most dangerous parts of the tunnel.

Key words: undersea tunnel; seismic response; hydrostatic pressure; hydrodynamic pressure; buried depth

0 引言

自 20 世纪 40 年代日本在关门海峡修建世界上第一条海底隧道至今, 海底隧道因其具有直达、便捷、通行量大以及受气候影响小等优点而得到大规模的规划与建设。然而, 海底隧道多建设在地震高发的沿海地区, 因此对其地震安全性方面的要求较高。与陆地隧道相比, 在进行海底隧道抗震设计时, 还需考虑海水压力对隧道结构地震反应的影响。国内外学者^[1-8]对海底隧道地震反应特性已进行了一些有价值的研究, 但这些研究通常是将海水压力作为静水压力或者不考虑海水压力, 鉴于地震作用与波浪的耦合作用, 这种方法显然欠妥。

为此, 以某海峡隧道建设工程为背景, 利用 ABAQUS 软件, 通过 VDLOAD 加载子程序, 采用 Airy 微小振幅波动理论, 将竖向动水压力施加在海底

土层上表面, 对比分析了静、动水压作用下不同埋深海底隧道地震反应特性。

1 海底隧道地震反应分析方法

1.1 波浪动水压力理论及其模拟方法

在海洋环境中, 海床土体受到的波浪动水压力是复杂的非线性问题。Airy 假设波浪的振幅远小于水深, 提出了 Airy 微小振幅波动理论^[9], 波浪竖向动水压力可表示为

$$p = \begin{cases} p_0 - \rho g z + \rho g a e^{kz} \sin(kx - \omega t) & (\text{深水波}), \\ p_0 - \rho g z + \rho g a \sin(kx - \omega t) & (\text{浅水波}), \end{cases} \quad (1)$$

式中, p_0 为大气压强, z 为水深, a 为波浪振幅,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013605)

收稿日期: 2013-06-07

$k=2\pi/\lambda$ ， λ 为波浪波长， $\omega=2\pi/T$ ， T 为波浪振动周期。

某海底隧道所在海域设计波浪要素如表 1 所示，并假定：①海床底面光滑，即不考虑土体与海水在水平方向的耦合作用；②海水可看成一个独立的外界因素。

据此，仅考虑竖向动水压力 p 作用在海床土层的表面，不考虑海床土层对上覆海水的反作用。通过 ABAQUS 软件自编加载子程序 VDLOAD，实现竖向动水压力施加到海床土层的表面。

表 1 设计波浪要素

Table 1 Parameters of design waves				
静水深度 /m	平均波 高/m	波周期 /s	波长 /m	波速 /(m·s ⁻¹)
20	5.17	7.3	71.2	9.5

1.2 基岩输入地震波的选取

由于缺乏隧道建设地区的强地震动记录，选取我国汶川大地震的绵竹清平波及美国 Taft 波，且峰值加速度调整为 2.0 m/s²。图 1 给出了两条地震波加速度时程曲线。

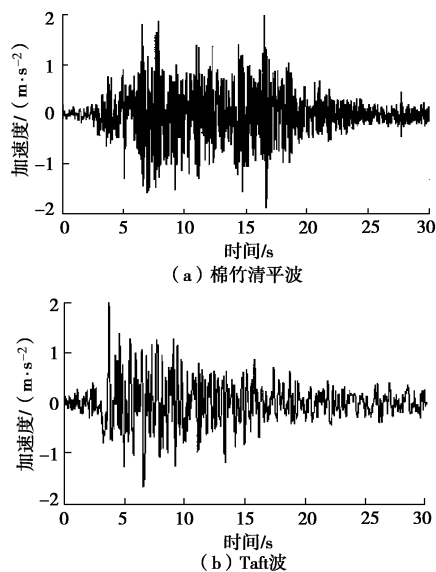


图 1 基岩输入地震动加速度时程

Fig. 1 Time histories of input ground motion of acceleration of bedrock

1.3 动力非线性本构模型及参数

某海峡隧道的场地简化为水平成层土，采用修正的 Davidenkov 黏弹性动力本构模型^[10]模拟土的动力特性，土层的物理力学参数如表 2 所示。

隧道衬砌结构采用 C50 混凝土，其动本构模型采用 Jeeho Lee 等提出的动塑性损伤模型^[11]，相应的模型参数见文献[12]。

2 有限元模型的建立

根据挪威方法^[13]关于隧道埋深选取的建议，选取

20 m 和 30 m 两种埋深进行分析，隧道衬砌的外径 5 m、内径 4.2 m，衬砌厚度 0.8 m。上覆海水作用以竖向动水压力的形式直接施加在海床土层表面。海水 - 土 - 隧道结构体系有限元模型的土层计算宽度和深度分别取为 200 m 和 110 m，土 - 海底隧道结构体系二维有限元网格划分示意图如图 2 所示，采用四结点完全积分平面应变单元模拟。水平向地震动从基岩面输入，可视为竖向入射的 SH 波，基岩面视为固定的刚性面，场地计算区域两侧采用竖向约束、水平向自由的人工边界。

表 2 某海峡场地土层物理力学参数

Table 2 Parameters of different soil strata					
土层描述	厚度 /m	密度 /(kN·m ⁻³)	G_{max} /MPa	ν	γ_0
粉黏与粉砂互层	3.5	1880	14.9	0.45	0.00173
粉黏与粉砂互层	4.5	1980	26.3	0.45	0.00173
粉黏夹粉砂	8	2030	43.3	0.43	0.00144
粉黏夹粉砂	6	2030	54.6	0.42	0.00144
粉黏	9	1900	75.9	0.42	0.00173
粉黏	21	1900	135	0.42	0.00173
粉黏夹粉砂	7	2040	105	0.38	0.00144
粉黏夹粉砂	13	2040	128	0.38	0.00144
粉黏	20	2000	114	0.35	0.00308
粉黏	6	2000	139	0.34	0.00308
粉黏	12	2000	154	0.32	0.00308

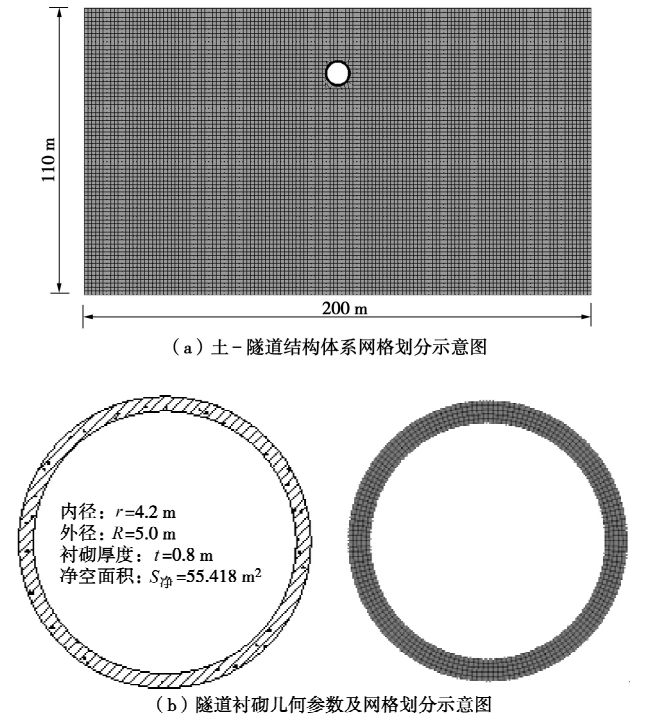


图 2 土 - 隧道结构体系二维有限元网格划分示意图

Fig. 2 Grid of two-dimension finite element mesh model

3 计算结果对比分析

为了便于对比静、动水压条件对隧道地震反应的影响，本文对隧道位移、应力及加速度的反应规律进

行了讨论。

3.1 海底隧道的位移反应规律

将海底隧道不同高度处水平位移时程与隧道底部水平位移时程差值的最大值定义为海底隧道相对水平位移。

定义动水压力对海底隧道地震反应影响系数 K_D ：

$$K_D = \frac{A_D - A_S}{A_S} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

式中, A_D 为动水压力条件下隧道地震反应, A_S 为静水压力条件下隧道地震反应。

图 3 及表 3 分别给出了基岩输入绵竹清平波和 Taft 波条件下不同水压、不同埋深海底隧道相对水平位移沿隧道高度的变化曲线和海底隧道顶部相对水平位移值及其动水压力影响系数 K_D , 可以看出：

- (1) 海底隧道的相对水平位移, 在绵竹清平波和 Taft 波作用下均近似呈抛物线型。
- (2) 20 m 埋深海底隧道的相对水平位移要比 30 m 埋深大 1.8~2.3 倍。这可能是由于 20 m 埋深海底隧道的上覆土层厚度较薄, 周围地基土对隧道的约束作用有限, 使其相对水平位移比 30 m 埋深隧道大。
- (3) 动水压力条件下隧道的相对水平位移比静水压力条件下相应值大, 这主要是由于动水压力作用相当于低应变循环荷载施加在结构上, 对结构造成的损伤大。
- (4) 由于结构损伤对低频发育的 Taft 地震动响应很强烈, 输入 Taft 波时隧道的相对水平位移值均比输入绵竹清平波时的大。

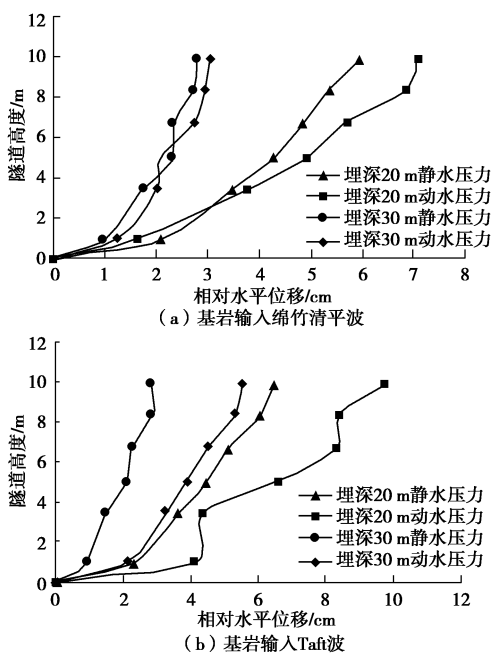


图 3 海底隧道的相对水平位移变化曲线

Fig. 3 Relative horizontal displacements of undersea tunnel

表 3 隧道顶部相对水平位移及 K_D 值

Table 3 Relative horizontal displacement and K_D factor at top of

隧道 埋深/m	绵竹清平波			Taft 波		
	静水	动水	$K_D/\%$	静水	动水	$K_D/\%$
20	6.0	7.1	19.0	6.4	9.8	51.8
30	2.8	3.1	9.3	2.8	5.5	95.4

3.2 海底隧道的应力反应规律

Von Mises 应力是基于剪切应变能的一种等效应力, 它用应力等值线来表示模型内部的应力分布情况, 可以清晰地描述出一种结果在整个模型中的变化, 便于分析人员快速确定模型中的最危险区域。其值如下式所示：

$$\sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)/2} \quad , \quad (3)$$

式中, σ_1 , σ_2 , σ_3 分别指第一、二、三主应力。

根据海底隧道结构动应力时程分析的动画演示过程, 选取海底隧道结构关键部位结点进行动应力反应规律分析, 其输出动应力反应的单元节点位置见图 4。图 5 给出了海底隧道外侧 Mises 应力反应包络图, 可以看出：

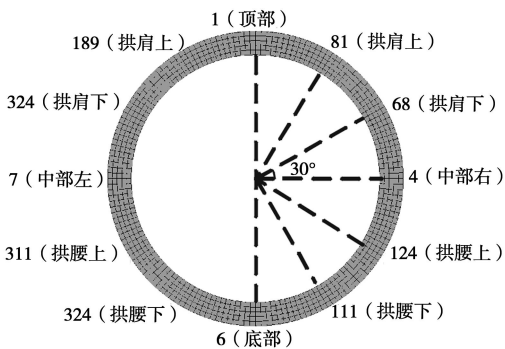


图 4 隧道结构输出动应力反应的单元节点位置

Fig. 4 Locations of nodes with stress responses

- (1) 不同埋深海底隧道在不同水压、不同地震动输入条件下应力分布特征较为一致。与隧道其他部位相比, 隧道拱肩和拱腰处的应力反应明显较大, 即为隧道结构的最危险部位; 此外, 隧道拱肩处的最大应力反应又比拱腰处的最大应力反应略大, 这也与隧道的相对位移反应规律相一致。
- (2) 相同条件下, 动水压力作用下 Mises 应力峰值都大于静水压力条件下相应值, 20 m 埋深海底隧道的 Mises 应力是 30 m 埋深的 1.03~1.59 倍。
- (3) 海底隧道埋深由浅变深时, 隧道的地震应力反应逐渐减小, 动水压力对隧道应力的影响也随着其埋深的增加而逐渐减弱。
- (4) Taft 波作用时隧道的应力值比绵竹清平波作用时大 1.1~2.5 倍, 这主要是因为本场地土覆地层较

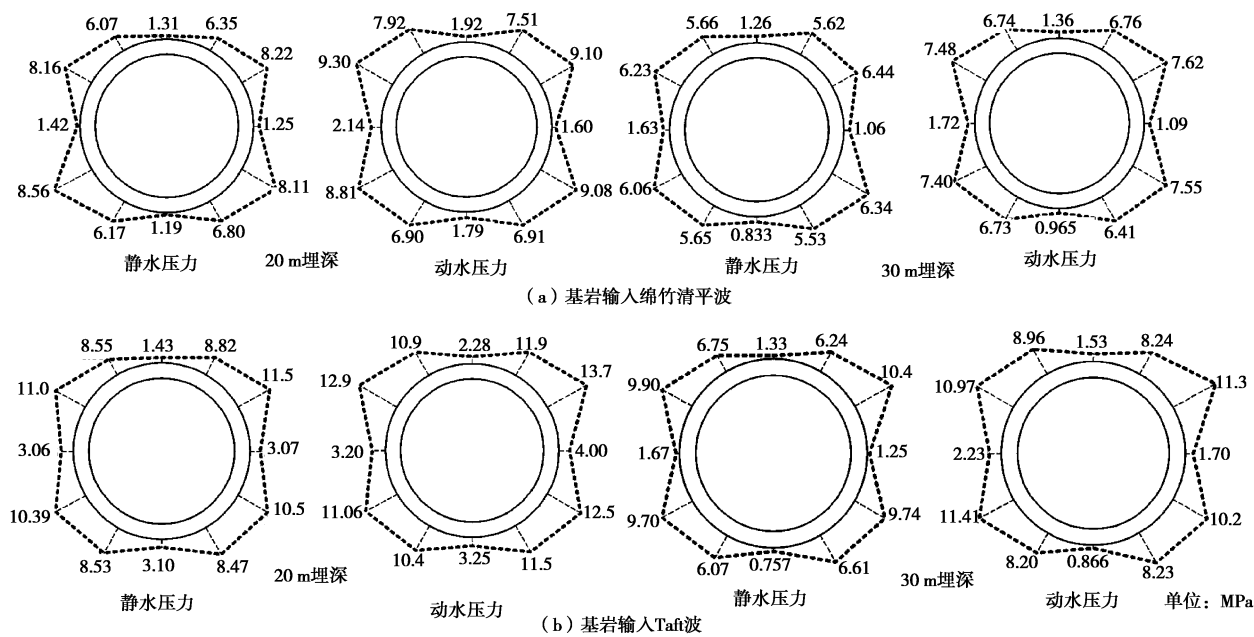


图 5 海底隧道外侧 Mises 应力反应包络图

Fig. 5 Envelop of Mises stress outside undersea tunnel

表 4 地震动作用下隧道结构不同部位的水平向峰值加速度

		Table 4 Peak horizontal accelerations at different positions of undersea tunnel under earthquakes				m/s ²	
输入地震动	位置点	埋深 20 m		埋深 30 m		K _D /%	
		静水	动水	静水	动水	埋深 20 m	埋深 30 m
绵竹清平波	隧道顶部	0.798	1.086	0.941	1.150	36.1	22.2
	隧道底部	0.988	1.097	1.112	1.172	11.0	5.4
Taft 波	隧道顶部	1.534	1.841	1.875	2.146	20.0	14.4
	隧道底部	1.844	2.036	2.867	3.116	10.4	8.6
基岩输入波峰值		2.0	2.0	2.0	2.0		

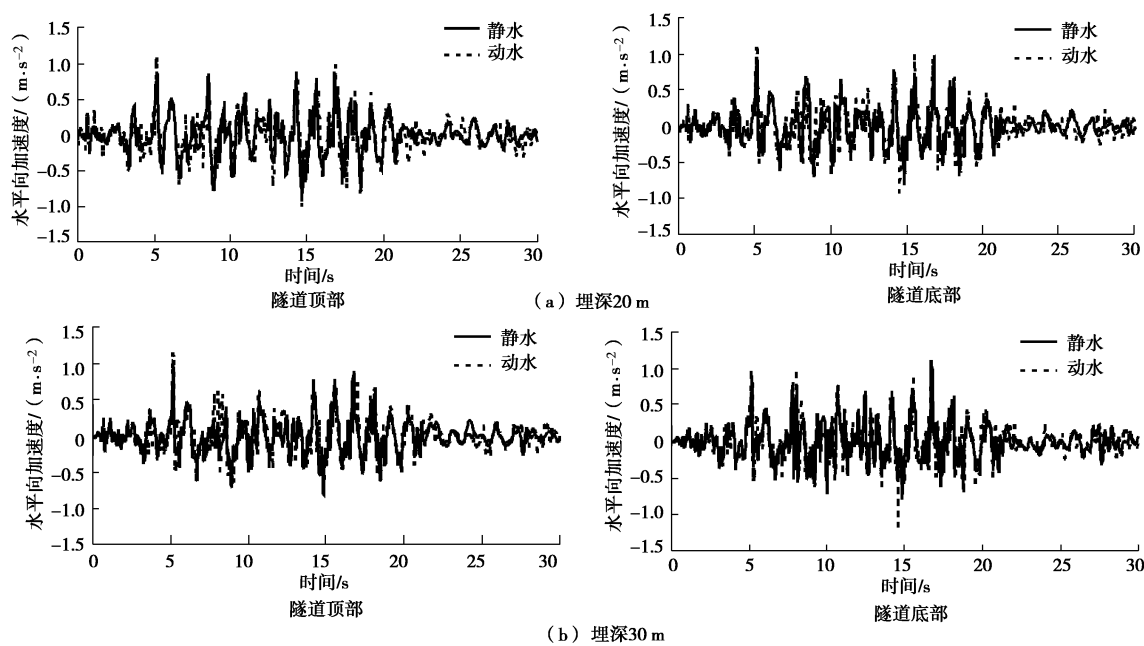


图 6 基岩输入清平波时隧道顶部和底部水平向加速度时程曲线

Fig. 6 Time histories of horizontal acceleration at top and bottom of undersea tunnel under input Qingping waves of bedrock

下伏硬基岩软弱, 而软弱地层对高频成分较为发育的地震动具有滤波作用。

3.3 海底隧道的加速度反应规律

图 6 给出了静、动水压力条件下不同埋深海底隧道在基岩输入绵竹清平波时隧道顶部和底部水平向加速度反应时程曲线, 表 4 则给出了海底隧道顶部和底部的水平向峰值加速度。可以看出:

(1)海底隧道顶部和底部加速度反应时程曲线与基岩输入地震波形态基本相同;在绵竹清平波作用下, 土层的高频滤波作用直接导致隧道顶部和底部峰值加速度相对基岩输入峰值加速度减少了一半左右;而在 Taft 波作用下, 相对于基岩输入地震动峰值加速度, 隧道顶部和底部峰值加速度可能减小近 23%, 也可能放大近 55%, 这主要是由土体的滤波与放大效应造成的。

(2)动水压条件下隧道顶部和底部水平加速度峰值均比静水压力条件下相应值大, 动水压力影响系数 K_D 最大和最小值分别为 36.1%和 5.4%。此外, 随着隧道埋深的增加, 动水压力影响系数 K_D 逐渐减小, 这说明动水压对隧道水平加速度反应的影响随着埋深的增加逐渐减弱。

(3)Taft 波作用时隧道结构的水平峰值加速度比绵竹清平波作用时相应的值大, 这主要是由于结构损伤对低频较为发育的 Taft 地震动响应强烈。

(4)不同埋深隧道底部的峰值加速度反应均大于其顶部的峰值加速度反应, 且与水压条件和输入地震动的特性有关。这是由于埋深的改变, 改变了土体 - 隧道结构相互作用体系的动力特征, 从而改变了动力相互作用效应的大小。

4 结 论

(1)动水压力作用下隧道结构的水平向加速度及相对水平位移分别比静水压力作用下相应值大 1.1~1.4 倍和 1.8~2.3 倍。

(2)随着隧道埋深的增加, 隧道结构的应力、水平位移均逐渐减小, 动水压力影响系数 K_D 均有减小的趋势, 也即埋深达到一定数值时, 动水压力对隧道结构的地震反应没有影响。

(3)不同埋深海底隧道在不同水压条件下的应力分布特征较为一致, 隧道拱肩和拱腰处的应力反应明显大于其他部位, 且拱肩处的最大应力反应又比拱腰处的最大应力反应略大, 拱肩和拱腰处为隧道结构的最危险部位。

(4)由于结构损伤对低频发育的 Taft 地震动响

应很强烈, Taft 波作用时隧道结构的水平向相对位移、加速度以及应力值均比绵竹清平波作用时的相应值大。

参考文献:

- [1] ZHANG X, LI S C, DING X L. Seismic response of QINGDAO sub-sea tunnel considering transversely isotropic[J]. Boundaries of Rock Mechanic, 2008.
- [2] SHUNZO Okamoto. Introduction to earthquake engineering[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1984: 867 - 871.
- [3] 刘继国, 郭小红, 程 勇. 高地震烈度下超大直径海底盾构隧道地震响应分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3):53 - 58. (LIU Ji-guo, GUO Xiao-hong, CHENG Yong. Seismic response analysis on super large-diameter undersea shield tunnel under high seismic intensity[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(3): 53 - 58. (in Chinese))
- [4] 陈向红, 张鸿儒. 暗挖海底隧道地震动水压力响应分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 36 - 40. (CHEN Xiang-hong, ZHANG Hong-ru. Analysis of effect of hydrodynamic pressure on undersea tunnels constructed by excavation method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(1): 36 - 40. (in Chinese))
- [5] 朱镜清. 地震作用下海水与海床土的耦合运动[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(2): 37 - 43. (ZHU Jing-qing. Coupled motion between sea water and sea bed-soil under earthquake action[J]. Earthquake Engineering and Engineering, 1988, 8(2): 37 - 43. (in Chinese))
- [6] 朱镜清, 周 建. 海底地震动估计的一个流体力学基础[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 87 - 93. (ZHU Jing-qing, ZHOU Jian. A fluid mechanics basis for estimating undersea ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering, 1991, 11(3): 87 - 93. (in Chinese))
- [7] 朱镜清, 周 建. 海底隧道体系地震反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 12(2): 90 - 98. (ZHU Jing-qing, ZHOU Jian. A seismic analysis method of undersea tunnels[J]. Earthquake Engineering and Engineering, 1992, 12(2): 90 - 98. (in Chinese))
- [8] 席仁强, 陈国兴, 王志华. 覆水场地地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6): 610 - 617. (XI Ren-qiang, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua. Seismic response of underwater site[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(6): 610 - 617. (in Chinese))
- [9] 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社,

2005. (TAO Jian-hua. Numerical simulation of water waves[M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [11] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27(9): 937 - 956.
- [12] 陈磊, 陈国兴. 近断层强地震动下双层竖向重叠地铁隧道的地震反应[J]. 防灾减灾工程学报, 2008(4): 399 - 408. (CHEN Lei, CHEN Guo-xing. Seismic response of two-layer overlapping metro tunnel under near-fault strong ground motion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008(4): 399 - 408. (in Chinese))
- [13] 吕明, GROV E, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4219 - 4225. (LÜ Ming, GROV E, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4219 - 4225. (in Chinese))
- (本文责编 胡海霞)