

DOI: 10.11779/CJGE2023S20015

# 平面 $P_1$ 波入射下双层衬砌对海底隧道地震响应的影响

朱赛男<sup>1,2</sup>, 陈艳华<sup>1</sup>, 王 宁<sup>1</sup>, 李伟华<sup>3</sup>

(1. 华北理工大学建筑工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省地震工程与防灾重点实验室, 河北 唐山 063210;  
3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 将海水和海床土分别视为理想流体和饱和多孔介质, 基于理想流体波动理论和 Biot 流体饱和多孔介质理论, 考虑海水-海床土-隧道结构动力相互作用, 利用波函数展开法和 Hankel 函数积分变换法, 给出平面  $P_1$  波入射下海底双层衬砌隧道地震响应的解析解。与以往的“大圆弧假定”方法相比, Hankel 函数积分变换法可以将海底双层衬砌隧道场地中的散射波场势函数从柱坐标系下直接转换到直角坐标系下, 可以更好地处理海水层表面和水土交界面处边界条件。在解析解的基础上, 分析内外衬砌刚度比和内外衬砌厚度比对海底双层衬砌隧道位移响应和应力响应的影响, 对海底双层衬砌隧道的抗减震设计提出合理建议。研究结果表明: ①海底双层衬砌隧道的应力响应明显小于同参数条件下的单层衬砌隧道; ②内外衬砌刚度比和厚度比对隧道位移响应的影响与隧道衬砌位置有关; ③随着内外衬砌刚度比和厚度比的增加, 隧道外衬砌应力响应均有减小趋势; ④综合内外衬砌刚度比和厚度比对隧道位移响应和应力响应影响, 海底双层衬砌隧道抗减震设计时, 隧道内外衬砌刚度比和厚度比的选取范围分别建议为  $E_2/E_1 \leq 3$  和  $\delta_2/\delta_1 \leq 2$ 。

**关键词:** 海底双层衬砌隧道; 海水-海床土-隧道结构动力相互作用; 散射问题; 解析解; 地震响应

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0122-06

作者简介: 朱赛男(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程抗震方面的研究工作。E-mail: gczhusainan@163.com。

## Effects of double-layer linings on seismic responses of undersea tunnels under incidence of plane $P_1$ waves

ZHU Sainan<sup>1,2</sup>, CHEN Yanhua<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, LI Weihua<sup>3</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063210, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Engineering and Disaster Prevention, Tangshan, 063210, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Seawater and seabed soil are regarded as the ideal fluid and saturated porous media respectively. Based on the ideal fluid wave theory and Biot's theory, considering the dynamic interaction of seawater-seabed-tunnel, using the wave function expansion method and Hankel function integral transformation method, the analytical solutions for the seismic response of a double-layer lining undersea tunnel under the incidence of plane  $P_1$  waves are obtained. Compared with the previous "large arc hypothesis" method, the Hankel function integral transformation method can directly convert the scattered waves by the double-layer lining undersea tunnel from the cylindrical coordinate system to the rectangular coordinate system, which can better deal with the boundary conditions (surface for the seawater and seawater-seabed interface). On the basis of the analytical solutions, the influences of the stiffness ratio of the inner to outer linings as well as their thickness ratio on the displacement and stress responses of the double-layer lining undersea tunnel are analyzed, and some suggestions are put forward for its anti-shock design. The research results show that: (1) The seismic dynamic stress responses of the undersea double-layer lining tunnel is significantly smaller than those of the single-layer one under the same parameters. (2) The effects of the stiffness ratio and thickness ratio of the inner to outer linings on the displacement responses of tunnel are related to the different locations of the linings. (3) With the increase of the stiffness ratio and thickness ratio of the inner to outer linings, the stress responses of the outer linings of the tunnel all decrease. (4) Considering the influences of the stiffness ratio and thickness ratio of the inner to outer linings on the displacement and stress responses of the tunnel, it is suggested that the selection ranges of the stiffness ratio and thickness ratio of the inner to outer linings of the undersea double-layer lining tunnel should be no more than 3 and 2, respectively.

基金项目: 唐山市科技局应用基础研究项目(22130211H); 河北省属高等学校基本科研业务费研究项目(JQN2023018); 国家自然科学基金项目(52078033); 河北省自然科学基金项目(E2020209072)  
收稿日期: 2023-11-30

**Key words:** undersea double-layer tunnel; seawater - seabed soil - tunnel structure dynamic interaction; scattering problem; analytical solution; seismic response

## 0 引言

由于海底地震动的记录严重缺乏, 导致海底隧道的地震响应研究进展较为缓慢, 尤其是在理论研究方面。很多跨海结构(跨海大桥、海底隧道)在做抗震分析时, 采用的地震记录多为陆地地震记录, 这显然是不合理的。因此, 一些学者尝试着用数值方法来分析海底隧道的地震响应及其相关的影响因素<sup>[1-7]</sup>, 在研究过程中多未考虑水-土-结构动力相互作用, 得到的成果和理论尚不充分。Ma 等<sup>[8]</sup>采用“大圆弧假定”处理水土交界面处边界条件, 利用波函数展开法尝试给出平面  $P$  波在水下输水隧洞周围散射问题的解析解, 但计算模型中的水下土体视作单相介质。而 Stoll 等<sup>[9]</sup>建立水层-流体饱和多孔介质模型, 证实了水下土层假定为饱和土的合理性。“大圆弧假定”是一种近似解析方法, 在求解过程中, 大宗量 Bessel 函数收敛较慢<sup>[10]</sup>, 导致场地内散射波的求解存在误差累积, 从而使得半空间表面零应力被放松<sup>[11]</sup>。由此, 从数学精度角度出发, “大圆弧假定”方法不再能充分满足半空间边界条件。朱赛男等<sup>[12-13]</sup>和 Li 等<sup>[14]</sup>均采用 Hankel 函数积分变换法对入射波作用下海底洞室和衬砌隧道地震响应进行研究, 该方法可以有效地将场地中的柱坐标系下的散射波直接转换到直角坐标系下, 避免了“大圆弧假定”方法的使用, 同时分析了入射波特性、场地条件和隧道埋深等因素对隧道场地地震响应的影响。

上述对海底隧道抗震问题的研究主要集中在海底单层衬砌隧道场地。海底隧道的外衬砌为隧道的主要承重结构, 内衬砌主要起到辅助作用。地震作用下的海底隧道周围海床土可能发生液化现象, 促使隧道周围孔隙水压力急剧增加<sup>[15]</sup>, 进而增加隧道渗水和上浮的可能性, 对海底隧道的安全性造成影响。而由内外衬砌组合而成的双层衬砌可以提高整个结构的耐久性、防水性能和抗浮性能<sup>[16]</sup>。日本首先在工程实际上建设双层衬砌隧道, 如东京湾水底隧道, 建造时间已超过 20 a<sup>[17]</sup>。已有的研究结果表明, 提高衬砌结构刚度、设置减震层均可有效地达到抗震和减震作用<sup>[18]</sup>。在双层衬砌隧道场地中, 地震波会被设置的隔震层部分吸收, 从而使得衬砌的应力集中减小<sup>[19]</sup>。对此, 有学者建立双层衬砌理论模型, 对双层衬砌隧道的地震响应进行研究。Ding 等<sup>[20]</sup>利用波函数展开法对  $P$  波入射下饱和土半空间中复合式衬砌隧道的抗震性能进行研究。采用相同的方法, Fan 等<sup>[18]</sup>给出平面  $SV$  波作用下饱和土半空间中含缓冲层衬砌隧道散射问题的解

析解, 并重点分析缓冲层对隧道动应力集中系数的影响。Zhao 等<sup>[21]</sup>建立考虑岩石-衬砌接触面的非线性特性的最终衬砌-初始衬砌-围岩复合衬砌隧道模型, 对  $SH$  波作用下复合衬砌隧道地震响应进行研究。

从研究成果可以看出, 关于海底双层衬砌隧道地震响应的研究成果鲜见报导。鉴于此, 本文基于理想流体介质波动理论和 Biot 流体饱和多孔介质波动理论, 建立海水-海床土-双层衬砌隧道结构动力相互作用模型。利用 Hankel 函数积分变换法, 给出  $P_1$  波作用下考虑海水-海床土-隧道结构相互作用的海底双层衬砌隧道地震响应的解析解, 并分析内外衬砌刚度比和内外衬砌厚度比等因素对隧道位移响应和应力响应的影响。

## 1 场地模型与基本方程

### 1.1 场地模型

海底双层衬砌隧道场地模型如图 1 所示。水层视为理想流体介质<sup>[22]</sup>, 水深为  $h_w$ 。饱和土层为流体饱和多孔介质。双层衬砌隧道埋置在饱和土层中, 由内衬砌和外衬砌组成, 外衬砌位于饱和土与内衬砌之间。隧道埋深  $h$ , 外衬砌外半径  $a$ , 外衬砌内半径  $b$ , 内衬砌内半径  $c$ 。内外衬砌、水土交界面和水层表面分别采用直角坐标系  $(x_1, y_1)$ ,  $(x, y)$  和  $(x_2, y_2)$ 。其中, 内外衬砌也可采用柱坐标系  $(r_1, \theta_1)$ 。上述各坐标系间的关系见文献[12]。

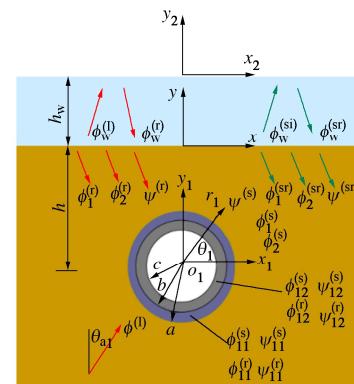


图 1 场地模型

Fig. 1 Analysis model

### 1.2 海底双层衬砌隧道场地波动方程

海水层为理想流体, 其波动方程见文献[23, 24]; 海床土的波动方程可采用 Biot<sup>[25]</sup>提出的流体饱和多孔介质的波动方程; 海底隧道的双层衬砌均为单相介质,

其波动方程见文献[10]。

## 2 问题的边界条件

海底双层衬砌隧道场地模型中的边界条件有水层自由表面、水土交界面、外衬砌-饱和土交界面、内外衬砌交界面和内衬砌临空面。为考虑海水-海床土-隧道结构动力相互作用, 对海底双层衬砌隧道场地模型的边界条件做以下假设: ①水土交界面透水, 外衬砌-饱和土界面不透水; ②水土交界面、外衬砌-饱和土界面和内外衬砌界面的应力和位移均连续。上述场地中边界条件的表达式可分别见文献[24, 23, 16, 18, 26]。

## 3 场地波场分析

设入射波  $P_1$  波的频率和入射角分别为  $\omega$  和  $\theta_{a1}$ , 波幅系数为 1。该入射波在直角坐标系  $(x, y)$  下势函数表达为:

$$\phi^{(1)} = e^{ik_{a1}(x \sin \theta_{a1} + y \cos \theta_{a1})} e^{i\omega t}, \quad (1)$$

式中,  $k_{a1}$  为  $P_1$  波波数。场地中每个波的势函数均有时间因子  $e^{i\omega t}$ , 为书写方便, 后续均忽略此项。

### 3.1 自由场波场

场地不存在隧道时, 场地为自由场。入射波入射下, 水土交界面处产生反射波 ( $P_1$  波、 $P_2$  波和 SV 波), 水层中产生 P 波 (上行 P 波和下行 P 波)。这些波的势函数的表达式可见文献[14]。

### 3.2 散射波场

由于场地中海底双层衬砌隧道的存在, 入射波  $P_1$  波的作用下的隧道附近、水土交界面处、水层、外衬砌、内衬砌均会产生散射波。其中, 隧道附近和水土交界处的散射波均属饱和土中的散射波。

#### (1) 饱和土层中散射波场

隧道附近的散射  $P_1$  波、 $P_2$  波和 SV 波的势函数和水土交界面附近产生的散射  $P_1$  波、 $P_2$  波和 SV 波的势函数均见参考文献[12, 14]。

从场地模型中可以看出, 水层自由表面和水土交界面处边界条件是在直角坐标系下建立的, 上述散射波势函数是在柱坐标系  $(r_1, \theta_1)$  下建立的, 此时将柱坐标系下的散射波势函数直接代入边界条件进行计算显然是不合理的。在以往的饱和土半空间中的隧道对地震波散射问题的研究中, 多采用“大圆弧假定”方法, 该方法具有很大的局限性。

本文采用 Hankel 函数积分变换法, 饱和土中的散射波势函数均可转换到直角坐标系下, 转换方法和具体表达式见文献[12, 14], 避免了传统地震波散射问题所采用的“大圆弧假定”。

#### (2) 水层中散射波场

参考直角坐标系下的饱和土中散射波势函数表达, 水层中散射波势函数表达式可直接写出, 具体见文献[12, 14]。

#### (3) 外衬砌中的散射波场

由于隧道外衬砌的存在, 外衬砌中会产生发散型散射 P 波  $\phi_{11}^{(s)}$  和 SV 波  $\psi_{11}^{(s)}$ , 及汇聚型散射 P 波  $\phi_{11}^{(r)}$  和 SV 波  $\psi_{11}^{(r)}$ 。 $\phi_{11}^{(s)}$ 、 $\phi_{11}^{(r)}$ 、 $\psi_{11}^{(s)}$  和  $\psi_{11}^{(r)}$  的势函数表达式见文献[26]。

#### (4) 内衬砌中的散射波场分析

同样, 由于内衬砌的存在, 内衬砌中也会产生发散型散射 P 波  $\phi_{12}^{(s)}$  和 SV 波  $\psi_{12}^{(s)}$ , 及汇聚型散射 P 波  $\phi_{12}^{(r)}$  和 SV 波  $\psi_{12}^{(r)}$ 。 $\phi_{12}^{(s)}$ 、 $\phi_{12}^{(r)}$ 、 $\psi_{12}^{(s)}$  和  $\psi_{12}^{(r)}$  的势函数表达式见文献[26]。

## 4 问题的解与验证

### 4.1 问题的求解

自由场中的波和散射波场中的波的求解方法可见文献[14]和文献[26], 此处不再赘述。

在后续计算分析时, 定义无量纲频率  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\omega a}{\pi \sqrt{\mu_s / \rho_s}}, \quad (2)$$

式中,  $\mu_s$  为饱和土的拉梅常数,  $\rho_s$  为饱和土的密度。

定义  $AC_r^{11} = |u_r^{11}| / |u_0|$  和  $AC_\theta^{11} = |u_\theta^{11}| / |u_0|$  分别为隧道外衬砌的径向位移和环向位移放大系数,  $PPCF = |\sigma^{11,f}| / |\sigma_0|$  和  $DSCF_1 = |\sigma_\theta^{11}| / |\sigma_0^{11}|$  分别为外衬砌的孔压集中系数和动应力集中系数。 $DSCF_2 = |\sigma_\theta^{12}| / |\sigma_0^{12}|$  为内衬砌的动应力集中系数。其中,  $u_0 = k_{a1}$ ,  $\sigma_0 = \mu k_b^2$ ,  $\sigma_0^{12} = \mu_2 k_{12,b}^2$ 。

### 4.2 验证

为验证本文中解的正确性, 内外衬砌设为相同材料, 此时外衬砌海底隧道模型可看成为海底单层隧道模型, 具体退化方法见文献[26]。采用本文解计算得到外衬砌的孔压集中系数 (PPCF) 和动应力集中系数 ( $DSCF_1$ ), 并将计算结果与朱赛男<sup>[12]</sup>得到的相同条件下海底单层衬砌隧道衬砌厚度  $\delta = 0.15a$  时衬砌的孔压集中系数 (PPCF) 和动应力集中系数 ( $DSCF_1$ ) 进行对比。

图 2 给出 P 波以  $\eta=0.25$ ,  $\theta_{a1}=30^\circ$  入射下采用本文解得到的外衬砌的孔压集中系数 (PPCF<sub>1</sub>) 和动应力集中系数 (DSCF<sub>1</sub>) 与文献[12]中衬砌隧道孔压集中系数 (PPCF) 和动应力集中系数 (DSCF<sub>1</sub>) 的对比。从图 2 中可以看出, 两种模型的孔压集中系数和动应力集中系数基本一致, 从而验证了本文  $P_1$  波在海底双层衬砌隧道附近散射问题的解析解的准确性。

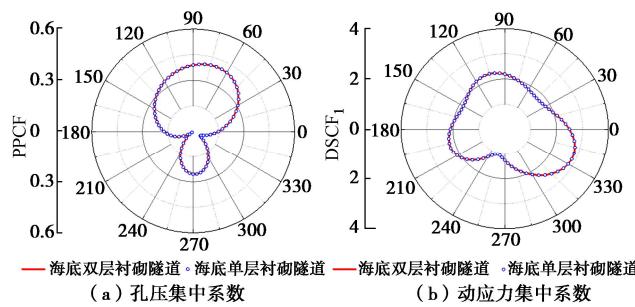


图 2 海底双层衬砌隧道退化海底单层衬砌隧道

Fig. 2 Undersea double-layer lining tunnel degraded to single-layer one with perfect contact

## 5 计算分析

本文为研究双层衬砌对海底隧道地震位移响应和应力响应的影响, 在分析中, 取隧道埋深  $h/a=2$ , 水深  $h_w/a=5$ , 饱和土参数和内外衬砌参数见文献 [26]。

### (1) 内外衬砌刚度比的影响

图 3 给出  $P_1$  波以无量纲频率  $\eta=0.5$  和入射角  $\theta_{al}=30^\circ$  入射时, 不同的内外衬砌刚度比 ( $E_2/E_1$ ) 条件下, 隧道拱顶 ( $\theta_1=90^\circ$ ) 和左侧拱腰 ( $\theta_1=180^\circ$ ) 外衬砌径向位移和环向位移分布情况。从图中可以看出, 内外衬砌刚度比对左侧拱腰处的位移影响较小。 $E_2/E_1=0$  时, 表示海底隧道为单层衬砌, 该条件下隧道拱顶处的径向位移明显大于双层衬砌情况, 而环向位移相差不大。这也说明, 双层衬砌的存在可以有效地减小海底隧道位移响应, 尤其是径向位移。此外, 在内外衬砌刚度比  $E_2/E_1 \geq 3$  时, 内外衬砌刚度比对隧道各处的位移影响不再明显。

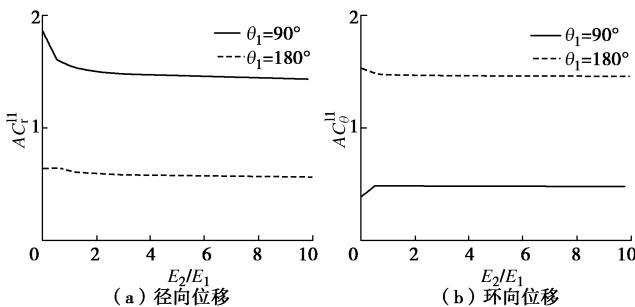


图 3 内外衬砌刚度变化对隧道位移的影响

Fig. 3 Influences of stiffness on displacement of tunnel

图 4, 5 分别给出  $P_1$  波以无量纲频率  $\eta=0.5$  和入射角  $\theta_{al}=30^\circ$  入射时, 不同的内外衬砌刚度比 ( $E_2/E_1$ ) 条件下, 隧道外衬砌处的动应力集中系数 (DSCF<sub>1</sub>)、孔压集中系数 (PPCF) 和内衬砌动应力集中系数 (DSCF<sub>2</sub>) 分布情况。从图 4 中可以出, 在其他条件相同的情况下, 双层衬砌隧道的动应力集中系数和孔压集中系数明显小于单层衬砌隧道条件。同

时, 可以发现, 随着内外衬砌刚度比的增加, 隧道外衬砌动应力集中系数和孔压集中系数有减小趋势。同时, 在图 5 中可以发现, 内衬砌动应力集中系数随着内外衬砌刚度比的增加而明显增加。这和内外衬砌刚度比对饱和土中双层衬砌隧道减震效果是一致的<sup>[27]</sup>。

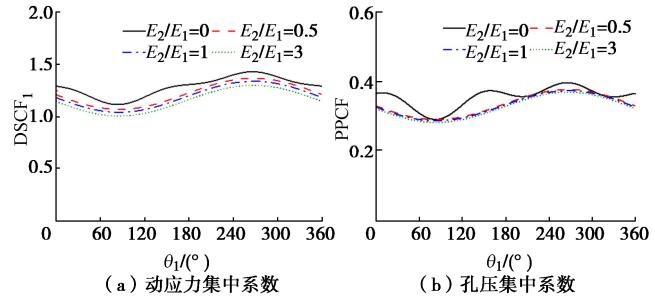


图 4 内外衬砌刚度变化对外衬砌应力的影响

Fig. 4 Influences of stiffness on PPCF and DSCF<sub>1</sub> around outer lining

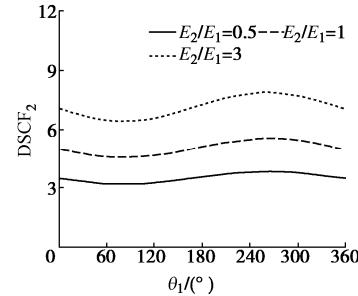


图 5 内外衬砌刚度变化对内衬砌应力的影响

Fig. 5 Influences of stiffness on DSCF<sub>2</sub> around inner linings

综合内外衬砌刚度比对地震作用下的海底双层衬砌隧道位移响应和应力响应的影响, 内外衬砌刚度比的选择建议  $E_2/E_1 \leq 3$ 。

### (2) 内外衬砌厚度比的影响

图 6 给出  $P_1$  波以无量纲频率  $\eta=0.5$  和入射角  $\theta_{al}=30^\circ$  入射时, 不同的内外衬砌厚度比 ( $\delta_2/\delta_1$ ) 条件下, 隧道拱顶 ( $\theta_1=90^\circ$ ) 和左侧拱腰 ( $\theta_1=180^\circ$ ) 外衬砌径向位移和环向位移分布情况。从图中可以看出, 内外衬砌厚度比的变化对左侧拱腰处的位移影响与内外衬砌刚度比一样, 影响均较小。 $\delta_2/\delta_1=0$  时, 表示海底隧道为单层衬砌, 该条件下隧道环向位移数值与海底双层衬砌情况相近, 而海底单层衬砌隧道拱顶的径向位移大于双层衬砌隧道。此外, 随着内外衬砌厚度比的增加, 隧道拱顶和左侧拱腰的径向位移均减小。在内外衬砌厚度比  $\delta_2/\delta_1 \geq 2$  后, 内外衬砌厚度比对隧道径向位移的影响甚微。这和饱和土中双层衬砌隧道内外衬砌厚度比对隧道动应力集中的影响规律是一致的<sup>[27]</sup>。

图 7, 8 给出  $P_1$  波以无量纲频率  $\eta=0.5$  和入射角  $\theta_{al}=30^\circ$  入射时, 不同的内外衬砌厚度比 ( $\delta_2/\delta_1$ ) 条件下, 隧道外衬砌处的动应力集中系数 (DSCF<sub>1</sub>)、

孔压集中系数 (PPCF) 和内衬砌动应力集中系数 ( $DSCF_2$ ) 分布情况。从图 7, 8 中可以出, 随着内外衬砌厚度比的增加, 外衬砌动应力集中系数 ( $DSCF_1$ )、外衬砌孔压集中系数 (PPCF) 和内衬砌应力集中系数 ( $DSCF_2$ ) 均减小。对比图 7, 8 可以发现, 内外衬砌厚度比对隧道内衬砌应力响应的影响较外衬砌动应力响应明显。同时, 结合内外衬砌对海底双层衬砌隧道位移响应和应力响应的影响, 建议海底双层衬砌隧道内外衬砌厚度比为  $\delta_2/\delta_1 \leq 2$ 。

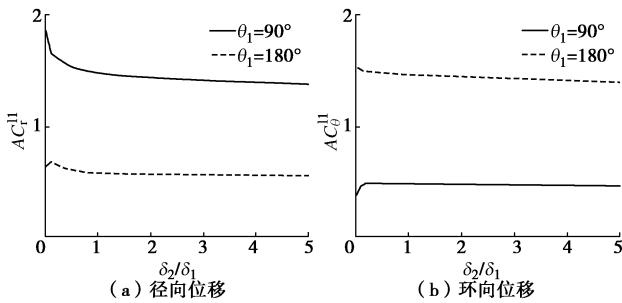


图 6 内外衬砌厚度变化对隧道位移的影响

Fig. 6 Influences of thickness on displacement of tunnel

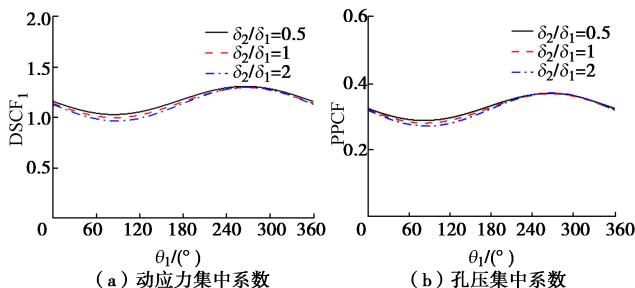


图 7 内外衬砌厚度变化对外衬砌应力的影响

Fig. 7 Influences of thickness on PPCF and  $DSCF_1$  around outer linings

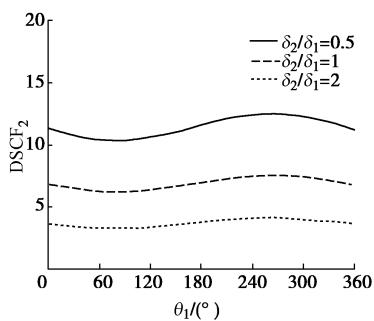


图 8 内外衬砌厚度变化对内衬砌应力的影响

Fig. 8 Influences of thickness on  $DSCF_2$  around inner linings

## 6 结 论

本文将海水和海床土分别视为理想流体和饱和土, 利用 Hankel 函数积分变换法和波函数展开法, 给出海底双层衬砌隧道对入射  $P_1$  波的散射问题的解析解, 并对内外衬砌刚度比和内外衬砌厚度比对海底双

层衬砌隧道响应进行研究, 进而对海底双层衬砌隧道抗减震参数提出建议。

(1) 地震作用下双层衬砌可以有效地减小海底隧道的位移响应和应力响应。

(2) 隧道外衬砌应力响应随着内外衬砌刚度比和厚度比的增加而减小。

(3) 综合内外衬砌刚度比对隧道位移响应和应力响应影响, 海底双层衬砌隧道抗减震设计时, 隧道内外衬砌刚度比和衬砌厚度比的选取范围分别建议为  $E_2/E_1 \leq 3$  和  $\delta_2/\delta_1 \leq 2$ 。

## 参 考 文 献:

- [1] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMON N, DROSOS V, et al. Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(9): 1067-1090.
- [2] DING J H, JIN X L, GUO Y Z, et al. Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel[J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1367-1377.
- [3] CHENG X S, XU W W, YUE C Q, et al. Seismic response of fluid-structure interaction of undersea tunnel during bidirectional earthquake[J]. Ocean Engineering, 2014, 75: 64-70.
- [4] 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.
- [5] 巨建民, 李会鹏. P 波斜入射下海底沉管隧道地震响应分析[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(6): 112-116. (JU Jianmin, LI Huipeng. Seismic response analysis of submarine immersed tunnel to P-wave of oblique incidence[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018, 39(6): 112-116. (in Chinese))
- [6] 周鹏, 崔杰, 李亚东, 等. 地震 P 波斜入射下入射角度对海底沉管隧道结构动力响应的影响[J]. 世界地震工程, 2016, 32(3): 78-85. (ZHOU Peng, CUI Jie, LI Yadong, et al. Effect of oblique incident angle of P-wave on submarine immersed tunnels[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(3): 78-85. (in Chinese))
- [7] 刘继国, 程勇, 郭小红. 海底盾构隧道地震响应影响因素分析[J]. 中外公路, 2011, 31(4): 200-203. (LIU Jiguo, CHENG Yong, GUO Xiaohong. Analysis of influencing factors on seismic response of subsea shield tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(4): 200-203. (in Chinese))
- [8] MA H W, CHEN W H. Transverse response of underwater shield tunnel to incident P waves[J]. Applied Mechanics and

Materials, 2011, **90/91/92/93**: 1602-1609.

[9] STOLL R D, KAN T K. Reflection of acoustic waves at a water-sediment interface[J]. Acoustical Society of America Journal, 1981, **70**(1): 149-156.

[10] LIU Q J, ZHAO M J, WANG L H. Scattering of plane  $P$ ,  $SV$  or Rayleigh waves by a shallow lined tunnel in an elastic half space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, **49**: 52-63.

[11] LIN C H, LEE V W, TODOROVSKA M I, et al. Zero-stress, cylindrical wave functions around a circular underground tunnel in a flat, elastic half-space: incident  $P$ -waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **30**(10): 879-894.

[12] 朱赛男, 李伟华, LEE Vincent W, 等. 平面  $P$  波入射下海底衬砌隧道地震响应解析分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1418-1427. (ZHU Sainan, LI Weihua, LEE V W, et al. Seismic response of undersea lining tunnels under incident plane  $P$  waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1418-1427. (in Chinese))

[13] 朱赛男, 李伟华, LEE Vincent W, 等. 平面  $P_1$  波斜入射下海底洞室地震响应解析分析[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 93-103. (ZHU Sainan, LI Weihua, LEE V W, et al. Analytical solution of seismic response of an undersea cavity under incident  $P_1$ -wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 93-103. (in Chinese))

[14] LI W H, ZHU S N, LEE V W, et al. Scattering of plane  $SV$ -waves by a circular lined tunnel in an undersea saturated half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, **153**: 107064.

[15] 栾茂田, 张小玲, 张其一. 地震荷载作用下海底管线周围砂质海床的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1155-1161. (LUAN Maotian, ZHANG Xiaoling, ZHANG Qiyi. Stability analysis of sandy seabed around submarine pipelines under seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1155-1161. (in Chinese))

[16] 周济民. 水下盾构法隧道双层衬砌结构力学特性[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (ZHOU Jimin. Mechanical Characteristics of Double-Layer Lining Structure of Underwater Shield Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

[17] JAPAN TUNNELLING ASSOCIATION. Challenges and changes: Tunnelling activities in Japan 1994[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, **10**(2): 203-215.

[18] FAN K X, SHEN Y S, WANG S S, et al. Dynamic response of composite lining tunnel with buffer layer: an analytical and experimental investigation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, **2020**: 5453138.

[19] CHENG X S, KANG T F, YUE C Q, et al. Shock reduction techniques for a submarine tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, **37**(5): 3781-3804.

[20] DING H B, TONG L H, XU C J, et al. Aseismic performance analysis of composite lining embedded in saturated poroelastic half space[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(9): 04020156.

[21] ZHAO W S, CHEN W Z, YANG D S. Effect of an imperfect interface on seismic response of a composite lining tunnel subjected to  $SH$ -waves[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(12): 04018177.1-04018177.10.

[22] 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 Jingqing, ZHOU Jian. A fluid mechanics basis for estimating undersea ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, **11**(3): 87-93. (in Chinese))

[23] WANG J T, ZHANG C H, JIN F. Analytical solutions for dynamic pressures of coupling fluid-porous medium-solid due to  $SV$  wave incidence[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, **33**(12): 1467-1484.

[24] WANG J T, ZHANG C H, JIN F. Analytical solutions for dynamic pressures of coupling fluid-solid-porous medium due to  $P$  wave incidence[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, **3**(2): 263-271.

[25] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, **28**(2): 168-178.

[26] 朱赛男, 陈凯江, 李伟华. 水下双层衬砌隧道对平面  $SV$  波散射问题的解[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, **55**(2): 217-226. (ZHU Sainan, CHEN Kaijiang, LI Weihua. Analytical solution to the scattering of plane  $SV$  waves in an underwater double-lined tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, **55**(2): 217-226. (in Chinese))

[27] 范凯祥. 饱和地层浅埋隧道复合式衬砌对弹性波的散射[D]. 成都: 西南交通大学, 2021. (FAN Kaixiang. Scattering of Elastic Waves by Composite Lining of Shallow Tunnel in Saturated Stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese))