

DOI: 10.11779/CJGE20220651

# 淤积-潮汐耦合作用下沉管隧道接头变形特征研究

周桓竹<sup>1,2</sup>, 喻莹<sup>1</sup>, 侯晋芳<sup>3</sup>, 俞缙<sup>4</sup>, 王延宁<sup>\*1,5</sup>

(1. 汕头大学土木与环境工程系广东省结构安全与监测工程技术中心, 广东 汕头 515063; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;  
3. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 4. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;  
5. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 重点研究了循环荷载耦合下沉管隧道接头的变形特征。通过建立管-土相互作用模型, 将隧道简化为 Timoshenko 梁模型, 将地基简化为 Kerr 地基模型, 同时考虑基床系数随时间变化, 建立管节-接头理论模型, 分析接头处转角和挠度差。对比荷载叠加和荷载耦合两种不同加载方式下沉管隧道接头变形问题, 讨论淤积荷载引发的结构变形在总变形中的贡献比例, 以及适合分析运维期接头变形问题的理论解析方法。与 ABAQUS 数值计算结果进行比较, 说明方法的适用性。以甬江沉管隧道实测数据对比分析表明: 循环荷载耦合作用下对沉管隧道的动力响应影响显著, 大于由单个荷载引起结构变形的叠加。淤积荷载引起的沉管结构变形占据耦合荷载导致变形的 75%~125%, 提出的理论模型可以很好地分析实测沉降结果, 验证了提出理论模型的有效性。

**关键词:** 沉管隧道; 荷载耦合; 理论计算; 软土地基; 接头沉降

中图分类号: TU43; U459.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)09-1926-08

**作者简介:** 周桓竹(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事沉管隧道变形分析与动力学计算方面的科研工作。E-mail: huanzhuz@163.com。

## Deformation characteristics of joints of immersed tube tunnels under coupling loads of back silting-tidal cycle

ZHOU Huanzhu<sup>1,2</sup>, YU Ying<sup>1</sup>, HOU Jinfang<sup>3</sup>, YU Jin<sup>4</sup>, WANG Yanning<sup>\*1,5</sup>

(1. Department of Civil and Environmental Engineering & Guangdong Engineering Center for Structure Safety and Health Monitoring, Shantou University, Shantou 515063, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. CCCC First Harbor Engineering Co., LTD., Tianjin 300461, China; 4. Fujian Tunnel and Urban Underground Space Engineering Technology Research Center, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 5. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The proposed method focuses on the deformation characteristics of joints of immersed tube tunnels under cyclic load coupling. By establishing the tunnel-soil interaction model, the tunnel is simplified to the Timoshenko beam model, and the foundation is simplified to the Kerr foundation model. At the same time, considering the change of the subgrade coefficients with time, the theoretical model for the element-joint is established to analyze the transfer angle and deflection of the joints. By comparing the joint deformations of immersed tube tunnels under two different loading modes, namely load superposition and load coupling, the contribution proportion of structural deformation caused by back silting loads in the total deformation is discussed, and a theoretical analytical method suitable for analyzing the joint deformations during operation and maintenance is proposed. A comparison with the numerical results of ABAQUS demonstrates the applicability of the proposed method. By comparing with the measured data of Yongjiang immersed tube tunnel, it is shown that the dynamic response of the immersed tube tunnel is significantly affected by the cyclic load coupling, which is greater than the superposition of structural deformation caused by the single load. The deformation of immersed structure caused by the back silting loads accounts for 75%~125% of the deformation caused by the cyclic load coupling. The proposed theoretical model can well analyze the measured settlement results, which verifies the validity of the proposed theoretical model.

**Key words:** immersed tube tunnel; load coupling; theoretical calculation; soft soil foundation; joint settlement

**基金项目:** 广东省自然科学基金项目(2022A1515011200); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放课题(SKLGDUK2005); 广东省科技计划项目(STKJ2021129)

**收稿日期:** 2022-05-19

**\*通信作者** (E-mail: wangyn@stu.edu.cn)

## 0 引言

沉管隧道是一种通过将管节分段预制后浮运沉放至特定位置的现代隧道建造方式<sup>[1]</sup>, 具有工期短、整体性强等优势, 应用广泛<sup>[2-3]</sup>。沉管隧道运营期长期受到潮汐及淤积等循环荷载作用的影响, 容易产生过大的变形<sup>[4]</sup>。由潮汐荷载引起的管节变形占据总沉降的4%~10%<sup>[5]</sup>, 由淤积荷载引起的管节沉降占据总沉降的13%左右<sup>[5]</sup>。因此, 有必要针对淤积-潮汐循环荷载作用下沉管隧道的不均匀变形特性开展相关研究, 探明其变形过程并开展相应的计算分析。

沉管隧道常年受潮汐荷载影响, 当回淤土层透水速度小于潮位变化速度<sup>[4]</sup>时, 可将某时刻作用于海床的潮汐荷载等效为该时刻潮位变化产生的水压差, 管节由此随着潮汐水位的升降发生相应的周期往复运动<sup>[6-7]</sup>, 进而出现不均匀变形。例如, 比利时安特卫普 Kennedy 隧道在潮汐作用下, 管节振动幅度可达 10 mm<sup>[7]</sup>。Oda 等<sup>[8]</sup>和于洪丹等<sup>[9]</sup>研究了潮汐荷载变化规律, Hu 等<sup>[10]</sup>提出了水下隧道节段非线性波浪力的计算方法, 为荷载理论计算提供了思路。谢雄耀等<sup>[5]</sup>验证了潮位变化会导致管节的周期性浮动<sup>[11]</sup>。

此外, 对于位于大回淤区域的沉管隧道, 下部土体的应力路径与传统隧道不同, 具有周期长、频率低的固结、卸荷、再加载的循环特性。因清淤频率大致为 2~4 次/a, 则土体既会在循环加卸荷作用下产生地基累积塑性变形, 又将因加卸荷时间较长, 而产生较大程度的排水固结变形, 两种因素叠加, 由此产生的管节长期沉降将较为严重。管节接头对由此造成的差异沉降极为敏感<sup>[12]</sup>, 易发生差异沉降超限或疲劳损伤。因此, 研究淤积和潮汐荷载下的沉管隧道长期沉降对于沉管结构的安全有着重要意义。

沉管隧道沉降计算中需考虑隧道与土的相互作用, 通常先采用弹性地基梁法, 用地基弹簧模拟地基压缩性, 再用合适的梁模型模拟沉管管节。目前广泛采用的 Winkler 地基模型是将地基简化为多个独立弹簧描述地基的变形压缩特性<sup>[12]</sup>。后续研究又提出双参数地基模型, 如 Vlasov 模型<sup>[13]</sup>、Filonenko-Borodich 模型<sup>[14]</sup>、Pasternak 模型<sup>[15]</sup>等。Kerr 三参数地基模型<sup>[16]</sup>进一步将土层划分为两个弹簧层和一个剪切层, 更贴合实际, 近来受到广泛关注。但以前的研究中未考虑地层参数空间变化和基床参数随时间的变化。

隧道通常采用 Euler 梁模型分析管节的受力变形过程<sup>[17]</sup>。然而, 由于隧道纵向地层差异, 切向的错动产生的剪切位移不可忽略<sup>[18]</sup>。近年来, Timoshenko 梁模型被应用于盾构隧道的分析计算<sup>[13, 18-19]</sup>, 能够较好地体现土层差异, 分析管节不均匀变形, 减小因采用

Euler 梁模型忽略剪切位移导致的变形误差。需要指出的是, 实际工程中, 潮汐-淤积荷载可视为作用于顶板之上荷载, 此荷载通过侧墙和中间隔墙传递作用于底板; 预制沉管隧道结构主体由两边侧墙、(左右隧道的)中间隔墙以及顶板和底板构成, 底板和顶板的变形特点与传统平板变形的特点相同, 板宽可达数十米, 而其厚度相对很小, 横向分布的最大挠度甚至可大于轴向分布的挠度, 即底板产生横向分布的拱起(隆起)和顶板产生横向分布下凹的变形均极为明显。据此可知, 只考虑抗弯刚度的 Euler 梁显然难以合理表征沉管结构的变形特点; 且底板的隆起变形大大“吸收”了荷载作用产生的沉降位移, 以致明显地减小了沉管的沉降, 对此应采用 Timoshenko 梁作出相应分析。

现有基于原位数据计算管节沉降的方法<sup>[20]</sup>, 以及通过铰接和半铰接模型模拟管节接头建立的理论模型<sup>[21]</sup>, 无法传递接头差异沉降。考虑到接头差异沉降<sup>[22]</sup>是引起管节纵向不均匀沉降<sup>[23]</sup>的关键, 本文对应建立了考虑接头转角和挠度差传递的管节-接头理论模型。

本文从地基和管节的受力特征出发, 考虑地基沿纵向的不均匀特征, 提出了考虑淤积-潮汐循环荷载耦合作用下的沉管隧道变形分析方法, 并以甬江沉管隧道为例计算分析, 结果与荷载叠加引起的管节沉降及实测数据进行对比, 并与数值模拟结果进行比较, 验证该方法的有效性。

## 1 淤积-潮汐耦合作用管节变形计算

首先确定淤积荷载和潮汐荷载表达方式, 其次引入随时间变化的等效压缩基床参数和等效剪切基床参数, 建立 Kerr 三参数地基的 Timoshenko 梁模型, 最后考虑接头受力和变形传递, 建立管节接头变形计算公式。

### 1.1 淤积-潮汐循环荷载

采用正弦波形循环函数模拟潮汐循环荷载随时间的变化趋势<sup>[24]</sup>, 表达式见式(1), 变化趋势如图1(a)。

$$q(t_c) = q_r \sin\left(\frac{2\pi}{T_r} t_k\right) + q_j \sin\left(\frac{2\pi}{T_j} t_k\right) \quad (1)$$

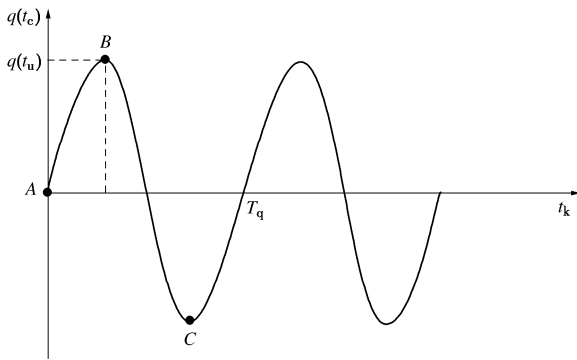
式中:  $q(t_c)$  为任一时段的潮汐荷载;  $t_k$  为加载时长;  $q_r$ ,  $T_r$  分别为潮汐荷载日变化幅值和周期;  $q_j$ ,  $T_j$  分别为潮汐荷载季节性变化幅值和周期。

采用梯形循环函数<sup>[12]</sup>模拟淤积荷载伴随时间的变化趋势, 表达式见式(2), 变化趋势如图1(b)。

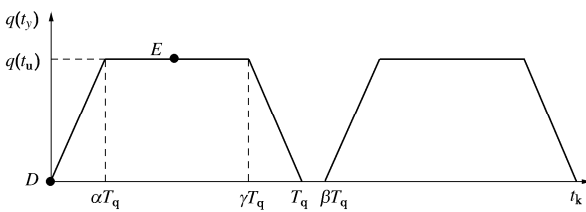
$$q(t_y) = \begin{cases} \frac{q(t_u)}{\alpha T_q} [t - (n-1)\beta T_q] & (n-1)\beta T_q \leq t < (n-1)\beta T_q + \alpha T_q \\ q(t_u) & (n-1)\beta T_q + \alpha T_q \leq t < (n-1)\beta T_q + \gamma T_q \\ \frac{q(t_u)}{(1-\gamma)T_q} [(n-1)\beta T_q + T_q - t] & (n-1)\beta T_q + \gamma T_q \leq t < (n-1)\beta T_q + T_q \\ 0 & (n-1)\beta T_q + T_q \leq t < n\beta T_q \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q(t_y)$  为任一时段的回淤清淤荷载;  $q(t_u)$  为回淤

清淤荷载循环周期最大值;  $T_q$  为荷载循环周期;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  为与荷载循环周期内加载时长有关的常数。



(a) 潮汐荷载



(b) 淤积荷载

图 1 淤积-潮汐循环荷载作用

Fig.1 Cyclic loads on immersed tunnel

## 1.2 沉管隧道计算模型

实际工程中, 沉管隧道会因外力同时发生管节的弯曲变形和剪切变形, 本文采用 Timoshenko 梁<sup>[13]</sup>模型考虑管体的弯剪影响, 其变形示意图如图 2。

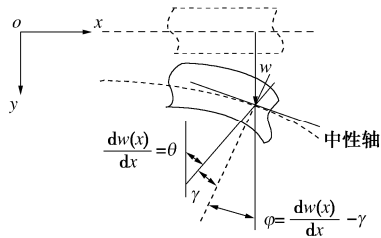


图 2 Timoshenko 梁

Fig. 2 Timoshenko beam

Timoshenko 梁的弯矩表达式<sup>[13]</sup>和剪力表达式<sup>[13]</sup>分别为

$$M(x) = EI\kappa = -EI \frac{d\varphi}{dx} = -EI \frac{d^2w}{dx^2} + EI \frac{d\gamma}{dx}, \quad (3)$$

$$Q(x) = GA\gamma / f_s = GA \left( \frac{dw}{dx} - \varphi \right) / f_s. \quad (4)$$

式中:  $w(x)$ ,  $M(x)$ ,  $Q(x)$  分别为管节的挠度、弯矩、剪力;  $EI$ ,  $GA$  分别为管节的抗弯刚度和抗剪刚度;  $\kappa$  为中性轴的曲率;  $dw(x)/dx$  为中性轴的转角, 即  $\theta$ ,  $\varphi$  为由弯曲变形引起的截面转角, 以下简称弯转角;  $dw(x)/dx - \varphi$  为由剪切变形引起的截面剪切角, 即  $\gamma$ <sup>[13]</sup>;  $f_s$  为截面剪应力的非均匀分布系数<sup>[25]</sup>。

考虑管节横向宽度, 循环荷载  $P_k$  表达式为

$$P_k = q_x B. \quad (5)$$

式中:  $q_x$  为管节上方循环荷载, 表示潮汐荷载和淤积荷载之和;  $B$  为管节宽度。

沉管与土邻界面处的沉降不仅与该处所受竖向压力有关, 还与邻近位置的压力有关。Kerr 地基模型同时考虑了地基的连续性和压缩性, 更适合模拟沉管与土相互作用模型下软土地基的变形<sup>[16]</sup>。基于此, 提出了置于 Kerr 三参数地基的 Timoshenko 梁分析模型 (KTM), 模拟工程中的沉管隧道如图 3 所示。为使问题简化, 认为同一管节下卧地基均匀, 不同管节下方软土分布存在差异, 暂不讨论同一管节下部存在不同土层的情况。

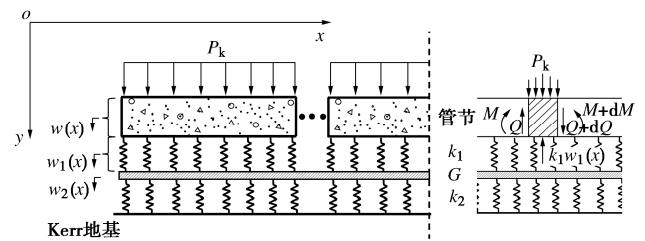


图 3 Kerr 地基下管土相互作用模型图

Fig. 3 Kerr foundation for element-soil interaction

此时荷载作用下的沉管隧道竖向挠度为

$$w(x) = w_1(x) + w_2(x). \quad (6)$$

式中:  $w_1(x)$  为上层弹簧层的变形量;  $w_2(x)$  为剪切层的变形量。

此时地基梁和剪切层所受应力计算分别为

$$q_1(x) = k_1 w_1(x) = k_1 [w(x) - w_2(x)], \quad (7)$$

$$q_2(x) = k_2 w_2(x). \quad (8)$$

故可以得到剪切层的平衡方程:

$$k_1 w_1(x) = -G_s \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} + k_2 w_2(x). \quad (9)$$

式中:  $k_1$ ,  $k_2$  分别为上层和下层弹簧层的压缩刚度;  $G_s$  为剪切层的剪切刚度。

结合式 (8), (9), 可以得到

$$w(x) = \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) w_2(x) - \frac{G_s}{k_1} \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2}. \quad (10)$$

管节受力如图 3 所示, 其受力平衡方程为

$$\frac{dQ}{dx} = [q_1(x) - q_x] B, \quad (11)$$

$$T \left( \frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{d\varphi}{dx} \right) = k_1 w_1(x) B - P_k. \quad (12)$$

式中:  $T$  为管节的等效剪切刚度,  $T = GA/f_s$ 。

此时基于 Timoshenko 梁的管节平衡方程为

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = [q_x - q_1(x)] B - \frac{EI}{T} \frac{d^2 [q_x - q_1(x)] B}{dx^2}. \quad (13)$$

将式 (9), (10) 代入式 (13), 可得基于 KTM 模型的沉管隧道挠度构成  $w_2(x)$  控制方程:

$$\frac{d^6 w_2}{dx^6} - \left( \frac{k_1 + k_2}{G_s} + \frac{Bk_1}{T} \right) \frac{d^4 w_2}{dx^4} + \left( \frac{k_1 B}{EI} + \frac{k_1 k_2 B}{TG_s} \right) \frac{d^2 w_2}{dx^2} - \frac{k_1 k_2 B}{G_s EI} w_2 = -\frac{k_1 B q_x}{G_s EI} + \frac{k_1 B}{TG_s} \frac{d^2 q_x}{dx^2} \quad (14)$$

### 1.3 沉管隧道管节变形求解

对式(14)进行求解, 本文按照黄栩等<sup>[26]</sup>对盾构隧道变形求解的思路, 可得循环荷载下管节的位移响应。为了避免复杂的级数解<sup>[19]</sup>, 本文先设定  $q_x=0$ , 则式(14)化为

$$\frac{d^6 w_2}{dx^6} - \left( \frac{k_1 + k_2}{G_s} + \frac{Bk_1}{T} \right) \frac{d^4 w_2}{dx^4} + \left( \frac{k_1 B}{EI} + \frac{k_1 k_2 B}{TG_s} \right) \frac{d^2 w_2}{dx^2} - \frac{k_1 k_2 B}{G_s EI} w_2 = 0 \quad (15)$$

式(15)可以表示为

$$\left( \frac{d^2}{dx^2} - \lambda_1 \right) \left( \frac{d^2}{dx^2} - \lambda_2 \right) \left( \frac{d^2}{dx^2} - \lambda_3 \right) w_2 = 0 \quad (16)$$

式中:  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的计算见 Zhang 等<sup>[16]</sup>的研究。

进一步对  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  进行转化, 用  $\rho$ ,  $R$ ,  $M$  进行表示, 如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1,2} &= \pm \sqrt{\lambda_1} = \pm \rho, \\ \alpha_{3,4,5,6} &= \pm (R \pm Mi) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中:  $R$ ,  $M$  分别为  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的平方根。

通过以上计算, 可以得到  $w_2(x)$ , 将其代入式(10), 可以得到沉管隧道最终挠度  $w(x)$ 。

考虑管节结构实际受到均布荷载  $q_x$  的影响, 由于对称性, 此时沉管结构中间位置需要满足以下条件:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= 0, \\ \frac{dw^2}{dx^2} &= 0, \\ EI \frac{d^3 w}{dx^3} &= Bq_x / 2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

考虑工程实际, 假定沉管隧道进出口处不产生位移<sup>[16]</sup>, 此时沉管隧道挠度计算表达式为

$$w(x) = C_1 e^{-\rho x} + e^{-Rx} (C_2 \cos Mx + C_3 \sin Mx) \quad (19)$$

根据挠度和转角的关系可得

$$\theta(x) = \frac{dw(x)}{dx} \quad (20)$$

结合式(3), (12), 得到该模型下管节弯矩:

$$M(x) = -EI \frac{d\theta}{dx} = -EI \cdot \left( \frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{k_1 S_t B}{T} + \frac{P_k}{T} \right) \quad (21)$$

式中:  $S_t$  近似为  $w_1(x)$ , 为某一时刻下的地基沉降, 挠度  $w$ 、转角  $\theta$ 、弯矩  $M(x)$ 、剪力  $Q(x)$  均以使管节顺时针转动为正<sup>[24]</sup>。

自第一管节开始, 即当  $x=0$  时的挠度  $w_0$ 、转角  $\theta_0$

和弯矩  $M_0$  的表达式为

$$w_0 = C_1 + C_2 \quad (22)$$

$$\theta_0 = -\rho C_1 - RC_2 + MC_3 \quad (23)$$

$$M_0 = EI(-C_1 \rho^2 + C_2(M^2 - R^2) + 2C_3 RM - P_k/T + BSk_1/T) \quad (24)$$

用挠度  $w_0$ 、转角  $\theta_0$ 、弯矩  $M_0$ 、均布荷载  $q_x$  和地基沉降效应  $S_t$  表示  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ , 将表达式代入式(24), 为方便表示, 另外引入  $F_1(x) \sim F_5(x)$  表达式, 分别对应管节初始端挠度  $w_0$ 、转角  $\theta_0$ 、弯矩  $M_0$ 、均布荷载  $q_x$  和地基沉降效应  $S_t$  的影响:

$$F_1(x) = [e^{-\rho x} (M^2 + R^2) \cos(bx)/2 - e^{-Rx} \cos(Mx)(-\rho^2 + 2R\rho)] / (M^2 + \rho^2 - 2R\rho + R^2) - e^{-Rx} \sin(Mx)(M^2 \rho + \rho^2 R - \rho R^2) / (M^3 + M\rho^2 - 2MR\rho + MR^2) \quad (25)$$

$$F_2(x) = 2R[e^{-\rho x} - e^{-Rx} \cos(Mx)] / (M^2 + \rho^2 - 2R\rho + R^2) + e^{-Rx} \sin(Mx)(M^2 + \rho^2 - R^2) / (M^3 + M\rho^2 - 2MR\rho + MR^2) \quad (26)$$

$$F_3(x) = [e^{-Rx} \cos(Mx) - e^{-\rho x}] / EI / (M^2 + \rho^2 - 2R\rho + R^2) - e^{-Rx} \sin(Mx)(\rho - R) / EI / (M^3 + M\rho^2 - 2MR\rho + MR^2) \quad (27)$$

$$F_4(x) = [e^{-Rx} \cos(Mx) - e^{-\rho x}] / T / (M^2 + \rho^2 - 2R\rho + R^2) - e^{-Rx} \sin(Mx)(\rho - R) / T / (M^3 + M\rho^2 - 2MR\rho + MR^2) \quad (28)$$

$$F_5(x) = Bk_1[e^{-\rho x} - e^{-Rx} \cos(Mx)] / T / (M^2 + \rho^2 - 2R\rho + R^2) + e^{-Rx} \sin(Mx)Bk_1(\rho - R) / T / (M^3 + M\rho^2 - 2MR\rho + MR^2) \quad (29)$$

此时, 式(24)可表示为

$$w(x) = [F_1(x) \cdot w_0 + F_2(x) \cdot \theta_0 + F_3(x) \cdot M_0 + F_4(x) \cdot q_x \cdot B + F_5(x) \cdot S_t] \quad (30)$$

### 1.4 沉管隧道下卧地基刚度求解

基于广义胡克定律, 下层弹簧层压缩刚度的计算, 如下所示:

$$k_2 = \frac{4E_s}{3H} \quad (31)$$

$$k_2 = k_1 / n \quad (32)$$

与上层弹簧层压缩刚度呈倍数关系<sup>[16]</sup>, 剪切层的剪切刚度计算, 如下所示:

$$G_s = \frac{2E_s H}{9(1 + \nu_s)} \quad (33)$$

式中:  $E_s$ ,  $H$  和  $\nu_s$  分别为地基的压缩模量、深度和泊松比。

需要指出的是, 此处认为上层弹簧层的压缩刚度会伴随软土地基固结沉降而不断提高, 还与伴随时间变化的外部荷载相关, 因此, 提出应考虑各个管节下不同性质土层的等效压缩刚度  $k_1(t)$  和等效剪切刚度  $G(t)$ 。即提取任一时刻下全回淤工况荷载  $q_i$  和软土地

基沉降  $S_i$  反算得到等效压缩刚度  $k_1(t)$ :

$$k_1(t) = \frac{q_t}{S_t} \quad (34)$$

联立式 (31) ~ (33), 并将式 (34) 替换  $k_1$ , 得出等效剪切刚度  $G(t)$ :

$$G(t) = \frac{3H^2}{18n(1+\nu_s)} \cdot \frac{q_t}{S_t} \quad (35)$$

式中:  $q_t$  为运营期伴随时间变化的循环荷载取值, 即式 (5) 中  $q_x$ ;  $S_t$  为循环荷载引起的伴随时间变化的地基沉降<sup>[27]</sup>。

### 1.5 沉管隧道接头模型

沉管隧道多采用管节式结构来降低尺寸过大产生的结构内力, 相邻管节之间采用柔性接头进行模拟。变形连续, 竖向差异沉降量  $\Delta w$  (如图 4 (a)) 和转角  $\Delta\theta$  (如图 4 (b)) 的计算式为

$$\Delta w = Q_1 / k_j, \quad (36)$$

$$\Delta\theta = M_1 / k_w \quad (37)$$

式中:  $Q_1$ ,  $M_1$  的计算表达式分别见式 (4) 和式 (3);  $k_j$  和  $k_w$  分别为接头抗剪刚度和抗弯刚度。若  $\Delta w$  为“+”, 表示后一管节相对于前一管节沉降, 若  $\Delta w$  为“-”, 表示后一管节相对于前一管节抬升。若  $\Delta\theta$  为“+”, 表示后一管节相对于前一管节发生顺时针转动, 若  $\Delta\theta$  为“-”, 表示后一管节相对于前一管节发生逆时针转动。

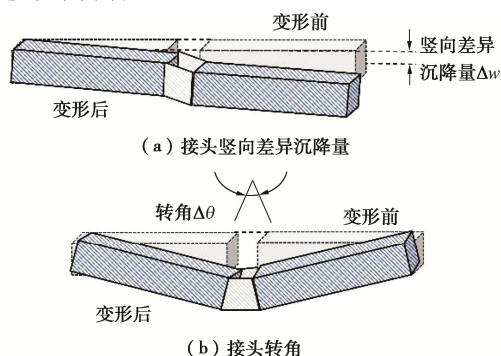


图 4 接头变形示意图

Fig. 4 Deformation of joint

任一管节右端接头处的沉降  $S_i$  为管节左端头处的沉降值  $S_{i-1}$  和该管节挠度值  $w_i$  之和:

$$S_i = S_{i-1} + w_i \quad (38)$$

## 2 实例分析

本节采用理论计算和数值模拟相结合的方法。以

甬江沉管隧道为例, 进行循环荷载耦合引起的理论沉降和实测沉降的对比分析。对比循环荷载不同耦合方式, 比较耦合荷载引起的管节实测沉降和理论计算结果, 区分荷载耦合和荷载叠加引起的管节沉降差异, 通过 ABAQUS 数值模拟结果, 结合实测沉降, 说明理论计算的合理性。

### 2.1 工程参数

甬江沉管隧道位于宁波甬江下游段, 整体长度为 1019.97 m, 沉管段总长为 420 m, 沉管结构共分为 5 段管节, 自北向南依次记为 E1~E5 (85 m+80 m+85 m×3), 共有 6 个接头, 依次为 J1~J6, 如图 5 所示。沉管结构各管节和接头参数取值参考魏纲等<sup>[24]</sup>的研究, 取管节抗弯刚度  $EI = 1.92 \times 10^9$  kPa、抗剪刚度  $GA = 5.5 \times 10^7$  kPa, 梁截面的抗剪刚度修正系数  $f_s = 2.0$ , 接头与管体的弯曲刚度比取 1/600, 剪切刚度比取 1/50, 取接头抗弯刚度  $k_w = 3.2 \times 10^6$  kN·m/rad、抗剪刚度  $k_j = 1.1 \times 10^6$  kN/m。由此计算 J4 接头受到循环荷载产生的变形规律。有关于地基渗透性、压缩模量和孔隙比等参数的取值见魏纲等<sup>[24]</sup>的研究。

### 2.2 荷载施加方式

隧道淤积荷载相关参数为  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 1.0$ ,  $\gamma = 0.9$ , 以一年两次清淤频率讨论,  $T_q = 180$  d, 淤积循环荷载函数最大值  $q(t_0) = 16.425$  kPa, 如图 1 (a)。甬江沉管隧道潮汐荷载相关参数为  $q(t_k) = 17.64$  kPa,  $q_r = 12.74$  kPa,  $T_t = 1.454 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $q_j = 4.9$  kPa,  $T_j = 1.991 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , 如图 1 (b)。由此计算 2000—2003 年间沉管隧道 J4 接头变形趋势。

基于所提出的 Kerr 地基上的 Timoshenko 梁 (KT 法) 方法, 分别计算潮汐荷载和淤积荷载引起的接头沉降并与实测沉降对比, 如图 6~8 所示。

图 6 (a) 表明, 在高平潮位移下, 除中后期的 Kerr 地基上的 Timoshenko 梁模型的计算沉降比实测沉降小之外, 该模型能够很好地包含大部分实测数据, 整体模拟效果偏好, 计算沉降曲线和实测沉降曲线在趋势变化和数值拟合上相近。图 6 (b) 表明, 理论计算沉降与淤积荷载引起的接头实测沉降拟合程度较好, 呈阶梯性下沉状, 以清淤间隔为周期进行循环下沉。

基于 KT 法模拟的合理性, 进行荷载耦合引起的接头变形 (以下简称“耦合变形”) 和不同荷载引起接头变形叠加 (以下简称“叠加变形”) 两种计算方

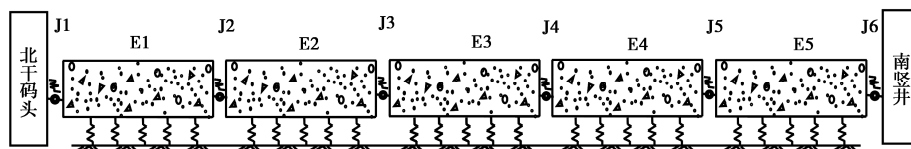


图 5 管节-接头分析模型图

Fig. 5 Theoretical model for element-joint

式的讨论。耦合变形即在计算时,一方面讨论耦合荷载施加过程中由两种循环荷载特征位置耦合导致的接头变形,另一方面讨论耦合荷载在初始位置的不同施加方式导致的接头变形;叠加变形是分别进行两种荷载引起的接头变形计算,而后进行叠加,以此与荷载耦合引起的变形进行比较。根据图 1,当初始荷载耦合方式为循环荷载零点值(即潮汐荷载  $A$  点值与淤积荷载  $D$  点值)相互作用时,对应的荷载施加方式如图 7,进一步将该荷载状态下的耦合变形与叠加变形进行比较,如图 8 (a)。

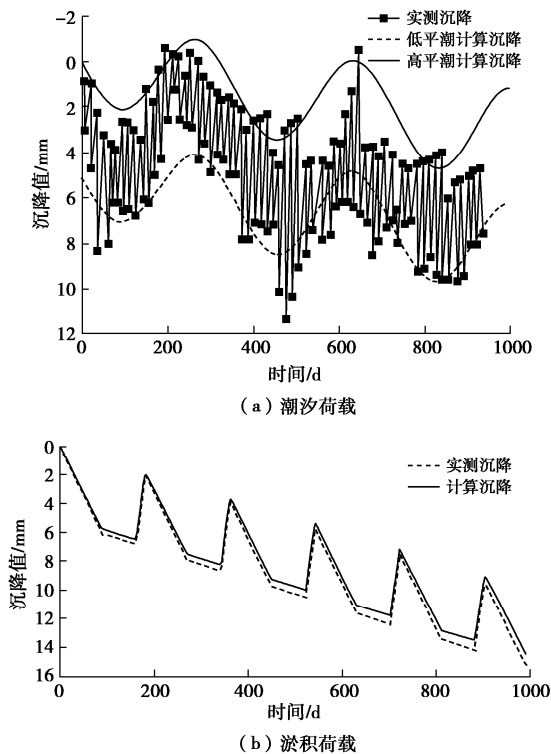


图 6 理论沉降和实测沉降对比图

Fig. 6 Comparison between theoretical and measured settlements

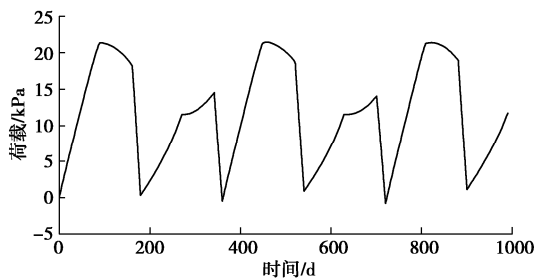


图 7 循环荷载零点值耦合

Fig. 7 Zero-value coupling of cyclic loads

$A$  点和  $D$  点考虑荷载耦合与变形叠加比较,结果如图 8 (a)。叠加变形明显小于耦合变形。这说明管节沉降并不是由循环荷载引起的沉降单纯叠加引起,实际工程中,耦合变形要大于叠加变形,前者是后者的 1.4 倍,会加剧管节变形。由于工程缺乏两种循环荷载耦合导致接头变形的实测数据,因此,本文开展了基于 Abaqus 数值模拟与理论分析的对比分析如图 8

(b) 所示。可以发现,数值模拟结果略小于理论计算结果,这是因为在进行理论分析时,不可避免对部分参数进行简化,某种程度弱化了易压缩性质的土层,但是两种方法计算结果大致相近。

观察图 8 发现,耦合变形是在淤积荷载引发变形的基础上进行波动,因此,进一步讨论淤积荷载导致沉降和耦合荷载导致沉降之间的关系,如图 9 所示。

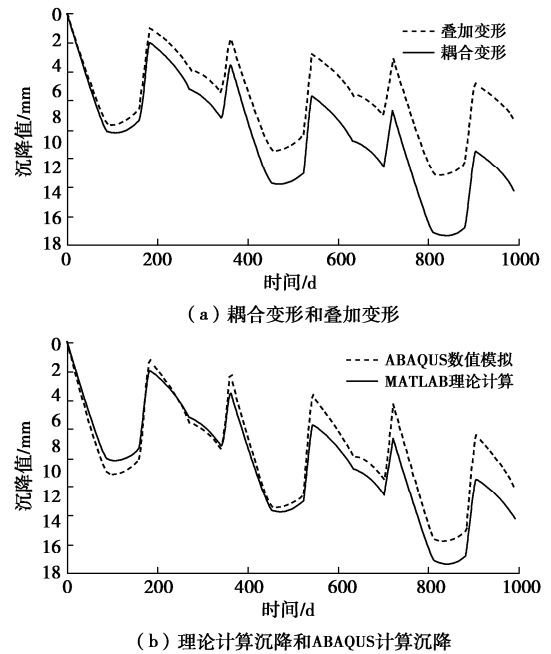


图 8 荷载耦合沉降对比

Fig. 8 Comparison of load coupling settlements

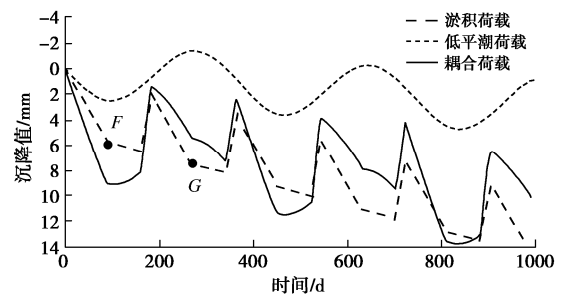


图 9 回淤清淤荷载作用和荷载耦合作用下的沉降对比

Fig. 9 Comparison between load coupling and back silting load settlements

当两种荷载最高值耦合 ( $B$  点和  $E$  点), 淤积荷载引起的沉降 (点  $F$ ) 占比 75% 左右, 当潮汐荷载最低值 (点  $C$ ) 和淤积荷载最大值 (点  $E$ ) 耦合, 淤积荷载引起的沉降 (点  $G$ ) 占比 125% 左右。由此可见,耦合作用时淤积荷载引起的接头变形占据主要地位,约为 75%~125%,潮汐荷载引起的结构沉降占据次要地位,约为  $\pm 25\%$ 。

### 2.3 初始荷载耦合方式分析

上述计算是基于两种循环荷载起始零点耦合展开的,下面讨论不同耦合方式引发的沉降差异。以淤积

荷载最低值  $D$  点 (如图 1 (b)) 为基础, 分别耦合潮汐荷载的峰值  $B$  点, 谷值  $C$  点 (如图 1 (a)), 分析相关沉降。图 10 (a) 为  $B$  点和  $C$  点分别与  $D$  点的荷载耦合图, 图 10 (b) 为  $B$  点和  $C$  点分别与  $D$  点荷载耦合导致的接头沉降图。

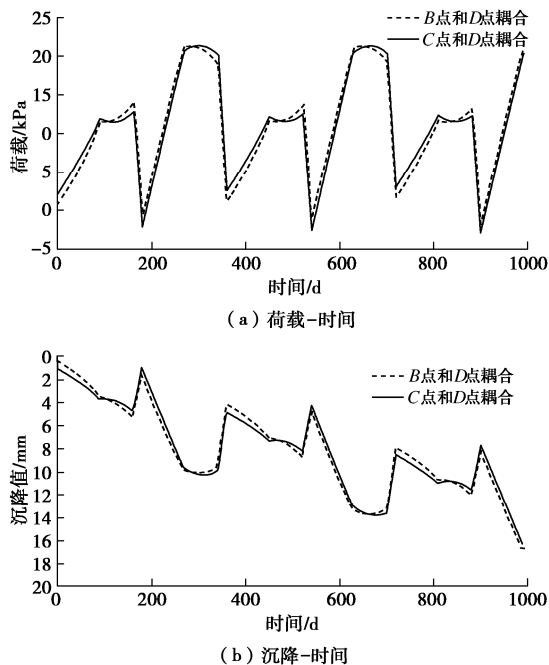


图 10 潮汐荷载和淤积荷载耦合方式

Fig. 10 Coupling modes of tidal and back silting loads

观察发现, 两种荷载耦合方式引起的结构变形差异可忽略不计, 再次印证潮汐荷载在工程变形中占比小的理论, 结合图 9, 如果实际工程中对于潮汐荷载引发沉降的测量困难, 可以通过对淤积荷载引发的沉降扩大 1.3 倍大概估计。

### 3 结 论

本文考虑随时间变化的基床参数和接头变形传递, 提出淤积-潮汐循环荷载耦合作用下沉管隧道接头变形分析模型, 得出以下 3 点结论。

(1) 基于结构受力特征和地基特点, 提出了一种考虑接头弯剪作用和地基纵向刚度随时间变化的 KT 理论分析模型, 以甬江隧道为例验证分析。

(2) 多种循环荷载相互作用引发结构变形是通过荷载耦合实现的, 淤积-潮汐循环荷载耦合会加剧管节变形, 是叠加变形的 1.4 倍。

(3) 考虑荷载耦合时, 淤积荷载引起的结构变形占循环荷载导致变形的 75%~125%, 潮汐荷载引起的结构变形占循环荷载导致变形的  $\pm 25\%$ 。实际工程中对潮汐荷载引发沉降的测量困难时, 可通过对淤积荷载引发的沉降放大 1.3 倍大概估计。

### 参考文献:

- [1] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS 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] WANG Y N, ZHOU H Z, MIN X H. Modelling the performance of immersed tunnel via considering variation of subsoil property[J]. Ocean Engineering, 2022, **266**: 113114.
- [3] HU Z N, XIE Y L, XU G P, et al. Segmental joint model tests of immersed tunnel on a settlement platform: a case study of the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **78**: 188-200.
- [4] 邵俊江, 李永盛. 潮汐荷载引起沉管隧道沉降计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, **31**(6): 657-662. (SHAO Junjiang, LI Yongsheng. Calculation methods for settlements of immersed tunnels induced by tidal load[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, **31**(6): 657-662. (in Chinese))
- [5] 谢雄耀, 王 培, 李永盛, 等. 甬江沉管隧道长期沉降监测数据及有限元分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(8): 2314-2324. (XIE Xiongyao, WANG Pei, LI Yongsheng, et al. Monitoring data and finite element analysis of long term settlement of Yongjiang immersed tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(8): 2314-2324. (in Chinese))
- [6] GRANTZ W. Immersed tunnel settlements Part 1: nature of settlements[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(3): 195-201.
- [7] GRANTZ W. Immersed tunnel settlements Part 2: case histories[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(3): 203-210.
- [8] ODA Y, ITO K, YIM S C. Current forecast for tunnel-element immersion in the bosphorus strait, turkey[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2009, **135**(3): 108-119.
- [9] 于洪丹, 陈卫忠, 郭小红, 等. 潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2905-2914. (YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on effect of tide on stabilities of channel tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2905-2914. (in Chinese))
- [10] HU Z N, XIE Y L, XU G P, et al. Advantages and potential challenges of applying semi-rigid elements in an immersed tunnel: a case study of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **79**: 143-149.



- [11] 周桓竹, 寇晓强, 王延宁. 潮汐作用下的沉管隧道竖向位移计算[J]. 岩土力学, 2021, **42**(10): 2785-2794, 2807. (ZHOU Huanzhu, KOU Xiaoqiang, WANG Yanning. Vertical displacement calculation of immersed tube tunnel under tidal load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(10): 2785-2794, 2807. (in Chinese))
- [12] 王延宁, 周桓竹, 俞 缙. 沉管隧道运维期回淤影响下的长期沉降模型[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(2): 292-300. (WANG Yanning, ZHOU Huanzhu, YU Jin. Long-term settlement model for immersed tube tunnels under back silting loads during operation and maintenance periods[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(2): 292-300. (in Chinese))
- [13] WU H N, SHEN S L, YANG J, et al. Soil-tunnel interaction modelling for shield tunnels considering shearing dislocation in longitudinal joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2018, **78**: 168-177.
- [14] 李瑞遐. 应用微分方程[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2005. (LI Ruixia. Applying Differential Equation[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 刘建文, 施成华, 雷明锋, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(9): 2215-2225. (LIU Jianwen, SHI Chenghua, LEI Mingfeng, et al. Analytical method for influence analysis of foundation pit excavation on underlying metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, **50**(9): 2215-2225. (in Chinese))
- [16] ZHANG D M, HUANG Z K, LI Zi-li, et al. Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **108**(5): 197-211.
- [17] 边学成. 高速列车运动荷载作用下地基和隧道的动力响应分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (BIAN Xuecheng. Dynamic Analyses of Ground and Tunnel Responses Due to High-Speed Train Moving Loads[D]. Hangzhou: ZheJiang University, 2005. (in Chinese))
- [18] TALMON A M, BEZUIJEN A. Calculation of longitudinal bending moment and shear force for Shanghai Yangtze River Tunnel: application of lessons from Dutch research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2013, **35**(4): 161-171.
- [19] 廖少明. 隧道纵向剪切效应的简化弹性地基柱壳理论解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(7):1486-1493. (LIAO Shaoming. Theoretic analysis of simplified cylindrical shell on elastic foundation for tunnel longitudinal shear effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(7):1486-1493. (in Chinese))
- [20] WU H N, SHEN S L, LIAO S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2015, **50**: 317-323.
- [21] LI P, SONG E X. Three-dimensional numerical analysis for the longitudinal seismic response of tunnels under an asynchronous wave input[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **63**: 229-243.
- [22] YU H T, XIAO W H, YUAN Y, et al. Seismic mitigation for immersion joints: design and validation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, **67**: 39-51.
- [23] XIAO W H, YU H T, YUAN Y, et al. Compression-bending behavior of a scaled immersion joint[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2015, **49**: 426-437.
- [24] 魏 纲, 陆世杰. 考虑管土效应的潮汐荷载引起沉管隧道管节沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(增刊 2): 4329-4337. (WEI Gang, LU Shijie. Research on settlement of immersed tunnel elements under tidal load with consideration of element-soil effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S2): 4329-4337. (in Chinese))
- [25] LI P, DU S J, SHEN S L, et al. Timoshenko beam solution for the response of existing tunnels because of tunneling underneath[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2016, **40**(5): 766-784.
- [26] 黄 栩, 黄宏伟, 张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1241-1249. (HUANG Xu, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei. Longitudinal deflection of existing shield tunnels due to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1241-1249. (in Chinese))
- [27] 余子烨, 翟国君, 梅国雄, 等. 循环荷载作用下连续排水边界双层土一维固结[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, **49**(1): 99-105. (YU Ziye, ZHAI Guojun, MEI Guoxiong, et al. One-dimensional consolidation of double-layered soft soils with continuous drainage boundaries under cyclic loading[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, **49**(1): 99-105. (in Chinese))