

DOI: 10.11779/CJGE20211560

沉管隧道运维期回淤影响下的长期沉降模型

王延宁^{1,2,3}, 周桓竹^{1,2,4}, 俞 缙⁵

(1. 汕头大学土木与环境工程系, 广东 汕头 515063; 2. 汕头大学广东省结构安全与监测工程技术研究中心, 广东 汕头 515063;

3. 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; 4. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;

5. 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)

摘要: 当下跨海集群工程建设过程中绝大部分均采用了沉管隧道的通过方式, 如港珠澳大桥和深中通道工程等, 随着陆续完成, 运维期的长期沉降规律逐步成为研究重点。在对管节接头沉降计算中, 多采用 Winkler 地基上的 Euler 梁模型, 而忽略了柔性管节的剪切变形和地基土体的连续性, 没有考虑管-土相互作用引起的沉管位移, 与实际结果偏差较大。考虑沉管隧道运维期受到长期回淤清淤荷载的影响, 基于柔性沉管隧道的受力变形特征, 将沉管隧道管节等效为置于 Vlasov 双参数地基上的 Timoshenko 梁, 考虑了地基土体的连续性, 强化了土体的刚度, 同时考虑了管节截面的弯曲变形和剪切变形, 即将管节变形视为位错变形模式, 并以此推导了其竖向变形计算公式, 与 Winkler 地基上的 Euler 梁模型和 Timoshenko 梁模型进行比较, 以验证所提出的计算方法的合理性。以甬江沉管隧道工程为例, 分析在运维期回淤荷载影响下的沉管隧道管节接头竖向位移规律, 将基于上述模型的理论计算结果与实测结果对比分析表明: 提出的基于 Vlasov 双参数地基的 Timoshenko 梁模型更为合理, 计算结果与实测数据更吻合。回淤荷载引起的管节接头沉降伴随时间呈指指数型变化, 在早期阶段沉降发展快, 在中后期以半年为周期呈阶梯性下沉, 清淤频次影响沉降大小, 一年两次清淤引起的管节-接头沉降最小, 研究结果对沉管隧道管节-接头的设计计算和运营管理具有一定指导意义。

关键词: 沉管隧道; 理论模型; 管-土相互作用; Vlasov 双参数地基; 循环荷载

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)02-0292-09

作者简介: 王延宁(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事软土地基处理及岩土工程稳定性分析等方面的教学和科研工作。E-mail: wangyn@stu.edu.cn。

Long-term settlement model for immersed tube tunnels under back silting loads during operation and maintenance periods

WANG Yanning^{1, 2, 3}, ZHOU Huanzhu^{1, 2, 4}, YU Jin⁵

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China; 2. Guangdong Engineering Center for Structure Safety and Health Monitoring, Shantou University, Shantou 515063, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and

Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. School of Civil Engineering,

Wuhan University, Wuhan 430072, China; 5. Fujian Tunnel and Urban Underground Space Engineering Technology Research Center,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: At present, most of the cross-sea cluster projects adopt the immersed tube tunnel, such as Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge and Shenzhen-Zhongshan Channel. With the completion of the projects, the long-term settlement laws during the operation and maintenance periods have gradually become the focus of research. In the settlement calculation of joints, the Euler beam model on the Winkler foundation is mostly used. However, the shear deformation of the flexible element-joint and the continuity of the foundation are ignored and the displacement of the element caused by the interaction between the element and the soil is not considered, thus the results greatly deviate from the actual ones. Considering the back silting and desilting loads during the operation and maintenance periods, based on the stress and deformation characteristics of the flexible immersed tube tunnel, the elements are equivalent to the Timoshenko beams placed on the Vlasov double-parameter foundation, the continuity of the foundation is considered, the stiffness of the soil is strengthened, and the bending and shear deformations of the elements are considered, namely, the deformation of the elements is regarded as the dislocation deformation mode.

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2022A1515011200); 广东省科技计划项目(STKJ2021129); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放课题 (SKLGDUEK2005)

收稿日期: 2021-12-22

Accordingly, the formula for calculating the vertical deformation is derived. Meanwhile, the Euler beam model and the Timoshenko beam model placed on the Winkler foundation model are introduced for comparison to verify the rationality of the proposed method. Taking the Yongjiang immersed tube tunnel project as an example, the laws of the vertical displacement of the elements under the influences of back silting and desilting loads are analyzed, and the theoretical results of the above four models are compared with the observed ones. The results show that the Timoshenko beam model placed on the Vlasov double-parameter foundation has more preferable results compared with the other three methods. The settlement of the element-joint caused by back silting loads changes exponentially with time, the settlement develops rapidly at the early stage, and it decreases step by step with a half-year period at the middle and late stages. The frequency of dredging affects the settlement, and the settlement of the element-joint caused by dredging twice a year is the least. The research results may have some guiding significance for the design and operation management of the element-joint in immersed tube tunnels.

Key words: immersed tube tunnel; theoretical model; element-soil interaction; Vlasov double-parameter foundation; cyclic loading

0 引言

沉管隧道因施工周期较短, 防水性能较高, 地质适应能力较强在跨海工程中得到广泛应用^[1], 以往对于浅埋沉管隧道在运维期回淤荷载作用下变形的理论研究较少^[2], 而中国当下沉管隧道往往跨越繁忙水运航道, 大多属于深埋隧道, 管节在运营期受回淤清淤循环荷载影响较大。研究发现, 回淤速度最高可达 5 cm/d, 由淤积荷载引起的管节沉降占据总沉降的 13% 左右^[3], 管节接头对由此造成的差异沉降极为敏感^[4], 易发生差异沉降超限或疲劳损伤, 故研究运维期受回淤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。

从管节位移的本质而言, 沉降主要是由隧道下卧基础层受压变形产生, 有必要讨论地基变形, 余子烨等^[5]提供了变荷载下地基固结变形的理论计算。邵俊江等^[6]对循环荷载下沉管隧道变形问题的理论分析进行了讨论, 然而没有考虑管-土之间的相互影响, 以上学者忽视了管体自身的刚度, 实际工程中隧道地基与上部结构存在较显著的共同作用效应^[7-8]。刘鸿哲等^[9]建立 Winkler 地基模型讨论沉管隧道的变形问题, 然而该模型忽略土体的连续性。因此, 本文在 Winkler 地基土体模型上做进一步改善, 通过引入 Vlasov 双参数地基模型^[10]来考虑相邻土弹簧单元间的影响。

对于结构而言, Wang 等^[11]和 Zhou 等^[12]均采用 Euler 梁模型模拟隧道结构, 只考虑了隧道的弯曲变形而忽略了剪切变形^[13]。Wu 等^[14]充分考虑节段式沉管隧道的结构受力特点, 将其简化为同时考虑管段弯曲和剪切的 Timoshenko 梁模型^[15-16], 两种梁模型分别对应两种计算模式。同时他们忽略了管节连接之间接头的位移差, 禹海涛等^[17]分别考虑了接头的力学特性和刚度解析表达式, 建立力学模型。谢雄耀等^[18]建立了接头止水带的分析模型, 然而最终并未给出接头挠度的计算推导。因此, 基于 Timoshenko 梁模型, 进而开展接头受力分析, 是更为科学合理的。

综上, 本文考虑运维期回淤荷载作用, 采用合适的管-土作用模型, 引入淤积荷载函数和地层参数, 可以大致预估和描述回淤清淤作用引起的沉管隧道的沉降规律^[6], 通过进一步优化和完善, 提出的合理计算方法。以探究回淤清淤循环荷载下管节长期沉降的理论分析模型, 应用于实际工程的设计与施工中。

1 方法与假定

1.1 基本假定

基于沉管受力变形特征, 本文给出如下假设: ①计算中不考虑其他荷载引起的地层沉降; ②重点讨论合理的不同管节长期沉降理论模型, 因此暂假定沉管隧道下卧地基层沿相应管节纵向均匀分布, 同一管节下卧地基刚度均匀; ③管节接头同时考虑抗剪刚度和抗弯刚度, 接头处存在挠度差和转角差。

1.2 求解过程

基于上述假定, 沉降计算分析过程分为两步进行(如图 1 所示): 首先确定回淤清淤荷载的循环形式, 进而通过 Terzaghi 一维固结理论微分方程计算由此引起的下卧地基土层非线性固结沉降, 反算得到等效基床参数。其次, 比较多种管-土相互作用模型的建立方法, 确立基于 Vlasov 双参数地基模型的 Timoshenko 梁模型, 结合接头变形计算管节沉降。

2 理论求解

2.1 梁模型

18 世纪初出现了经典的 Euler 梁模型, 现有沉管隧道的结构受力及变形研究中大多将其简化为此模型, 即假设梁变形时横截面始终水平并垂直于中性轴, 只考虑梁的弯曲变形而不引入剪切变形(如图 2(a)), 不考虑梁截面的剪力(如图 2(b)), 计算简便而得到广泛应用, 然而该理论只能解释细长梁的弯曲变形模式(如图 2(c))。对于沉管隧道这一大截面、多管节

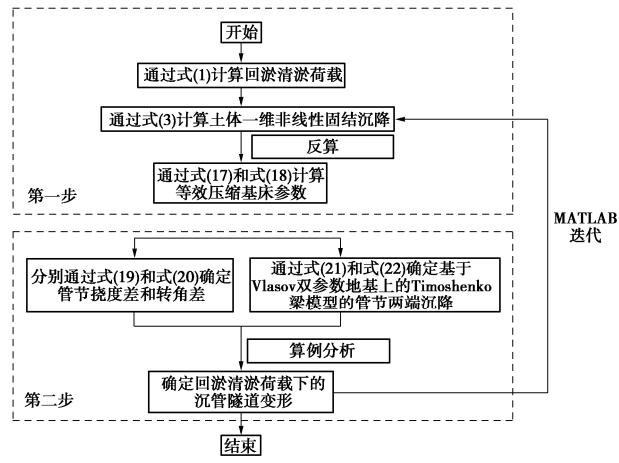


图 1 计算流程图

Fig. 1 Flow chart of calculation

的结构, 应同时考虑管节截面的弯曲变形和剪切变形(如图 2 (d)), 同时考虑梁截面的弯矩和剪力(如图 2 (e)), 其变形模式为弯曲变形和剪切变形组合的位错变形模式(如图 2 (f)), 更符合工程实际。因此本文计算中, 主要是将沉管结构等效为 Timoshenko 梁模型, 按照位错变形模式进行对比计算。

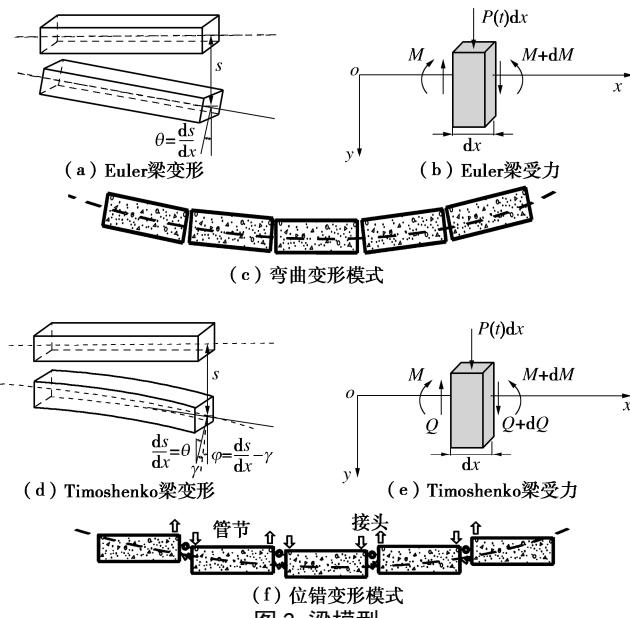


图 2 梁模型

Fig. 2 Beam models

2.2 回淤荷载

基于现场实际, 地基受到循环荷载的影响, 前期河床标高发生变化, 伴随回淤清淤荷载的不断施加, 后期近似认为每次回淤至一定高度后管节上覆压力不变^[3, 19], 达到稳定阶段, 将回淤清淤荷载模拟为梯形循环更符合工程受力^[20]。假定河床回淤匀速不变, 当回淤达到一定厚度时, 回淤速度与河流冲刷速度相等, 此时管节上覆压力不变, 认为河床标高一定, 接下来人工清淤至设计标高^[3]。采用图 3 所示的函数来刻画回淤清淤荷载随时间的变化趋势。计算表达式为

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

式中: $q(t_k)$ 为任一时段的回淤清淤荷载; t_k 为加载时长; $q(t_u)$ 为回淤清淤荷载循环周期最大值; T_q 为荷载循环周期; α , β , γ 为与荷载循环周期内加载时长有关的常系数。

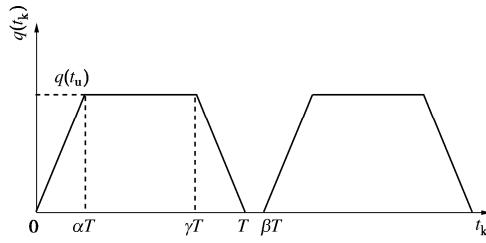
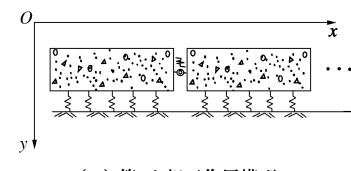


图 3 回淤清淤荷载形式

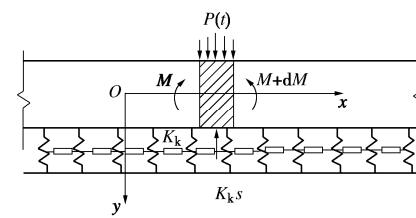
Fig. 3 Forms of back silting and desilting loads

2.3 地基沉降

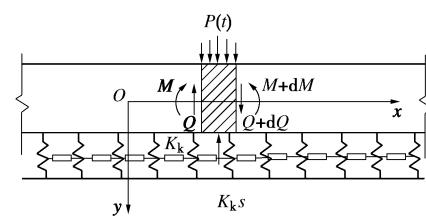
本文建立多种管-土相互作用模型, 如图 4 (a) 所示, Vlasov 双参数地基模型和 Winkler 地基模型的区别在于是否考虑地基的连续性, 前者存在剪切基床参数 T 。比较基于 Winkler 地基的 Euler 梁模型(如图 4 (b) 所示)和 Timoshenko 梁模型(如图 4 (c) 所示)以及基于 Vlasov 地基的 Timoshenko 梁模型(如图 4 (d) 所示), Timoshenko 梁模型相较于 Euler 梁模型考虑了抗剪刚度 GA 。计算过程将管节下卧土层视为单层地基, 需要指出的是, 基于这一假定得到的结果同样可按上述方法推广至多层地基。



(a) 管-土相互作用模型



(b) Winkler地基-Euler梁模型



(c) Winkler地基-Timoshenko梁模型

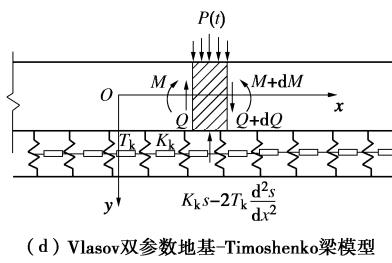


图 4 管-土相互作用模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of element-soil interaction model

暂不讨论水平方向地基土层的排水和压缩, 将其限定为竖直方向, 地基固结系数 c_v 视为恒定, 引入 Terzaghi 一维固结理论微分方程^[21]:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - f(t) \quad . \quad (2)$$

式中: c_v , z , u 分别为地基的固结系数、土层深度、超孔隙水压力; $f(t) = dq/dt$ 为荷载加载速率。

根据三角函数的正交关系和 Laplace 逆变换, 参照连续排水边界条件下土体一维非线性固结解析解^[22], 可以求出 t 时刻下的地基沉降 $S(t)$:

$$S(t) = \frac{H}{E_s} \left[q(t) - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} T_m(t) \right] = \frac{H}{E_s} \left\{ q(t) - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \left[\sum_{i=0}^{N-2} T_{m1}(t - i\beta T_q) + T_{m2}(t - (N-1)\beta T_q) \right] \right\} . \quad (3)$$

式中: $T_m(t)$ 为待求时间函数^[23]; H 为排水距离; E_s 为地基的压缩模量; 其余各参数计算可参考宗梦繁等^[23]和李勇义等^[22]的研究。

综上, 通过地基土层的压缩模量 E_s 、排水距离 H 、固结系数 c_v 和循环周期 T_q 等参数可计算出 t 时刻正弦波形循环函数通式对应的地基沉降值 $S(t)$ 。

2.4 管节变形

考虑管节横向宽度, 此时荷载表达式为

$$P(t) = q(t) \cdot B \quad , \quad (4)$$

式中, $q(t)$ 为回淤清淤荷载, B 为管节横向宽度。

如图 4 (d) 所示, 以 Vlasov 双参数地基上的 Timoshenko 梁模型为例, 说明不同管-土相互作用模型的理论推导过程, 受力平衡方程为

$$\frac{dQ}{dx} = K_k s - 2T_k \frac{d^2s}{dx^2} - P(t) \quad , \quad (5)$$

$$K_k = KB \quad , \quad (6)$$

$$T_k = TB \quad , \quad (7)$$

式中, K , T 分别为地基模型的压缩基床参数和剪切基床参数。

考虑 Timoshenko 梁的弯矩表达式^[24]和剪力表达式^[24]分别为

$$M(x) = EI\kappa = -EI \frac{d\varphi}{dx} = -EI \frac{d^2s}{dx^2} + EI \frac{d\gamma}{dx} \quad , \quad (8)$$

$$Q(x) = GA\gamma / f_s = GA \left(\frac{ds}{dx} - \varphi \right) / f_s \quad . \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (5), 得

$$GA \left(\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{d\varphi}{dx} \right) / f_s = K_k s - 2T_k \frac{d^2s}{dx^2} - P(t) \quad . \quad (10)$$

将式 (4) ~ (9) 代入式 (10), 得到沉管隧道挠度计算表达式:

$$\left(1 + \frac{2T_k}{GA/f_s} \right) \frac{d^4s}{dx^4} - \left(\frac{K_k}{GA/f_s} + \frac{2T_k}{EI} \right) \frac{d^2s}{dx^2} + \frac{K_k}{EI} s = \frac{P(t)}{EI} - \frac{1}{GA/f_s} \frac{d^2P(t)}{dx^2} \quad . \quad (11)$$

式中: s 为沉管隧道的挠度; $M(x)$, $Q(x)$ 分别为沉管隧道的弯矩和剪力; EI , GA 分别为管节的抗弯刚度和抗剪刚度; κ 为中性轴的曲率; ds/dx 为中性轴的转角, 即 θ ; φ 为由弯曲变形引起的截面转角, 以下简称弯转角; $ds/dx - \varphi$ 为由剪切变形引起的截面剪切角, 即 γ ^[25]; f_s 为截面剪应力的非均匀分布系数, 取值见 Li 等^[16]的研究。

通过计算推导^[10], 最终获得管节右端挠度表达式为

$$s = F_1(x)s_0 + F_2(x)\theta_0 + F_3(x)M_0 + F_4(x)Q_0 - F_5(x)S(t) + P(t) \int_0^x F_4(x-\xi) d\xi \quad . \quad (12)$$

式 (12) 中, $S(t)$ 的计算见式 (3), 与荷载循环周期 T_q 有关, 将式 (13) 代入式 (12), 可确定不同清淤频率下的管节变形计算方法。

$$T_q = 365/n \quad , \quad (13)$$

式中, n 为一年内清淤次数, 即清淤频率。一年两次清淤时, $n=2$; 一年一次清淤时, $n=1$; 两年一次清淤时, 认为 $n=0.5$, 以此类推。

根据挠度和转角的关系可得

$$\theta(x) = \frac{ds}{dx} \quad . \quad (14)$$

结合式 (8), (12), 得到该模型下沉管隧道的弯矩为

$$M(x) = -EI \left\{ \frac{d^2s}{dx^2} - \left[\left(K_k s - 2T_k \frac{d^2s}{dx^2} - K_k S(t) \right) f_s / GA \right] \right\} . \quad (15)$$

根据弯矩和剪力之间的关系^[10], 得到该模型下沉管隧道的剪力计算为

$$Q(x) = EI \left\{ \frac{d^3s}{dx^3} - \left[\left(K_k \frac{ds}{dx} - 2T_k \frac{d^3s}{dx^3} - K_k \frac{dS(t)}{dx} \right) f_s / GA \right] \right\} . \quad (16)$$

由于基床参数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有关, 因此分别使用等效压缩基床参数 $K(t)^{[10]}$ 和等效剪切基床参数 $T(t)^{[8]}$ 替换上述式子中的压缩基床参数 K 和剪切基床参数 T , 具体求解不再赘述^[10], 表达式为

$$K(t) = \frac{q(t)}{S(t)}, \quad (17)$$

$$2T(t) = \frac{H^2(1-V_0)}{6} \cdot \frac{q(t)}{S(t)}. \quad (18)$$

2.5 接头变形

根据实际工况^[26], 沉管隧道相邻管节间传递挠度差 Δs 和转角 $\Delta\theta$, 如图 5 所示, 计算方式分别为

$$\Delta s = Q_1 / k_j, \quad (19)$$

$$\Delta\theta = M_1 / k_w. \quad (20)$$

式中: Q_1 , M_1 的计算表达式分别为式 (16), (15); k_j 和 k_w 分别为接头的抗剪刚度和抗弯刚度。若 Δs 为 “+”, 表示后一管节相对于前一管节沉降, 若 Δs 为 “-”, 表示后一管节相对于前一管节抬升。若 $\Delta\theta$ 为 “+”, 表示管节发生顺时针转动, 若 $\Delta\theta$ 为 “-”, 表示管节发生逆时针转动。

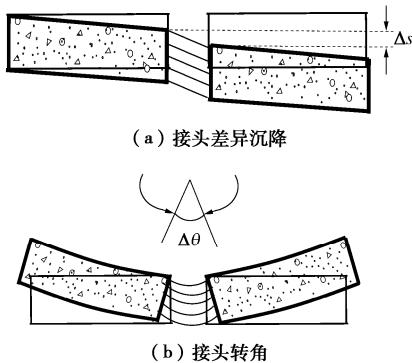


图 5 接头变形

Fig. 5 Deformations of joints

则任一管节左端接头处的沉降值 W_i 为上一管节右端头处的沉降值 $W_{(i-1)+}$ 和与上一管节相邻接头挠度差值 $\Delta s_{(i-1)}$ 之和:

$$W_{i-} = W_{(i-1)+} + \Delta s_{(i-1)}. \quad (21)$$

式中: W_i 为某管节左端接头处的沉降值; $W_{(i-1)+}$ 为上一管节右端接头处的沉降值; $\Delta s_{(i-1)}$ 为某管节与上一管节相邻接头处的挠度差值。

则任一管节右端接头处的沉降值 W_{i+} 为该管节左端头处的沉降值 W_i 和该管节挠度值 s_i 之和:

$$W_{i+} = W_{i-} + s_i, \quad (22)$$

式中, W_{i+} 为某管节右端接头处的沉降值, s_i 为某管节挠度值。

3 算例

3.1 工程参数

甬江沉管隧道修建于宁波甬江下游段, 隧道长度为 1019.97 m, 沉管段总长为 420 m, 沉管共由 5 段管节组成, 自北向南依次记为 E1~E5 (85 m+80 m+85 m×3), 如图 6 所示。江水最大流速为 1.20~1.30 m/s, 平均流速为 0.36~0.37 m/s, 泥砂含量较大, 淤积严重, 实测淤积强度为 3 cm/d^[27], 这些泥砂主要是由涨潮流从外海带入, 即泥砂倒灌^[20]。为了防止出现回淤导致管段产生过大沉降, 隧道管理部门按照每年两次的频率进行清淤, 每次清淤历时半个月左右^[3]。

假设回淤荷载为梯形循环函数, 相关参数^[27]确定为 $\alpha=0.5$, $\beta=1.0$, $\gamma=0.9$, 以一年两次清淤频率讨论, $T=182.5$ d, 根据实测淤积强度可以得到循环荷载函数最大值 $q(t_u)=16.425$ kPa。通过查阅文献^[20], 本文引入 Winkler 地基的 Euler 梁模型 (W-E 沉降模型) 和 Timoshenko 梁模型 (W-T 沉降模型), 以及基于 Vlasov 双参数地基的 Timoshenko 梁模型 (V-T 沉降模型), 4 种计算模型的基本参数见表 1。接头采用橡胶材料,

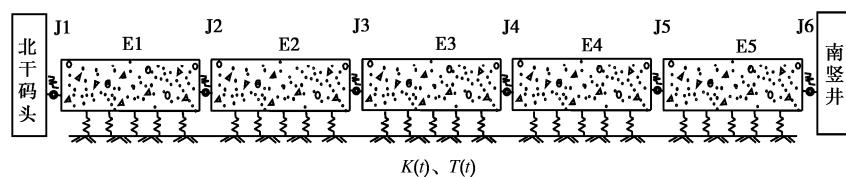


图 6 甬江沉管隧道示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Yongjiang immersed tube tunnel

表 1 计算模型参数

Table 1 Parameters of model

计算模型	地基深度 H/m	压缩模量 E_s/kPa	固结系数 $c_v/(m^2 \cdot d^{-1})$	抗弯刚度 $EI/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	抗剪刚度 $GA/(kN \cdot m^{-1})$
一维沉降模型	15	1.58×10^3	3.12×10^{-3}	—	—
W-E 模型	15	1.58×10^3	3.12×10^{-3}	1.92×10^9	—
W-T 模型	15	1.58×10^3	3.12×10^{-3}	1.92×10^9	5.5×10^7
V-T 模型	15	1.58×10^3	3.12×10^{-3}	1.92×10^9	5.5×10^7

在工作水压区间变化范围内^[28], 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 $k_w = 3.2 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 抗剪刚度 $k_j = 1.1 \times 10^6 \text{ kN}/\text{m}^{[10]}$, 梁截面的剪切修正系数 f_s 取 2.0^[14]。暂时不考虑由于管节自重、车辆荷载和潮汐荷载等引起的管节沉降。

由于甬江沉管隧道在 J4 和 J5 两个接头处的沉降最不稳定, 因此本文以沉管隧道 E3-E4 管段接头处的 J4 接头为例进行讨论, 根据谢雄耀等^[3]的观测记录, 可认为由回淤荷载引起的管节沉降伴随时间呈现指数型沉降式发展, 如图 7 (a) 所示, 在 1996—2003 年的早期阶段管段沉降发展快, 在 2003—2010 年的中后期阶段管段沉降逐步趋于稳定, 本文重点在于建立合理的回淤荷载下管节沉降的理论分析模型, 因此以 2003 年作为计算起始时间 (如图 7 (b) 所示), 讨论自 2003—2010 年这段时间内管段沉降伴随时间发展过程的分析模型与实例验证。

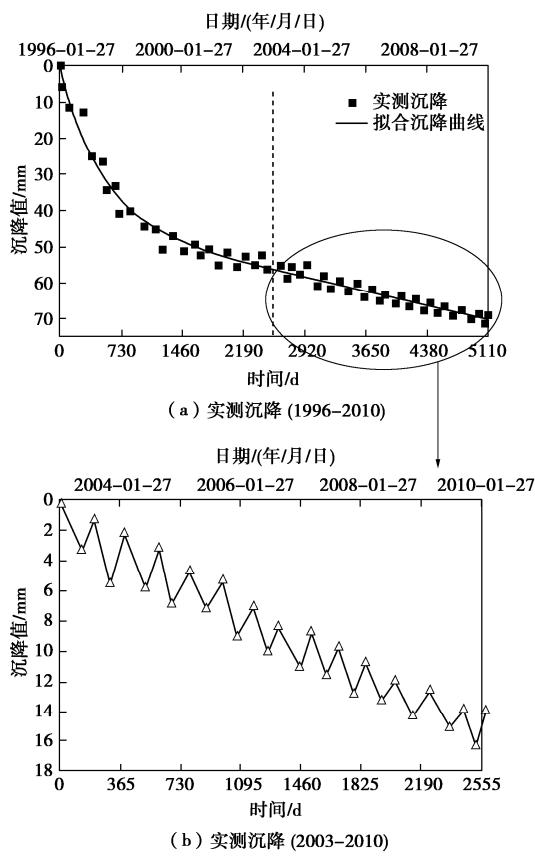


Fig. 7 Measured settlements

3.2 计算结果

甬江沉管隧道段受到的回淤清淤荷载变化如图 8 所示。对于只考虑河床下卧土层一维非线性固结沉降理论下 (一维沉降模型) 的计算模型而言, 通过 MATLAB 拟合, 可以得到管段接头截面竖向位移伴随时间变化的曲线如图 9 (a) 所示。4 种模型相互关系如图 9 (a), 更进一步的, 将计算结果的最大值局部

放大, 如图 9 (b)。4 种模型和实测数据之间的沉降差值如图 10 所示。进一步结合式 (12), (13) 提出的根据不同清淤频率确定管节变形的计算方法, 讨论不同清淤频率下的计算结果如图 11 所示。

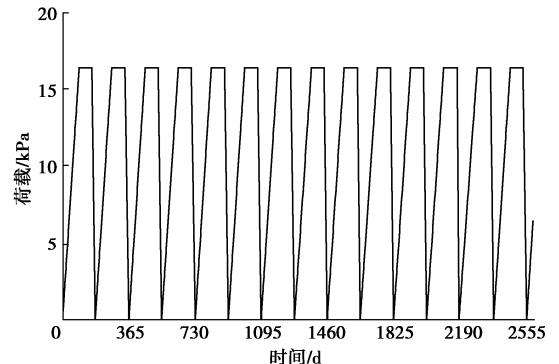
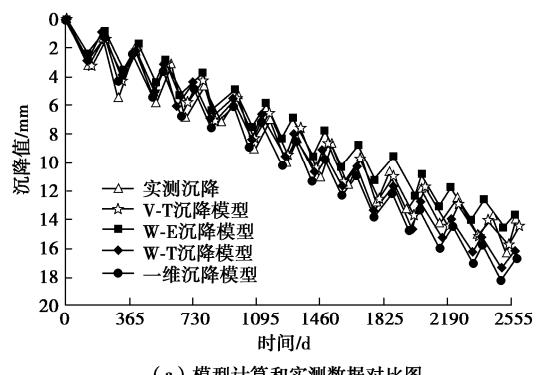
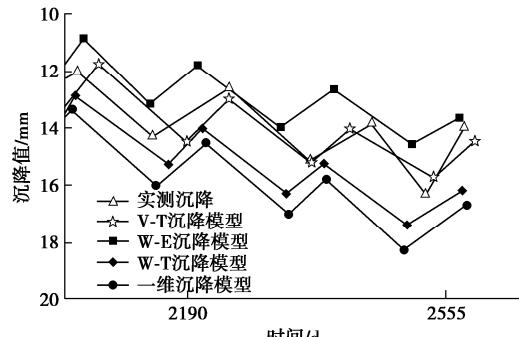


图 8 荷载-时间曲线图

Fig. 8 Load-time curves



(a) 模型计算和实测数据对比图



(b) 模型计算和实测数据对比局部放大图

图 9 模型对比图

Fig. 9 Comparison among models

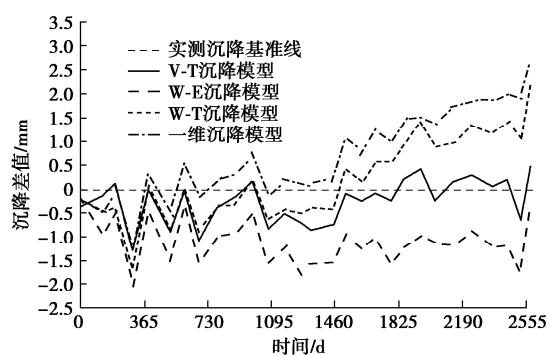


图 10 模型计算和实测数据差值对比图

Fig. 10 Comparison between calculated and measured data

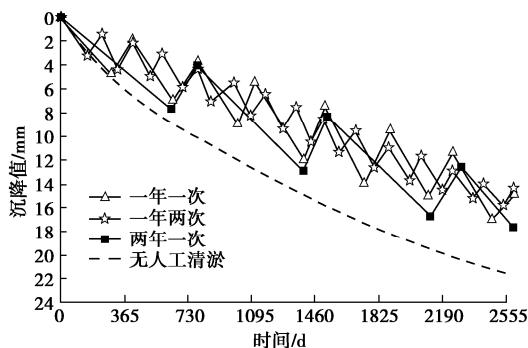


图 11 清淤频率对比图

Fig. 11 Comparison of dredging frequencies

3.3 分析讨论

从图 9 中可以直观地观察到,对于一维沉降模型和 V-T 沉降模型的计算模拟而言,回淤清淤荷载引起的管段接头沉降值均以半年为周期进行循环变化,表现为阶梯性下沉,每次清淤后,管段的沉降曲线都会上抬 1~2 mm,但在清淤完成不久,随着河床迅速的回淤,沉降曲线又迅速向下发展,与实测数据相似。4 种模型模拟的回淤清淤荷载引起的接头沉降量变化趋势相同,其中一维沉降模型模拟的沉降值最大,其余沉降值从大到小排序依次是 W-T 沉降模型, V-T 沉降模型和 W-E 沉降模型。图 10 更直观地体现了 4 种模型计算沉降和实测数据的差异,4 种模型在前期拟合程度相差不大,相较于 Euler 梁模型而言, Timoshenko 梁模型考虑了管节的剪切变形,由回淤荷载引发的沉降增量伴随时间逐渐变大,对比 Euler 梁模型,沉降差值也呈现逐步扩大趋势。相比于 Winkler 地基模型,Vlasov 地基模型中引入的等效剪切基床参数考虑了地基的连续性,在外力作用下随着时间的推移土体刚度逐步发挥作用,引起的沉降增量逐渐变小,随着时间增长,两类地基土模型之间的计算差值愈加明显,其中 V-T 模型与实测数据的拟合程度最好。观察图 11,进一步对比 V-T 模型下清淤频率引起的管节沉降,相比于进行一年一次清淤和两年一次清淤,一年两次清淤频率引起的管节沉降最小,运维期按此频率开展清淤工作是合理的。由于影响软土地区甬江沉管隧道长期沉降的因素是固结参数,在计算时间跨度方面未能更加清晰体现清淤频率对地基沉降的影响,因此进一步比较了一年两次清淤频率相对于无人工清淤的情况,7 a 间累积沉降量相差达 6~8 mm,无人工清淤时引起的管节沉降为 22 mm 左右,一年两次清淤频率将计算时间内回淤引起的附加沉降减少 28%,从长远来看,这说明人工清淤对运维期回淤影响下的长期沉降有缓解作用。需要指出的是,上述结论是基于河床标高淤积到一定高度后保持不变的假定而得出的,而对

于淤积严重乃至河床不断升高的工况,附加沉积将进一步增大。

4 结 论

本文考虑运维期沉管隧道主要承受回淤-清淤荷载扰动影响,提出将管节受力过程等效为置于 Vlasov 双参数地基模型上的 Timoshenko 梁模型,开展竖向位移计算,并与只考虑河床下卧土层一维非线性固结沉降模型的计算值进行对比,同时与基于 Winkler 地基模型的两种梁模型进行辅助比较,以甬江沉管隧道工程为例进行了验证,得到以下 4 点结论。

(1) 阐述了多种地基-梁模型之间的区别,提出使用同时考虑梁截面弯曲变形和剪切变形及地基土层间的剪切传递的计算模型模拟柔性沉管隧道管体变形,并与实际工程的实测数据对比分析。结果表明,对于沉管隧道管节接头的设计计算具有一定指导意义。

(2) 回淤荷载引起的管节接头沉降伴随时间呈指型变化,在早期阶段沉降发展快,在中后期阶段沉降呈阶梯性下沉状,以清淤间隔为周期进行循环下沉。

(3) 清淤频次影响管节沉降,对甬江隧道而言,一年两次清淤引起的管节接头沉降最小,无人工清淤时 7 年间引起的附加沉降减少 28%,类似工程应根据地层条件和回淤速率合理设置清淤频率。

(4) 当前仅考虑了地基参数固定和地层均匀条件下回淤清淤荷载引起的沉管隧道管节变形,而忽略了其他因素如隧道运营期间长期受到的车辆循环荷载以及下卧淤泥质地层等引起的土层沉降不均匀的问题等,下一步将针对性开展相关工作。

参 考 文 献:

- [1] LI W, FANG Y G, MO H H, et al. Model test of immersed tube tunnel foundation treated by sand-flow method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **40**: 102-108.
- [2] 张庆贺, 高卫平. 水域沉管隧道基础处理方法的对比分析[J]. 岩土力学, 2003, **24**(S2): 349-352. (ZHANG Qinghe, GAO Weiping. Comparison analysis on treatment methods of pipe-sinking tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S2): 349-352. (in Chinese))
- [3] 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))

- [4] 禹海涛, 萧文浩, 赵旭, 等. 沉管隧道柔性接头压缩性能研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 115-122, 180. (YU Haitao, XIAO Wenhao, ZHAO Xu, et al. Compression performance of flexible joints in immersed tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 115-122, 180. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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, 2003, 31(6): 657-662. (in Chinese))
- [7] BIAN X, HONG Z, DING J W. Evaluating the effect of soil structure on the ground response during shield tunnelling in Shanghai soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58(9):120-132.
- [8] ZHOU H, WANG L C, JIANG B, et al. Improved vertical displacement calculation model for immersed tube tunnel considering tidal load[J]. China Ocean Engineering, 2022, 36(3): 416-427.
- [9] 刘鸿哲, 黄茂松. 超长沉管隧道纵向地震响应频域分析方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 1971-1978. (LIU Hongzhe, HUANG Maosong. Frequency-domain analysis method for longitudinal seismic response of super-long immersed tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 1971-1978. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] WANG J C, HUANG W M, XU R Q, et al. Analytical solution for segmental-tunnel lining incorporating interaction between adjacent rings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(7): 1-17
- [12] ZHOU S H, HE C, GUO P J, et al. Modeling of vehicle-track-tunnel-soil system considering the dynamic interaction between twin tunnels in a poroelastic half-space[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(1): 1-15.
- [13] TALMON A M, et al. 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, 2013, 35: 161-171.
- [14] WU H N, et al. Soil-tunnel interaction modelling for shield tunnels considering shearing dislocation in longitudinal joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 78: 168-177.
- [15] 陈拴, 吴怀娜, 沈水龙, 等. 盾构隧道纵向结构变形模式及理论模型[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S1): 85-92. (CHEN Shuan, WU Huaina, SHEN Shui long, et al. Longitudinal structural deformation mode and theoretical model of shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 85-92. (in Chinese))
- [16] 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 and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(5): 766-784.
- [17] 禹海涛, 袁勇, 刘洪洲, 等. 沉管隧道接头力学模型及刚度解析表达式[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 145-150. (YU Haitao, YUAN Yong, LIU Hongzhou, et al. Mechanical model and analytical solution for stiffness in the joints of an immersed-tube tunnel[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 145-150. (in Chinese))
- [18] 谢雄耀, 易成敏, 李伟平, 等. 甬江沉管隧道运营期接头监测数据安全性分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2338-2344. (XIE Xiongyao, YI Chengmin, LI Weiping, et al. Safety analysis of settlement monitoring data of joints of Yongjiang immersed tube tunnel during operation period[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2338-2344. (in Chinese))
- [19] YUE X B, XIE Y, XIE Y L. The deformation characteristics of weak foundation with high back siltation in the immersed tunnel[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018(12): 1-14.
- [20] 邵俊江. 沉管隧道的沉降预测及其控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2003. (SHAO Junjiang. Study on Settlement Prediction and Control of Immersed Tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese))
- [21] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2004. (CHEN Xizhe. Soil mechanics and geotechnical engineering[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [22] 李勇义, 冯健雪, 梅国雄. 连续排水边界下梯形循环荷载作用的一维固结解析解[J]. 工程力学, 2019, 36(2):

- 134-140. (LI Yongyi, FENG Jianxue, MEI Guoxiong. One-dimensional consolidation analysis of the trapezoidal cyclic loading under continuous drainage boundary[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, **36**(2): 134-140. (in Chinese))
- [23] 宗梦繁, 吴文兵, 梅国雄, 等. 连续排水边界条件下土体一维非线性固结解析解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(12): 2829-2838. (ZONG Mengfan, WU Wenbing, MEI Guoxiong, et al. An analytical solution for one-dimensional nonlinear consolidation of soils with continuous drainage boundary[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(12): 2829-2838. (in Chinese))
- [24] 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*, 2015, **50**: 317-323.
- [25] 陈 铕, 万春风, 薛松涛, 等. Timoshenko 梁运动方程的修正及其影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, **33**(6): 711-715. (CHEN Rong, WAN Chunfeng, XUE Songtao, et al. Modification of motion equation of Timoshenko beam and its effect[J]. *Journal of Tongji University*, 2005, **33**(6): 711-715. (in Chinese))
- [26] 胡指南, 冯怀平, 马超超, 等. 沉管隧道节段接头剪力键受力阶段与沉降控制标准研究[J]. *现代隧道技术*, 2018, **55**(4): 132-138. (HU Zhinan, FENG Huaiping, MA Chaochao, et al. Load-bearing stages of joint shear keys and settlement control standards of immersed tunnel elements[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, **55**(4): 132-138. (in Chinese))
- [27] 黄明华. 甬江水底隧道运行性能分析与健康监测系统设计实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. (HUANG Minghua. Running Performance Analysis and Health Monitoring System Design of Yongjiang Underwater Tunnel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese))
- [28] 禹海涛, 萧文浩, 袁 勇, 等. 沉管隧道接头与管节本体刚度比试验[J]. *中国公路学报*, 2016, **29**(12): 134-141. (YU Haitao, XIAO Wenhao, YUAN Yong, et al. Experiment on stiffness ratio of immersion joint to immersed tunnel element[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, **29**(12): 134-141. (in Chinese))

勘 误

本刊 2023 年(第 45 卷)第 1 期“基于 HVSR 谱比动态聚类的海域场地特性研究”(作者: 刘献伟, 陈 苏, 李小军, 傅 磊, 胡进军, 孙 浩)一文中, 图 1, 3 有误, 特此更正。

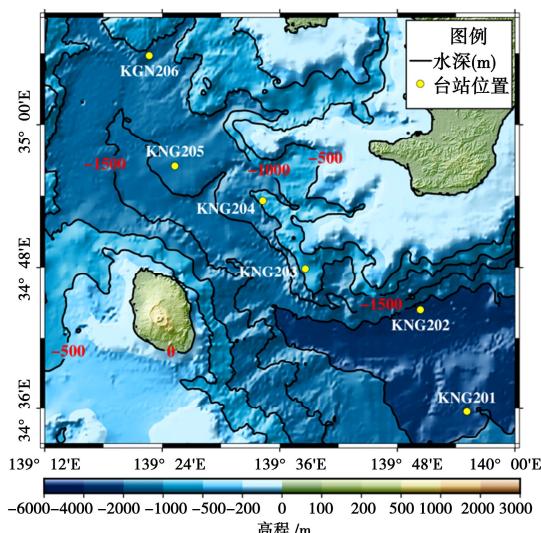


图 1 海底台站与水深分布图

Fig. 1 Distribution map of submarine stations and water depth

本刊 2022 年(第 44 卷)第 12 期第 2329 页“城市内河底泥物理-矿物成分-污染性状关联性试验研究”(作者: 王 钢, 吉 锋, 曾玲玲, 崔慧贞)一文中, 添加基金项目: 国家自然科学基金项目(52178361); 江苏水源公司科技研发项目(SSY-JS-2020-F-48), 特此更正。

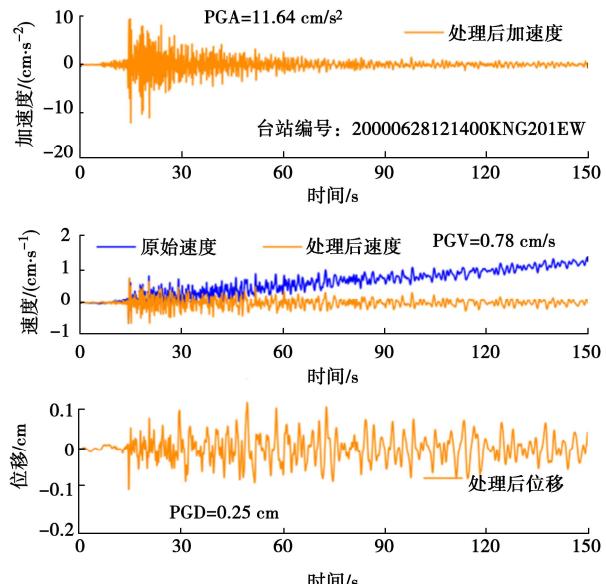


图 3 地震记录处理

Fig. 3 Processing of seismic records