

文章编号: 0559-9350(2025)06-0705-12

复合管道水击波速的计算

杨开林

(流域水循环模拟与调控国家重点实验室 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 水击波速是计算管道水击压力的关键参数, 复合管道水击波速的准确计算是一个亟需解决的科学问题。本文根据水击波速的原始定义, 建立了水击波速与管道内壁周向应变率的函数关系, 以及周向应变率与周向、径向和轴向应力变化率的函数关系。在此基础上, 考虑复合管各层应变率、交界面压力、管材力学参数和结构尺寸等的相互影响, 提出了准确计算复合管水击波速的通用公式。通过对影响通用公式各因素的解析, 导出薄壁复合管(包括薄壁衬砌隧洞和地下埋管)水击波速的近似公式, 然后分析了传统复合管水击波速公式存在的问题及适用条件。最后, 通过算例证明: (1)对于含有厚壁层的复合管道, 应该采用准确计算水击波速的通用公式; (2)传统的复合管道水击波速公式仅适用于薄壁复合管; (3)PCCP管的水击波速在945~1184 m/s之间; (4)当管道地下铺设时, 受回填土的影响, 管道水击波速略微增加, 影响较小。

关键词: 复合管道; 水击波速; 应变率; 厚壁管道; 薄壁管道; 隧洞

中图分类号: TV136

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20240460

1 研究背景

有压输水系统水力过渡过程数值仿真和水击(水锤)防护是工程设计和运行安全的重点课题^[1-2], Wylie等^[3]、Chaudhry^[4]和克里夫琴科^[5]在这方面作了开创性的工作。杨玲霞等^[6]对水击基本方程进行了改进。Yang^[7]研究了增加水泵机组转动惯量 GD^2 , 以防止管道低水压液体出现汽化现象。近几年来, 杨开林研究了先导式泄压阀水力瞬变的数值仿真^[8], 提出了新的空气阀水力瞬变数学模型^[9], 利用空气阀形成空气阀调压室^[10]和水击补气式压力罐^[11]以提高水击防护的效果, 以及空气阀进排气孔径的合理选择方法^[12]。

水击波速是计算管道水击压力的关键参数, 因为水击压力的大小与水击波速成正比^[3-5]。早在160多年前, Menabrea就提出了刚性管道、弹性水体条件下的水击波速公式, Kortweg考虑管道的弹性, 提出迄今常用的薄壁管道水击波速公式^[4]:

$$a = \sqrt{(K/\rho)/(1 + KD/(eE))} \quad (1)$$

式中: a 为管道水击波速, m/s; K 为水体的体积弹性模数, Pa; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; D 为管道直径(内径), m; e 为管壁厚度, m; E 为管材的杨氏弹性模量, Pa。

在1970年代, Wylie等^[3]考虑了管道支撑情况的影响, 对Kortweg水击波速公式进行了修正, 同时, 在其他人的研究基础上, 给出厚壁管道、圆形隧洞、带衬圆隧洞和混凝土管水击波速的公式。与此同一时期, 柯莱克提出了复合衬砌隧洞的水击波速公式^[5]:

$$a = \sqrt{(K/\rho)/(1 + K/K_c)} \quad (2)$$

收稿日期: 2024-07-20; 网络首发日期: 2025-06-05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20250605.0953.001>

作者简介: 杨开林(1955-), 教授级工程师, 主要从事水力瞬变研究。E-mail: ykcliwhr@sohu.com

$$K_c = \frac{1}{2} \frac{e_1 E_1}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{E_2 A_2}{R_2 L} + \frac{1}{2} \sum_{j=3}^{n-1} \frac{E_j \ln(R_{j+1}/R_j)}{1 - \mu_j^2} + \frac{1}{2} \frac{E_n}{1 + \mu_n} \quad (3)$$

式中： K_c 为管道与水接触内壁的弹性系数，即管道内壁抵抗水压变化引起的变形系数； R 为半径，m； A_2 为沿轴向长度 $L=1$ m内的钢筋等效面积， m^2 ； μ 为材料的泊松比；下标 $j=1, 2, 3, \dots, n$ 为混凝土衬砌隧洞分层编号； n 为隧洞分层数；第 n 层为隧洞围岩。在式(3)右边：第1项为薄壁钢筒内衬层弹性系数；第2项为混凝土钢筋等效弹性系数；第3项为混凝土衬砌层和水泥灌浆层的弹性系数；第4项为隧洞围岩层弹性系数。

吕海艳^[13]和郭强等^[14]研究了流固耦合，包括轴向应力对厚壁管道水击波速的影响，结果表明所得厚壁管道水击波速值比经典薄壁管道水击波速值小。

目前随着对管道防腐和水质要求的提高，已经研发了很多由两个或两个以上的单层管道彼此紧密套合在一起的复合管道，例如预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)、钢塑复合管、钢筋混凝土管、带衬隧洞、带衬球墨铸铁管等。周文龙等^[15]针对带内衬和外衬保护的复合管道，采用了下述水击波速公式：

$$a = \sqrt{(K/\rho)/[1 + KD_1/(e_1 E_p)]} \quad (4)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{E_1 \ln(D_2/D_1)}{1 - \mu_1^2} + \frac{1}{2} \frac{E_2 \ln(D_3/D_2)}{1 - \mu_2^2} + \frac{1}{2} \frac{e_3 E_3}{D_3} \quad (5)$$

式中： E_p 为复合管道的等效弹性模量，Pa；下标1、2、3为管层编号。

张奥等^[16]总结了常用水击波速公式，对地下铺设带内衬复合管道采用下式：

$$a = \sqrt{(K/\rho)/[1 + KD/((e_1 E_1 + e_2 E_2 + DE_s/5)c_1)]} \quad (6)$$

式中： E_s 为土壤的杨氏弹性模量； c_1 为考虑管道支撑情况的修正系数。

观察传统复合管水击波速公式(2)(4)(6)，它们之间差异明显。这就提出三个问题：(1)传统复合管水击波速公式存在的问题；(2)各自的适用条件；(3)如果这些公式使用条件均有限，如何系统考虑影响复合管水击波速的各方面因素，以确定复合管水击波速的理论准确值。

本文的主要目的是，首先根据水击波速的原始定义，确定水击波速与管道内壁周向应变率的函数关系；建立厚壁圆筒周向应变率与周向、径向和轴向应力变化率的基本方程，并导出单层厚壁管道水击波速公式；然后，建立复合管与水接触管壁周向应变率与其它各层应变率、交界面压力、管材力学参数和结构尺寸关系的基本方程，并解析导出准确计算复合管水击波速的通用公式；在此基础上，通过对影响通用公式各因素的解析，导出薄壁复合管(包括薄壁衬砌隧洞和地下埋管)水击波速的近似公式，然后分析传统复合管水击波速公式存在的问题及适用条件；最后，通过算例比较本文所提复合管通用水击波速公式与传统常用公式的差异。

2 水击波速与管壁应变率基本方程

输水管道水击波速的原始定义^[5,17]是：

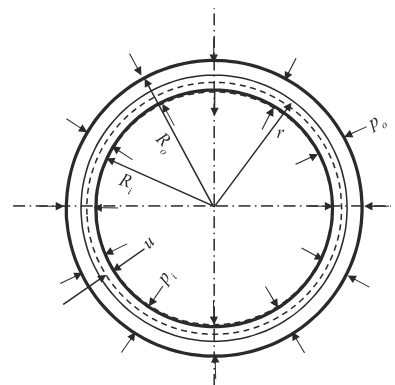
$$a = \sqrt{(K/\rho)/[1 + K\dot{A}_i/(A_i \dot{p}_i)]} \quad (7)$$

式中： p_i 为管道水压，Pa；变量上的“ \cdot ”代表变量对时间的一阶求导； $A_i = \pi R_i^2$ 为管道的过水断面面积， m^2 ；下标 i 表示管道内壁。

如图1所示，由于管壁具有弹性，因此，在管道水压 p_i 和外压 p_o 的作用下，管道内侧将产生径向位移 u_i ，这时管道过水断面面积的改变量：

$$\Delta A_i = \pi (R_i + u_i)^2 - \pi R_i^2 = \pi (2R_i u_i + u_i^2)$$

由于上式右边第二项与第一项相比是高阶微量，即 $2R_i u_i \gg u_i^2$ ，



注： R_o 为管壁外径； R_i 为管壁内径； r 为管道壁面任意圆的半径。

图1 厚壁管道截面特征参数

所以

$$\Delta A_i \approx 2\pi R_i u_i \quad (8)$$

在水击发生时, p_i 和 p_o 随时间变化, 从而引起 ΔA_i 随时间变化。对式(8)求导得:

$$\dot{A}_i = 2\pi R_i \dot{u}_i \quad (9)$$

\dot{u}_i 与管道内壁周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta i}$ 的关系^[18]是:

$$\dot{u}_i = R_i \dot{\xi}_{\theta i} \quad (10)$$

根据式(9)(10), 可得管道过水断面面积的相对膨胀率:

$$\dot{A}_i/A_i = 2\pi R_i \dot{\xi}_{\theta i}/(\pi R_i^2) = 2\dot{\xi}_{\theta i}$$

当定义

$$K_c = \dot{p}_i/(\dot{A}_i/A_i) = \dot{p}_i/(2\dot{\xi}_{\theta i}) \quad (11)$$

把式(11)代入式(7), 可得管道水击波速:

$$a = \sqrt{(K/\rho)/(1 + K/K_c)} \quad (12)$$

显然, 管道内壁变形越大, K_c 越小, 水击波速也越小。

假设管材各向同性, 且垂直于管轴的横截面在变形后仍保持为平面, 则根据厚壁圆筒应变与应力分析理论^[18]可得下述基本方程:

$$\dot{\xi}_{\theta} = [\dot{\sigma}_{\theta} - \mu(\dot{\sigma}_r + \dot{\sigma}_z)]/E \quad (13)$$

$$\dot{\xi}_z = [\dot{\sigma}_z - \mu(\dot{\sigma}_r + \dot{\sigma}_{\theta})]/E \quad (14)$$

$$\dot{\sigma}_{\theta} = \frac{\dot{p}_i R_i^2 - \dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{(\dot{p}_i - \dot{p}_o)(R_i^2 R_o^2)}{R_o^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (15)$$

$$\dot{\sigma}_r = \frac{\dot{p}_i R_i^2 - \dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{(\dot{p}_i - \dot{p}_o)(R_i^2 R_o^2)}{R_o^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (16)$$

式中: σ 为管道应力, Pa; μ 为泊松比; 下标 θ 、 r 、 z 分别表示管道周向、径向和轴向; 下标 o 表示管壁的外侧。

从式(13)可知, 周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta}$ 不仅与周向应力变化率 $\dot{\sigma}_{\theta}$ 有关, 而且与径向应力变化率 $\dot{\sigma}_r$ 和轴向应力变化率 $\dot{\sigma}_z$ 有关。管道轴向应变率 $\dot{\xi}_z$ 和应力变化率 $\dot{\sigma}_z$ 与管道的支撑有关, 可分为下述三种情况:

(a) 管道只在上游末端固定,

$$\dot{\sigma}_z = (\dot{p}_i R_i^2 - \dot{p}_o R_o^2)/(R_o^2 - R_i^2), \dot{\xi}_z \neq 0 \quad (17)$$

(b) 全管固定, 没有轴向运动, 例如地下埋管和衬砌隧洞, 根据式(14), 可得:

$$\dot{\sigma}_z = \mu(\dot{\sigma}_r + \dot{\sigma}_{\theta}), \dot{\xi}_z = 0 \quad (18)$$

(c) 管道全部采用膨胀接头连接, 例如管道采用承插式接头连接,

$$\dot{\sigma}_z = 0 \quad (19)$$

管道内壁面应力变化率的边界条件是:

$$\dot{\sigma}_{\theta i} = [\dot{p}_i(R_i^2 + R_o^2) - 2\dot{p}_o R_o^2]/(R_o^2 - R_i^2), r = R_i \quad (20)$$

$$\dot{\sigma}_{r i} = -\dot{p}_i, r = R_i \quad (21)$$

管道外壁面应力变化率的边界条件是:

$$\dot{\sigma}_{\theta o} = [2\dot{p}_i R_i^2 - \dot{p}_o(R_i^2 + R_o^2)]/(R_o^2 - R_i^2), r = R_o \quad (22)$$

$$\dot{\sigma}_{r o} = -\dot{p}_o, r = R_o \quad (23)$$

对管道支撑方式(a), 把式(17)(20)(21)代入式(13)得管道内壁应变率:

$$\dot{\xi}_{\theta i} = \frac{1}{E} \left[\frac{\dot{p}_i(R_i^2 + R_o^2) - 2\dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} - \mu \left(-\dot{p}_i + \frac{\dot{p}_i R_i^2 - \dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) \right] = \frac{1}{E} \left[\frac{2\dot{p}_i R_i^2 - 2\dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} (1 - \mu/2) + \dot{p}_i (1 + \mu) \right] \quad (24)$$

对管道支撑方式(b), 把式(18)(20)(21)代入式(13)得管道内壁应变率:

$$\dot{\xi}_{\theta i} = \frac{1}{E} \left[\frac{2\dot{p}_i R_i^2 - 2\dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} (1 - \mu^2) + \dot{p}_i (1 + \mu) \right] \quad (25)$$

对管道支撑方式(c), 把式(19)(20)(21)代入式(13)得管道内壁应变率:

$$\dot{\xi}_{\theta i} = \frac{1}{E} \left[\frac{2\dot{p}_i R_i^2 - 2\dot{p}_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \dot{p}_i (1 + \mu) \right] \quad (26)$$

观察式(24)–(26), 它们可以用下述统一形式描述:

$$\dot{\xi}_{\theta i} = \frac{\dot{p}_i}{E} \left(\frac{2R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} c_1 + 1 + \mu \right) - \frac{\dot{p}_o}{E} \frac{2R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} c_1 \quad (27)$$

系数 c_1 与管子的支撑情况有关, 对于管子支撑情况(a)(b)(c), 系数 c_1 分别为:

$$c_1 = 1 - \mu/2, \quad c_1 = 1 - \mu^2, \quad c_1 = 1 \quad (28)$$

对管道支撑方式(a), 把式(17)(22)(23)代入式(13)可得管道外壁应变率; 对管道支撑方式(b), 把式(18)(22)(23)代入式(13)可得管道外壁应变率; 对管道支撑方式(c), 把式(19)(22)(23)代入式(13)可得管道外壁应变率。类似的, 可得管道外壁应变率的统一描述形式:

$$\dot{\xi}_{\theta o} = \frac{\dot{p}_i}{E} \frac{2R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} c_1 - \frac{\dot{p}_o}{E} \left(\frac{2R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} c_1 - 1 - \mu \right) \quad (29)$$

观察式(27)(29)可知, 管壁周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta i}$ 和 $\dot{\xi}_{\theta o}$ 不仅与管壁压力 \dot{p}_i 和 \dot{p}_o 、管材力学参数 E 和 μ 、结构参数 R_i 和 R_o 有关, 而且与管道支撑情况 c_1 有关。在一般情况下, 根据式(11)(12)(27), 可以推导得到单层管道和隧洞的水击波速; 对于复合管, 问题比较复杂, 需要根据式(11)(12)(27)(29)并考虑复合管各层之间应变率的相互影响, 才能推导得到水击波速计算公式。

在一般情况下, 当水击发生时, 管道外壁压力随时间变化微小, 可忽略不计, 即 $\dot{p}_o = 0$, 这时, 根据式(11)(12)(27), 可得管道的水击波速:

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left\{ 1 + \frac{2K}{E} \left[\frac{2R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} c_1 + (1 + \mu) \right] \right\}} \quad (30)$$

由于在推导的过程中, 全面考虑了影响管道内壁周向应变率的各因素, 且分析过程中没有简化, 所以式(30)所得结果就是厚壁管道水击波速的准确解。

因为管道内径 $D = 2R_i$, 且 $R_o^2 - R_i^2 = (R_o - R_i)(R_i + R_o) = e(D + e)$, 所以式(30)可以改写为

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left\{ 1 + \frac{KD}{eE} \left[\frac{D}{D + e} c_1 + \frac{2e}{D} (1 + \mu) \right] \right\}} \quad (31)$$

式(31)与 Wylie 等^[3]根据他人研究成果推荐的厚壁管道水击波速公式完全相同。观察式(31), 似乎水击波速 a 与水压 p 无关, 但是实际有关, 因为管道承受的水压越大, 所需管壁厚度 e 就越大, 而水击波速也就越大。

对于薄壁管道, $e/D < 1/25$, 这时, 式(31)可以简化为:

$$a = \sqrt{(K/\rho) [1 + K D c_1 / (e E)]} \quad (32)$$

上式就是常用的考虑管道支撑方式的薄壁管道水击波速公式。

对于圆形隧洞, 假设围岩埋深较大时, 则 $R_o \gg R_i$ 。当令 $R_o \rightarrow \infty$, 则从式(31)可得隧洞水击波速为

$$a = \sqrt{(K/\rho) [1 + 2K(1 + \mu)/E]} \quad (33)$$

3 复合管道水击波速的准确解

复合管道是由两个或两个以上的单层管道彼此紧密套合在一起的管道, 例如预应力钢筒混凝土管(PCCP)、钢塑复合管、钢筋混凝土管、带衬隧洞、带衬球墨铸铁管等。

如图2所示, 对于复合管道, 水击波速 a 取决于与水接触管壁的周向应变率, 即复合管道第1层内

壁的周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta_i,1}$ ，而 $\dot{\xi}_{\theta_i,1}$ 不仅与第1层外壁的应变率有关，而且与其它各层内壁和外壁的应变率有关。换句话说，需要建立复合管层与层应变率之间的函数关系，然后联立求解。

由式(27)可得第j层内壁周向应变率：

$$\dot{\xi}_{\theta_i,j} = \frac{\dot{p}_j}{E_j} \left(\frac{2R_j^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j + 1 + \mu_j \right) - \frac{\dot{p}_{j+1}}{E_j} \frac{2R_{j+1}^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j \quad (34)$$

式中： $j = n, n-1, n-2, \dots, 1$ ； n 为复合管道的层数；对管道支撑情况(a)(b)(c)，系数 c_j 分别为：

$$c_j = 1 - \mu_j/2, c_j = 1 - \mu_j^2, c_j = 1 \quad (35)$$

由(29)可得第j层外壁周向应变率：

$$\dot{\xi}_{\theta_o,j} = \frac{\dot{p}_j}{E_j} \frac{2R_j^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j - \frac{\dot{p}_{j+1}}{E_j} \left(\frac{2R_{j+1}^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j - 1 - \mu_j \right) \quad (36)$$

在复合管道第j-1层外壁与第j层内壁的界面，受水压影响，第j-1层外壁将向外推挤第j层内壁，产生周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta_o,j-1}$ ，同时第j层内壁将向内推挤第j-1层外壁，产生周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta_i,j}$ ，从而使两层紧紧挤压在一起，这时在两层交界面的应变率边界条件是：

$$\dot{\xi}_{\theta_o,j-1} - \dot{\xi}_{\theta_i,j} = 0 \quad (37)$$

式(34)(36)(37)可分别改写为下述线性方程：

$$\dot{\xi}_{\theta_o,j-1} = b_{j,1} \dot{p}_{j-1} - b_{j,2} \dot{p}_j \quad (38)$$

$$\dot{\xi}_{\theta_i,j} = b_{j,3} \dot{p}_j - b_{j,4} \dot{p}_{j+1} \quad (39)$$

$$b_{j,1} \dot{p}_{j-1} - (b_{j,2} + b_{j,3}) \dot{p}_j + b_{j,4} \dot{p}_{j+1} = 0 \quad (40)$$

其中：

$$\begin{cases} b_{j,1} = \frac{1}{E_{j-1}} \frac{2R_{j-1}^2}{R_j^2 - R_{j-1}^2} c_{j-1}, & b_{j,2} = \frac{1}{E_{j-1}} \left(\frac{2R_j^2}{R_j^2 - R_{j-1}^2} c_{j-1} - 1 - \mu_{j-1} \right) \\ b_{j,3} = \frac{1}{E_j} \left(\frac{2R_j^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j + 1 + \mu_j \right), & b_{j,4} = \frac{1}{E_j} \frac{2R_{j+1}^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j \end{cases} \quad (41)$$

如果复合管最外层 $j = n$ 是隧洞围岩，这时 $R_{n+1} \gg R_n$ ，则由式(41)可得

$$b_{n,3} = (1 + \mu_n)/E_n, \quad b_{n,4} = 2c_n/E_n \quad (42)$$

令式(40)中

$$\dot{p}_{j+1} = w_{j+1} \dot{p}_j \quad (43)$$

式中 w_{j+1} 为待定系数。

在管道水击过程中，可取 $\dot{p}_{n+1} = 0$ ，这时取

$$w_{n+1} = 0 \quad (44)$$

将式(43)代入式(40)可得：

$$w_j = \frac{b_{j,1}}{b_{j,2} + b_{j,3} - b_{j,4} w_{j+1}}, \quad j = n, n-1, n-2, \dots, 2 \quad (45)$$

将式(43)代入式(39)可得：

$$\dot{\xi}_{\theta_i,j} = (b_{j,3} - b_{j,4} w_{j+1}) \dot{p}_j, \quad j = n, n-1, n-2, \dots, 1 \quad (46)$$

对于复合管道第1层内壁，周向应变率：

$$\dot{\xi}_{\theta_i,1} = (b_{1,3} - b_{1,4} w_2) \dot{p}_1 \quad (47)$$

把式(47)代入式(11)得复合管道与水接触内壁的弹性系数：

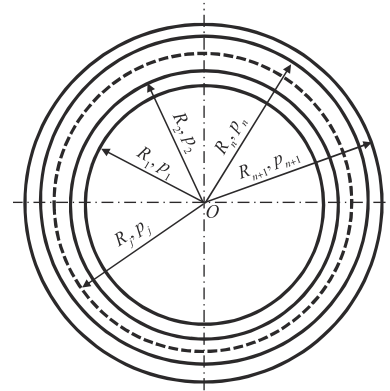


图2 复合管道断面示意

$$K_c = \frac{\dot{p}_1}{2\dot{\xi}_{\theta i,1}} = \frac{1}{2} \frac{1}{b_{1,3} - b_{1,4}w_2} \quad (48)$$

综上所述, 复合管水击波速的计算程序是: 由式(45)的代数递推计算得 w_n, w_{n-1}, \dots, w_2 , 然后由式(48)计算复合管的弹性系数 K_c , 最后由式(12)计算水击波速。由于在推导式(45)(48)(12)的过程中, 全面考虑了复合管影响周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta i,1}$ 的各因素, 所以由此计算的水击波速是准确解。

需要说明的是, 由于在推导的过程中没有涉及具体的管材, 式(45)(48)(12)不仅适用于各种管材的厚壁管道和复合管道, 而且也适用于薄壁管道、隧洞、带衬隧洞等, 所以这些公式是准确计算水击波速的通用公式。在一般情况下, 公式所涉及参数在设计中均可得到。

下面将通过准确计算水击波速的通用公式的解析, 导出薄壁复合管道水击波速的近似公式, 以简化计算程序及比较分析传统复合管水击波速公式(2)(4)(6)存在的问题, 以及各自的适用条件。

4 薄壁复合管道水击波速的近似公式

当管道直径 $D_j = 2R_j$ 与壁厚 $e_j = R_{j+1} - R_j$ 的比值 $D_j/e_j = 2R_j/e_j \geq 25$, 可视为薄壁复合管道。下面研究薄壁复合管道水击波速的解析求解。

对于薄壁管层:

$$R_j^2 \approx R_{j-1}^2 + 2e_{j-1}R_{j-1}, \quad R_j^2 - R_{j-1}^2 \approx 2e_{j-1}R_{j-1}, \quad R_{j+1}^2 \approx R_j^2 + 2e_jR_j, \quad R_{j+1}^2 - R_j^2 \approx 2e_jR_j \quad (49)$$

由于管材的泊松比 $\mu < 0.5$, 例如混凝土 $\mu = 0.1 \sim 0.15$, 钢管 $\mu = 0.25$, 铸铁 $\mu = 0.25$, 塑料 $\mu = 0.33$, 聚乙烯 $\mu = 0.46$, 环氧树脂 $\mu = 0.38$, 因此把式(49)代入式(41)得:

$$\begin{cases} b_{j,1} = \frac{1}{E_{j-1}} \frac{2R_{j-1}^2}{R_j^2 - R_{j-1}^2} c_{j-1} \approx \frac{R_{j-1}}{e_{j-1}E_{j-1}} c_{j-1} \\ b_{j,2} = \frac{1}{E_{j-1}} \left(\frac{2R_j^2}{R_j^2 - R_{j-1}^2} c_{j-1} - 1 - \mu_{j-1} \right) \approx \frac{1}{E_{j-1}} \left(\frac{R_{j-1}}{e_{j-1}} c_{j-1} + 2c_{j-1} - 1 - \mu_{j-1} \right) \approx \frac{R_{j-1}}{e_{j-1}E_{j-1}} c_{j-1} \\ b_{j,3} = \frac{1}{E_j} \left(\frac{2R_j^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j + 1 + \mu_j \right) \approx \frac{1}{E_j} \left(\frac{R_j}{e_j} c_j + 1 + \mu_j \right) \approx \frac{R_j}{e_jE_j} c_j \\ b_{j,4} = \frac{1}{E_j} \frac{2R_{j+1}^2}{R_{j+1}^2 - R_j^2} c_j \approx \frac{R_j}{e_jE_j} c_j + 2c_j \approx \frac{R_j}{e_jE_j} c_j \end{cases} \quad (50)$$

由式(50)可知, 对薄壁管层:

$$b_{j,1} = b_{j,2}, \quad b_{j,3} = b_{j,4}, \quad b_{j,2} = b_{j-1,3} \quad (51)$$

对于 $j = n$ 层, $w_{n+1} = 0$, 根据式(44)(46):

$$\dot{\xi}_{\theta i,n} = \dot{p}_n b_{n,3} = \dot{p}_n / (1/b_{n,3}) \quad (52)$$

对于 $j = n - 1$ 层, 根据式(45)(46)(51):

$$w_n = b_{n,1} / (b_{n,2} + b_{n,3} - b_{n,4}w_{n+1}) = b_{n,1} / (b_{n,2} + b_{n,3}) = b_{n,2} / (b_{n,2} + b_{n,3}) = b_{n-1,3} / (b_{n-1,3} + b_{n,3}) \quad (53)$$

$$\dot{\xi}_{\theta i,n-1} = \dot{p}_{n-1} (b_{n-1,3} - b_{n-1,4}w_n) = \dot{p}_{n-1} [b_{n-1,3} - b_{n-1,3}b_{n-1,3} / (b_{n-1,3} + b_{n,3})] = \dot{p}_{n-1} / (1/b_{n-1,3} + 1/b_{n,3}) \quad (54)$$

根据式(52)(54)描述的复合管道第 n 层和第 $n - 1$ 层内壁周向应变率的数学描述, 可推论得出第 1 层内壁周向应变率

$$\dot{\xi}_{\theta i,1} = \dot{p}_1 / (1/b_{1,3} + 1/b_{2,3} + \dots + 1/b_{n-1,3} + 1/b_{n,3}) = \dot{p}_1 / \sum_{j=1}^n \frac{1}{b_{j,3}} = \dot{p}_1 / \sum_{j=1}^n \frac{e_j E_j}{R_j c_j} \quad (55)$$

下面论证式(55)推论的正确性。当把复合管道第 2 至 n 层用一个等效 $j = 2$ 层代替, 其等效层内壁周向应变率:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{\theta i,2} &= \dot{p}_2 b_{e2,3} = \dot{p}_2 / (1/b_{e2,3}) = \dot{p}_2 / (1/b_{2,3} + 1/b_{3,3} + \dots + 1/b_{n-1,3} + 1/b_{n,3}) \\ b_{e2,3} &= 1 / (1/b_{2,3} + 1/b_{3,3} + \dots + 1/b_{n-1,3} + 1/b_{n,3}) \end{aligned}$$

式中下标“e”表示等效管参数。

根据式(45)(46)(51)与等效层外壁 $\dot{p}_3 = \dot{p}_{n+1} = 0$ 和 $w_3 = 0$ ，可得：

$$w_2 = b_{2,1}/(b_{2,2} + b_{e2,3} - b_{e2,4}w_3) = b_{1,3}/(b_{1,3} + b_{e2,3})$$

$$\dot{\xi}_{\theta_{i,1}} = \dot{p}_1(b_{1,3} - b_{1,4}w_2) = \dot{p}_1[b_{1,3} - b_{1,3}b_{1,3}/(b_{1,3} + b_{e2,3})] = \dot{p}_1/(1/b_{1,3} + 1/b_{e2,3}) = \dot{p}_1/\sum_{j=1}^n \frac{1}{b_{j,3}} = \dot{p}_1/\sum_{j=1}^n \frac{e_j E_j}{R_j c_j}$$

由于上式与式(55)完全相同，结论得证。

4.1 薄壁复合管道通用水击波速公式 把式(55)代入式(11)，可得：

$$K_c = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n 1/b_{j,3} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{e_j E_j}{R_j c_j} = \sum_{j=1}^n \frac{e_j E_j}{D_j c_j} \quad (56)$$

把式(56)代入式(12)，可得薄壁复合管道的水击波速：

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left[1 + K/\sum_{j=1}^n \frac{e_j E_j}{D_j c_j} \right]} \quad (57)$$

对于单层薄壁管，取 $n = 1$ ， $\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{e_j E_j}{R_j c_j} = \frac{e_1 E_1}{D_1 c_1} = \frac{eE}{Dc_1}$ ，式(57)简化为式(32)，即薄壁复合管水击波速公式也适用于单层薄壁管。

下面分析两个特例：薄壁衬砌隧洞、地下铺设复合管道。

4.2 薄壁衬砌隧洞水击波速计算 对薄壁衬砌的隧洞，当用式(42) $b_{n,3}$ 代替式(56)中 $b_{n,3}$ ，则

$$K_c = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{b_{j,3}} = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{e_j E_j}{R_j c_j} + \frac{E_n}{1 + \mu_n} \right) \quad (58)$$

把式(58)代入式(12)可得薄壁衬砌隧洞的水击波速：

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left[1 + K \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{e_j E_j}{D_j c_j} + \frac{1}{2} \frac{E_n}{1 + \mu_n} \right) \right]} \quad (59)$$

式中 $c_j = 1 - \mu_j^2$ 。

4.3 地下铺设管道的水击波速 目前大量的输水管道采用地下铺设方式，并在管道上面回填土(土壤、砂石)。当管道周围回填土结构松散，容许管道轴向移动，则可以忽略不计回填土对水击波速的影响。当管道周围回填土结构密实，不容许管道轴向移动，则需要考虑回填土对水击波速的影响。根据式(58)和参考文献[16]，地下铺设管道内壁的弹性系数和水击波速分别为：

$$K_c = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{e_j E_j}{R_j c_j} + \frac{E_s}{c_s} \right) \quad (60)$$

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left[1 + K \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{e_j E_j}{D_j c_j} + \frac{1}{2} \frac{E_s}{c_s} \right) \right]} \quad (61)$$

式中 c_s 为经验系数，与回填土厚度、泊松比有关，一般取 $c_s \approx 2.5^{[16]}$ 。

5 传统复合管水击波速公式分析

5.1 柯莱克水击波速公式分析 对于薄壁管层，因为

$$\ln(R_{j+1}/R_j) = \ln(1 + e_j/R_j) \approx e_j/R_j$$

所以，式(3)可近似为

$$K_c = \frac{1}{2} \frac{e_1 E_1}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{e_2 E_2}{R_2} + \frac{1}{2} \sum_{j=3}^n \frac{e_j E_j}{R_j c_j} + \frac{1}{2} \frac{E_n}{1 + \mu_n} \quad (62)$$

式中： $e_2 = A_2/L$ ； $c_j = 1 - \mu_j^2$ 。

比较式(58)和(62)可知，式(3)假设 $\mu_1^2 = \mu_2^2 = 0$ 和 $c_1 = c_2 = 1$ ，即没有考虑隧洞轴向和径向应

力对第1项隧洞内衬钢筒和第2项钢筋弹性系数分量的影响。作为改进,式(3)(2)应为:

$$K_c = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{E_j \ln(R_{j+1}/R_j)}{c_j} + \frac{1}{2} \frac{E_n}{1 + \mu_n} \quad (63)$$

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left\{ 1 + Kl \left[\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{E_j \ln(R_{j+1}/R_j)}{c_j} + \frac{1}{2} \frac{E_n}{1 + \mu_n} \right] \right\}} \quad (64)$$

对于薄壁复合管,式(64)可改写为:

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left\{ 1 + Kl \left[\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{E_j \ln(R_{j+1}/R_j)}{c_j} \right] \right\}} \quad (65)$$

下面的算例将表明,柯莱克水击波速公式只适用于薄壁复合管,而不适用于厚壁复合管,可以用式(59)代替。

5.2 周文龙等复合管水击波速公式分析 对于薄壁管层,因为 $D_{j+1}/D_j = R_{j+1}/R_j$,所以式(5)可改写为:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{E_1 \ln(R_2/R_1)}{c_1} + \frac{1}{2} \frac{E_2 \ln(R_3/R_2)}{c_2} + \frac{1}{2} \frac{e_3 E_3}{2R_3} \quad (66)$$

式中 $c_j = 1 - \mu_j^2$, $j = 1, 2$ 。

比较式(3)和式(66),两者具有一定相似性,式(66) E_p 中第1、2项相当于式(3) K_c 中第3项2个分量;而式(66) E_p 中第3项相当于式(3) K_c 中第1项,如果前者不是后者的1/2,在相同复合管条件下, $E_p = K_c$ 。

对于单层薄壁管,式(66)可改写:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{E_1 \ln(R_2/R_1)}{c_1} \approx \frac{1}{2} \frac{E_1 e_1}{R_1 c_1} = \frac{E_1 e_1}{D_1 c_1}$$

代入式(4)得

$$a = \sqrt{(K/\rho) / [1 + KD_1^2 c_1 / (E_1 e_1^2)]} \quad (67)$$

比较常用薄壁管水击波速公式(32)和式(67),后者分母比前者多出 D_1/e_1 。据此,可得结论,式(4)存在笔误。

5.3 张奥等复合管水击波速公式分析 张奥等^[16]地下铺设带内衬复合管道水击波速式(6)可改写为,

$$a = \sqrt{(K/\rho) \left[1 + Kl \left(\frac{e_1 E_1}{Dc_1} + \frac{e_2 E_2}{Dc_1} + \frac{1}{2} \frac{E_3}{c_s} \right) \right]} \quad (68)$$

当令式(61)中 $n = 2$ 、 $D_1 c_1 = Dc_1$ 和 $D_2 c_2 = Dc_1$,则式(66)等于式(61),所以,某种程度上,张奥等复合管水击波速公式是本文式(61)的一种近似。换句话说,张奥等复合管水击波速公式只适用于薄壁复合管。此外,内衬和管道的泊松比差异较大, $D_2 c_2 = Dc_1$ 只是假设,实际上不可能。

6 算例

6.1 算例1 衬砌隧洞断面可分为6层^[5]:第1层钢板衬砌层,第2层为混凝土衬砌层,第3层为混凝土中钢筋层,第4层为混凝土衬砌层,第5层为水泥灌浆层,第6层为围岩层。各层内壁半径 R_j 、壁厚 e_j 、弹性模量 E_j 、泊松比 μ_j 均列于表1,其中第三层环形钢筋布置在 $R_3 = 3.2$ m处,沿隧洞长度 $L = 1$ m内有4根直径 $d = 0.028$ m的钢筋,等效钢筋层厚度 $e_3 = 4\pi(d/2)^2/L = 0.0025$ m;围岩层外壁 $R_7 \rightarrow \infty$ 。

对于衬砌隧洞,可按管道支撑方式(b),取 $c_j = 1 - \mu_j^2$ 计算水击波速。计算取水体的体积弹性模数 $K = 2.2 \times 10^9$ Pa、水的密度 $\rho = 998.2$ kg/m³。采用了三种水击波速计算方法:方法1采用复合管道通用水击波速公式(45)(48)(12),方法2采用薄壁衬砌隧洞水击波速公式(58)(59),方法3采用改进的

式(63)(64), 计算结果分别列于表1和表2。在三种水击波速计算方法中, 方法1完整考虑了复合管道的材料力学特性和结构尺寸的影响, 计算的水击波速是理论准确值。

表1 衬砌隧洞特征参数及计算结果

j	R_j/m	e_j/m	E_j/Pa	μ_j	$e_j E_j / (R_j c_j)$	$E_j \ln(R_{j+1}/R_j) / c_j$	说明
1	3.000	0.0340	2.0×10^{11}	0.300	2.49×10^9	2.48×10^9	钢板衬砌
2	3.034	0.1660	2.1×10^{10}	0.167	1.18×10^9	1.15×10^9	混凝土衬砌
3	3.200	0.0025	2.0×10^{11}	0.300	1.72×10^8	1.72×10^8	混凝土钢筋
4	3.203	0.1975	2.1×10^{10}	0.167	1.33×10^9	1.29×10^9	混凝土衬砌
5	3.400	4.5000	3.5×10^{10}	0.200	4.83×10^{10}	3.07×10^{10}	水泥灌浆层
6	7.900	∞	2.5×10^{10}	0.200	2.08×10^{10}	2.08×10^{10}	围岩层

表2列出了管道内壁的弹性系数 K_c 和水击波速 a 的计算结果, 其中方法2和3计算 K_c 值都比方法1大1倍以上, 偏差较大。结果导致三种方法计算的水击波速差别明显, 方法1计算的准确水击波速为1379 m/s, 方法2、3计算的近似水击波速分别为1442和1430 m/s。

观察表1, 方法2计算的 K_c 分量 $e_j E_j / (R_j c_j)$ 及方法3计算的 K_c 分量 $E_j \ln(R_{j+1}/R_j) / c_j$ 中水泥灌浆层和围岩层占比最大, 可达90%以上。换言之, 在隧洞组成结构中, 由于水泥灌浆层和围岩层属于厚壁, 对水击波速的影响最大, 起主导作用。此外, 对于水泥灌浆层, 方法2计算 K_c 分量约为方法3的1.5倍, 两者差别明显, 但是, 在混凝土、钢筋、钢板等薄壁层, 两种方法计算的 K_c 分量差别微小。

6.2 算例2 内衬式预应力钢筒混凝土管(Single Rubber Ring Lined Prestressed Steel Cylinder Concrete Pipe, PCCPSL), 由混凝土和钢筒组成管芯, 并在钢筒外侧缠绕环向预应力钢丝, 然后制作水泥砂浆保护层的管道, 管道采用承插式接头连接。PCCPSL管的最小内径为400 mm, 其最小管芯厚40 mm, 最小保护层厚25 mm, 钢筒厚1.5 mm^[19]。

由于预应力环向钢丝情况未知, 且由算例1可知, 钢筋层的影响较小, 计算时没有考虑。这时, 可将管道分为三层: 第一层为混凝土内衬, $R_1 = 0.2$ m, $e_1 = 0.0385$ m, $E_1 = 21 \times 10^9$ Pa, $\mu_1 = 0.167$; 第二层为钢筒, 内壁 $R_2 = R_1 + e_1 = 0.2385$ m, $e_2 = 0.0015$ m, $E_2 = 200 \times 10^9$ Pa, $\mu_2 = 0.3$; 第三层水泥砂浆保护层, 内壁 $R_3 = R_2 + e_2 = 0.24$ m, $e_3 = 0.025$ m, $E_3 = 35 \times 10^9$ Pa, $\mu_3 = 0.2$; 外壁半径 $R_4 = R_3 + e_3 = 0.265$ m。

对于PCCP管, 可按管道支撑方式(c)计算水击波速, 取 $c_j = 1$ 。方法2采用薄壁水击波速公式(56)(57), 当采用方法1、2和3分别计算水击波速, 可得表3和4计算结果。

观察表3, 方法2和3计算 K_c 值都比方法1大, 最大偏差达17%, 方法1、2、3计算的水击波速分别为1184、1216和1204 m/s。观察表4, 方法2计算的 K_c 分量 $e_j E_j / (R_j c_j)$ 及方法3计算的 K_c 分量 $E_j \ln(R_{j+1}/R_j) / c_j$ 数值接近, 其中水泥砂浆层和混凝土内衬的占比较大, 钢筒层最小。由于PCCPSL管每层都属于薄壁, 采用方法2和3计算的水击波速比较接近方法1的。

6.3 算例3 埋置式预应力钢筒混凝土管(Single Rubber Ring Embedded Prestressed Steel Cylinder Concrete Pipe, PCCPSE), 由钢筒内外两层混凝土层组成管芯并在管芯混凝土外侧缠绕环向预应力钢丝, 然后制作水泥砂浆保护层而制成的管道, 管道采用承插式接头连接。目前国内最大PCCP管内径4000 mm,

表2 衬砌隧洞内壁的弹性系数 K_c 和水击波速 a 计算结果

参数	方法1	方法2	方法3
K_c	1.38×10^{10}	3.71×10^{10}	2.83×10^{10}
$a/(m/s)$	1379	1442	1430

表3 PCCPSL管道内壁的弹性系数 K_c 和水击波速 a 计算结果

参数	方法1	方法2	方法3
K_c	3.84×10^9	4.49×10^9	4.23×10^9
$a/(m/s)$	1184	1216	1204

表4 PCCPSL管特征参数及计算结果

j	R_j/m	e_j/m	E_j/Pa	μ_j	$e_j E_j / (R_j c_j)$	$E_j \ln(R_{j+1}/R_j) / c_j$	说明
1	0.200	0.0385	2.10×10^{10}	0.17	4.04×10^9	3.70×10^9	混凝土
2	0.239	0.0015	2.00×10^{11}	0.30	1.26×10^9	1.25×10^9	钢筒
3	0.240	0.0250	3.50×10^{10}	0.20	3.65×10^9	3.47×10^9	水泥砂浆

最小管芯厚260 mm, 最小保护层厚25 mm, 钢筒厚1.5 mm^[19]。

由于预应力环向钢丝情况未知, 计算时没有考虑。这时, 可将PCCPSE管道分为四层: 第一层混凝土内衬, 内壁 $R_1 = 2.0$ m, $e_1 = 0.1$ m, $E_1 = 21 \times 10^9$ Pa, $\mu_1 = 0.167$; 第二层钢筒, 内壁 $R_2 = R_1 + e_1 = 2.1$ m, $e_2 = 0.0015$ m, $E_2 = 200 \times 10^9$ Pa, $\mu_2 = 0.3$; 第三层混凝土, 内壁 $R_3 = R_2 + e_2 = 2.1015$ m, $e_3 = 0.16$ m, $E_3 = 21 \times 10^9$ Pa, $\mu_3 = 0.167$; 第四层水泥砂浆保护层, 内壁 $R_4 = R_3 + e_3 = 2.2615$ m, $e_4 = 0.025$ m, $E_4 = 35 \times 10^9$ Pa, $\mu_4 = 0.2$; 外壁半径 $R_5 = R_4 + e_4 = 2.2865$ m。

与算例2类似, 可按管道支撑方式(c)计算水击波速。当采用方法1、2和3分别计算水击波速, 可得表5和6计算结果。

观察表5, 方法1、2、3计算 K_c 值比较接近, 偏差在6%范围内, 使得三者水击波速值也非常接近, 分别为945.5、961.5和953.8 m/s。观察表6, 方法2计算的 K_c 分量 $e_j E_j / (R_j c_j)$ 及方法3计算的 K_c 分量 $E_j \ln(R_{j+1}/R_j) / c_j$ 数值接近, 其中混凝土衬砌的占比较大, 钢筒层最小。

表5 PCCPSE管道内壁的弹性系数 K_c 和水击波速 a 计算结果

参数	方法1	方法2	方法3
K_c	1.50×10^9	1.59×10^9	1.55×10^9
$a/(m/s)$	945.5	961.5	953.8

表6 PCCPSE管特征参数及计算结果

j	R_j/m	e_j/m	E_j/Pa	μ_j	$e_j E_j / (R_j c_j)$	$E_j \ln(R_{j+1}/R_j) / c_j$	说明
1	2.000	0.1000	2.10×10^{10}	0.167	1.05×10^9	1.03×10^9	混凝土
2	2.100	0.0015	2.00×10^{11}	0.300	1.43×10^8	1.43×10^8	钢筒
3	2.102	0.1600	2.10×10^{10}	0.167	1.60×10^9	1.54×10^9	混凝土
4	2.261	0.0250	3.50×10^{10}	0.200	3.87×10^8	3.85×10^8	水泥砂浆

根据算例1、2和3计算结果, 可得一个重要结论: 本文薄壁复合管水击波速公式和柯莱克水击波速公式仅适用于薄壁复合管, 包括薄壁复合管内衬隧洞。

由于算例2和3中PCCP管分别是我国目前能够生产的最小和最大直径PCCP管, 且衬砌厚度随水压的增加而增加, 导致水击波速随之增大, 所以能够从中得出一个重要结论: PCCP管的水击波速随管径的增大而减小, 取值在945~1184 m/s之间。需要说明的是, 如果考虑预应力环向钢丝的作用, PCCP管的水击波速会略微增加。这与以前经验值800~850 m/s^[20]差别较大。产生这一较大偏差的主要原因是经验值是按薄壁管道水击波速公式(32)计算的, 没有考虑钢筒对水击波速的影响^[21]。

6.4 算例4 管道类型和规格尺寸与算例2相同, 管道铺设在地下, 回填土弹性模量为 5×10^7 Pa。可按管道支撑方式(b)计算水击波速。方法2采用薄壁水击波速公式(60)(61), 当采用方法1、2和3分别计算水击波速时, 可得表7计算结果。

当采用方法1时, 算例2的水击波速为1184 m/s, 而本例为1190 m/s。从中可得结论, 当管道地下铺设时, 受回填土的影响, 管道波速略微增加。

表7 地下铺设管道内壁的弹性系数 K_c 和水击波速 a 计算结果一览

参数	方法1	方法2	方法3
K_c	3.99×10^9	4.68×10^9	4.41×10^9
$a/(m/s)$	1190	1224	1212

7 结论

基于管道水击波速的原始定义,首先建立了描述水击波速与管道过水断面面积的相对膨胀率与管壁周向应变率 $\dot{\xi}_{\theta}$ 的函数关系,然后根据厚壁圆筒应力和应变基本理论,建立了 $\dot{\xi}_{\theta}$ 与管筒结构及力学参数的函数关系基本方程,并推导出单层厚壁管道水击波速计算公式。在此基础上,建立了复合管道层与层间周向应变率相互联系的线性代数方程组,解析得到管道、隧洞、复合管水击波速准确计算的通用公式。然后,针对薄壁复合管,包括隧洞和地下埋管,解析得到薄壁复合管水击波速的近似公式,并与传统的水击波速公式进行了比较。最后通过算例分析,得到下述重要结论:(1)对于含有厚壁层的复合管道,包括衬砌隧洞,应该采用准确计算复合管水击波速的通用公式(45)(48)(12);(2)对于薄壁复合管道,可以根据情况分别采用本文所得式(57)(59)(61)计算水击波速;(3)传统的复合管道水击波速计算公式,包括柯莱克、周文龙和张康等公式均存在不合理的地方,且仅适用于薄壁复合管,包括薄壁复合管内衬隧洞,不适用于含有厚壁层的复合管;(4)PCCP管的水击波速在945~1184 m/s之间,随管径的增大而减小,这与以前经验值800~850 m/s差别较大,主要原因是经验值是按薄壁管道水击波速公式(32)计算的,没有考虑钢管对水击波速的影响;(5)当管道地下铺设时,受回填土(土壤和砂石)的影响,管道波速略微增加,影响较小。需要注意的是,现有复合管道水击波速的确定主要依靠理论公式计算,缺乏原型实测水击波速数据的比较,今后应加强这方面的研究工作。

参 考 文 献:

- [1] 杨开林.长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J].水利学报,2016,47(3):424-435.
- [2] 王玲,王福军,黄靖,等.安装有空气阀的输水管路系统空管充气过程瞬态分析[J].水利学报,2017,48(10):1240-1249.
- [3] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid Transients [M]. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1978.
- [4] CHAUDHRY M H. Applied Hydraulic Transients[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- [5] 克里夫琴科.水电站动力装置中的过渡过程[M].常兆堂,周文通,吴培豪译.北京:水利出版社,1981.
- [6] 杨玲霞,李树慧,侯咏梅,等.水击基本方程的改进[J].水利学报,2007,38(8):948-952.
- [7] YANG K L. A practical method to prevent liquid column separation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(7): 620-623.
- [8] 杨开林.先导式泄压阀水力瞬变的仿真[J].水利学报,2022,53(4):413-420.
- [9] 杨开林.空气阀水力瞬变数学模型[J].水利学报,2023,54(7):775-784.
- [10] 杨开林.控制输水管道瞬态液柱分离的空气阀调压室[J].水利学报,2011,42(7):805-811.
- [11] 杨开林.水击补气式压力罐及水力瞬变仿真[J].水利学报,2024,55(2):137-146,157.
- [12] 杨开林.输水管线空气阀进排气孔径的合理选择[J].水利学报,2024,55(5):537-548,563.
- [13] 吕海艳.流固耦合对水击波速的影响[J].水利科技与经济,2005(16):593-595.
- [14] 郭强,周建旭,黄亚,等.考虑流固耦合的厚壁输水管水锤和振动特性分析[J].农业工程学报,2020,36(27):137-143.
- [15] 周云龙,洪文鹏,孙斌.复合管道气液固三相流浆体水击压强和水击波速计算[J].工程热物理学报,2006(S1):209-212.
- [16] 张奥,孙强,肖童,等.管道水锤波速计算方法研究[J].低温建筑技术,2022,44(17):1-4,21.
- [17] 杨开林.电站与泵站中的水力瞬变及调节[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [18] 徐秉业,刘信声,沈新普.应用弹塑性力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2017.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.预应力钢筒混凝土管:GB/T 19685—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [20] 董茹,王小东,闫朝.水锤波速对长距离加压输水工程停泵断流弥合水锤计算的影响研究[J].榆林学院学报,2021,31(10):16-20.
- [21] 罗东翔,李晓桐.波速对长距离PCCP管道水力过渡过程的影响[J].水利科技与经济,2016,22(6):43-45.

Calculation of water hammer velocity in composite pipelines

YANG Kailin

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The water hammer velocity is a key parameter for calculating pipeline water hammer pressure, and the accurate calculation of water hammer velocity in composite pipes is an urgent scientific problem that needs to be solved. According to the original definition of water hammer wave velocity, the functional relationship between water hammer wave velocity and circumferential strain rate on the inner wall of the pipeline, as well as the functional relationship between circumferential strain rate and circumferential, radial, and axial stress change rates, have been established. On this basis, considering the mutual influence of strain rate, interfacial pressure, pipe mechanical parameters, and structural dimensions of composite pipes, a general formula for accurately calculating the water hammer wave velocity in composite pipes is proposed. Then, by analyzing the factors that affect the general formula, the approximate formulas for the water hammer wave velocity of thin-walled composite pipes are derived, including thin-walled lining tunnels and underground buried pipes. The problems and applicable conditions of the traditional formula for water hammer wave velocity in composite pipes are analyzed. Finally, it is demonstrated through numerical examples that: (1) for composite pipelines with thick wall layers, the general formula for accurately calculating water hammer velocity should be used; (2) The traditional formulas for water hammer velocity in composite pipelines are only applicable to thin-walled composite pipes; (3) The water hammer velocity of PCCP pipes is between 945 and 1184 m/s; (4) When the pipeline is laid underground, the wave velocity in the pipeline slightly increases due to the influence of backfill soil, and the impact is relatively small.

Keywords: composite pipe; water hammer wave velocity; strain rate; thick-wall pipe; thin-wall pipe; tunnel

(责任编辑: 鲁 婧 韩 昆)

(上接第 704 页)

Effects of soil and water conservation of vegetation measures in the middle Yellow River

WENG Baisha, YANG Panpan, YAN Denghua, WANG Hao

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Afforestation, grass planting, and natural restoration are typical soil and water conservation measures (SWCMs) in the middle Yellow River. Analyzing these SWCMs' water and sediment regulating effects is of great significance for understanding the mechanisms of runoff and the future situation of water and sediment in the middle Yellow River. This article analyzed 1165 relevant literature and compiled 1089 datasets containing three indicators: surface runoff modulus, sediment yield modulus, and average infiltration rate. It then conducted a quantitative analysis of the water and sediment regulating effects of these SWCMs, as well as the influence of terrain slope and rainfall intensity on these effects. The results indicate that the effects of soil and water conservation of afforestation and grass planting increased with the increase of vegetation coverage, but decreased with the increase of terrain slope and rainfall intensity, especially when the rainfall intensity was more than 120 mm/h. The effect of soil water storage of natural restoration increased with the increase of restoration years, and the effects of water and sediment reduction were relatively stable when the restoration years are between 30 and 60 years. The effective values of these SWCMs are proposed to provide parameter support for numerical simulation. It is recommended that the vegetation cover of grass planting should be controlled within 60% and afforestation should be controlled within 60%—70%.

Keywords: soil and water conservation measure; soil and water conservation; Meta-analysis; the middle Yellow River

(责任编辑: 王 婧)