

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230321

# 埋地压力钢管镇墩稳定性计算

吴国茂, 崔靛靛, 蔡 平

(遵义市水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 贵州 遵义 563002)

**摘要:** 针对现有研究成果缺少详细分析镇墩稳定性、可滑移长度判别公式存在不足的问题, 在现有计算公式基础上, 优化设置伸缩节情况下管道轴向力公式, 提出了弯管下游轴向力和不设置伸缩节情况下轴向力公式, 分析了设置伸缩节与未设置伸缩节情况下管道轴向推力及各条件下镇墩砼量比较, 得到在一定条件下不设置伸缩节的埋地钢管镇墩砼量最省, 可为今后的研究设计工作提供参考。

**关键词:** 埋地压力钢管; 镇墩; 轴向力; 摩擦力; 内水压力

**中图分类号:** TV314

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)11-0148-04

## 1 引言

水利水电行业中钢管的铺设方式有明管、钢衬管及埋地钢管, 明管及钢衬管的铺设形式已广泛应用于工程实践, 埋地钢管在水利水电行业还是一种新型管道布置和结构型式。埋地管具有结构简单、施工方便、环保经济等特点, 在地质、地形满足要求情况下, 将压力钢管埋于土中, 有效减少内外温差, 增加了管土之间整体摩擦力, 而镇墩可充分利用土的被动土压力作用减少重量, 节省投资。为保持压力管道不致发生滑移、倾覆, 常在管道平面转折处设置镇墩, 以满足转折处的稳定要求。现有研究多集中于压力钢管明管、柔性管道下镇墩方面, 而关于埋地压力钢管对应的镇墩稳定方面的研究较少。对此, 本文通过分析管道轴向受力与镇墩稳定性, 探索现有研究存在的不足, 揭示有无伸缩节埋地钢管轴向推力及镇墩稳定性, 丰富现有研究成果, 充分发挥埋地钢管效益。

## 2 设置伸缩节条件下的镇墩稳定计算

### 2.1 埋地钢管受力情况

埋地钢管在受到管顶土压力作用的同时, 当受到内水压力、温差应力的作用会产生轴向变形, 而受到土压力的挤压产生管土摩擦力作用减弱了管道相对滑移。当直管段达到一定长度时总摩擦力大于轴向力时阻止管道整体滑移, 此时在管道转弯处可不设镇墩, 但直管段的长度不足以阻止

管道滑移时, 需设置镇墩阻止管道滑移, 设置镇墩除了受到管道转弯处动水压力和轴向应力外, 还受到上下游管道轴力, 对设置镇墩轴力情况应进行深入分析。

### 2.2 现有埋地钢管可滑移长度 $L_{c2}$ 计算

为了公式表达与规范<sup>[1]</sup>统一, 设上游段管道伸缩节至弯管处长度为  $L$ , 管道可滑移长度  $L_{c2}$  (伸缩节处为起端), 单位长度摩擦力为  $F_{fk}$ , 钢管单位长度自重沿轴线分力  $F_1$ , 钢管转弯处水压力轴向推力  $F_2$ , 管道变径推力  $F_3$ , 伸缩节端部推力  $F_{4-1}$ , 伸缩节止水填料摩擦力  $F_{4-2}$ , 阀门或闷头轴力  $F_5$ 、弯管离心力  $F_6$ , 镇墩一侧受到轴向推力  $T_i$ , 针对现有公式当  $L \leq L_{c2}$  时, 管段全段滑移, 推力  $T_i = F_1 L + F_2$  (或  $F_5$ ) +  $F_3 + F_{4-1} \pm F_{4-2} + F_6 - F_{fk} L$  (式 A);  $L > L_{c2}$  时, 管段部分滑移, 有  $T_i = F_2 + F_6 - (\pm \alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{0p}) A_s$  (式 B); 当  $L = L_{c2}$  时, 式 A 等同于式 B, 即得到规范<sup>[1]</sup>修正公式为:

$$L_{c2} = \frac{1}{F_{fk} - F_1} [(\pm \alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{0p}) A_s + F_3 + F_{4-1} \pm F_{4-2} + F_5] \quad (1)$$

式中, 第一个“±”表示温度应力温升取“-”, 温降取“+”; 第二个“±”表示当  $(-\nu_s \sigma_{0p} + \alpha_s E_s \Delta T_s) \leq 0$  时,  $F_{4-2}$  为“+”,  $(\pm \nu_s \sigma_{0p} + \alpha_s E_s \Delta T_s) > 0$  时,  $F_{4-2}$  为“-”。

为反映式(1)趋势, 设不考虑直径变化推力  $F_3$ 、阀门或闷头轴力  $F_5$  的作用下, 埋地土重度  $\gamma_{so} = 18 \text{ kN/m}^3$ , 管顶埋土厚度  $H_{so} = 2 \text{ m}$ , 管土摩

收稿日期: 2023-03-06, 修回日期: 2023-04-21

作者简介: 吴国茂(1987-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水利水电工程, E-mail: 379433184@qq.com

擦系数  $\mu_s = 0.25$ , 钢管与水平面夹角  $\beta = 10^\circ$ , 温差  $\Delta T_s = 15^\circ\text{C}$ , 伸缩节止水填料沿管轴向长度  $b_p = 0.2\text{ m}$ , 伸缩节止水材料与钢管摩擦系数  $\mu_1 = 0.3$ , 其他参数及部分力见表 1。管道可滑移距离  $L_{c2}$  与水头  $H$  关系见图 1。

表 1 管道参数

Tab. 1 Pipes parameters

管径 $D/\text{m}$	壁厚 $\text{mm}$	断面 面积 $A_s/\text{mm}^2$	伸缩节 内径 $d_4$ $/\text{m}$	流量	单位	单位自重	温度
					$F_{fk}$	沿管轴线 分力 $F_1$	$\alpha_s E_s \Delta T_s$
1	12	37 699	0.94	1.18	24.99	0.51	37.08
2	16	100 531	1.94	4.72	61.30	1.37	
3	22	207 345	2.94	10.60	110.10	2.83	

注:流量单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ ; 摩擦力  $F_{fk}$ , 自重沿管轴线分力  $F_1$  单位均为  $\text{kN}/\text{m}$ ; 温度应力单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

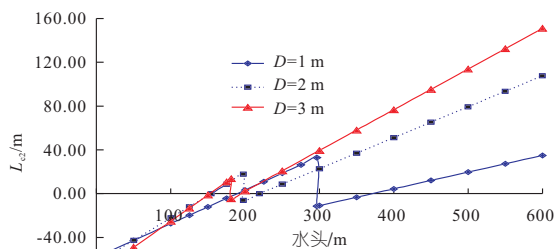


图 1 不同管径下管道可滑移距离  $L_{c2}$  与水头  $H$  关系  
Fig. 1 The relationship between slip distance  $L_{c2}$  and water head  $H$  in different pipe diameteris

由图 1 可知,  $L_{c2}$  与水头  $H$  呈线性关系; 由于式(1)存在两次  $L_{c2} = 0$ , 且  $L_{c2} = 0$  区间段存在突变, 选取表 1 中直径  $D = 2\text{ m}$  的应力见表 2。由表 2 可知, 在  $H = 154.30, 219.11\text{ m}$  处出现两次  $L_{c2} = 0$ , 在  $H = 197.76\text{ m}$  处  $L_{c2}$  突变由正变为负且无过渡, 产生原因是伸缩节摩擦力  $F_{4-2}$  突变由正变为负。在  $H = 154.30 \sim 219.11\text{ m}$  段, 此时摩擦力  $F_{fk} + F_{4-2}$  应为平均静摩擦力, 受力随轴向力变化而变化, 此时  $L_{c2} = 0$ , 其他内水压力下,  $F_{fk} + F_{4-2}$  为滑动摩擦力。

表 2 两次  $L_{c2} = 0$  段应力数值

Tab. 2 Stress of  $L_{c2} = 0$  for two times

参数	不同 $H(\text{m})$ 下的应力			
	154.3	197.76	197.77	219.11
$-\alpha_s E_s \Delta T_s / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	-37.08	-37.08	-37.08	-37.08
$\nu_s \sigma_{0p} / \text{N}$	28.93	37.08	37.08	41.08
$(-\nu_s \sigma_{0p} + \alpha_s E_s \Delta T_s) A_s / \text{kN}$	-819.20	0	0	402.44
$F_{4-1} / \text{kN}$	270.37	351.06	351.08	390.70
$F_{4-2} / \text{kN}$	548.97	712.81	-712.84	-793.14
$L_{c2} / \text{m}$	0	17.75	-6.04	0

因此将  $F_{fk} + F_{4-2}$  分为滑动摩擦力和平均静摩擦力: 当伸缩节距镇墩距离  $L$  全管段滑动时,  $F_{fk} + F_{4-2}$  为滑动摩擦力, 沿管道滑动方向需根据受力情况判断; 当为平均静摩擦力时, 伸缩节距镇

墩全段或管中某处距镇墩不滑动, 对此问题进一步优化轴向推力。

### 2.3 上、下游段钢管对镇墩轴向推力 $T_i, T'_i$ 优化

设管道轴向力  $F_i = \pm F_1 L \pm F_3 + F_{4-1} + (\pm \alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{0p}) A_s$ , 滑动摩擦力  $F_k = F_{4-2} + F_{fk} L, T_0 = -(\pm \alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{0p}) A_s$ , 其中“ $\pm$ ”表示上游侧为“ $+$ ”, 下游侧为“ $-$ ”, 温升为“ $-$ ”, 温降为“ $+$ ”。

#### 2.3.1 温升分析

(1) 当  $F_i \geq F_k$  时, 镇墩轴向力  $T_i = F_i - F_k + F_2 + F_6 + T_0$ , 化简为:

$$T_i = \pm F_1 L + F_2 \pm F_3 + F_{4-1} + F_6 - F_{4-2} - F_{fk} L \quad (2)$$

各受力分布见图 2。

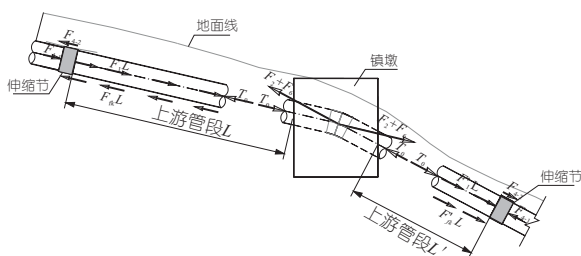


图 2 管道正向轴向合力大于滑动摩擦力

Fig. 2 The forward axial force of the pipeline is greater than the sliding friction force

(2) 当  $-F_k < F_i < F_k$ , 轴向力  $F_k$  不足以让管道整体滑动, 此时伸缩节止水填料摩擦力与管土摩擦力为静摩擦力, 或伸缩节止水填料摩擦力为滑动摩擦力而管土摩擦力为平均静摩擦力, 管道轴向力与平均静摩擦力抵消, 此时轴向力  $T_i = F_2 + F_6 + T_0$ , 化简为:

$$T_i = F_2 + F_6 - (-\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{0p}) A_s \quad (3)$$

(3) 当  $F_i < -F_k$  时, 温升带来的轴向力大于上游正向轴向力与正向摩擦力之和, 由于伸缩节的适应性, 会对温度应力产生的轴向力进行释放, 最终温度应力等于正向轴向力与正向摩擦力之和, 出现此种现象的原因有温差大、水头低、埋深浅、摩擦力小及管段短, 此时轴向力  $T_i = F_i + F_k + F_2 + F_6 + T_0$ , 化简为:

$$T_i = \pm F_1 L + F_2 \pm F_3 + F_{4-1} + F_{4-2} + F_6 + F_{fk} L \quad (4)$$

其受力关系见图 3。

对于下游管道, 通过分析得到判别方式与轴向推力  $T'_i$  同上游管道, 此时长度  $L'$  为下游镇墩至伸缩节处的距离,  $F_1$  变为负值, 若有  $F_3$  时变为负值。

#### 2.3.2 温降分析

当  $F_i \geq F_k$  时, 镇墩受到轴向力为:

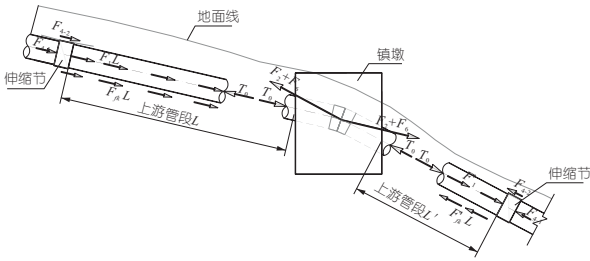


图 3 管道反向轴向合力大于滑动摩擦力

Fig. 3 The reverse axial force of the pipeline is greater than the sliding friction force

$$T_i = \pm F_1 L + F_2 \pm F_3 + F_{4-1} + F_6 - F_{4-2} - F_{fk} L \quad (5)$$

当  $-F_k < F_i < F_k$  时(一般不存在  $F_i \leq -F_k$ ),此时  $F_{4-2}$ 、 $F_{fk}$  为平均静摩擦力,管道轴向力与静摩擦力抵消,镇墩受到轴向力为:

$$T_i = F_2 + F_6 - (\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s \quad (6)$$

2.3.3 公式汇总

对公式进行汇总,见表 3。

表 3 镇墩上、下游侧轴向推力公式汇总表

Tab. 3 Summary table of anchor block for upper and downstream axial force formulas

名称/参数	升温	降温
$F_i \geq F_k$	$T_i = \pm F_1 L + F_2 \pm F_3 + F_{4-1} + F_6 - F_{4-2} - F_{fk} L$	$T_i = \pm F_1 L + F_2 \pm F_3 + F_{4-1} + F_6 - F_{4-2} - F_{fk} L$
$-F_k < F_i < F_k$	$T_i = F_2 + F_6 - (\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s$	$T_i = F_2 + F_6 - (\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s$
$F_i \leq -F_k$	$T_i = \pm F_1 L + F_2 \pm F_3 + F_{4-1} + F_6 + F_{4-2} + F_{fk} L$	$T_i = F_2 + F_6 - (\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s$

注:“±”表示上游侧为“+”,下游侧为“-”。

2.4 镇墩受力分析

采用表 3 中公式对不同水压情况下的镇墩进行受力分析,选取表 1 中  $D=2$  m 管径进行分析,上游管段  $\beta$  取  $0^\circ$ ,下游管段  $\beta$  取  $30^\circ$ ,上游伸缩节至镇墩管段长  $L=50$  m,镇墩至下游伸缩节管段长  $L'=10, 30, 50, 70$  m 进行对比分析。

2.4.1 上下游管道轴向推力计算值

通过分析得到,当下游管道长度  $L' \leq L$  时,低水头下  $T_i > T'_i$ ,高水头下  $T_i < T'_i$ ,当随着下游管段  $L'$  逐渐增大到  $L$ ,轴向力差距越来越小,相等段越来越长;当  $L' > L$  时,得到相反结论,具体轴向力见图 4。

2.4.2 镇墩稳定计算分析

在保证抗倾滑系数  $K=1.5$  且竖向合力  $N \geq 0$  kN,主被动土压力设置定值,分析得到下游管段长度  $L'$  对镇墩砼量影响较大,当  $L'$  越小低水头下砼方量越大,而高水头下砼方量越小,且无明显线性规律,呈锯齿形; $L'$  的增加由锯齿形趋向线性,后转变为低水头下镇墩砼量越来越小,高水

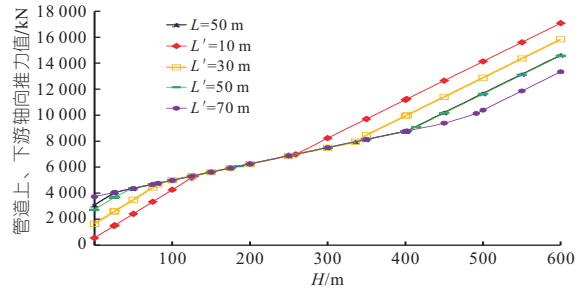


图 4 管径  $D=2$  m 下不同水头上、下游侧轴向推力  
Fig. 4 Upstream and downstream axial thrust of pipe diameter 2 m under different head conditions

头下镇墩砼量越来越大,具体砼量见图 5。从整体分析来看,埋地压力钢管上、下游伸缩节设置的位置很重要,如上游  $L$  较长,轴向力在较低水头下温度应力受到管土摩擦力的作用不能完全释放,轴向力大,而下游  $L'$  较短时,温度应力得到释放,轴向力小,最终不平衡推力较大,对应镇墩砼量增加。

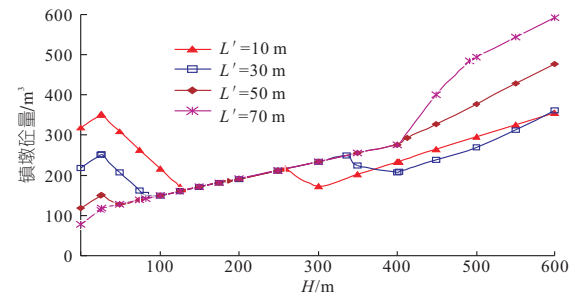


图 5 管径  $D=2$  m 下不同水头镇墩砼方量

Fig. 5 The concrete square quantity of 2 m pipe diameter under different water heads

因此,在设计中为避免此现象的发生,下游管道长度比  $L'/L=0.6 \sim 1.0$  之间较宜,设计水头低时比值取高值,设计水头高时取低值;当  $L'/L < 0.6$  时,需注意低水头下的镇墩稳定。此外,若能满足不设镇墩的最小管段长度时,不设置构造镇墩为宜,让温度应力在弯管处的变形得到部分释放。

3 不设置伸缩节条件下的镇墩稳定计算

3.1 上、下游段钢管对镇墩轴向推力  $T_i$ 、 $T'_i$  计算

管道上下游均设置镇墩情况下,管段则根据上下游镇墩受力平分的原则,管道摩擦力可能为正或负,设  $L$  为镇墩之间管道长度, $L_1$  为上游管段镇墩至受力平分处管道长度,有  $F_1 L_1 \pm F_{fk} L + F_3 = -F_1 (L - L_1) \pm F_{fk} (L - L_1)$ ,得到:

$$L_1 = \left(1 \pm \frac{F_1}{F_{fk}}\right) \frac{L}{2} - \frac{F_3}{2F_{fk}} \quad (7)$$

当  $F_1 L_1 + (\pm \alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s + F_3 < 0$

时“±”取“-”, $F_1L_1 + (\pm\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s + F_3 \geq 0$  时“±”取“+”;求下游管道  $L_1$  利用式(7)时运算符号正好相反。在无管道直径变化推力  $F_3$  的作用时,多数情况下  $F_1/F_{fk} \leq 0.1$ , 即  $L_1$  可近似取  $L/2$ 。

由于未设置伸缩节,即无伸缩节作用力  $F_4$ , 但温度变化和泊松效应引起的轴力得不到释放,即一直存在  $(\pm\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s$ 。当  $F_1L + F_3 < F_{fk}L$  时,此时  $F_{fk}L$  为平均静摩擦力,轴向推力不考虑  $F_1L$ 、 $F_3$  的作用;当  $F_1L + F_3 \geq F_{fk}L$  时,此时  $F_{fk}L$  不足以抵抗  $F_1L + F_3$  的作用,此时  $F_{fk}L$  为滑动摩擦力,需考虑  $F_1L + F_3$  的剩余下滑力。得到表 4 计算公式。

表 4 公式汇总表

Tab. 4 Summary table of formulas

名称/参数	管道轴向力计算公式
$F_1L + F_3 \geq F_{fk}L$	$T_i = F_2 + F_6 - (\pm\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s \pm (F_1L_1 + F_3 - F_{fk}L_1)$
$F_1L + F_3 < F_{fk}L$	$T_i = F_2 + F_6 - (\pm\alpha_s E_s \Delta T_s + \nu_s \sigma_{op}) A_s$

注:第一个“±”温升为负,温降为正;第二个“±”上游管道为正,下游管道为负。

整体来说,不设置伸缩节的埋地钢管,减少了伸缩节的力,能有效减少管道沿程作用力,但不能耗散温度变化和泊松效应引起的轴力。

以 2 m 管径为例,其他参数条件见表 1,有  $F_1L + F_3 < F_{fk}L$ ,采用表 4 中对应公式,得到有无伸缩情况下镇墩砼方量见图 6,整体为线性关系,而设置伸缩节后计算较为复杂。

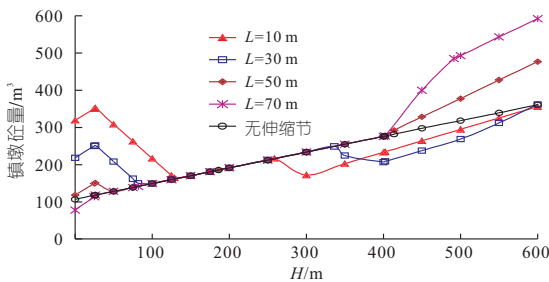


图 6 不同水头下有无伸缩节的镇墩砼量比较

Fig. 6 Comparison of concrete quantity in anchor block with and without expansion joints

### 3.2 与明钢管镇墩稳定计算比较

通过规范<sup>[1]</sup>计算明管轴向力与无伸缩节下的埋地管轴向力相应镇墩砼量见图 7。可以看出,低水头时埋地管镇墩砼量可能较明管大,但总体上来看,埋地管的镇墩砼量小。

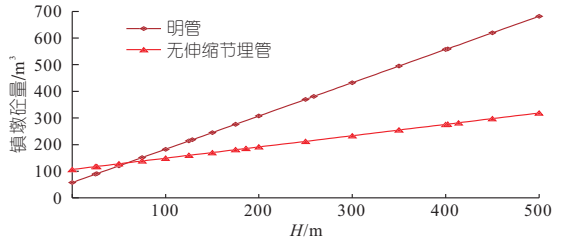


图 7 不同水头下明管与埋地管镇墩砼量比较

Fig. 7 Comparison of concrete quantity of anchor block in open pipe and buried pipe under different water heads

## 4 结论

a. 针对钢管现有公式可滑移长度出现两次为零的情况,将钢管与土、伸缩节之间的摩擦力分为滑动摩擦力和平均静摩擦力,通过受力平衡分析论证,得到了温升、温降下轴向推力计算公式,修订了现有计算公式,弥补了下游轴向推力计算公式。

b. 在管道不设置伸缩节而上下游设置镇墩的情况下,通过受力平衡分析,得到了温升、温降下镇墩轴向推力计算公式。

c. 分别对设置伸缩节钢管、未设置伸缩节钢管及明钢管的镇墩稳定进行计算。在满足地质、地形条件的情况下埋地管一般不设置伸缩节,若设置钢管伸缩节时,伸缩节设置位置是关键,需根据水头、上下游管道的长度合理设置,尽量避免上下游管道长度相差太大,计算时需注意低水头镇墩稳定;整体来说在满足抗倾抗滑要求的情况下,埋地压力钢管的镇墩砼方量最省,在满足地质、地形条件下,可优先考虑埋地压力管道。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程压力钢管设计规范:SL/T281-2020 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

## Stability Calculation on Anchor Block of Buried Penstock

WU Guo-mao, CUI Liang-liang, CAI Ping

(Zunyi Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower Co., Ltd., Zunyi 563002, China)

**Abstract:** Currently, the researchers have not yet conducted a detailed analysis of the anchor block stability and there exist shortcomings in the discriminatory formula for the slip length. On the basis of the existing computational formulas, the axial force formula for the pipeline was optimized considering expansion joints, and the axial force formula was proposed for downstream elbow pipe without considering the expansion joints. Furthermore, by analyzing axial thrust on pipelines in the context of considering or not considering the expansion joints and comparing the concrete amount of the anchor block under all conditions, the anchor block of the buried steel pipe was found to have the minimum amount of concrete used in the context of not considering the expansion joints and under certain condition, which can provide a reference for future research and design work.

**Key words:** buried penstock; anchor block; axial force; friction force; internal water pressure