

DOI: 10.11779/CJGE20230650

纵向槽钢和轴力共同作用的盾构隧道等效刚度解析解

江学辉^{1,2}, 颜建伟¹, 罗文俊^{*1}, 刘天宇¹, 徐长节¹

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 江西外语外贸职业学院国际工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 为准确快速地预测纵向槽钢加固技术对盾构隧道等效刚度的影响, 开展了纵向槽钢加固技术的理论研究。解析地提出了纵向槽钢和纵向轴力耦合作用的盾构隧道等效刚度理论解, 并与经典理论、模型试验和数值模拟对比验证了本方法的可靠性。结果表明盾构隧道的中性轴 ϕ 随槽钢、纵向轴压力的增加而减小, 其大小直接改变了隧道管片间的接触状态, 从而影响了隧道的等效刚度; 盾构隧道的等效刚度与纵向轴压力呈 S 曲线正相关, 与弯矩呈非线性反相关, 与隧道管片宽度、槽钢截面面积、数量、弹性模量呈线性正比关系; 盾构隧道的等效刚度贡献大小顺序依次为纵向槽钢数量、截面面积、弹性模量。从理论上诠释了纵向槽钢等敏感性参数对隧道等效刚度的影响机理, 可准确快速地预测纵向槽钢加固效果。

关键词: 纵向槽钢; 纵向轴力; 解析解; 盾构隧道; 等效刚度

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2166-08

作者简介: 江学辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 隧道理论及加固技术研究。E-mail: jiangxh2020@126.com。

Analytical solution for equivalent stiffness of shield tunnels under combined action of longitudinal channel steel and axial force

JIANG Xuehui^{1,2}, YAN Jianwei¹, LUO Wenjun¹, LIU Tianyu¹, XU Changjie¹

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Department of International Engineering, Jiangxi College of Foreign Studies, Nanchang 330099, China)

Abstract: To accurately and quickly predict the effects of longitudinal channel steel reinforcement technology on the equivalent stiffness of a shield tunnel, the theoretical researches are conducted on the longitudinal channel steel reinforcement technology. A new analytical solution is proposed for the equivalent bending stiffness of the shield tunnel under the combined action of longitudinal channel steel and axial force. The solution can be degenerated into a special case without longitudinal channel steel, and it is validated those the classical theory, model tests and numerical simulation. The results show that the neutral axial ϕ of the shield tunnel decreases with the increasing longitudinal channel steel and longitudinal axial force, directly affecting the contact state between tunnel segments, which will impact the equivalent stiffness of the shield tunnel. The equivalent stiffness of the shield tunnel increases nonlinearly in an S-curve with the longitudinal axial force and decreases with the increasing bending moment, which is directly proportional to the width of tunnel segment, the number, elastic modulus and sectional area of channel steel. The influential order on the equivalent stiffness of the shield tunnel is the number, sectional area and elastic modulus of longitudinal channel steel. The influence mechanism of sensitivity parameters of longitudinal channel steel on the equivalent stiffness of tunnels is theoretically explained, which enables accurate and quick prediction of the reinforcement effects of longitudinal channel steel.

Key words: longitudinal channel steel; longitudinal axial force; analytical solution; shield tunnel; equivalent stiffness

0 引言

伴随着公共安全要求的日益提升, 对既有盾构隧道结构与列车运营安全的影响扰动控制将愈加严格。当新建盾构隧道穿越既有隧道时, 不可避免地引起荷载的变化, 从而导致既有隧道结构变形过大等灾害问

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(52225210); 国家自然科学基金项目(51978265); 江西省防灾减灾及应急管理重点实验室项目(20212BCD42011)

收稿日期: 2023-07-11

*通信作者(E-mail: lwj06051979@163.com)

题, 工程界把提高既有隧道等效刚度作为一种防止既有隧道产生过大变形的常用方法之一^[1]。纵向槽钢加固隧道方法能在受限空间中有效提高隧道等效刚度且施工简单方便, 因而作为一种常用的隧道加固技术^[2]。因此, 准确快速地预测纵向槽钢加固技术对盾构隧道等效刚度的影响成为槽钢加固隧道亟待解决的问题。

盾构隧道由隧道管片与螺栓连接而成, 因此会在隧道管片之间形成管片接缝。管片与管片间的接缝面及千斤顶产生的纵向预压力均会对盾构隧道的等效刚度有显著影响^[3-4]。廖少明等^[5]通过对钱江隧道纵向应力进行多年的现场实测试验, 试验表明: 隧道纵向压应力随时间而发生变化, 一般经历剧烈波动、动态稳定、逐渐衰减和稳定 4 个阶段, 其值最终可保留 30% 的初始顶推力。耿萍等^[6-7]、王祖贤等^[8]建立考虑轴力和弯矩的隧道纵向等效刚度计算模型, 研究表明纵向轴向力对盾构隧道刚度有显著的影响, 轴向压力越大, 隧道等效刚度有效率越大。黄大维等^[9]、Li 等^[10]开展了考虑轴力和弯矩共同作用的隧道等效刚度模型试验, 试验表明在纵向轴力作用下盾构隧道的等效刚度非常数, 其与轴向压力呈非线性正相关关系。现有研究已证实, 盾构隧道确实存在纵向轴压力, 且轴向压力对隧道等效刚度有显著的影响, 因此, 研究盾构隧道的等效刚度需考虑纵向轴力 N 和接缝面的影响。

目前, 对既有隧道变形控制技术一般从以下 3 方面进行加固, 从控制扰动源 (土体加固)^[11-13]、切断扰动传递路径 (隔离技术)^[14-16]及加强既有隧道结构刚度^[2, 17-19]3 方面着手。土体加固和隔离技术因施工周期长、成本较高、影响列车运行等因素, 其与纵向槽钢技术相比, 纵向槽钢技术既可有效提高隧道等效刚度又不影响列车运营, 且施工简单方便和费用相对较低等优点, 因此在加固既有隧道工程中得到广泛应用^[2, 19]。唐永锋^[2]对纵向槽钢加固隧道进行了模型试验, 研究表明纵向槽钢可以明显提高盾构隧道等效刚度和减小隧道沉降变形。由于联络通道施工诱发水土流失而导致已建隧道纵向沉降变形过大等病害问题, 在施工现场采用了纵向槽钢加固盾构隧道技术, 解决了该隧道纵向沉降变形过大等病害问题^[19]。

综上所述, 目前学术界主要基于盾构隧道模型试验来研究纵向槽钢对盾构隧道的影响, 每次为评估纵向槽钢加固效果需开展条件复杂、成本高、耗时的隧道模型试验, 而理论研究可快速评估纵向槽钢对盾构隧道的影响, 但现阶段未见考虑纵向槽钢作用下的隧道等效刚度理论研究。因此, 从理论上研究纵向槽钢

对盾构隧道等效刚度的影响具有重大意义。

据此, 本文在管片接缝处建立纵向轴力 N 和纵向槽钢的应变-应力耦合计算模型, 从而推导出纵向槽钢和轴力 N 的盾构隧道等效刚度解析解, 其次, 将本文解析解退化为无纵向槽钢的特殊解与经典理论、模型试验和数值模拟对比验证, 以验证本文解的可靠性; 最后, 基于已验证的解, 对纵向槽钢和轴力 N 作用下的隧道等效刚度进行敏感性参数分析, 以揭示槽钢对隧道等效刚度的影响机制。

1 等效刚度解析解

1.1 模型基本假定

由于盾构隧道管片间存在接缝且接缝对隧道的等效刚度有显著影响, 因此, 本文建立纵向轴力 N 和槽钢联合作用的应变-应力耦合计算模型且考虑盾构隧道接缝的影响。为计算方便, 作如下假设:

(1) 盾构隧道横截面假设为圆形平面, 圆形平面上各点的应力应变与该点至隧道的中性轴垂直距离呈线性正相关性。

(2) 纵向槽钢一般在注浆孔中通过螺栓连接管片 (形成固定连接), 如图 1 所示, 因此假设槽钢与管片满足变形协调条件。

(3) 纵向螺栓应力及应变服从线性变化。

(4) 螺栓总体刚度假设为沿管片中心线分布均匀的线刚度 k_t ^[20], 槽钢抗拉总体刚度假设为均匀分布的线刚度 g , 如图 1 所示。

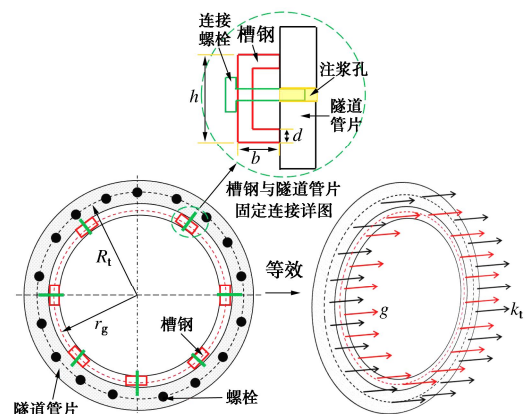


图 1 等效线刚度及槽钢连接示意图

Fig. 1 Diagram of equivalent linear stiffness and connection of channel steel

1.2 纵向刚度解析解的推导

对盾构隧道接缝处的应力-应变进行耦合分析, 如图 2 所示。在盾构隧道接缝处分别建立纵向槽钢作用下的应力平衡和应变变形协调方程, 具体如下所示:

$$\begin{aligned}
& 2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} E_t t \frac{\varepsilon_{tc}}{R_t - R_l \sin \varphi} (R_l \sin \alpha - R_l \sin \varphi) \cdot R_l d\alpha + \\
& 2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \frac{g \cdot \varepsilon_{gc} \cdot l_t}{r_g - r_g \sin \varphi} (r_g \sin \alpha - r_g \sin \varphi) \cdot r_g d\alpha - \\
& 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} E_t t \frac{\varepsilon_{tc}}{R_t + R_l \sin \varphi} (R_l \sin \varphi - R_l \sin \alpha) \cdot R_l d\alpha - \\
& 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \frac{g \cdot \varepsilon_{gc} \cdot l_t}{r_g + r_g \sin \varphi} (r_g \sin \varphi - r_g \sin \alpha) \cdot r_g d\alpha = N, \quad (1) \\
& 2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} E_t t \frac{\varepsilon_{tc}}{R_t - R_l \sin \varphi} (R_l \sin \alpha - R_l \sin \varphi)^2 \cdot R_l d\alpha + \\
& 2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \frac{g \cdot \varepsilon_{gc} \cdot l_t}{r_g - r_g \sin \varphi} (r_g \sin \alpha - r_g \sin \varphi)^2 \cdot r_g d\alpha + \\
& 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} E_t t \frac{\varepsilon_{tc}}{R_t + R_l \sin \varphi} (R_l \sin \varphi - R_l \sin \alpha)^2 \cdot R_l d\alpha + \\
& 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \frac{g \cdot \varepsilon_{gc} \cdot l_t}{r_g + r_g \sin \varphi} (r_g \sin \varphi - r_g \sin \alpha)^2 \cdot r_g d\alpha = M - N R_l \sin \varphi, \quad (2) \\
& r_g = R_t - \frac{b}{2} - \frac{t}{2}. \quad (3)
\end{aligned}$$

式中: ε_{tc} 为混凝土的拉应变; ε_{tc} 为混凝土的压应变; ε_{gt} 为槽钢的拉应变; ε_{gc} 为槽钢的压应变; θ 为管片的旋转角度; l_t 为管片的宽度; t 为管片的厚度; R_t 为指隧道半径; b 为纵向槽钢的厚度; r_g 为槽钢至隧道圆心的距离; E_t 为混凝土的弹性模量; φ 为隧道的中性轴与中心水平线夹角, 如图 2 所示; ε_b 为纵向螺栓的拉应变; l_b 为纵向螺栓的长度。

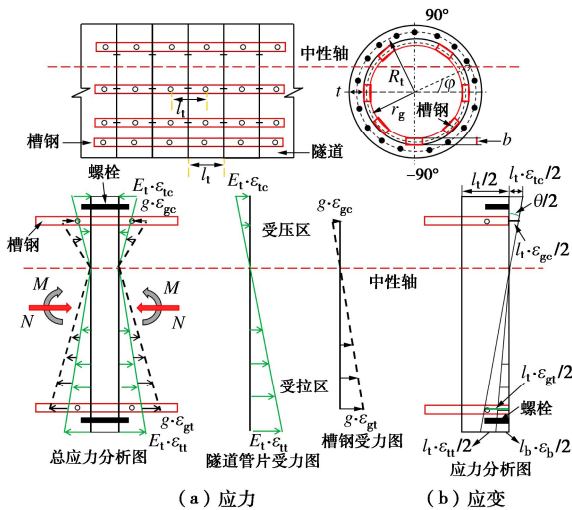


图 2 应力-应变计算模型

Fig. 2 Computational model for stress-strain

纵向螺栓线刚度 k_t 计算方程式如下所示:

$$k_t = \frac{n \cdot E_b \cdot \pi \cdot R_b^2}{2\pi R_l l_b}. \quad (4)$$

式中: k_t 为纵向螺栓线性刚度; n 为纵向螺栓的数量; R_b 为纵向螺栓的半径; E_b 为纵向螺栓的弹性模量。

槽钢线刚度 g 计算方程式如下所示:

$$g = \frac{n_g \cdot E_{cg} A_g}{2\pi r_g l_t}. \quad (5)$$

式中: g 为槽钢线性刚度; n_g 为槽钢数量; A_g 为槽钢的横截面积; E_{cg} 为槽钢的弹性模量。

在隧道管片受拉区建立混凝土拉力与纵向螺栓拉力的平衡方程:

$$\begin{aligned}
& 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} E_t t \frac{\varepsilon_{tc}}{R_t + R_l \sin \varphi} (R_l \sin \varphi - R_l \sin \alpha) R_l d\alpha \\
& = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \frac{l_b \varepsilon_b \cdot k_t}{R_t + R_l \sin \varphi} (R_l \sin \varphi - R_l \sin \alpha) R_l d\alpha. \quad (6)
\end{aligned}$$

建立螺栓应变与混凝土应变的平衡方程如下 (图 2 所示):

$$\frac{l_b \varepsilon_b}{2} + \frac{\varepsilon_{tc} \cdot l_t}{2} = \frac{\theta}{2} (R_t + R_l \sin \varphi), \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon_{tc} \cdot l_t}{2} = \frac{\theta}{2} (R_t - R_l \sin \varphi). \quad (8)$$

隧道管片的拉应变与压应变的之间的方程式可通过联立方程 (6) ~ (8) 求解, 具体如下:

$$\varepsilon_{tc} = \frac{\varepsilon_{tc} l_t k_t (1 + \sin \varphi)}{(E_t l_t + k_t) (1 - \sin \varphi)}. \quad (9)$$

弯曲转角 θ 可由方程 (8) 变换求解:

$$\theta = \frac{\varepsilon_{tc} \cdot l_t}{R_t - R_l \sin \varphi}. \quad (10)$$

基于相似定理, 建立隧道管片压应变和槽钢拉压应变之间的表达式, 如图 2 所示, 为方便及简化计算且考虑槽钢厚度较小的原因, 作以下近似处理, 具体如下:

$$\frac{\varepsilon_{gc}}{\varepsilon_{tc}} = \frac{r_g - R_l \sin \varphi}{R_t - R_l \sin \varphi} \approx \frac{r_g - r_g \sin \varphi}{R_t - R_l \sin \varphi} = \frac{r_g}{R_t} = \alpha, \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_{gt}}{\varepsilon_{tc}} = \frac{r_g + R_l \sin \varphi}{R_t - R_l \sin \varphi} \approx \frac{r_g + r_g \sin \varphi}{R_t - R_l \sin \varphi} = \alpha \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (12)$$

式中: α 为槽钢半径 r_g 与隧道半径 R_t 之比, 如图 2 所示。

基于隧道的等效刚度理论, 建立纵向轴力 N 及槽钢的隧道等效刚度的表达式:

$$(EI)_{eq} = \frac{M l_t}{\theta}. \quad (13)$$

弯矩 M 的方程式 (14) 可通过联立方程 (1), (2), (9), (11), (12) 求解:

$$M = E_t t \frac{\varepsilon_{tc} R_t^2}{1 - \sin \varphi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) - \cos \varphi \sin \varphi \right] +$$

表 1 隧道设计参数^[10]
Table 1 Design parameters of tunnel^[10]

原型隧道								模型隧道							
R	t	n	l_t	E_t	E_b	l_b	R_b	R	t	n	l_t	E_t	E_b	l_b	R_b
3.1	350	17	1.0	34.5	206	400	15	200	23	6	65	2.06	2.41	34	8
m	mm		m	GPa	GPa	mm	mm	mm	mm		mm	GPa	GPa	mm	mm

$$E_t t \frac{\varepsilon_{tc} R_t^2 \cdot l_t \cdot k_t}{(1 - \sin \varphi) \cdot (E_t t + l_t \cdot k_t)} \left[\left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) + \sin \varphi \cos \varphi \right] +$$
$$\frac{\alpha \cdot g \cdot \varepsilon_{tc} \cdot r_g \cdot l_t}{1 - \sin \varphi} \left[\pi \cdot r_g + (2\pi \cdot r_g - 2\pi \cdot R_t) \cdot \sin^2 \varphi \right] \quad (14)$$

隧道的等效刚度方程式可通过联立方程 (10), (13), (14) 求解:

$$(EI)_{eq} = E_t \cdot t \cdot R_t^3 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \cos \varphi \sin \varphi \right) + \right.$$
$$\frac{l_t \cdot k_t}{E_t t + l_t \cdot k_t} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi + \sin \varphi \cos \varphi \right) +$$
$$\left. \frac{\alpha \cdot g \cdot r_g \cdot l_t}{E_t \cdot t \cdot R_t^2} \cdot (\pi \cdot r_g + 2\pi \cdot r_g \cdot \sin^2 \varphi - 2\pi \cdot R_t \cdot \sin^2 \varphi) \right] \quad (15)$$

隧道的等效刚度有效率方程式如下:

$$\eta = \frac{(EI)_{eq}}{E_t I_c} = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \cos \varphi \sin \varphi \right) + \right.$$
$$\frac{l_t \cdot k_t}{E_t t + l_t \cdot k_t} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi + \sin \varphi \cos \varphi \right) +$$
$$\left. \frac{\alpha \cdot g \cdot r_g \cdot l_t}{E_t \cdot t \cdot R_t^2} \cdot (\pi \cdot r_g + 2\pi \cdot r_g \cdot \sin^2 \varphi - 2\pi \cdot R_t \cdot \sin^2 \varphi) \right] \quad (16)$$

式中: I_c 为无缝的均质盾构隧道惯性矩, 其中 $I_c = \pi \cdot t \cdot R_t^3$ (或 $I_c = \frac{\pi(R^4 - (R-t)^4)}{4}$)。

2 可确性分析

为了验证计算模型的可靠性, 将本文理论计算结果分别与经典理论计算结果、模型试验结果和数值模拟结果进行对比验证。

2.1 与经典理论和模型试验结果的对比

将本文的理论解退化无纵向槽钢 (即 $g = 0$) 的理论计算结果分别与经典 Yukio 理论计算结果和盾构隧道模型试验结果^[10]进行对比验证。本文计算参数根据 Li 等^[10]的计算参数取值 (如表 1 所示), 为了对比结果的一致性且引入了荷载归一化参数 ξ ($\xi = NR_t/(2M)$)^[10], 后将本文计算结果与 Li 等^[10]的盾构模型试验结果 (如图 3 所示) 和经典刚度理论计算结果 (即 $N = 0$ MN 的计算结果, 如图中 3 的计算误差表所示) 进行对比。

图 3 可知, 本文退化无纵向槽钢的理论计算曲线

与 Li 等^[10]的盾构隧道模型试验计算曲线一致, 且本文退化无纵向轴力的计算结果 (即 $N = 0$ MN 的计算结果) 与 Yukio 等^[21]的经典理论计算结果一致 (从图中计算误差表可知本文理论的结果与经典理论的结果差值均小于 1%^[21]), 通过与上述两种结果对比验证了本文理论计算方法的准确性。

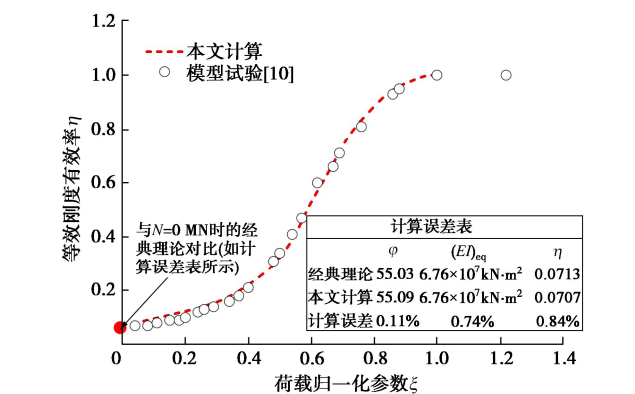


图 3 等效刚度有效率与荷载关系图

Fig. 3 Relationship between effective ratio of equivalent stiffness and load

2.2 与数值模拟结果的对比

为了进一步保证计算模型的可靠性, 将本文计算参数采用钟小春等^[22]的计算参数 (隧道设计参数如表 2 所示)。先将本文解退化至无轴力、无纵向槽钢的解, 后将表 2 的设计参数代入退化的解, 计算结果与钟小春^[22]数值模拟结果如图 4 所示。

表 2 隧道设计参数^[22]
Table 2 Design parameters of tunnel^[22]

R	t	n	l_t	E_t	E_b	l_b	R_b
3.0	300	16	1.0	34.5	206	400	15
m	mm		m	GPa	GPa	mm	mm

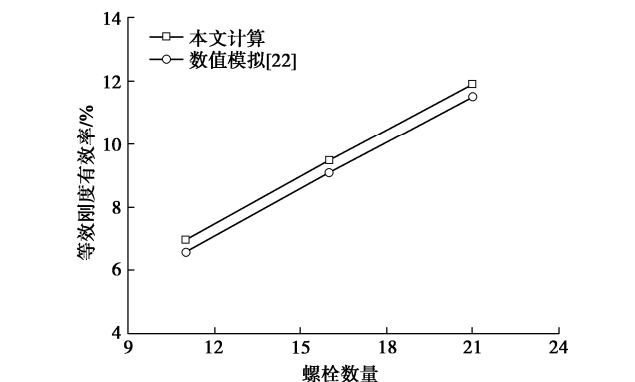


图 4 等效刚度有效率与螺栓数量

Fig. 4 Relationship between effective ratio of equivalent stiffness and number of bolts

从图 4 可知, 研究结果表明隧道等效刚度与螺栓数量呈线性增长关系。由于本文没有考虑施加对称约束, 所以本文理论计算结果略小于数值模拟结果, 且本文计算结果与钟小春等^[22]的数值模拟结果误差为 3.36%。由此可见本文的计算结果与钟小春等^[22]数值模拟结果吻合, 再次验证了本文解析解的可靠性。

3 计算分析

基于上述已验证的解析解, 本节的设计参数如表 1, 3 所示。为揭示纵向槽钢加固盾构隧道机理, 本节分析纵向轴力、弯矩、纵向槽钢等参数对盾构隧道等效刚度的影响。福州滨海城际快线采用 C14b 的纵向槽钢加固既有隧道, 本文以此为研究背景, 具体纵向槽钢参数如表 3 所示。

表 3 纵向槽钢设计参数 (C14b)

Tab. 3 Design parameters of longitudinal channel steel

槽钢厚度 b	槽钢数量 n_g	槽钢模量 E_{cg}	槽钢面积 A_g
60 mm	7 根	206 GPa	21.316 cm ²

3.1 纵向轴力对盾构隧道等效刚度的影响

在弯矩为 20 MN·m 作用下分析不同轴力对隧道力学性能的影响。由图 5 可知, 纵向槽钢及纵向轴力均能改变中性轴 φ 的大小; 有无纵向槽钢的中性轴 φ 的最大差值 (即 $\Delta\varphi$) 为 4.19°, 随着纵向轴力的增加, 中性轴 φ 和中性轴差值 $\Delta\varphi$ 均非线性减小, 且最终趋于稳定值; 当 $\varphi=-90^\circ$ 时, 表明隧道管片完全接触, 此时隧道等效刚度达到最大值, 等于无缝隙面的均质盾构隧道的等效刚度。研究表明, 中性轴 φ 与纵向轴力呈非线性反比关系, 为非常数。

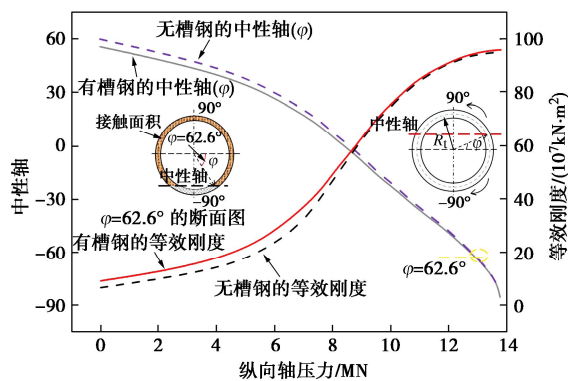


图 5 纵向轴力对等效刚度和中性轴的影响

Fig. 5 Effects of longitudinal axial force on equivalent stiffness and neutral axis of tunnel

隧道等效刚度与纵向轴力呈 S 曲线正相关性; 当纵向轴力 $N = 0$ MN 时, 有纵向槽钢作用下的等效刚度 $(EI)_{eq}=9.29\times10^7$ kN·m², 而无槽钢的隧道等效刚度 $(EI)_{eq}=6.71\times10^7$ kN·m², 隧道等效刚度增幅达 38.45%; 当纵向轴力 $N = 12.6$ MN 时, 即隧道的中性轴

$\varphi=-62.6^\circ$, 此时隧道管片间接触面积达 85%, 有纵向槽钢的隧道等效刚度与无纵向槽钢的刚度差值稳定在 1×10^7 kN·m² 左右。研究表明有纵向槽钢的隧道等效刚度明显大于无纵向槽钢的隧道等效刚度; 隧道的中性轴 φ 为非常数, 其随纵向槽钢和轴力增加而减小, 其直接改变隧道管片之间的接触状态和隧道惯性矩大小, 从而影响了隧道的等效刚度。

3.2 弯矩对隧道等效刚度的影响

由图 6 可知, 隧道的等效刚度与纵向轴力呈 S 曲线非线性正相关性, 与弯矩呈非线性反相关性; 当纵向轴力 $N = 0$ MN 时 (即隧道处于纯弯状态), 盾构隧道的中性轴 φ 和等效刚度为固定值, 其均不受弯矩大小的影响, 此时有纵向槽钢的隧道等效刚度是无槽钢的等效刚度的 1.38 倍 (即增幅 38.45%); 随着纵向轴力 N 的增加, 有槽钢的隧道等效刚度与无槽钢的隧道等效刚度差值从 2.58×10^7 kN·m² 逐渐降至 0.97×10^7 kN·m²; 在弯矩和纵向轴力 N 耦合作用下, 弯矩越大, 隧道的等效刚度越小; 有槽钢的等效刚度最大值是最小值的 10.33 倍; 无槽钢的等效刚度最大值是最小值的 14.15 倍。研究结果表明纵向槽钢和轴压力均可显著提高隧道等效刚度, 且纵向轴力越小时, 槽钢加固效果越明显; 纵向轴力与隧道等效刚度呈非线性正相关关系, 与黄大维等^[9]、Li 等^[10]的隧道模型试验得出类似的结论一致。

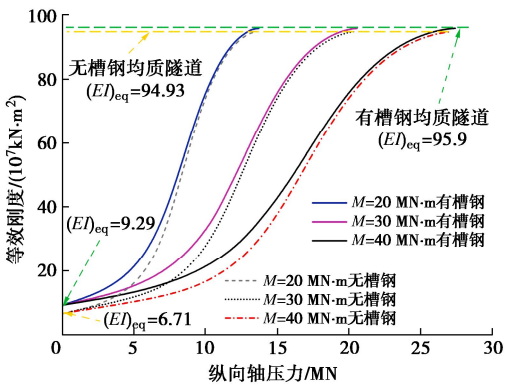


图 6 弯矩和纵向轴力对等效刚度的影响

Fig. 6 Effects of bending moment and longitudinal axial force on equivalent stiffness of tunnel

3.3 不同槽钢参数对隧道等效刚度的影响

根据 3.1 节分析可知, 纵向轴力明显可以提高既有隧道的等效刚度, 为深入揭示纵向槽钢对既有隧道刚度的影响, 因此, 本节只考虑纵向槽钢对隧道等效刚度的影响 (在本节退化不考虑纵向轴力的解)。本节基于表 1, 3 的隧道设计参数, 为了便于比较不同参数对隧道等效刚度的影响, 每次只改变一个隧道设计参数。

(1) 管片宽度对刚度的影响

图 7 表明, 隧道的等效刚度随槽钢计算长度 (隧道管片宽度) 的增大而线性增加, 随隧道半径的增大而非线性增加; 当隧道的半径 R 分别为 2.6, 3.1, 3.6 m 时, 在纵向槽钢的作用下, 隧道的等效刚度最大分别提高了 1.43, 1.39, 1.39 倍, 表明隧道半径越小, 提高效果越明显; 以半径 $R=3.1$ m 为分析对象, 管片宽度 (即槽钢计算长度) 每增加 1 m, 隧道的等效刚度约增大 2.56×10^7 kN·m²; 研究结果表明增加隧道管片宽度 (即槽钢计算长度) 可显著提高隧道等效刚度; 当新建隧道穿越既有隧道且既有隧道设计参数不能变更时, 在既有隧道安装纵向槽钢可显著提高隧道刚度从而减小隧道纵向变形, 有利于提高既有隧道稳定性。

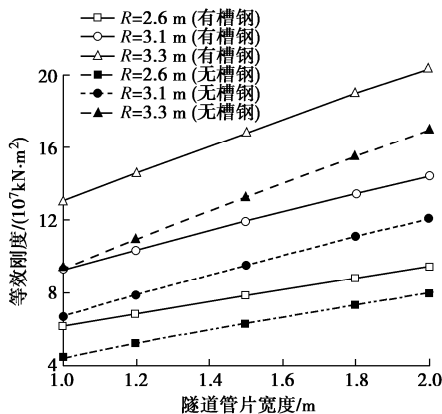


图 7 管片宽度对等效刚度的影响

Fig. 7 Effects of width of tunnel segment on equivalent stiffness of tunnel

(2) 槽钢数量对刚度的影响

图 8 可知, 隧道的等效刚度与纵向槽钢数量呈正相关性, 纵向槽钢数量越多, 隧道的等效刚度越大; 当隧道的半径 $R=3.1$ m 时, 每增加 1 根纵向槽钢, 隧道的等效刚度约提高 0.355×10^7 kN·m²; 以隧道的半径 $R=3.6$ m 为分析对象, 安装 7 根纵向槽钢的隧道等效刚度是无槽钢的 1.4 倍, 安装 19 根纵向槽钢的隧道等效刚度是无槽钢的 2.04 倍。研究表明增加隧道的半径和增加纵向槽钢的数量均可显著提高隧道的等效刚度。

(3) 槽钢面积对刚度的影响

图 9 表明, 隧道的等效刚度随槽钢面积增加而线性提高, 槽钢的面积越大, 隧道的等效刚度就越大, 半径越大, 隧道刚度增长率就越大; 从图 9 中的实线与虚线夹角可知, 当纵向槽钢型号为 C28a (即槽钢面积为 40 cm²) 时, 隧道的等效刚度出现斜率折点, 表明此时加固效果相对最经济, 如继续增加槽钢面积, 隧道刚度增长率略微减小; 以隧道的半径 $R=3.1$ m 为

分析对象, 安装 7 根纵向槽钢且每根槽钢的面积为 160 cm² 的隧道等效刚度是无纵向槽钢的 3.51 倍, 且槽钢面积每增大 1 cm², 隧道的等效刚度约提高 0.105×10^7 kN·m²。

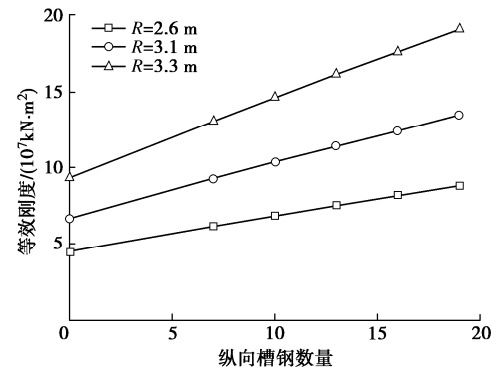


图 8 槽钢数量对等效刚度的影响

Fig. 8 Effect of the number of channel steel on the equivalent stiffness of tunnel

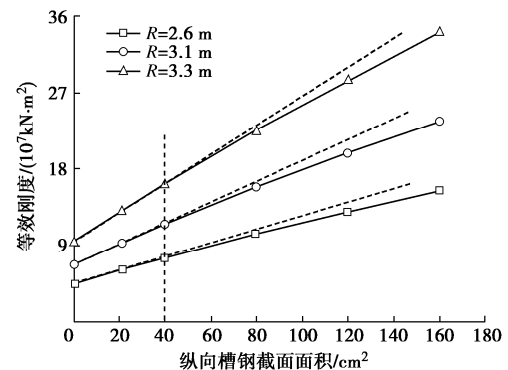


图 9 槽钢面积对等效刚度的影响

Fig. 9 Effects of sectional area of channel steel on equivalent stiffness of tunnel

(4) 槽钢弹性模量对刚度的影响

由图 10 可知, 纵向槽钢弹性模量越大, 隧道的等效刚度就越大, 隧道半径越大, 刚度增长率就越大; 在相同条件下, 隧道的半径由 2.6 m 增大至 3.6 m 时, 隧道的等效刚度最大增幅从 49.11% 提高至 56.99%; 以隧道的半径 $R=3.1$ m 为研究对象, 槽钢模量每提高 1 GPa, 隧道的等效刚度提高约 0.0124×10^7 kN·m²。研究表明隧道的等效刚度与槽钢的弹性模量呈正相关性; 在既有隧道运营过程中要防止纵向槽钢因腐蚀导致弹性模量降低从而降低隧道的等效刚度。

由图 8~10 可知, 隧道的等效刚度斜率由大到小的排序依次为槽钢数量 > 槽钢面积 > 槽钢弹性模量, 因此, 本文建议按照纵向槽钢数量、截面面积、弹性模量的顺序来提高既有隧道的等效刚度。本文从理论上诠释了纵向槽钢等敏感性参数对隧道等效刚度的影响机理, 且可准确快速地分析不同槽钢参数对隧

道刚度的影响。

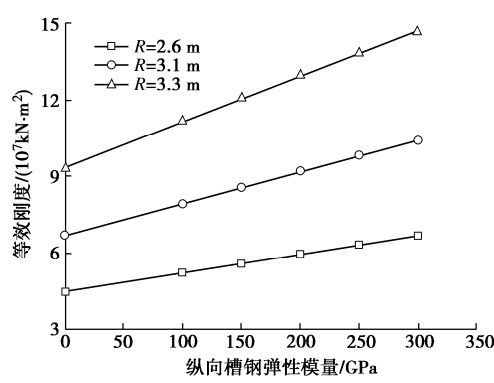


图 10 槽钢模量对等效刚度的影响

Fig. 10 Effects of elastic modulus of longitudinal channel steel on equivalent stiffness of tunnel

4 结 论

在盾构隧道接缝处建立考虑纵向轴力和纵向槽钢的隧道等效刚度解析解，通过 3 个经典案例验证了本文的理论计算模型。基于已验证的计算模型，对隧道的等效刚度进行了敏感性参数分析，主要得到以下 3 点结论。

(1) 盾构隧道的等效刚度与纵向轴压力呈 S 曲线正相关关系，与弯矩呈非线性反相关关系；纵向槽钢和纵向轴压力均能改变隧道的中性轴 φ ，而中性轴 φ 直接改变隧道管片的接触状态和惯性矩大小，从而影响隧道的等效刚度。

(2) 盾构隧道的等效刚度随槽钢计算长度（管片宽度）、槽钢面积、槽钢数量、槽钢弹性模量的增加而线性增加；盾构隧道的等效刚度贡献大小顺序依次为纵向槽钢数量、槽钢面积、弹性模量。

(3) 应根据临近盾构施工产生的附加弯矩大小来设置不同参数的纵向槽钢和不同大小的纵向轴压力，以提高既有隧道的等效刚度和稳定性；本文推导出了考虑纵向槽钢和纵向轴力 N 耦合作用下的盾构隧道等效刚度解析解，可准确快速地预测纵向槽钢加固技术对隧道等效刚度的影响，为槽钢加固技术提供了理论依据。

参考文献：

[1] 梁荣柱, 曹世安, 向黎明, 等. 地表堆载作用下盾构隧道纵向受力机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 736-747. (LIANG Rongzhu, CAO Shian, XIANG Liming, et al. Experimental investigation on longitudinal mechanical mechanism of shield tunnels subjected to ground surface surcharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2023, 42(3): 736-747. (in Chinese))

[2] 唐永锋. 盾构隧道纵向变形破坏机理及加固措施模型试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. (TANG Yongfeng. Model Test Study on Longitudinal Deformation Failure Mechanism and Reinforcement Measures of Shield Tunnel[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese))

[3] ZHANG J, ZHAO M. Experimental study on mechanical behavior of the skew joints of shield tunnels under large eccentric compressive loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111(5): 1-14.

[4] JIANG X, LUO W, ZHU B, et al. Evaluation of longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel with residual jacking force[J]. Appl Sci, 2023, 13(13): 1-4.

[5] 廖少明, 门燕青, 肖明清, 等. 软土盾构法隧道纵向应力松弛规律的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 795-803. (LIAO Shaoming, MEN Yanqing, XIAO Mingqing, et al. Field tests on longitudinal stress relaxation along shield tunnel in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 795-803. (in Chinese))

[6] 耿 萍, 陈枰良, 张 景, 等. 轴力和弯矩共同作用下盾构隧道纵向非线性等效抗弯刚度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2522-2534. (GENG Ping, CHEN Pingliang, ZHANG Jing, et al. Nonlinear longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel under the combined effect of axial force and bending moment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2522-2534. (in Chinese))

[7] GENG P, MEI S Y, ZHANG J, et al. Study on seismic performance of shield tunnels under combined effect of axial force and bending moment in the longitudinal direction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 103004.

[8] 王祖贤, 施成华, 龚琛杰, 等. 考虑横向性能的盾构隧道纵向非线性等效抗弯刚度计算模型[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1295-1308. (WANG Zuxian, SHI Chenghua, GONG Chenjie, et al. Calculation model of longitudinal nonlinear equivalent bending stiffness of shield tunnel considering its transverse performance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1295-1308. (in Chinese))

[9] 黄大维, 陈后宏, 罗文俊, 等. 纵向残余顶推力对盾构隧道纵向刚度影响试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(1): 142-152. (HUANG Dawei, CHEN Houhong, LUO Wenjun, et al. Experimental study on the influence of shield tunnel

- longitudinal rigidity induced by longitudinal residual jacking force[J]. China Railway Science, 2023, **44**(1): 142-152. (in Chinese))
- [10] LI X J, ZHOU X Z, HONG B C, et al. Experimental and analytical study on longitudinal bending behavior of shield tunnel subjected to longitudinal axial forces[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **86**: 128-137.
- [11] 张冬梅, 邹伟彪, 闫静雅. 软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2203-2212. (ZHANG Dongmei, ZOU Weibiao, YAN Jingya. Effective control of large transverse deformation of shield tunnels using grouting in soft deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2203-2212. (in Chinese))
- [12] 陈仁朋, 张 品, 刘 湛, 等. MJS 水平桩加固在盾构下穿既有隧道中应用研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, **45**(7): 103-110. (CHEN Renpeng, ZHANG Pin, LIU Zhan, et al. Application study of MJS horizontal column reinforcement in shield tunneling[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, **45**(7): 103-110. (in Chinese))
- [13] HU J, LIU Y, WEI H, et al. Finite-element analysis of heat transfer of horizontal ground-freezing method in shield-driven tunneling[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(10): 04017080.
- [14] 孙 旻, 徐 伟. 软土地层管幕法施工三维数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1497-1500. (SUN Min, XU Wei. 3D numerical simulation of pipe-curtain method in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1497-1500. (in Chinese))
- [15] 谭忠盛, 孙晓静, 马 栋, 等. 浅埋大跨隧道管幕预支护技术试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊 1): 429-434. (TAN Zhongsheng, SUN Xiaojing, MA dong, et al. Experimental research of pipe-roof pre-supporting technology for the shallow large-span tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S1):429-434. (in Chinese))
- [16] 张冬梅, 逢 健, 任 辉, 等. 港珠澳大桥拱北隧道施工变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(9):1632-1641. (ZHANG Dongmei, PANG Jian, REN Hui, et al. Observed deformation behavior of Gongbei Tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge during construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(9): 1632-1641. (in Chinese))
- [17] 柳 献, 唐 敏, 鲁 亮, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(11): 2300-2306. (LIU Xian, TANG Min, LU Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2300-2306. (in Chinese))
- [18] 邵 华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(6): 1036-1043. (SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(6): 1036-1043. (in Chinese))
- [19] LIU D J, WANG F, HU Q F, et al. Structural responses and treatments of shield tunnel due to leakage: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **103**: 103471.
- [20] 梁荣柱, 王凯超, 黄 亮, 等. 类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(2): 212-223. (LIANG Rongzhu, WANG Kaichao, HUANG Liang, et al. Analytical solution for longitudinal equivalent bending stiffness of quasi-rectangular shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(2): 212-223. (in Chinese))
- [21] YUKIO S B, KAZUHIKO K, NAOMI O, et al. An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analyses[C]// Proceedings of Japan Society of Civil Engineering, Doboku Gakkai Ronbunshu, 1988: 319-327.
- [22] 钟小春, 张金荣, 秦建设, 等. 盾构隧道纵向等效弯曲刚度的简化计算模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 132-136. (ZHONG Xiaochun, ZHANG Jinrong, QIN Jianshe, et al. Simplified calculation model for longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel and its influence factors' analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 132-136. (in Chinese))