

盾构隧道纵向变形引起的横向效应

张冬梅^{1,2}, 黄 翔³, 黄宏伟^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 浙江 杭州 310006)

摘要: 提出了隧道纵向变形对横断面的影响机理可以分为横断面压扁效应和纵向剪切传递效应, 并针对典型的盾构隧道纵向变形曲线, 分析了压扁效应与纵向剪切传递效应对隧道横向受力、变形的影响特点。结果表明: 隧道纵向变形过程中, 纵向剪切传递效应和压扁效应共同作用使隧道产生横向附加变形和受力; 在通常情况下, 纵向剪切传递效应产生的隧道横断面变形与受力强于压扁效应, 但是随着隧道纵向变形的增加, 压扁效应的作用也逐渐变得显著, 在设计中应当进行考虑。

关键词: 隧道; 纵向变形; 压扁效应; 纵向剪切传递效应

中图分类号: TU921

文献标志码: A

Effect of Longitudinal Deflection on Shield Tunnel Convergence

ZHANG Dongmei^{1,2}, HUANG Xu³, HUANG Hongwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310006, China)

Abstract: The effect of longitudinal deflection on shield tunnel convergence was studied through longitudinal shear transfer and circumferential flattening. Taking the typical deflection pattern of shield tunnel as example, the effects of flattening and longitudinal shear transfer on tunnel convergence and internal forces were analyzed and compared, respectively. The results indicate that the internal forces and tunnel convergence induced by the longitudinal transfer effect are normally larger than that induced by the flattening effect. However, the effect of flattening on tunnel convergence is not ignorable with the increase of tunnel settlement.

Key words: tunnel; longitudinal deflection; flattening;

longitudinal shear transfer

由于开挖的安全性及周边环境保护方面的优势, 盾构法被广泛地应用于城市隧道建设之中。对盾构隧道拼装式管片衬砌的设计, 通常仅按照平面应变问题考虑, 即仅考虑隧道横断面的受力与变形^[1-3]。实际上, 由于盾构隧道为细长管状结构, 纵向刚度较小, 因此不论是在施工阶段受曲线推进、纠偏、土体扰动等因素的影响, 又或者是在运营期间受长期沉降、邻近施工的影响, 隧道都很容易产生纵向变形^[4-6]。纵向变形将进一步对隧道横向产生作用, 表现为引起隧道横断面的附加变形与受力, 本文称之为隧道纵向变形引起的横向效应。

目前对盾构隧道纵向变形引起横向效应的研究十分有限。廖少明^[7]将盾构隧道在纵向变形条件下的结构反应归纳为结构纵向挠曲、结构纵向剪切传递、横断面压扁及横断面翘曲。其中纵向剪切传递效应与横断面压扁效应是由盾构隧道纵向变形引起的最为主要的横向效应。隧道纵向变形引起衬砌环与环之间的相对位移或者产生相对位移的趋势, 使隧道衬砌环与环之间产生剪切力, 这种剪切力将会使隧道横断面产生变形与附加内力, 这就是纵向剪切传递效应。廖少明等^[7-8]对纵向剪切传递效应进行了深入的研究, 在将盾构隧道视为一维弹性地基梁进行隧道纵向受力分析时, 发现沿隧道纵向分布的包括竖向土压力、侧壁摩阻力、地基抗力在内的竖向荷载对于任意隧道横断面都无法取得平衡, 该不平衡荷载需要由来自隧道横断面两侧的不均衡剪切力平衡, 证明了纵向剪切传递效应的存在。

盾构隧道在受弯产生纵向变形的过程中, 将对衬砌沿纵向产生附加内力, 纵向附加内力的方向与

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51278379); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB013800); 上海市自然科学基金(12ZR1433600); 上海市优秀学科带头人计划(12XD1405100)

第一作者: 张冬梅(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为软土盾构隧道结构安全评价及控制。

E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn

隧道纵轴线相同. 由于隧道发生了弯曲, 因此纵向附加内力将产生指向隧道横断面直径方向的附加内力, 并进而导致横截面椭圆化, 这就是隧道纵向变形引起的横断面压扁效应. 英国人 Brazier 第一次对钢管压扁现象进行了研究, 因此这种现象又称为 Brazier 现象^[9]. 目前关于压扁效应的研究多见于管道工程^[10-12]. 樊振宇^[13]在对盾构隧道纵向变形进行数值模拟时, 发现盾构隧道横断面会出现椭圆化变形. Huang 等^[14]首次提出了盾构隧道的压扁效应, 并指出压扁隧道对盾构隧道受力变形有较大影响, 然而并未对该效应进行深入分析. 除此之外, 并无其余相关研究见诸文献.

为了深入分析盾构隧道纵向变形引起的横向效应, 本文首先揭示了盾构隧道压扁效应的机理, 得到由压扁效应引起的盾构隧道横断面受力与变形. 然后, 综合考虑隧道纵向剪切传递效应和压扁效应, 分析了不同影响因素下典型隧道纵向变形对横向效应的影响规律和特点, 并将压扁效应与纵向结构剪切效应进行对比, 以揭示隧道纵向变形引起横向效应的原理, 为盾构隧道设计和安全运营维护提供技术依据.

1 盾构隧道压扁效应机理

1.1 均质隧道的压扁效应

为方便推导, 首先将盾构隧道按照均质管段来分析, 隧道在纵向弯矩 M 的作用下, 上下方衬砌将产生纵向的内力 P , 如图 1 所示.

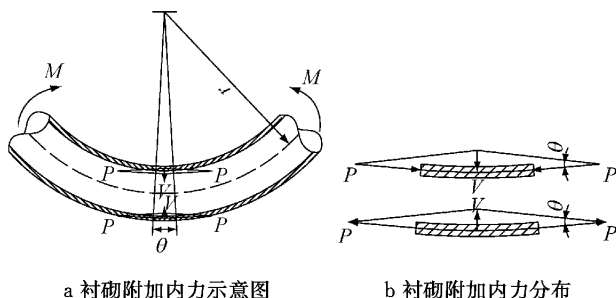


图 1 隧道弯曲条件下衬砌内力图

Fig.1 Tunnel bending induced lining force

假定隧道衬砌厚度为 T , 作用在衬砌厚度方向上的等效纵向应力为 σ_x , 则

$$P = \sigma_x T \quad (1)$$

由于隧道弯曲的影响, 纵向内力 P 将产生一个指向隧道直径方向的附加力 (见图 1b)

$$V = 2P \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

式中: θ 为隧道纵向单位长度的弯曲角度. 对于微小角度 θ 有

$$\sin(\theta/2) \approx \theta/2$$

因此, 隧道弯曲产生的附加力可表示为

$$V = 2P \sin \frac{\theta}{2} = \sigma_x T \theta \quad (3)$$

工程上, 隧道纵向弯曲变形通常采用隧道变形曲率 κ 表示, 隧道曲率 κ 的定义为单位长度的弯曲角度, 可表示为

$$\kappa = \frac{d\theta}{dx} \quad (4)$$

对于单位长度

$$\kappa = \theta \quad (5)$$

在隧道纯弯的条件下, 衬砌应力 σ_x 可表示为

$$\sigma_x = My/I_c = E\kappa y \quad (6)$$

式中: I_c 为隧道横截面惯性矩, y 为计算点与中性轴的距离, E 为衬砌弹性模量. 将式 (5)~(6) 代入式 (3), 径向附加力

$$V = TE\kappa^2 y = TE\kappa^2 r \cos \alpha \quad (7)$$

式中: α 为如图 2 所示的计算点与竖向直径的夹角, r 为隧道半径.

根据式 (7), 由压扁效应引起的作用在隧道横断面的荷载 V , 本文称之为压扁荷载, 其分布形式如图 2 所示. 隧道拱顶与拱底由于在弯曲情况下纵向应力较大, 因此这两处压扁荷载最大, 而隧道水平直径处压扁荷载为零. 压扁荷载 V 的出现是隧道产生压扁效应的原因.

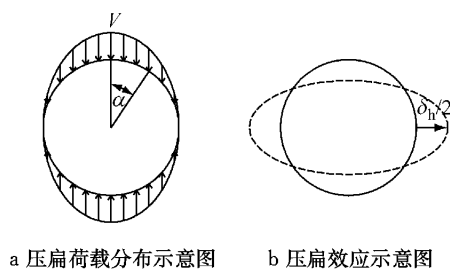


图 2 压扁荷载分布及压扁效应图

Fig.2 Distribution of flattening load induced by tunnel bending

在如图 2 所示的压扁荷载作用下, 根据力法可求得压扁荷载作用下隧道横断面的变形与内力^[14], 如下所示:

$$\delta_h = T\kappa^2 r^5 / (6I_c) \quad (8)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{4} TE\kappa^2 r^3 - \frac{1}{2} TE\kappa^2 r^3 \sin^2 \alpha \quad (9)$$

$$N_\alpha = TE\kappa^2 r^2 \sin^2 \alpha \quad (10)$$

$$Q_\alpha = -TE\kappa^2 r^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (11)$$

式中: δ_h 为压扁荷载引起的隧道横断面变形, M_a 为压扁荷载引起的衬砌弯矩, N_a 为压扁荷载引起的衬砌轴力, Q_a 为压扁荷载引起的衬砌剪力。

1.2 盾构隧道的压扁效应

上述推导是在假定隧道为均质圆管的条件下得到的,然而盾构隧道与均质管段相比有其特殊之处,主要包括隧道管片间的接缝、隧道横断面侧向土体的约束作用及盾构隧道具有初始的设计纵向线型。

为了考虑隧道接缝导致的隧道刚度减弱,引入盾构隧道横向刚度有效率 η ,采用刚度折减的均质圆环模拟隧道衬砌结构。考虑隧道横向刚度折减后,由压扁效应引起的隧道横断面变形

$$\delta_h = T\kappa^2 r^5 / (6\eta I_c) \quad (12)$$

然而,由于地层对隧道变形的约束作用,压扁效应引起的实际隧道横向变形小于式(12)的计算结果,土层的约束作用采用土体侧向抗力来表述,并假设侧向土体抗力 p_k 以三角形形式分布于隧道两侧水平直径上下各 45° 的范围内^[1],如图3所示。

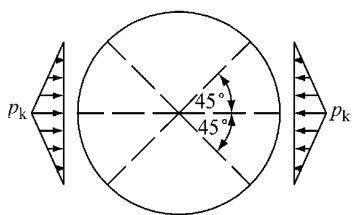


图3 土体抗力分布示意图

Fig.3 Distribution of soil resistance

土体抗力采用 Winkler 地基模型计算,如下所示:

$$p_k = k\delta_h \quad (13)$$

式中: k 为土体基床系数。由土体抗力引起的隧道水平直径处变形

$$\delta_{h,p_k} = -0.045 \cdot 4p_k r^4 / (\eta EI_c) = -0.045 \cdot 4k\delta_h r^4 / (\eta EI_c) \quad (14)$$

因此,考虑抗力影响的隧道水平直径处的变形

$$\delta'_h = \delta_{h,p_k} + \delta_h / 2 = T\kappa^2 r^5 / (12\eta I_c) - 0.045 \cdot 4k\delta_h r^4 / (\eta EI_c) \quad (15)$$

则考虑土体抗力情况下的隧道收敛

$$\delta = 2\delta'_h = TE\kappa^2 r^5 / [6(0.045 \cdot 4kr^4 + \eta EI_c)] \quad (16)$$

为考虑隧道初始纵向设计线型,假设隧道纵向具有初始曲率 κ_0 (初始弯曲角度为 θ_0),后续的压扁效应是在初始曲率的基础上发生的,则隧道发生纵向弯曲后,最终弯曲角度 θ 是 θ_0 与 θ_i 之和(见图4),其中 θ_i 为由于隧道纵向变形引起的弯曲角度,故

$$V = \sigma_x T\kappa = \sigma_x T(\kappa_0 + \kappa_i) \quad (17)$$

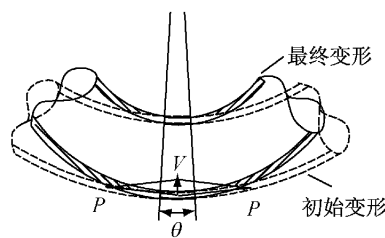
$$\sigma_x = My/I_c = E\kappa_i y \quad (18)$$

式中: κ_i 为由于隧道纵向弯曲而产生的附加曲率,由此得压扁荷载

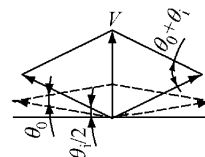
$$V = TE\kappa_i y(\kappa_0 + \kappa_i) \quad (19)$$

根据式(17)~(19),考虑隧道初始曲率、接头刚度和地层抗力影响的,隧道弯曲引起的横向收敛

$$\delta = 2\delta'_h = TEr^5 \kappa_i(\kappa_0 + \kappa_i) / [6(0.045 \cdot 4kr^4 + \eta EI_c)] \quad (20)$$



a 压扁效应示意图



b 压扁效应荷载作用

图4 考虑盾构隧道初始曲率的压扁效应

Fig.4 Flattening effect considering original curvature of tunnel

综合考虑以上因素,隧道衬砌内力分别为

$$M_a = TEr^3 \kappa_i(\kappa_0 + \kappa_i) / 4 - TEr^3 \kappa_i(\kappa_0 + \kappa_i) \sin^2(\alpha/2) + M_k \quad (21)$$

$$N_a = TEr^2 \kappa_i(\kappa_0 + \kappa_i) \sin^2 \alpha + N_k \quad (22)$$

$$Q_a = -TEr^2 \kappa_i(\kappa_0 + \kappa_i) \sin \alpha \cos \alpha + Q_k \quad (23)$$

式中: M_k , N_k , Q_k 为侧向土体抗力作用引起的隧道衬砌内力,计算方法见表1。

表1 土体抗力引起的隧道衬砌内力表

Tab.1 Internal force of lining subjected to soil resistance

soil resistance		
内力	$0 \leq \alpha \leq \pi/4$	$\pi/4 \leq \alpha \leq \pi/2$
M_a	$(0.234 \cdot 6 - 0.353 \cdot 6 \cos \alpha) p_k r^2$	$(-0.347 \cdot 8 + 0.5 \sin^2 \alpha + 0.235 \cdot 7 \cos^3 \alpha) p_k r^2$
N_a	$(0.353 \cdot 6 \cos \alpha) p_k r$	$(-0.707 \cos \alpha + \cos^2 \alpha + 0.707 \sin \alpha \cos \alpha) p_k r$
Q_a	$(0.353 \cdot 6 \sin \alpha) p_k r$	$(\sin \alpha \cos \alpha - 0.707 \cos^2 \alpha \sin \alpha) p_k r$

2 盾构隧道纵向剪切传递效应

当盾构隧道产生纵向不均匀沉降时,为使隧道任意横断面的竖向荷载取得平衡,隧道横断面两侧将产生不平衡剪切力 dQ 。由于 dQ 的作用,隧道横断

面将产生变形与附加内力。

由隧道纵向变形引起的作用于隧道横断面的剪切荷载

$$P_s = -\frac{dQ}{dx} = (EI)_{eq} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} \quad (24)$$

式中: $(EI)_{eq}$ 为隧道纵向等效弯曲刚度, $(EI)_{eq} = EI\xi$, 其中 EI 为隧道纵向刚度, ξ 为纵向刚度有效率, 一般取为 $1/6 \sim 1/8$; $w(x)$ 为隧道总的变形量, x 为沿隧道纵向的位置坐标。

由剪切荷载引起的隧道衬砌内力分别为

$$M_\alpha = 3P_s r \cos \alpha / (4\pi) - P_s r / (2\pi) + P_s r [1 - \cos \alpha - (\alpha/2) \sin \alpha] / \pi \quad (25)$$

$$N_\alpha = -3P_s \cos \alpha / (4\pi) + P_s \alpha \sin \alpha / (2\pi) \quad (26)$$

$$Q_\alpha = -3P_s \sin \alpha / (4\pi) + P_s (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) / (2\pi) \quad (27)$$

假设隧道横向变形后受到侧向土体弹性抗力的作用, 同样假设侧向土体抗力以三角形形式分布于隧道两侧水平直径上下各 45° 的范围内, 得到剪切荷载引起的隧道水平直径处变形

$$\delta_k = 0.042 P_s r^3 / (0.045 4kr^4 + \eta EI_c) \quad (28)$$

3 典型的盾构隧道纵向变形模式

由于隧道发生纵向变形的原因不同, 纵向变形的模式也有所差异, 为了分析不同隧道纵向变形引发的横向效应, 对典型的盾构隧道纵向变形模式进行了总结和分析。

3.1 整体变形

隧道整体变形主要表现为整体下沉和倾斜两部分, 可表示为

$$w(x) = w_0 + \Delta w \quad (29)$$

式中: w_0 为整体下沉, Δw 为不均匀倾斜变形。当隧道整体变形时, 压扁效应与纵向剪切传递效应均不会使隧道结构产生附加作用。然而在隧道边界约束处或地基条件沿隧道纵向发生变异时, 隧道在整体变形条件下也将承受附加荷载的作用。

3.2 隧道推进时的指数型变形模式

盾构正常推进过程中, 衬砌环脱出盾尾后就随着下卧土层的变形而下沉, 盾尾后方不同位置的衬砌沉降不同, 因此会产生纵向变形^[15]。根据上海地区盾构的施工实例, 盾构正常推进时隧道的曲线模式可用双曲线或指数型曲线表示。两种形式相似, 本文仅以指数型曲线为例进行介绍, 如下所示:

$$w(x_1) = S_{\max} (1 - e^{-\beta x_1}) \quad (30)$$

式中: 参数 β 与盾构施工参数、隧道尺寸、埋深等相

关, 取值范围大约在 $0.005 \sim 0.020$ 之间; S_{\max} 为隧道最大沉降值, 其变化的范围一般在 $10 \sim 130 \text{ mm}$ ^[15]; x_1 为距盾尾的距离。

3.3 隧道纠偏变形模式

盾构曲线推进与纠偏推进情况下, 由于千斤顶的偏心荷载作用, 隧道纵向变形曲线可表示为^[16]

$$w(x_2) = M [1 - \cos(\pi x_2 / (2l_0))] / [2(EI)_{eq} \lambda^2] \quad (31)$$

式中: $l_0 = \sum p_j / (\pi D \tau)$, $M = e \sum p_j$, 其中 p_j 与 e 分别为千斤顶顶力与偏心距, D 为隧道外径, τ 为地基摩阻力, $\tau = F\mu$, F 为隧道外表面土体压力, μ 为混凝土与周围土层之间的摩擦系数, 通常可取为 0.3 ; $\lambda = [kD / 4(EI)_{eq}]^{1/4}$; x_2 为距顶推力作用点的距离。

3.4 隧道受邻近施工影响的变形模式

在邻近施工如盾构穿越、桩基施工、基坑开挖等作用下, 受影响的隧道的变形曲线可采用高斯曲线来模拟, 如下所示:

$$w(x_3) = S_{\max} \exp(-x_3^2 / 2i^2) \quad (32)$$

式中: i 为隧道纵向变形反弯点(隧道变形曲线曲率正负变化处)与变形最大点的距离, x_3 为距隧道最大沉降点的距离。

3.5 隧道长期沉降的变形模式

根据上海地铁长期纵向沉降观测数据, 隧道长期沉降的变形可以用分段三次抛物线来拟合^[17], 一个分段长度可以为 $70 \sim 180 \text{ m}$, 隧道接头段和中间段长期沉降的模式 $w_1(x_4)$ 和 $w_2(x_4)$ 分别如下所示:

$$\begin{aligned} w_1(x_4) &= ax_4^3 - (168.34a + 0.0005)x_4^2 + \\ &\quad (7836.7a + 0.0566)x_4 + w_{01} \\ w_2(x_4) &= ax_4^3 - (147.52a - 0.002)x_4^2 + \\ &\quad (4674.5a - 0.2091)x_4 + w_{02} \end{aligned} \quad (33)$$

式中: w_{01} 和 w_{02} 分别为隧道接头段和中间段分段沉降曲线起始点的沉降值, mm ; a 为参数, 其数值对于接头段大约在 $-8 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$, 对于中间段范围为 $-2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$; x_4 为距隧道沉降分段起始点的距离。

4 盾构隧道纵向变形的横向效应

4.1 隧道指数型变形模式下的横向效应

为分析隧道指数型模式变形条件下压扁效应与纵向剪切传递效应对隧道横向效应的影响, 以 $\beta = 0.01$, $S_{\max} = 100 \text{ mm}$ 的曲线为例, 对比分析了压扁效应和隧道纵向剪切传递效应对隧道横向效应的贡献。隧道的纵向变形如图 5 所示。在以下分析中均以

上海延安东路隧道为对象,延安东路隧道外径 11 m,衬砌厚度 0.55 m.

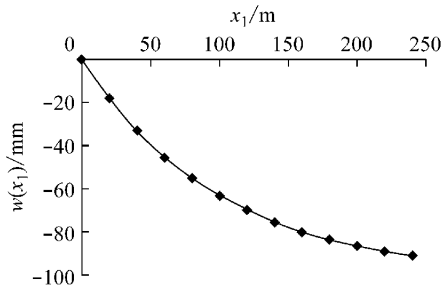


图5 指数型模式隧道纵向变形图

Fig.5 Tunnel deflection of exponential pattern

在如图5所示的指数型隧道纵向变形模式下,隧道任一点的曲率可计算如下:

$$\kappa = S_{\max} \beta^2 e^{-\beta x_1} / (1 + S_{\max}^2 \beta^2 e^{-\beta x_1})^{3/2} \quad (34)$$

隧道纵向变形曲率及对应的压扁效应隧道收敛分布如图6所示,隧道变形最大曲率出现在 $x_1 = 0$ (盾尾)处,因此压扁效应最显著的位置也在此处.

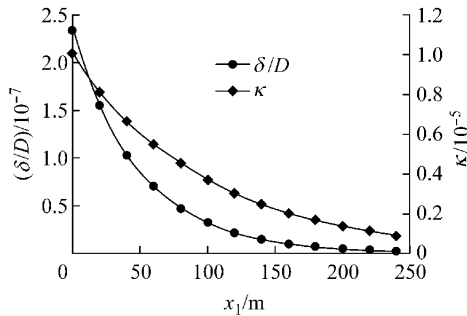


图6 指数型模式隧道变形曲率及对应的隧道收敛分布图

Fig.6 Bending curvature and the corresponding tunnel convergence for exponential pattern deflection

盾尾处隧道最大曲率随 β 与 S_{\max} 的变化见图7. β 与 S_{\max} 的变化都对最大曲率有较大的影响,当 β 与 S_{\max} 的数值同时较大时,隧道曲率可能大于 $1/10\,000$,此时应当考虑压扁效应对隧道产生的影响.

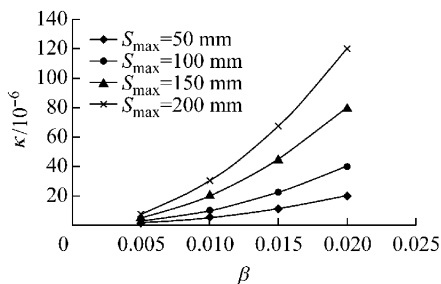


图7 指数型模式隧道变形最大曲率随 β 与 S_{\max} 变化图

Fig.7 Variation of tunnel bending curvature with β and S_{\max} for exponential pattern deflection

指数型纵向变形模式下纵向传递剪切荷载及其引起的隧道收敛分布如图8所示,两者的最大值也出现在盾尾处.

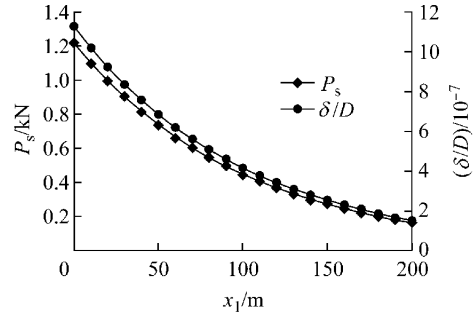


图8 指数型模式剪切荷载及对应的隧道收敛分布图

Fig.8 Shear force and the corresponding tunnel convergence for exponential pattern deflection

隧道剪切荷载同样与 β 及 S_{\max} 相关,如图9所示.当 β 与 S_{\max} 的数值越大,隧道所受的剪切荷载越大,此时需注意纵向剪切传递效应引起的隧道横向效应.

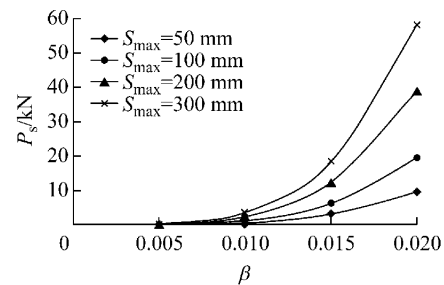


图9 指数型模式隧道最大剪切荷载随 β 与 S_{\max} 变化图

Fig.9 Variation of shear force with β and S_{\max} for exponential pattern deflection

以隧道收敛来衡量压扁效应与纵向剪切传递效应的量值,指数型变形模式下在 $x_1 = 0$ (盾尾)处由纵向剪切传递效应引起的隧道收敛(δ_s)与由压扁效应引起的隧道收敛(δ_f)的比值可按下式计算:

$$\delta_s / \delta_f = 0.205 \, 2(EI)_{eq} (1 + \beta^2 S_{\max}^2)^3 / (TEr^2 S_{\max}) \quad (35)$$

由于 β 与 S_{\max} 的数值一般较小,因此式(35)可简化为

$$\delta_s / \delta_f = 0.205 \, 2(EI)_{eq} / (TEr^2 S_{\max}) \quad (36)$$

δ_s 与 δ_f 的比值随 S_{\max} 变化的趋势如图10所示.总体而言,在指数型模式下纵向剪切传递效应引起的隧道收敛比压扁效应更显著,而当隧道最大沉降数值增大时,两种效应引起的效果逐渐接近,此时考虑纵向变形引起的横向效应时,不能忽略压扁效应的影响.

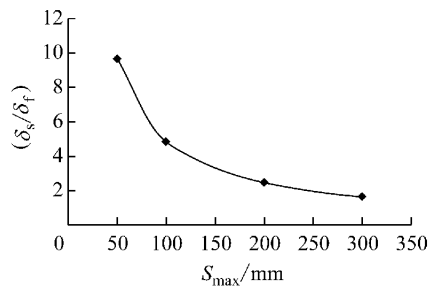


图 10 纵向剪切传递效应与压扁效应引起的隧道收敛对比图

Fig.10 Comparison of tunnel convergences subjected to longitudinal shear transfer effect and flattening effect

4.2 纠偏荷载作用下隧道的横向效应

以 600 t 纠偏荷载作用下, $\sum p_j = 5\,880\text{ kN}$, $e = 10\text{ cm}$, $k = 5\,000\text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $l_0 = 10\text{ m}$ 为例, 得到的隧道变形如图 11 所示。

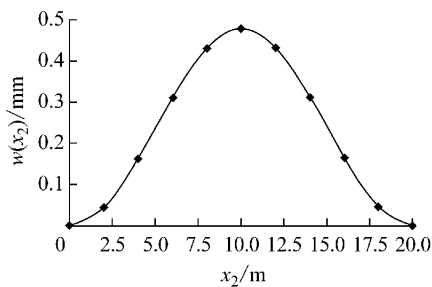


图 11 纠偏荷载作用下隧道纵向变形图

Fig.11 Tunnel deflection subjected to shield correction load

纠偏荷载作用下隧道变形曲率及对应的压扁效应隧道收敛分布如图 12。隧道变形最大处曲率为零, 隧道曲率最大值出现在千斤顶顶推作用点处及与距顶推作用点 $2l_0$ 处。

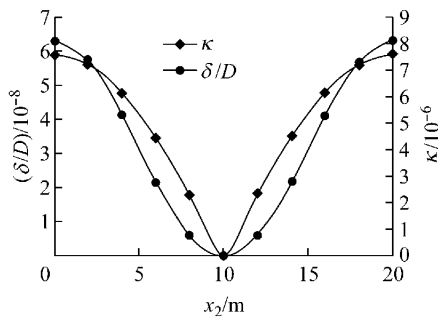


图 12 纠偏荷载作用下隧道变形曲率及对应的隧道收敛分布图

Fig.12 Bending curvature and the corresponding tunnel convergence subjected to shield correction load

隧道剪切荷载及对应的隧道收敛分布如图 13 所示。在 $x_2 = l_0$ 处, 剪切荷载为零, 且在此两侧剪切荷载的方向相反。剪切荷载的最大值同样出现在顶推作用点处及距作用点 $2l_0$ 处。

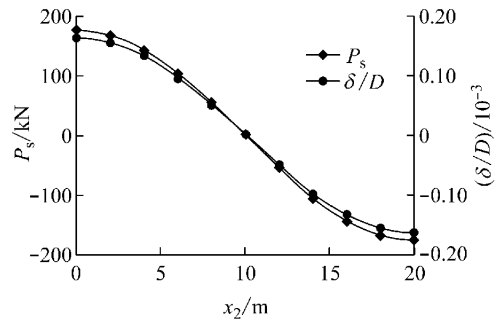


图 13 纠偏荷载作用下隧道剪切荷载及对应的隧道收敛分布图

Fig.13 Shear force and the corresponding tunnel convergence subjected to shield correction load

对比图 12 与 13 的隧道收敛发现, 纠偏荷载作用下隧道的纵向剪切传递效应十分显著, 由其引起的隧道横向变形远大于压扁效应。因此在纠偏荷载作用时可以忽略压扁效应, 但是要考虑纵向剪切传递效应。

4.3 长期沉降模式下隧道的横向效应

隧道长期沉降曲线可用三次抛物线拟合, 当隧道长期沉降与地基沉降完全一致时, 隧道纵向剪切传递的荷载为零。当隧道长期沉降与地基变形不一致时, 此时必然产生纵向剪切传递效应。

对隧道长期沉降曲线进行三次抛物线拟合, 然后可求出隧道任一点的曲率, 进而可以求得隧道的压扁效应。由于长期沉降曲线变化较大, 此处不针对具体曲线进行计算分析。对上海地铁 1 号线隧道长期沉降情况进行分析^[17]: 隧道沿线各点曲率 κ 分布范围很广, 最小曲率大于 $1/1\,000$, 其中 $\kappa \geq 1/1\,000$ 的约占 5.38%, $1/5\,000 < \kappa < 1/1\,000$ 的约占 16.36%。因此总体而言, 长期沉降曲线模式下隧道压扁效应在某些位置十分显著, 需要引起重视。

4.4 邻近施工影响下隧道的横向效应

对于如式(32)所示的由邻近施工引起的隧道纵向变形, 隧道各点曲率计算表达式为

$$\kappa = \left[\left(-\frac{S_{\max}}{i^2} + \frac{x_3^2 S_{\max}}{i^4} \right) \exp\left(-\frac{x_3^2}{2i^2}\right) \right] / \left[1 + \frac{x_3^2 S_{\max}}{i^4} \exp\left(-\frac{x_3^2}{2i^2}\right) \right]^{3/2} \quad (37)$$

由式(37)可得隧道曲率三个极值点的位置为 $x_3 = 0$, $x_3 = \pm\sqrt{3}i$, 对应的最小曲率半径分别为

$$\begin{cases} \rho = -\frac{i^2}{S_{\max}}, & x = 0 \\ \rho = -\frac{i^2 e^{3/2} \left(1 + \frac{3S_{\max}^2}{i^2 e^3}\right)^{3/2}}{2S_{\max}}, & x_3 = \sqrt{3}i \end{cases} \quad (38)$$

假定一条隧道初始曲率为 $1/4\ 000$ (坡度 2.5%), 隧道受邻近施工影响发生纵向不均匀沉降槽, 沉降槽曲线可以用高斯曲线描述, 如图 14 所示, 最大沉降量位于距离沉降槽中心 0.3 m 处, 反弯点位置 i 与隧道最大沉降点的距离为 50 m .

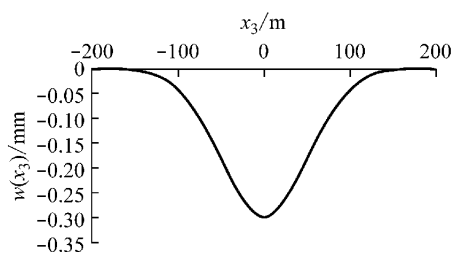


图 14 受邻近施工影响的隧道纵向变形图

Fig. 14 Tunnel deflection affected by nearby construction

隧道纵向曲率分布如图 15 所示, 隧道最大曲率在最大变形处, 即 $x_3 = 0$ 处, 为 1.2×10^{-4} (曲率半径 $\rho = 8\ 333\text{ m}$), 另外在 $x_3 = \pm 86.60 (\pm \sqrt{3}i)$ 存在两个极值点. 这也是隧道压扁效应的三个极值点.

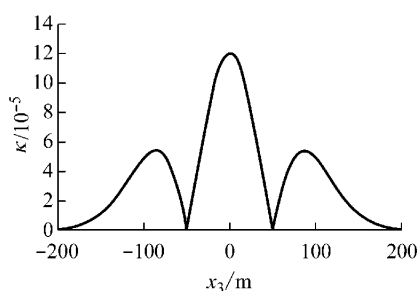


图 15 受邻近施工影响的隧道纵向曲率分布图

Fig. 15 Tunnel bending curvature affected by nearby construction

邻近施工影响下的隧道纵向剪切传递效应产生的剪切荷载

$$P_s = -(EI)_{\text{eq}} [S_{\max} \exp(-x_3^2/2i^2) (3 - 6x_3^2/i^2 + x_3^4/i^4)/i^4] \quad (39)$$

剪切荷载沿隧道纵向的分布如图 16 所示. 剪切荷载的五个极值点出现在 $x = 0, x = \pm 1.356i$ 以及 $x_3 = \pm 2.857i$ 处. 剪切荷载的分布表明, 剪切荷载对隧道横向变形的影响可以区分为加载和卸载作用, 加载影响会引起隧道横椭圆变形, 而卸载作用则会

引起隧道竖椭圆变形. 当隧道由于上方基坑开挖引起隆起或者由于下方隧道穿越引起下沉时, 无论是隧道上方地基上隆或者下方地基下沉, $x_3 = 0$ 处隧道均位于卸荷区, 如图 16 所示, 隧道纵向沉降产生负的剪切荷载. 而当隧道由于上方加载而发生下沉时, 此时上部土体挤压隧道下沉, 隧道中央区域处于加载区. 假如隧道由于下方盾构穿越而发生沉降, 则中间区域 $(-0.742i < x_3 < 0.742i)$ 为卸载区. 而相邻的两个区域 $(-2.334i < x_3 < -0.742i, 0.742i < x_3 < 2.334i)$ 为加载区, 在此区域, 隧道纵向沉降产生正的剪切荷载. 需注意的是, 压扁效应与纵向剪切传递效应不同, 在隧道纵向任何位置均为加载区, 因此, 压扁效应和纵向剪切传递效应所引起的隧道横向变形也不同 (如图 17 所示).

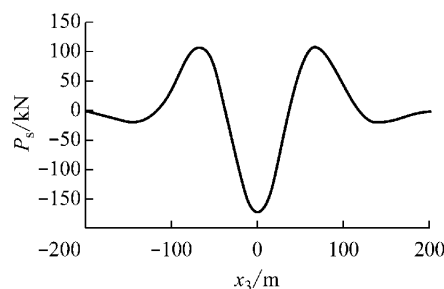


图 16 剪切荷载沿隧道纵向分布图

Fig. 16 Shear force along longitudinal direction

图 17 显示了压扁效应、纵向剪切传递效应引起的隧道收敛以及两种效应叠加的总效应. 由压扁效应引起的隧道收敛显然要比纵向剪切传递效应小, 在隧道中部压扁效应引起的收敛值抵消了约 $1/3$ 由剪切传递引起的隧道收敛, 而在剪切荷载的极值点 $x_3 = \pm 1.356i$ 附近, 两种效应同时表现为加载效果, 得到的隧道收敛为两者的叠加.

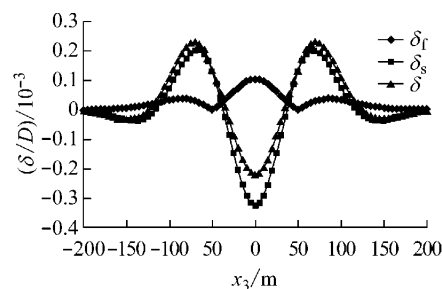


图 17 隧道横断面收敛沿隧道纵向分布图

Fig. 17 Tunnel convergence along longitudinal direction caused by tunnel flatting and shear transfer

为了进一步说明纵向剪切传递效应加载区与卸载区的不同含义, 图 18 显示了隧道中央区域纵向剪

切传递为加载区时的隧道横断面收敛情况. 在隧道中央区域由于两种效应的叠加, 隧道横断面收敛十分明显, 因此这种情况尤其需要引起注意.

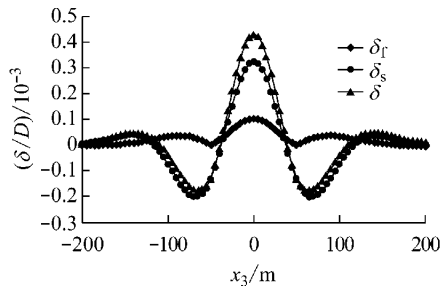


图 18 隧道中部为加载区的隧道横断面收敛沿隧道纵向分布图

Fig. 18 Tunnel convergence along longitudinal direction with loading in the middle area of the tunnel

高斯曲线的形状是由隧道最大变形值 S_{\max} 及反弯点的位置 i 定义的. 当隧道变形曲线不同时, 压扁效应与纵向剪切传递效应在横向效应中所占的比重将发生变化.

倘若不考虑初始曲率的影响, 在 $x_3 = 0$ 处由纵向剪切传递效应引起的隧道收敛(δ_s)与由压扁效应引起的隧道收敛(δ_f)比值可按式(40)计算:

$$\delta_s/\delta_f = 0.6156(EI)_{eq}/(TEr^2 S_{\max}) \quad (40)$$

从式(40)可以看出, 两者之间的比值仅与 S_{\max} 有关, 与 i 无关. 然而如果考虑隧道初始曲率 κ_0 , 则剪切效应与压扁效应引起的隧道收敛比为

$$\delta_s/\delta_f = 0.6156(EI)_{eq}/[TEr^2(S_{\max} + \kappa_0 i^2)] \quad (41)$$

图 19 显示了考虑初始曲率的不同隧道变形曲线条件下 δ_s 与 δ_f 的比值. 对于固定的反弯点位置 i , 随着隧道最大沉降量的增大, 收敛比逐渐减小, 也即由压扁效应引起的隧道收敛与剪切效应引起的收敛

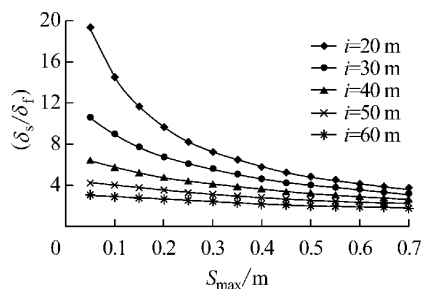


图 19 不同隧道纵向变形曲线的纵向剪切传递效应及压扁效应

Fig. 19 Longitudinal shear transfer effect and flattening effect of different longitudinal deflection

越接近. 对于给定了隧道最大变形的情况, 随着反弯点的位置远离, 收敛比逐渐减小. 因此, 当隧道变形越大及反弯点位置离隧道变形轴线越远的情况下, 应当注意压扁效应的影响.

5 结论

(1) 盾构推进时, 隧道纵向变形呈指数型变形模式条件下, 压扁效应与纵向剪切传递效应的最大值均在盾尾处, 纵向剪切传递效应引起的隧道收敛较显著, 当隧道最大沉降较大时两者的效果相近.

(2) 纠偏荷载作用下, 压扁效应与纵向剪切传递效应的最大值都出现在顶推作用点处及距作用点 $2l_0$ 处. 在纠偏荷载作用时可以忽略压扁效应, 仅考虑纵向剪切传递效应.

(3) 邻近施工影响下呈高斯曲线型分布的盾构隧道纵向变形, 压扁效应的最大值出现在隧道变形最大处, 另外在距最大变形 $\sqrt{3}i$ 处存在两个极值点. 纵向剪切传递效应的最大值也出现在隧道沉降最大处.

(4) 受邻近施工影响呈高斯曲线型分布的盾构隧道纵向变形条件下, 纵向剪切传递效应引起的隧道变形强于压扁效应, 然而压扁效应与纵向剪切传递效应引起隧道变形的比值随着隧道最大沉降量的增大与反弯点的位置远离而逐渐接近. 此时应注意压扁效应的影响.

参考文献:

- [1] ITA Working Group No. 2. Guidelines for the design of shield tunnel lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303.
- [2] Bakker K J. Structural design of linings for bored tunnels in soft ground[J]. Heron, 2003, 48(1): 33.
- [3] 戴志仁. 盾构隧道管片设计若干问题研究与探讨[J]. 铁道工程学报, 2012(6): 65.
DAI Zhiren. Study and discussion on the issues about segment design of shield tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(6): 65.
- [4] 黄宏伟, 臧小龙. 盾构隧道纵向变形形态研究分析[J]. 地下空间, 2002, 22(30): 244.
HUANG Hongwei, ZANG Xiaolong. Research on the longitudinal deflection of shield tunnel [J]. Underground Space, 2002, 22(30): 244.
- [5] Molins C, Arnau O. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1. test configuration and execution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 764.

(下转第 272 页)