

基于盾构隧道纵向沉降的纵向等效刚度反分析

殷建国^{1,2}, 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 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 随着我国经济建设的深化, 城市轨道交通建设得到迅速发展。在盾构隧道常见病害中, 盾构隧道纵向沉降会对隧道纵向性能造成不利影响。盾构隧道结构刚度是结构性能的重要力学性能指标之一, 采用盾构隧道纵向等效连续化模型, 分别对于纵向等效刚度为常数以及沿盾构隧道纵向变化的情况, 基于盾构隧道纵向沉降对纵向等效刚度进行反分析, 探究盾构隧道纵向沉降对隧道纵向等效刚度的影响。分析得出, (1) 当隧道纵向刚度有效率 η 沿隧道纵向为常数时, 随着实际沉降的增大, 隧道纵向刚度有效率 η 变小, 且随着实际沉降的增大趋于平稳; (2) 当隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿隧道纵向变化时, 实际沉降与理论沉降之比小于 1 时, 反算出得到的隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿纵向中间大, 两边小; 实际沉降与理论沉降之比大于 1 时, 反算得到的隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿纵向中间小, 两边大; (3) 根据反算出的纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 计算所得到的沉降曲线与实际沉降曲线有所差异。

关 键 词: 纵向沉降; 盾构隧道; 纵向等效连续化模型; 反分析

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 增 1-0230-05

Back analysis of longitudinal equivalent rigidity of shield tunnel based on longitudinal settlement curve

YIN Jian-guo^{1,2}, HUANG Hong-wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The urban track traffic develops rapidly with the economic growth in China. Among the common diseases of shield tunnel, longitudinal settlement will put adverse influence on the longitudinal performance of shield tunnel. The structural stiffness of shield tunnel structure is one of the most important mechanical performance index. The longitudinal equivalent continuous model is adopted; and the longitudinal effective rigidity ratio is assumed to be constant and variable longitudinally. The longitudinal equivalent rigidity is back calculated based on settlement curve to analyze the influence of longitudinal settlement on the longitudinal equivalent rigidity of shield tunnel. The results indicate: (1) When the longitudinal equivalent rigidity is constant, the longitudinal effective rigidity ratio η reduces and change to be steady as the ratio of actual settlement and theoretic settlement w_{actual}/w increases. (2) When the longitudinal effective rigidity ratio $\eta(x)$ is variable longitudinally, the back-calculated $\eta(x)$ at the middle part is larger than that at both ends less than 1; and the back-calculated $\eta(x)$ at the middle part is smaller than that at both ends for are greater than 1. (3) The settlement curve which is calculated based on back-calculated $\eta(x)$ has some differences with the actual settlement curve.

Keywords: longitudinal settlement; shield tunnel; longitudinal equivalent continuous model; back analysis

1 引 言

随着我国经济建设的深化, 城市轨道交通建设得到迅速发展。目前运营中的城市轨道交通地下结构出现多种常见病害, 其中盾构隧道纵向沉降不仅会引起渗漏水、错台等其他病害^[1-2], 而且还会对盾构隧道纵向性能造成不利影响。盾构隧道结构刚

度是结构性能的重要力学性能指标之一, 本文采用纵向等效连续化模型, 探究盾构隧道纵向沉降对隧道纵向等效刚度的影响。

志波由纪夫^[3]提出的纵向等效连续化模型, 认为隧道在横向为一均质圆环, 在纵向以刚度等效的方法把由接头和管片组成的盾构隧道等效为具有相同刚度和结构特性的均匀连续梁。纵向刚度有效率

是表征隧道纵向抵抗弯曲变形的性能指标。许多学者针对隧道纵向刚度有效率进行过一定程度的研究。黄宏伟等^[4]采用此模型, 分析得到上海地铁盾构隧道纵向刚度有效率 $\eta = 0.067$ ^[4]。曾东洋等^[5]在分析上海明珠线盾构隧道的纵向沉降时纵向刚度有效率采用 0.01。李围^[6]通过有限元分析, 得出地铁盾构隧道纵向抗弯刚度系数近似为 0.05。廖少明等^[7]认为纵向接头的影响范围是有限的, 并非是纵向等效连续化模型中的整环范围, 结合梁-弹簧模型与等效连续化模型, 认为上海地铁隧道纵向刚度有效率 η 为 0.143~0.200。徐凌^[8]考虑根据环缝影响范围修正了传统的纵向等效连续化模型, 并采用室内模型试验进行了验证, 得出上海地铁隧道的纵向等效刚度有效率一般为 1/7~1/6。赵慧岭等^[9]利用纵向等效连续化模型研究隧道纵向弯曲变形, 引入了修正系数来考虑横向变形使理论解与实测接近, 但其引入的修正系数缺乏理论支持。

以上研究均认为盾构隧道纵向等效刚度为常数, 随着隧道服役年限的增加, 隧道纵向等效刚度将产生变化。此外, 盾构隧道纵向沉降在隧道日常监测中容易获取, 能够反映隧道纵向等效刚度的变化。本文采用纵向等效连续化模型, 基于盾构隧道纵向沉降对纵向等效刚度进行反分析, 探究盾构隧道纵向沉降对隧道纵向等效刚度的影响。

2 基于纵向等效连续化模型的盾构隧道纵向沉降计算

采用纵向等效连续化模型, 隧道纵向刚度有效率 η 见式(1)。地基采用弹性地基模型, 隧道受力分析如图1所示。图中, q 为隧道结构上方的荷载; p 为隧道结构下方地层作用在结构上的均布荷载; b 为隧道结构横断面宽度。

$$\eta = \frac{(EI)_{eq}}{E_c I_c} \quad (1)$$

式中: $(EI)_{eq}$ 为等效连续化模型的等效抗弯刚度; $E_c I_c$ 为隧道结构纵向抗弯刚度。

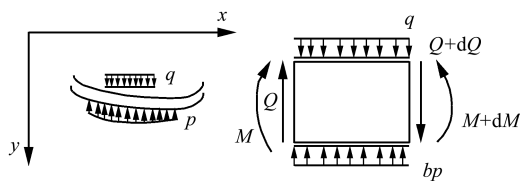


图1 纵向等效连续化模型及弹性地基梁受力分析

Fig.1 Force analysis of longitudinal equivalent continuous model of shield tunnel and beam on elastic foundation

根据力学平衡:

$$-dQ - q(x)dx + bp(x)dx = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{dx} = -q(x) + bp(x) \quad (3)$$

式中: $p = k(x)w$, k 为地基基床系数, w 为地基某一点处位移。

$$\eta(x)E_c I_c \frac{d^4 w}{dx^4} + bk(x)w = -q(x) \quad (4)$$

由于针对隧道纵向沉降问题, 笔者等关注的是较长范围内的隧道特性, 故根据弹性地基量理论中对无限长梁的划分标准, 则 $\lambda l \geq \pi$, 隧道为无限长梁。

2.1 无限长梁受集中力 P_0 作用

隧道等效刚度梁受力图如图2所示。

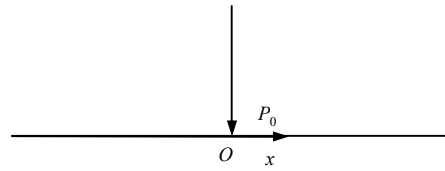


图2 无限长梁受集中力作用下受力分析
Fig.2 Force analysis of infinite beam under concentrated force

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4 w}{dx^4} + 4\lambda(x)^4 w &= 0 \\ x \rightarrow \infty \text{时}, w &= 0 \\ x = 0 \text{时}, \frac{dw}{dx} &= 0 \\ x = 0 \text{时}, Q &= -\frac{P_0}{2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: x_0 为 P_0 的作用位置, 当 $\lambda(x) = \lambda$ 沿隧道纵向为常数时, 解析解为式(6)。

$$w = \frac{P_0 \lambda}{2kb} e^{-\lambda|x-x_0|} (\cos(\lambda|x-x_0|) + \sin(\lambda|x-x_0|)), \quad (x \in R) \quad (6)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4\eta E_c I_c}} \quad (7)$$

2.2 无限长梁受分布荷载 $q(x), x \in (a, b)$ 作用

$$\text{disLoad}(x) = \begin{cases} q(x), & x \in (a, b) \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (8)$$

$$w = \int \frac{\text{disLoad}(x)\lambda}{2kb} e^{-\lambda|x-\xi|} (\cos(\lambda|x-\xi|) + \sin(\lambda|x-\xi|)) d\xi \quad (9)$$

当 $disLoad(x) = \begin{cases} q, x \in (0, b_0 - a_0) \\ 0, \text{其余} \end{cases}$ 时, 且分布荷载

的一端点为原点的条形分布荷载。

$$w = \frac{q\lambda}{2kb} \int_0^{b_0-a_0} e^{-\lambda|x-\xi|} (\cos(\lambda|x-\xi|) + \sin(\lambda|x-\xi|)) d\xi \quad (10)$$

最终解析解见式 (11)~(13)。

当 $x < 0$ 时,

$$w = \frac{q}{2kb} \left[-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda(b_0-a_0-x)} \cos(\lambda(b_0-a_0-x)) + \frac{1}{\lambda} e^{\lambda x} \cos(\lambda x) \right] \quad (11)$$

当 $x > b_0 - a_0$ 时,

$$w = \frac{q}{2kb} \left[\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda(x-(b_0-a_0))} \cos(\lambda(x-(b_0-a_0))) - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda x} \cos(\lambda x) \right] \quad (12)$$

当 $0 \leq x \leq b_0 - a_0$ 时,

$$w = \frac{q}{2kb} \left[\frac{2}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda(b_0-a_0-x)} \cos(\lambda((b_0-a_0-x))) - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda x} \cos(\lambda x) \right] \quad (13)$$

当隧道纵向等效刚度梁在任意分布荷载作用时, 通过对无限长梁在集中力 P_0 作用下的隧道沉降曲线进行叠加即可获得。

当 $\lambda(x)$ 沿隧道纵向变化时仅能通过数值积分进行求解, 其微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4 w}{dx^4} + 4\lambda(x)^4 w &= 0 \\ x \rightarrow \infty \text{ 时, } w &= 0 \\ x \rightarrow \infty \text{ 时, } \frac{dw}{dx} &= 0 \\ x = 0 \text{ 时, } \frac{dw}{dx} &= 0 \\ x = 0 \text{ 时, } Q &= -\frac{P_0}{2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.3 参数确定

以上海市地铁 2 号线作为分析工程背景, 区间隧道的外径为 6 200 mm, 内径为 5 500 mm。管片

环宽 1 000 mm, 混凝土 C50 的弹性模量为 34 500 MPa, 管片为通缝拼装^[10]。上海地铁隧道的纵向等效刚度有效率一般在 1/7~1/6 之间^[8]。 $D_0 = 6\ 200$ mm, $D_i = 5\ 500$ mm, $E_c = 34\ 500$ MPa, $\eta = \frac{1}{6}$ 。

$$I_c = \frac{\pi}{64} (D_0^4 - D_i^4) = \frac{\pi}{64} (6\ 200^4 - 5\ 500^4) = 2.76 \times 10^{13} \text{ mm}^4 \quad (15)$$

$$E_0 = \beta E_s = 1.5 \times 5 = 7.5 \text{ MPa} \quad (16)$$

$$H = 2.5 D_0 \quad (17)$$

$$k = \frac{E_0}{H} = \frac{7.5 \text{ MPa}}{2.5 D_0} = \frac{7.5 \text{ MPa}}{2.5 \times 6\ 200 \text{ mm}} =$$

$$4.839 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^2 \quad (18)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4\eta E_c I_c}} = 4.66 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1} \quad (19)$$

3 隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 反分析

在一定荷载作用下计算得到沉降曲线 $w_0(x)$, 基于此沉降线, 分别取实际沉降曲线为 $w_{\text{actual}}(x)$ ($w_{\text{actual}}(x)/w_0(x) = 0.1 \sim 1.5$), 再基于实际沉降曲线 $w_{\text{actual}}(x)$ 、地基基床系数 k 和隧道结构上方荷载分布对隧道纵向刚度有效率 η 进行反分析。为了简化, 采用隧道中部受集中力 $P_0 = 1$ N 作用进行隧道纵向刚度有效率的研究, 实际沉降曲线计算结果如图 3 所示。

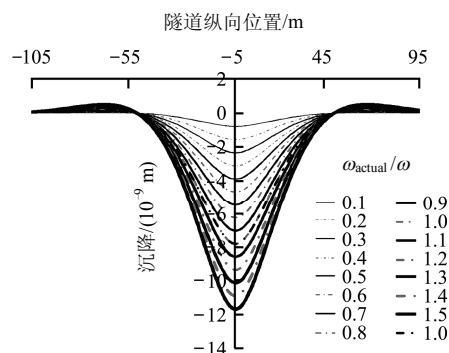


图 3 隧道假设的实际沉降曲线

Fig.3 Actual settlement curves which are assumed

3.1 隧道纵向刚度有效率 η 沿隧道纵向为常数

当隧道纵向刚度有效率 η 沿隧道纵向为常数时, 根据不同的实际沉降曲线 $w_{\text{actual}}(x)$ ($w_{\text{actual}}(x)/$

$w_0(x) = 0.6 \sim 1.5$), 对隧道纵向刚度有效率 η 进行反分析, 其中 $w_0(x)$ 为 $\eta = \frac{1}{6}$ 时的沉降曲线如图 4、5 所示 (图 5 中 y_{ita} 为隧道纵向等效刚度折减系数)。

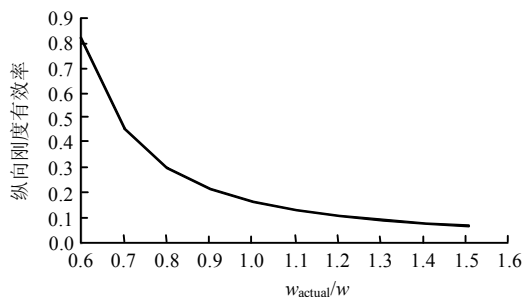


图 4 纵向刚度有效率 η 与实际沉降比例 w_{actual}/w 变化曲线
Fig.4 Relationship between longitudinal effective rigidity ratio η and actual settlement ratio w_{actual}/w

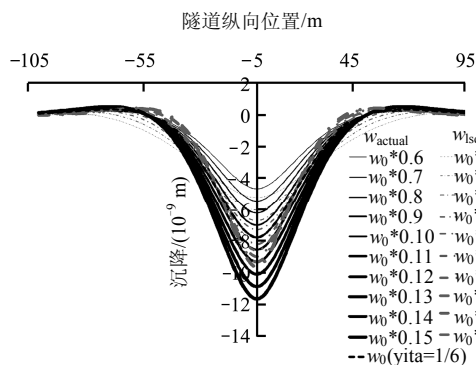


图 5 根据反分析所得到的纵向刚度有效率 η 计算的沉降曲线与实际沉降曲线对比
Fig.5 Settlement curves of back-calculated longitudinal effective rigidity ratio η and actual settlement

从图 4 可以看出, 随着实际沉降的增大, 隧道纵向刚度有效率 η 变小, 且随着实际沉降的增大趋于平稳。与隧道纵向结构设计经验——隧道纵向刚度有效率 η 越小, 对隧道沉降的影响越显著, 相吻合。图 5 表明, 根据反分析所得到的隧道纵向刚度有效率 η 计算的隧道纵向沉降曲线与实际纵向沉降曲线有差异, 当 $w_{\text{actual}}/w < 1$ 时, 计算值比实际纵向沉降曲线沉降值更大; 当 $w_{\text{actual}}/w > 1$ 时, 计算值比实际纵向沉降曲线沉降值更小; 当 $w_{\text{actual}}/w = 1$ 时, 计算值与实际纵向沉降曲线重合。

3.2 隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿隧道纵向变化

考虑隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿隧道纵向变化。由于反算参数太多会造成结果并不惟一, 所以假设道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿隧道纵向变化是连续的, 反算结果如图 6~9 所示。

图 6、7 验证了隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 反算

的正确性。从图 8、9 中可以看出, 根据反算出的纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 计算所得到的沉降曲线并不能与实际沉降曲线完全重合。一方面, 实际沉降曲线是多种因素作用下造成的, 纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 只在 $[0, 1]$ 区间内有物理意义, 只能解释其中的一部分。另一方面, 为了减少反算参数个数, 对有效率进行了额外约束。从图 8 可知, 当 $w_{\text{actual}}/w < 1$ 时, 隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿纵向中间大, 两边小。当 $w_{\text{actual}}/w > 1$ 时, 隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿纵向中间小, 两边大。

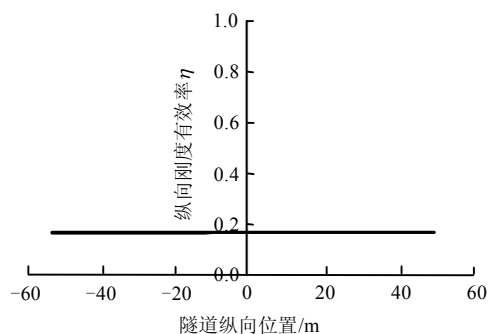


图 6 纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 纵向变化曲线
Fig.6 Relation curve between longitudinal effective rigidity ratio η and position

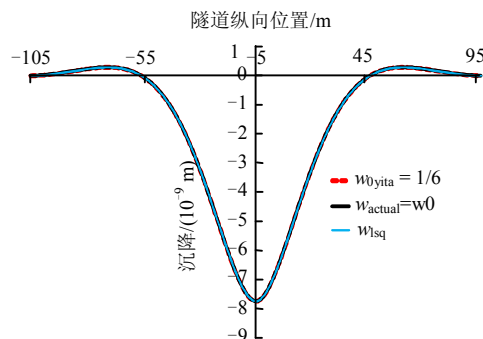


图 7 根据反分析得到纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 计算的沉降曲线与实际沉降曲线图
Fig.7 Settlement curve based on back-calculated longitudinal effective rigidity ratio and actual settlement

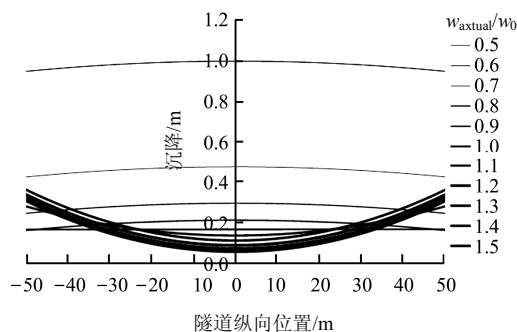


图 8 纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 纵向变化曲线
Fig.8 Relation curves between longitudinal effective rigidity ratio η and position

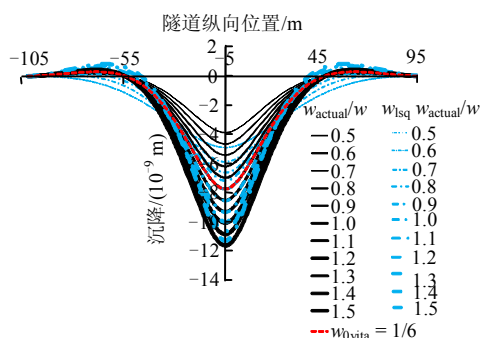


图9 根据反分析得到纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 计算沉降曲线与实际沉降曲线

Fig.9 Settlement curves based on back-calculated longitudinal effective rigidity ratio and actual settlement

4 结 论

(1) 隧道纵向刚度有效率 η 沿隧道纵向为常数时,随着实际沉降的增大,隧道纵向刚度有效率 η 变小,且随着实际沉降的增大趋于平稳。当 $w_{\text{actual}}/w < 1$ 时,根据反分析所得到的隧道纵向刚度有效率计算的隧道纵向沉降曲线比实际纵向沉降曲线沉降值更大;当 $w_{\text{actual}}/w > 1$ 时,计算曲线比实际纵向沉降曲线沉降值更小;当 $w_{\text{actual}}/w = 1$ 时,计算与实际纵向沉降曲线重合。

(2) 隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿隧道纵向变化时,当 $w_{\text{actual}}/w < 1$ 时,反算出得到的隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿纵向中间大,两边小;当 $w_{\text{actual}}/w > 1$ 时,反算得到的隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 沿纵向中间小,两边大。

(3) 根据反分析得到的隧道纵向刚度有效率 $\eta(x)$ 计算的隧道纵向沉降曲线与实际纵向沉降曲线有所差异。

参 考 文 献

- [1] 李翔宇, 王志良, 刘铭, 等. 基于管片错台的通缝拼装盾构隧道纵向变形安全评估[J]. 现代隧道技术, 2011, (6): 27—31.
LI Xiang-yu, WANG Zhi-liang, LIU Ming, et al. Safety assessment of longitudinal deformation of a shield-driven tunnel with a straight joint based on segment dislocation[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, (6): 27—31.
- [2] 林永国. 地铁隧道纵向变形结构性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [3] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. 答变位法によるツールドトネルの耐震設計法[J]. 土木技術資料, 1986, 28(5): 45—52.
- [4] 黄宏伟, 臧小龙. 盾构隧道纵向变形性态研究分析[J]. 地下空间, 2002, 22(3): 244—251.
HUANG Hong-wei, ZANG Xiao-long. Research and analysis of longitudinal deformation characteristics of shield tunnel[J]. *Underground Space*, 2002, 22(3): 244—251.
- [5] 曾东洋, 胡蔓宁, 史彦文. 盾构隧道施工地表沉降变位影响因素研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(4): 34—38.
ZENG Dong-yang, HU Man-ning, SHI Yan-wen. Research on the influential factors of ground settlement and up-heal in shield tunnel construction[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2006, 23(4): 34—38.
- [6] 李围. 盾构隧道管片衬砌结构纵向刚度问题初步研究[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(5): 63—65.
LI Wei. Study on the longitudinal rigidity of segment lining of shield tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008, 25(5): 63—65.
- [7] 廖少明, 侯学渊, 彭芳乐. 隧道纵向剪切传递效应及其一维解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1110—1116.
LIAO Shao-ming, HOU Xue-yuan, PENG Fang-le. Longitudinal shear transfer of tunnel and its 1D analytical solution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1110—1116.
- [8] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学地下建筑与工程系, 2005.
- [9] 赵慧岭, 献柳, 勇袁. 软土隧道长期沉降的纵向作用效应研究[J]. 特种结构, 2008, 25(1): 79—83.
ZHAO Huiling, LIU Xian, YUAN Yong, et al. Effect of long-term settlement on longitudinal mechanical performance of tunnel in soft soil[J]. *Special Structures*, 2008, 25(1): 79—83.
- [10] 黄宏伟, 徐凌, 严佳梁, 等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 11—18.
HUANG Hong-wei, XU Ling, YAN Jia-liang, et al. Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(1): 11—18.