



盾构隧道横向刚度有效率研究

黄宏伟, 徐 凌, 严佳梁, 余占奎

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 对现有国内外盾构隧道横向刚度有效率的取值进行了整理分析, 认为目前通错缝隧道刚度有效率的取值常凭经验判定, 缺少足够的验证。基于二环盾构隧道相似结构模型加载试验的结果以及相关研究成果, 发现隧道加载时变形与荷载存在着明显的线弹性关系, 隧道刚度有效率为一常数, 符合修正惯用设计法的理论基础。对上海地铁盾构隧道的研究表明, 通缝拼装时刚度有效率为 0.67, 错缝拼装时刚度有效率为 0.75, 软弱土体抗力对隧道有效刚度的影响可以忽略。通过与已有经验公式、结构试验结果比较, 表明相似模型结构试验具有简单、可操作性强、数据丰富、结果可信、经济的特点, 可成为研究通错缝拼装盾构隧道刚度有效率的较理想方法。

关键词: 盾构隧道; 有效刚度; 相似结构; 模型试验; 通错缝

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)01-0011-08

作者简介: 黄宏伟(1966-), 男, 山西芮城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程、岩土工程等方面的教学和研究。

Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels

HUANG Hong-wei, XU Ling, YAN Jia-liang, YU Zhan-kui

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: After a detailed discussion on the transverse effective rigidity ratio of shield tunnel, it was shown that the effective rigidity ratio was always an empirical value. Based on the model test of two-ring tunnel structures and the analysis of the test results, some conclusions could be drawn. The relation of deformation of tunnel structure with the load was clearly linear elastic, so the effective rigidity of shield tunnel was constant in elastic stage, which was agreeable to the rule of the modified conventional design method; the effective rigidity ratios of tunnel with nonstaggered and staggered installation were 0.67 and 0.75 respectively for Shanghai Metro; the effect of soil resistance on the effective rigidity of shield tunnel was very small in soft ground. Compared with empirical formulas and structural tests, the model test could be done conveniently, with abundant believable results and economical cost, and would be a good method to study the effective rigidity of shield tunnels.

Key words: shield tunnel; effective rigidity; similarity structure; model test; nonstaggering and staggering pattern

0 前 言

盾构法隧道以其较好的经济技术优势与对相邻环境影响较小的优点在城市轨道交通中得到广泛采用。管片的拼装对盾构隧道的施工进度、日后运营等有着重要影响。上海地铁早期施工的盾构隧道, 通常采用通缝拼装, 而近来错缝隧道已逐渐被广泛应用, 广州地铁、深圳地铁、北京地铁#5线试验段和南京地铁#1线, 皆采用错缝拼装。由于管片拼装方式不同, 其隧道结构计算方法存在差异。设计方法的选择对衬砌结构内力的计算显然是十分重要的, 而这又与隧道用途、周围土层条件状况、荷载等各种条件密切相关, 因此众多文献^[1-7]都介绍了盾构隧道主要的设计方法。对于上海所处的软土地层而言, 日本提出的修正惯用法是一种常用的方法。

修正惯用法是将隧道接头部分弯曲刚度的降低认为是环整体弯曲刚度的降低, 并引入两个参数, 圆环刚度折减系数即刚度有效率 η 和管片弯矩传递系数 ζ , 来考虑管片多接缝造成的管片刚度降低和管片接缝拼装的影响, 即管片环是具有 ηEI ($\eta \leq 1$, EI 为均质隧道横断面抗弯刚度)、且弯曲刚度均匀的环, 同时以 $(1 + \zeta) M$ 为主截面的设计弯矩, $(1 - \zeta) M$ 为接头的设计弯矩。

修正惯用设计法因其概念明确, 计算简便而在国内得到大量采用。计算方法的关键在于计算参数选择的合理性, 显然参数 η 的确定对修正惯用设计法是十

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279032)

收稿日期: 2004-12-13

分重要的,取值是否合理将直接决定了隧道衬砌设计是否合理、经济,此外研究应采用何种合适的方法来获得隧道刚度有效率也具有重大意义。

对目前国内外相关文献进行的总结分析表明目前刚度有效率 η 的选取比较盲目,缺乏试验与工程现场结果的验证,本文将根据室内模型试验的结果,以上海地铁隧道为例,研究刚度有效率 η 的取值以及进行通缝隧道间刚度有效率的比较,并且说明本次相似结构模型试验是研究刚度有效率的简单、实用、经济的方法。

1 隧道刚度有效率

从现有资料分析,隧道刚度有效率的研究主要是隧道刚度有效率的取值及其影响因素。

1.1 隧道刚度有效率的取值

(1) 理论解析

钟小春,朱伟等^[8]选用最大水平位移作为判断准则,采用梁—弹簧模型和修正法分别计算衬砌环的最大水平位移,如两者最大水平位移恰好一致,则因修正法中最大水平位移的计算结果与刚度有效率有关,因此可以得到刚度有效率的数值。据此,钟小春总结出我国地铁盾构隧道衬砌由接头弯曲刚度与管片弯曲刚度之比 λ 得到横向刚度有效率 η 的简单的确定方法。根据他的研究, η 一般在 0.4~0.8 之间,并且管片通缝对刚度有效率的影响很小,甚至错缝比通缝拼装隧道的刚度有效率略小一些。

Lee K M, Hou X Y 等^[9]提出了盾构隧道横向设计方法(弹性铰模型),由该方法得到隧道水平直径或竖向直径的变化,而后不断修正隧道连续圆环的刚度,通过连续圆环模型计算隧道水平直径或竖向直径的变化,当两种方法计算得到的隧道水平直径或竖向直径的变化量十分接近时,此时的刚度即为考虑接头影响的隧道横向等效刚度。Lee K M, Ge X W^[10]据此给出了盾构隧道通缝拼装情况下隧道横向抗弯刚度的有效率 η 与各参数(隧道半径、壁厚、地层抗力系数、接头刚度比等)关系的拟合公式。根据研究他们认为软土地区隧道刚度有效率 η 一般在 0.1~0.6 之间。

因此,目前的研究主要是通过梁—弹簧模型或其它解析方法计算出盾构隧道竖向直径处或水平直径处的变形,以此与修正惯用设计法得到的结果对比,进而得到刚度有效率的数值。但研究大都仅限于通缝一个方面,所得的刚度有效率的计算公式适用于通缝情况,对错缝研究的比较少,或者虽然进行了两者的比较,进行了错缝隧道刚度有效率的研究,但尚未得到比较完善的结果。

(2) 经验取值

表 1 给出了目前资料中对刚度有效率的经验取值,表明目前设计计算时通缝拼装隧道刚度有效率的范围较为广泛,在确定某一隧道刚度有效率时往往只是凭经验判断,缺乏隧道加载试验结果的证实,也缺乏工程数据的验证,不同隧道直径、不同接头、不同土层间的比较不明确。由于刚度有效率直接决定着设计设计是否安全、经济,因此单纯靠经验取值,不能针对具体隧道得到具体的刚度有效率,显然是不太合理的。

表 1 盾构隧道刚度有效率的经验值

Table 1 Empirical value of effective rigidity ratio of shield tunnel

隧道	管片拼装形式	刚度有效率
任意隧道 ^[11]	通错缝	0.25~0.8, 0.6~1.0
上海地铁#2 线隧道 ^[12,13]	通缝	0.7(对纵向刚度)
上海黄浦江某越江隧道 ^[14]	通缝	0.7(对纵向刚度)
上海大连路隧道 ^[15,16]	错缝	0.65~1.0
广州地铁隧道 ^[17]	错缝	0.8
深圳地铁隧道 ^[5]	错缝	0.5
某盾构隧道 ^[18]	未知	0.55、0.65、0.75
任意通缝拼装隧道 ^[19]	通缝	0.65~0.75

(3) 结构试验

在日本,用错缝拼装管片在地面上加载的试验结果显示 η 大致为 0.6~0.8, ζ 为 0.3~0.5,为此日本隧道规范^[7]建议 η 取 0.8, ζ 取 0.3。

日本曾进行过 DPLEX 隧道圆角矩形管片的加载试验^[20, 21],隧道加载模型为二环(0.5 环+1 环+0.5 环),错缝拼装,衬砌环平面尺寸 3.3 m×3.0 m,衬砌厚 175 mm。由试验结果(隧道受荷下的变形)可知,隧道刚度有效率取为 0.8 比较合理,试验结果与隧道刚度有效率取为 0.8 以及采用梁—弹簧模型得到的结果比较吻合,弹性阶段隧道荷载—变形曲线基本为一截距为 0 的直线。

现场加载试验以及室内加载试验的结果固然可信度较高,但不同隧道尺寸、不同隧道接头、不同土层条件下的隧道刚度有效率是不同的,因此以个别条件下隧道加载试验结果为经验进行取值不尽合理,并未考虑到各个盾构隧道的特殊性,并且进行结构加载试验的过程繁琐、复杂而且也不经济。

1.2 刚度有效率的影响因素

对刚度有效率的影响因素已有不少研究,如现有资料^[7, 22]认为影响 η 的主要因素有:管片种类、尺寸、形状,管片接头的结构特性、管片环相互之间的接头方法及其结构特性,也与荷载有关,尤其受周围围岩

的影响特别明显。Lee K M, Ge X W^[10]研究了通缝拼装隧道横向刚度有效率 η 与各隧道参数的关系: 接头刚度比 λ 增大, η 增大; 地层抗力系数 K_s 增大, η 增大; 接头数增多, η 减小; 隧道半径增大, η 增大。黄宏伟等^[23]对隧道通常采用的接头形式、构造及适应性进行归类, 进而对不同接头形式的性能进行分析, 说明不同接头对隧道刚度的影响。但目前的研究对通错缝拼装引起刚度有效率的不同比较的还不多, 定量表示也较少。

2 模型试验

2.1 二环隧道模型简介

为探索通过简单、易行、经济的相似结构模型试验得到上海地铁通错缝拼装盾构隧道横向刚度有效率的可行性, 进行了二环均质、通缝拼装、错缝拼装盾构隧道相似模型结构的受压荷载试验。隧道结构由聚乙烯管 (PE 管) 模拟, 环纵向接头由螺丝+薄塑料片 (PE 片) 模拟。

上海地铁#2 线管片采用通缝拼装, 拼装管片示意图见图 1, 拟采用错缝拼装管片见图 2^[24]。试验选取的主要相似比见表 2 所示, 其中管片材料满足几何相似比与弹性模量相似比的要求, 对隧道环纵向螺栓接头, 主要是将螺栓视为弹簧, 考虑环纵向接头全部的弹性刚度系数相似, 环纵向接头全部的弹性刚度系数

$$K_1 = N \frac{E_1 A_1}{l_1}, \tag{1}$$

式中, N 为环纵向接头总数, E_1 为接头的弹性模量, A_1 为接头的横截面面积, l_1 为接头的长度。

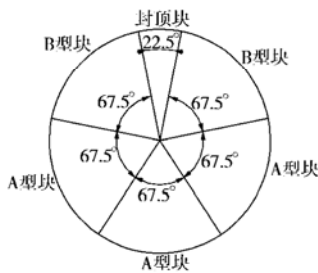


图 1 通缝拼装管片位置图

Fig. 1 Nonstaggered pattern of shield tunnels

并且各相似比之间的关系符合相似试验的基本要求, 即

$$C_{K1} = C_E C_L, \tag{2}$$

$$C_P = C_E C_L^2, \tag{3}$$

式中, C_{K1} 为弹性刚度系数相似比, C_L 为几何相似比, C_E 为弹性模量相似比, C_P 为集中荷载相似比。

原型隧道、相似模型隧道参数如表 3 所示, 原型隧道接头、试验选取的接头片的参数如表 4 所示, 其

主要参数基本符合相似比的要求: 对管片, 管片环外径、厚度和环宽符合几何相似比要求, 弹性模量基本符合弹性模量相似比要求; 对接头, 原型中环纵向 29 个接头与模型中环纵向 24 个接头的弹性刚度系数基本满足弹性刚度系数相似比要求, 如图 3 所示, 模型试验中接头片选择为厚 2 mm、长 17 mm、宽 7.5 mm 的塑料片 (PE 片), 并且开有两个直径均为 3 mm 的孔。

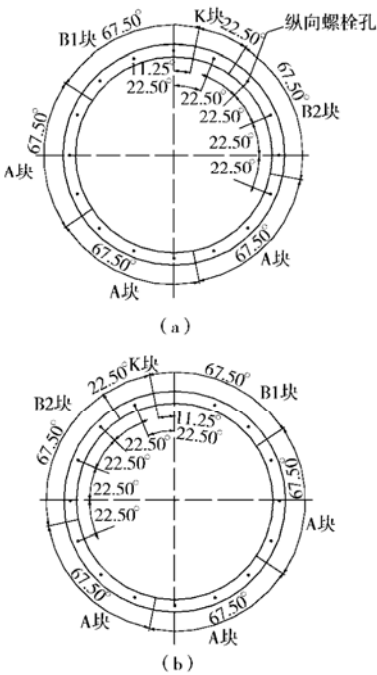


图 2 错缝拼装管片位置图

Fig. 2 Staggered pattern of shield tunnels

表 2 模型试验主要的相似比

Table 2 Similarity ratio of model tests

几何相似比 C_L	弹性模量相似比 C_E	弹性刚度系数相似比 C_{K1}	集中荷载相似比 C_P
38.75	29.36	1137.7	44085.88

表 3 原型隧道、模型隧道参数

Table 3 Parameters of prototype and model tunnels

类型	隧道外径/mm	管片厚度/mm	环宽/mm	弹性模量/MPa
原型隧道	6200	350	1000	3.45×10^4
模型隧道	160	9.5	25.8	1175

表 4 原型隧道接头、模型隧道接头参数

Table 4 Parameters of joints of prototype and model tunnels

类型	环向接头/个	纵向接头/个	直径或宽厚/mm	长度/mm	弹性模量/MPa
原型隧道	12	17	30	400	2.06×10^5
模型隧道	12	12	7.5、2	17	480

在进行相似模型试验时按照图 1, 2 所示的角度切

割并且拼装，通缝管片 6 块管片中关键块所对横断面圆心角为 22.5° ，其余 5 块管片均为 67.5° ，并且在每块管片的四边中间位置各钻一直径 3 mm 的圆孔，以安装螺丝，小孔圆心距每条边的距离为 4.5 mm。

错缝管片 6 块管片中关键块所对的横断面圆心角为 22.5° ，在管片的四边的中间位置各钻一直径 3 mm 的圆孔，用以安装螺丝，小孔圆心距每条边的距离为 4.5 mm；其余 5 块管片均为 67.5° ，并且在一块管片的四边中间位置各钻一直径 3 mm 的圆孔，小孔圆心距每条边的距离为 4.5 mm，在其余 4 块管片的纵缝中间各钻一直径 3 mm 的圆孔，在环缝一侧 $1/3$ 位置处各钻一直径 3 mm 的圆孔，小孔圆心距各边的距离均为 4.5 mm。

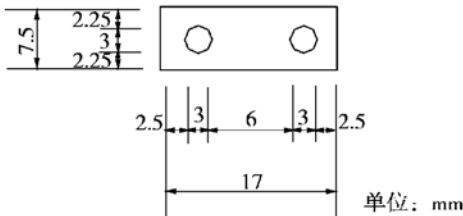


图 3 接头片尺寸

Fig. 3 Dimension of joint

试验中采用长 20 mm、直径 3 mm 的螺丝将接头片与管片相连，图 4、5 所示为管片纵环向的拼装方式，拼装隧道时与螺丝配套的螺母在隧道内侧旋入，拼装过程中确保螺母旋紧。

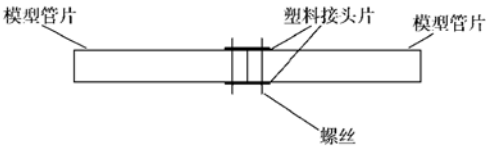


图 4 管片纵向连结方式

Fig. 4 Longitudinal connection of segments

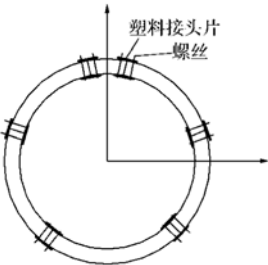


图 5 管片环向连结方式

Fig. 5 Circumferential connection of segments

图 6、7 为拼装完毕的二环通缝错缝模型隧道结构，图 8 为二环均质模型隧道结构。

2.2 试验过程

图 9 为模型隧道横向结构试验布置图，采用砝码

竖向加载，一个砝码为一级荷载，重 375 g，力的作用点与圆环中心的连线与竖直方向的夹角约为 30° ，试验中依次加 5 个砝码即 5 级加载；所用的千分表为机械式千分表，量程为 1 mm，可读至 0.001 mm。试验时管片底部为固定支座。



图 6 二环通缝拼装结构

Fig. 6 Two rings of tunnel with nonstaggered pattern



图 7 二环错缝拼装结构

Fig. 7 Two rings of tunnel with staggered pattern

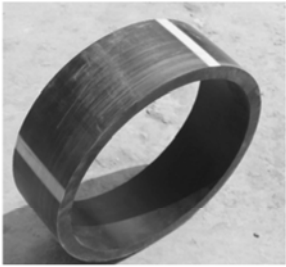


图 8 二环完全均质结构

Fig. 8 Two rings of tunnel without joints



图 9 模型隧道圆环下部固定上部受集中荷载布置图

Fig. 9 Picture of the model tunnel loaded on the top and fixed at the bottom

试验中依次测量并记录在 5 级荷载下二环通缝管

片结构、二环错缝管片结构以及二环均质管片中第一环管片环水平直径、左右 45° 及拱顶 5 个位置的变形。

2.3 试验结果

由于试验结果中二环通缝、错缝、完全均质结构的变形曲线相近, 因此以二环错缝结构变形—荷载曲线为例给出, 如图 10 所示 (图中变形值为负表示向圆环内变形, 变形值为正表示向圆环外变形)。图 10 和表 5、6 中的数值均为已经通过相似比转化后得到的数据。

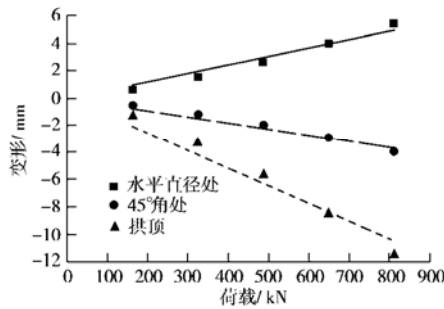


图 10 二环错缝拼装结构变形—荷载图

Fig. 10 Relation between deformation and load of two rings of tunnel with staggered pattern

图 10 中的各变形曲线表示隧道各部位变形与荷载呈线弹性关系 (拟合曲线均为过坐标原点的直线)。

表 5 为二环通错缝隧道、均质隧道变形曲线的斜率, 显然各曲线的斜率之比即为其对应横向抗弯刚度之反比, 因此可以得到通错缝隧道刚度与均质隧道刚度之比即通错缝隧道横向抗弯刚度的有效率, 如表 6 所示。

表 5 各隧道变形曲线斜率

Table 5 Gradient of the fitting deformation curves for the three model tunnels

	水平直径处 拟合曲线	45°角处 拟合曲线	拱顶 拟合曲线
通缝	0.007051	-0.004842	-0.014562
错缝	0.006147	-0.004515	-0.012875
均质	0.004765	-0.003351	-0.009454

表 6 通错缝隧道横向刚度的有效率

Table 6 Effective rigidity ratio of tunnel with nonstaggered and staggered pattern

	水平直径处	45°角处	拱顶	平均
通缝有效率	0.68	0.69	0.65	0.67
错缝有效率	0.78	0.74	0.73	0.75

表 6 表明在现有接头模式的情况下, 通缝情况下隧道横向抗弯刚度的有效率约为 0.67, 错缝情况下刚度的有效率约为 0.75, 错缝拼装比通缝拼装刚度提高约 12%。可以看出目前上海地铁盾构隧道设计中刚度有效率取为 0.7 左右还是比较合理的。

3 模型试验结果分析

3.1 与理论解的比较

在二环加载试验中, 力的作用点与横截面圆环中心的连线和竖直方向的夹角约为 30°, 圆环底端为固端, 则由结构力学知识^[25, 26]可推得单环圆环在上述角度沿长度方向为均布线荷载作用下水平直径处、拱顶及 45° 角位置处最终半径变形值的公式分别为

$$\delta_1 = 0.0576 \frac{F_1 R^3}{EI}, \quad (4)$$

$$\delta_2 = 0.118 \frac{F_1 R^3}{EI}, \quad (5)$$

$$\delta_3 = 0.0478 \frac{F_1 R^3}{EI}. \quad (6)$$

式中 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 为圆环水平直径处、拱顶及 45° 角位置处受荷后最终半径变形值 (m); F_1 为单环圆环所受的荷载 (N); EI 为圆环抗弯刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$); R 为圆环计算半径 (m)。

原型隧道计算半径为 2.925 m, 则单环圆环受荷后水平直径处最终半径变形值的公式为

$$\delta = 0.0117F. \quad (7)$$

式中 δ 为圆环水平直径处受荷后最终半径变形值 (mm), $\delta = \delta_1 \times 1000$; F 为单环圆环所受的荷载 (kN), $F = F_1 \times 1000$ 。

试验结果表明二环均质隧道水平直径处最终半径变形随荷载的变化曲线表达式为 (因试验数据已通过相应的相似比转化为原型隧道情况, 故此变化曲线应为原型隧道时的情况):

$$\delta = 0.004765F', \quad (8)$$

式中, F' 为二环所受总荷载 (kN), 则单环情况下 $F = 1/2 F'$ 。

则均质模型隧道单环时水平直径处最终半径变形随荷载的变化曲线表达式为

$$\delta = 0.00953F. \quad (9)$$

事实上本次试验中所施加的荷载是集中荷载, 而与集中荷载相比, 认为结构所受荷载是沿长度方向的均布线荷载可由结构力学知识容易推导得变形的理论解, 而且模型隧道环宽较小, 因此采用了均布线荷载下的变形公式。式 (7)、(9) 显示试验结果为理论值的 81.5%, 相当接近, 说明试验结果是可信的。同时由式 (4) ~ (6) 知, 理论上圆环受荷后水平直径处与拱顶最终半径变形值之比为 0.49; 圆环受荷后 45° 角位置处与拱顶最终半径变形值之比为 0.40。表 6 中二环加载的结果显示 3 种情况下水平直径处数据均约为各自情况拱顶处变形的 $\frac{1}{2}$, 45° 处数据均约为各自情况拱顶处变形的 $\frac{1}{3}$, 与理论解相当接近, 这也说明

试验数据具有较高的可靠性。

3.2 与现有结论的比较

试验结果表明错缝拼装隧道水平直径处的变形比通缝拼装隧道水平直径处的变形少了 13%。而钟小春, 朱伟等^[27]的计算结果显示在以上海地铁为原型的基本计算条件下, 与通缝型式的衬砌管片相比, 错缝条件下的水平位移减少了 8% 左右。上海地铁隧道#2 线实际采用的是短直螺栓, 而文献^[27]中计算时采用的是弧形螺栓, 因此存在一些差异。

试验结果表明错缝的刚度有效率为 0.75, 弹性阶段隧道荷载—变形曲线基本上为一截距为 0 的直线。与日本进行的二环错缝拼装 DPLEX 隧道圆角矩形管片的加载试验^[20, 21]结果相比, 两者基本相同, 表明试验结果可信, 同时结构的变形与荷载成线性关系, 说明隧道横向刚度在弹性阶段基本为常数, 这也正是隧道修正惯用设计法所要求的。同时, 由于本次试验简单、易行、可控性强、试验数据可靠而且十分经济, 因此通过相似模型结构试验在研究隧道刚度有效率是十分合适的。

相关研究^[28-30]对管片接头刚度的介绍可知地铁隧道管片间旋转弹簧模量 K_θ 可取为 $55000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$, 而接头弯曲刚度与管片弯曲刚度之比

$$\lambda = \frac{K_\theta l}{EI}, \quad (10)$$

式中, λ 为接头刚度比, K_θ 为管片间旋转弹簧模量, l 为隧道管片环宽。

上海地铁#2 线中管片环宽 1 m, 均质隧道横向抗弯刚度为 $12326.56 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 则可得 $\lambda=0.45$ 。

钟小春, 朱伟等^[8]认为通错缝拼装隧道刚度有效率相差很小, 且总结出我国地铁通错缝拼装盾构隧道衬砌由接头弯曲刚度与管片弯曲刚度之比 λ 来得到横向刚度有效率 η 的简单的确定方法:

$$\eta = 0.492 \log \lambda + 0.6644, \quad (11)$$

将 $\lambda=0.45$ 代入式 (11) 可得上海地铁隧道 η 约为 0.49。

本次试验结果表明通缝情况下隧道横向抗弯刚度的有效率约为 0.67, 错缝情况下刚度的有效率约为 0.75, 通缝时的有效率数值与式 (11) 的结果接近, 而错缝拼装却比通缝拼装刚度提高约 12%, 通错缝的刚度有效率并不一致。

LEE K M, GE X W^[10]给出了盾构隧道通缝拼装情况下隧道横向抗弯刚度的有效率 η 与各参数 (隧道半径、壁厚、地层抗力系数、接头刚度比 λ 等) 关系的拟合公式。现上海地铁盾构隧道管片接头的 K_θ 取为 $55000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$, 则 $\lambda=0.45$, $\log \lambda = -0.35$, 因此由文献^[10]可得 η 的计算公式为

$$\eta = 0.236 + 8.549 \times 10^{-7} K_s + 0.1061R -$$

$$0.0477R_l - 0.0119R + 0.0682, \quad (12)$$

式中, K_s 为地层抗力系数, R 为隧道横断面计算半径, l 为管片厚度。

上海地铁中隧道横断面 $R=2.925 \text{ m}$, $l=0.35 \text{ m}$, 不考虑土对隧道的作用, 即 $K_s=0$, 则 η 的计算值约为 0.53, 这与式 (11) 的计算值相近, 而试验结果表明通缝拼装隧道刚度有效率 η 约为 0.67, 计算值约为试验结果的 75%, 比较接近。当 $K_s=10000 \text{ kN}/\text{m}^3$ 时 (与上海代表性的软弱土层的相应数值相当), 式 (12) 的结果为 $\eta=0.54$, 与 $K_s=0$ 时的计算值相差很小, 表明软弱地层对隧道计算刚度的影响较小。

LEE K M, GE X W^[10]的研究只适用于通缝拼装隧道情况, 且对隧道的尺寸、接头数等都有限制, 而本次简单的相似结构加载试验得到了通错缝隧道的刚度有效率, 且加载试验可针对不同的隧道工程进行。

接头片的弹性模量容易求得, 因此本次试验中接头的相似考虑的是接头弹性系数相似而不是旋转模量相似, 试验结果表明通缝隧道的结果与已有计算公式结果接近, 错缝隧道结果与结构模型试验结果接近, 因此试验中考虑接头弹性系数相似是合适的。已有公式只适用于通缝隧道, 与之相比本次试验同时得到了通错缝隧道刚度有效率, 与结构模型试验相比, 本次试验模型制作简单、加载方便、结果同样可靠而且十分经济, 因此通过相似结构模型试验研究通错缝隧道刚度有效率是一种较理想的方法。

4 结论与建议

(1) 本次二环模型隧道试验结果表明模型隧道的变形随荷载是线弹性变化的, 说明隧道刚度为一固定值, 符合修正惯用设计法理论基础。均质隧道模型试验的结果与传统力学公式的计算值吻合, 通缝隧道刚度有效率也与经验公式的计算值接近, 错缝隧道试验结果与结构试验结果相近, 因此本次相似结构模型试验的结果是可信的。

(2) 与以往研究相比, 二环模型隧道加载试验结果可靠、而且同时得到了通错缝隧道刚度有效率, 相似模型结构试验具有简单、可操作性强、数据丰富、结果可信、经济的特点, 因此相似模型结构试验可成为研究通错缝拼装盾构隧道刚度有效率的较理想方法。

(3) 二环模型隧道的模型试验结果表明上海地铁盾构隧道横向刚度有效率经验值为: 通缝拼装隧道取 0.67 左右, 错缝拼装隧道取 0.75 左右, 即错缝拼装比通缝拼装刚度提高约 12%。

(4) 在上海这种隧道下卧层基本为软弱地层时地

层的作用对隧道横向有效刚度的影响较小。

由于本次试验加载方案采用了集中荷载,事实上隧道在土层中承受分布荷载,因此为更好的研究错缝隧道刚度,进行分布荷载加载试验是更好的方法,而相似结构模型因其结构小使得分布荷载施加简便,从而有利于今后进一步的研究。

参考文献:

- [1] 管林星. 考虑盾构隧道施工过程的衬砌内力计算方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.(GUAN Lin-xing. Research on computational method of internal force of shield lining considering construction process [D]. Shanghai: Tongji University. 2004.)
- [2] 朱世友. 国内地铁盾构区间隧道管片结构设计的现状与发展[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 23 - 28. (ZHU Shi-you. Present status and development of segment design for the shield driven running tunnel of metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6): 23 - 28.)
- [3] 王占生, 朱世友. 桩基下地铁隧道管片衬砌分析[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(增刊): 271 - 277. (WANG Zhan-sheng, ZHU Shi-you. Analysis of subway segment lining under a pile foundation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(Supplement): 271 - 277.)
- [4] 丁春林, 刘建国, 宫全美, 肖广智. 盾构隧道管片衬砌内力计算方法比较[J]. 地下空间, 2001, 21(3): 208 - 214. (DING Chun-lin, LIU Jian-guo, GONG Quan-mei, XIAO Guang-zhi. Comparison of calculation methods on internal forces of shield tunnel lining[J]. Underground Space, 2001, 21(3): 208 - 214.)
- [5] 胡如军, 朱伟, 谈小龙. 盾构隧道管片的设计计算方法[J]. 河海大学学报, 2001, 29(增刊): 182 - 185. (HU Ru-jun, ZHU Wei, TAN Xiao-long. Segment design in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University, 2001, 21(Supplement): 182-185.)
- [6] 汪时机. 盾构隧道衬砌结构形式和内力计算方法分析[J]. 矿业科学技术, 2002, (4): 18 - 21. (WANG Shi-ji. Analysis of calculations and styles of shield tunnel lining[J]. Science and technology of mining industry, 2002, (4): 18 - 21.)
- [7] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (Specification and explanation of tunnel (shield tunnel)[M]. ZHU Wei, translator. Beijing: China Construction Industry Press, 2001.)
- [8] 钟小春, 朱伟, 季亚平, 徐洋. 盾构衬砌管片环弯曲等效刚度的一种确定方法[J]. 地质与勘探, 2003, 39(增刊): 185 - 189. (ZHONG Xiao-chun, ZHU Wei, JI Ya-ping, XU Yang. The method to confirm the effective bending stiffness of shield-driven tunnel lining[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(Supplement): 185 - 189.)
- [9] LEE K M, HOU X Y, GE X W, TANG Y. An analytical solution for a jointed shield - driven tunnel lining[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(4): 365 - 390.
- [10] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed shield - driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Journal of Canadian Geotechnical Engineering, 2001, 38: 461 - 483.
- [11] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield-driven tunnels[M]. Beijing: China Railway Press. 1991.)
- [12] 田敬学, 张庆贺. 盾构法隧道的纵向刚度计算方法[J]. 中国市政工程, 2001, (3): 35 - 37. (TIAN Jing-xue, ZHANG Qing-he. Calculation of longitudinal rigidity of shield tunnels[J]. China Municipal Engineering, 2001, (3): 35 - 37.)
- [13] CHEN Bao, WEN Zhu-yin. Elasto-plastic analysis for the effect of longitudinal uneven settlement[C]// Reclaiming the underground space- Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress 2003. Rotterdam: Balkema, 2003.
- [14] 温竹茵, 周质炎. 盾构法隧道的纵向受力分析[J]. 特种结构, 2002, 19(2): 14 - 16. (WEN Zhu-yin, ZHOU Zhi-yan. Analysis of longitudinal stress of shield tunnels [J]. Special Structure, 2002, 19(2): 14 - 16.)
- [15] 肖龙鸽, 薛文博. 盾构隧道管片衬砌的内力分析[J]. 西部探矿工程, 2002, (5): 94 - 96. (XIAO Long-ge, XUE Wen-bo. Analysis of internal forces of shield tunnel segment lining [J]. West-China Exploration Engineering, 2002, (5): 94 - 96.)
- [16] 丁春林, 周书明, 周顺华. 盾构施工对隧道围岩内力和地层变形的影响[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 62 - 65. (DING Chun-lin, ZHOU Shu-ming, ZHOU Shun-hua. Shield construction's influence on the surrounding rock's inner force for the tunnel and stratum deformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(4): 62 - 65.)
- [17] 陈中, 喻渝. 修正惯用设计法在盾构管片结构计算中的应用和体会[J]. 科学技术通讯, 2002, (4): 1 - 7, 25. (CHEN Zhong, YU Yu. Application of modified conventional design method on the design of shield tunnel segment[J]. Communication of Science and Technology, 2002, (4): 1 - 7, 25.)
- [18] 赵国旭, 何川. 盾构隧道管片设计的主要影响因素分析[J]. 铁道建筑, 2003, (12): 25 - 28. (ZHAO Guo-xu, HE Chuan. Analysis of the main influencing factors on the design of

- shield tunnel segment[J]. Railway Construction, 2003, (12): 25 - 28.)
- [19] 张柏林, 余才高. 结合南京地铁探讨盾构隧道设计[C]//城市轨道交通隧道工程最新技术—2003 上海国际隧道工程研讨会论文集. 上海: 同济大学出版社, 2003.(ZHANG Bo-lin, SHE Cai-gao. Study on the design of shield tunnel by Nanjing subway[C]// Proceedings of 2003 Shanghai International Symposium on Tunnel Engineering. Shanghai: Press of Tongji University, 2003.)
- [20] KASHIMA Y, KONDO N, Inoue M. Development and application of the DPLEX shield method: results of experiments using shield and segment models and application of the method in tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 45 - 50.
- [21] 洪代玲, 译. DPLEX 盾构法的开发和应用—模型试验结果及其在隧道施工中的应用[J]. 世界隧道, 1997,(4):14 - 19. (HONG Dai-ling, translator: Development and application of the DPLEX shield method. results of experiments using shield and segment models and application of the method in tunnel construction[J]. World Tunnel, 1997, (4): 14 - 19.)
- [22] KOYAMA Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003,18(2-3):145 - 159.
- [23] 黄宏伟, 严佳梁, 徐 凌. 软土盾构隧道管片环接头的形式及其设计建议[J]. 地质与勘探, 2003,39(增刊):17 - 22.(HUANG Hong-wei, YAN Jia-liang, XU Ling. Design suggestions on joints between longitudinal segments in soft shield tunnel[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(Supplement): 17 - 22.)
- [24] 刘文燕. 盾构法隧道衬砌施工阶段受力性能分析[D]. 上海: 同济大学, 2002.(LIU Wen-yan. Analysis on the mechanical property of the shield tunnel lining during construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.)
- [25] 朱伯钦, 周竞欧, 许哲明. 结构力学(上册)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.(ZHU Bo-qin, ZHOU jing-ou, XU Zhe-ming. Structural mechanics (1)[M]. Shanghai: Press of Tongji University, 1993.)
- [26] 朱伯钦, 周竞欧, 许哲明. 结构力学(下册)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.(ZHU Bo-qin, ZHOU jing-ou, XU Zhe-ming. Structural mechanics (2)[M]. Shanghai: Press of Tongji University, 1994.)
- [27] 钟小春, 朱 伟, 秦建设. 盾构隧道衬砌管片通缝与错缝的比较分析[J]. 岩土工程学报, 2003,25(1):109 - 112. (ZHONG Xiao-chun, ZHU Wei, QIN Jian-she. The comparison of shield tunnel with segment seams in sequence and in stagger[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 109 - 112.)
- [28] 张厚美. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2000,22(3):309 - 314.(ZHANG Hou-mei. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 309 - 314.)
- [29] 潘昌实, 译. 盾构隧道衬砌设计指南(草案)[J]. 世界隧道, 1997,(2):19 - 29.(PAN Chang-shi, translator. Proposed recommendation for design of lining of shield tunnel[J]. World Tunnel, 1997, (2): 19 - 29.)
- [30] 胡志平, 冯紫良, 刘学山, 陈 枫. 盾构隧道管片衬砌结构稳定性风险分析[J]. 同济大学学报, 2004,32(5):596 - 600. (HU Zhi-ping, FENG Zi-Liang, LIU Xue-shan, CHEN Feng. Study on assessment of structure stability in shield tunnel[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(5): 596 - 600.)

2006 年度黄文熙讲座报告会通知

2006 年度黄文熙讲座报告会定于 2006 年 1 月 10 日在南京举行, 现将 2006 年度黄文熙讲座报告会的具体事项通知如下, 热烈欢迎全国各行业的岩土工作者参加。

1. 会议时间: 2006 年 1 月 10 日上午 9: 00~12: 00, 下午 13: 30~17: 00
2. 会议地点: 中国南京广州路 223 号南京水利科学研究院国际会议厅
3. 主讲人: 李广信(2006 年黄文熙讲座撰稿人, 清华大

学教授)

4. 讲座题目: 土的清华弹塑性模型及其发展
5. 报告会上还将邀请国内一些岩土工程专家学者作相关内容的学术报告
6. 食宿 会议安排食宿, 费用自理。住宿酒店: 瑞迪大酒店。
7. 联系方式 电话 025 - 85829534, 85829553; 传真: 025 - 85829555; E-mail: jpming@nhri.cn; 联系人: 明经平。

《岩土工程学报》编辑部
南京水利科学研究院岩土工程研究所