

大连地铁盾构开挖地层移动规律的模型试验研究

朱训国^{1,2}, 陈 枫^{1,2,3}, 徐孟林^{1,2}, 赵德深^{1,2}

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测与控制辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116622;
3. 浙江大学 水工结构与水环境研究所, 杭州 310000)

摘 要: 以大连市地铁 2 号线 202 标段工程为研究对象, 通过相似材料模型试验绘制不同地层随时间沉降曲线, 即同一时刻不同地层沉降槽曲线和不同地层水平位移曲线, 得到盾构隧道施工地层移动规律。试验结果表明, 不同地层各测点的垂直位移随时间的变化可用以时间为自变量的负指数函数表示; 先行隧道施工对地层产生扰动, 引起地层软化, 导致两条隧道之间地表沉降明显叠加, 沉降较大; 隧道开挖时, 若存在地下结构或管线, 其将受到附加剪切作用, 易出现裂缝, 在施工中必须做好切实可行的防护措施。

关 键 词: 相似模型试验; 沉降槽曲线; 水平位移; 垂直位移; 地层移动规律

中图分类号: U 42

文献标识码: A

Study of strata movement law through similar model test in the Dalian city subway shield tunnelling

ZHU Xun-guo^{1,2}, CHEN Feng^{1,2,3}, XU Meng-lin^{1,2}, ZHAO De-shen^{1,2}

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China;

2. Provincial Key Laboratory for Disaster Predicting and Controlling of Complex Structural System, Dalian University, Dalian, Liaoning 11662, China;

3. Institute of Hydraulic Structures and Water Environment, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: It is obtained the strata movement law under shield tunnelling construction engineering through similar material model test to monitor the curves over time that the different strata settlement trough and horizontal displacement at the same time taking the No.202 tender of No.2 line in Dalian city subway project as the studying object. The results show that the vertical displacement change of the monitoring points for the different strata can be fitted negative with exponential function. The ground strata disturbance has been produced because the first constructing tunnel and resulting as the ground softening; and the surface settlement of the two tunnels is obviously superimposed larger settlement. The existed underground structures or pipelines will prone to cracks subjected additional shearing when tunnel excavating, so that must taking effective protective measures.

Key words: similar model test; settlement trough curve; horizontal displacement; vertical displacement; strata movement law

1 前 言

由于地铁施工引起的地层移动给人们的生活造成巨大的影响, 逐渐受到科研人员的关注和研究。在岩土工程中, 通常依据相似理论, 对工程原型按一定的比例缩小进行相似材料模拟试验, 用物理模型模拟的方法研究工程中的真实情况。

目前利用相似材料模拟试验的研究很多, 朱合华等^[1]、徐前卫^[2]结合国家 863 计划“盾构及地层

适应性相似模拟方法和试验平台研究”的课题, 分别以北京地区典型砂土地层和上海地区的软土地层中土压平衡盾构的掘进施工为背景, 开展了盾构施工参数和地层物理力学特性之间的适应性模型试验研究, 从理论上对土体-盾构的相互作用规律, 以及盾构各工作参数之间的内在联系作了初步探讨, 但运用此法对地铁盾构开挖引起地层移动规律的研究较少, 本文基于这种方法, 对其地层移动规律进行深入研究。

收稿日期: 2012-10-04

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 51009015/E090705, No.51274051/E0409); 辽宁省教育厅科学技术基金资助 (No. L2012450); 大连大学博士专项基金资助 (No. 08-6)。

第一作者简介: 朱训国, 男, 1974 年生, 博士, 主要从事地下工程稳定性与防灾减灾等研究。E-mail: zhu_xunguo@hotmail.com

2 工程概况

大连市地铁 2 号线 202 标段工程包括春光街、香工街两站及促进路-春光街-香工街-沙河口三区间，线路全长 2.9 km，盾构区间 2.3 km，两隧道线距约 10 m，埋深约 15 m。基本地质情况，如地质柱状见图 1。

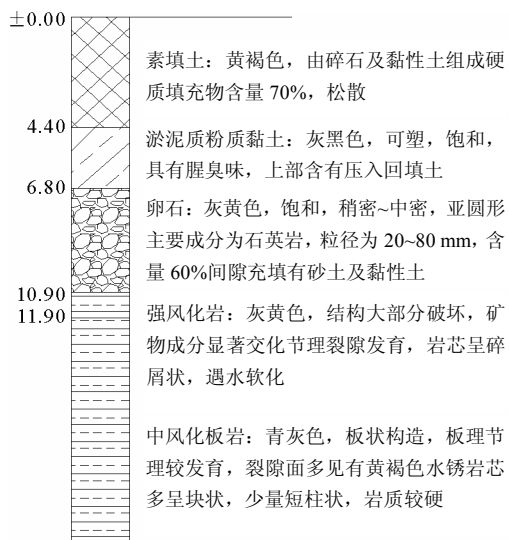


图 1 施工区间的地质柱状图 (单位: m)

Fig.1 Geological histogram of shield tunneling stratum(unit: m)

盾构管片衬砌内径为 5 400 mm，外径为 6 000 mm，管片宽 1 200 mm。每环衬砌管片包括 3 块标准片、2 块临接片和 1 块封顶片。衬砌管片看作均质混凝土筒状圆环，采用 C50 混凝土，抗渗等级为 S12。衬砌管片安装时盾尾同步注浆，盾尾断面如图 2 所示。

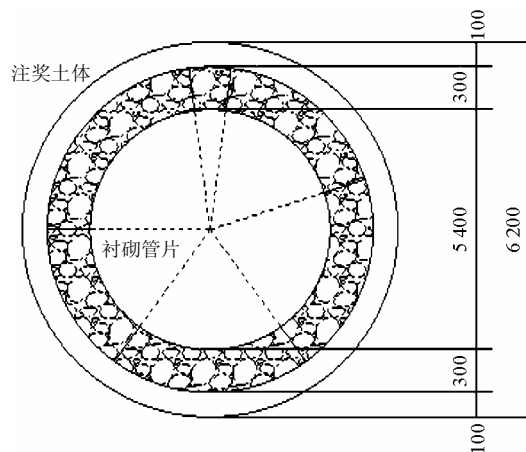


图 2 盾尾断面示意图 (单位: m)

Fig.2 Cross section of shield tail(unit: m)

根据地勘报告和现场试验，施工区间地层及衬砌管片的力学参数见表 1。

表 1 土体和管片原型与物理模型力学参数

Table 1 The mechanical parameters of prototype and physical model for soil and tunnel segment

类型	原型厚度 /m	模拟厚度 /cm	原型重度 /(kN/m ³)	模拟重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /MPa	模拟弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	模拟黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
素填土	4.4	8.8	16.5	10.30	20	0.250	0.38	11.0	0.138	12.9
黏土	2.4	4.8	18.0	11.25	23	0.290	0.30	20.8	0.260	25.3
卵石	4.1	8.2	19.5		25	0.310	0.30	43.0	0.538	24.6
强风化岩	1.0	2.0	24.8	12.20	30	0.375	0.25	36.0	0.450	34.3
中风化板岩	24.1	48.2	25.3	15.80	46	0.575	0.23	60.0	0.750	37.8
注浆土体			20.0	12.50	120	1.500	0.30	300.0	3.750	32.1
衬砌管片	0.3		25.0	15.63	35 000	437.500	0.15			

3 物理模型试验

3.1 参数确定

(1) 模拟相似比的确定

根据模型及工程实际情况确定的几何相似比^[3]:

$$a_l = \frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{50}; \quad a_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} = \frac{1}{1.6} \quad (1)$$

应力、弹模、黏聚力、强度等相似比:

$$a_\sigma = a_\tau = a_c = a_E = a_{[\sigma]} = a_\gamma a_l = \frac{1}{80} \quad (2)$$

时间相似比:

$$a_t = \sqrt{a_l} = \frac{1}{7.07} \quad (3)$$

上部采用荷载铁块、荷载袋及千斤顶外荷载、支架阻力及支承压力等力相似比:

$$a_F = a_N = a_f = a_\gamma a_l^3 = \frac{1}{2 \times 10^5} \quad (4)$$

（2）模型尺寸确定

根据实际工程工作面长度及隧道埋深，结合实验台比尺（长×高×宽）为 2.8 m×2.0 m×0.3 m，根据相似理论计算得出的相似比，建立二维相似模型，尺寸（长×高×宽）为 2.80 m×0.78 m×0.30 m。模型中，隧道半径为 0.12 m，相当于实际 6 m，两隧道边距为 0.20 m，相当于实际 10 m，实验模型见图 3。



图 3 室内物理实验模型
Fig.3 The indoor physical test model

3.2 材料选取及配制

相似材料选用石英砂和云母作为制作模型的骨料，以石灰和石膏作为胶结材料，选硼砂作为缓凝剂，相似材料配比是按不同的材料组分组合而成，以使其达到模拟某种土体的目的。

借鉴参考文献中对实验材料配比的理论和具体实例，笔者对材料配比，进行了大量的系统实验和研究，共做试件 162 块，通过整理分析得到了不同模型实验材料的配比。



图 4 配比材料压缩试验
Fig.4 The compression test for simulated material

强度试验中采用 WE-2 试验机加载，加载速率为 2 mm/s，测定试块的单轴抗压强度，试件为 8 cm×4 cm×4 cm 的长柱体。考虑到试验时的离散性和偶然性，每组试件做 3 块，按不同配比计算各种材料所需量。把所需材料按比例配好，搅拌均匀，用量筒或量杯加入所需水量，迅速搅匀，每块分量均匀铺入试模内压缩至所需重度体积，然后放到平

整木板上，自然养护风干后脱模即成试件，材料压缩试验见图 4。

试验结果取平均值，得出砂胶比。根据模型的主要岩性参数有重度和抗压强度，依据相似理论，选取相似材料配比^[3]。相似材料物理参数见表 1。各土层相似材料配比见表 2。

表 2 砂子、石灰、石膏相似材料配比表
Table 2 Similar materials test table of sand, lime and gypsum

土层	材料配比(砂子：石灰：石膏：云母：水)
素填土	8.0：0.7：0.2：0.1：1.0
粉质黏土	8.0：0.5：0.2：0.1：1.0
卵石	8.0：0.5：0.3：0.2：1.0
强风化岩	8.0：0.4：0.4：0.2：1.0
中风化岩	8.0：0.4：0.6：0.1：1.0
衬砌管片	6.0：1.5：0.3：0.0：1.0

3.3 实验观测方法设计

土体内部应力采集采用预埋设微型压力传感器 BW11—2，灵敏度为 0.01 kPa，外连 YE2539 高速静态数据采集系统。传感器非等间距布置，靠近隧道开挖位置较密，远处较疏。压力传感器布置见图 5。

$$\left. \begin{aligned} H &= a \sqrt{\frac{\psi_H^2}{1 - \psi_H^2 - \psi_V^2}} \\ V &= a \sqrt{\frac{\psi_V^2}{1 - \psi_H^2 - \psi_V^2}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

模型表面位移测量采用画网格线方式，采用 DJ6 经纬仪测量各网格线交点对固定位置点角度变化^[4]，位移计算如图 6 所示，采用换算式（5）换算成位移来反映模型变形规律。图中， $OO' = a$ 为经纬仪到其在模型表面的距离，测设得出 OO' 的长度，通过经纬仪测出任一点 $P(H, V)$ 的水平角 ψ_H 和竖直角 ψ_V ，通过式（5）计算 P 点的坐标值。土体应力及模型表面位移量测方式见图 7、8。

模型制作完成后，应力传感器对土层应力进行连续性监测，待应力场稳定 1 d 后，进行位移监测，然后进行开挖^[5]。采用先左后右的开挖方式，间隔时间为 24 h（相当于实际施工中的 7 d），一步挖通，及时安装支护环，并位移量测。开挖及支护完成后进行连续性观测，位移观测时间间隔为 4 h（相当于实际施工中的 28.3 h），应力时间观测间隔为 30 min，隧道开挖的同时采集试验数据。开挖及支护完成后的模型见图 9。

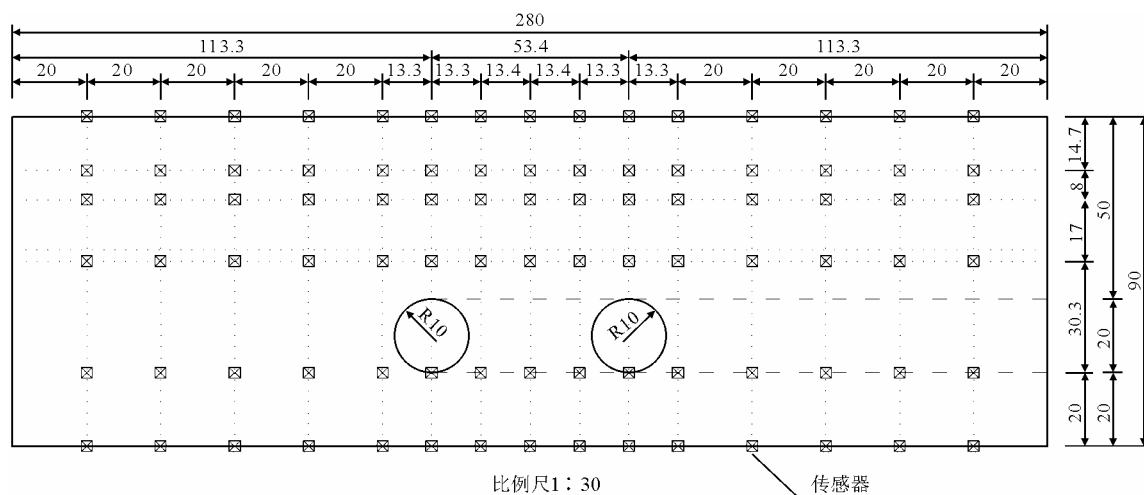


图 5 压力传感器布置 (单位: cm)

Fig.5 Layout of pressure sensors for model(unit: cm)

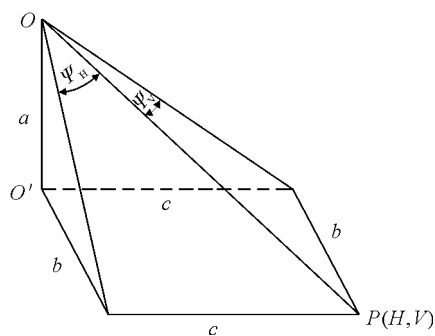


图 6 位移计算示意图

Fig.6 Sketch of calculating displacement



图 9 模型及测点布置

Fig.9 The 2D model and monitoring points placement



图 7 土体应力传感器量测

Fig.7 Stress measurement for model



图 8 模型表面位移量测

Fig.8 Displacement measurement for model

4 模型试验监测结果分析

隧道开挖后经过 200 h 的连续监测, 得到了大量的试验数据, 经过整理, 研究地层的垂直位移和水平位移变化规律以及土层沉降槽形态发展。

4.1 地层竖向位移随时间的沉降变化规律

选取测点 C2、D2、E2 和 C5、D5、E5, 研究分析地层竖向位移随时间沉降变化规律, 其监测结果如图 10 所示。从图可见, (1) 2#线中 C、E 两点的垂直位移沉降随时间变化的规律基本相同, 但与 D 点的变化规律差异较大。C、E 两点的沉降速率在 0~10 h 内较大, 但 10~20 h 内 E 点的沉降速率明显小于 C 点。监测时间 60 h 后, 两点的沉降速率基本相同。对于 D 点, 0~10 h 内的沉降速率明显比 C、E 两点大的多; 10~20 h 内的沉降速率反而较 C、E 两点小; 20~30 h 的沉降速率较 C、E 两点明显增大很多, 说明此阶段 C、D、E 相同时间内垂直沉降的位移量具有很大的差异; 30 h 后, C、D、E 3 点的沉降速率基本相同。(2) 5#线中 C、E 两点的垂直位移沉降随时间变化的规律几乎完全一致, 但

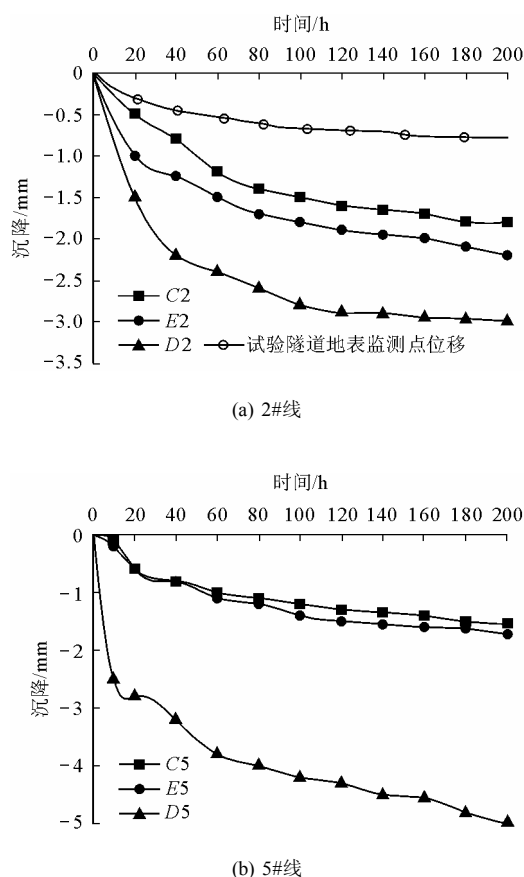


图 10 地层随时间沉降曲线
Fig.10 Time and settlement curves

与 D 点的变化规律差异性更大。 C 、 E 两点的沉降速率在 $0\sim 20$ h 内较大,但 $20\sim 40$ h 内 C 、 D 、 E 三点的沉降速率差异不大,可以认为沉降速率相同; 40 h 后 C 、 E 两点的垂直位移沉降速率又基本相同,但 D 点的沉降速率明显要比 C 、 E 两点的垂直位移沉降速率大。(3) 针对上述观测结果,可用以下理论解释:隧道开挖,导致地层的初始地应力状态发生了改变,由于地应力的从平衡状态向不平衡状态发展,因此地层发生相应的变化。对应于开始阶段 ($0\sim 10$ h), $2\#$ 线 C 、 D 、 E 三点的沉降速率虽然不尽相同,但整体变化规律是一致的, D 点 $10\sim 20$ h 内的沉降速率较 C 、 E 两点小; $20\sim 30$ h 的沉降速率较 C 、 E 两点明显增大很多,是由于 D 点位于隧道拱肩上方,隧道开挖形成临空面,隧道承压拱能的土体在重力作用下向临空区移动; $40\sim 60$ h 之间,地层的应力进行重新分布,由于施加了衬砌,抑制了地层的变形,使地层速度一度放慢; 100 h 之后,由于应力重新分布后的固结沉降,土体竖向变形速率开始下降,最终土层趋于稳定。(4) 地层竖向位移的最大值点在隧道轴线处附近,而非两隧道的连线的中心,充分说明了两隧道间土体的支柱作用,

施工时较大的两隧道间距能有效减小共同扰动。 $2\#$ 线地层中 C 、 E 点的竖向位移值大于 $5\#$ 地层 C 、 E 点的竖向位移,这与经验公式分布规律、数值计算及理论分析一致^[6],但 $2\#$ 线地层中 D 点的竖向位移小于 $5\#$ 线地层中 D 点的竖向位移。同时,上述沉降/时间曲线,可以用一指数递减函数来拟合(图中串相应沉降随时间变化曲线)。

上述模型试验所测监测点的沉降位移变化趋势,与 202 标段的试验隧道现场地表所测相应点的变化趋势是一致的,图 10 中地表监测点的相应位移数据充分说明了这个问题。由于并非是一层一致点的监测数据,不能进行简单的对比分析,但其变化趋势是一致的,由此也验证了模型的正确性。

4.2 不同深度地层竖向位移移动规律研究

拟合各层测点双线隧道支护完成后的竖向位移可以得出地层的沉降槽曲线,图 11 为 $2\#$ 、 $5\#$ 水平线在不同时间的沉降槽曲线。

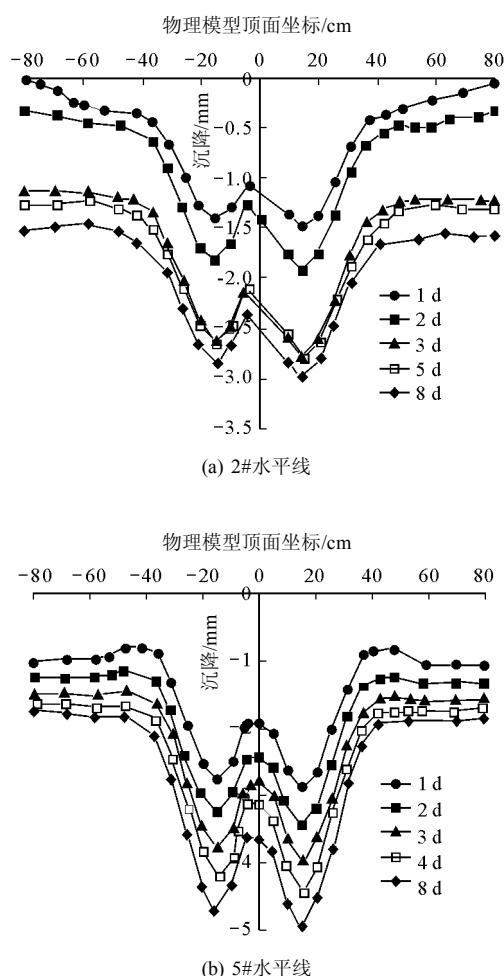


图 11 地层水平线沉降槽曲线
Fig.11 Settlement trough curves of horizontal lines #2 and #5

由图可以看出, 各地层沉降槽曲线呈现“双峰”特征, 距离地表深度越大, “双峰”呈对称的趋势越明显。2#水平线的地层在隧道施工完成后的前 3 d 内, 地层沉降幅度较大, 能达到 70%~80%最大沉降量, 之后, 各测点的沉降幅度变小并趋于一致。前期沉降是由于隧道开挖直接扰动土体所致, 后期沉降则是土体应力场及位移场重新调整, 达到平衡后的结果^[7], 同时, 前期沉降扰动土层的位移变化非常明显, 持续时间较短, 后期沉降则速率缓持续时间较长。5#水平线的地层变化规律, 具有和 2#水平线的地层变化规律类似的特点, 但 5#水平线前 3 d 的沉降占前 5 d 沉降总量的比例要大于 2#水平线相应数据。

图 12 为同一时间不同层深沉降槽曲线。由图可以看出, 隧道正上方不同地层的沉降差异值较大, 沉降值随深度增加而增大, 而沉降槽宽度随观测深度的增加而减小, 沉降槽半宽约为 30 cm。由此可以得出双孔隧道盾构施工引起的地层移动的规律: 两条隧道的沉降曲线类似两个单线的叠加, 沉降槽曲线变宽加深。先行隧道地表沉降槽曲线呈典型的正态分布, 宽度和深度较小, 后行隧道地表沉降槽明显不对称, 先行隧道一侧沉降较大, 是由于先行隧道施工对地层产生扰动, 引起地层软化所致, 两条隧道之间地表沉降明显叠加, 沉降较大。

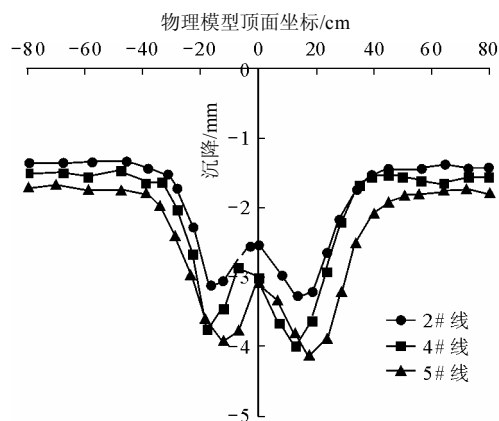


图 12 同一时刻 (3 d) 不同地层沉降槽曲线
Fig.12 Curves of different strata settlement trough at the same time(third day)

4.3 不同深度地层水平位移移动规律分析

地表下地层水平位移变化极其复杂, 与地层的位置、隧道的布置、施工情况等因素有关。

图 13 为不同深度地层的水平侧向位移曲线。由图可见, 土层各测点水平侧向位移在隧道开挖完成后有向中心靠拢的趋势, 侧向位移变化范围约为 $-0.6 \sim 1.0$ mm。2#、4#线地层水平位移的极值点出现

在离两隧道中心线左右 20 cm 的位置, 如以坐标原点为对称点, 则其变化趋势有一定的对称性, 但数值不成对称性。5#线地层的水平位移与 2#、4#线不同, 其左洞的最大水平位移点大约处于两洞中心线左侧 15 cm 处, 而右洞的最大水平位移点反而与 2#、4#线基本相同。

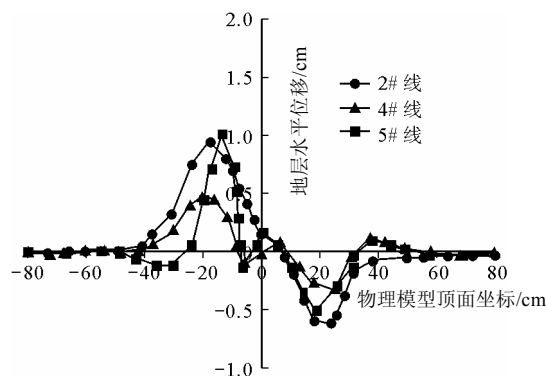


图 13 第 3 天不同地层水平位移曲线
Fig.13 Curves of different strata horizontal displacement at 3rd day

对比分析各地层的侧向位移曲线, 较深地层, 即 5#线地层侧向水平位移变化复杂。两隧道中间土体的侧向位移变化不具有 consistency, 在隧道两侧上方的测点水平位移变化最为剧烈, 即 $X = \pm 5, \pm 30$ cm 处, 在图 13 中 2#、5#水平线的侧向位移曲线在以上位置处具有反向性, 具有如此剪切运动特性的土层叫做“剪切层”, 具体原因是隧道开挖直接引起附近土体的土体间隙^[8]。

此外, 左右最大侧向位移并不等值反向, 先开挖一侧 (左侧) 的侧向位移极值要略大于后开挖一侧 (右侧), 这主要是先期位移影响的结果。

通过以上分析可以得到不同深度地层水平位移移动规律: (1) 左右平行布置的两隧道相向施工, 不同深度的地层水平位移是不对称的, 靠隧道侧的水平位移因另一隧道的影响而明显减小; (2) 左右平行布置的两隧道盾构同向不同时开挖, 两隧道轴线之间水平位移很小, 在两洞轴线上水平位移随深度近似成线性递减, 对称轴线上的水平位移不再为 0; (3) 2#、5#水平线的地层出现较明显的剪切层, 如果在此区域有桩基、剪力墙等结构物, 那么在隧道开挖时将受到附加剪切作用, 最容易出现裂缝, 在施工中应做好切实的防护措施。

5 结 论

(1) 不同地层各测点的垂直位移随时间的变化可以用以时间为自变量的负指数函数表示。

(2) 对于相同地层不同测点而言, 不同测试时间内的垂直位移沉降速率不同, 前期沉降速率达, 后期沉降速率低; 对于不同地层相同测点而言, 不同测试时间内的垂直位移沉降速率也不相同, 距地表较浅地层的沉降速率大于较深地层的沉降速率。两条隧道的沉降曲线类似 2 个单线的叠加, 沉降槽曲线变宽加深。先行隧道地表沉降槽曲线呈典型的正态分布, 宽度和深度较小, 后行隧道地表沉降槽明显不对称, 先行隧道一侧沉降较大, 是由于先行隧道施工对地层产生扰动, 引起地层软化所致, 两隧道之间地表沉降明显叠加, 沉降较大。左右平行布置的两隧道盾构同向不同时开挖, 两隧道轴线之间水平位移很小, 在两洞轴线上水平位移随深度近似成线性递减, 而对称轴线上的水平位移不再为 0。2#、5#水平线的地层出现较明显的剪切层, 如果在此区域有桩基、剪力墙等结构物, 那么在隧道开挖时将受到附加剪切作用, 最容易出现裂缝, 在施工中应做好切实的防护措施。

参考文献

- [1] 朱合华, 徐前卫, 傅德明, 等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1437—1441.
ZHU He-hua, XU Qian-wei, FU De-ming, et al. Study on design principle of shield machine applicable to different strata[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1437—1441.
- [2] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [3] 林韵梅. 实验岩石力学模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [4] 康建荣, 王金庄. 相似材料模拟试验经纬仪观测方法分析[J]. 矿山测量, 1999, 27(1): 43—46.
KANG Jian-rong, WANG Jin-zhuang. Theodolite observation of displacement of similarity material in simulation test method and analysis[J]. **Mine Surveying**, 1999, 27(1): 43—46.
- [5] 汪恩清, 丁世敬. 土应力传感器动态匹配误差理论研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 78—83.
WANG En-qing, DING Shi-jing. The investigation for dynamic matching error in the registration of soil pressure cells[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 78—83.
- [6] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [7] 孙广忠. 岩体力学的进展——岩体结构力学[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(2): 112—116.
SUN Guang-zhong. Advance in rockmass mechanics——Rockmass structural mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1991, 10(2): 112—116.
- [8] 蒋建平, 章杨松, 阎长虹, 等. 地下工程中岩移的断层效应探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1257—1262.
JIANG Jian-ping, ZHANG Yang-song, YAN Chang-hong, et al. Study on strata displacement under fault effect in underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1257—1262.
- [21] 陈海明, 班凤其, 刘小伟. 非饱和土抗剪强度指标 c 、 φ 值与含水率 w 的关系[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2006, 29(6): 736—738, 746.
CHEN Hai-ming, BAN Feng-qi, LIU Xiao-wei. Relationship between water content ω and unsaturated soil shear strength indices c and φ [J]. **Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)**, 2006, 29(6): 736—738, 746.
- [22] 胡展飞, 傅艳蓉. 基于不同初始含水率的软黏土抗剪强度的试验研究[J]. 上海地质, 2001, 77(1): 38—42.
HU Zhan-fei, FU Yan-rong. Experimental study of the shear strength of soft soil with different initial water content[J]. **Shanghai Geology**, 2001, 77(1): 38—42.

上接第 126 页