

# 岩溶区不同围岩加固方案下盾构隧道列车 振动荷载响应研究\*

邹仁高<sup>1</sup> 谢建斌<sup>1,2\*\*</sup> 李明卓<sup>1</sup> 魏胜斌<sup>1</sup> 许 坤<sup>1</sup>

(1. 云南大学建筑与规划学院, 650500, 昆明; 2. 昆明军龙岩土工程有限公司, 650021, 昆明//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 目的:研究岩溶区土岩复合地层中不同围岩加固方案下,地铁盾构隧道在列车运行荷载作用下的动力响应,以评估不同围岩加固的可靠性。方法:基于岩溶专项勘察成果和有限元分析方法,依托岩溶区昆明地铁4号线联大街站—吴家营站区间盾构隧道,建立相应岩溶区土岩复合地层地铁盾构隧道的有限元模型,分析隧道运营100年后的累计沉降。结果及结论:各围岩加固方案均可减少列车动力荷载作用下地铁盾构隧道的位移、应力和加速度,其中采用洞外围岩全断面注浆加固方案的效果最好;采用隧道两侧注浆加固围岩时,隧道运营100年后的沉降不满足不均匀沉降要求;为保证岩溶区土岩复合地层地铁盾构隧道的安全运营,应选择在地铁盾构隧道外侧全断面注浆加固隧道围岩。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 围岩加固; 动力响应; 列车荷载; 长期沉降

**中图分类号** U458.1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.09.028

## Vibration Load Response of Shield Tunnel Trains under Different Surrounding Rock Reinforcement Schemes in Karst Area

ZOU Rengao, XIE Jianbin, LI Mingzhuo, WEI Shengbin, XU Kun

**Abstract** **Objective:** It is aimed to study the dynamics response of metro shield tunnel under train operation load when different surrounding rock reinforcement schemes are adopted for soil-rock composite strata of Karst areas, and to evaluate the reliability of different surrounding rock reinforcement. **Method:** Based on the results of Karst-specific field investigations and finite element (FE) analysis, taking the Liandajie Sta.-Wujiaying Sta. shield tunnel interval of Kunming Metro Line 4 built in Karst area, a FE model is established corresponding to metro shield tunnel in soil-rock composite strata of

Karst areas. The cumulative settlement of the tunnel after 100 years of operation is analyzed. **Result & Conclusion:** All the surrounding rock reinforcement schemes can reduce the displacement, stress and acceleration of the metro shield tunnel under train dynamic load, among which the external surrounding rock whole-section grouting reinforcement scheme performs the best. When the surrounding rock is reinforced by grouting on both sides of the tunnel, the tunnel settlement after 100 years of operation may not meet the requirements of uniform settlement. To ensure the safe operation of metro shield tunnels in soil-rock composite strata of Karst areas, the reinforcement scheme of full-section grouting on the outer side of metro shield tunnel is recommended.

**Key words** metro; shield tunnel; surrounding rock reinforcement; dynamics response; train load; long-term settlement

**First-author's address** School of Architecture and Planning, Yunnan University, 650500, Kunming, China

云南省全省岩溶分布面积约占30%<sup>[1]</sup>,昆明市近滇池侧除有岩溶分布外,还广泛分布着泥炭质土等软土,昆明市邻近滇池侧的地铁隧道常需穿越泥炭质土-岩溶交接分布的软硬复合岩土层。岩溶区溶洞的分布、形态、填充程度,以及土岩复合地层中土、岩分布不同等因素,严重影响昆明地铁盾构隧道施工,增加了隧道施工难度及安全隐患<sup>[2]</sup>。文献<sup>[3]</sup>基于南京地铁沉降监测数据,采用有限元法研究了列车运行振动荷载作用下粉细砂地层中地铁动力响应及长期沉降变形。

为研究岩溶区土岩复合地层地铁盾构隧道结构长期运营的累计沉降,本文依托昆明地铁4号线

\* 国家自然科学基金资助项目(11862024,51264037);云南省教育厅科学研究基金项目(2022Y063);云南大学专业学位研究生实践创新项目(2021Z17)

\*\* 通信作者

某区间工程<sup>[4]</sup>,基于岩溶专项勘察成果和有限元分析方法,研究了岩溶区土岩复合地层不同围岩加固时,地铁盾构隧道结构在列车运行荷载作用下的动力响应,并对隧道运营 100 年后隧道结构基底的累计沉降进行了预测分析。

1 工程概况

昆明地铁 4 号线连接昆明主城与呈贡新区,线路自西北向东南穿越整个昆明盆地。本文选择 4 号

线联大街站—吴家营站区间地铁盾构隧道为研究对象,该段里程为 YDK40 + 853. 97—YDK40 + 973. 97。该区间位于滇池东侧,属较典型的滨湖相与河流交汇沉积地貌。勘探揭示该区间为较典型的“上软下硬”土岩复合地层,区间内共有 7 处溶洞,其中左线隧道 1 个、右线隧道 6 个。所有溶洞均为全填充,填充物以⑪<sub>1,2</sub>硬塑状黏性土为主。各岩土层及溶洞填充物的物理力学参数见表 1。

表 1 岩土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock-soil mass

土层名称及编号	天然重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	动弹性模 量/MPa	动剪切模 量/MPa	纵波波速 值/(m/s)	剪切波波速 值/(m/s)
① <sub>2</sub> 杂填土	18.0	1.10	0.38	12	8	88.87	30.57	413.83	126.67
② <sub>1,2</sub> 黏土	17.8	1.23	0.31	25	12	241.67	85.43	559.67	210.67
③ <sub>1</sub> 黏土	18.5	1.00	0.35	25	10	224.50	97.00	544.00	205.00
⑥ <sub>1,2</sub> 黏土	19.2	0.83	0.30	30	13	297.50	106.00	584.50	235.00
⑥ <sub>4</sub> 泥炭土	17.5	1.02	0.38	15	7	123.00	43.00	476.00	159.60
⑧ <sub>1,2</sub> 黏土	19.2	0.85	0.30	30	13	371.33	132.00	643.00	255.50
⑪ <sub>1,2</sub> 硬塑状黏土	19.2	0.83	0.44	20	28	136.00	47.50	493.50	178.50
⑭ <sub>1,3</sub> 白云岩夹灰岩	27.0		0.21		60	6 363.00	2 440.00	1 861.00	988.00

2 三维有限元建模

2.1 模型尺寸及网格

昆明地铁 4 号线盾构隧道管片外径为 6.44 m,隧道顶部距地面 38.9 m,隧道左、右线轴心间距为 12.903 m,里程段内各层土体的剪切波波速介于 126.27 ~ 988.00 m/s 之间。

选取模型宽度尺寸为隧道开挖直径的 8 ~ 12 倍<sup>[5]</sup>,建立如图 1 所示的盾构隧道三维有限元模型。图 1 中,模型整体尺寸为:长 70 m,宽 120 m,高 70 m。

2.2 材料本构及模型边界条件

材料本构:模型中土体选用莫尔-库伦本构,盾构管片采用弹性本构。隧道结构部分参数见表 2。

模型边界条件:①由于盾构隧道模型下部为基岩,在采用 Midas GTS-NX 软件进行计算分析时,模型底部可选用固定边界约束;②为减少边界对计算结果的影响,模型周边边界选用黏性边界;③盾构隧道衬砌和接头处均采用刚性连接。

2.3 列车荷载模拟

为表征列车行驶过程中的荷载-时程曲线,文献

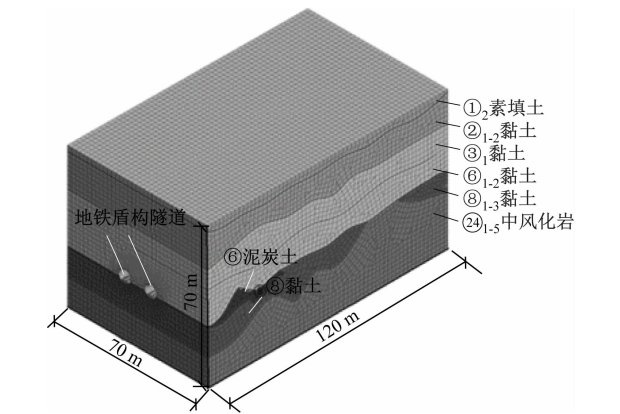


图 1 昆明地铁 4 号线联大街站—吴家营站区间有限元模型  
Fig. 1 Finite element model of interval between Liandajie Station and Wujiaying Station of Kunming Metro Line 4

表 2 隧道结构力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of tunnel structure

结构	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比
管片	24.5	35.5	0.30
道床	24.0	30.0	0.24
轨道	78.5	210.0	0.25
管片外注浆体	21.0	0.4	0.20

[6]选取了一个激励力函数用于模拟列车荷载-时程曲线,该列车荷载包括静荷载和系列正弦函数叠加而成的动荷载。本文参考文献[6],选用反映列车不平顺、附加荷载和轨面波形磨损效应的激振力来模拟昆明地铁列车荷载图。昆明地铁列车振动荷载时程曲线如图 2 所示。

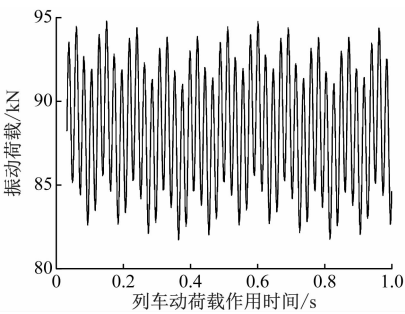


图2 地铁列车振动荷载时程图

Fig.2 Time-history diagram of metro train vibration load

3 动力分析

为研究不同围岩加固方案的加固效果,本文针对 4 种地铁盾构隧道围岩(隧道周边软弱地层)注浆加固方案分别进行建模研究。A 类注浆加固方案为地铁盾构隧道围岩全断面注浆加固,B 类注浆加固方案为隧道两侧注浆加固(67.5°圆心角),C 类注浆加固方案为隧道下部 3/8 圆弧(135°圆心角)范围注浆加固,D 类注浆加固方案为隧道下部半圆(180°圆心角)范围注浆加固。

建模分析时,各类围岩加固范围均为隧道盾构管片轮廓外延 3 m,注浆钢花管长 3.5 m、壁厚 3.5 mm,水泥浆液注浆,各类围岩加固方案实施后的岩土层无侧限抗压强度均不小于 0.8 MPa。注浆加固后围岩的物理力学参数按表 3 取值。

表3 改良后土体力学参数

Tab.3 Mechanical parameters of modified soil mass					
参数	弹性模量/ MPa	重度/ (kN/m³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
取值	100	22.5	95	40	0.3

鉴于昆明地铁 4 号线联大街站—吴家营站区间隧道将穿越较小承载力的泥炭质土层,因此本文选取盾构隧道周边泥炭质土层分布最多的截面为监测断面。

3.1 列车荷载作用下地铁盾构隧道位移响应

图 3 为数值模拟得到的右线列车荷载作用下,

围岩未加固时与加固后监测断面处隧道结构的位移幅值图。

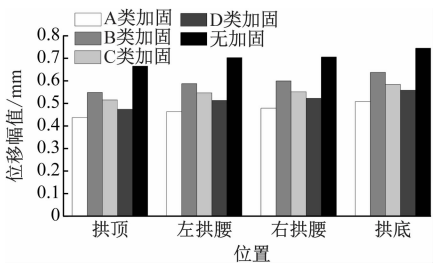


图3 监测断面处隧道不同位置的位移幅值

Fig.3 Displacement amplitude of different tunnel locations at monitoring sections

由图 3 可知:

1) 加固后,列车荷载作用下地铁盾构隧道结构的沉降均有所减少,其中采用 A 类注浆加固方案时拱底的沉降最小,为 0.507 mm。

2) 在列车振动荷载作用下,监测断面处隧道结构中拱底处位移最大,右侧拱腰处位移略大于左侧拱腰处位移,拱顶处位移最小。

3) 未加固时,隧道基底最大沉降达 0.743 mm,采用 A 类注浆加固方案时隧道基底最大沉降为 0.507 mm,与未加固时相比,降幅为 31.7%;采用 B 类、C 类和 D 类注浆加固方案时,隧道基底最大沉降分别为 0.636 mm、0.583 mm、0.557 mm,与未加固时相比,降幅分别为 14.4%、21.5% 和 25.0%。由此可见,A 类注浆加固方案的加固效果最好。

3.2 列车荷载作用下地铁盾构隧道应力响应

图 4 为数值模拟得到的右线列车荷载作用下,围岩未加固时与加固后监测断面处隧道基底最大主应力。

由图 4 可知:当隧道受列车振动荷载作用时,围岩未加固时与加固后的隧道基底的最大主应力有一定差异;采用 A 类注浆加固方案时,隧道基底最大主应力的数值最小,为 136.6 kPa,与未加固时相比,降低了 4.6%,小于疲劳状态下 C50 混凝土抗拉强度设计值(1 190 kPa)<sup>[7]</sup>;采用 B 类、C 类和 D 类注浆加固方案时,隧道基底最大主应力降幅分别为 1.7%、1.3% 和 1.5%。该模拟结果也表明,采用隧道围岩二次注浆加固工艺对盾构隧道结构的应力影响并不显著。

3.3 列车荷载作用下地铁盾构隧道加速度响应

表 4 为数值模拟得到的右线列车荷载作用下监测断面处隧道不同位置最大加速度。

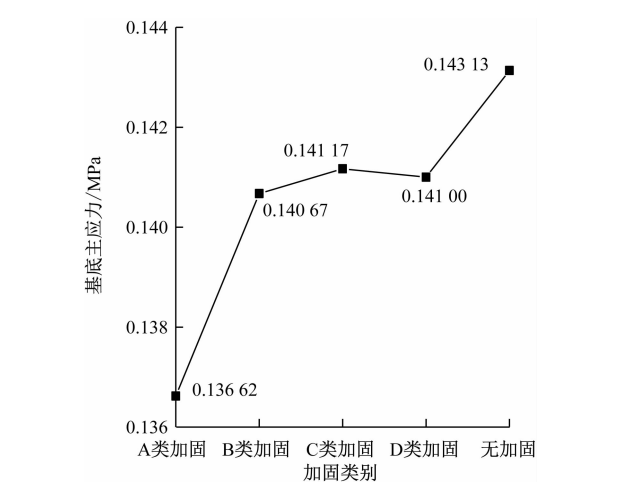


图4 监测断面处隧道基底主应力幅值  
Fig.4 Principal stress amplitude of tunnel base at monitored section

表4 监测断面处隧道不同位置最大振动加速度  
Tab.4 Maximum acceleration of different tunnel locations at monitoring sections

加固类别	最大振动加速度/(mm/s <sup>2</sup> )			
	拱顶	左拱腰	右拱腰	拱底
A类	9.670	11.971	12.087	15.755
B类	11.890	15.845	15.946	18.306
C类	13.840	15.700	15.715	18.692
D类	12.232	14.653	14.727	18.010
未加固	15.416	19.950	19.938	22.634

由表4可知,与围岩未加固相比,围岩加固后列车荷载作用下监测断面处隧道不同位置的最大振动加速度均有减小;未加固时,隧道拱底振动加速度最大值为22.634 mm/s<sup>2</sup>;当采用A类注浆加固方案加固时,隧道拱底的最大振动加速度为15.755 mm/s<sup>2</sup>,与未加固时相比,降幅为30.4%;采用B类、C类和D类注浆加固方案加固时,隧道拱底最大振动加速度分别为18.306 mm/s<sup>2</sup>、18.692 mm/s<sup>2</sup>和18.010 mm/s<sup>2</sup>,与未加固时相比,降幅分别为19.1%、17.4%和20.4%。

4 地铁盾构隧道工后累计沉降

4.1 列车荷载作用下隧道典型断面处基底沉降

由列车荷载作用下监测断面处地铁盾构隧道的位移、应力及振动加速度分布可知,列车运行振动荷载对地铁盾构隧道结构有一定影响。为研究岩溶区穿越“土岩交接”复合地层,尤其是下卧软土层的地铁盾构隧道在工后列车运行振动荷载作用

下的累计沉降,分析地铁盾构隧道运营100年后的沉降,本文采用经典 Monismith 简单指数模型<sup>[8]</sup>计算并预测昆明地铁4号线联大街站—吴家营站区间地铁盾构隧道运营100年后的拱底累计沉降,计算公式为:

ε = AN<sup>b</sup>

式中:

- ε——隧道基底土体的累积塑性应变;
- A——单次荷载作用下盾构隧道基底土体的塑性应变,取决于土体类型、物理状态和偏应力;
- N——荷载的作用次数即列车振动荷载的作用次数;
- b——由土体类型和地铁列车运营工况决定的参数,取值为0.17。

图5为列车荷载作用下盾构隧道典型断面处(桩号里程YDK40+863.97处,图1所示模型距左端7 m处的断面)基底运营100年时段内的累计沉降曲线。

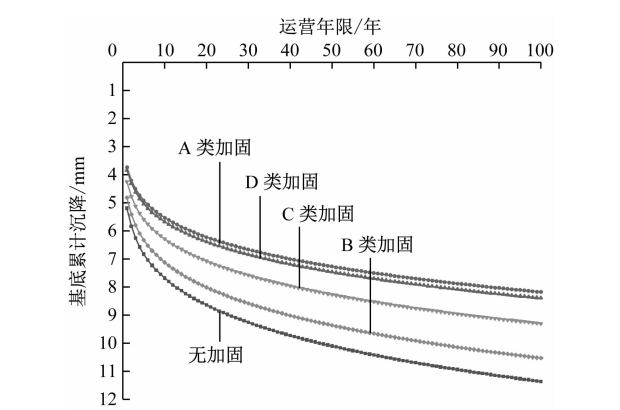


图5 列车运行100年隧道典型断面处基底累计沉降  
Fig.5 Cumulative settlement of base at typical tunnel section after 100 years of train operation

由图5可知:

- 1) 与未加固时相比,加固后的隧道运营100年后基底累计沉降均有一定程度减小。其中,采用B类注浆加固方案加固时隧道基底累计沉降最大,C类的次之,D类的较小,A类最小。
- 2) 采用A类注浆加固方案加固时隧道基底累计沉降为8.176 mm,但是,第1年内的隧道基底沉降为3.737 mm,为百年总沉降量的45.7%;前2年内的隧道基底累计沉降为4.205 mm,为百年总沉降量的51.4%;前10年内的隧道基底累计沉降为5.528 mm,为百年总沉降量的67.6%。由此可知,列车运行荷载作用下隧道基底累计沉降主要发生

在运营初始阶段。

#### 4.2 列车荷载下地铁盾构隧道基底沿程沉降

为全面研究列车运行荷载作用下地铁盾构隧道基底的沿程沉降情况,本文自模型左端(桩号里程 YDK40+863.97 处)开始,沿模型每隔 5.0 m(隧道下卧软土区段)或 3.5 m(隧道穿越土岩交接区段)设一分析预测点,以预测该处隧道基底的累计沉降值。图 6 为预测的地铁运营 100 年后昆明地铁 4 号线联大街站—吴家营站区间下卧软土层段隧道基底沿程沉降曲线。

根据城市轨道交通沉降监测要求:地铁盾构管片结构基底差异沉降应小于  $0.000\ 4\Delta L_x^{[9-10]}$  ( $\Delta L_x$  为分析预测点间距);在昆明地铁 4 号线联大街站—吴家营站区间,在 0~73.5 m ( $\Delta L_x$  为 5.0 m)区段,相邻监测点基底沉降差值不应大于 2 mm;在 73.5~120.0 m ( $\Delta L_x$  为 3.5 m)区段,相邻监测点基底沉降差值不应大于 1.4 mm。由图 6 可知,采用 A 类、C 类和 D 类注浆加固方案加固时,隧道管片结构基底相邻预测点的差异沉降均符合规范要求,而围岩未加固时及采用 B 类注浆加固方案加固时,隧道管片结构基底相邻预测点的差异沉降则不符合规范要求。

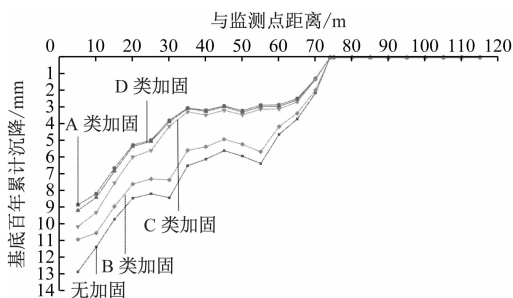


图 6 地铁运营 100 年后隧道沿线基底累计沉降

Fig. 6 Cumulative settlement of base along tunnel line after 100 years of metro operation

## 5 结语

本文依托昆明地铁 4 号线某岩溶区间工程,采用理论分析及数值模拟方法,研究了列车动力荷载作用下岩溶区不同围岩注浆加固方案下地铁盾构隧道结构的动力响应及运营期隧道基底的累计沉降,研究结果表明:

1) 4 类围岩加固方案均可减少列车动力荷载作用下地铁盾构隧道的位移、应力和振动加速度。其中,A 类注浆加固方案的效果最好,与未加固时相

比,列车运行荷载作用下隧道典型断面处的位移、应力和振动加速度的减幅分别为 31.7%、30.4% 和 4.6%。

2) 在列车运行荷载作用下,昆明地铁 4 号线联大街站—吴家营站区间盾构隧道的基底累计沉降主要发生在地铁运营前 10 年内,地铁运营前 10 年内的隧道基底累计沉降达运营 100 年后总沉降量的 2/3。故应加强盾构隧道工后前 10 年的监测与管控,以保证隧道结构安全。

3) 地铁盾构隧道运营 100 年后,未加固时,隧道基底沉降为 11.357 mm;采用 A 类、B 类、C 类和 D 类注浆加固方案时隧道基底的沉降分别为 8.176 mm、10.527 mm、9.293 mm 和 8.392 mm;而未加固时及采用 B 类注浆加固方案时,隧道管片基底累计沉降不满足隧道不均匀沉降的控制标准。因此,泥炭质土-岩溶交接分布软硬复合岩土层中或下卧软土层时,地铁盾构隧道围岩加固选用全断面注浆加固方案或隧道下部加固方案为宜。

## 参考文献

- [1] 符必昌,黄英,方丽萍,等.碳酸盐岩上覆红土的成因研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2959.  
FU Bichang, HUANG Ying, FANG Liping, et al. Cause study of laterite overlying carbonate rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2959.
- [2] 胡瑞青,王士民.泥炭质土不同赋存条件对盾构隧道衬砌结构动力响应特性影响分析[J].铁道标准设计,2017,61(8):101.  
HU Ruiqing, WANG Shimin. Analysis of dynamic response characteristics of shield tunnel lining structure in peat soil of different deposit conditions[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(8):101.
- [3] 王涛,施斌,马龙祥,等.粉细砂地层对地铁列车荷载的动力响应及长期变形研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1378.  
WANG Tao, SHI Bin, MA Longxiang, et al. Study on the dynamic response and long-term deformation of silty fine sand ground to subway train load[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1378.
- [4] 彭都.昆明轨道交通 4 号线工程岩溶专项勘察[R].成都:中国中铁二院工程集团有限公司,2017.  
PENG Du. Special Karst survey of Kunming Rail Transit Line 4 project[R]. Chengdu: China Railway Second Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [5] 冯义.基于动荷载的交叠盾构隧道两阶段安全分析[J].现代隧道技术,2021,58(4):109.

(下转第 169 页)



的土地使用权及其背后潜在的巨大收益,政府与轨道交通公司权力方也有借地生财、推动项目进程的意图。基于此,各方打造了综合多方权力的交通商业综合体,从而平衡各权力方的利益,并最终推动了建设项目的进行。深圳市凯达尔集团有限公司没有国有资本控股背景,但仍与广东珠三角城际轨道交通有限公司合作开发交通商业综合体,并最终形成了一定的空间形态,是典型的空间生产过程。

经过研究发现:从表面来看,新塘站-凯达尔交通商业综合体的落地是包括了政府、民营企业、轨道交通公司在内的 PPP 模式;从深入剖析来看,该项目既没有成立合作项目公司,也不是政府招商引资的结果,而是两个权力主体、多个相关方之间的利益冲突问题化解、权力交错,最终改变原有规划,以交通商业综合体的形式平衡多方权力、利益的过程。

研究案例发现,微观权力的运行仍处于宏观权力的框架之下,但宏观权力依旧无法完全渗透到微观权力的运行中去。在权力双方博弈的过程中,根据政策条例,政府一方本可以根据公共利益需要,依法收回群星村的使用权,但政府仍选择用交易协商的方式解决了历史遗留问题,体现了宏观权力是无法完全操控社会的。因此,政策法规等宏观权力在处理特定的问题时,也需要给予微观权力实践一定程度的、可自由调整的空间。基于《中华人民共和国土地管理法(2004 年版)》中关于收回土地使用权的规定,以及 2006 年颁布的《招标投标挂牌

出让国有土地使用权规范(试行)》文件中关于商业性质土地必须通过招拍挂的形式出让的规定,在案例地块用地性质及权属人变更环节,经历了群星村集体上缴土地使用权至政府、政府收储土地并重新进行国有用地公开挂牌出让、最后仍将土地定向出让给深圳市凯达尔集团有限公司的过程,手续繁杂、耗时耗力,且无法避免公开招拍挂过程中土地流向的不确定性,减缓了土地的开发进程。为加快“三旧”改造、城市更新进程,需要适当提升政策运行的灵活度。而深圳市凯达尔集团有限公司作为民营企业,有一定的实力承担与政府的大型合作项目,在我国鼓励 PPP 模式的背景下,不仅需要提高实践的灵活度,也需要加大对社会资本的信任度,充分吸纳更多元的社会资金,才能促成更多的政企合作项目,真正缓解政府的融资压力。

## 参考文献

- [1] 马学广. 城市边缘区空间生产与土地利用冲突研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.  
MA Xueguang. Study on spatial production and land use conflicts in urban-rural fringe [M]. Beijing: Peking University Press, 2014.
- [2] 王丰龙, 刘云刚. 空间生产再考: 从哈维到福柯[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1293.  
WANG Fenglong, LIU Yungang. Revisiting production of space: from Harvey to Foucault[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(11): 1293.

(收稿日期:2021-04-04)

## (上接第 164 页)

- FENG Yi. Two-stage safety analysis of overlapped shield tunnels based on dynamic loads [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 109.
- [6] 张冬梅, 李钰. 地铁荷载引起的盾构隧道及土层长期沉降研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 563.  
ZHANG Dongmei, LI Yu. Long-term settlement of shield tunnel in soft clay due to vehicle vibration [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 563.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 55.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 55.

- [8] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [C]// TRB. 54th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB). Columbia: TRB, 1975: 1.
- [9] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范 GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 16.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 16.

(收稿日期:2022-03-01)