

DOI: 10.11779/CJGE201905010

既有地下结构受下穿施工影响的力学响应与安全控制研究

白海卫^{1,2}, 王剑晨², 刘运亮², 张顶立¹

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 北京地区下穿工程中, 新建隧道断面及施工方法种类繁多、地层条件复杂、既有结构形式多样, 有极其复杂的组合关系, 目前尚无对既有结构力学响应的系统分析。通过北京地区 13 个下穿工程案例, 总结了新建隧道结构形式及施工措施, 明确既有地下结构变形特点, 采用两阶段法分析及预测了各因素影响下既有地下结构的力学响应。研究表明: ①新建隧道包括市政管道、地铁区间及车站, 常见的施工方法有多导洞法、台阶法, 洞桩托换法和中洞法, 新建隧道开挖面积与施工方法有较明确的对应关系。②既有地下结构实测最大沉降概率分布符合数学期望 4.89, 方差 16.4 的正态分布。其中, 新建市政管道、地铁区间和地铁车站下穿施工引起的既有地下结构平均最大沉降分别为 2.56, 3.82, 11.07 mm。③根据新旧隧道空间位置关系的不同, 穿越工程可分为 7 种组合, 其中, 既有地下结构力学响应有 V, U, W 3 种模式。④严格控制新建隧道开挖面积, 不留或少留间隔土, 尽可能选择 W 型穿越模式, 以此减小对既有地下结构的扰动。

关键词: 穿越工程; 既有地下结构; 力学响应; 安全控制

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)05-0874-11

作者简介: 白海卫(1982—), 男, 陕西榆林人, 博士研究生, 研究方向为城市地下工程的风险管理与控制。E-mail: baihaiwei@bjucd.com。

Safety control and mechanical response of existing underground structures induced by excavation of new tunnels under construction

BAI Hai-wei^{1,2}, WANG Jian-chen², LIU Yun-liang², ZHANG Ding-li¹

(1. Key Laboratory for Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Urban Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: In crossing projects, the sections and construction methods for new tunnels are numerous, the geological conditions are complex, and the structural forms of the existing tunnels are various. There is a complex relationship among them, which has not been deeply studied till today. Based on the measured data from 13 projects in Beijing, the structural forms and the construction methods for the new tunnels are summarized, the deformation laws of the existing tunnels are analyzed, and the mechanical response of the existing tunnels is investigated by using the two stage method. The results show: (1) The new tunnels have three types of municipal pipelines, subway stations and metro tunnels. Their construction methods include guiding hole method, bench method, cavern-pile method and center drift method. The corresponding relationship between the construction methods and the excavation area is clear. (2) The probability distribution of the maximum settlement of the existing tunnels accords with the normal one, with the mathematical expectation being 4.89 and the variance 16.4. The average maximum settlements of the existing tunnels caused by excavation of municipal pipelines, metro tunnels and subway stations are 2.56, 3.82 and 11.07 mm. (3) The crossing projects can be summarized into 7 combinations by the spatial relationship between the new and existing tunnels. According to the deformation and stress characteristics, there are three modes of W, U and V in the mechanical response of the existing tunnels. (4) In order to reduce the disturbance of the existing tunnels, the excavation area of the new tunnels should be strictly controlled, the soil between the roof of the new tunnels and the floor of the existing tunnels should be less or not left, and the preferable crossing mode should be W-type.

Key words: crossing project; existing underground structure; mechanical response; safety control

0 引言

随着北京地下工程建设的快速发展, 城市既有地

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51678035)

收稿日期: 2016-11-17

修改稿返回日期: 2018-12-06

下结构逐渐增多, 新建隧道下穿既有地下结构的情况不可避免^[1]。下穿施工会造成既有地下结构基底承载力不足, 引起沉降及内力变化, 进而影响既有结构的安全。减小对既有地下结构的扰动, 是城市地下工程建设中亟需解决的热点问题。

国内外学者对于穿越工程中既有地下结构变形规律及安全控制技术进行了大量的研究。马振超^[2]分析 4 个下穿工程既有地下结构实测变形, 发现符合正态分布形式。韩焯等^[3]统计伦敦(10 例)、北京(2 例)下穿工程, 认为既有地下结构变形可采用 Peck 公式进行分析及预测。张成平等^[4-5], 姚海波^[6]对北京地铁 5 号线崇文门站下穿工程的变形控制技术 & 实测位移进行分析, 提出了注浆抬升法。笔者搜集北京地区 10 个近接下穿工程, 发现既有地下结构变形整体呈柔性、两变形缝之间的单个管节呈刚性的特征^[7]。陈孟乔等^[8]基于北京地铁机场线东直门站上跨下穿 13 号线工程, 研究近距离穿越时既有地铁结构变形控制技术及标准。张治国等^[9]基于两阶段法, 对邻近施工影响下既有隧道变形及受力进行了分析。

目前研究中, 单一工程的安全控制技术及实测变形分析具有针对性, 但穿越工程类型众多, 缺乏普遍性; 修正 Peck 公式可预测既有地下结构变形, 但不能分析其力学特点; 两阶段法和有限元分析法可以分析既有地下结构的变形及受力特点, 但多针对具体工程。北京地区新建隧道形式及施工方法种类众多, 既有地下结构形式多样, 尚无对既有地下结构变形控制及力学响应的系统分析。

本文搜集并拟合北京地区 13 个下穿案例 18 组变形数据, 总结归纳新建隧道常见的结构形式及施工措施, 分析既有地下结构变形规律, 采用两阶段法研究了各因素影响下既有地下结构的力学响应, 在此基础上提出穿越施工安全控制对策。

1 北京地区穿越工程案例统计

1.1 穿越工程案例统计

采用 Peck 公式对搜集到的 18 组既有结构实测变形数据进行拟合, 结果如表 1 所示。拟合中单洞隧道开挖引起的横向地层沉降表示为^[7]

$$s(x) = \frac{AV_1}{i\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中 A 为开挖面积, $s(x)$ 为距离隧道中心轴线为 x 处的地表沉降 (mm); i 为从沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离 (m); V_1 为地层损失率, 在不考虑固结情况下, 反应了隧道施工引起的洞室收敛变形率, V_1 值主要与施工方法有关^[3, 7]。

双洞平行隧道开挖地层横向沉降计算公式为

$$s(x) = \frac{A_1V_{11}}{\sqrt{2\pi}i_1} \exp\left[-\frac{\left(x-\frac{D}{2}\right)^2}{2i_1^2}\right] + \frac{A_2V_{12}}{\sqrt{2\pi}i_2} \exp\left[-\frac{\left(x+\frac{D}{2}\right)^2}{2i_2^2}\right] \quad (2)$$

式中 A_1, A_2 为第一、二条隧道横截面积, V_{11}, V_{12} 为第一、二条隧道修建引起的地层损失率; i_1, i_2 分别为第一、二条隧道修建引起的沉降槽宽度; D 为两个隧道中心间距。

1.2 新建隧道特性分析

(1) 新建隧道类型复杂, 包括了市政管道、地铁区间及车站等。洞室数量以单洞和双洞为主。新建隧道开挖面积在 3.4~235.7 m² 不等。各案例中, 新建隧道覆跨比 (洞室高/洞室宽) 为 0.55~1.60。

(2) 新建隧道施工方法包括了台阶法、多导洞法、洞桩托换法及中洞法等, 各工法典型剖面示意图如图 1。超前注浆预加固是各工法成功实施共同的前提, 除此之外要点各异, 台阶法要点为上下台阶的距离和初支的封闭时机; 多导洞法要点为导洞大小的划分、开挖顺序以及临时支撑的拆除顺序等; 洞桩托换法要点是桩基托换时机及顶升系统作用的有效发挥; 中洞法要点是导洞大小划分、施作顺序及两侧洞的对称施工。采用 Peck 公式对既有地下结构变形数据进行拟合, 各工法 V_1 值如表 2 所示。

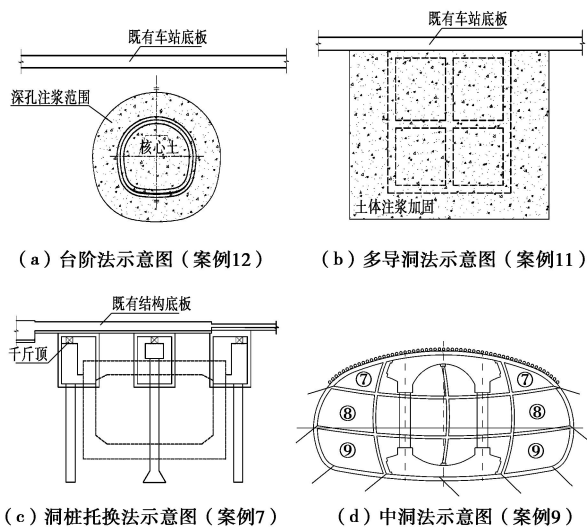


图 1 各工法典型剖面示意图

Fig. 1 Typical profiles of various construction methods

表 2 中, 各工法对地层扰动最小的是多导洞法 (V_1 为 0.165%), 台阶法的 V_1 是多导洞法的 2.8 倍, 洞桩托换法是 4.1 倍, 中洞法达到了 5.4 倍, 数值越大, 说明施工过程中对土体及既有结构的扰动越大。

(3) 辅助措施的广泛使用。下穿工程的本质是新建隧道施工造成的地层变形传播过程中对既有结构扰

表1 北京地区下穿工程案例统计

Table 1 Cases of crossing projects in Beijing

工程	新建隧道	地质条件	L_1	H_1	D	Z	施工工法	既有地下结构	h_0	$L_2 \times H_2$	S_{max}	V_1
1 ^[10]	南水北调暗涵 (双洞马蹄形)	粉细砂、卵石	4.2	5.1	8.2	6.22	台阶法	1号线五棵松站 (明挖单层3跨)	4.83	18.3×7.85	4.83	0.284
2 ^[2]	10号线公主坟站 (双洞平顶直墙)	粉质黏土、 粉细砂、卵石	14.1	9.3	63.2	4.66	6导洞施工+千斤顶 顶升	1号线公主坟站 (明挖单层3跨)	4.51	19.85×7.75	2.91	0.142
3 ^[11]	9号线军博站(双 洞拱顶直墙)	卵石、砾岩	9.6	10.5	14.3	16.05	6导洞施工	1号线区间(明挖 单层2跨)	5.3	10.4×5.85	2.35	0.024
4 ^[2]	崇文门热力隧道 (单洞平顶直 墙)	粉土、粉质 黏土、粉细 砂、中粗 砂、卵石	3.6	2.5	—	1.25	台阶法	2号线崇文门— 北京站区间(明 挖单层2跨)	3.87	9.9×5.9	1.74	0.299
5 ^[2]	崇文门污水隧道 (单洞平顶直 墙)	粉土、粉质 黏土、粉细 砂、中粗 砂、卵石	1.9	1.8	—	0.9	台阶法	2号线崇文门— 北京站区间(明 挖单层2跨)	3.87	9.9×5.9	2.6	1.183
6 ^[2]	郑常庄热力隧道 (单洞平顶直 墙)	粉质黏土、 砂质黏土、 粗砂、卵石	5.8	3.2	—	1.6	台阶法	1号线五棵松— 万寿路区间(暗 挖单层2跨)	2	12.05×7.52	1.08	0.116
7 ^[12]	机场线东直门站 (单洞平顶直 墙)	粉土、粉细 砂、中粗砂	13.3	9.2	—	4.62 4.62	洞桩托 换+千斤 顶顶升	上行线 下行线 13号线折返线 (暗挖单层2跨)	8.8	12.05×4.18	15.95 11.39	0.725 0.64
8 ^[13]	4号线宣武门站 (双洞平顶直 墙)	粉质黏土、 卵石圆砾	9.8	9	13.9	6.4	4导洞施 工+大管 棚 考虑顶升最 北线终变形 排除工前顶 升变形 考虑顶升最 南线终变形 排除工前顶 升变形	2号线宣武门站 (明挖单层3跨)	4.5	19.7×7.95	4.41 8.56 5.9	0.102 0.187 0.195
9 ^[6]	5号线崇文门站 (单洞岛式暗挖 车站)	粉细砂、卵 石、圆砾、 中粗砂	7.2	11.5	—	7.71	中洞 法+ 管幕 中洞开挖完成 注浆抬升	2号线区间(暗挖 单层1跨)	5.1	5.9×5.9	31.26 14.95	0.89 0.38
10 ^[14]	10号线国贸一双 井区间(双洞间 距大近似为单 洞)	粉细砂、卵 砾石	6.1	7.8	77	5	6导洞施工	1号线区间(明挖 单层2跨)	10.6	5.7×6.1	4.69	0.333
11	6号线东四—朝 阳门区间(双洞 平顶直墙)	粉细砂、中 粗砂、卵石 圆砾	6.8	7.8	17	3.9	4导洞施工,千斤顶 顶升,周边注浆2m	5号线东四站(暗 挖单层3跨)	12.6 8	19×9.9	6.9	0.204
12	7号线广渠门外 —双井区间(双 洞马蹄形断面)	粉质黏土、 粉细砂、中 粗砂	6.3	6.6	17	3.3	台阶法+临时仰拱+ 深孔注浆周边3m	10号线双井站 (暗挖单层2跨)	13.8	20×9.6	1.2	0.44
13	6号线朝阳门— 东大桥区间(双 洞平顶直墙)	粉质黏土、 圆砾卵石	6.8	7.8	16	3.9	4导洞施工,千斤顶 顶升,周边注浆3m	2号线朝阳门站 (明挖单层3跨)	5.3	22.7×11.0	2.5	0.158

注: L_1 为新建隧道宽(m), L_2 为既有地下结构宽(m), H_1 为新建隧道高(m), H_2 为既有地下结构高(m); h_0 为既有地下结构埋深(m); D 为导洞轴心距(m); Z 为新建隧道轴心到既有地下结构底板的距离(m); S_{max} 为既有地下结构最大沉降(mm); 新建分离式双洞隧道时,由于双洞同时开挖且地层条件、施工方法均相同,因此令 V_{11} 等于 V_{12} , K_1 等于 K_2 。

表2 各施工方法 V_1

Table 2 Values of V_1 by various construction methods

工法	多导洞法	台阶法	洞桩托换法	中洞法
V_1	0.02%~0.27% (0.165%)	0.12%~1.18% (0.464%)	0.64%~0.73% (0.638%)	0.89%

注: 括号内为 V_1 平均值。

动而产生的安全问题。因此,穿越工程从4个方面进行了控制:从源头减小地层变形;阻隔地层变形的传播;采取辅助措施补偿地层及既有建(构)筑物变形;可采用基底承载力的托换。

1.3 既有地下结构特性分析

北京地区穿越工程既有地下结构有如下特点:

(1) 结构形式多样, 包括了明挖和暗挖车站、明挖及暗挖区间, 埋深在 2.0~13.8 m 之间。明挖法施工的结构, 在 18~30 m 范围内设置变形缝。可将既有结构考虑为箱型梁结构, 采用等效法进行抗弯刚度分析, 如表 3 所示。

表 3 北京地区既有地下结构抗弯刚度统计

Table 3 Values of flexural rigidity of existing structures in Beijing

工程	既有地下结构形式	$EI_x/(N \cdot m^2)$	等效E/GPa
1	1号线五棵松站	1.7×10^{13}	21.2
2	1号线公主坟站	1.79×10^{13}	21.1
3	1号线区间	3.65×10^{12}	21.1
4	2号线区间	2.24×10^{12}	22.2
5	2号线区间	2.24×10^{12}	22.2
6	1号线区间	3.65×10^{12}	21.1
7	13号线折返线	9.67×10^{12}	20.3
8	2号线宣武门站	1.62×10^{13}	19.7
9	2号线区间	2.24×10^{12}	22.2
10	1号线区间	9.06×10^{11}	17.5
11	5号线东四站	4.04×10^{13}	17.0
12	10号线双井站	2.9×10^{13}	17.7
13	2号线朝阳门站	4.65×10^{13}	18.8

注: 抗弯刚度为既有隧道纵向抵抗沉降变形的能力。以矩形隧道为例, 惯性矩 $I = bh^3 - b_1^3 h_1^3$ 的计算中, b 为隧道宽, h 为隧道高, $b-b_1$ 为衬砌厚度。

从表 3 可以看出: ①横截面尺寸越大, 相应的刚度越大。地铁车站的抗弯刚度约为区间的 4~51 倍。②北京地区地铁结构多采用 C40 混凝土, 弹性模量为 32.5 GPa。按照截面尺寸进行实体等效后, 实体弹模为 17.0~22.2 GPa, 约下降了 31.7%~47.7%; ③等效后的实体材料弹模为土体变形模量 (以重黏土为例, 100 MPa) 的 200 倍左右, 说明无论是既有车站还是区间抗变形能力都远大于天然地层。

(2) 下穿施工会引起既有结构的沉降, 统计得到最大沉降为 1.08~31.26 mm, 最大沉降的直方图及正态分布曲线如图 2 所示(注: 案例 9 采用中洞法施工, 该工法沉降较大, 后期不再使用, 本节分析不考虑该工点; 案例 8 仅分析最终变形)。

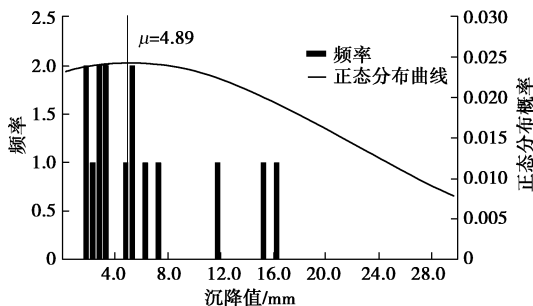


图 2 既有地下结构最大沉降概率分析

Fig. 2 Probability analysis of maximum settlements of existing underground structure

从图 2 可以看出, 13 个案例中, 最大沉降值小于 3 mm 的有 7 个案例, 占总数的 54%; 最大沉降值小于 8 mm 的有 12 个案例, 占总数的 92%。对各沉降值的概率分布进行分析, 发现符合数学期望 (μ) 4.89, 方差 (σ^2) 为 16.4 的正态分布。在具体工程中, 沉降与新建隧道类型的关系如表 4 所示。

表 4 既有地下结构最大沉降与新建隧道类型的关系

Table 4 Relationship between maximum settlement of existing underground structures and types of new tunnels

类别	工程号	A/m^2	S_{max}/mm	$S_{均}/mm$	工法
市政工程	1, 4, 5, 6	3.42~36.41	1.08~4.83	2.56	台阶法
地铁区间	10, 11, 12, 13	47.82~106.08	1.2~6.9	3.82	多导洞、台阶法
地铁车站	2, 3, 7, 8, 9	70.03~235.70	2.35~31.26	11.07	多导洞法、洞桩托换法、中洞法

从表 2、4 可以看出:

(1) 新建隧道开挖面积与施工方法有较明确的对应关系。当开挖面积小于 40 m² 时, 多采用台阶法; 40~100 m² 时, 采用多导洞法或台阶法; 当开挖总面积大于 100 m² 时, 则采用双洞分离式多导洞法、单洞洞桩托换法及单洞中洞法。开挖面积越大, 采用的施工方法所对应的地层损失率也越高。

(2) 目前北京地区新建隧道下穿既有地铁时, 考虑既有地铁的正常运营, 沉降控制指标为 3 mm。市政管道穿越施工时, 开挖面积小, 工法统一, 既有地铁平均最大沉降值为 2.56 mm, 基本可以满足过轨工程变形控制要求。

(3) 新建地铁区间下穿施工开挖面积较大, 密贴下穿时为平顶直墙型断面, 有隔离土存在时为马蹄形断面, 工法集中于多导洞法和台阶法。既有地铁平均最大沉降值为 3.82 mm, 略大于目前过轨工程变形控制要求。其中, 小于 3 mm 的有 2 个案例, 占 50%。

(4) 新建地铁车站下穿施工开挖面积最大, 从案例 9 施工以来, 地铁车站施工方案由单洞大面积中洞法和洞桩托换法, 逐渐转变为双洞多导洞法。既有结构平均最大沉降值为 11.07 mm, 远大于目前过轨工程变形控制要求。其中, 小于 3 mm 的有 2 个案例, 占 40%。新建地铁车站下穿施工是目前穿越工程中难度最大、风险最高的工程。

2 既有地下结构力学响应预测分析

针对前述统计的北京地区穿越工程情况, 本文采用两阶段分析法对常见的影响因素进行系统分析, 以此明确既有地下结构的力学响应规律。

2.1 两阶段分析方法

分析下穿工程中新建隧道-土体-既有地下结构的

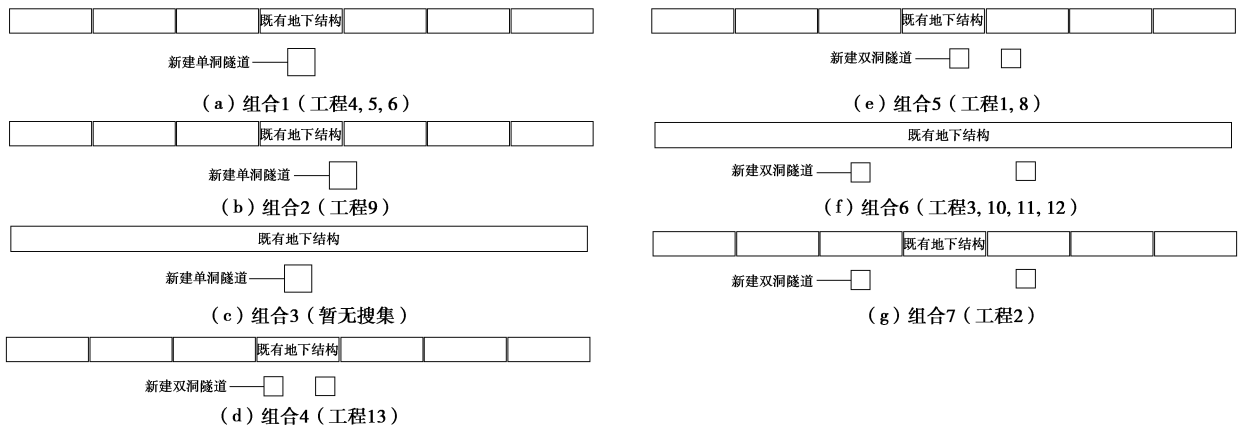


图3 穿越工程分类

Fig. 3 Classification of crossing projects

相互作用时,可采用两阶段分析法。第1阶段分析下穿施工引起的土体变形,第2阶段将地层变形施加于既有隧道,应用弹性地基模型分析既有地下结构的纵向变形和内力的变化^[9]。

本文中,新建隧道施工引起的天然地层条件下地层变形由 Peck 公式进行确定,地层变形与地基弹性系数相乘后即可获得既有结构受到的附加荷载。而双参数地基模型采用两个独立参数来表征地基土的特性,改进了 Winkle 模型中地基不连续的缺陷^[15]。故本文采用 Pasternak 双参数地基梁模型,控制方程为

$$EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} - G_p b^* \omega'' + kb^* \omega = bq(x), \quad (3)$$

式中, EI 为既有地下结构抗弯刚度, ω 为梁的挠度, G_p 为地基弹性层剪切刚度, k 为基床反力系数, $q(x)$ 为根据 Peck 公式确定的附加荷载, b 为梁横截面宽度, $b^* = b[1 + (G_p/k)^{1/2}/b]$ 。 G_p 的取值为: $G_p = G_0 H/2$, $G_0 = E_0/2 \times (1 + \mu)$, μ 为泊松比, H 为地基厚度。根据徐凌^[16]的研究,地基深宽比大于 6 时,基底附加应力严重衰减。因此,本文计算中取既有地下结构下方地基厚度为 6 倍结构洞径。

梁任一截面的转角 θ 、弯矩 M 及广义剪力 V 与梁挠度 ω 之间的关系分别为

$$\theta = \omega', \quad M = -EI\omega'', \quad V = -EI\omega''' + G_p b^* \omega'。 \quad (4)$$

初始条件 θ_0 , M_0 , V_0 与 ω_0 将由问题的边界条件所确定。其中的两个非零值,可用 $x=l$ 的边界条件予以确定。由于直接对式(1)进行求解比较困难,本文将上式转化为一阶积分方程,采取 Matlab 软件编程进行数值积分求得最终解答。

2.2 新旧隧道空间位置的影响

根据新建隧道数量、新旧隧道位置关系以及既有地下结构是否存在变形缝,穿越工程可分为 7 种组合,如图 3 所示。其中,工程 4, 5, 6 为组合 1, 工程 9

为组合 2, 工程 13 为组合 4, 工程 1, 8 为组合 5, 工程 3, 10, 11, 12 为组合 6, 工程 2 为组合 7, 组合 3 没有搜集到工程实例。

各组合既有地下结构实测变形如图 4 所示。

以案例 8 (组合 5) 为背景 (变形数据取排除工前顶升的实测变形), 采用两阶段法对 7 种组合变形及受力进行分析。其中, 组合 2 分为两种情况, 组合 2 (a) 为新建隧道轴心位于变形缝正下方, 组合 2 (b) 为轴心位于变形缝侧下方 (工程 9 的情况), 轴心与变形缝的水平距离 4.2 m。组合 6 (a) 中新建隧道双洞间距 13.9 m (工程 8 的情况), 组合 6 (b) 新建隧道间距 70 m (工程 10 的情况)。其中单洞隧道开挖时, 开挖面积为 176.4 m², 双洞隧道开挖时, 各个隧道开挖面积取 88.2 m², 双洞轴心距为 13.9 m。施工方法为多导洞法, V_1 取 0.187%, K 值取天然地层沉降槽宽度系数, 根据韩焯^[3]修正公式取 0.93。既有地下结构抗弯刚度为 1.62×10^{13} N/m, 存在变形缝时管节纵向长度 27 m, 无变形缝时取常规车站长度 200 m。既有车站底板和新建车站位置处为卵石、粉质黏土层, 天然土体基床系数取 100×10^6 N/m³, 天然土体剪切模量取 121×10^6 N/m³。计算得到各组合变形如图 5 所示。

统计 7 种组合既有地下结构变形及受力如表 5 所示。

从图 5、表 5 可以看出:

(1) 组合 5 中, 两阶段法计算既有车站最大沉降值为 8.0 mm, 实测值 8.56 mm。计算得到最大弯矩 1094 kN·m, 最大剪力 161 kN。计算变形与影响范围均与实际值吻合较好, 说明两阶段法可有效分析既有地下结构力学响应。

(2) 不同组合情况下, 既有地下结构变形模式及变形量差异极大。变形缝存在时, 两变形缝之间的管节呈“刚体”变形特征, 整体呈链状变形; 无变形缝

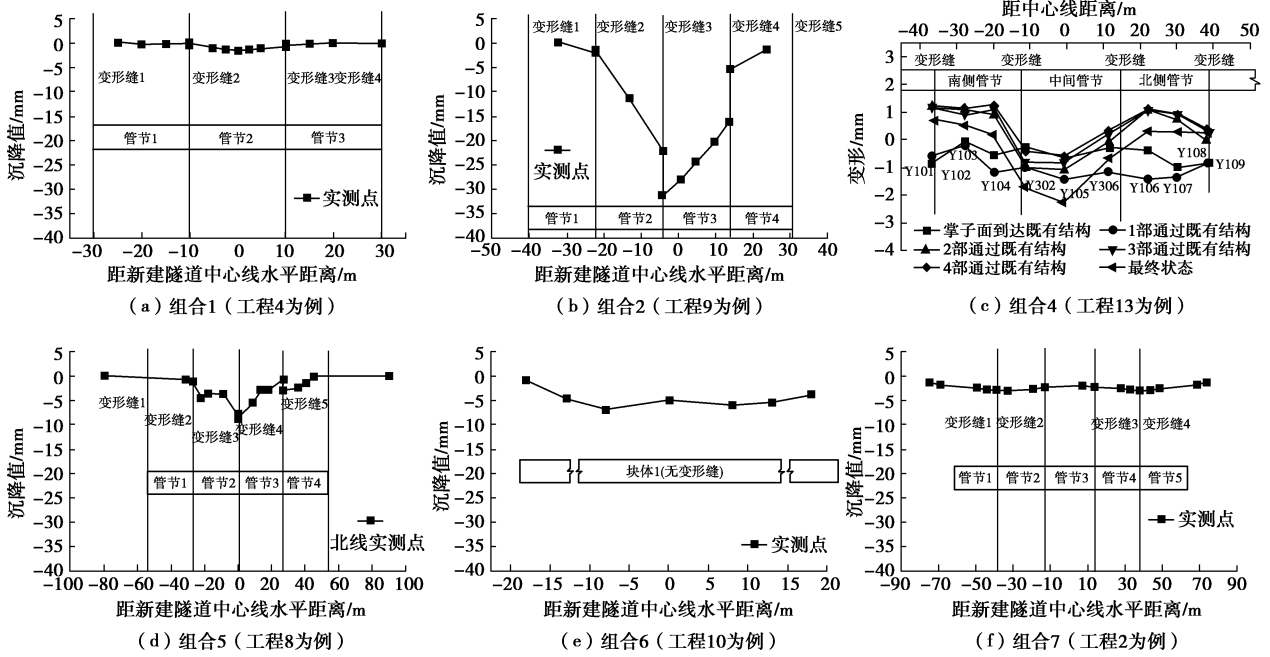


图 4 既有地下结构实测变形

Fig. 4 Measured deformations of existing underground structures

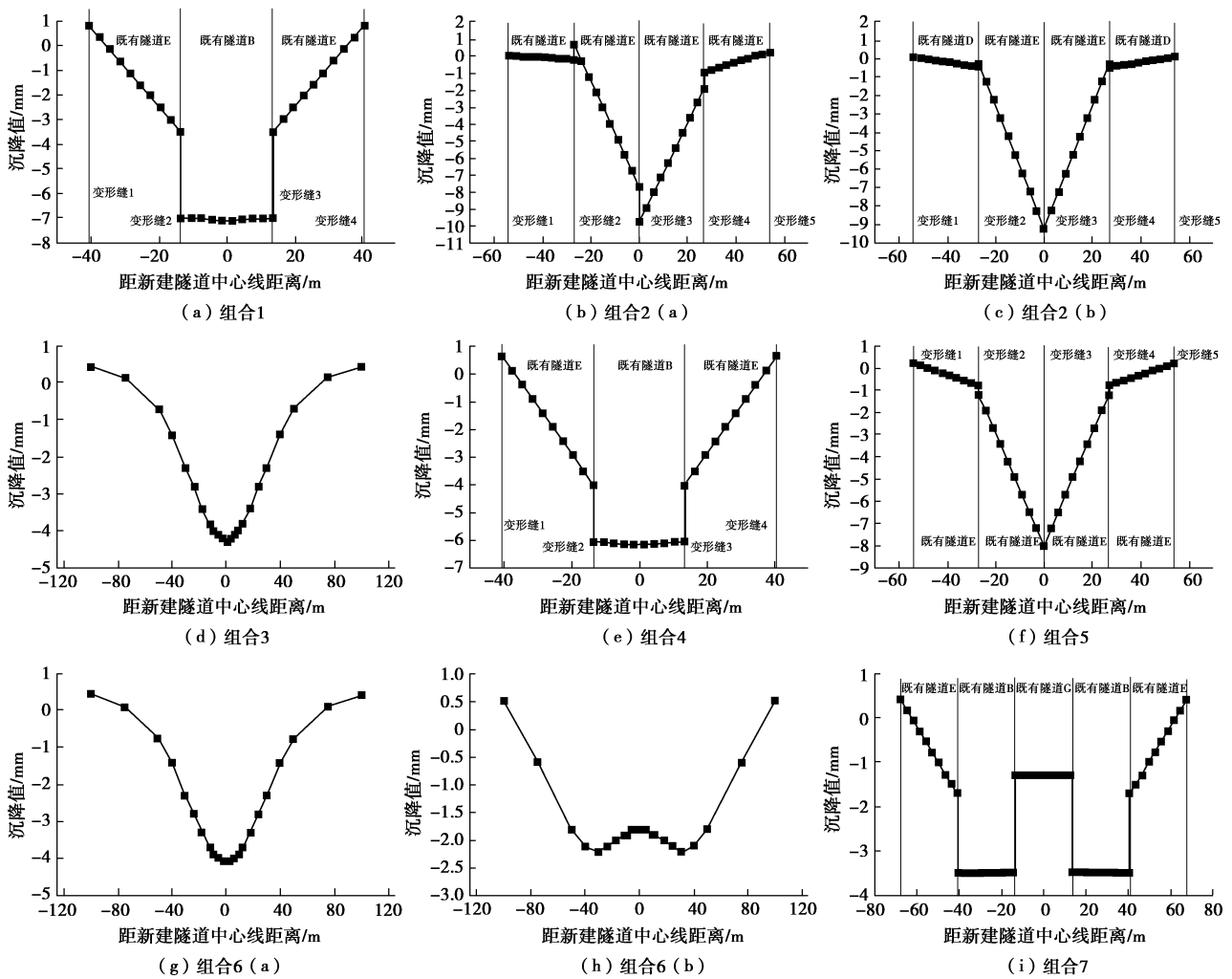


图 5 各组合既有地下结构变形

Fig. 5 Deformations of various combinations of existing underground structures

表 5 7种组合中既有地下结构变形及受力

Table 5 Deformations and internal forces of seven combinations of existing underground structures

类型	组合	S_{max} /mm	ΔS_{max} /mm	$\Delta S'_{max}$ /mm	M_{max} /(kN·m ⁻¹)	V_{max} /kN
单洞 隧道	1	7.1	4.3	3.5	-7456	-874
	2 (a)	9.7	8.4	2.0	-3280	-419
	2 (b)	9.2	9.0	0.2	635	-150
双洞 隧道	3	4.3	4.3	0.0	-51540	-5149
	4	6.1	4.6	2.3	-4755	-556
	5	8.0	6.8	0.5	-1094	-161
	6 (a)	4.1	4.1	0.0	-49269	-4380
	6 (b)	2.2	2.2	0.0	-396	-29
7	3.5	2.1	2.2	-3714	-435	

注： ΔS_{max} 为最大差异沉降，差异沉降为两个变形缝之间的管节的最大沉降和最小沉降之差； $\Delta S'_{max}$ 为变形缝处最大错动，变形缝错动为变形缝左右两侧管节边缘的沉降差； M_{max} 和 V_{max} 分别为弹性地基梁的最大弯矩和最大剪力。

时，整体呈柔性变形特征。其中，组合 2、5 沉降及差异沉降最大，其次是组合 1、4，组合 3、6、7 最小。组合 2(a) 的最大沉降和最大差异沉降可达到组合 6(b) 的 4.4 和 3.8 倍。变形缝错动方面，组合 1 错动最大，其次为组合 2、4、7，组合 3、5、6 错动值为零。

(3)地基梁的弯矩及剪力宏观表达了下穿施工引起的结构内力变化。其中，组合 3、6 最大，其次是组合 1、4、7，最小是组合 2、5。从受力可以看出：变形缝的存在对既有地下结构受力有重要影响；既有结

构受力趋势与变形基本相反，变形较大的组合，受力小，变形较小的组合受力大。

(4) 组合 1, 2, 3 中新建隧道为单洞隧道，组合 4, 5, 6, 7 为双洞隧道。总体来说，在地层损失率、总的开挖面积相同的情况下双洞隧道施工造成的变形与受力均小于单洞施工，约为单洞隧道 80%~90%。

(5) 不对称工况下（组合 2 (a)），与组合 2 (b) 相比，既有地下结构变形增大、受力也变大，对既有地下结构较为不利。

(6) 组合 6 (a)、6 (b) 对比可以看出，双洞隧道间距较小时，对既有地下结构的影响相互叠加，既有地下结构变形呈单峰状，反之则影响较少，呈双峰状变形。同时，既有结构内力将大幅下降。

2.3 新建隧道施工方法的影响分析

计算分析中，采用地层损失率变化来反应不同施工方法对既有地下结构力学响应的影响。 V_l 值分别取 0.15%，0.3%，0.45%，0.6%，0.75%，0.9%。不同 V_l 值条件下既有地下结构响应如图 6 所示。

图 6 中，地层损失率与既有地下结构最大沉降、最大弯矩和剪力呈线性关系。当地层损失率增大 3 倍时，最大沉降值约增大 2.6 倍。

2.4 新建隧道开挖面积的影响分析

开挖面积分别取 3, 10, 50, 90, 110, 140 m² 进行计算。既有地下结构力学响应如图 7 所示。

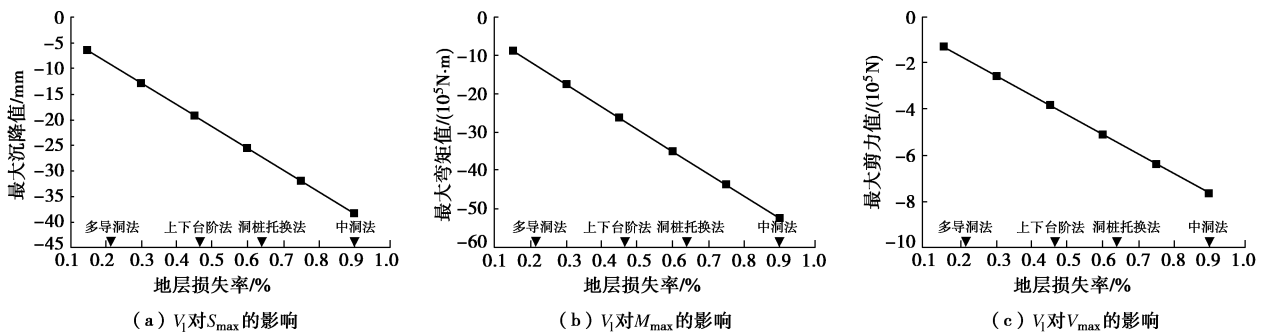


图 6 地层损失率对既有地下结构的影响

Fig. 6 Influences of formation loss rate on mechanical response of existing underground structures

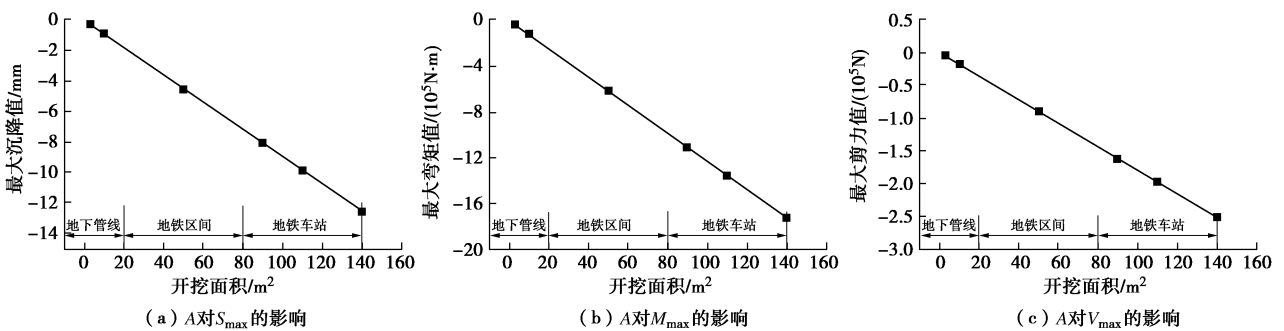


图 7 新建隧道开挖面积对既有地下结构的影响

Fig. 7 Influences of excavation area on mechanical response of existing underground structures

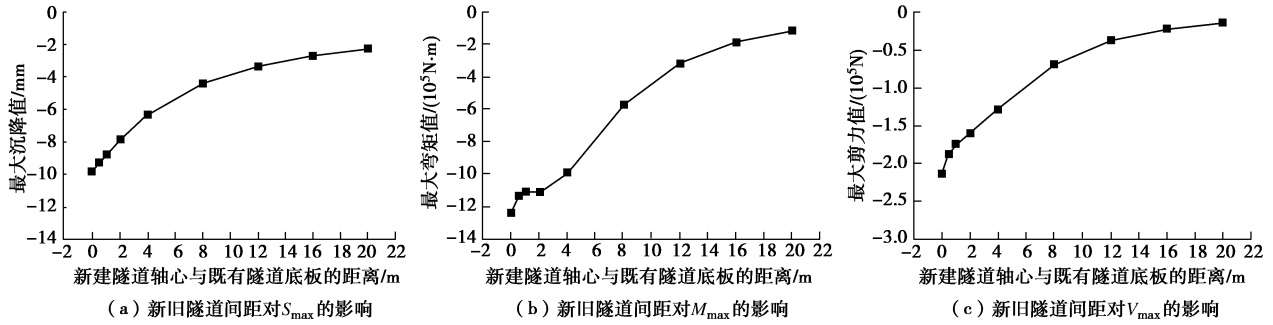


图 8 新旧隧道竖向间距对既有地下结构的影响

Fig. 8 Influences of vertical distance between new and old tunnels on mechanical response of existing tunnels

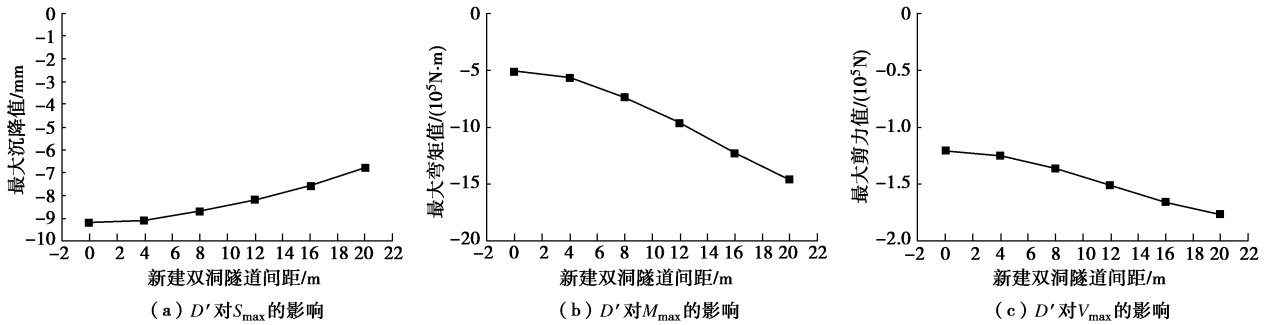


图 9 双洞隧道水平间距对既有地下结构的影响

Fig. 9 Influences of double-tunnel spacing on mechanical response of existing underground structures

图 7 表明, 开挖面积与既有地下结构沉降、最大弯矩和剪力呈线性关系。开挖面积增大 5 倍时, 沉降约增大 4.2 倍。由 Peck 公式可知, 开挖面积及其地层损失率对地层的扰动是乘积的关系, 因此, 减小开挖面积是控制既有地下结构变形的关键。

2.5 新旧结构竖向和水平间距的影响

改变计算模型中新建隧道竖向净距的大小, 分析竖向间距变化既有地下结构的响应。新旧隧道竖向间距取 0~20 m, 影响如图 8 所示。

新建隧道采用双洞分离形式时, 双洞净距 (D') 对既有结构的影响如图 9 所示, 净距取 0~20 m。

从图 8, 9 中可以看出:

(1) 新建隧道顶板与既有地下结构底板间距越大, 既有地下结构沉降和受力越小。间距由 0 m 变 8 m (1 倍洞径) 时, 最大沉降及受力衰减速率较快; 8~20 m (1~2 倍洞径) 时, 最大沉降及受力衰减速率较慢; 20 m 后影响逐渐稳定。

(2) 实际工程中, 增大竖向间距会增加新建隧道埋深及隧道纵坡, 有地下水时增加降水难度等诸多不便。因此案例统计显示, 北京地区穿越工程均以近距离或零距离为主。

(3) 随着新建隧道双洞间距的增大, 各隧道施工对既有地下结构的影响逐渐分离, 既有地下结构最大沉降呈减小趋势。当净距大于 2 倍洞径后, 沉降比单洞隧道减小 25%。

(4) 由于变形缝的存在, 随着双洞隧道间距的增大, 穿越组合类型将由组合 5 转化为组合 7 或 1。此时, 与沉降规律相反的是, 随着双洞间距的增大, 既有地下结构受力将逐渐增大。

(5) 在以变形控制为前提的穿越工程中, 新建隧道双洞间距的增大可有效控制既有结构沉降。

2.6 既有地下结构刚度的影响

既有地下结构刚度的变化需分为是否存在变形缝分别考虑 (以组合 5 和组合 6 (a) 为例)。考虑地下管线、地铁区间及车站刚度的不同, 既有地下结构刚度取 $0.01 \times 10^{13} \sim 2.0 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 如图 10 所示。

从图 10 (a) ~ (f) 中可以看出, 既有结构有无变形缝在刚度变化时呈现完全不同的规律:

(1) 有变形缝时, 两个变形缝之间的管节长度短, 刚度大, 管节变形呈现刚体特征, 以整体沉降为主。随着刚度的增大, 既有结构变形呈增大趋势, 但变化较小。当刚度由 $0.01 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}$ 变为 $2 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 最大沉降值由 7.7 mm 变为 8.0 mm, 变化率仅为 3.89%, 并在既有结构刚度达到 $0.5 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}$ 后趋于平稳。

(2) 无变形缝时, 既有结构部分受到穿越工程的影响, 呈现柔性特征, 受刚度变化影响大。随着刚度的增加, 既有结构沉降逐渐减小, 由 7.05 mm 减小为 4.10 mm, 变化率达到 41.84%, 结构刚度达到 $2.0 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}$ 后趋于平稳。反之, 随着刚度的增大, 抵抗变形

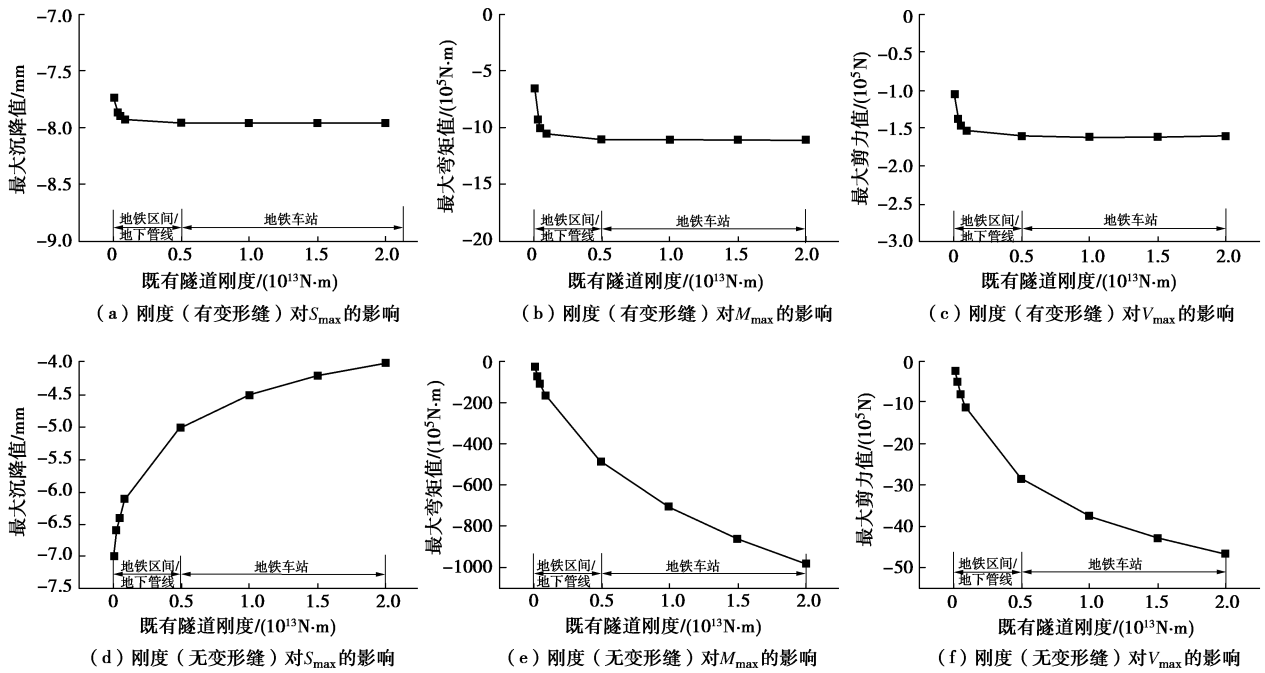


图 10 既有地下结构刚度对既有地下结构的影响

Fig. 10 Influences of rigidity on mechanical response of existing underground structures

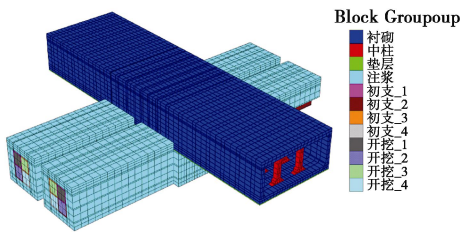


图 11 区间下穿地铁车站的三维数值模型

Fig. 11 Numerical model for twin tunnels tunnelling beneath existing subway station

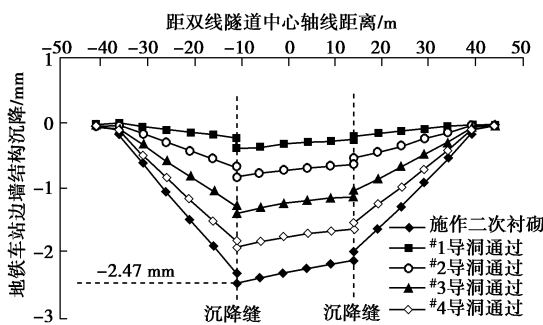


图 12 既有车站纵向沉降变形图

Fig. 12 Settlements of existing subway stations

能力逐渐增强，受力呈逐渐增大趋势。

2.7 施工过程的动态变化研究

鉴于隧道施工的时空效应，以案例 11 为例建立三维有限元模型，分析穿越过程中既有地下结构的动态响应。地层参数按照工程地质勘查报告取值，结构材料参数按照有关规范取值。

从表 6 可以看出：

(1) 随着新建工程的施工，既有车站沉降呈逐渐增大的趋势，最终沉降为 2.47 mm。

(2) 4 导洞阶段沉降占比 76.9%，四导洞施工是变形控制的核心阶段，优化开挖面积和工序，减小对地层的扰动，是控制既有隧道变形的关键。

(3) 拆撑及施作二衬阶段沉降占比 23.1%，分段、分步拆撑是控制变形的重要措施。

表 6 既有地铁车站结构的最大沉降

Table 6 Maximum settlements of existing subway stations

阶段	S_i /mm	$(\Delta S/S_i)/\%$	$(S_i/S_{max})/\%$
1 导洞施工	0.36	14.6	14.6
2 导洞施工	0.81	18.2	32.8
3 导洞施工	1.37	22.7	55.5
4 导洞施工	1.90	21.5	76.9
拆撑施作二衬	2.47	23.1	100.0

注： S_{max} 为施工结束时最大沉降值， S_i 为各阶段最大沉降值， ΔS 为各阶段增量沉降值。

3 既有地下结构力学响应模式及控制

3.1 既有地下结构力学响应模式

不同的组合情况，既有地下结构的响应并不相同。组合 2、5 中既有地下结构的变形近似呈 V 型，组合 1、3、4、6 (a) 近似呈 U 型，组合 6 (b)、7 近似呈 W 型，根据变形情况将受下穿施工影响的既有地下结构响应分为 3 种模式，各模式产生的条件及对应的受力、变形情况如表 7 所示。

表 7 既有地下结构力学响应模式

Table 7 Mechanical response types of existing underground structures

模式	V	U	W
新建隧道	单洞或双洞 (间距较小)	单洞或双洞 (间距较小)	双洞 (间距较大)
既有地下结构	存在变形缝	存在或不存在变形缝	存在或不存在变形缝
组合方式	隧道中心线位于既有地下结构变形缝正下方或附近 (2, 5)	隧道中心线位于既有地下结构管节中心正下方或附近 (1, 3, 4, 6 (a))	隧道中心线位于既有地下结构管节中心正下方或附近 (6 (b), 7)
S_{max}/mm	8~9.7	4.1~7.1	2.2~3.5
$\Delta S_{max}/mm$	6.8~9	4.1~4.3	2.1~2.2
$\Delta S'_{max}/mm$	0.5~2	0~3.5	0~2.2
$M_{max}/(kN \cdot m)$	-3280~635	-51540~-4755	-3714~-396
V_{max}/kN	-419~-150	-5149~-556	-435~-29

3 种模式中, V 型沉降最大、受力较小, U 型受力最大、沉降较小, 而 W 型变形、受力均最小。

3.2 穿越施工安全控制对策

基于北京穿越工程特点, 结合各因素影响下既有结构的力学响应规律, 提出以下安全控制对策:

(1) 施工方案确定中, 应严格控制新建隧道开挖面积, 当开挖面积较大时, 优先选择双洞分离的形式并尽可能增大水平间距。

(2) 根据统计案例结果, 在综合使用辅助措施的前提下, 不留或少留间隔土。

(3) 尽可能选择 W 型穿越模式, 以此减小对既有地下结构的扰动。

4 结 论

(1) 北京地区下穿工程以正交下穿为主, 新建隧道种类多样, 包括市政管道、地铁区间及车站, 洞室数量以单洞和双洞为主。施工方法包括多导洞法、台阶法, 洞桩托换法和中洞法。Peck 公式拟合得到各工法地层损失率平均值为 0.165%, 0.464%, 0.683%和 0.890%。新建隧道开挖面积与施工方法有较明确的对应关系。

(2) 既有结构实测最大沉降为 1.08~31.26 mm, 概率分布分析表明符合数学期望 (μ) 4.89, 方差 σ^2 为 16.4 的正态分布。其中, 新建市政管道下穿施工时既有地下结构平均最大沉降为 2.56 mm, 新建地铁区间时为 3.82 mm, 而新建地铁车站时达到 11.07 mm, 是风险最高、难度最大的工程。

(3) 考虑新建隧道与既有结构的相对位置、既有结构长度、新建隧道洞室数量等因素, 将穿越工程归纳为 7 种组合, 采用两阶段法对各因素影响下既有地下结构力学响应的进行分析, 并根据受力及变形特点将既有地下结构的力学响应明确为 V, U, W 3 种模式。

(4) 穿越工程中, 应严格控制新建隧道开挖面积,

优先选择双洞分离的形式。在综合使用辅助措施的前提下, 不留或少留间隔土, 并尽可能选择 W 型穿越模式, 以此减小对既有地下结构的扰动。

参考文献:

- [1] 王占生, 张顶立. 浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4208 - 4214. (WANG Zhan-sheng, ZHANG Ding-li. Key techniques on shallow embedded tunnel constructed beneath existing subway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4208 - 4214. (in Chinese))
- [2] 马振超. 北京既有线下穿工程的特点及影响规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (MA Zhen-chao. Research on the characteristics and the influence of the construction cross beneath the existing line in Beijing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [3] 韩 焯, 刘赫炜, STANDING J R. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 134 - 141. (HAN Xuan, LIU Cheng-wei, STANDING J R. Structural settlement of existing tunnel caused by new tunnel excavated underneath[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 134 - 141. (in Chinese))
- [4] 张成平, 张顶立, 王梦恕. 大断面隧道施工引起的上覆地铁隧道结构变形分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 805 - 810. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu. Structural deformation of overlying subway tunnels induced by tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 805 - 810. (in Chinese))
- [5] 张成平, 张顶立, 吴介普, 等. 暗挖地铁车站下穿既有地铁隧道施工控制[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 69 - 73. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WU Jie-pu, et al. Construction control of a newly-built subway station

- under-crossing the existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2009, **35**(5): 69 - 73. (in Chinese))
- [6] 姚海波. 大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005. (YAO Hai-bo. Research on construction technology of large section tunnel crossing under the existing subway tunnel by means of shallow tunneling method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [7] 王剑晨, 张顶立, 张成平, 等. 北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有地下结构变形特点及预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 947 - 956. (WANG Jian-chen, ZHANG Ding-li, ZHANG Cheng-ping, et al. Deformation characteristics of existing tunnels induced by excavation of new shallow tunnel in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 947 - 956. (in Chinese))
- [8] 陈孟乔, 杨广武. 新建地铁车站近距离穿越既有地铁隧道的变形控制[J]. 中国铁道科学, 2011, **32**(4): 53 - 59. (CHEN Meng-qiao, YANG Guang-wu. Deformation control of a newly-built subway station crossing the adjacent existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2011, **32**(4): 53 - 59. (in Chinese))
- [9] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1373. (ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1373. (in Chinese))
- [10] 李鹏. 穿越工程对地铁五棵松车站变形影响统计分析 & 预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. (LI Peng. Statistical analysis and prediction of the deformation of Wukesong subway station due to being crossed[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [11] 徐吉民. 北京地铁军博站下穿施工对既有线影响的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2012. (XU Ji-min. Study of influence for Beijing Junbo subway station passing through the existing line[D]. Beijing: North China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [12] 沈良帅, 贺少辉. 复杂环境条件下跨下穿同一既有地铁隧道的变形控制分析及施工方案优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 2893 - 2900. (SHEN Liang-shuai, HE Shao-hui. Subsidence controlling and construction scheme optimization of cutting across and underpassing an existing metro tunnel under complex environmental conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2893 - 2900. (in Chinese))
- [13] 王剑晨, 张顶立, 张成平, 等. 浅埋暗挖隧道近距施工引起的上覆地铁结构变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 90 - 98. (WANG Jian-chen, ZHANG Ding-li, ZHANG Cheng-ping, et al. Deformation of overlying subway structure caused by nearly shallow buried tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 90 - 98. (in Chinese))
- [14] 白海卫. 新建隧道下穿施工对既有地下结构纵向变形的影响和工程措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. (BAI Hai-wei. Study on longitudinal deformation of existing metro tunnel caused by undercrossing construction and engineering measures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [15] 黄义, 何芳社. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (HUANG Yi, HE Fang-she. Beam, plate and shell on elastic foundation[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [16] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2005. (XU Ling. Research of the longitudinal settlement of soft soil shield tunnel[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2005. (in Chinese))