

文章编号: 1007-2993(2023)05-0567-07

# 软土-基岩条件下地铁车站施工间歇期的结构变形监测与分析

柯磊<sup>1</sup> 李红<sup>1</sup> 刘坤<sup>1</sup> 陈明银<sup>2</sup>

(1. 中铁五局集团第五工程有限责任公司, 湖南郴州 423000; 2. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏苏州 215000)

**【摘要】** 针对软土-基岩条件下地铁车站施工间歇期的结构变形监测与评价中存在的不足, 将布拉格光纤光栅传感技术应用于车站施工间歇期的结构变形监测中。以深圳某地铁车站为例, 将光纤传感器安装在车站主体结构上, 远程自动化获取结构在施工间歇期的变形信息。监测结果表明: 软土-基岩地基的主体结构在施工间歇期存在一定程度变形, 监测期间车站地板的最大应变为  $62 \mu\epsilon$ , 车站地下二层的墙柱结构最大变形为  $249 \mu\epsilon$ , 位于软土-基岩分界面附近的墙柱结构同时受到剪切和压缩应力的影响, 表明软土-基岩地基的车站设计应分别考虑底板和底层墙柱的抗弯和抗剪。

**【关键词】** 变形监测; 软土-基岩地基; 施工间歇期; 车站主体结构; 布拉格光纤光栅技术

**【中图分类号】** U 227

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.009

## Monitoring and Analysis of Structural Deformation During Subway Station Construction Interval under Soft Soil-bedrock Conditions

Ke Lei<sup>1</sup> Li Hong<sup>1</sup> Liu Kun<sup>1</sup> Chen Mingyin<sup>2</sup>

(1. China Railway Fifth Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Chenzhou 423000, Hunan, China; 2. Suzhou Nanzhi Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China)

**【Abstract】** There are insufficient researches on the structural deformation monitoring and evaluation of subway stations during construction intervals under the condition of soft soil-bedrock. The fiber Bragg grating sensing technology was applied in the structural deformation monitoring research during the construction interval of the station. Taking a subway station in Shenzhen as a research case, the optical fiber sensor was installed on the main structure of the station, and the deformation information of the structure during the construction interval was obtained automatically and remotely. The results show that the main structure of the soft soil-bedrock foundation has a certain degree of deformation during the construction interval. During the monitoring period, the maximum strain of the station floor is  $62 \mu\epsilon$ , and the maximum deformation of the wall column structure of the second underground floor of the station is  $249 \mu\epsilon$ . Wall-column structures located near the soft soil-bedrock interface are affected by both shear and compressive stresses. Therefore, the flexural and shear strength design of the base plate and the bottom wall column should be respectively considered in the subsequent station construction of the soft soil-bedrock foundation.

**【Key words】** deformation monitoring; soft soil-bedrock foundation; construction interval; main structure of the station; fiber Bragg grating technology

### 0 引言

随着我国城市化的不断发展, 多数城市开始对地下空间进行开发和利用<sup>[1-3]</sup>。保障城市轨道交通、深基坑以及地下综合管廊等地下工程的安全施工成为新的挑战。地铁作为城市地下工程的核心基础设施, 其稳定性评价尤为重要。由于城市地铁工程建设

一般紧邻既有道路、隧道、管线等, 施工工况较为复杂。地铁车站基坑的开挖将不可避免地影响周围结构的稳定性<sup>[4]</sup>。此外, 地铁的建设也常常面临着复杂的不良地质条件, 例如软土、湿陷性黄土、岩溶、软硬岩共存等<sup>[5-6]</sup>。这对车站与隧道的支护结构和地铁的主体结构变形量控制与评价提出了严格的要求。

作者简介: 柯磊, 男, 1980年生, 汉族, 大学本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程监测与评价工作的研究。E-mail: 124721770@qq.com

结构变形的评价方法可以分为数值模拟<sup>[7-8]</sup>和现场监测<sup>[9]</sup>。数值模拟方法可较为直观、全面地了解结构在各种荷载作用下的变形。例如,白晓宇等<sup>[10]</sup>基于有限元模拟研究了土-岩组合地层深基坑围护结构的变形规律。朱彦鹏等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方法建立深基坑结构的变形和渗流三维模型,对开挖过程中的支护结构的变形进行了评价。江中华<sup>[12]</sup>针对地下车站主体结构在运营期不同荷载条件下的力学响应进行三维全尺寸的精细化数值分析。数值模拟的准确度取决于模型预设的参数与土体和结构的实际参数差异大小。然而在复杂的地质条件和工况下通常难以准确获得土体的真实物理力学参数,因此,模拟结果与实际结果存在差异。通过对车站施工过程中的结构变形进行监测可以准确地获取其变形信息,进一步分析结构的稳定性。鲍树峰等<sup>[13]</sup>提出根据围护墙水平位移最大值、水平位移最大值的变化率等组合基坑安全风险预警指标特征参数,并根据实际监测数据对基坑的安全状态进行评价和预警。商大勇<sup>[14]</sup>对地铁车站的基坑支护体系下阳角部位的结构变形和土体沉降进行监测,并分析了变形规律。张楠<sup>[15]</sup>基于两个典型岩-土地基深基坑工程案例的监测数据,分析了岩-土地基基坑的变形特点。在复杂地质条件下通过对结构或周围土体的监测是一种高效可行的方法。然而,目前的研究多针对地铁施工过程中或地铁运营期的监测与评价,车站施工间歇期的结构变形规律的研究较为匮乏。特别处于软土-岩石地基的条件下,由于软土的承载力较低,车站的主体结构完工后,地基仍有可能产生较大的压缩变形。车站的主体结构发生的差异性沉降将影响地铁的安全运营,甚至诱发结构产生局部的裂隙。因此,软土-基岩条件下地铁车站施工间歇期的结构变形监测研究对于地铁的安全运营以及类似工程的设计具有重要的意义。

本文将布拉格光纤光栅(FBG)传感技术应用于软土-基岩条件下地铁施工间歇期的车站主体结构监测。多个FBG传感器被布设于车站的顶板、底板以及墙柱结构中。为了对比不同地基条件下结构的变形规律,本文选择位于软土-岩石地基和岩石地基两个典型的监测剖面进行研究,并针对结构变形的差异性进行了分析。

## 1 监测原理

### 1.1 光纤布拉格光栅(FBG)感测技术

布拉格光纤光栅(FBG)是纤芯折射率沿轴向呈周期性变化的光栅。当入射激光波长与FBG的周期满足布拉格条件时,光栅处的温度或应变的改变将引

起光栅周期的变化<sup>[16]</sup>。光纤芯层和包层半径同时变小,通过光弹性效应改变了光纤的折射率,从而引起光栅波长偏移<sup>[17-18]</sup>。基于应变与光栅波长偏移量的线性关系,被测结构应变或者温度可通过计算得出<sup>[19]</sup>。布拉格光纤光栅具体传感原理见图1,相关计算公式见式(1)。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$ 为光纤光栅的中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为光栅折射率; $\Lambda$ 为光栅周期。

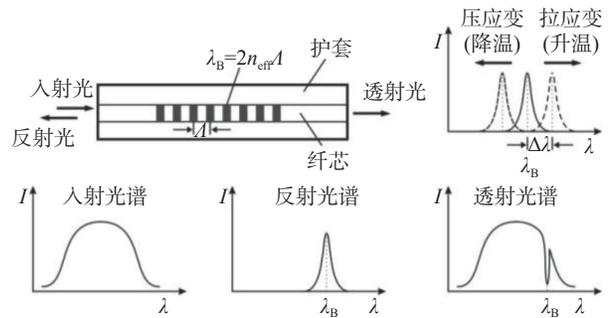


图1 FBG传感原理

由式(1)可知,FBG反射的波长 $\lambda_B$ 与栅格间距及光纤折射率相关,当光纤发生轴向变形及温度变化时即可引起栅格间距及折射率的漂移,从而反射波长也发生相应漂移,即通过测量 $\lambda_B$ 漂移量,即可得光纤的变形量或温度变化量。

应变和温度与中心波长 $\lambda_B$ 的均为线性关系,其关联公式如式(2)所示:

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon\varepsilon + \alpha_T\Delta T \quad (2)$$

式中: $\alpha_\varepsilon$ 为光纤光栅应变灵敏系数; $\alpha_T$ 为光纤光栅的温度灵敏度系数; $\Delta T$ 为温度变化值; $\varepsilon$ 为应变。

### 1.2 FBG应变计

FBG埋入式应变计如图2所示,FBG埋入式应变计利用光纤光栅作为微测力元件。当传感器受到轴向拉伸或压缩时,传感器的弹性敏感元件所受的作用力发生改变。同时光纤光栅波长发生相应的变化。在室内标定试验确定传感器的应变与光栅波长的线性系数后,FBG传感器可以对结构的变形量进行监测。此外,FBG埋入式应变计通过增加温度参考光

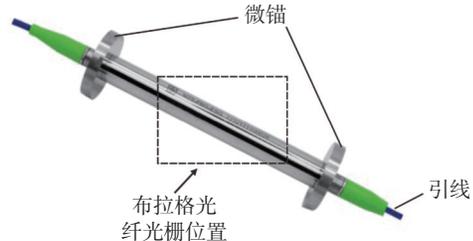


图2 FBG埋入式应变计

栅实现温度的自补偿功能,可以有效剔除温度变化对应变测量引起的误差。光纤光栅埋入式应变计常被

应用于结构内部应变监测,其灵敏度高,稳定性好。传感器参数见表 1。

表 1 FBG 埋入式应变计参数

量程/ $\mu\epsilon$	分辨率	光栅中心波长/nm	反射率/%	应变计尺寸/mm	微锚直径/mm
-1500 ~ +1000	0.1% F. S	1510 ~ 1590	>90	直径: 13; 长度: 110	30

## 2 案例分析

### 2.1 研究区域概况

研究区域概况和地铁车站传感器布设如图 3 所示,研究区域位于广东省深圳市轨道交通 14 号线的坳背站,建筑总面积约为 40928  $m^2$ 。区域周围存在较多的既有建筑,基坑开挖深度约为 19 m,因此,车站的监测工作尤为重要。基坑开挖范围内的土层浅部主要为素填土和粉质黏土,在 8.8 m 深度以下存在微风化碎屑灰岩,其中不均匀分布溶洞。软土地基区域主要由黏土、粉质黏土、粉土组成。表 2 为软土地基土层的基本物理力学指标。本文的研究内容是在车站主体结构完工以及上覆回填土覆盖完成后的主体结构变形规律。因此,相比于不同深度的地层差异性,横纵向的软硬土的分布差异性对本文的研究更为重要。如图 3(a)所示,根据前期勘测结果,确定了软土-岩石的潜在分界面。以基坑的两个典型剖面  $A_0$ - $A_1$ 、 $B_0$ - $B_1$  为例,本文将分析软硬分布不均条件下的车站主体结构变形特点。

坳背站为地下二层双岛式站台车站,地下一层为站厅层,地下二层为站台层。车站顶板埋深为 5.4 m,中板埋深为 11.45 m,底板埋深为 19.65 m。为确保基坑施工安全和地下结构运营安全,结合本地下

的工程特点及技术条件,项目重点监测了岩溶发育区的软土-岩石界面车站底板、顶板、柱体等结构。采用 FBG 传感器监测结构变形,FBG 传感器的布设示意图如图 3(b)所示。同时为了对比软土-岩石地基与岩石地基车站结构变形差异性, $B_0$ - $B_1$  剖面的主体结构上被布设与  $A_0$ - $A_1$  相同的传感器。

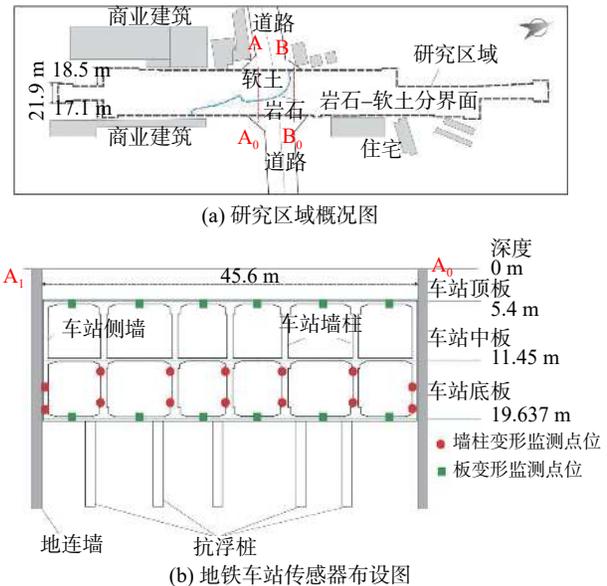


图 3 研究区域概况与地铁车站传感器布设图

表 2 软土地基地层基本物理力学参数

岩土编号	岩土名称	深度/m	天然含水量w/%	重度 $\gamma$ /( $kN \cdot m^{-3}$ )	土粒比重 $G_s$	天然孔隙比e	饱和度 $S_r$ %	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}$ / $MPa^{-1}$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa	直剪试验			
												内摩擦角 $\phi_q$ (°)(快剪)	黏聚力 $c_q$ /kPa(快剪)	内摩擦角 $\phi_s$ (°)(固快)	黏聚力 $c_s$ /kPa(固快)
1	素填土	0~3.3	20.78	19.32	2.71	0.69	81.07	10.80	0.31	0.21	8.61	23.20	25.90		
2	黏土	3.3~7.5	35.71	17.98	2.73	1.07	91.27	18.50	0.67	0.50	4.54	5.88	17.38	11.65	25.40
3	粉质黏土	7.5~19.5	24.71	19.50	2.71	0.74	89.89	12.85	0.43	0.33	5.64	13.95	23.25	15.67	32.55
4	粉土	19.5~20	17.21	20.6	2.67	0.52	87.83	8.54	0.21	0.21	7.68	19.18	21.86		
5	粉质黏土	20~29.1	27.01	18.93	2.71	0.86	92.50	13.22	0.54	0.31	6.52	16.80	25.20	22.70	28.60

说明:表中物理力学参数均为土层深度范围内的平均值。

### 2.2 传感器布设

FBG 埋入式应变计在混凝土浇筑前绑扎于钢筋骨架上(见图 4(a)、图 4(b))。传感器两端的引线根部采用扎丝或扎带将其固定至钢筋上,随混凝土浇筑

即可实现埋入式应变计的植入。传感器安装完成后采用便携式 FBG 解调仪检测传感器的存活率并记录传感器的初始波长(见图 4(c))。FBG 埋入式应变计采用专用光缆引线接续,并固定至钢筋上沿钢筋引

出(见图4(d))。其中,引线的过弯处需要以大于5 cm的弯曲半径引出。引线在穿过钢筋混凝土结构

时须穿套保护管过渡保护。最后,线路被集成至FBG无线解调仪上,解调仪参数见表3。

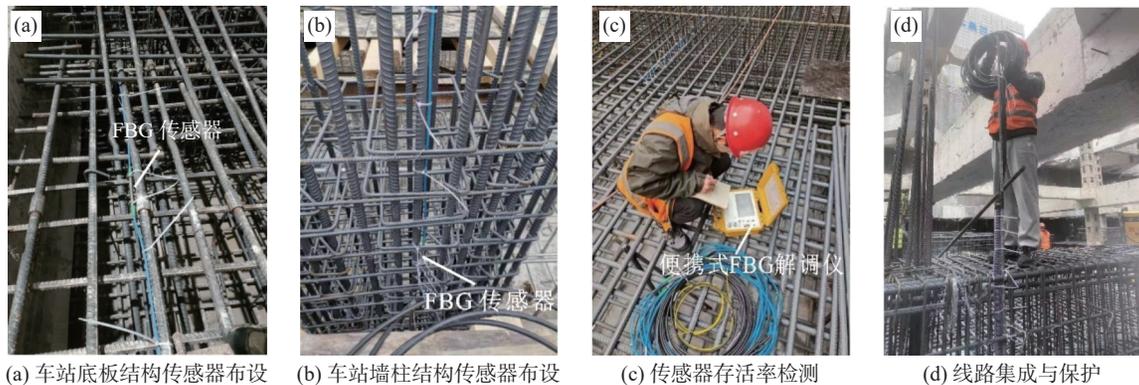


图4 光纤光栅传感器埋设保护现场照片

表3 光纤光栅解调仪性能参数

通道数	波长范围/mm	波长分辨率/pm	重复性/pm	解调速率/Hz	动态范围/dB	光学接口类型	每通道最大FBG数量
16	1527 ~ 1568	1	±3	1	35	FC/APC	30

### 2.3 监测结果

#### (1) A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub> 剖面结构监测结果

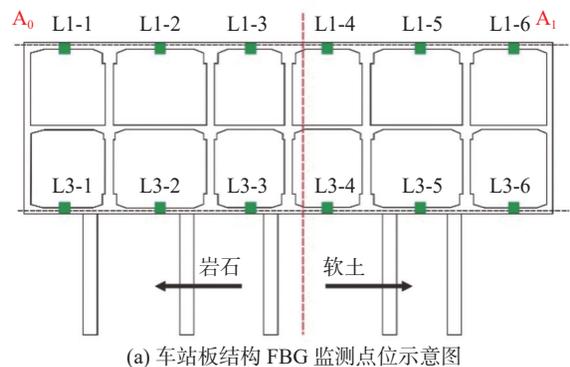
A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub> 车站板结构 FBG 监测结果如图5所示。如图5(a)所示,针对车站顶板和底板布设的传感器进行编号,从A<sub>0</sub>至A<sub>1</sub>,传感器编号分别为L<sub>ij</sub>(i=1,2,3;j=1,2,...,6,i表示楼层,j表示每层传感器编号)。软土-岩石的潜在分界面约位于车站剖面的中间。如图5(b)所示,车站顶板的中部应变具有不断增大的趋势,最大值为25.3 με。而车站两侧应变则不断地减少,最小值为-28.6 με。顶板的应变变化范围较小,且车站两侧变形较为对称。如图5(c)所示,车站底板整体变形不断增大,并呈现不均一性。L3-2和L3-4处的应变在11月6日之后快速增大,最大值分别为61.6 με和47.9 με。位于岩石地基范围内的结构变形较大,而位于软土范围内的结构变形较小。

A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub> 车站墙柱结构 FBG 监测结果如图6所示。车站地下二层的墙柱结构具有明显的压应变,且不断增大,最大压应变约为249 με。不同位置处的墙柱应变呈现中心大两侧小的趋势,整体曲线为倒U型。车站中部整体应变分布在150~250 με范围内。同一根墙柱的上下两个位置的FBG应变传感器呈现了不同的应变值。其中,L2-4与L1-4处传感器数值相差较大,应变差值为114 με,并且该位置位于软土-岩石交界面附近。

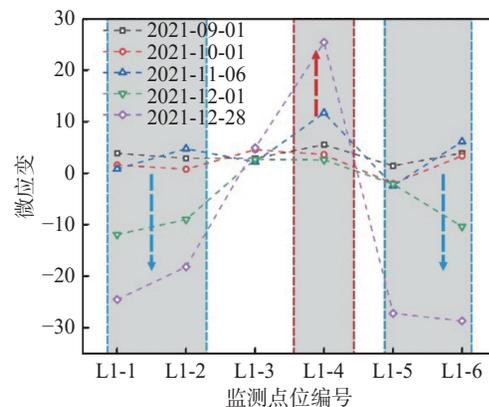
#### (2) B<sub>0</sub>-B<sub>1</sub> 剖面结构监测结果

B<sub>0</sub>-B<sub>1</sub> 车站板结构 FBG 监测结果如图7所示,

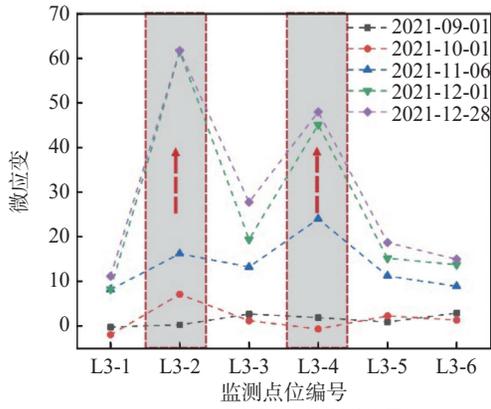
软土-岩石潜在分界面位于B<sub>1</sub>侧的车站边界附近。该剖面布设了三层板结构的监测点位,其编号规律与A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub>类似。如图7(b)所示,顶板整体应变变化较小,应变范围在-20~+15 με之内。而车站中板的应变则较为复杂,从B<sub>0</sub>侧开始,应变的增大和减小趋势交替出现,即L2-1与L2-4应变明显增大,L2-3与



(a) 车站板结构 FBG 监测点位示意图

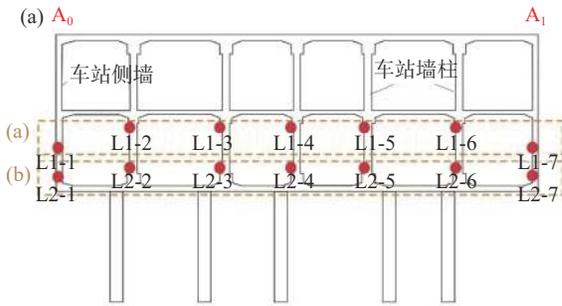


(b) 车站顶板应变监测结果

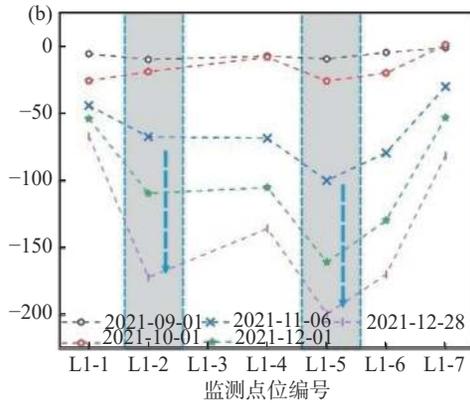


(c) 车站底板应变监测结果

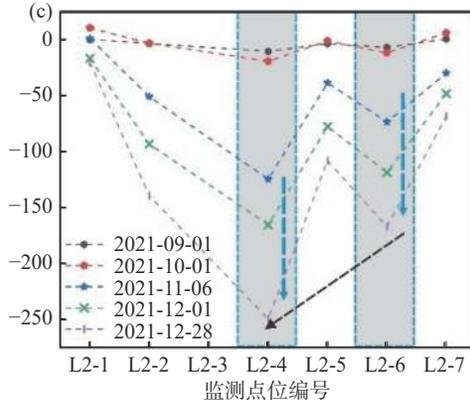
图5 A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub> 车站板结构 FBG 监测结果



(a) 车站墙柱结构 FBG 监测点位示意图

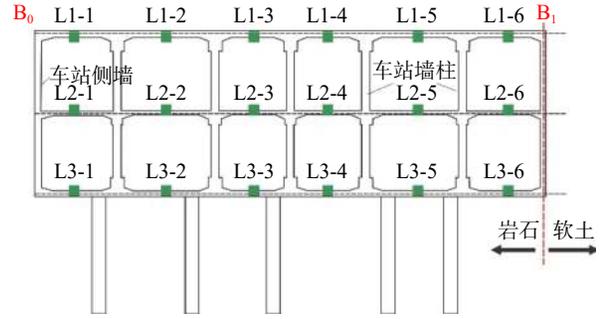


(b) 墙柱结构上部应变监测结果

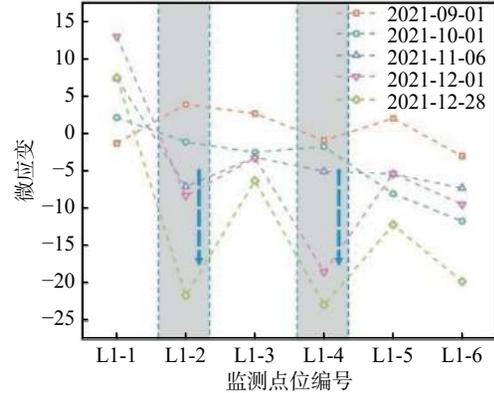


(c) 墙柱结构下部应变监测结果

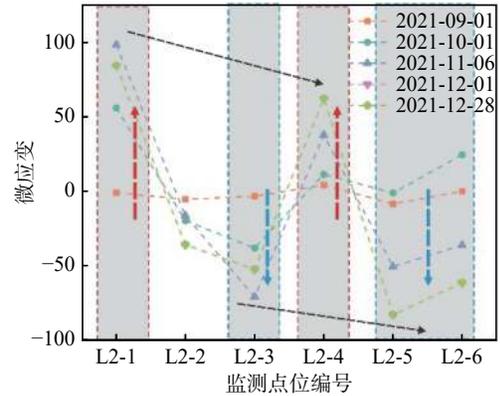
图6 A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub> 车站墙柱结构 FBG 监测结果



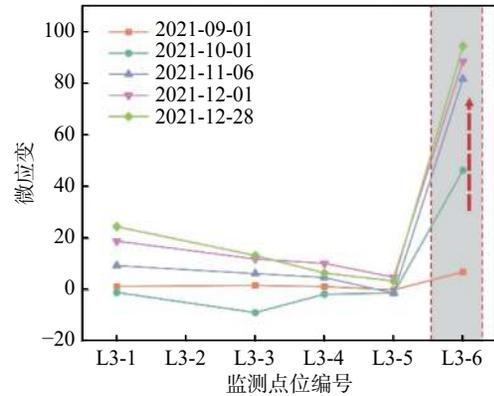
(a) 车站墙柱结构 FBG 监测点位示意图



(b) 车站顶板应变监测结果



(c) 车站中层板应变监测结果



(d) 车站底板应变监测结果

图7 B<sub>0</sub>-B<sub>1</sub> 车站板结构 FBG 监测结果

L2-5 应变明显减小。并且在 12 月 28 日时, L2-1 的应变比 L2-4 处大 22  $\mu\epsilon$ , L2-3 处的应变比 L2-5 处大

13  $\mu\epsilon$ 。这表明车站中板整体呈现  $B_0$  侧变形值大于  $B_1$  侧(见图 7(c))。如图 7(d)所示,车站的底板变形规律较为明显,除位于软土附近的板结构具有明显的变形,其余均表现较为一致的微弱变形。

$B_0$ - $B_1$  车站墙柱结构监测结果如图 8 所示, L1-3 和 L2-3 处的应变最大值分别为 35.6  $\mu\epsilon$  和 34.2  $\mu\epsilon$ , L1-3 和 L2-3 处的压应变最大值分别为 -52  $\mu\epsilon$  和 -64  $\mu\epsilon$ 。同一根墙柱的不同位置的应变近似相等。且变化规律较为一致,在靠近软土地基处的墙柱出现应变增大,其余墙柱均表现为不同程度的应变减小的趋势。且与图 6 中的监测结果相比,  $B_0$ - $B_1$  剖面处墙柱变形较小,压应变最大值约为  $A_0$ - $A_1$  剖面处墙柱压应变最大值的 1/4。

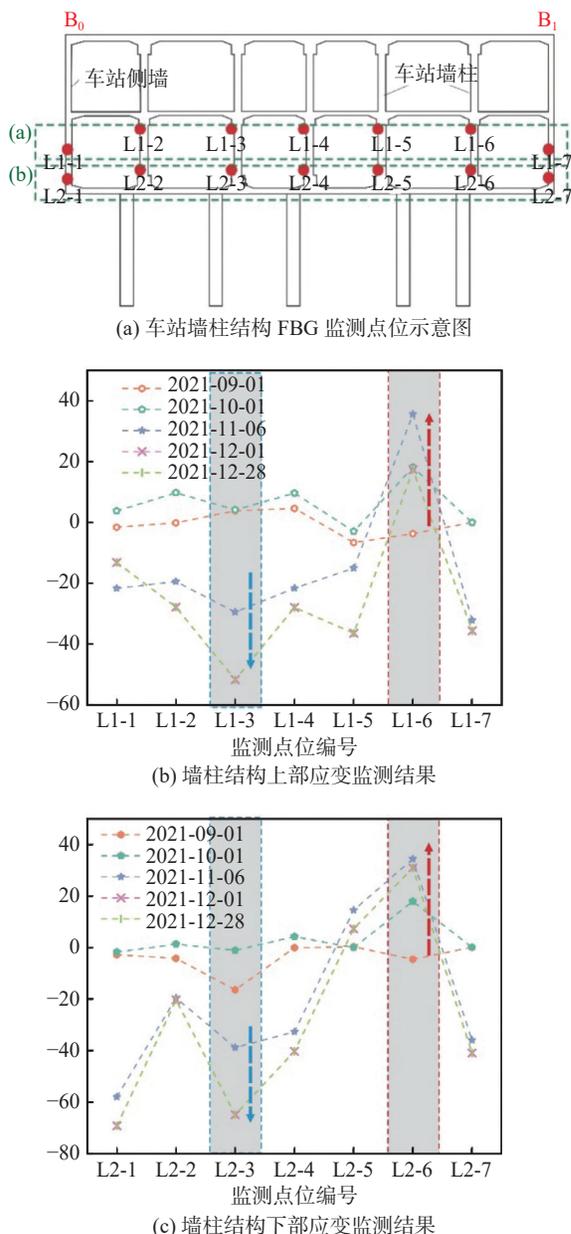


图 8  $B_0$ - $B_1$  车站墙柱结构 FBG 监测结果

### 3 讨论

对比不同地基条件下的车站主体结构变形可以发现,岩石地基条件下的车站主体结构整体变形明显小于软土-岩石地基条件下,且变形较为均一,仅在靠近软土的结构出现了较为明显的变形。墙柱的不同位置的变形规律和变形量较为一致。而软土-岩石地基条件下,底板位于岩石部分出现了较为明显的变形,位于软土部分的结构变形量相对较小。

不同地基条件下车站底板变形差异示意图如图 9(a)所示。软土-岩石交界面可以被视为一个等效支点,位于软土部分的板结构由于底部承载力不足随着软土的压缩整体向下移动。这将导致位于软土部分的结构弯曲变形较小,而由于等效支点的支撑作用,位于岩石部分的板结构将呈现中部隆起的变形特点,即具有明显的弯曲变形。因此,底板在等效支点附近和岩石地基范围内具有较为明显的弯曲变形。如图 9(b)所示,由于  $B_0$ - $B_1$  处的土-岩分界面位于结构边缘处,因此只有靠近软土地基的结构存在较小的弯曲变形。

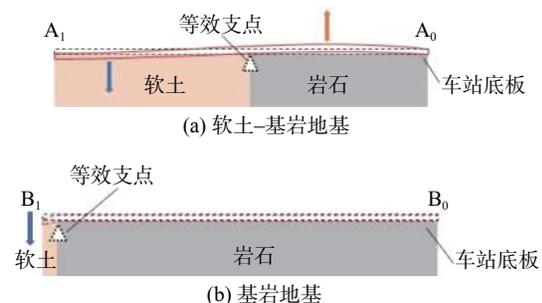


图 9 不同地基条件下车站底板变形差异示意图

此外,图 6 中同一墙柱的不同位置存在变形差异较大的现象。不同地基条件下车站墙柱变形差异如图 10(a)所示。车站地下二层的板与墙柱结构可以视为矩形结构,当该结构全部位于软土或全部位于岩石地基时,相邻的墙柱的变形量相差较小。因此,

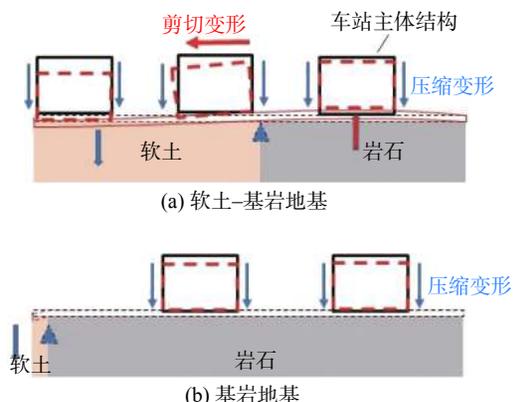


图 10 不同地基条件下车站墙柱变形差异示意图

矩形结构表现整体的压缩变形,同一墙柱结构的不同位置的应变相差较小。而位于软土-岩石交界面附近的矩形结构,底板的变形差异性导致相邻的墙柱结构变形明显不同。在底板和中板的作用下,墙柱不但受到压缩变形还承受一定的剪切变形,因此表现为同一墙柱的不同位移的变形相差较大。而对于结构全处于岩石地基条件下,其墙柱的整体变形也相应的较为均一(见图10(b))。

#### 4 结论

本文以深圳地铁坳背站为研究案例,采用FBG应变计对不同地基条件下的车站主体结构的变形进行自动化监测。基于监测结果对软土-基岩条件下的车站施工间歇期的结构变形进行分析,得到以下结论:

(1) 软土-基岩地基的车站结构变形明显大于位于岩石地基处结构的变形。车站底板的最大应变值为 $62\ \mu\epsilon$ ,车站地下二层的墙柱结构最大变形为 $249\ \mu\epsilon$ 。

(2) 软土-基岩条件下的车站结构变形显示明显的差异性。车站的底板位于软土部分的弯曲变形小,而位于岩土交界面和基岩部分出现明显的弯曲变形。这是由于岩土分界面起到了等效支点的作用,随着软土的压缩变形,位于软土部分的结构整体下移,而位于岩石部分的结构在等效支点的作用下出现了弯曲变形。

(3) 位于岩土分界面附近的车站墙柱结构的变形具有明显的差异性。这是由于岩土分界面附近的相邻墙柱的差异性沉降导致车站的板结构将剪切力作用传至墙柱上。因此位于岩土分界面附近的墙柱结构同时承受着压缩和剪切变形。

#### 参 考 文 献

- [1] 王 睿,苗龙刚,章慧健,等.砂卵石地层新建通道施工对上覆既有地铁车站的变形影响研究[J].现代隧道技术,2021,58(6):129-136.
- [2] 雷 刚,贺彦卫,张晓霞,等.土岩组合地层明挖基坑桩撑体系设计优化[J].科学技术与工程,2021,21(3):1150-1156.
- [3] 胡智民.土岩组合地层浅埋隧道埋深确定方法研究[J].隧道建设,2015,35(4):322-327.
- [4] 金雪峰.某紧邻地铁车站土岩基坑设计与变形规律研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):815-824.
- [5] 龚旭东.处于上软下硬地层的青岛某地铁车站初支拱盖法施工变形规律及控制[J].城市轨道交通研究,2021,24(6):109-114.
- [6] 王海成,刘秀珍,张 龙.复杂环境下软土基坑支护设计实践与分析[J].岩土工程技术,2022,36(2):160-164.
- [7] 路林海,孙 红,王国富,等.地铁车站支护与主体结构相结合深基坑变形[J].中国铁道科学,2021,42(1):9-14.
- [8] 周振鸿,孙华波,吕 果,等.深大基坑桩锚支护监测与数值分析[J].岩土工程技术,2021,35(4):233-237.
- [9] 胡 静,孙延胜,张晶晶.SMW工法在软弱土地地区深基坑支护中的组合应用[J].岩土工程技术,2018,32(6):317-320.
- [10] 白晓宇,张明义,闫 楠,等.土岩深基坑桩-撑-锚组合支护体系变形特性[J].中南大学学报:自然科学版,2018,49(2):454-463.
- [11] 朱彦鹏,李凤岐,杨校辉,等.兰州地铁红砂岩基坑开挖监测与数值模拟分析[J].兰州理工大学学报,2022,48(1):121-127.
- [12] 江中华.大型地铁车站主体结构运营期安全分析与安全监测方案设计[J].城市轨道交通研究,2022,25(1):63-69.
- [13] 鲍树峰,莫海鸿,王友元,等.土岩组合基坑安全风险预警标准探讨[J].岩土工程学报,2014,36(S1):180-185.
- [14] 商大勇.土岩组合地层地铁车站深基坑阳角变形及稳定性[J].北京交通大学学报,2020,44(6):25-33.
- [15] 张 楠.土岩组合地层深基坑变形规律研究[J].铁道工程学报,2021,38(7):1-5.
- [16] 温明翠.FBG位移传感器的研究及其在管廊监测中应用[D].大连:大连理工大学,2019.
- [17] 张矿伟,张少杰,赵晓霞,等.光纤Bragg光栅应变传感器在桥梁结构监测中的应用[J].光学仪器,2014,36(1):15-19.
- [18] 何健辉,张进才,陈 勇,等.基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统[J].水文地质工程地质,2021,48(1):146-153.
- [19] 李俊鑫,郎向伟.基于光纤Bragg光栅的测斜仪设计与试验[J].传感器与微系统,2020,39(4):86-88.

收稿日期:2022-06-30