

DOI:10.11918/202003092

地铁车站复合墙结构体系受力特性

陈保国¹, 闫腾飞¹, 王程鹏¹, 宗秋雷², 孟庆达¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 成都 610081)

摘要: 针对地铁车站复合墙体系受力变形规律与理论计算结果存在较大差异, 围护结构土压力分布规律和主体结构内力具有不确定性问题, 采用 EPS 板(聚苯乙烯泡沫)代替防水垫层进行模型试验和数值模拟, 对比分析复合墙和叠合墙体系受力、变形特性, 得到墙后水平土压力、周围地表沉降、结构体系内力等变化规律。结果表明: 复合墙技术具有良好的卸荷作用, 可有效改善地铁车站主体结构受力状态; 卸荷效果随 EPS 板厚度增大或弹性模量减小而增强, 但地连墙弯矩会随着卸荷作用的增大而增大, 因此, 并非 EPS 板厚度增大或弹性模量越小就越好, 而是需要确定合理的减载参数; 复合墙体系会引起较叠合墙体系更大的周围地表沉降, 本文条件下的主要影响区域为 $0.60H \sim 1.25H$ (H 为基坑深度), 沉降差约为 12%。

关键词: 复合墙; 叠合墙; 土压力; 结构内力

中图分类号: U476

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)11-0066-08

Mechanical characteristics of compound wall structural system for subway station

CHEN Baoguo¹, YAN Tengfei¹, WANG Chengpeng¹, ZONG Qiulei², MENG Qingda¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

Abstract: The stress states and deformation laws of the compound wall system of subway stations are quite different from theoretical calculation results, and the distribution law of earth pressure on retaining structure and the internal force of the station structure are uncertain. In this study, expanded polystyrene (EPS) foam was used to replace waterproof layer, and model tests and numerical simulations were conducted to investigate the stress states and deformation laws of compound wall and composite wall systems. The horizontal earth pressure behind the diaphragm wall, the surrounding ground surface settlement, and the structural internal force were obtained. Research results show that the compound wall technique had good load reduction effect and could effectively improve the stress state of the main structure of the subway station. The load reduction effect of the compound wall technique increased with the increase in the thickness of the EPS board or the decrease in the elastic modulus of the EPS board. However, the bending moment of the diaphragm wall would increase with the increase in the load reduction effect of the subway station structure. Thus, the load reduction effect is not always available at a higher EPS board thickness or a lower elastic modulus, but reasonable load reduction parameters of EPS board are required. The compound wall technique could induce a larger surrounding ground surface settlement than the composite wall technique. The influence area of ground surface settlement was about $0.60H$ to $1.25H$ in this study (H is the depth of the foundation pit), and the difference of the settlement between the two techniques was about 12%.

Keywords: compound wall; composite wall; earth pressure; structural internal force

近年来,中国城市轨道交通快速发展^[1-2], 地铁车站成为了现代城市轨道交通的重要纽带^[3-4]。诸多学者针对地铁车站深基坑和车站结构受力变形规律开展了一系列研究,并取得许多成果。刘念武等^[5]以实际工程为背景,分析软土地区地铁车站深

基坑受力变形规律和对周边建筑物的影响。吴意谦等^[6]研究了黄土地区地铁车站深基坑受力变形规律。石钰锋等^[7]针对某局部盖挖施工地铁车站回填过程中主体结构局部开裂的问题,分析了不同工况下车站开裂原因。Zhou 等^[8]介绍了一种地铁车站深基坑风险预测模型,并通过武汉某地铁车站深基坑工程验证了其可靠性。Xing 等^[9]通过理论分析和数值模拟的方法分析基坑降水和开挖对既有地铁车站的影响,提出地铁车站地下水处理措施和保护方案。Sun 等^[10]采用数值模拟方法研究了地震

收稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(52178370);

中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2019082)

作者简介: 陈保国(1981—),男,副教授,硕士生导师

通信作者: 陈保国,baoguo_chen@126.com

纵波作用下地铁车站动力响应和对地表的影响。

上述研究对地铁车站深基坑支护体系和车站主体结构设计、施工具有重要的指导意义,但未涉及围护结构与车站主体结构之间的连接方式和相互作用。地铁车站主体结构与围护结构之间作用机理复杂,根据两者连接方式不同可分为复合墙和叠合墙^[11]。复合墙指车站结构外墙与地连墙之间分离,中间填充衬垫材料,仅可传递法向压力;叠合墙指车站结构外墙与地连墙之间采用钢筋连接形成整体,可传递弯矩和剪力。

有学者致力于叠合墙与复合墙体系受力变形研究工作,并取得宝贵的经验。路林海等^[12]对基坑“预制桩-墙”结构体系进行研究,分析了叠合墙与复合墙方案中,车站主体结构和围护结构的承载性能。王雪剑等^[13]分析了叠合墙式车站结构地震反应的影响规律,提出地连墙在有效约束车站结构侧移的同时也会引起结构关键节点损伤。付继赛等^[14-15]通过对比叠合墙与复合墙体系条件下车站结构在地震荷载作用下的动力响应,提出叠合墙地铁车站较复合墙具有更好的抗侧移刚度。上述研究工作对进一步揭示复合墙体系受力变形规律起到了积极作用。

然而,地铁车站复合墙体系作用机理复杂,受力变形规律与理论计算存在较大差异,围护结构土压力分布规律和主体结构内力具有不确定知性。因此,有必要进行复合墙体系受力特性研究,尤其是车站主体结构受力特性、墙后土压力分布规律及对周边环境的影响。鉴于此,以复合墙体系(地连墙+EPS板+车站结构)为对象开展研究,并与叠合墙体系(地连墙+车站结构)对比,连接方式如图 1 所示,采用模型试验结合数值模拟方法研究复合墙体系受力特性及变形规律。以期为实际工程提供参考与借鉴。

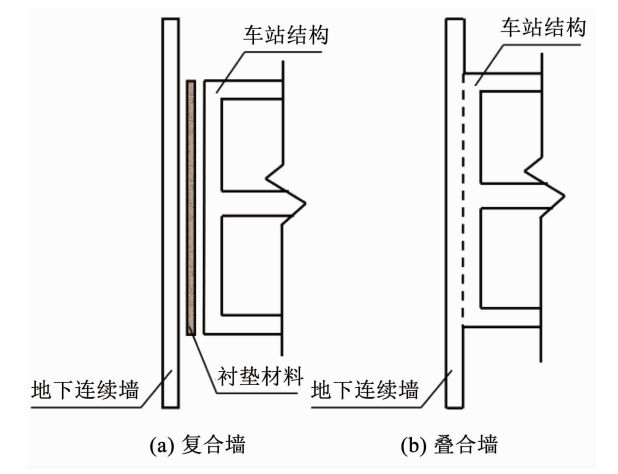


图 1 结构连接方式示意

Fig. 1 Schematic of structural connection types

1 模型试验

1.1 试验方案

试验模型箱尺寸为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),采用 5 mm 的 Q235 钢板。为减小模型箱内壁与填土之间的摩擦作用,在模型箱内壁均匀涂抹一层凡士林。本试验模型与实际工程的几何相似比为 1:50,基坑开挖深度为 40 cm,模型试验中深基坑支护体系采用地连墙+内支撑组合形式。考虑到加工难度,模型试验中的钢筋混凝土结构采用等效厚度的钢板代替。根据刚度等效原则,地连墙采用 Q235 钢材,厚度为 5 mm;内支撑杆件选用直径为 12 mm(壁厚 0.3 mm)的钢管,水平间距 6 cm,试验模型中将围檩与内支撑杆件连接为一个整体,作为一道水平支撑;围檩选用截面尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的方形钢管。在基坑开挖阶段沿基坑深度方向共设置 4 道水平支撑,竖向间距为 10 cm,支撑体系与地连墙之间不铰接,仅可传递法向压力。地铁车站主体结构选用与地连墙相同材质的材料制作,结构尺寸为 $48\text{ cm} \times 26\text{ cm}$ (宽 $\times$ 高),壁厚 15 mm,车站顶板覆土厚度 14 cm。复合墙试验中在地连墙与车站结构外墙之间填充 10 mm 厚的 EPS 板,其高度与地铁车站侧墙高度一致,如图 2 所示。为了对比分析,也进行了叠合墙模型试验,叠合墙中地连墙与车站结构外墙固接,材料与复合墙试验一致。

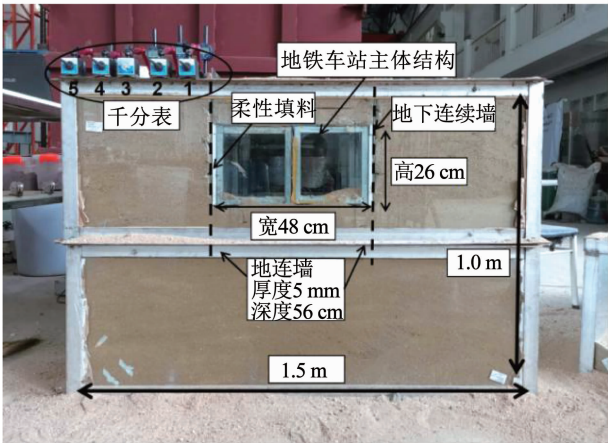


图 2 模型试验装置及地铁车站模型

Fig. 2 Model test device and subway station frame model

考虑到常重力条件下(1g)小比例模型试验的一般局限性,本模型试验主要目的在于研究车站复合墙结构体系对地连墙墙背土压力的卸荷作用,对车站主体结构受力的改善效果,以及复合墙结构体系本身的受力与变形特性,为了避免复杂工程地质条件的影响,直观地反映车站复合墙结构体系的受力和变形规律,模型试验仅考虑了几何上的相似,并

非是针对实际工程进行的完全相似试验。本文研究的问题源于实际工程,但研究的理论意义在于抽象出复合墙结构体系受力特性的一般规律,揭示复合墙结构体系的受力机理。

模型试验地层材料为取自武汉江滩的河沙。试验用砂的物理力学参数通过室内土工实验测得,钢材和 EPS 板参数根据材质查得。各种试验材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料参数
Tab. 1 Material parameters

材料	弹性模量 E/MPa	泊松 比 μ	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
试验干砂	30.0	0.31	32	0	1 600
地下连续墙	2×10^5	0.28	—	—	7 800
钢支撑	2×10^5	0.28	—	—	7 800
车站结构	2×10^5	0.28	—	—	7 800
EPS 板	3	0.29	—	—	15

注:现场钢支撑采用 $\phi 609(t=16\text{ mm})$,地连墙和主体结构混凝土强度分别为 C35、C60。

地连墙侧壁布设 6 对应变片监测构件应变,深度依次为 0.02、0.12、0.22、0.34、0.45、0.55 m;墙后布设 6 只 LY-350 型应变式微型土压力盒,深度依次为 0.05、0.15、0.27、0.38、0.5、0.55 m;基坑侧壁中部位置沿远离基坑方向依次布置 5 只千分表监测地表沉降(地表铺设 5 张 $20\text{ mm}\times20\text{ mm}$ 金属薄片,千分表的测头与金属薄片接触),距基坑边缘依次为 0.04、0.12、0.24、0.36、0.49 m,如图 3 所示。

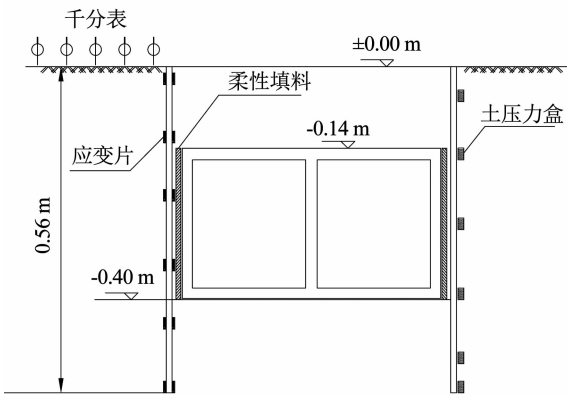


图 3 试验测点布置
Fig. 3 Layout of test points

试验过程如下,先在地连墙上安置应变片和温度补偿应变片。向模型箱填砂 44 cm 厚,然后安放地连墙(基坑宽度 48 cm)和墙后最下层土压力盒;压实到既定的填土密度,再依次填砂、压实并安放墙后土压力盒,直至填土顶面。然后进入开挖过程,第 1 步开挖至 -0.03 m ,安放第 1 道支撑;第 2 步开挖

至 -0.13 m ,安放第 2 道支撑;第 3 步开挖至 -0.23 m ,安放第 3 道支撑;第 4 步开挖至 -0.33 m ,安放第 4 道支撑;第 5 步开挖至 -0.40 m 。再进入车站建设过程,分区域拆除第 4 道与第 3 道支撑,安放 EPS 板与车站结构。最后依次拆除第 2 道与第 1 道支撑,并回填车站上部土层,上覆填土厚度为 14 cm。按以上试验步骤分别进行复合墙与叠合墙试验,每项试验是一个独立的试验过程。

1.2 复合墙与叠合墙体系受力变形特性对比分析

墙背水平土压力的分布规律如图 4 所示,总体上墙背土压力随深度增加逐渐增大。车站深度范围内复合墙体系墙背水平土压力值小于叠合墙体系,该区域内的复合墙墙后水平土压力介于静止土压力和主动土压力之间。在深度为 $0.675H$ 附近,复合墙体系墙背水平土压力较叠合墙体系相同位置处的水平土压力减小了约 24.3%,减载效果明显。在车站底板以下,深度为 $1.25H\sim1.4H$,复合墙体系墙背土压力大于叠合墙体系,主要原因可能是复合墙体系中 EPS 板压缩导致墙体发生向基坑内的偏转,使得地连墙底部出现了更大的被动土压力。这也说明复合墙体系墙后卸荷作用将以嵌入段墙后土压力增加为代价。

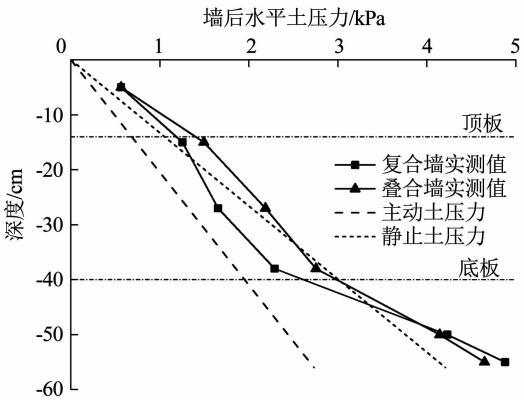


图 4 地连墙墙后水平土压力分布规律
Fig. 4 Horizontal earth pressure behind diaphragm wall

车站结构上部支撑拆除后,地连墙在水平土压力作用下发生向基坑内的挠曲变形或偏转,复合墙体系由于 EPS 板刚度低的特点,导致地连墙偏转位移大于叠合墙,从而使地连墙墙后土压力逐渐减小。由于 EPS 板的卸荷作用,传递至车站结构的水平土压力减小,可有效改善车站结构受力特性。

车站周围地表沉降分布规律如图 5 所示。可以看出,地表最大沉降均发生在基坑边缘,沉降随距基坑边缘距离增大而减小,为典型的三角形沉降分布规律;不同于基坑开挖时地连墙 + 内支撑支护方案下的“碟型”沉降。主要原因是车站结构上部支撑

拆除后,地连墙在水平土压力的作用下发生向基坑内的挠曲变形或偏转,一方面引起了地连墙周边进一步的地层缺失,另一方面使得地连墙与墙后土体的摩擦力降低。

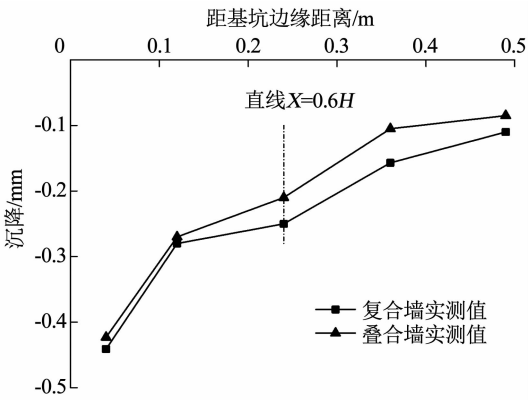


图 5 基坑周围地表沉降

Fig. 5 Ground surface settlements around foundation pit

总体上,复合墙体系对周围环境的影响大于叠合墙体系。在距离地连墙 $0.6H$ 内,复合墙体系与叠合墙体系引起的周边沉降规律一致,数值接近,约为 $0.11H$; 在 $0.6H \sim 1.25H$ 内,复合墙体系引起的地表沉降大于叠合墙,最大沉降差位于距基坑边缘 $0.9H$ 处,差值约为复合墙体系最大沉降值的 12% 。

造成两种结构体系地表沉降差异的主要原因可能是:复合墙体系支撑刚度小于叠合墙体系,在地铁站顶-底板高度范围受刚度影响,周围土体挤压地连墙发生变形,直接导致墙背土层进一步产生地层缺失。由于地连墙的竖向摩擦作用和土体内摩擦角的存在,深层土体地层缺失并非直接影响地连墙边缘区域的地表沉降,而是将影响按照近似主动土压力破裂面的角度方向扩展至基坑周边较远的区域,主要影响范围为 $0.60H \sim 1.25H$ 。地表沉降理论影响范围为 $0.63H \sim 1.8H$ (见图 6,图 6 中 29° 为主动破裂面与水平方向的近似夹角)。

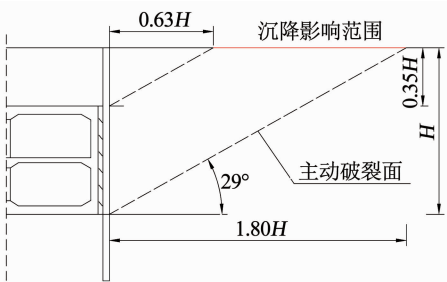


图 6 地表沉降范围理论计算区间

Fig. 6 Theoretical calculation range of ground surface settlements

复合墙体系具有很好的卸荷作用,但是在控制周围地表沉降方面相对于叠合墙体系并不占据优

势,在实际工程建设中应合理评价其影响范围及影响程度,加强地表沉降监测,做好应急预案。

复合墙与叠合墙方案中左侧地连墙弯矩包络线如图 7 所示。向基坑内挠曲定义为正,相反为负。结果表明,地连墙弯矩分布形式基本相同,但复合墙方案中地连墙的弯矩值小于叠合墙。

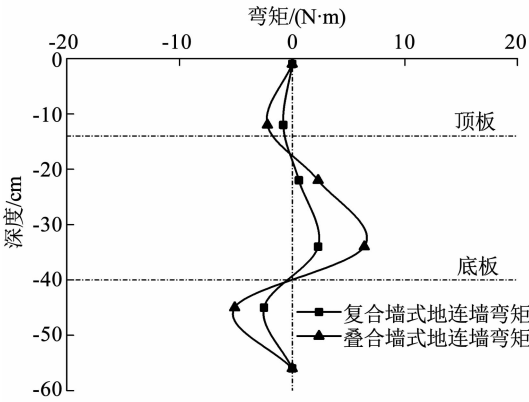


图 7 地连墙弯矩包络线

Fig. 7 Bending moment envelope of diaphragm wall

受车站结构顶板和底板刚度影响,两方案地连墙内均出现两个反弯点,在顶板和底板附近出现负弯矩极值点;顶板附近分别为 -0.8 、 $-2.2 \text{ N} \cdot \text{m}$,底板附近分别为 -2.5 、 $-5.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。车站侧墙范围内的地连墙出现正弯矩,由于 EPS 板减载作用,复合墙正弯矩小于叠合墙,最大值分别为 2.3 、 $6.4 \text{ N} \cdot \text{m}$,位于 0.34 m 深度处。地连墙深度 12 、 22 、 34 、 45 cm 测点处,复合墙弯矩值同比叠合墙依次减小 63.6% 、 73.9% 、 64.1% 、 50.0% 。

2 数值模拟

2.1 数值模拟与参数

采用有限元软件 Midas-GTS 建立模型,为了与试验结果对比分析,数值模型尺寸与模型试验一致 (如图 8 所示)。模型中土体和 EPS 板采用平面应变单元,地连墙、内支撑及车站结构采用结构单元。砂土采用 M-C 理想弹塑性材料,地连墙、内支撑及车站结构采用弹性模型。根据地连墙墙背土压力试验结果可知 EPS 板处于弹性工作状态,因此,模拟中 EPS 板采用弹性模型。砂土-地连墙、地连墙-EPS 板、EPS 板-车站侧墙之间均建立接触关系,接触面采用无厚度双面接触单元,该接触单元可模拟材料的相对滑移,接触单元服从库伦剪切破坏准则和拉伸破坏准则。模型四周边界约束水平位移,底部边界约束水平和竖向位移,不考虑排水固结的影响。材料参数见表 1,接触面参数见表 2 (接触参数依据相关手册^[16]确定)。

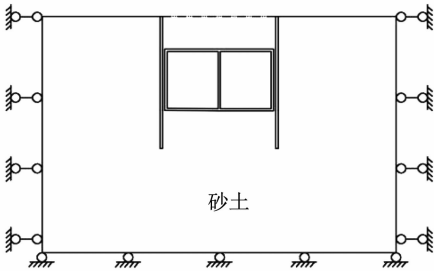


图 8 数值模型示意

Fig. 8 Numerical model

表 2 接触面参数

Tab. 2 Contact surface parameters

接触关系	法向刚度 k_n /TPa	切向刚度 k_s /TPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	膨胀角 Ψ /(°)
砂土-地连墙	300	300	0	28	0
地连墙-EPS 板	300	300	4	22	0
EPS-车站侧墙	300	300	4	22	0

2.2 数值模拟结果验证

图 9 为复合墙与叠合墙条件下墙后水平土压力对比曲线。可以看出,模拟结果与模型试验结果变化趋势相同,复合墙墙后土压力数值模拟与试验结果最大差异约为 9.9%,叠合墙中墙后土压力最大差异约为 12.3%。

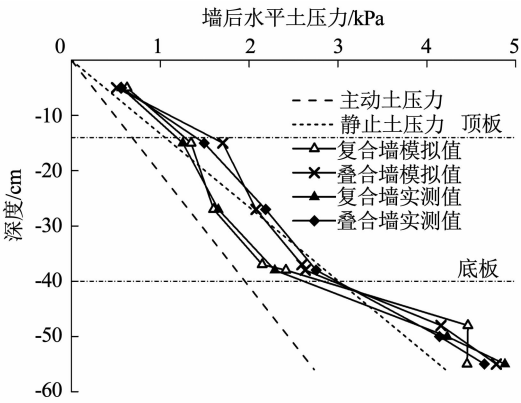


图 9 地连墙墙后水平土压力

Fig. 9 Horizontal earth pressure behind diaphragm wall

图 10 为周围地表沉降对比曲线,可以看出,模拟结果与实测结果变化趋势相同,模拟结果略小于试验结果,模拟与试验得到的沉降最大值的差异分别为 11.3% (复合墙)和 5.4% (叠合墙)。

图 11 为地连墙弯矩对比曲线,可以看出,模拟与试验得到的地连墙弯矩最大值的差异约为 7.4% (复合墙)和 14% (叠合墙)。数值模拟得出的墙背土压力分布规律、周围地表沉降规律、地连墙弯矩包络线与模型试验结果基本一致,验证了数值模型的可靠性。

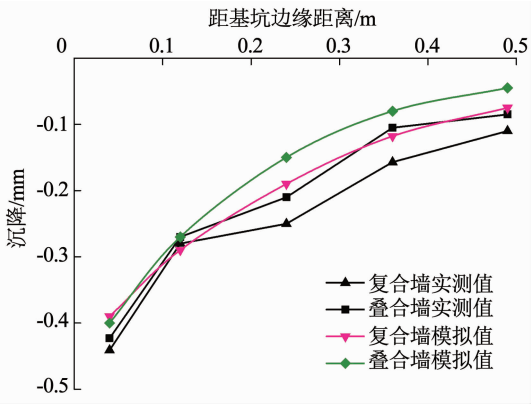


图 10 周围地表沉降

Fig. 10 Ground surface settlements

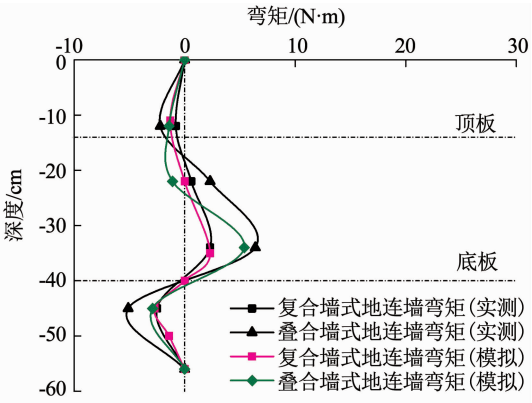


图 11 地连墙弯矩包络线

Fig. 11 Bending moment envelope of diaphragm wall

下面将采用验证后的数值模型,对比分析复合墙和叠合墙条件下结构体系的受力特性。

2.3 复合墙与叠合墙体系受力特性对比分析

复合墙体系与叠合墙体系的弯矩包络线如图 12 所示。地连墙及车站侧墙弯矩最大值分别位于嵌入段和侧墙顶部,分别为 2.7、22.9 N·m。两种结构形式的内力分布差异明显,其中复合墙体系中地连墙与车站侧墙的内力相对较小,表明复合墙方案中的车站结构受力性能优于叠合墙方案。

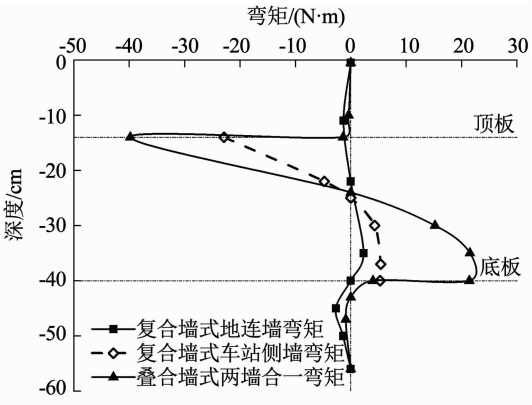


图 12 两种结构体系弯矩包络线

Fig. 12 Bending moment envelope of two structure systems

由图 13 可知,两种方案下顶板和底板弯矩分布形式基本相同,但复合墙方案中车站结构弯矩相对较小。顶板与侧墙连接点的弯矩值降低 40.36%,顶板中部立柱节点处弯矩值也显著降低,底板与侧墙连接点处弯矩减小 69.36%,这表明复合墙体系可降低车站结构的内力,尤其是车站主体结构 4 个角点处的弯矩值,但是对底板中部立柱节点的弯矩改善不明显。工程设计中采用复合墙方案时可以结合实际进一步优化地铁车站结构尺寸,降低造价。

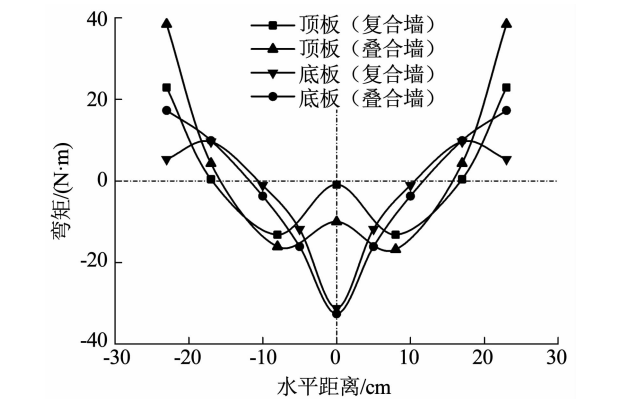


图 13 车站主体结构顶板和底板弯矩

Fig. 13 Bending moment of the top and bottom slabs of the station frame

3 EPS 板对复合墙体系受力特性影响

3.1 EPS 板厚度的影响

图 14 为 EPS 板厚度对墙后土压力的影响规律。可以看出,车站侧墙深度范围内水平土压力随 EPS 板厚度增加而减小,嵌入段土压力随 EPS 板厚度增加而增大。EPS 板厚度增加有利于减小车站深度范围内墙后水平土压力,但会引起嵌入段墙后土压力增加。EPS 板厚度在 0.5 ~ 1.5 cm 的变化过程中,水平土压力减小了 17.14%。

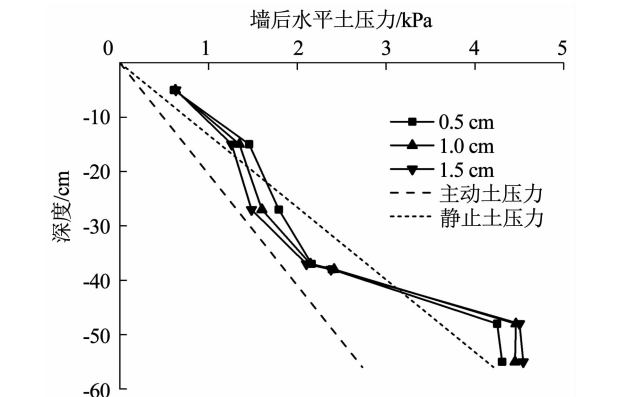


图 14 EPS 板厚度对墙后水平土压力影响

Fig. 14 Influence of EPS board thickness on horizontal earth pressure behind diaphragm wall

矩分布规律如图 15 所示。可以看出,地连墙弯矩随 EPS 板厚度增加而增大,车站结构弯矩随 EPS 板厚度增加而减小。EPS 板厚度在 0.5 ~ 1.5 cm 的变化过程中,地连墙最大弯矩增幅为 17.39%,结构顶板与侧墙节点最大弯矩降幅为 19.38%,结构底板与侧墙节点最大弯矩降幅为 40.91%,这表明 EPS 板厚度增加会改善主体结构受力,但一定程度上会引起地连墙结构内力的增加。从图 15 还可以看出,EPS 板厚度变化对底板最大弯矩值(中柱-底板节点处)改善不明显。复合墙方案工程应用中,应该重点关注此位置处的受力状态。

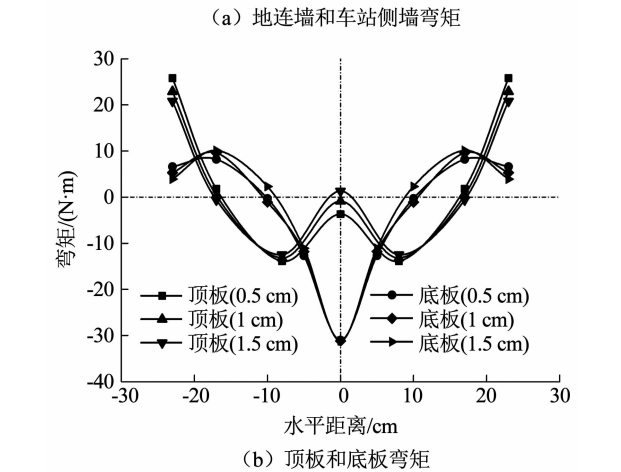
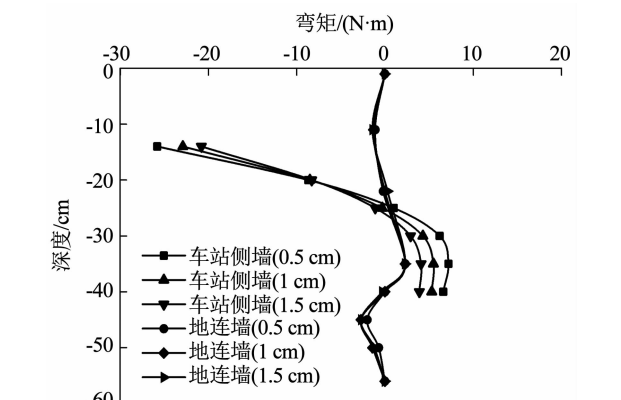


图 15 地连墙及主体结构弯矩包络线

Fig. 15 Bending moment envelope of diaphragm wall and main structure

3.2 EPS 板弹性模量的影响

控制厚度 1 cm 不变,EPS 板弹性模量分别取 0.7、1.5、2、3、3.8 MPa,以研究 EPS 板弹性模量对复合墙体系受力特性的影响。

图 16 为不同 EPS 板弹性模量条件下墙后土压力分布规律。可以看出,车站侧墙深度范围内墙后土压力随 EPS 板弹性模量减小而减小,嵌入段土压力随模量减小而增加。EPS 板弹性模量在 0.7 ~ 3.8 MPa 的变化过程中,车站侧墙深度方向中心位置水平土压力降幅为 23.05%。

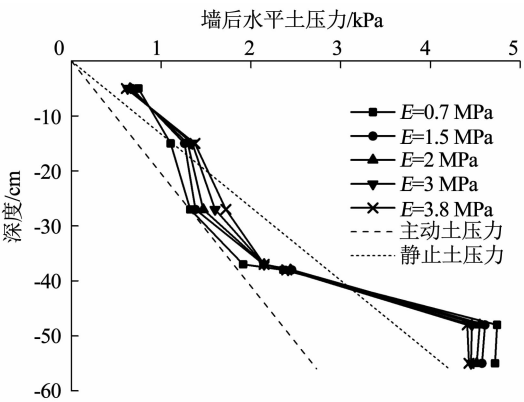


图 16 EPS 板模量对墙后水平土压力影响

Fig. 16 Influence of EPS elastic modulus on horizontal earth pressure behind diaphragm wall

不同 EPS 板模量下,地连墙和主体结构弯矩分布规律如图 17 所示。可以看出,地连墙弯矩随 EPS 板模量减小而增大,车站结构弯矩随 EPS 板模量减小而减小。EPS 板模量在 0.7 ~ 3.8 MPa 变化过程中,地连墙最大弯矩增幅为 32%,结构顶板与侧墙节点最大弯矩减幅为 27.92%,结构底板与侧墙节点最大弯矩减幅为 36.84%,这表明 EPS 板弹性模量减小可显著改善主体结构受力状态,但会引起地连墙弯矩增大。从图 17 还可以看出,EPS 板模量变化对底板最大弯矩值(中柱-底板节点处)改善不明显。

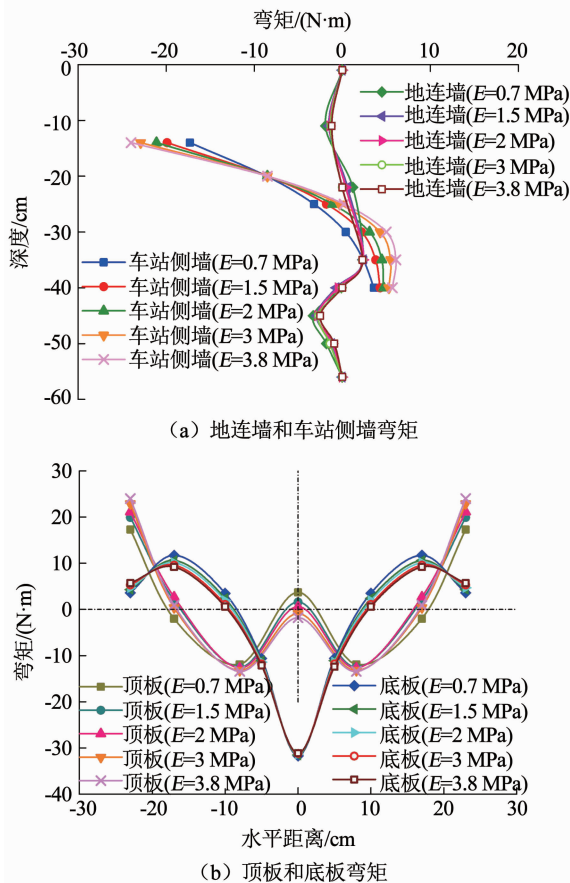


图 17 地连墙及车站主体结构弯矩

Fig. 17 Bending moment of diaphragm wall and station frame

4 讨 论

EPS 板的物理和力学参数直接影响复合墙体系减载效果。EPS 板厚度增加,弹性模量减小,将有利于体系减载卸荷,但亦可引发地连墙受力增大甚至失稳破坏。因此,应存在一个合理的 EPS 板厚度和弹性模量参数值,使地连墙和主体结构受力处于最优状态,达到地连墙和主体结构协调受力目的,避免出现应力集中等问题,实现降低风险和造价的目标。

数值分析结果表明,车站结构的“中柱-底板”节点处正应力值(0.84 MPa)最大,且 EPS 板厚度及其弹性模量的变化对该节点的受力影响不大,但可以明显改善除该节点以外的结构其他部位受力状态。因而,在复合墙结构体系设计时应将该节点单独考虑,文中在寻求合适的 EPS 板参数时未考虑该节点,重点研究了车站结构与地连墙两者(中柱-底板节点除外)最大应力值随 EPS 板参数的变化规律。

EPS 板厚度和复合墙体系受力特性关系曲线如图 18 所示。地连墙最大正应力随 EPS 板厚度增加而增大,主体结构(中柱-底板节点处除外)最大正应力随 EPS 板厚度增加而减小。两条曲线交点即为地连墙和主体结构受力平衡点,该平衡点对应的 EPS 板厚度为最佳厚度,约为 1.0 cm。

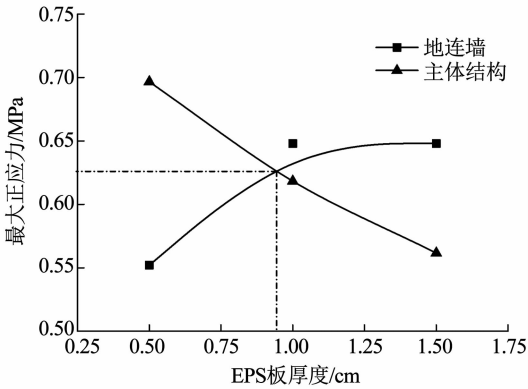


图 18 EPS 板厚度与体系受力特性的关系

Fig. 18 Relation between EPS board thickness and mechanical characteristics

图 19 为 EPS 板模量与复合墙体系受力特性关系曲线。可以看出,地连墙最大正应力随 EPS 板弹性模量减小而增大,主体结构(中柱-底板节点除外)最大正应力随 EPS 板弹性模量减小而减小。曲线交点即为地连墙和主体结构受力平衡点,对应的 EPS 板模量值为最佳弹性模量,约为 3.0 MPa。

上述研究表明,并非 EPS 板厚度增大或弹性模量越小就越好,而是应在保障体系受力稳定条件下合理追求卸荷减载效果,达到合理受力的目的。

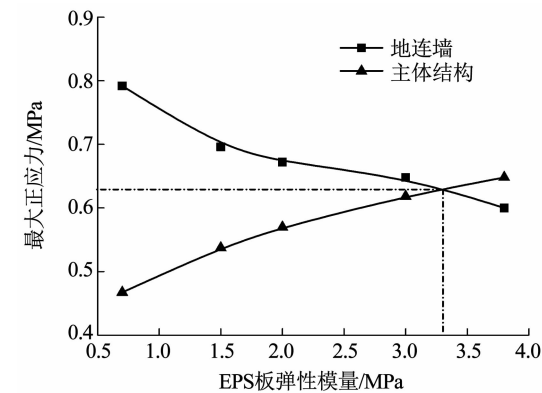


图 19 EPS 板弹性模量与体系受力特性的关系

Fig. 19 Relation between EPS elastic modulus and mechanical characteristics

5 结论与建议

1)复合墙体系墙后土压力具有良好的卸荷减载作用,减载效果随 EPS 板厚度增大和模量减小呈增强趋势。但是并非 EPS 板厚度越大或弹性模量越小结构体系的受力状态就越好,而应寻求合理的减载参数达到最优的减载效果。本文数值模拟条件下 EPS 板合理厚度为 1.0 cm,合理弹性模量为 3.0 MPa。

2)复合墙体系能够有效改善主体结构受力状态,显著降低主体结构 4 个角点的弯矩值。顶板-侧墙节点弯矩降低 40%,底板-侧墙节点弯矩减小 69%。

3)复合墙方案会引起较叠合墙方案更大的地表沉降,本文条件下的主要影响区域为距离基坑边缘 0.60H~1.25H,二者最大沉降值约相差 12%。

参考文献

[1]朱炎兵,周小华,魏仕锋,等. 临近既有地铁站的基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2997
ZHU Yanbing, ZHOU Xiaohua, WEI Shifeng, et al. Investigation on deformation behaviors of foundation pit adjacent to existing metro stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2997. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.10.023

[2]翁效林,孙腾,冯莹. 桩基础承载过程对近距离地铁隧道影响机制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 138
WENG Xiaolin, SUN Teng, FENG Ying. Influence of loading pile foundation on existing neighboring subway tunnel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 138. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.023

[3]张旭,张成平,韩凯航,等. 隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 759
ZHANG Xu, ZHANG Chengping, HAN Kaihang, et al. Case study of control technology of structural settlements due to tunnelling beneath a subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 759. DOI: 10.11779/CJGE201704023

[4]曹前,秦鹏,周云. 同深基坑开挖对紧邻地铁车站特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1494
CAO Qian, QIN Peng, ZHOU Yun. Study on characteristics of subway station induced by excavation of adjacent deep foundation pit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(6):

1494. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2018.06.018

[5]刘念武,陈奕天,龚晓南,等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515
LIU Nianwu, CHEN Yitian, GONG Xiaonan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0116

[6]吴意谦,朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 404
WU Yiqian, ZHU Yanpeng. Monitoring and numerical simulation of deformation law of deep foundation pit of subway station in Lanzhou collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 404. DOI: 10.11779/CJGE2014S2071

[7]石钰铎,余超,万先逵,等. 局部盖挖施工回填过程地铁车站开裂研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3050
SHI Yufeng, YU Chao, WAN Xiankui, et al. Research on cracking of subway station during backfilling process of partial cover excavation construction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3050

[8]ZHOU Y, LI S Q, ZHOU C, et al. Intelligent approach based on random forest for safety risk prediction of deep foundation pit in subway stations[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019, 33(1): 05018004. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000796

[9]XING H F, XIONG F, WU J M. Effects of pit excavation on an existing subway station and preventive measures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 04016063. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000919

[10]SUN Q Q, DIAS D, GUO X F, et al. Numerical study on the effect of a subway station on the surface ground motion[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 243. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.026

[11]北京市规划委员会. 地铁设计规范: GB 50175—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013
Beijing Planning Commission. Code for design of metro: GB 50175—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013

[12]路林海,王国富,王婉婷,等. 地铁车站基坑预制桩-墙结构设计分析与受力分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(10): 93
LU Linhai, WANG Guofu, WANG Wanting, et al. Research on the structure design and mechanics analysis of the precast pile-retaining wall for metro station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(10): 93

[13]王雪剑,庄海洋,陈国兴,等. 地下连续墙对叠合墙式地铁车站结构地震反应的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1435
WANG Xuejian, ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, et al. Effect of diaphragm wall on earthquake responses of an underground subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1435. DOI: 10.11779/CJGE201708010

[14]付继赛,庄海洋,王旭,等. 地下连续墙连接方式对地铁车站结构地震反应的影响研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(6): 42
FU Jisai, ZHUANG Haiyang, WANG Xu, et al. Influence of diaphragm wall connection mode on earthquake response of subway station structure[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(6): 42

[15]ZHUANG H Y, YANG J, CHEN S, et al. Seismic performance of underground subway station structure considering connection modes and diaphragm wall[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 127: 105842. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105842

[16]Itasca Consulting Group. Fast Lagrangian analysis of continua: theory and background. FLAC (version 5.0) users' manual[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2005