

DOI: 10.7672/sgjs2026100083

地铁车站厚板大开洞结构受力性能影响因素分析*

牛建辉^{1,2}, 娄国欣³, 田鹏刚^{1,2}, 薛建阳³, 杨汶杰^{1,2}, 解智勋^{1,2}, 罗 峥³

(1. 陕西建工控股集团未来城市创新科技有限公司, 陕西 西安 710115; 2. 未来城市建设与管理
创新联合研究中心, 陕西 西安 710115; 3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 利用有限元软件 ABAQUS 建立三维荷载-结构模型, 分析支护桩围护体系与地下连续墙围护体系下支护桩入土深度、支护桩间距、地下连续墙刚度、柱间距等因素对结构受力与变形的影响。结果表明: 随着支护桩入土深度在一定范围内的增加, 主体结构的内力与位移减小, 超出这个范围后影响不大; 结构水平位移随支护桩间距的增加而增大, 但增幅在减小, 最后趋于稳定; 地下连续墙刚度的增加能有效减小主体结构的水平位移, 减小主体结构主要受力构件的应力; 柱间距的减小能有效减小底板的竖向位移及柱应力。

[关键词] 地铁车站; 地下连续墙; 支护桩; 数值模拟; 受力性能

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0083-06

Analysis of Influencing Factors on the Mechanical Performance of Thick Slab Structures with Large Openings in Subway Stations

NIU Jianhui^{1,2}, LOU Guoxin³, TIAN Penggang^{1,2}, XUE Jianyang³, YANG Wenjie^{1,2},
XIE Zhixun^{1,2}, LUO Zheng³

(1. SCEGC City of Future Scientific and Technological Innovation Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710115, China; 2. SCEGC-XJTU Joint Research Center for Future City Construction and Management Innovation, Xi'an, Shaanxi 710115, China;
3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The finite element software ABAQUS is used to establish a three-dimensional load-structure model to analyze the influence of supporting pile depth, supporting pile spacing, diaphragm wall stiffness, column spacing on the stress and deformation of the structure under the supporting pile retaining system and the diaphragm wall retaining system. The results show that the internal force and displacement of the main structure decrease with the increase of the depth of the retaining piles in a certain range, it has little impact when it goes beyond this range. With the increase of supporting pile spacing, the horizontal displacement of the structure increases, but the magnitude of the increase decreases, and finally tends to be stable. The increase of the stiffness of the diaphragm wall can effectively reduce the lateral displacement of the main structure and reduce the equivalent stress of the main structural member of the main structure. The decrease of column spacing can effectively reduce the vertical displacement of the bottom plate and the maximum stress of the column.

Keywords: subway stations; diaphragm wall; support piles; simulation; mechanical performance

0 引言

在地铁修建过程中, 为满足施工作业的需要, 通常在车站主体结构楼板上预留不同尺寸的洞口, 大开洞对厚板刚度的削弱较严重^[1-3]。地铁车站施

工阶段的开洞结构与正常使用阶段标准结构的设计计算存在明显差异。目前, 有关地铁车站结构的研究大多针对正常使用阶段的标准结构, 缺少对施工阶段开洞结构的研究, 尤其是对于地铁轨排井、盾构井、端头井等空间受力作用明显的地下大开洞结构。虽然平面计算模型建模较简单, 计算速度快, 但不能考虑结构各构件之间的相互作用^[4-6], 并不能反映结构真实的受力状态。对于二维平面模

* 未来城市建设与管理创新联合研究中心揭榜挂帅基金 (2024WHZ0221)

[作者简介] 牛建辉, 正高级工程师, E-mail: 407888838@qq.com

[通信作者] 薛建阳, 教授, E-mail: jianyang_xue@163.com

[收稿日期] 2025-09-21

型存在的缺陷,许多学者提出建立平面模型、板壳模型和实体模型。多数学者认为在结构计算时应采用三维实体模型与板壳模型,以上两种模型计算结果虽然在个别位置有所出入,但在整体上与真实情况较符合^[7-8]。

为研究地铁车站厚板大开洞结构受力性能的影响因素,利用有限元软件 ABAQUS 建立三维荷载-结构模型,分析支护桩围护体系与地下连续墙围护体系下支护桩入土深度、支护桩间距、地下连续墙刚度、柱间距等因素对结构受力与变形的影响。

1 建立有限元模型

1.1 模型截面尺寸

模型结构尺寸来自于成都某地铁车站设计方案(见图 1),混凝土强度等级为 C30,纵向受力钢筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋,详细尺寸如表 1 所示。

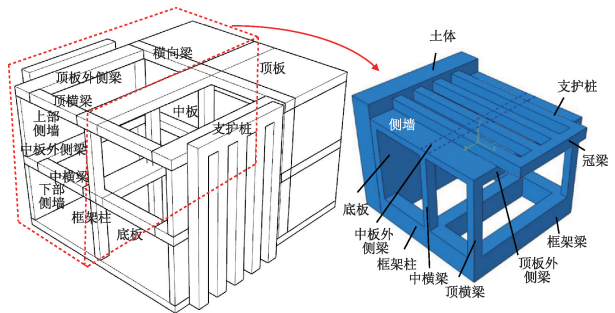


图 1 地铁站单柱双跨结构及模型

Fig. 1 Single-column two-span structure of a metro station and model

表 1 构件截面尺寸

Table 1 Section size of component	
截面类型	截面尺寸/mm
地下连续墙	1 000(厚)
(中板/顶板)外侧梁	1 000×1 600
侧墙	800(厚)
横向梁	1 000×1 600
顶板	800(厚)
中板	800(厚)
底板	1 000(厚)
框架梁	1 000×1 000
框架柱	1 000×1 000

1.2 模型的接触和相互作用

模型需用到的接触关系有:绑定约束、耦合约束、嵌入约束。利用绑定约束关系完成桩和主体框架结构上顶板表面的接触;采用嵌入约束表达钢筋和混凝土之间的相互作用;使用合并命令连接各层板、侧墙和梁。

1.3 模型的网格划分和单元选择

网格划分会影响到 ABAQUS 计算结果的准确性,要将单元网格的尺寸控制在一定范围之内,使之既能保证收敛的速度,又能保证模拟所需的精度要求。在容易导致应力集中的部位,网格需要进行加密,在较规则的区域采用四边形网格,在板开洞的局部采用三角形和四边形网格^[9]。模型中混凝土与型钢采用六面体 C3D8 实体单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元。

1.4 本构关系

采用 ABAQUS/Standard 模块中的混凝土塑性损伤模型模拟混凝土的非线性行为,应力-应变关系采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版)建议的应力-应变全曲线方程。型钢、纵筋和箍筋采用双线性强化模型。

1.5 施加荷载

在地铁开洞时基坑仍处于施工降水阶段,且覆土还未回填,故不考虑侧向水压力和顶板上的覆土荷载,仅考虑土压力、楼板上的施工荷载(按 8kN/m^2 考虑)及地铁基地附近超载(按 40kN/m^2 考虑),作用范围为 $15\sim 20\text{m}$ 。荷载计算时考虑荷载的基本组合,不考虑荷载偶然组合,这是由于在地震作用时,结构受周边岩土介质相对位移的控制,在地震作用下自振特性表现不太明显。因此,选用荷载基本组合的计算结果对地铁车站厚板大开洞结构进行有限元建模分析^[3]。

1.6 模型位移及应力监测

对地铁车站模型关键构件进行监测,监测点布置如图 2 所示。其中位移监测为顶板外侧梁、中板外侧梁、横向梁和底板的跨中部位,应力监测分别为顶板外侧梁、中板外侧梁和横向梁的跨中及梁端部,底板的应力监测为跨中位置,框架柱的应力监测为柱底。由于上部墙体较薄弱^[10],因此本文均提取上部墙体数据进行分析。

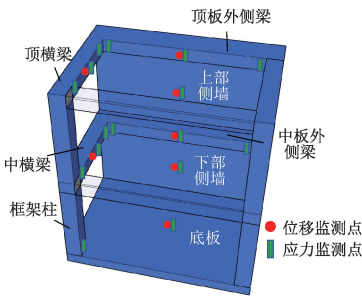


图 2 模型位移和应力监测点

Fig. 2 Monitoring points for displacement and stress in the model

2 支护桩围护体系下大开洞结构受力性能影响因素分析

2.1 支护桩嵌固比

深基坑在开挖面基底下设置具有一定插入深度的板(桩)墙结构作为挡土围护结构,其中支护桩围护结构即在主体侧墙外侧按设计施工做钻孔灌注桩,支护桩围护体系主要起支护、挡土及挡水作用。在地铁结构设计中,支护桩入土深度对结构影响较大,用嵌固比作为支护桩入土深度的研究对象,即支护桩在底板以下的埋置长度与基坑开挖深度的比值。为研究不同嵌固比下结构的位移变化规律,建立支护桩嵌固比分别为 0.30,0.35,0.40,0.45,0.50,0.55,0.60 的有限元模型,分析支护桩嵌固比对大开洞结构的影响,结果如图 3 所示,支护桩相邻嵌固比侧向位移差值如表 2 所示。

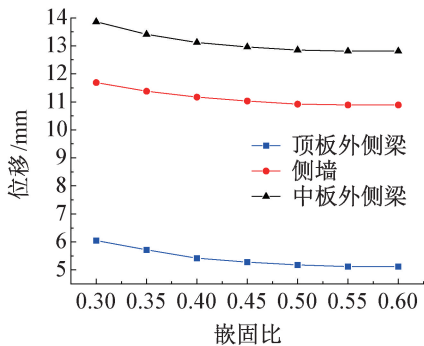


图 3 不同嵌固比下构件的最大位移值

Fig. 3 Maximum displacement value of components under different embedded ratio

表 2 不同嵌固比下构件的位移差值

Table 2 Displacement difference value of components under different embedded ratio								mm
项目	嵌固比							
	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	
顶板外侧梁位移差	—	-0.33	-0.30	-0.14	-0.10	-0.06	0	
侧墙位移差	—	-0.31	-0.21	-0.14	-0.11	-0.03	0	
中板外侧梁位移差	—	-0.45	-0.29	-0.16	-0.11	-0.04	0	

由图 3、表 2 可知,支护桩嵌固比对结构各构件位移有较大影响,随着支护桩嵌固比的增加,结构侧墙、顶板外侧梁及中板外侧梁的最大位移逐渐减小,但支护桩相邻嵌固比侧向位移的差值随嵌固比的增加而减小。当支护桩嵌固比达到 0.5 左右时,侧墙、顶板外侧梁及中板外侧梁侧向位移几乎到达最小值。由此可知,支护桩嵌入深度到达一定程度后对结构各构件位移控制最优,在此基础上增大支护桩的入土深度对结构的侧向位移影响很小。

2.2 支护桩间距

在地铁结构设计中,合理的支护桩间距在保证

结构安全、控制施工成本、降低施工难度等方面有很大的作用。为研究支护桩间距对地铁大开洞结构受力的影响,在基坑开挖深度相同时,建立不同桩间距的有限元模型进行分析,结果如图 4,5 所示。取支护桩排列间距与基坑开挖深度的比值作为研究对象,即桩距系数。

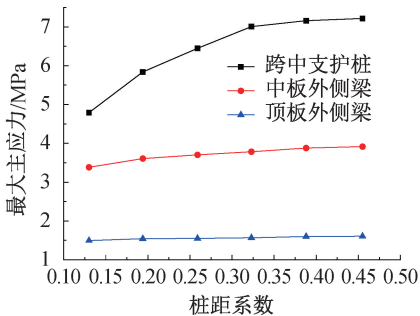


图 4 不同桩距系数时构件的最大主应力

Fig. 4 Maximum principal stress of components with different pile distance coefficients

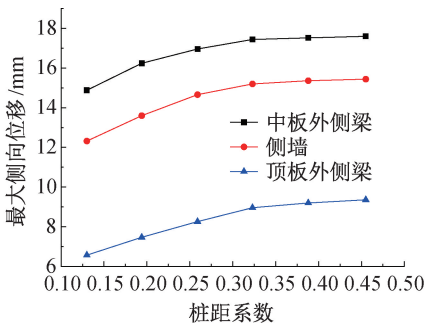


图 5 不同桩距系数时构件的最大位移值

Fig. 5 Maximum displacement values of components with different pile distance coefficients

由图 4 可知,随着桩距系数的增大,结构跨中支护桩的主应力增幅较大,结构纵梁应力增大趋势较小。由此可知改变支护桩间距对桩自身的受力影响较明显,对主体结构的应力影响较小。由图 5 可知,地铁车站主体结构构件的水平位移随桩距系数的增加而逐渐增大,但变化趋势逐渐减慢,到达一定数值后趋于稳定。

由上述分析可知,支护桩间距对主体结构的应力影响较小,对主体结构的侧向位移影响较大,且随着桩距系数的增大,对结构的位移与应力影响程度逐渐减小。

3 地下连续墙围护体系下大开洞结构受力性能影响因素分析

3.1 地下连续墙刚度

在地铁结构施工过程中,地下连续墙较厚,施工中不可避免的问题及混凝土收缩和蠕变等会造

成结构刚度削弱。因此,在地铁结构设计计算时需对地下连续墙刚度进行折减。为研究地下连续墙刚度对结构应力与位移的影响,在保持地下连续墙厚度不变的前提下,建立地下连续墙刚度分别为 $0.6EI$ 、 $0.8EI$ 和 EI 时的地铁大开洞结构模型进行分析,结果如图 6 所示。

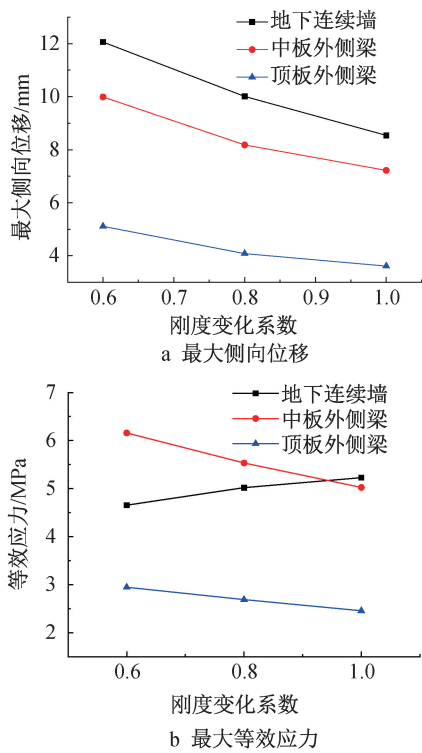


图 6 不同刚度下构件的位移与应力变化
Fig. 6 Variation of displacement and stress of components at different stiffness

由图 6a 可知,随着地下连续墙刚度的增大主体结构构件侧向位移逐渐减小,变化较明显。当地下连续墙的刚度由 $0.6EI$ 递增至 EI 时,地下连续墙、中板外侧梁及顶板外侧梁的最大侧向位移分别减小了 29.2%、27.7%、29.4%。由图 6b 可知,随着地下连续墙刚度的增大,顶板外侧梁、中板外侧梁的最大等效应力逐渐减小,但地下连续墙的应力值随刚度的增加而增大。当刚度由 $0.6EI$ 递增至 EI 时,中板外侧梁、顶板外侧梁的等效应力分别减小了 18.4%、16.6%,地下连续墙的应力值增大了 12.3%。

上述数据表明,地下连续墙刚度的变化对主体结构的位移与内力均有较大影响,地下连续墙刚度的增加能有效减小主体结构的侧向位移,降低主体结构受力构件的等效应力,增强结构的稳定性。

3.2 地下连续墙与内衬墙刚度比

在地铁车站大开洞结构中,地下连续墙与主体

结构共同受力,因而,地下连续墙与内衬墙的协同作用较明显,两者共同抵抗侧向水土压力,提高结构的整体稳定性。目前,进行地铁结构设计时常将地下连续墙和内衬墙单独考虑,往往忽略了二者的相互作用。为研究地下连续墙与内衬墙的相互联系,提出地下连续墙与内衬墙刚度比的概念。建立不同的地下连续墙与内衬墙刚度比模型,分析两墙体在不同刚度比下的结构内力与位移变化规律。

地下连续墙与内衬墙的刚度比定义为:

$$\gamma = EI_a/EI_b \tag{1}$$

式中: E 为混凝土弹性模量; I_a 为每延米地下连续墙的截面惯性矩, $I_a = t_a^3/12$; t_a 为地下连续墙厚度; I_b 为每延米内衬墙的截面惯性矩, $I_b = t_b^3/12$; t_b 为内衬墙厚度。

选取地下连续墙厚度 t_a 分别为 0.8、1.0、1.2m,调整内衬墙厚度 t_b 来组成不同的刚度比 γ 。为研究不同刚度比对地铁车站结构应力与位移的影响,建立不同刚度比条件下的地铁大开洞结构模型,具体数据如表 3 所示(纵梁、横梁梁高均为 1.6m),计算得出结构构件的应力和位移值。

表 3 刚度比、地下连续墙厚、内衬墙厚的关系			
Table 3 Relationship of stiffness ratio, diaphragm wall thickness, lining wall thickness			
编号	t_a/m	t_b/m	γ
1	0.8	0.4	8.0
2	0.8	0.8	1.0
3	0.8	1.0	0.5
4	1.0	0.4	15.6
5	1.0	0.8	2.0
6	1.0	1.0	1.0
7	1.2	0.4	27.0
8	1.2	0.8	3.4
9	1.2	1.0	1.7

不同刚度比下构件的最大侧向位移如表 4 所示。由表 4 可知,随着墙体总厚度的增大,结构最大侧向位移逐渐减小。在墙体总厚度相同时,结构各构件的位移随着刚度比的增加而减小。这说明在相同厚度下,地下连续墙厚度增加产生的影响大于内衬墙减小产生的影响,两者之间地下连续墙起主要作用。地下连续墙厚度一定时,随着内衬墙厚度的增加,地下连续墙与内衬墙刚度比减小,地下连续墙与纵梁的侧向位移均有相应程度的减小,当地下连续墙厚度较大时,改变内衬墙厚度对各构件位移的影响相对减弱。

为研究地下连续墙与内衬墙刚度变化对结构应力的影响,对不同刚度比下结构构件的最大等效应力进行对比分析,结果如图 7 所示。由图 7a,

表 4 不同刚度比下构件的最大侧向位移
Table 4 Maximum lateral displacement table for components with different stiffness ratios

墙体总厚/m	t/m	t_b/m	γ	地下连续墙位移/mm	中板外侧梁位移/mm	顶板外侧梁位移/mm
1.6	0.8	0.8	1.0	12.24	10.26	5.25
1.6	1.2	0.4	27.0	10.35	8.72	4.46
1.8	0.8	1.0	0.5	10.31	8.60	4.35
1.8	1.0	0.8	2.0	9.02	7.42	3.68
2.0	1.0	1.0	1.0	7.69	6.25	3.11
2.0	1.2	0.8	3.4	6.52	5.34	2.66

7b 可知,在内衬墙厚度为 0.8,1.0m 时,结构主要构件的最大等效应力随地下连续墙与内衬墙刚度比的增加而减小。由图 7c,7d 可知,在地下连续墙厚度为 0.8,1.0m 时,结构主要构件的最大等效应力随地下连续墙与内衬墙刚度比的增加而增加,表明地下连续墙与内衬墙的刚度变化时,结构主要构件的位移与内力均会受到显著影响。地下连续墙和内衬墙刚度的增加,可提高结构的抗侧移能力,增加结构稳定性。

3.3 柱间距

研究发现,在地铁大开洞结构中,最大等效应力位置一般出现在洞口端部附近的柱底部,易破坏。设计中常采用增大柱截面尺寸来保证足够的承载能力,而对柱间距的变化考虑不多。因此在不改变柱体尺寸的前提下,分析改变大开洞区段的柱间距对主体结构内力的影响。

为研究柱距变化对结构性能的影响,选取柱间距 4~15m 进行参数化分析,利用有限元软件建立柱间距分别为 15,9,6,4m 时的地铁模型。通过对比主要构件的位移与应力,分析柱间距的影响,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,当柱间距由大变小时,地下连续墙、中板外侧梁与顶板外侧梁的等效应力减小。当柱间距由 15m 减小至 4m 后,地下连续墙、中板外侧梁与顶板外侧梁的等效应力分别减小了 15.7%, 5.7%, 17.6%, 柱底最大应力减小了 21.4%;地下连续墙、中板外侧梁和顶板外侧梁的最大水平位移有减小趋势,但变化不大,底板最大竖向位移显著减小,变化幅度较大。上述结果表明,柱间距的改变,对柱应力影响最大,对地下连续墙和梁的应力影响较大,对柱、地下连续墙和梁的位移影响较小;柱间距的减小能有效减小底板的竖向变形及柱应力,提高结构的整体稳定性。

4 结语

1)随着支护桩入土深度在一定范围内的增加,

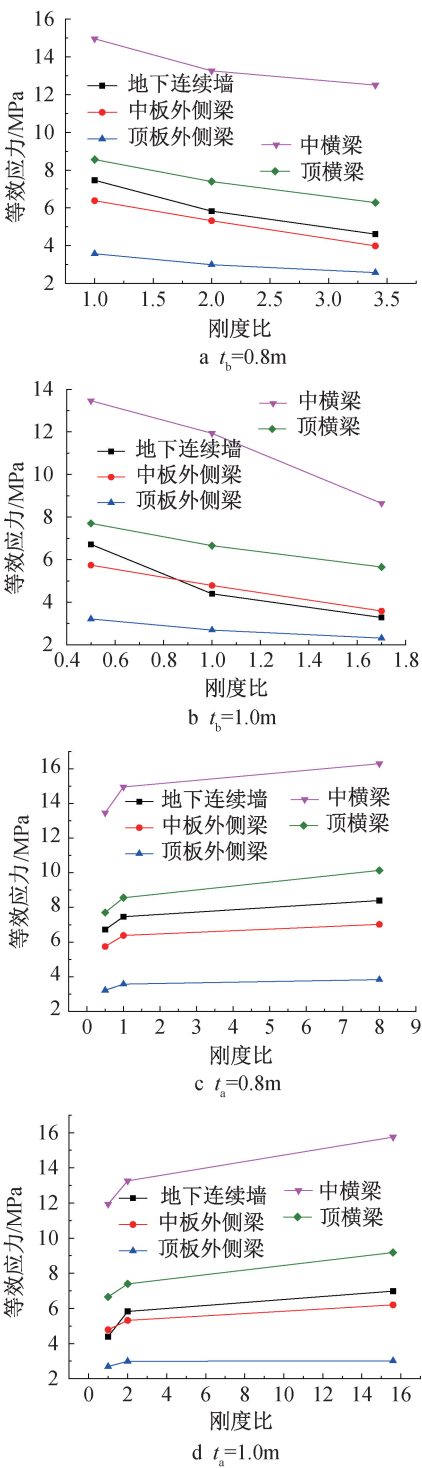


图 7 构件的最大等效应力变化
Fig. 7 Maximum equivalent stress change of components

主体结构的内力与位移减小,超出这个范围后影响不大。

2)结构构件水平位移随支护桩间距的增加而增大,但增幅在减小,最后趋于稳定。

3)地下连续墙刚度的增加能有效减小主体结构的侧向位移,降低主体结构主要受力构件的等效应力。

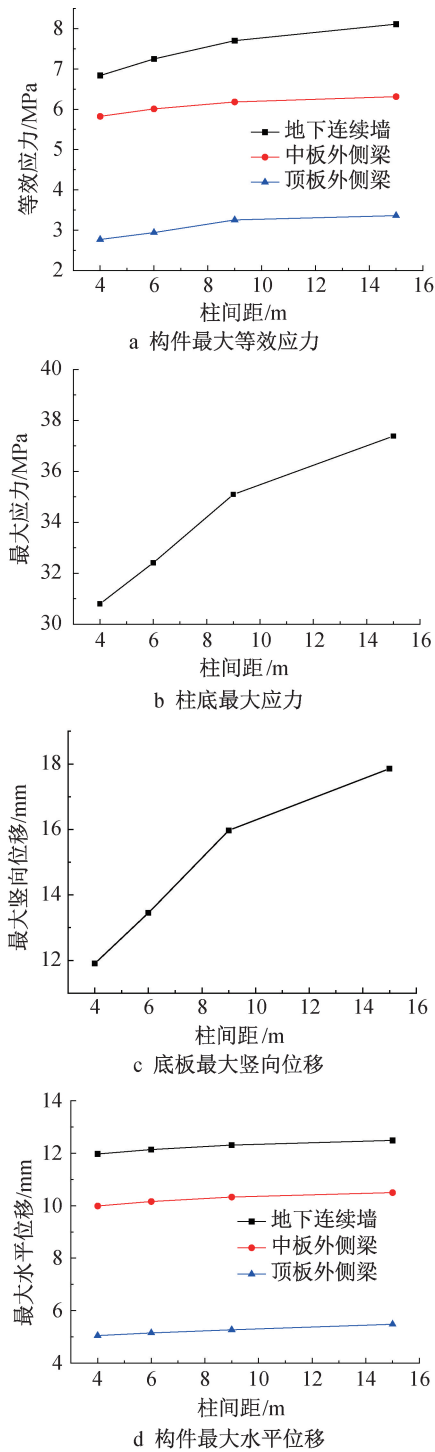


图 8 柱间距不同时构件的位移与应力变化
Fig. 8 Variation of displacement and stress of components at different column distances

4)结构最大侧向位移随墙体总厚度的增大而减小,在墙体总厚度相同时,结构各构件的位移随连续墙与内衬墙刚度比的增加而减小。

5)柱间距的减小能有效减小底板的竖向位移及柱应力。

参考文献:

[1] 代坤. 明挖地铁车站空间计算模型与平面计算模型的对比分析[J]. 隧道建设, 2010(S1): 254-258.
DAI K. Comparative analysis on 3D computation model and 1D computation model for metro stations constructed by cut and cover method[J]. Tunnel construction, 2010(S1): 254-258.

[2] 赵德平. 大尺寸开洞结构的简化平面应变模型的分析 and 探讨[J]. 特种结构, 2010, 27(4): 18-21.
ZHAO D P. The analysis and discussion about simplified plane-strain model for the structure with a large-size hole[J]. Special structures, 2010, 27(4): 18-21.

[3] 王雯. 地铁车站主体结构内力分布规律及其影响因素研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
WANG W. Research on internal force distribution and influencing factors of main structure of subway station [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.

[4] 薛建阳, 王亚辉, 黄小刚, 等. 地铁车站轨排井结构加强措施及布置方案分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1209-1216.
XUE J Y, WANG Y H, HUANG X G, et al. Analysis on strengthening measures and layout scheme of pile-group support structure in subway station [J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2017, 42(4): 1209-1216.

[5] 吴峰, 王浩, 葛潇. 地下结构大开洞楼板的受力分析[J]. 工业建筑, 2009, 39(S1): 436-439.
WU F, WANG H, GE X. Mechanical characteristics analysis of floor slab with large opening for underground structure [J]. Industrial construction, 2009, 39(S1): 436-439.

[6] BRANSBY M F, SPRINGMAN S M. 3-D finite element modelling of pile groups adjacent to surcharge loads [J]. Computers and geotechnics, 1996, 19(4): 301-324.

[7] 贾蓬. 地铁车站结构设计中中平面简化与空间受力的分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2004.
JIA P. Analysis and research on plane simplification and spatial stress in structural design of subway station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004.

[8] 黎钜宏. 地铁地下车站主体结构内力变化规律的分析研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
LI J H. Analysis and research on variation nature of internal force of subway underground station main structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.

[9] 甄精莲. 基于 ABAQUS 的深基坑变形三维有限元分析[D]. 广州: 南华大学, 2005.
ZHEN J L. Three-dimensional finite element analysis of deep foundation pit deformation based on ABAQUS [D]. Guangzhou: University of South China, 2005.

[10] 娄国欣. 地铁地下车站厚板大开洞结构受力性能研究与影响因素分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
LOU G X. Research on the mechanical performance and influencing factors of thick slab large opening structures in metro underground stations [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.