

文章编号: 1674-599X(2021)03-0010-07

抛填石层超深基坑咬合桩结构参数优化研究

樊思俊¹, 李卓¹, 李繁², 刘家茂¹, 徐正祥¹, 曾习凡¹

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 钻孔咬合桩围护结构对抛填石层的超深基坑施工至关重要, 其合理的结构参数选定是咬合桩结构设计的关键。依托深圳地铁12号线太子湾站钻孔咬合桩工程, 采用Midas/GTS有限元数值模型, 模拟基坑开挖过程中围护桩的受力变形规律, 并与现场实际效果进行了相互验证, 研究了草索桩桩径比、咬合量及刚度比对结构位移和弯矩的影响效应。研究结果表明: 钻孔咬合桩最适宜的草索桩桩径比为1.3:1, 草桩桩径1500 mm, 素桩桩径1200 mm, 咬合量为350 mm, 刚度比为1:0.8, 即素混凝土标号C20或C25, 草桩所用混凝土标号C35, 以为类似工程设计提供借鉴。

关键词: 抛填石层; 钻孔咬合桩; 特性指标; 数值模拟; 参数优化

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.002

Optimization of structural parameters of occlusal piles in ultra-deep foundation pit under geological conditions of dumped rock

FAN Si-jun¹, LI Zhuo¹, LI Fan², LIU Jia-mao¹, XU Zheng-xiang¹, ZENG Xi-fan¹

(1. The Eighth Sinohydro Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The retaining structure of bored occluding piles is very important to the construction of ultra-deep foundation pits of dumped rockfill. The reasonable structural parameters is the key to the design of occluding piles. Relying on the bored occluding pile project at Taiziwan Station of Shenzhen Metro Line 12, the Midas/GTS finite element numerical model was used to simulate the force and deformation law of the retaining pile during the excavation of the foundation pit, and mutual verification was carried out with the actual effect on site. The effects of the pile diameter ratio, occlusal amount and stiffness ratio of the raw piles on the structural displacement and bending moment were investigated. The results show that the most suitable pile diameter ratio for the bored occluding pile is 1.3:1, the pile diameter is 1500 mm, and the pile diameter is 1200 mm, the most suitable occlusal amount is 350 mm. The most suitable stiffness ratio is 1:0.8. Consequently, the plain concrete labeled C20 or C25 is used, and the concrete labeled C35 is used for steel reinforced concrete pile. This study is considered to provide a reference for similar engineering design.

Keywords: dumped rock layer; bored occlusal pile; characteristic index; numerical simulation; parameter optimization

针对抛填石层复杂地质条件, 以钻孔咬合桩作为围护结构的基坑工程^[1-2], 施工过程中相应土体及结构的受力与变形控制极为重要^[3-4], 一般通过改变围护结构自身属性, 可以达到改善受力变

形目的, 而在特定工程环境中, 如何量化分析咬合桩桩体关键参数可能产生的影响效应, 是该工程领域重要研究课题之一, 有必要开展咬合桩特性参数的优化研究。罗积胜^[5]针对杭州地铁1号线

收稿日期: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908234); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4743)

作者简介: 樊思俊(1985—), 男, 中国水利水电第八工程局有限公司高级工程师。

滨和路站的基坑围护工程, 考虑了咬合桩桩体参数的影响, 运用有限差分建模手段, 分析了各种因素的影响规律。付长春^[6]以圆形咬合桩围护结构为研究对象, 选用Midas/GTS有限元软件, 并基于特定的地质条件对咬合桩结构受力与形变的影响参数做出了定性与定量的评价。张桢^[7]对某地铁站基坑围护结构进行数值模拟, 分析了咬合桩尺寸、咬合量、桩体强度等特性指标的物理力学效应, 最终确定了最优设计参数。凌萌苗等人^[8]采用数值模拟方法对北京地铁新宫站基坑围护结构的设计参数进行了优化分析, 为设计与施工提供了优化建议。针对复杂地质条件下基坑围护桩结构的受力变形分析问题, 相关学者多采用有限元数值建模的手段进行研究^[9-11], 但有关咬合桩特性参数对受力变形机理的研究相对匮乏^[12-15]。因此, 作者以深圳地铁12号线太子湾站钻孔咬合桩工程为依托, 基于Midas/GTS有限元软件对太子湾站主体基坑施工进行建模分析, 研究钻孔咬合桩桩体特性指标对围护结构受力形变的影响效应, 以基坑开挖过程中咬合桩结构的受力与变形为控制指标, 对不同桩径比、咬合量、刚度比开展分项研究, 探明其影响规律, 进而合理调整咬合桩结构参数, 实现特性指标的优化设计。

1 工程概况

依托深圳市城市轨道交通12号线太子湾站主体围护结构咬合桩为工程背景, 基坑主体结构长为238 m, 宽为26.1 m, 深为30.154 m。竖向设置5道支撑, 第一道支撑采用800 mm×1 000 mm 砼支撑, 与冠梁直接连接, 水平间距一般按9 m布置, 均设八字撑; 第二、四道支撑采用800 mm×1 000 mm、1 200 mm×1 200 mm 砼支撑, 设置砼腰梁, 水平间距一般按9 m布置, 均设八字撑; 第三道支撑设置Φ800 mm (t=20 mm) 钢支撑, 并设置钢腰梁, 钢支撑水平间距一般为3.0 m; 第五道支撑采用@800 (t=20 mm) 钢支撑。盾构端第一、二、三道支撑设置800 mm×1 000 mm 砼支撑, 第二、五道支撑设置800 mm×1 200 mm 砼支撑, 所有砼支撑均选用C30等级混凝土, 钢管横支撑与钢腰梁均采用Q235B钢材。基坑内部详细的支护结构如图1~2所示。

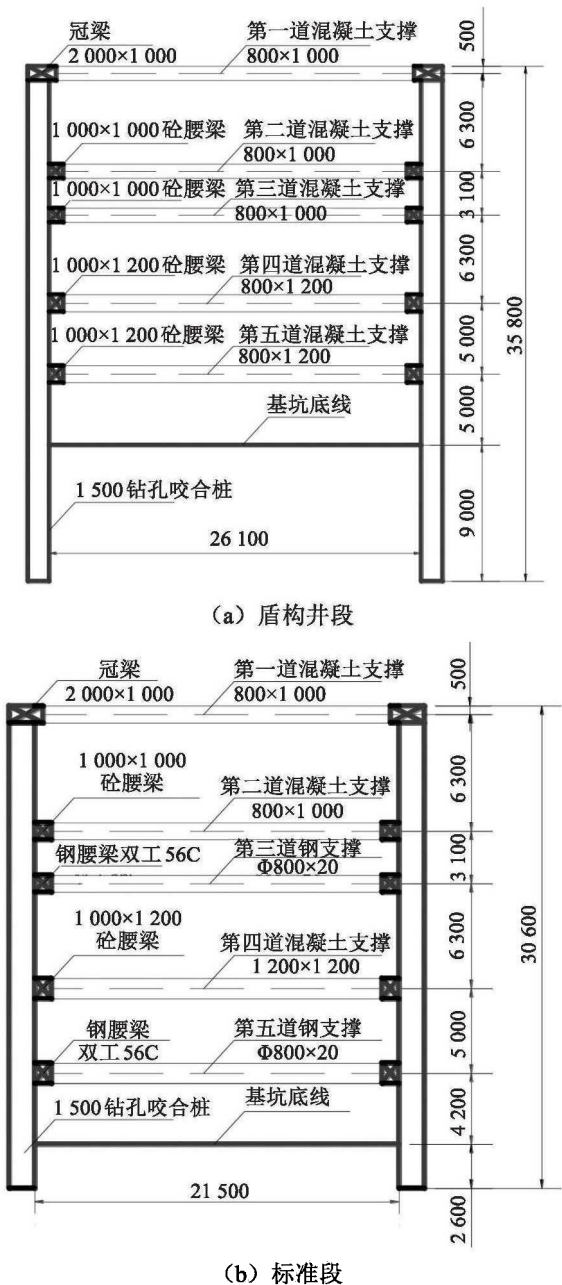


图1 围护结构剖面 (单位: mm)

Fig. 1 Sectional view of enclosure structure(unit: mm)

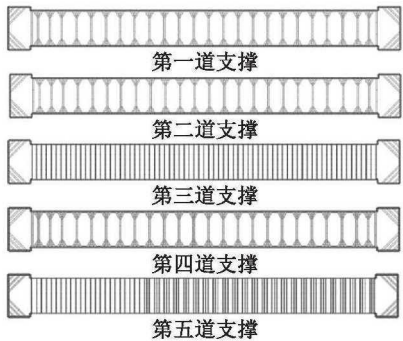


图2 基坑内支撑平面示意

Fig. 2 Schematic diagram of the support plane in the foundation pit

太子湾站主体围护结构中咬合桩素桩桩径设定为1.2 m，混凝土考虑选用C20；荤桩桩径设定为1.5 m，混凝土考虑选用C35，桩间距设置为1 m，咬合量设定为350 mm。此研究区间不考虑地下水，自上而下分布的地层依次为：填碎石、素填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、强风化片麻状混合花岗岩、强风化片麻状混合花岗岩、中风化片麻状混合花岗岩。

2 模型建立

2.1 模型参数设定

模型x向取400 m，y向取200 m，z向取100 m。三维模型的侧面考虑水平约束作用，底部考虑水平与垂直约束作用，而模型的顶部不设约束。3D有限元模型如图3~4所示。

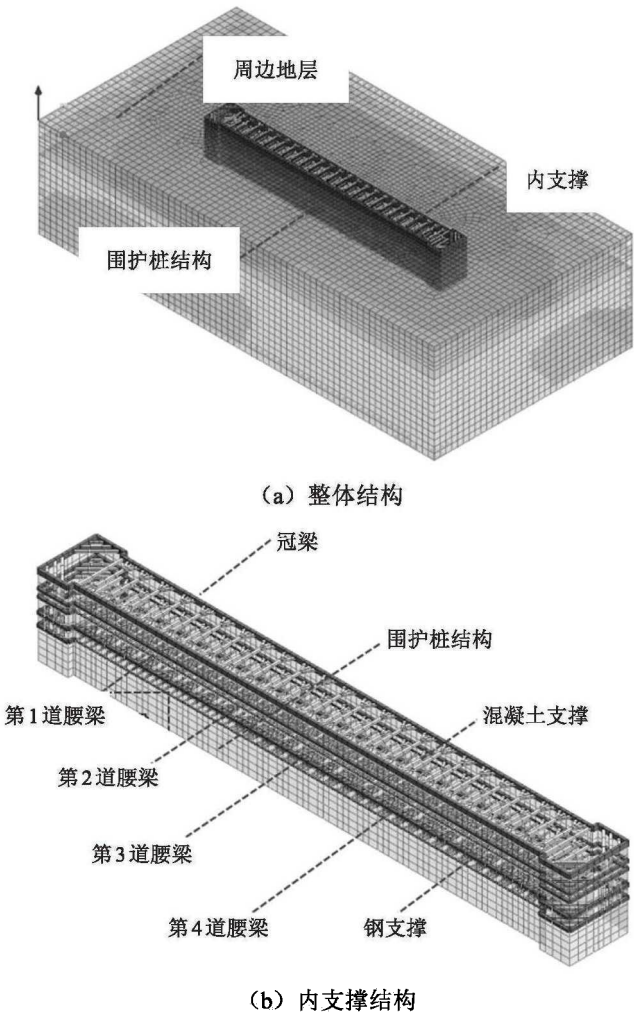


图3 围护桩结构空间布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the space layout of the retaining pile structure

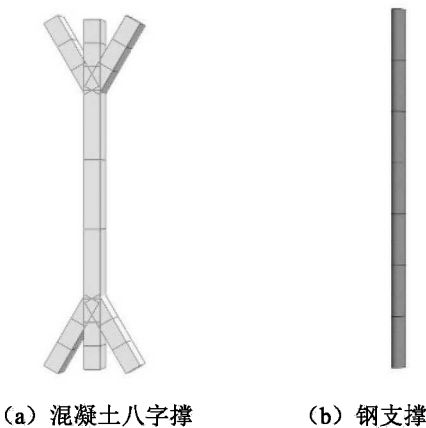


图4 基坑内支撑示意

Fig. 4 Schematic diagram of the support in the foundation pit

2.2 施工工况模拟

主要施工步骤为：①初始地应力平衡；②围护结构施作模拟；③基坑内土体开挖；④待第一层土开挖工序计算完成后，重复上述开挖工序，开挖至预定深度。基坑开挖的模拟工况见表1。

表1 基坑开挖模拟工况

Table 1 Simulation conditions of foundation pit excavation

阶段	名称	描述
S1	开挖-1	施工冠梁、第一道撑及开挖土体6.9 m
S2	开挖-2	施工腰梁、第二道撑及开挖土体3.1 m
S3	开挖-3	施工腰梁、第三道撑及开挖土体6.3 m
S4	开挖-4	施工腰梁、第四道撑及开挖土体5.0 m
S5	开挖-5	施工腰梁、第五道撑及开挖土体5.0 m

2.3 模型验证

根据《深圳市基坑支护技术规范》(SIC05-2011)中基坑变形验算的相关规定，依托太子湾站钻孔咬合桩工程，采用理正深基坑7.0分析软件计算基坑开挖施工工序下咬合桩围护结构的水平位移，其端头废水池A-A的为13.12 mm，标准段B-B的为12.00 mm，标准段破碎带C-C的为14.07 mm，标准段砂层D-D的为13.70 mm，墙头扩大端E-E的为16.75 mm。

采用数值模拟方法，可以得到基坑开挖各个施工工况下咬合桩结构的变形情况。模拟基坑开挖完成后围护结构的水平位移值，如图5所示。结合太子湾站钻孔咬合桩结构的水平位移理论值与现场实测结果，对数值模型进行合理性验证，得到咬合桩围护结构水平位移理论值与数值模拟值的对比情况，如图6所示。

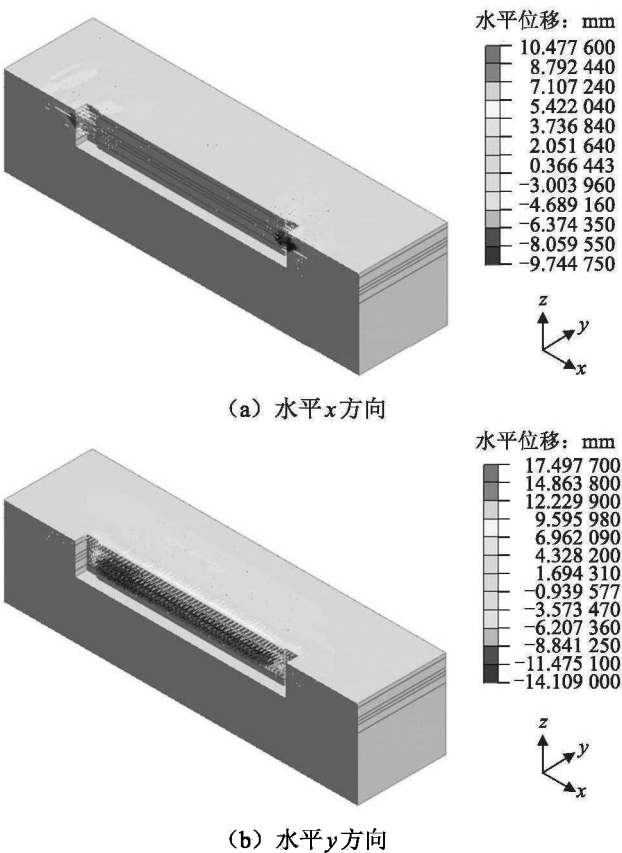


图5 围护结构水平位移模拟结果

Fig. 5 Simulation results of horizontal displacement of envelope structure

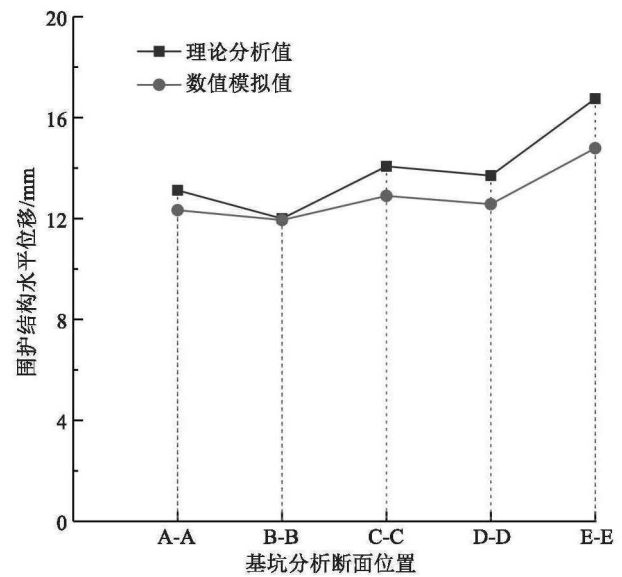


图6 围护结构水平位移理论与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of theory and numerical simulation horizontal displacement of envelope structure

从图6中可以看出,对于不同基坑开挖断面处围护桩水平方向的变形分析,数值模拟值与理论分析值具有一致的分布规律。采取数值模拟所获

得的水平位移略小于理论值,但最大差值仅为2.05 mm,约为理论值的12%,表明:数值模型能够有效契合同一分析条件下的理论模型,能够为数值建模实现咬合桩特性指标优化提供良好的验证基础。

3 咬合桩特性指标优化分析

对于咬合桩荤桩桩径比、咬合量及荤素桩刚度比分析,模拟工况参数见表2。

表2 模拟工况参数

Table 2 Parameters of simulated working conditions					
序号	咬合桩 荤桩桩 径/mm	素桩与荤 桩桩径比	咬合桩咬 合量/mm	素桩混凝 土等级	素桩与荤 桩混凝土 刚度比
工况-1	1 200	1 : 1.00	150	C15	1 : 0.70
工况-2	1 300	1 : 1.10	200	C20	1 : 0.80
工况-3	1 400	1 : 1.20	250	C25	1 : 0.90
工况-4	1 500	1 : 1.30	300	C30	1 : 0.95
工况-5	1 600	1 : 1.33	350	C35	1 : 1.00

3.1 咬合桩桩径比

考虑素桩尺寸1 200 mm、咬合量和混凝土刚度不变,分别设定素桩与荤桩桩径比分别为1:1.00、1:1.10、1:1.20、1:1.30、1:1.33,即对荤桩桩径1 200、1 300、1 400、1 500、1 600 mm 5种工况进行模拟,模拟结果如图7~8所示。

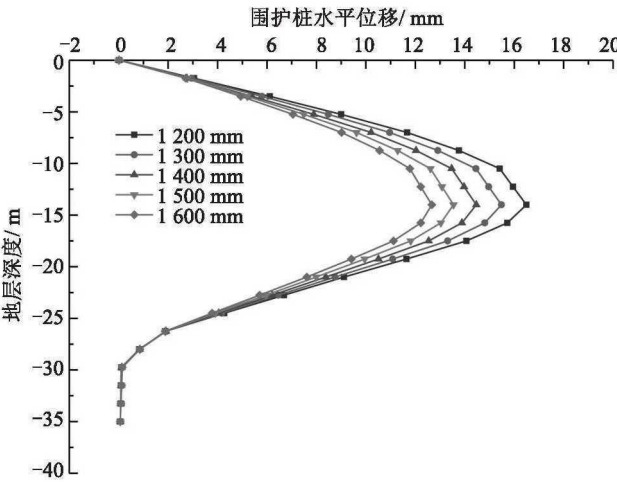


图7 不同桩径比工况围护结构水平位移对比

Fig. 7 Comparison of horizontal displacements of enclosure structures under different pile diameter ratios

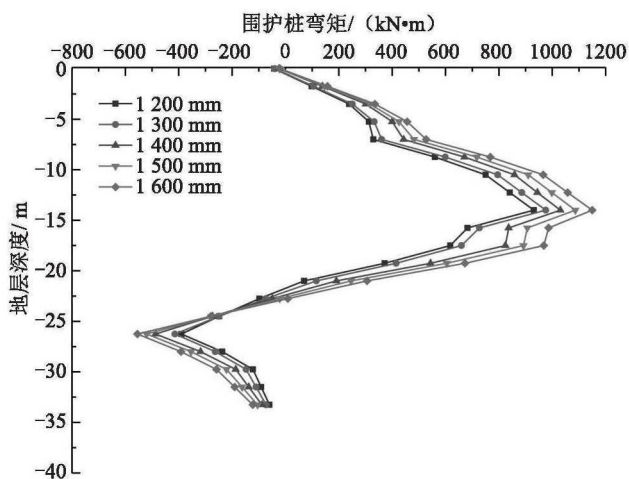


图8 不同桩径比工况围护结构弯矩对比

Fig. 8 Comparison of bending moments of enclosure structures with different pile diameter ratios

从图7~8可以看出,从工况1到工况5,随着荤桩桩径均匀增加,围护结构产生的水平位移显著降低,整个位移趋势呈线性变化,随着位移的降低降幅略有减小,通过分析可知,桩径比对围护的结构内力影响较明显。从图7~8还可以看到,从工况1到工况5,随着荤桩桩径均匀增加,围护结构所承受的弯矩逐渐增大。

不同桩径比工况下围护结构最大水平位移与弯矩变化趋势如图9所示。从图9中可以看出,相对于工况1,工况5的荤桩桩径增大了33%,而围护桩结构的最大水平位移则减小了23.5%,最大弯矩同步增大了23.1%,表明:咬合桩桩径比对变形与内力的作用效果较为显著。

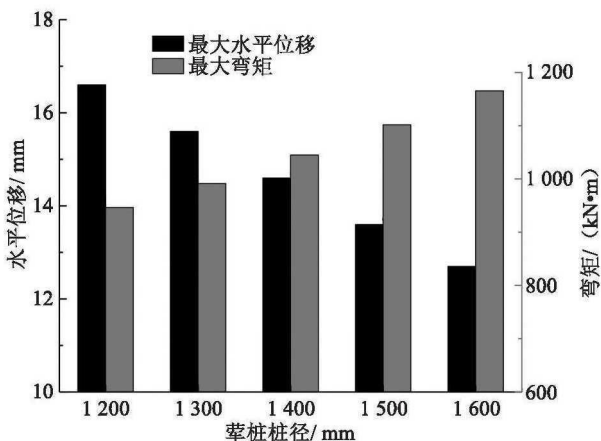


图9 不同桩径比工况下围护结构最大水平位移与弯矩变化趋势

Fig. 9 Variation trend of maximum horizontal displacement and bending moment of the enclosure structure under different pile diameter ratios

通过各工况对比分析,荤素桩桩径比对围护结构变形与受力都具有较大影响。综合施工成本与施工安全质量等因素,建议桩径比为1:1.30,即荤桩桩径1500 mm,素桩桩径1200 mm(即工况4)较为合适。

3.2 咬合桩咬合量

保持咬合桩桩径、混凝土刚度不变,分别设定咬合量150、200、250、300、350 mm 5种工况进行模拟,模拟结果如图10~11所示。

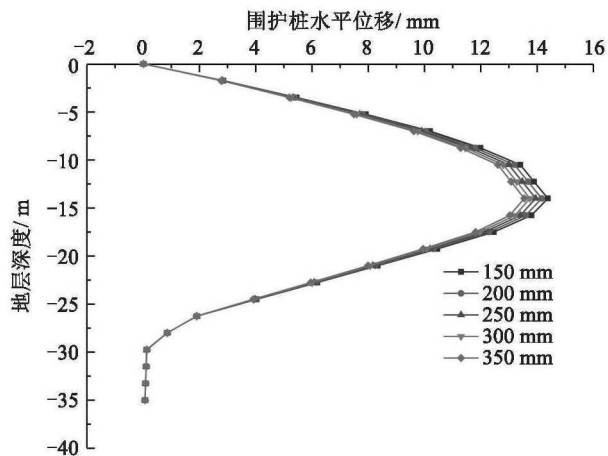


图10 不同咬合量工况下围护结构水平位移对比

Fig. 10 Comparison of horizontal displacement of enclosure structure under different bite conditions

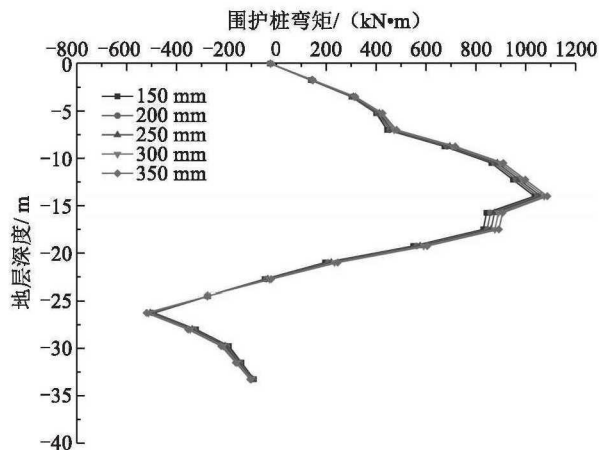


图11 不同咬合量工况下围护结构弯矩对比

Fig. 11 Comparison of bending moments of enclosure structure under different occlusal conditions

从图10~11可以看出,从工况1到工况5,随着咬合量的均匀增加,围护结构产生的水平位移持续降低,整个位移趋势基本呈线性变化;咬合量对于围护结构内力的影响效应较微弱,从工况1到工况5,随着咬合量增加围护结构所承受的弯矩逐渐增大,但弯矩的变化幅度较小。

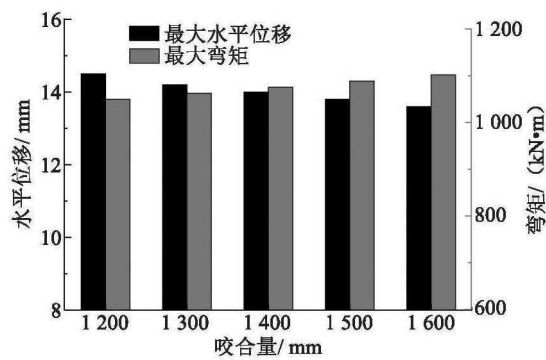


图12 不同咬合量工况下围护结构最大水平位移与弯矩变化趋势

Fig. 12 Variation trend of the maximum horizontal displacement and bending moment of the envelope structure under different occlusal conditions

不同咬合量工况下围护结构最大水平位移与弯矩的变化趋势如图12所示。从图12中可以看出, 相对于工况1, 工况5的咬合量增大了133%, 而围护桩结构的最大水平位移则减小了6.2%, 最大弯矩仅增大了5%, 表明: 咬合量对于变形与内力的作用效果相对较小。因此, 咬合桩的咬合量对桩体的侧向变形与受力情况有一定影响效应。经过优化分析, 确定采用350 mm的咬合量时咬合桩的内力与变形结果最为理想。

3.3 咬合桩桩素桩刚度比

保持桩的混凝土等级、咬合桩桩径和咬合量恒定, 分别设定素桩与桩混凝土的刚度比为: 1:0.70、1:0.80、1:0.90、1:0.95、1:1.0, 即对素桩混凝土等级C15、C20、C25、C30、C35 5种工况进行模拟分析, 模拟结果如图13~14所示。

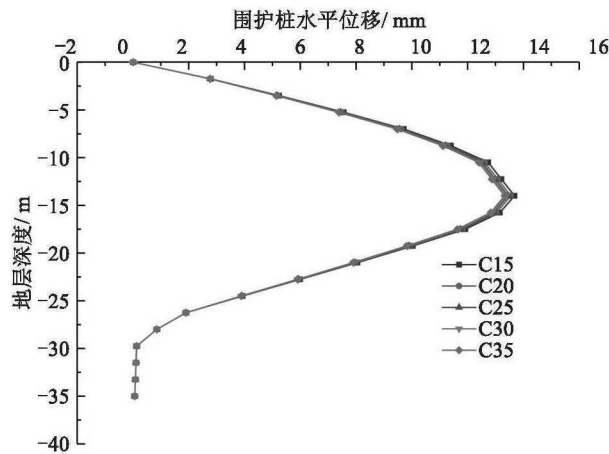


图13 不同桩素桩刚度比工况下围护结构水平位移对比

Fig. 13 Comparison of the horizontal displacement of the enclosure structure under different ratios of the rigidity of the raw material piles

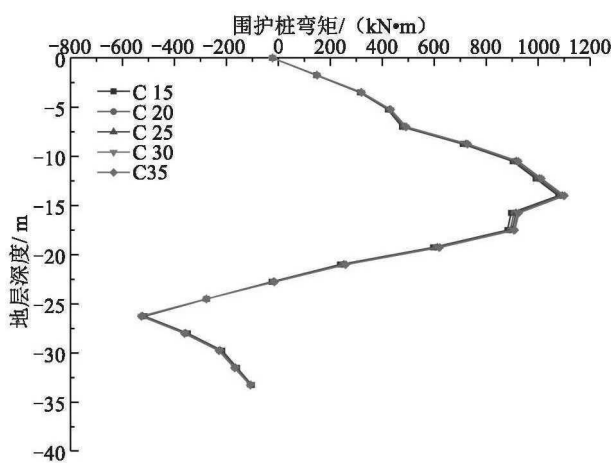


图14 不同桩素桩刚度比工况下围护结构弯矩对比

Fig. 14 Comparison of the bending moment of the enclosure structure under different ratios of the stiffness ratio of the raw material piles

从图13~14中可以看出, 从工况1到工况5, 随着素桩刚度的提高, 围护结构产生的水平位移略有些许降低, 整个位移趋势无明显变化; 素桩刚度对围护结构的弯矩总体上有增大, 但可忽略不计, 从工况1到工况5, 整个位移趋势无明显变化。

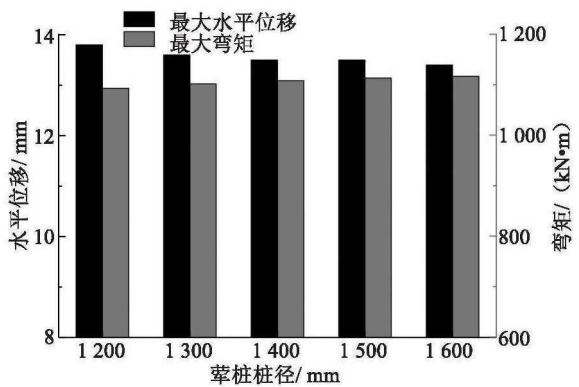


图15 不同刚度比工况下围护结构最大水平位移与弯矩变化趋势

Fig. 15 Variation trend of the maximum horizontal displacement and bending moment of the envelope structure under different stiffness ratio conditions

通过改变素桩混凝土等级可以改变桩素桩的刚度比, 从图15中可以看出, 相对于工况1, 工况5的混凝土增大了4个等级, 而围护桩结构的最大水平位移只减小了3.1%, 最大弯矩只增大了2.2%, 表明: 桩素桩刚度比对咬合桩变形与内力的作用效果相当小。因此, 2种桩的刚度比对咬合桩的侧向变形与弯矩影响效应较小。考虑到深圳太子湾地铁站基坑工程临海而建, 水力联系较大,

需要增强围护结构的防渗性能,建议咬合桩的素混凝土桩采用标号为C20混凝土或C25混凝土。

4 结论

通过数值模拟研究了桩径比、咬合量以及荤素桩刚度比等对围护结构的内力变化与位移的影响,得出结论为:

1) 荤素桩桩径比对咬合桩围护结构的侧向变形与承载弯矩具有较大的影响。综合分析建议桩径比选取1:1.30,即荤桩1500 mm,素桩1200 mm较为合适。

2) 咬合量对咬合桩围护结构的侧向变形与承载弯矩有一定的影响,但弱于桩径比的影响程度。经过优化分析,确定咬合桩采用350 mm的咬合量时内力与变形结果最为理想。

3) 荤素桩刚度比对咬合桩的侧向变形和承载弯矩影响不大。考虑到深圳太子湾地铁站基坑工程临海而建,水力联系较大,需要增强围护结构的防渗性能,建议咬合桩的素混凝土桩采用标号为C20混凝土或C25混凝土。

参考文献(References):

- [1] 廖中林,徐传鹏.地铁车站基坑钻孔咬合桩施工与设计[J].交通科技与经济,2013,15(2):24-27. (LIAO Zhong-lin,XU Chuan-peng.Design and construction of borehole cast-in-place piles in the subway station pit[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2013, 15(2): 24-27. (in Chinese))
- [2] 周勇,王惠君,朱彦鹏.某地铁深基坑桩撑支护结构施工力学行为分析[J].铁道工程学报,2019,36(1):86-92. (ZHOU Yong, WANG Hui-jun, ZHU Yan-peng. Construction mechanics behavior analysis of pile-strut supporting structure of a subway deep foundation pit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(1): 86-92. (in Chinese))
- [3] Anderson T C. Secant piles support access shafts for tunnel crossing in difficult geologic conditions[C]//Geo Support Conference 2004. Orlando, Florida, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2004: 299-308.
- [4] Zdravkovic L, Potts D M, St John H D. Modelling of a 3D excavation in finite element analysis[J]. Géotechnique, 2005, 55(7): 497-513.
- [5] 罗积胜.地铁车站咬合桩围护结构设计计算方法及其应用研究[D].成都:西南交通大学,2009. (LUO Ji-sheng. Study on the calculation design of method and the application of secant pile wall in the support structure of metro station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [6] 付长春.圆形咬合桩深基坑围护结构受力及变形特点分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015. (FU Chang-chun. Analysis of stress and deformation characteristics of retaining structure for circular secant pile deep excavation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese))
- [7] 张桢.兰州地铁钻孔咬合桩设计优化研究[D].兰州:兰州大学,2016. (ZHANG Zhen. Design optimization of the secant pile wall at Lanzhou subway[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese))
- [8] 凌萌茁,闫建龙,沈宇鹏,等.北京地铁新宫站复合支护结构参数优化分析[J].路基工程,2019(3):165-170,182. (LING Meng-zhuo, YAN Jian-long, SHEN Yu-peng, et al. Optimized design on parameters of composite supporting structure in Xingong station in Beijing subway[J]. Subgrade Engineering, 2019(3): 165-170, 182. (in Chinese))
- [9] 廖德武,程娟,张君恺,等.钻孔咬合桩在卵石层基坑支护设计中的应用[J].地下空间与工程学报,2017,13(S2):805-811. (LIAO De-wu, CHENG Juan, ZHANG Jun-kai, et al. Application of drilling clenching pile in foundation pit support design of pebble bed[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 805-811. (in Chinese))
- [10] 陈秀辉.深大基坑咬合桩支护结构数值模拟研究[J].施工技术,2017,46(13):72-76,109. (CHEN Xiu-hui. Numerical simulation of secant pile support structure in deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2017, 46(13): 72-76, 109. (in Chinese))
- [11] 张健,周中,邢凯.盾构隧道近接施工对地层变形的影响[J].交通科学与工程,2019,35(4):63-70. (ZHANG Jian, ZHOU Zhong, XING Kai. The influence of shield tunnel construction adjacent to the existing structure on deep soil displacement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 63-70. (in Chinese))
- [12] 赵利平,龙骁鹏,黄筱云.水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2020,17(3):30-

(下转第49页)

- simply supported RC beams strengthened with externally bonded CFRP [J]. Journal of Transportation science and engineering, 2012,28(3): 22-26.(in Chinese))
- [10] 邓宇,杨希涛,张鹏,等.CFRP布加固小偏心受压PEC柱的试验研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2017,42(1): 165-174. (DENG Yu, YANG Xi-tao, ZHANG Peng, et al. Experimental study of CFRP reinforced PEC column under mall eccentric compression[J]. Journal of Guangxi University:Natural Science Edition. 2017,42(1):165-174. (in Chinese))
- [11] An W. Saadatmanesh H, Ehsani M, RC beams strengthened with FRP plates. Part II: Analysis and parametric study[J]. Journal of Structural Engineering, 1991,117(11):3434-3455.
-
- (上接第16页)
- 36,70.(ZHAO Li-ping, LONG Xiao-peng, HUANG Xiao-yun. Settlement analysis of composite foundation of soil-cement mixing pile[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology:Natural Science, 2020,7(3): 30-36, 70.(in Chinese))
- [13] 周广友,李聪,胡勇,等.箱涵顶进施工过程中路面沉降的数值模拟分析[J]. 公路工程,2020, 45(3):29-37.(ZHOU Guang-you, LI Cong, HU Yong, et al. Numerical simulation analysis of pavement settlement during the construction process of box culvert-jacking[J]. Highway Engineering,2020, 45(3): 29-37. (in Chinese))
- [14] 吴刚,李军委,同飞,等.荣民金融中心深基坑支护设计及数值模拟分析[J]. 建筑结构,2019, 49(S2):906-909.(WU Gang, LI Jun-wei, TONG Fei, et al. Design and numerical simulation analysis of deep foundation pit support in Rongmin financial center[J]. Building Structure, 2019, 49 (S2): 906-909. (in Chinese))
- [15] 谭伟. 临近边坡地铁基坑开挖数值模拟研究[J]. 土工基础,2020,34(2):176-180.(TAN Wei. Numerical evaluation of a subway Deep Excavation near a slope[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(2): 176-180 (in Chinese))