

超深地下连续墙内嵌永久钢结构施工关键技术

朱作猛

上海智平基础工程有限公司 上海 200072

摘要: 本文具体分析了武汉三镇中心项目的难点问题: 地下连续墙的垂直度控制要求高、地下连续墙墙底沉渣控制要求、筋笼与钢骨柱相结合的偏心问题、混凝土浇筑困难、钢筋笼连接问题; 通过多次超声波检测、气举反循环参数控制、钢骨架型钢单独吊装、选择和易性好的混凝土、合理分幅等措施, 很好的解决了上述问题, 为类似工程提供了参考依据。
关键词: 地下连续墙墙; 垂直度; 沉渣; 钢骨柱; 气举反循环

Key Technology of Permanent Steel Structure Embedded in Ultra-deep Underground Continuous Wall

Zuomeng Zhu

Shanghai Zhiping Foundation Engineering Co., LTD., Shanghai 200072

Abstract: This paper specifically analyzes the difficult problems of Wuhan Sanzhen center project: high verticality control requirement of underground continuous wall, sediment control requirement of underground continuous wall, eccentric combination of cage and steel bone column, concrete pouring, connection problem of steel cage, multiple ultrasonic detection, independent lifting of steel skeleton steel, selecting concrete with good workability and reasonable width, and provides a reference for similar projects.

Keywords: Underground continuous wall wall; Verticality; Sediment; Steel bone column; Air lift reverse circulation

1 引言

随着城市化发展, 地下空间的利用率越来越高, 为保证周边环境及基坑的安全性, 超深地下室普遍采用超深地下连续墙作为垂直支护结构, 地下连续墙施工技术也日渐成熟; 地下连续墙仅作为临时支护结构, 造成材料的浪费, 不符合国家“碳中和”的理念, 故现设计单位把地下连续墙与地下室外墙相结合, 即两墙合一技术; 本文中的武汉三镇中心项目还在地下连续墙中内嵌永久钢结构, 且地下

连续墙作为永久结构的承载桩, 本文阐述了该工程的难点分析及后续的解决措施, 可为以后类似项目提供一定的参考依据。

2 概况

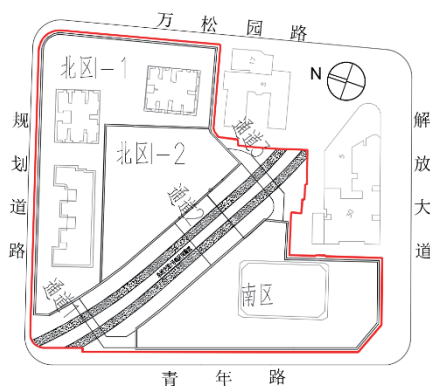
2.1 周边环境概况

武汉三镇中心项目作为武汉首个地铁隧道从项目地块下方横穿的工程, 位于武汉市江汉区青年路与解放大道交汇处, 拟建地下室东、西、南三面临近城区主干道, 地下室分为2个部分, 武汉市轨道交通2#线从东西方向穿越本场区。

2.2 基坑概况

武汉三镇中心项目南北区地下室范围为地下四层, 南北区之间地下一层设置3个通道联通, 基坑规模信息如下:

区域	基坑面积 (m ²)	基坑深度 (m)
北区地下室	19697	18.7~21.4
南区地下室	9657	18.7~21.7
南北区通道 (3条)	656/1345/652	6.05~6.25



为保证基坑安全，本工程南北地下室范围采用地下连续墙+等厚度水泥土搅拌墙+四道钢筋砼支撑的支护形式。为保护轨道交通2#线区间隧道的安全性，地铁侧地连墙采用1200mm厚56m~58m超深嵌岩地连墙（兼部分主体结构外墙结构），为满足后续上盖主体结构施工需求，地铁侧地连墙均内嵌钢骨柱结构。

2.3 地质概况

地连墙施工范围内的土层有①杂填土、②粉质粘土、③₁粉质粘土夹粉土粉砂、③₂粉质粘土夹粉细砂、④₁粉细砂、④₂细砂、④₃粉质粘土、④₂细砂、⑤圆砾、⑥₂中风化泥岩。基坑结构设计参数如下：

地层编号及 土层名称	重度 γ (kN/m ³)	综合建议值		渗透系数K (m/d)
		C (kPa)	φ (°)	
①杂填土	18.5	8	18	0.6
②粉质粘土	19.1	20	11	0.002
③ ₁ 粉质粘土夹粉土、粉砂	19.3	18	13	0.02
③ ₂ 粉质粘土、粉细砂互层	18.8	13	17	0.7
④ ₁ 粉细砂	18.0	0	31	12
④ ₂ 细砂	18.5	0	35	14
④ ₃ 粉质粘土	18.4	25	11	0.002
⑤圆砾	20.0	0	40	18
⑥ ₁ 强风化泥岩	/	/	/	/
⑥ ₂ 中风化泥岩	/	/	/	/

3 地连墙施工难点分析：

3.1 地下连续墙的垂直度控制要求高

地下连续墙内嵌的钢骨柱为主体结构，主体结构垂直度要求高，如地下连续墙成槽存在倾斜，钢骨柱下放时会造成钢骨柱垂直度不达标的问题，故施工过程中需严格控制地下连续墙的垂直度。

3.2 地下连续墙墙底沉渣控制要求高

由于钢骨柱为主体结构的一部分，地下连续墙作为钢骨柱的承载桩，还需考虑地下连续墙承载力问题，地墙的持力层为⑥₂层中风化泥岩，且需穿透较厚砂层，故对墙底沉渣的要求较高。

3.3 钢筋笼与钢骨柱相结合，重量较重，存在偏心问题，需选用合理的吊装方案

钢筋笼最重约75t左右，钢骨柱型钢重量约15t左右，合计约90t左右；且钢骨柱型钢底标高位于基坑底上部，故如钢筋笼与钢骨柱型钢采用整体吊装，存在偏心问题。

3.4 混凝土浇筑困难

现有主体结构专业设计的钢骨柱分布宽度范围（1800/2600mm）内外侧纵向主筋为大于地下墙纵向受力钢筋，在地连墙钢筋笼加工过程中，该区域均采用主体结构专业设计的钢骨柱配筋施工，钢筋分布较密，且内置钢骨，故混凝土浇筑困难。

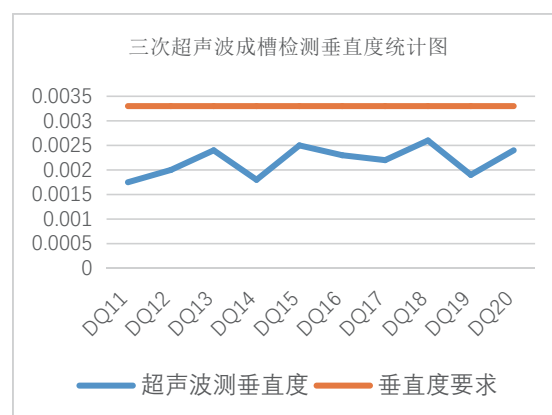
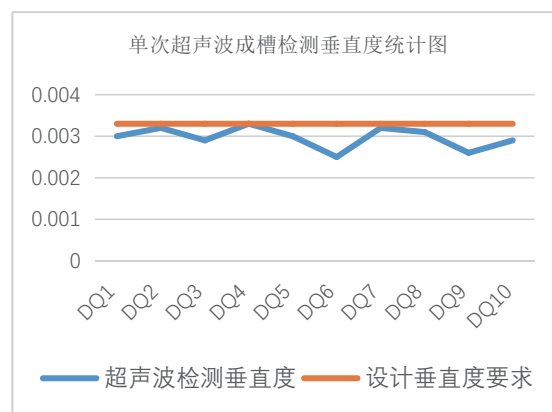
3.5 钢筋笼连接问题

现有钢骨柱及暗柱范围内纵向钢筋底部标高为+2.75m（底板底部），直径为 $\Phi 32$ ，底板底部以下区域地下墙钢筋为 $\Phi 25 \sim 28$ ，涉及不同直径钢筋连接的问题。

4 上述施工难点的解决措施：

4.1 针对地下连续墙的垂直度控制要求高的解决措施

成槽施工直接影响地下连续墙垂直度的关键工序，现常用超声波来检测成槽的垂直度控制，常规是在成槽至设计底标高后进行检测。本工程成槽深度较深，最深约58m；先施工非地铁侧地墙，其中选取10幅地墙成槽垂直度检测结果统计（如下图：单次超声波成槽检测垂直度统计图），可以看出有地墙垂直度虽然未超出设计垂直度要求范围，但非常接近设计要求值；故地铁侧采用分三段进行超声波成槽检测，分别为19m一次、38m一次，成槽至设计标高一次。施工过程中根据每次检测数据来进行纠偏和修正。



同样选取地铁侧10幅地墙成槽垂直度检测结果统计（如上图：三次超声波成槽检测垂直度统计图），所有数据均小于设计垂直度要求，说明采用三次超声波成槽检测方法可行。

4.2 针对地下连续墙墙底沉渣控制要求高的解决措施

地下连续墙施工过程中均会存在墙底沉渣，墙底沉渣的厚度直接影响地下连续墙的承载力，为降低墙底沉渣厚度，需在混凝土灌注前控制沉渣厚度，地墙一清时，会保留20~30cm的土体，以便采用抓斗进行清底。二清采用气举反循环清孔，而气举反循环时采用的风量及风管放置导管内的深度直接影响清孔结果。

为保证清孔后的沉渣厚度满足设计要求，施工前进行了成槽试验，二清均采用了反循环清孔，根据不同的风量、不同的风管放置深度分别进行试验，试验结果如下表数据所示：

不同的风管放置深度下的试验		
名称	数值	数值
风管放置深度	1/3	2/3
反砂量	5.8m ³	6.6
沉渣厚度	194mm	83mm
备注：以上实验结果均在导管直径、风管直径、空气压力、清孔时间、风量（3.5m ³ /min）均相同的情况下。		
不同风量下的试验		
名称	数值	数值
风量	3.5m ³ /min	5m ³ /min
反砂量	6.6	6.85
沉渣厚度	83mm	49mm
备注：以上实验结果均在导管直径、风管直径、空气压力、清孔时间、风管放置深度（2/3）均相同的情况下。		

根据上述试验结果表明，风管放置深度为2/3时，且风量较大时，清孔效果最佳；故说明风管的放置深度直接影响清孔的效果，且风量约大时，清孔的效果越好。

4.3 针对钢筋笼与钢骨柱相结合的吊装问题的针对措施

本工程地墙钢筋笼吊装采用整体吊装的形式，但本身地墙钢筋笼就较重，约75t，而钢骨柱重约15t，为避免选用较大履带吊、地基承载力不足、钢筋笼与钢骨柱一起的偏

心等问题，本工程采用地墙钢筋笼与钢骨柱内的型钢分开吊装下放的方式。

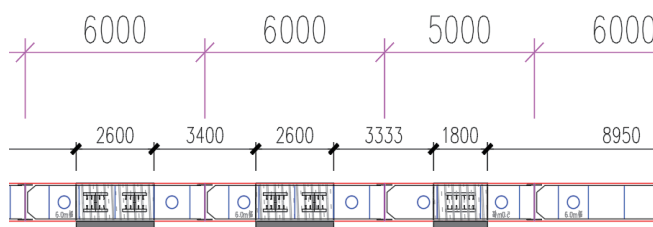
现有主体结构专业设计的钢骨柱分布宽度范围（1800/2600mm）内外侧纵向主筋为26~28根Φ32，大于地下墙纵向受力钢筋（内侧25根Φ28，外侧20Φ25），地下墙钢筋笼加工过程中，在钢骨柱分布宽度范围内按照主体结构设计钢筋规格予以设置（按照较大规格钢筋的原则执行）。

地墙钢筋笼（含钢骨柱钢筋）吊装采用常规的双机台吊（350t+250t履带吊）；钢骨柱型钢待地墙钢筋笼下放后单独吊装。钢骨柱型钢采用100t吊车单独吊装，钢骨柱型钢的定位及导向是一难点。为保证后续钢骨柱型钢的下放定位精确，在钢筋笼预留的空腔内内置角钢作为导向及定位作用，深度同型钢，角钢与原钢骨柱箍筋焊接连接。

4.4 针对混凝土浇筑困难的针对措施

由于钢骨柱的配筋比地墙配筋要大且多，在钢骨柱范围内采用的是钢骨柱配筋，考虑钢骨柱周边钢筋分布较密，为保证混凝土浇筑质量和密实度，钢骨柱布置的地下连续墙采用流动性好的细石混凝土。

（1）为方便导管的下放，本工程根据钢骨柱位置进行了分幅调整，如下图所示。



（2）本工程施工前根据分别采用不同的混凝土坍落度来进行试验（如下表）。

坍落度	160	200	240
蜂窝情况	存在大量蜂窝情况	蜂窝情况几乎没有	混凝土离析
强度	51MPa	46MPa	33MPa
备注：混凝土等级C35，养护28d，其他条件均相同。			

通过上述试验结果表明，坍落度太小流动性不行，会造成混凝土蜂窝情况；坍落度太大易离析，会造成混凝土强度降低，故需选用合理的坍落度，本工程坍落度采用200左右。

（3）由于钢骨柱内置型钢、钢筋过密等问题，混凝土

浇筑不易充满，本工程采用自制振捣棒来保证混凝土灌注的质量和密实度。

现场根据钢筋柱配筋及内置型钢情况，模拟相同的施工条件做三个方形容器，分别进行三种情况的试验，其中一个为不放置振捣棒，一个为放置普通振捣棒，另一个为放置自制振捣棒：

试验条件	试验结果
不放置振捣棒	混凝土较松散，部分区域混凝土缺失。
放置普通振捣棒	混凝土填充完整，但强度不达标。
自制振捣棒	混凝土填充密实，且强度符合设计要求。

根据上述试验结果表明，采用自制振捣棒能很好的保证混凝土浇筑的质量和密实度。

4.5 针对钢筋连接问题的针对性措施

鉴于地下墙最大结构内力为底板及以下一定深度范围，为避免在底板附近区域出现薄弱环节，要求钢筋柱上部纵向钢筋延伸至标高-1.25m，不同直径钢筋接头设置在标高-1.25m以下并错开50%，不同直径的钢筋连接采用变径套筒机械连接。

5 抽水试验及取芯报告结果显示

5.1 抽水试验

待周边围护施工完毕后，在土方开挖前进行抽水试验，进行为期20天的抽水，在此抽水过程中，坑外观测水位变化为-89~-435mm。

5.2 取芯报告

S1-20 混凝土芯样抗压强度汇总表 表 6					
编号	孔号	芯样龄期 (天)	取样深度 (m)	单个芯样抗压强度 (MPa)	本组芯样抗压强度平均值 (MPa)
S1-20	S1-20-1	>60	1.10-1.50	51.10	49.73
				49.80	
			8.00-8.40	48.30	
				50.80	
			17.40-17.80	49.70	
				49.40	
	S1-20-2	>60	0.90-1.30	48.50	53.33
				49.30	
			12.30-12.60	50.40	
				55.50	
			23.30-23.70	52.90	
				55.30	
	S1-20-3	>60	0.80-1.20	53.70	50.07
				53.30	
			9.70-10.10	53.00	
				52.20	
			18.80-19.20	53.00	
				49.60	

S1-20 钻芯完整性检测结果一览表										表 7
编号	孔号	钻芯深度 (m)	施工提供深度 (m)	钻芯检测长度 (m)	钻芯样个数	钻芯强度检测值 (MPa)	桩端沉渣 (mm)	桩身类别	桩身完整性评价及结论	备注
S1-20	S1-20-1	18.20	56.9	18.20	9	49.40	/	I	混凝土芯样连续、完整、胶结好，芯样侧面表面光滑、骨料分布均匀，芯样呈长柱状、断口吻合	/
	S1-20-2	25.75	56.9	25.75	9	53.33	/	I	混凝土芯样连续、完整、胶结好，芯样侧面表面光滑、骨料分布均匀，芯样呈长柱状、断口吻合	/
	S1-20-3	20.15	56.9	20.15	9	50.07	/	I	混凝土芯样连续、完整、胶结好，芯样侧面表面光滑、骨料分布均匀，芯样呈长柱状、断口吻合	/

注：检测编号由建设单位及监理单位共同指定

6 结论

根据上述抽水试验及取芯结果显示，本工程地墙施工质量良好。采用分次超声波成槽检测，保证了地墙的垂直度；控制气举反循环的风量、风管的放置位置，控制了沉渣厚度；采用钢筋笼与型钢分开吊装、采用与箍筋焊接的角钢起到定位及导向的作用，解决了钢筋笼偏心等问题；采用细石混凝土、控制混凝土的坍落度及采用自制振捣棒，保证了混凝土的质量及密实度；采用变径机械套筒连接解决了不同直径钢筋的连接问题，把接头位置置于基坑底以下一定位置，避免了薄弱点位于坑底以上的隐患；根据以上措施解决了本工程的难点问题，可给以后类似工程提供一定的参考依据。

参考文献：

[1]赵建修. 装配式钢结构住宅抗侧力体系分类及研究进展[J]. 施工技术, 2018, 47 (S4): 575-583.

[2]杨焱森. 大型钢结构建筑施工中的变形监测研究[D]. 广东工业大学, 2020. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2020.000209.