



钻孔灌注桩空桩回填措施比选研究

文__陶世馨（中国葛洲坝集团第一工程有限公司，商务部副主任，工程师）

随着城市的快速发展，城市中心区用地越来越紧张，地上建筑越盖越高，地下空间越挖越深，钻孔灌注桩以其振动小、噪声低、钻进速度快、无泥浆污染、造价低、混凝土灌注质量较好等优势，广泛应用于基坑支护中。

采用钻孔灌注桩施工，虽然单个钻孔灌注桩引起的周围土体变形较小，但大型工程多为群桩基础，由成百上千根钻孔桩组成，当大量空孔同时存在时，土体卸荷导致的周围土体变形就会较大。随着时间的推移，刚开挖时形成的对维持周围土体稳定起积极作用的负孔隙水压力会逐渐消散，加上土的蠕变特性，空孔缩径现象进一步发展，对周围环境影响更加明显。针对群桩基础的空孔效应对周边环境的影响，采用空桩回填是目前较为经济有效的控制措施。同时，空桩回填还能保证场地平整、密实，确保施工设备的正常运行。

钻孔灌注桩空桩回填常见处理措施有回填砂、碎石、水玻璃固化剂，回填水泥土，回填碎石与注浆加固结合，回填C10混凝土，回填再生混凝土等。本文针对项目工期紧、场地狭窄、地质条件差等特点，结合工程实际对比钻孔灌注桩空桩回填的不同处理措施，最终选用C10混凝土回填措施，使这一难题得到解决。

一、工程概况

（一）设计概况

工程场地面积11000m²，灌注桩约694根，其中塔楼Φ1200mm工程桩447根，孔深约84m，桩长56.50m，桩顶空孔段25.90m；裙楼Φ800mm工程桩247根，孔深约58.50m，桩长35m，桩顶空孔段22.45m。

（二）工程地质条件

工程地质分区属长江漫滩工程地质区，场区地表普遍分布人工填土，往下依次为淤泥质粉质黏土（混夹粉土、粉砂）、粉质黏土（混夹粉土、粉砂）、粉细砂、含圆砾及含卵石砾砂，下伏基岩为白垩系浦口组泥质砂岩，岩面起伏不大，埋深在65.20m~68.60m。

1. 浅层岩土层特性

（1）1层杂填土：杂色，潮湿，稍密—中密。主要成分为黏性土，混大量碎石、建筑垃圾，粒径2cm~7cm不等，堆填时间一般不超过5年。该层土层顶高程6.70m~7.21m，平均6.93m；揭示厚度0.50m~3.50m，平均2.01m。

（2）2层素填土：灰黄色、灰褐色，潮湿，松散—稍密，局部中密。主要成分为黏性土，局部为路基填土，见贝壳及螺丝碎片，混粉细砂及少量碎石，堆填时间一般不超过5年。普遍分布，均有揭露。该层土层顶埋深0m~2.20m，平均0.14m；层顶高程4.50m~7.18m，平均6.63m；揭示厚度0.60m~4.90m，平均2.41m。

（3）1层淤泥质粉质黏土：灰色，流塑，夹粉砂、粉土薄层，局部呈互层状，具水平层理，局部以粉砂、粉土为主。均有揭露、普通分布。该层土层顶埋深0.60m~4.90m，平均2.61m；层顶高程2.04m~6.07m，平均4.18m；揭示厚度11.10m~22m，平均15.57m。

（4）2层淤泥质粉质黏土：灰色，流塑，夹粉砂薄层，呈互层状，具水平层理，局部以粉砂、粉土为主，均有揭露、普通分布。该层土层顶埋深15.10m~24m，平均18.18m；层顶高程-17.29m~-8.40m，平均-11.39m；揭示厚度4.60m~14.90m，平均10.01m。

（5）3层粉砂：灰色，饱和，中密，局部密实，夹粉质黏土薄层，含云母碎屑，分选性较好，级配差，主要矿物成分为石英、长石等。均有揭露，普遍分布。该层土层顶埋深24.60m~34.50m，平均28.18m；层顶高程-27.46m~-17.99m，平均-21.40m；揭示厚度1.90m~13.40m，平均6.63m。

2. 水文条件

（1）地表水。工程周边较大的地表水体为长江，最近距离约800m；中心河呈东西走向，距工程场区约700m。

地表水体与地下水的水力联系及对基坑开挖的影响评价如下：长江与潜水及承压水的水力联系较密切，通过含水层补给地下水，对基坑开挖影响较大；中心河与潜水的水力联系较密切、与承压水的水力联系较微弱，对基坑开挖影响一般。

（2）地下水。根据地下水贮存条件，场区地下水类型主要为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水。松散岩类孔隙水根据其埋藏条件和水力性质，分为孔隙潜水、承压水。

孔隙潜水近地表分布，主要赋存于浅部1层杂填土人工填土中。由于1层杂填土成分复杂，极不均匀，其透水性较好、赋水性较差，该含水层水位埋深主要受大气降水控制。

承压水主要赋存于埋深15m~48m的粉细砂、含圆砾及含卵石砾砂层中。透水性、赋水性均较好，隔水层

为微透水—弱透水的淤泥质粉质黏土（夹粉砂）及粉质黏土夹粉砂层，含水层底板为下伏基岩。

基岩裂隙水为碎屑岩类裂隙水，埋深为58m~70m。该层强风化泥质砂岩浅部岩芯较破碎，岩体透水性和赋水性较差，水量较贫乏。

含水层之间的水力联系：覆盖层中潜水与承压水之间水力联系微弱，承压水与下伏基岩裂隙水水力联系较为密切。

（三）空桩回填段概况

工程桩顶空孔段22.45m，空桩段范围地层主要为杂填土、淤泥质粉质黏土，呈流塑—软塑状态，地质条件极差，孔壁长时间暴露极易坍塌。空孔回填不密实、不牢固，极易造成空孔槽壁坍塌、地面沉陷，影响相邻灌注桩施工，给灌注桩施工留下安全隐患。

二、工程特点及存在的问题

工程特点如下：第一，工程桩桩位密度大、桩间距小、空孔深度大，易出现垮孔、窜孔现象。裙楼设计桩基顶标高距地面孔口高度约23m，留空段较长，同时桩基净间距最小仅为1.60m（2D）；塔楼设计桩基顶标高距地面孔口高度约26m，留空段较长，同时桩基净间距最小仅为2.40m（2D）；留空段若不采取有效措施回填，极易发生窜孔，影响桩基成孔。若一处出现垮孔、窜孔现象，将会给周围带来连锁反应，存在质量和安全隐患。第二，工期仅为6个月，工期紧且任务重。项目地连墙约4万m³，塔楼工程桩447根，工期仅为6个月，平均每天施工塔楼工程桩2.50根。为满足工期要求，在（70×72）m²场地内，施工高峰期需要配备4台旋挖钻机。第三，施工场地原始地形为池塘，虽然施工准备期已对软弱地基进行土壤固化剂换填处理，但由于换填深度有限，处理后的场地承载力仅能满足小型设备荷载要求。不良地基对设备合理调配造成巨大障碍，设备和人员将会出现不同程度停工。施工平面布置示意图如图1所示。

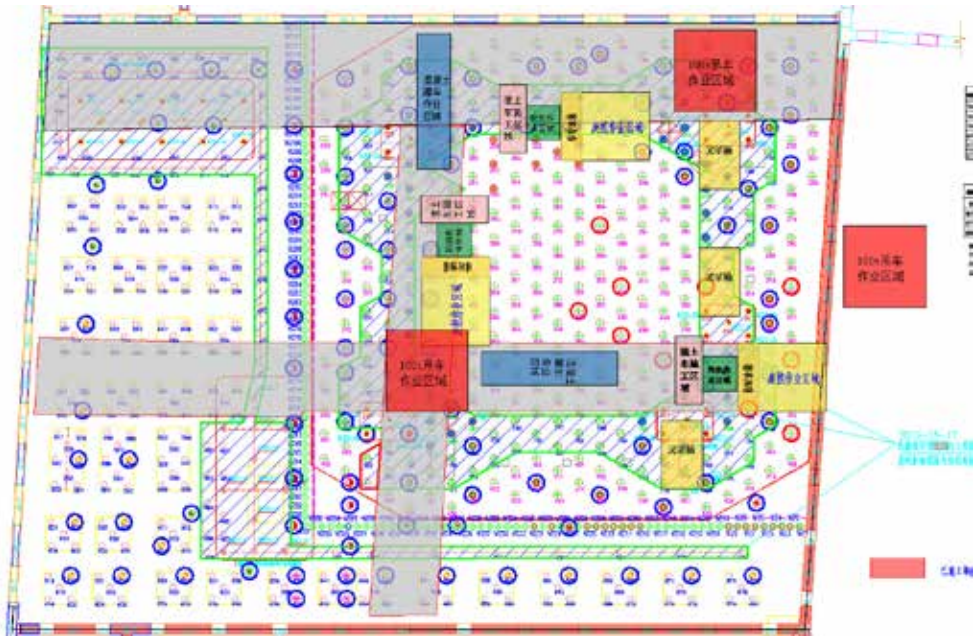


图1 施工平面布置示意图

同时，地质条件差，场地狭窄。在塔楼工程桩施工时，需确保三轴、地连墙、双高压旋喷工法（RJP）、高压旋喷桩、围护桩等多项工序能够同时开展。工程施工存在的主要问题为需在满足工期和场地条件下，选用有效的空孔回填措施，保证工程质量。

三、处理措施

钻孔灌注桩空桩回填常见处理措施有回填碎石与注浆加固相结合、回填C10混凝土、回填再生混凝土，具体措施如下。

（一）回填碎石与注浆加固相结合

空桩回填碎石，护筒拔出后对碎石进行注浆加固，确保地基承载力。采用桩端注浆，塔楼下设1根注浆管距孔口25m位置，注浆管底部采用花管，每根塔楼工程桩注入水泥5t。裙楼下设1根注浆管距孔口22m位置，注浆管底部采用花管，每根塔楼工程桩注入水泥3t。压浆水泥采用P42.5MPa普通硅酸盐水泥，水泥浆配置：水灰比W/C=0.5~0.6，浆液初凝时间>2h。注浆完成后，采用水灰比为0.7的浓浆封口。注浆管采用内径为43mm，壁厚为2.50mm的钢管，塔楼碎石注浆管长度为25.60m，裙楼碎石注浆管长度为22.20m。

（二）回填C10混凝土

灌注桩施工过程中，空桩回填C10混凝土对防止塌孔、串孔效果很好。根据地勘报告，地面以下6m为黏土夹粉砂层，透气、透水。采用反循环及旋挖钻机工艺成孔形成真空负压区，引起相邻孔位水、空气进入负压区内，极易形成串孔，进而引起塌孔。采用C10混凝土回填超过粉砂层，形成隔气、隔水状态，可以防止串孔、塌孔。

采用泥浆下直导管法浇筑，导管直径为Φ250mm，埋深不得小于2m，不宜超过6m。导管开浇顺序为低处至高处，待工程桩C50（水下）、C30（水上）混凝土浇筑至设计桩顶超浇高度，上提导管至工程桩桩身混凝土顶部30cm处，开始浇筑C10混凝土。混凝土浇筑按照水下混凝土浇筑要求进行。

（三）回填再生混凝土

灌注桩施工过程中，空桩回填选用再生混凝土，对防止塌孔、串孔有一定的效果。工程回填量较大，选用性能合格的再生料，为节约成本选择运输距离较近的厂家。工程使用时需经过初试验，确定合理的配合比，以满足流动性、粘聚性和保水性的性能要求。空桩回填再生混凝土需进行专业的性能测试，满足抗压性、耐久性、抗渗性、抗冻性的要求。

再生混凝土拌合物浇筑倾落高度较大时，应加串筒、斜槽或溜管等辅助工具。振捣采用机械振捣成型，振捣时间宜按拌合物和易性和振捣部位等不同情况，控制在10s~30s内。用插入式振捣棒振捣时，插入间距不应大于振捣棒振捣作用半径的一倍。连续多层浇筑时，振捣棒插入下层拌合物的深度约50mm。其他步骤和要求，应严格按照工程所在地区的《再生骨料混凝土应用技术标准》进行。

四、措施比选分析

空桩回填措施由于回填材料的不同，施工方法、工序、工期、经济成本都有差异，下面分别进行分析比较。

（一）主要优缺点对比

3种空桩回填措施的优缺点对比见表1。

表1 空桩回填措施优缺点对比		
回填材料	主要优点	主要缺点
回填碎石与注浆加固相结合	(1) 成本相对较低 (2) 后期开挖凿除方便	各工序间干扰较大，施工时间较长，占用场地较多。水泥浆搅拌过程中会产生一定扬尘，需要采取抑尘措施。
回填C10混凝土	(1) 回填迅速 (2) 可靠性高 (3) 占用场地少 (4) 工序相互干扰小	成本较高，一方面是混凝土原材料成本，另一方面是破除成本，后期开挖破除难度相对较大。
回填再生混凝土	(1) 回填迅速 (2) 能减少天然骨料资源的开采和城市环境污染	由于再生骨料来源不一，容易导致再生混凝土性能不稳定，存在一定的安全风险，后期开挖破除难度极大。

（二）工期对比分析

空桩回填措施工期对比分析见表2。

表2 空桩回填措施工期对比			
处理方式	单根桩回填时间	相邻孔位可施工等待时间	总时间
回填碎石与注浆加固相结合	碎石回填施工时间2h，注浆时间为12h	浇筑后36h，设备需等注浆强度约12h	50h
回填C10混凝土	混凝土自卸施工时间0.5h	混凝土浇筑后24h，设备不用停等	24.5h
回填再生混凝土	再生混凝土自卸施工时间0.5h	混凝土浇筑后24h，设备不用停等	24.5h

（三）经济性对比分析

研究区段塔楼Φ1200mm工程桩447根（内含39根试锚桩），桩顶空孔段25.90m；裙楼Φ800mm工程桩247根，桩顶空孔段22.45m，空桩回填经济对比分析见表3。

表3 空桩回填经济对比分析表		
处理方式	工程量	估算成本（万元）
回填碎石与注浆加固相结合	(1) 碎石14727m³ (2) 注浆管（内径43mm，壁厚2.50mm）15928m (3) 水泥用量4811t	650.04
回填C10混凝土	C10混凝土14727m³	730.46
回填再生混凝土	再生混凝土14727m³	680.06

根据上述对比，再生混凝土性能不稳定，工程桩基空桩回填再生混凝土用量大，在周边市场不易购买，为了保证工程质量，不宜选用再生混凝土回填措施。回填碎石与注浆结合的措施经济性较好，但施工工序多、时间长。回填C10混凝土的措施施工工期短、质量高，但经济成本略高。

五、措施工程效果

为选取更适合的回填措施，工程进行现场回填试验，选用回填碎石与注浆结合、回填C10混凝土进行效果对比。试验桩回填碎石与注浆加固相结合措施，原计划塔楼空孔回填碎石部分采用5t水泥进行注浆，现场实际

注浆过程中，注入水泥用量远大于5t水泥，当注入水泥达到8t时才有泛浆现象。同时，水泥浆在碎石中形成数条通道，水泥浆随着通道往孔口泛浆，未出现整个孔口泛浆现象，整个空孔段碎石没有很好地被水泥浆充实。碎石中注浆并不能很快起到加固地基的作用，在注浆完成后36h，旋挖钻机施工相邻孔位出现地面塌陷和串孔情况。施工现场图详见图2。

而空桩回填采用C10混凝土回填后，在施工、质量安全、工效和工期上取得较好效果。施工现场图详见图3，空桩回填C10混凝土工程效果见表4。



图2 回填碎石与注浆结合现场图



图3 回填C10混凝土现场图

表4 空桩回填C10混凝土工程效果	
工程目标	工程效果
施工	(1) 便于现场施工，对地基扰动小，对临近施工部位不会产生影响； (2) 仅有混凝土罐车施工，不需要占用过多场地； (3) 工序简单，对其他部位的各工序施工不相互干扰。
质量安全	(1) 有效避免地表下沉，保证了施工设备的行走和施工人员的安全； (2) 有效防止小间距相邻孔位的串孔，确保了施工质量。
工效	(1) 回填速度快，塔楼空桩回填仅用0.5h； (2) 回填后24h即可进行相邻桩位的施工，便于设备的高效利用，确保总工期的实现。
工期	回填方案可确保工程桩成孔48h后，可施工相邻3d距离的工程桩，保证设备避免来回周转造成停工，实现总工期目标。

根据试验桩回填效果，空桩段优先采用回填C10混凝土措施，能满足工程质量和工期目标。

六、结语

工程支护桩采用钻孔灌注桩，空孔回填不密实，易引发坍孔，由此导致地表沉陷，影响大型旋挖钻机施工及行走安全，处理措施要具备可行性、适用性、经济性。本文介绍钻孔灌注桩空桩段回填相关处理措施，根据以往施工经验和现场回填试验，结合回填碎石与注浆加固相结合、回填C10混凝土和回填再生混凝土3种方法，经研究分析和经济对比，优先采用回填C10混凝土措施，该措施能保证工程安全稳定，完全满足工序和工期要求，成本略高。因此，工程选用回填C10混凝土措施，施工取得良好的固化效果，为同类工程提供经验借鉴。