武汉枢纽江岸西编组站峰下线排水泵站地基加固及封水工程

柳　涛　徐敬业
（铁道部第四勘测设计院第一勘测设计研究处，武汉，430063）
李华驹
（武汉铁路工程二公司，武汉，430034）

提　要　本文介绍了联合应用三重管高压旋喷桩和压力注浆进行地基加固和防水处理的成功实例。文中探讨了高压旋喷桩和压力注浆用于地基加固和防水处理的优劣，对施工中的一些问题和现象进行了分析。本文对同类工程，尤其是防水工程有一定的借鉴作用。

一　工程概况

武汉枢纽江岸西编组站位于长江一级阶地，与长江最近距离 1.5km，大部分由湖区回填而成。峰下机走线于驼峰下斜穿通过，其中 FDK0+215.479~+260.579 基坑开挖深度 6~8m。基坑采用厚 2.3m 的水泥土挡墙支护。水泥土挡墙外边界距线路中心线 6.8m。为避免基坑发生管涌，基坑底压力注浆封水层顶面标高 12.9m，底面标高 9m。

峰下线排水泵站位于 FDK0+256.5 右侧，外壁紧贴水泥土挡墙，距驼峰区线路最近 12m。泵站泵井内径 ϕ6m，外径 ϕ6.7m。沉井法施工。沉井刃角高 1.5m，外径 ϕ6.9m，最薄处厚 0.15m，最厚处厚 0.35m，沉井设计深度 9.1m，底设计标高 14.2m。沉井分两节预制。1999 年 8 月 6 日开始掏土下沉，下沉中出现不均匀沉降。当掏土至设计标高以上 1.7m 时，沉井自动下沉，沉井内出现大量积水。此时正值长江汛期，水位高达 29m，为避免工程事故，遂停止挖土，但沉井继续自动下沉达 0.9m，最终超沉 0.7m，不均匀沉降量达 0.2m。在判读勘探资料的基础上，我们联合应用高压旋喷桩和压力注浆对地基进行加固和封水处理。处理后的沉井于 12 月 2 日恢复挖土作业，12 月 7 日至设计标高。

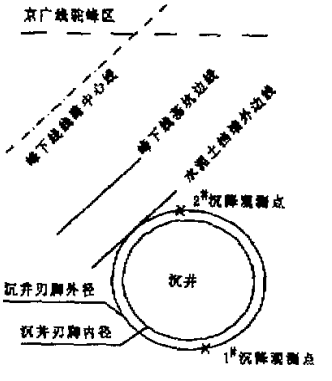


图 1　峰下线排水泵站平面位置图

处理前，掏土作业在泥泞中进行，一边挖土一边排水，并出现沉井自动下沉现象，而处理后，恢复掏

土，沉井不再继续下沉且仅在挖至设计标高时轻微渗水，基本实现了干燥开挖，加固及封水效果理想。

表1 停止掏土后沉井自动下沉观测记录

日 期		8.17	8.18	8.19	8.20	8.24	8.28	8.30	9.1	9.3	9.10
1#	标高(m)	23.528	23.284	23.074	22.919	22.651	22.627	22.625	22.625	22.623	22.62
	沉降(m)	0	0.244	0.21	0.155	0.268	0.024	0.002	0	0.002	-0.003
2#	标高(m)	23.789	23.554	23.339	23.174	22.837	22.840	22.841	22.834	22.838	22.83
	沉降(m)	0	0.235	0.215	0.165	0.337	-0.003	-0.001	0.007	-0.004	0.001

二 场区地质条件

场区为长江一级阶地，上部为淤泥质砂粘土、粘土，下部为粉砂层。各土层岩性为：

1.杂填土：软塑，粘土夹碎石、碎砖、生活和建筑垃圾，厚 1.1~1.6m，层底标高 21.18m；

2.淤泥质粘土：褐灰色，流塑~软塑，夹腐植物，有腐臭味，厚 2.9m，层底标高 18.26m；

3.粘土：褐黄色间灰褐色，硬塑，厚 4.95m，层底标高 13.33m；

4.淤泥质砂粘土：软塑，夹薄层粉砂，具微层理构造，厚 2m，层底标高 11.33m；

5.粉砂：灰褐色，松散，饱和，局部夹薄层粘性土和腐植物，厚度大于 10m。

表1 岩土物理力学性质指标统计表

层序	岩土名称	含水量 ω (%)	容重 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L	塑限 W_p	渗透系数 k (m/d)	压缩系数 a_{1-2}	直接快剪 粘聚力 c(kPa)	直接快剪 内摩擦角 ϕ(°)
1	杂填土									
2	淤泥质粘土	41.7	17.9	1.2	47.	21.	0.1	0.99	16.2	3.8
3	粘 土	33.9	19.1	0.91	48.	21.	0.07	0.44	32	4.2
4	淤泥质砂粘土	37.5	18.1	1.05	39.	25.	0.5	0.53	14	9.9
5	粉 砂									

场区地下水分两层：上层为填土层上层滞水和粘性土孔隙潜水，埋深 0.58m，下层为淤泥质砂粘土及砂层含水层，具承压性，水量丰富，由大气降水补给并与长江互补。

三 沉井不均匀下沉及自动下沉原因分析

沉井距驼峰区最近线路仅 12m，该线路为江岸西编组站主要调车机车行走线。机车行走过程中不可避免地对沉井产生振动影响，使沉井产生振动附加荷载，因而应该说 2# 点沉降相对大一些，但事实却与之相反。这是由于：

1.峰下线基坑侧，由于水泥土挡墙水泥水化水解过程中吸收水分而使周围土体含水量降低，因而使周围土体的力学性质得到一定程度的改善，其侧壁摩阻力增大；

2.其次沉井上部 4.25m 土体为流~软塑，在振动作用下，能够更好地在土体自重作用

下将沉井下沉形成的孔隙填充，从而对沉井壁的约束作用得到较大程度的发挥。

若取混凝土容重为 24KN/m^3，则沉井自重 W 为：

$$W=(3.35^2-3^2)\times3.14\times9.1\times24=1,507.4\text{kN}$$

地基对刃脚的支承力为：$f_p=(3.35^2-3^2)\times3.14\times180=1256.2\text{kN}$

沉井外土体的侧摩阻力为：$f_t=2\times3.35\times3.14\times(1.35\times5+2.9\times5+4.06\times15)=1,728.3\text{kN}$

因此，如果沉井刃脚处土体的支撑作用和沉井外土体的侧摩阻力充分发挥，即便不考虑沉井内部土体对井壁的侧摩阻力，沉井也应不会自动下沉，因此，沉井刃脚处土体的支撑作用和沉井外土体的侧摩阻力并没有充分发挥，我们认为是由于以下原因造成的：

1.为使沉井顺利下沉，刃脚外侧垂直、内侧倾斜、下薄上厚，最薄处厚 0.15m，最厚处厚 0.35m，因而在刃脚下端形成较大的应力集中。再者，沉井自动下沉时，已基本下沉到位，刃脚下硬塑状粘土层仅 0.8m 左右，对沉井已经不能很好地起到持力层的作用；

2.为使沉井顺利下沉，沉井刃角外径略大于泵井外径。对于上部处于软塑状态的杂填土和流塑~软塑状态的淤泥质粘土来说，尽管能够在土体自重的作用下将沉井下沉形成的孔隙填充，但对沉井壁的约束作用不可能在短时间内得到充分发挥；而对于处于硬塑状态的粘土来说，很难在土体自重作用下将孔隙很好填充，对沉井井壁的约束作用更小。能够对沉井井壁充分发挥约束作用只有沉井刃脚部位 1.5m 高度范围内的沉井侧壁土体；

3.沉井距驼峰区最进线路仅 12m，为江岸西编组站主要调车机车行走线，机车经常行走。机车行走不可避免地对沉井产生振动影响，使沉井产生振动附加荷载。沉井上部 4.25m 土体处于流塑~软塑状态，沉井刃脚下 0.8m 以下为淤泥质砂粘土和粉砂，这种附加荷载进一步削弱了土体对沉井侧壁的约束作用和刃脚支撑作用。

由此可见：沉井的自动下沉是不可避免的，并且只有当沉井自重被沉井内、外土体的约束作用(即侧壁摩擦力)和沉井刃脚下土体的支撑作用相平衡时，才会停止下沉。

四　沉井地基加固和封水处理方案的选择

为避免继续开挖造成沉井再次自动下沉及超沉加重，必须加固沉井刃脚下土体。鉴于长江水位较高，且沉井超沉 0.7m，破坏了沉井底部的隔水粘土层，而地质条件本身又非常容易发生管涌(附近约 200m 处地下通道施工过程中，曾经发生管涌，淘空土体，造成立交桥发生严重不均匀沉降、基坑壁严重扭曲、基坑附近房屋破坏、地下通道十多年未能开通的惨痛教训)，必须进行防水处理以避免发生管涌。

在确定地基加固和防水处理方案时，结合工程实践提出以下三种方案：①采用压力注浆进行地基加固和封水处理；②采用高压旋喷桩进行地基加固和封水处理；③高压旋喷桩和压力注浆联合应用分别进行地基加固和封水处理。

对以上方案经过多次比选、论证后认为：

1.采用压力注浆进行地基加固和封水处理，防水效果固然能够保证，但用于地基加固，不仅工作量大、费用高，而且要使加固效果达到一定的要求确是勉为其难，这是由于：要防止恢复掏土时沉井自动下沉就要提高刃脚下土体强度和沉井周围土体对沉井侧壁的摩阻力，前者要靠压力注浆充填或挤压地基土的孔隙和裂隙、改变土体结构而显著提高宽度仅

为 0.15m 的刃脚接触面上的土体强度，效果难以保证，后者要通过以上作用增强周围土体对沉井的约束作用不仅需要一定的厚度和深度，而且到底能增加多少也难以心中有数；

2.如果采用高压旋喷桩进行地基加固和封水虽能满足地基加固的要求，封水效果也易保证，造价也相对低于纯粹采用压力注浆，但由于沉井上部的顶板在掏土下沉前已浇注成型，而沉井下土体的封水需在沉井内作业，采用高压旋喷桩封水就必须敲掉水泵顶板。另外，由于高压旋喷桩是在高压水流的作用下切割破碎土体并使之与水泥浆液混合而成，影响桩径的因素很多(如水压差异等)。如果施工中由于某种原因影响桩径或由于桩位误差使桩间搭接不好而出现“脱扣”现象，则封水效果就不能得到保证；

3.高压旋喷桩和压力注浆联合应用进行地基加固和封水。沉井刃脚下地基采用高压旋喷桩进行加固处理是在普通地质钻机引孔后，利用高压旋喷钻机把带有喷嘴的注浆管钻进至预定标高，以高压设备从喷嘴中喷射出压力高于 20MPa 的高压水流，冲击、切割破坏土体，使土粒从土体剥落下来，一部分随浆液冒出地面，一部分与浆液混合并按一定的浆土比例和质量大小有规律地重新排列、凝固，从而形成强度较高、渗透性很低的固结体，对刃脚部分的土体进行托换而达到加固目的，并对来自沉井侧面的地下水进行封堵，又能防止压力注浆施工中浆液过度扩散。施工过程中所冒出的浆体可以回灌沉井，经过沉淀、固结之后形成强度较高的覆盖层，不仅能够减少(甚至避免)压力注浆过程中出现冒浆现象，又能为之提供有利的工作环境。压力注浆封水是在沉井内部封堵具有承压性质的下层地下水，并使沉井与沉井下土体及沉井刃脚下高压旋喷桩体形成一个封闭整体，从而在地下水作用下产生向上的浮力，具有地基加固的异曲同工之妙。另外，压力注浆还能对高压旋喷桩搭接中存在的某些“脱扣”现象起到一定程度的补救作用。

通过以上分析，我们认为：第三个方案综合了其它方案的优点，而避开了其缺点。因而我们予以积极推荐并最终付诸实施，沉井的地基加固和封水处理获得了理想的效果。

五　沉井地基加固和封水处理的设计和施工

1. 沉井地基加固和封水设计

沉井地基加固和封水处理设计如图 2 所示，高压旋喷桩为三重管式，桩长 6m，桩径 1.2m，桩间距 0.9m，沉井刃脚进入高压旋喷桩 1m。压力注浆孔间距 1m，梅花形布置，注浆封水层厚 5m，注浆浆液采用水玻璃和水泥浆液，水玻璃注浆孔和水泥浆注浆孔间隔布置。

2.高压旋喷桩施工

由于高压旋喷桩是在沉井刃脚以上 1m 至刃脚以下 5m 范围内施工，不可避免地对沉井外侧土体产生一定地扰动。再者，一部分高压空气和浆液沿沉井壁逸出对沉井侧壁

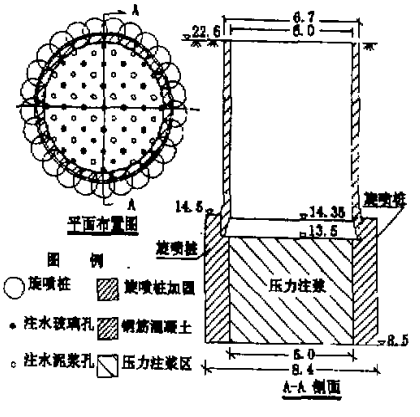


图 2 地基加固和封水处理设计

土体的扰动和剥离作用也减小了侧壁土体的侧壁摩阻力，更为重要的是：高压旋喷桩施工后达到一定强度需要一定的龄期，因此，沉井在高压旋喷桩施工过程中将出现沉降。为减小沉降和不均匀沉降，高压旋喷桩施工采用间隔 5 孔作业法。为减小沉井先期不均匀沉降量，高压旋喷桩施工先从总沉降量小的一侧开始。

高压旋喷桩 1999 年 10 月 24 日开始施工。施工过程中沉井的沉降观测结果如表 3。

为使高压旋喷桩尽快发挥承载效能，减少沉井沉降，在浆液中添加 3%水玻璃以达到速凝早强效果，但常出现堵管现象，增加了施工难度，又影响成桩质量。于是，我们改为在清水泵水箱内加入 5%水玻璃，但由于水的稀释作用使得与水泥浆液混合的水玻璃浓度过小而基本无效。在经过以上尝试后，我们决定：在高压旋喷桩成桩后，用注浆泵将 4%左右的水玻璃通过钻杆和花管以 1m 为一段自下而上注入桩体，取得了良好效果。

表 1　高压旋喷桩施工过程中沉井沉降观测记录

日　期		10.25	10.26	10.27	10.28	10.29	11.1	11.2	11.3
1#	标高(m)	22.549	22.545	22.542	22.536	22.536	22.526	22.525	22.525
	沉降(m)	0	0.004	0.003	0.006	0.00	0.01	0.001	0
2#	标高(m)	22.751	22.747	22.745	22.738	22.738	22.735	22.735	22.735
	沉降(m)	0	0.004	0.002	0.007	0.00	0.003	0	0

由表 3 知：在高压旋喷桩施工初期，沉井有轻微下沉，但很快趋于稳定。我们认为：首先是向桩体注入水玻璃取得了良好效果，使高压旋喷桩达到了速凝早强的效果；其次，由于随高压空气上行的浆液对沉井侧壁土体先期存在的空隙或裂隙以及前期高压旋喷桩施工过程中产生的空隙或裂隙有一定的填充作用，不仅提高了沉井侧壁的摩阻力，也减少了后期高压旋喷桩施工过程中的高压空气对沉井侧壁土体的扰动和剥离作用(这表现在：高压旋喷桩施工初期，浆液的上逸不是沿着钻孔而是沿着沉井侧壁四周上逸，随着施工的继续进行，沉井侧壁的冒浆现象逐渐减少，开始沿着钻孔上逸，并最终只沿钻孔上逸，至此，沉井基本稳定)。另外，上逸的浆体进入沉井，对沉井内的土体起到反压作用，浆液的沉淀固结也可以增大沉井内壁的侧壁摩阻力，对沉井的沉降趋向稳定也有一定的积极作用。

3. 压力注浆施工

高压旋喷桩施工完成后，11 月 5 日开始进行压力注浆封水施工。注浆成孔采用自行设计的 ZDJ—1 型和 ZDJ—2 型振动沉管拔管机，该设备行走于轨排之上，不仅具有移行方便、对工作环境要求相对较低的优点，也具有注浆管与孔壁间隙小而减少冒浆现象的发生且有利于冒浆现象的处理等优点。

在封水工程中，对浆材的要求主要在于可灌性和胶凝时间而对结石强度的要求不高。在常用浆材中，普通硅酸盐水泥的可灌性与胶凝时间都优于矿渣硅酸盐水泥，而水玻璃作为真溶液的可灌性更优于普通硅酸盐水泥浆，但造价高出普通硅酸盐水泥较多，因此，注浆浆液的选择综合考虑技术可行性和经济合理性而选用细粒 425 号普通硅酸盐水泥浆液(水灰比 1：1)和水玻璃真溶液。施工时先注水泥浆液，再注水玻璃，水泥浆液注浆孔和水玻璃注浆孔间隔布置，目的是先通过水泥浆液的渗透、劈裂，使水泥颗粒通过凝结作用、与土体的化学作用及其自身体积尽可能多地堵塞土体中较大的孔隙和裂隙，再用水玻璃真溶液通过凝结作用以及与土体的化学作用堵塞土体中较小的孔隙和裂隙，这样不仅能够充

分发挥各自的功用，降低工程造价，也能使水泥浆液与水玻璃发生反应，从而防止浆液的过度扩散，既没有水泥水玻璃混合注浆的堵管现象，又达到了同样的目的。

为保证注浆均匀性，以 1m 作为一个注浆段，从下而上注浆。

压力注浆于 1999 年 11 月 15 日施工完毕，在随后进行的沉井掏土施工中基本实现了干燥开挖，说明封水效果显著，达到了预期效果。