

Study on the Protection of Buildings by Pressurized Recharge in Urban Rail Transit Construction

Tianxiang Liu

Shanghai Jinghai Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai, 200137, China

Abstract

During urban rail transit construction, activities such as foundation pit dewatering, excavation, and shield tunneling inevitably cause soil and water loss within the construction influence range, leading to uneven settlement of surrounding buildings and structures. In severe cases, this may result in adverse effects such as wall cracking, facade damage, load-bearing structure deformation, and obvious tilting of buildings[1]. Pressurized recharge involves using specialized equipment to inject water with a certain pressure and flow rate into underground aquifers, replenishing groundwater loss caused by construction, maintaining relatively stable groundwater levels, reducing formation settlement due to groundwater level changes, and thus protecting surrounding important buildings[2]. This paper analyzes the role of pressurized recharge in protecting important buildings through the deformation of the protected structure during construction, combined with specific working conditions. It summarizes the advantages and disadvantages of this protection measure and proposes relevant optimization suggestions.

Keywords

pressurized recharge; building protection effect; shortcomings and deficiencies; optimization suggestions

城市轨道交通建设加压回灌保护建筑的研究

刘天祥

上海京海工程技术有限公司, 中国 · 上海 200137

摘 要

城市轨道交通工程建设过程中由于基坑降水、开挖以及盾构掘进等施工活动不可避免地会造成施工影响范围内一定程度的水土流失,从而导致周边建筑物基础产生一定程度的不均匀沉降,严重时可能导致建筑墙体开裂、外立面损坏、承重结构变形、明显倾斜等不利影响^[1]。加压(压力)回灌是采用专用设备通过向地下含水层中注入一定压力和流量的水,补充因工程施工导致的地下水流失,维持地下水位的相对稳定,从而减小因地下水位变化引起的地层沉降变化,进而保护周边重要建筑^[2]。本文通过被保护建筑在施工过程中的变形情况,结合具体工况,分析加压回灌对重要建筑保护中的作用,总结该保护措施的优点并提出相关优化建议。

关键词

加压回灌、建筑保护作用、缺点与不足、优化建议

1 工程概况

D 塔是长三角某城市标志性建筑,高 193.5 米(含避雷针),飞碟式结构,塔筒最大直径 14 米,塔楼最大直径 24 米,为单层地下室、群桩筏板基础,基桩为 450 预制方桩,桩长 11.65m,持力层为③-2 层粉砂层。该塔地处城市轨道交通 1 号线换乘站东南象限,距离车站主体基坑约 41m、附属结构出入口约 29m、区间左线隧道 18m,是轨道交通工程建设中的重要保护建筑。

在轨道交通工程建设过程中,采用隔离墙、隔离桩等一系列措施对 D 塔进行加固保护,主体基坑施工阶段采用

常压回灌,附属基坑施工采用加压回灌控制其沉降与倾斜。本文重点论述加压回灌对 D 塔的保护作用。D 塔保护期间,在西北至北侧环形设置 8 口回灌井,间距 12 ~ 16m。其中 HG1-6 井深 63 米,对应⑤-3 粉砂夹粉土层,为深层回灌井;HG7-8 井深 27 米,对应④-2 粉质粘土夹粉土层,为后补浅层回灌井。加压回灌水源为自来水,共设置 3 条回灌路径,具体施工参数详见下表。

D 塔共设置沉降监测点 8 个,其编号分别为: Jc14-1~Jc14-8;倾斜监测点 4 个,其编号分别为: Jq14-1~Jq14-4。

2 加压回灌保护施工

自 2021 年 7 月 4 日附属出入口基坑加固阶段开始进行加压回灌,2022 年 3 月 30 日附属基坑回填完成,各深层回灌井陆续关停,至 2022 年 4 月 18 日夜,各回灌井全部关停。附属出入口基坑各施工阶段与加压回灌具体情况详见下表。

【作者简介】刘天祥(1976-),男,中国黑龙江齐齐哈尔人,本科,工程师,从事轨道交通工程监测与工程测绘研究。

表 1 加压回灌施工参数

回灌路径	回灌井编号	回灌压力	回灌深度	回灌土层	对应土层特性	备注
路径 1	HG1、HG4、HG6	0.37 ~ 0.4Mpa	63m	⑤ -3 粉砂夹粉土	灰色，饱和，中密，中等压缩性	深层回灌井
路径 2	HG2、HG3、HG5	0.40 ~ 0.42 Mpa	63m	⑤ -3 粉砂夹粉土	灰色，饱和，中密，中等压缩性	深层回灌井
路径 3	HG7、HG8	0.47 ~ 0.52 Mpa	27m	④ -2 粉质粘土夹粉土	灰色，饱和，软塑，中等压缩性	浅层回灌井

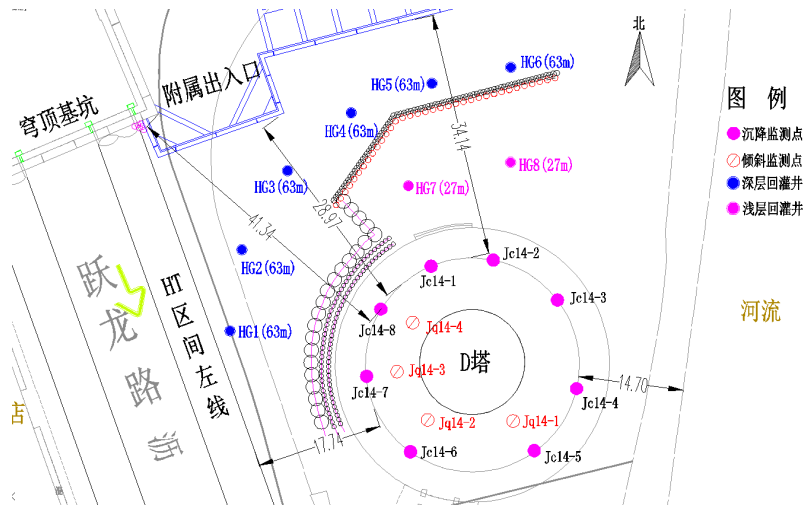


图 1 D 塔与地铁结构位置关系与回灌井、监测点位置示意图

表 2 基坑施工阶段与加压回灌情况统计表

时间	施工阶段	回灌井启闭状态	回灌量 (m³)	回灌压力 (Mpa)
2021.7.4 ~ 7.30	附属基坑加固	路径 1：开启	深层回灌：325 浅层回灌：80	路径 1:0.40
		路径 2：开启		路径 2:0.42
		路径 3：开启		路径 3:0.52
2021.7.31 ~ 10.15	附属、塔基加固	路径 1：开启	深层回灌：280 ~ 420 浅层回灌：70 ~ 60	路径 1:0.40
		路径 2：开启		路径 2:0.42
		路径 3：8 月 8 日关闭		路径 3:0.47
2021.10.16 ~ 12.21	附属基坑开挖	路径 1：开启	深层回灌：410 ~ 430	路径 1:0.38
		路径 2：开启		路径 2:0.40
2021.12.22 ~ 2022.3.30	附属结构施工	路径 1：开启	深层回灌：430 ~ 360	路径 1:0.39
		路径 2：开启		路径 2:0.41
2022.3.31 ~ 4.7	终止回灌第一阶段	路径 1：开启	深层回灌：360 ~ 190	路径 1:0.38
2022.4.8 ~ 4.17	终止回灌第二阶段	路径 2：4 月 7 日关闭		路径 2:0.40
2022.4.18	终止回灌第三阶段	路径 1：关闭	深层回灌：120 ~ 0	/

3 加压回灌与重要保护建筑变形情况分析

加压回灌期间，D 塔建筑沉降监测数据呈缓慢下沉趋势，且与回灌量呈现相关性，各施工阶段具体表现如下：

附属基坑加固施工阶段：每日回灌量约 400m³，D 塔西北侧监测点 Jc14-8 阶段性沉降 -2.33mm，变化速率 -0.09mm/d，数据变化较为平缓。

附属基坑及 D 塔基础加固阶段：每日回灌量提升至 420m³，受 D 塔自身加固纠偏影响，沉降变化较前阶段有所增大。南侧监测点 Jc14-5 阶段性沉降 -18.60mm，变化速率 -0.24mm/d。该阶段初期因回灌量不足（< 420m³），D 塔下沉明显；随回灌量增至 420m³ 并稳定维持，下沉趋势

得到有效控制，沉降数据与回灌量变化趋势一致。

附属基坑开挖施工阶段：每日回灌量保持 410m³ 以上，基坑开挖初期 D 塔无明显沉降，收底阶段沉降呈小幅缓慢增大趋势。北侧监测点 Jc14-1 阶段性沉降 -4.31mm，变化速率 -0.06mm/d。期间两次设备故障导致回灌量骤减（2021 年 10 月 28 日减 30%、12 月初减 20%），导致 D 塔明显或小幅下沉；故障排除、回灌量恢复后，沉降变化回归正常。

附属基坑结构施工阶段：每日回灌量由 430m³ 缓慢降至 360m³，D 塔沉降变化平缓，北侧监测点 Jc14-1 阶段性沉降 -7.18mm，变化速率 -0.07mm/d，监测数据未出现异常波动。

终止回灌阶段：

第一阶段（回灌量 360m³ → 190m³）：沉降变化平缓，

无显著异常；

第二阶段（回灌量 190m³ → 120m³）：D 塔下沉变化趋势有所增加；

第三阶段（回灌井全部关停）：下沉趋势明显增大，关停后前 15 天沉降相对明显但逐步减缓，16-30 天下沉趋势缓慢减少。北侧监测点 Jc14-1 阶段性沉降 -6.89mm，变化速率 -0.14mm/d。

工后跟踪阶段：D 塔沉降变化进一步缓慢减小，北侧监测点 Jc14-1 阶段性沉降 -5.61mm，变化速率 -0.08mm/d，整体趋于平缓。

各阶段数据表明，加压回灌量的稳定供应是控制 D 塔

沉降的关键因素：回灌量充足且稳定时，沉降速率较小且变化平缓；回灌量骤减或不足时，下沉趋势显著加剧；终止回灌后，D 塔沉降速率随时间推移逐步降低，最终在工后跟踪阶段趋向缓和，验证了加压回灌在轨道交通工程建设中对邻近重要建筑保护的有效性。

加压回灌期间，D 塔倾斜与沉降变化相关联。附属基坑加固期倾斜无明显变化；D 塔基础加固纠偏前，由于回灌量影响导致倾斜变化较明显，纠偏后原西北方向倾斜得以一定程度纠正；后续阶段西北方向倾斜缓慢小幅增大，因沉降均匀故倾斜变化平缓，终止回灌阶段倾斜变化较其他阶段略有增大。

表 3 坑各施工阶段加压回灌状态下 D 塔沉降与倾斜阶段变化与变化速率情况统计表

监测点号	阶段性变化量 (mm)						变化速率 (mm/d)					
	附属基坑加固阶段	附属、塔基加固	附属基坑开挖阶段	附属结构施工阶段	终止回灌阶段	工后跟踪阶段	附属基坑加固阶段	附属、塔基加固	附属基坑开挖阶段	附属结构施工阶段	终止回灌阶段	工后跟踪阶段
Jc14-1	-1.95	-8.26	-4.31	-7.12	-6.89	-5.61	-0.07	-0.11	-0.06	-0.07	-0.14	-0.08
Jc14-2	-1.09	-10.34	-4.25	-7.18	-6.40	-5.65	-0.04	-0.13	-0.06	-0.07	-0.13	-0.08
Jc14-3	-0.79	-14.50	-3.69	-6.31	-5.61	-5.10	-0.03	-0.19	-0.06	-0.06	-0.11	-0.07
Jc14-4	-1.02	-18.49	-2.45	-4.86	-4.59	-4.13	-0.04	-0.24	-0.04	-0.05	-0.09	-0.06
Jc14-5	-0.28	-18.60	-1.78	-4.36	-4.03	-3.63	-0.01	-0.24	-0.03	-0.04	-0.08	-0.05
Jc14-6	-1.00	-15.02	-2.04	-5.12	-4.68	-3.61	-0.04	-0.20	-0.03	-0.05	-0.10	-0.05
Jc14-7	-1.63	-10.52	-3.23	-6.14	-5.43	-4.99	-0.06	-0.14	-0.05	-0.06	-0.11	-0.07
Jc14-8	-2.33	-8.22	-3.87	-7.06	-6.46	-5.42	-0.09	-0.11	-0.06	-0.07	-0.13	-0.07
监测点号	阶段性变化量 (‰)						变化速率 (‰/d)					
	附属基坑加固阶段	附属、塔基加固	附属基坑开挖阶段	附属结构施工阶段	终止回灌阶段	工后跟踪阶段	附属基坑加固阶段	附属、塔基加固	附属基坑开挖阶段	附属结构施工阶段	终止回灌阶段	工后跟踪阶段
Jq14-1	-0.04	0.31	-0.09	-0.09	-0.09	-0.07	-0.001	0.004	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001
Jq14-2	0.01	0.15	-0.07	-0.07	-0.05	-0.07	0.000	0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Jq14-3	0.02	-0.12	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.001	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Jq14-4	0.04	-0.33	0.05	0.07	0.07	0.04	0.001	-0.004	0.001	0.001	0.001	0.001

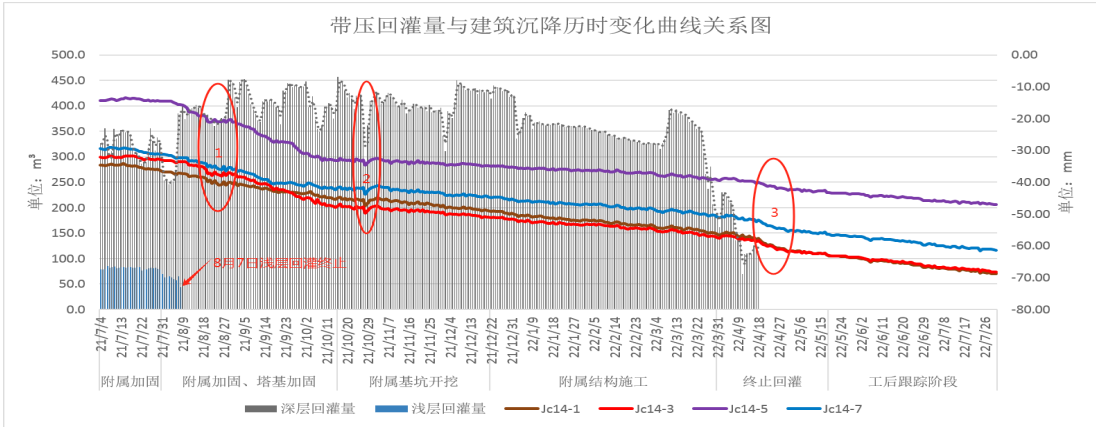


图 2 加压回灌量与保护建筑沉降监测数据历史变化曲线关系图

表 4 终止回灌实施过程 D 塔沉降与倾斜阶段变化与变化速率情况统计表

监测点号	阶段性变化量 (mm)					变化速率 (mm/d)					备注
	终止回灌第一阶段	终止回灌第二阶段	终止回灌第三阶段	完全终止回灌15天	完全终止回灌15-30天	终止回灌第一阶段	终止回灌第二阶段	终止回灌第三阶段	完全终止回灌15天	完全终止回灌16-30天	
Jc14-1	0.03	-1.36	-0.87	-3.31	-1.38	0.00	-0.14	-0.87	-0.22	-0.09	塔北侧
Jc14-2	0.24	-1.41	-0.77	-3.20	-1.26	0.03	-0.14	-0.77	-0.21	-0.08	塔东北
Jc14-3	0.27	-1.18	-0.64	-2.94	-1.12	0.03	-0.12	-0.64	-0.20	-0.07	塔东侧
Jc14-4	0.22	-0.98	-0.60	-2.13	-1.10	0.03	-0.10	-0.60	-0.14	-0.07	塔东南
Jc14-5	0.35	-1.00	-0.45	-2.04	-0.89	0.04	-0.10	-0.45	-0.14	-0.06	塔南侧
Jc14-6	0.20	-0.95	-0.49	-2.08	-1.36	0.02	-0.09	-0.49	-0.14	-0.09	塔西南
Jc14-7	0.24	-1.15	-0.54	-2.96	-1.02	0.03	-0.12	-0.54	-0.20	-0.07	塔西侧
Jc14-8	0.25	-1.54	-0.79	-3.30	-1.08	0.03	-0.15	-0.79	-0.22	-0.07	塔西北
监测点号	阶段性变化量 (‰)					变化速率 (‰/d)					备注
	终止回灌第一阶段	终止回灌第二阶段	终止回灌第三阶段	完全终止回灌15天	完全终止回灌15-30天	终止回灌第一阶段	终止回灌第二阶段	终止回灌第三阶段	完全终止回灌15天	完全终止回灌16-30天	
Jq14-1	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	-0.01	-0.001	-0.001	-0.010	-0.003	-0.001	南-北
Jq14-2	0.00	-0.01	-0.01	-0.04	0.01	0.000	-0.001	-0.010	-0.003	0.001	西南-东北
Jq14-3	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.000	0.000	-0.010	0.000	0.000	东-西
Jq14-4	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.000	0.002	0.010	0.003	0.000	东南-西北

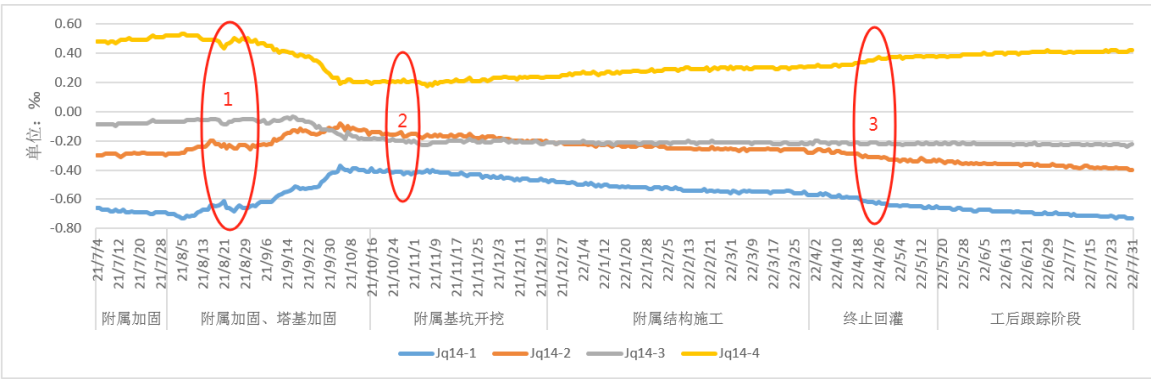


图3 重要保护建筑倾斜监测数据历史变化曲线图

4 加压回灌在重要建筑保护过程中的作用

加压回灌通过补充施工导致的地下水流失，维持地下水位稳定，减小土体有效应力变化，从而抑制地层沉降。恒定压力下，足量回灌可在较大程度主动抵消施工扰动，有效控制建筑下沉，是重要建筑保护的有效措施^[3]。

5 缺点与不足

设备风险：设备故障或维修致回灌量骤减超 20% 时，保护建筑竖向位移显著增大，对塔类小型建筑倾斜影响较小。

地下水饱和问题：长期回灌可能引发地面反涌（如 2022 年 3 月回灌井反涌），反映地层吸水能力饱和。

终止回灌滞后影响：回灌井关闭导致水量骤减，地下水充盈度下降，建筑沉降与倾斜呈持续缓慢增大趋势，且影响周期较长。

倾斜控制局限：加固纠偏仅能减缓倾斜速率，无法根本解决建筑已有倾斜（如 D 塔纠偏后仍缓慢倾斜）。

6 相关优化建议

设备管理：加强密封检查，制定定期维护计划，降低故障发生率，确保回灌量稳定。

终止回灌方案优化：分批次递减回灌量、控制压力并延长终止周期，减少地下水位变化对建筑的影响。

综合保护：对已有倾斜建筑，应在施工前进行加固纠偏，施工过程中应结合回灌与隔离桩、注浆等措施，形成多技术协同保护体系。

7 结论

加压回灌是控制工程施工过程中邻近建筑沉降的有效手段^[4]，通过压力补偿地下水，稳定地下土层变化，显著降低建筑变形风险^[5]。但存在设备依赖、地下水饱和、终止回灌滞后影响及倾斜控制局限等问题。实际工程中，需加强设备维护，优化回灌终止工艺，并与其他建筑保护措施结合，形成“预防 - 控制 - 修复”一体化策略，才能有效降低施工对重要建筑的影响，保障城市设施安全。

参考文献

[1] 薛永申.超大超深基坑工程降水及回灌施工技术[J].建筑施工,2014,36(05):483-485.

[2] 何晔,黄鑫磊,占光辉.基于现场试验研究的浅层地下水人工回灌影响因素分析[J].上海国土资源,2015,36(03):75-77+82.

[3] 吴建中,王寒梅,杨天亮.浅层地下水人工回灌应用于上海市工程性地面沉降防治的试验研究[J].现代地质,2009,23(06):1194-1200.

[4] 曹剑然.天津地区基坑工程中承压层回灌控沉理论与技术研究[D].天津大学,2018.

[5] 熊海贝,刘强,康加华,等.基坑围护结构施工对邻近历史保护性建筑物的影响[J].结构工程师,2010,26(03):135-139.