

地形偏压深基坑变形分析与应对策略研究

文 / 严振华 江阴市中威建设工程有限公司

摘要：深基坑工程常面临地形偏压挑战，导致变形复杂且控制困难。本文依托某具体工程，通过系统现场监测分析了地形偏压下深基坑的变形规律。研究表明，偏压显著增加了围护结构变形的不对称性，偏压侧呈现“鼓胀”变形且量值较大，非偏压侧则近于“平移”变形。为应对此问题，工程采用了“连梁式桩锚组合支护”策略。监测数据显示，该包含SMW工法桩和预应力锚索的组合体系，通过主动预控与结构协同作用，有效抑制了偏压侧墙体位移和周边地表沉降，各关键指标均满足安全控制要求。研究验证了该支护策略在处理地形偏压问题上的有效性，可为同类工程提供实践参考。

关键词：深基坑；地形偏压；变形分析；支护结构；桩锚支护

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.027

引言

随着城市化进程加速，深基坑工程日益增多，常遭遇复杂地质与环境条件，其中地形偏压尤为突出。地形偏压导致基坑两侧土压力分布显著不均，增大了围护结构与施工难度，易引发过大变形甚至失稳，严重威胁工程安全。因此，深入研究地形偏压下深基坑的变形规律及有效应对策略具有重要理论与实践意义^[1]。本文依托某具体深基坑工程实例，基于现场监测数据，着重分析地形偏压条件下的基坑变形特征，并对所采用的“连梁式桩锚组合支护”体系的实际应用效果进行评估，旨在为类似工程提供借鉴。

一、工程概况及地质条件

某城市轨道交通线路中的一座地下两层岛式车站工程，该车站主体结构采用明挖顺做法施工，总长约465m，标准段宽度约20.5m，基坑开挖深度介于16.8m至18.9m之间，标准段覆土厚度约3.4m，属于典型的深大基坑工程，

基坑横断面见图1所示。围护结构主要采用厚度0.8m的地下连续墙，并设置多道混凝土及钢支撑的内支撑体系。基坑一侧紧邻已建成的大型地下商业建筑群，两者最小净距仅为1.4m至6.2m，该商业建筑的早期开挖形成了一个高度约20.3m、坡度约1:1.2的放坡界面（采用喷锚支护），其坡顶标高与新建车站基坑顶面标高基本持平。邻近大型构筑物及其开挖边坡的存在，基坑在开挖前其周边土体已存在一定的应力释放和变形历史，基坑在近四分之三的区域长度范围内承受显著的地形偏压荷载，非对称的边界条件使得基坑两侧土压力分布差异明显，增加了基坑变形控制的难度和施工风险^[2]。

二、基坑开挖变形监测

（一）监测内容及频率

本工程基坑属于深大基坑，且紧邻大型既有构筑物，存在显著的地形偏压效应，同时基坑及周边环境保护等级要求高。

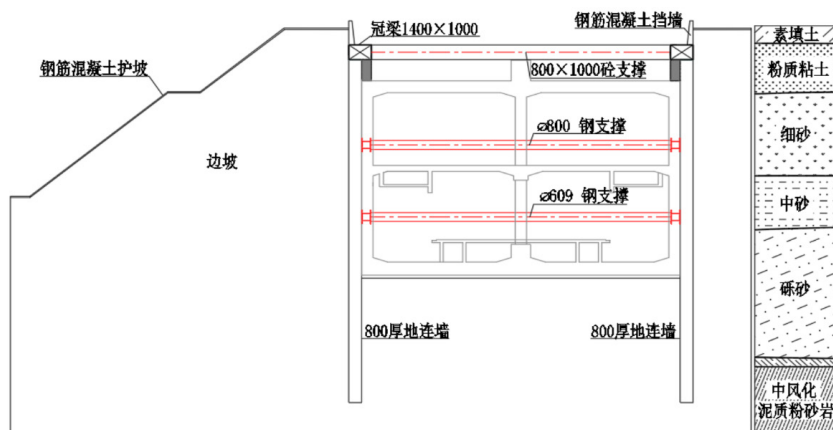


图1 车站基坑横断面图（自绘）

1. 竖向位移监测

监测基坑周边地表沉降反映开挖对周围土体的影响范围和程度；监测邻近建筑物及重要管线沉降；监测既有边坡（地形偏压侧）坡顶及坡面沉降；监测偏压侧边坡的稳定性；地下连续墙墙顶沉降，评价围护结构自身的竖向变形。此项主要通过高精度水准仪进行测量^[3]。

2. 水平位移监测

地下连续墙墙顶水平位移监测用了分析围护墙顶部的整体水平移动。地下连续墙墙体侧向变形监测，通过在墙体内预埋测斜管，使用测斜仪分层（如每0.5m）测量墙体随深度的水平位移剖面，判断墙体变形模式和安全状态的核心指标，主要通过全站仪（测墙顶）和测斜

仪（测墙身）进行。进行支撑轴力监测，采集内支撑（含混凝土支撑和钢支撑）轴力数据，通过在支撑构件上安

装应变计或轴力计，监测支撑实际受力情况，判断其工作状态是否正常。具体监测频率见表 1 所示。

表 1 基坑监测频率表（自制）

施工阶段	主要工况 / 条件	监测频率	备注
基坑开挖前	获取初始值	1 次 / 周	至少测量三期，取稳定平均值 开挖初期，应力调整 开挖深度增加，风险增大 深层开挖，变形控制关键期 关键工序转换期，应力变化剧烈
	开挖深度 $D \leq 5m$	1 次 / 2d	
	$5m < D \leq 12m$	1 次 / 1d	
基坑开挖及支撑架设阶段	$D > 12m$	2 次 / 1d	结构形成初期，变形可能反弹或调整
	支撑架设 / 拆除前后	增加监测频率	
底板浇筑后及维护阶段	底板浇筑后 7 天内	2 次 / 1d	变形速率通常减缓 趋于稳定阶段 确认长期稳定性，直至监测结束或结构受力体系重大改变前 根据实际情况加密，确保及时发现异常
	底板浇筑后 8 ~ 21 天	1 次 / 1d	
	底板浇筑后 22 ~ 45 天	1 次 / 2d	
特殊情况	底板浇筑 45 天后	1 次 / 3d ~ 1 次 / 周	每日至少 2 次，直至险情排除或采取有效措施后调整
	暴雨、台风、周边施工影响	增加监测频率	
	监测数据接近或超过预警值	增加监测频率	

(二) 监测点的布设

监测点位的选择旨在捕捉关键部位的变形与受力状态。具体布设策略如下：

1. 围护结构变形监测点（地下连续墙）

墙顶水平位移与沉降点沿基坑周边均匀布设，并在中部、阳角处及地形偏压侧等预计变形较大或受力复杂的区域进行加密。根据规范及工程经验，典型间距控制在 15m ~ 20m 左右，确保每条边至少有 3 个监测点，以便反映墙顶的整体变形趋势。墙体水平位移（测斜管）基坑周边选取代表性断面进行布设，重点关注基坑长边中点、角部以及地形偏压显著的区段。测点间距一般不宜大于 30m，且应在偏压侧与非偏压侧对称或对应位置布设，以便直接对比分析偏压效应。测斜管预埋于地下连续墙钢筋笼内，贯通墙体深度。

2. 支撑轴力监测点

选择不同层高、不同位置（中部、端部）的代表性支撑（含混凝土支撑和钢支撑）进行监测。测点通常布置在支撑杆件长度的 1/3 或 1/4 位置附近，避开节点区域，以反映支撑的实际轴力传递情况。在地形偏压侧对应的支撑上应保证有足够的监测点。

3. 周边环境监测点

地表沉降点沿基坑边缘向外呈放射状或网格状布设，布设范围通常为开挖深度的 1 ~ 3 倍。测点密度由近及远递减，在紧邻基坑边缘、既有边坡坡脚 / 坡顶、邻近建筑物及重要管线处应加密布设。边坡监测点在地形偏压侧的既有边坡上，布设坡顶沉降、坡面沉降及坡脚水平位移监测点，监测边坡在基坑开挖影响下的稳定性。地下水位观测孔在基坑内外均需布设，监测降水效果及水位变化对变形的影响。具体布设情况见图 2 和图 3 所示。

(三) 监测点的布设

为便于对现场监测数据进行统一分析与处理，并与后续可能的数值模拟结果进行对比。

1. 围护墙体变形分析

偏压侧墙体变形呈现典型的“鼓胀”形态，在开挖

初期，最大水平位移出现在墙体中上部，随着开挖深度的增加，最大位移值不断增大，并且其发生位置逐渐向下移动，最终集中在墙体中下部。这反映了偏压侧土压力大且作用点随开挖加深的特征。非偏压侧墙体变形更接近于“类悬臂”或“平移”形态，最大水平位移通常发生在墙顶或墙体上部，且随深度增加位移迅速减小，表明非偏压侧土压力相对较小，墙体主要表现为顶部向坑内位移。靠近基坑端部（角部）的测点显示的水平位移值普遍小于基坑中部的测点，基坑角部区域因空间约束而具有的“端头效应”，刚度相对较大，变形受到抑制。

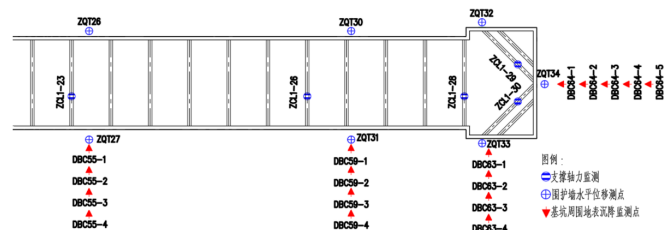


图 2 监测点布设平面图（自绘）

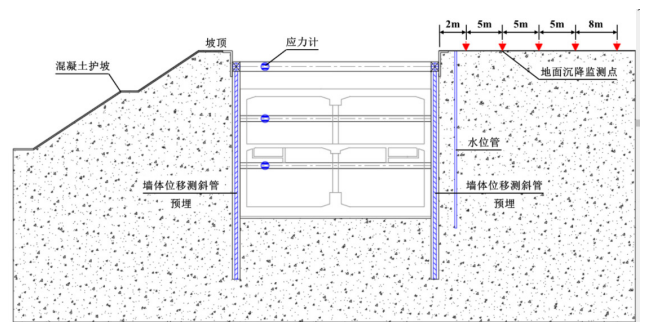


图 3 监测点布设横断面图（自绘）

2. 地表沉降分析

基坑周边部分地表沉降监测点（DBC 系列）数据，随着基坑开挖，周边地表普遍发生沉降，且离基坑边缘

越近, 累计沉降量越大, 形成了明显的沉降槽。对比不同位置的测点, 靠近地形偏压侧区域的土体沉降速率和最终沉降量预计更为显著, 且稳定所需时间可能更长, 反映了偏压条件下土体扰动范围更广、变形更剧烈。

3. 支撑轴力分析

部分支撑轴力监测点 (ZCL 系列) 的轴力随时程变化, 对比偏压侧斜撑与非偏压侧斜撑同一层支撑的轴力, 偏压侧支撑承受的轴力远大于非偏压侧, 印证地形偏压导致土压力不均衡分布的事实。支撑轴力通常在下一层土方开挖后开始显著增长, 并在基坑开挖至设计底标高附近时达到峰值或趋于稳定, 上层支撑在下层支撑施加并受力后, 其轴力可能出现增长停滞甚至略有下降的现象, 体现了支撑体系间的荷载调整与传递。不同类型支撑受力差异, 纵向斜撑与横向直撑的轴力发展也存在差异, 与支撑的几何布置、约束条件及所承担的土压力分布有关。

三、地形偏压基坑施工支护策略

(一) 连梁式桩锚组合支护

采用了“连梁式桩锚组合支护”方案, 作为对主体内支撑体系的加强和补充。结构组成及工作原理示意如图 4 和图 5 所示, 该组合支护体系中, 基坑主体围护结构 (地下连续墙) 及其冠梁 (基坑冠梁), 作为基坑的主要挡土和防渗结构; 在基坑偏压侧, 距离主体围护结构一定距离的位置, 平行施工一排 SMW 工法桩 (即型钢水泥土搅拌桩), 利用水泥土的抗渗性和型钢的刚度与强度, 形成一道具有良好支挡能力和止水效果的复合桩墙, 在其顶部浇筑混凝土冠梁 (桩顶冠梁); 预应力锚

索及连接构件通过水平或小角度倾斜设置的预应力锚索, 将基坑冠梁与 SMW 工法桩的桩顶冠梁连接起来, 锚索两端通过钢垫板和锚具将预拉力传递给两个冠梁。

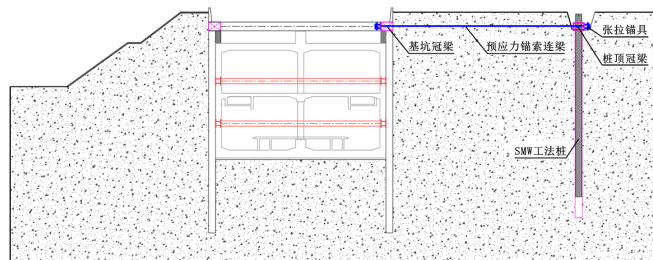
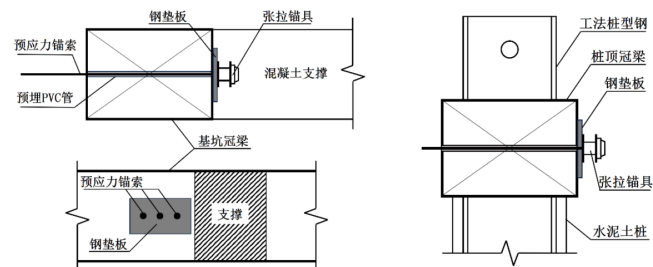


图 4 连梁式桩锚组合支护示意图 (自绘)



(a) 基坑冠梁 (b) SMW 工法桩冠梁

图 5 连梁细部结点图 (自绘)

(二) 应用效果验证

为定量评估“连梁式桩锚组合支护”在应对本工程地形偏压条件下的实际应用效果, 需进行现场监测数据与预设的控制标准进行对比, 并重点关注偏压侧与非偏压侧的变形差异及控制水平^[4]。应用效果见表 2 所示。

表 2 主要监测项目最大实测值与控制值对比表 (自制)

序号	监测项目	位置 / 侧别	最大实测值 (示例)	控制值 / 报警值	状态
1	墙体最大水平位移	偏压侧	28.5 mm	30 mm/0.2%H	满足要求
		非偏压侧	19.8 mm	30 mm/0.2%H	满足要求
2	墙顶最大水平位移	偏压侧	22.1 mm	25 mm/0.2%H	满足要求
		非偏压侧	15.4 mm	25 mm/0.2%H	满足要求
3	最大地表沉降 (距坑边 5m)	偏压侧区域	23.6 mm	25 mm	满足要求
		非偏压侧区域	16.2 mm	25 mm	满足要求
4	最大支撑轴力 (第一道)	偏压侧斜撑	1180 kN	设计值 × 0.7 ~ 0.8	满足要求
		非偏压侧斜撑	850 kN	设计值 × 0.7 ~ 0.8	满足要求

从上表可以看出, 采用的“连梁式桩锚组合支护”策略应对显著地形偏压方面取得了良好的应用效果, 该体系有效控制了偏压侧围护结构的变形和周边地表的沉降, 保证了各项关键指标均处于安全可控范围内。

结语

本文依托某地形偏压深基坑工程实例, 通过系统的现场监测与数据分析, 揭示了地形偏压导致基坑两侧变形呈现显著非对称性的规律。研究重点验证了应用于偏压侧的“连梁式桩锚组合支护”策略。结果表明: 该组合支护体系通过预应力主动控制及结构协同作用, 有效抑制了偏压侧围护结构的过大变形与周边环境沉降, 各项监测指标均满足安全控制要求, 证明了其处理地形偏压问题的有效性。研究成果可为类似复杂条件下深基坑工程的设计与施工提供有益参考。

参考文献

[1] 谢会杰. 深基坑开挖过程变形特征及影响因素数值模拟研究 [J]. 重庆建筑, 2025, (03): 78-81+98.
 [2] 朱君. 复杂环境地质条件下的深基坑设计与施工探讨 [J]. 建材发展导向, 2025, (06): 28-30. DOI: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2025.0246.
 [3] 翟天琦. 深基坑开挖过程中的地连墙水土压力监测与分析 [J/OL]. 岩土工程技术, 1-6 [2025-04-06]. <https://doi.org/10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0443>.
 [4] 郑永来, 蓝鑫, 许旭兵, 等. 基坑开挖渗流对周边环境的影响及数值模拟研究 [J/OL]. 工程地质学报, 1-11 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2024-0377>.