

杭州解百商业城半逆作法深基坑 支护设计与监测

Design and monitoring of deep excavation with semi-top-down method in Hangzhou Jiebai commercial building

应宏伟¹, 王奎华¹, 谢康和¹, 潘秋元¹, 陈忠麟²

(1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市建筑设计研究院, 浙江 杭州 310013)

摘要: 介绍了杭州一个采用半逆作法施工的基坑工程的设计和现场监测实例。该工程设三层地下室, 基坑深 14.7~15.2 m, 采用 0.8 m 厚的地下连续墙作为支护墙, 地下各层部分结构梁板形成水平支撑体系。通过对监测结果的分析, 得出一些有价值的结论。

关键词: 深基坑; 半逆作法; 监测

中图分类号: TU 43; TU 922

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)01-0079-05

作者简介: 应宏伟, 男, 1971 年生, 1997 年在浙江大学获岩土工程博士学位, 现在浙江大学岩土工程研究所任教, 主要从事地基处理和深基坑开挖课题的研究和教学工作。

YING Hong-wei¹, WANG Kui-hua¹, XIE Kang-he¹, PAN Qiu-yuan¹, CHEN Zhong-lin²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Hangzhou Building Design and Research Institute, Hangzhou 310013, China)

Abstract: A 14.7~15.2 m deep excavation in Hangzhou, with semi-top-down constructing method, is given as a case history. 0.8m-thick diaphragm is used as the retaining wall, and partial structural beams and slabs of the basement are designed to constitute the strut system. Some useful conclusions are obtained through the analyses of the measured results.

Key words: deep excavation; semi-top-down method; monitoring

1 前言*

近些年来, 城市地下空间的开发利用, 使得基坑面积和开挖深度越来越大, 而基坑一般都位于已有建筑物、道路、地下管线密集的城区, 周围环境对开挖引起的土体变形很敏感。深基坑支护设计理论是随着工程实践而逐渐发展的, 并且具有一定的地区经验性, 目前并不十分完善。因此, 支护结构的合理设计和开挖过程中的现场监测、信息反馈都十分重要。

对于三层以上地下室, 逆作法是解决深基坑支护难题的一种较好的施工方法, 它一般全部或部分利用地下结构本身作为基坑支护结构, 在沿海软土地区如上海、福州、天津, 都已有成功应用逆作法施工的实例。与常规支护型式相比, 这种方法具有支护体系刚度大、基坑安全系数高的特点, 因而对周围地层的变形容易控制, 但土方开挖不方便。本文将介绍采用半逆作法施工的杭州解百商业城支护结构设计和施工监测。

望, 南面为国货路。该商城占地面积 7000 m², 地上 8~10 层, 地下 3 层, 基坑开挖深度约 14.7~15.2 m, 地下各层楼面中, 南、北两侧存在 1.3 m 的高差, 其平面基本呈 99 m × 76 m 的矩形, 是目前浙江省开挖深度最深、面积也比较大的基坑。基坑平面见图 1。

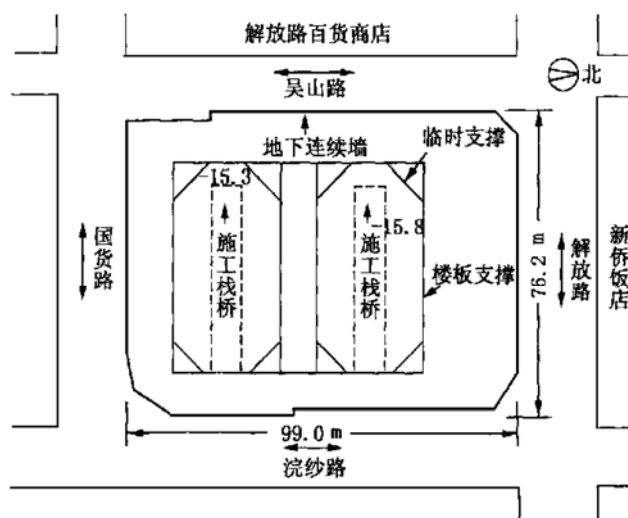


图 1 基坑支护平面图

Fig. 1 Plan of the pit

2 工程概况及地质条件

2.1 工程概况

解百商业城位于杭州市解放路繁华地段, 距西湖约 300 m。周边环境复杂, 西侧隔吴山路与老解百商店相邻, 东侧紧靠浣纱路, 北面隔解放路与新侨饭店相

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59738160)

收稿日期: 2000-04-03

表 1 场地主要土层及物理力学指标

Table 1 Soil stratification and physicomechanical properties

土 层	厚度/m	w/%	I_p	I_L	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c_{cu}/kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$
①填土	2.0~ 6.2				(18.0)	(5.0)	(15.0)
②- 1 砂质粉土	0.0~ 4.0	32.8	8.00	0.77	18.3	16.0	29.2
②- 2 粘质粉土	0.0~ 7.0	36.8	9.65	1.57	18.1	9.2	22.7
③淤泥质粘土	0.0~ 3.0	55.7	24.6	1.13	16.5	15.8	2.7
④- 1 粉质粘土	2.6~ 4.5	26.2	13.1	0.51	19.4	28.8	6.8
④- 2 粘土粉土互层	8.0~ 11.0	33.1	16.3	0.62	18.6	47.1	10.4
⑤灰色粘土	0.9~ 3.0	34.2	16.1	0.80	18.5	41.6	7.9
⑥- 1 粘土	2.3~ 3.4	29.8	17.8	0.35	19.0	38.6	18.6
⑥- 2 粉质粘土	0.0~ 5.5	28.1	15.0	0.56	19.0	34.2	17.0
⑦灰色粘土	0.0~ 3.7	32.3	15.6	0.65	18.6	30.2	14.1

地下室外墙与周边道路最小距离 4 m, 最大距离也仅 8 m, 在商业城施工期间, 基坑四周与道路之间建有 2 层的临时商业用房。城市主干地下管网从解放路北侧通过; 地下人防工程分别从解放路和国货路通过。

2.2 工程地质条件

从表 1 可知, 由于场地处于钱塘江冲海积平原和古湖沼平原交界位置, 因此浅部土层分布复杂, 其中 ①土层主要为人工填土, 土性较差; ②- 1 土性较好, 渗透性也较好, ②- 2 土承载力较低, 此层土厚度变化较大, 主要分布于场地西南角; ③土层为软弱土层, 具有高压缩性, 但其分布范围较小, 仅分布于场地东北角。基底附近其它土层的土质较好。

场地浅部有潜水含水层, 地下水位为 1.2~ 1.8 m, 对基坑侧壁的止水措施要求高。

3 基坑支护方案选取

针对用地紧张、施工周期短、基坑开挖深度大、周围环境复杂等特点, 经多种方案比较, 确定采用“三墙合一、半逆筑、半中心岛、敞开挖土”的基坑支护方案^[1]。该方案的特点是: 采用 0.8 m 厚的地下连续墙, 作为地下室结构外墙和基坑挡土墙、止水帷幕, 同时部分墙幅又作为框架柱承担上部结构竖向荷载。起基桩作用, 作为挡土墙时, 墙深 28.2~ 31.6 m, 兼作框架柱时, 墙深约 38.0 m; 利用各层地下室周边及中间东西向一个柱网的楼面梁、板(地下二层楼面中增加中间南北向一个柱网)兼作围护墙水平支撑体系, 按逆作法施工, 不仅充分利用了结构楼面侧向刚度大的优点, 还使整个基坑平面分割成“日”字形, 南、北各留出一个 51.6 m×27.0 m 的矩形洞口, 大型挖土机及运输汽车可通过洞口处的斜向栈桥直接下坑作业, 与全逆作法相比, 大大加快了挖土作业的速度。基坑支护剖面见图 2。对地下一层、地下二层支撑平面中南、北楼面的高差, 通过设置 6 根大梁解决水平力的传递问题。

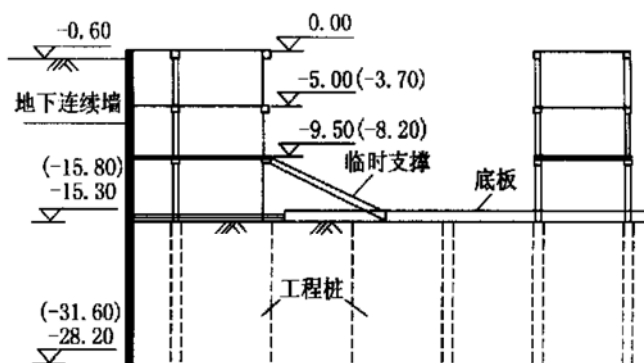


图 2 基坑典型剖面图

Fig. 2 Cross section of the pit

4 支护结构计算

4.1 地下连续墙内力、变形计算

按弹性抗力法中的 m 法计算各施工工况地下连续墙的内力、水平位移和各道支撑平面的均布支撑力, 计算时考虑当前工况墙体已经发生的变形和已设支撑所受的支撑力。开挖阶段采用水土合算, 永久性使用阶段则采用水土分算并取静止土压力。坑外附加荷载取 15 kPa。根据施工顺序, 开挖阶段分为以下计算工况:

- 悬臂挖土至 - 5.0 m (- 3.7 m) ;
 - 将地下连续墙墙顶从 - 2.50 m 现浇至 0.00, 浇捣作为水平支撑的地下一层和地下室顶板周边梁、板和临时支撑, 到达设计强度后, 挖至 - 9.50 m (- 8.20 m) ;
 - 浇捣作为支撑的地下二层周边梁、板、临时支撑, 到达设计强度后, 中间挖土至 - 15.30 m (- 15.80 m), 沿基坑周围保留 10~ 15 m 宽护墙土堤;
 - 浇捣中心岛底板, 到设计强度后, 分段开挖剩余三角土, 及时设置中心岛底板与挡墙之间的水平支撑。
- 由于基坑面积大, 而且采用的是大开口的楼面结构支撑形式, 平面上不同位置的支撑水平刚度必有差

异, 因此沿基坑周边不同位置选取有代表性的 18 个计算点, 在各层支撑围檩上作用单位均布力, 采用 Super SAP 有限元程序, 按平面受力体系, 计算得到该点的水平位移, 对其取倒数得到各点的等效水平支撑刚度。结果表明 3 层支撑中各计算点的最小等效刚度为 30 MN/m (南面中间点), 最大为 327 MN/m (西南角)。

基坑西侧中间计算点各工况计算结果见图 3。

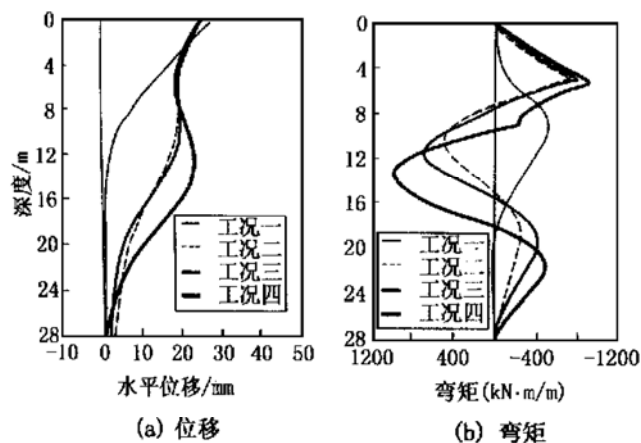


图 3 支护墙计算结果

Fig. 3 Calculation of the retaining wall

4.2 支撑系统内力、变形计算

采用以下近似方法进行支撑系统的内力、变形计算: 将前述 m 法得到的各计算点支撑反力按分段均布水平荷载加到各支撑平面上, 计算中考虑主梁、楼板、临时支撑的相互作用, 对地面层支撑, 另考虑 25 kPa 的施工竖向荷载, 对地下二层支撑, 另考虑 55 kPa 的人防竖向荷载, 采用 Super SAP 有限元程序求出支撑系统的内力和变形。结果表明支撑梁中最大轴力为 11000 kN, 计算最大水平位移约 40 mm, 均在设计允许范围之内。

5 地下结构施工监测

软土地区深基坑开挖对周围环境的影响是个十分复杂的工程问题, 在建筑物和城市管网密集的城区中采用二墙合一和半逆作法建造挖深近 16 m 的地下结构在浙江地区尚无先例, 无论是设计还是施工均无可借鉴的成功经验。为确保地下结构的顺利施工, 为类似基坑的设计积累资料, 对深基坑开挖和地下结构施工的全过程进行了现场监测。监测仪器平面布置见图 4。

5.1 监测内容

监测项目包括: ①地下连续墙墙身水平位移; ②坑外土体深层水平位移; ③墙身弯矩; ④支撑梁轴力; ⑤地下墙及立柱竖向位移; ⑥坑底土回弹; ⑦基坑周围地表沉降; ⑧坑外地下水位。

5.2 监测结果及分析^[2]

(1) 墙身水平位移

图 5 给出了全部土方开挖结束时测斜管 I1~ I8 所观测的地下连续墙墙身水平位移结果 (受施工顺序的制约, 墙内测斜管的测试从工况二开始)。墙身变形分布均表现为两头小中间大, 其中, 位于基坑边中点的 I3 J5 J7 测斜管的位移观测结果明显大于基坑角部, 空间效应明显。不计悬臂开挖阶段的变形时, 墙身最大侧移为 18.9 mm。

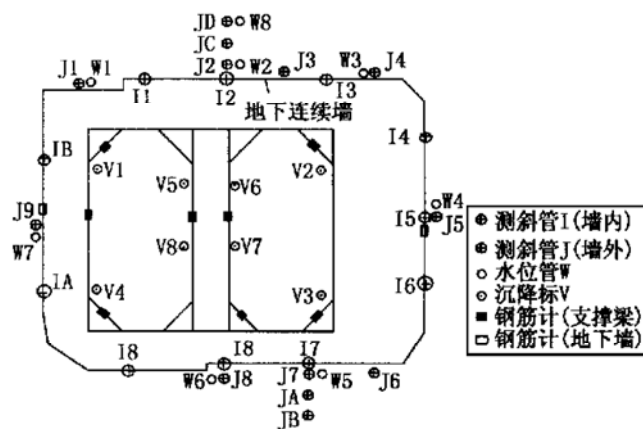


图 4 监测仪器平面布置图

Fig. 4 Arrangement of monitoring instrument

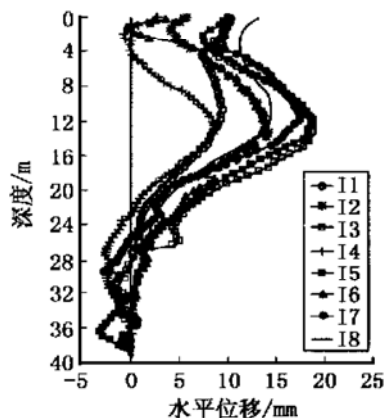


图 5 墙身水平位移监测结果

Fig. 5 The monitored horizontal displacements of diaphragm

(2) 坑外土体水平位移

图 6 给出了开挖至最终坑底标高时, 距地下墙约 1 m 的测斜管 J1~ J9 测得的坑外土体水平位移结果。此项观测从地下一层土方开挖之日开始。观测结果同样反映出基坑长边中间部位土体位移明显大于基坑角部, 如 J2, J3, J7 测斜管的位移明显比较大, 最大位移为 62.7 mm。

有限元数值分析结果表明, 深基坑开挖对周围环境的影响程度随离开挖方区域距离的增大而减小, 而且竖直面上土体的变形特征也将从小中间大变化到上大下小的悬臂开挖变形特征^[3]。本工程的监测结果

也大致验证了这一结论。图 7 中基坑西面的 J2 测斜管距侧壁约 1 m, 最大位移为 62.3 mm; JC 距侧壁约 5 m, 最大位移为 25.0 mm; 而 JD 距侧壁约 20 m(埋设在老解百基础边缘), 其最大位移仅 4.4 mm, 受开挖之影响已很小。由于本工程基底附近土质尚好, 基坑周围水平位移显著影响范围约为开挖深度的 1 倍。

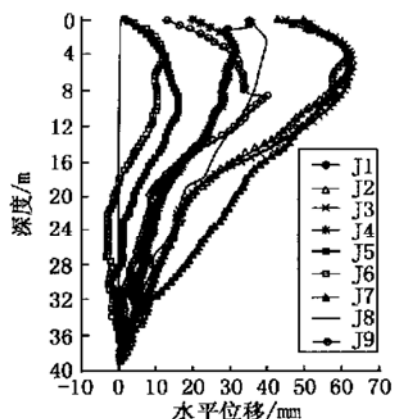


图 6 墙后土体水平位移监测结果

Fig. 6 The monitored horizontal displacements of the soil behind the wall

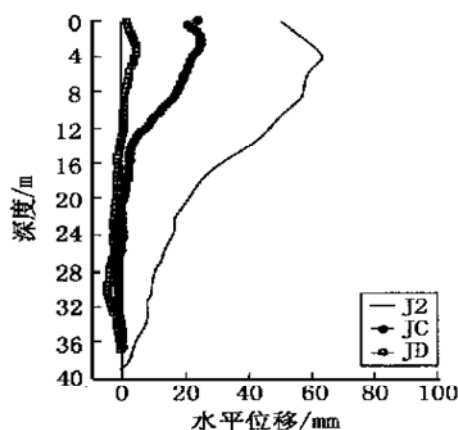


图 7 距基坑侧壁不同距离的土体位移

Fig. 7 The displacements of the soil at different distance from the pit

图 8 给出了整个地下室施工期间 J2 测斜管测得的土体水平位移。随着土方开挖的进行, 地基的水平位移逐渐增大。值得注意的是, 在 6 月中旬悬臂开挖阶段结束时, 该处土体已发生 24.1 mm 的位移, 而在 11 月中旬全部土方开挖完成至 12 月底整个地下室结构施工完毕, 该区域土体最大位移从 62.3 mm 增加到 99.1 mm。分析原因, 一方面是由于此期间坑后大量堆载导致侧压力增大的影响, 另一方面也可能是由于土的蠕变作用所致。

(3) 地下连续墙墙身弯矩

在基坑南面和北面各选择 1 幅地下墙槽段, 在主筋不同深度埋设钢筋应力计, 由钢筋应力推算墙身弯

矩。根据观测结果, 在基坑开挖和地下结构施工过程中, 地下连续墙墙体弯矩不断变化, 其中基坑南侧的 B-31 槽段墙体最大弯矩为 124.4 kN·m, 基坑北侧的 A-11 槽段最大弯矩为 116.4 kN·m, 均远小于设计控制值。二者的差异之大值得深入探讨。

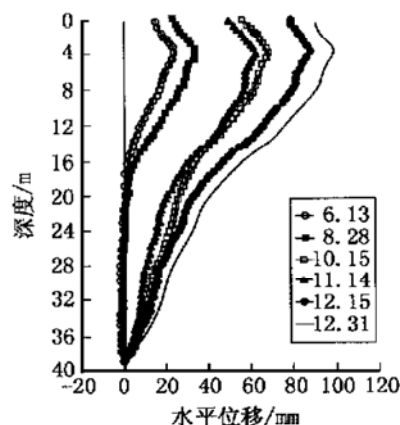


图 8 不同施工阶段 J2 测斜管观测结果

Fig. 8 The horizontal displacements monitored by inclinometer J2 at different constructing stages

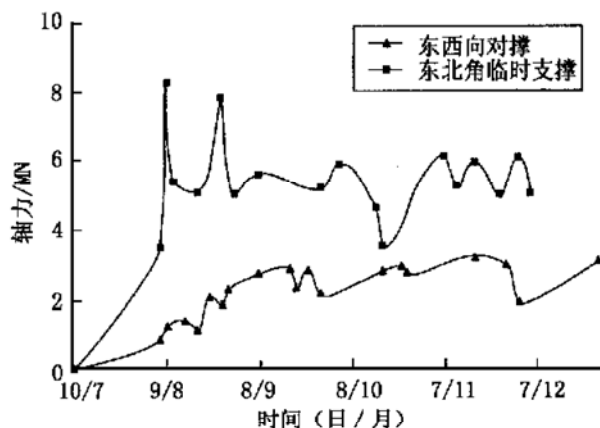


图 9 支撑轴力观测结果

Fig. 9 The monitored axial force of strut

(4) 支撑梁轴力

在各层楼面主梁和临时支撑中选取部分构件进行轴力监测。从监测结果发现, 支撑梁轴力在施工过程中呈增大趋势, 地下一层和地下二层楼面的临时支撑轴力明显大于地面层, 地下二层楼面的支撑轴力明显高于地下一层和地面层。另外, 本工程采用周边梁板兼作水平内支撑体系的半逆作法施工, 由于主梁和主梁之间的板共同作用, 与未浇板的临时支撑相比, 主梁钢筋和混凝土的应力大大降低, 充分体现了半逆作法的优越性, 从图 9 地下一层支撑轴力的观测数据中就可发现此现象。

(5) 地下墙及立柱竖向位移

本工程地下室采用半逆作的施工方法, 使之在地下施工的初始阶段, 地下结构立柱和连续墙由于结构

荷载的增大而下沉, 最大沉降约 1.5 cm; 在地下二层梁板浇筑完成以后, 随着地下三层土方的开挖, 此时结构荷载基本不变, 立柱和墙体随坑内土体的隆起而略微上抬。这与一般正作法施工的基坑中立柱始终上抬的现象是不同的。图 10 给出了地下施工期间墙顶竖向位移观测结果。

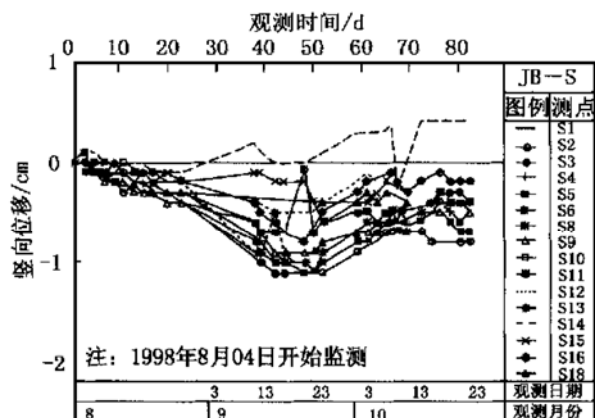


图 10 墙顶竖向位移观测结果

Fig. 10 The monitored settlement at the top of the diaphragm

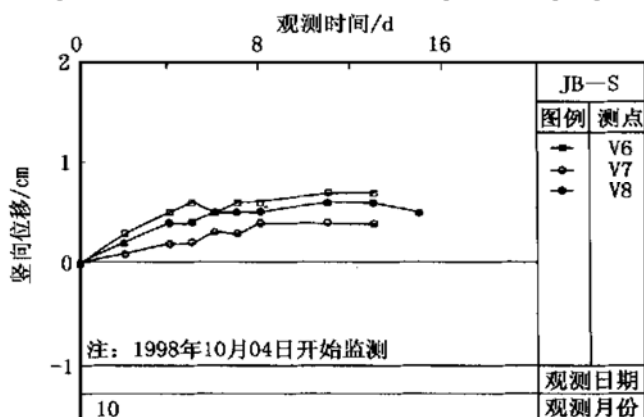


图 11 坑底土体回弹观测结果

Fig. 11 The monitored rebound of the soil at the bottom of the pit

(6) 坑底土体回弹

图 11 给出了位于基坑中部的部分坑底土体回弹观测结果。由于在施工过程中沉降标较难保护, 观测到的仅为第三层土方开挖阶段土体发生的回弹值, 最大回弹约 7 mm。

(7) 基坑周围地表沉降

基坑周围道路和建筑物的沉降观测表明, 开挖过程中最大地表沉降为 35 mm, 发生在基坑北侧中点附近的解放路南侧人行道上。

(8) 坑外地下水位

由于地下连续墙的止水效果比较好, 地下施工过程中基坑侧壁未发生明显渗漏, 除 W3 水位管显示坑外地下水位局部降低 2.5 m 外, 其余观测数据基本不变。

6 结 论

(1) 杭州解百商业城工程的实践证明, 采用半逆作法施工, 不仅发挥了支护体系刚度大、基坑安全系数高的特点, 而且节约了临时支护结构的费用, 同时加快了土方开挖速度, 缩短了施工工期, 对深、大基坑工程具有更大意义。

(2) 开挖引起的地下连续墙墙身和坑外地基土体的水平位移均表现出明显的空间效应, 坑外土体水平位移随离基坑侧壁距离的增大而明显减小, 从本工程的监测结果来看, 基坑周围水平位移显著影响范围约为开挖深度的 1 倍。

(3) 利用地下室部分梁板兼作水平支撑体系时, 由于结构主梁和主梁之间的现浇板协同作用, 整体刚度很大, 使主梁承受的内力大大减小, 充分体现出这种方法的优越性。

(4) 采用半逆作法的地下结构施工和基坑开挖过程中, 支护墙和地下结构立柱的竖向位移特征为先隆起后沉降。

参考文献:

- [1] 陈忠麟, 倪士坎. 解百商业城基坑支护设计简介[R]. 杭州: 杭州市建筑设计研究院, 1998.
- [2] 谢康和, 应宏伟. 杭州解百商业城地下室基坑围护与结构工程施工现场监测总结报告[R]. 杭州: 浙江大学岩土工程研究所, 1999.
- [3] 应宏伟. 软土地基深基坑工程性状的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.