

深圳市某大型地铁车站盖挖逆作法设计探讨

苏卜坤¹, 姜 燕^{2, 3}, 姚丽娜⁴

(1. 广州市市政工程设计研究院, 广东 广州 510060; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610;
3. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510641; 4. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 对一个采用盖挖逆作法的地铁车站进行了施工全过程的模拟计算, 较好地反映了使用阶段的结构受力对施工阶段受力的继承关系, 从而得到较为准确的内力和变形, 并对侧向土压力的选取及不对称结构支撑刚度的修正提出建议, 同时计算也表明, 采取墙背土压力随开挖过程而变化的方法更合理, 对类似设计具有一定参考价值。

关键词: 盖挖逆作法; 计算; 土压力; 不对称结构

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0728-07

作者简介: 苏卜坤(1982-), 男, 河南信阳人, 硕士, 主要从事岩土工程、地下结构等相关设计与研究工作。E-mail: xiaosu13@163.com。

Structure design of a metro station in Shenzhen using covered top-down construction method

SU Bu-kun¹, JIANG Yan^{2,3}, YAO Li-na⁴

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510641, China; 4. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The whole construction process of a metro station is simulated by using the covered top-down construction method. The calculated results better reflect the inheritance relationship of the structural response between the construction stage and the service stage, resulting in more accurate internal force and deformation. Besides, some new methods are also proposed to choose the lateral earth pressure and to modify the brace stiffness of the asymmetric structure. It is more reasonable to make the lateral earth pressure vary with the excavation process. It may provide reference for the design of the similar projects.

Key words: covered top-down construction method; calculation; earth pressure; asymmetric structure

0 引言

随着全国各地地铁建设的不断开展, 地铁车站的施工方法选择成为越来越被关注的焦点问题, 其对结构型式、建筑布局、线路埋深、城市地下空间的综合利用、工期、造价及周围环境等有重大影响, 而且也直接关系到车站使用功能及服务质量。地铁车站施工的基本方法有明挖顺作法、盖挖逆作法、矿山法和盾构法等。其中, 盖挖逆作法已成为在交通繁忙的城市中心修建具有综合功能的地铁车站的一种有效工法。它可以大大缓解地铁施工对城市交通的干扰; 同时由于该工法结构的主要受力构件兼有临时结构与永久结构的双重功能, 可简化施工程序、降低造价、还可大大减小结构变形和地面沉降量。

第四纪地层中的地铁深基坑多采用以地连墙为围护结构的多撑式支护体系, 常将它们作为主体结构的

侧墙或侧墙的一部分。施工中, 随着支撑的安装与拆除、内衬和顶、底板等内部构件的施作, 其结构型式、刚度、支撑条件和荷载情况不断变化; 结构受力与施工方法、开挖步序和施工措施关系密切。荷载效应应有连续性, 且使用阶段的受力是施工阶段受力的继续^[1]。

针对盖挖逆作法的特点, 在设计计算时所采用的分析方法就必须能反映: ①施工过程中结构刚度的不断变化对墙体受力的影响; ②结构与地层的相互作用及开挖过程中土体刚度变化的影响; ③施工过程及施工完成后的使用阶段墙体受力变化的连续性。

对于上述问题, 在当前的设计计算中还没有得到很好的解决, 针对这些问题, 本文以一个采用盖挖逆作法的大型不对称结构的地铁车站的结构计算为例,

详细介绍了所采用的计算方法和模型，并对结果进行了分析，得到几点结论，以供类似工程设计参考。

1 工程概况

拟建车站位于深圳市福田区，车站站位位于市政干道交叉口位置，地处商业繁华地段。站位周边以大型商业物业及广场为主，周边物业部分带地下一层或地下两层地下商场或地下车库。道路两侧存在密集的电力、电信、雨水、给水、污水、路灯等地下管线管道。站位所在地原始地貌为台地及冲洪积阶地，地形起伏不大，地面高程一般为11.43~12.47 m。本车站范围内上覆第四系全新统人工填土层(Q_4^{ml})、冲洪积层(Q_4^{al+pl})，第四系上更新统坡积层(Q_3^{dl})，第四系花岗岩残积层(Q^{el})，下伏燕山期花岗岩(γ_5^3)。

车站长约330 m，标准段宽28.1 m，基坑深26.5 m，上部覆土厚度约1.5 m。采用现浇整体式框架结构，为三层四跨（负三层三跨）钢筋混凝土结构，主体结构和围护结构之间设置密贴防水层，复合墙结构，形式如图1所示。由于周边环境复杂，施工场地有限，交通疏解压力大，经综合考虑，车站采用盖挖逆作法施工。

围护结构采用1000 mm地连墙，中立柱采用双拼工字钢立柱，立柱基础采用直径1.5 m的钻孔灌注桩，深入基底约13 m，兼做抗拔桩。部分钢立柱在开挖施工过程中外包混凝土兼做车站永久柱，剩余部分在施工完成后割除。在逆作过程中除各层板撑外，分别在负一层负三层跨中设置一道钢管撑。顶板直接搭界在地连墙顶部或嵌入地连墙预留的凹槽内，顶板与地连墙（围护桩）之间无钢筋连接形成铰接，便于防水层施做，结构受力明确。

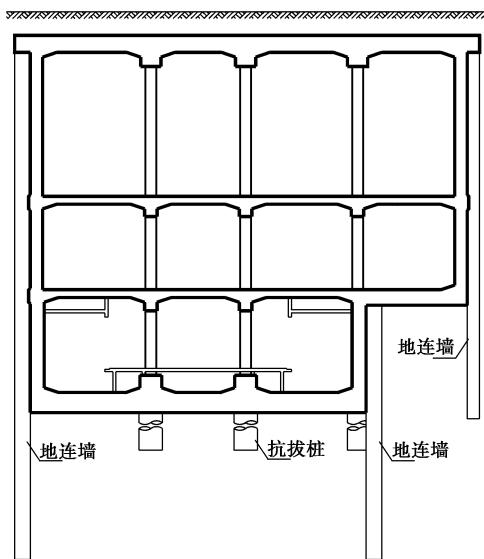


图1 车站结构横断面图

Fig. 1 Cross section of station structure

车站的主要施工步骤如下：

步骤一：场地平整，倒边施工两侧地下连续墙、截水沟、中立柱及基础。开挖基坑至顶板底，施工部分负一层侧墙防水、墙顶冠梁、车站顶板及部分侧墙。

步骤二：基坑内降水；开挖土方至负一层支撑处，施工侧墙及防水，在侧墙内侧架设支撑。

步骤三：开挖土方至中板，施工负一层剩下侧墙、防水及中板结构，并完成负一层需外包砼的型钢柱。

步骤四：拆撑上一道支撑，开挖土方至负二中板，施工负二层防水及中板，再施工负二层侧墙及负二层需外包砼的型钢柱。

步骤五：开挖土方至负三层支撑处，施工侧墙及防水，在侧墙内侧架设支撑。

步骤六：开挖土方至底板，施工负三层剩下侧墙、防水及底板结构，并完成负三层需外包砼的型钢柱。

步骤七：拆除负三层支撑，封堵各层出土口，顶板剩余部分施工，回填土恢复路面，切除部分临时钢立柱，站台板等附属结构施工。

2 车站逆作法设计

采用盖挖逆作法施工地铁车站，虽有诸多优势，同时，它也对设计施工有着更加严格的要求。其中车站中间竖向支撑系统是逆作法设计与施工的关键之一，其必须满足强度、刚度和稳定性要求，对于这部分主要是通过结构构造措施和施工技术的严格把关及先进技术的应用来实现；其次是对逆作法车站的设计计算也是重点，由于其影响因素较多，与施工过程密切相关，计算较为复杂，目前也无较为成熟简易的商业计算软件。所以下面就结合这座车站的具体计算，对逆作法设计计算中重难点进行初步讨论。

2.1 计算参数

计算参数的选取原则是根据地勘报告并参考地区经验，取代表性钻孔MGZ3-SHB-22，主要地层为素填土(1-1)、砾质黏性土(7-1)全风化花岗岩(8-1)和强风化花岗岩(8-2)岩其各土层及材料参数如下表：

表1 岩土物理力学参数值

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层 编 号	土层 厚度 /m	天然重度 γ ($kN\cdot m^{-3}$)	侧压 力系 数	垂 直基 床 系数 c ($MPa\cdot m^{-1}$)	水 平基 床 系数 ϕ ($MPa\cdot m^{-1}$)	抗剪强度 (固快)	
						/kPa	(°)
1-1	2.0	18.0	0.60	—	—	14	18
7-1	18.4	17.9	0.42	17	22	22	27
8-1	2.1	18.1	0.38	70	90	30	30
8-2	14.5	18.5	0.37	100	130	40	35

2.2 计算模型

模型假设如下：①模型沿车站纵向取1 m，将车站视为弹性地基上的平面框架结构进行计算；②考虑围护结构与主体结构的共同作用，两者之间用只承受

压力的连杆相连，当连杆受拉则自动失效；③采用地层弹簧模拟地层反力，弹簧刚度=基床系数×分段长度，地层弹簧设置为只受压，受拉则弹簧失效。④侧向土压力采用静止土压力，水土分算。通常认为，采用盖挖逆作法施工时，由于用刚度很大的顶、楼板等水平构件代替临时支撑，基坑开挖过程中墙体水平位移一般较小，墙背土压力可近似按静止土压力考虑^[2-3]。

计算模型及荷载分布见图2。本计算采用通用空间有限元分析软件MIDAS-CIVIL进行计算分析。

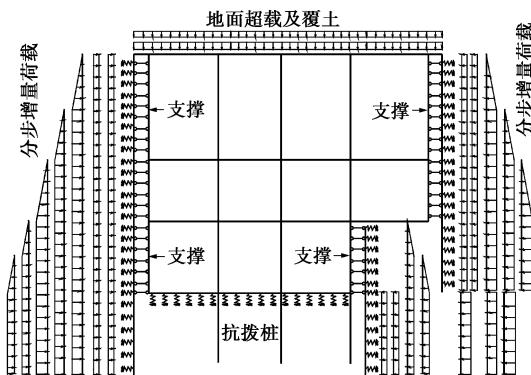


图 2 车站模型及荷载图

Fig. 2 Sketch map of model and load of station

模拟时有以下几点需要说明：①土弹簧沿墙背全高范围及开挖侧坑底以下均设置，即在围护结构内外侧均设置只压弹簧，采用节点弹性支承；②对于临时钢支撑及抗拔桩，也是采用等效刚度，在相应节点处设置节点弹性支承，同时考虑抗拔桩的水平承载力，用节点弹性支承模拟；③设置施工阶段时，将开挖步与施工步分开。在开挖步，模型结构单元不变，钝化相应开挖深度范围内的地连墙内侧只压弹簧，同时施加由此开挖步产生的侧向水土压力；待变形后即到施工步时，激活在开挖后需施工的结构单元及主体结构地连墙间的连杆单元，有临时支撑时激活支撑约束。

2.3 考虑施工过程的计算分步实施

结构内力按弹性地基杆系有限元法计算分析，围护及主体结构受力计算模拟施工全过程，荷载按“增量法”原理进行。施工阶段中，底板设置泄水孔而无水压力，侧向水土压力直接作用于围护结构，然后传至主体结构；使用阶段中，底板泄水孔封闭而产生水压力，同时不考虑围护结构的长期防水功能，侧向水压力转而作用于主体结构侧墙，土压力作用于围护结构。

在校核支撑轴力时，发现第2道支撑（节点弹性支承模拟）两端不相等， $N_L=559\text{ kN}$, $N_R=353\text{ kN}$ ，详见图3。这是由围护结构及荷载的不对称导致两侧挡土墙的支承刚度不同引起的，本文参照文献[4]中的方法对

支撑刚度进行了迭代修正。

$$K_1 = \frac{P_1}{S_1 + \Delta S + \frac{\Delta S}{K}} \quad .$$

式中 K_1 为荷载较大一侧的支撑修正刚度； P_1 , P_2 分别为初始计算时两侧支撑反力值， $P_1 > P_2$ ； S_1 , S_2 分别为初始计算时两侧支撑处位移值； S_3 为将不平衡力 $\Delta P = P_1 - P_2$ 作用于荷载小一侧时产生的位移值； $\Delta S = S_2 - S_3$ 。

将支撑刚度进行迭代计算，重新输入模型中计算后支撑反力值为： $N_L=294\text{ kN} \approx N_R=288\text{ kN}$ ，符合实际。具体计算模型见图4。

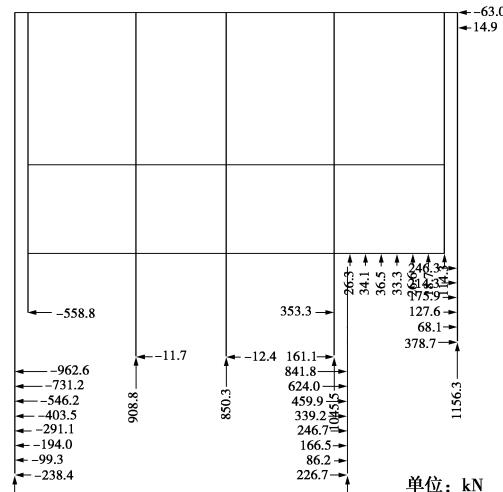


图 3 支撑刚度修正前反力图

Fig. 3 Reaction diagram before correction of bracing stiffness

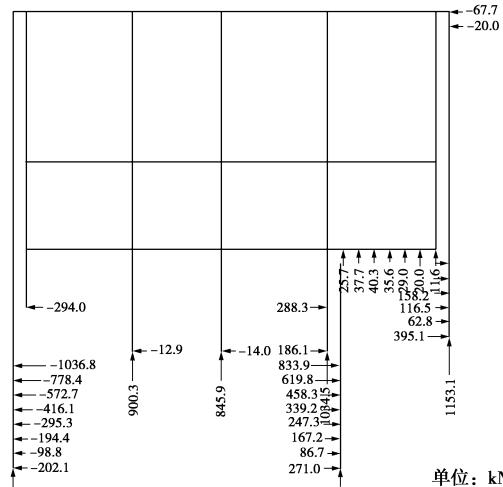


图 4 支撑刚度修正后反力图

Fig. 4 Reaction diagram after correction of bracing stiffness

3 计算结果分析

按照前述设计的施工过程进行了全过程模拟计算。各个主要施工阶段计算结果如图5~7所示。

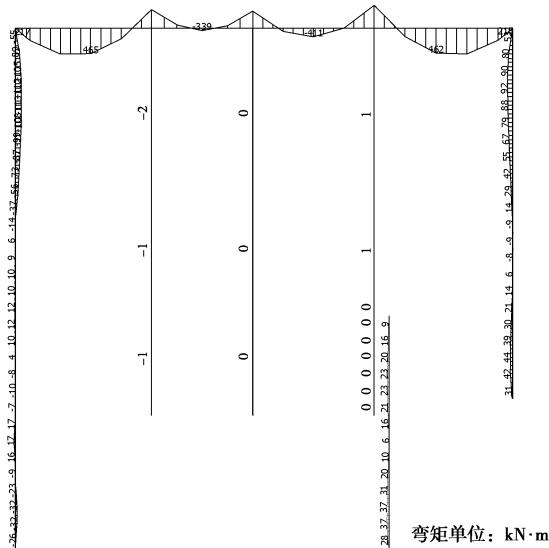


图 5 完成顶板结构并恢复路面后弯矩图

Fig. 5 Bending moments after roof structure completed and road restored

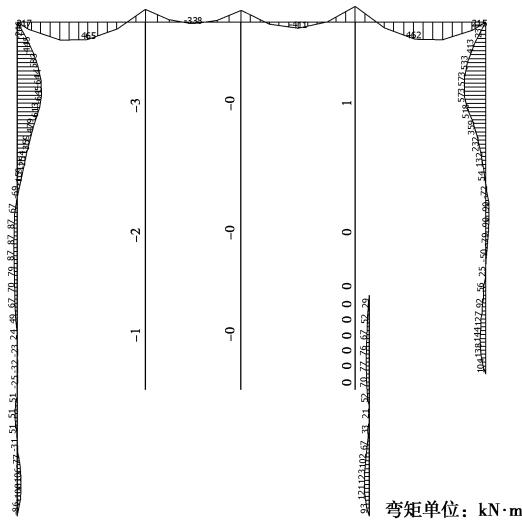


图 6 开挖负一层上半部分后弯矩图

Fig. 6 Bending moments excavation of after upper part of -1F

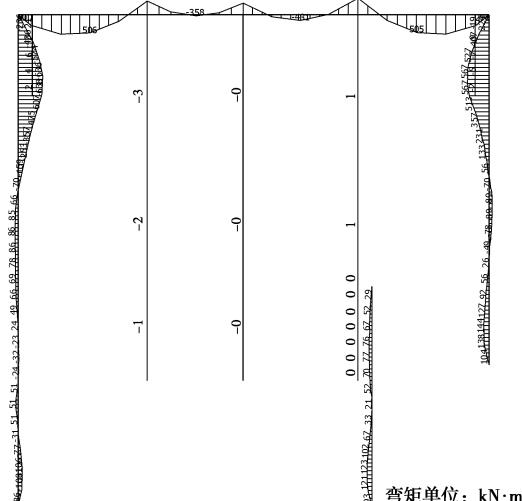


图 7 完成负一层上半部分侧墙及第一道撑后弯矩图

Fig. 7 Bending moments after completion side wall at upper part of -1F and first support

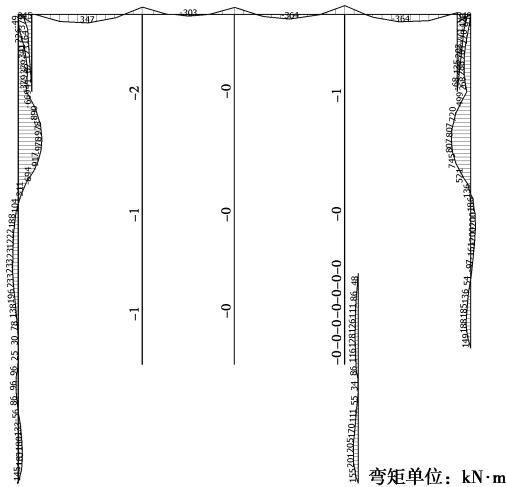


图 8 开挖负一层下半部分后弯矩图

Fig. 8 Bending moments after excavation of lower part of -1F

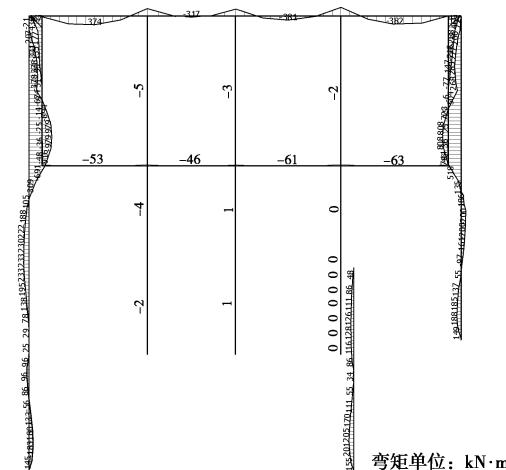


图 9 完成负一层下半部分侧墙及中板后弯矩图

Fig. 9 Bending moments after completion of side wall at lower part of -1F and medium plate

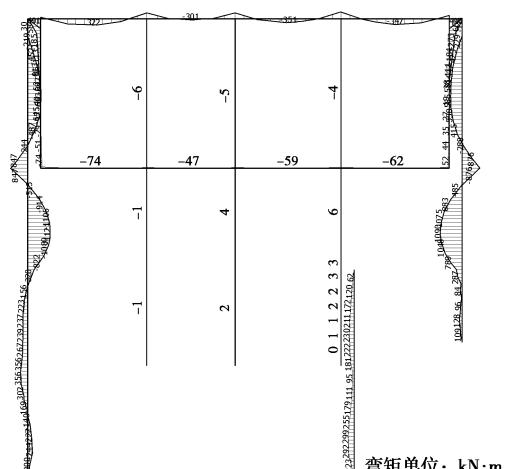


图 10 开挖负二层、拆除第一道撑部分后弯矩图

Fig. 10 Bending moments after excavation of -2F and removal of first support

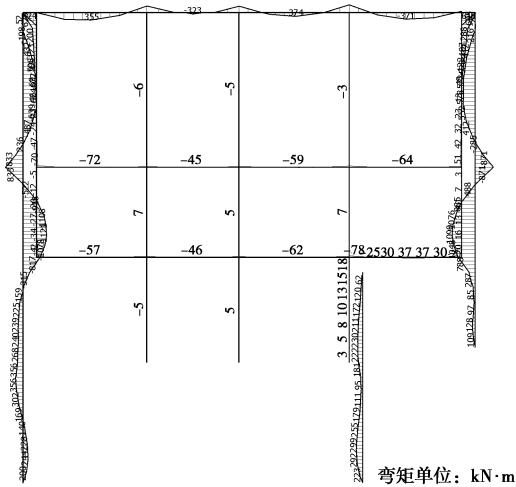


图 11 完成负二层侧墙及中板后弯矩图

Fig. 11 Bending moments after completion of side wall at lower part of -2F and medium plate

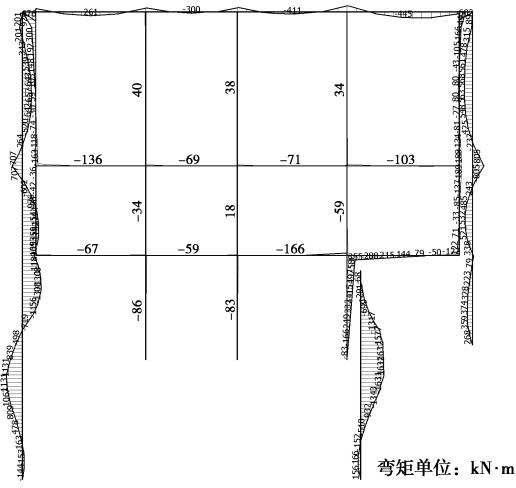


图 12 开挖负三层上半部分后弯矩图

Fig. 12 Bending moments after excavation of upper part of -3F

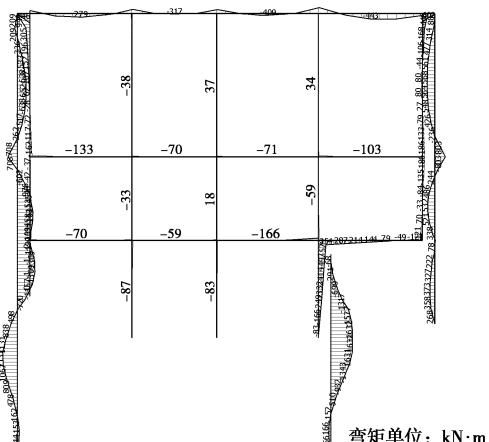


图 13 完成负三层上半部分侧墙及第二道撑后弯矩图

Fig. 13 Bending moments after completion of side wall at upper part of -3F and second support

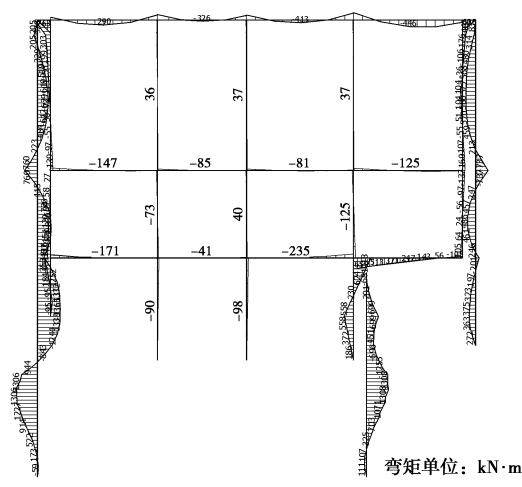


图 14 开挖负三层下半部分后弯矩图

Fig. 14 Bending moments after excavation of lower part of -3F

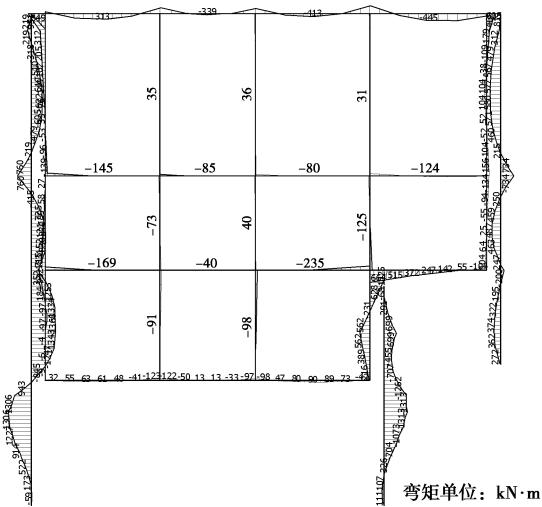


图 15 完成负三层下半部分侧墙及底板时弯矩图

Fig. 15 Bending moments after completion of side wall at lower part of -3F and bottom plate

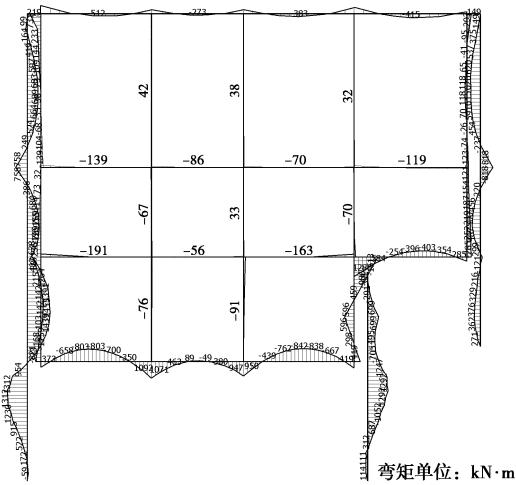


图 16 底板封闭、拆除第二道撑后弯矩图

Fig. 16 Bending moments after tamping of bottom plate and removal of second support

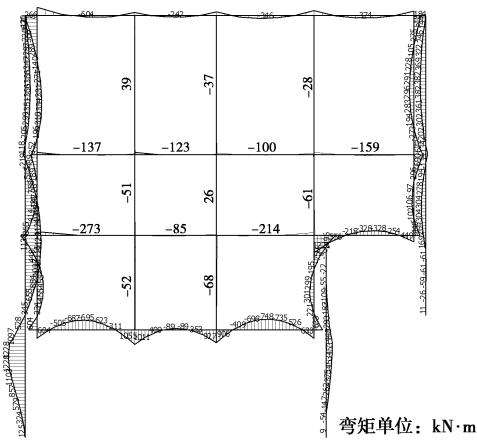


图 17 使用阶段(水压力转移至主体侧墙后)弯矩图

Fig. 17 Bending moments during service stage (water pressure behind main side wall)

从图 5~17 中, 可以清晰看出随着逆作法开挖过程的进行, 车站结构各部分内力值不断变化。左侧地连墙最大负弯矩(坑内侧)、最大负弯矩(坑外侧)均发生在图 15 所示工况中, $M_{\max}^- = -1455 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{\max}^+ = 1312 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。右侧地连墙最大负弯矩(坑内侧)发生在图 11 所示工况中, M_{\max}^- 为 $-1090 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 右侧地连墙最大正弯矩(坑外侧)发生在图 12 所示工况中, $M_{\max}^+ = 1632 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。围护结构最大水平位移在开挖负三层上部土体时产生, 左侧约为 23 mm; 右侧约为 32 mm。

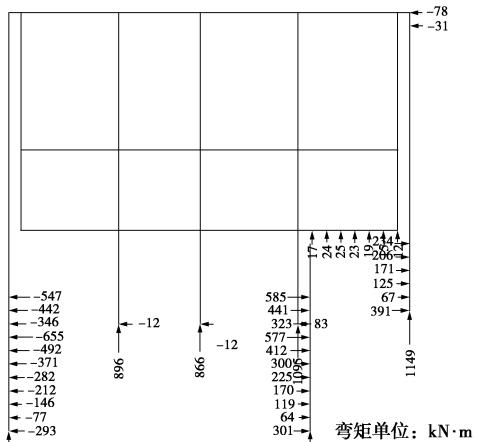


图 18 完成负二层侧墙及中板时反力图

Fig. 18 Reaction diagram after completion of side wall at lower part of -2F and medium plate

由于本文在建模时对围护结构内外侧均设置只压弹簧, 来实现模拟侧向土压力在开挖过程中, 随着土体挖除、主体结构施做、支撑的架设与拆除等引起侧向支撑刚度变化, 从而引起侧向土压力的不断变化。

以完成负二层侧墙及中板这个工况为例, 从反力图中可以看出, 地连墙内外侧的土弹簧均有反力存在, 详见图 18。从而使得: 坑底以上墙背实际土压力=静

止土压力 - 土抗力(此值 \geq 主动土压力), 坑底以下实际土压力=静止土压力+土抗力(此值 \leq 被动土压力)。这样就能使侧向土压力随着开挖过程而不断变化, 从而更符合实际情况。

2.5 常规方法验算

按照前述施工过程, 采用常规方法(理正深基坑软件 6.5 版)进行计算。只能针对围护结构(地连墙)进行施工模拟, 边挖边撑, 楼板处采用刚性铰代替, 详细工况见表 2。得到各施工阶段的内力包络图如图 19 所示。

表 2 计算工况

Table 2 Load cases of calculation

工况号	工况类型	深度 /m	支锚道号
1	开挖	2.60	—
2	刚性铰	2.05	—
3	开挖	7.75	—
4	加撑	—	1.内撑
5	开挖	13.00	—
6	刚性铰	12.60	—
7	拆撑	—	1.内撑
8	开挖	19.00	—
9	刚性铰	18.50	—
10	开挖	23.00	—
11	加撑	—	2.内撑
12	开挖	26.50	—
13	刚性铰	26.00	—
14	拆撑	—	2.内撑

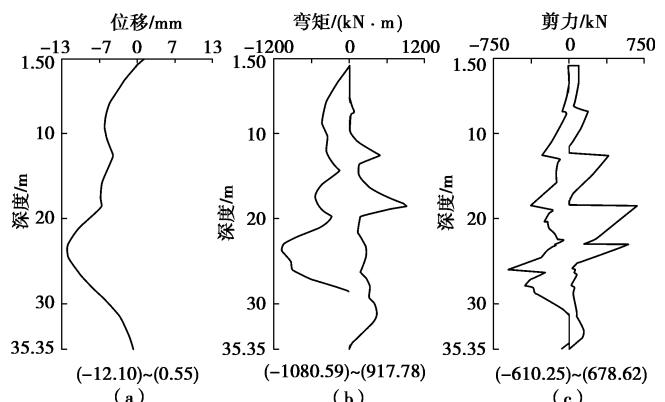


图 19 围护结构位移内力包络图

Fig. 19 Envelope diagrams for displacement and internal force

理正计算工况对应的是对称结构的简化计算工况, 所以, 为便于结果对比, 笔者修改模型, 拟将车站负三层全部挖除, 形成基本对称结构重新计算。计算结果在此不再赘述。取其中某一阶段内力图如图 20 示。由于原结构右侧围护结构地连墙包含高低墙两部分, 结果不具有可比性, 所以, 取左侧深度约 31 m 的地连墙的计算结果进行比较。

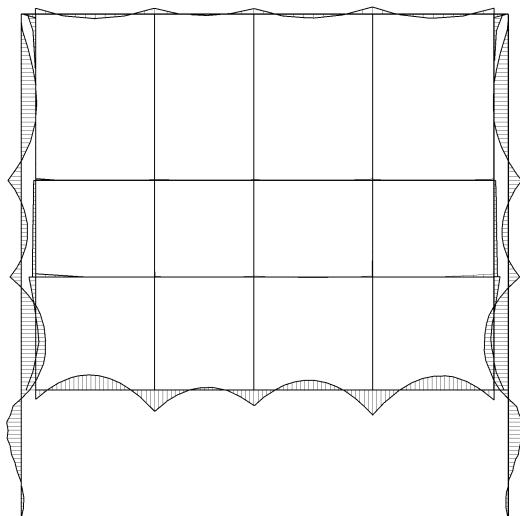


图 20 对称结构封闭底板、拆第二道撑后弯矩图

Fig. 20 Bending moments of symmetric structure after tamping of bottom plate and removal of second support

3 种工况计算结果对比如表 3 所示。

表 3 计算结果对比

Table 3 Comparison of calculating result

项目名称	不对称	对称	截面法(理正)
	结构模型	结构模型	计算模型
$M_{\max}^-/(kN \cdot m)$	-1455	-1271	-1081
$M_{\max}^+/(kN \cdot m)$	1312	1203	918
S_{\max}/mm	23	17	12

从图 19 中可以看出, 理正计算的地连墙最大负弯矩(坑内侧) M_{\max}^- 为 $-1080 \text{ kN} \cdot \text{m}$; 最大正弯矩(坑外侧) M_{\max}^+ 为 $990 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。最大水平位移约为 12 mm 。根据表 3 知, 与前述对称结构的整体模型计算结果比较: 左侧地连墙弯矩值分别偏小 15% 和 24%, 位移值偏小 29%; 与前述不对称结构的整体模型计算结果比较: 左侧地连墙弯矩值分别偏小 26% 和 30%, 位移值偏小 48%, 总体上计算偏于不安全。

分析原因, 笔者认为主要因素有以下 3 个方面: ①理正中侧向土压力为通过强度参数 c , φ 值计算的主动土压力, 比本文使用的土压力值偏小; ②理正计算时土压力在开挖过程中一直保持定值, 在施工开挖阶段不能考虑围护结构上的土抗力的不断变化引起的结构内力效应的累积; ③理正中是截面法计算, 没有考虑不对称基坑中支撑刚度的修正和车站的主体结构刚度对计算结果的影响。

从比较中也能看出, 在基坑开挖深度相同, 其他施工步序、结构尺寸等均相同的情况下, 由于车站基坑的不对称、主体结构的不对称引起的内力差异也是很明显的, 这点不容忽视。

4 结 论

本文对一个采用盖挖逆作法的地铁车站进行了施工全过程的模拟计算, 较好地反映了使用阶段的结构受力对施工阶段受力的继承关系, 从而得到较为准确的内力和变形, 为设计提供参考。

通过工程实例计算对比分析, 发现对采取逆作法施工的车站在设计时有以下 3 点值得注意:

(1) 侧向土压力的选取应与明挖顺做法有所区别, 一般采用静止土压力;

(2) 对于采用逆作法施工的车站计算应采用整体模型, 并按照施工过程模拟计算, 才能得到较真实准确的内力和位移; 不对称结构在进行整体计算时需考虑不平衡土压对支撑刚度的影响;

(3) 同时围护结构按弹性地基梁模型计算, 外侧也需设置土弹簧, 即采取墙背土压力随开挖过程而变化的方法更合理。

参 考 文 献:

- [1] 徐至均, 赵锡宏. 逆作法设计与施工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (XU Zhi-jun ZHAO Xi-hong. The reverse design and construction method[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese))
- [2] JGJ 165—2010 地下建筑工程逆作法技术规程[S]. 2010. (JGJ 165—2010 Industry Standard Technical specification for top-down construction method of underground buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [3] GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 2003. (GB 50157—2003 State Standard. Code for design of metro[S]. 2003. (in Chinese))
- [4] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)