

昆明市北市区某冲洪积及湖积地层中盆式开挖基坑支护工程设计要点浅析

余再西¹, 李荣玉², 何小远³

1. 云南建安昆宁工程设计咨询有限公司, 云南 昆明 650000

2. 云南邦众岩土工程有限公司, 云南 昆明 650000

3. 建研地基基础工程有限责任公司, 云南 昆明 650000

摘 要： 由于锚索超红线受到限制，内支撑支护结构工期长、造价高，盆式开挖基坑支护体系在昆明地区得到推广和应用，但是昆明地区地质条件复杂，这种支护方式在昆明应用过程中有成功的经验也有很多失败的案例。本文借助昆明市北市区某冲洪积及湖积地层中盆式开挖基坑支护工程为实例，通过数值模拟和类似项目的经验总结，给出了昆明地区盆式开挖基坑支护体系的一些设计和施工要点，以提升工程技术人员对此类支护结构的认知，减少工程事故的发生，促进这种支护体系在昆明地区的推广应用。

关 键 词： 盆式开挖；基坑支护；冲洪积地层

Analysis of Design Considerations for Pothole Excavation and Shore Protection in a Fluvial-Alluvial and Lacustrine Sedimentary Area in Beijiao District, Kunming City

Yu Zaixi¹, Li Rongyu², He Xiaoyuan³

1. Yunnan Jianan Kunming Engineering Design & Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

2. Yunnan Bangzhong Geotechnical Engineering Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

3. CABR Foundation Engineering CO.,LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract： Due to the limitation of anchor cable exceeding the red line, the internal support structure has a long construction period and high cost. The basin excavation foundation pit support system has been promoted and applied in Kunming area. However, the geological conditions in Kunming area are complex, and this support method has successful experience and many failed cases in the application process in Kunming. This article takes the basin excavation foundation pit support project in a certain alluvial and lacustrine formation in Beishi District, Kunming City as an example. Through numerical simulation and experience summary of similar projects, some design and construction points of the basin excavation foundation pit support system in Kunming area are given to enhance the understanding of engineering technicians on such support structures, reduce the occurrence of engineering accidents, and promote the promotion and application of this support system in Kunming area.

Keywords： basin excavation; foundation pit support; alluvial and alluvial strata

引言

由于锚索超红线受到限制，内支撑支护结构工期长、造价高，盆式开挖基坑支护体系在昆明地区得到推广和应用，但是昆明地区地质条件复杂，这种支护方式在昆明应用过程中有成功的经验也有很多失败的案例。近年来盆式开挖基坑支护体系的研究不少^[1-4]，但针对昆明地区的冲洪积及湖积地层的盆式开挖研究较少。昆明因地质条件复杂，既有湖沼积的泥炭、泥炭质土、淤泥、淤泥质土等软土，也有冲洪积的卵石、圆砾、粉质粘土、黏土等地层，其岩土工程有地域性和特殊性，盆式开挖基坑支护体系在昆明出现了很多因使用不当而造成的工程事故，故有必要针对昆明地区的地层特点对此支护体系做系统的研究。本文借助昆明市北市区某冲洪积及湖积地层中盆式开挖基坑支护工程为依托，通过数值模拟和类似项目的经验总结，给出了昆明地区盆式开挖基坑支护体系的一些设计和施工要点，以提升工程技术人员对此类支护结构的认知，减少工程事故的发生，促进这种支护体系在昆明地区的推广应用。

一、项目概况

（一）基坑周边环境条件

拟建设项目位于昆明市北市区，地下设置1~2层地下室，基坑的周长约为920，坑深约3.75~18.95m。基础底板主要置于第四系冲洪积和湖积相第②层粘土及第③层圆砾，局部置于第②₋₁层含砾粉质粘土、第②₋₂层粘土（软塑）及第③₋₁层粘土。

本基坑周边建、构筑物多而复杂、道路下放管线密集，且距基坑较近，整个基坑周围环境条件总体复杂。如图1所示，基坑各侧环境条件如下：（1）基坑西侧深度在8.15m~12.97m之间，距沔源路约50m，沔源路与基坑之间为地铁2号线的龙头街地铁站（已建成，投入使用），地铁车站为桩基础，桩长约15m，基坑开挖边线距离地铁车站最近距离为14.0m。地铁2号线轨道高架桥与龙头街地铁站二者为嵌套关系并非整体，即二者结构相互分离，高架桥为桩基础，高架桥距离基坑最小距离为26m，地铁高架线路一般保护区控制线为30米，本基坑已部分进入地铁控制保护区范围。（2）基坑西北侧深度在9.65m~10.55m，外侧为3层的龙泉古镇售楼中心，一层地下室，基础形式为桩基础，目前正在使用，售楼部主体结构距离基坑开挖线最小距离为9.5m。（3）基坑北侧深度在3.75m~10.15m，外侧为2~5层民房，部分为浅基础，部分为人工挖孔桩，基坑开挖线距离民房的最小距离为4m。（4）基坑东侧深度在11.25m~18.90m，外侧多为空地或城中村道路，其中东南角为冯友兰故居，距基坑开挖线最近距离为22.5m。（5）基坑南侧为二期开发用地，基坑深度在4.95m~13.95m之间，其东南侧为空地，西南侧为甲方待修复古建筑。（6）基坑西北侧管线多而复杂，存在雨水管、污水管、燃气管、电力管线等各类管线，应引起高度重视。（7）基坑北侧200m左右为金汁河，河底标高约1907.0m，金汁河目前为干涸状态，金汁河与本场地的圆砾层中的空隙水存在相互补给和排泄关系。

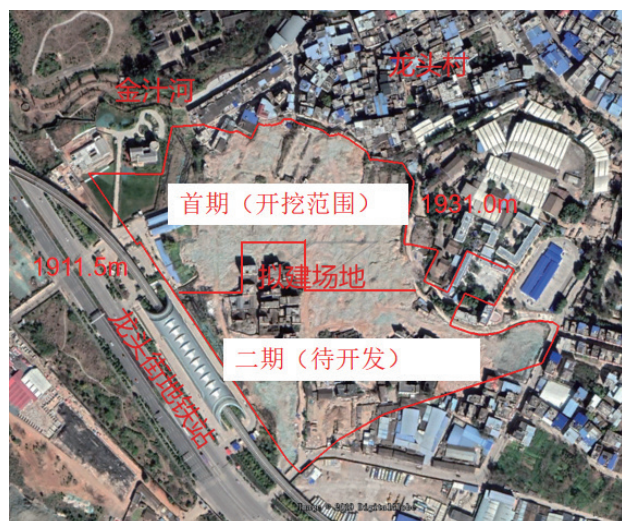


图1 基坑周边环境条件

（二）工程地质和水文地质概况

拟建场地由上至下为：场地地基土表部为厚度不均的杂填土，中部为冲、洪积相形成的碎石类土及粘性土层等，下部冲积相及湖积相的碎石类土及粘性土互层。

第①层杂填土 (Q_4^{ml})：褐色、褐黄色、褐灰色、杂色，松散，稍湿至很湿。以粘性土为主，局部地段表层为建筑垃圾、碎砖、砣（老建筑毛石基础）、生活垃圾及少量植物根茎，成分杂乱，土质不均，成分杂乱。

第②层粘土 (Q_4^{el+dl})：褐灰色、褐黄色，可塑状为主，局部硬塑状，饱和。标准贯入修正后平均锤击数7.4击，分布于整个场地，厚度变化大，处于基坑开挖范围内。

第②₁层含砾粉质粘土 (Q_4^{al+pl})：褐灰色，可塑状为主，局部硬塑状，饱和。

第②₂层粘土 (Q_4^{el+pl})：褐灰色、褐黄色，软塑状为主，局部可塑状，饱和。天然孔隙比 e 平均1.344，液性指数 I 平均0.78，标准贯入修正后平均锤击数2.9击。

第③层圆砾 (Q_4^{al+pl})：褐灰色，稍密，很湿。砾石成分为玄武岩、砂岩、石英及少量灰岩，中等风化，粒径1.0cm~3.0cm，少量4.0~5.0cm，圆~亚圆状，砾石含量50~55%左右，粉细砂填充。重型动力触探平均为9.3击。

第③₁层粘土 (Q_4^{al+pl})：灰色、兰灰色，可塑状，饱和。土质细腻，切面光滑，局部夹薄层状粉土。标准贯入修正后平均锤击数6.7击。

第④层圆砾 (Q_4^{al+pl})：褐灰色，稍密~中密，很湿。砾石成分为玄武岩、砂岩、石英及少量灰岩，中等风化，粉砂及少量粘性土填充。重型动力触探测试杆长修正击数为10.3击。典型地质剖面图如图2所示。

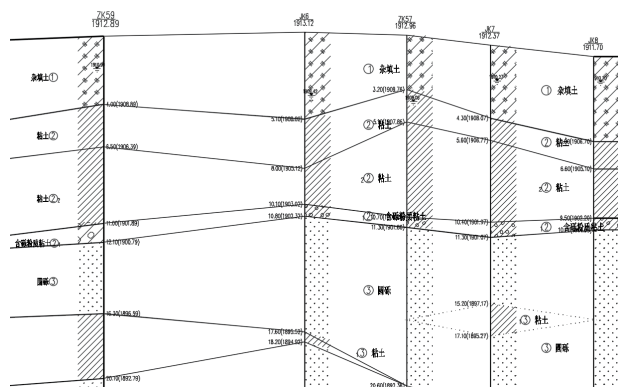


图2 典型地质剖面图

水文地质条件：（1）地表水：区内河流发源于北部基岩山地，大多源近流短。场地西北侧约百米的盘龙江为区内最大河流，从松花坝水库以下，自北向南横贯整个市区，在海埂附近汇入滇池。场地北侧发育一条金汁河，属于盘龙江支流，宽约7.8m，离拟建场地红线边缘约30米。松花坝水库位于场地北方约3公里。场地西侧发育以无名沟渠，现状为干涸，宽约5米。深约4米，离拟建场地红线边缘约140m，如遇丰水季节，需适当考虑对工程施工的影响。（2）地下水：本次勘察深度范围内，场地地下水类型上部主要为孔隙性潜水，微具承压性，孔隙潜水主要靠大气降雨及地表径流（盘龙江、金汁河）补给，通过蒸发排泄。孔隙潜水主要赋存于圆砾层中，圆砾层厚度大，分布范围广，水量较大，富水性强，与场地附近的地表径流盘龙江、金汁河水力联系紧密。

（三）基坑支护要点和支护方案

本基坑支护结构设计时需要考虑以下几方面的问题：（1）基于昆明市的相关规定，锚索出红线限制使用，锚索施工对地基土存在扰动，锚索施工打穿止水帷幕地下水不易控制（特别是建筑物附近）和甲方要求，本项目不使用锚索特别是建筑附近；（2）地铁车站、民房和古建筑一侧对变形控制要求高，应选用控制变形较好的支护体系；（3）圆砾层中地下水丰富应做好地下水控制措施；（4）本项目为坡地建筑地面高差大（基坑外侧最大高差达20m），基底标高变化大（最大高差达13.7m），基底从上到下分5台设置地下室，基坑周长长，形状不规则，基于这些客观因素，整体性强、变形控制较好的全内支撑支护结构在本项目无法实现。综上所述，根据本基坑周边保护对象、基坑深度、工程地质、水文条件和各方面的限制条件，本基坑整体选用对周边环境扰动较小、控制变形较好的排桩+盆式开挖+内支撑的支护形式，局部采用放坡+土钉墙的支护形式，根据边界条件、基坑深度和周边环境的不同，支撑为混凝土支撑或钢支撑，钢支撑有水平支撑和斜支撑，其中留土反压工况为本基坑支护设计的重点控制工况。具体支护方案如图3所示。

二、设计过程中存在的问题

目前基坑支护设计常用的商业软件为理正深基坑和同济启明星软件，其中理正深基坑无法计算盆式开挖预留土台工况的结构内力和变形，同济启明星软件虽然可以考虑预留土台工况，但其计算结果与实际施工后的结果差异太大，难以指导施工。从昆明多个项目盆式开挖设计和施工的情况来看，土层性质较差的地层中盆式开挖工况支护结构变形较大且软土地区常常出现不收敛的



> 图3 基坑支护平面布置图

情况。本项目因诸多剖面采用了盆式开挖基坑支护体系，为了弄清楚预留土台工况支护结构的变形，采用数值模拟方法对各剖面预留土台工况支护结构的变形进行了计算分析。

三、数值模拟过程和结果

采用 Plaxis 软件进行数值模拟，各地层物理力学参数根据勘察报告中数值直接取值或根据相关经验公式推算而得，具体地层和参数详见表1。其中：对②层采用固结快剪试验结果作为土体强度参数，对②₂层采用静三轴剪切作为土体强度参数；⑤层采用的粘聚力和内摩擦角同④层；圆砾层压缩模量统一采用22MPa；填土层各应力段压缩模量统一假设为4MPa；各层泊松比根据静止土压力系数估算： $\nu=\zeta/(1+\zeta)$ ；各层弹性模量取值为压缩模量的4倍。

表1 数值模拟参数取值表

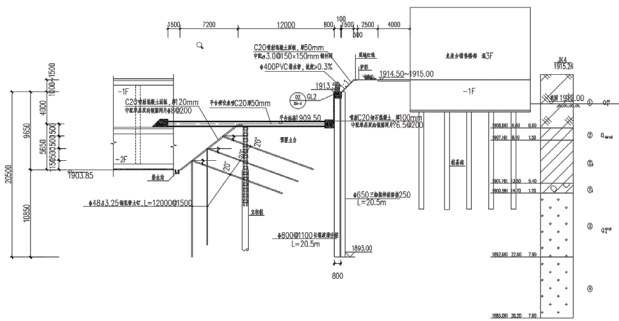
地层编号	地层名	重度 γ kN/m ³	压缩模量 E_s			泊松比 ν	弹性模量 E			粘聚力 c kPa	内摩擦角 ϕ °
			100-200	200-300	300-400		100-200	200-300	300-400		
			MPa	MPa	MPa		MPa	MPa	MPa		
①	杂填土	18.0	4.00	4.00	4.00	0.35	16.00	16.00	16.00	12.0	6.0
②	粘土	18.5	5.08	6.48	7.86	0.30	20.32	25.92	31.44	45.3	9.9
② ₁	含砾粉质粘土	18.9	5.44	6.62	7.75	0.30	21.76	26.48	31.00	40.8	10.4
② ₂	粘土	16.8	3.40	4.40	5.40	0.40	13.60	17.60	21.60	27.4	3.0
③	圆砾	22.0	25.00	25.00	25.00	0.28	100.00	100.00	100.00	4.0	27.0
③ ₁	粘土	18.3	4.68	5.86	7.10	0.30	18.72	23.44	28.40	37.5	6.3
④	圆砾	22.0	25.00	25.00	25.00	0.28	100.00	100.00	100.00	4.0	28.0
④ ₁	粘土	18.5	5.33	6.66	8.05	0.30	21.32	26.64	32.20	40.6	7.2
⑤	圆砾	22.0	25.00	25.00	25.00	0.28	100.00	100.00	100.00	4.0	28.0
⑤ ₁	粘土	18.6	7.29	9.39	11.65	0.30	29.16	37.56	46.60	44.4	10.4

模型说明：支护桩和喷射混凝土面层采用板单元；土钉采用土工格栅单元；坑边建筑采用大刚度的弹性实体，荷载按照每层15kPa估算。

下面选取一个典型剖面将理正计算结果与 Plaxis 数值计算结果进行对比。本支护剖面如图3所示，基坑深度9.65m，采用排桩

+三轴搅拌桩止水帷幕+坑内预留土台+水平钢管支撑的支护方式，支护桩直径为800mm，间距1100mm，桩长20.5m，预留土台高5.65m，总宽19.2m，平台宽12m，放坡坡比为1:1.27，坑边3层建筑距离支护桩边约8.5m，桩基础。基坑开挖范围内土层主要为①层杂填土、冲洪积的②₂层软塑状黏土、③、④层冲洪积的

圆砾层。



> 图3 典型剖面支护结构图

理正深基坑软件无法考虑预留土台开挖工况，仅能考虑开挖到预留土台标高工况。理正深基坑软件计算模型如图4a所示，开挖到预留土台标高工况计算结果如图4b所示，桩顶最大水平位移为24.49mm。

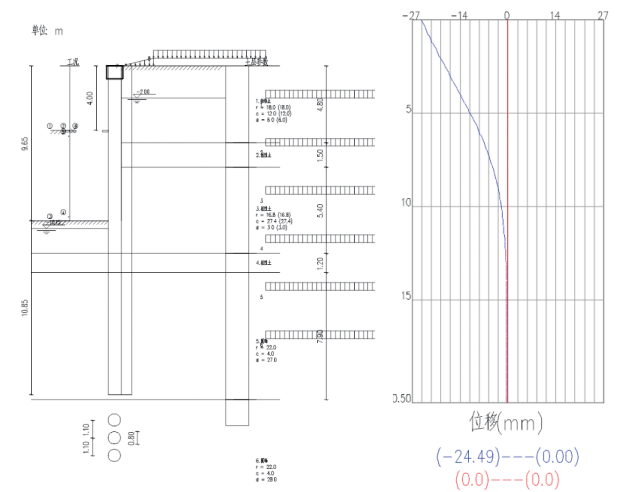
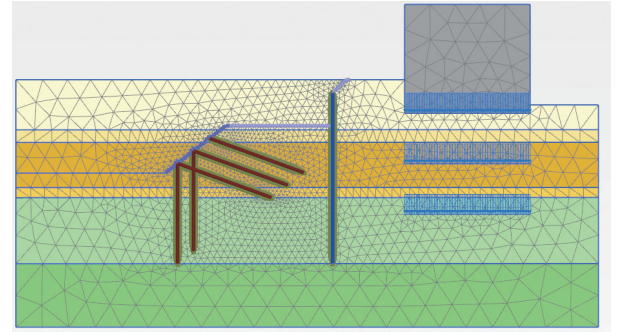


图4a 理正计算模型

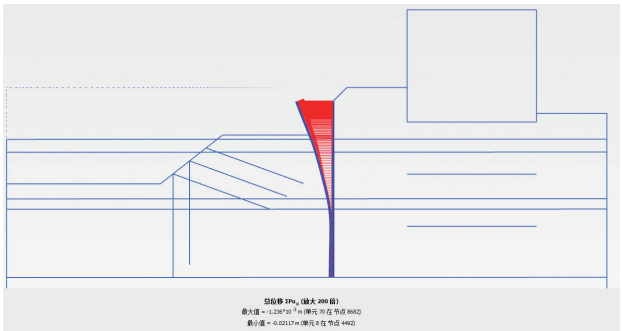
图4b 开挖到预留土台标高工况桩身变形情况

> 图4 典型剖面理正计算模型和计算结果

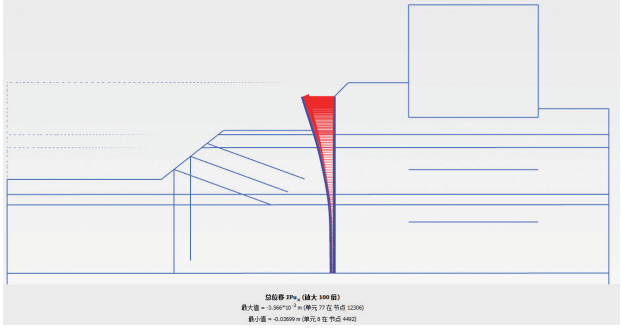
Plaxis 数值计算模型和计算结果如图5~图9所示，由图可以看出：（1）数值模拟计算分析结果中开挖至预留土台标高工况桩身最大变形为21.17mm，此计算结果与理正计算结果24.49mm基本吻合；（2）保留预留土台其余部分土体开挖至坑底工况，桩身最大位移增加至36.99mm，变形绝对值增加了15.82mm，变形相对值增加了75%；（3）数值模拟除了给出桩身变形外还给出了开挖各工况基坑内外土体的变形，这样能更有针对性的采取支护措施。



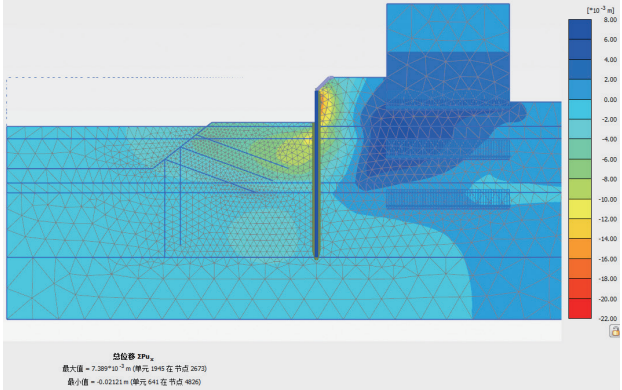
> 图5 典型剖面 Plaxis 数值模型



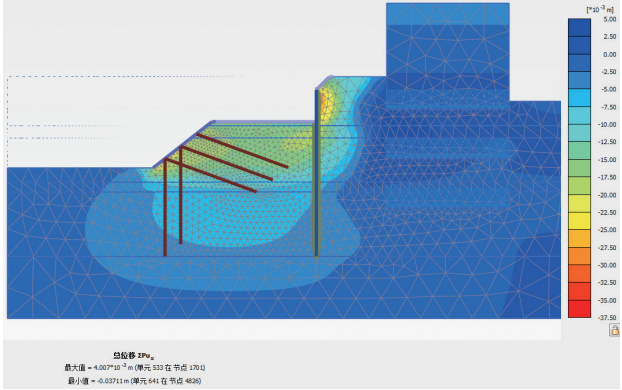
> 图6 开挖至预留土台标高工程桩位移



> 图7 预留土台后开挖至坑底工程桩位移



> 图8 开挖至预留土台标高土体位移分布情况



> 图9 预留土台后开挖至坑底土体位移分布情况

从理正深基坑商业设计软件和 Plaxis 数量模拟软件的计算过程和结果可以得出：（1）理正深基坑商业设计软件，不能按现场实际任意工况模拟施工过程，但数值模拟软件能按实际工况模拟整个施工过程；（2）盆式开挖支护体系，开挖到预留土台标高工况理正软件计算结果与数值模拟结果基本吻合，但预留土台外围土体开挖至坑底的过程中支护结构仍然会产生很大变形，甚至会

超过开挖至预留土台标高工况变形的50%；（3）数值模拟除了给出桩身变形外还给出了各工况基坑内外土体的变形，这样能更有针对性的采取支护措施。

四、设计和施工的常见问题和要点

盆式开挖基坑支护体系设计需要考虑主要问题：预留土台工况的稳定性问题和变形问题。稳定性问题：盆式开挖基坑支护体系预留土台工况主要靠坑内土体和支护桩的作用来保证基坑的安全，若坑内土体不稳定或其存在较大变形，此支护体系将不成立，故坑内预留土体稳定是此支护体系成立的前置条件。坑内预留土体的稳定性不仅要考虑自重作用，还有还要考虑支护桩传递给预留土体的作用力，不能简单的按坑内预留土体建模分析稳定性。可以采用下面两种方法建模，方法一：近似计算，不考虑桩的作用（剔除桩），从基坑顶到基坑底完全按纯放坡模型来计算整个边坡稳定性，如果这种情况下整个边坡稳定，则支护体系成立；方法二：精确计算，先算出桩作用在预留土台上的作用力，再把作用力施加在预留土体上，建模计算预留土台的稳定性。变形问题：此支护体系的变形主要发生在开挖至预留土台标高工况，预留土台工况，支撑后开挖预留土台工况和拆撑工况，其中不确定性最高风险最大的是预留土台工况。目前的商业软件都因无法模拟预留土台工况或因计算理论不成熟导致此工况的变形计算结果难以指导现场施工，数值模拟能有效解决此问题。

盆式开挖支护体系施工要点：预留土台作用和常规的堆土反压存在较大差异，堆土反压主要靠土体的重量来保证坡体的稳

定，盆式开挖预留土台不仅起到反压作用，更需要支护桩提供被动抗力，即嵌固作用，故土体结构性和强度显得极其尤为重要。施工过程中除了常规土方开挖的标高、尺寸等几何形状控制外，避免扰动土体和地表水冲刷坡面造成预留土台局部垮塌也是施工控制要点。除此之外减少预留土台无支撑状态暴露时间也是设计和施工的关键点，特别是软土地区。

五、结论和建议

（1）盆式开挖基坑支护体系预留土台工况是设计和施工控制的重点和难点，施工过程中应避免扰动预留土且应尽量缩短预留土台无支撑状态暴露时间。

（2）盆式开挖支护体系预留土台外围土体开挖至坑底过程中支护结构仍然会有产生很大的变形，甚至会超过前期变形的50%。

（3）目前常规商业软件难以完全模拟盆式开挖的各个工况，对周边环境复杂破坏后果严重的项目，应采用数值模拟分析盆式开挖基坑支护体系各工况的变形和内力。

（4）盆式开挖支护体系设计重点和难点是预留土台工况的稳定性分析和变形控制。稳定性可以采用下面两种方式计算，方法一：近似计算，不考虑桩的作用（剔除桩），从基坑顶到基坑底完全按纯放坡模型来计算整个边坡稳定性；方法二：精确计算，先算出桩作用在预留土台上的作用力，再把作用力施加在预留土体上，建模计算预留土台的稳定性。变形可以采用数值模型计算得到。

参考文献

- [1] 同玲，等. 不同施工阶段斜抛撑基坑变形及其对邻近建筑物的影响分析 [J]. 建筑结构, 2017, 47 (增刊): 1108~1111.
- [2] 周同和，等. 盆式开挖预留土墩支护结构稳定性与变形分析 [J]. 建筑科学, 2018, 34 (11): 14~21.
- [3] 斜抛撑在深基坑支护中的应用研究 [J]. 施工技术, 2018, 47 (增刊): 11~15.
- [4] 盆式开挖法在软土地区超大深基坑应用案例分析 [J]. 建筑科技, 2022, 第4期: 66~68.