

某梁板支撑体系的深大基坑三维全过程分析

应宏伟¹, 郭跃²

(1. 浙江大学, 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 提出了考虑梁板复合支撑和分段施工效应的深大基坑支护结构三维全过程计算方法, 编制了三维全过程分析有限元程序。以软土地基上某复杂深大基坑工程为例, 详细计算了整个基坑支护结构、梁板复合支撑系统在施工全过程中的受力及变形性状。将计算结果与实测资料相比较, 验证了本文方法的适用性, 同时表明梁板复合支撑是控制深大基坑变形的有效方法之一。

关键词: 深基坑; 梁板支撑; 三维; 过程分析; 有限元

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)11-1670-06

作者简介: 应宏伟(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事软土力学与地基处理、土工数值分析、基坑工程的教学与科研工作。Email: ice898@zju.edu.cn。

3D analysis on a deep beam-slab braced foundation pit considering effect of construction process

YING Hong-wei¹, GUO Yue²

(1. Key Laboratory on Soft Soil and Geo-Environmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: A method to analyze behaviors of beam-slab braced foundation pits was proposed considering the effect of construction process. A 3D FEM program based on the model was developed. The method was used to analyze the deformation and internal forces in the retaining structure and the beam-slab bracing system of a deep foundation at different excavation stages. The analytical results were compared with the measured data. It was indicated that the suggested method could be used to simulate the excavation process of complex foundation pits. It was also shown that the beam-slab bracing system was an effective way to control the displacement of large and deep foundation pit.

Key words: deep foundation pit; beam-slab bracing system; 3D; process analysis; FEM

0 引言

随着城市建设的发展, 基坑平面规模越来越大, 开挖深度也越来越深。传统的计算方法, 如规范推荐的平面弹性地基梁法, 在计算这些结构复杂、工况繁多的深基坑工程时, 需引入过多的假定, 计算结果不能反映基坑的空间效应。因此, 国内学者对其做了较多的改进工作^[1-4], 并提出相应的计算模型和计算方法, 使之能够进行基坑的三维或准三维分析。本文提出了考虑梁板复合支撑和分段施工效应的深大基坑支护结构三维全过程计算方法, 并用于软土地基上某复杂深大基坑工程支护结构的计算。

1 基坑支护结构现有计算模型

1.1 平面框架模型

平面框架模型^[1]可看成是准空间的计算方法, 它

先采用竖向弹性地基梁法对排桩进行平面分析; 再将上一步求得的支撑反力施加到支撑框架上, 求解支撑变形及内力。该模型实际上是不协调模型, 即第一步求得的排桩在支撑结点处的位移和第二步所求得相应的支撑位移往往是不相等的, 存在两点不足: ①在排桩计算时, 较难选取一个较合适的支撑刚度; ②在平面框架计算时, 为保证满足求解要求, 需要引入额外水平约束。对于形状规则, 结构对称的基坑工程这个方法是可行的, 但对于不规则形状的基坑, 会引起较大的计算误差, 特别是在施加额外约束的支撑结点位置上。

1.2 空间杆件单元协调模型

协调的空间计算模型^[2-4]是将围护结构与支撑系统共同建立到计算空间模型中。较平面框架模型有了较大的改进, 但仍存在一些不足之处: ①现有空间协

调模型多为杆单元模型。在深大基坑工程设计中, 为提高整个支护结构的水平刚度, 支撑系统除常用的梁支撑外, 还增加了混凝土板支撑。特别是在地下室采用逆作法或半逆作法的基坑工程中, 地下室楼板是支撑系统的主要组成部分。在计算这些深基坑工程时, 杆件单元模型存在着较大局限性; ②没有考虑分段施工的影响。为了尽量减少一次性无支撑暴露时间, 分段挖土、及时设置支撑的分段施工是软土地基深基坑工程在施工过程常采用的一种方法。不考虑分段施工的影响显然不能准确地反映支护结构在施工各阶段内的实际受力及变形性状。

1.3 三维实体单元协调模型

三维实体单元计算协调模型^[5]是将土体作为实体单元、围护结构作为实体单元或板单元、支撑系统作为空间杆单元共同建立到空间模型中, 从而考虑土-支护结构和支撑系统三者的相互作用, 仅从计算理论上讲, 该模型是最合理的计算模型。但实际应用中, 三维实体单元计算协调模型存在着两个主要问题: ①土的本构关系以及计算参数较难确定, 且与实际工程采用的参数不同; ②在计算复杂平面形状、支撑布置形式、施工工况的基坑工程时, 模型建立困难, 计算速度慢, 计算稳定性较差, 实用性不强。因此有必要对基坑支护结构的计算模型进行适当的力学简化, 使之既适用于各种复杂的基坑, 又满足工程计算的要求。

本文在现有空间杆件单元协调模型的基础上, 提出了空间梁板单元协调模型。如图 1, 围护桩、支撑梁采用的空间梁单元模拟, 为了能较好地采用地下室逆作法或临时梁板复合支撑的基坑工程进行分析, 模型中除杆件单元外, 还增加了三角形平板单元^[6]。

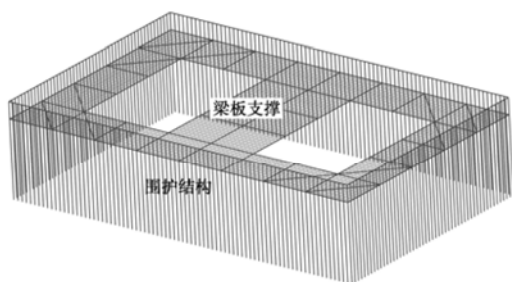


图 1 空间梁板单元协调模型示意图

Fig. 1 Spatial beam-slab element model

2 三维全过程计算方法

2.1 三维全过程分析中关键问题与基本假定

梁板支撑体系深大基坑工程的三维全过程计算方法关键问题主要有两个方面: ①土、支护结构以及支撑系统(支撑梁、支撑板)三者的协同作用。②基坑

施工的过程分析。过程分析不但要考虑沿深度方向上的各个工况的施工顺序, 还需考虑水平方向上的分段施工(子工况)对整个支护结构的影响。实际工程中的分段施工包括: ①逐块逐层挖土并施工支撑。在这个阶段内, 坑内土体被挖去, 坑外主动土压力逐步增大, 内支撑逐步发挥作用; ②逐块逐层拆除支撑。这个阶段从土方开挖完毕直至内支撑被完全拆除, 期间主动土压力和坑内土面保持不变, 内支撑被逐步去除。

为解决上述两方面的问题, 引入如下基本假定:

①支护结构、支撑系统各构件均为线弹性体; ②围护结构底部竖向位移为零; ③各构件在结点位置的位移完全协调; ④基坑内侧开挖面以下土体的作用简化为弹性抗力法; ⑤基坑外侧主动土压力取现行《建筑基坑工程技术规范》^[7]推荐的土压力分布模型。

2.2 土弹簧计算

在平面分析中土弹簧仅分布在围护桩的内侧。当支护结构为密排桩墙时, 桩间土的宽度一般在 20~50 cm 之间, 其刚度应远大于法向土弹簧刚度。不考虑切向土弹簧往往会使计算产生较大的误差, 特别是在基坑角部。如图 2 所示, 在三维分析中, 代表被动土抗力的土弹簧在垂直于围护桩的两个侧面上均有分布。其中基坑边法线方向的土弹簧就是通常所说的被动区土弹簧, 切线方向的土弹簧则是挡土结构对支撑结构沿基坑周边切向方向的弹性约束。

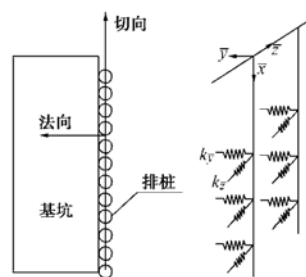


图 2 土弹簧示意图

Fig. 2 Soil spring

法向土弹簧的计算方法主要有 m 法、 C 值法、 K 法等。本文采用 m 法, 即每一薄层土法向土弹簧刚度

$$k_{ni} = m_i \cdot z_i \cdot h_i \quad (1)$$

其中, m_i 为该层土的水平力地基反力比例系数 (kN/m^4); z_i 为该层土中点到开挖面的距离 (m); h_i 为该土层厚度 (m)。

从理论上分析, 切向土弹簧刚度 k_{ti} 不小于法向刚度。一般情况下, 当围护结构为密排桩时, k_{ti} 可取为 k_{ni} 的 1~5 倍, 当围护结构为地下连续墙, k_{ti} 应该更大得多。本文对切向土弹簧刚度的取值采用偏保守的做法, 具体如下: 开挖面以上土体的切向刚度不加

以考虑, 即 $k_u=0$; 开挖面以下切向土弹簧刚度取与法向土弹簧刚度相同值, 即 $k_u=k_{ni}$ 。

施加桩侧土弹簧以后, 可以模拟切向力在同侧支护桩之间的传递, 整个支护结构在水平面内已经满足稳定静力平衡的要求, 所以不需要施加额外的水平方向约束。这也是基坑支护结构三维分析的一大优势。

2.3 考虑分段施工影响的过程分析

在模拟实际工程中逐块逐层开挖土方、设置内支撑时, 结构本身以及外荷载 (包括土压力和地面施工荷载引起的侧压力) 随工况的不同而变化, 其中支护结构本身的变化会直接影响到整体刚度矩阵的变化, 这给求解带来困难。这类问题可采用增量法来解决。

基坑分段逐层施工计算所需要解决的问题比较多, 其中最主要的是如何处理单元的“去除”问题。最为常用的处理方法有两种: 一是采用所谓的“空气单元法”, 即保留原来的单元及结点, 以“空气单元”代替未出现的或被拆除的支撑单元, 令土体弹性模量为一个很小值, 这种处理方法程序实现简单, 但会因单元刚度太小使整体刚度矩阵成为病态矩阵, 给计算带来一定的误差; 另一种方法是将未出现的或被拆除单元从计算网格中删去, 网格中不再包含这部分单元, 这种处理方法显得更合理一些, 但单元编号和结点编号的不断变化, 给编程工作带来较大困难。

本文在“空气单元法”的基础上进行了改进处理, 在单元刚度集成总刚度矩阵及总荷载向量同时, 记录下支护结构已出现的单元结点号; 总刚度矩阵及总荷载向量完成后不直接求解此方程组, 而是根据前一步中记录的结点号, 在总刚度矩阵及总荷载矩阵中提取相应数据, 组成新刚度矩阵及荷载向量; 然后再进行求解, 再根据前面结点编号将此位移映射到总位移向量中。这样既避免了线性方程组的奇异问题, 又不需要对结点重新编号。

采用上述方法和基于 MATLAB 环境, 针对采用梁板式支撑体系的复杂基坑, 研制了考虑分段施工全过程影响的三维有限元计算程序。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

西湖文化广场二期工程基坑平面为扇形, 径向距离最大处达 150 m, 外围弧长约 500 m。基坑分为 A, B, C, D, E 5 个区, 均设两层地下室, 设计开挖深度 A~D 区为 12.85 m, E 区 11.6 m, 超高层 D 区中间筒体深坑达 15.75 m, 基础工程桩均为大直径钻孔灌注桩。

基坑影响深度范围内的地基土主要为: 杂填土、素填土、粉质黏土、淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土。

其中软黏土层厚度达 24 m, 层底深度约 29 m, 流塑状态, 含有机质、云母等, 渗透性差, 但强度极低。

基坑 E 区距离京杭大运河最近处约 10 m, D 区北侧距离 7 层住宅楼约 28 m, 其它范围开挖显著影响范围内没有既有建筑物, 场地周围环境条件比较有利。

支护结构采用一排大直径钻孔灌注排桩结合两排直径 0.6 m 水泥搅拌桩形成挡土隔渗墙, 设置两层钢筋混凝土内支撑^[8]。围护桩直径 1.0 m, 桩中心间距 1.15 m, 支撑平面布置如图 3 所示, 其中主支撑采用 1.1 m×0.9 m 和 0.9 m×0.8 m, 次支撑采用 0.8 m×0.8 m, 0.8 m×0.7 m, 0.7 m×0.7 m 等多种截面, 在对撑和大角撑等支撑平面内主要受力范围设置的混凝土支撑板 (图 3 中的阴影部分) 厚度为 16 cm, 支撑梁板的混凝土强度等级均为 C30。

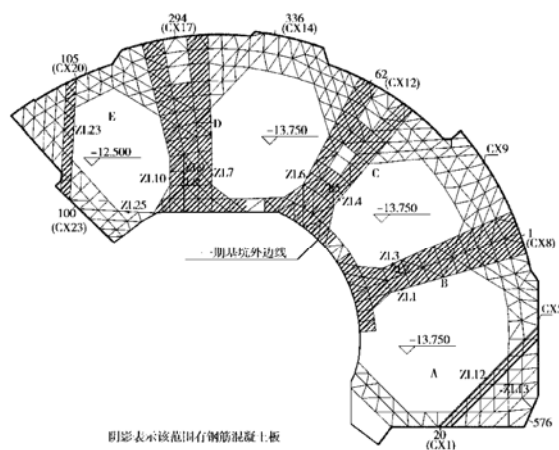


图 3 基坑平面图

Fig. 3 Plan of pit

根据工程整体进度安排, 二期工程围护桩及工程桩施工结束后, 一期主体结构 (同样设两层地下室) 已施工结束, 支护方案在两期工程交界线上未另设围护挡墙, 而是将支撑直接支承于一期地下室结构上。支护结构典型剖面图见图 4。

3.2 计算模型与计算工况

整个基坑支护结构经过一定的力学简化以后, 得到三维计算模型如图 5 所示, 图中直线即代表围护桩及支撑梁, 阴影部分即表示该范围同时设有钢筋混凝土板。在施工过程中, 支护结构各部分构件按一定顺序依次浇注及拆除, 所以图中所表示的构件并不一定同时出现某个工况的计算模型中。考虑到一期主体结构完工后其侧向刚度非常大, 二期支护结构与一期主体结构相邻的部位基本上没有水平位移, 所以在这些结点上直接施加水平向位移约束。

基坑采用分层分段施工, 概括为 12 个工况: ①A, B 两区挖土至 -4.60 m, 施工第一层支撑。②A 区挖土

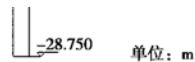


图 4 支护结构典型剖面图^[8]

Fig. 4 Profile of retaining structure

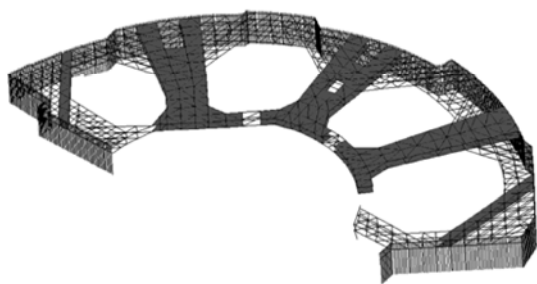


图 5 三维计算模型

Fig. 5 3D calculation model

至-9.70 m, 施工第二层支撑, C 区挖土至-4.60 m, 施工第一层支撑。③B 区挖土至-9.70 m, 施工第二层支撑, D 区挖土至-4.60 m, 施工第一层支撑。④A 区挖土至-13.75 m, 浇基础底板, C 区挖土至-9.70 m, 施工第二层支撑, E 区挖土至-4.60 m, 施工第一层支撑。⑤B 区挖土至-13.75 m, 浇基础底板, D 区挖土至-9.70 m, 施工第二层支撑。⑥A 区拆除第二层支撑并施工地下一层楼板, C 区挖土至-13.75 m, 浇基础底板, E 区挖土至-9.70 m, 施工第二层支撑。⑦B 区拆除第二层支撑并施工地下一层楼板, D 区挖土至-13.75 m, 浇基础底板。⑧A 区拆第一层支撑, C 区拆除第二层支撑并施工地下一层楼板, E 区挖土至-12.50 m, 浇基础底板。⑨B 区拆除第一层支撑, D 区拆除第二层支撑, 施工地下一层楼板。⑩C 区拆除第一层支撑, E 拆除第二层支撑, 施工地下一层楼板。⑪D 区拆除第一层支撑。⑫E 区拆除第一层支撑。

3.3 计算结果分析

选取较为典型的工况⑧的部分计算结果进行分析。在此工况中, 全场各区都已开挖到基坑底面, 其中 A 区第一层支撑和第二层支撑均已拆除, B 区、C 区第二层支撑也已拆除。第一层和第二层支撑平面的典型变形计算结果见图 6 和图 7 所示。

为考察支撑板的作用, 同时计算了仅不设支撑板、

单位: mm 工况八 58.1

图 6 第一层支撑变形计算结果

Fig. 6 Deformation of upper bracing system

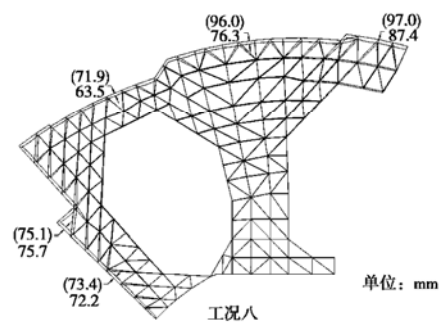


图 7 第二层支撑变形计算结果

Fig. 7 Deformation of lower bracing system

其余条件均与前述计算模型相同的情况, 该情况下的计算结果见图中括号内数字。由于在对撑和大角撑部位采用了刚度很大的梁板复合支撑, 第一层支撑中对撑附近处腰梁变形约 35 mm, 其它部位变形约 50 mm。第二层支撑只剩下 D, E 区部分, 腰梁变形普遍比第一层支撑大, 变形值在 60~80 mm。而对于不设支撑板的情况, 从图中可以看出, 与设置了支撑板的情况相比, 在第一层支撑平面中, 主对撑附近的腰梁变形量一般要增大约 20 mm, 其余位置腰梁变形量一般增大约 10 mm, 第二层支撑的变形规律也类似。

第一层和第二层支撑的轴力计算结果见图 8 和图 9, 不设支撑板情况的计算结果见图中括号内数字。

从图 8, 9 中可以看出, 第一层支撑中 B, C 区主对撑轴力在 7000~7400 kN 之间; D 区主撑轴力最大值为 4876.9 kN; E 区西南主对撑中轴力 6309.7 kN。各区及西部角撑交界处的腰梁轴力则大多在 8000 kN 以上, 西部角撑交界处轴力更是达到 11796.1 kN。第二层支撑中, D 区对撑最大轴力比第一层支撑略大, 其值为 5601.5 kN; E 区支撑及腰梁轴力比第一层支撑小。从图中还可发现, 采用梁板复合支撑体系时支撑梁的轴力明显小于采用纯支撑梁体系的情况, 说明支撑板分担了相当一部分支撑力。

沿基坑周边不同位置的围护桩各工况的变形、内

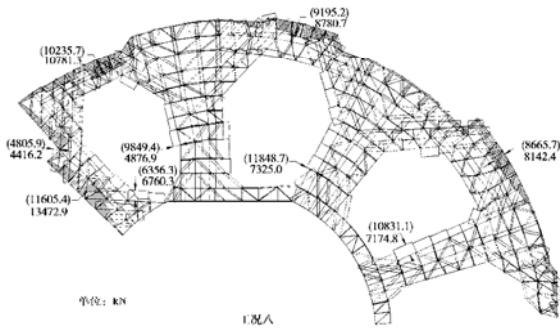


图 8 第一层支撑轴力计算结果

Fig. 8 Axial force of upper bracing system

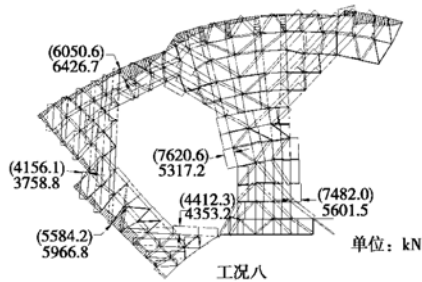


图 9 第二层支撑轴力计算结果

Fig. 9 Axial force of lower bracing system

力如图 10 所示, 围护桩编号及平面位置见图 2。

从图 10 中可以看出: 围护桩变形曲线呈明显的鼓形; 围护桩最大剪力在 600 kN 左右; 桩身最大弯矩出现在基底位置, 最大值普遍在 2000 kN·m 左右。

3.4 计算与实测结果的比较

埋设于桩内的测斜管的观测数据^[9]与本文计算结果对比见图 11, 可以看出: ①本文计算结果与观测曲线中的最大位移发生在现开挖面附近, 与软土地基上内撑式支护结构的典型变形曲线相符; ②本文计算与实际观测得出的围护桩最大位移较为接近, 但两者的桩顶位移有一定的差距。这是由于现场观测是从围护桩冠梁施工完毕之后开始的, 即观测曲线中没有包括围护桩在冠梁施工前悬臂开挖工况时发生的变量。

从轴力观测结果与本文计算结果对比 (见图 12) 看出, 支撑轴力计算值和实测值随基坑施工工况的变化规律基本相同, 在数值上实测值更大。其原因可能有以下因素: ①从支撑梁中的 4 根主筋的应变去推测整个钢筋混凝土截面的轴力这一过程有误差; ②采用的测试传感器不能同时进行温度补偿, 而在实际工程中证明温差对超长支撑梁的影响是比较大的, 有时甚至会出现同一天的不同时刻测试结果最大差值达 15%

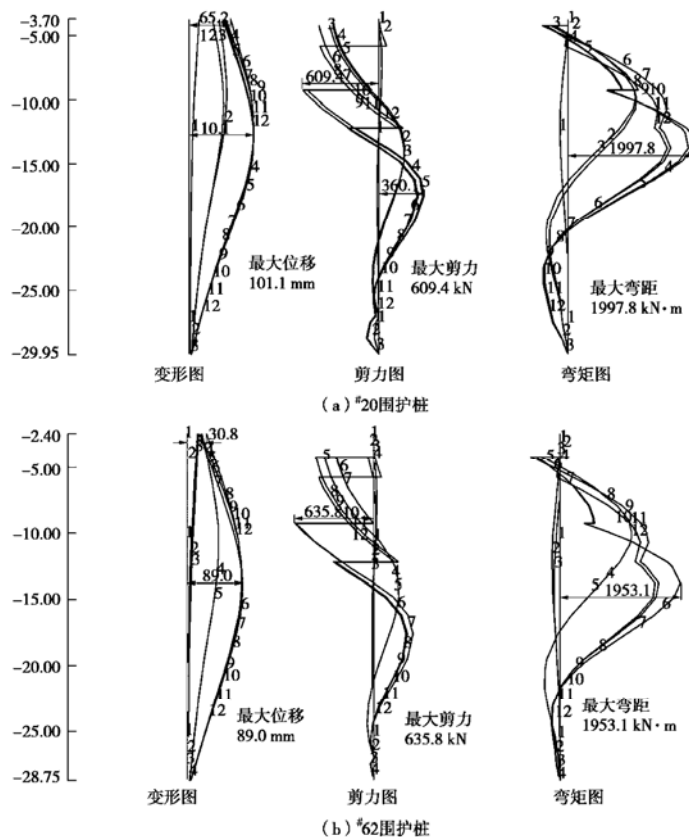


图 10 围护桩变形及内力计算结果

Fig. 10 Deformation and internal forces of retaining piles

左右; ③测试结果受测点附近施工荷载的影响较大; ④深厚软黏土中的基坑工程具有明显的流变效应, 这导致实测的支撑轴力在基坑施工后期仍逐渐增大。

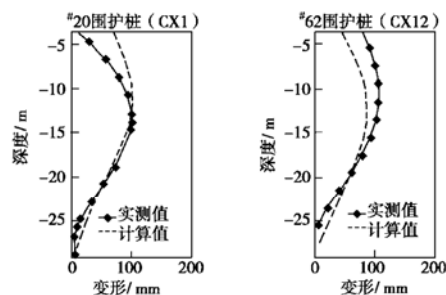


图 11 围护桩最终变形计算值与实测值的比较

Fig. 11 Comparison between computed and measured pile deflections

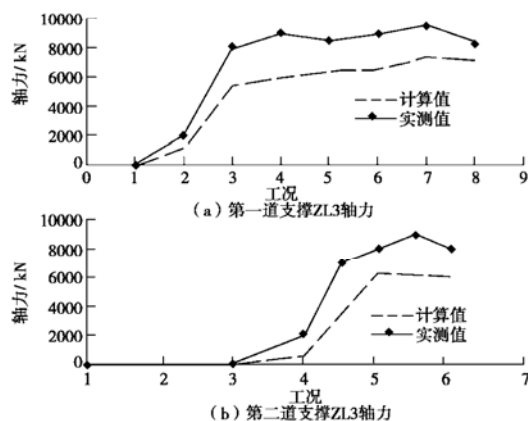


图 12 ZL3 测点支撑轴力计算值与实测值的比较

Fig. 12 Comparison between computed and measured axial forces of strut ZL3

4 结 论

(1)分段施工是软土深基坑工程控制基坑变形的一个有效措施。本文提出了考虑梁板复合支撑和分段施工效应的深大基坑支护结构三维全过程计算方法, 通过对杭州西湖文化广场二期基坑工程进行三维全过程模拟, 表明本文方法和程序完全可以适用采用梁板式支撑和分段施工的复杂基坑的全过程分析。

(2)梁板复合支撑中支撑梁与板协调工作, 共同提供围护墙的支撑力, 支撑刚度显著增大, 较大幅度地减小支护结构的变形, 同时支撑板提高了支撑平面的稳定性。该实例的计算和实测结果证明, 采用梁板复合支撑不失为控制深大基坑变形的有效方法之一。

参考文献:

[1] 吕凤梧, 徐 伟. 以现浇钢筋混凝土框架为支撑体系的支护结构有限元数值解法[J]. 建筑施工, 1996, 18(4): 37 - 40. (LÜ Feng-wu, XU Wei. Numerical simulation on the

retaining structure braced by casting reinforced concrete frame by FEM[J]. Building Construction, 1996, 18(4): 37 - 40. (in Chinese))

- [2] 顾汉梁, 张昌权, 范益群, 等. 软土地基深基坑围护结构的时空子结构分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 78 - 83. (GU Han-liang, ZHANG Chang-quan, FAN Yi-qun, et al. The space analysis of frame bracing structure in soft soil deep excavation using finite element sub-structure computing technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 78 - 83. (in Chinese))
- [3] 陆培毅, 刘 畅, 顾晓鲁. 深基坑支护结构支撑系统简化空间分析方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 471 - 474. (LU Pei-yi, LIU Chang, GU Xiao-lu. Researches on bracing system of foundation pit using simplified space analytical method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 471 - 474. (in Chinese))
- [4] 潘 泓, 曾律弦. 深基坑环梁支护结构空间分析方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 849 - 852. (PAN Hong, ZENG Lu-xian. Researches on ring beam retaining structure of deep foundation pit by spacial analytical method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 849 - 852. (in Chinese))
- [5] 陆新征, 宋二祥, 吉 林, 眭 峰. 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 487 - 491. (LU Xin-zheng, SONG Er-xiang, JI Lin, KUI Feng. 3-Dimensional FEA for the interaction between supporting structure of excavation and soil in a very deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 487 - 491. (in Chinese))
- [6] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (WANG Xu-cheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [7] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规范[S]. 1999:16 - 19. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. 1999: 16 - 19. (in Chinese))
- [8] 浙江省建筑设计研究院. 西湖文化广场二期深基坑围护结构设计[R]. 杭州, 2003. (Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute. Design of the retaining structure of the West Lake Cultural Plaza excavation[R]. Hangzhou, 2003. (in Chinese))
- [9] 浙江大学岩土工程研究所. 西湖文化广场二期深基坑开挖监测总结报告[R]. 杭州: 浙江大学, 2004. (Geotechnical Engineering Institute of Zhejiang University. Monitoring report of the West Lake Cultural Plaza deep excavation[R]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))