

# YJK 基础设计软件的最新进展

梁 博, 陈岱林, 李光金

(北京盈建科软件有限责任公司, 北京 100191)

## 1 复杂工程基础设计现状和问题分析

复杂工程基础设计中由于缺少有效的软件工具支持, 目前大都没有进行整体协同分析, 常以单项基础辅助计算软件和手工计算结合, 效率低而且存在计算模型不合理等问题。复杂工程基础设计中存在的突出问题包括: 1) 没有实现上部结构-基础-土共同分析, 在沉降计算、承载力计算、内力配筋方面存在较大计算误差; 2) 水浮力、人防计算多采用倒楼盖计算模型, 在复杂情况下不符合实际情况; 3) 带裙房多塔楼结构没有进行整体分析, 不能考虑主楼荷载对裙房部分的影响; 4) 以位移结果替代沉降, 没有进行符合规范要求的沉降验算; 5) 基础冲切抗剪分析未按规范要求进行验算, 存在浪费和安全不足两种不合理现象。

YJK 基础设计软件针对复杂工程基础设计的突出问题进行了技术攻关, 在关键计算内容上取得了多项进展。

## 2 YJK 基础设计软件主要特点

### 2.1 YJK 基础建模的主要特点

1) 统一的基础建模模块, 集成所有基础类型, 二维和三维建模均支持; 2) 提供了基于 AutoCAD 导图的快速建模机制, 支持桩、承台、筏板、独立基础、柱墩以及地质资料孔点等模型导入; 3) 提供自动辅助建模, 实现了多墙多柱下围区自动生成承台、承载力布桩等功能; 4) 筏板布置不受网格节点限制, 支持加厚区、减薄区、开洞、后浇带, 可以进行点点连接、双线延伸、设置外挑长度、区域编辑以及移动、复制、镜像等操作; 5) 增加了实用的辅助工具菜单, 包括统一修改标高、地基承载力、阶高; 自动的模型碰撞检查及合并; 自动工程量统计。

### 2.2 YJK 基础计算的主要特点

统一的“一键”计算, 程序自动识别不同的基础类型, 调用不同的方法, 对基础进行分析计算。

(1) 整体式基础: 包括筏板、桩筏、地基梁等, 调用有限元求解器计算, 可以考虑上部刚度。软件对复杂承台、复杂独基基础, 包括多柱承台、墙下承台、多柱独基、墙下独基也按照有限元方法计算。

(2) 分离式基础: 包括单柱独基、单柱承台、墙下条基等分离式基础, 调用相应的单构件基础算法。如果单柱独基、单柱承台与地基梁连接, 或者与筏板连接, 软件也将它们按照有限元方法计算, 可以考虑它们和地梁或者和筏板的协同工作。

### 2.3 YJK 基础结果输出的主要特点

#### (1) 统一的设计结果管理

所有类型的基础, 所有计算结果在同一视图下来查看和处理, 见图 1。



图 1 设计结果管理菜单

#### (2) 完整简洁的计算书

包括基本参数、荷载、受弯计算、冲切验算、受剪验算、局部受压验算、沉降计算等全部信息。

#### (3) 图形结果运用等值线、平面云图、三维变形云图

三维变形位移的云图见图 2。

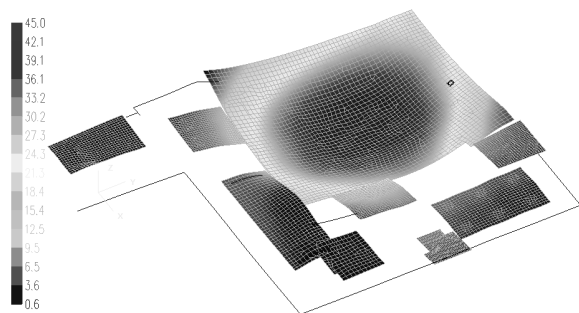


图 2 三维位移云图

## 3 YJK 在复杂联合基础设计方面的进展

YJK 基础软件支持多种复杂基础的联合计算和设计, 包括: 复杂单体基础如多墙或多柱下承台及独基; 地基梁与桩承台或独基的联合基础; 梁下布桩基础; 各种复杂筏板, 如桩筏、平筏、梁筏, 并支持加厚区、子筏板、减薄区、柱墩等; 支持交叉拉梁基础的拉梁计算和分析, 如独立基础加拉梁、承台基础加拉梁; 上述各种联合基础带防水板, 防水板支持不同标高不同厚度的多块防水板。YJK 基础设计软件支持了所有实际工程的基础应用形式, 在复杂联合基础设计上有突出优势, 具体进展包括以下几方面的内容。

### 3.1 提供了高效率高质量的自动网格划分

板有限元计算模型中一个重要的因素就是网格剖分, 设计软件一般都提供网格自动剖分算法。但是复杂联合基础中由于各种基础构件的多边形边界错综复杂、柱墙桩位置限制了网格的划分等, 目前多存在两个问题: 1) 网格划分质量差, 出现大量的角度很小或者接近 180 度的畸形三角形网格, 严重影响了计算的准确性和在复杂工程中的应用; 2) 自动剖分效率低, 网格剖分时间往往比较长, 工程规模稍大

时剖分时间达几个小时,限制了在大型工程中的应用。

YJK 提升了网格自动划分的质量,网格划分效果基本以计算精度高的四边形单位为主,见图 3。

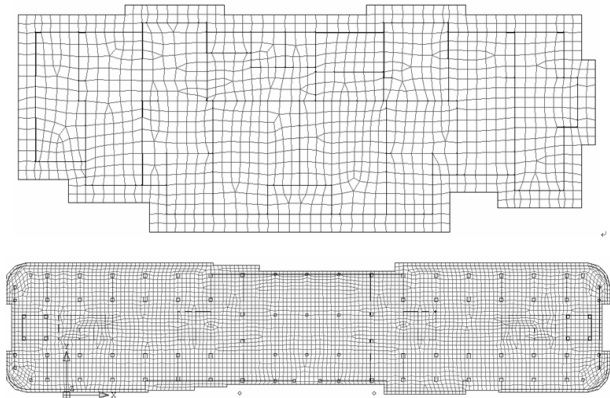


图 3 网格划分示例

盈建科经过数次攻关,提升了大规模工程的剖分效率。以某 300m×400m 的超大规模的桩筏工程项目为例,按 1m 网格划分,尺度划分时间由 30min 减少到 2min 左右。

### 3.2 高效快速的上部结构刚度凝聚

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)第 5.3.12 条和第 8.4.21 条要求,基础设计时要考虑上部基础土共同分析。YJK 将上部结构作为一个子结构进行静力凝聚来实现上部基础土共同分析。YJK 改进优化了上部结构刚度凝聚计算方法,提升效率 100 倍以上,大规模工程计算耗时由过去 2~5h 缩短至 10min 以内。

在 YJK 软件中实现上部结构-基础-土共同分析,用户需要设置两处参数:

#### (1) 生成上部结构刚度

如果基础计算考虑上部刚度的影响,则必须在上部结构的计算中生成传给基础的刚度,并输入传给基础刚度的楼层数。计算中既可以考虑上部全部楼层的刚度,也可以仅考虑用户输入的部分楼层的刚度,一般可以考虑上部结构的 2~5 层刚度就足够了。用户在【前处理及计算】【计算参数】【结构总体信息】中设置生成上部结构刚度的参数,见图 4。

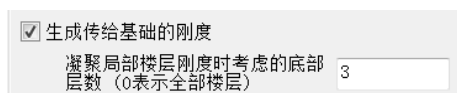


图 4 生成上部结构刚度参数界面

#### (2) 基础计算时考虑上部结构刚度

在基础计算时只要叠加上部结构凝聚刚度,其计算结果对于下部基础而言就是上下部结构共同作用计算的理论解,是完全等价的。用户在【基础建模】【参数设置】中设置是否考虑上部结构刚度,见图 5。

### 3.3 通用有限元计算核心

YJK 基础设计软件采用了通用有限元计算核心,支持基

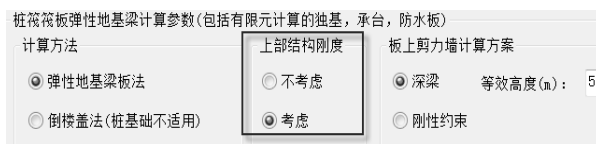


图 5 是否考虑上部结构刚度界面

于施工模拟的后浇带计算分析、支持考虑拉压刚度不同的非线性迭代计算、支持多模型计算技术,能完成大规模复杂工程的计算分析。

对于复杂联合基础,软件进行整体的有限元划分,并在各类型基础和筏板之间进行单元协调处理,不同类型基础的单元厚度不同。通过考虑不同基础刚度、不同部位不同桩土刚度的协调计算,并可以同时考虑上部结构刚度,完成基础的计算分析和设计。

### 3.4 带裙房多塔结构基础设计要点

按照规范要求,对于带裙房多塔结构基础应该建立主楼和裙房整体模型并考虑上部结构刚度进行上部结构-基础-地共共同分析。但是从实践看,工程师往往没有进行多塔结构基础设计整体分析,主要是源于缺少软件工具的支持,具体为:1) 上部结构计算软件的能力和速度有限,不支持多塔上部结构整体计算设计;2) 基础网格划分速度太慢,计算规模和速度有限;3) 缺少高效的上部结构刚度凝聚算法。

不进行多塔结构基础设计整体分析带来的问题包括:1) 承载力计算有较大误差,特别是裙房部分未考虑塔楼荷载影响;2) 抗浮设计、内力配筋计算等均存在较大误差。

YJK 可以实现带裙房多塔结构基础的整体设计,具体进展包括:1) 改进了工程拼装,快速完成多塔结构的拼装;2) 上部结构可以快速完成大规模工程计算,大规模工程使用 64 位版本计算耗时基本控制在 1h 内,计算规模可达 300 万自由度;3) 高效的上部结构刚度凝聚算法,凝聚计算时间缩减至 10min 内。

## 4 基于桩土刚度非线性分析的抗浮设计

### 4.1 当前基础抗浮设计存在的问题

近几年有不少地下室因地下水的作用而造成工程事故,主要是因为很多工程在底板抗浮设计中错误使用楼板计算模块,采用基于倒楼盖的计算模型,主要问题包括:

(1) 对地表水抗浮重要性认识不足,地下水位较低地区不进行抗浮验算。

当地下室地基为不透水的岩层且支护严密的基坑,认为不存在水浮力,而很多工程事故是暴雨地表水引起的。

(2) 只验算整体抗浮,因计算手段缺乏未考虑局部抗浮问题。

未分析结构上部荷载的分布和抗浮力的传递途径,未考虑局部范围因抗浮荷载小于水浮力,导致底板隆起,甚至造成地下室及上部结构构件大面积破坏。如果局部(比如裙房)水浮力大于上部荷载,会有较大安全隐患,基于不动支座的

倒楼盖模型是无法模拟这种情况的。

(3) 底板计算中只验算强度，不进行裂缝宽度的计算。

#### 4.2 基础抗浮设计非线性分析的必要性和原理

在基础工程中，土只能承担压力，不能承担拉力；普通桩、抗拔锚杆等拉压刚度不同，差异很大。所以如果土或者桩出现了部分受拉的情况，就应该考虑土桩抗拉抗压刚度不同的非线性迭代计算方法进行分析和设计。

非线性本质要求不能使用叠加原理，所以不能按单工况分别计算、然后荷载组合通过效应叠加的方法。应该在荷载组合后，考虑结构的实际变形，对于处于受压的区域，桩（包括锚杆）采用抗压刚度进行计算，考虑土的刚度；而对于处于受拉的区域，桩（包括锚杆）采用抗拉刚度进行计算，不能考虑土的刚度。所以要采用迭代的非线性计算方法。

以受水浮力作用加抗拔锚杆的平筏基础为例说明变刚度的过程，见图 6。

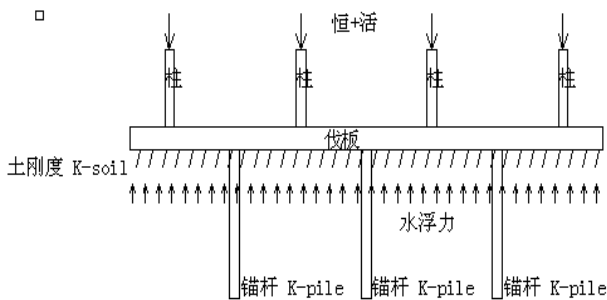


图 6 加抗拔锚杆的平筏基础

一般情况下，如果没有水浮力，整个筏板下的地基处于受压状态；如果水浮力比较小，地基压力会减小，但是仍然会处于整体受压状态。这个时候土起到支撑作用，抗拔锚杆不起作用，见图 7。

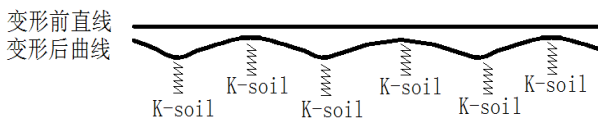


图 7 整体受压时的计算简图

随着水浮力增大，部分区域的筏板会出现上拱效应，上拱区域的土将失去支撑作用，该区域的抗拔锚杆将起拉杆作用，见图 8。

#### 4.3 需要进行非线性分析的情况及软件实现

如果地基土或者桩出现了部分受压部分受拉的情况，就应该通过考虑土桩抗拉抗压刚度不同的非线性迭代计算方

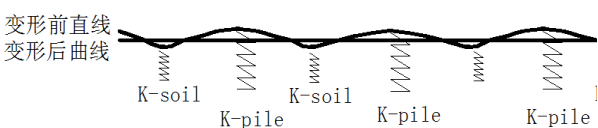


图 8 水浮力较大部分受拉时的计算简图

法进行分析。从实际工程角度来看，最常见的需要进行非线

性分析的情况包括：1) 进行人防设计的工程；2) 抗浮设防水位比较高的工程；3) 上部结构荷载特别不均匀的工程；4) 存在较大水平力荷载的工程。

YJK 软件默认对含高水的组合、含人防的组合采用非线性分析方法，用户可以在【基础建模】【计算参数】中自定义工况组合的分析属性，见图 9。

| 标准组合 |     | 基本组合 |      | 准永久组合 |       | 土刚默认组合 |       |      |    |      |  |
|------|-----|------|------|-------|-------|--------|-------|------|----|------|--|
| 序号   | 分析  | 恒载   | 活载   | 风 x   | 风 y   | 震 x    | 震 y   | 震 z  | 低水 | 高水   |  |
| 44   | 非线性 | 1.20 | 0.60 |       |       |        | -1.30 | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 45   | 非线性 | 1.20 | 0.60 | 0.28  |       | 1.30   |       | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 46   | 非线性 | 1.20 | 0.60 |       | 0.28  |        | 1.30  | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 47   | 非线性 | 1.20 | 0.60 | -0.28 |       | -1.30  |       | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 48   | 非线性 | 1.20 | 0.60 |       | -0.28 |        | -1.30 | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 49   | 非线性 | 1.20 | 0.60 | 0.28  |       | -1.30  |       | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 50   | 非线性 | 1.20 | 0.60 |       | 0.28  |        | -1.30 | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 51   | 非线性 | 1.20 | 0.60 | -0.28 |       | 1.30   |       | 0.50 | -- | 1.20 |  |
| 52   | 非线性 | 1.20 | 0.60 |       | -0.28 |        | 1.30  | 0.50 | -- | 1.20 |  |

图 9 设置非线性分析属性用户界面

使用 YJK 进行非线性抗浮验算分析的要点包括：1) 考虑上部结构刚度 因为只有考虑了上部结构刚度，才能正确模拟在高水组合或者人防组合作用下的变形和相互支撑作用。2) 准确合理地设置桩土刚度系数 由于地基土的基床系数软件默认是只抗压不抗拉的，所以不需要指定抗拉刚度为 0。对于桩，软件默认是拉压刚度相同的。所以对于需要考虑桩拉压不同的情况，需要交互指定桩的刚度。

#### 5 将基于上部结构-基础-土共同作用的迭代计算方法用于沉降计算

影响沉降的因素包括上部刚度、基础刚度以及桩土性质等，所以《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）第 5.3.12 条提出：“在同一整体大面积基础上建有多栋高层和低层建筑，宜考虑上部结构、基础与地基的共同作用进行变形分析”。

##### 5.1 沉降和有限元位移之间的关系

位移是按有限单元法计算的弹性变形，是基础构件的弹性位移。

在得到节点位移后，计算基底压力，再计算附加压力，然后采用分层总和法计算沉降。计算过程如下：1) 沉降试算确定初始桩刚度和基床反力系数；2) 总刚度方程有限元求解板的弹性位移或变形；3) 从节点位移换算成桩、土等效弹簧的变形量，得到桩反力和基底压力；4) 根据桩顶附加荷载和基底附加压力以及地质资料计算沉降。

所以从计算过程来看，位移和沉降是不同计算公式求解的结果，有本质差异。考虑到大部分情况下基础与桩土未脱离，板底桩底沉降和位移从理论上数值应该是相等的。但由于沉降计算的非线性，无法一次计算得到一致的位移和沉降，应该需要采用迭代计算方法进行求解。

##### 5.2 沉降迭代计算原理

沉降迭代的计算过程本质是桩土变刚度的过程,具体过程是:1)按平均基底压力或者平均桩反力进行沉降试算,确定初始桩刚度和基床反力系数;2)第一次有限元计算,用初始刚度进行有限元计算,并得到实际桩反力和基底压力计算沉降,用该沉降计算结果重新计算出新的桩土刚度;3)再一次有限元计算,用更新后的桩土刚度代入总刚,再计算一次桩反力和基底压力,根据桩土刚度调整后得到的桩反力和基底压力计算沉降;4)多次迭代直到位移和沉降小于允许值。该计算方法综合考虑了上部结构刚度、基础刚度、桩土的非线性性质以及基础构件之间的相互影响,能得到位移和沉降一致的结果。

### 5.3 沉降迭代在 YJK 中的实现及工程应用

YJK 软件实现了沉降和位移一致的沉降迭代计算,用户可以通过【基础建模】【参数设置】来设置,界面见图 10。

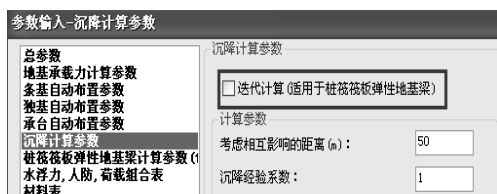


图 10 沉降迭代计算用户界面

具体技术条件是:1)软件对于沉降计算的准永久组合按独立的沉降模型进行计算,所以选择迭代计算沉降,只影响沉降的计算结果;2)沉降迭代收敛误差控制建议为预计最大沉降的 5%,最大次数一般建议在 10 次以内,软件最大允许迭代次数为 50 次;3)按“弹性地基梁板法”整体有限元计算的基础才进行迭代计算沉降,选择“倒楼盖法”进行计算时,软件不进行迭代计算沉降;4)只抗拔的锚杆是不用进行沉降计算的,用户可以修改锚杆(用桩建模)的抗压刚度小于 1000,软件对于无抗压刚度的桩不改变刚度;5)对于不负担上部结构荷载的土,比如按常规桩基设计的桩筏或者按筏板建模的防水板,也是不用进行沉降计算的,用户可以修改指定其抗压刚度小于 100,对于刚度小于 100 的土迭代中不改变刚度。

## 6 基础冲切抗剪分析的改进

基础冲切破坏是不可修复的严重破坏形式,但目前传统基础设计软件的冲切计算存在计算不合理,会给工程设计带来安全隐患。

### 6.1 基础冲切应采用实际反力计算冲切力

基础冲切应采用实际反力来计算冲切力,包括内筒冲切、墙柱冲切等。采用平均反力将不能得到实际的冲切力,导致冲切验算结果失真。

以框筒结构平板式筏基的内筒冲切为例。核心筒下基底压力较大,从核心筒向周边递减。见图 11。

对于框筒结构,核心筒、外框、裙房的荷载和刚度差异较大,导致基底压力不符合直线分布,宜采用有限元计算结

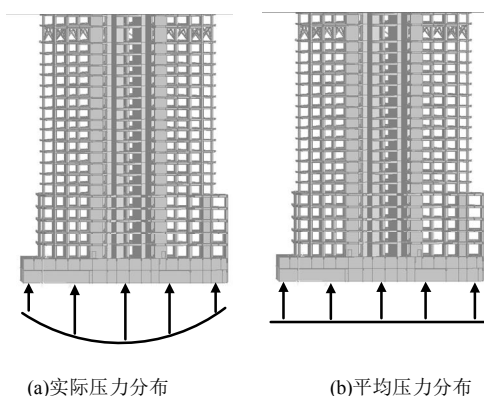


图 11 压应力分布

果得出的净反力值计算基底压力。因筒底压力较平均值大,冲切力相应减少,筏板厚度更容易满足要求。而采用平均值基底反力计算是不准确的,因为整个筏板的荷载分布不均匀的,计算没有考虑到核心筒内基底压力要远大于核心筒外基底压力,造成计算的基底压力比实际值小很多。某工程内筒冲切对比结果见表 1。

| 结果   | 平均基底压力 | 实际基底压力 |
|------|--------|--------|
| 内筒荷载 | 951396 | 936211 |
| 地基反力 | 354795 | 786117 |
| 冲切力  | 596601 | 150094 |
| 安全系数 | 0.6    | 1.89   |

### 6.2 承台的柱冲切验算必须考虑冲跨比影响

依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)第 5.9.7-1、《建筑地基基础设计规范》第 8.5.19 条规定,承台的柱冲切验算要考虑实际冲跨比影响。

以桩在  $45^{\circ}$ ~ $75^{\circ}$  冲切破坏椎体范围为例,按实际冲跨比(实线箭头范围内)和固定冲跨比(虚线箭头范围内)进行柱冲切验算,见图 12。

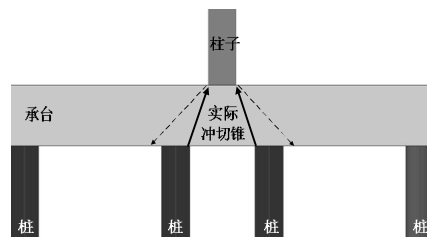


图 12 实际冲切锥示意图

计算结果差异包括:1)冲切破坏椎体不同,固定按  $45^{\circ}$  计算考虑冲跨比情况下,冲切破坏椎体大(虚线箭头范围内),抗冲切力会比实际大;2)按实际冲跨比计算,介于  $45^{\circ}$ ~ $75^{\circ}$  冲切破坏椎体范围的桩反力不应该被扣除,而固定按  $45^{\circ}$  计算考虑冲跨比情况下会错误扣除掉,冲切力计算桩会比实际值小。

所以承台的柱冲切验算必须考虑冲跨比影响,否则抗冲切力会比实际大、冲切力会比实际小,造成明显的安全隐患。