

# 佳构 STRAT 软件计算水浮力的“总量控制负弹簧模型”

上海佳构，201404

水浮力对于地下空间、地下室、水池等地下结构的重要作用，往往是结构底板配筋的控制因素。但水浮力的计算，是结构分析中的一个难点。

## 一、难点

1) 难以确定约束边界。所有重力、风、地震等作用均以结构底部为约束边界，但水浮力不以底部支承点。

2) 土弹簧的单向性。需要通过单拉计算。

3) 土体作用的复杂性。在局部层次，需要忽略土弹簧的作用，因为在一个板跨内水浮力直接作用在底板上，如果再有土弹簧分担水压力使底板内力偏小。在整体层次上，需要包含土弹簧因素，因为水浮力作用下的整体变形必然与上部结构与地基土之间的相互作用相关。

4) 抗拔桩支点与上部柱底支点的矛盾。当设置部分抗拔桩时，抗拔桩可以确定其弹簧值(仍然与荷载相关)，而上部结构对底板的支点属于不同的受力机制，而无法确定相应的弹簧值。

5) 需要考虑上部结构的协同作用。在考虑水浮力对基础的整体作用，上部结构作为悬空弹性体必须参与计算。

## 二、分析

虽然水浮力使结构具有上浮的趋势，但结构设计的措施使结构的重量(加抗拔桩拉力)大于水浮力的总和。正是在这样的前提下，水浮力的作用，实际上是在已经产生的地基压缩的基础上回弹，总体上基础与地基并未完全脱开。因此，水浮力的计算，仍是在上部结构、基础、地基三者之间相互作用的变形体计算(弹性或塑性)。

当然，这里所说的基础与地基未脱开是从结构整体层次而言，但不能排除在某些重量较小的局部水浮力产生的向上变形大于已有的压缩变形，使基础与地基脱开——这正是水浮力复杂性所在，也是水浮力必须通过整体计算的原因之一。

当上部重量小于水浮力、但设有抗拔桩时，可以认为基础与地基脱开，这是基础与地基之间仅通过抗拔桩联系，抗拔桩的变形刚度即为基础刚度。如果整个工程均采用抗拔桩，仅设置抗拔桩负弹簧即可，问题相对简单。实际上，对于带有裙房的高层结构，抗拔桩仅限裙房，主体部分仍通过重量抗浮。这样基础地基脱开的裙房抗拔桩部分，与基础地基不脱开的主体结构部分同时存在，水浮力的计算更为复杂。

当上部重量小于水浮力、且没有抗拔桩时，结构整体表现为漂浮的弹性体，这是失效的结构，不在本文讨论之列。

## 三、当前工程中水浮力计算的状况

针对埋地水池的水浮力，STRAT 软件数年前即采用在侧底边界设置负弹簧的方式，这本

身是一个创新方法。但负弹簧的值是根据经验设定的，缺乏理论依据。且各侧壁底边界的负弹簧数值相同，模型较为粗略。

STRAT 软件在 V5.0、V6.0 版本将这种方法引申沿用到建筑结构基础底板的计算。应用中需要手工将柱、墙底部设置负弹簧。负弹簧的数值经验确定，且各部分数值相同。

除 STRAT 软件的较早采用负弹簧机制外，当前针对地基基础的水浮力，均未进行整体分析。水浮力对底板的作用，主要采用倒楼盖法计算，即假定柱底嵌固的边界条件下，计算水浮力对底板的局部作用。抗拔桩的设计基本上都是根据柱底内力进行总量控制，未能在考虑结构变形情况下验算每个桩的反力。对于带裙房塔楼的基础，裙房的抗拔桩拉力与塔楼的重力作用之间的变形协调，设计上基本没有考虑。

#### 四、STRAT 软件“总量控制负弹簧模型”

STRAT 软件深入分析水浮力作用特点和机制，首次提出地下空间、基础底板、埋地水池水浮力计算的总量控制负弹簧模型：

- 1) 在上部结构与基础整体协同模型中，通过单向拉压机制分别计算重力荷载、水浮力；
- 2) 分别设置正弹簧、负弹簧。其中负弹簧仅对水浮力有效；
- 3) 假定基础设计合理，结构重力荷载与抗拔桩承载力之和不小于水浮力总量，并且上部结构各个墙柱底荷载与其下基础承载力相匹配。
- 4) 抗浮负弹簧的总量为正弹簧总量的一定倍数。
- 5) 抗浮负弹簧向抗拔桩和柱墙底集中，并根据柱墙底荷载(或者相应基础承载力)、抗拔桩承载力比例分配。

如前面的分析，合理设计的结构重量加上抗拔桩承载力不小于水浮力总量，水浮力作用产生的变形相当于已有压缩的回弹，因此负弹簧与正弹簧直接关联，且负弹簧的总量不小于正弹簧的总量。

将负弹簧向柱墙底、抗拔桩集中，使得在一个板跨内水浮力完全作用于基础底面而不被土体分担(局部层次忽略土体作用)，而仍可以反映出各部分上部荷载与水浮力不匹配而导致整体变形(整体层次土体参与作用)。

柱墙下独立基础、局部桩基一般根据单个柱墙的荷载设计，较大范围的筏板基础、桩法基础在设计中也需确保上部重心与基础重心吻合，因此上述第 3 条假定是符合实际情况的。如此同时，在相对均匀的地基条件下，地基正弹簧刚度与荷载大小相关，因此可以根据柱墙底荷载或者相应地基承载力比例确定负弹簧的分配。

#### 五、软件实现及功能

STRAT V6.2 版本实现自动添加负弹簧的功能。这项功能程序自动处理，不需要用户干预。

**设负弹簧条件：**前处理 STRAT/Prep 自动检测工程工况设置情况。当有下列情况之一：

1)存在用户设置的“外水压”工况，2)地下室外墙参数种选中“侧壁水压”项，3)基础参数中选中“有底板水浮力”项，程序将自动添加水浮力负弹簧。

**施加位置：**所有与基础底板相连的柱、墙底部点，筒体侧壁底部点。

**模型查看：**Plots 可以查看程序自动添加的负弹簧，负弹簧在 Plots 作为节点弹簧显示。

**计算过程：**STRAT/Strat 计算时，非单拉计算(弹性动静力计算、基础计算、基础协同计算)，忽略抗浮负弹簧。单拉计算中，正负弹簧均参与作用，根据一类荷载作用下的基础的变形趋势，当受压时正弹簧起作用，当受拉时负弹簧起作用。

需要注意的是，非单拉计算中外水压(水浮力)作用下正弹簧仍然起作用，此时得到的底板水浮力偏小。

单拉计算重，负弹簧虽然根据水浮力的条件确定，但在计算中程序并不是简单地将负弹簧仅用于水浮力工况。因为对于平面较大、荷载分布不均匀的大型地下空间、地下室、水池，在局部重力荷载作用下，基础仍有可能向上变形与地基托开，而水浮力作用下也有可能部分向下变形与地基接触。因此程序采用更为精细的变形控制，确定各部分正、负弹簧是否参与计算。

V6.2 版本已经将单拉计算扩充到基础协同模型中。

**基础设计和地基验算：**负弹簧模型、单拉计算等，其结果与普通计算相同，在 Plots 计算基础底板配筋，验算地基承载情况，然后在 Design 内绘制绘制基础施工图。

## 五、工程应用

STRAT 软件深入分析水浮力作用特点和机制，首次提出地下空间、基础底板、埋地水池水浮力计算的总量控制负弹簧模型：

### STRAT V7.0 基础：自动设置水浮力负弹簧，完善负弹簧机制

STRAT 能够通过单向土弹簧、单向拉压计算，实现水浮力对地下室底板、侧墙、埋地水池等结构上的水浮力作用。这是 STRAT 所特有的功能。

此前版本中，负弹簧需要用户手工输入。一般情况下，沿侧壁底部设置线性弹簧，程序根据网格剖分大小确定各点的弹簧值。用户输入的线弹簧一般都是相同值。这对于质量分布均匀、平面范围较小的水池筒仓是合适。但对于较大的水池，尤其对于长宽达数百米的地下建筑，显然过于粗略。

V6.2 版本实现自动添加负弹簧的功能。这项功能程序自动处理，不需要用户干预。

**设负弹簧条件：**程序自动检测工况设置，当有下列情况之一：1)存在“外水压”工况，2)地下室外墙参数种选中“侧壁水压”，3)基础参数中选中“有底板水浮力”项，程序将自动添加负弹簧。

**施加位置：**所有与基础底板相连的柱、墙底部点，筒体侧壁底部点。

**施加负弹簧的值：**负弹簧大小的确定，是个难点。STRAT 软件经过研究，首次提出“[总量控制负弹簧模型](#)”，该模型根据结构的特点、荷载的大小，综合确定负弹簧的具体数值，详见相关说明。

**结果查看：**程序自动添加的负弹簧在 Plots 内可以查看。

V6.2 版本进一步完善负弹簧的 Strat 计算处理机制。明确负弹簧只在单拉计算中，才参与作用。非单拉计算，如一般结构计算、基础计算、基础协同计算，程序忽略负弹簧的作用。

附注：STRAT 的基础功能能自动确定各类结构地基的土弹簧(正弹簧)，用于恒活等重力、风、地震等各类荷载作用。这是程序此前版本已有的功能。