

水池、筒仓有限元整体计算模型

谢靖中

(上海交通大学土木系)

水池、筒仓是土木工程中常见的一类构筑物，具有不同于其他土木工程结构的受力特点：

1、刚度大，对变形敏感。相对于框架结构、剪力墙结构，完全由混凝土壁板组成的水池筒仓，其结构的刚度大，因此温度等变形产生的荷载效应也大，结构对变形敏感。

2、荷载工况多，荷载作用形式复杂。常见的荷载即有结构自重、使用活荷载、内部储料表面压力、外部土压力、预应力、内外温差、动土压力、动水压力、风荷载等。此外还可能有季节温差、基础变形内力、内部气压等。这些荷载产生复杂的内力作用，例如贮料表面压力，不但产生竖向作用，而且产生水平作用。

3、结构本身为复杂的空间体。纵横交错、多向重叠的壁板、顶板，组成复杂的空间体，在复杂荷载作用下，产生纷繁复杂的内力效应。对于水池筒仓，由荷载计算内力的过程尤为复杂。

4、截面设计复杂。多种荷载作用，按不同要求进行荷载组合，荷载组合类型多。在多数情况下，还需要考虑各仓、各池储料压力的不同时作用的荷载互异的情况，则荷载组合的类型成倍增加。壁板均为双向受力，并且两个方向均需按偏压、偏拉计算配筋。

现有针对水池、筒仓的设计方法，在大多数情况下，还是一种离散化的、针对局部结构(或单个构件)的设计方法。这种设计方法存在如下问题：

1、采用理想化的边界条件。对单个壁板边支承，理想为简支、嵌固、或弹性支承。实际上，几乎所有的板边支承均为弹性支承，支承刚度值是受相邻壁板、底板、顶板影响的复杂值，甚至同一条边不同部位的刚度值都不相同。

2、未考虑整个结构的协同作用。一个方向的壁板的侧向压力，在另外方向的壁板中产生轴向力，轴向力值的大小受壁板、底板的相对刚度值影响，并且轴力沿高度不均匀分布。一个仓室的内部水压，会在相邻壁板中产生次生弯矩和轴力。尤其是内外温差产生的内力，更是结构整体协同变形的结果。采用单个壁板的计算方式，很难精确计算这些复杂内力。

结构计算的方法，是与当时的技术条件相适应的，也是一个不断发展变化的过程。相对于多高层建筑结构，水池筒仓的有限元计算，对软件有更高的要求。由于壁板需要有限元剖分，水池筒仓的计算量大。一般体量的水池筒仓，其计算模型即超过数万节点，这已经超过早期基于一维变带宽技术的有限元软件的最大解题容量。在这种条件下，对水池筒仓进行整体有限元计算是很困难的。现代稀疏存储技术的发展，使基于微机的有限元软件能达到数十万节点的计算容量，这为水池筒仓的整体有限元计算，创造了必要的技术条件。

作者所开发的通用建筑结构 STRAT 软件，具有基于稀疏存储技术的大容量求解器，和较为完善的全三维空间建模的功能，具备对水池筒仓进行有限元整体计算能力。被广泛应用于水池筒仓的设计，取得很好的效果。

水池筒仓的整体有限元计算，对结构模型建立、计算单元的选取、边界条件的设置、加载的方法，都与此前常用方法有所不同。本文将根据 STRAT 软件在水池筒仓中的应用实践，介绍水池筒仓有限元计算模型的合理选取。

一、计算单元

水池筒仓的结构构成主要的是壁板、底板和顶板，较为合理有限元计算单元是壳单元。壳单元

由平面内受力的膜部分,和平面外弯剪受力的板部分单元组成(在工程中也俗称为板单元)。壳单元的膜部分具有平面内旋转自由度,即同时具有面内两个平动、一个转动自由度。壳单元的板部分具有平外三个自由度,即两个弯曲自由度和一个垂直壳面的平动自由度。膜部分与板部分相结合,使壳单元具有空间全部6个自由度,可以模拟任意空间壁板,也可以与梁单元任意连接。

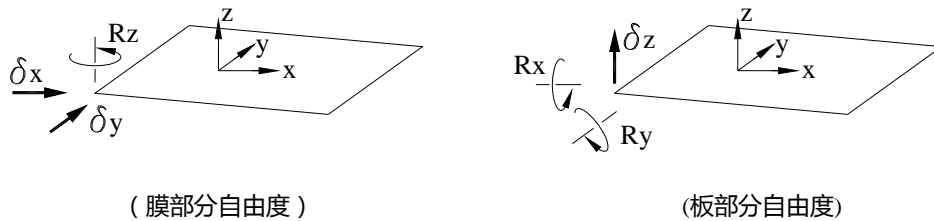


图 1、有限元中的壳单元自由度

现代壳单元中的板部分一般均同时兼顾厚、薄板,即包含有剪切变形,同时能很好地解决薄板的剪切锁定问题。

块体单元也常用来计算水池筒仓的壁板。但在实际应用中,块体单元具有局限性。首先,块体元细分壁板,计算节点更多,会增加计算量。其次,块体元计算得到的是应力,而钢筋混凝土壁板、楼板的有效的内力形态是混凝土压、钢筋拉所产生的内力,应力对混凝土板没有意义,块体的应力最终还需要积分成内力。再次,块体元计算,在一些边角部位,不可避免地会出现应力集中的现象,这种按弹性计算得到的应力集中,与实际情况不附。

除壳单元、块体元外,梁柱单元也用于模拟水池、筒仓中狭长构件。

二、整体细分壳单元模型

利用空间受力的壳单元,对水池筒仓中的壁板、底板、顶板,按两维细分,建立三位空间整体有限元细分模型。根据壳单元本身的力学性能,细分的幅度,一般是在一个受力跨度方向分成 8~10 格为宜。此外还需要根据具体软件中所开发的壳单元力学性能确定。

一个壁板的单元网格,需要与相邻壁板的网格相协调。这样,在壁板折角相交的部位,壳单元的膜部分、板部分相互传递弯矩、剪力,体现壁板相互之间弹性支撑的边界条件。因此壁板网格剖分的密度,在更多的情况下是根据相互之间网格协调确定的。

底板也需要用细分的壳单元模拟。首先,底板对侧壁板的弹性支撑,需要通过有限元计算确定。其次,在水浮力作用下底板本身受力,也需要通过计算确定。

对壁板侧面的竖向加劲肋(或扶壁柱)和水平加强带,以及起水平加强带作用的整体现浇走道板,可以用细分的壳单元模拟,也可以用梁柱单元模拟。当用梁柱单元模拟时,梁柱单元壁板壳节点处需要断开,即梁柱、壳单元网格协调,这样能够反映梁板空间协同作用的受力特性。对于圆形水池的水平加强带,可以用环形梁单元模拟,也可以用加厚的板带模拟。

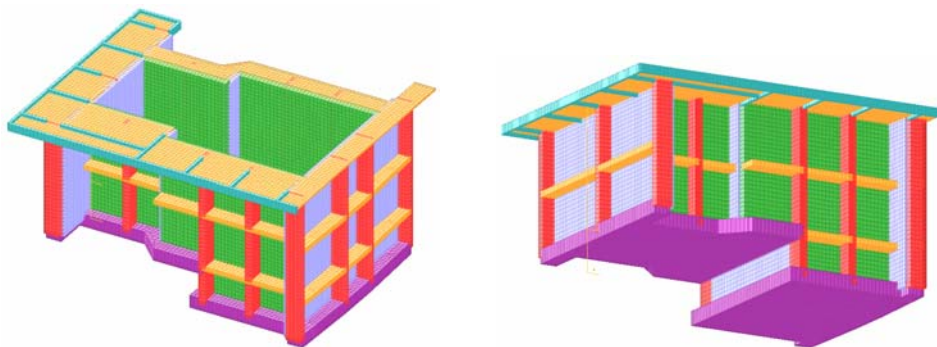


图2、某水池的整体细分壳单元模型(双向加强肋, 走道板)

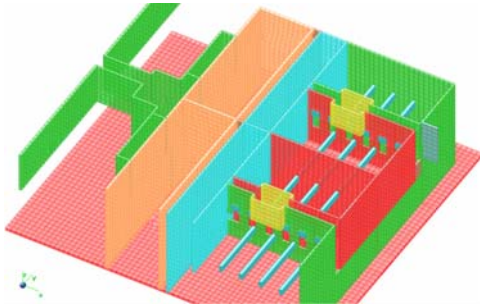


图3、地下构筑物模型
(纵横壁板剖分, 梁单元)

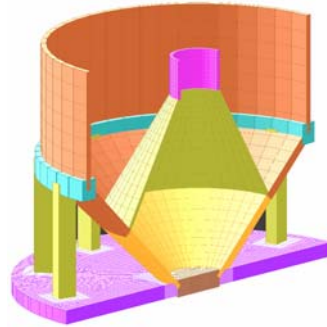


图4、循环澄清池模型
(壁板协调剖分, 带环梁、柱)

三、荷载作用

荷载是结构计算的重要方面, 全面、准确地施加各类荷载, 是取得可信的计算结果的必要条件。相对于模型简化产生的计算误差, 荷载简化造成的误差更显著, 也更直接。

在水池筒仓有限元整体计算模型中, 所有荷载均在计算之前添加到结构上。不同类型的荷载放在在不同的荷载工况中, 通过荷载组合, 有区别地参与构件界面设计。其中, 对于储料压力、水压力, 每个仓室单独设置一个工况, 便于反映不同储料方式对结构产生的荷载效应, 取得的最不利荷载组合。

水池、筒仓可能作用类型荷载如下。

- ◆ 水压力: 分内水压和外水压。水压都是与壁板面垂直的压力, 并且沿深度呈线性变化。内水压各仓室需要放置在不同工况中。外水压作用外侧壁和底板上, 作用在底板上的外水压, 就是一般所说的水浮力。

- ◆ 骨料压力: 内部颗粒状装料对仓壁产生的表面压力, 分成表面垂直压力、表面切向力、摩擦力。对于高度大于直径两倍的深仓, 骨料压力沿高度呈指数函数变化。

- ◆ 土压力: 作用于外侧壁的土体侧向压力, 沿深度线性变化。土压的荷载值, 需要考虑池外地面堆载。

- ◆ 预应力: 以抗拉为主的轴向索, 和以抗弯为主的偏心索。

- ◆ 内外温差: 又称为局部温度变形荷载, 由局部地、短期的温度差异变化产生。例如池内贮水的温度、与池外大气温度的差异, 日照引起的外表面升温等。虽然内外温差的温度变化是局部的, 但在水池、筒仓中产生的内力却是整体性的: 除外壁板的弯曲内力外, 在关联壁板、甚至所有壁板内产生轴向内力。内外温差引起的内力分布形态非常复杂, 受水池筒仓本身的结构形式影响大, 相同的温度值在不同水池筒仓中产生的变形内力不同。

- ◆ 季节温差: 又称为整体温度荷载, 是由季节性大气温度变化, 引起水池筒仓整体性膨胀或收缩, 同时受到由于温度变化相对迟缓的地基土的变形约束作用, 而产生的约束变形内力。季节温差产生的变形内力, 与水池筒仓的长度、基础条件有关, 长度越大则变形内力越大, 基础刚度越大变形内力也越大。

- ◆ 动水压力、动土压力: 贮水、池外土体在地震时对池壁产生的侧向动压力。

- ◆ 气压: 仓室密封性检测时施加的充气压力。充气压力在沿内壁均匀分布, 作用方向与壁板垂直。

- ◆ 风荷载：池仓高出地平面部分外表面的压力。风荷载与作用面垂直，沿高度变化。
- ◆ 恒、活重力荷载。
- ◆ 其它可能作用荷载。

四、地震作用计算

高出地面的水池、筒仓需要计算地震作用。在有限元整体计算模型中，可以由有两种计算地震力的方式。

一种是施加动水、动土压力的方式，将动力荷载作用等效为静力荷载。

另一种方式，是采用动力反应谱方法。反应谱方法考虑到结构动力特性与场地土的特性，是一种适合有限元计算的方法。对于水池而言，其结构的动力响应需要考虑流体、固体的耦合作用。利用流体不可压缩的特性，对于水池封闭区域有限体积的流体，可以采用简化的附加质量法考虑流体对水池动力响应的耦合作用。水池筒仓内部贮料(固体、液体)分布质量，可以按照沿侧壁均匀分布的方式处理。

在一般的多高层结构中，恒、活等重力荷载的质量，可以直接由荷载得到。但在水池筒仓结构中，内部贮料产生的表面压力的分布，与质量分布并不一致，不能直接由荷载转化为质量的方式计算质量，因此需要专门计算内部贮料的质量。在 STRAT 软件，对水压力、土压力等类型荷载，不隐含将荷载转化为质量，就是这个原因。

为了计算贮料的分布质量，在 STRAT 软件中，可以设一个单独的荷载工况，将液体的重量按池壁均匀分布，并设该工况“荷载转化为质量系数”设为 1.0，这样就可以很简便地计算贮料的分布质量。在最后进行构件设计时，再将该工况的类型设为“未定”，该工况将不参与荷载组合，不用于计算配筋。

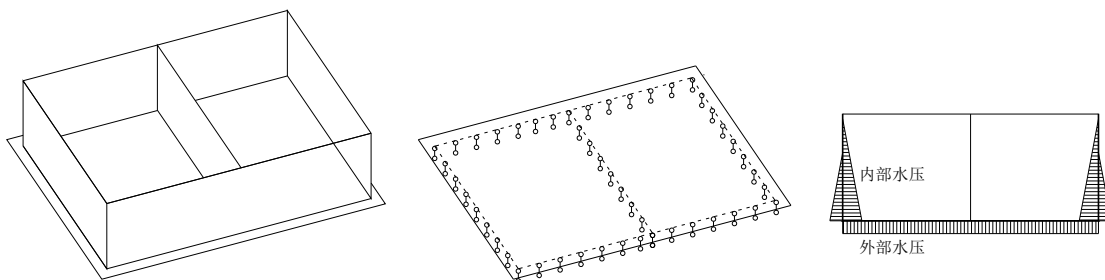
五、基础模型

基础模型涉及有限元整体模型的边界条件，对计算结果影响显著。基础计算模型的设置，需要根据水池筒仓的结构型式、基础面积大小、地基土的条件，以及作用荷载的类型综合考虑。对于一般的平面水池，可以有三种模拟水池筒仓基础的方式。

1、简单基础模型。

沿侧壁底部设竖向支撑，限制竖向变形，但不限制水平变形。再选择两个点，设置水平约束，限制水池整体的刚体变形，见图 5。这种模型适用于小型池、池本身刚度大、地基条件好的情况。

采用这种模型时，底板上不施加内水压，但施加外水压。作用于底板的内水压，可以认为直接传递到地基土，底板不直接承担内水压。



沿侧壁底部加竖向约束
图 5、简单基础模型

底板不加内部水压

在内水压作用下，底板作为侧壁的弹性支撑，结合其它相连壁板的弹性支撑，通过有限元计算得到壁板实际的弹性边界条件，从而得到壁板的实际受力。与此同时，壁板受力时底板也会产生次生变形，相应产生底板在壁板下的局部受力，见图6。在外水压(水浮力)作用下，壁板作为底板弹性支撑，使底板成为弹性支承连续板。这种模型计算结果，与一般手工计算结果一致。

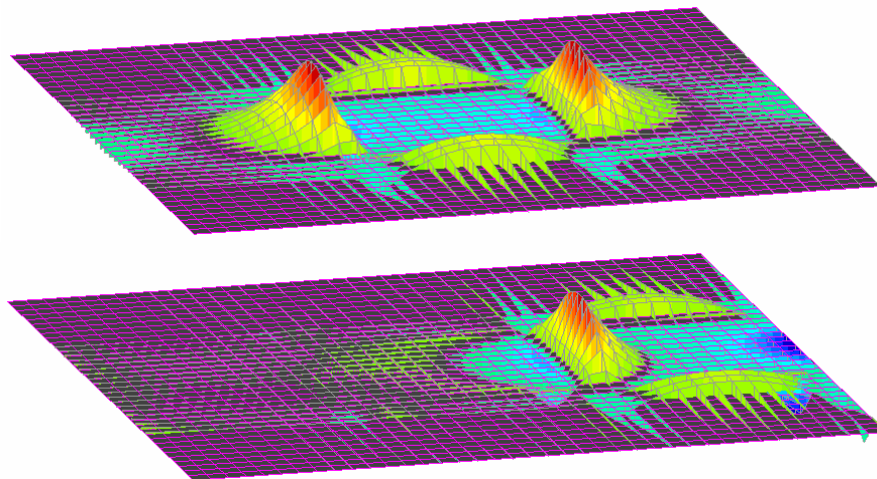


图6、内水压在底板产生的次生局部内力(STRAT 软件计算)

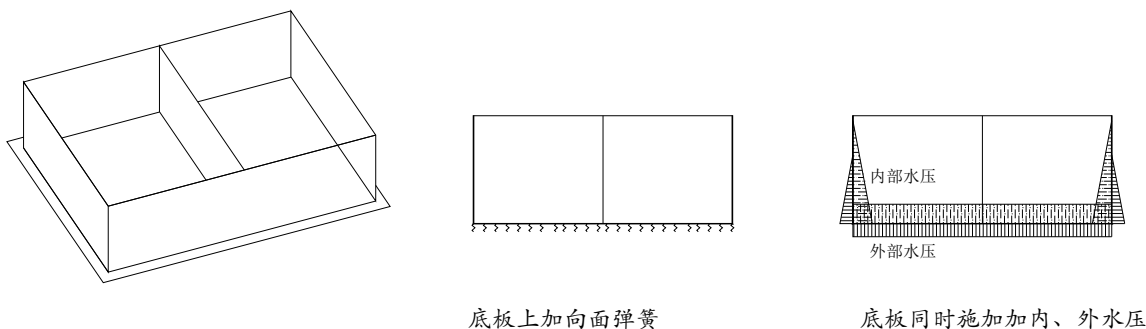
2、一般基础模型

在底板上设竖向面弹簧，模拟地基土对底板的弹性支承作用。水平向自由变形，只加必要的水平刚度变形约束，见图7。面弹簧根据地基条件确定，对天然地基采用文克尔系数。对桩基础，计算桩的弹簧刚度，弹簧类型为点弹簧。

该模型适用各种类型的水池，由于考虑了土体的弹性支撑，计算结果也更符合实际情况。采用这种模型时，底板上同时施加内水压和外水压。

但需要注意，由于土体弹簧是单向弹簧，只能承压，不能受拉。因此这些土体弹簧，需要具有单向受力的属性。即在内水压作用下，弹簧承压；而在外部水浮力作用下，弹簧不起作用。

STRAT 软件专门针对水池、筒仓结构，在新版本中开发了单向拉压弹簧的计算功能，可以很方便地模拟地基土的弹簧作用。



底板上加竖向面弹簧

底板同时施加加内、外水压

图7、一般基础模型

3、计算整体温度作用时的基础模型

整体温度荷载(季节温差)需要考虑地基土对池的水平向弹性约束，因此除了竖向面弹簧外，还需要包含水平向弹簧。

在上述一般基础模型基础上，取消水平刚体约束，加上基底的水平弹簧，就可以用于计算整体温度作用。水平弹簧仍按照地基土的文克尔系数取值。

六、荷载组合和截面设计

水池筒仓上作用荷载类型多，且多为可变荷载，各种荷载的组合尤为复杂。在多种可变荷载作用下，结构各部位达到最大的配筋所对应的荷载组合不同，甚至同一壁板中的不同部位，对应的荷载组合均不相同。

对于多仓室水池筒仓中的贮料表面压力荷载，一般需要考虑三种参与组合的方式：单仓贮料组合、隔仓贮料组合、全仓贮料组合。在这些组合中，除了贮料压力外，同时按荷载规范的规定包含必须的恒活重力荷载、风荷载和地震作用。

单仓贮料是一种基本的方式，能计算内壁板的双向受力配筋。隔仓贮料组合考虑贮料压力对相邻仓室次生内力的影响。全仓贮料组合主要用于考虑对下部支撑结构的不利影响。

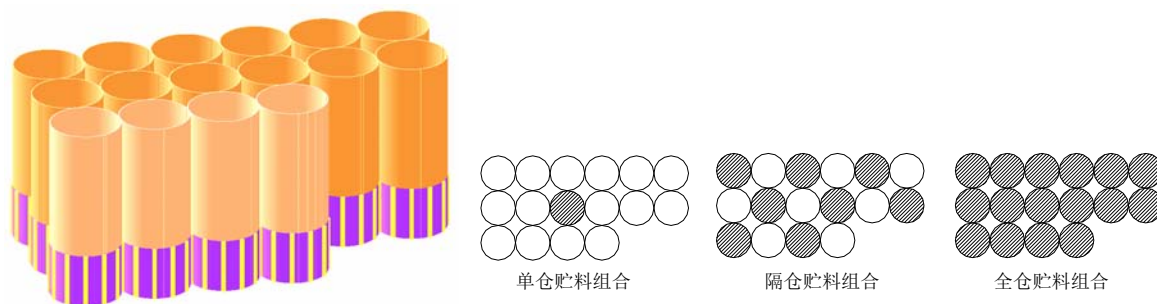


图 8、多仓室筒仓的荷载组合

外水压力一般情况下不与内部贮料压力同时组合。土压力与外水压力可以同时组合。

需要特别注意内外温差荷载，在不同形式的水池筒仓中，温度变形内力的分布形态差别很大。需要分析温度内力与内部贮料压力、外水压单独作用下工况内力符号的异同，选择最不利的组合方式。在很多情况下，较大的内外温差变形内力，会改变壁板配筋分布的形态。

为处理水池筒仓的荷载组合问题，STRAT 软件开发有“荷载互异”的处理功能，能方便地处理水池筒仓贮料压力的组合问题。将贮料内压、外水压、土侧压等工况，设为互异工况，则程序能自动进行这些工况单独与恒、活、风、地震之间的组合，这是荷载组合中工作量最大的部分。同时程序提供方便的操作工具，在程序自动形成的处理的基础上，只需手工添加隔仓、全仓组合等有限的几种组合，或者添加其它有特殊需要的组合，处理非常方便。

截面设计是计算的最终目标。对于水池筒仓的壁板、顶板、底板，都是双向受力，同时在每个受力方向，都需要按偏压、或偏拉计算配筋。一般计算软件，都能在所有荷载组合中，取得各部位最大配筋值。需要注意的是，水池筒仓侧壁在水平方向，多数情况下是偏拉受力(贮料压力在相邻壁板中产生水平拉力)。对于混凝土构件而言，偏拉是一种不利的受力形态，拉力会使配筋增大、出现较大裂缝，截面配筋必须充分考虑拉力影响。

裂缝控制是水池设计的重要因素，在 STRAT 软件中能自动计算双向裂缝，并按照控制裂缝宽度自动调整配筋。裂缝计算按照相关给排水构筑物的规范的方法，并判断偏拉受力时的偏心距的控制要求。