

倾覆力矩超详细攻略（中）

——“倾覆力矩”与“零应力区”

董礼

我们在《倾覆力矩超详细攻略（上）》中给大家介绍了：倾覆力矩的三种计算方式，今天继续介绍倾覆力矩的结果在哪查看以及其他经典问题：

2、倾覆力矩的结果在哪查看？

1 结构整体抗倾覆验算

抗倾覆力矩Mr	倾覆力矩Mov	比值Mr/Mov	零应力区(%)
7.905E+004	6.660E+001	1186.94	0.00

2 规定水平力下框架柱、短肢墙地震倾覆力矩

楼层	塔号	框架柱	短肢墙	普通墙
3	1	19.75	19.75 (0.453%)	65.18
2	1	11.83	31.58 (0.362%)	169.39
1	1	2.90	34.48 (0.263%)	283.18

3 X 向地震作用下结构的弯矩

Floor	Tower	Fx (kN)	Vx (分塔剪重比) (kN)	Mx (kN-m)	Static Fx (kN)
3	1	19.75	19.75 (0.453%)	65.18	66.10
2	1	11.83	31.58 (0.362%)	169.39	44.06
1	1	2.90	34.48 (0.263%)	283.18	0.00

如上图所示，倾覆力矩有四个位置输出：

- 1、“wmass.out”文件；
- 2、“wv02q.out”文件；
- 3、“wzq.out”文件；
- 4、【楼层结果】—【地震倾覆弯矩】。

这里面的第3项和第4项是相同内容，只不过一个是文本文件一个是图形文件。

X方向最大弯矩 = 3082.7 (kN*m)

各层 X 方向的作用力 (CQC)

Floor	Tower	Fx (kN)	Vx (分塔剪重比) (kN)	Mx (kN-m)	Static Fx (kN)
4	1	115.99	115.99 (3.128%)	452.36	113.37
3	1	145.54	226.78 (2.133%)	1285.16	151.83
2	1	146.40	315.55 (1.650%)	2609.24	112.95
1	1	178.99	361.53 (1.373%)	3082.75	23.95

按规范要求的X向楼层最小剪重比 = 0.80%

振型 1 的地震力

Floor	Tower	F-y-x (kN)	F-y-y (kN)	F-y-t (kN-m)
4	1			
3	1			
2	1			
1	1			

用户最多的疑问就是：倾覆力矩结果要在哪看，以及几个结果又为什么不一样？

首先，如果是想判断下图中这些规范限值要求的，就在“wv02q.out”中查看，该文件下输出了三种计算方式的倾覆力矩供用户进行选取，这一点在上一篇文章中已经交代。

《高规》7.1.8.1条规定：“在规定的水平地震作用下，短肢剪力墙承担的底部地震倾覆力矩不宜大于结构总底部地震倾覆力矩的50%。”

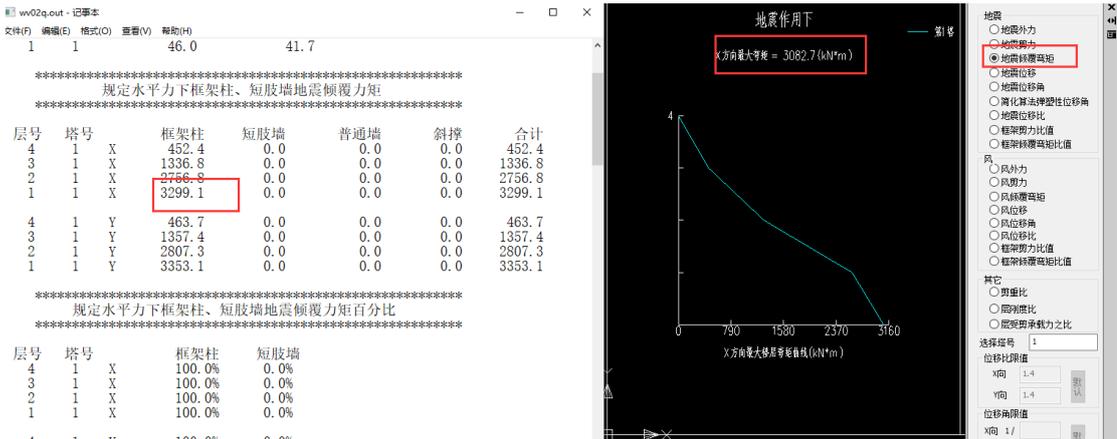
《高规》7.1.8-2条规定：“具有较多短肢剪力墙的剪力墙结构是指，在规定的水平地震作用下，短肢剪力墙承担的底部倾覆力矩不小于结构底部总地震倾覆力矩的30%的剪力墙结构。”

《高规》8.1.3条规定：“抗震设计的框架-剪力墙结构，应根据在规定的水平力作用下结构底层框架部分承受的地震倾覆力矩与结构总地震倾覆力矩的比值，确定相应的设计方法，并应符合下列规定：”。

《高规》10.2.16-7条规定：“框支框架承担的地震倾覆力矩应小于结构总地震倾覆力矩的50%。”。

《抗震规范》6.1.9-4条规定：“矩形平面的部分框支抗震墙结构。底层框架部分承担的地震倾覆弯矩，不应大于结构总地震倾覆力矩的50%。”。

而“楼层结果”中的地震倾覆弯矩为什么与“wv02q.out”文件结果的数值不同呢？



“楼层结果”中的“地震倾覆弯矩”数据来自于“wzq.out”文件中的“地震作用下结构的弯矩”。由于“wzq.out”中“地震作用下结构的弯矩”主要输出的是各个单振型下的地震力等信息，因此“wzq.out”里的地震倾覆弯矩，为先单振型按外力求倾覆弯矩，然后 CQC 组合得到的，其倾覆弯矩统计方法为《抗震规范》6.1.3 条文说明中的公式。

而“wv02q.out”中的地震倾覆弯矩为规定水平力下的结果，规定水平力计算是静力计算过程，软件直接统计倾覆弯矩结果。以下是核算过程：

$$M_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ij} h_i$$

$$3299 = 115.99 \times 3.9 + 226.78 \times 3.9 + 315.55 \times 4.5 + 361.53 \times 1.5$$



需要补充的是，根据《抗规》6.1.3-1 注解：底部指计算嵌固端所在的层。选取倾覆力矩与规范做对比时应注意。

3、“倾覆力矩”与“零应力区”

与“wv02q.out”中的倾覆力矩不同，“wmass.out”文件中输出的抗倾覆力矩 Mr 以及倾覆力矩 Mov 是求解零应力区的过程解，并不是规范要求的倾覆力矩，因此很多用户经常将两者混淆，将这两处进行比较。

```

wmass.out - 记事本
文件(F)  编辑(E)  格式(O)  查看(V)  帮助(H)
*****
                          结构整体抗倾覆验算
*****

      抗倾覆力矩Mr      倾覆力矩Mov      比值Mr/Mov      零应力区(%)
层号: 1      塔号: 1
X向风      1.560E+006      1.031E+004      151.25      0.00
Y向风      1.560E+006      1.031E+004      151.25      0.00
X地震      1.493E+006      4.727E+004      31.59      0.00
Y地震      1.493E+006      4.727E+004      31.59      0.00
    
```

《抗规》4.2.4 条以及《高规》12.1.7 等条文对零应力区进行了规定：

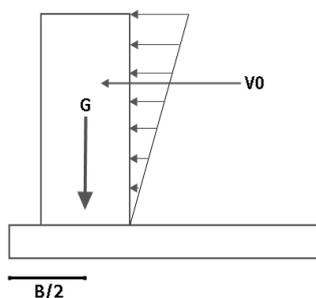
《抗震规范》4.2.4 条规定：“高宽比大于 4 的高层建筑，在地震作用下基础底面不宜出现脱离区（零应力区）；其他建筑，基础底面与地基土之间脱离区（零应力区）面积不应超过基础底面面积的 15%。”。

《高规》12.1.7 条规定：“在重力荷载与水平荷载标准值或重力荷载代表值与多遇水平地震标准值共同作用下，高宽比大于 4 的高层建筑，基础底面不宜出现零应力区；高宽比不大于 4 的高层建筑，基础底面与地基之间零应力区面积不应超过基础底面面积的 15%。质量偏心较大的裙楼与主楼可分别计算基底应力。”。

《高规》12.1.7 条文说明：对裙房和主楼质量偏心较大的高层建筑，裙房和主楼可分别进行基底应力验算。”。

《广东高规》13.1.6 条规定：“在重力荷载与风荷载标准组合下，基础底面不宜出现零应力区；在重力荷载与设防烈度地震作用标准组合下，基础底面与地基之间零应力区面积不应超过基础底面面积的 20%。筏形或箱型基础计算时，质量偏心较大的裙楼与主楼可分开考虑。”。

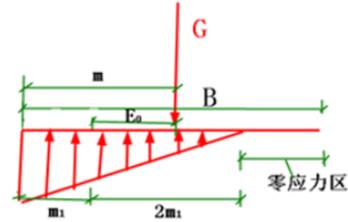
由于规范并未对零应力区公式进行规定，因此程序采用《复杂高层建筑结构设计》中的简化算法计算：即假定水平荷载为倒三角分布，合力点位置再 2/3H 处。不同的是，YJK 考虑了塔楼偏置的影响，按塔楼综合质心计算抗倾覆力臂。



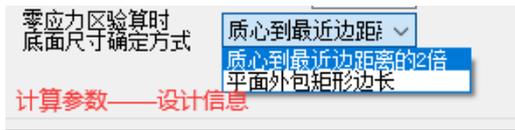
软件分别采用风和地震参与标准组合进行验算。对于风荷载组合，活荷载组合系数取 0.7；对于地震组合，活荷载乘以重力荷载代表值系数，可以考虑单独定义的构件质量折减系数。下图为零应力区公式的推导过程：

计算方法

- B 为底层底面宽度
- m 为综合质心距离边界最短距离
- E_0 为水平地震作用或风荷载与竖向荷载共同作用下基底反力的合力点到基础中心的距离
- M_r 为抗倾覆力矩
- M_{ov} 为倾覆力矩
- $M_{ov} = G \times E_0, M_r = G \times m$
- 零应力区比例 $= \frac{B-3m_1}{B} = 1 - \frac{3m_1}{B} = 1 - \frac{3(m-E_0)}{B}$
- $= 1 - \frac{3}{B} \left(\frac{M_r}{G} - \frac{M_{ov}}{G} \right) = 1 - \frac{3M_r}{BG} \left(1 - \frac{M_{ov}}{M_r} \right)$
- $= 1 - \frac{3m}{B} \left(1 - \frac{M_{ov}}{M_r} \right)$
- 对于质心刚好位于底面中心的情况, $m = \frac{B}{2}$,
- 带入上式后, 零应力区比例 $= 1 - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{M_{ov}}{M_r} \right)$

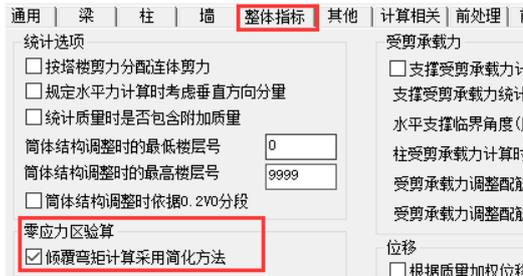


需要说明的是, 公式中的 m , 程序提供了两种方式:

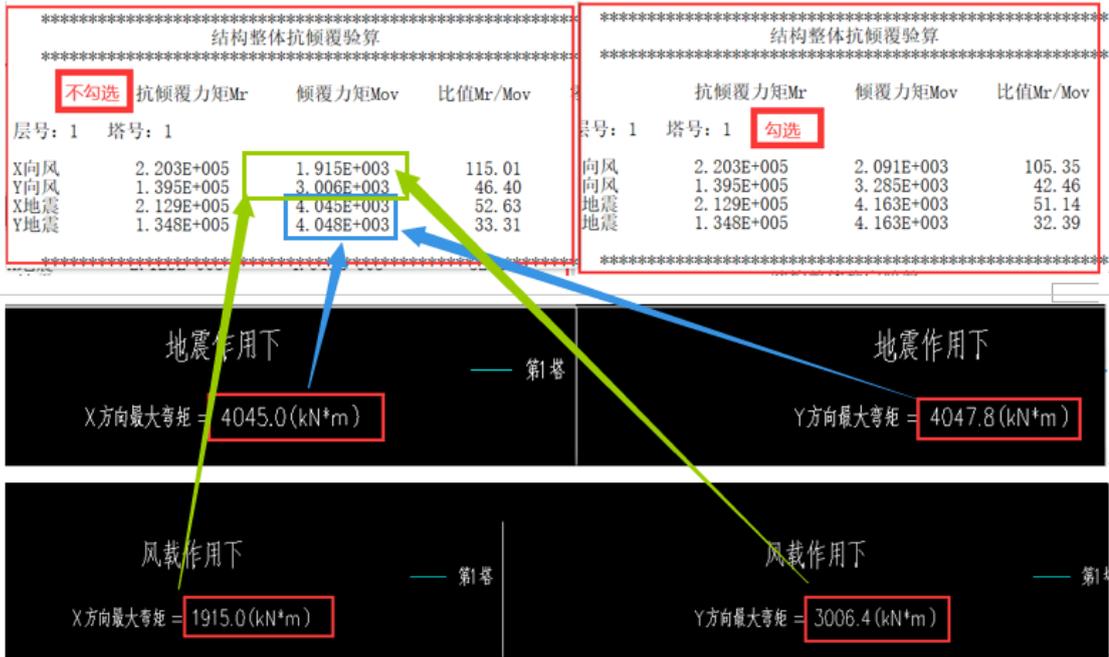


- 1) 质心到最近边距的 2 倍: 即取底部总宽度为该数值, 相当于取 $m=B/2$;
- 2) 平面外包矩形边长: 即取平面外轮廓对应的宽度。

而对于计算零应力区的倾覆力矩是否采用简化算法, 程序在【高级选项】中也进行了放开: 勾选时, 按照上面的简化算法进行计算, 不勾选, 则按软件实际计算得到的倾覆弯矩计算。



通过下面的对比可以看出, 当不勾选采用简化算法时, 程序选取【楼层结果】—【地震/风倾覆弯矩】下的结果。

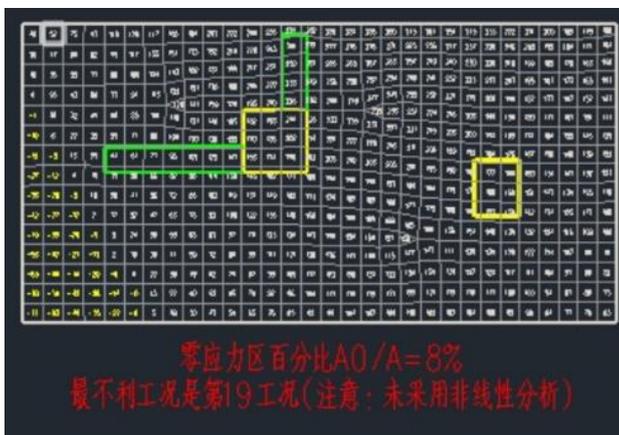


下面我们再来看两组用户常见问题：

问题 3: 上部结构“wmass.out”中未出现零应力区，而基础计算中个别独基出现零应力区，结果为什么不一样，我该以那个为准？

结构整体抗倾覆验算

	抗倾覆力矩Mr	倾覆力矩Mov	比值Mr/Mov	零应力区(%)
层号: 1 塔号: 1				
X向风	2.271E+007	3.494E+004	649.99	0.00
Y向风	1.578E+007	9.512E+004	165.94	0.00
X地震	2.215E+007	2.605E+005	85.00	0.00
Y地震	1.539E+007	2.797E+005	55.03	0.00



答：上部结构中的零应力区的计算方法为简化算法，是基于上部的外包轮廓计算的，没有考虑实际基础的尺寸大小，他是一个估算的结果，可以应用于方案阶段。

相较于上部结构，基础模块中的基础尺寸是准确的，因此基础中的零应力区为精确计算结果，最终结果推荐查看基础的零应力区结果。

软件将基础分为刚体基础和有限元基础。孤立的独基等为刚体基础；筏板、地基梁、筏板内承台、多柱承台为有限元基础。对于刚体独立基础，程序按照《地基规范》5.2节相关内容计算零应力区；对于有限元基础，当单元格的有限元结果出现 0 应力，则为零应力区。

下图为零应力区的一些技术条件，程序会在零应力区结果中给出提示。

零应力区面积校验结果

说明： 1) 筏板等按有限元计算情况下的零应力区应该采用非线性分析的结果；
 2) 筏板零应力区统计是以相联通的多筏板区域为对象进行的；
 3) 零应力区百分比统计是除含高水组合外的所有标准组合中的最不利组合；
 4) 基床系数为 0 (不考虑土作用) 的单元不参与筏板零应力区面积统计；

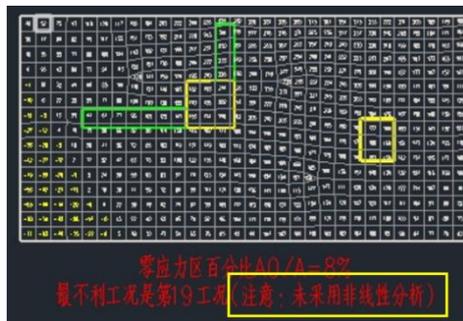
还需要注意的是：

1) 零应力区验算意味着筏板下部分区域的可能出现脱离区(零应力区)，考虑到土的单压特点，脱离区的基底压力会出现负值，由于土不能承担拉力，所以是不合理的。需用户指定所有标准组合的分析属性为非线性，用户界面见下图：

参数输入-水浮力,人防,荷载组合表

标准组合	基本组合	准永久组合	生成默认组合	增生	删行	导入	导出			
序号	分析	恒载	活载	风 X	风 Y	震 X	震 Y	震 Z	低水	高水
23	非线性	1.30	1.50						1.00	—
24	非线性	1.30		1.50					1.00	—
25	线性	1.30			1.50				1.00	—
26	线性	1.30		-1.50					1.00	—
27	线性	1.30			-1.50				1.00	—

2) 如果未采用非线性分析，软件会在零应力图上给出提示，如下图所示：

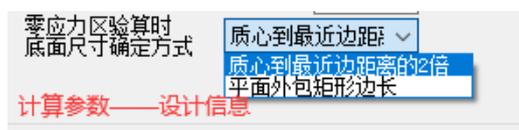


问题 4: 整体抗倾覆验算结果与 PKPM 结果不一致。

Y方向最小刚度比: 1.0000(第 10层第 1塔)					X方向最小刚度比: 1.0000(10层1塔)					
结构整体抗倾覆验算结果					结构整体抗倾覆验算结果					
	抗倾覆力矩Mr	倾覆力矩Mov	比值Mr/Mov	零应力区(%)		抗倾覆力矩Mr	倾覆力矩Mov	比值Mr/Mov	零应力区(%)	
X 风荷载	1388137.8	8235.1	168.56	0.00	pkpm	X向风	1.348E+006	8.235E+003	163.74	0.00
Y 风荷载	333917.6	24677.8	13.53	0.00		Y向风	4.433E+005	2.468E+004	17.96	0.00
X 地震	1346030.0	158960.3	8.47	0.00		X地震	1.307E+006	1.645E+005	7.95	0.00
Y 地震	324227.8	176434.2	1.84	31.63		Y地震	4.296E+005	1.798E+005	2.39	12.78

答：对于整体结构抗倾覆计算和基础零应力区的计算，当上部各层相对于底部楼层有质心偏置的情况时，PKPM 和 YJK 计算结果不同，YJK 考虑了塔楼偏置的影响，按塔楼综合

质心计算抗倾覆力臂，塔楼综合质心是按照按各层质心的质量加权计算得出的。而 PKPM 的抗倾覆力臂直接取用基础底面宽度的一半计算。改为【平面外包矩形边长】方式，计算结果基本一致。



```

*****
                结构整体抗倾覆验算
*****

```

	抗倾覆力矩Mr	倾覆力矩Mov	比值Mr/Mov	零应力区(%)	
层号: 1 塔号: 1					修改后的结果
X向风	1.348E+006	8.235E+003	163.74	0.00	
Y向风	4.433E+005	2.468E+004	17.96	0.00	
X地震	1.307E+006	1.645E+005	7.95	0.00	
Y地震	4.296E+005	1.798E+005	2.39	29.52	

>15% 不满足《高规》12.1.7

```

*****
                结构整体稳定验算
*****

```

通过两篇文章，我们详细介绍了倾覆力矩的三种方式以及“倾覆力矩”与“零应力区”等内容，在《倾覆力矩全网最强攻略（下）》中我们将介绍一些特殊构件比如端柱、支撑的零应力区统计原则，以及倾覆力矩超过 100%、倾覆力矩为 0 等常见问题，敬请期待。

参考文献：

- [1] 陈岱林、高航等. 结构软件技术条件及常见问题详解. 北京：中国建筑工业出版社，2015
- [2] 基础设计软件 YJK-F 用户手册及技术条件. 北京盈建科软件股份有限公司，2022