 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v4i7.869

Calculation and Analysis of Thermocline Column

Zhenxiang Li Yang Xiao

Shenzhen Branch of China Academy of Building Research, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

Buckling buckling analysis can be used more and more reasonably to judge the stability of the column and calculate the length coefficient, and then calculate the bearing capacity of the component, and combine the performance design requirements to carry out the medium seismic calculation to solve the calculation and analysis problem of the jump column, which can be used as a reference for similar projects.

Keywords

thermocline column; buckling analysis; buckling load factor; mesoseismic analysis

关于跃层柱计算分析

李贞祥 肖扬

中国建筑科学研究院有限公司深圳分公司，中国·广东 深圳 518000

摘 要

跃层柱运用越来越多，可通过Buckling屈曲分析更为合理地判断柱子稳定性和计算长度系数，进而计算构件的承载力情况，并结合性能设计要求，进行中震验算，解决跃层柱计算分析问题，可供类似工程参考。

关键词

跃层柱；屈曲分析；屈曲荷载因子；中震分析

1 引言

现阶段，由于建筑使用需求，楼板开大洞、柱子跨跃多层情况越来越多，规范在基于弹性分析理论基础上，柱子承载力验算中通过计算长度系数来保证结构安全，该规定有一定的适用范围，未必能保证复杂结构的安全性和计算上的准确性。对于跃层柱等关键构件，其计算长度系数、结构稳定性及承载力该如何分析呢?

屈曲分析，可认为是相对成熟的理论分析，主要用于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷。下面通过屈曲分析来介绍跃层柱稳定性情况、计算长度系数判断以及跃层柱承载力安全性情况分析。

2 屈曲分析介绍

结构失稳（屈曲）是指在外力作用下结构的平衡状态开始丧失，稍有扰动则变形迅速增大，最后使结构破坏。稳定问题一般分为两类：第一类是理想化的情况，即达到某种荷载时，除结构原来的平衡状态存在外，可能出现第二个平衡状态，所以又称平衡分岔失稳或分支点失稳，而数字处理上是求解屈曲特征值问题，故又称特征值屈曲。此类结构失稳时相应的荷载称为屈曲荷载。第二类是结构失稳时，变形迅速增大，而不会出现新的变形形式，即平衡状态不发生质变，也称为极值点失稳。结构失稳时相应的荷载称为极限荷载。

YJK 软件的屈曲分析工况是解决线性屈曲问题的，属于第一类失稳。

结构的第一类稳定问题，在数学上统一归结为广义特征值问题。YJK 软件通过对特征值方程进行求解，来确定结构屈曲时的屈曲荷载和破坏形态。屈曲特征方程为：

$$[K-\lambda G(r)]\Psi=0$$

其中，K 为刚度矩阵；G（r）为荷载向量 r 作用下的几何刚度；λ 为特征值对角矩阵；Ψ 为对应的特征值向量矩阵。

求解特征值方程，得到特征值和对应的特征值向量，用以确定屈曲荷载和对应的变形形态。每一组“特征值—特征向量”为结构的一个屈曲模式。特征值 λ 称为屈曲因子，在给定的荷载模式下，它乘以 r 中的荷载就会引起结构屈曲，即屈曲荷载为屈曲因子与给定荷载的乘积。如果 λ 为负值，说明当荷载反向时会发生屈曲。

通过屈曲分析，找到所关注构件对应的局部屈曲模态。构件的临界屈曲荷载为该局部屈曲模态对应的屈曲因子乘

【作者简介】李贞祥（1987–），男，中国福建龙岩人，本科，工程师，从事建筑结构研究。

以初始荷载。若构件的临界屈曲荷载远大于它所承受的荷载，则说明构件不会发生屈曲，满足稳定性要求。

3 工程案例

某商业中心为 5 层，结构体系为钢筋混凝土框架结构。项目地面以上多处存在局部跃层柱，其中 F2（地上第二层）~F3（地上第三层）跃层柱跨越 2 层，柱高为 10.8m、12.6m。下列重点分析 F2~F3 层区间跃层柱计算，并对这些跃层柱进行屈曲分析求出其计算长度系数，与《混凝土结构设计规范》计算长度值取包络。

局部跃层柱和拟分析的跃层柱编号示意图如图 1 所示。

3.1 跃层柱屈曲分析

采用 YJK 软件进行 Buckling 分析，计算中选取恒载（D）+0.5x 活载（L）作为屈曲分析每步加载值，对整体结构进行线性屈曲分析。分析步骤如下：首先，对跃层柱进行线性屈曲分析得到结构的各阶屈曲模态，屈曲临界荷载系数；其次，检查各阶段屈曲模态形状，确定该构件发生局部屈曲时的临界荷载系数，得到该构件的屈曲临界荷载 Ncr；最后，由欧拉临界荷载公式反算该构件的计算长度计算，即：

$$N_{cr}=\frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}\ ,\ \mu=\frac{\pi}{l}\sqrt{\frac{EI}{N_{cr}}}$$

基于屈曲分析推导跃层柱的计算长度系数。以 KZ24（最小屈曲荷载因子）为例跃层柱屈曲分析方法如下：

①采用 YJK 软件建立跃层柱模型，进行 Buckling 屈曲工况分析；

②选取跃层柱失稳状态下对应的，屈曲荷载因子。

例如，选取框架柱 KZ24 失稳对应，屈曲荷载系数 K=55.33 大于 10。

从上结果可知该柱子主要沿着截面 B 和 H 两个方向失稳，符合常规的失稳形式。

将屈曲倍数输入表 1 的计算表格，计算得到柱的计算长度系数。

从表 1 可知，跃层柱通过屈曲分析得到的计算长度系数小于规范计算长度系数取值，YJK 的截面验算结果偏于保守，柱稳定性满足要求。小结：通过对跃层柱进行屈曲分析，跃层柱最小屈曲荷载系数均大于 10，可认为稳定性满足要求，并和规范计算长度系数进行比较分析，取两者不利计算长度系数进行构件承载力分析计算。

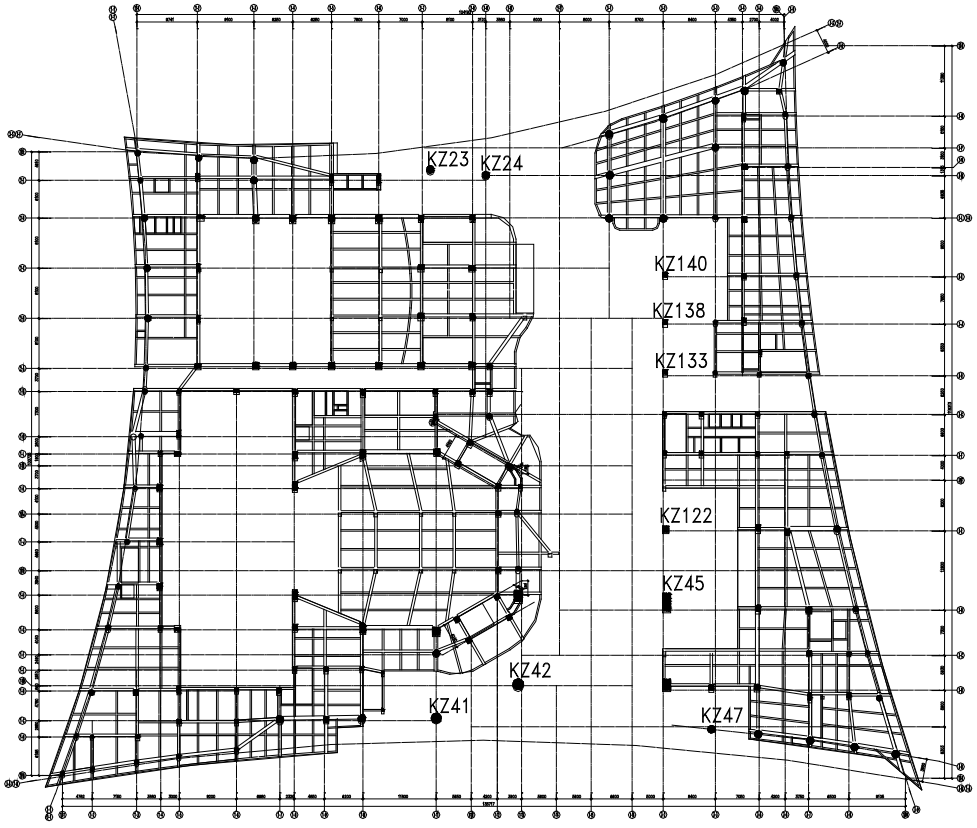


图 1 F2~F3 层跃层柱示意图

表 1 计算长度系数汇总表（2~3 层）

柱编号	KZ23	KZ24	KZ41	KZ42	KZ45
B（或直径 D）（mm）	1200（型钢柱）	1200（型钢柱）	1600	1700（型钢柱）	1300
H（mm）	/	/	/	/	2900
弯曲刚度 EI	3.42E+15	3.42E+15	1.08E+16	1.53E+16	8.85E+16
计算长度 L（mm）	12600	12600	12600	12600	21600
模型计算屈曲荷载 Pcr_Cal（kN）	6.94E+05	7.06E+05	1.59E+06	1.71E+06	1.28E+06
计算长度系数（屈曲分析）	0.55	0.55	0.65	0.75	1.21
计算长度系数（规范取值）	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
承受最大轴力 F（kN）	12639	21977	12477	29571	9520
F<Pcr	是	是	是	是	是
柱编号	KZ47	KZ122	KZ133	KZ138	KZ140
B（或直径 D）（mm）	1200	1000	800	800	800
H（mm）	/	1000	800	800	800
弯曲刚度 EI	3.41E+15	2.79E+15	1.14E+15	1.14E+15	1.14E+15
计算长度 L（mm）	12600	10800	10800	10800	10800
模型计算屈曲荷载 Pcr_Cal（kN）	7.69E+05	2.89E+05	2.19E+05	2.06E+05	1.45E+05
计算长度系数（屈曲分析）	0.52	0.90	0.57	0.59	0.70
计算长度系数（规范取值）	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
承受最大轴力 F（kN）	11603	3800	3748	4068	3958
F<Pcr	是	是	是	是	是

表格参数说明：

①理论屈曲荷载 $P_{cr}=\frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}$；

②$\mu_{cal}=1\Big/\sqrt{\frac{P_{cr_cal}}{P_{cr}}}$；

③规范计算长度系数为：1.25（中间层）。

3.2 跃层柱中震分析

根据本项目选定的性能目标为 C，在设防烈度地震作用下结构预期的性能状况如表 2 所示。

本次中震验算的主要对象为关键构件跃层柱，需满足中震抗弯弹性要求。根据小震设计下得到的配筋计算各主要构件的受弯承载力，验算构件的震后性能状况是否达到预期性能水准的要求。跃层柱的受弯承载力采用空间的 N—M—M 包络面来反映。

跃层柱均属于压弯构件，由于地震作用方向的不确定，理论上所有柱均属于双向压弯构件，截面的压弯承载力应为双向偏压下的承载力，即空间的 N—M—M 包络面。通过观察组合效应坐标点与 N—M—M 包络面的位置关系判断截面承载力是否满足要求，效应点位于 N—M—M 包络面内可认为构件尚未屈服，否则认为构件进入塑性状态。

设防地震参数取值见表 3。

表 2 中震震后预期性能状况

结构抗震性能水准	宏观损坏程度	损坏部位		设防烈度地震
3	轻度损坏	关键构件	与悬挑结构连接的框架柱	无损坏（抗剪弹性、抗弯弹性）
			跃层柱	无损坏（抗剪弹性、抗弯弹性）
			托柱框架梁	无损坏（抗剪弹性、抗弯弹性）
		普通构件	大跨度框架梁	轻微损坏（抗剪弹性、抗弯不屈服）
			其他框架柱	轻微损坏（抗剪弹性、抗弯不屈服）
			桁架杆件	轻微损坏（抗剪弹性、抗弯不屈服）
		耗能构件	框架梁	轻度损坏、部分中度损坏（部分抗弯屈服，抗剪不屈服）

表 3 设防地震参数取值

主要控制参数	取值
中梁刚度放大系数	按 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》取值
连梁刚度折减系数	0.5
周期折减系数	1.0
计算振型数量	30
地震作用分析方法	CQC
是否考虑刚性楼板假定	不考虑
中震状态	中震弹性
地震影响系数最大值	0.23
特征周期	0.4s
内力调整	不考虑与抗震等级有关的增大系数
抗震调整系数γ_{RE}	中震弹性按弹性设计取值
是否组合风荷载	不组合
材料强度取值	中震弹性取设计值
荷载分项系数	中震弹性按规范取值；保留组合系数

中震弹性参数取值：

①地震影响系数最大值按照规范提供数值；

②保留荷载分项系数，保留组合系数；

③取消组合内力调整（取消强柱弱梁，强剪弱弯调整），即内力调整系数取 1.0；

④抗震调整系数 γRE 同小震；

⑤材料强度采用设计值；

⑥不考虑风荷载；

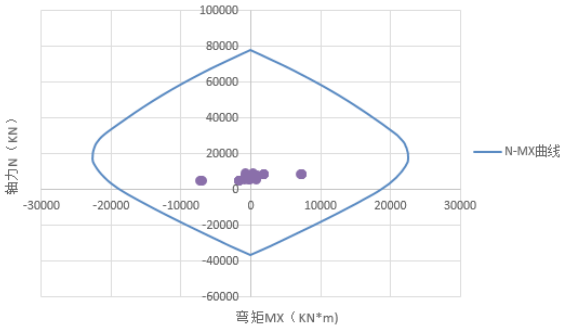
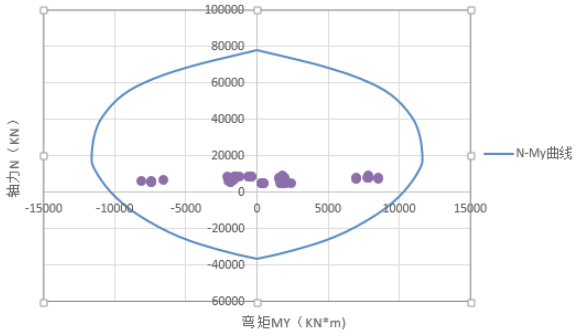
⑦不考虑构件的抗震等级。

提取考虑中震荷载组合后内力值，采用截面分析方法（PM 曲线法）对关键位置柱子（跃层柱）进行截面验算。柱 PM 曲线由 XTRACT 程序生成，该程序是基于纤维模型与自定义材料本构对钢—混凝土组合截面进行分析，其程序在广大超限工程中有所应用。程序自动考虑构件压弯效应，可以绘制出 PMM 曲面，柱弯矩—轴力点在 PMM 曲线中，表明处于安全状态。

选取部分跃层柱中震正截面弹性验算如表 4 所示。

表 4 部分跃层柱中震正截面弹性验算

F2~F3 层

楼层	P-Mx	P-My
KZ41 1600 型砼圆柱		

注：图表中柱轴力压力为正，拉力为负。

以上各图表明跃层柱关键构件正截面压弯富余度较大，满足中震弹性的要求。

4 结语

对于跃层柱的计算分析，可通过 Buckling 屈曲分析，进行判断其构件稳定性，并可通过比较规范柱计算长度系数取值，考虑两者包络值来最终判断柱计算长度系数，进而计算跃层柱构件承载力值。如果是超限分析，考虑性能设计，评判跃层柱为关键构件，可结合中震相关验算，进行后续分析验算。笔者主要从对跃层柱计算更为合理角度考虑，希望对于其他设计师遇到类似项目可有所帮助。

参考文献

[1] 盈建科建筑结构计算软件用户手册-v2.0-2014[Z].北京盈建科软件股份有限公司,2014.

[2] GB50010—2010 混凝土结构设计规范(2015版)[S].

[3] GB50011—2010 建筑抗震设计规范(2016年版)[S].