

CiSDesigner 接力 SAP2000 在复杂工业建筑中的应用

筑信达 杨硕

1. 概述

CiSDesigner 是用于钢筋混凝土构件正截面设计与校核的设计工具软件^[1]，软件实现了正截面极限状态承载力基本理论的独创快速算法，将截面纤维化，正确高效地计算各种截面类型与配筋形式的 PMM 相关包络面。本文以一个 SAP2000 的复杂工业建筑模型为例，筛选出部分按照构造配筋和非构造配筋的柱，方式一通过 SAP2000 输出的正截面配筋总面积给出手算的实配筋方案，方式二通过 CiSDesigner 读取 SAP2000 中柱的设计内力给出配筋方案。对比发现，使用 CiSDesigner 读取 SAP2000 中柱的设计内力得到的配筋方案不仅满足承载力要求，对应的钢筋总面积更小，并且给出配筋方案的种类多、效率更高。

1.1. 工程背景与概况

示例模型为一个复杂的工业建筑，如图 1 所示，结构为混凝土框架-剪力墙结构，模型中混凝土柱共 557 根，抗震等级为 I 级，混凝土强度等级为 C35，纵向受力钢筋为 HRB400，模型中考虑恒、活、风、车辆移动荷载以及地震作用等工况，设计的荷载组合共 84 个。

原模型采用 SAP2000 进行柱的正截面承载力校核分析，校核发现有部分柱子的 D/C 比（承载比）超过了限值要求。若采用 SAP2000 进行混凝土柱的正截面设计时，则程序只输出正截面配筋总面积，无法生成具体的截面配筋方案，并且 SAP2000 中定义柱截面的布筋方式时无法区分角筋与中部钢筋的直径。

为解决以上难题，联合 SAP2000 强大的分析能力与 CiSDesigner 的构件正截面设计功能，来高效完成柱正截面的配筋方案输出。

以下是 SAP2000 分析完成后，对模型中所有的柱进行正截面设计，分别筛选出部分构造配筋柱以及非构造配筋柱，根据 SAP2000 计算配筋面积进行手工实配钢筋，数据如表 1、2 所示。

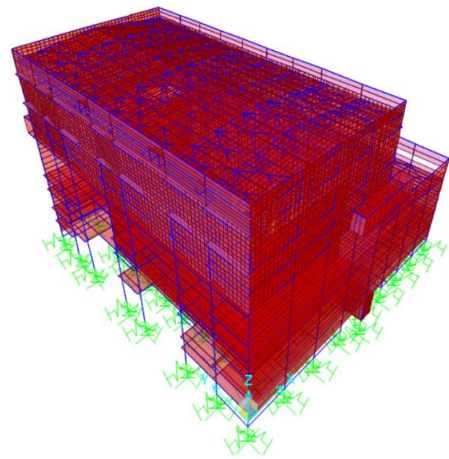


图 1. 复杂工业建筑模型

表 1. 非构造配筋的柱

柱截面	截面尺寸 B*H(mm2)	沿 2、3 轴纵 筋数量	位置	控制荷载组合	柱的 ID	计算配筋面积 (mm ²) 及配筋率 ρ	手工实配方案 (mm ²) 及 配筋率 ρ
Z50x50	500X500	5 和 5	中	AF1EX	3099	4829.16 (1.93%)	d20*16=5027.2 (2.01%)
Z60x160	1600X600	7 和 12	中	AF1EX	1395	11040 (1.15%)	d22*34=12923.4 (1.35%)
Z70x70	700X700	6 和 6	中	AF1EY	407	5532.44 (1.13%)	d20*20=6284 (1.28%)
Z70x100	1000X700	7 和 6	边	AF1EY	469	7400.75 (1.06%)	d22*22=8362.2 (1.20%)
Z160x80	800X1600	11 和 6	边	AF1EX	1238	20163.96 (1.57%)	d32*30=24126 (1.89%)

表 2. 构造配筋的柱

柱截面	截面尺寸 B*H(mm2)	沿 2、3 轴 纵筋数量	位置	控制荷载组合	柱的 ID	计算配筋面积 (mm ²) 及配筋率 ρ	手工实配方案 (mm ²) 及 配筋率 ρ
Z50x50	500X500	5 和 5	角	BF1EY	1570	2875 (1.15%)	d16*16=3217.6 (1.29%)
Z60x160	1600X600	7 和 12	中	BF1EY	651	10080 (1.05%)	d20*34=10682.8 (1.11%)
Z70x70	700X700	6 和 6	中	BF1EY	18	5145 (1.05%)	d20*20=6284 (1.28%)
Z100x70	700X1000	7 和 6	边	BF1EY	3263	7350 (1.05%)	d22*22=8362.2 (1.19%)
Z160x80	800X1600	11 和 6	边	BF1EY	1247	13440 (1.05%)	d25*30=14727 (1.15%)

2. SAP2000/CiSDesigner 的正截面设计

2.1 SAP2000 中的柱配筋设计流程

SAP2000 默认显示输出的高亮设计配筋结果，是取所有设计组合结果的包络值，这也是工程师最关心和需要的结果。对于柱，SAP2000 默认按照双向偏心受压来考虑其正截面承载力计算，轴心受压柱与单向偏心受压柱将由双向偏心受压算法退化后计算。

SAP2000 中，柱正截面承载力设计的步骤如下：

- 获取分析内力 N 、 M_1 、 M_2 ，然后自动调整为设计内力 N_F 、 M_{1F} 、 M_{2F} ，分析内力的调整包括强柱若梁、二道防线的调整以及其它地震作用放大的调整。
- 读取柱两端同一主轴的组合弯矩设计值，取绝对值较大端为 M_2 ，绝对值较小端为 M_1 ，依据（GB50010-2010）6.2.3 验算是否考虑 $P-\delta$ 效应，并根据（GB50010-2010）6.2.4 计算 C_m 和 η_{ns} 。
- 根据（GB50010-2010）6.2.5 确定设计弯矩 M_d 。
- SAP2000 根据截面应变分布，生成 PM 曲线，通过旋转截面中性轴进一步形成 PMM 曲面球^[2]。
- 按《混凝土结构设计规范》（GB50010-2010）6.2.15 条计算轴心受压承载力，并修正 PMM 曲面。
- 计算 D/C 比，获取计算配筋面积。
- 验算最大/最小配筋率，输出实配钢筋的计算面积，并验算轴压比限值。

PMM 曲面球的生成形状与柱截面上钢筋的摆放位置有关，SAP2000 中进行柱截面配筋设计的时候，需指定截面沿局部 2、3 轴方向的钢筋的具体布置方案，不同的布置方案影响生成 PMM 曲面球的形状以及总的截面设计配筋面积。

2.2 SAP2000 柱布筋方式的影响

需注意的是，定义柱截面布筋方式时，SAP2000 无法单独指定角筋与中部钢筋不同的直径。所以，根据截面总配筋面积，设计生成的柱截面上所有钢筋直径相同，程序将基于该布筋形式生成柱对应的 PMM 曲面球。

对于程序输出的总配筋面积，应按照柱截面 2、3 方向的钢筋根数来分配。即使采用相同的钢筋面积，也不能随意替换其它布筋方式。因为不同的布筋方式将改变 PMM 曲面球的形状，可能使设计内力点落在 PMM 曲面球的外部，给工程带来安全隐患。

以表 1 中的非构造配筋柱 Z50x50（ID=3099）为例，假如采用面积等效但布筋方式不同的方案来替代，如图 2 所示，再使用 CiSDesigner 软件进行校核，可以发现承载比已超过限值。

实际工程中，工程师依据有限的经验，无法提前预估柱截面 2、3 方向钢筋的布置形式。这给工程师使用 SAP2000 进行柱截面设计带来一定的困难。

2.3 CiSDesigner 中的柱配筋设计流程^[1]

P-M-M 曲面作为构件破坏状态的承载力包络图，是构件设计的基石。CiSDesigner 实现了一种快速生成钢筋混凝土构件截面 P-M-M 相关面的算法，直接对截面应变关系分析，其采用截面各个极限状态时的极限应变分布关系作为 P-M 曲线的控制点，并高效实现 P-M-M 的包络面，如图 3 所示。CiSDesigner 采用该算法，对每根柱子每个截面按照实际的应力-应变关系进行高效的设计配筋，并提供若干不同的布筋方案，具体的设计流程如下：

- 将混凝土截面、钢筋、型钢都纤维化。
- 计算截面参数、混凝土属性、回转半径、附加偏心距、最大最小配筋率等。
- 形成各种满足规范要求的配筋方案并按照配筋面积由小到大排序。
- 按照下列顺序计算每个配筋方案。

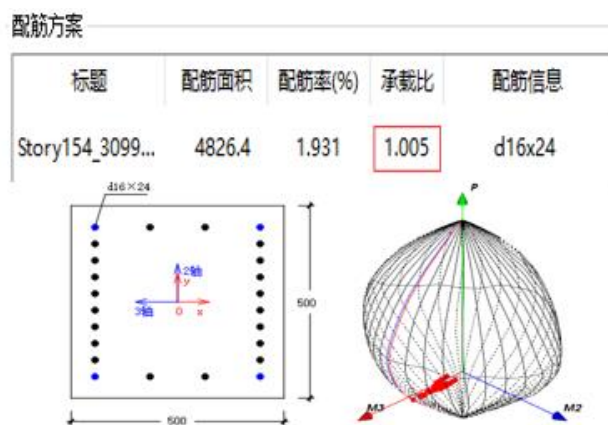


图 2. CiSDesigner 校核的结果

- a) 计算三维 P-M-M 包络图
 - b) 调整 P-M 曲线及内力值
 - c) 计算每个内力的指定角度的 P-M 曲线
 - d) 计算每一个设计内力的承载比
5. 承载比的配筋方案数量达到用户指定的数量，则结束计算过程。

在满足规范规定与用户设置的前提下，通过优化配筋参数，给出多种配筋方案供用户选择，且选筋满足规范的配筋率和钢筋间距的构造要求。

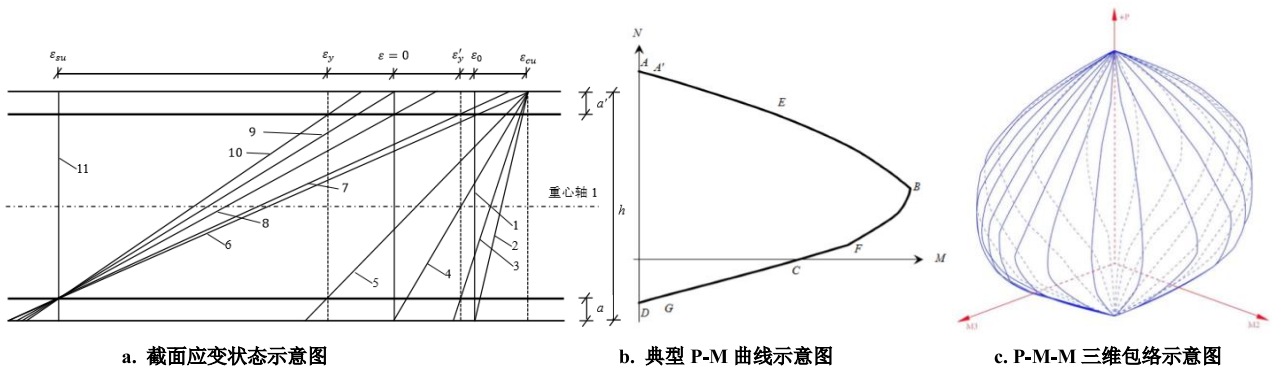


图 3. PMM 相关包络面

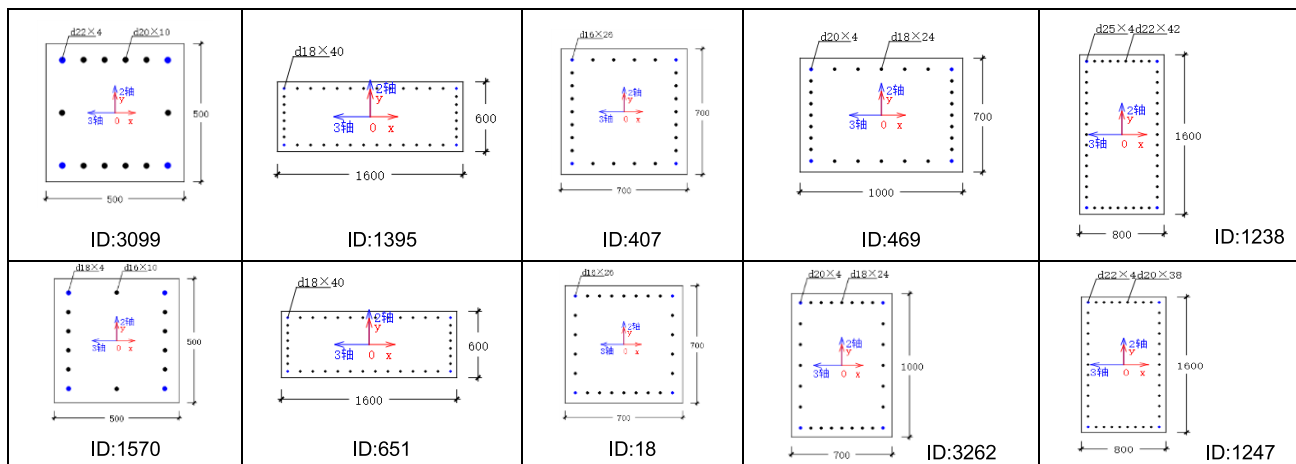
2.4 CiSDesigner 联合 SAP2000 进行柱设计配筋

通过以上介绍，我们可以借助 SAP2000 专业的分析能力配合 CiSDesigner 的强大设计功能，进行柱配筋方案的设计。CiSDesigner 支持 ETABS、SAP2000 工程模型的导入，可自动导入所有的截面类型和设计内力以及计算长度、抗震等级等相关信息，并为每个构件提供多种配筋方案。目前支持的截面类型有：矩形、圆形、工字型等普通钢筋混凝土柱截面；L 形、T 形、十字形、Z 形等异形钢筋混凝土柱截面；型钢混凝土柱截面；矩形、T 形梁截面；一字形剪力墙截面；任意形状的柱截面类型。

使用截面设计软件 CiSDesigner 读取 SAP2000 模型中柱子的设计内力并进行设计配筋，选择 MM 图算法进行承载能力比验算，部分柱子（与表 1 和表 2 中柱的 ID 相同）的配筋方案，如表 3 所示。

表 3. CiSDesigner 的柱截面设计配筋

柱的 ID	柱截面	优选配筋面积 (mm ²)	对应的配筋方案	承载比
3099	Z50x50	4662.4	4d22+10d20	0.994
1395	Z60x160	10180	40d18	0.317
407	Z70x70	5228.6	26d16	0.997
469	Z100x70	7364.8	4d20+24d18	0.955
1238	Z160x80	17927.8	4d25+42d22	0.999
1570	Z50x50	3029	4d18+10d16	0.322
651	Z60x160	10180	40d18	0.424
18	Z70x70	5228.6	26d16	0.675
3263	Z100x70	7364.8	4d20+24d18	0.226
1247	Z160x80	13460	4d22+38d20	0.565



3 CiSDesigner 与 SAP2000 的柱配筋结果对比

表 1 和表 2 根据 SAP2000 输出的截面配筋总面积，给出了实配筋布置方案，从 CiSDesigner 的众多配筋方案中优选出总面积最小的配筋方案，具体的配筋面积如表 3 所示，对比结果如表 4 所示。

表 4. 配筋面积对比

柱的 ID	柱的截面	a.CiSDesigner 的优选配筋方案 (mm ²)	b.SAP2000 对应的实配方案 (mm ²)	配筋面积误差 (b-a) / b(%)
3099	Z50x50	d22*4+d20*10=4662.4	d20*16=5027.2	7.3
1395	Z60x160	d18*40=10180	d22*34=12923.4	21.2
407	Z70x70	D16*26=5228	d20*20=6284	16.8
469	Z100x70	d20*4+d18*24=7364.8	d22*22=8362.2	11.9
1238	Z160x80	d25*4+d22*42=17927.8	d32*30=24126	25.7
1570	Z50x50	d18*4+d16*10=3029	d16*16=3217.6	5.9
651	Z60x160	d18*40=10180	d20*34=10682.8	4.7
18	Z70x70	d16*26=5228.6	d20*20=6284	16.8
3263	Z100x70	d20*4+d18*24=7364.8	d22*22=8362.2	11.9
1247	Z160x80	d22*4+d20*38=13460	d25*30=14727	8.6

依据上表中的数据，对比方案 b 和 a 的截面配筋面积，a 为 CiSDesigner 软件读取 SAP2000 中柱的设计内力，计算并给出满足承载力、符合规范构造要求的配筋方案，其配筋面积相对于手算实配方案 b 的面积可低 4.7%~25.7%。

无论是构造配筋还是非构造配筋的柱截面，通过 CiSDesigner 读取 SAP2000 中柱的设计内力得到的配筋方案，在满足承载力、规范要求的前提下，正截面配筋总面积可以更小，使用钢筋量更省。

4 小结

通过以上对 SAP2000、CiSDesigner 的配筋流程介绍，充分利用 SAP2000 强大的分析功能，使用筑信达开发的 CiSDesigner 接力 SAP2000 输出的构件设计内力，通过其独创的算法快速生成 PMM 曲面承载力包络图，并提供若干不同的布筋方案。上面的案例表明，联合两个软件进行框架截面的配筋方案输出，具备计算速度高效、截面配筋经济、配筋方案多样的特点。欢迎工程师们登录北京筑信达工程咨询有限公司的官网下载并试用。

参考资料

- [1] 北京筑信达工程咨询有限公司. 筑信达截面设计软件 CiSDesigner(V1.7.2)技术说明书. 2020, 3.
- [2] Computers & Structures Inc. SAP2000 v22.0.0, Concrete Frame Design-ACI318-14.