

CiSDetailer

筑信达施工图设计软件

- 筑信达施工图设计软件 CiSDetailer
- ETABS 与 Perform3D 弹塑性分析功能对比示例
- 减震结构附加阻尼比的计算方法
- DeepEX 应用案例——上海某地铁深基坑开挖工程
- 常规桥梁阶段施工模拟在 CSiBridge 中的实现



主 办：北京筑信达工程咨询有限公司

主 编：李 立

美 编：张翠莲

北京筑信达工程咨询有限公司

地址：北京市石景山区古盛路 36 号泰然大厦 4 层 408 室

电话：010-68924600 技术热线：010-68924600-200

传真：010-68924600-8

网址：www.cisec.cn 在线支持：support.cisec.cn

邮箱：support@cisec.cn (技术支持)

sales@cisec.cn (产品销售)

筑信达武汉分公司

地址：武汉市洪山区武珞路 717 号兆富国际 805 室

电话：027-8788 6890 / 8788 6891

区域代理

北方区

北京华思维泰克科技有限公司

联系人：王博

手 机：159 1060 8694

华东区

上海江图信息科技有限公司

联系人：薛平

手 机：137 0172 6345

华南区

广州倍益软件技术有限公司

联系人：田茂金

手 机：137 6071 9009

华中区

武汉百思通科技有限公司

联系人：叶亮

手 机：139 9561 6575

西南区

金橡果科技成都有限公司

联系人：刘宇

手 机：185 1282 0985

Content

筑信达

筑信达施工图设计软件 CiSDetailer

1



ETABS 与 Perform3D 弹塑性分析功能对比示例

9

减震结构附加阻尼比的计算方法

21

ETABS 中组合柱的定义分析与校核

26

常规桥梁阶段施工模拟在 CSiBridge 中的实现

33



基于美标的螺栓承载力计算

36



土的排水不排水特性及排水固结过程模拟方法

40



DeepEX 应用案例—上海某地铁深基坑开挖工程

45

新版发布

CiSDetailer 评估版发布

53

ETABS 18.1.0 新增及改进功能

53

活动报道

SAP2000 实例操作培训班圆满落幕
(天津、石家庄、太原站)

54

征稿启示

55



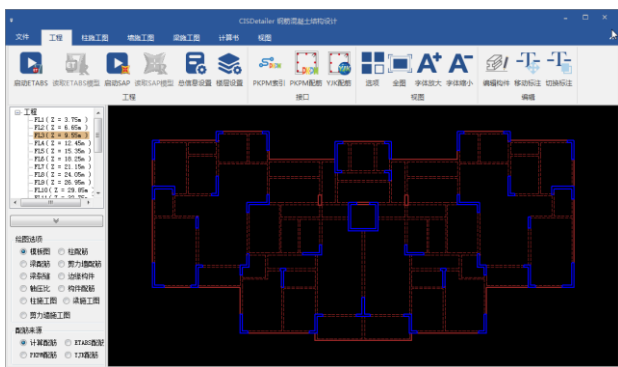
筑信达施工图设计软件 CiSDetailer

筑信达 孙雪艳 刘慧璇

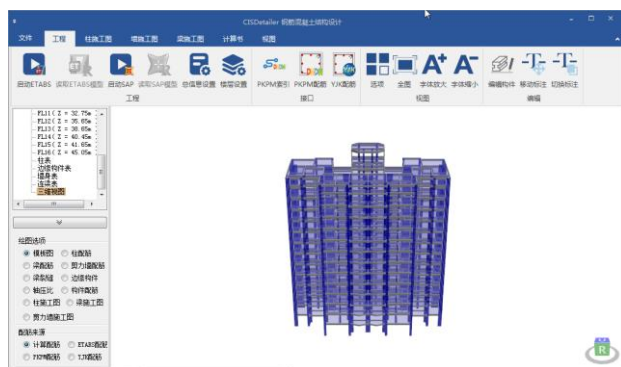
ETABS 和 SAP2000 是应用广泛的结构设计软件，其强大的分析和设计能力得到广大工程师的认可，但在施工图和结果输出方面还不能完全满足中国工程师的需求。筑信达施工图设计软件 CiSDetailer（以下简称 CiSDetailer）是北京筑信达工程咨询有限公司开发的施工图设计软件，读取 ETABS/SAP2000 软件的模型信息和分析设计结果，在软件中进行模型显示、构件类型判断、配筋计算、构件 PMM 双偏压配筋计算、边缘构件划分、裂缝计算、施工图绘制、舒适度计算、计算书输出等，并提供多软件配筋结果的对比，不仅解决 CSI 软件的后处理问题，也是功能完善的施工图设计软件。本文将介绍 CiSDetailer 的主要功能。

1 模型导入

CiSDetailer 能**一键导入 ETABS 和 SAP2000 软件的模型**，包括模型参数、设计内力、设计结果等。导入过程中将自动完成框架梁、框架柱等构件的合并与划分，将有限元模型转换为与实际工程情况一致的设计对象模型。通过左侧的树形目录可快速切换显示各层平面图及三维视图，如图 1 所示。用户可在“总信息设置”与“楼层设置”中查看结构体系、风荷载、地震荷载、构件内力调整等信息，用户也可自行设置配筋信息。后续的配筋计算、施工图设计工作都将基于导入的模型数据和用户设置去完成。



(a) 平面视图



(b) 三维视图

图 1 CiSDetailer 视图显示

2 独立配筋与细节输出

模型成功导入后，CiSDetailer 可完成梁、柱、墙构件的**独立配筋与设计细节的输出**。

2.1 梁

程序通过将同一轴线上的梁构件组成梁串，根据支撑关系、参数设置等自动完成**梁的合并、主次梁的判别**。用户也可人为调整梁构件的搭接情况。

程序按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)进行梁构件的**正截面承载力和斜截面承载力计算**，并显示计算配筋结果，如图 2 所示。用户可查看其设计细节，也可人为指定是否考虑地震，对设计过程和结果进行复核，如图 3 所示。

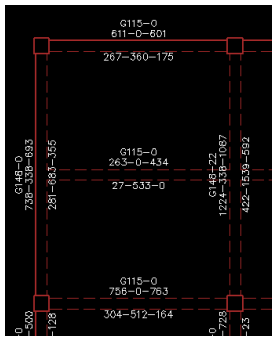


图2 梁配筋结果图

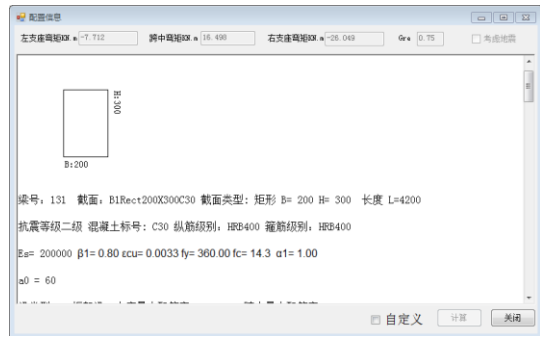


图3 设计细节

2.2 柱

程序基于柱构件的 PMM 曲面，按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) 附录 E 方法进行柱的双偏压设计。用户可通过 PMM 曲面对话框查看构件的设计细节，如图 4，查看构件的 PMM 曲面及设计控制内力，输出 PMM 曲面的原始数据。PMM 曲面对话框中内置了截面设计器，如图 5，用户可以自定义任意截面形状，指定型钢、开洞、及钢筋排布，并输出自定义截面的 PMM 曲面、进行承载力校核。

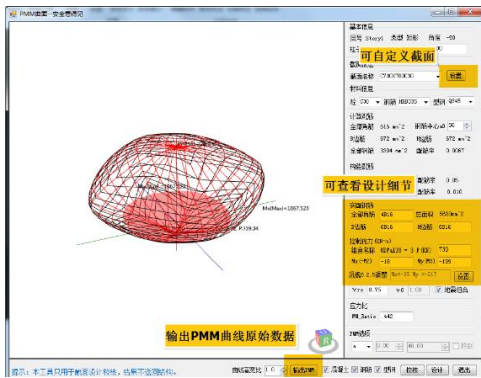


图4 PMM 曲面对话框

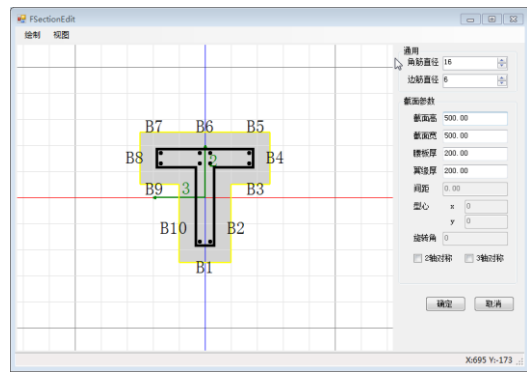


图5 截面设计器

2.3 墙

程序可自动判别连梁、墙肢，一键完成 ETABS 中墙肢、连梁标签的指定。

对剪力墙进行设计时，程序将自动完成边缘构件的划分。边缘构件识别原则为：

- 1) 墙肢的两端形成边缘构件；
- 2) 墙肢的端部不与其他墙肢相交时为暗柱；
- 3) 墙肢的端部有壁柱时为有端柱边缘构件（端柱）；
- 4) 墙肢的端部与另外一个墙肢的中部相交时形成的边缘构件为有翼墙边缘构件（翼墙）；
- 5) 两个墙肢的端部相交时形成转角墙；
- 6) 梁与墙肢垂直相交时形成暗柱（梁端固结）；
- 7) 墙身上的柱自然形成边缘构件。

程序按照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010) 计算暗柱纵筋、墙身分布筋，按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) 进行连梁正截面承载力和斜截面承载力计算。用户可查看墙垛、边缘构件等配筋计算细节，部分细节输出如图 6 所示。



墙垛配筋计算

墙垛暗柱配筋面积计算:

墙垛标签: P3, 包含1个墙垛, $bw=300$ (第一个墙垛宽度), 长度 $lw=4000$

墙垛长/墙垛宽 > 4, 钢筋合力点 $aa = \text{Max}(200, lw / 20, bw * 0.5) = 200$

墙垛有效高度 $hw0 = lw - aa = 3800$

$f_{yw} = 270, \alpha_1 = 1, \beta_1 = 0.8, E_s = 210000, \epsilon_{cu} = 0.0033, f_c = 14.3$

墙垛暗柱配筋计算控制组合: UMW139 - 3, 测站位置: Bottom, 弯矩 $M = -204143852.092631$, 轴力 $N = 2892312.35420742$

墙垛轴压比计算:

墙垛底部重力代表值轴力 $P = -1171702.69539114$

墙垛轴压比 $U_c = 1.2 * 1171702.69539114 / 1200000 = 0.0819372514259542$

地震组合 $\gamma_{RE} = 0.85$, 轴力 $N = 0.85 * 2892312.35420742 = 2458466$, 剪力 $V = 0.85 * 241969.563968751 = 205674$, 弯矩 $M = 0.85 * -204143852.092631 = -173522274$

抗震等级: 二级

竖向分布筋配筋率 $\rho_{wv} = 0.0025$ (高规 7.2.17)

分布筋面积 $A_{sw} = \text{area} \rho_{wv} = 1200000 * 0.0025 = 3000$

(a) 墙垛

边缘构件配筋信息

边缘构件编号: G8

设置约束边缘构件界限值: 根据高规 表 7.2.14 设置约束边缘构件轴压比限值, 抗震等级: GradeII, 轴压比限值 0.3

边缘构件处于底部加强部位, 墙垛最大轴压比 $U_c = 0.0819372514259542 < 0.3$, 所以该边缘构件为构造边缘构件

边缘构件边缘构件编号: G8 是独立的边缘构件

边缘构件 1 配筋计算:

类型: b, 包含2个墙垛端,

计算配筋面积:

墙垛端部计算配筋 $A_{sWallEnd} = \text{墙垛P3计算配筋}3600 + \text{墙垛P6计算配筋}1100 = 4700$

==>边缘构件编号: G8 计算配筋面积等于各子边缘构件计算配筋面积之和 $A_{sEdge} = 4700$

边缘构件 1 构造配筋:

该边缘构件阴影部分面积 270000

非约束边缘构件构造配筋 (抗规 6.4.5-2 高规表 7.2.16) 二级抗震加强部位, $A_{sG} = \text{Math.Max}(0.008 * 270000, A_{sG}(6g14)) = 2160$

==>边缘构件编号: G8 构造配筋面积等于各子边缘构件构造配筋面积之和 $A_{sEdgeGou} = 2160$

==>边缘构件编号: G8 纵向配筋面积 $A_s = \text{Max}(4700, 2160) = 4700$

该边缘构件配筋率 = 1.74%

该边缘构件为非约束边缘构件, 依据高规 7.2.16, 构造筋为 GJ8-150

(b) 边缘构件

图 6 剪力墙设计细节

3 一键对比多款软件配筋结果

结构设计时, 用户经常需要使用多种软件进行配筋结果的校核, 而 CiSDetailer 可帮助用户一键对比多款软件设计结果。程序可通过读取 PKPM 的索引文件和结果文件、以及 YJK 的结果文件, 读取 PKPM 和 YJK 配筋结果。

同时, 程序通过导入的 ETABS 或 SAP2000 模型数据, 读取 ETABS 或 SAP2000 配筋结果。

这样, CiSDetailer 可以有多种配筋数据的来源: CiSDetailer 独立配筋结果、ETABS/SAP2000 配筋结果、PKPM 配筋结果、YJK 配筋结果。用户只需切换绘图选项和配筋来源, 即可在视图窗口原位显示同一构件不同软件的配筋结果, 进行对比和校核, 如图 7 所示, 结果对比直观, 方便用户快速选取最优配筋方案。

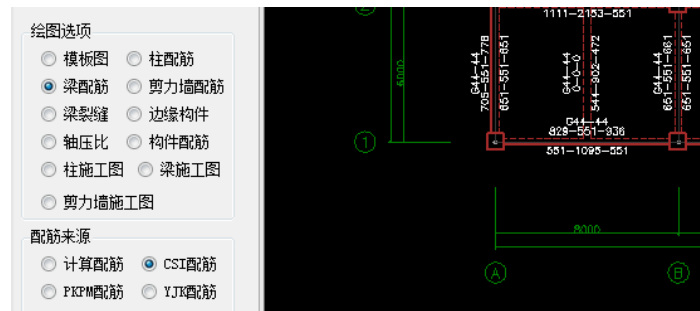
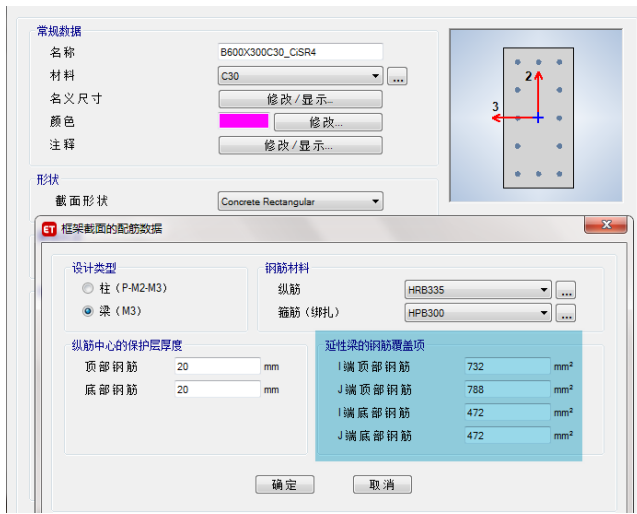


图 7 配筋来源显示

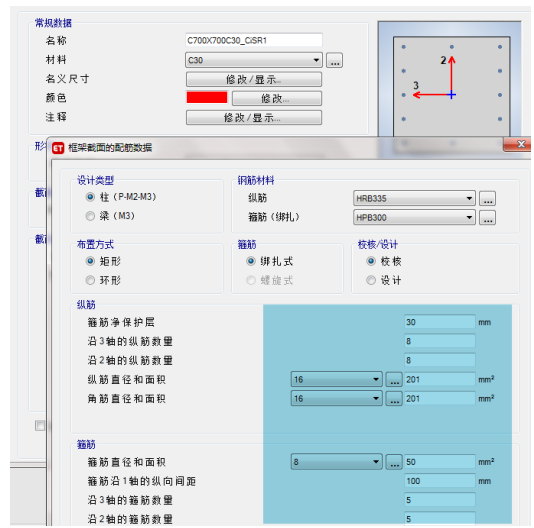
4 实配钢筋导入 ETABS 和 SAP2000

确定配筋方案后, 可以将实配钢筋导入 ETABS 和 SAP2000 中, 用于后续的弹塑性分析。带有配筋数据的截面将以“xxx_CiSRx”的格式重新命名, 添加在 ETABS 和 SAP2000 的截面列表中, 如图 8。若配筋方案再次修改, 用户可以取消之前导入的配筋。





(a) 自动导入的梁截面实配钢筋数据



(b) 自动导入的柱截面实配配筋数据

图 8 导入实配钢筋

5 施工图输出

5.1 梁

程序根据配筋结果和梁跨数据对梁归并、选筋，生成**梁平法施工图**，如图 9 所示。用户可人为修改图中的配筋信息，修改后实时显示。可输出 pdf 和 dxf 格式的施工图。

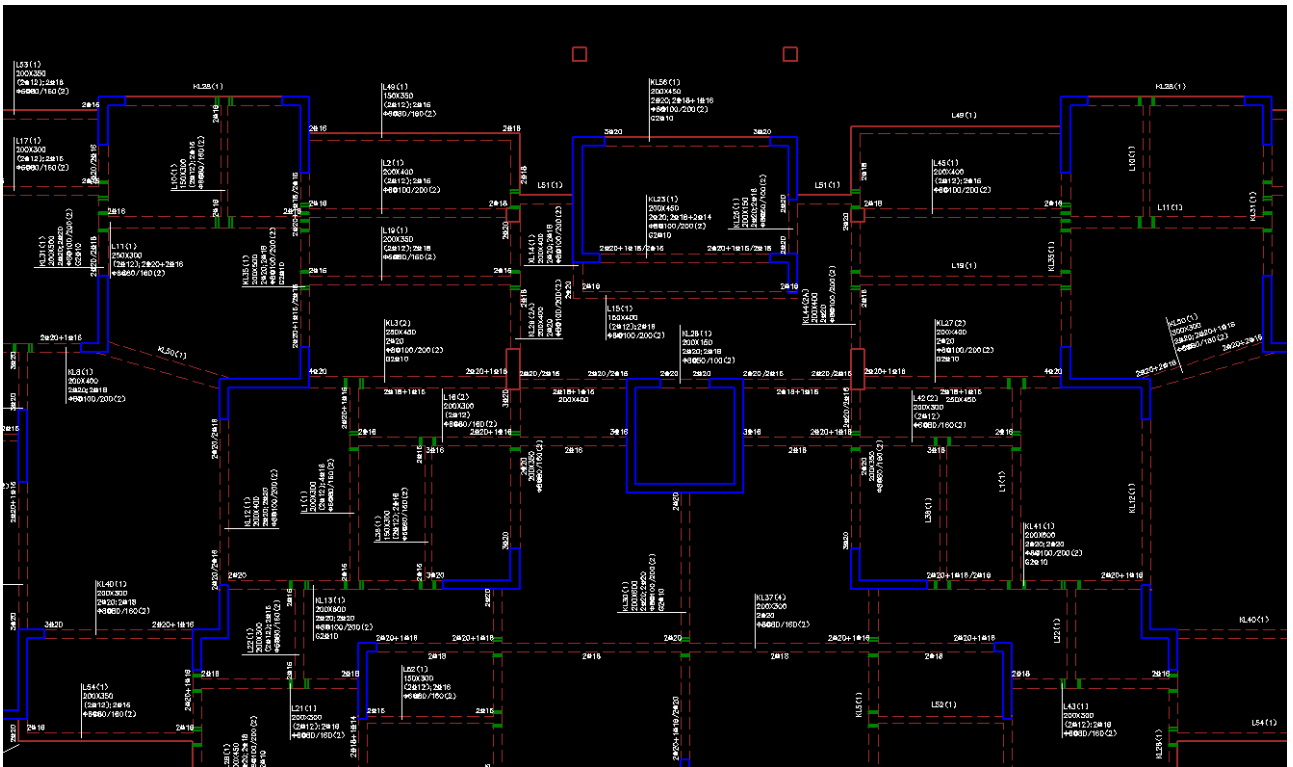
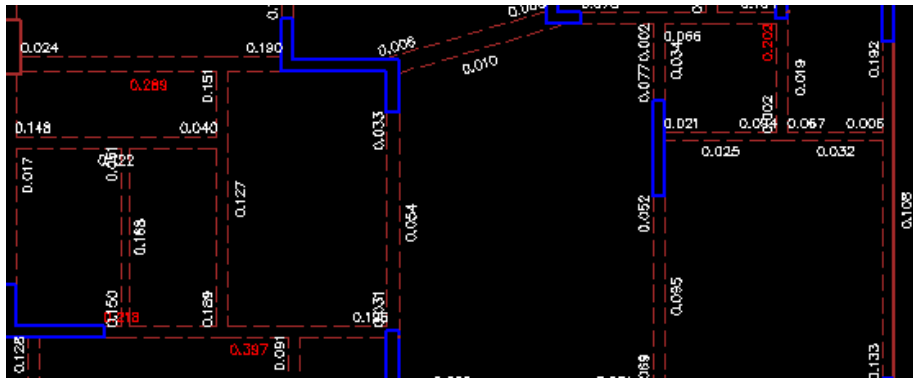


图 9 梁施工图局部

程序根据梁的实配钢筋进行**裂缝验算**，用户可自定义裂缝限值，也可以查看裂缝计算过程，如图 10。



(a) 裂缝验算结果

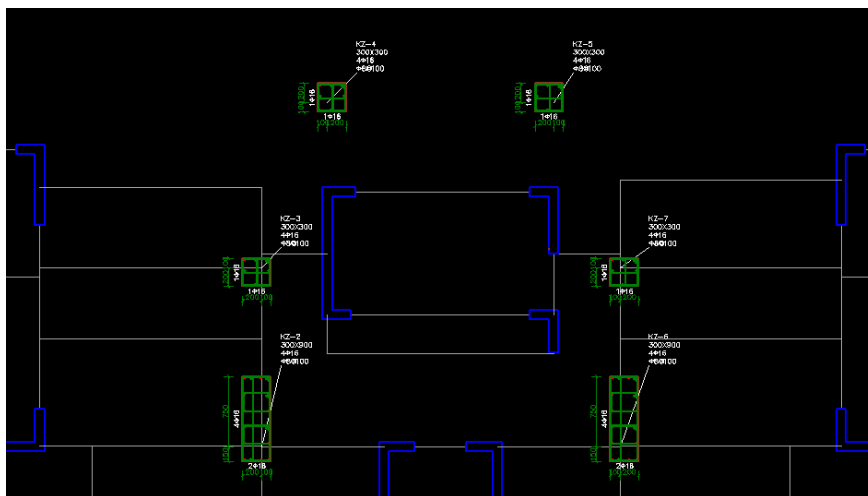


(b) 裂缝验算过程

图 10 裂缝验算

5.2 柱

柱设计完成后可查看和输出施工图。程序根据配筋结果进行构件归并、选筋，按照《混凝土结构施工图平面整理表示方法制图规则和构造详图（现浇混凝土框架、剪力墙、梁、板）》16G101-1（以下简称平法图集）表 2.2.2 进行分类和编号。程序将布置在剪力墙上的柱判别为剪力墙上柱，其它柱为框架柱。生成的柱平法施工图有表格画法和原位画法两种表达方式，如图 11 所示。用户也可以通过编辑构件自定义柱的分段、配筋等信息，修改的内容将直接更新在施工图中。可输出 pdf 和 dxf 格式的施工图。



(a) 原位画法



柱表

柱号	标高	BxH	B1	B2	H1	H2	全部纵筋	角筋	E边	H边	箍筋类型	锚固	备注
KZ-1	0.000—6.650	300x300	150	150	200	100		4Φ16	1Φ16	1Φ16	1C2X2	Φ8@100	
KZ-2	0.000—40.450	300x900	200	100	150	750		4Φ16	2Φ16	4Φ16	1C3X6	Φ8@100	
	40.450—45.050	200x400	100	100	100	300		4Φ16		1Φ16	1C2X3	Φ8@100	
KZ-3	0.000—6.650	300x300	200	100	200	100		4Φ16			1C2X2	Φ8@100	
KZ-4	0.000—5.500	300x300	100	200	100	200		4Φ16	1Φ16	1Φ16	1C2X2	Φ8@100	
KZ-6	0.000—5.500	300x300	200	100	100	200		4Φ16	1Φ16	1Φ16	1C2X2	Φ8@100	
	0.000—40.450	300x900	100	200	150	750		4Φ16	2Φ16	4Φ16	1C3X6	Φ8@100	
	40.450—45.050	200x400	100	100	100	300		4Φ16		1Φ16	1C2X3	Φ8@100	
KZ-7	0.000—6.650	300x300	100	200	200	100		4Φ16			1C2X2	Φ8@100	
KZ-8	32.750—40.450	300x300	200	100	100	200		4Φ16			1C2X2	Φ8@100	
KZ-9	32.750—40.450	300x300	100	200	100	200		4Φ16			1C2X2	Φ8@100	
KZ-10	40.450—41.650	200x300	100	100	200	100		4Φ16			1C2X2	Φ8@100	

(b) 表格画法

图 11 柱施工图

5.3 墙

根据计算配筋面积和边缘构件识别结果，程序完成墙肢构件归并、选筋、钢筋排布，生成原位画法和表格画法两种表达方式的平法施工图。剪力墙和连梁按照平法图集表 3.2.2 进行分类和编号，部分结果输出如图 12 所示。可输出 pdf 和 dxf 格式的施工图。

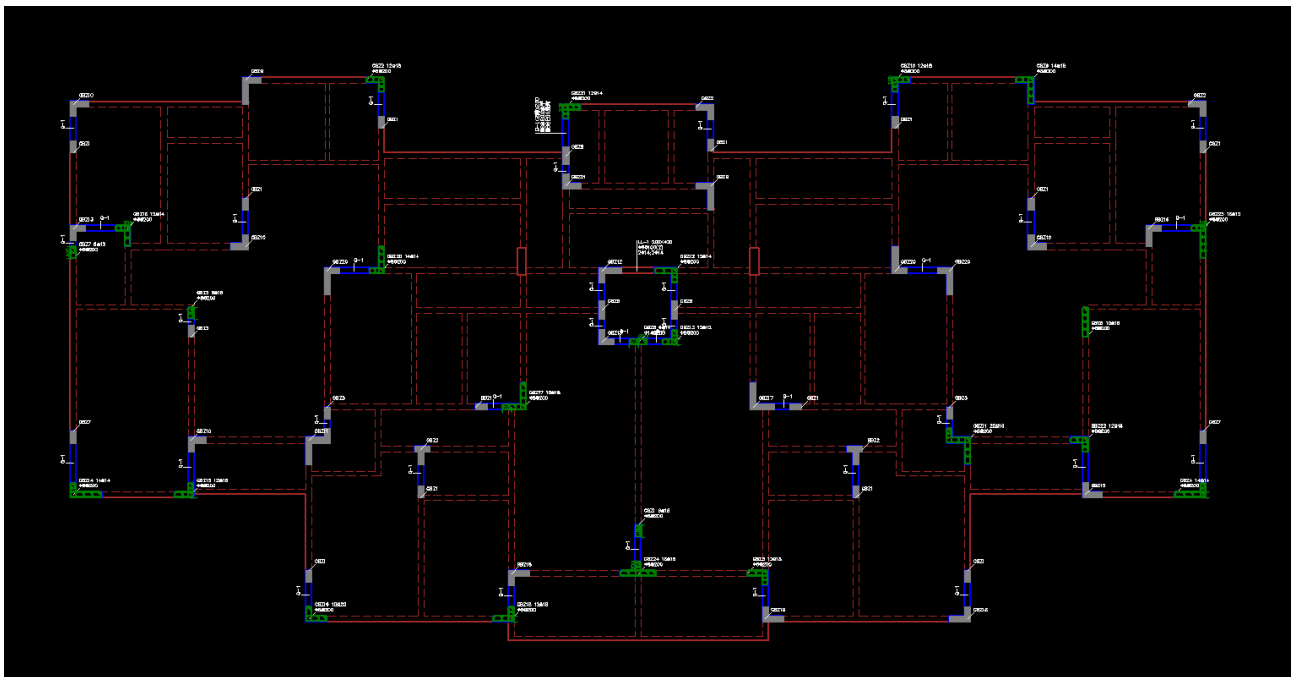
剪力墙柱表

编号	QW1	QW3	QW4	QW5	QW7	QW9	QW10
标高	0.000 - 1.000	0.000 - 3.600	0.000 - 7.000	3.600 - 7.000	7.000 - 14.400	7.000 - 14.400	7.000 - 14.400
截面	Φ8@10	Φ8@150	Φ8@150	Φ8@100	Φ8@100	Φ8@100	Φ8@100

剪力墙柱表

编号	QW2	QW6	QW8
标高	0.000 - 3.600	3.600 - 7.000	7.000 - 14.400
截面	Φ8@150	Φ8@100	Φ8@100

(a) 表格画法



(b) 原位画法

图 12 剪力墙施工图

6 生成计算书

SAP2000 和 ETABS 输出的结果主要以表格和图形展示，其表达方式与国内工程师的习惯存在一定差异。CiSDetailer 计算书功能对读取的结果数据进行整理再加工，**一键生成符合国内工程师习惯要求的计算书**。用户也可以自定义计算书的输出内容。默认生成的计算书内容包括**结构基本信息、荷载信息、结构大指标、补充验算、超限信息、简图**等，具体内容输出如图 13 所示。计算书可输出为 word 和 pdf 格式，部分计算书内容如图 14 所示。目前，该功能支持生成弹性分析设计的计算书，今后会增加超限分析计算报告的功能。

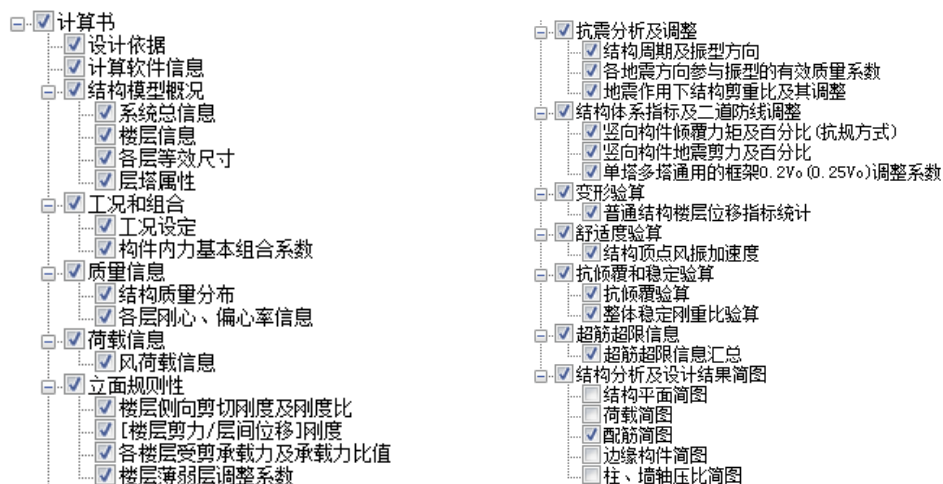


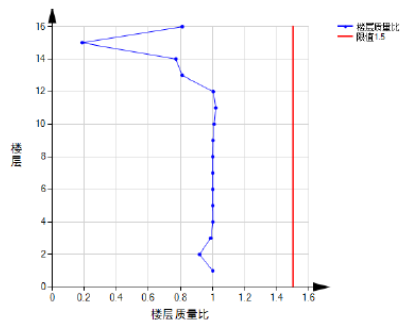
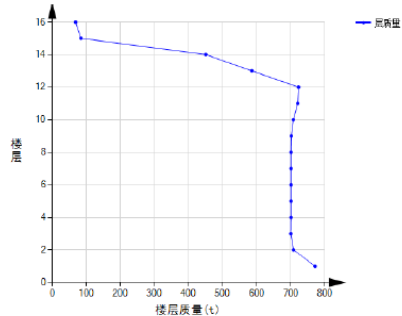
图 13 计算书输出内容与选项

五. 质量信息

5.1 结构质量分布

表5-1 质量分布

楼层	层质量(t)	质量比
FL16	68.908	0.811
FL15	85.0	0.188
FL14	451.121	0.77
FL13	585.888	0.81
FL12	723.469	1.003
FL11	721.03	1.019
FL10	707.763	1.009
FL9	701.771	1.001
FL8	700.742	1.0
FL7	700.742	1.0
FL6	700.742	1.0
FL5	700.742	1.0
FL4	700.767	1.001
FL3	700.205	0.988
FL2	708.367	0.918
FL1	771.674	1.0
BASE	94.435	1.0
总计:	9823.365	/



5.2 各层刚心、偏心率信息

Xstif, Ystif(m): 刚心的 X, Y 坐标值
 Alf(Degree): 原刚性主轴的方向
 Bex, Bey: X, Y 方向的偏心率

表5-2 各层刚心、偏心率信息

层号	Xstif	Ystif	Alf	Bex	Bey
FL16	18.693	12.476	0.00	0.009%	0.001%
FL15	18.688	11.611	0.00	0.016%	0.361%
FL14	18.703	8.201	0.00	0.001%	0.203%

FL4	EQX	3822.255	71677.344	5.33%	3.2%
FL3	EQX	3932.389	78262.983	5.02%	3.2%
FL2	EQX	4006.101	84813.495	4.72%	3.2%
FL1	EQX	4052.976	92075.739	4.4%	3.2%
FL16	RSX	167.541	742.803	22.56%	3.2%
FL15	RSX	276.575	1493.288	18.52%	3.2%
FL14	RSX	762.317	6195.123	12.31%	3.2%
FL13	RSX	1332.947	11886.449	11.21%	3.2%
FL12	RSX	1829.224	18666.634	9.8%	3.2%
FL11	RSX	2181.503	25462.887	8.57%	3.2%
FL10	RSX	2434.977	32116.509	7.58%	3.2%
FL9	RSX	2633.696	38714.731	6.8%	3.2%
FL8	RSX	2811.669	45307.108	6.21%	3.2%
FL7	RSX	2991.592	51899.486	5.76%	3.2%
FL6	RSX	3185.628	58491.864	5.45%	3.2%
FL5	RSX	3409.666	65084.241	5.24%	3.2%
FL4	RSX	3643.638	71677.344	5.08%	3.2%
FL3	RSX	3863.577	78262.983	4.94%	3.2%
FL2	RSX	4037.691	84813.495	4.76%	3.2%
FL1	RSX	4137.394	92075.739	4.49%	3.2%

FL1	EQY	4633.798	92075.739	5.03%	3.2%
FL16	RSY	179.807	742.803	24.21%	3.2%
FL15	RSY	300.234	1493.288	20.11%	3.2%
FL14	RSY	852.294	6195.123	13.76%	3.2%
FL13	RSY	1474.616	11886.449	12.41%	3.2%
FL12	RSY	2014.391	18666.634	10.79%	3.2%
FL11	RSY	2410.067	25462.887	9.47%	3.2%
FL10	RSY	2704.041	32116.509	8.42%	3.2%
FL9	RSY	2940.275	38714.731	7.99%	3.2%
FL8	RSY	3153.86	45307.108	6.97%	3.2%
FL7	RSY	3378.0	51899.486	6.51%	3.2%
FL6	RSY	3617.721	58491.864	6.18%	3.2%
FL5	RSY	3870.791	65084.241	5.95%	3.2%
FL4	RSY	4125.411	71677.344	5.76%	3.2%
FL3	RSY	4354.922	78262.983	5.56%	3.2%
FL2	RSY	4524.34	84813.495	5.33%	3.2%
FL1	RSY	4615.683	92075.739	5.01%	3.2%

表8-4 剪力比X方向

楼层	工况	剪力(kN)	重力(kN)	剪力比(%)	限值(%)
FL16	EQY	571.472	742.803	76.93%	3.2%
FL15	EQY	639.441	1493.288	42.82%	3.2%
FL14	EQY	989.782	6195.123	15.98%	3.2%
FL13	EQY	1424.335	11886.449	11.98%	3.2%
FL12	EQY	1919.71	18666.634	10.28%	3.2%
FL11	EQY	2373.071	25462.887	9.32%	3.2%
FL10	EQY	2778.683	32116.509	8.65%	3.2%
FL9	EQY	3141.789	38714.731	8.12%	3.2%
FL8	EQY	3465.347	45307.108	7.65%	3.2%
FL7	EQY	3749.89	51899.486	7.23%	3.2%
FL6	EQY	3995.417	58491.864	6.83%	3.2%
FL5	EQY	4201.93	65084.241	6.46%	3.2%
FL4	EQY	4369.432	71677.344	6.1%	3.2%
FL3	EQY	4497.815	78262.983	5.75%	3.2%
FL2	EQY	4579.155	84813.495	5.4%	3.2%

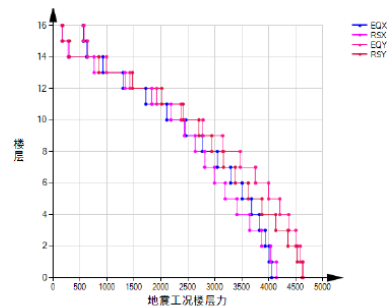


图 14 部分计算书内容

此外，CiSDetailer 软件还可进行舒适度验算，并将计算结果输出在计算书中。用户仅需在总信息中完成相关信息的设置，程序将按照《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)完成 X、Y 两个方向的顺风向加速度和横风向风振加速度计算。舒适度计算过程与结果如图 15 所示。



图 15 结构舒适度计算

7 结束语

CiSDetailer 软件通过读取 CSI 软件模型信息，可按照规范进行配筋计算，也可读取 CSI 软件及国内软件的配筋结果，进行多软件设计结果的对比，同时可以生成平法施工图，输出图表计算书，还可以将实配钢筋导入 ETABS 或 SAP2000 中用于弹塑性分析。CiSDetailer 将为工程设计工作带来极大便利。





ETABS 与 Perform3D 弹塑性分析功能对比示例

筑信达 李立

经过十余年的推广和实践，Perform-3D 作为专业的建筑结构非线性分析与性能评估软件在国内已获得广泛认同。ETABS 也是国内工程师们熟知的多高层建筑结构分析和设计软件，抗震、减隔震的弹塑性分析一直是 ETABS 优势功能之一。从 ETABS2016 版本开始，ETABS 不断借鉴 Perform-3D 的功能特点加强完善性能化设计相关的功能，并进一步提升弹塑性分析效率。当前的 ETABS v18 已经融合了 Perform-3D 许多特色功能，建筑结构非线性分析与性能评估也成为 ETABS 的功能亮点。对此，不少用户关心两个产品在这方面的使用方法和应用体验有什么区别。本文试图从一个简单例子入手，对比 ETABS v18.1.0 和 Perform-3D v7 抗震弹塑性分析的相关功能，从应用的角度带来一些直观的认识，供工程师们使用产品时参考。

1. 模型概况

本例为 5 层钢筋混凝土框架结构，规则对称。本文借用这个例子来展示功能，并不探讨结构本身的合理性。

该模型的框架梁端指定了塑性铰（弯矩铰），框架柱两端指定了纤维铰，施加双向地震时程作用。分别独自建立 ETABS 模型（图 1）和 Perform3D 模型（图 2），并尽量保证两个模型的一致性。表 1、图 3~图 5 是部分计算结果对比，可以看到两个软件的计算结果吻合得较好。下文将逐一对比介绍模型的设置及相应的软件功能。

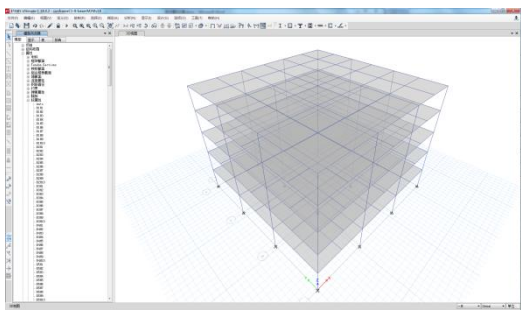


图 1 ETABS 模型

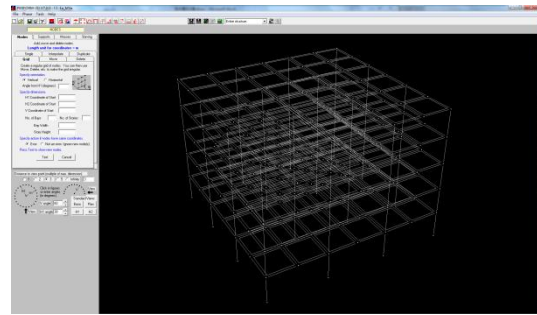


图 2 Perform-3D 模型

表 1 周期结果

	T1 /s	T2 /s	T3 /s
ETABS 模型	1.06	1.06	0.89
Perform-3D 模型	1.02	1.02	0.86

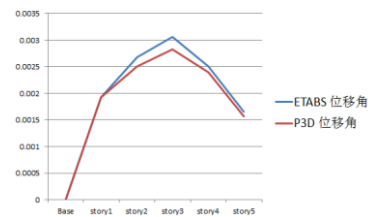


图 3 层间位移角

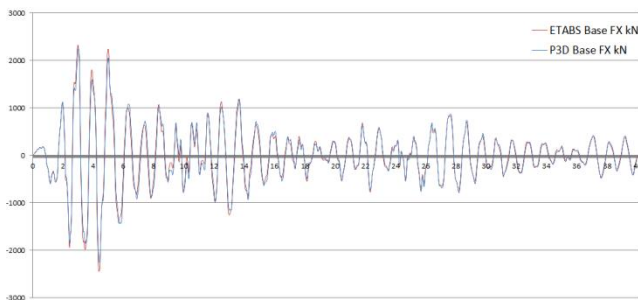


图 4 X 方向基底剪力

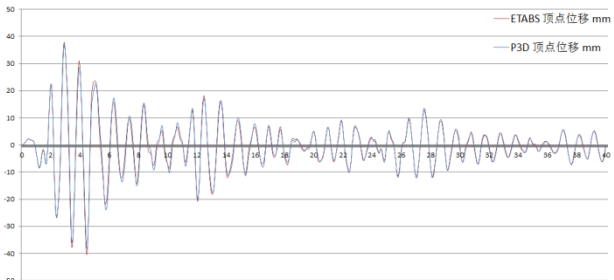
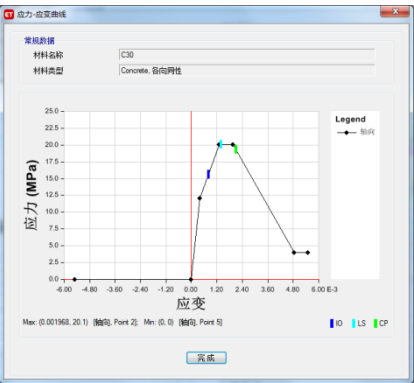
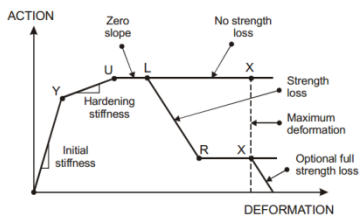
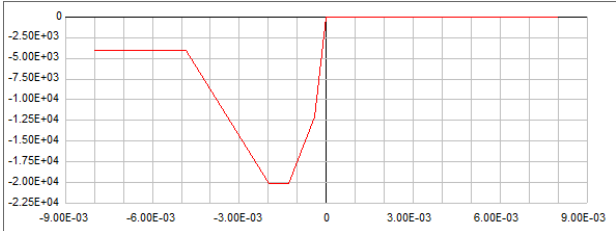

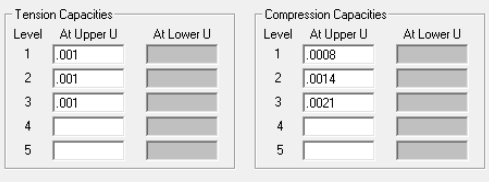
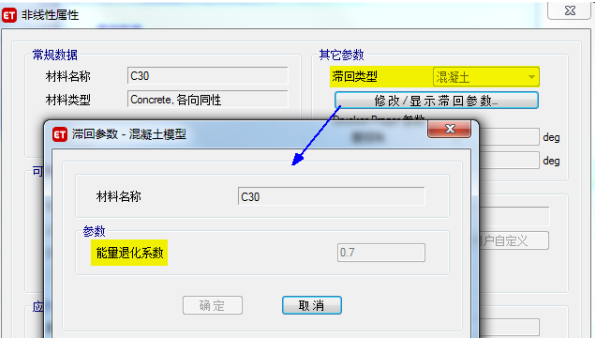
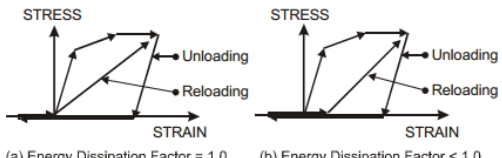


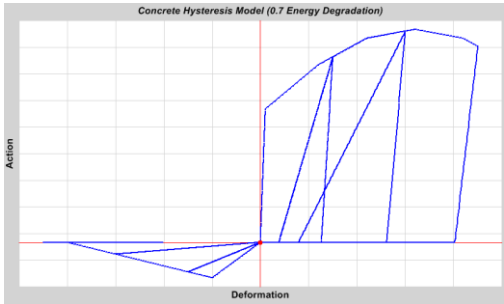
图 5 顶点位移

2. 非线性分析的设置

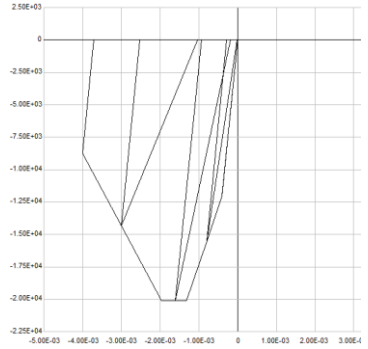
2.1 材料本构

本例使用的材料有 C30、C35 和 HRB400。材料的非线性参数主要包括：应力-应变曲线、可接受准则和滞回模型。材料的可接受准则通过材料应变来定义，用于使用纤维单元的构件性能评估。以下以 C30 为例对比本例材料参数的设置。

ETABS	Perform-3D
应力-应变曲线	
 <p>混凝土应力-应变曲线可以参数化定义，也可自定义。参数化定义中内置了 Mander 模型自动考虑约束混凝土的效应。本例使用的用户自定义应力-应变曲线。</p>	 <p>Perform-3D 使用通用的 F-D（力-变形）形式来描述材料或构件的非线性行为。</p>  <p>材料的应力-应变曲线通过定义 F-D 关键点参数来确定。所有参数都需要自定义，没有内置模型。</p>
可接受准则	
 <p>ETABS 可输入 3 级水准的可接受准则，对应 3 个应变值。</p>	 <p>Perform-3D 最多可输入 5 级水准的可接受准则，本例与 ETABS 的设置一致，仅使用 3 级。</p>
滞回类型	
	 <p style="text-align: center;">Figure 1.8 Concrete Material in Compression</p>



ETABS 提供了 8 种滞回模型，适用于不同性质的材料或其它非线性单元。为了和 Perform-3D 内置的滞回规则类似，本例使用的混凝土滞回模型（具体含义参见 ETABS 联机帮助）。



Perform-3D 通过指定 F-D 的关键点对应的能量退化因子来确定往复加载过程中的刚度退化。混凝土材料的滞回规则是，卸载刚度等于弹性刚度，通过能量退化因子来控制再次加载时刚度的变化。

2.2 纤维铰

本例框架柱使用了纤维铰，相关操作包括定义纤维截面、纤维段长度等。以下是本例底部中柱的纤维铰定义。

ETABS	Perform-3D
-------	------------

纤维截面定义

Fiber	Area cm²	Coord3 mm	Coord2 mm	Material	Stress Strain Curve
7	1.5	-240	80	HRB400	SSC1
8	2	-240	240	HRB400	SSC1
9	1.5	80	-240	HRB400	SSC1
10	1.5	-80	-240	HRB400	SSC1
11	1.5	80	240	HRB400	SSC1
12	1.5	-80	240	HRB400	SSC1
13	60.2	-250.1	250.1	C35	SSC1
14	66	0	250.1	C35	SSC1
15	60.2	250.1	250.1	C35	SSC1

纤维布置根据柱截面自动生成的，并自动识别混凝土约束区和非约束区。所有纤维的状态都可以监测，默认按最不利的纤维结果表征该部位的性能状态。

No	Type	Material Name	Area	Axis 2 Coord	Axis 3 Coord
1	Steel	HRB400	201	240	-240
2	Steel	HRB400	154	240	-80
3	Steel	HRB400	154	240	80
4	Steel	HRB400	201	240	240
5	Steel	HRB400	201	-240	-240
6	Steel	HRB400	154	-240	-80
7	Steel	HRB400	154	-240	80
8	Steel	HRB400	201	-240	240
9	Steel	HRB400	154	80	-240
10	Steel	HRB400	154	-80	-240
11	Steel	HRB400	154	80	240
12	Steel	HRB400	154	-80	240
13	Concrete	C35	6024	-250	250
14	Concrete	C35	6600	0	250
15	Concrete	C35	6024	250	250
16	Concrete	C35	6600	-250	0
17	Concrete	C35	6600	250	0
18	Concrete	C35	6024	-250	-250
19	Concrete	C35	6600	0	-250
20	Concrete	C35	6024	250	-250

定义纤维截面则非常繁琐，纤维位置、材料、面积均手工输入，不仅要提前合理规划纤维分布，还要保证输入过程中的准确性。需要定义监测纤维，通过监测纤维的应变来表征该部位的性能。但柱的监测纤维数量有限，最多 4 个。

纤维段长度

定义铰时输入纤维铰长度，本例相对长度 0.2。

No.	Component Type	Component Name	Length	Propn
1	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	
2	Column, Inelastic Fiber Section	500X500C30I	.2	
3	Column, Reinforced Concrete Section	C500X500	.6	
4	Column, Inelastic Fiber Section	500X500C30I	.2	
5	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	

定义组件时输入纤维段的长度，本例相对长度 0.2。

2.3 塑性铰

本例框架梁使用了塑性铰（弯矩铰）。塑性铰的定义主要包括：骨架曲线、可接受准则、滞回模型。ETABS 内置了 ASCE 41-13 和 ASCE 41-17 两本规范，可以根据截面信息自动生成相应的塑性铰。本例的梁铰即自动铰，相关数据自动生成。



Perform-3D 的塑性铰有多种类型，本例使用弯矩-转角铰，输入的数据与 ETABS 一致。

ETABS	Perform-3D
铰的力-变形关系	
<p>骨架曲线自动生成，屈服弯矩为 483.9 kN-m</p>	<p>根据 ETABS 的数据输入 Perform-3D 梁铰的弯矩-转角关系</p>
可接受准则	
<p>基于铰的转角的可接受准则，根据规范自动生成</p>	<p>根据 ETABS 的数据手工输入</p>
滞回类型	
<p>塑性铰的滞回模型默认是各项同性模型，这种模型不考虑刚度退化，耗能效果最好</p>	<p>相应地，Perform-3D 也不考虑刚度退化</p>

2.4 铰布置

框架的塑性铰一般布置在构件端部，建模时要确定铰在杆件上的位置，以及铰的长度，同时要避开节点区。本例中梁铰是零长度的弯矩铰，柱铰是相对长度为 0.2 的纤维铰。以下是两个软件关于铰布置的相关操作，在操作过程中尽量确保模型的一致性。

ETABS	Perform-3D
塑性铰位置	



指定数据

铰属性	相对距离
自动 M3	0.05
自动 M3	0.95

自动铰数据
类型: From Tables in ASCE 41-13
表格: Table 10-7 (Concrete Beams - Flexure) Item I
自由度: M3

该图为指定铰对话框。本例梁两端布置弯矩铰（自动铰），塑性铰中心位置为 $0.05L_0$ 和 $0.95L_0$ (L_0 为杆件净长度，自动考虑端部偏移的影响)。铰属性来自截面数据依据内置的 ASCE41-13 规范自动生成。

COMPONENT LENGTHS ARE NOT TO SCALE

No.	Component Type	Component Name	Length	Propn
1	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	
2	Beam, Reinforced Concrete Section	B300X600C30		.1
3	Moment Hinge, Rotation Type	B300X600C30_rot_I	0	
4	Beam, Reinforced Concrete Section	B300X600C30		.9

该图为本例主梁组件的示意图和构成信息。由于主梁被次梁打断，这里定义的是主梁左半段的组件。上图从左到右（列表中从上至下）依次是节点区、弹性段、塑性铰、弹性段。因为是半跨梁，所以铰中心的相对距离是 0.1，换算为全跨即 0.05，与 ETABS 模型一致。

纤维铰位置

纤维定义选项
 来自于框架截面的默认值
 用户定义

铰长度
 铰长度: 0.2
 相对长度

指定数据

铰属性	相对距离
FH1	0.1
FH1	0.9

该图为定义纤维铰和指定纤维铰对话框。本例柱两端布置纤维铰，纤维段的相对长度是全长的 20%，纤维定义来自截面定义。铰中心位置的相对距离是 0.1 和 0.9。

COMPONENT LENGTHS ARE NOT TO SCALE

No.	Component Type	Component Name	Length	Propn
1	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	
2	Column, Inelastic Fiber Section	500X500C30I		2
3	Column, Reinforced Concrete Section	C500X500		6
4	Column, Inelastic Fiber Section	500X500C30I		2
5	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	

该图为本例柱组件的示意图和构成信息。从左到右（列表中从上至下）依次是节点区、20%纤维段、60%弹性段、20%纤维段、节点区。

铰布置查看及刚域设置

完成铰布置后，可通过视图检查各个铰的位置。图中黑点代表铰，旁边文字信息是铰的编号及类型。

图中的加粗黑线是节点区，ETABS 默认通过杆件的端部偏移模拟刚域，本例与 Perform3D 的设置一致。

Column Width: [Diagram showing column width and beam depth]

End Zones for Beam Elements
 End zone lengths are always one half of the column width.
 If columns above and below have different widths:
 Use larger Use smaller Use average

End Zone Stiffness
 Stiffness, as a multiple of the element stiffness
 Bending: 10 Axial: 10

End Zones for Column Elements
 End zone lengths as multiples of beam depth
 Below beam axis: 1.5 Above beam axis: 1.5
 If beams around the column have different depths:
 Use largest Use smallest Use average

无法从视图直接显示所有构件的塑性铰布置。只能通过选择杆件来查看选定构件的铰布置。

下图为 Perform-3D 的自动刚域设置。

2.5 阻尼、工况设置

ETABS	Perform-3D
阻尼	

两个模型采用相同的瑞利阻尼设置，ETABS 模型直接按 Perform-3D 的结果输入了 Alfa 和 Beta（直接按周期来定义也是可行的，本例影响不大）。值得一提的是，Perform-3D 允许同时使用模态阻尼和瑞利阻尼，ETABS 也增加了这个功能（左图下方红框），允许在直接积分法中使用模态阻尼，相关的论述请参看筑信达技术通讯的另一篇文章“[瑞利阻尼的应用](#)”。另外，本例按大多数工程习惯取阻尼比为 5%，但笔者认为当考虑构件塑性发展时，不能再按弹性分析的经验来取阻尼比，阻尼比应当适当降低，否则将高估阻尼耗能，而降低了结构应承受的作用。

地震工况

<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Load Type</th> <th>[Preceding Analysis No.] + Load Case Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Gravity</td> <td>[0] + Grav</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Earthquake</td> <td>[1] + EL2</td> </tr> </tbody> </table>		No.	Load Type	[Preceding Analysis No.] + Load Case Name	1	Gravity	[0] + Grav	2	Earthquake	[1] + EL2
No.	Load Type	[Preceding Analysis No.] + Load Case Name								
1	Gravity	[0] + Grav								
2	Earthquake	[1] + EL2								

继承重力荷载，运行双向地震时程分析（直接积分法）。

2.6 性能检查

性能化设计一个重要的环节就是检查结构是否达到预期的性能目标，在建模期间设定的“可接受准则”是构件性能检查的衡量尺度。Perform-3D 通过建立一系列的极限状态组 (Limit State Groups)，并检查其使用率 (usage ratio) 来进行性能检查。ETABS 也引入了类似的做法，但从操作上简便了许多。

ETABS	Perform-3D

“性能检查”只需指定地震工况和性能水准。地震工况可以是一个，也可以是多个。

可定义多个“性能检查”，对应不同的地震水准（例如中震、大震）以及



不同的性能水准 (IO、LS、CP)。

对不同的性能水准，分别定义不同的极限状态组，每组要包含相应的构件信息。以上图为例，IO 极限状态组包含了所有柱纤维（混凝土纤维、钢筋纤维）IO 水准的应变，和所有梁铰 IO 水准的转角。

3 结果查看

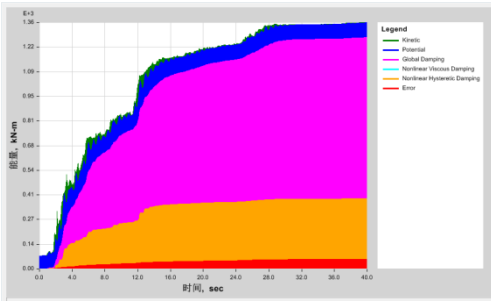
3.1 大指标

基底剪力、顶点位移等力或变形的时程曲线两个软件都可以便捷地显示，但对于层间位移角等与楼层相关的结果，ETABS 的显示更直观，操作也简单。能量图的表达两个软件是类似的，既可显示整个结构的累计能量组成，也可按组显示构件耗能的情况，ETABS 的显示方式更灵活。

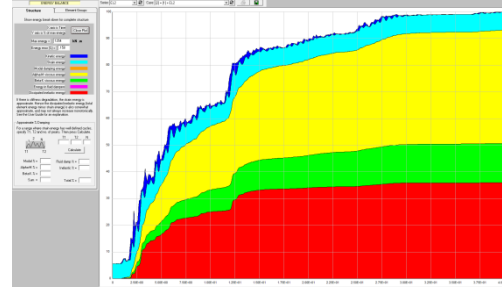
ETABS	Perform-3D
基底剪力	
顶点位移	
位移角	
<p>楼层响应图显示各层位移角结果 (X、Y 两个方向)，可以选择显示包络结果或给定时刻的结果。</p>	<p>可直接显示单个位移角的时程曲线，各层位移角的统计结果仅以文本方式输出，需二次整理。</p>



累积能量构成图

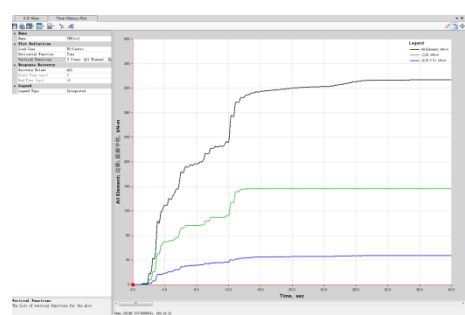


桃红色为瑞利阻尼耗能，土黄色为塑性变形耗能。底部红色是能量误差，这是由于积分参数 α 非零引起的（见本文第 4 节）。本例能量误差约 4%，可以接受。

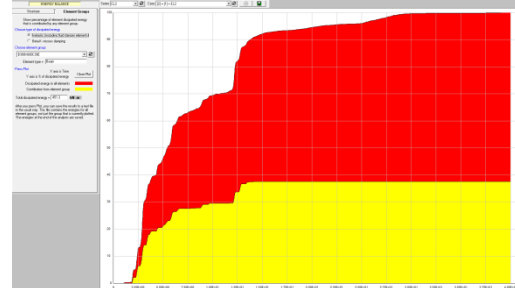


黄色和绿色共同构成瑞利阻尼耗能（对应于左侧桃红色），黄色是质量相关部分，绿色是刚度相关部分。红色为塑性变形耗能（对应于左侧土黄色）。

按组显示构件耗能



本例中，黑线代表所有梁柱构件的耗能，绿线代表所有边梁的耗能，蓝线代表底部中柱的耗能。组的定义是任意的，上图中显示组的数量也无限制。



本例中，红色代表所有梁柱构件的耗能（相当于左侧黑线），黄色代表边梁的耗能（相当于左侧绿线）。Perform-3D 一次只显示一个组（黄色）所占的比例。

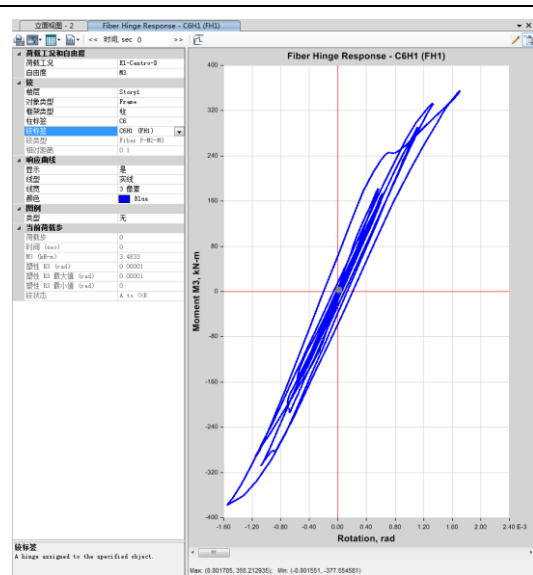
3.2 铰结果

本例采用了塑性铰和纤维铰。以下以柱端纤维铰为例说明典型的铰结果显示。

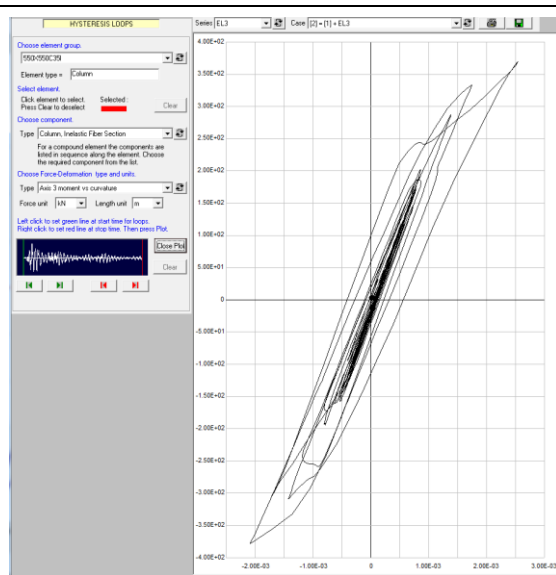
ETABS

Perform-3D

铰的滞回曲线

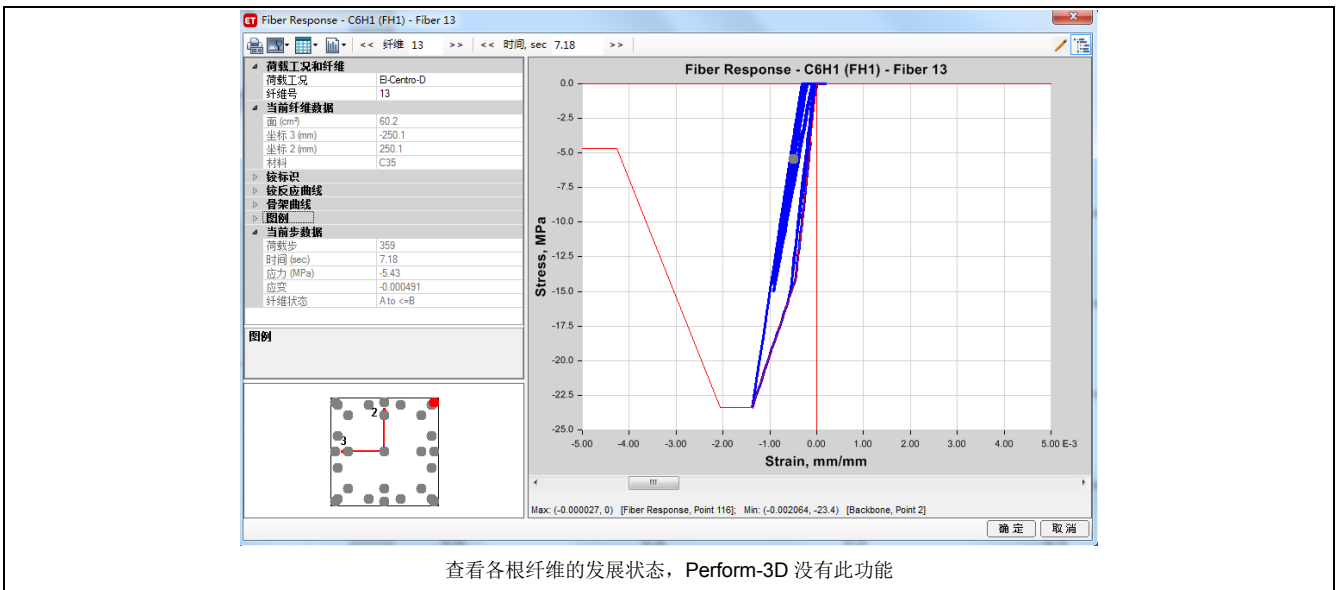


可以选择自由度（轴向和两个转动方向）、可以查看给定时间点的状态



可以选择自由度（轴向和两个转动方向）、可以设定显示的时间段

单根纤维的结果



3.3 性能评价

根据本文 2.6 节的定义，分析完成后可以查看各个构件的性能状态。ETABS 将其称为 Hinge D/C Ratios，Perform-3D 将其称为 Usage Ratios，两者的含义是一样的，都是实际结果（如塑性变形）与目标水准的比值，可以理解为相对于目标水准，各个构件的损伤比率。通过 Usage Ratios 可以便捷地评估结构的性能状态。

以下是柱构件在大震作用下 IO 水准的损伤情况，图中的数据代表了柱截面中最大的纤维变形与 IO 变形的比值，大于 1 即不满足 IO 要求（本例仅展示功能，忽略构件截面可能存在的不合理性）。本例选择几根典型的柱构件，将两个软件计算的性能校核结果汇总于表 2，可以看到两个软件计算结果吻合较好。

ETABS	Perform-3D
性能状态图	
<p>柱上下两端的纤维铰都显示，取截面中所有纤维变形的最大值进行计算。显示颜色和和数据。</p>	<p>上下纤维段的较大值代表整个构件的状态，所以图中一根柱子只有一种颜色，取监测纤维变形的最大值进行计算。只显示颜色，可以导出数据。</p>

Usage Ratio Graphs

这原是 Perform-3D 特有表达方式，可以直观表达出结构中各个部位在给定性能目标下的塑性状态发展过程。ETABSv18.1.0 增加了该图的输出。


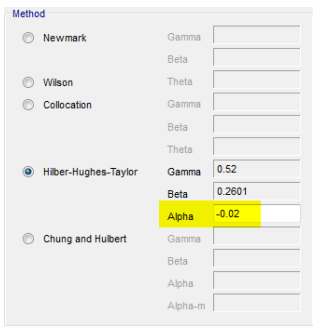
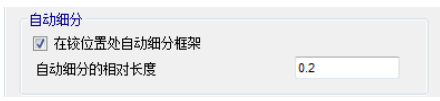
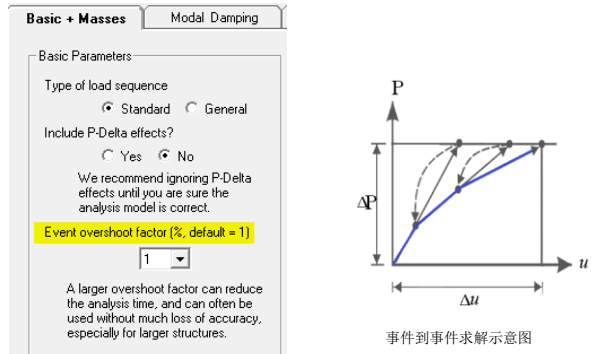


表 2 性能校核结果对比

构件类型	楼层	截面	柱位置			ETABS D/C Ratios	Perform3D Usage Ratios
			X 坐标	Y 坐标	Z 坐标		
中柱	1	550X550C35	8	16	0	1.734	1.462
中柱	3	500X500C30	8	16	7.2	1.250	1.267
中柱	5	500X500C30	8	16	14.4	0.635	0.689
边柱	1	500X500C35side	0	16	0	1.129	1.102
边柱	3	450X450C30side	0	16	7.2	1.137	1.147
边柱	5	450X450C30side	0	16	14.4	0.776	0.797
角柱	1	500X500C35corner	24	24	0	0.987	0.822
角柱	3	450X450C30corner	24	24	7.2	0.750	0.617
角柱	5	450X450C30corner	24	24	14.4	0.790	0.555

4 分析参数设置

Perform-3D 分析效率很高是这款产品受欢迎的重要因素之一。Perform-3D 有一套相对“封闭”的求解策略，提供给用户干预分析过程的参数很少。ETABS 则不同，有许多分析参数需要用户根据模型情况进行设置，这些参数会显著影响模型的分析时长。ETABS 默认的分析参数设置适用于大多数情况。以下简要说明两个软件分析相关的主要参数，更详细的解释可查看软件的联机帮助或技术文档。

ETABS	Perform-3D
 <p>以上为求解控制参数。“ETE 求解”和“迭代求解”是两种求解方法，可以同时打开，也可以选择其一。但对于非线性直接积分时程分析，若只用“ETE 求解”，ETABS 不会对每个时间步结束时刻的平衡条件进行检查，容易引起较大的计算误差，对此建议要始终打开“迭代求解”。</p>  <p>以上是积分方法选项。HHT 是推荐的方法，也是默认选项。建议将参数 Alpha 设为一个负数（0 到 -1/3 之间），可加快收敛。本例 Alpha 取 -0.02。</p>  <p>以上是较细分选项（命令为指定>框架>较覆盖）。较细分意味着在塑性较位置形成更小的单元，有助于收敛，但是会显著增加分析时长。</p>	 <p>采用 Event-to-Event 的求解策略，一个事件（Event）发生代表结构刚度发生显著变化（例如屈服、卸载）。本质上是将完全的非线性行为按照事件到事件的方式描绘出来。ETABS 的“ETE 求解”也是借鉴了 Perform-3D 的思路。但 ETABS “ETE”方法适用的非线性单元类型是有限的（本例采用的框架较适用于“ETE”）。</p> <p>Event overshoot factor 可理解为事件迭代容差。当模型规模较大时，事件数量增加，求解时间就会加长。这时增大容差可提高求解效率，但要注意控制由此带来的能量误差。本例使用默认值 1%。</p>



本例中，Perform-3D 的参数保持默认，ETABS 则根据不同选项区分了几种情况，将分析时长的数据结果汇总于表 3。可以看到，如果分析参数设置恰当，ETABS 的分析耗时已经接近 Perform-3D，这相对于早几年的 ETABS 版本已经有显著的进步。

通过对表 3 的数据对比，对 ETABS 的参数设置有如下建议：

1) “较细分”会显著影响分析时长，所以一般建议初次分析时关闭“较细分”，遇到收敛困难时，可对局部杆件打开“较细分”。

2) 如果模型中出现塑性铰的数量较多、塑性程度较深（如大震的情况），ETABS 的分析耗时会增加，但仍然有提高效率的办法。比如适当加大收敛容差，在表 3 中，括号里的数据是将容差从 0.0001 放大为 0.005 后的计算时长。

3) 本例中 ETABS “ETE”的方法并没有太大优势，也说明是否使用“ETE”是因模型而异的，“ETE”有助于收敛，但对于本例这种不存在收敛困难的模型，“ETE”在分析效率上并无优势。

表 3 单工况分析时长对比

地震水准	Perform-3D v7	ETABS v18.1.0			
		较不细分		较细分	
		仅迭代求解	ETE+迭代求解	仅迭代求解	ETE+迭代求解
中震	1 分钟 33 秒	2 分 09 秒	2 分 10 秒	5 分 26 秒 (3 分 51 秒)	5 分 36 秒 (3 分 43 秒)
大震	2 分钟	3 分 15 秒	3 分 28 秒	7 分 42 秒 (5 分 23 秒)	9 分 23 秒 (5 分 25 秒)

注：

- 1) 工况信息：单个双向地震作用时程分析工况，持时 40 秒。
- 2) 计算机信息：i5-4570 CPU@3.20GHz，RAM 8 GB，64 位操作系统。
- 3) 较细分时较相对长度为 0.2。

实际工程项目通常需要计算多条地震波，此时采用并行计算可以大大提高分析效率。Perform-3D 于 v6 版本增加了并行计算功能（图 6）。ETABS 于 v18.1.0 版本增加了该功能。图 7 是 ETABS 的高级分析选项，在“分析进程”中选择“独立进程”即可实现并行计算，关于图 7 中各项的说明可查看筑信达知识库[“求解器解析”](#)。本例采用并行计算同时求解中震、大震两个工况，计算时长汇总于表 4（ETABS 设置为仅迭代求解，收敛容差 0.005）。对比表 4 与表 3 的数据，明显看到 ETABS 采用并行计算后计算效率又进一步提高。根据 CSI 的建议，高级求解器更适合处理大模型，常规模型多线程求解器求解速度更佳。但对于本例，两种求解器不分伯仲。

表 4 并行计算分析时长对比

并行工况	Perform-3D v7	ETABS v18.1.0			
		高级求解器		多线程求解器	
		较不细分	较细分	较不细分	较细分
中震+大震	3 分钟	2 分 32 秒	6 分 06 秒	2 分 54 秒	5 分 05 秒

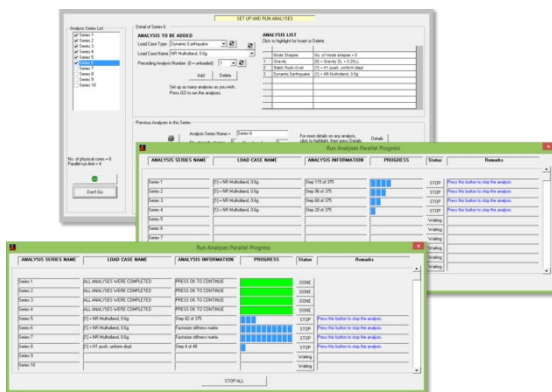


图 6 Perform-3D 并行计算

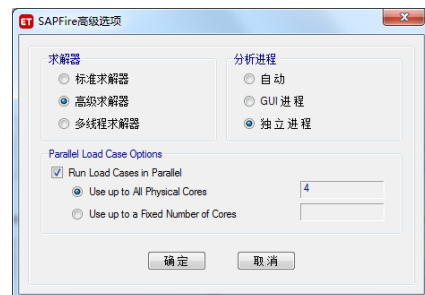


图 7 ETABS 高级分析选项



需要强调的是，本例分析时长的对比数据，仅供参考，并不能由此断言某种方式一定优于另一种。因为非线性分析是一个非常复杂的过程，有太多因素影响分析的效率和精度，我们需要始终明确的是分析目的（什么样的数据是关键有效的），而不是一味追求分析速度。

5 小结

本文从非线性材料定义、铰定义和布置、工况定义、性能检查、结果输出、分析参数设置多个方面详细对比了 ETABS 和 Perform-3D 的功能特点。可以看到，ETABS 经过这几年的发展已完全具备处理建筑结构非线性分析及性能评估问题的能力，并且操作简单。对于多数结构工程师来讲，ETABS 操作环境更加友好，易学易用。

Perform-3D 复杂的理论体系和繁杂的操作模式常常令很多工程师望而却步，好在国内已有很多工具实现了 Perform-3D 的前后处理，让更多工程项目能使用 Perform-3D。笔者认为，Perform-3D 本身就是建筑结构非线性分析及性能评估技术的缩影，凝结了 Powell 教授杰出的研究成果和心得，学习 Perform-3D 的过程就是向 Powell 教授学习的过程，意义非凡。

总体而言，Perform-3D 分析稳定、可靠、效率高，这与它精巧的组件设置、强大高效的求解策略、有选择性的数据存储以及针对性极强的产品定位都不无关系。ETABS 这些年在非线性分析功能、分析效率等方面进步显著，并且仍在持续改进中，同时 ETABS 具备更广泛的通用性，非线性分析类型更多（除了材料非线性问题，还有大位移等问题），因此可控的分析参数更多。另一方面，ETABS 存储数据量更大（比如包含所有纤维的细节结果），塑性状态更新比较耗时（与塑性程度有关）。因此，处理 ETABS 的非线性模型，需要具体项目具体分析，合理的模型设置和恰当的分析参数会显著改善求解效率。

限于时间，本文没有对比剪力墙结构、减隔震单元、变形监测单元等内容，今后将补充这方面的信息和示例供大家参考。



减震结构附加阻尼比的计算方法

筑信达 杨硕 吴文博

1. 引言

随着人民安全意识的增强与生活水平的提高，高烈度地区消能减震的实际工程运用越来越多。消能减震结构是由附加消能装置与原结构共同组成的一种新结构体系。

从能量角度来讲，地震作用输入到结构中的能量最终通过结构阻尼耗能、主体结构塑性耗能以及消能装置耗能三部分耗散掉，而减震结构是通过增加消能装置的耗能进而达到保护主体结构的目的，从而实现更高的性能目标。

常用的阻尼装置，根据其产生阻尼力的原因，可大致分类如下：

1. 速度相关型消能器：利用材料的阻尼特性来耗散地震能量，由粘滞材料与粘弹性材料制成，如黏滞阻尼器。

2. 位移相关型消能器：利用装置的滞回变形或构件的摩擦做功来耗散地震能量，由塑性变形性能好的金属材料或耐摩擦原件制成，如 BRB 支撑，金属剪切阻尼器。

理论上讲，含有消能装置的结构体系具有非比例阻尼的特征，由于阻尼矩阵与实振型非正交，工程中通常需要计算消能装置在结构中的附加有效阻尼比，这样便于采用实振型分解反应谱法对含有耗能装置的结构进行设计。

2. 附加阻尼比计算方法

附加阻尼比的求解方法主要有现行规范采用的基于能量的应变能法、能量曲线对比法、结构响应对比法等^[3]。下面介绍这几种方法在 ETABS 中的实现及所需参数的提取步骤。

2.1 应变能法

《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 第 12.3.4 条指明，消能部件附加给结构的有效阻尼比可按照下式估算：

$$\xi_a = \sum_j W_{c_j} / (4\pi W_s) \quad (1)$$

式中 ξ_a 为消能减震结构的附加有效阻尼比； W_{c_j} 为第 j 个消能部件在结构预期层间位移 ΔU_j 下往复循环一周所消耗的能量； W_s 为设置消能部件的结构在预期位移下的总应变能。

当不计及扭转影响时，消能减震结构在水平地震作用下的总应变能，可按下式估算：

$$W_s = (1/2) \sum F_i U_i$$

式中 F_i 为质点 i 的水平地震作用标准值； U_i 为质点 i 对应的水平地震作用标准值的位移。

F_i 即楼层侧向力，为上下楼层剪力值之差。目前有两种方式计算楼层侧向力，方式一为取时程每一时刻的楼层剪力进行相减，得到时程每一时刻的楼层侧向力，而后再取各时刻楼层侧向力的极值；方式二为取楼层剪力的极值后，使用极值进行相减。但是对于方式二而言，上下楼层的剪力极值不一定出现在同一时刻，因此方式一可能更加接近于真实情况，如图 1 所示。用户可以通过表格 **Story Force** 获取每一时刻的楼层剪力或楼层剪力的极值，如图 2 所示。

U_i 即楼层位移，由于规范中要求不计及扭转影响，因此楼层位移建议使用隔板质心处的楼层位移，这样可以得到一个整体结构的平均位移，避免使用最大位移导致计算结果过于保守，一些情况下，最大位移只是局部的变形，并不能表征结构整体的变形。用户可通过表格 **Diaphragm Center Of Mass Displacement** 输出楼层位移如图 2 所示，如果模型中并未设置隔板，也可选取结构中心位置处的节点位移代替。

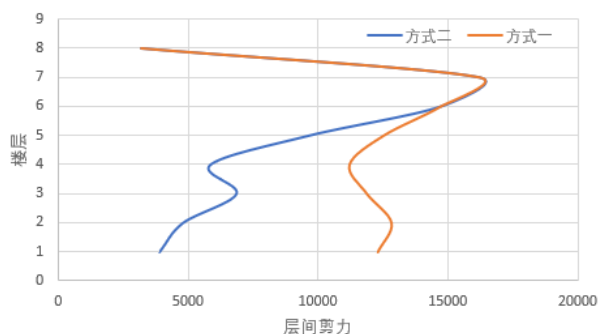


图 1 各层地震作用标准值

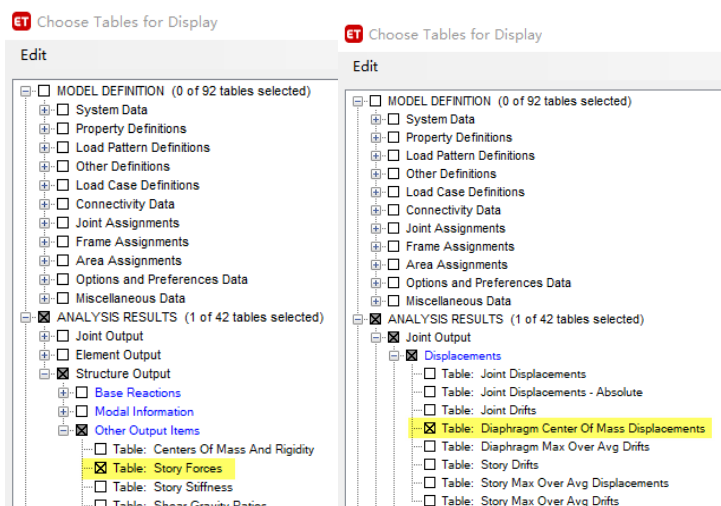


图2 楼层剪力与隔板质心位移

在实际应用中，还有另外一种近似方法计算应变能，即采用楼层剪力与层间位移之积。这个方法相对来讲更易计算。楼层剪力可以直接通过表格 Story Forces 查取，而层间位移则需要通过层间位移角与层高的乘积获得。目前 ETABS 可以输出三个层间位移角，分别是 **Diaphragm Max Over Avg Drifts**、**Story Drifts**、**Story Max Over Avg Drifts**，我们推荐使用通过 **Diaphragm Max Over Avg Drift** 列表输出的 **Avg Drift**，取每层的 **Avg Drift** 包络值与其层高的乘积求得层间位移，如果没有隔板可以选取结构中心处的节点位移角代替或其他方法。两者都取包络值，如图 3 所示。

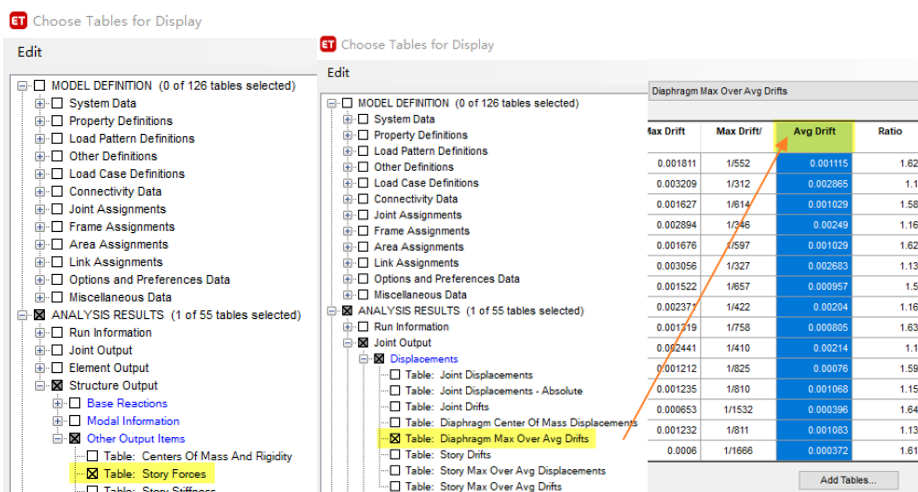


图3 楼层剪力与层间位移角

对于阻尼器的耗能，《建筑消能减震技术规程》JGJ297-2013 第 6.3.2 条指明，非线性黏滞消能器在水平地震作用下往复循环一周所消耗的能量，可按照下式计算：

$$W_{cj} = \lambda_1 F_{djm\max} \Delta u_j \quad (3)$$

式中 λ_1 为阻尼指数的函数，可按照下表取值； $F_{djm\max}$ 为第 j 个消能器在相应水平地震作用下的最大阻尼力； Δu_j 为第 j 个消能器两端的最大相对水平位移。

表1 阻尼指数

阻尼指数 α	λ_1 值
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1	3.1

(备注：其他阻尼指数对应的 λ_1 值可线性插值)



在 ETABS 中通过【显示>表格>ANALYSIS RESULTS>Element Output>Link Output】提取每个黏滞消能器的力与变形,过程为:如图 4 所示,从 **Element Force-Links** 列表提取消能器的内力,从 **Element Deformation-links** 列表下提取消能器的相对位移,求出所有消能器的总耗能 W_{cj} 。

位移相关型消能器在水平地震作用下往复循环一周所消耗的能量,可按下式计算:

$$W_{cj} = \sum A_j \quad (4)$$

式中 A_j 为第 j 个消能器的恢复力滞回环在相对水平位移 ΔU_j 时的面积。

1. 采用双线性恢复力模型的金属消能器,可通过下式估算:

$$W_{cj} = 4Q_{dj}(\Delta U_j - d_j) \quad (5)$$

式中 Q_{dj} 为第 j 个消能器的特征强度, ΔU_j 为第 j 个消能器在时程作用下的最大相对位移, d_j 为第 j 个消能器的屈服位移。

2. 采用双线性恢复力模型的屈曲约束支撑(BRB),可通过下式估算:

$$W_{cj} = 4f_{yj} S_j(\Delta U_j - d_y) \quad (6)$$

式中 f_{yj} 为第 j 个 BRB 的屈服强度, S_j 为第 j 个 BRB 的截面等效面积, ΔU_j 为第 j 个 BRB 的最大相对位移, d_y 为第 j 个 BRB 的屈服位移。

3. 采用理想弹性恢复力模型的普通摩擦消能器,可通过下式估算:

$$W_{cj} = 4P_{yj} d_{0y} \quad (7)$$

式中 P_{yj} 为第 j 个消能器的起滑摩擦力, d_{0y} 为第 j 个消能器的最大滑动位移。

以上各公式 (5) (6) (7) 中参数的提取与图 4 的提取过程相同。计算结构 X 与 Y 向的附加阻尼比,当有多条地震动输入的时候,工程中常见做法是,分别取 X 或 Y 向各条地震作用下附加阻尼比的均值 (7 条) 或最小值 (3 条),再取 X 和 Y 向附加阻尼比的较小值作为整个结构的附加阻尼比。

从上述计算方法中可以看出,规范方法是一种包络法,由于各项指标均取包络值,因此与时间并没有严格的相关性(例如最大楼层侧向力与最大位移并未发生在同一时刻),使用时甚至导致一些物理意义不明确的情况。通常包络法是偏于保守的,但是一些极端的特例下也会出现偏不安全的情况。基于上述问题,也有一些学者提出了时变计算方法,时变法计算时,采用时程分析结果的各瞬时值计算每个时刻的附加有效阻尼比,可以作为规范方法的一个较好的补充。具体可参考文献[1]和文献[2]。

2.2 能量曲线对比法

能量比法是近年新提出的附加阻尼比计算方法,其依据是结构模态耗能比等于消能器总耗能与附加阻尼比之比,因此可通过结构固有阻尼比、结构固有阻尼比对应的耗能和消能器总耗能,推算消能器附加给结构的阻尼比,能量比法概念简单,物理意义明确。计算公式如下:

$$\xi_a = \frac{W_d}{W_1} \xi_1 \quad (8)$$

式中 ξ_a 为消能减震结构的附加有效阻尼比; ξ_1 为结构固有阻尼比; W_d 为所有消能部件消耗的能量; W_1 为结构固有阻尼比对应消耗的能量。

关于结构固有阻尼比对应的耗能 W_1 和消能器耗能 W_d 可通过【显示>表格>structure output>other outputs items>total energy components】弹出非线性时程分析工况下各部分的耗能情况,如图 5 所示,依次为“输入能量”、“动能”、“势能”、“模态阻尼耗能”、“连接单元—阻尼器耗能”、“连接单元—滞回耗能”、“能量误差”。应当注意的是在图 5 表格中,各个分量是包络的结果。输入能量、模态阻尼耗能、连接单元-阻尼器耗能和连接单元-滞回耗能都是具有累积效果的,最终时刻即为累积最大值,但是动能和势能输出值则为整个时程过程中的最大值,并非最终时刻值。

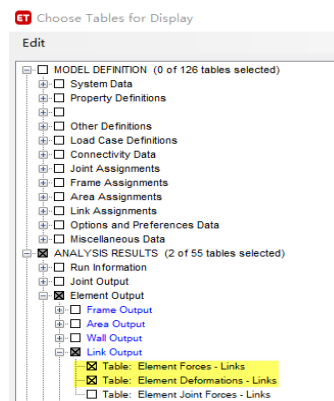


图 4 连接单元的内力与变形



ET Total Energy Components

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Total Energy Components

Filter: ((Output Case) = 'acc7-1')

	Output Case	Input Energy kN-m	Kinetic Energy kN-m	Potential Energy kN-m	Global Damping Energy kN-m	Link Damper Energy kN-m	Link Hysteresis Energy kN-m	Energy Error kN-m
▶	acc7-1	13874.4978	1512.1176	1496.0945	8057.665	5811.4298	0	0.1172

图 5 各能量包络值

以图 5 数据为例，计算附加阻尼比如下。取 $W_d=5811.4298\text{KN}\cdot\text{m}$ ，结构固有阻尼比对应的耗能 $W_1=8057.665\text{KN}\cdot\text{m}$ ，结构固有阻尼比为 5%，则附加阻尼比的值如下：

$$\xi_a = \frac{5811.4298}{8057.665} 5\% = 3.606\%$$

用户可以通过【显示>累积能量分量】或者【通过显示>显示绘图函数】显示整个时程分析内各部分耗能的累积能量图，如图 6 所示。

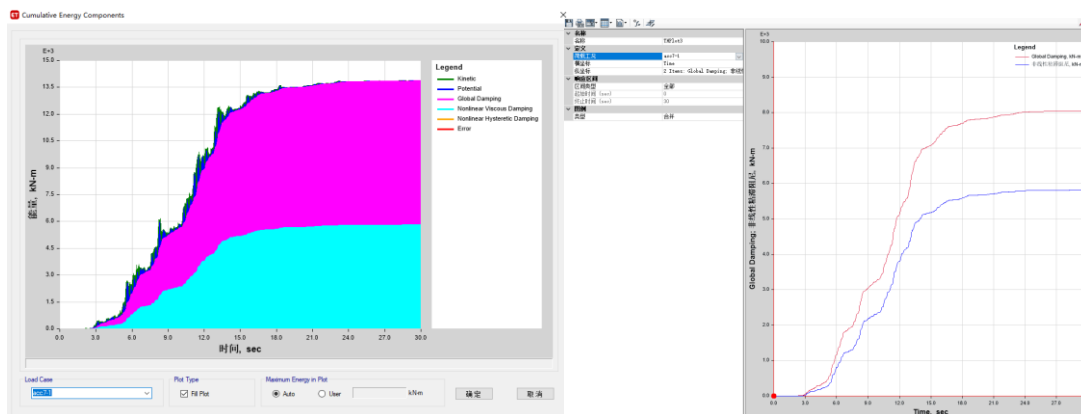


图 6 耗能分布图

由前述方法，每个时间步上都对应有一个附加阻尼比，工程中通常取最终时刻计算阻尼比，此时结构各部分耗能趋于稳定，如图 7 所示。

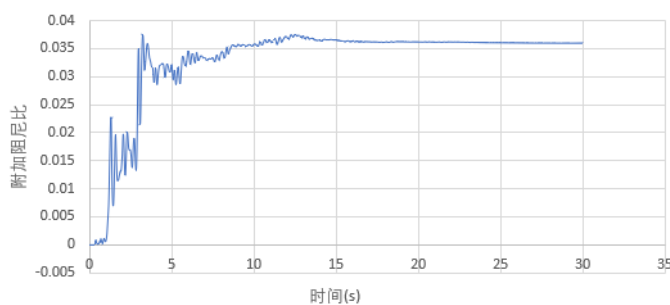


图 7 附加阻尼比时程变化曲线

2.3 结构响应对比法

结构响应对比法是采用等效对比结构动力响应的方法确定消能减震结构的附加阻尼比。

用户可建立两种模型，其中模型 A 布置有阻尼器，分析时采用 FNA 法，模态阻尼取为 5%，而模型 B 未布置阻尼器，分析时采用线性模态时程分析，模态阻尼可取大于 5% 的值，如 7%、8%、n% 等一系列数值。对比结构层剪力和层间位移角等重要响应参数(用户确定)，找到与模型 A 响应最为接近的某个模型 B，此时模型 B 的阻尼比为模型 A 的总阻尼比，扣除结构的固有阻尼比，如 5%，即可得到阻尼器附加给结构的有效阻尼比。

模型 A 采用 FNA 法与模型 B 采用线性模态时程分析法的工况定义如下图所示。

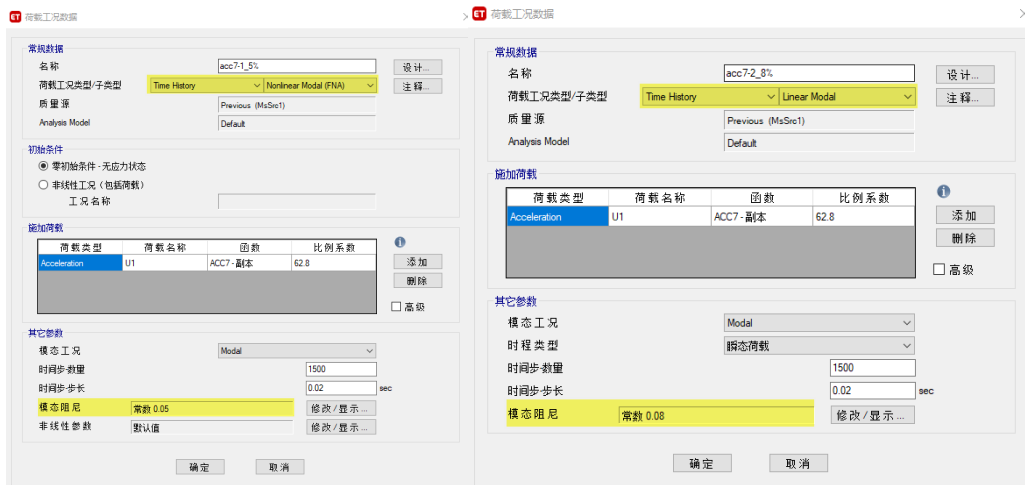


图 8 模型 A 与 B 的工况定义

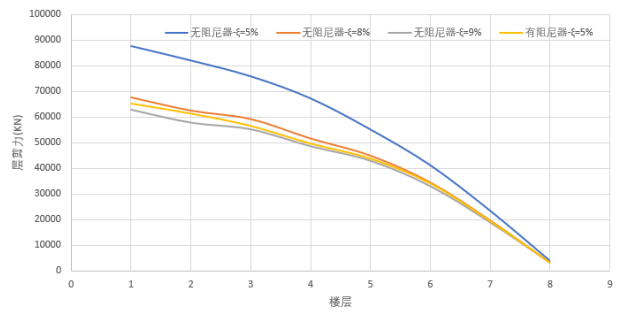


图 9 层剪力曲线对比

从若干定义有不同模态阻尼比的模型 B 中，筛选出结构响应与模型 A 基本吻合的模型 B，两模型的结构响应对比如图 9、10 所示。从两图可以看出以不同的参考指标确定结构的附加阻尼比会稍有不同，但可保守的取为 8% 左右。

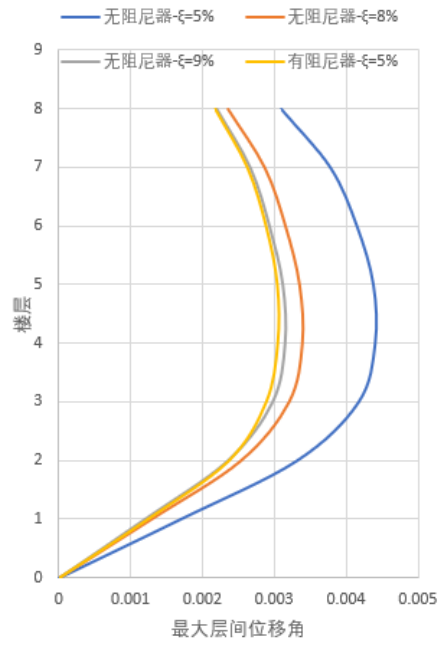


图 10 结构层间位移角

3. 小结

本文介绍了消能减震结构中附加阻尼比的三种计算方法。采用规范的应变能的计算方法时，计算过程比较复杂，如果通过 API 等二次开发工具计算也可节省大量时间；能量比法概念简单、直观，参数提取便捷，可作为参考使用；结构响应对比法需要若干的类比模型，有较强的宏观概念。工程师们可根据消能装置的类型和计算效率，选择相应的计算方法。

参考文献:

[1]周云,区彤,徐昕,商城豪.基于应变能法的附加有效阻尼比时变计算方法研究[J].建筑结构,2019,49(11):103-108.
 [2]徐昕,区彤,周云,孙作玉,段静.BRB 消能减震结构设计中附加有效阻尼比计算方法分析研究[J].建筑结构,2018,48(17):89-95.
 [3]丁洁民,吴宏磊.粘滞阻尼技术工程设计与应用[M].北京:中国工业出版社,2017.



ETABS 中组合柱的定义、分析与校核

筑信达 刘慧璇

组合柱被广泛用于各类高层、大跨结构等实际工程中。常见的组合柱有两大类，型钢混凝土柱和钢管混凝土柱。这些组合柱能方便地在 ETABS 中建立，并进行分析和校核。目前，ETABS 可以根据 PMM 曲面校核型钢混凝土柱的承载力，以及按中国规范进行钢管混凝土柱的设计。本文将就组合柱的截面定义、分析、设计进行介绍。

1. 钢管混凝土柱

1.1 定义截面

点击【定义>截面属性>框架截面>添加截面】，选择组合截面中的钢管混凝土截面（如图 1a），对其进行定义。如图 1b，可在图示①处定义钢管采用的材料，图示②处定义钢管的直径和钢管壁厚，图示③处定义填充的混凝土材料。

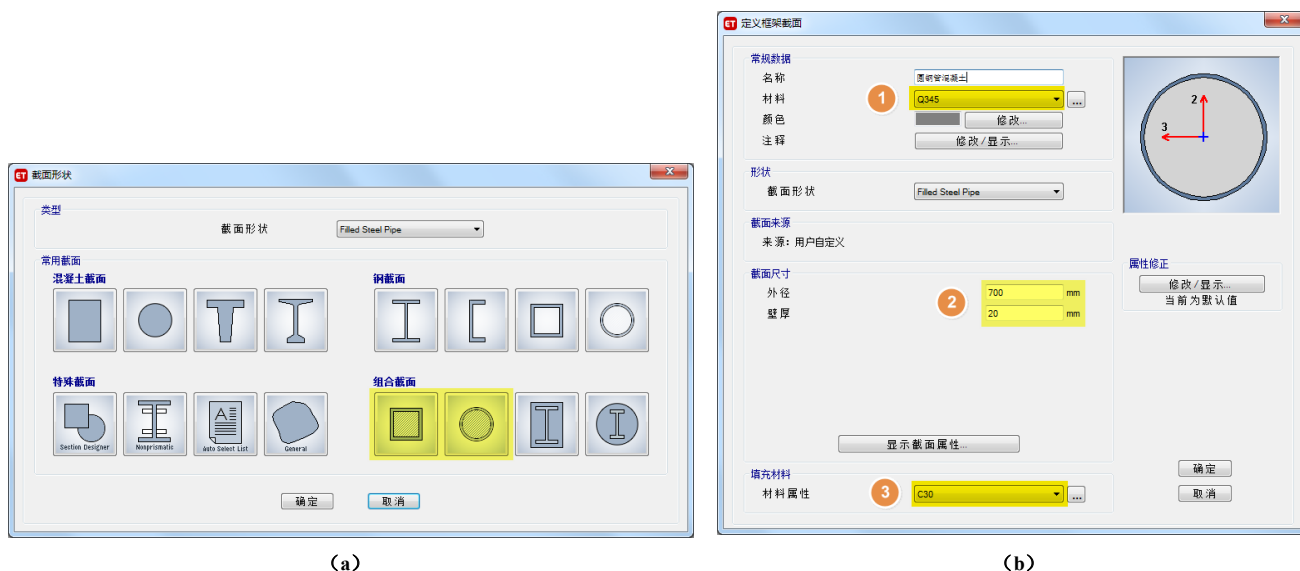


图 1 定义钢管混凝土截面

1.2 分析与设计

对于钢管混凝土柱，分析完成后，点击【设计>组合柱设计】，在设计首选项中选择 Chinese2010（程序目前仅实现了《高层建筑混凝土结构技术规程》和《矩形钢管混凝土结构技术规程》的相关规定），进行设计和校核。构件输出的设计细节有“包络”和“摘要”两种。“摘要”显示的是采用当前测站位置的设计内力得到的校核结果。“包络”则显示整个构件（拉）压弯承载力、稳定性、以及抗剪能力校核结果的最大值。

1.2.1 圆形钢管混凝土柱

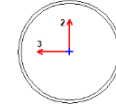
图 2 为某圆形钢管混凝土柱的设计细节。

设计规范选择 Chinese2010 时，程序将基于《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010) 的附录 F，对圆形钢管混凝土柱进行校核：

- a) 受压承载力验算：程序按 JGJ3-2010 F.1.2 条验算单肢柱的轴心受压承载力。
- b) 拉弯承载力验算：程序按 JGJ3-2010 F.1.7 条验算单肢柱的拉弯承载力。
- c) 受剪承载力验算：程序按 JGJ3-2010 F.1.8 条验算单肢柱的受剪承载力。
- d) 构造验算：

Chinese 2010 组合柱 - 钢管混凝土校核

层: Story1	单元: C3	测站位置: 3000 mm
截面 ID: 圆钢管混凝土	组合编号: DCon7	长度: 3600 mm
方向: 柱	Y ₀ : 1	Y _{RE} : N/A
Y _{RE} (S): N/A	Y _{REV} : N/A	框剪 SMF: N/A
抗震等级: 二级	D=700 mm	t=20 mm
r _c =330 mm	l=3000 mm	A _s =427.3 cm ²
A _c =3421.2 cm ²	E _s =206000 MPa	f _s =295 MPa
E _c =30000 MPa	f _c =14.3 MPa	-



错误信息 - Section is Slender

设计内力

组合	N kN	M ₃₃ kN-m	M ₂₂ kN-m	V ₂ kN	V ₃ kN	M ₁ kN-m	M ₂ kN-m
DCon7	-35.4101	17.2149	-9.4225	-8.7764	4.8603	10.4729	19.6249

设计系数

长度系数 μ	有效系数 k	钢筋混凝土承载力比 θ	系数 φ_l	系数 φ_e	系数 φ_0	系数 β	系数 a/D _{major}	系数 a/D _{minor}
1.25	0.5	2.576	1	0.234	0.866	0.534	2824.548	2791.691

拉弯构件和压弯构件设计

强度比

$$\gamma \frac{N}{\varphi_l \varphi_e N_c} = 0.007$$

JGJ3-2010 (F.1.2-1)

抗剪设计

图 2 圆形钢管混凝土柱设计细节

基于 JGJ3-2010 11.4.9 条自动判断构件是否符合构造要求:

- 1) $D \geq 400\text{mm}$, D 为钢管外径;
- 2) $t \geq 8\text{mm}$, t 为钢管壁厚;
- 3) $20\sqrt{235/f_y} \leq D/t \leq 100\sqrt{235/f_y}$, f_y 为钢材的屈服强度;
- 4) $0.5 \leq \theta \leq 2.5$, θ 为套箍指标, $\theta = \frac{A_a f_a}{A_c f_c}$;
- 5) 柱子的长细比 $\frac{L_e}{D/2} \leq 80$;
- 6) $e_0/r_c \leq 1$;

当不满足构造要求时, 将给出如图 2 红框中所示的错误信息。

表 1 圆钢管混凝土柱设计细节参数说明

项目	解释
长度系数 μ	考虑柱端约束条件的计算长度系数, 根据梁柱刚度的比值, 按 GB50017 确定
有效系数 k	考虑柱身弯矩分布梯度影响的等效长度系数, 按 JGJ3-2010 F.1.6 确定
钢筋混凝土承载力比 θ	钢管混凝土的套箍指标, 按 JGJ3-2010 F.1.2-4 计算
系数 φ_l	考虑长细比影响的承载力折减系数, 按 JGJ3-2010 F.1.4 确定
系数 φ_e	考虑偏心率影响的承载力折减系数, 按 JGJ3-2010 F.1.3 确定
系数 φ_0	按轴心受压柱考虑的 φ_l 值
系数 β	柱两端弯矩设计值之绝对值较小者 M_1 与绝对值较小者 M_2 的比值, 按 JGJ3-2010 F.1.6 确定
系数 a/D _{major}	主轴方向剪跨 a 与柱径 D 的比值
系数 a/D _{minor}	次轴方向剪跨 a 与柱径 D 的比值

11.2.2 矩形钢管混凝土柱

图 3 为某矩形钢管混凝土柱的设计细节。



图 3 矩形钢管混凝土柱设计细节

设计规范选择 Chinese2010 时，程序将基于《高层建筑混凝土结构技术规程（JGJ3-2010）》和《矩形钢管混凝土结构技术规程（CECS159:2004）》，对矩形钢管混凝土柱进行校核：

- a) 双轴压弯承载力验算：程序按 CECS159: 2004 6.2.5 条验算柱的压弯承载力。
- b) 双轴拉弯承载力验算：程序按 CECS159: 2004 6.2.7 条验算柱的拉弯承载力。
- c) 抗剪承载力验算：程序将按 CECS159: 2004 6.3.4 条验算柱的抗剪承载力。
- d) 稳定性验算：程序将按 CECS159: 2004 6.2.6 条验算柱分别绕主轴 x、y 的稳定性。
- e) 构造验算

基于 JGJ3-2010 11.4.10 条自动判断构件是否符合构造要求：

- 1) $b \geq 400\text{mm}$ 且 $h \geq 400\text{mm}$;
- 2) $t_w \geq 8\text{mm}$ 且 $t_f \geq 8\text{mm}$;
- 3) $h/b \leq 2$ 且 $b/h \leq 2$;
- 4) $b/t_f \leq 60\sqrt{235/f_y}$ 且 $h/t_w \leq 60\sqrt{235/f_y}$, f_y 为钢材的屈服强度;
- 5) $\lambda_x \leq 80$ 且 $\lambda_y \leq 80$;
- 6) $\frac{N}{N_u} \leq \|\mu_N\|$, $\|\mu_N\|$ 为矩形钢管混凝土柱的轴压比限值。

当不满足构造要求时，将给出错误警告。

表 2 矩形钢管混凝土柱设计细节参数说明

项目	解释
α_c	受压构件中混凝土的工作承担系数，按 CECS159: 2004 4.4.2 条确定
d_n	管内混凝土受压区高度，按 CECS159: 2004 6.2.1-4 计算
长度系数	考虑柱端约束条件的计算长度系数，根据梁柱刚度的比值，按 GB50017 确定
有效长度系数	考虑柱身弯矩分布梯度影响的等效长度系数，按 JGJ3-2010 F.1.6 确定
系数 λ	长细比，按 CECS159: 2004 6.1.3-2 计算
限值 λ	长细比限值，按 GB50017 和 GB50011 8.3.1 条确定
系数 β	弯矩等效系数，柱两端弯矩设计值之绝对值较小者 M_1 与绝对值较小者 M_2 的比值，按 JGJ3-2010 F.1.6 确定

2. 型钢混凝土柱

建议采用 SD 截面定义型钢混凝土柱，程序将基于构件的 PMM 曲面，根据《混凝土结构设计规范》进行构件的截面设计和承载力校核。

2.1 定义截面

如图 4，点击【定义>截面属性>框架截面>添加截面>SD 截面】，在弹窗中定义截面参数：①基本材料选择混凝土；②选择是否校核或设计构件；③在截面设计器中绘制其截面具体形状；④可输出截面属性，程序将基于基本材料计算其截面属性，计算过程可参考知识库“[组合截面的截面属性计算原则](#)”，该截面属性仅用于分析内力，不用于设计。



图 4 SD 截面

在**截面设计器**中，用户可自定义截面尺寸、布筋形式等。如图 5 所示，可通过左侧的绘图按钮灵活绘制型钢和混凝土截面，在混凝土截面的任意位置右键单击，可在弹窗中设置材料、截面尺寸、钢筋直径与数量、保护层厚度等信息。

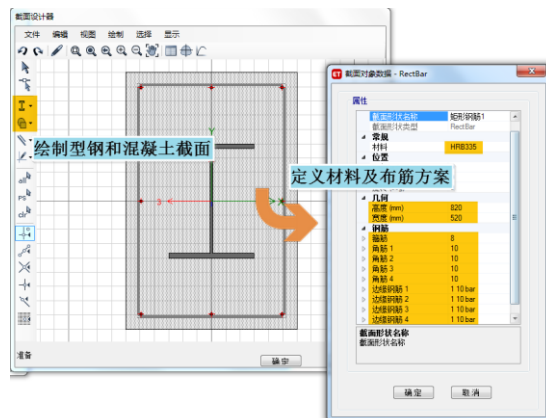


图 5 截面设计器

2.2 分析与设计

对于型钢混凝土柱，分析完成后，点击【设计>混凝土框架设计】，程序基于构件截面生成 PMM 曲面，根据混凝土结构设计规范 GB50011-2010 进行承载力校核或设计。注意，计算 PMM 曲面的构件截面并不是使用基本材料的等效截面，而是按实际截面形式，考虑了型钢的作用。

现以某工程案例进行说明。图 6 所示为一个多层悬挑框架结构，图中标黄的柱截面尺寸为 700×700mm，内嵌型钢为

400×300×16×12, 当截面采用**校核配筋**时(图 7a), 配筋结果为“(15824)”, 表示的是“(型钢面积 14020+纵筋面积 1804)”, 此时 Dcon26 内力组合下, 构件测站 2m 处的 **D/C 比为 0.458**, 如图 8a 所示; 当截面采用**设计配筋**时(图 7b), 配筋结果则显示“3638”, 表示的是整根构件的**设计配筋面积最大值**。程序基于截面定义的布筋方案, 根据 PMM 曲面和设计首选项中设置的 D/C 比限值(默认值为 1), 调整钢筋直径, 直至满足应力比需求, 得到设计配筋方案。可以看见此时 Dcon26 内力组合下, 构件测站 2m 处的 **D/C 比为 0.568**, 如图 8b 所示。可查看构件设计细节, 如图 8c。

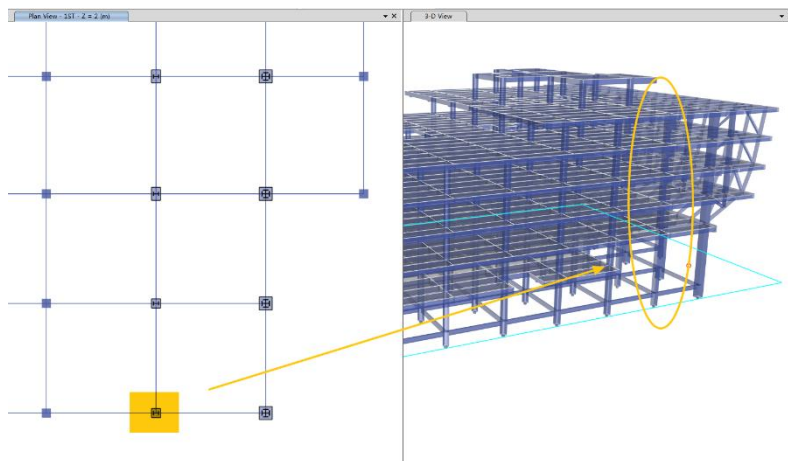
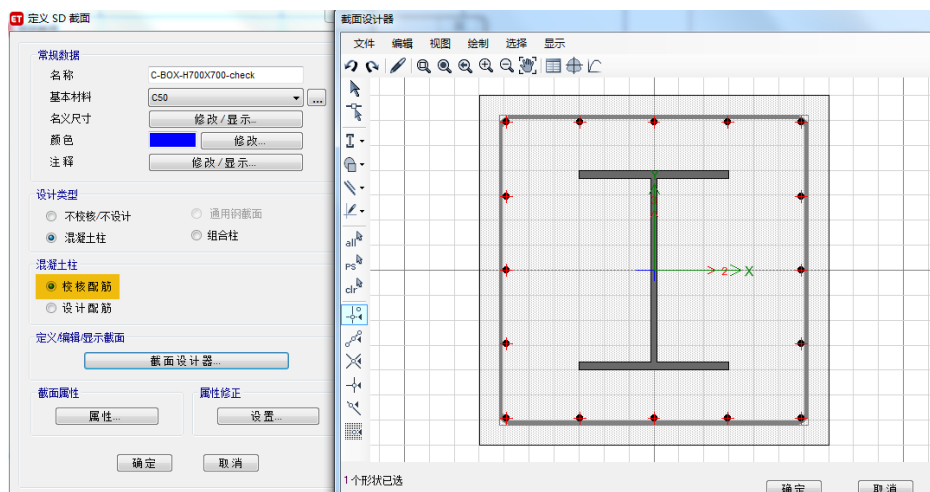
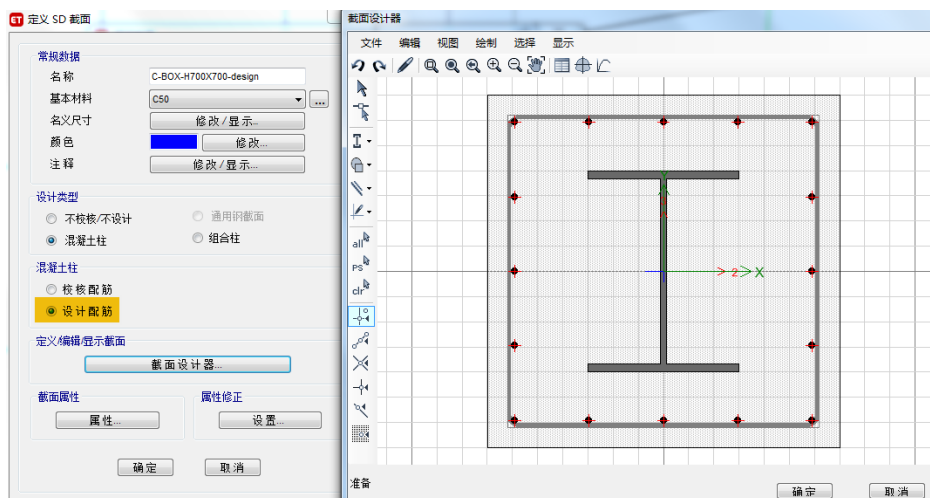


图 6 案例模型

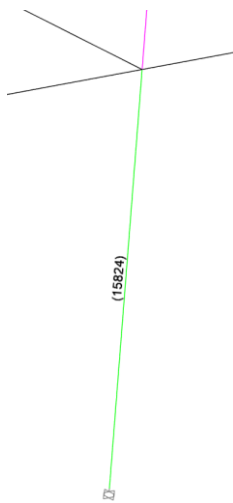


(a) 矩形型钢混凝土柱-校核



(b) 矩形型钢混凝土柱-设计

图 7 矩形型钢混凝土柱截面



Concrete Column Design Information (Chinese 2010)

Story: 1ST, Column: C158

COMBO ID	STATION LOC	CAPACITY RATIO	MAJOR REINFOR
DCon24	1.0000	0.459	
DCon24	2.0000	0.446	
DCon25	0.0000	0.471	
DCon25	1.0000	0.458	
DCon25	2.0000	0.445	
DCon26	0.0000	0.489	
DCon26	1.0000	0.474	
DCon26	2.0000	0.458	
DCon27	0.0000	0.550	
DCon27	1.0000	0.479	
DCon27	2.0000	0.420	
DCon28	0.0000	0.550	
DCon28	1.0000	0.479	
DCon28	2.0000	0.420	
DCon29	0.0000	0.501	

Strength (selected) / Deflection

Interaction Surface for Section C-BOX-H700X700-check (Chinese 2010) Station 2 m

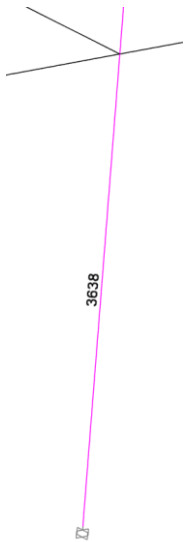
Display Options: Show Design Code Data (selected)

Combo: DCon26
 P: 5102.1978 kN
 M2: 160.2845 kN-m
 M3: 119.9383 kN-m
 D/C Ratio: 0.458

Point	P kN	M2 kN-m	M3 kN-m
1	11520.307	0	0
2	11520.307	111.7469	83.6184
3	11491.262	292.2788	218.7075
4	10123.3209	508.4262	380.4471
5	8032.8864	702.7667	525.8689
6	5290.4418	812.2333	607.781
7	1947.5008	800.5589	599.0452
8	-1510.6236	608.2833	455.1686
9	-3726.4174	306.9366	229.6757
10	-4647.27	105.6891	79.0855
11	-4985.0585	0	0

DCon26 Curve is at 53.193 deg

(a) “矩形型钢混凝土柱-校核”截面相关面



Concrete Column Design Information (Chinese 2010)

Story: 1ST, Column: C158

COMBO ID	STATION LOC	LONGITUDINAL REINFORCEMENT	MAJOR REINFOR
DCon24	1.0000	3078	
DCon24	2.0000	3078	
DCon25	0.0000	3078	
DCon25	1.0000	3078	
DCon25	2.0000	3078	
DCon26	0.0000	3078	
DCon26	1.0000	3078	
DCon26	2.0000	3078	
DCon27	0.0000	3638	
DCon27	1.0000	3638	
DCon27	2.0000	3638	
DCon28	0.0000	3638	
DCon28	1.0000	3638	
DCon28	2.0000	3638	
DCon29	0.0000	3638	

Strength (selected) / Deflection

Interaction Surface for Section C-BOX-H700X700-design (Chinese 2010) Station 2

Display Options: Show Design Code Data (selected)

Combo: DCon26
 P: 5102.1978 kN
 M2: 160.2845 kN-m
 M3: 119.9383 kN-m
 D/C Ratio: 0.568

Point	P kN	M2 kN-m	M3 kN-m
1	8984.2776	0	0
2	8984.2776	91.501	68.4687
3	8984.2776	265.219	198.4591
4	8984.2776	473.4179	354.251
5	7804.5973	655.1247	490.2192
6	5191.4615	746.5728	558.6483
7	1993.8605	723.7264	541.5528
8	-1384.1591	535.2427	400.5134
9	-3430.9653	255.3269	191.057
10	-4233.9191	79.6962	59.6354
11	-4483.8134	0	0

DCon26 Curve is at 53.193 deg

(b) “矩形型钢混凝土柱-设计”截面相关面

ETABS 18.0.2

License #

Chinese 2010 柱截面设计

层: 1ST 单元: C158 截面 ID: C-BOX-H700X700-design



测站位置: 2000 mm	组合编号: DCon26	设计方法: PMM
抗震: 否	$\gamma_s = 1$	$l_0 = 2000$ mm
一般截面	$b = 200$ mm	$f_{ok} = 34.55$ MPa
$f_c = 16.48$ MPa	$f_t = 1.56$ MPa	$E_c = 34500$ MPa
$f_{yk} = 400$ MPa	$f_y = 360$ MPa	$f_{yk} = 360$ MPa
$E_s = 200000$ MPa	$a_s = 40$ mm	

轴力及双向受弯设计 PMM

钢筋面积 mm ²	钢筋比 %	设计 N kN	设计弯矩 M2 kN-m	设计弯矩 M3 kN-m
3078	0.55	5102.1978	160.2845	119.9383

Factored Axial Force and Biaxial Moment

Factored P _s kN	Factored M ₂ kN-m	Factored M ₃ kN-m
5102.1978	41.2332	0.887

设计参数 (GB50010 6.2.3)

	半径 i mm	长度 l _c mm	M ₁ kN-m	M ₂ kN-m	p-Δ 效应
主抗弯 (M3)	190.8	2000	0.887	40.3599	否
次抗弯 (M2)	198.3	2000	41.2332	105.1355	否

(c) “矩形型钢混凝土柱-设计”截面部分设计细节

图 9 设计信息

3 设计首选项与覆盖项

当用户需修改某些构件的设计参数时，可选中该构件，通过【设计>组合柱设计>设计覆盖项】进行修改，如图 10。图中部分参数意义见下表：

编号	选项	解释
4	框剪结构剪力调整系数 (SMF)	按JGJ3-2010 8.1.4、9.1.11、11.1.6；GB50011-2010 6.6.3-1、8.2.3-3中相关规定调整
5	弯矩放大系数MMF - 柱顶	框架柱和框支柱柱顶弯矩放大系数
6	弯矩放大系数MMF - 柱底	框架柱和框支柱柱底弯矩放大系数
7	剪力放大系数SMF-柱	框架柱剪力放大系数
8	轴力放大系数AFMF-柱	框支柱轴力放大系数
9	转换柱类型	通过该选项选择柱内力调整方式，转换柱和框支柱应满足JGJ 3-2010 10.2.11 和3.10.4 规定。 框支柱调整满足JGJ 3-201010.2.17 条规定。
10	柱位置	影响角柱内力调整及柱的最小配筋率
13	无支撑长度比(主)	绕框架对象主轴无支撑长度系数，此项用于考虑节点搭接和支撑作用影响
14	无支撑长度比(次)	绕框架对象次轴无支撑长度系数，此项用于考虑节点搭接和支撑作用影响
15	有效长度系数(μ 主)	有效长度系数(μ 主)，根据GB50010-2010 6.2.20-2
16	有效长度系数(μ 次)	有效长度系数(μ 次)，根据GB50010-2010 6.2.20-2
17	弯矩增大系数 (Dns主)	弯矩增大系数，根据GB50010-2010 6.2.4条规定
18	弯矩增大系数 (Dns次)	弯矩增大系数，根据GB50010-2010 6.2.4条规定

选项	数值
02 设计类型	柱
03 抗震设计等级	二级
04 框剪结构剪力调整系数(SMF)	1
05 弯矩放大系数 MMF - 柱顶	1.32
06 弯矩放大系数 MMF - 柱底	1.1
07 剪力放大系数 SMF - 柱	1.584
08 AFMF (柱)	1
09 转换柱类型	非转换柱
10 柱位置	角柱
11 净截面与毛截面面积比	1
12 活荷载折减系数	1
13 无支撑长度系数(主)	0.7
14 无支撑长度系数(次)	0.7
15 有效长度系数(μ 主)	1.25
16 有效长度系数(μ 次)	1.25
17 弯矩增大系数 (Dns 主)	0
18 弯矩增大系数 (Dns 次)	0

图 10 设计覆盖项

4 小结

本文着重介绍了 ETABS 中组合柱的截面定义、设计与校核。

对于钢管混凝土柱，用户可采用组合截面直接定义，ETABS 实现了《高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ3-2010)》和《矩形钢管混凝土结构技术规程 (CECS159:2004)》的构件设计与校核。

对于型钢混凝土柱，建议采用 SD 截面进行定义，ETABS 将根据 PMM 曲面对构件进行正截面承载力校核或设计。

同时，SD 截面也适用于更为复杂的组合柱截面的分析和设计。

常规桥梁阶段施工模拟在 CSiBridge 中的实现

筑信达 吕良

由于大型桥梁的施工工艺复杂，施工过程漫长，为了保证内力控制合理、合龙精度符合要求以及成桥线形与设计线形相吻合，必须进行桥梁的施工阶段分析。CSiBridge 作为桥梁分析设计软件，不仅继承了 SAP2000 高效准确的分析内核，同时基于桥梁工程背景，加入了一些特有的功能，能解决各类复杂桥梁的施工阶段分析问题。本文将主要介绍常规桥梁阶段施工模拟在 CSiBridge 中的实现。

1 方法概述

施工阶段分析一般是在完成成桥状态分析后进行的，通常需要考虑支架的安装拆除、挂篮的移动、结构体系转换、混凝土的收缩徐变等问题。因此其分析的重点与流程与成桥状态分析会有一些区别。

CSiBridge 施工阶段分析的一般流程如下：

- (1)建立整体桥梁模型(包括截面、材料、边界、荷载)；
- (2)定义材料的收缩徐变特性；
- (3)定义各施工阶段的结构组、荷载组、边界组；
- (4)按实际施工顺序和工期定义施工阶段(利用已定义的结构组、荷载组、边界组)；
- (5)点击运行分析，分析完成后利用后处理功能查看分析结果。

依据上述分析流程，后文将简要的介绍在 CSiBridge 中进行施工阶段分析时涉及到的一些功能及需要注意的一些问题。

2 模型的建立

对于常规桥梁，CSiBridge 采用参数化方式能快速建立全桥模型。但是参数化模型中不包括临时支架、挂篮走行、结构转换等信息，因此在做施工阶段分析时，需要在建立全桥模型后添加这些额外的组件或荷载。这些操作可以通过高级选项卡中的相关命令来完成。例如：悬臂施工桥梁零号块的临时固结，可采用绘制的连接单元来模拟；现浇段的支架可采用绘制单点连接模拟；挂篮荷载可采用指定集中荷载模拟等。其定义方式灵活，适用于分析模拟桥梁各类施工方式。

钢混组合梁桥的施工工艺和常规混凝土梁桥有所区别，常采用先钢梁后混凝土板的施工顺序，钢梁既作为桥梁腹板，在施工时也兼作施工支撑的一部分。混凝土面板常采用现浇或预制的方式安装。因此在施工时，钢梁和混凝土之间会存在施工时间差异。一般设计软件在处理钢混叠合梁的施工阶段分析时，为了建模及分析的便利，常采用组合截面或联合截面将两种材料构成的截面近似的处理为一种材料截面。在模拟混凝土板浇筑时刚度的转变、计算收缩徐变时必然与真实情况有所不同。

在 CSiBridge 中可通过预设的钢混组合梁截面模板定义主梁截面，从而避免的建模困难的问题。程序直接采用壳单元来模拟混凝土板，而钢梁既可以采用杆系单元也可以采用壳单元模拟。两种不同属性的材料单独考虑其结构的添加删除、荷载的施加、属性的转变等，程序会自动考虑不同单元之间的连接关系。因此其计算结果必然更加贴近结构的真实情况。关于钢混叠合梁施工阶段模拟的更多信息可查看筑信达知识库《[钢混组合梁桥的施工阶段分析](#)》。

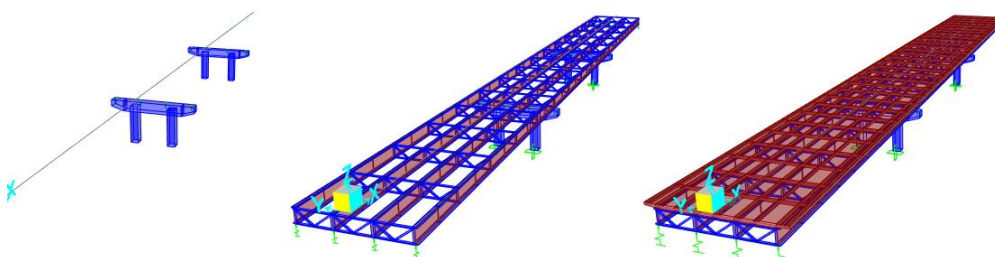


图1 钢混叠合梁施工阶段分析

另外，对于采用悬臂浇筑或分段施工的混凝土梁桥，在 CSiBridge 中可以通过分段建模助手对悬臂施工桥梁的施工分段、悬臂段钢束和施工阶段进行快速参数化定义，能极大的减少工程师在建立模型时所花费的时间。更多关于分段桥梁建模助手

的信息可查看技术通讯文章《[在 CSiBridge 中快速定义分段施工桥梁](#)》。

3 混凝土的收缩徐变

收缩徐变是混凝土材料本身所固有的特性。收缩徐变会导致混凝土结构的内力和变形随时间不断变化，对于预应力混凝土结构还会造成预应力的损失。对于分段悬臂浇注的大跨度预应力混凝土桥梁，其影响尤为显著。因此进行施工阶段分析时一般都需要考虑混凝土的收缩徐变。

混凝土收缩徐变的计算有方法很多，CSiBridge 也内置了多个国家和地区的规范推荐方法，其中中国规范参考了欧洲规范 CEB-FIP90 的计算方法，在程序中主要是通过三个参数来控制：徐变系数、收缩系数、及强度发展系数，如下图 2 所示。如需要考虑混凝土相应的时间属性，则勾选对应属性前的选框，并依据规范填入相关材料的参数，程序即会计算出混凝土的时间参数。需要注意的是中国规范并没有规定混凝土的强度发展系数，因此计算时如果勾选了考虑混凝土的强度变化，强度发展系数的计算方式与欧标一致。



图 2 混凝土时间相关属性

用户在依据规范输入混凝土的相关参数后，即可查看徐变系数、收缩系数、及强度发展系数随时间的变化曲线，如下图所示。将鼠标挪至曲线上任意一点，程序即会输出当前时刻的系数大小，方便用户校核。另外，对于一些特殊材料程序还允许用户自行输入材料的徐变系数曲线、收缩系数曲线以及强度发展曲线，以满足工程需要。

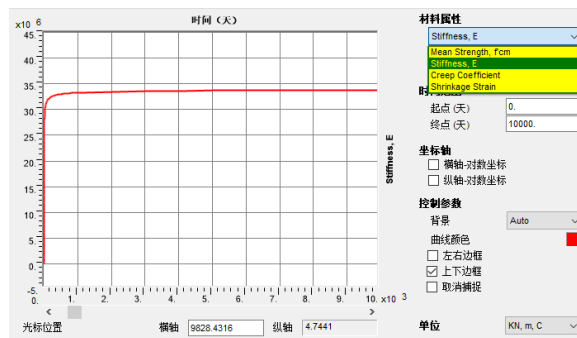


图 3 混凝土的徐变系数曲线

4 结构组的设置

为了方便在不同的阶段同时安装或移除某一部分构件，在定义施工阶段之前，一般需要将同一阶段安装或移除的结构构件指定到一个组。需要注意的是 CSiBridge 中有两种组的定义方式。对于通过桥梁对象定义的组件，一般可以通过**桥对象**选项卡来进行组的定义。而通过**高级**选项卡中的绘图命令绘制的组件，则可以通过高级选项卡中的指定命令来定义组。对于这两种定义对象组方式的详细区别可查看筑信达知识库文档《[CSiBridge 中组的定义](#)》。

5 施工阶段的定义与规划

大型桥梁划分的施工阶段多、结构形式变化多样，如果直接在工况中编辑各个施工阶段及流程，不仅效率较低也很容易出错。为此在 CSiBridge 中可以通过**阶段规划**功能来定义并规划各个施工阶段。在编辑**阶段规划**时，用户首先需要定义好各个阶段结构状态的变化，用户可通过操作：Add Structure、Remove Structure、Load Objects、Change Section 等命令来模拟当



前阶段中，结构的添加、移除、荷载施加、构件属性转换等变化，如图 4 所示。在指定操作时需要同时指定该操作对应的组，对于需要考虑收缩徐变的混凝土结构，还可以指定结构的添加龄期。该龄期表示的是结构激活时的龄期，用于确定收缩应变时结构的材龄以及计算徐变系数和混凝土的强度发展，因此在考虑徐变和混凝土强度发展时，结构的添加龄期一定要准确定义。

定义完各个施工阶段定义后，即可采用施工横道图的方式来定义整个施工流程。对于该流程，用户仅需关注各施工阶段的**持续时间和紧前工序**。编辑完成后如图 5 所示，用户可通过横道图直观的了解在施工过程中结构在每一个阶段的持续时长、前后施工阶段的逻辑关系。便于检查施工顺序、结构状态等。对于一些重要的阶段，可以通过设置输出标签，来查看该阶段的结构受力状态。

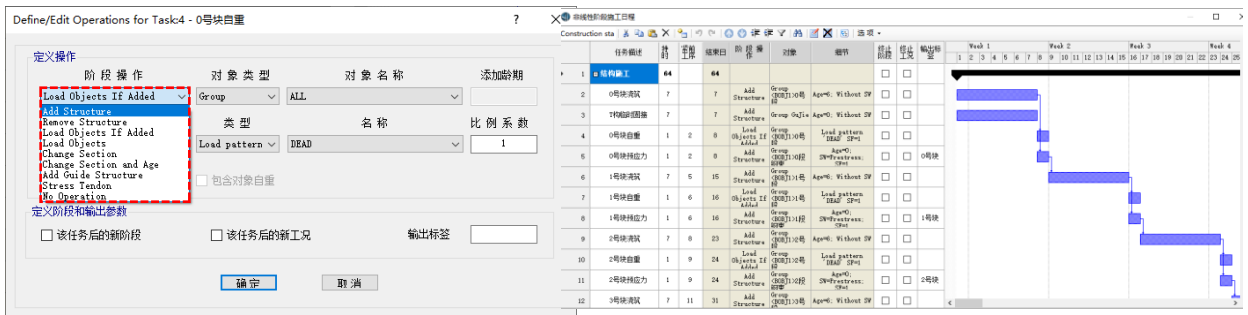


图 4 阶段规划窗口

图 5 定义施工阶段

完成**阶段规划**的定义后，程序会自动生成对应的**荷载工况**。该工况为程序自动生成的工况，无法直接修改，用户可复制后进行编辑。在该荷载工况窗口中，程序详细列出了在施工过程中，结构在各个阶段的刚度、质量、荷载、边界条件变化。各个阶段的结构的状态不断变化，每一个阶段的分析都是在上一阶段分析的结果基础上进行的，因此施工阶段分析为非线性静力分析工况。对于高墩及大跨桥梁一般还需要考虑材料的非线性甚至几何非线性，CSiBridge 中的施工阶段分析可以考虑材料及几何的双重非线性。

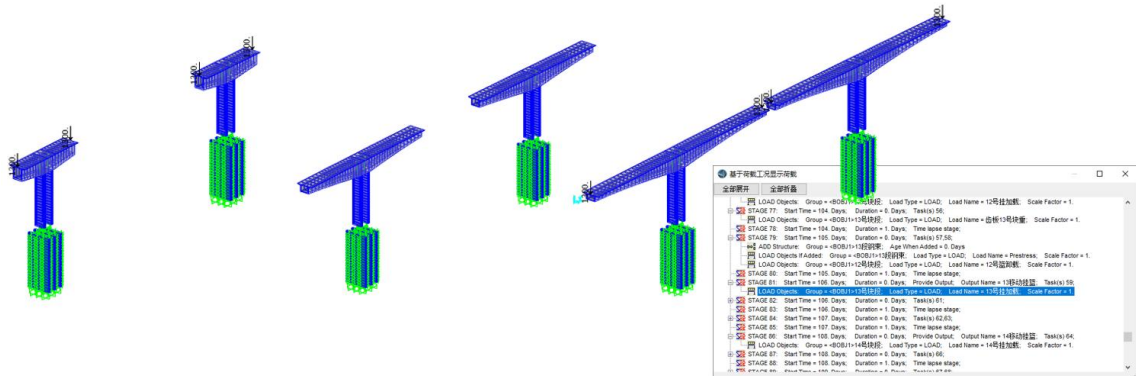


图 6 查看施工阶段荷载工况

CSiBridge 中不仅可以通过**阶段规划**窗口或**荷载工况**窗口来检查施工阶段的定义，还可以结合图形来查看结构在各个施工阶段荷载、结构形式、边界条件的变化。在开始选项卡显示一栏，可以通过工况来查看结构荷载。对于施工阶段分析，程序会以树型菜单的形式列出各个分析阶段，如图 6 所示。依次点击各个施工阶段，窗口中的模型会依据各个施工阶段定义的不同显示各个阶段模型、荷载、边界条件等的变化，方便用户校核。

6 总结

参数化的建模方式结合高级选项卡中的绘制功能，解决了 CSiBridge 在模拟各类桥梁复杂施工建模的问题。同时软件自带的多种工具与功能为钢混组合梁桥及悬臂施工梁桥的施工阶段分析提供了极大的便利。对于施工阶段分析中需要考虑的时间效应，用户可以灵活选择。采用横道图以及图形显示的方式来帮助用户定义整个施工阶段的流程，能直观的显示整个施工过程中结构的变化。进行施工阶段分析时，CSiBridge 具有能解决各类问题的普遍性，也具有针对解决某一些问题的便利性，能帮助工程师高效解决施工阶段分析问题。

基于美标的螺栓承载力计算

筑信达 张志国

目前，IDEA 支持基于美标 AISC、欧标 EN、加拿大规范 CISC、澳大利亚规范 AS、俄罗斯规范 SP 以及国标 GB 的钢结构节点校核，具体包括：板件校核、焊缝校核、螺栓或锚栓校核以及柱脚节点的混凝土校核。为了让广大用户深入学习和理解关于钢结构节点校核的更多细节，本文将重点介绍基于美标 AISC 360-16 的螺栓承载力在 IDEA 中的具体计算方法。关于其它组件（锚栓、焊缝）或其它规范（欧标 EN、国标 GB）的钢结构节点校核内容，请读者参阅《筑信达技术通讯》中刊载的往期文章或关注本期刊的后续文章。

美标 AISC 360-16 支持分项系数设计法（LRFD）和允许应力设计法（ASD）两种设计方法，前者的承载力设计值 ϕR_n 中包含分项系数 ϕ ，后者的允许承载力 R_n/Ω 中包含安全系数 Ω ，用户可根据需要选择具体采用的设计方法，也可以在 IDEA 的设置选项中修改上述分项系数和安全系数的默认值。本文将在后续内容中分别介绍上述两种设计方法在基于美标的螺栓承载力计算中的具体应用。

1 普通螺栓的承载力

1.1 抗拉承载力和抗剪承载力

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$

$$R_n = F_n A_b \quad \text{(AISC 360-16 J3-1)}$$

上式中， A_b 为根据螺栓（公称）直径 d 计算的螺杆截面面积，即： $A_b = \pi d^2/4$ 。注意，美标 AISC 并未在 A_b 中考虑螺纹对螺栓抗拉或抗剪承载力的削弱作用。 F_n 为螺栓的抗拉强度 F_t 或抗剪强度 F_v ，具体取值详见 AISC 360-16 表 J3.2。从表中数据可以看出，各个材料等级的螺栓均区分是否考虑螺纹的两种强度取值。以常见的 A490 为例，考虑螺纹的抗剪强度为 469MPa，不考虑螺纹的抗剪强度为 579MPa，后者大于前者。

可以看出，美标 AISC 采用折减抗剪强度的方式考虑螺纹对螺栓抗剪承载力的削弱作用，而非直接采用螺杆的有效截面面积。同时，上述强度折减仅限于螺栓的抗剪强度而不影响抗拉强度。这一点与欧标 EN 和国标 GB 有所不同，后两者均采用螺栓在螺纹处的有效直径 d_e 计算螺栓的抗拉承载力。抗剪承载力则可采用公称直径或有效直径，国标取公称直径，欧标可根据需要二选一。

1.2 承压承载力

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$

$$\text{标准孔: } R_n = 1.2l_c t F_u \leq 2.4dt F_u \quad \text{(AISC 360-16 J3-6a, J3-6c)}$$

$$\text{槽孔: } R_n = 1.0l_c t F_u \leq 2.0dt F_u \quad \text{(AISC 360-16 J3-6e, J3-6f)}$$

上式中， F_u 为承压板件的抗拉强度，具体取值与钢材牌号有关，用户可在 IDEA 的材料列表中查看。以常见的 A36 为例，抗拉强度 $F_u=400\text{Mpa}$ 。 l_c 为沿传力方向螺孔边缘与相邻螺孔边缘或板件边缘之间的净距离， d 和 t 分别为螺栓直径和承压板件的厚度。

事实上，上述承压承载力的计算公式包括两种板件破坏方式，即：孔壁的挤压破坏和板件的剪切破坏。可以看出，当 $l_c < 2d$ 时，剪切破坏起控制作用；当 $l_c > 2d$ 时，挤压破坏起控制作用。对比国标 GB 的处理方法，孔壁的挤压破坏（即承压破坏）采用计算手段予以保证；板件的剪切破坏则利用构造措施予以保证，如：最小孔距 $3d_0$ 或最小端距/边距 $2d_0$ 。此处，如果忽略 d 和 d_0 之间的微小差异，美标中的临界净距 $l_c=2d$ 与国标中的最小孔距 $3d_0$ 完全一致。

1.3 拉剪承载力

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$



$$R_n = F'_n A_b \quad (\text{AISC 360-16, J3-2})$$

$$F'_n = 1.3F_{nt} - \frac{F_m}{\phi F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \quad (\text{LRFD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-3a})$$

$$F'_n = 1.3F_{nt} - \frac{\Omega F_m}{F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \quad (\text{ASD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-3b})$$

上式中， F'_n 为考虑剪应力折减后的螺栓抗拉强度，美标 AISC 以此计算螺栓的抗拉承载力。 F'_n 的具体取值与荷载组合中的剪应力水平 f_{rv} 有关，但不得大于折减前的螺栓抗拉强度 F_{nt} 。根据美标 AISC 的相关规定，当螺栓中的拉应力或剪应力小于等于 ϕF_n (LRFD) 或 F_n/Ω (ASD) 的 30% 时，可忽略拉剪承载力的校核。

2 高强度螺栓摩擦型连接的承载力

根据螺栓直径和材料等级，利用 AISC 360-16 表 J3.1 确定预拉力 T_b 的具体取值，如图 1 所示。注意，材料等级 A307 仅限于普通螺栓，不适用于高强度螺栓。该表格中的预拉力值等于 0.7 倍的螺栓抗拉强度与有效截面面积的乘积，即： $T_b=0.7F_u \times A_{be}$ 。以直径为 M20 的 A490 螺栓为例，预拉力 $T_b=0.7 \times 1040 \times 245/1000=178.36\text{kN} \approx 179\text{kN}$ 。

TABLE J3.1M Minimum Bolt Pretension, kN ^[a]		
Bolt Size, mm	Group A (e.g., A325M Bolts)	Group B (e.g., A490M Bolts)
M16	91	114
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334
M30	326	408
M36	475	595

图 1 高强螺栓的最小预拉力

2.1 抗剪承载力

$$\text{标准孔: } \phi=1.0 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=1.5 \text{ (ASD)}$$

$$\text{槽孔: } \phi=0.7 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.14 \text{ (ASD)}$$

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (\text{AISC 360-16, J3-4})$$

其中：

μ 为抗滑移系数，具体取值与接触面类型有关，A 类取 0.3，B 类取 0.5，详见 AISC 360-16 J3.8。

D_u 为平均预拉力与最小预拉力的比值，即超张拉系数，此处取 1.13。

h_f 为考虑多层填板的系数。如图 2 所示，单层填板取 1.0，多层填板取 0.85。IDEA 只考虑单层填板，故此取 1.0。

n_s 为传力摩擦面的数量。

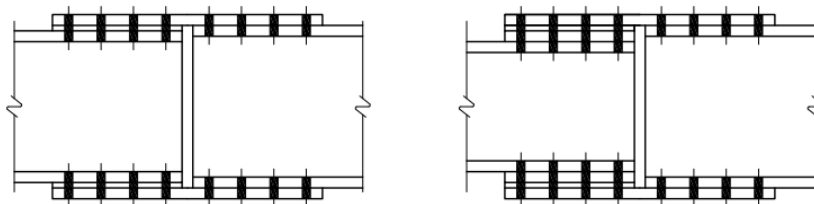


图 2 单层填板（左）与多层填板（右）



2.2 抗拉承载力和拉剪承载力

$$k_{sc} = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b n_b} \geq 0 \quad (\text{LRFD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-5a})$$

$$k_{sc} = 1 - \frac{1.5T_a}{D_u T_b n_b} \geq 0 \quad (\text{ASD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-5b})$$

上式中，折减系数 k_{sc} 既可作为抗拉承载力的计算公式（即： $k_{sc} \geq 0$ ），也可用于考虑螺栓拉力对抗剪承载力 R_n 的削弱作用。其中， T_u 和 T_a 为荷载组合中的螺栓拉力值，前者对应于分项系数设计法 LRFD，后者对应于允许应力设计法 ASD， n_b 为受拉螺栓的数量。此时，高强度螺栓摩擦型连接的拉剪承载力的计算表达式如下所示：

$$R_n = \mu k_{sc} D_u h_f T_b n_s$$

3 螺栓布置的构造要求

根据 AISC 360-16 J3.3 规定，螺栓中心的最小间距为 2.66（即 $2\frac{2}{3}$ ）倍螺栓直径 d ，螺孔边缘的最小净距为 d 。用户可在设置选项中修改上述最小间距的默认值。对于标准孔，螺栓中心的最小边距和最小端距应符合 AISC 360-16 表 J3.4 的要求，如图 3 所示。需要注意的是，AISC 360-16 J3.5 对螺孔间距和边距/端距的最大值也给出了具体规定，但 IDEA 并未校核该构造要求。因此，用户在采用美标 AISC 校核钢结构节点时，应自行保证有关最大间距值的构造要求。

Bolt Diameter, mm	Minimum Edge Distance
16	22
20	26
22	28
24	30
27	34
30	38
36	46
Over 36	1.25d

图 3 标准孔的最小边距和最小端距

4 算例演示

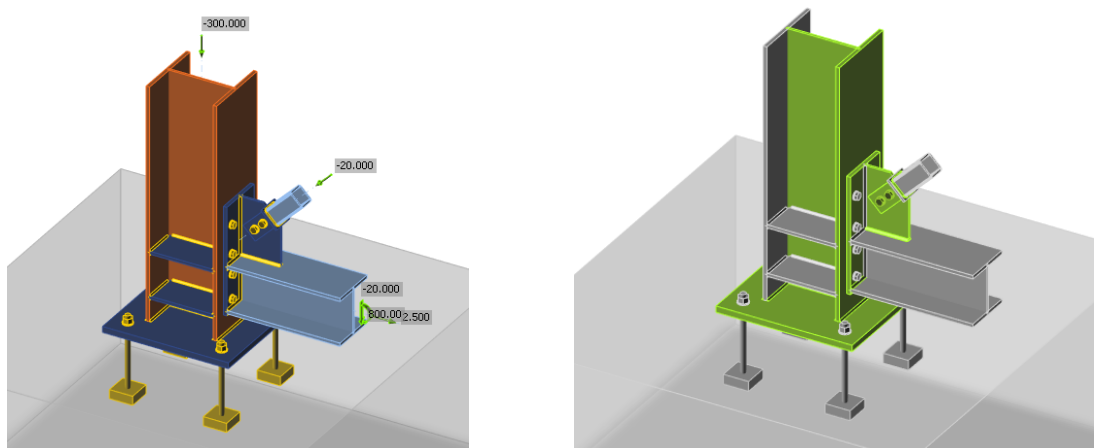


图 4 基于 AISC-LRFD 的柱脚节点承载力校核



图 4（左）所示的柱脚节点采用底板和锚栓与柱下的混凝土独立基础相连，同时以端板和螺栓与水平梁相连，斜撑则通过连接板和螺栓与端板和水平梁相连。该柱脚节点基于美标 AISC-LRFD 的整体校核结果如图 4（右）所示，无红色标识的组件表明通过校核。

以端板某处直径 16mm、材料等级 A490 的普通螺栓为例，抗拉和抗剪承载力的校核计算如下所示。可以看出，IDEA 根据螺栓（公称）直径计算抗拉或抗剪的截面面积，即： $A_b = \pi d^2 / 4 = 3.14 \cdot 16^2 / 4 = 198 \text{ mm}^2$ 。由于本算例中的普通螺栓未考虑螺纹对抗剪强度的影响，故抗剪强度取 579MPa；如考虑其影响，则取 469MPa。

Tension resistance check (AISC 360-16: J3-1)

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nt} \cdot A_b = 115.8 \text{ kN} \geq F_t = 47.3 \text{ kN}$$

Where:

- $F_{nt} = 780.0 \text{ MPa}$ – nominal tensile stress from AISC 360-16 Table J3.2
- $A_b = 198 \text{ mm}^2$ – gross bolt cross-sectional area
- $\phi = 0.75$ – capacity factor

Shear resistance check (AISC 360-16: J3-1)

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nv} \cdot A_b = 86.0 \text{ kN} \geq V = 19.4 \text{ kN}$$

Where:

- $F_{nv} = 579.0 \text{ MPa}$ – nominal shear stress from AISC 360-16 Table J3.2
- $A_b = 198 \text{ mm}^2$ – gross bolt cross-sectional area
- $\phi = 0.75$ – capacity factor

上述普通螺栓的承压承载力的校核计算如下所示，由于沿传力方向该螺孔边缘与最近的相邻螺孔边缘的净距 $l_c = 71 \text{ mm}$ ，大于两倍的螺栓直径 $2d = 32 \text{ mm}$ ，故该螺孔处不存在板件的剪切破坏，需以孔壁的挤压破坏验算其承压承载力 $R_n = 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u$ 。

Bearing resistance check (AISC 360-16: J3-6)

$$R_n = 1.20 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2.40 \cdot d \cdot t \cdot F_u$$
$$\phi R_n = 176.1 \text{ kN} \geq V = 19.4 \text{ kN}$$

Where:

- $l_c = 71 \text{ mm}$ – clear distance, in the direction of the force, between the edge of the hole and the edge of the adjacent hole or edge of the material
- $t = 15 \text{ mm}$ – thickness of the ply
- $d = 16 \text{ mm}$ – diameter of a bolt
- $F_u = 400.0 \text{ MPa}$ – tensile strength of the connected material
- $\phi = 0.75$ – resistance factor for bearing at bolt holes

上述普通螺栓中的拉应力或剪应力小于等于 ϕF_{nt} 或 ϕF_{nv} 的 30%。根据美标 AISC 的相关规定，可忽略拉剪承载力的校核，如下所示。

Interaction of tension and shear check (AISC 360-16: J3-2)

The required stress, in either shear or tension, is less than or equal to 30% of the corresponding available stress and the effects of combined stresses need not to be investigated.

5 小结

本文详细介绍了 IDEA 中基于美标 AISC 360-16 的螺栓承载力计算，包括普通螺栓的抗拉、抗剪、承压以及拉剪承载力计算以及高强度螺栓摩擦型连接的预拉力、抗剪、抗拉和拉剪承载力计算。希望以上内容可以帮助众多的 IDEA 用户或爱好者更加深入地理解和应用此软件，以期解决实际工程中遇到的有关美标钢结构节点设计的各类问题。

土的排水、不排水特性及排水固结过程模拟

筑信达 郭晓通

土的一个重要特性是孔隙水的存在。根据有效应力原理，饱和土体内任意一点的总应力由土骨架和孔隙水共同承担，所以孔隙水显著影响土体在荷载作用下的响应。

PLAXIS 中提供了多种方式来描述在该响应过程中土骨架-孔隙水的相互关系。其中，塑性计算、动力计算与安全性计算中使用一种简化的方式，即选择分析一个排水效应或不排水效应；固结计算根据土体的渗透特性来描述时间相关的排水固结过程，可以用来分析超静孔隙水压力的消散问题；最高级的选项是完全的流固耦合计算，用于描述土体在任一瞬时状态下的渗流场与应力场。

1. 土的排水与不排水特性

1.1 土体的排水类型

排水，即在外荷载作用下土体中的水可以很快排出，不会产生超静孔隙水压力。不排水，即在外荷载作用下土体中的水不能及时排出，引起孔隙水压力增加，产生超静孔隙水压力。排水、不排水特性的选择主要与土体类型和分析内容有关，排水主要适用于渗透特性好的土层（如砂土），也被用于荷载施加速率慢或仅考虑长期效应的分析；不排水主要适用于渗透特性差的土层（如黏土），也被用于荷载施加速率快或需要考虑短期效应的分析。例如，分析某路基填筑后地基土的长期沉降时，地基土的排水类型应选择排水。地震作用下，砂土中的孔隙水无法及时排出，产生超静孔隙水压力。因此，在采用 UBC3D-PLM 本构模型计算砂土在循环荷载下的液化行为时，排水类型应选择不排水。

土的排水与不排水特性可以通过材料设置窗口中的排水类型选项来定义，如图 1.1 所示。

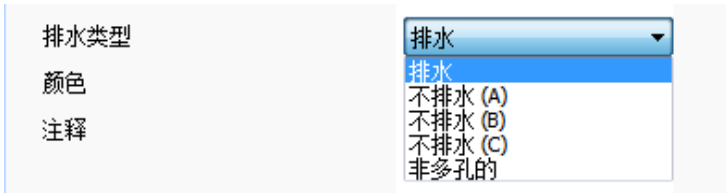


图 1.1 PLAXIS 中的排水类型选项

排水：孔隙水可以及时排出，土体内不会产生超静孔隙水压力。

非多孔：材料中无孔隙或裂隙，如混凝土。

不排水 A：采用有效刚度参数 (E', v') 及有效强度参数 (c', ϕ')，水被赋予很大的体积模量，使土难以压缩，同时计算超静孔隙水压力值。不排水 A 选项可以在除霍克-布朗模型与节理岩体模型外所有本构模型中使用，也是 PLAXIS 中最常用的不排水选项。在不排水 A 中，不排水抗剪强度 S_u 是一个计算结果，而非输入参数，用户可以通过在后处理中应力菜单栏下选择动抗剪强度选项来查询并检查该数值，所以不排水 A 选项可以用来分析固结过程中土体抗剪强度的变化。

在不排水 A 选项下，土体遵循摩尔-库伦屈服准则，土压力系数 K_0 值默认为 $1 - \sin \phi'$ 。需要注意的是，排水类型选择不排水 A 时，用户必须输入材料刚度与强度参数的有效值。此外，当使用不排水 A 时，剪胀角为正值可能会引起不符合实际情况的孔隙吸力和抗剪强度；剪胀角为负值可能会引起不符合实际情况的孔压和液化行为。因此选择不排水 A 时建议将剪胀角 ψ 设置为 0。

不排水 B：采用有效刚度参数 (E', v') 及不排水抗剪强度参数 S_u ($\phi = 0$)，水被赋予很大的体积模量，使土难以压缩，同时计算超静孔隙水压力值。与不排水 A 的不同点在于，不排水 B 中抗剪强度值 S_u 是输入参数。在计算过程中，土体的抗剪强度是不变的，不会在计算中实时更新。该选项可以在摩尔-库伦模型 (MC)、硬化土模型 (HS)、小应变土体硬化模型 (HSS)、NGI-ADP 模型中使用。在不排水 B 选项下，土体的破坏由最大剪应力决定，即遵循 Tresca 屈服准则，土压力系数 K_0 的默认值为 0.5。需要注意的是，如果在 HS 或 HSS 本构模型中使用不排水 B，则土体的刚度不再依赖于应力，模型不存在压缩硬化现象。

不排水 C：采用不排水刚度参数 (E_u, v_u) 和不排水抗剪强度参数 S_u ($\phi = 0$)，孔隙水压力的计算包含在总应力计算中，不单独进行计算。此时，孔隙水压力 $P = 0$ ，有效应力 $\sigma' =$ 总应力 σ ，不区分有效应力与孔隙水压力。该选项可以在线弹性模型、

摩尔-库伦模型、NGI-ADP 模型中使用。不排水 C 选项中土体的破坏也由最大剪应力决定，遵循 Tresca 屈服准则，土压力系数 K0 的默认值为 0.5。

1.2 不排水特性的计算及控制参数

PLAXIS 中采用如下式所示的有效应力原理表达方式，土体内的总应力 σ 可分为有效应力 σ' 和活动孔隙水压力 P_{active} ，由于水不承受任何剪应力，因此有效剪应力等于总剪应力。

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma'} + mP_{active} \quad m = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$$

活动孔隙水压力 P_{active} 为孔隙水压力 P_w 、有效饱和度 S_{eff} 与孔隙压力系数 α_{Biot} 的乘积。孔隙压力系数 α_{Biot} 是一个表征固体颗粒可压缩性的参数，如果视土颗粒为不可压缩固体，则 $\alpha_{Biot}=1$ ：

$$P_{active} = \alpha_{Biot} S_{eff} P_w$$

孔隙水压力 P_w 又可划分为稳态孔隙水压力 P_{steady} 和超静孔隙水压力 P_{excess} 。其中，稳态孔隙水压力即静孔隙水压力，是地下水位以下土体中的静态孔隙水压力或稳态渗流计算的土体中的孔隙水压力。

$$P_w = P_{steady} + P_{excess}$$

由于稳态孔隙水压力不随时间变化，所以其速率为 0，总孔隙水压力的速率等于超静孔隙水压力的速率：

$$\dot{P}_w = \dot{P}_{excess}$$

在不排水分析中，超静孔隙水压力速率的计算公式为：

$$\dot{P}_{excess} = \frac{\alpha_{Biot} \dot{\epsilon}_v}{n/K_w + (\alpha_{Biot} - n)/K_s} \quad C_s = \frac{1}{K_s} \quad C_w = \frac{1}{K_w}$$

式中，

K_w 和 K_s 分别为水和土颗粒的体积模量， n 为土的孔隙率， ϵ_v 为土的体积应变率。 K_w 可以由土的剪切模量、不排水泊松比 ν_u 和有效泊松比 ν' 求得，如下式所示：

$$K_w = \frac{2G}{3} \left(\frac{1+\nu_u}{1-2\nu_u} - \frac{1+\nu'}{1-2\nu'} \right)$$

同时 PLAXIS 中引入了孔隙压力系数 B (Skempton-B)，用户可以使用 B 参数进行不排水特性的表达。B 与 ν' 和 ν_u 有如下关系：

$$B = 1 - \frac{(1+\nu')(1-2\nu_u)}{(1+\nu_u)(1-2\nu')}$$

土层的材料参数选项卡中提供了这些参数的输入可用于调整土层的不排水性能。如图 1.2 所示，不排水性能共分为三种，分别是标准、手动-刚度依赖 K_w 和手动-常量 K_w 。

默认情况下，不排水性能为标准，不排水特性参数不可手动修改。此时，土体的固体材料（即颗粒）不可压缩 ($\alpha_{Biot}=1$)，Skempton-B 值为 0.992979，不排水泊松比为 0.495，水的参考体积模量 $K_{w,ref}/n$ 为 90×10^{12} 。

“手动刚度依赖 K_w ” 选项中，土体的固体材料同样默认为不可压缩 ($\alpha_{Biot}=1$)，用户可以手动指定 Skempton-B 的值。在最高级的第三种选项“手动-常量 K_w ” 中，用户需输入 K_w 值，也可以考虑固体材料的可压缩性，指定不等于 1 的 α_{Biot} 值。

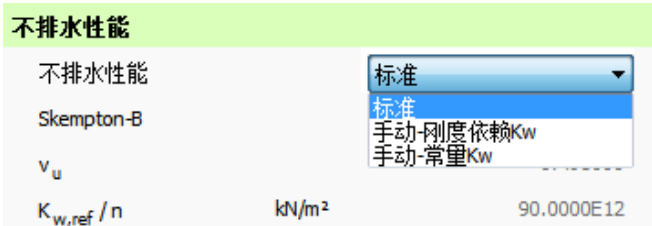


图 1.2 土的不排水性能调整

2. 土的排水固结过程分析

PLAXIS 中的塑性计算通常只用于进行弹塑性变形分析，仅在软土蠕变模型中考虑时间相关的效应，且在该分析中不考虑孔隙水压力随时间的变化。土体的排水固结过程需要通过固结计算或流固耦合计算来完成。

2.1 PLAXIS 中的排水固结理论

PLAXIS 中的固结控制方程遵循 Biot 耦合固结理论 (Biot, 1956)，一般称该理论为真三维固结理论。

假设一均质同向的饱和土单元体 $dx dy dz$ ，体力只考虑重力，以土为隔离体（土骨架+孔隙水），渗流遵循达西定律，土骨架遵循弹性假设，则将平衡方程、有效应力原理、土颗粒的本构方程、几何方程、连续性方程联立得到 Biot 三维固结微分方程：

$$\begin{cases} -G\nabla^2 u^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G\nabla^2 v^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G\nabla^2 w^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \\ -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{K}{\gamma_w} \nabla^2 u = 0 \end{cases}$$

上式中， u 为超静孔隙水压力， K 为渗透系数， γ_w 为水的容重。

PLAXIS 中的固结计算主要用于分析超静孔隙水压力的消散问题。固结计算以超孔压为计算目标，可以计算指定时间内的固结状态及达到某一固结状态所需要的时间。

与固结计算相比，流固耦合计算可以考虑瞬态渗流场与应力场的耦合问题。如果用于固结计算的模型中存在时间相关的渗流边界条件，则只能采用流固耦合计算。与固结计算不同的是，流固耦合计算直接计算总孔压，且流固耦合计算中必须考虑非饱和土引起的孔隙吸力。此外，本文 1.2 节介绍的不排水特性中的高级参数同样会影响固结计算与流固耦合计算结果。

2.2 固结计算的分类

1、按荷载类型分类

固结计算按荷载类型的不同可分为分步施工计算、指定固结度的计算和指定最小超孔压的计算三种。如图 2.1 所示：



图 2.1 固结计算中的荷载类型

(1) 分步施工

分析指定的时间后模型中土层的固结情况，在该模式下，时间间隔为输入值，荷载随着时间步线性增加达到指定值。

(2) 指定固结度的计算

常在分步施工模型之后进行计算，该荷载类型下不可改变模型中的激活对象，分析达到某一固结度所需的时间及变形情况。

(3) 指定最小孔压的计算

常在分步施工模型之后进行计算，该荷载类型下不可改变模型中的激活对象，分析模型中的超静孔隙水压力最大值达到某个数值（输入值）所需的时间及变形情况。

通常情况下，用户可以采用分步施工的荷载类型来计算指定时间内模型中超静孔隙水压力及应力场、位移场的变化情况；也可以采用指定固结度或指定孔压的方式计算特定的固结状态及所需时间。

2、按固结方式分类

固结计算按固结方式还可分为常规固结与真空固结。真空预压法是在需要加固的软土地基表面先铺设砂垫层、埋设垂直排水管道，再用不透气的封闭膜使其与大气隔绝，密封膜端部进行埋压处理，通过砂垫层内埋设的吸水管，使用真空泵或

其他真空手段抽真空，使其形成膜下负压，以增加地基土的稳定性、减小沉降的地基处理方式。由于 PLAXIS 不考虑孔隙气压力，但用户可采用水头边界条件建立真空固结的计算模型。通常，用户可以选择创建排水线单元来模拟真空预压法中的塑料排水板，排水线的行为选择真空，用排水线上的水头值 h 来近似描述真空吸力，如图 2.2 所示。 $\gamma_w h$ 即为真空吸力值。

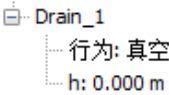


图 2.2 排水线单元中的真空排水选项

3. 排水固结典型案例分析

图 3.1 为一路堤的填筑及固结沉降分析的二维平面应变模型。分析目标是分析场地的最终沉降量和完成 90%固结所需的时间。共设置两个工况。

- 工况 1：天然固结
- 工况 2：塑料排水板排水固结法

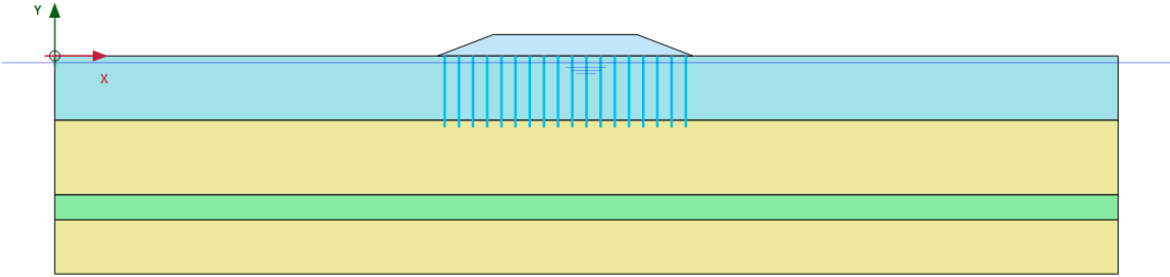


图 3.1 案例模型图

首先，指定模型计算类型为平面应变问题，节点类型为 15 节点。
 随后进行场地土层与路堤的几何建模与参数输入。土层共分为三层，表层土为淤泥质黏土，下伏土层为中砂，中间夹一层薄层粉质黏土，地下水水位为-0.9m。
 然后，根据各土层特性，选取本构模型和参数。淤泥质黏土采用软土本构模型，中砂及粉质黏土采用硬化土本构模型，回填路堤采用摩尔-库伦模型。

其中，淤泥与粉质黏土具有不排水特性，排水类型选择不排水 A，输入地勘报告提供的有效强度参数 c' 和 ϕ' 。同时根据压缩试验提供的压缩系数 C_c 和回弹系数 C_s ，作为替代参数进行硬化土本构模型和软土本构模型中刚度参数的输入，最后输入初始孔隙比 e_{mi} 和各个方向的渗透系数 K 。由于各土层为正常固结，初始应力选项卡下的先期固结压力 POP 和超固结比 OCR 值保持默认值。在路堤底部创建间隔为 2m 的排水线单元模拟塑料排水板。行为选择常规，水头值 h 为 0。

网格划分后，定义分步施工模式下的施工顺序，如图 3.2。
 初始阶段，采用土压力系数 K_0 直接生成场地的初始应力场。
 阶段一，设置计算类型为固结计算，荷载类型为分步施工，时间间隔设置为 30 天，同时激活路堤。
 阶段二，设置计算类型为固结计算，荷载类型为固结度，其值设置为 90%。
 阶段三，设置计算类型为固结计算，荷载类型为分步施工，指定其上一阶段为初始阶段，同时激活排水线和路堤，输入时间间隔为 30 天。
 阶段四，设置计算类型为固结计算，荷载类型为固结度，其值设置为 90%。



图 3.2 分步施工阶段设置图

如图 3.3，经过计算，天然固结工况下，路堤天然修建 30 天的沉降最大值为 0.4017m，固结度达到 90%所需时间为 159.2 天，完成 90%固结时沉降最大值为 0.7120m。塑料排水板工况下，路堤修建 30 天的沉降最大值为 0.7040m，固结度达到 90%所需时间为 52.63 天，完成 90%固结时沉降最大值为 0.7065m。可见塑料排水板能有效加快地基土的排水固结过程。

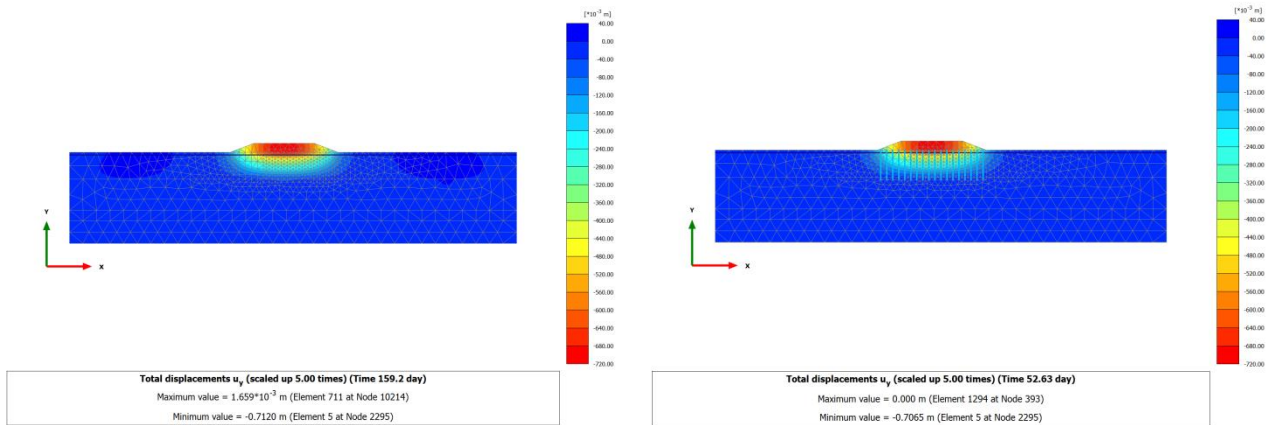


图 3.3 两工况下最终沉降图

取模型中路堤下方一应力点，通过曲线生成器可以得到两工况下土体内超静孔隙水压力的消散曲线。如图 3.4，天然工况下，超孔压的消散速率总体较为平缓；塑料排水板工况下，超孔压消散速率初始较高，随着超孔压数值的逐渐减小，其消散速率也逐渐变缓。

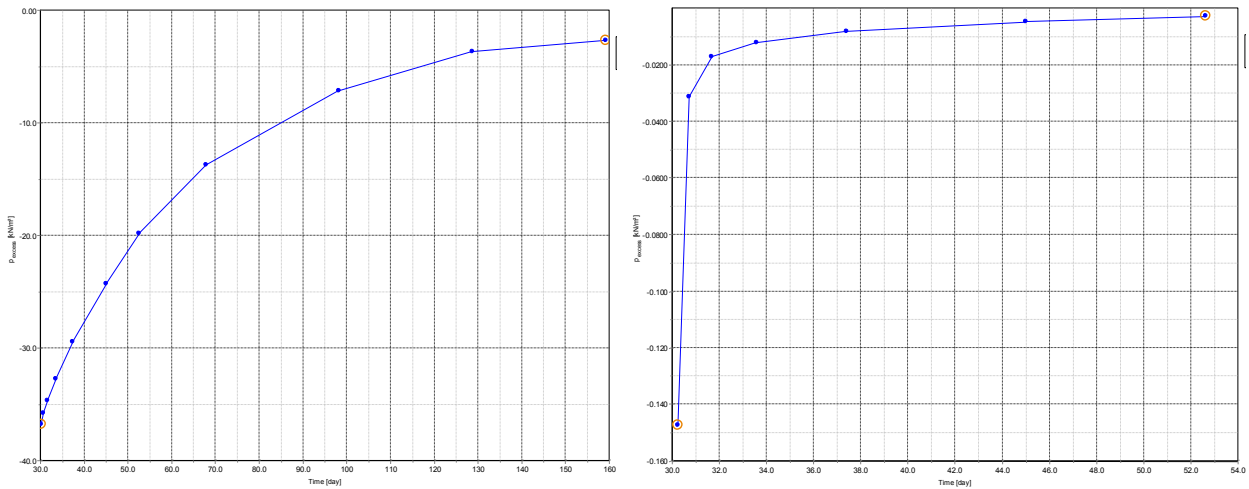


图 3.4 两工况下超静孔隙水压力消散曲线

4、小结

土体在荷载作用下超静孔隙水压力的产生与消散问题是岩土工程中经常遇到的问题，PLAXIS 中用不排水特性来描述超静孔隙水压力的产生，用固结与流固耦合两种分析方式来描述时间相关的超静孔隙水压力消散问题。更多相关内容，请参照筑信达知识库中的相关文章，具体如下：

- 1、[材料的排水类型与渗透性](#)
- 2、[固结分析中可以采用哪些加载方式？](#)
- 3、[超静孔隙水压力的产生和影响](#)
- 4、[真空固结的模拟方法](#)



DeepEX 应用案例——上海某地铁深基坑开挖工程

筑信达 詹毕顺

本文主要利用 DeepEX 深基坑设计软件分析上海软土地区某地铁深基坑开挖工程。该工程信息来源于论文 *Performance of a deep excavation in soft clay* (同济大学 G.B. Liu、J Jiang 等)。根据论文提供的基坑及土层资料在 DeepEX 中重现该开挖过程，并将计算结果与论文中监测数据进行对比，以验证 DeepEX 分析计算的可靠性。另外，通过学习本案例，用户可以了解 DeepEX 中深基坑开挖建模全过程以及其独有的坑底加固模拟方法，以便更好地处理类似工程问题。

1. 工程概况

本工程位于上海市西南地区，是地铁 4 号线和地铁 9 号线的交汇点。场地平面布置，如图 1 所示。其中阴影部分为基坑位置，基坑宽 35m，开挖深度 20.7m。基坑采用地连墙以及多道内支撑组成的支护结构体系，断面如图 2 所示。为了提高基坑底部软黏土承载能力，对坑底以下 3m 区域内土体进行压密注浆处理。^[1]

基坑位于典型的上海深厚软土地层中，地层由第四纪陆相冲积层和海相沉积层组成。^[1]其土体具有高含水率，高压缩性，低渗透性，低承载力等特征。地下水位位于地表以下 1.0m 处。^[1]

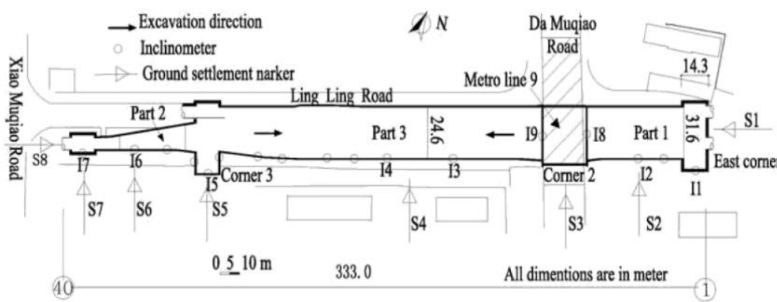


图 1 基坑平面位置图

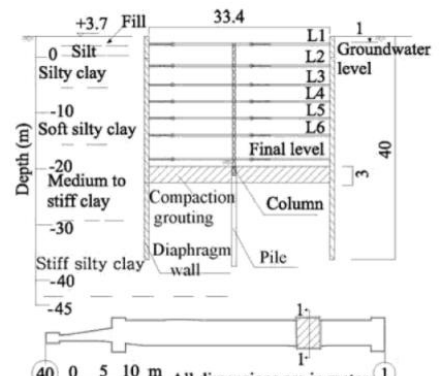



图 2 基坑断面图

2. 土体及支护参数选取

2.1 土体参数

DeepEX 中土体参数大致包括重度、强度参数、刚度参数、静止土压力系数、渗透系数等。要想获得所有这些参数，需要通过大量的现场和室内试验。在已知参数具体数值后，用户可以直接创建相应土体材料。但是，大多数情况下，我们没有办法直接获得所有参数。因此，为了方便用户使用，DeepEX 中提供了大量估算公式、图表以及推荐值，甚至还提供了根据现场试验 (SPT、CPT 等) 数据估算土体参数的工具，如【SPT Estimator】。当用户不确定土体某一参数时，可以点击其后面

箭头符号 ()，弹出相应估算公式或图表，从而快速获得参数取值。当然，也可以利用估算工具【SPT Estimator】得到土体重度和刚度参数。

本例中根据文献提供的勘测数据断面图 (见图 3)，可以得到土体的液限、塑限以及 SPT 试验锤击数 N_{spt} 等数据。然后，可以由这些数据获得 DeepEX 中土体参数。其总体思路如下：依据 N_{spt} ，利用估算工具【SPT Estimator】，得到土体重度和强度参数 (对应表 1 中 3-5 列)；根据土体液限、塑限计算出的塑性指数 PI，利用估算图表得到黏土等体积剪切摩擦角 Φ_{cv} ，利用估算公式得到峰值剪切摩擦角 Φ_{peak} (对应表 1 中 6-7 列)；最后由 N_{spt} 利用估算公式得到土体刚度参数 (对应表 1 中 8-9 列)。由此，获取 DeepEX 中全部土体参数，具体数值见下表。

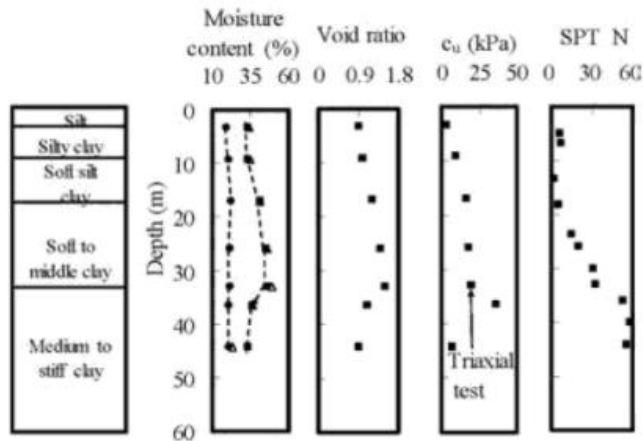


图3 文献中土体参数

表1 DeepEX 中土体参数取值

名称	土体类型	γ (kN/m ³)	C'或 Su (kPa)	Φ (deg)	Φ_{cv} (deg)	Φ_{peak} (deg)	E_{load} (kPa)	E_{ur} (kPa)	exp
F	砂土	19	2	32	-	-	18900	94500	0.5
S	粉土	18.5	4	24	-	-	15000	75000	0.5
SC	粉质黏土	17.5	20	-	28	19.5	12000	36000	1
SSC	黏土	18	30	-	28	19.5	12000	36000	1
SMC	黏土	19.8	100	-	30	21.1	40600	121800	1
MSC	黏土	23.2	334.3	-	30.47	21.4	137500	480000	1

注： γ —土体重度；C'—土体有效粘聚力；Su—土体不排水剪切强度； Φ —土体内摩擦角； Φ_{cv} —非线性分析时黏土的等体积剪切摩擦角； Φ_{peak} —非线性分析时黏土的峰值剪切摩擦角； E_{load} —加载时土体弹性模量； E_{ur} —卸载再加载时土体弹性模量；exp—指数数值（一般，砂土或粉土可以取 $E_{ur}=5E_{load}$ 、 $exp=0.5$ ，黏土取 $E_{ur}=3E_{load}$ 、 $exp=1$ ）。表中土体名称为图3左侧土体英文简称，自上而下一一对应，且土体F代表施工中在原有土层上添加的填土材料。

下面以MSC土层为例展示从图3中数据得到DeepEX土体参数的详细过程。

本例，从图3可以得到MSC土层SPT（标准贯入试验）锤击次数 $N_{spt}=55$ ，土体塑限 $\omega_p=20\%$ ，土体液限 $\omega_L=32\%$ ，塑性指数 $PI=\omega_L-\omega_p=32-20=12$ 。根据 N_{spt} 数值，在DeepEX估算工具【SPT Estimator】中拖动 N_{spt} 至55，得到黏土重度 $\gamma=23.2\text{kN/m}^3$ 和土体不排水抗剪强度 $S_u=334.3\text{kPa}$ 。（具体见图4）

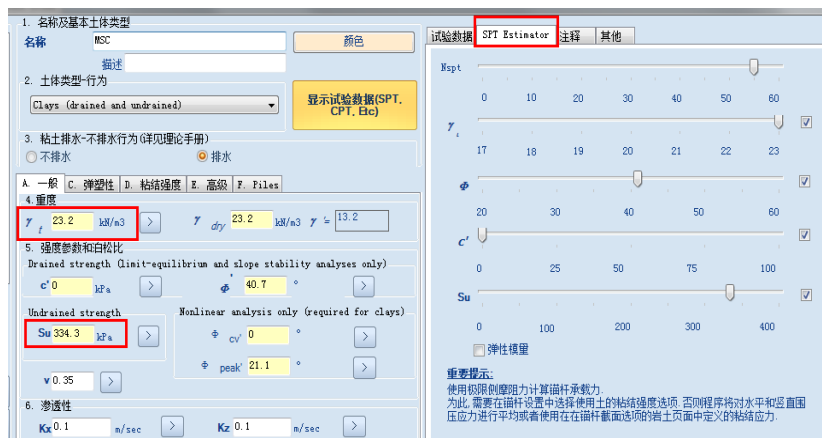


图4 利用SPT锤击数估算黏土重度和抗剪强度

对于黏土在体积不变条件下的剪切摩擦角 Φ_{cv} ，可以根据 DeepEX 提供的 Φ_{cv} 与塑性指数 PI 之间的关系图表来估算。在图中将塑性指数 PI 移动到 12，可以得到 MSC 体积不变条件下的剪切摩擦角 $\Phi_{cv}=30.47^\circ$ ，见图5。然后根据 Φ_{cv} 与 Φ_{peak} 之间

关系式自动计算 Φ_{peak} ，则 $\Phi_{peak}=21.4^\circ$ 。

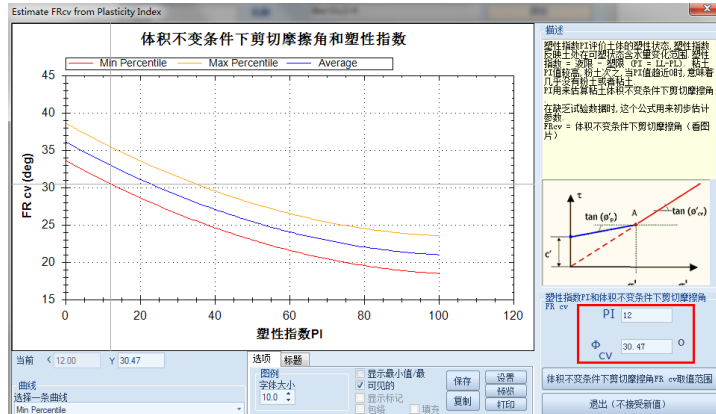


图 5 体积不变条件下黏土剪切摩擦角估算图表

对于 MSC 的刚度参数，由于软黏土具有很强的非线性特征，因此，选择能够体现土体非线性的指数模型作为其本构。另外，文献只提供了 SPT 试验锤击数 (N_{spt}) 且图 6 中第一个公式只适用于砂土，因此选择第三个估算公式 $E=2.5N_{spt}$ 计算加载弹性模量 E_{load} ，最终得 $E_{load}=2.5 \times 55 \text{MPa}=137500 \text{kPa}$ 。

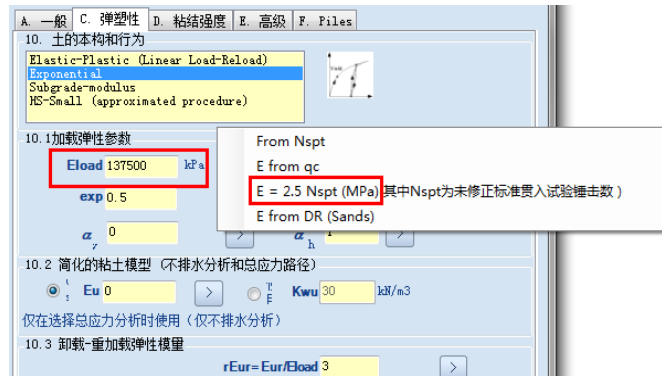


图 6 黏土 MSC 刚度参数估算

2.2 支护结构参数

由前面介绍可知，基坑采用地连墙以及 6 道内支撑组成的围护结构体系。其中地连墙长 40m，宽 0.8m，具体截面尺寸及配筋见表 2。

表 2 地下连续墙截面尺寸

墙体类型	厚度 (m)	长度 (m)	竖向配筋	横向配筋
地下连续墙	0.8	40	14 $\Phi 32$	$\Phi 8/10 \text{cm}$

6 道内支撑采用圆钢管截面，截面外径及厚度见表 3，支撑编号及位置见图 2。^[1]

表 3 内支撑截面

支撑编号	截面类型	直径 (mm)	厚度 (mm)
L1	圆钢管	580	16
L2	圆钢管	609	16
L3	圆钢管	609	16
L4	圆钢管	609	16
L5	圆钢管	609	16
L6	圆钢管	609	16

在 DeepEX 中用户可以通过【内支撑截面】菜单来创建上表中圆钢管截面。对于中国规范中给定的常见截面，用户可以自行选择使用。对于某些特殊尺寸截面，用户也可以在【内支撑截面】菜单中自行创建。下面以 L1 截面为例说明自行创建圆钢管截面过程，具体操作步骤见图 7。在输入截面尺寸时，用户需要注意按标准格式来输入，如 L1 截面应该表示为“PM580x16”，其中“PM”表示公制圆钢管，“580”表示截面外径 580mm，“16”代表钢管壁厚 16mm。在输入截面尺寸后，敲击回车键，程序会自动计算相应截面力学属性。



图 7 自行设置圆钢管截面

3 关键操作步骤介绍

在给出土体、支护结构参数以及开挖断面尺寸后，用户可以据此在 DeepEX 中建立模型。其建模过程可以全部在【一般】选项中完成（见图 8）。大体思路如下：建立土体材料、设定支护结构截面→编辑钻孔，设置土层→根据开挖过程，设置各施工阶段。整个建模过程，思路与同类软件类似，操作也非常简单。

但是，实际操作过程中，我们会发现没有那么容易，稍有不慎就会出现计算结果异常或者分析计算不收敛等问题。而出现这些问题的主要原因在于对一些关键操作步骤理解不够、认识不足。下面主要从土体参数输入和编辑土体命令两个方面来说明本例中的一些关键操作步骤，希望能够帮助用户快速准确建立模型，完成分析计算并得到符合实际情况的计算结果。

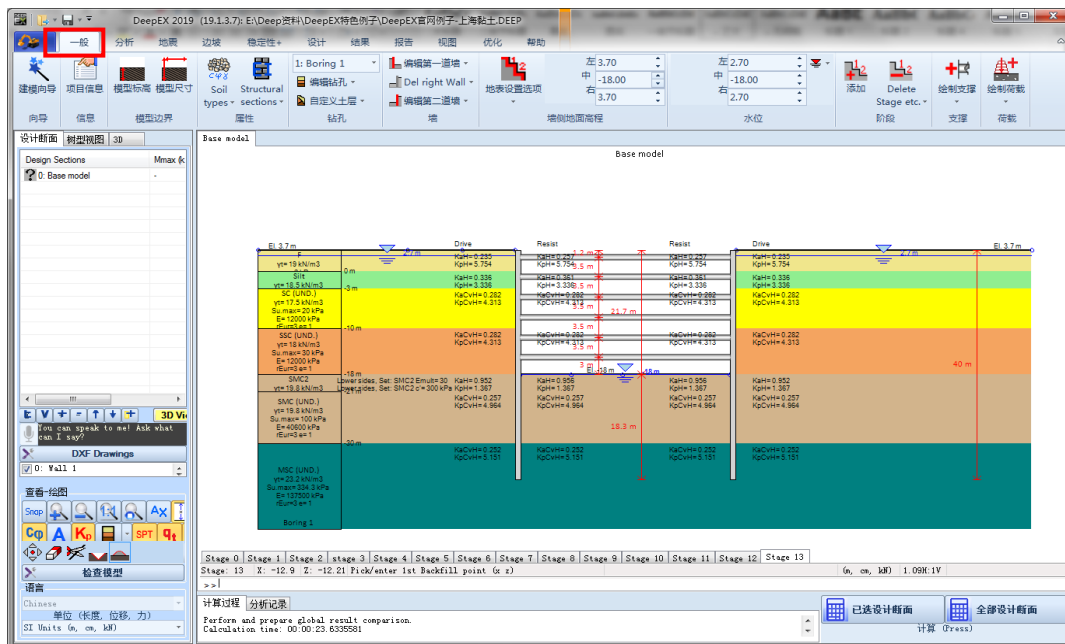


图 8 DeepEX 操作界面

3.1 土体参数输入

由于本案例中土体层数较多且类型不一，用户在输入土体参数时首先需要确保各个参数的准确性，避免出现串行或者参数名称和数值不对应情况。在此基础上，用户仍需要注意以下几点：

- 1) 正确选择土体类型。砂土、粉土以及黏土不同类型土体会有不同的参数，选择恰当的土体类型是准确输入土体参数的前提。具体操作，见图 9。

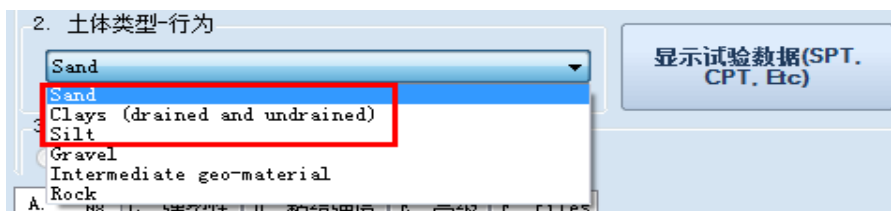


图 9 土体类型选择

- 2) 确保静止土压力系数数值处于正常范围内。一般情况下，用户在输入土体内摩擦角后，DeepEX 会根据公式自动计算静止土压力系数。其中公式默认采用 $K_0=1-\sin\varphi$ ，用户也可以选择公式 $K_0=0.95-\sin\varphi$ 进行计算，当然还能自行输入相应数值。但是在实际操作时，一不留神就会使用某些异常数值（见图 10），从而影响计算结果。

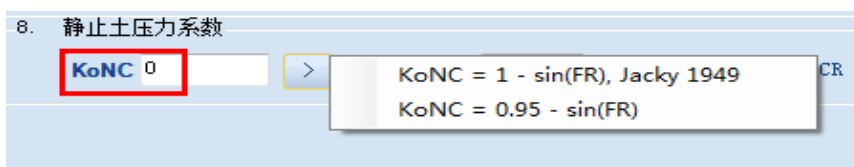


图 10 静止土压力系数输入

- 3) 选择合适的土体本构并正确输入相应参数。本例中基坑工程处于典型的上海软土地区，土体具有较强的非线性特性。因此，在 DeepEX 中应该选用能够体现土体非线性的指数模型进行计算。选择指数模型后，用户还需正确输入相应参数，尤其应该注意竖向应力系数 α_v 和水平应力系数 α_h 的取值。对于砂土，竖向应力系数 α_v 一般为 0，水平应力系数 α_h 取 1；对于黏土，竖向应力系数 α_v 一般为 1，水平应力系数 α_h 取 0。



图 11 土体本构参数

3.2 编辑土体命令

DeepEX 中【Edit soil change commands】（编辑土体命令）菜单具有改变土体某些属性的功能，可以用来模拟坑底土体加固情形。在本例中基坑底部有一个 3m 的注浆加固区域，加固处理使土体强度、刚度参数明显提高，因此可以利用【Edit soil change commands】来进行模拟。其具体操作步骤如下：

在【一般】选项土体类型下面找到【Edit soil change commands】（见图 12），点击该命令就会弹出【修改土层属性】菜单（见图 13），可以在该菜单中修改基坑加固区土体参数。



图 12 编辑土体命令



图 13 修改土体属性

【修改土层属性】菜单中的操作可以按照①→②→③→④→⑤→⑥的步骤进行，具体见图 14。其中①表示土体属性改变的起始阶段；②表示添加土体材料变化，可以添加一个或多个；③表示土体属性修改选项，下拉列表中有多种土体参数修改选项可供选择；④代表需要修改属性的土体类型，用户可以在下拉列表中选择相应土体；⑤此处可以修改土体某一参数具体数值；⑥表示土体参数修改应用的具体位置。

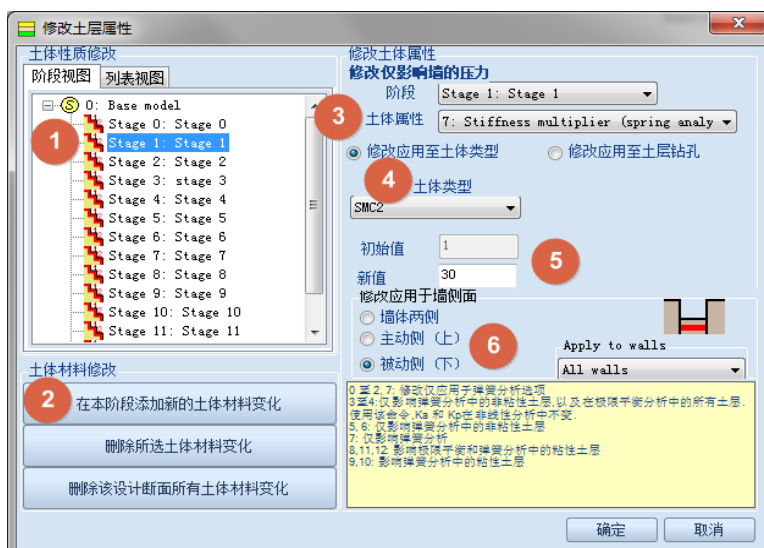


图 14 土体属性修改操作步骤

本例中土体属性修改始于 stage 1 (阶段 1)，因此①处应该选中 stage 1。基坑加固会使坑底土体弹性模量增大 30 倍，粘聚力达到 300kPa，因此需要添加两个材料变化，并在③土体属性选项中分别选择【7: Stiffness multiplier】(刚度放大)和【3: c'-effective cohesion】(改变有效粘聚力)选项。当③中选择【7: Stiffness multiplier】时，⑤中新值应该设为 30，表示土体刚度增大 30 倍；当③中选择【3: c'-effective cohesion】时，⑤中应将土体有效粘聚力调整为 300kPa。由于本例中只是对基坑底部被动区土体进行加固，故⑥中应选择被动区选项。

完成上述土体参数修改后，在坑底建立一个 3m 土层，选择相应土体类型，即可完成坑底土体注浆加固，达到图 15 所示效果。

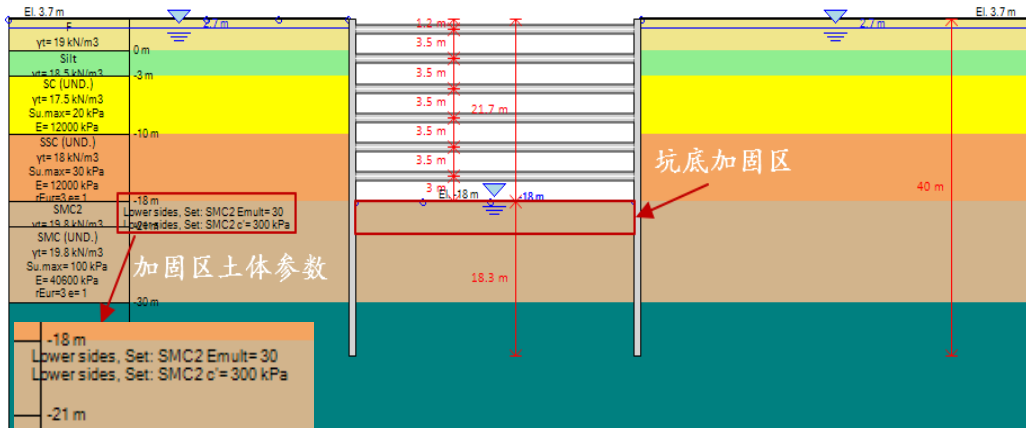


图 15 基坑底部注浆加固

4 计算结果分析

DeepEX 中计算结果类型较为全面，包括各类安全系数、墙体水平位移及内力、地表沉降、作用于墙上的水压力、土压力等。结果输出方式也是多种多样，可以通过表格、图表、计算报告等不同方式呈现。其中最常见的方式是在原模型中输出结果图，并且在图形相应位置标注出最值，方便用户查看。结果图的具体输出形式见图 16，用户可以在【结果】选项中自行选择需要呈现的结果。

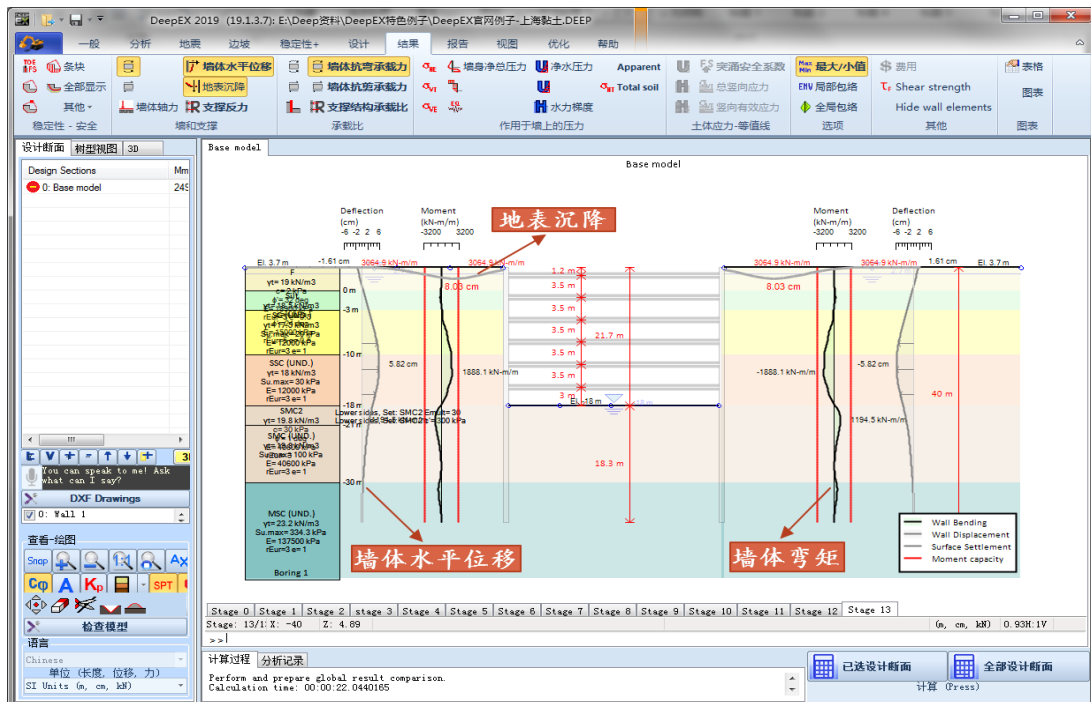


图 16 DeepEX 计算结果输出

本例中根据前面资料，在 DeepEX 中建立模型，分析计算即可得到如图 17 所示墙体水平位移和弯矩计算结果。从图中可以看出，左右两侧墙体位移和弯矩对称分布，大小相等。最终开挖完成后，墙体最大水平位移为 5.82cm；而根据文献监测数据，墙体最大水平位移为 5.45cm（见图 18）。通过对比可以发现两者相差不多，说明 DeepEX 计算结果与监测数据较为吻合。

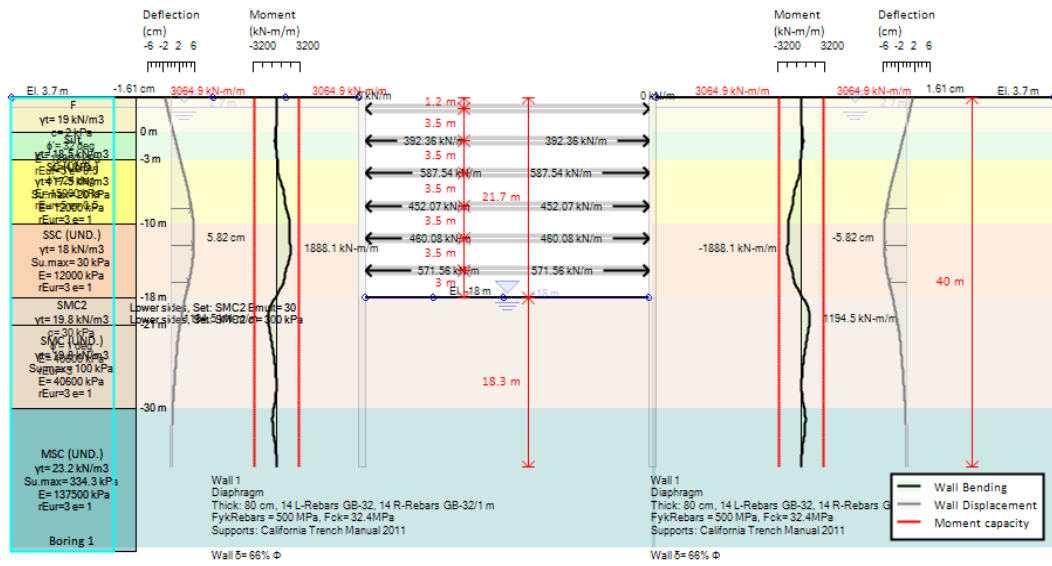


图 17 DeepEX 中基坑最终开挖深度处墙体水平位移及弯矩图

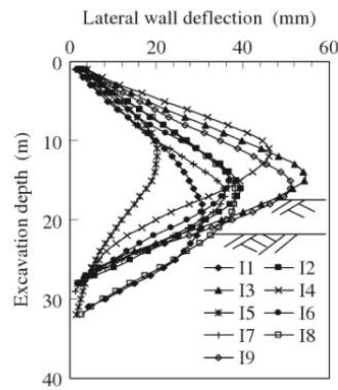


图 18 最终开挖深度处墙体最大水平位移监测值

5 小结

本文从实际工程出发，介绍了 DeepEX 中土体参数获取、支撑截面设置、土参输入注意事项以及坑底加固模拟方法等内容，并将 DeepEX 计算结果与监测数据进行对比分析。从分析结果的准确性、坑底加固模拟的独特性以及土参获取的便捷性等方面，说明 DeepEX 能够帮助工程师快速处理类似复杂工程问题，较好完成相应工程的设计工作。

参考文献

- [1] G.B. Liu, J Jiang, C.W.W.Ng. Performance of a deep excavation in soft clay Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground[C]. 2009: 419-425.
- [2] <https://www.deepex.com/resources/deep-excavation-professional-issues-case-studies>

CiSDetailer

筑信达施工图设计软件

筑信达施工图设计软件 CiSDetailer 评估版发布

- ETABS、SAP2000 模型信息读取
- 各构件的设计内力、配筋结果读取
- 其他软件配筋结果读取与对比
- 柱构件配筋计算、配筋归并、平法施工图绘制、PMM 校核与设计
- 剪力墙墙肢连梁判断与标签指定、约束 / 构造边缘构件识别、配筋计算、配筋归并、平法施工图绘制
- 梁构件支座判断、支座调整、配筋计算、配筋归并、平法施工图绘制、裂缝计算
- 计算书舒适度计算、显示样式设置、内容输出选择、word 版本计算书
- 视图输出为 PNG 或 AutoCAD 格式

[点击了解更多功能特性](#)

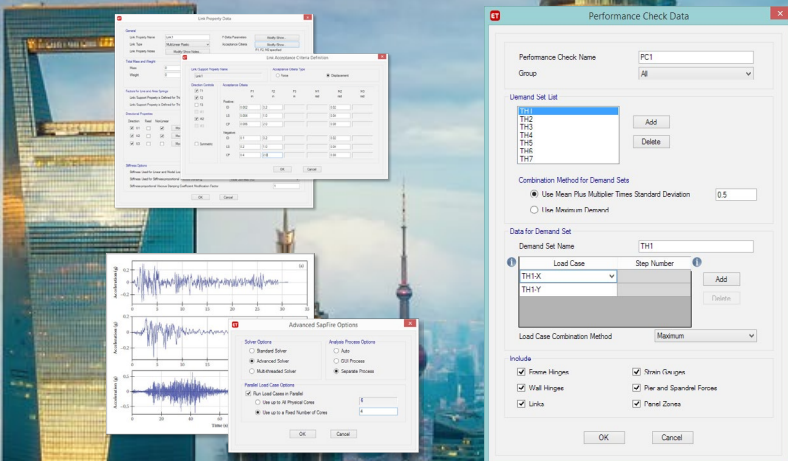
ETABS[®]

Integrated Analysis and Design
of Building Systems

version
18

新增及改进功能

[点击了解更多功能特性](#)



SAP2000 实例操作培训班天津、石家庄、太原站圆满落幕

SAP2000 实例操作培训班是由筑信达公司倾力打造的精品课程，2019 年 10-12 月，课程在天津、石家庄、太原相继开班。该课程内容涵盖了工业和民用建筑的常见结构类型，通过若干个实例操作，帮助参会工程师们快速掌握 SAP2000 的建模技巧、分析设置和结果解读。本次课程的主讲老师是筑信达技术工程师杨硕、刘慧璇，参与培训的学员来自民用、电力、轨道交通、石油石化、冶金、钢构、光伏等多个行业。

培训结束后收到很多工程师的反馈：

本次讲座很有针对性，内充充实，对 SAP2000 的入门及实际操作技巧很有帮助。由于 CSI 系列软件比 PKPM 和 YJK 的自主性高很多，对于结构设计人员的理论知识要求高，希望今后筑信达公司多开展一些专题讲座，针对 CSI 软件的高级操作以及分析方法进行解析和研讨。CSI 系列软件的培训可以很有针对性的提高各专业领域的人对产品的理解，展示 CSI 软件的强大功能，对于当今主流做国外项目的中国设计企业很有帮助。

——左工 天津水泥工业设计研究院

组织的很好，技术人员服务一流，专业过硬，希望多组织这样的培训。

——武工 河北省电力勘测设计研究院

非常好，希望多点类似上机操作的培训。

——马工 中国汽车工业工程有限公司

谢谢学员们对我们工作的支持与肯定，我们会继续努力推出更多培训课程！

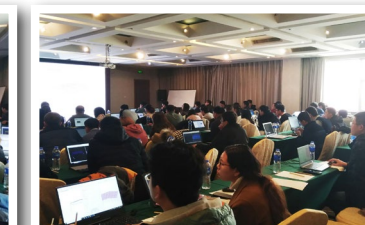
天津站



石家庄站



太原站



征稿启事



如果你使用过我们的产品
如果你喜爱工程分析

或许你正困惑其中
或许你已成果丰硕

欢迎来这里发声!

这里
可以提问
也可以“炫技”

可以严肃
也可以顽皮

题材不限
风格不拘

只要与它们相关
SAP2000、ETABS、SAFE、
Perform3D、CSiBridge、PLAXIS
……
请速速

筑信达《技术通讯》是面向广大土木工程
师的技术刊物，内容覆盖筑信达全线产
品（CSI结构/桥梁产品、PLAXIS岩土产品
、筑信达自主开发产品）的最新动态、技
术知识。旨在帮助工程师们更好地将软件
产品应用于工程实践，同时也为工程师们
切磋数值分析技术、分享工程应用经验提供
平台！

欢迎广大工程师踊跃投稿！

稿件一经采纳，作者将有机会获赠：

- 技术专著
- 产品单机版免费限时使用权
- 高级培训免费名额

投稿请寄

support@cisec.cn

(请注明“技术通讯”投稿)

期待与你的相识!



你是我的菜



CiBRIDGE
SAP2000
ETABS
SAFE
PERFORM3D
CiSDesigner
CiSGTCAD
CiSModelCenter
CiSOpenSteel

PLAXIS

IDEA

**DEEP
EX**



在线支持
support.cisec.cn



网络课堂
www.cisec.cn



知识库
wiki.cisec.cn



视频教程
i.youku.com/bjcisec