



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

剪力墙结构构件变形指标的研究 及计算平台开发

2008级博士生：陈学伟
指导老师：韩小雷 教授
华南理工大学
土木与交通学院



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

剪力墙结构构件变形指标的研究 及计算平台开发



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

主要内容

➤第一章 绪论

➤第二章 宏观单元理论研究及结构弹塑性分析平台MESAP的开发

➤第三章 剪力墙宏观单元理论与单元开发

➤第四章 修正斜压场单元理论与单元开发

➤第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

➤第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

➤第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

➤第八章 连梁构件变形性能指标研究

➤第九章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

➤第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

➤结论与展望

平台开发

创新点

变形指标

创新点

工程应用

创新点



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

绪论（研究综述）

1. 基于性能的抗震设计方法的研究背景

2. 结构及构件抗震性能试验的研究背景

国内外剪力墙构件抗震性能试验研究

国内外连梁构件抗震性能试验研究

国内外剪力墙整体结构抗震性能试验研究

3. 结构弹塑性分析方法及宏观单元理论的研究背景

塑性铰梁柱单元的研究

纤维梁柱单元的研究

剪力墙非线性单元的研究

4. 结构分析平台的研究

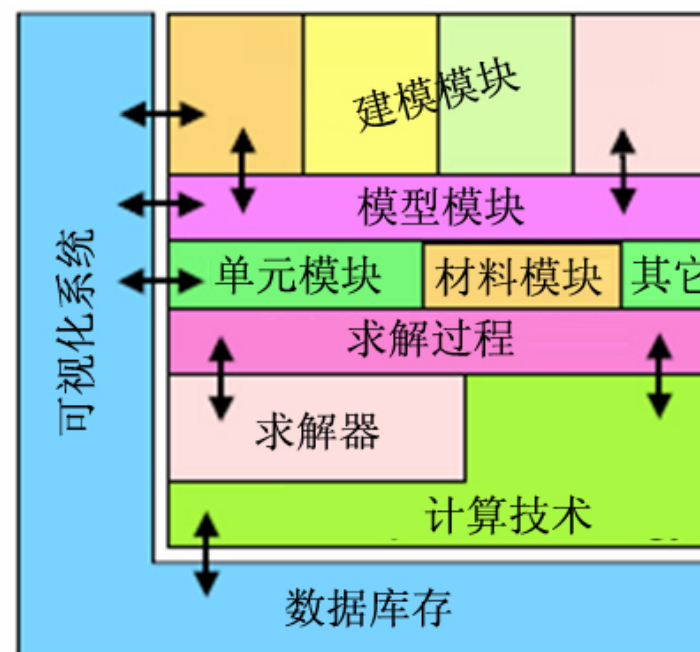
DRAIN2D, IDARC2D, CANNY

OpenSEES, Perform-3D

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第一部分：计算平台开发MESAP

- 第二章 宏观单元理论研究及结构弹塑性分析平台MESAP的开发
- 第三章 剪力墙宏观单元理论与单元开发
- 第四章 修正斜压场单元理论与单元开发





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

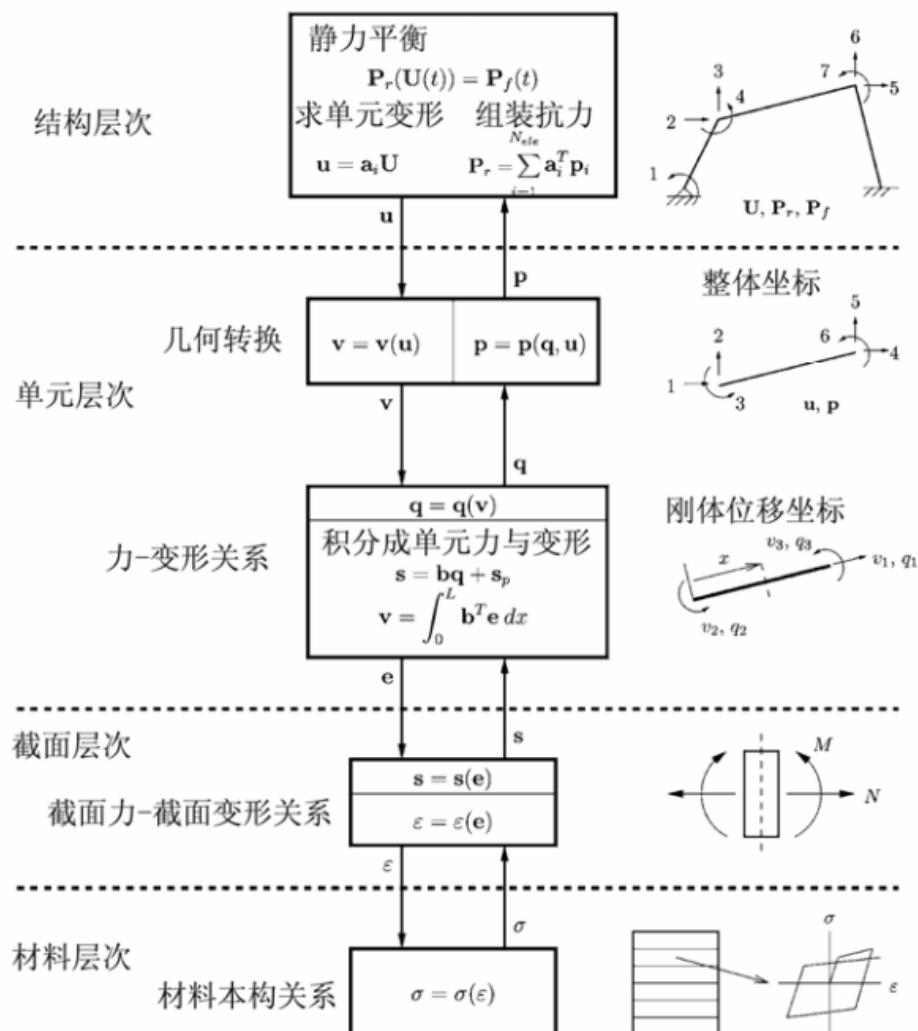


图 2-6 OpenSEES 计算过程示意图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

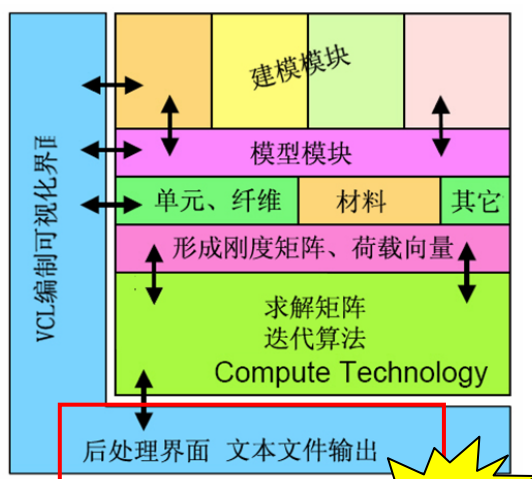
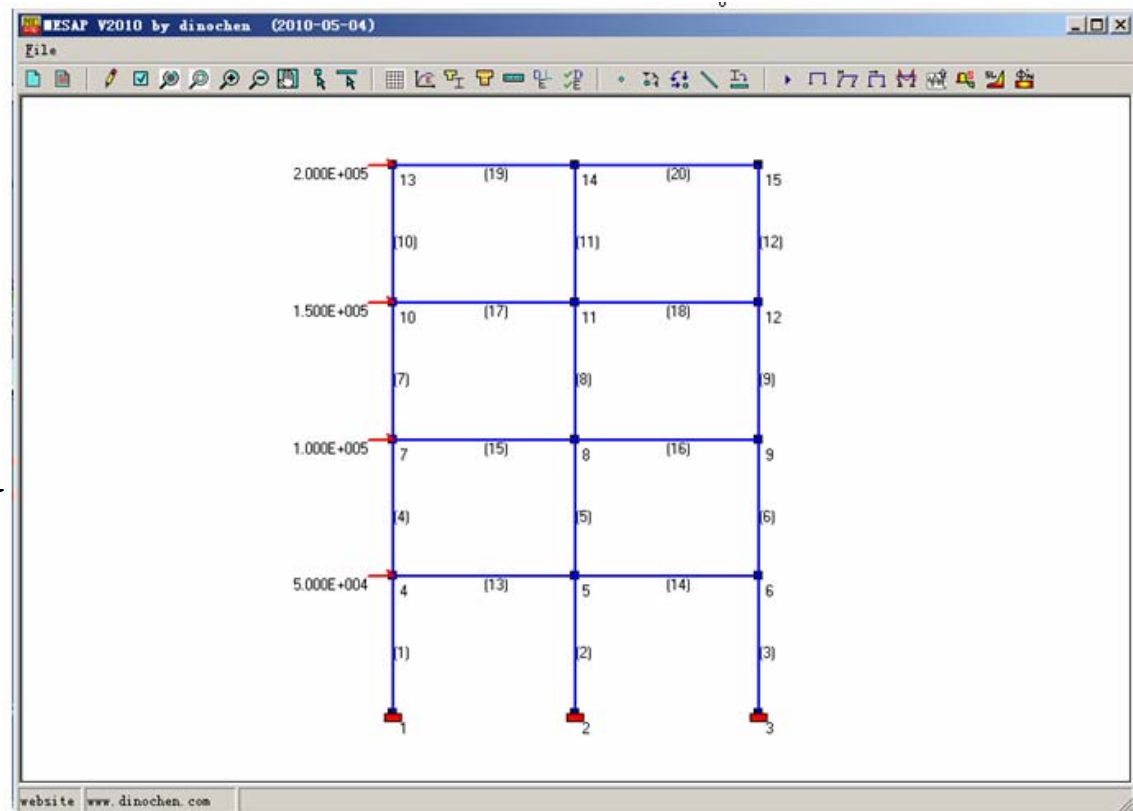


图 2-7 MESAP 平台整体结构





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

Material Property Data dialog box. It contains fields for Material Name (concrete), Material Number (1), and a dropdown for Type of Material (Concrete01 Material). Below these is a table for material properties.

material property	value
concrete compressive strength at 28 days	-35
concrete strain at maximum strength	-0.002
concrete crushing strength	-6
concrete strain at crushing strength	-0.012

Buttons: OK, Cancel

(b) 材料输入对话框

Fiber Section Data dialog box. It contains fields for Fiber Section Name (C400x400), Fiber Section Number (1), and Number of Fibers (12). Below these is a table for fiber data and a list of 12 fibers.

Num	Mat	PosY	Area
1	1	-180	16000
2	1	-140	16000
3	1	-100	16000
4	1	-60	16000
5	1	-20	16000
6	1	20	16000
7	1	60	16000
8	1	100	16000
9	1	140	16000
10	1	180	16000
11	2	165	1024
12	2	-165	1024

Buttons: Plot Section, OK, Cancel

(c) 纤维截面输入对话框

Define Analysis Case dialog box. It contains fields for Analysis Case Name (pushover), Analysis Case Num (1), and Analysis Type (Disp Contr). It also has sections for Displacement Control, Load Case Property, and Iteration Control. A graph is shown on the right.

Property: Analysis Case Name: pushover, Analysis Case Num: 1, Analysis Type: Disp Contr

Displacement Control: Control Node Num: 13, Control Direction: 1, Control Disp: 100

Constant Load: Constant Load: , Load Steps: 0

Load Case Property: Load Case: DEAD, Load Scale: 1, Time History Func: THDATA.TXT

Iteration Control: Structure Tolerance: 0.1, Section Tolerance: 0.0001, Max Iteration Steps: 100

Graph: Y-axis: 1.50E+000 to -1.45E+000, X-axis: 0.00 to 896.00

Buttons: OK, Cancel

(d) 分析工况对话框

创新点

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第二章 宏观单元理论研究及结构弹塑性分析平台MESAP的开发

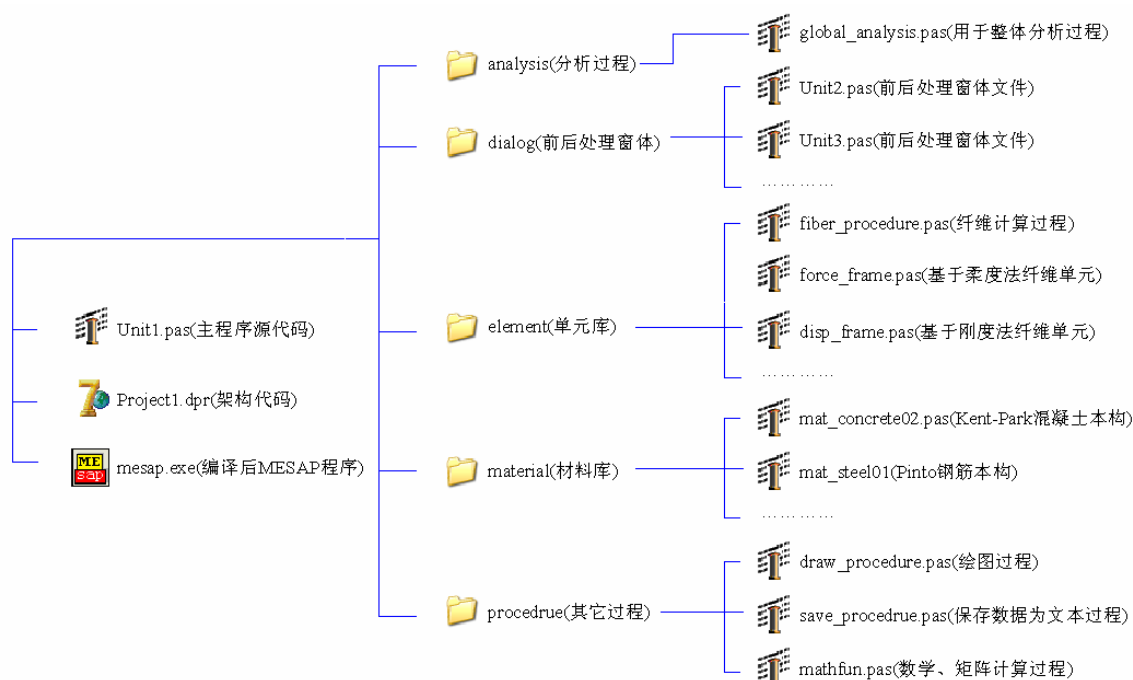
单元类型：

- 弹性杆系单元、平面单元；
- 基于刚度法的纤维单元
- 基于柔度法的纤维单元
- 基于柔度法的塑性铰单元
- 多竖向弹簧单元
- 修正斜压场单元

创新点

材料类型

- 单轴混凝土材料
- 双轴混凝土材料
- 钢筋材料
- 弹簧（剪力墙）本构模型
- 单分量塑性铰模型





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第二章 宏观单元理论研究及结构弹塑性分析平台MESAP的开发

单元类型：

- 基于刚度法的纤维单元
- 基于柔度法的纤维单元
- 基于柔度法的塑性铰单元

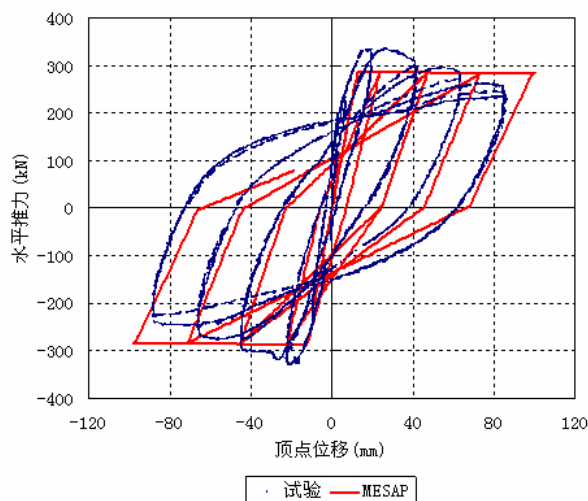
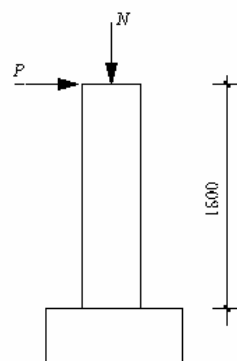
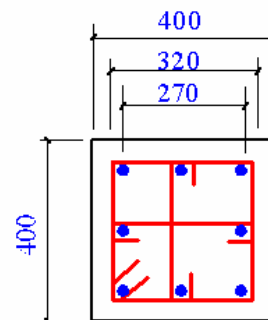


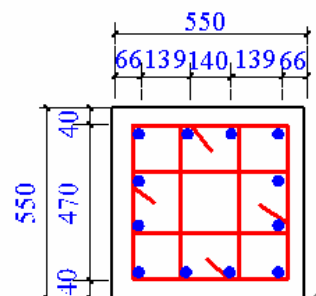
图 2-21 试件 1 滞回分析曲线对比



(a) 试件立面



(b) 试件 1



(c) 试件 5 与试件 7

图 2-19 试件配筋示意图

Fig.2-19. Details of specimen



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第二章 宏观单元理论研究及结构弹塑性分析平台MESAP的开发

MESAP应用于整体结构的分析

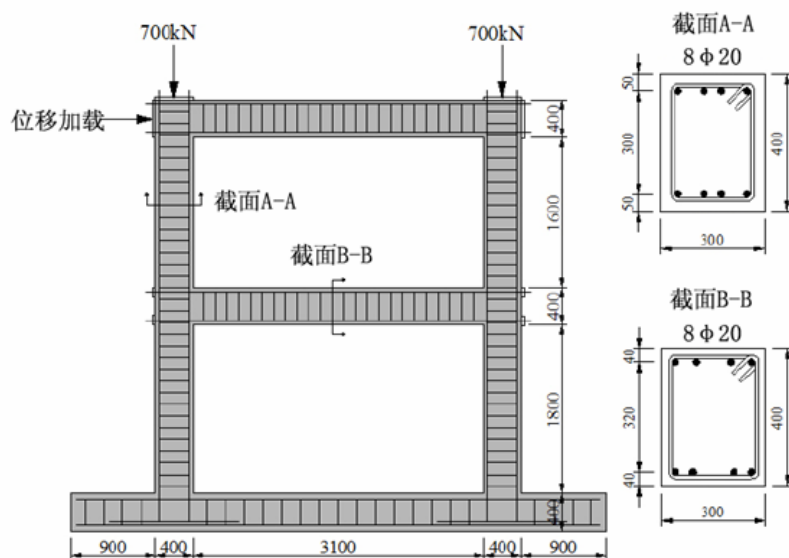
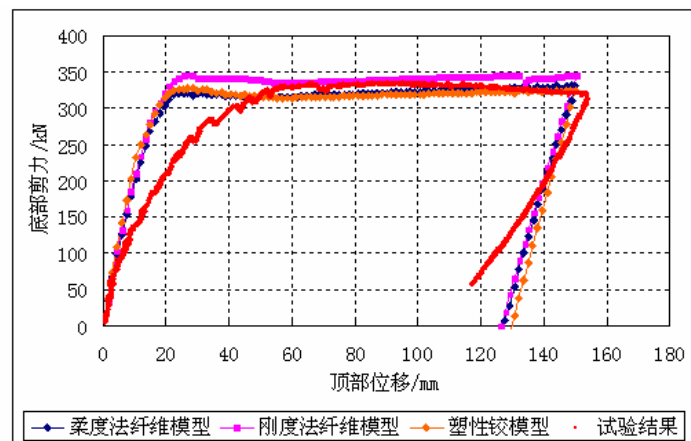
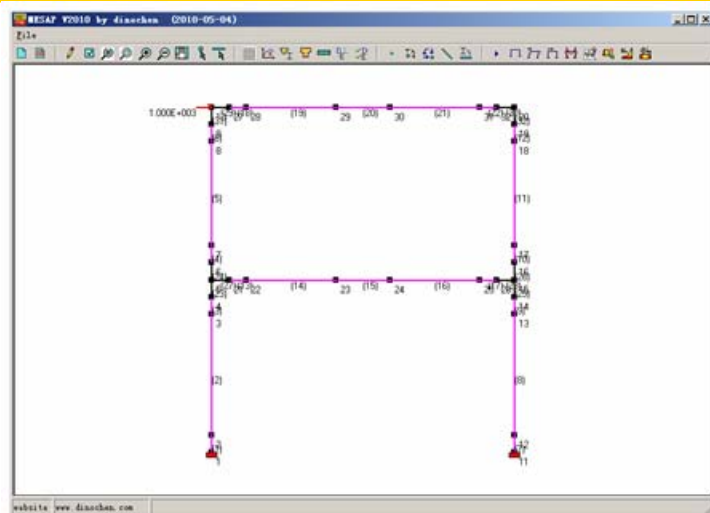


图 2-27 试件立面图与截面配筋图





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第二章 宏观单元理论研究及结构弹塑性分析平台MESAP的开发

MESAP应用于整体结构的分析与校正

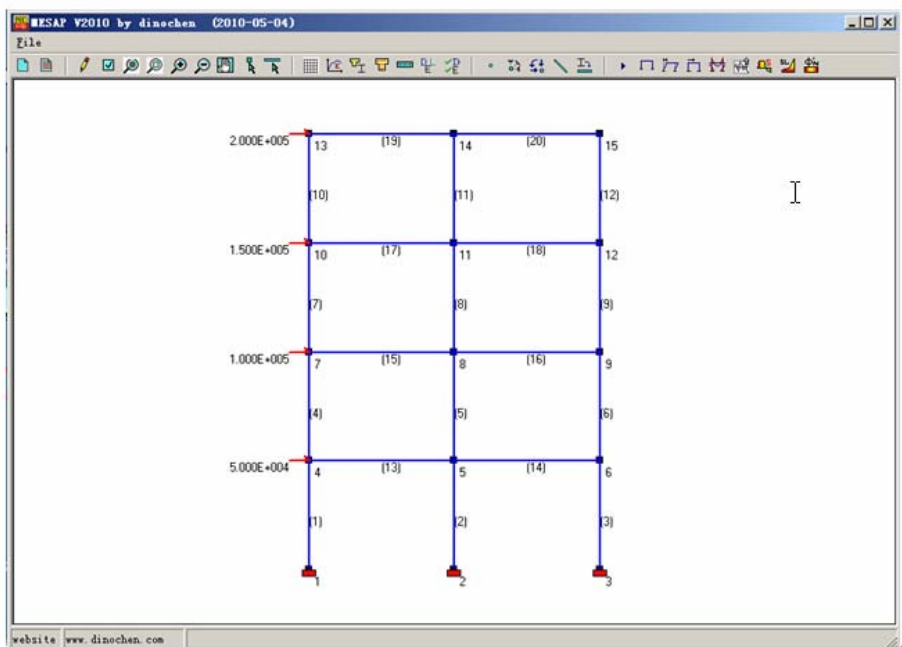


图 2-34 算例模型图

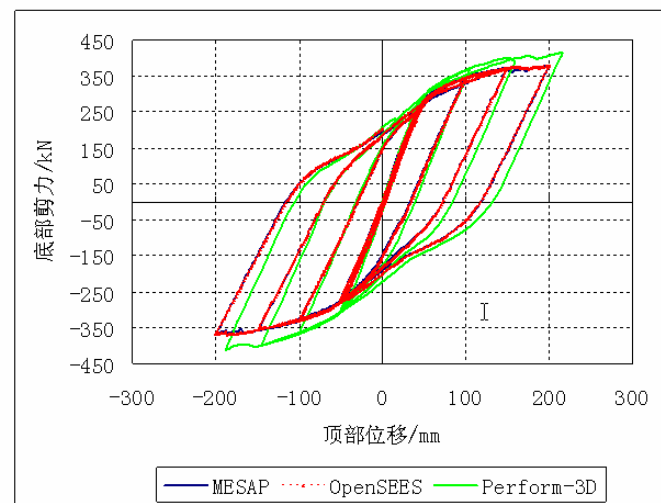


图 2-36 不同程序分析结果对比图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第三章 剪力墙宏观单元理论与单元开发

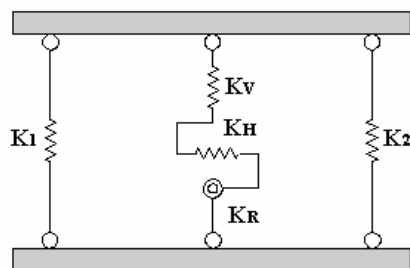


图 3-1 TVLEM 模型示意图

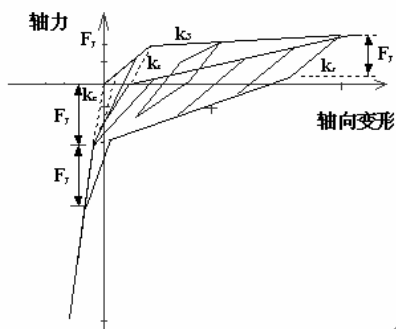
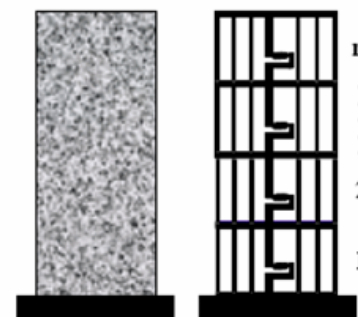


图 3-2 Kabeyasawa 弹簧本构



(a) 剪力墙构件 (b) 宏观单元模型

图 3-4 宏观单元模型示意图

Fig.3-4 Sketch of macro element model

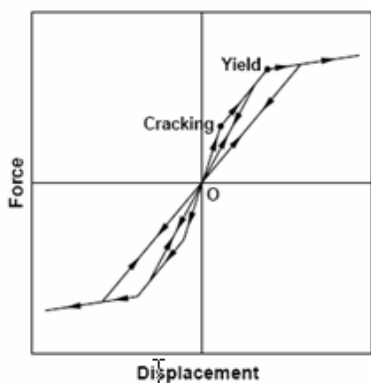


图 3-6 原点指向式剪切本构

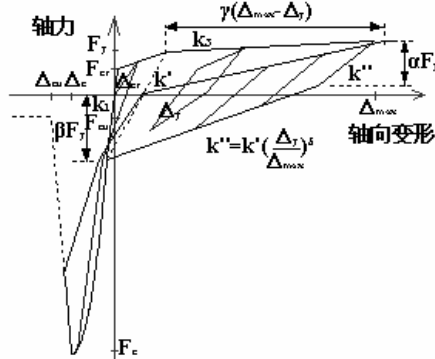


图 3-7 Fischinger 竖向弹簧滞回模型

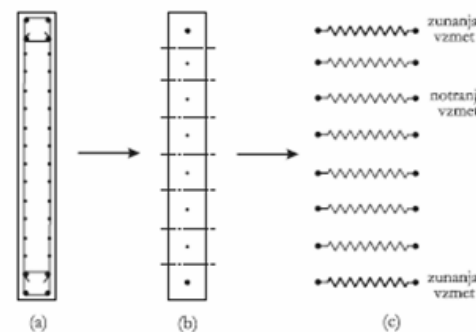


图 3-5 剪力墙弹簧划分示意图

Fig. 3-5 Sketch of springs division of shear wall section

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第三章 剪力墙宏观单元理论与单元开发

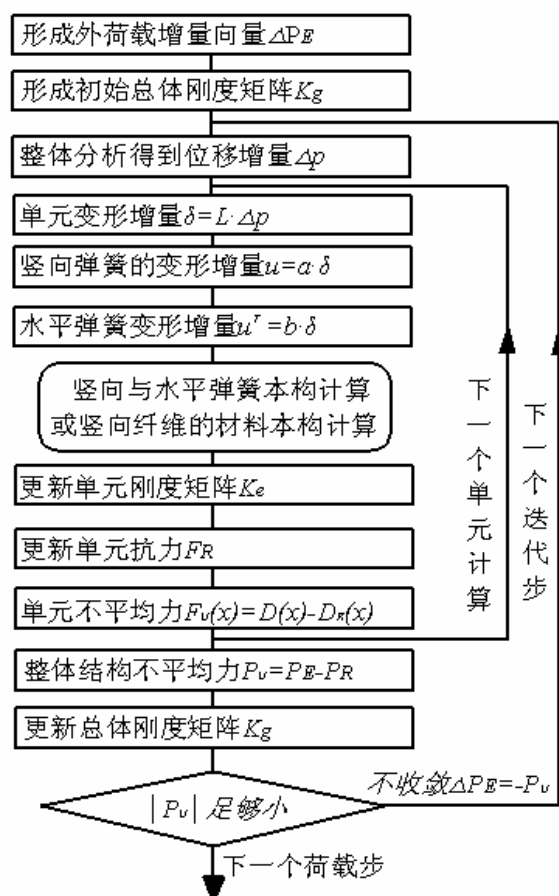


图3-12 MVLEM单元内迭代流程图

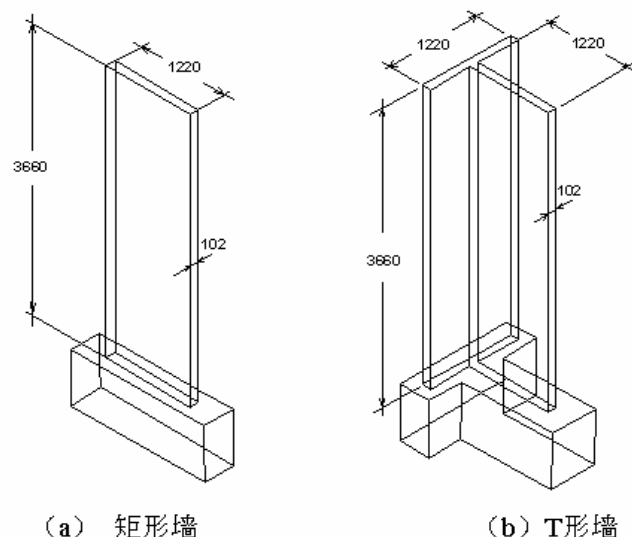


图3-14 试件RW2与TW2尺寸示意图

Fig. 3-14 Dimensions of specimen RW2 and TW2

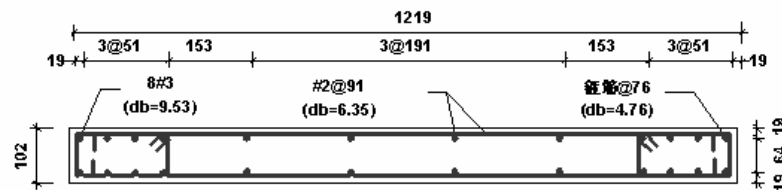


图3-15 试件RW2截面配筋图

Fig. 3-16 Section and reinforcement of specimen RW2



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第三章 剪力墙宏观单元理论与单元开发

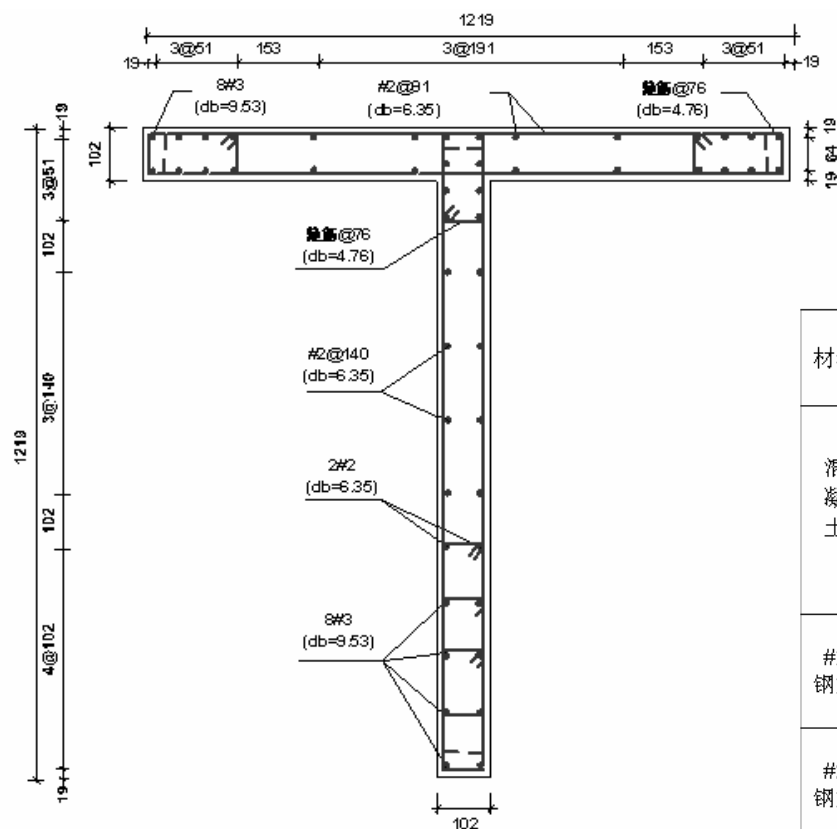


图3-16 试件TW2截面配筋图

Fig. 3-16 Section and reinforcement of specimen TW2

表3-2 材料参数表

Table 3-2 Parameters of material constitutive

材料	参数	RW2 试件		TW2 试件				
		暗柱	腹墙	翼缘	翼缘	翼缘腹墙相交	腹墙	腹墙
		约束区	非约束区	约束区	非约束区	约束区	非约束区	约束区
混凝土	f_c'/MPa	47.6	42.8	43.9	42.8	43.9	42.8	57.1
	ϵ_c'	0.0033	0.0021	0.0024	0.0021	0.0024	0.0021	0.0056
	E_c/GPa	31.03	31.03	31.03	31.03	31.03	31.03	31.03
	ϵ_{cr}	0.0037	0.0022	0.0025	0.0022	0.0025	0.0022	0.0073
	r	1.90	7.00	3.80	7.00	3.80	7.00	1.45
#3 钢筋	σ_y/MPa	395	-	395	-	395	-	387
	E_0/GPa	200	-	200	-	200	-	200
	b	0.0185	-	0.0185	-	0.0185	-	0.02
#2 钢筋	σ_y/MPa	-	336	-	336	-	356	-
	E_0/GPa	-	200	-	200	-	200	-
	b	-	0.035	-	0.035	-	0.0295	-



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第三章 剪力墙宏观单元理论与单元开发

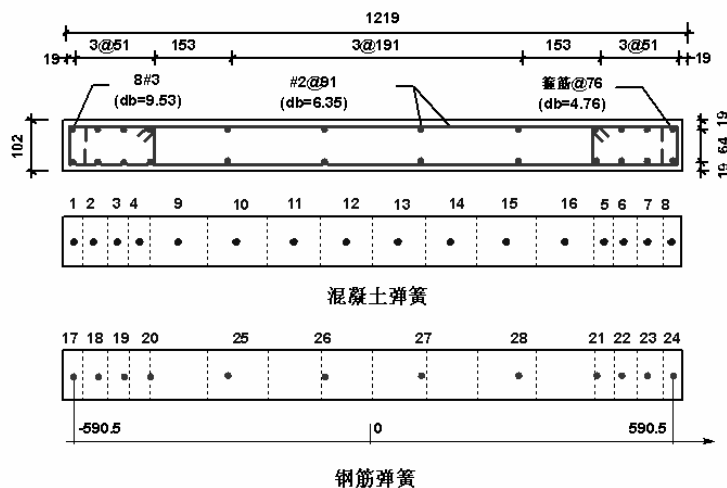
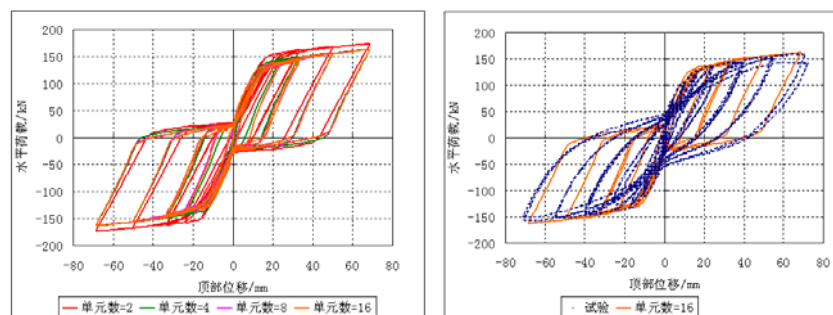


图3-19基于材料本构的竖向弹簧划分示意图



(a) 不同单元数的对比

(b) 分析结果与试验结果的对比

图 3-20 不同弹簧数的分析结果与试验结果的对比

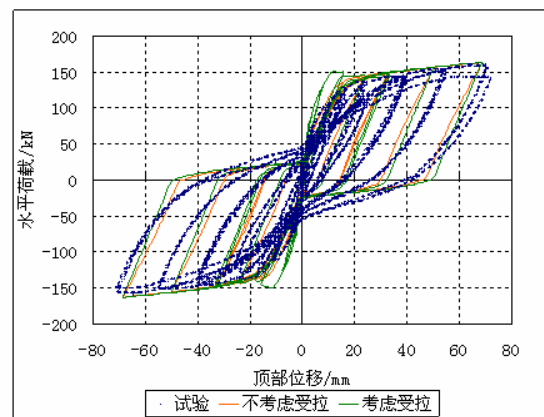


图 3-26 是否考虑混凝土受拉的分析结果与试验结果的对比



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第四章 修正斜压场单元理论与单元开发

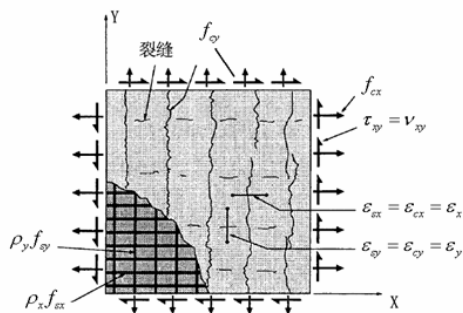


图 4-1 各应变变量与应力变量

Fig. 4-1 Variables of strain and stress

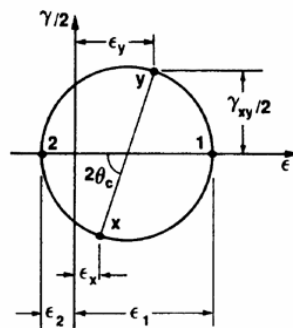


图 4-2 莫尔应变圆

Fig. 4-2 Mohr strain circle

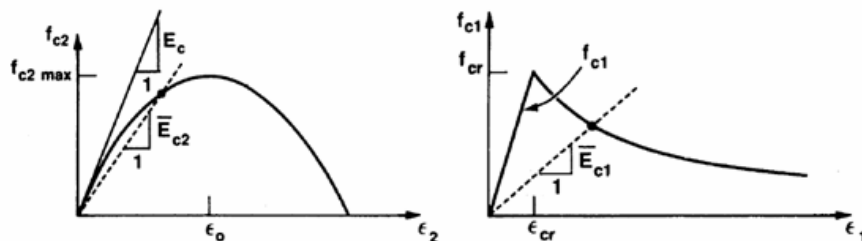


图 4-3 Hongestad Parabola 混凝土本构

Fig. 4-3 Hongestad Parabola concrete model

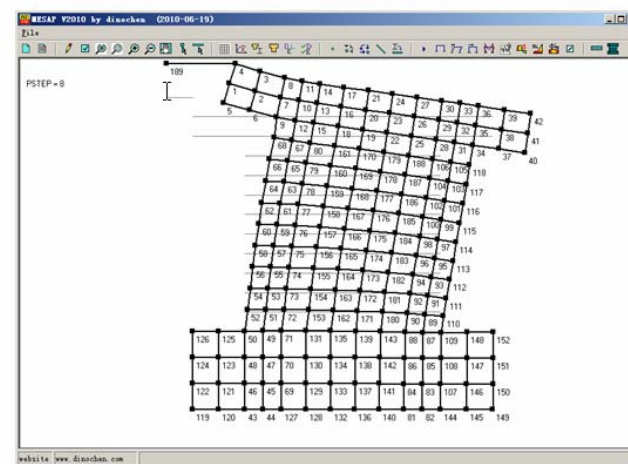
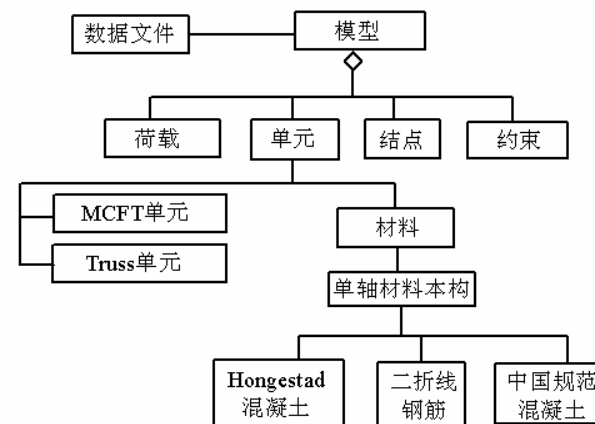


图4-6 MCFT单元显示界面图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第四章 修正斜压场单元理论与单元开发

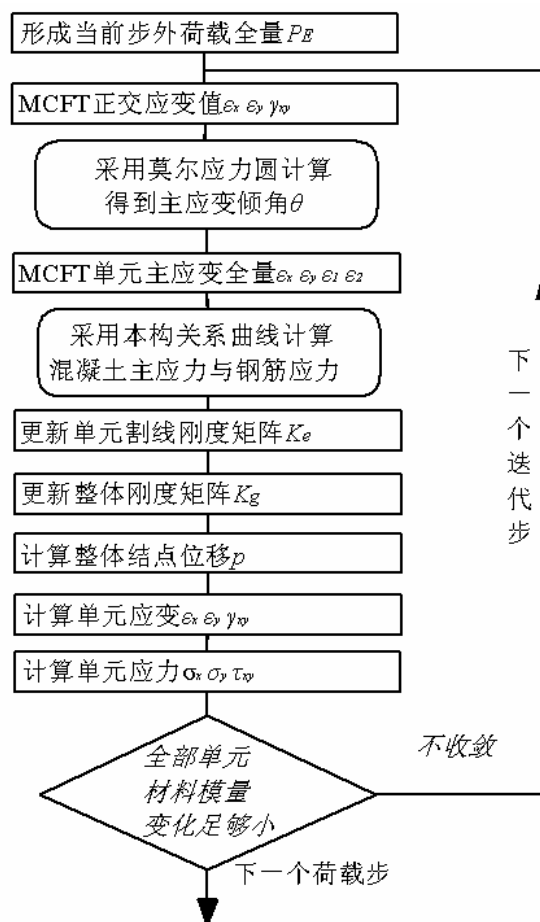


图4-7 MCFT单元内迭代流程图

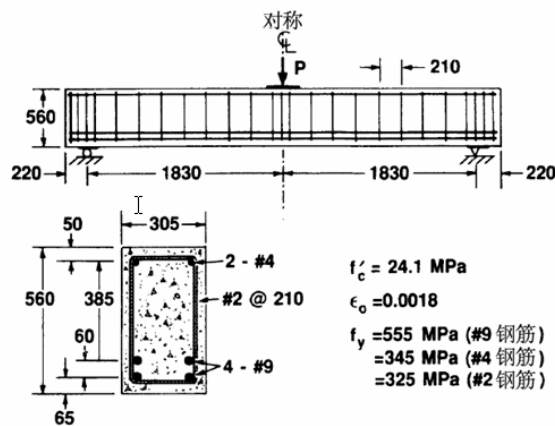


图4-13 试件尺寸与配筋图

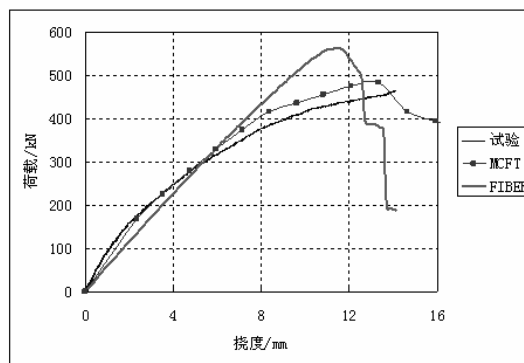


图4-15 荷载—位移曲线与试验结果对比图

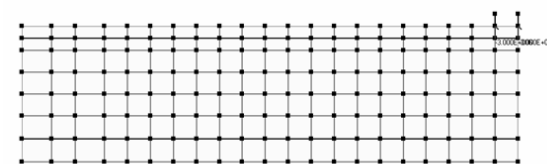


图4-14 离散式模型网格划分分图

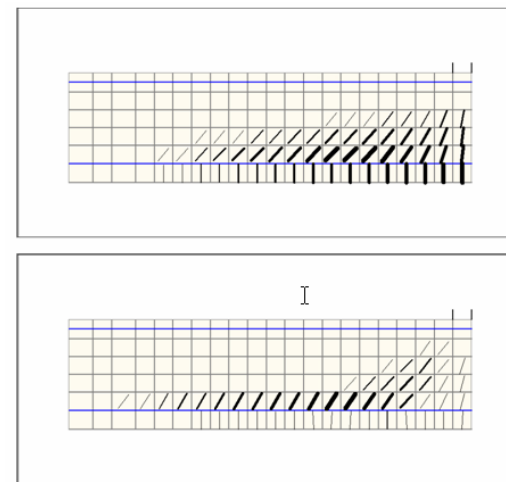


图 4-17 构件裂缝图

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第四章 修正斜压场单元理论与单元开发

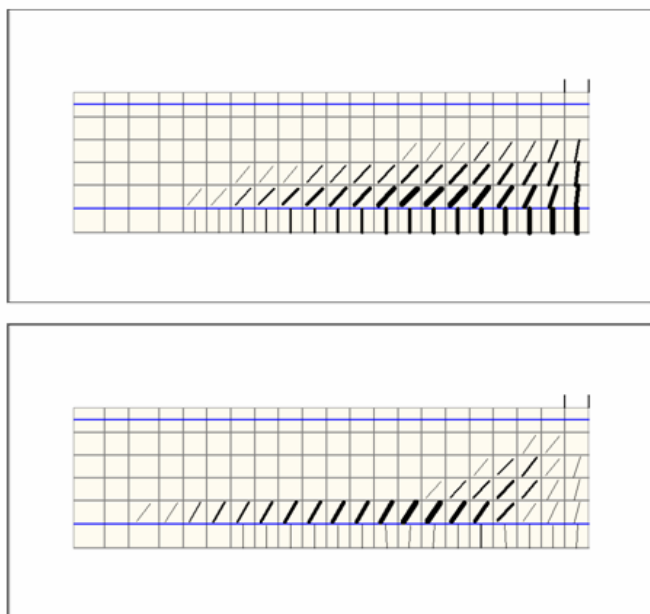


图 4-17 构件裂缝图

Fig. 4-17 The crack distribution of member

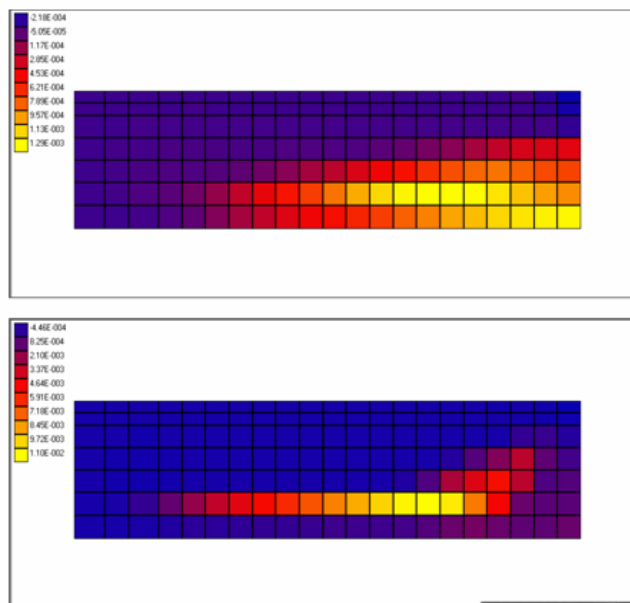


图 4-18 构件应变图

Fig. 4-18 The strain distribution

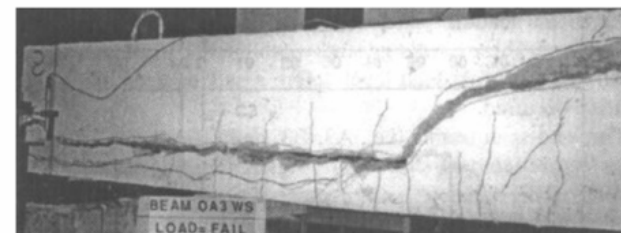


图 4-18 裂缝观测图

Fig. 4-18 Image of cracks distribution



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第四章 修正斜压场单元理论与单元开发

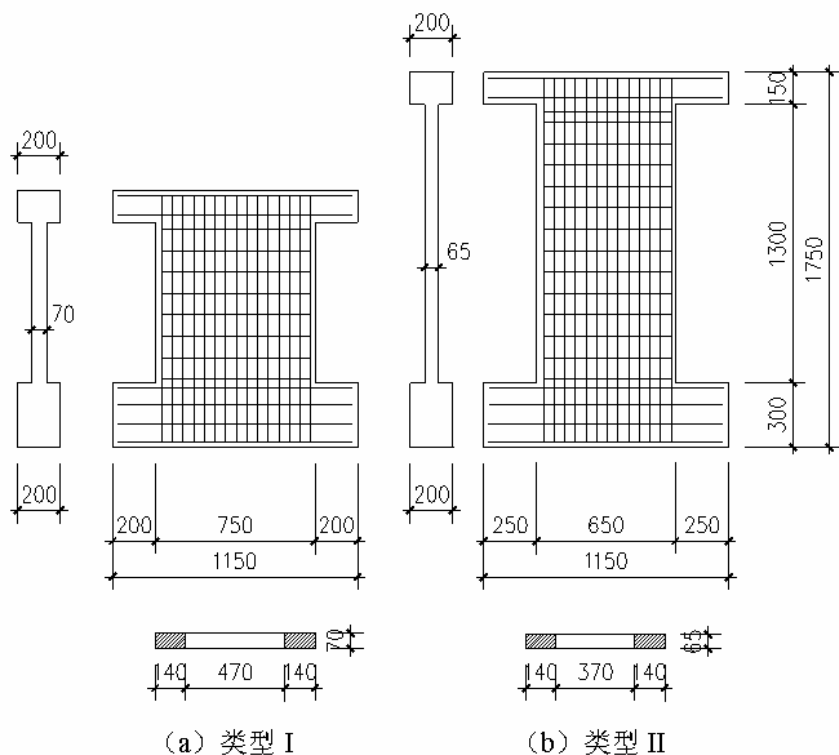


图 4-19 剪力墙构件尺寸图

Fig. 4-19 The dimension of specimens

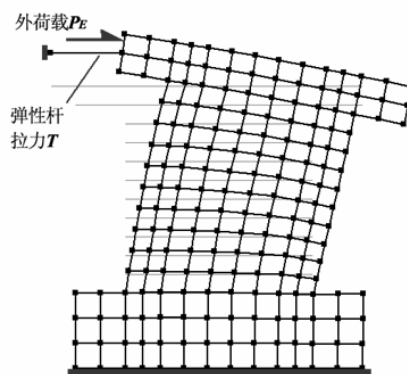


图 4-21 模型加载图

Fig. 4-21 The loading chart of model

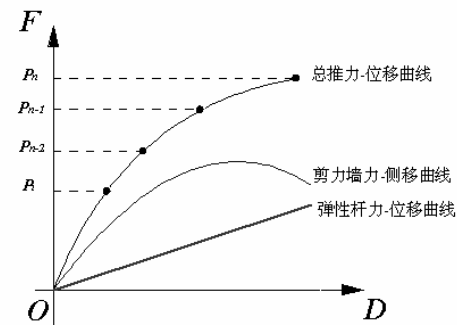


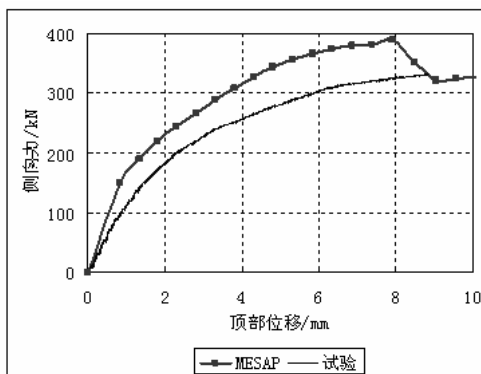
图 4-22 位移加载原理图

Fig. 4-22 The principle of displacement control

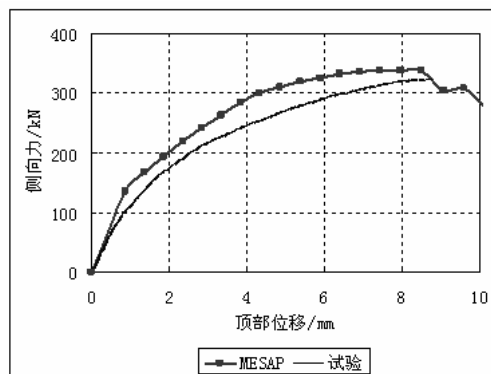


剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

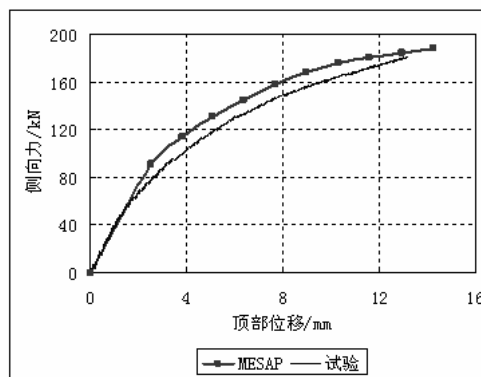
第四章 修正斜压场单元理论与单元开发



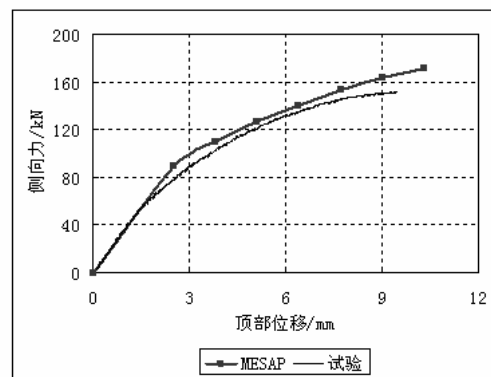
(a) SW13



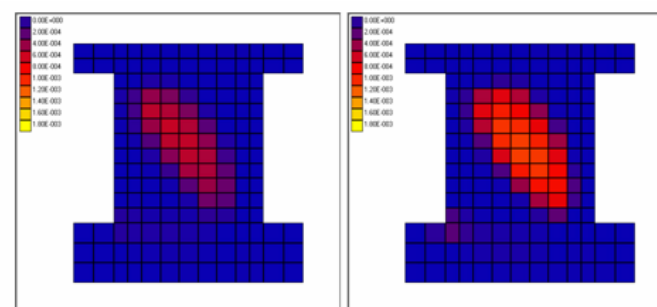
(b) SW15



(c) SW23

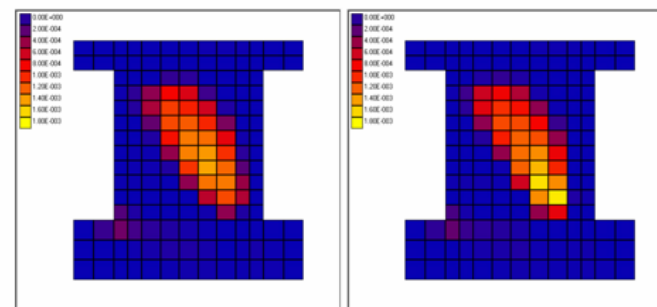


(d) SW25



荷载步=6/20

荷载步=10/20



荷载步=14/20

荷载步=20/20

图 4-25 水平钢筋应变变化图

Fig. 4-25 Development of strain of horizontal reinforcement



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第四章 修正斜压场单元理论与单元开发

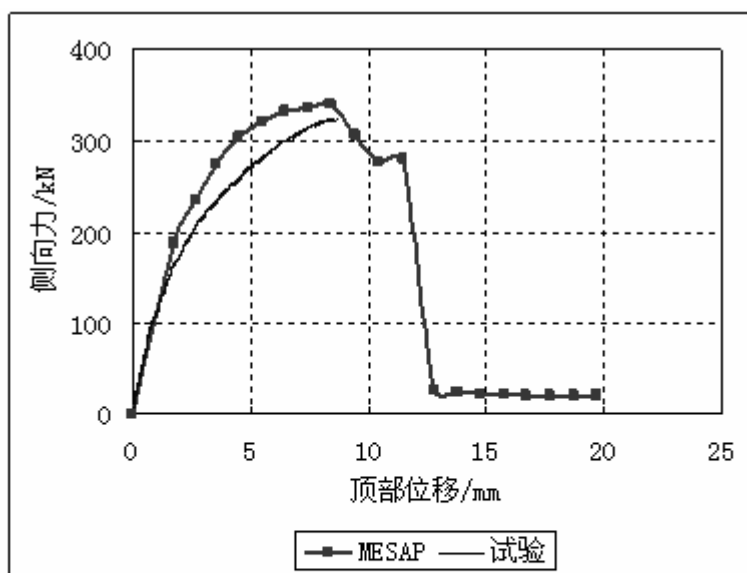


图 4-26 水平力-位移关系曲线图

Fig. 4-26 The force-displacement curve of analysis

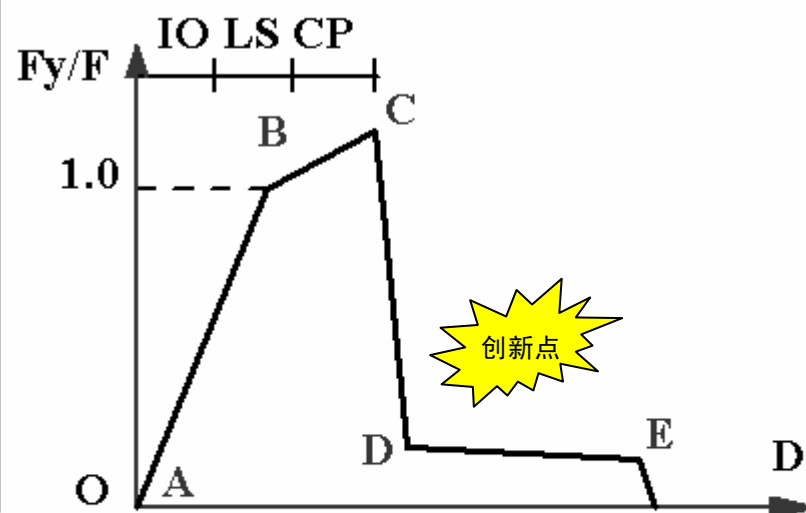


图 4-27 非延性构件力-位移关系曲线

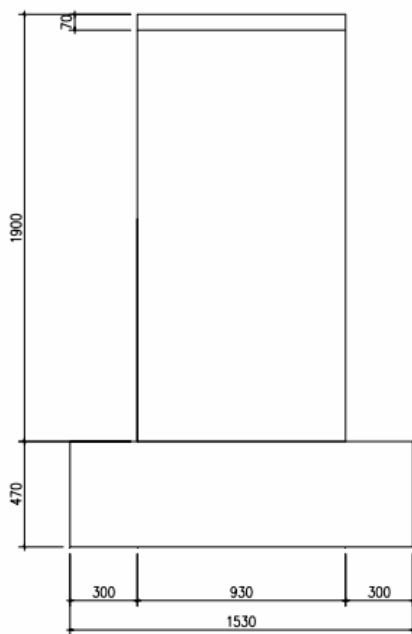
Fig. 4-27 The force-displacement of non-ductility elements



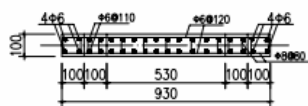
剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

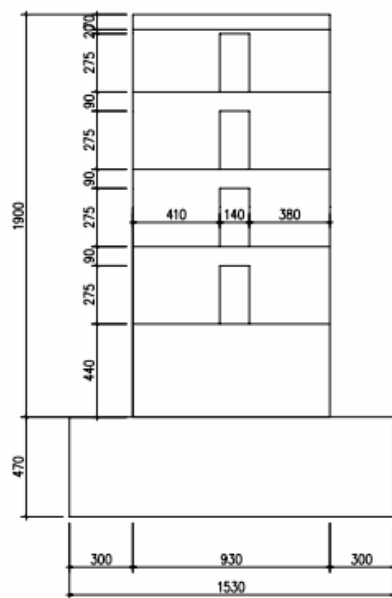
花园酒店改造工程剪力墙试验数值分析



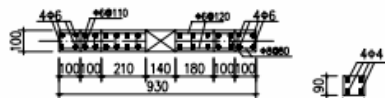
试件一立面图



试件一截面配筋



试件五立面图



试件五截面配筋



连梁的截面配筋



图 5-3 加载装置现场图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

花园酒店改造工程剪力墙墙试验数值分析

表5-1 试件参数表

Table 5-1 The parameters of specimens

编号 参数		试件一	试件二	试件三	试件四	
开洞情况		开洞前	开洞前	开洞前	开洞前	
设计依据		现行规范 ^[150]	现行规范	原结构	原结构	
轴压比		0.24	0.36	0.24	0.36	
配筋率	竖直	0.52%	0.52%	1.32%	1.32%	
	水平	0.475%	0.475%	0.314%	0.314%	
	端部拉筋	1.14%	1.14%	0.314%	0.314%	
配筋量	竖直	Ø6@110	Ø6@110	Ø6.5@50	Ø6.5@50	
	水平	Ø6@120	Ø6@120	Ø4@80	Ø6@120	
	拉筋	端部	Ø8@110×80	Ø8@110×80	Ø4@160×50	Ø4@160×50
		中部	Ø8@110×120	Ø8@110×120	0	Ø4@160×100

编号 参数		试件五	试件六	试件七	试件八	
开洞情况		规则洞	规则洞	规则洞	规则洞	
设计依据		现行规范	现行规范	原结构	原结构	
轴压比		0.18	0.36	0.18	0.36	
配筋率	竖直	0.52%	0.52%	1.32%	1.32%	
	水平	0.475%	0.475%	0.314%	0.314%	
	端部拉筋	1.14%	1.14%	0.314%	0.314%	
配筋量	竖直	Ø6@110	Ø6@110	Ø6.5@50	Ø6.5@50	
	水平	Ø6@120	Ø6@120	Ø4@80	Ø4@80	
	拉筋	端部	Ø8@110×80	Ø8@110×80	Ø4@160×50	Ø4@160×50
		中部	Ø8@110×120	Ø8@110×120	0	Ø4@160×100



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

花园酒店改造工程剪力墙墙试验数值分析

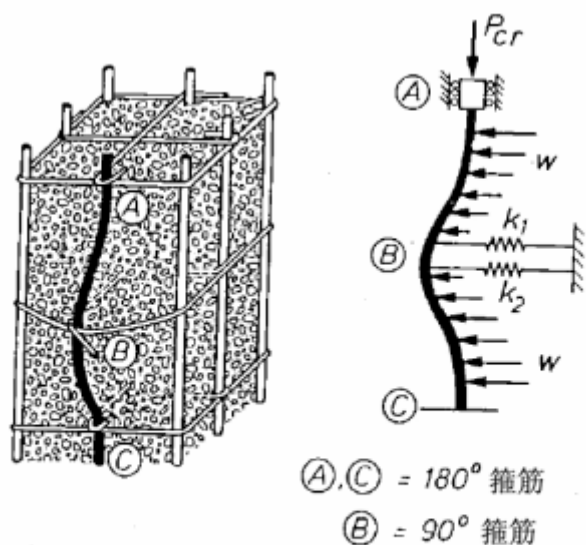


图 5-14 钢筋受压屈服机制示意图

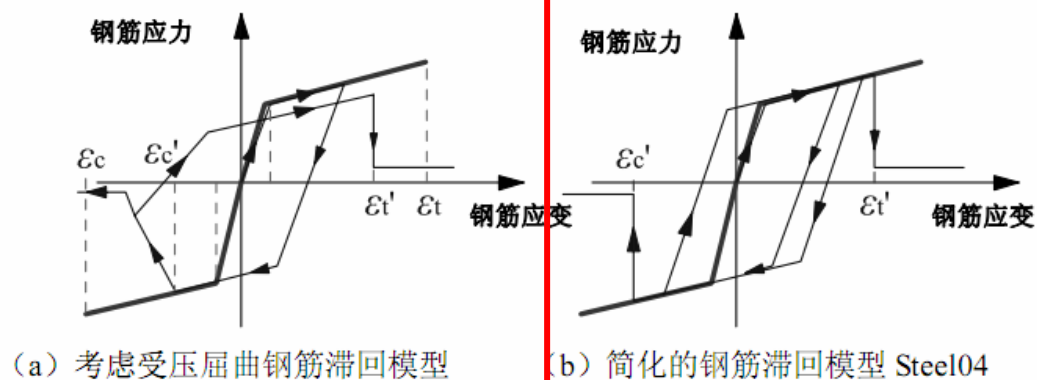


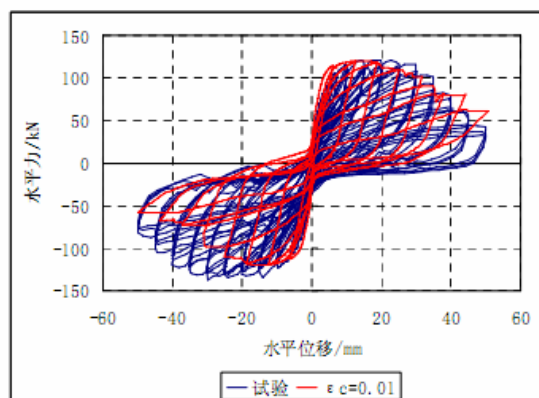
图 5-15 考虑钢筋受压屈曲退出工作的滞回模型

创新点

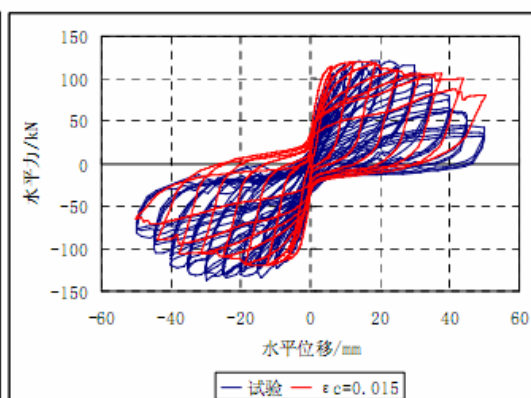


剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

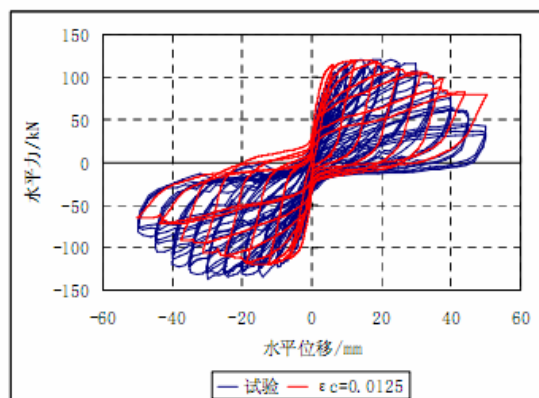
第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析



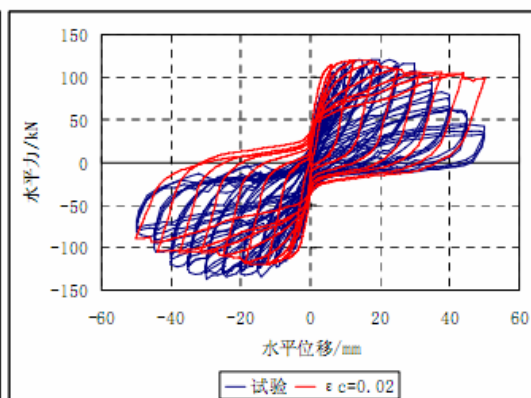
(a)



(b)



(c)



(d)



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

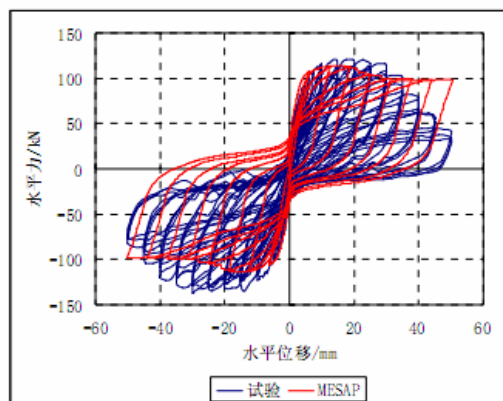
第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

从图 5-20 中可见，考虑钢筋受压应变极限确定反映出试验所得的构件滞回性能，钢筋应变限值取 0.01 时，反映出分析模型中钢筋过早受压屈服退出工作，承载力下降的坡度比试验结果大，图（b）与图（c）反映出当钢筋受压极限应变为 0.0125~0.015 时，滞回曲线与试验结果吻合，且在发生相应受压极限应变时，力-变形曲线时显突变下降，分析得到在接近倒塌的预测滞回环成 Z 形捏缩与试验结果相吻合，表明考虑弹簧在适当的应变限出工作有利于接近倒塌状态的模拟，模型应变在 0.0125~0.015 的分析结果能够反映实际构件钢筋的屈曲行为。图（d）反映出整过过程未发出钢筋退出工作行为，由于整过分析过程钢筋应变均小于 0.02，图中可知滞回环不明显呈现 Z 型捏缩，构件力-变形曲线的平缓下降是由于局部混凝土进入下降段引起。分析表明，试件一的钢筋受压应变极限在 0.0125~0.015 之间。

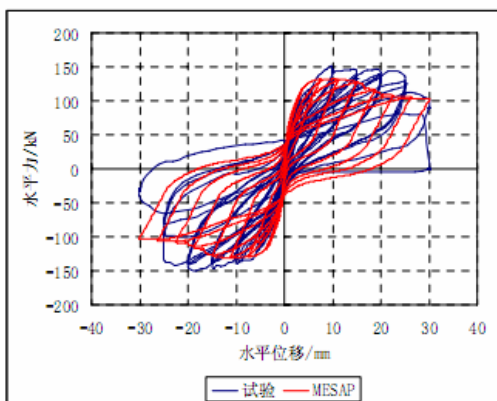


剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

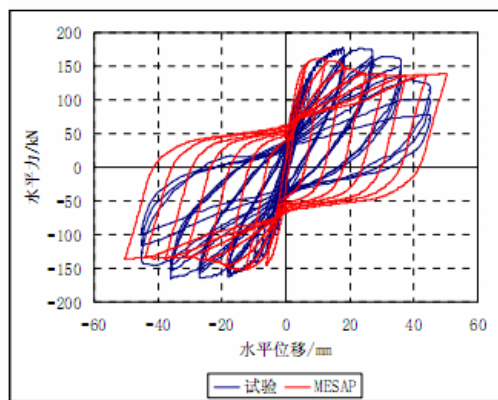
第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析



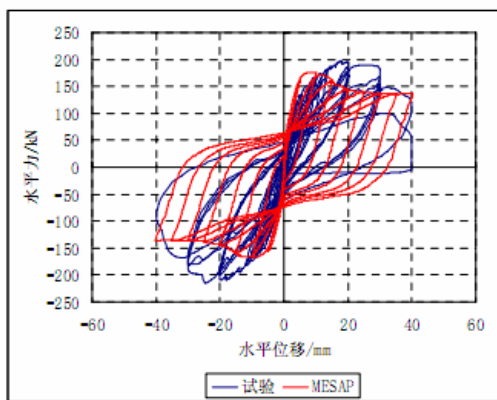
(a) 试件一



(b) 试件二



(c) 试件三



(d) 试件四

表 5-4 c 点变形值与 c 点对应边缘钢筋最大应变

Table 5-4 Deformation and the maximum strain of corresponding edge reinforcement bar at point c

试件	下降 90%承载力 时变形值/mm	钢筋屈曲出现 时变形值/mm	边缘钢筋 压应变
试件一	29.87	30.00	0.010082
试件二	24.96	20.00	0.010962
试件三	35.49	36.00	0.016589
试件四	29.87	30.00	0.01456



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

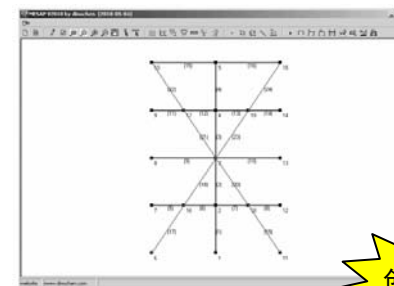
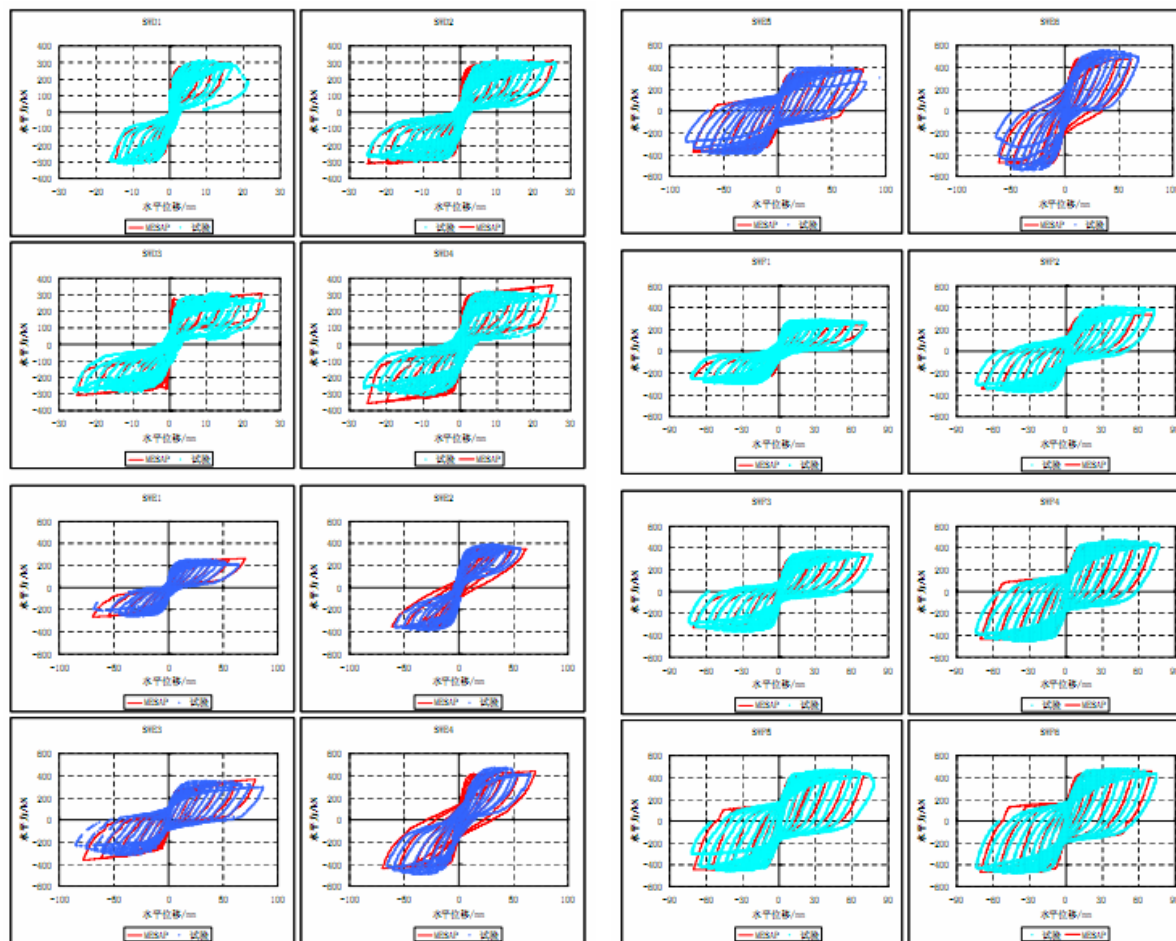


图 5-32 带暗支撑剪力墙模型试件分析模型

创新点

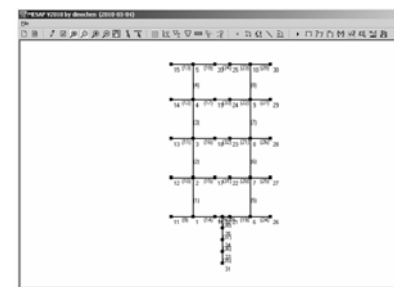


图 5-24 开洞剪力墙试件分析模型图

创新点



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

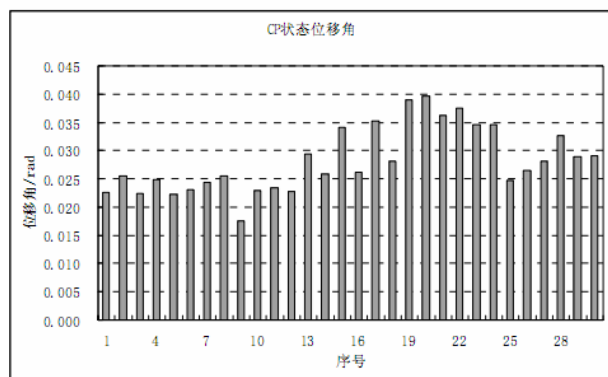


图 5-35 剪力墙位移角分布图

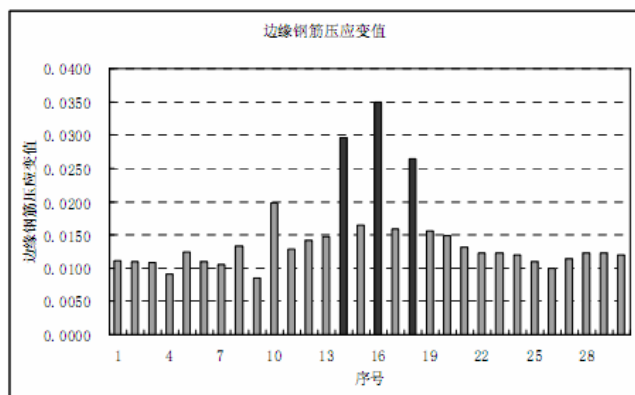


图 5-36 边缘钢筋压应变分布图

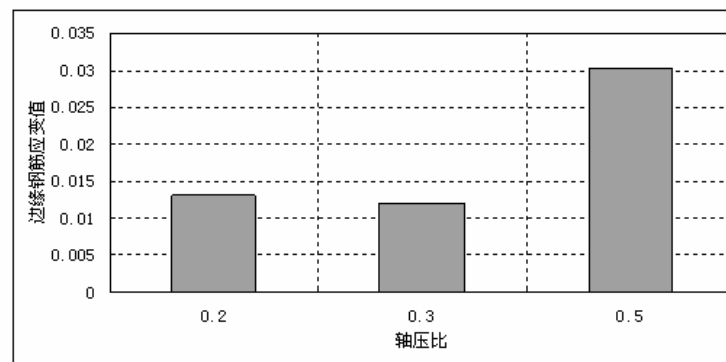


图 5-37 边缘钢筋压应变限值与轴压比关系

创新点



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第五章 剪力墙构件低周往复试验及数值分析

第五章经过大样本的剪力墙试件低周往复荷载试验的数值分析，分析表明剪力墙的CP变形值与边缘钢筋拉应变限值关系密切。边缘钢筋拉应变限值 ε_{scu} 与轴压比有一定关系，取值方法如下：

$$\text{当 } \varphi_N \leq 0.3 \text{ 时, } \varepsilon_{scu} = 0.010 \quad (6-2)$$

$$\text{当 } 0.3 < \varphi_N \leq 0.5 \text{ 时, } \varepsilon_{scu} = 0.01 + 0.075 \times (\varphi_N - 0.3) \quad (6-3)$$

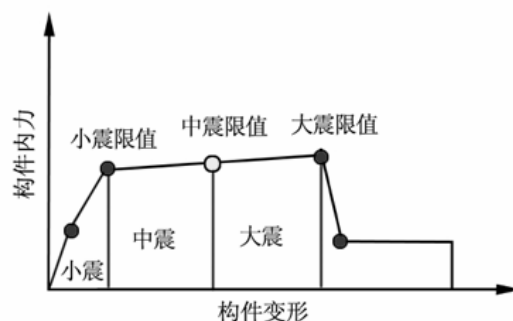
$$\text{当 } \varphi_N > 0.5 \text{ 时, } \varepsilon_{scu} = 0.025 \quad (6-3)$$

创新点



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究



研究构件变形
性能指标的意义

图 6-2 三水准构件性能指标

Fig. 6-2 Performance limit state of element according to three levels of Chinese code

表 6-1 基于中国抗震水准划分的性能指标与 FEMA356 的对比

Table 6-1 Comparison of performance limit state

based on Chinese code and FEMA 356

构件变形	FEMA356 指标	中国抗震水准
开裂未屈服	OP	
接近屈服	IO	小震限值 δ_{IO}
屈服未倒塌	LS	中震限值 δ_{LS}
接近倒塌	CP	大震限值 δ_{CP}

创新点



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

本文将采用剪力墙宏观单元（MVLEM单元），基于中国《混凝土规范》的材料本构关系对受弯控制的剪力墙构件进行分析，确定具有明显变形特征的小震状态限值与大震状态限值，即构件的屈服变形值及极限变形值。

大震变形限值采用极限变形值，其取值方法为：承载力下降90%或抗力急剧下降时所对应的变形值。

构件变形从0到OP状态及从OP至IO状态，合并成为小震指标，即小震保证构件变形不屈服。小震变形限值采用屈服变形值，其值可通过屈服位移值计算得到。如果构件行为表现为理想弹塑性行为，则荷载位移骨架曲线上存在明显的屈服点，可以直接得到屈服位移，混凝土构件一般不具备明显的屈服点，那么屈服点的取值与计算方法有：1) 通用屈服弯矩法、2) R.Park法、3) 能量等效法。本文采用的小震变形限值为三种方法计算值的平均值。



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

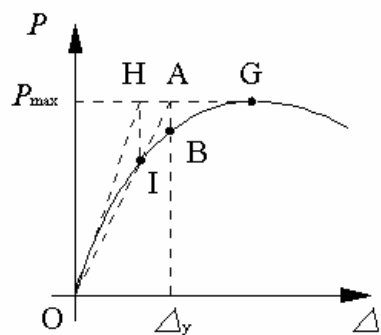


图 6-15 通用屈服弯矩法图

Fig. 6-15 Yielding moment method

I

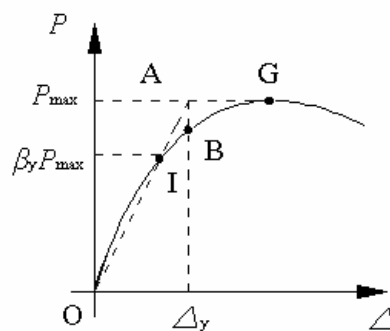


图 6-16 R.Park 法

Fig. 6-16 R.Park method

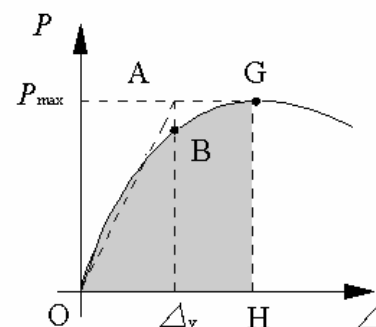


图 6-17 能量等效法

Fig. 6-17 Energy equivalence principle method



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

各参数影响性分布规律如图 6-11 所示。从图中可见，参数 a_1 、 a_5 、 a_6 为主控影响参数。剪力墙大震变形性能指标 θ_{CP} 随混凝土强度（参数 a_1 ）增大而减少，由于混凝土的延性随强度增大而减少，大震变形性能指标受混凝土延性影响。轴压比小于 0.4 时，大震变形性能指标随配筋率（参数 a_5 ）的增大而减少，轴压比大于 0.4 时，大震变形性能指标随配筋率（参数 a_5 ）的增大而增大。大震变形性能指标随轴压比（参数 a_6 ）增大而减少，影响性最大，轴压比大于 0.5 时反而增大，原因是提高了边缘钢筋压应变限值。参数 a_2 、 a_3 、 a_4 为非主控影响参数，对结果影响不大。

$$\beta = f_{ck} \rho_s \varphi_N$$

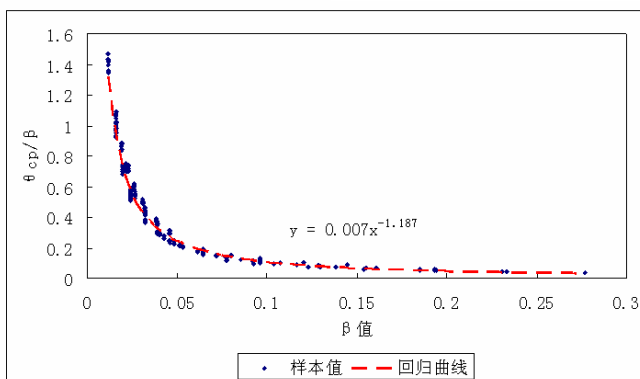


图 6-12 β 与 θ_{CP}/β 的关系

Fig. 6-12 The relationship between β and θ_{CP}/β



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

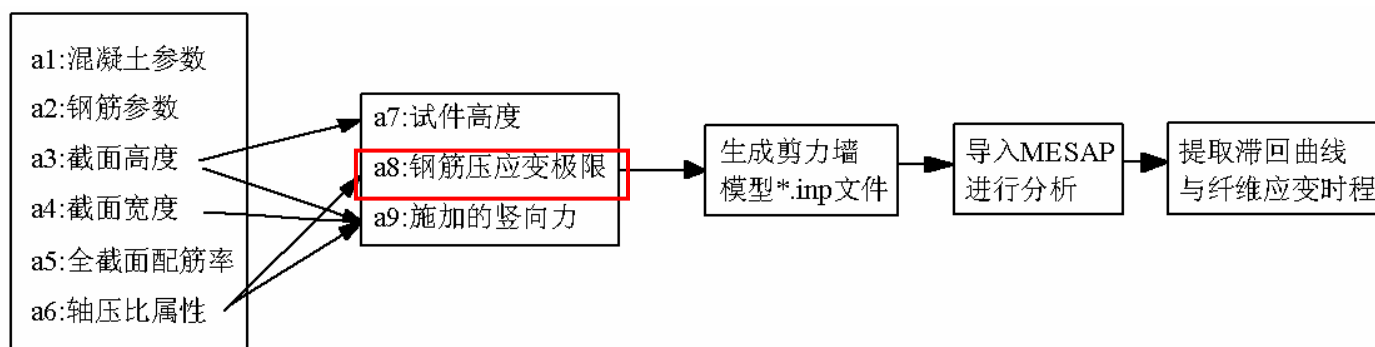


图 6-9 生成程序流程图

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

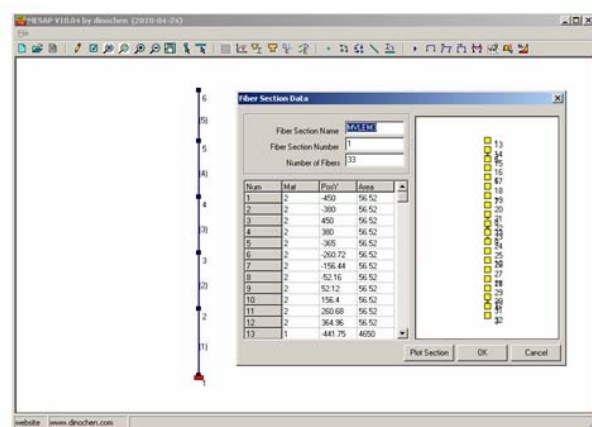


图 6-5 MESAP 剪力墙模型图

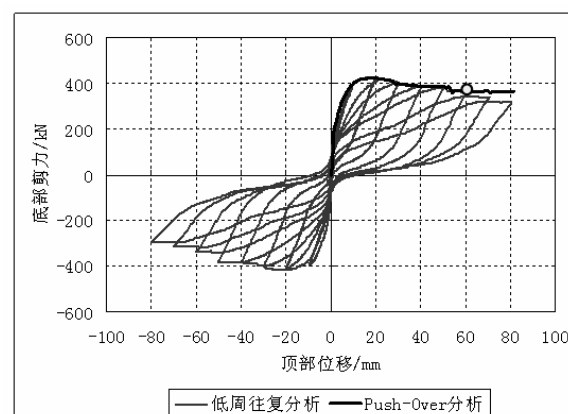
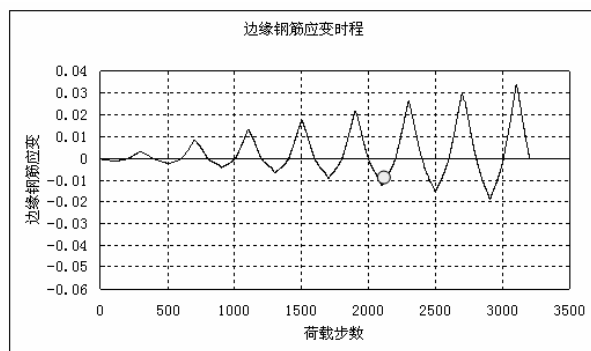
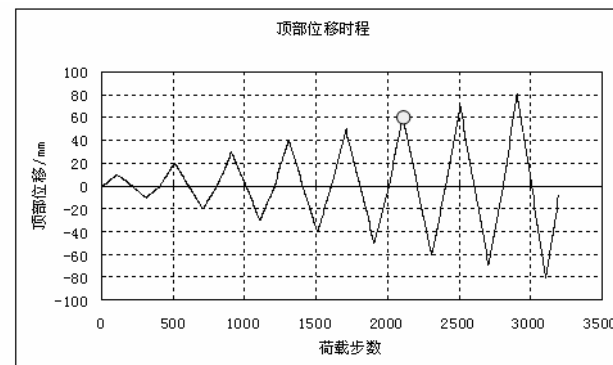


图 6-7 滞回曲线与单调加载曲线



(a) 边缘钢筋应变时程



(b) 顶部位移时程



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

表 6-6 分析参数取值表

Table 6-6 The parameters of analysis

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
名称	混凝土强度标准值/MPa	钢筋屈服强度/MPa	h/mm	b/mm	$\rho_s/\%$	φ_N
取值	C30	HRB335	2000	200	0.6	0.1
	C40		4000	400	0.8	0.2
	C50	HRB400	6000	500	1.0	0.4
	C60		8000	600	1.2	0.6

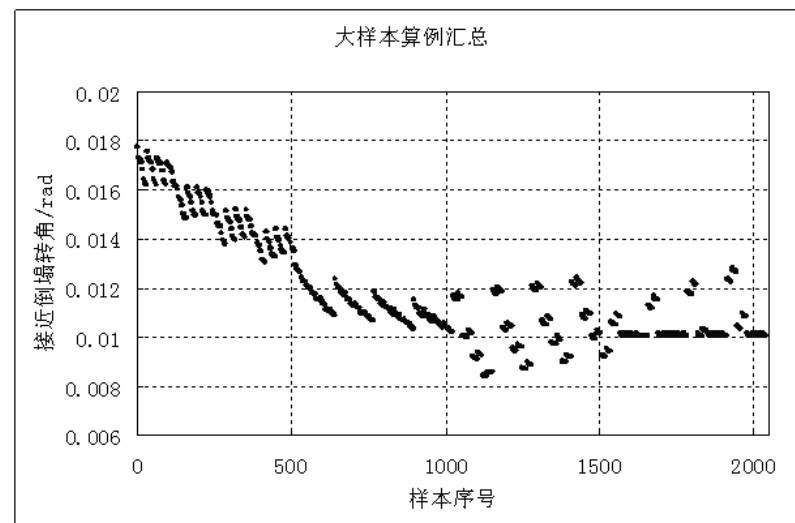


图 6-10 算例结果汇总



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

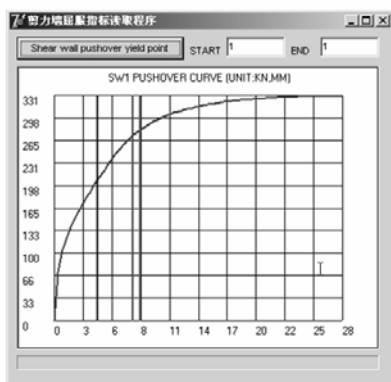
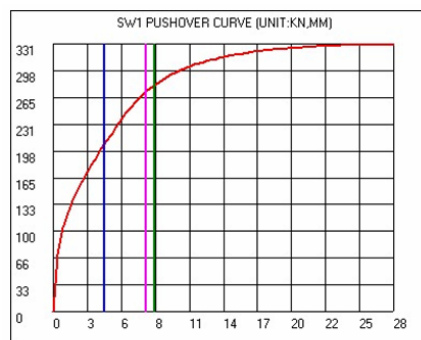
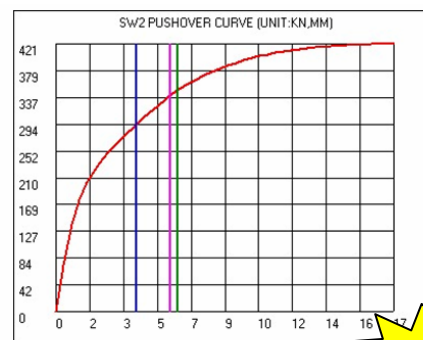


图 6-18 屈服点计算程序界面

Fig. 6-18 The interface of program of yielding point calculation



(a)



(b)

图 6-19 屈服指标计算结果图

创新点

各参数影响性分布规律如图 6-21 所示。从图 6-21 中可见，参数 a_1 、 a_2 、 a_5 、 a_6 为主控影响参数。剪力墙小震变形性能指标 θ_{10} 随混凝土强度（参数 a_1 ）增大而减少，由于混凝土的延性随强度增大而减少，大震变形性能指标受混凝土延性影响。小震变形性能指标随配筋程度（参数 a_5 与参数 a_2 的乘积）的增大而增大，由于屈服力提高从而直接提高了屈服指标。小震变形性能指标随轴压比（参数 a_6 ）的增大而减少。参数 a_3 、 a_4 为非主控影响参数，对结果影响不大。



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

$$\beta_{IO} = \frac{\rho_s f_y}{\varphi_N f_{ck}} \quad (\text{无量纲值})$$

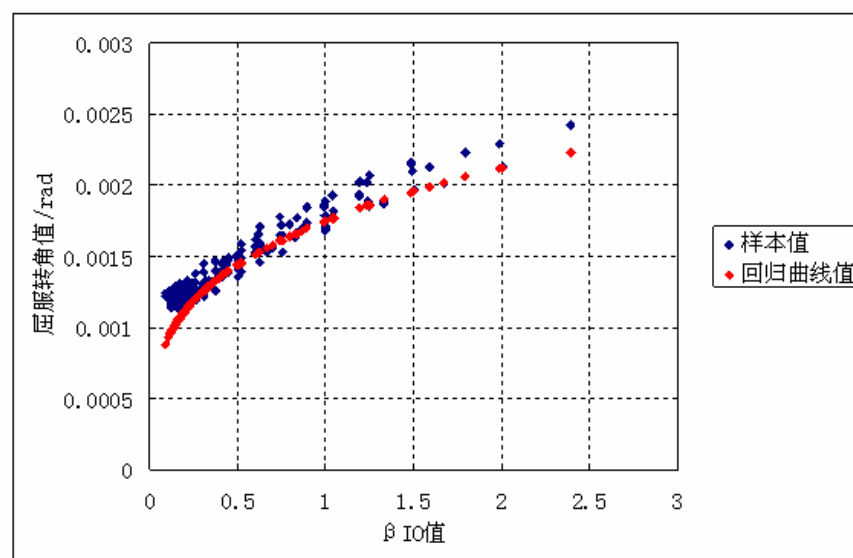


图 6-21 θ_{IO} 与 β_{IO} 的关系图

Fig. 6-21 The relationship between θ_{IO} and β_{IO}

$$\theta_{IO} = 0.00175 \beta_{IO}^{0.28}$$



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

表 6-10 受弯控制的剪力墙弯曲变形性能指标计算表（转角值 θ/rad ）

Table 6-10 Equations of deformation limit state

of shear-wall with flexure control (rotation θ/rad)

参数 β_{IO}	小震性能指标 θ_{IO}	参数 β_{CP}	大震性能指标 θ_{CP}
$\beta_{IO} = \frac{\rho_s f_y}{\varphi_N f_{ck}}$	$\theta_{IO} = 0.00175 \beta_{IO}^{0.28}$	$\beta_{CP} = \rho_s \varphi_N f_{ck}$	$\theta_{CP} = 0.0063 \beta_{CP}^{-0.187}$

表 6-11 FEMA356 规定受弯控制的剪力墙变形性能指标

Table 6-11 Deformation performance limit state

of shear-walls with flexure control in FEMA356

构件信息			允许塑性铰转角/rad				
			性能水准				
			构件类别				
			IO	主要构件		次要构件	
LS	CP	LS		CP			
$\frac{f_y(A_s-A_s')}{t_wl_wf'_c}$	$\frac{V}{t_wl_w\sqrt{f'_c}}$	约束边缘构件					
≤0.10	≤3	是	0.0050	0.010	0.015	0.015	0.020
≤0.10	≥6	是	0.0040	0.008	0.010	0.010	0.015

创新点



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第六章 受弯控制的剪力墙构件变形性能指标研究

- (2) FEMA 表中的指标主要计算变量为轴压比及剪应力水平，轴压比插值范围在 0.1~0.25，如果轴压比大于 0.25 则取轴压比为 0.25 的变形性能指标值。本文的计算表采用的变量为轴压比为主，结合配筋率及混凝土材料的影响，剪应力水平对配筋率有一定影响，在某一程度上，计算表考虑了剪应力水平的影响。本文计算表轴压比适用范围为 0.0~0.6，随着轴压比的增大延性减小，大震变形性能指标随着减小，本文计算表对该变量的影响进行了细分。
- (3) FEMA 表中考虑次要构件的性能指标，本文没有给出次要构件的性能指标。计算表中性能指标均用于作为竖向支撑的剪力墙构件，均作为主要构件对待。
- (4) FEMA 表中考虑约束效应、按我国《混凝土规范》对剪应力水平的要求得出的剪力墙的 CP 性能指标约为 0.009~0.015。本文计算表中得到的大震变形性能指标约为 0.008~0.017，两者基本上是接近的，但本文方法的大震变形性能指标值与轴压比关系密切，即底部剪力墙构件接近 0.008，顶部剪力墙构件接近 0.017，表明剪力墙构件的变形性能要求从底至顶逐步放松，符合结构抗震概念设计的原则。
- (5) FEMA 表中 IO 性能指标范围为 0.001~0.005，本文计算表小震性能指标 0.001~0.0024，本文计算方法比 FEMA 表偏小。FEMA 表中 LS 指标是 CP 指标的 50%，本文计算表中中震变形指标约为大震变形指标的 50%。



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

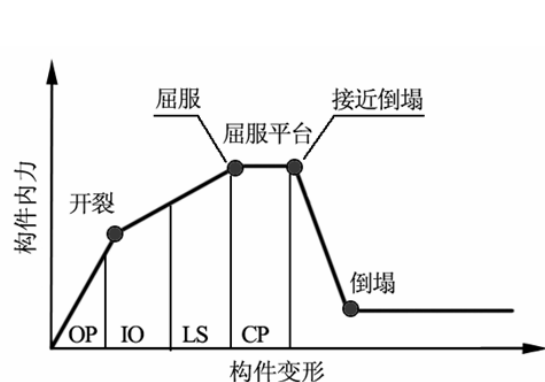


图 7-1 FEMA356 规范的构件性能指标示意图

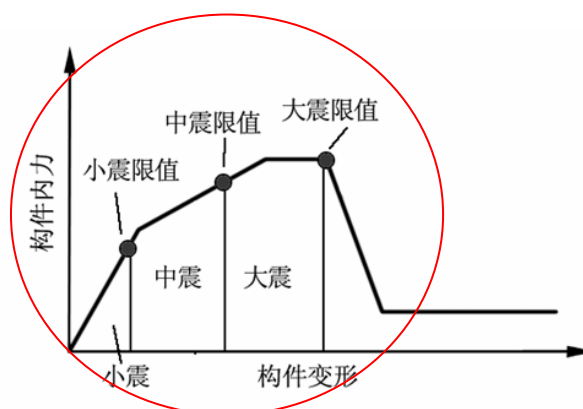


图 7-2 三水准的构件性能指标

表 7-1 不同水准的地震作用峰值加速度

Table 7-1 Peak accelerator of earthquake under different levels of earthquake

抗震烈度	6 度	7 度 (0.1)	7 度 (0.15)	8 度 (0.2)	8 度 (0.3)	9 度	平均值
小震/g	0.018	0.035	0.055	0.07	0.11	0.14	-
中震/g	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	-
大震/g	0.1	0.22	0.31	0.4	0.51	0.62	-
小震/大震	0.18	0.16	0.18	0.18	0.22	0.23	0.19
中震/小震	0.50	0.45	0.48	0.50	0.59	0.65	0.53

$$\delta_{LS} = \alpha_{LS} \times \delta_{CP} = 0.53 \times \delta_{CP} \quad (7-1)$$

$$\delta_{IO} = \alpha_{IO} \times \delta_{CP} = 0.19 \times \delta_{CP} \quad (7-2)$$



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

表 7-3 分析参数取值表

Table 7-3 The parameters of analysis

混凝土材料	钢筋材料	λ	h/mm	b/mm	$\rho_{sy}/\%$	$\rho_{sx}/\%$	φ_N
C30	HRB335	1.5	4000	300	0.6	0.2	0.1
C40		1.25	6000	500	1.2	0.5	0.3
C60		1	8000	700	2	1	0.6

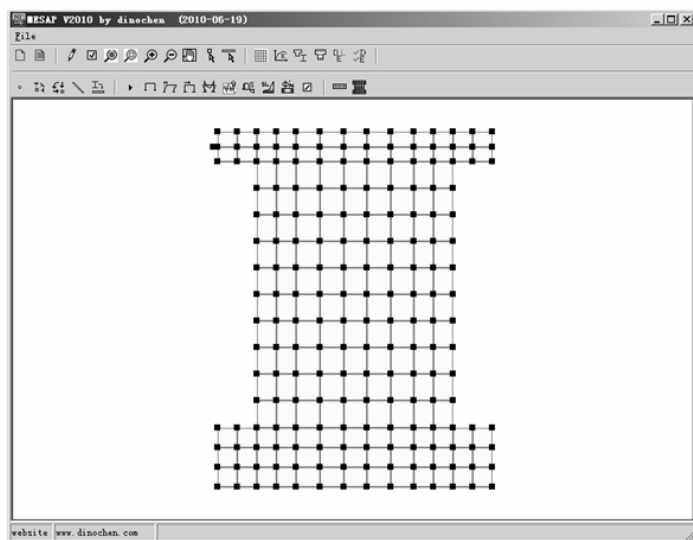


图 7-4 MCFT 单元显示界面图

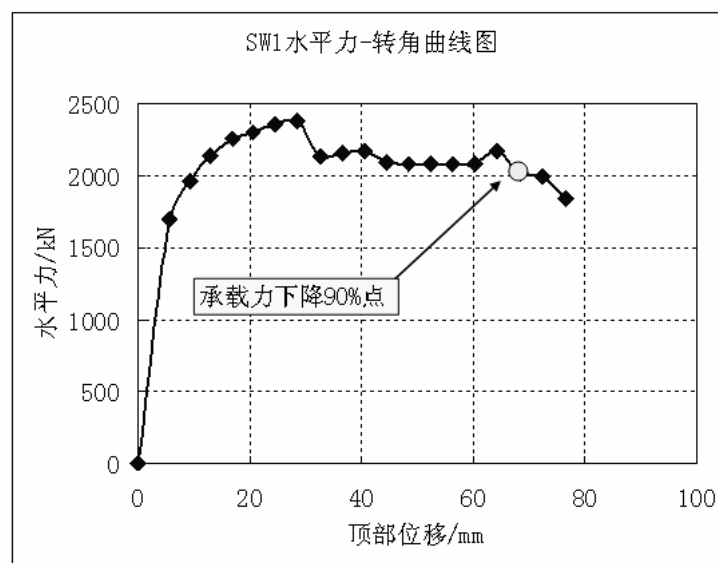


图 7-5 单调加载曲线示意图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

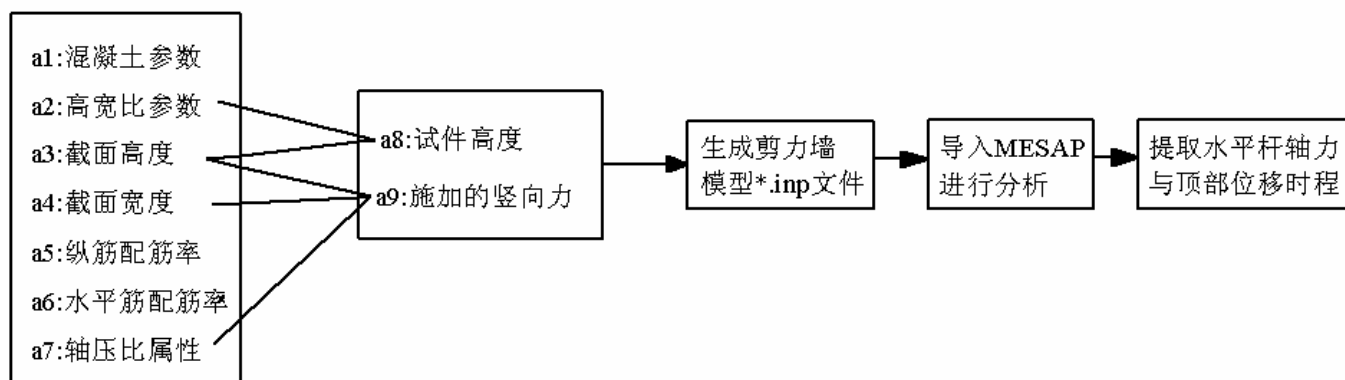


图 7-6 算例生成程序的流程图

Fig. 7-6 Flow chart of generate procedure

表 7-5 分析参数取值表

Table 7-5 The parameters of analysis

参数	a_1	—	a2	a3	a4	a5	a6	a7
名称	混凝土材料	钢筋材料	λ	h/mm	b/mm	$\rho_{sy}/\%$	$\rho_{sx}/\%$	φ_N
取值	C30	HRB335	1.5	4000	300	0.6	0.2	0.1
	C40		1.25	6000	500	1.2	0.5	0.3
	C60		1	8000	700	2	1	0.6



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

大震抗震变形性能指标值 θ_{CP} 与主控影响参数 a_1 、 a_2 、 a_4 基本上成正比关系，与 a_7 成反比关系，假定参数 β 等于参数 a_1 、 a_2 、 a_4 、 $1/a_7$ 的乘积，如式（7-3）所示。

$$\beta = \frac{a_1 a_2 a_4}{a_7} = \frac{f_{cu,k} b \lambda}{\varphi_N} \quad (7-3)$$

式中， $f_{cu,k}$ 单位为 MPa， b 单位为 mm。

当 $\beta < 100$ 时， $\theta_{CP} = 0.012$

当 $100 \leq \beta \leq 5000$ 时， $\theta_{CP} = 0.06\beta^{-0.35}$

当 $\beta > 5000$ 时， $\theta_{CP} = 0.003$

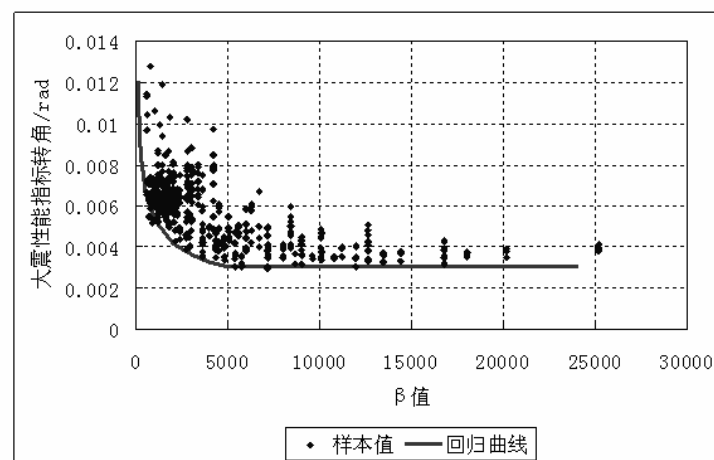


图 7-9 β 与 θ_{CP} / β 的关系



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

表 7-6 受剪控制的剪力墙变形性能指标计算表（转角值 θ /rad）

Table 7-6 Deformation performance limit state
of shear-wall with shear control (rotation /rad)

创新点

参数 β_{CP}	小震性能 指标 θ_{CP}	中震性能 指标 θ_{IO}	大震性能 指标 θ_{CP}
$\beta_{CP} = \frac{f_{cu,k} b \lambda}{\varphi_N}$	$\theta_{IO} = 0.19 \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.06 \beta^{-0.35}$
100	0.0023	0.0063	0.0120
200	0.0018	0.0050	0.0094
300	0.0015	0.0043	0.0082
400	0.0014	0.0039	0.0074
500	0.0013	0.0036	0.0068
1000	0.0010	0.0028	0.0053
2000	0.0008	0.0022	0.0042
3000	0.0007	0.0019	0.0036
4000	0.0006	0.0017	0.0033
5000	0.0006	0.0016	0.0030
备注	λ 为高宽比, φ_N 为轴压比, $\varphi_N \leq 0.6$, $f_{cu,k}$ /MPa 为混凝土材料强度等级;		

表 7-7 FEMA356 规定受剪控制的剪力墙变形性能指标

Table 7-6 Deformation performance limit state
of shear-walls with shear control in FEMA356

构件信息	位移角/rad				
	性能水准				
	构件类别				
	IO	主要构件		次要构件	
		LS	CP	LS	CP
所有受剪控制的剪力墙构件	0.0040	0.006	0.008	0.008	0.015



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第七章 受剪控制的剪力墙构件变形性能指标研究

- (2) FEMA 表中允许受剪控制的剪力墙进行变形指标控制的前提是轴压比不大于 0.15，轴压比大于 0.15 则采用承载力控制指标。性能指标计算没有变量。主要构件的 CP 性能指标为 0.008。本文的计算表中以轴压比、截面高度、混凝土材料作为变量。轴压比的范围为 0~0.6。计算表中大震变形性能指标的范围为 0.003~0.012，数量级与 FEMA 规范接近，由于考虑更大的轴压比，大震变形性能指标最小值为 0.003。表中数据表明，受剪控制的剪力墙构件由于延性储备不足，在大轴压比的情况下需要有更小的变形性能指标。
- (3) FEMA 表中考虑次要构件的性能指标，本文没有给出次要构件的性能指标。计算表中性能指标均用于作为竖向支撑的剪力墙构件，均作为主要构件对待。
- (4) FEMA 表中 IO 性能指标范围为 0.004，本文计算表小震性能指标 0.0006~0.0023，本文计算方法比 FEMA 表偏小。FEMA 表中 LS 指标是 CP 指标的 75%，本文计算表中中震变形指标约为大震变形指标的 50%。差异的原因主要是 FEMA356 与本文对指标的规定方法不同，本文在受剪控制构件的大震变形指标与极限变形指标匹配，而小震、中震指标则按地震作用比例进行调整，与构件的屈服变形状态无关。



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 连梁构件变形性能指标研究

表 8-8 受剪控制的连梁构件变形性能指标计算表（弦转角值 θ /rad）

Table 8-8 Deformation performance limit state

of coupling beam with shear control (chord rotation θ /rad)

创新点

参数 β_{CP}	小震性能指标 θ_{CP}	中震性能指标 θ_{IO}	大震性能指标 θ_{CP}
$\beta_{CP} = f_{cu,k} \rho_h / \rho_s$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{IO} = 0.53 \times \theta_{CP}$	当 $\lambda < 2.0$ 时, $\theta_{CP} = 0.005$ 当 $2.0 < \lambda \leq 3.0$, $\theta_{CP} = 0.07 \times \beta_{CP}^{-1.3} + 0.004 \geq 0.005$

表 8-10 受剪控制的连梁弯曲变形性能指标计算表（弦转角值 θ /rad）

Table 8-10 Deformation performance limit state

of coupling beam with shear control in FEMA (rotation θ /rad)

构件信息		允许弦转角/rad				
		性能水准				
		构件类别				
		IO	主要构件		次要构件	
	公式		LS	CP	LS	CP
配箍足够	≤ 3	0.006	0.015	0.020	0.020	0.030
	≥ 6	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
配箍不足	≤ 3	0.006	0.008	0.010	0.010	0.020
	≥ 6	0.004	0.006	0.007	0.007	0.012

$$\frac{V}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$$



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 连梁构件变形性能指标研究

表 8-9 受弯控制的连梁弯曲变形性能指标计算表（转角值 θ /rad）

Table 8-9 Deformation performance limit state

of coupling beam with flexure control (rotation θ /rad)

参数 β_{IO}	小震性能 指标 θ_{IO}	大震性能 指标 θ_{CP}	大震性能 指标 θ_{CP}
λ	$\theta_{IO} = 0.0006 \times (\lambda - 3) + 0.002$ $\theta_{IO} \leq 0.0035$	$\theta_{LS} = \theta_{IO} + \alpha_{LS}(\theta_{CP} - \theta_{IO})$	$\theta_{CP} = 0.004 \times (\lambda - 3) + 0.01$ $\theta_{CP} \leq 0.02$

表 8-11 受弯控制的连梁弯曲变形性能指标计算表（转角值 θ /rad）

Table 8-11 Deformation performance limit state

of coupling beam with flexure control in FEMA (rotation θ /rad)

构件信息		允许塑性铰转角/rad				
		性能水准				
		构件类别				
		IO	主要构件		次要构件	
配箍足够	$\frac{V}{t_w I_w \sqrt{f'_c}}$		LS	CP	LS	CP
	≤ 3	0.010	0.020	0.025	0.025	0.050
	≥ 6	0.005	0.010	0.020	0.020	0.040
配箍不足	≤ 3	0.006	0.012	0.020	0.020	0.035
	≥ 6	0.005	0.008	0.010	0.010	0.025



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 连梁构件变形性能指标研究

- (2) FEMA 表中性能指标计算变量为剪应力水平，本文计算方法的主要计算变量是跨高比。从试验研究及数值分析结果来看，跨高比越小，连梁的脆性破坏特征越明显，延性越差，变形性能指标越小。FEMA 表以剪应力水平为控制变量，因为适量的配筋量的情况下，梁的抗弯矩值恒定，跨高比越小，剪力值越大，剪应力水平也就超高。本文以跨高比为主要控制变量，可以将性能指标进一步的细分。
- (3) FEMA 表中主要构件的 CP 性能指标范围为 0.007~0.020。本文计算表中大震变形性能指标的范围为 0.0027~0.0067。两者存在差异的原因是由于本文性能指标计算中考虑跨高比很小的情况，其延性性能很差。而 FEMA 表中受弯控制的连梁的 CP 变形指标为 0.010~0.025，与受剪控制的变形性能指标接近，该点值得商榷。从试验现象与数值分析可知，合理的受剪控制的连梁大震变形性能指标应与受弯控制的连梁的变形指标有一定的差距。
- (4) 由表 8-9 中与表 8-11 对比可知，FEMA 表中受弯控制的主要连梁构件的 CP 性能指标范围为 0.010~0.020。本文计算表中大震变形性能指标的范围为 0.010~0.020，两者基本接近。FEMA 表中性能指标计算变量为剪应力水平，本文计算方法的主要计算变量是跨高比。

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

表 9-2 各种设计原则的性能水准表

Table 9-2 Performance levels according to different principles of design

建筑重要性	设计原则	小震	中震	大震
重要建筑	大震弹性	弹性模型； 承载力验算	弹性模型； 承载力验算	弹性模型； 承载力验算
	大震不屈服	弹性模型； 承载力验算	弹性模型； 承载力验算	弹性模型； 不屈服验算
特别重要建筑	中震弹性	弹性模型； 承载力验算	弹性模型； 承载力验算	弹塑性模型； 变形验算
	中震不屈服	弹性模型； 承载力验算	弹性模型； 不屈服验算	弹塑性模型； 变形验算
一般建筑	小震弹性	弹性模型； 承载力验算	弹塑性模型； 变形验算	弹塑性模型； 变形验算

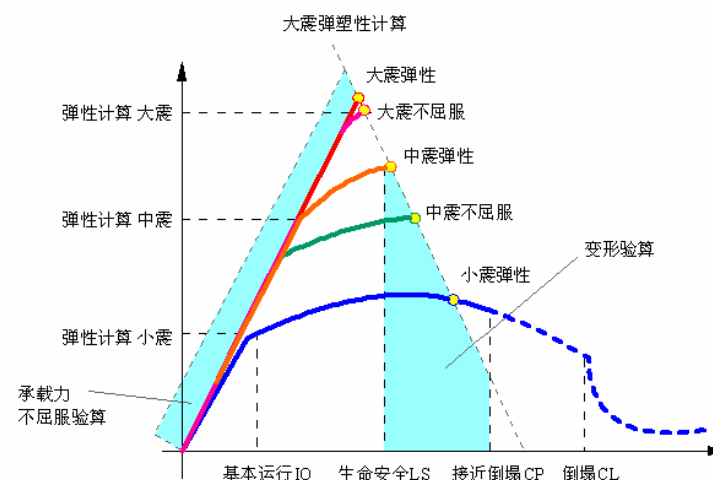


图 9-1 不同设计原则的整体性能水准示意图

Fig. 9-1 Performance levels according to different principles of design

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

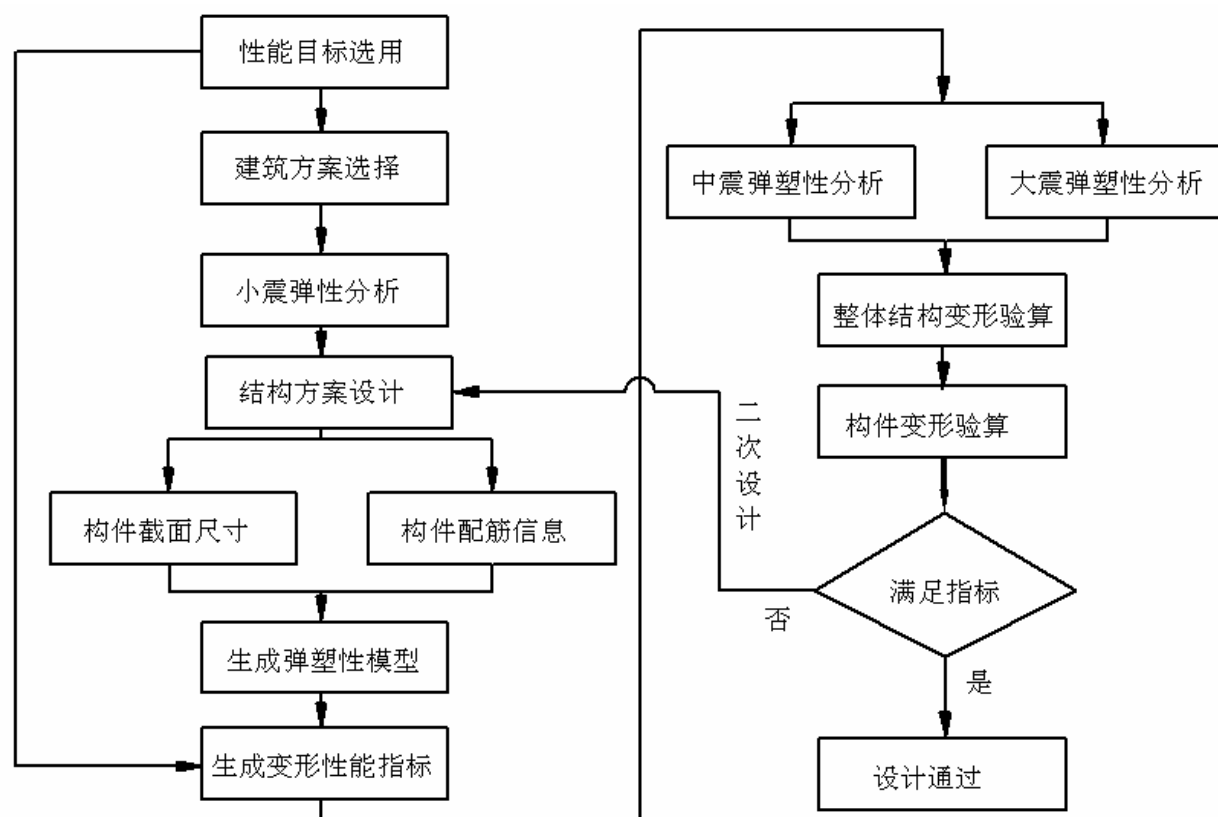


图 9-2 三水准三阶段基于性能的设计方法示意图

Fig. 9-2 Performance-based design of three stage under three levels



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

表 9-3 剪力墙构件变形性能指标计算表（转角值 θ/rad ）

Table 9-3 Deformation performance limit state of shear-wall element (rotation θ/rad)

剪力墙类型	小震性能指标 θ_{IO}	中震性能指标 θ_{LS}	大震性能指标 θ_{CP}
受弯控制 $\lambda \geq 2.0$	$\theta_{IO} = 0.00175\beta_{IO}^{0.28}$ $\beta_{IO} = \frac{\rho_s f_y}{\varphi_N f_{ck}}$ $0.1 \leq \beta_{IO} \leq 3$	$\theta_{LS} = \theta_{IO} + 0.5(\theta_{LS} - \theta_{IO})$	$\theta_{CP} = 0.0063\beta_{CP}^{-0.187}$ $\beta_{CP} = \rho_s \varphi_N f_{ck}$ $0.01 \leq \beta_{IO} \leq 0.4$
受剪控制 $\lambda < 2.0$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \times \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.06\beta^{0.35}$ $\beta_{CP} = \frac{f_{cu,k} b \lambda}{\varphi_N}$ $0.1 \leq \beta_{IO} \leq 3$

表 9-4 连梁构件变形性能指标计算表

Table 9-3 Deformation performance limit state of coupling beam element (rotation θ/rad)

连梁构件变形性能指标（弦转角值 θ/rad ）			
连梁类型	小震性能指标 θ_{IO}	中震性能指标 θ_{LS}	大震性能指标 θ_{CP}
受弯控制 $3 \leq \lambda \leq 5$	$\theta_{IO} = 0.0006 \times (\lambda - 3) + 0.002$ $\theta_{IO} \leq 0.0035$	$\theta_{LS} = \theta_{IO} + 0.5(\theta_{CP} - \theta_{IO})$	$\theta_{CP} = 0.004 \times (\lambda - 3) + 0.01$ $\theta_{CP} \leq 0.02$
受剪控制 $2 \leq \lambda < 3$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \times \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.07 \times \beta_{CP}^{-1.3} + 0.004$ $\beta_{CP} = f_{cu,k} \rho_h / \rho_s$ $\theta_{CP} \geq 0.005$
受剪控制 $\lambda < 2$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \times \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.005$



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

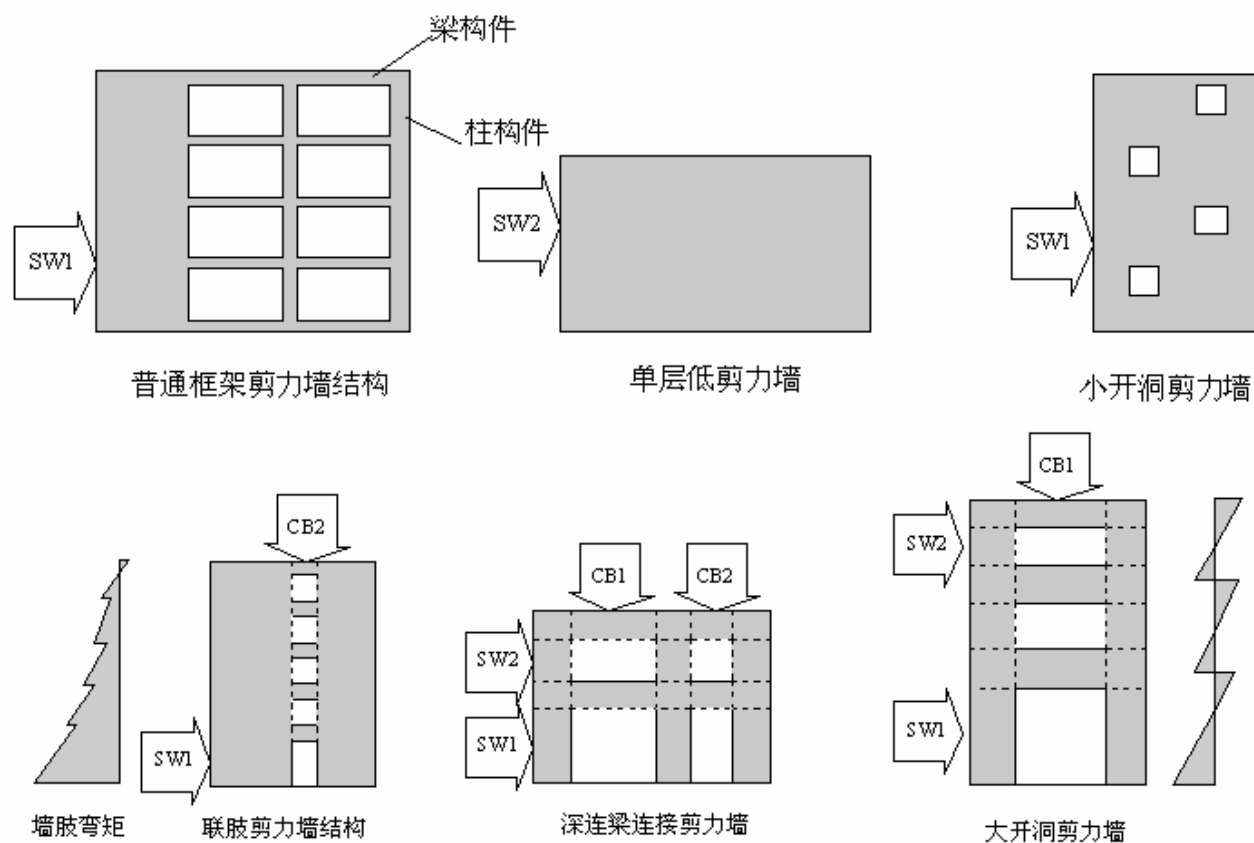


图 9-3 剪力墙、连梁构件分类示意图

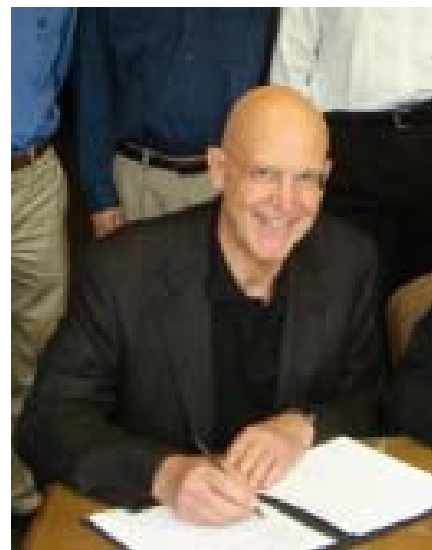


剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

PERFORM-3D(Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structure)三维结构非线性分析与性能评估软件，它的前身为美国加州大学Berkeley分校的Prof Granham H Powell开发的Drain-2DX和Drain-3DX，是一个致力于研究抗震设计的非线性软件工具。通过使用以变形为基础或者以强度为基础的极限状态来对复杂结构进行非线性分析，其中包括错综布置的剪力墙结构。

PERFORM-3D为用户提供了一个复杂地震工程工具来进行静力弹塑性Pushover分析和动力弹塑性时程分析。



G.H. Powell

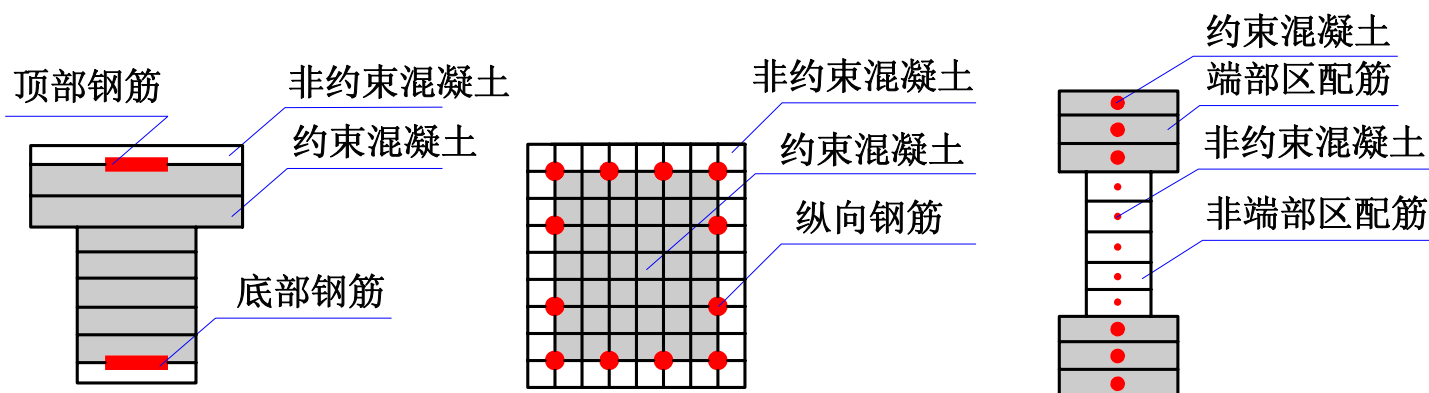


剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

■梁柱单元模型

PERFORM-3D提供多种梁柱单元模型，包括塑性铰模型及纤维模型。本文工程实例梁柱均采用纤维模型。纤维模型梁柱单元有以下特点：基于平截面假定，将梁柱的内力-变形关系转化成混凝土与钢筋的应力-应变关系；铁木辛柯梁单元，可考虑剪切变形；自由的纤维划分输入方式，可以输入约束混凝土及非约束混凝土纤维，可以输入复杂组合截面，梁柱纤维截面如图所示；





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

■混凝土材料本构

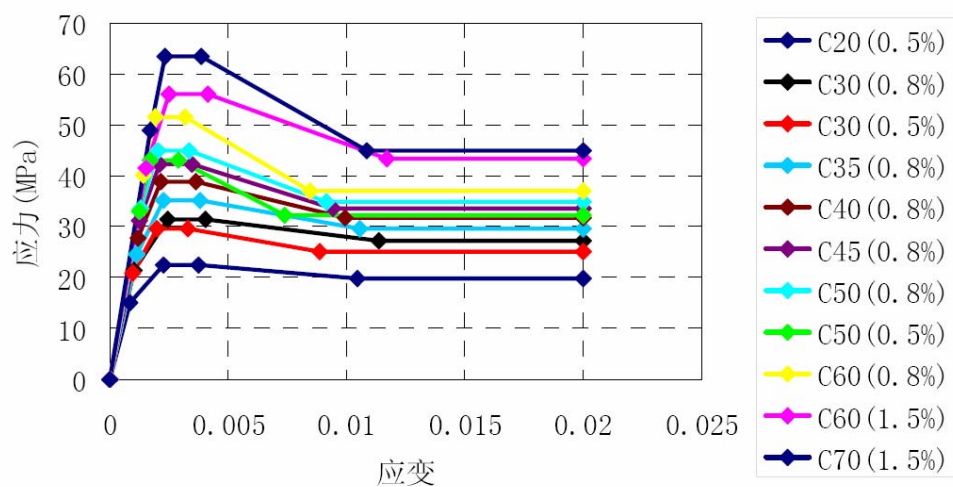


图 6 不同体积配箍率下的约束混凝土应力-应变关系



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

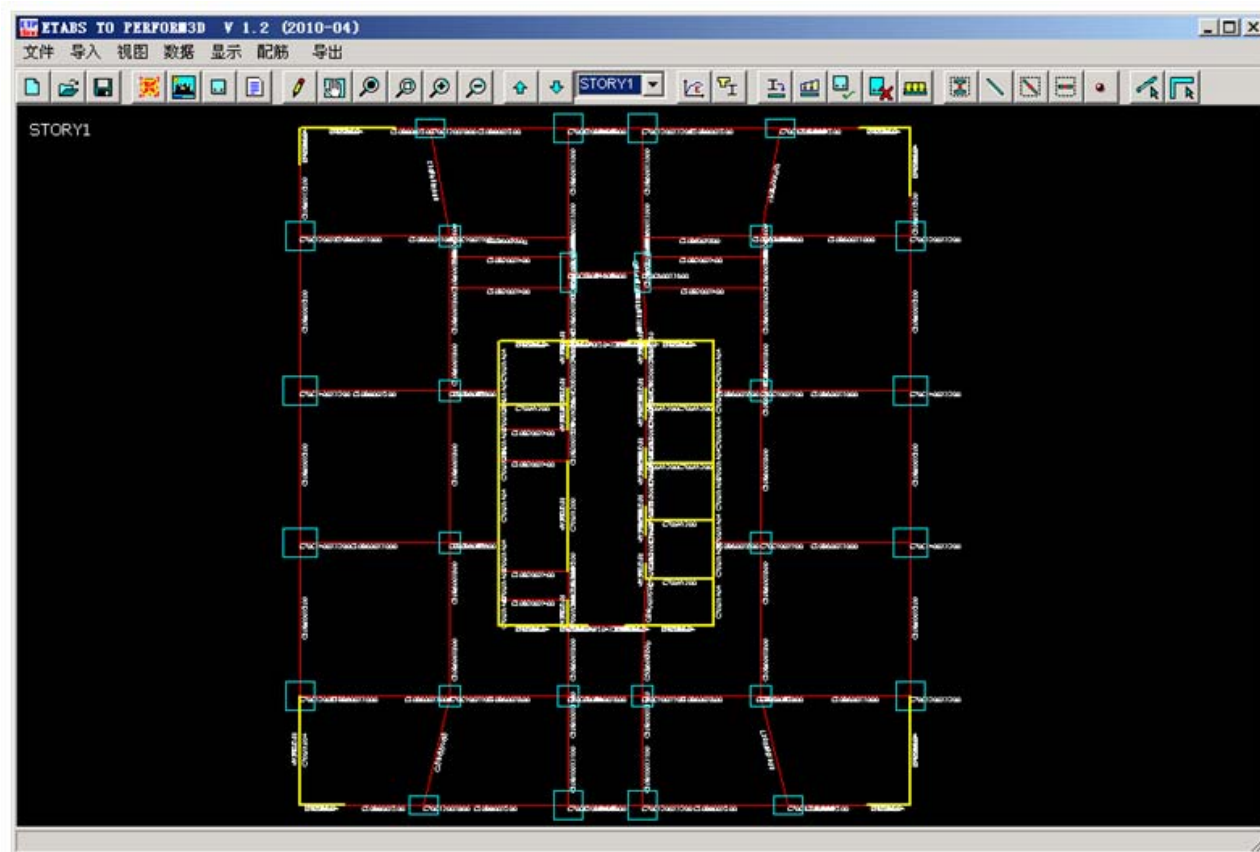


图 9-13 ETP 程序主界面

创新点

剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第八章 基于性能的剪力墙结构抗震设计方法的研究

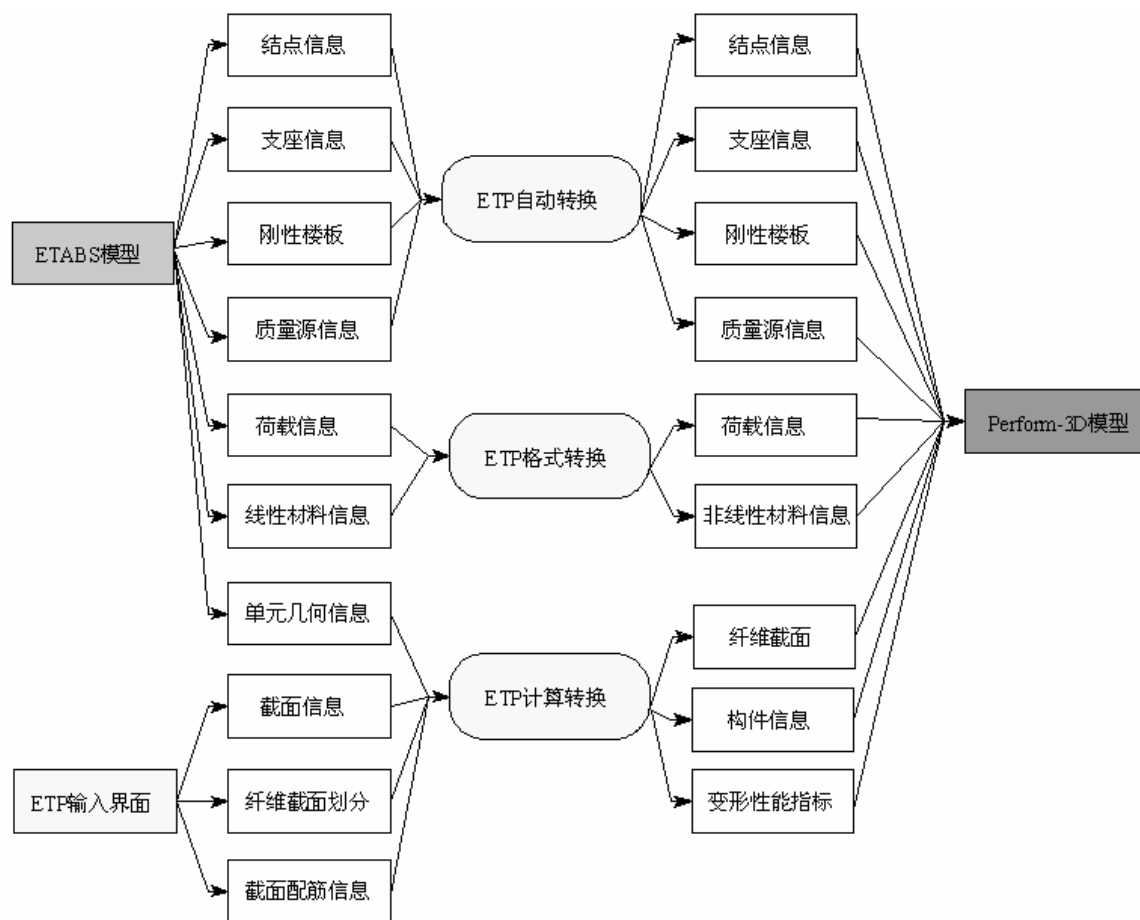


图 9-16 ETP 程序工作流程图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

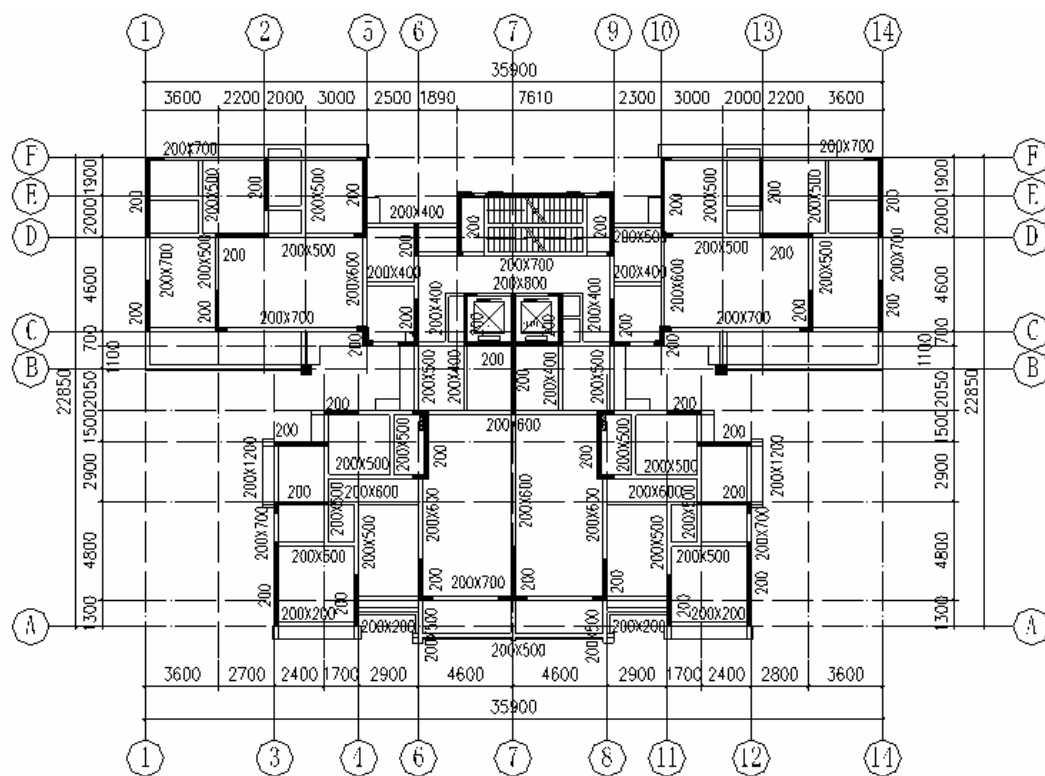


图 10-1 结构布置平面图

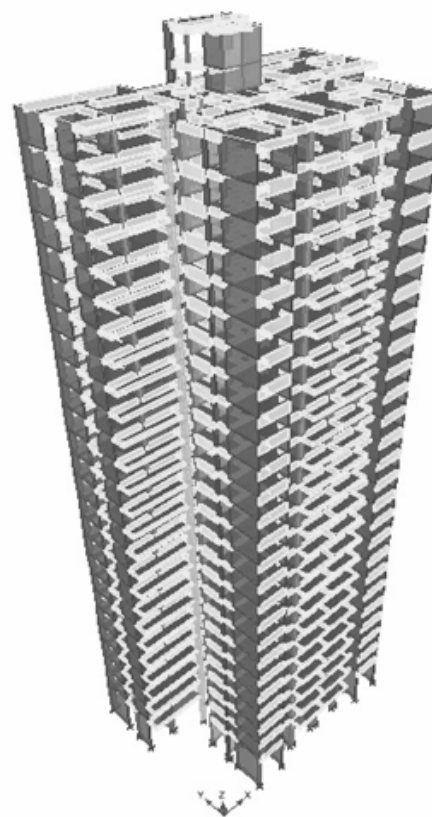


图 10-2 模型三维图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

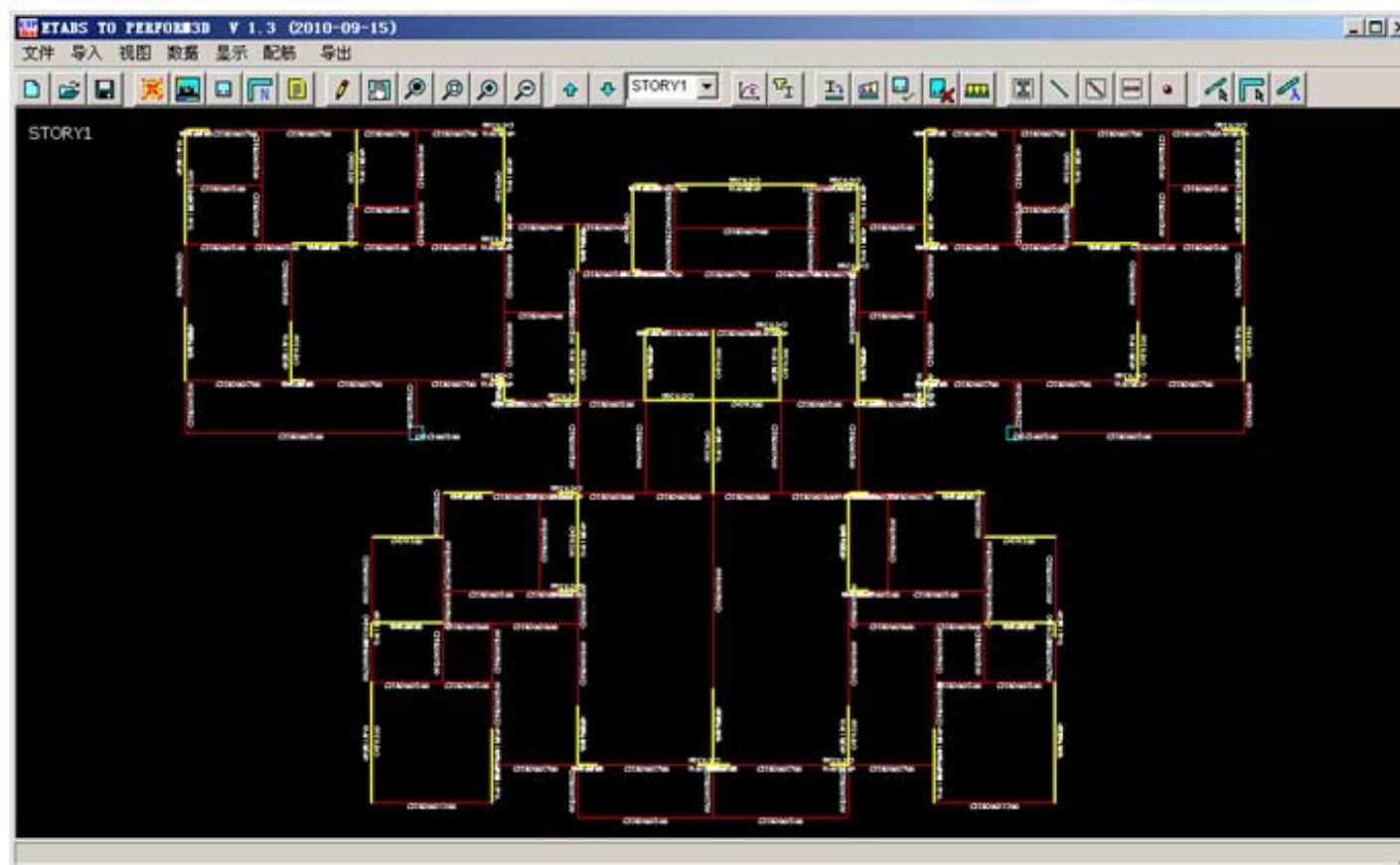


图 10-12 ETP 主界面图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

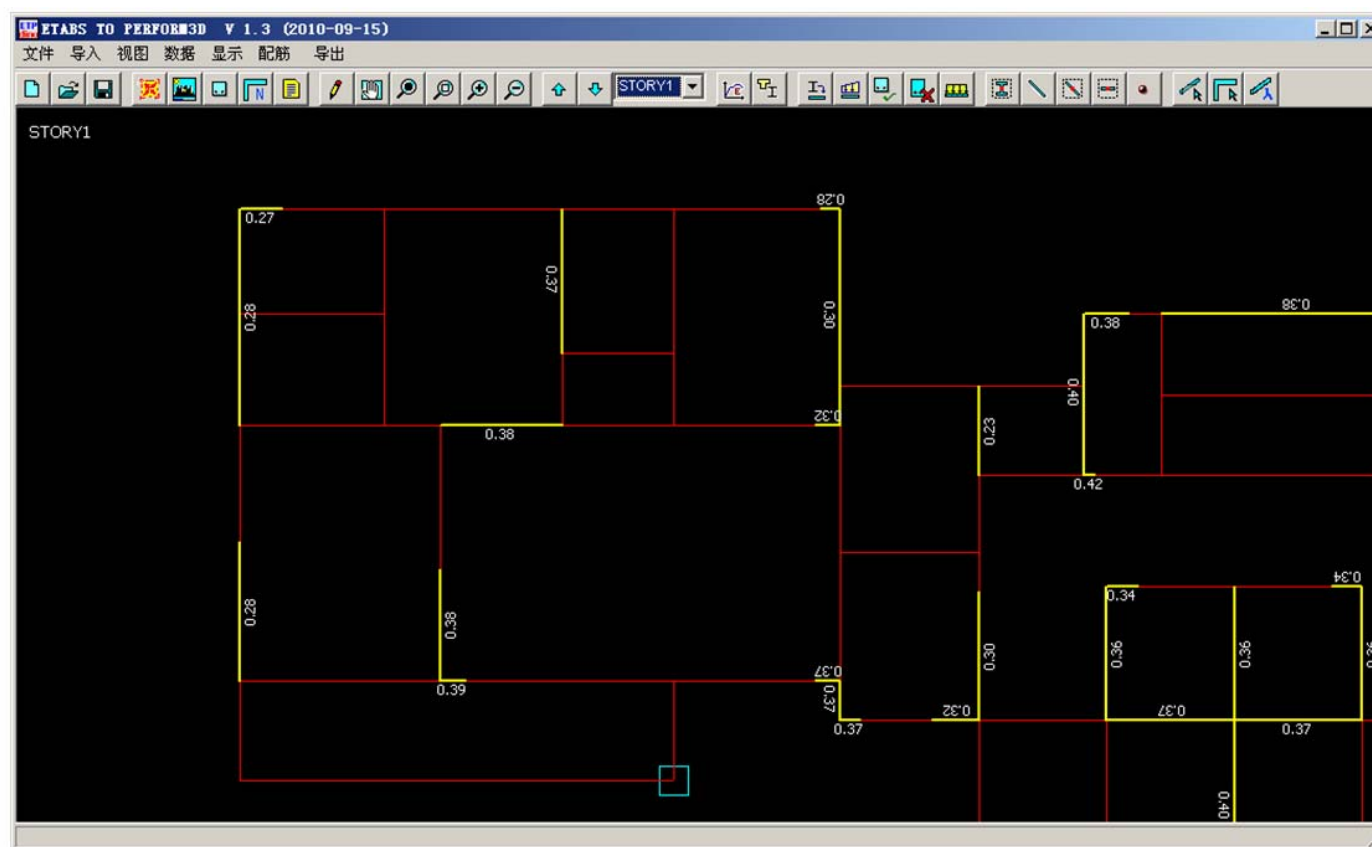


图 10-13 ETP 的轴压比显示图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

剪力墙由于不同的轴压比，不同的配筋率所计算得到的大震变形性能指标不同，归并后，ETP 程序按指标值大小划分不同的剪力墙变形测量单元，如图 10-15 所示。

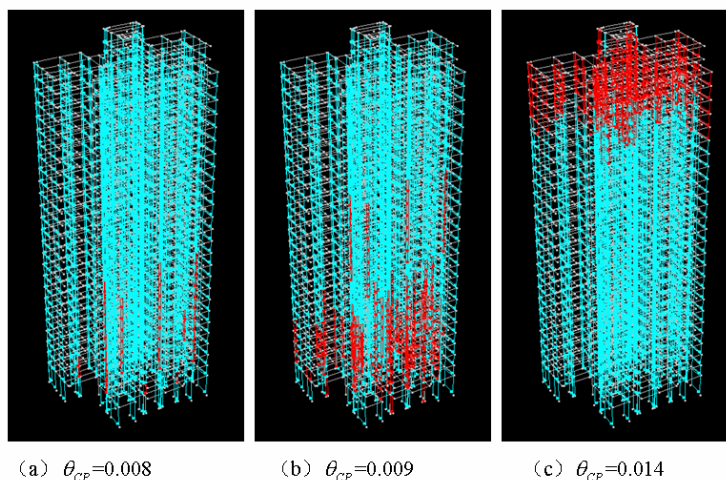


图 10-15 剪力墙大震性能指标分布图

表 10-4 构件变形限值表

Table 10-4 Table of deformation limit of components

层次	类别	状态	指标	限值	备注
构件	剪力墙	CP	大震指标	0.008~0.014	采用本文计算方法
	连梁	CP	大震指标	0.005~0.02	采用本文计算方法
	次梁	CL	允许破坏	—	—
结构	层间位移角	CP	大震指标	0.01	采用抗震规范限值



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

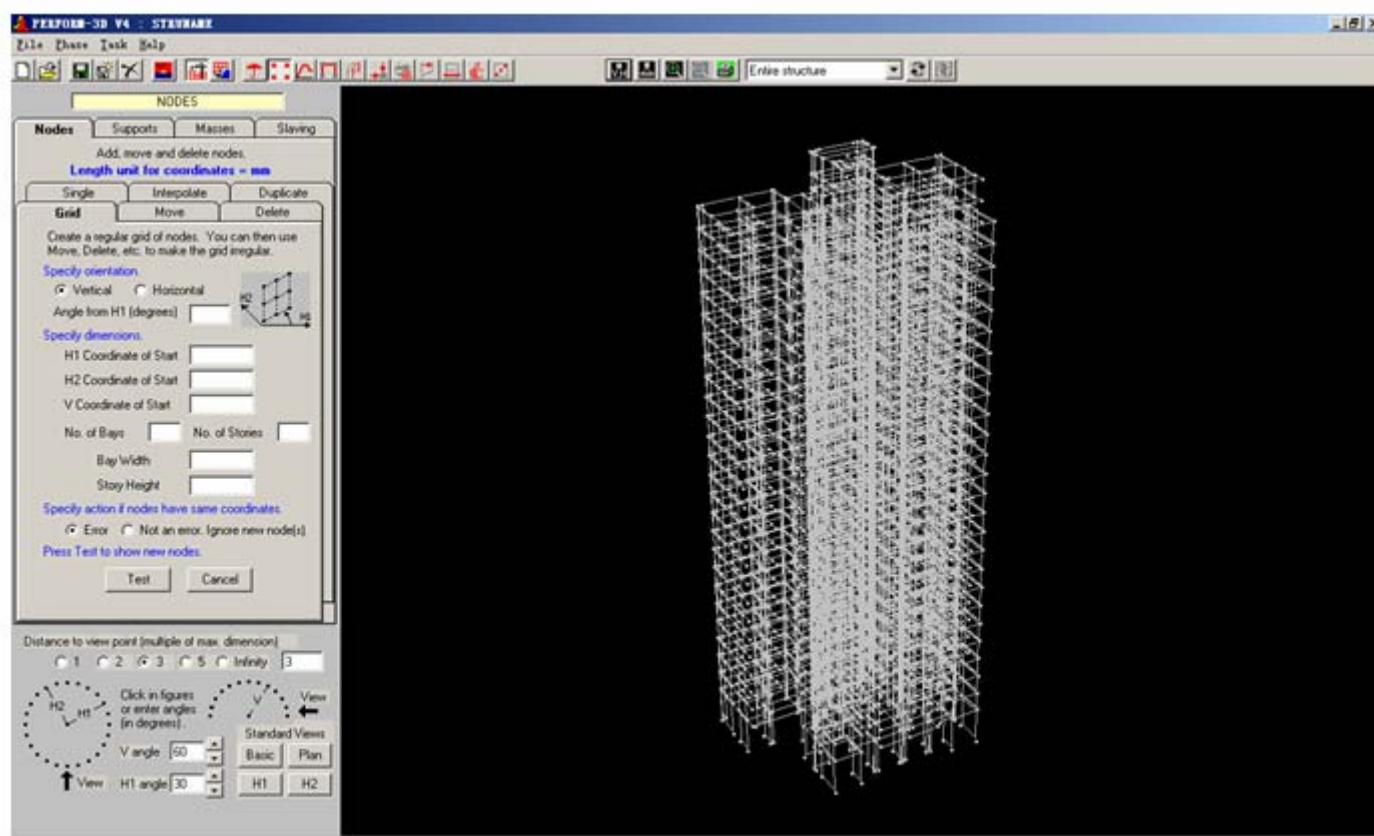
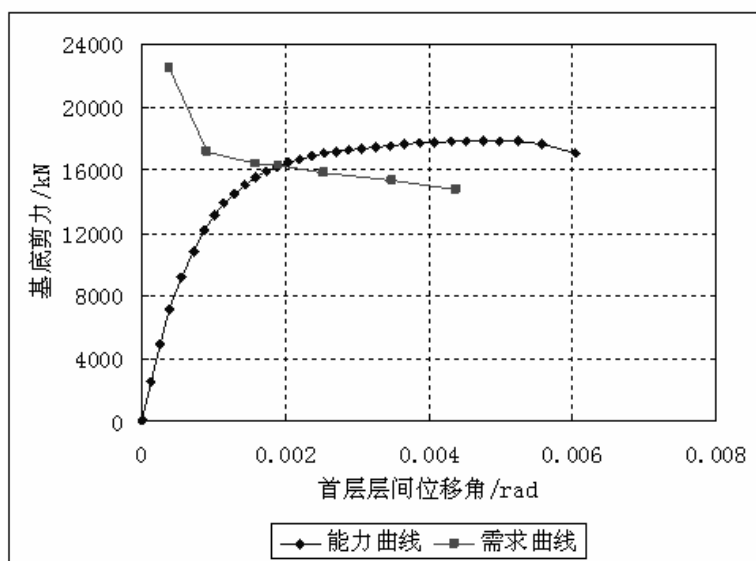


图 10-14 Perform-3D 模型图

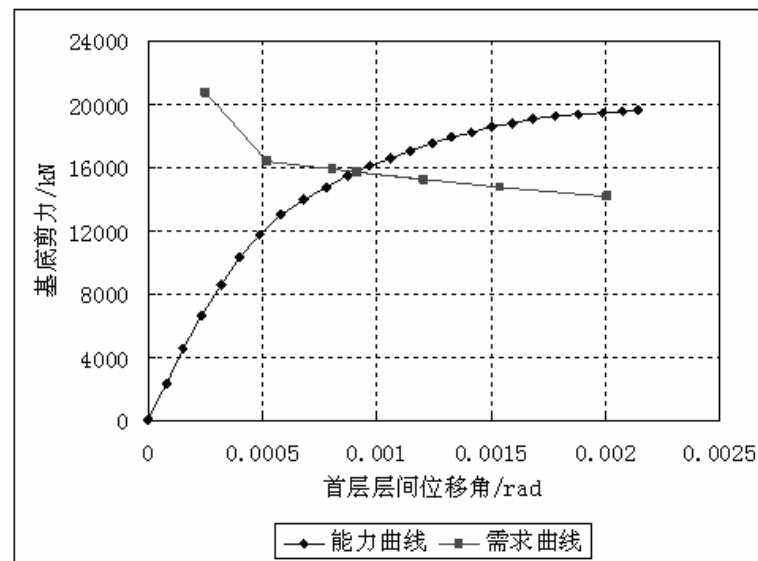


剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用



(a) X 方向



(b) Y 方向

图 10-16 Push-over 曲线



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

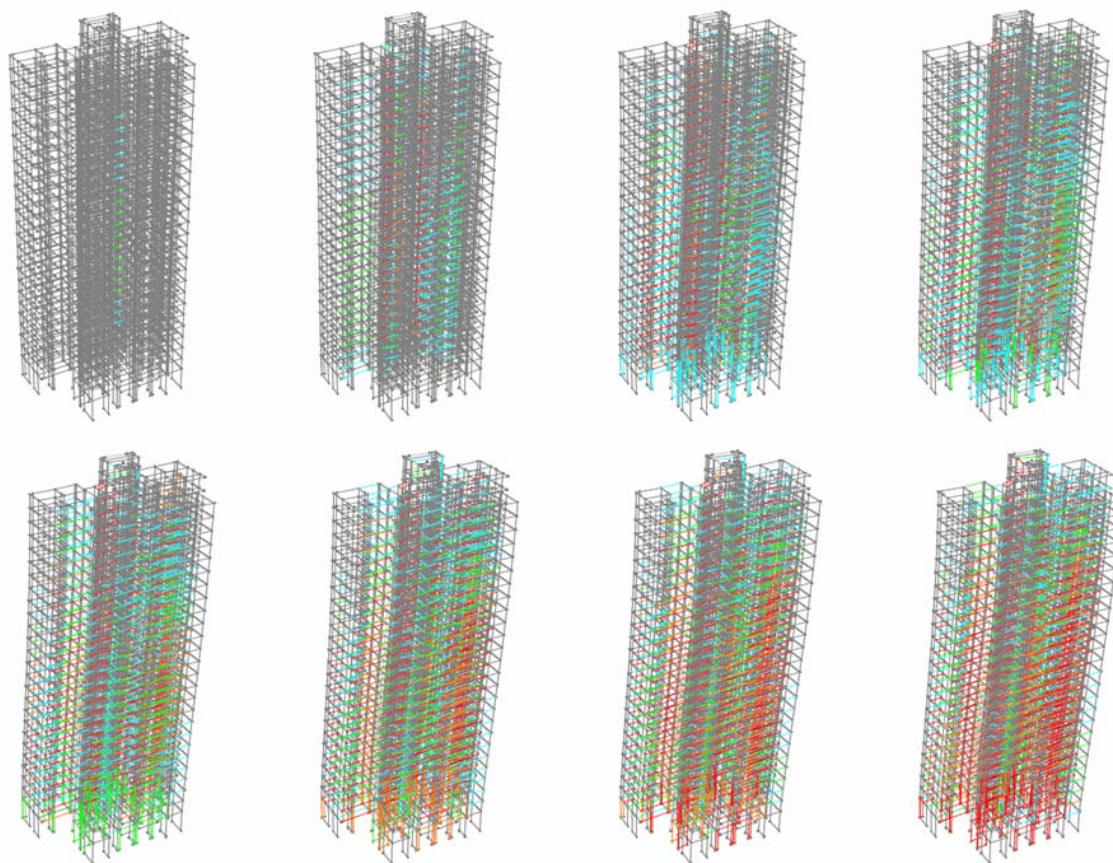


图 10-19 X 方向 Push-over 构件变形全过程图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

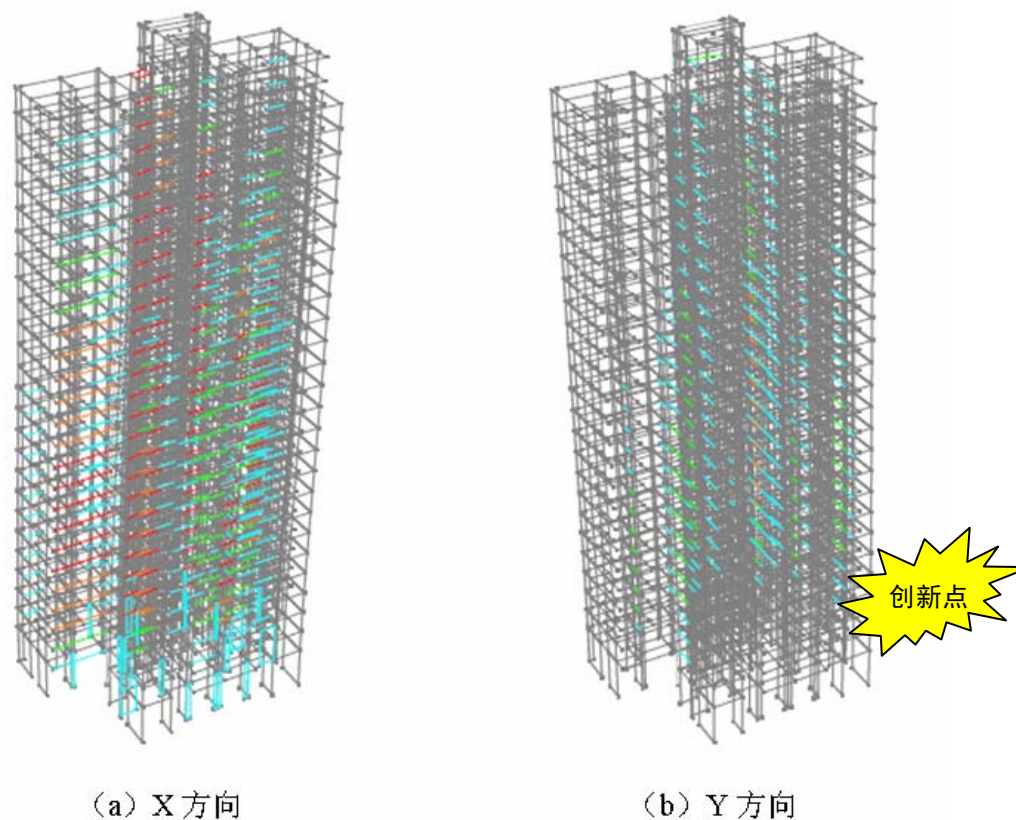


图 10-21 性能点处状态的构件变形图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

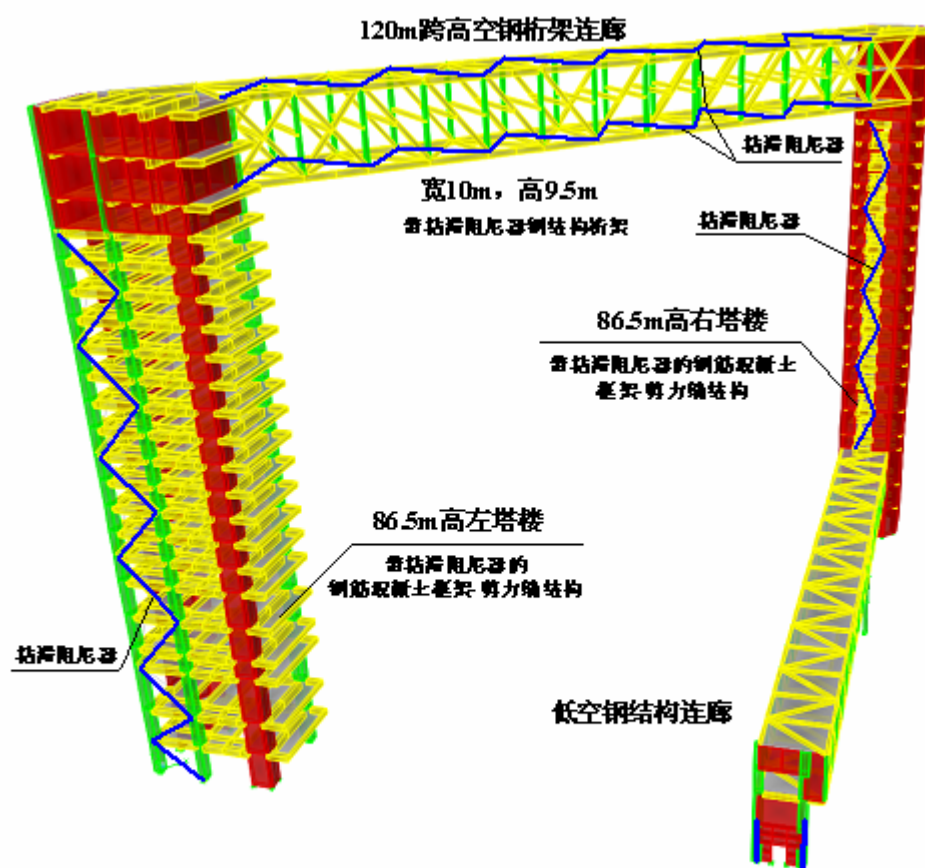
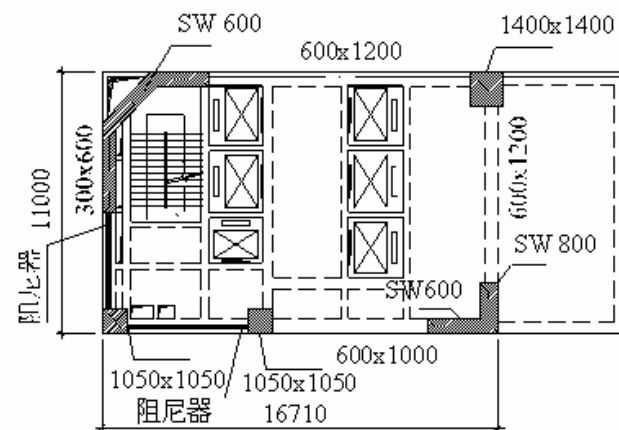
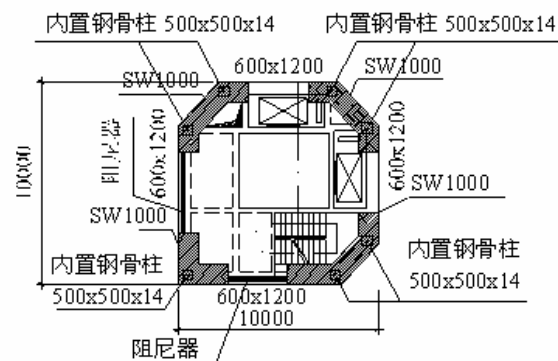


图 10-27 门架整体示意图



(a) 左塔楼



(b) 右塔楼



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

梁柱构件依据美国规程FEMA356中对于基于性能的抗震设计方法关于构件变形性能指标限值的规定，剪力墙构件采用本文的计算方法得到的性能指标。主要构件变形性能指标限值如表2所示。

表 10-5 主要构件在各阶段变形性能限值

Table 10-5 Deformation Performance Limit State of Main Components in Each Level

构件类型		大震性能指标/rad	备注
剪力墙	底部加强区（受弯）	0.0070~0.014	本文计算方法
框架柱	底部加强区（受弯）	0.025	FEMA356
框架梁	非底部加强区（受弯）	0.02	FEMA356



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

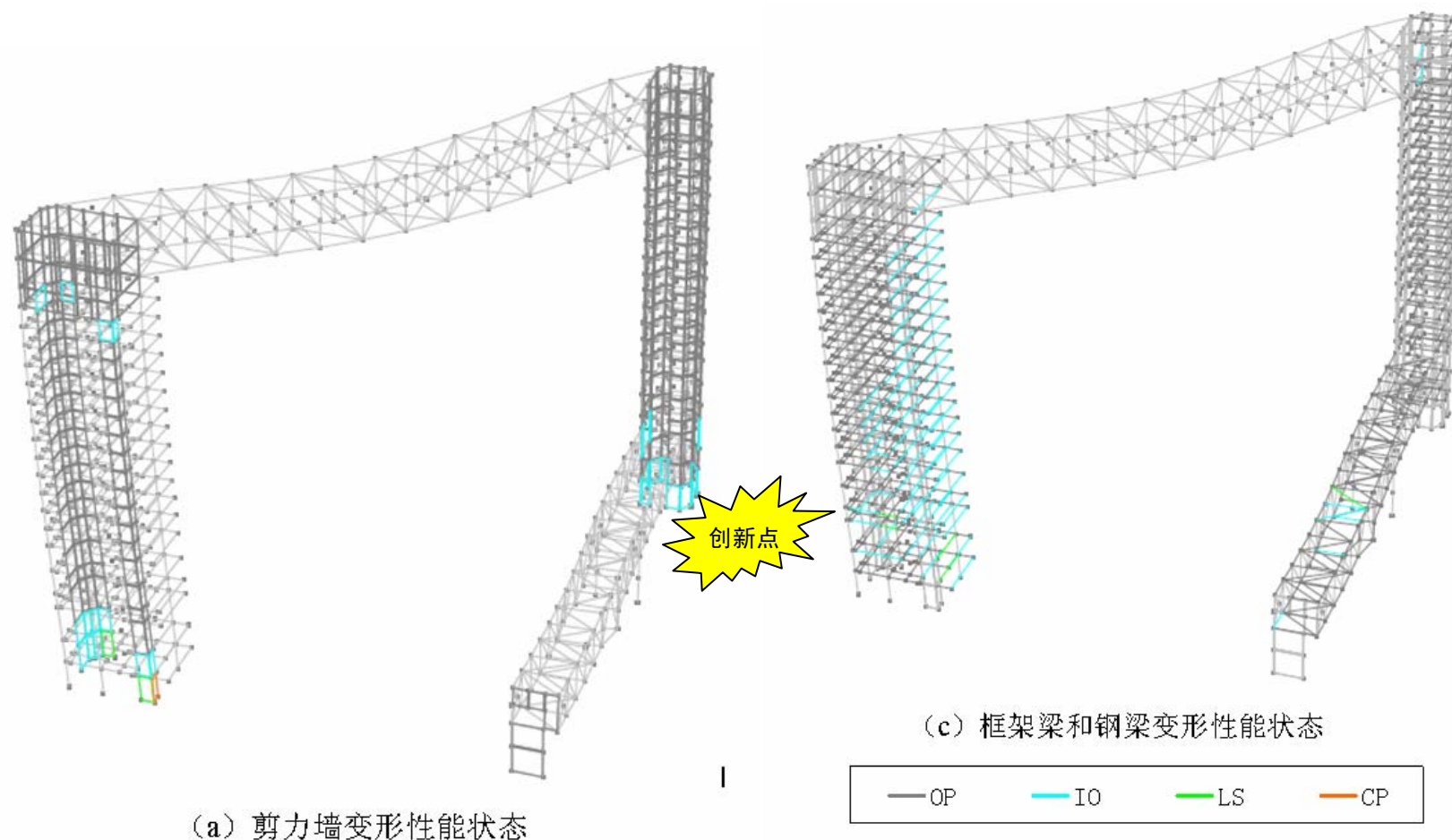
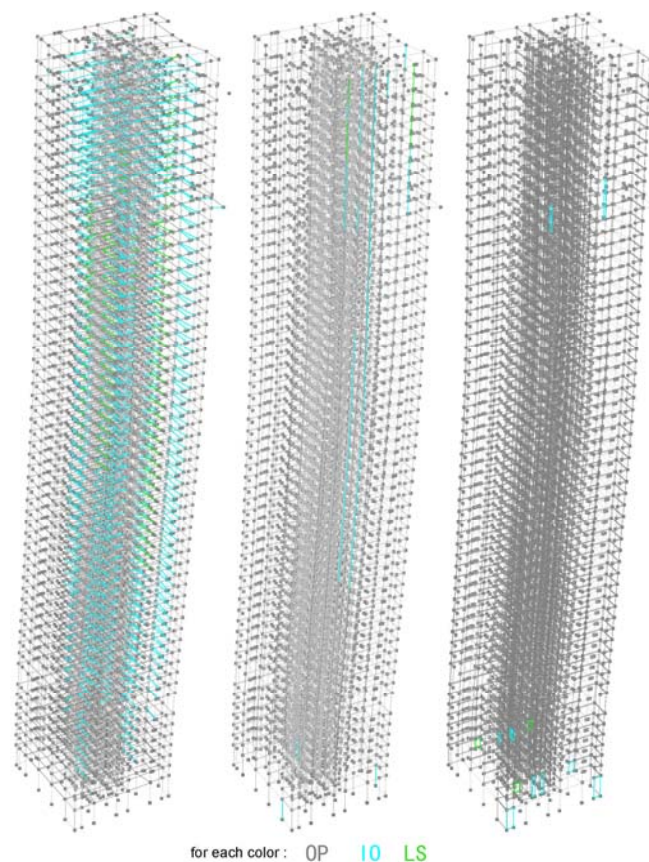


图 10-32 GM3Y 工况下各构件变形性能状态



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

第十章 剪力墙结构性能设计方法的算例及工程应用

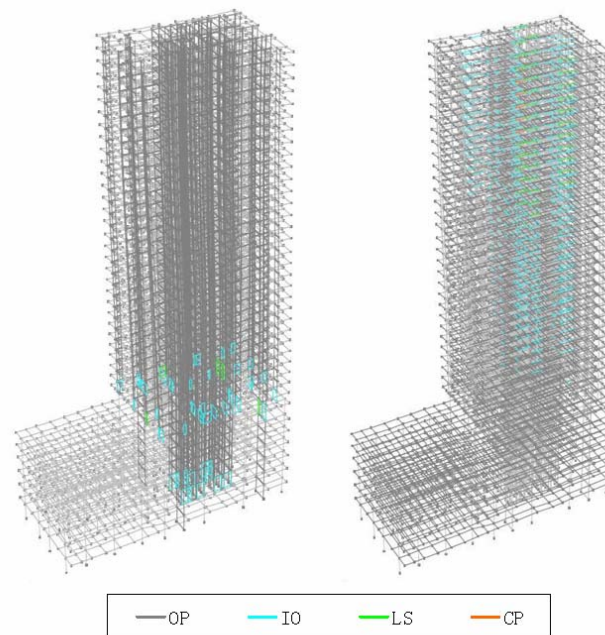


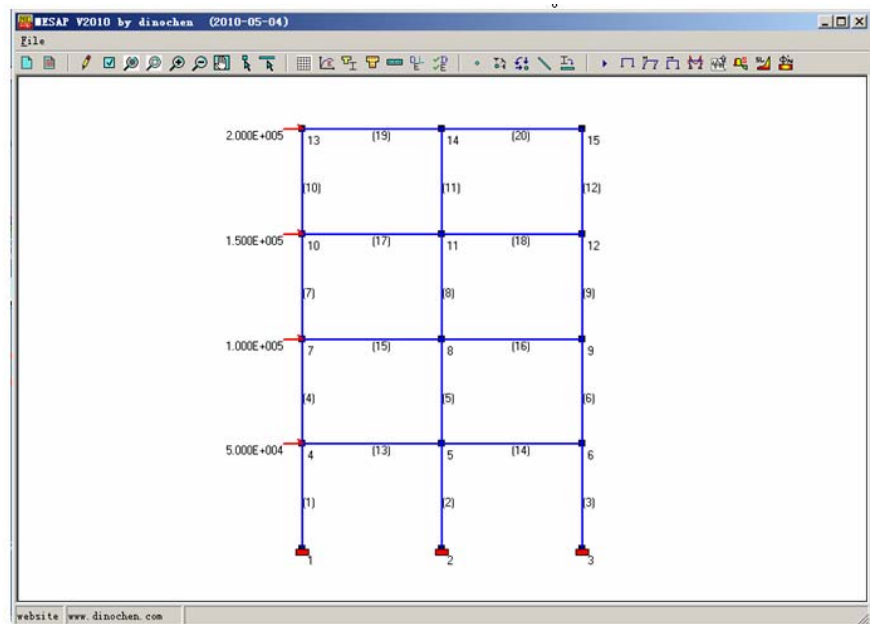
图 10 GM4 地震波工况下构件变形性能图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

结论与展望

- 基于面向对象的编程技术，自主研发了基于宏观单元理论的结构弹塑性分析平台 MESAP，开发多种宏观单元模型，多竖向弹簧单元可用于受弯控制的剪力墙构件的弹塑性分析。修正斜压场单元可用于受剪控制的剪力墙构件及连梁构件的弹塑性分析，基于柔度法的纤维单元用于受弯控制的连梁的弹塑性分析；MESAP平台的多种非线性单元为剪力墙构件及连梁构件的变形性能指标的计算奠定了工具的基础。





剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

结论与展望

- 本文采用国内外剪力墙试验及连梁试验校正本文编程弹塑性分析平台及相关的宏观单元。本文找出剪力墙构件的宏观变形与钢筋应变的关系，提出新的评估延性构件的极限变形的计算方法。该方法应用于计算受弯控制的剪力墙构件及连梁构件的极限变形指标。本文通过MESAP平台对大量的剪力墙及连梁构件进行弹塑性分析，回归得到剪力墙及连梁构件的变形性能指标。

表 9-3 剪力墙构件变形性能指标计算表（转角值 θ/rad ）

Table 9-3 Deformation performance limit state of shear-wall element (rotation θ/rad)

剪力墙类型	小震性能指标 θ_{IO}	中震性能指标 θ_{LS}	大震性能指标 θ_{CP}
受弯控制 $\lambda \geq 2.0$	$\theta_{IO} = 0.00175\beta_{IO}^{0.28}$ $\beta_{IO} = \frac{\rho_s f_y}{\varphi_N f_{ck}}$ $0.1 \leq \beta_{IO} \leq 3$	$\theta_{LS} = \theta_{IO} + 0.5(\theta_{CP} - \theta_{IO})$	$\theta_{CP} = 0.0063\beta_{CP}^{-0.187}$ $\beta_{CP} = \rho_s \varphi_N f_{ck}$ $0.01 \leq \beta_{IO} \leq 0.4$
受剪控制 $\lambda < 2.0$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \times \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.06\beta^{0.35}$ $\beta_{CP} = \frac{f_{cu,k} b \lambda}{\varphi_N}$ $0.1 \leq \beta_{IO} \leq 3$

表 9-4 连梁构件变形性能指标计算表

表 9-4 连梁构件变形性能指标计算表

Table 9-3 Deformation performance limit state of coupling beam element (rotation θ/rad)

连梁构件变形性能指标（弦转角值 θ/rad ）			
连梁类型	小震性能指标 θ_{IO}	中震性能指标 θ_{LS}	大震性能指标 θ_{CP}
受弯控制 $3 \leq \lambda \leq 5$	$\theta_{IO} = 0.0006 \times (\lambda - 3) + 0.002$ $\theta_{IO} \leq 0.0035$	$\theta_{LS} = \theta_{IO} + 0.5(\theta_{CP} - \theta_{IO})$	$\theta_{CP} = 0.004 \times (\lambda - 3) + 0.01$ $\theta_{CP} \leq 0.02$
受剪控制 $2 \leq \lambda < 3$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \times \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.07 \times \beta_{CP}^{-1.3} + 0.004$ $\beta_{CP} = f_{cu,k} \rho_h / \rho_s$ $\theta_{CP} \geq 0.005$
受剪控制 $\lambda < 2$	$\theta_{IO} = 0.19 \times \theta_{CP}$	$\theta_{LS} = 0.53 \times \theta_{CP}$	$\theta_{CP} = 0.005$



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

结论与展望

- 本文在结构弹塑性分析程序PERFORM-3D的基础上进行二次开发，二次开发程序不但能够快速准确地建立整体结构的纤维模型，而且能够将本文提出的性能指标计算方法嵌入，使大型结构分析程序能够根据构件的尺寸、内力、配筋等信息计算得出性能指标，并采用该性能指标进行结构弹塑性变形的评估。

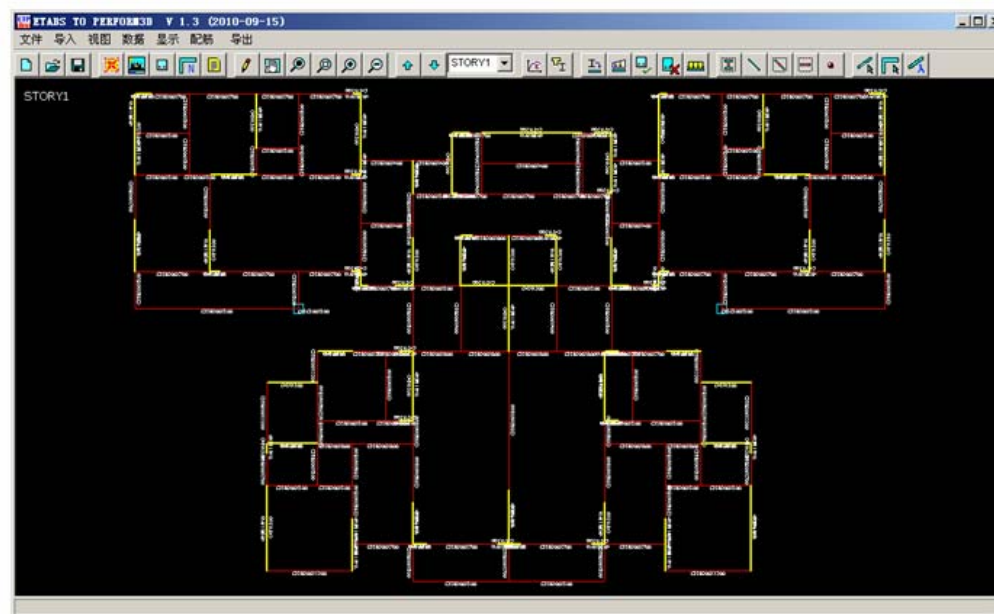


图 10-12 ETP 主界面图



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

结论与展望

- (1) 采用自编程序批量进行构件弹塑性分析得到构件变形性能指标，优点在于数值分析结果稳定，易于统计发现规律。缺点在于忽略了混凝土材料、钢筋材料的变异性、施工质量等等因素的影响，可以在批量计算的过程中加入可靠度分析方法；
- (2) 本文用于模拟压弯剪耦合构件的单元模型是修正斜压场单元，目前学术界仍有多种用于分析压弯剪耦合的单元模型，且研究正在发展当中，如Kabeyasawa的ASFI单元模型等。后续研究者可以其它压弯剪耦合单元对受剪控制构件进行分析；
- (3) 本文提出了构件变形性能指标，但未建立构件变形性能指标与整体结构变形性能指标的联系。简单言之，构件的变形性能指标的需求能力比值及分布范围与整体结构的变形性能指标存在一定关系，该关系可以通过大量的整体结构的试验或弹塑性分析得出，后续工作者可以在该方面着手，了解该关系后可以提出结构整体变形性能指标。



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

博士学位论文相关学术成果与奖励

- 发表SCI论文3篇，EI收录论文8篇，国内核心期刊论文9篇。在国际重要会议发表多篇学术论文
- 2008年第14届世界地震工程会议与日本防灾科学研究所合并的结构预测性分析比赛获得科研组第三名。
- 论文《基于宏观单元的结构非线性分析方法、算例及工程应用》在第18届全国结构工程学术会议上获“优秀论文奖”；
- 论文《三种非线性梁柱单元的研究及单元开发》在第19届全国结构工程学术会议上获“优秀论文奖”；
- 论文《剪力墙宏观单元开发及低周往复荷载试验数值分件》在2009年全国土木工程博士生学术会议上获“优秀论文奖”；
- 2010年以总分第一名被评为第二届华南理工大学“学术之星”称号（首届与第三届均无土木与交通学院学生获奖）



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

足尺钢框架比赛



Blind Analysis Contest足尺振动台试验模型



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

资助该课题研究的基金项目：

土木与交通学院优秀博士学位论文创新基金

华南理工大学优秀博士学位论文创新基金

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究项目 2009ZA04

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目2008KA01

“十一五”国家科技支撑计划研究项目2006BAJ04A12



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发



感谢各位
评委老师！
谢谢大家！



剪力墙结构构件变形指标的研究及计算平台开发

剪力墙结构构件变形指标的研究 及计算平台开发

2008级博士生：陈学伟
指导老师：韩小雷 教授
华南理工大学
土木与交通学院