

基于构件位移角的上海新抗规“变形检验”及 YJK 的实现

梅雨辰

一 引言

随着 2023 年 6 月 1 日新的上海《建筑抗震设计标准》(DG/TJ 08-9-2023) 的实施, 其不同于国标抗规和高规的性能设计方法和目标也格外引人注目。本文以新上海抗规提出的变形检验的设计方法为核心, 结合国内外相关规范展开探讨, 建议采用构件位移角来作为变形目标实施性能水准的评价和检验, 并结合 YJK-EP 和 Y-PACO 介绍该变形检验的操作和结果。

二 上海新抗规附录 K 性能设计的“变形检验”概念

上海《建筑抗震设计标准》(DG/TJ 08-9-2023) 在其附录 K 关于性能设计方法上, 在传统的承载力设计方法的同时提出了变形检验方法, 并在具体的性能水准中广泛应用, 如下图:

构件类别 性能水准	关键构件	主要构件	次要构件
1	弹性设计	弹性设计	弹性设计
2	弹性设计	正截面不屈服设计、斜截面弹性设计 (变形检验)	正截面极限承载力设计、斜截面不屈服设计 (变形检验)
3	正截面不屈服设计、斜截面弹性设计 (变形检验)	正截面极限承载力设计、斜截面不屈服设计 (变形检验)	正截面变形检验、斜截面极限承载力设计 (变形检验)
4	正截面极限承载力设计、斜截面不屈服设计 (变形检验)	正截面变形检验、斜截面极限承载力设计 (变形检验)	变形检验
5	正截面变形检验、斜截面极限承载力设计 (变形检验)	正截面变形检验、斜截面最小截面设计 (变形检验)	变形检验

上海抗规附录 K 构件类别性能水准

其在条文说明中给出了延性破坏混凝土荷载与变形曲线 (如下图 22), 同时指出这里的变形可以采用构件端部的塑性转角、总弦转角等指标, 并建议在无可靠依据时, 可参考美国规范 ASCE41-17 中的限值。

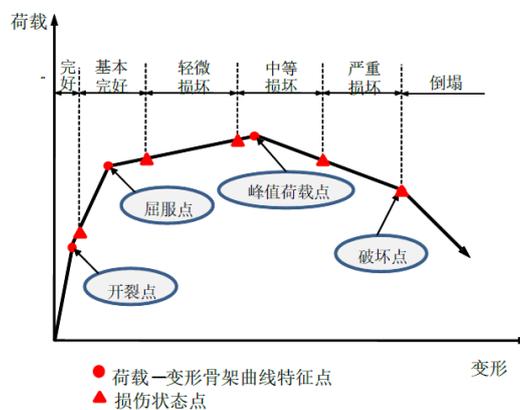


图 22 延性破坏钢筋混凝土构件的损伤等级划分示意图

国内超限工程目前一般采用损伤因子（应用于混凝土）和应变（应用于钢筋和钢材）来作为构件性能的评价指标，这属于微观性能评价指标，而本规范提出的变形检验属于宏观性能评价指标。对于延性受力状态，宏观变形比微观的损伤和应变更形象和直观地反映构件全截面的综合受力情况。

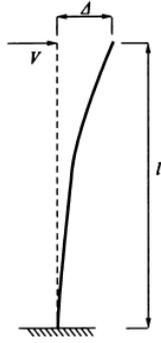
国际上的宏观变形检验方法一般是用美标 ASCE41-17 基于 FEMA356 的评价标准，其以构件的塑性转角作为变形评价指标，分为 OP（正常使用）、IO（可立即使用）、LS（生命安全）和 CP（建筑物不倒塌）四个性能目标。对于混凝土结构以等效配筋比、等效轴压比和等效剪压比等指标对不同的构件区分不同的弹塑性模型参数和相应性能目标的塑性转角限值，这在一些国际软件 SAP2000、ETABS、Perform3D 等都已广泛使用。

FEMA 356 表 6-7、表 6-8 非线性分析模型参数和容许准则——钢筋混凝土梁、柱 表 19-7

条 件			建模参数			容许准则				
			塑性转角 弧度		残余 强度比	塑性转角（弧度）				
						功能等级				
			a	b	c	IO	分量类型		LS	CP
主	次									
i. 抗弯控制柱										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	横向 配筋	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01
ii. 抗剪控制梁										
箍筋间距 $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.2	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.01
箍筋间距 $> d/2$			0.0030	0.01	0.01	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.005

然而上述塑性转角的变形检验指标是基于传统塑性铰模型的，该模型中的塑性铰长度以及塑性铰的位置需要人为进行假定，且基于杆单元而提出，对剪力墙等壳单元的适用存在争议，因而与实际受力存在一定的误差。随着弹塑性分析的精细化，基于纤维束和分层壳单元的分析模型开始广泛使用，其由于更少的计算假定和对钢筋的精细化模拟，目前分析精度高于传统的塑性铰模型，如 ABAQUS、Y-PACO、YJK-EP 等软件，但由于塑性铰模型中塑性铰长度的人为假定以及时程过程中塑性区的变化，纤维束模型不易获得美标中所需要的塑性转角，因而不建议对纤维束模型用塑性转角作为变形检验指标。

实际上相较于塑性转角，构件的总弦转角即构件的位移角作为变形检验，对精细化纤维束模型和分层壳单元更易计算和适用，其定义可参考华东院主编的《建筑结构抗震性能化设计标准》(T/CECA20024-2022)，指构件在反弯点处的 Δ 与反弯点至构件塑性铰根部的距离 L 的比值 Δ/L ，该指标的构件变形包含了全长范围内的弹性段变形与塑性段弹塑性变形，而在弹塑性阶段，弹性段的变形因为内力已达到承载力而总体上无明显增长。该变形指标可天然适用于纤维束模型和分层壳单元。



构件位移角（总弦转角）示意图

三 基于构件位移角的变形检验方法

规范层面基于构件位移角的性能评价标准最初正式提出于广东省标准《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程》(DBJ/T 15-151-2019)和行业标准《建筑结构非线性分析技术标准》(T/CECS 906-2021),两本规范分别在第7章变形指标限值和附录C.3借鉴了美标对构件受力状态和配筋状态的分类概念,提出了混凝土构件的构件位移角性能评价标准,《建筑结构抗震性能化设计标准》(T/CECA20024-2022)在混凝土构件的基础上,补充了钢构件的构件位移角性能评价标准(见标准7.4.1及附录D),对该变形检验性能评价方法进行了完善。

基于构件位移角的性能评价标准将构件性能分为1~6级,分别是1级:无损坏,2级:轻微损坏,3级:轻度损坏,四级:中度损坏,五级:比较严重损坏(又叫重度损坏),6级:严重损坏。

下面介绍混凝土构件位移角性能评价标准。

首先通过剪跨比和弯剪比以下两个指标

$$\lambda = \frac{M}{Vh_0} \quad (\text{C.3.2-1})$$

λ 为剪跨比; M 为构件截面弯矩; V 为构件截面剪力; h_0 为构件截面有效高度。

$$m = \frac{M_n}{V_n l} \quad (\text{C.3.2-2})$$

m 为弯剪比; M_n 、 V_n 分别为偏心受力构件抗弯、抗剪承载力,计算中钢筋和混凝土取材料强度平均值; l 为零弯矩位置到计算截面的距离。

将梁、柱和剪力墙分成弯曲破坏,弯剪破坏和剪切破坏,其划分的限值如下:

表 C.3.2-1 钢筋混凝土梁损伤破坏形态划分

损坏形态	剪跨比	弯剪比
弯曲损坏	$\lambda \geq 2.0$	$m \leq 1.0$
弯剪损坏	$1.0 \leq \lambda < 2.0$	$m \leq 0.5\lambda$
	$\lambda \geq 2.0$	$1.0 < m \leq 0.5\lambda$
剪切损坏	其他	

表 C.3.2-2 钢筋混凝土柱损伤破坏形态划分

损坏形态	剪跨比	弯剪比
弯曲损坏	$\lambda \geq 2.0$	$m \leq 0.6$
弯剪损坏	$\lambda \geq 2.0$	$0.6 < m \leq 1.0$
	$1.4 \leq \lambda < 2$	$m \leq 1.0$
剪切损坏	其他	

表 C.3.2-3 钢筋混凝土剪力墙损伤破坏形态划分

损坏形态	剪跨比	弯剪比
弯曲损坏	$\lambda \geq 1.5$	$m \leq 1.0$
弯剪损坏	$1.2 \leq \lambda < 1.5$	$m \leq 3.3\lambda - 3$
	$\lambda \geq 1.5$	$1.0 < m \leq 2.0$
剪切损坏	其他	

对于钢筋混凝土梁，在弯曲破坏下根据弯剪比 m 和体积配筋率 ρ_v 的不同数值划分成 4 种不同性态，在弯剪破坏下根据弯剪比 m 和纵筋配筋率 ρ_{sv} 的不同数值划分成 4 种不同性态，并给出每种性态下的构件位移角不同性能目标下的界限值。

表 7.3.7 混凝土梁弹塑性位移角限值

构件参数	构件性能状态					
	无损坏 (B1)	轻微损坏 (B2)	轻度损坏 (B3)	中度损坏 (B4)	比较严重损坏 (B5)	严重损坏 (B6)
弯控						
$m \leq 0.2$ $\rho_v \geq 0.012$	0.004	0.016	0.024	0.031	0.039	0.044
$m \geq 0.8$ $\rho_v \geq 0.012$	0.004	0.018	0.029	0.039	0.049	0.054

续表

构件参数	构件性能状态					
	无损坏 (B1)	轻微损坏 (B2)	轻度损坏 (B3)	中度损坏 (B4)	比较严重损坏 (B5)	严重损坏 (B6)
$m \leq 0.2$ $\rho_v \leq 0.001$	0.004	0.010	0.011	0.013	0.014	0.017
$m \geq 0.8$ $\rho_v \leq 0.001$	0.004	0.012	0.016	0.020	0.024	0.029
弯剪控						
$m \leq 0.5$ $\rho_{sv} \geq 0.008$	0.004	0.009	0.014	0.019	0.024	0.026
$m \geq 2.5$ $\rho_{sv} \geq 0.008$	0.004	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016
$m \leq 0.5$ $\rho_{sv} \leq 0.0005$	0.004	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016
$m \geq 2.5$ $\rho_{sv} \leq 0.0005$	0.004	0.005	0.007	0.008	0.009	0.012

注：1 表中 m 表示弯剪比， ρ_v 表示梁的体积配筋率， ρ_{sv} 表示梁的箍筋面积配箍率。

2 表中可以采用线性插值方法得到相应的位移角限值。

对于钢筋混凝土柱，在弯曲破坏下根据轴压力系数 \bar{n} 和体积配筋率 ρ_v 的不同数值划分成 4 种不同性态，在弯剪破坏下根据轴压力系数 \bar{n} 和弯剪比 m 的不同数值划分成 4 种不同性态，并给出每种性态下的构件位移角不同性能目标下的界限值。

表 7.3.8 混凝土柱弹性位移角限值

构件参数		构件性能状态					
		无损坏 (C1)	轻微损坏 (C2)	轻度损坏 (C3)	中度损坏 (C4)	比较严重损坏 (C5)	严重损坏 (C6)
弯控							
$\bar{n} \leq 0.1$	$\rho_v \geq 0.021$	0.004	0.018	0.027	0.037	0.046	0.056
$\bar{n} = 0.6$	$\rho_v \geq 0.021$	0.004	0.013	0.018	0.022	0.027	0.030
$\bar{n} \leq 0.1$	$\rho_v \leq 0.001$	0.004	0.015	0.022	0.029	0.036	0.042
$\bar{n} = 0.6$	$\rho_v \leq 0.001$	0.004	0.009	0.011	0.012	0.013	0.014
弯剪控							
$\bar{n} \leq 0.1$	$m \leq 0.6$	0.003	0.013	0.020	0.026	0.033	0.040

续表

构件参数		构件性能状态					
		无损坏 (C1)	轻微损坏 (C2)	轻度损坏 (C3)	中度损坏 (C4)	比较严重损坏 (C5)	严重损坏 (C6)
$\bar{n} = 0.6$	$m \leq 0.6$	0.003	0.009	0.011	0.014	0.016	0.018
$\bar{n} \leq 0.1$	$m \geq 1.0$	0.003	0.011	0.016	0.021	0.026	0.028
$\bar{n} = 0.6$	$m \geq 1.0$	0.003	0.008	0.009	0.011	0.012	0.014

注：1 表中 m 和 \bar{n} 分别表示弯剪比和轴压力系数（指构件轴力标准值与构件截面面积和混凝土轴心抗压强度标准值乘积之比值）， ρ_v 表示柱的箍筋体积配箍率。
 2 表中可以采用线性插值方法得到相应的位移角限值。
 3 轴压力系数 \bar{n} 大于 0.6 时，混凝土柱位移角限值为表中 \bar{n} 等于 0.6 的数值乘以 $2.5(1 - \bar{n})$ 。

对于钢筋混凝土剪力墙，其受力性态的划分指标和混凝土柱相同，只是限值上有所差别，不再赘述，详下图

表 7.3.9 混凝土剪力墙弹性位移角限值

构件参数		构件性能状态					
		无损坏 (SW1)	轻微损坏 (SW2)	轻度损坏 (SW3)	中度损坏 (SW4)	比较严重损坏 (SW5)	严重损坏 (SW6)
弯控							
$\bar{n} \leq 0.1$	$\rho_v \geq 0.025$	0.003	0.011	0.016	0.022	0.025	0.028
$\bar{n} = 0.4$	$\rho_v \geq 0.025$	0.003	0.010	0.013	0.017	0.020	0.022
$\bar{n} \leq 0.1$	$\rho_v \leq 0.004$	0.003	0.008	0.010	0.011	0.013	0.015
$\bar{n} = 0.4$	$\rho_v \leq 0.004$	0.003	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011
弯剪控							
$\bar{n} \leq 0.1$	$m \leq 0.5$	0.003	0.010	0.013	0.017	0.020	0.021
$\bar{n} = 0.3$	$m \leq 0.5$	0.003	0.008	0.011	0.013	0.015	0.016

续表

构件参数		构件性能状态					
		无损坏 (SW1)	轻微损坏 (SW2)	轻度损坏 (SW3)	中度损坏 (SW4)	比较严重损坏 (SW5)	严重损坏 (SW6)
$\bar{n} \leq 0.1$	$m = 2.0$	0.003	0.008	0.010	0.011	0.013	0.015
$\bar{n} = 0.3$	$m = 2.0$	0.003	0.007	0.008	0.010	0.011	0.013

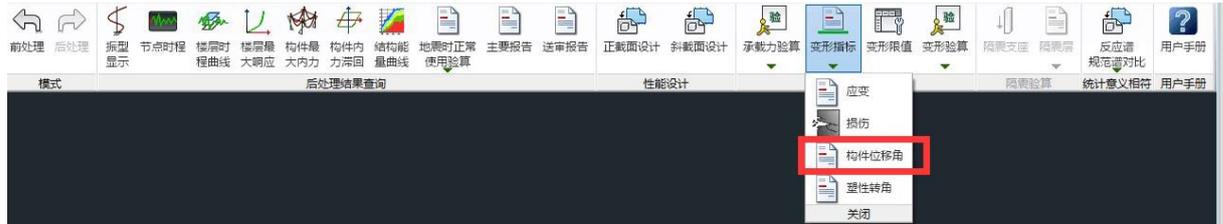
注：1 表中 m 和 \bar{n} 分别表示弯剪比和轴压力系数， ρ_v 表示剪力墙边缘构件的箍筋体积配箍率。
 2 表中可以采用线性插值方法得到相应的位移角限值。
 3 弯控轴压力系数 \bar{n} 大于 0.4 时，混凝土剪力墙位移角限值为表中 \bar{n} 等于 0.4 的数值乘以 $1.7(1 - \bar{n})$ ；弯剪控轴压力系数 \bar{n} 大于 0.3 时，混凝土剪力墙位移角限值为表中 \bar{n} 等于 0.3 的数值乘以 $1.4(1 - \bar{n})$ 。

从上述整个构件位移角变形检验评价过程可看出其核心是基于构件的受力性态，相较

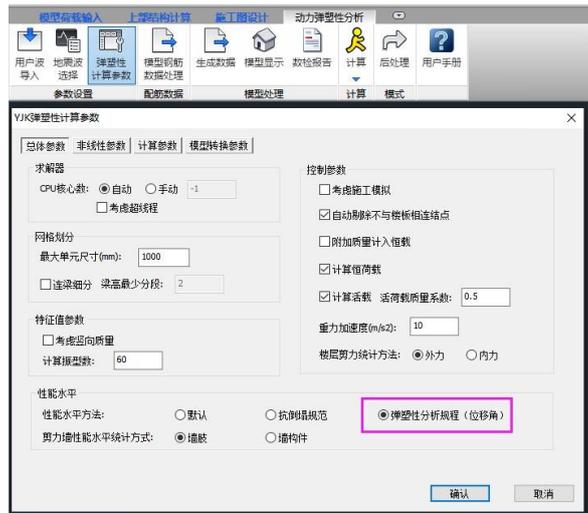
于统一的以损伤或应变的不区分性态的性能评价更合理。

四 基于 YJK-EP 和 Y-PACO 软件的构件位移角变形检验

上节介绍了基于构件位移角性能评价标准进行变形检验，YJK-EP 6.0 系列版本支持混凝土和钢构件的构件位移角性能评价标准，只需在后处理变形指标下拉菜单点选构件位移角选项即可显示构件变形性能，可以很方便地进行满足上海新抗规的变形检验。

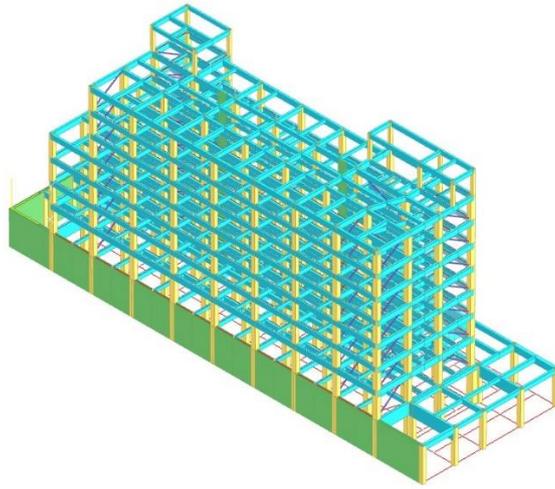


目前 Y-PACO 已支持混凝土构件的位移角评价标准，其设置非常简单，只需要在如下弹塑性参数中，将下方的性能水平方法由默认（指的是损伤因子判别）改成弹塑性分析规程（位移角）选项就可以了，不需要额外的操作。

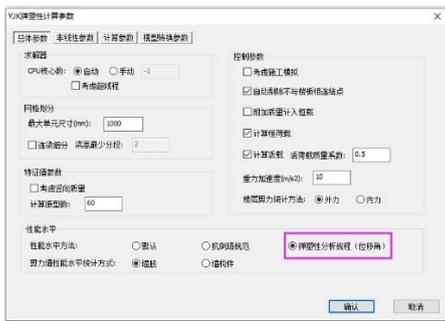


下面通过一个实际的模型对比一下基于构件位移角的变形检验性能评价与传统的基于损伤的默认评价标准的结果差别。

该模型为地上 8 层，地下 1 层的 BBR、墙式 VFD 组合减震混凝土框架体系。设防烈度为 7 度 (0.1g)，四类场地，经过小震反应谱计算配筋后，用 Y-PACO 进行大震弹塑性分析。



弹塑性参数中性价评价方法分别选择弹塑性分析规程和默认方法

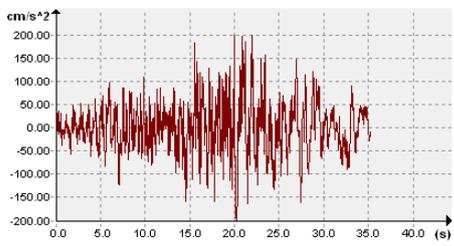


构件位移角变形检验设置

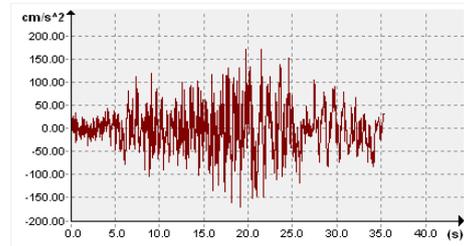


损伤因子性能方法设置

选择如下实际的一条天然波按主次方向输入，主次方向地震动如下：

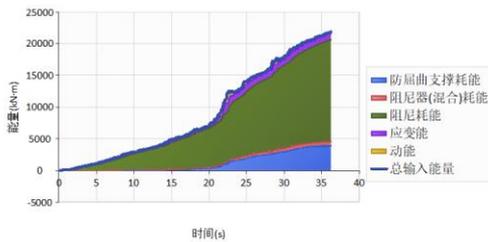


主方向波



次方向波

经计算，其能量曲线的结果如下：



LC_1100001 工况能量图

阻尼器耗能占比: 0%

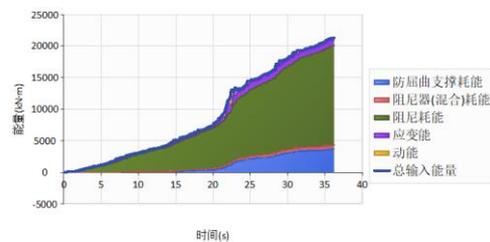
位移型阻尼器: 17.98%, 速度型阻尼器: 3.01%, 总占比: 20.99%

等效阻尼比: 0%

初始阻尼比: 5.00%

结构弹塑性: 0.25%, 位移型阻尼器: 1.22%, 速度型阻尼器: 0.20%

总等效阻尼比: 6.68%



LC_1100002 工况能量图

阻尼器耗能占比: 0%

位移型阻尼器: 17.52%, 速度型阻尼器: 2.81%, 总占比: 20.33%

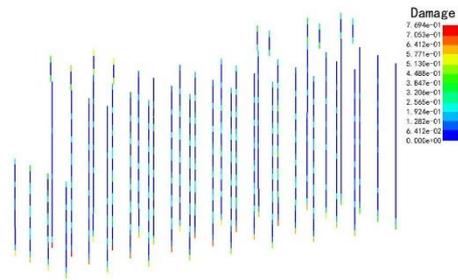
等效阻尼比: 0%

初始阻尼比: 5.00%

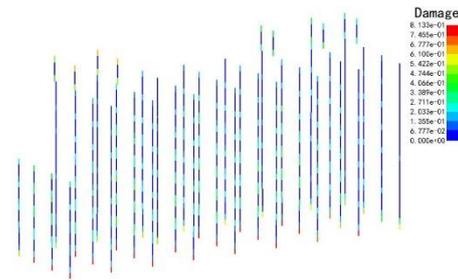
结构弹塑性: 0.26%, 位移型阻尼器: 1.18%, 速度型阻尼器: 0.19%

总等效阻尼比: 6.63%

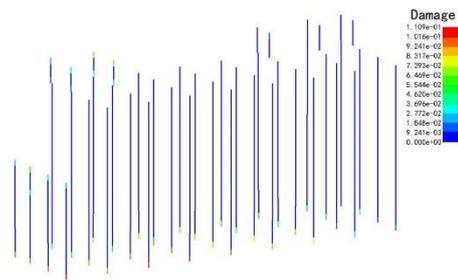
从能量曲线弹塑性耗能占比及其等效阻尼比可看出，该结构整体进入塑性并不明显，弹塑性破坏并不严重。然而根据损伤因子判别，底层柱混凝土受压和钢筋受拉出现了很多重度损伤，



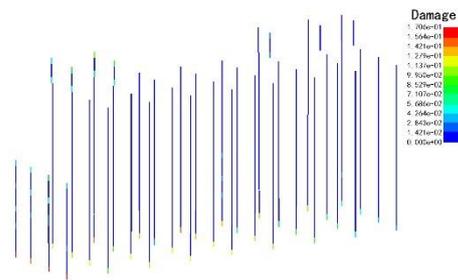
LC_1100001 工况框架柱混凝土受压损伤图



LC_1100002 工况框架柱混凝土受压损伤图

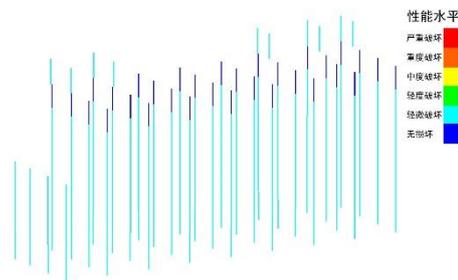


LC_1100001 工况框架柱钢筋损伤图

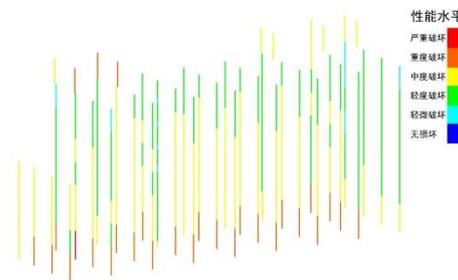


LC_1100002 工况框架柱钢筋损伤图

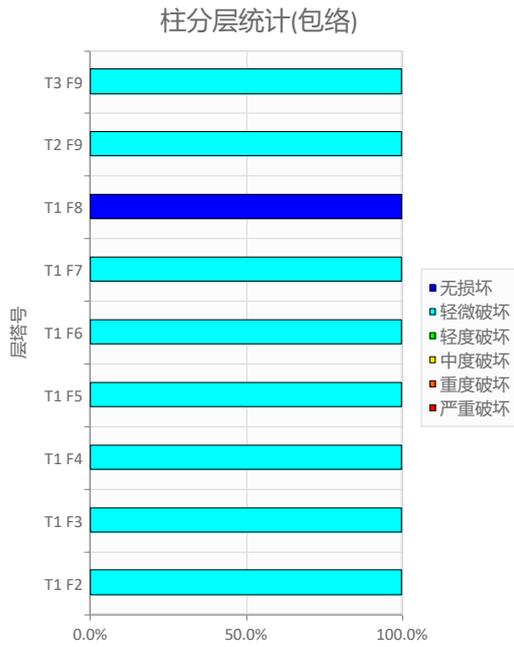
这导致根据损伤因子和应变默认方法判别底层大面积柱子达到重度损伤，而基于构件位移角的变形检验判别所有柱子最多只达到轻微损伤，如下所示：



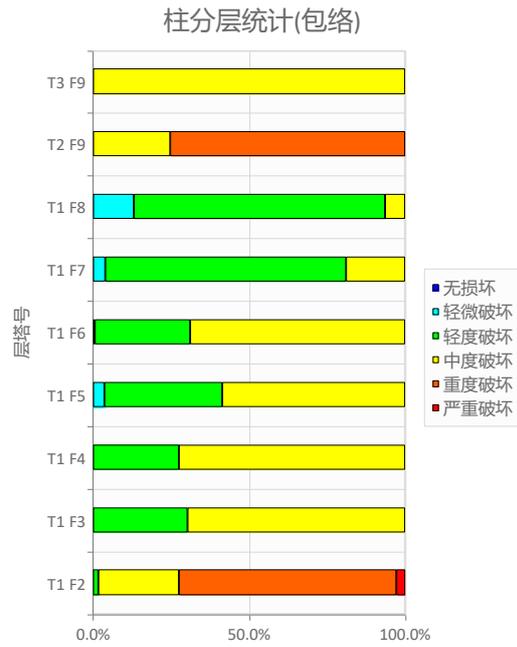
多工况包络构件位移角变形检验柱性能水平图



多工况包络损伤默认判别柱性能水平图



多工况包络构件位移角变形检验柱性能比例



多工况包络损伤默认判别柱性能比例

两种判别方法性能水平差异的主要原因在于传统的损伤和应变判别是单个纤维束的，以受力最大的最不利纤维束的性能水平作为整个构件的性能水平，而且只要混凝土受压损伤系数达到 0.001 就判别为开始塑性损坏，受压损伤系数超过 0.2 就判别为中度以上损伤，这样判别是非常严格的，往往会过高地估计结构的性能破坏状态，这种局部的损伤和破坏实际上并不能代表整个截面进入塑性的程度，因为从能量曲线看，并没有大面积的构件有很大的塑性变形和耗能。而基于构件位移角的变形检验判别通过截面的实际转动能较合适地反映其塑性变形，其结果和能量曲线的塑性耗能也是较相符的，其作为上海新抗规的变形检验方法也是较合适和值得推荐的。

参考文献：

- [1] 上海市工程建设规范《建筑抗震设计标准》DG/TJ08-9-2023[S],2023-06-01.
- [2] SAP2000 中文版使用指南（第二版）[M],2011-12-29.
- [3] 广东省标准《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程》DBJ/T 15-151-2019
- [4] 《建筑结构非线性分析技术标准》（T/CECS 906-2021）[S],2022-01-01
- [5] 《建筑结构抗震性能化设计标准》T/CECA20024-2022[S],2022-12-01.