



南京工業大學

NANJING TECH  
UNIVERSITY

土木工程學院

College of Civil Engineering

# 结构中混凝土的多层级变异性研究

---

汇报人：陶金聚

**E-mail:**

**taojinju@njtect.edu.cn**

2022年12月29日

**1 研究背景**

**2 层级模型**

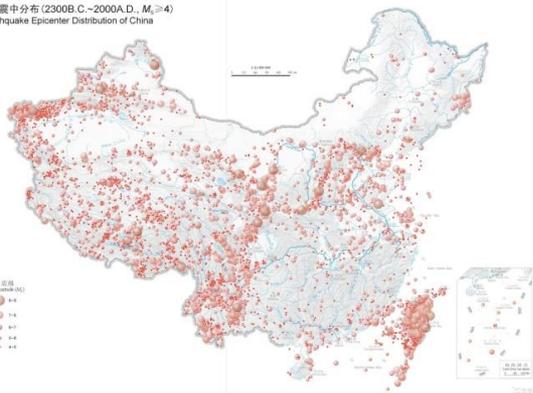
**3 混凝土结构地震随机响应分析**

**4 结论**

# 1 研究背景

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带交汇部位，是一个地震灾害多发的国家。

中国地震震中分布 (2300B.C.~2000A.D.,  $M_s \geq 4$ )  
Earthquake Epicenter Distribution of China



中国地震动峰值加速度区划图



公元前2300年至2000年我国地震震中分布 地震动参数区划图(GB 18306-2015)



1976 唐山地震

242769人遇难，164851人重伤



2008 汶川地震

69227人遇难，17923人失踪，374643人受伤



2022 芦山地震

4人死亡，42人受伤，14427人受灾

**工程结构在地震灾害中的损伤、破坏和倒塌是造成人员伤亡和财产损失的关键原因。**

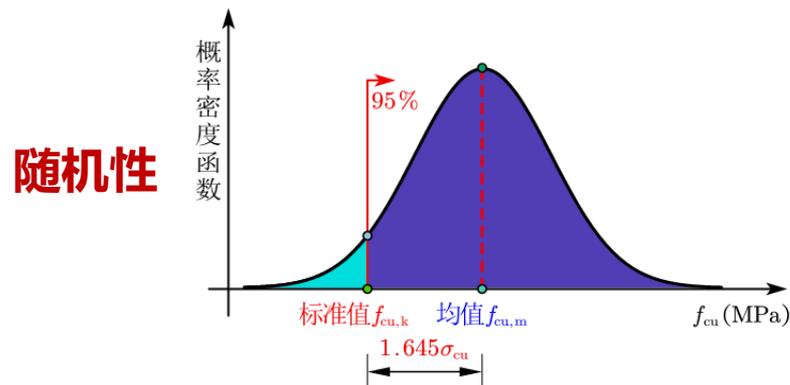
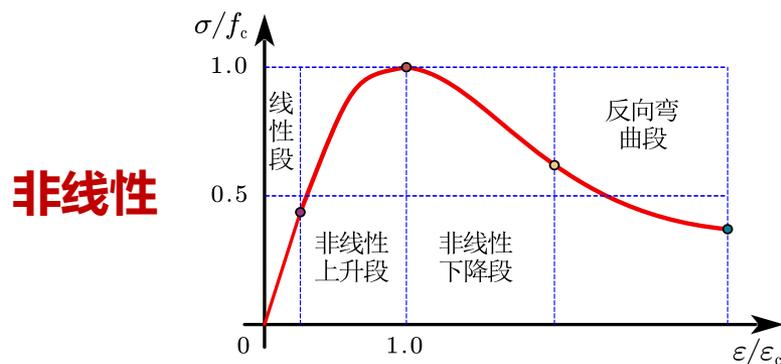
数据和图片来源：<http://www.stats.gov.cn>；百度图片；百度百科。

# 1 研究背景

## 第三代结构设计理论(李杰, 2017)

基本目标是实现结构生命周期中的**整体可靠性**设计，从而对工程结构的整体安全性和服役功能可靠性给出科学的**定量描述**。

如何科学合理地描述结构中混凝土的**非线性与随机性**，将对正确把握钢筋混凝土结构的地震响应和可靠度具有不可忽视的影响。



混凝土抗压强度标准值和变异系数 (GB 50010-2010)

强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60
$f_{cu,k}$ (MPa)	15	20	25	30	35	40	45	50	60
$\delta_c$ (%)	23.3	20.6	18.9	17.2	16.4	15.6	15.6	14.9	14.1

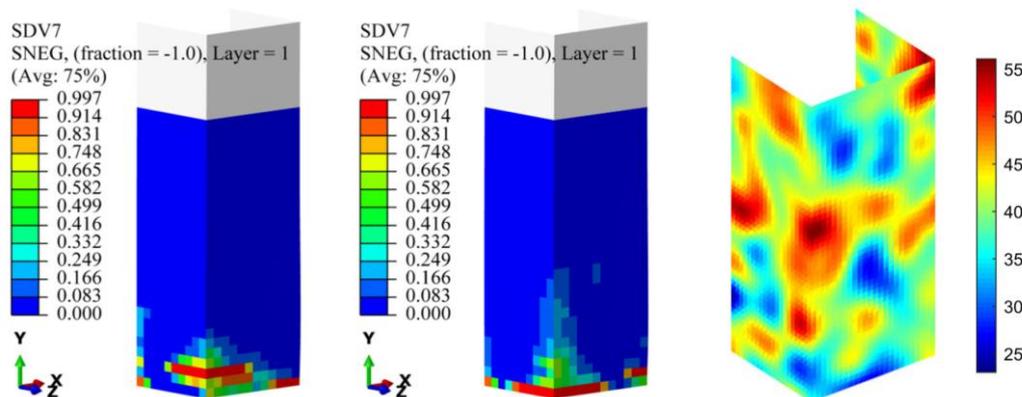
**20世纪80  
年代数据!**

# 1 研究背景

## 构件中混凝土的力学性能：

- 抗压强度变异系数：0.06 (Bartlett & MacGregor, 1996), 0.074 (贺景然, 2019);
- 抗压强度相关长度：2.4~3.4m (Yang et al., 2018) , 0.45m (Xu & Li, 2018) ;

混凝土的物理力学特性的空间变异性会对构件局部可能破坏的区域以及破坏模式产生影响。



剪力墙受压损伤云图与抗压强度随机场(Liang et al., 2021)

## 结构中混凝土的力学性能：(Bartlett & MacGregor, 1996; Shimizu et al., 2000):

- 同一建筑不同楼层的混凝土抗压强度有较大差异;
- 批次内变异系数：0.03;
- 批次间变异系数：0.10;
- 构件中变异系数：0.06;
- 构件间变异系数：0.05。

结构中混凝土的力学性能如何变化？如何描述结构中混凝土的变异性？

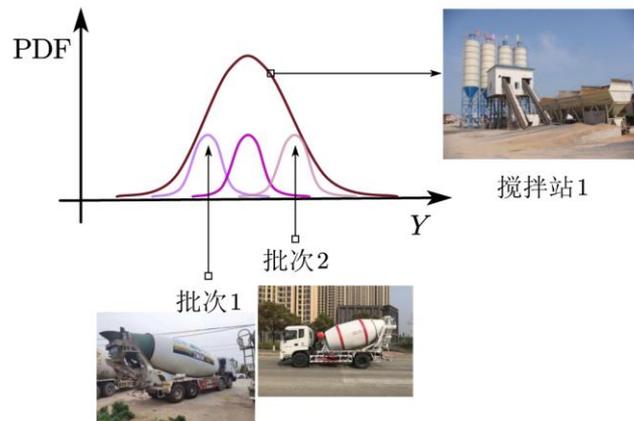
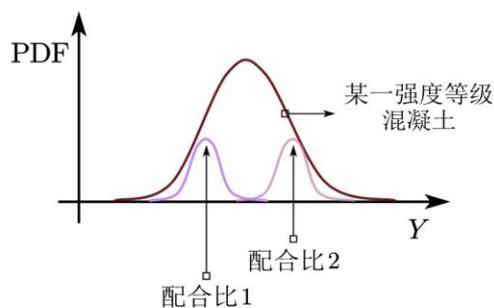
# 2 层级模型

不同强度等级混凝土抗压强度变异系数(GB 50010-2010)

强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60
$\delta_c(\%)$	23.3	20.6	18.9	17.2	16.4	15.6	15.6	14.9	14.1



- 芯样抗压强度变异系数：**0.042**;
- 混凝土梁抗压强度变异系数：0.08 (Xu & Li, 2018);
- 剪力墙混凝土抗压强度的变异系数：0.074 (贺景然, 2019)。

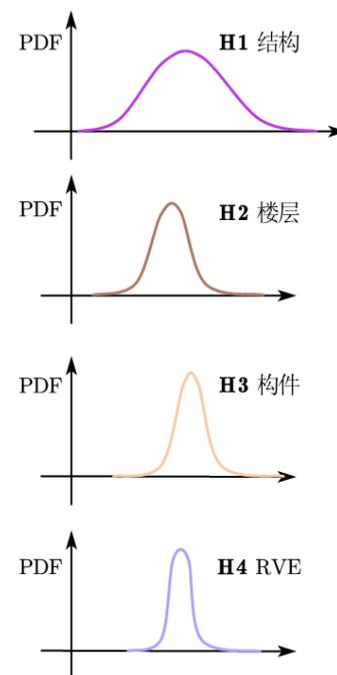
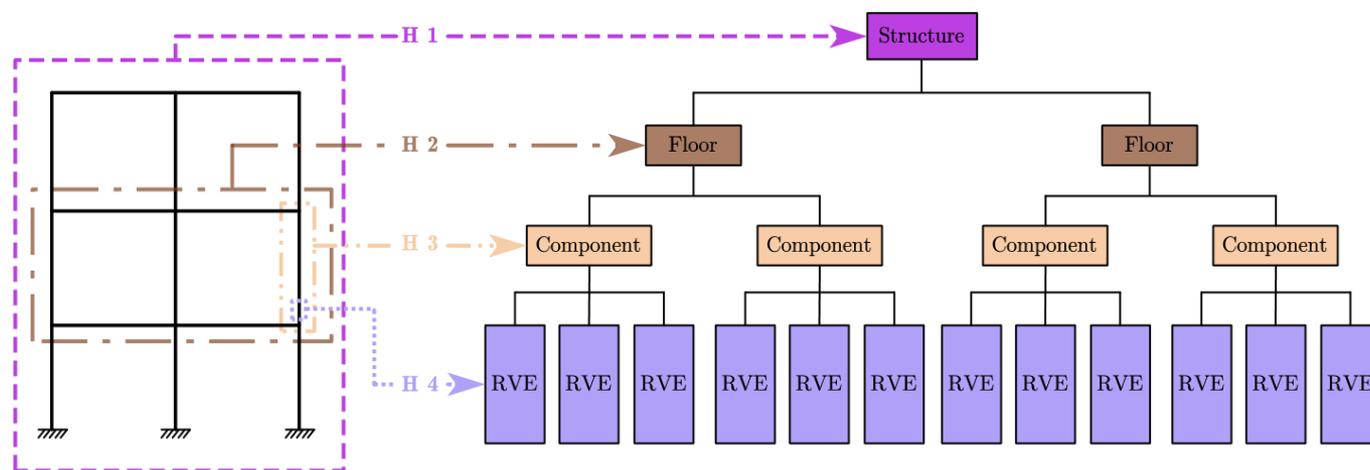


**结构中混凝土力学性能的变异性是由各种因素导致，其概率分布由许多子分布组成的混合分布。**

# 2 层级模型

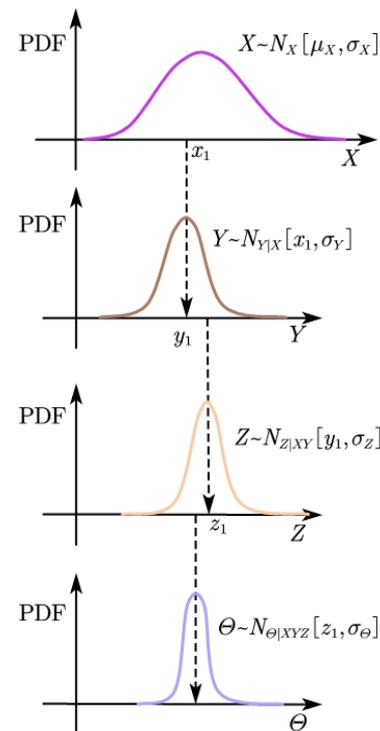
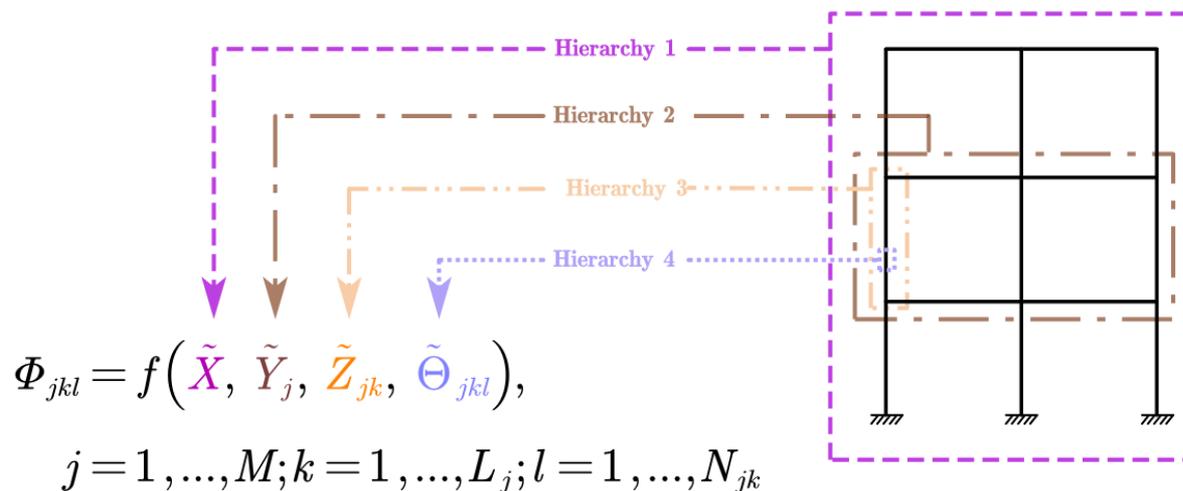
## 结构中混凝土力学性能变异性四个层级：

- **H1: 结构层级**—结构层级的一些因素导致结构间混凝土力学性能的变异性；
- **H2: 楼层层级**—楼层层级的一些因素导致同一结构不同楼层之间混凝土力学性能的变异性；
- **H3: 构件层级**—构件层级的一些因素导致同一楼层不同构件之间混凝土力学性能的变异性；
- **H4: RVE层级**—RVE层级的一些因素导致同一构件不同位置处的RVE之间混凝土力学性能的变异性。



# 2 层级模型

结构中混凝土的本构参数(第 $jkl$ 个RVE)可以表示为:



不同层级之间可以采用**相加关系**进行简化:

## 层级模型

$$\left\{ \begin{aligned} f_c(X) &= \mu_c + \sigma_X X \\ f_c(X, Y_j) &= f_c(X) + \sigma_Y Y_j \\ &= \mu_c + \sigma_X X + \sigma_Y Y_j \\ f_c(X, Y_j, Z_{jk}) &= f_c(X, Y_j) + \sigma_Z Z_{jk} \\ &= \mu_c + \sigma_X X + \sigma_Y Y_j + \sigma_Z Z_{jk} \\ f_c(X, Y_j, Z_{jk}, \Theta_{jkl}) &= f_c(X, Y_j, Z_{jk}) + \sigma_\Theta \Theta_{jkl} \\ &= \mu_c + \sigma_X X + \sigma_Y Y_j + \sigma_Z Z_{jk} + \sigma_\Theta \Theta_{jkl} \end{aligned} \right.$$

## 独立同分布

$$\left\{ \begin{aligned} f_c(X) &= \mu_c + \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_\Theta^2} X \\ f_c(X, Y_j) &= \mu_c + \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_\Theta^2} Y_j \\ f_c(X, Y_j, Z_{jk}) &= \mu_c + \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_\Theta^2} Z_{jk} \\ f_c(X, Y_j, Z_{jk}, \Theta_{jkl}) &= \mu_c + \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_\Theta^2} \Theta_{jkl} \end{aligned} \right.$$

# 2 层级模型

各层级变异系数(Bartlett & MacGregor, 1996)

层级	RVE $\delta_{\Theta}$	构件 $\delta_Z$	楼层 $\delta_Y$	结构 $\delta_X$
变异系数	0.03	0.06	0.112	0.186

## 结构中混凝土抗压强度：

(1) 第 $i$ 个结构混凝土抗压强度：

$$f_{c,i} = \mu_c + \sigma_X x_i, i = 1, \dots, N$$

(2) 第 $i$ 个结构第 $j$ 层混凝土抗压强度：

$$f_{c,ij} = f_{c,i} + \sigma_Y y_{ij}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M_i$$

(3) 第 $i$ 个结构第 $j$ 层第 $k$ 个构件混凝土抗压强度：

$$f_{c,ijk} = f_{c,ij} + \sigma_Z z_{ijk}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M_i, k = 1, \dots, L_{ij}$$

(4) 采用谱表达方法生成标准正态分布随机场 $\theta_{ijk}(\mathbf{x})$ ，构件 $k$ 中第 $l$ 个RVE混凝土抗压强度：

$$f_{c,ijkl} = f_{c,ijk} + \sigma_{\Theta} \theta_{ijkl},$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M_i, k = 1, \dots, L_{ij}, l = 1, \dots, K_{ijk}$$

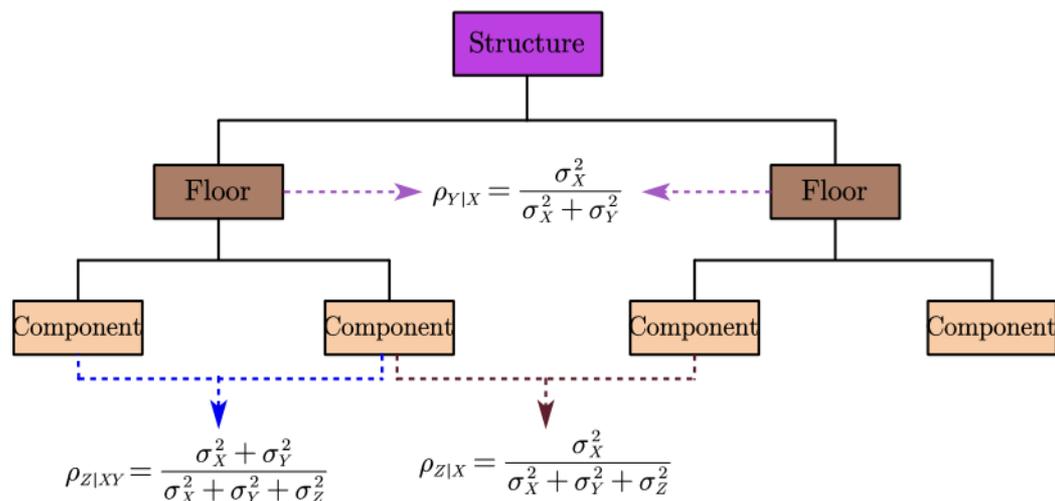
# 2 层级模型

同一结构中的相关性

H 1:  $\sigma_X$

H 2:  $\sigma_Y$

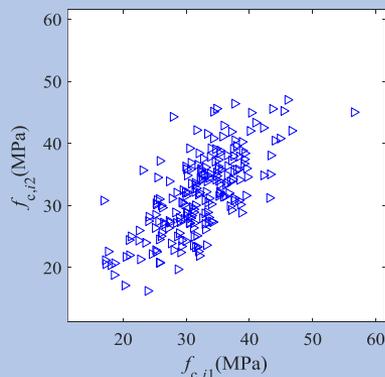
H 3:  $\sigma_Z$



同一结构不同楼层:

$$\rho_{Y|X} = \frac{0.186^2}{0.186^2 + 0.112^2}$$

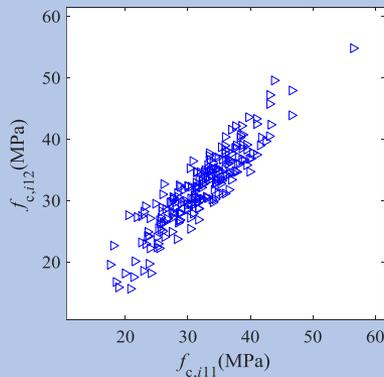
$$= 0.734$$



同一楼层不同构件:

$$\rho_{Z|XY} = \frac{0.186^2 + 0.112^2}{0.186^2 + 0.112^2 + 0.06^2}$$

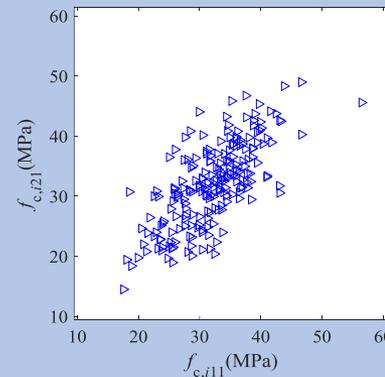
$$= 0.929$$



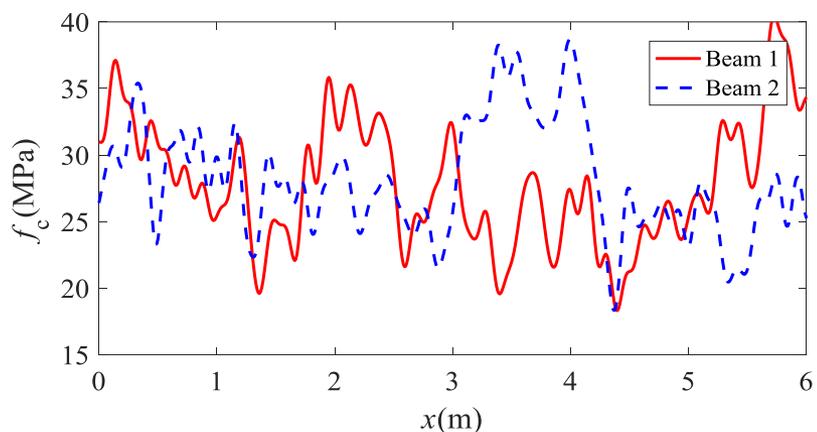
不同楼层不同构件:

$$\rho_{Z|X} = \frac{0.186^2}{0.186^2 + 0.112^2 + 0.06^2}$$

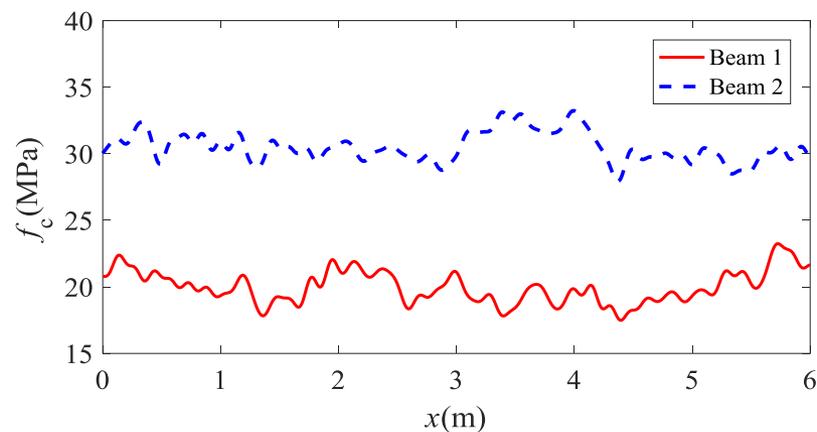
$$= 0.682$$



# 2 层级模型



独立同分布



层级模型

第 $k$ 个构件中混凝土抗压强度：

□ 独立同分布

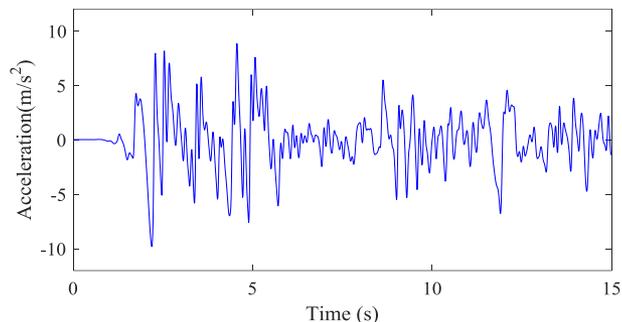
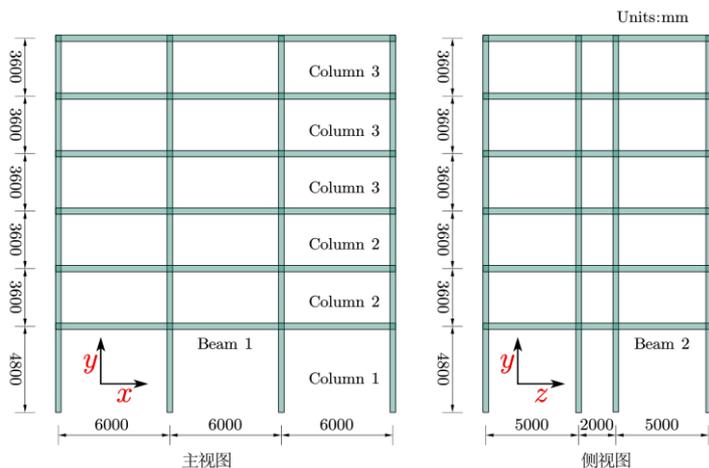
$$f_c(\mathbf{x}) = \mu_c + \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_\Theta^2} \Theta_k(\mathbf{x})$$

□ 层级模型

$$f_c(\mathbf{x}) = \mu_c + \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} Z_k + \sigma_\Theta \Theta_k(\mathbf{x})$$

# 3 混凝土结构地震随机响应分析

采用ABAQUS对一栋6层框架结构进行模拟，混凝土强度等级为C30。

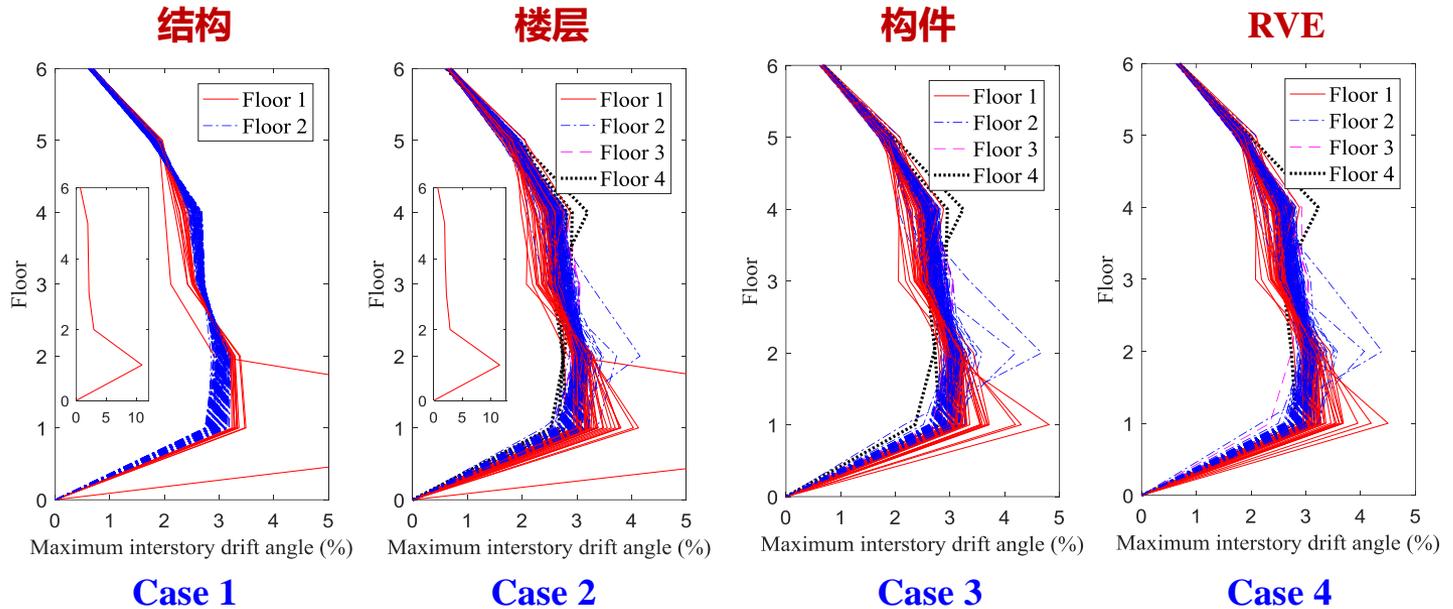


El Centro波的N-S分量(峰值调幅为1.0g)

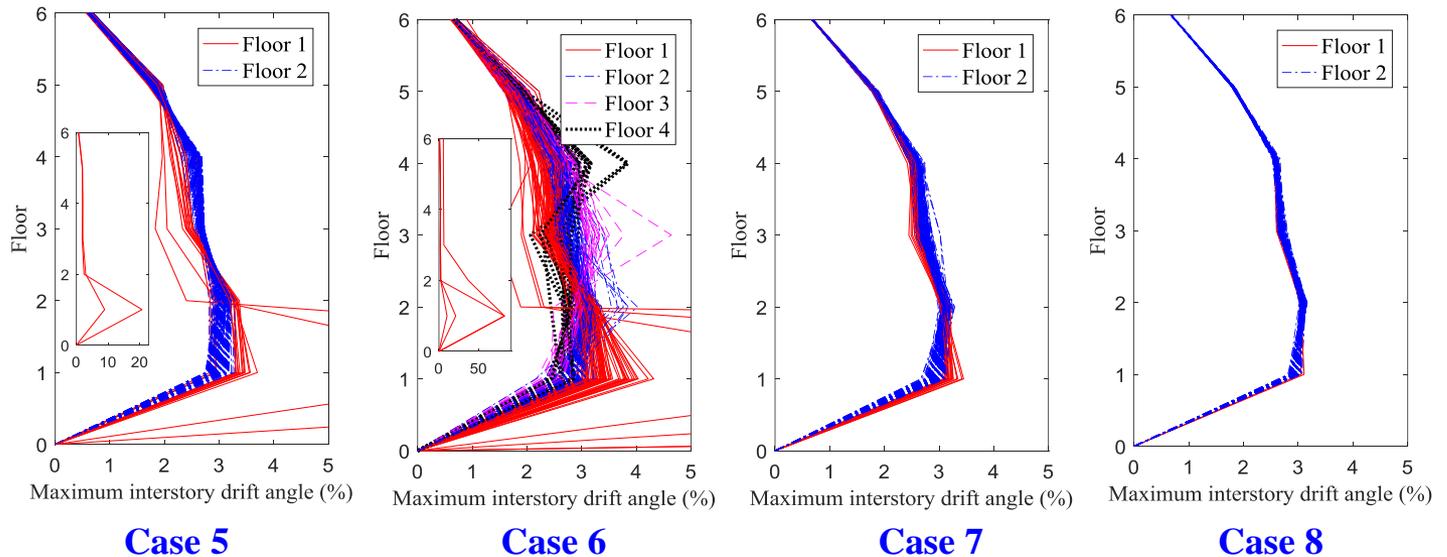
Cases	变异性	层级	独立随机变量	相关随机变量
Case 1	H1	H1	1	1
Case 2	H1+H2	H1, H2	1+6	6
Case 3	H1+H2+H3	H1, H2, H3	1+6+240	240
Case 4	H1+H2+H3+H4	H1, H2, H3, H4	1+6+240+1024	1024
Case 5	H1+H2+H3+H4	H1	1	-
Case 6	H1+H2+H3+H4	H2	6	-
Case 7	H1+H2+H3+H4	H3	240	-
Case 8	H1+H2+H3+H4	H4	1024	-

# 3 混凝土结构地震随机响应分析

层级模型



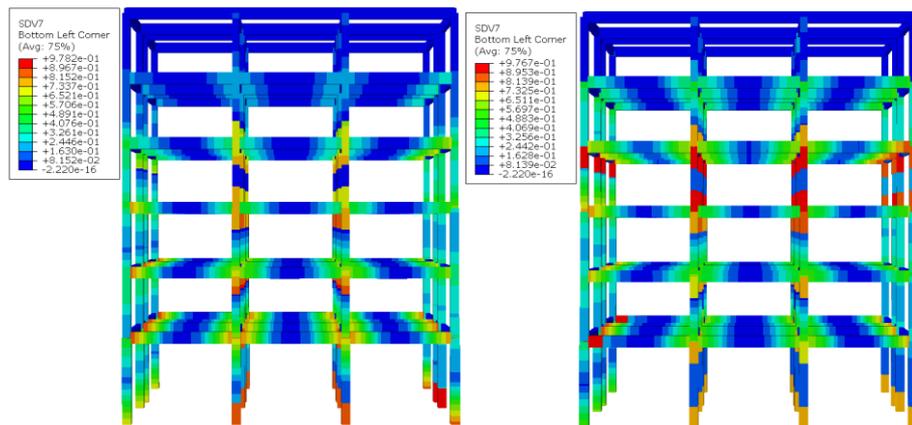
独立同分布



# 3 混凝土结构地震随机响应分析

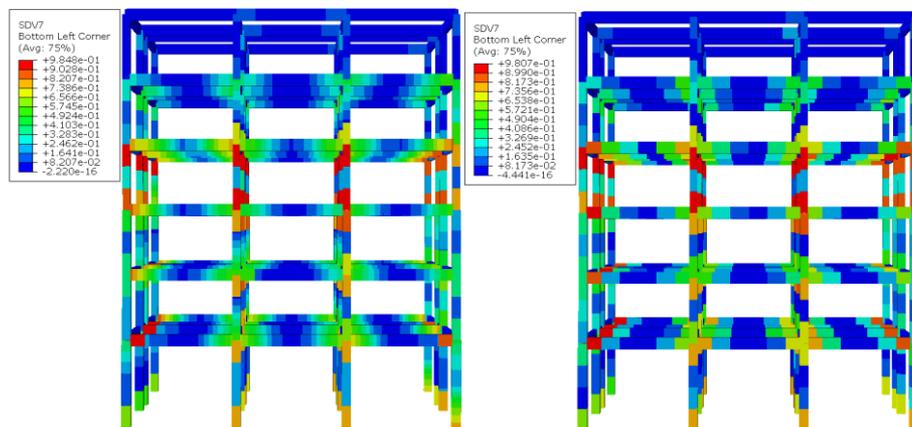
结构最大层间位移角所在楼层的比例

比例 (%)	Floor 1	Floor 2	Floor 3	Floor 4
Case 1	<b>6.00</b>	<b>94.00</b>	0	0
Case 2	<b>22.88</b>	<b>73.68</b>	<b>2.02</b>	<b>1.42</b>
Case 3	<b>23.57</b>	<b>73.10</b>	<b>2.06</b>	<b>1.27</b>
Case 4	<b>23.05</b>	<b>74.21</b>	<b>2.19</b>	<b>0.55</b>
Case 5	<b>8.36</b>	<b>91.64</b>	0	0
Case 6	<b>35.00</b>	<b>44.50</b>	<b>14.50</b>	<b>6.00</b>
Case 7	10.00	90.00	0	0
Case 8	1.00	99.00	0	0



Case 1

Case 2

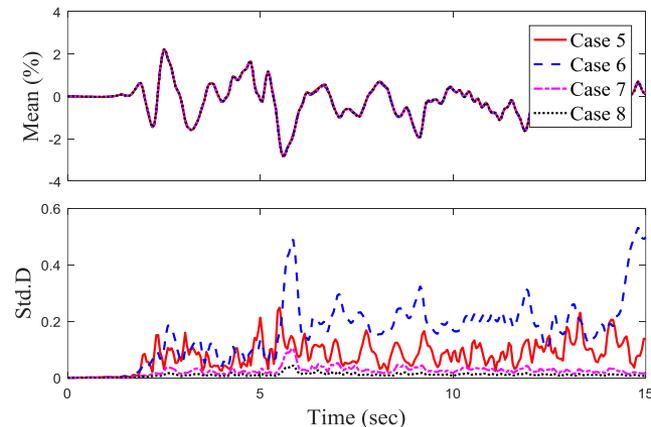
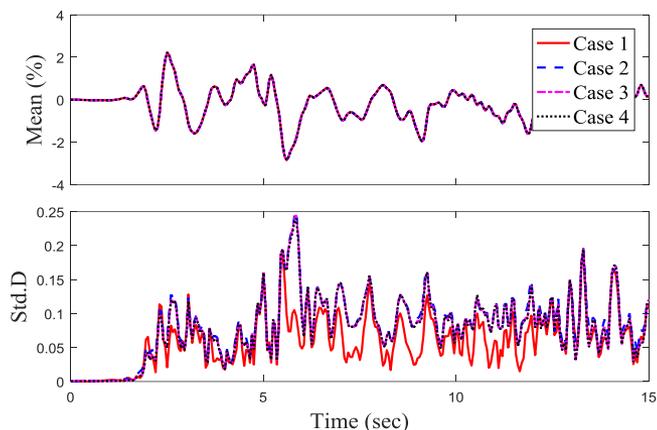


Case 3

Case 4

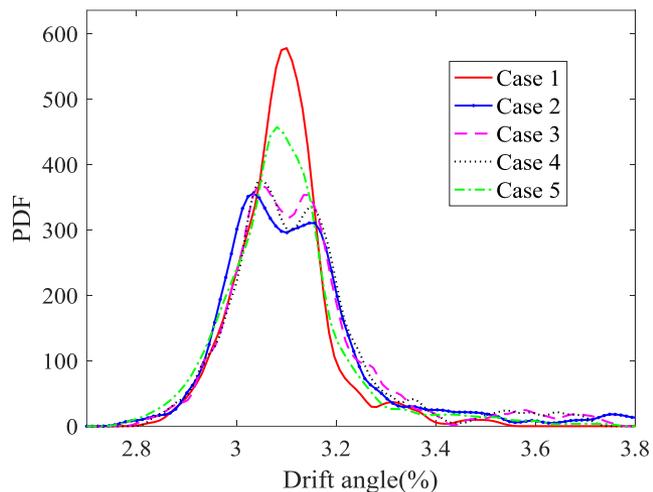
某一样本受压损伤

# 3 混凝土结构地震随机响应分析



层间位移角均值和标准差时程

## PDEM和等价极值事件(Li & Chen, 2009)



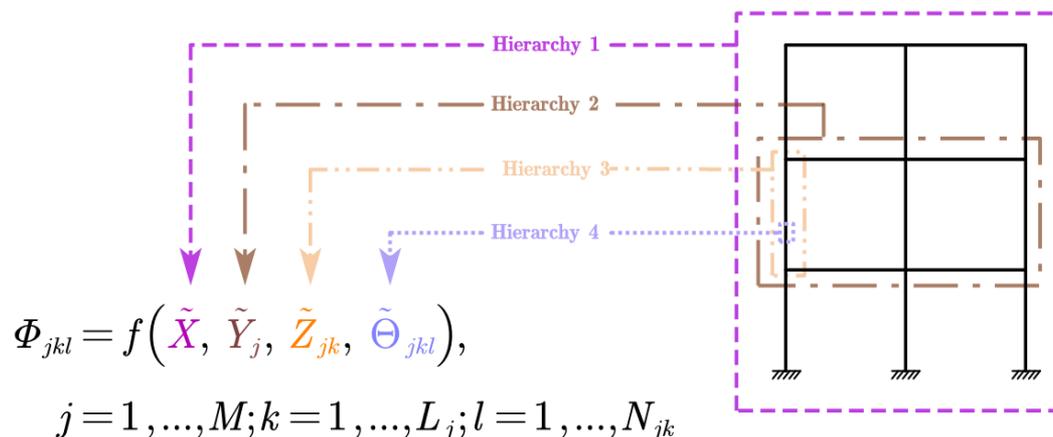
最大层间位移角概率分布

不同阈值下结构可靠度

阈值	0.032	0.034	0.036	0.038
Case 1	0.912	0.985	0.994	0.994
Case 2	0.802	0.922	0.954	0.976
Case 3	0.791	0.924	0.953	0.974
Case 4	0.785	0.924	0.955	0.974
Case 5	0.868	0.957	0.983	0.989

# 4 结论

- **层级模型**可以较好地描述结构中混凝土力学性能的变异性，且由该方法生成的本构参数在同一结构中具有明显的**相关性**。
- 当考虑**楼层层级**的变异性时，结构的破坏会向上部薄弱楼层转移，结构响应的变异性会增加，同时可靠度会降低。与楼层层级相比，**构件**和**RVE层级**混凝土的变异性对结构响应和可靠度的影响相对较小。
- 当采用**独立同分布方式**考虑结构中混凝土的抗压强度变异性时，从结构到RVE层级，结构响应的变异性先增大后减小。





## 参考文献

- 李杰. (2017). 论第三代结构设计理论. 同济大学学报(自然科学版), 45(5): 617-632.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. (2010). 混凝土结构设计规范 (GB 50010-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.
- Bartlett F. M., MacGregor J. G. (1996). Statistical analysis of the compressive strength of concrete in structures. *ACI Materials Journal*, 93(2): 158-168.
- 贺景然. (2019). 高层钢筋混凝土剪力墙的本构特性空间变异性量化与结构地震随机反应分析. 上海: 同济大学博士学位论文, 指导教师: 陈建兵教授.
- Xu T. Z., Li J. (2018). Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test of drilled cores. *Construction and Building Materials*, 188: 820-832.
- Yang Y., Peng J., Zhang J., Cai C. S. (2018). A new method for estimating the scale of fluctuation in reliability assessment of reinforced concrete structures considering spatial variability. *Advances in Structural Engineering*, 21(13): 1951-1962.
- Shimizu Y., Hirosawa M., and Zhou J. (2000). Statistical analysis of concrete strength in existing reinforced concrete buildings in Japan. Auckland, New Zealand: 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Liang Y. P., Ren X., Feng D. C. (2022). Efficient stochastic finite element analysis of irregular wall structures with inelastic random field properties over manifold. *Computational Mechanics*, 69(1): 95-111.
- Li J., Chen J. B. (2009). *Stochastic Dynamics of Structures*. Singapore: Wiley.

感谢各位老师!

敬请批评指正!

陶金聚

E-mail:

[taojinju@njtech.edu.cn](mailto:taojinju@njtech.edu.cn)