

# 城市桥梁群全寿期地震损伤快速预测方法

Rapid life-cycle post-earthquake damage prediction of city-scale bridge classes

徐积刚

南京工业大学 土木工程学院

School of Civil Engineering, Nanjing Tech Univ.

2022.12.29



南京工业大学  
NANJING TECH  
UNIVERSITY



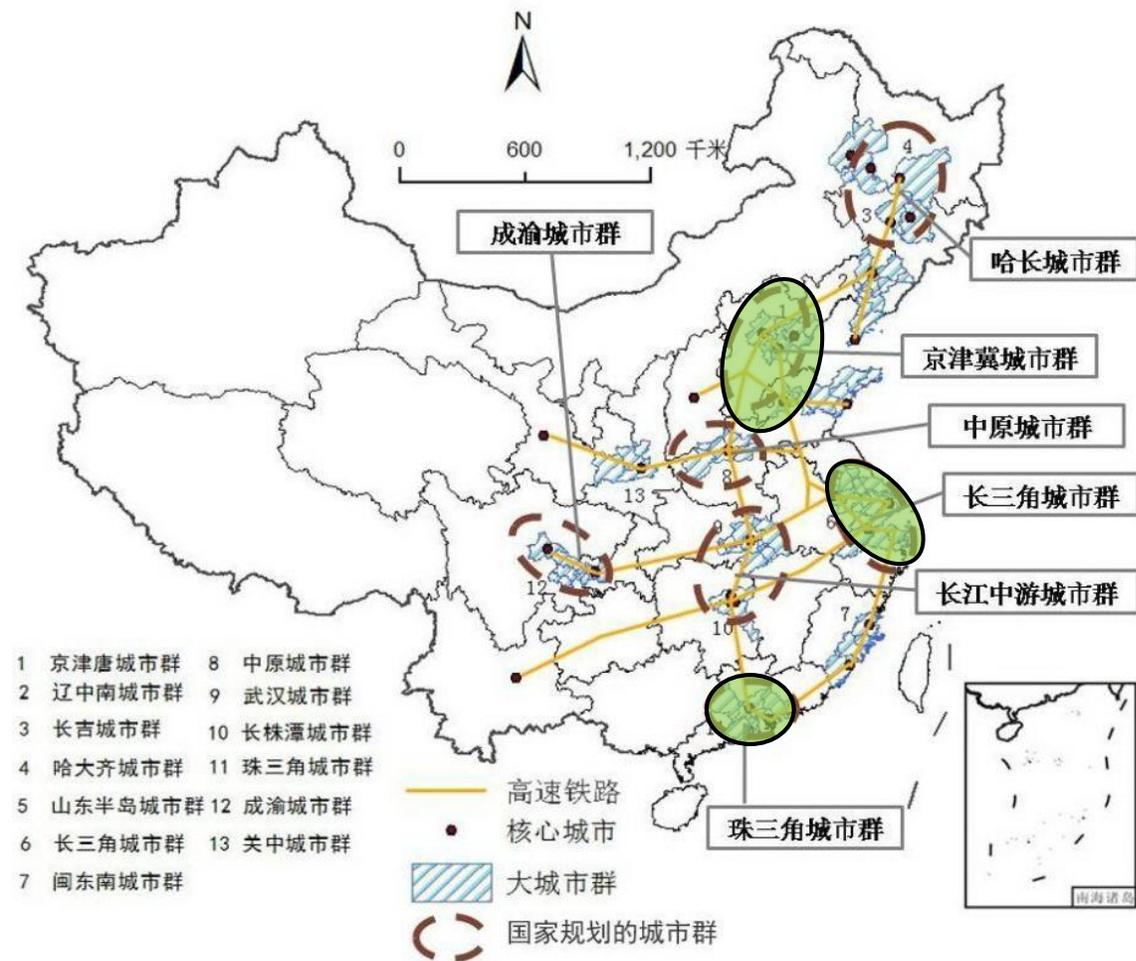
南京工业大学  
土木工程学院  
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING  
NANJING TECH UNIVERSITY

- **目录**
- **Content**

- 1 研究背景
- 2 传统方法的一些局限
- 3 物-数融合的新方法
- 4 总结

## ● 城市规模的快速发展带来城市安全需求的重大问题

岳清瑞 院士



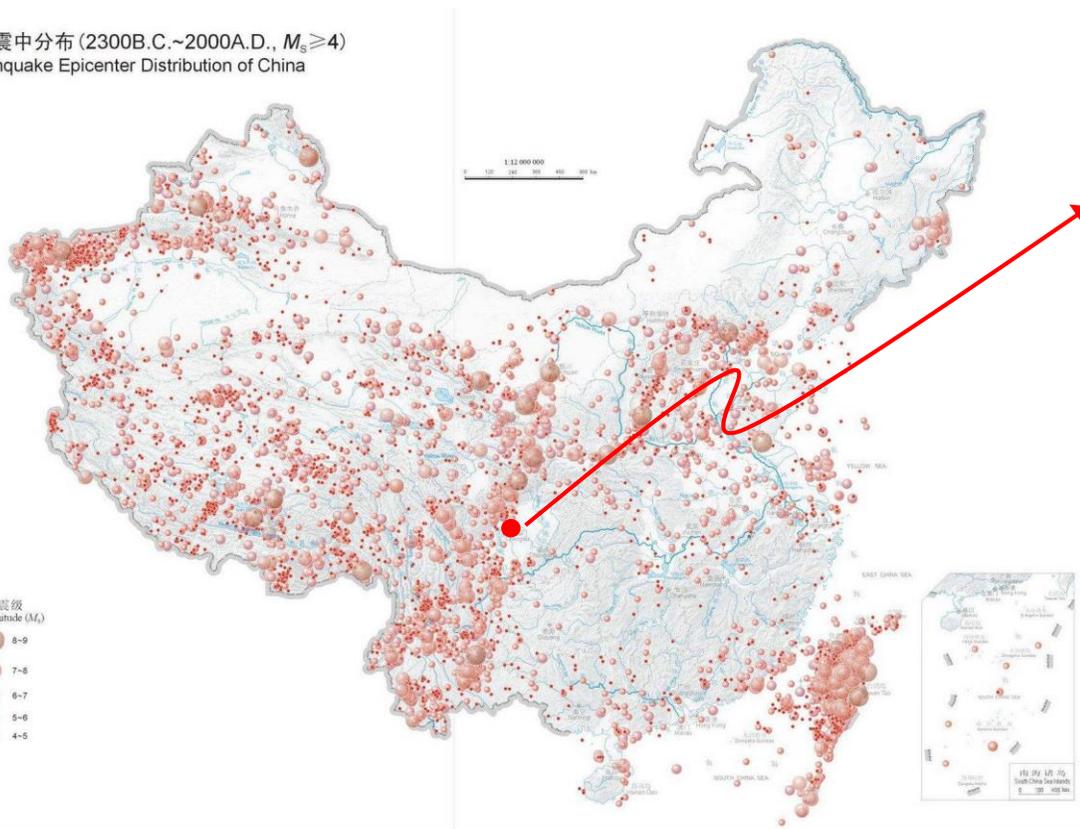
区域	面积/万平方公里	人口/亿	GDP/万亿
全国	960	14.13	114.37
京津冀	22.2	1.10	9.78
长三角	22.5	1.65	27.60
珠三角	5.5	0.79	10.06
<b>三大城市群合计</b>	<b>50.2</b>	<b>3.54</b>	<b>47.44</b>
	<b>5.2%</b>	<b>25.0%</b>	<b>41.5%</b>

三大城市群仅占全国**5.2%**土地面积，聚集**25%**人口，GDP占比**41.5%**。人口-财富高度集中！城市安全成为国计民生重大问题！

截止2021年末，我国城镇化率已突破**64.7%**，城镇化建设成绩举世瞩目！

## ● 我国城市面临重大地震威胁

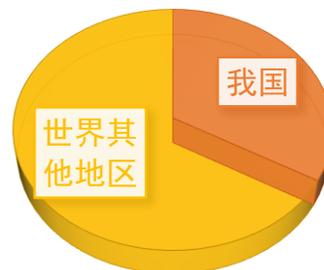
中国地震震中分布 (2300B.C.~2000A.D.,  $M_s \geq 4$ )  
Earthquake Epicenter Distribution of China



### 08汶川地震-

- 死亡8万余人;
- 经济损失8000亿元。

地震发生次数占比



### 11年东日本大地震 (9.0级)

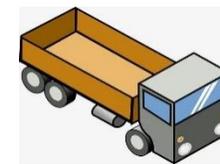
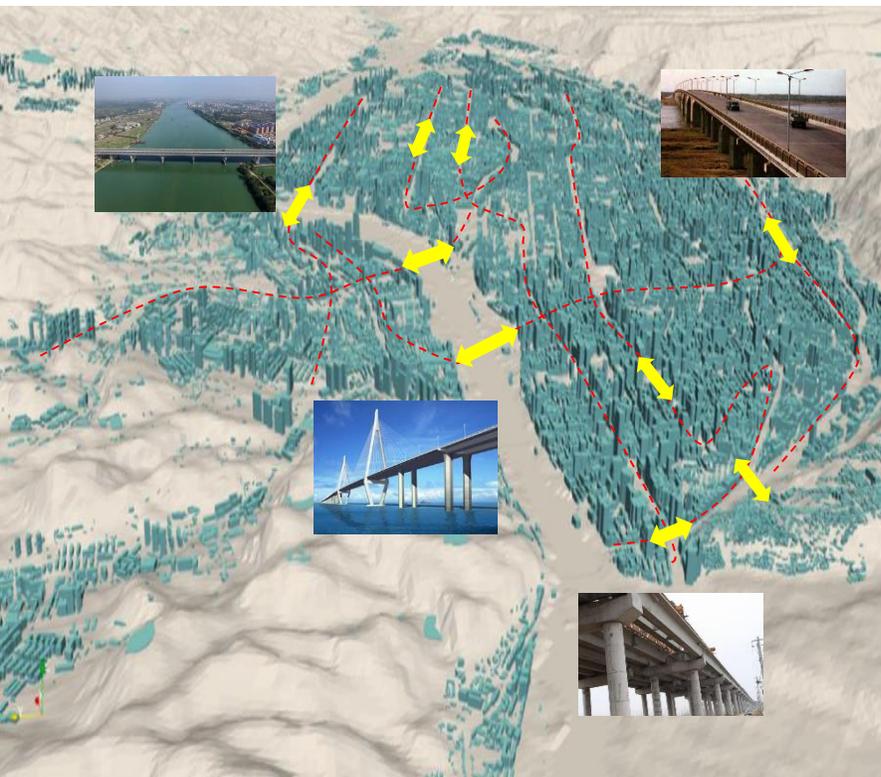


- 房屋毁坏130万栋;
- 经济损失17万亿日元 (当年GDP占比3.4%) ;

强烈地震是城市可持续发展重大威胁!

我国地震总数约占世界1/3。我国 2/3 的百万以上人口城市位于 6 度以上地震设防区域, 178 个地级市位于 7 度以上的高烈度区域。

## ● 桥梁群网作为城市“骨骼” 地震安全尤为重要



经济发展“骨骼”

“十四五”交通强国



震时救援“骨骼”

避免出现“城市孤岛”



灾后重建“骨骼”

快速震后恢复与重生

桥梁网络如同身体骨骼网络一样，对于机体正常运行起到至关重要的作用。并且牵一发而动全身，某一桥梁的地震失效就可能引起整个桥梁网络的顺利运行。

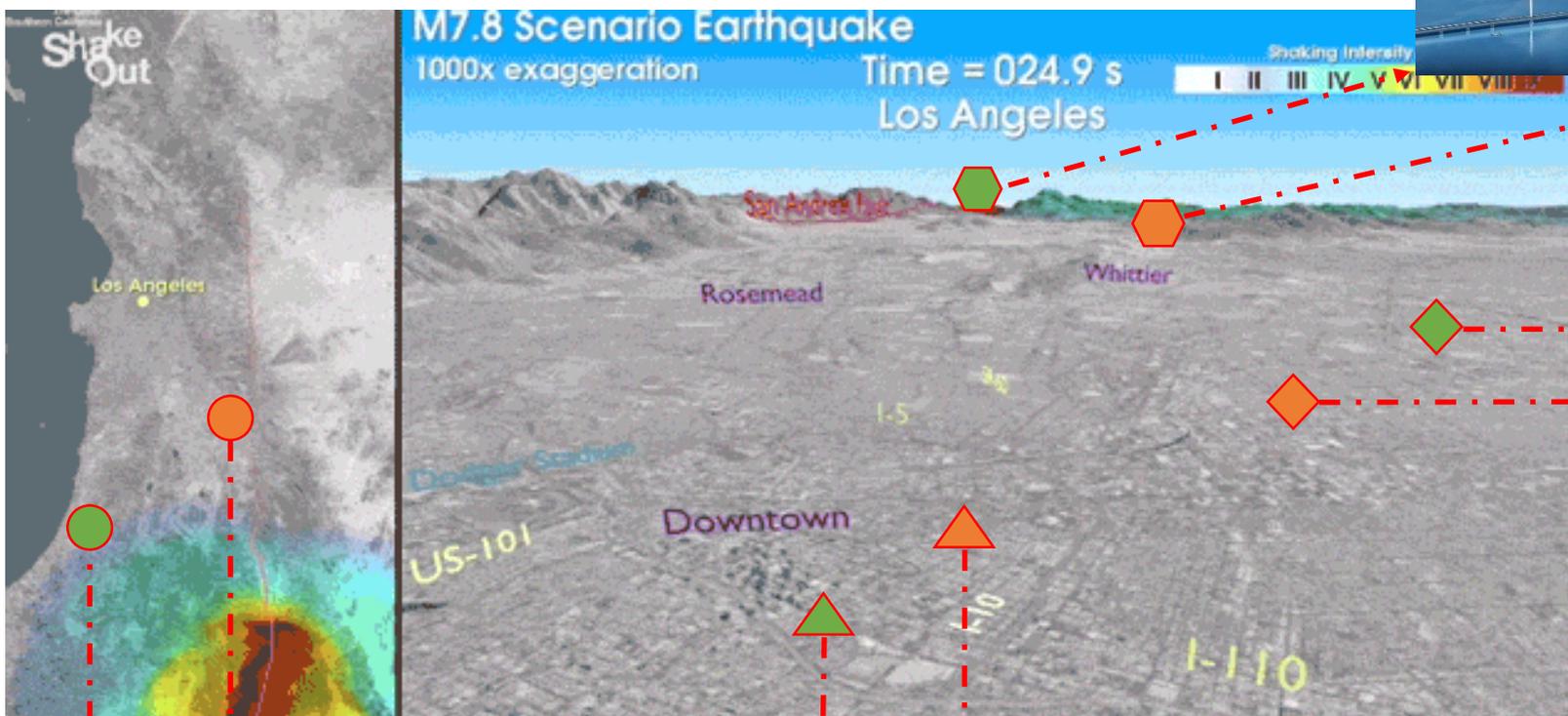
需从网络层面把握桥梁群的抗震能力，提升交通群网的抗震可靠性！

## ● 桥梁群网震后损伤评估面临的挑战

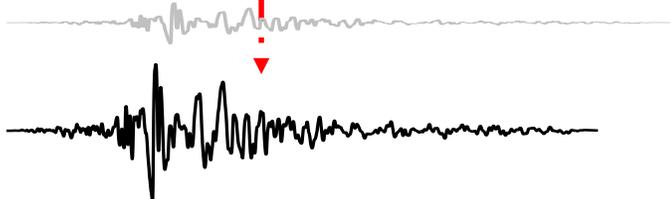
不同设计，桥梁抗震能力差异显著



不同龄期，桥梁老化程度差异显著



不同位置，遭受地震强度差异显著



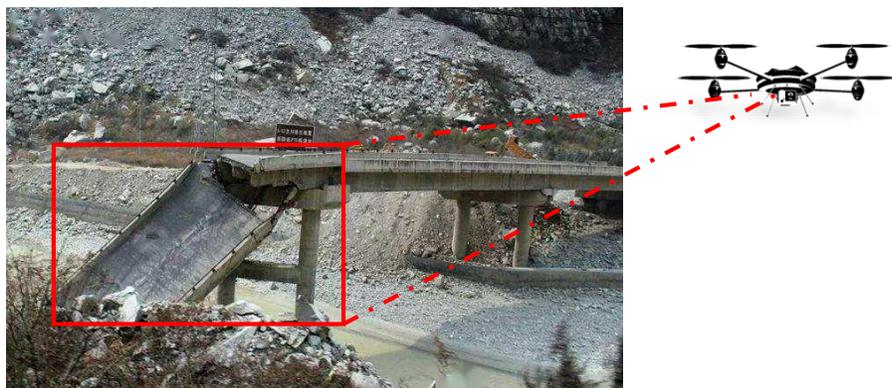
不同桥址，场地条件差异显著

如何考虑多源参数不确定性，快速给出区域桥梁群网震前/震后损伤评估结果？

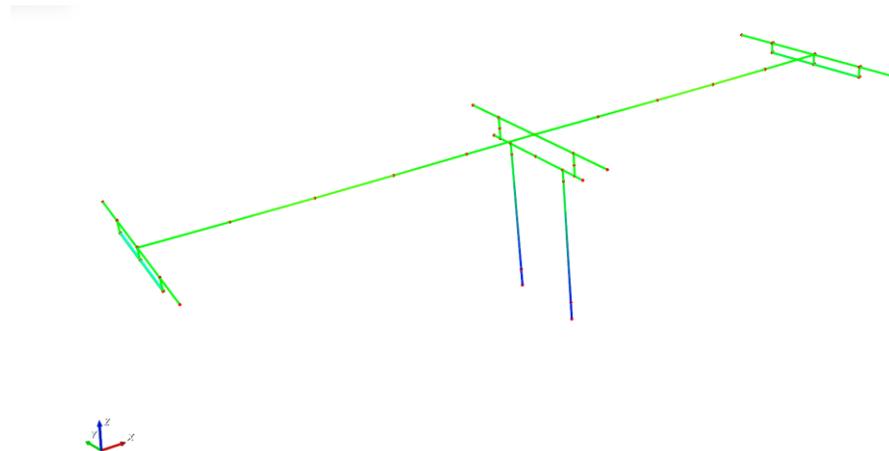
## 2 传统方法的一些问题

### ● 桥梁群震后损伤评判的既有方法

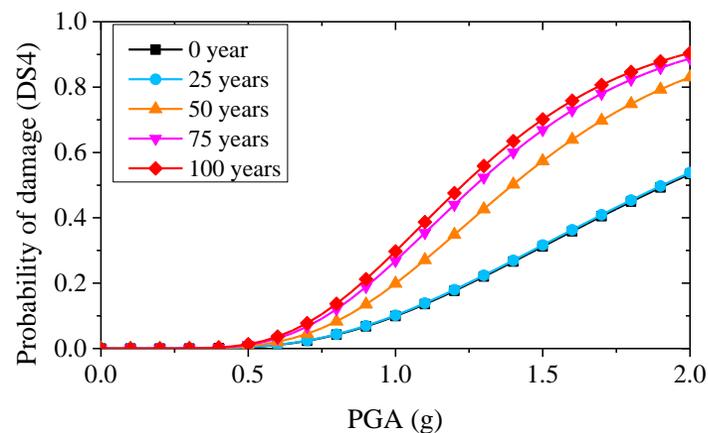
- 震后实地观察-显然不具有预测性



- 动力时程分析-费时、费力、效率低



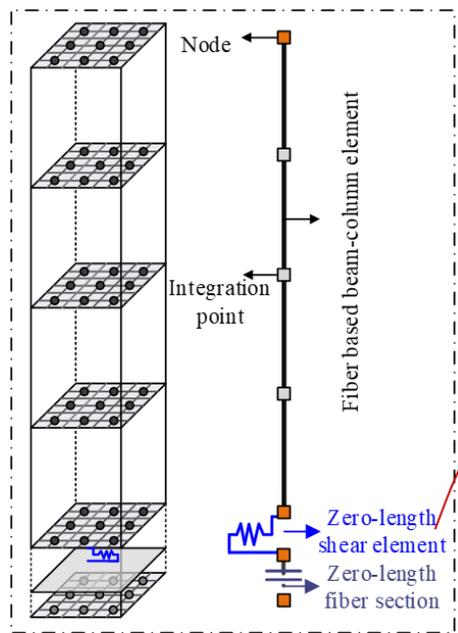
- 解析易损性曲线-不具有拓展性，忽略个性特征



高效率-高精度-震前/震后均可应用，还具有拓展性（桥梁改造/有机更新）

# 3 物-数融合的新方法

## 以物理机制为基础，结合新兴的人工智能技术有望开辟新的道路



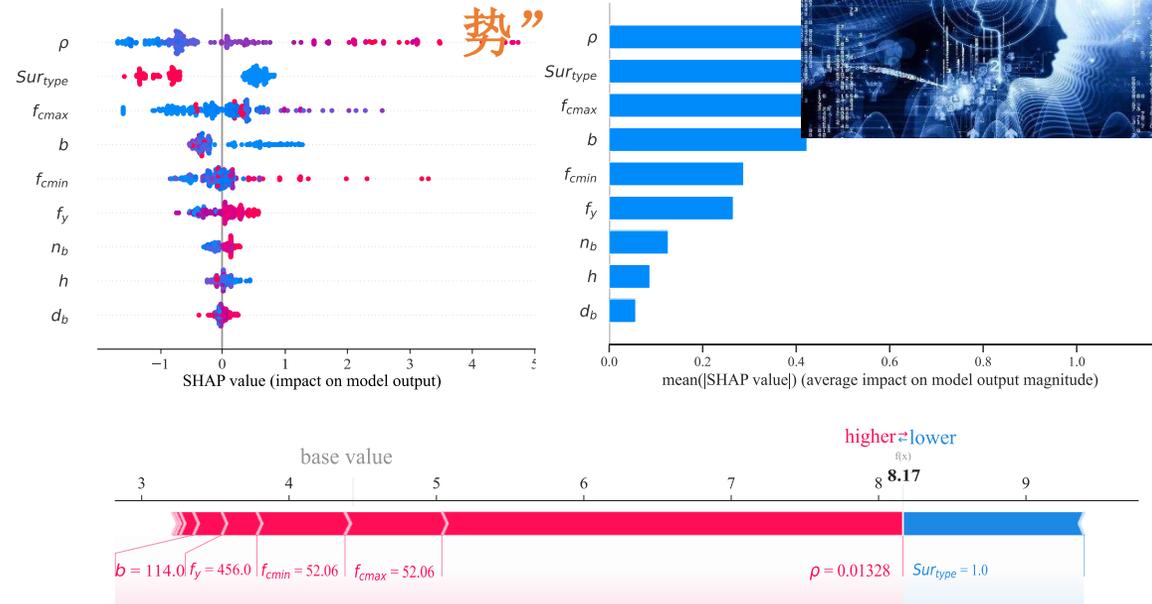
“更加逼近现实真相”



多失效模式融合的物理机制模型

Xu J-G et al. 2020 *SDEE*; 2021 *BEE*; 2021 *ES*

“某些方面无可取代的优势”



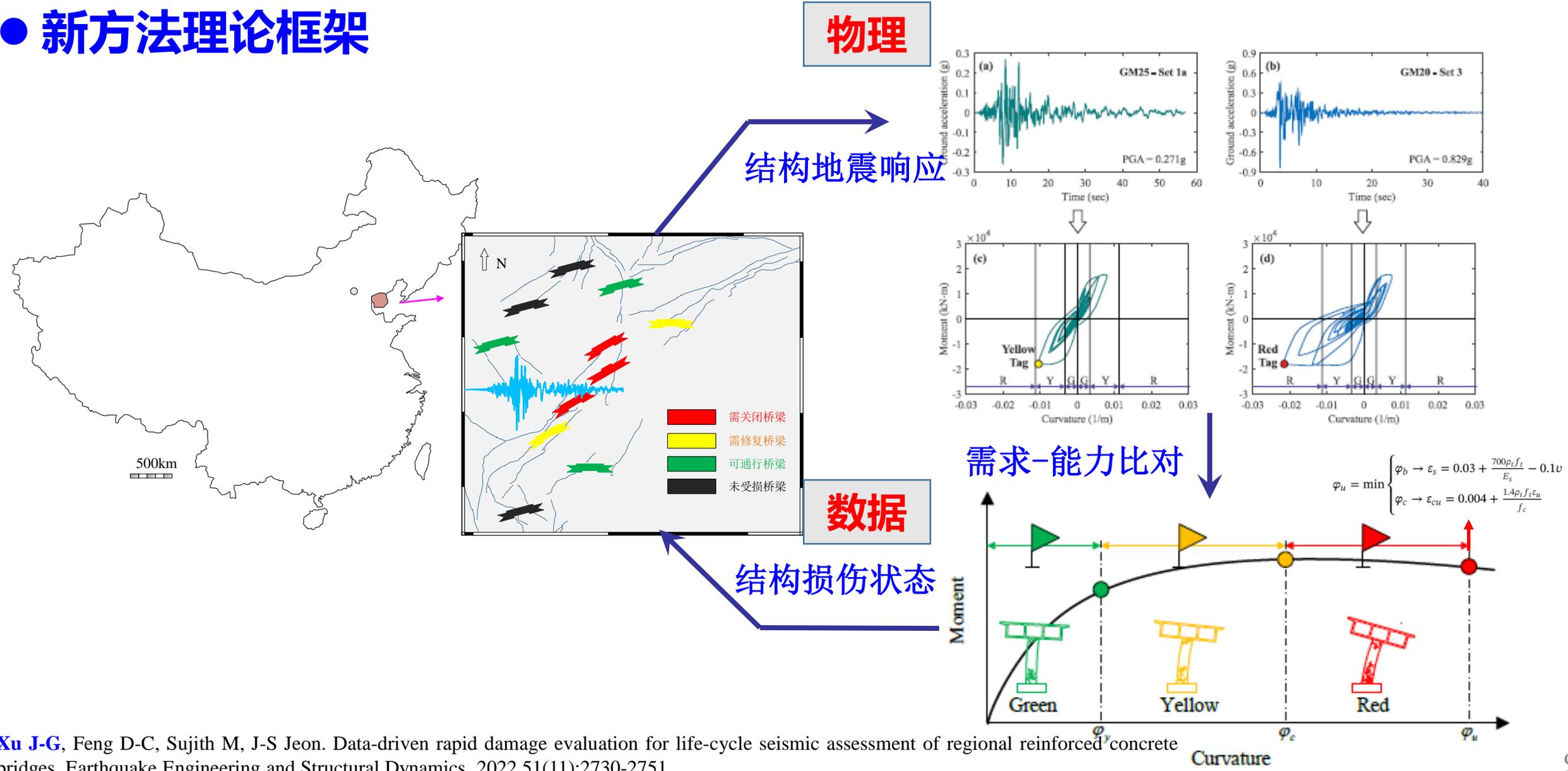
高精度可解释的人工智能模型

Xu J-G et al. 2021 *CBM*; 2022 *ES*

以单桥更加清晰化、精细化、精准化的物理模型为基础，融合高效率、高精度、可解释的人工智能模型，有望突破传统方法面临的精度与效率间难以协调的问题。

# 3 物-数融合的新方法

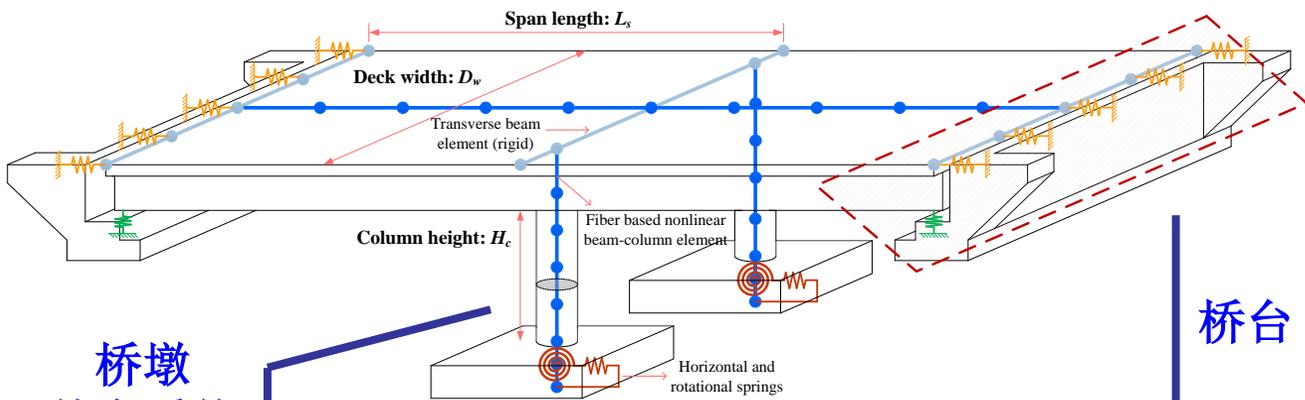
## 新方法理论框架



Xu J-G, Feng D-C, Sujith M, J-S Jeon. Data-driven rapid damage evaluation for life-cycle seismic assessment of regional reinforced concrete bridges. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2022.51(11):2730-2751.

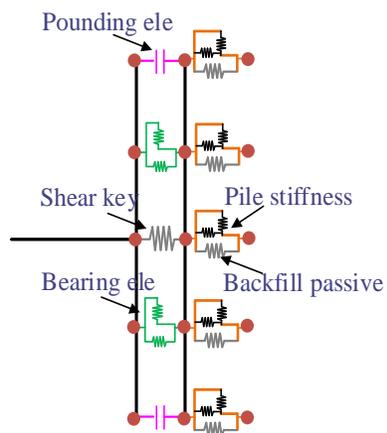
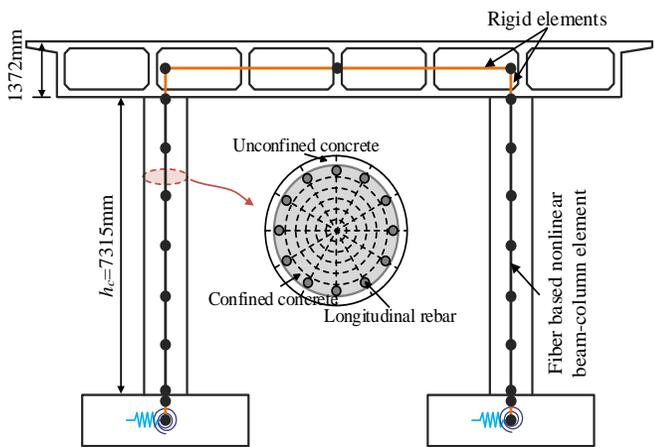
# 3 物-数融合的新方法

## 基础物理模型



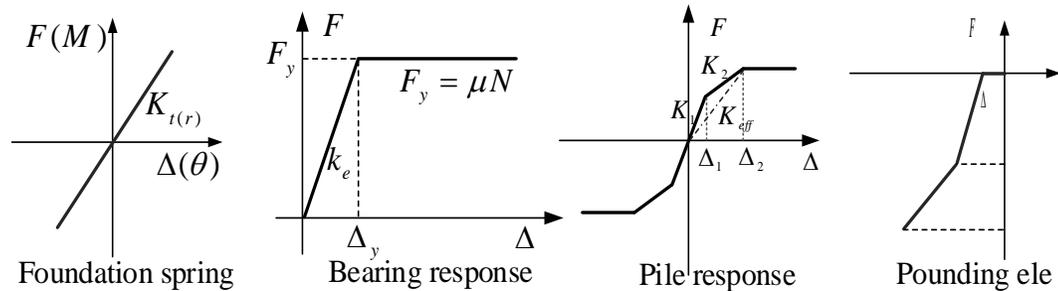
桥墩  
基底系统

桥台



精细化有限元模型

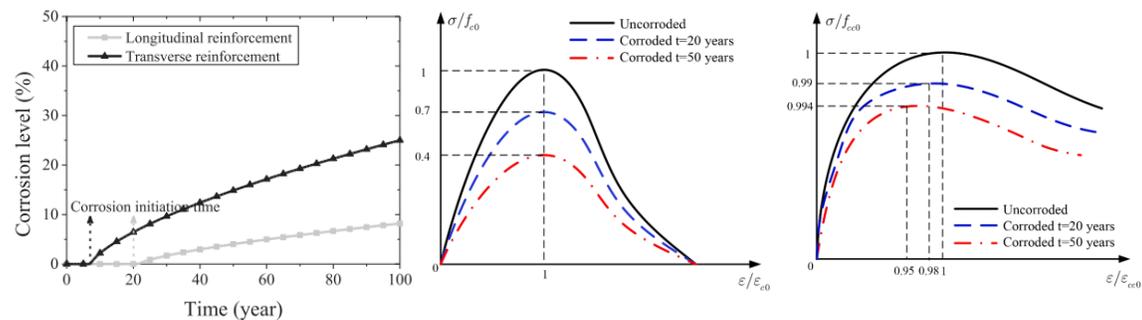
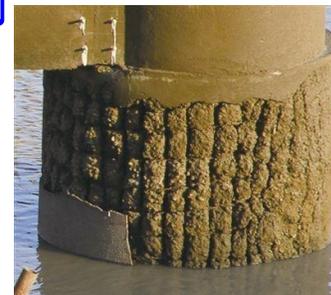
## 部分材料本构关系



## 时变锈蚀效应的影响

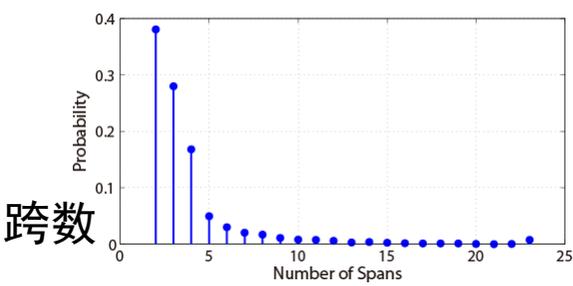
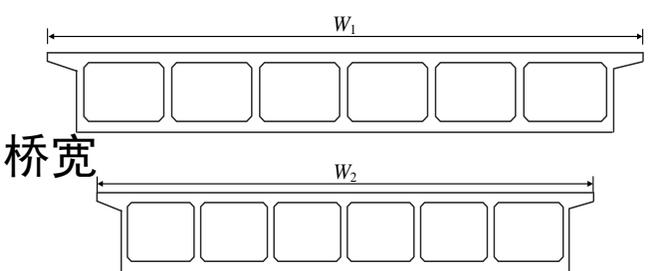
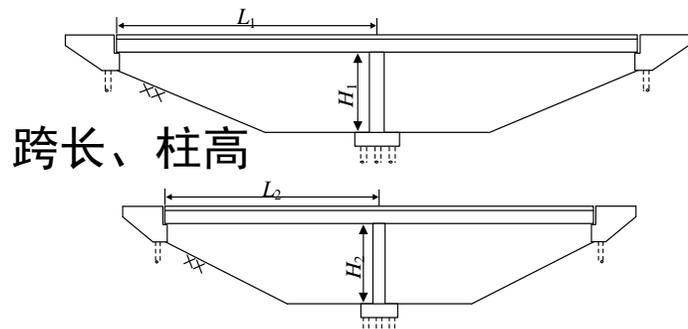
$$T_0 = X_I \left\{ \frac{x_c^2}{4k_e k_t k_c D_0 t_0^n} \left[ \text{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_{cr}}{C_s} \right) \right]^{-2} \right\}^{\frac{1}{1-n}}$$

$$r_{cr}(t) = \frac{32.13(1 - w/c)^{-1.64}}{x_c} (t - T_0)^{-0.29}$$



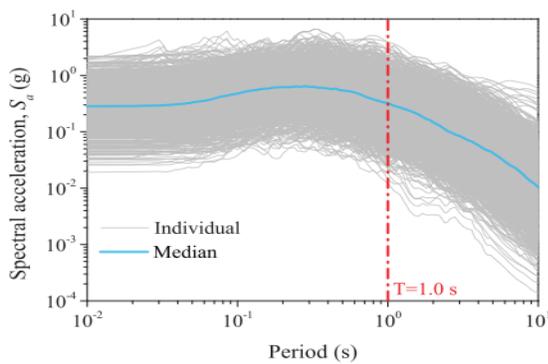
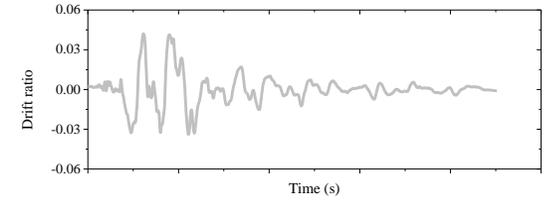
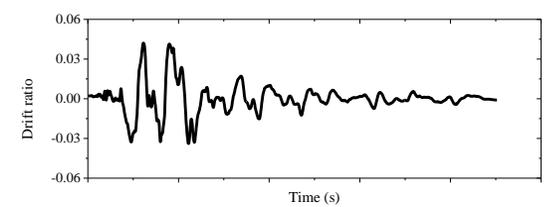
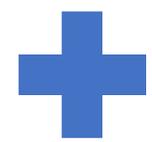
# 3 物-数融合的新方法

## 多源不确定性考虑

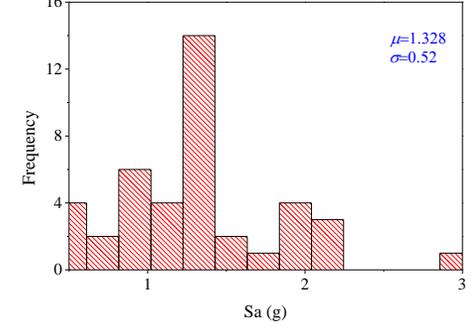
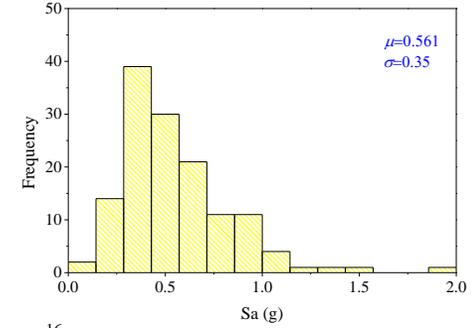
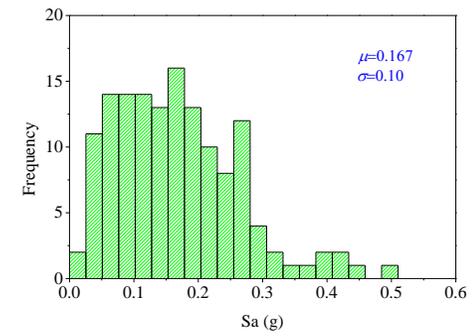


结构参数

LHS



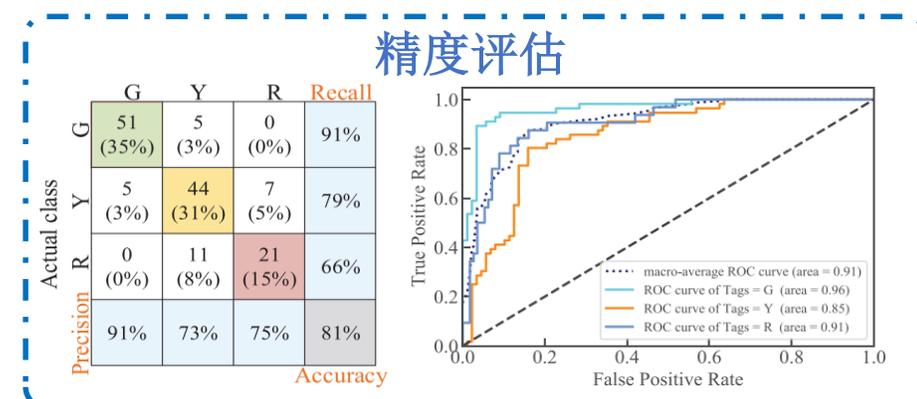
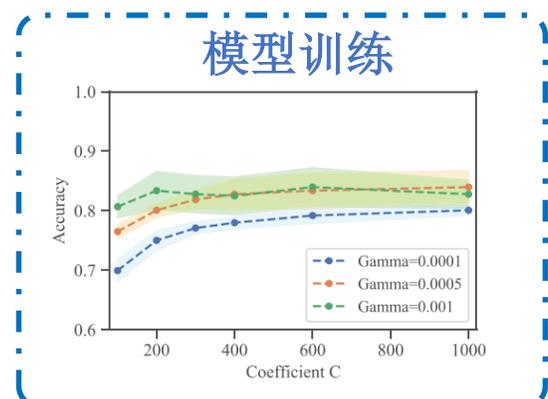
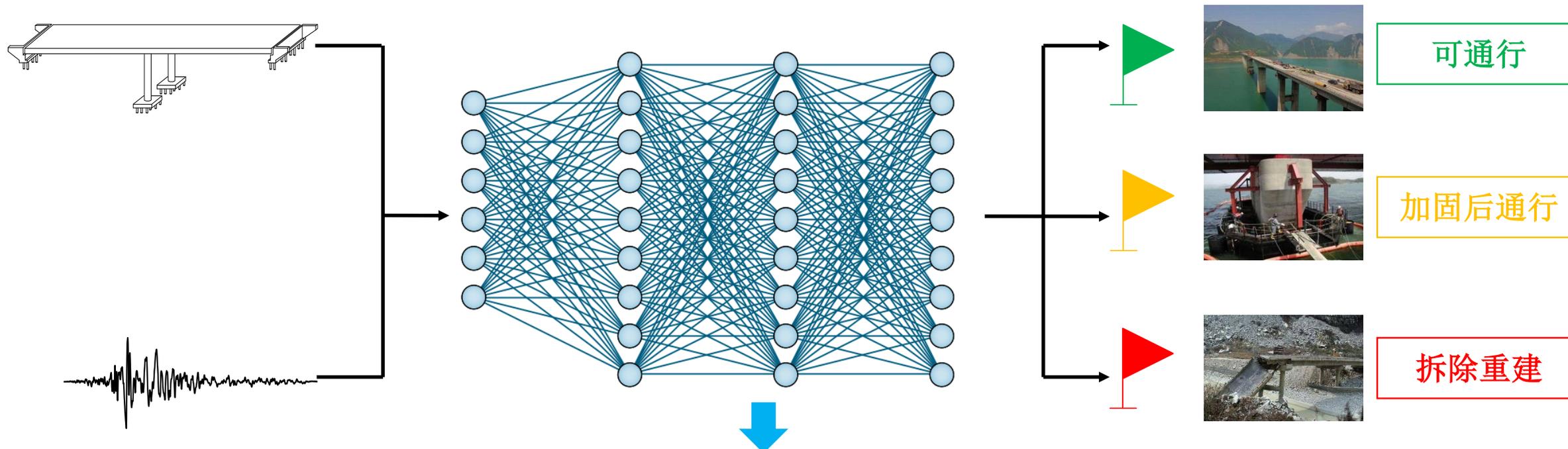
地震参数



震后损伤状态

# 3 物-数融合的新方法

## 机器学习：桥梁-地震动-损伤状态高维映射



# 3 物-数融合的新方法

## 机器学习：桥梁-地震动-损伤状态高维映射

**ANN** Predicted class

		G	Y	R	Recall
Actual class	Precision	49 (34%)	7 (5%)	0 (0%)	88%
	G	9 (6%)	38 (26%)	8 (6%)	70%
	Y	0 (0%)	12 (8%)	20 (14%)	62%
Accuracy		84%	67%	71%	75%

(B)

**SVM** Predicted class

		G	Y	R	Recall
Actual class	Precision	48 (33%)	8 (6%)	0 (0%)	86%
	G	6 (4%)	47 (33%)	3 (2%)	84%
	Y	0 (0%)	14 (10%)	18 (13%)	56%
Accuracy		89%	68%	86%	78%

(C)

**GBDT** Predicted class

		G	Y	R	Recall
Actual class	Precision	51 (35%)	5 (3%)	0 (0%)	91%
	G	4 (3%)	44 (31%)	8 (6%)	79%
	Y	0 (0%)	13 (9%)	19 (13%)	59%
Accuracy		93%	71%	70%	79%

(E)

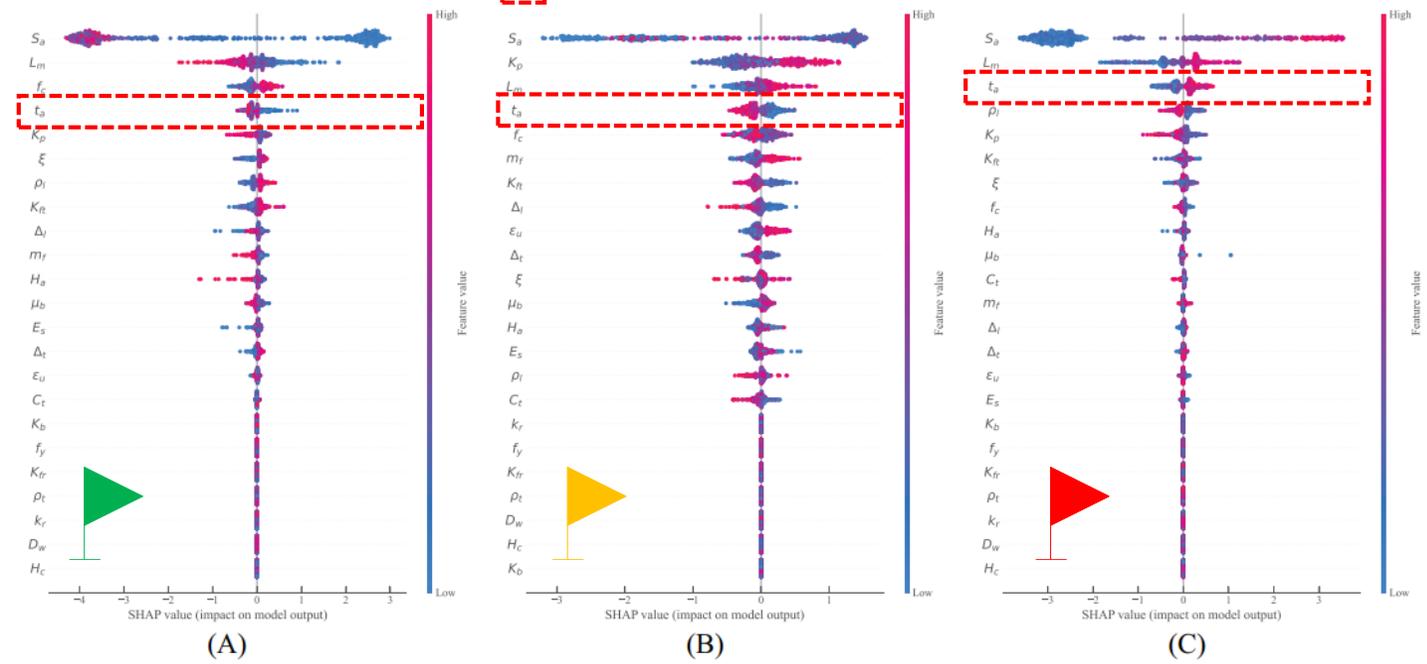
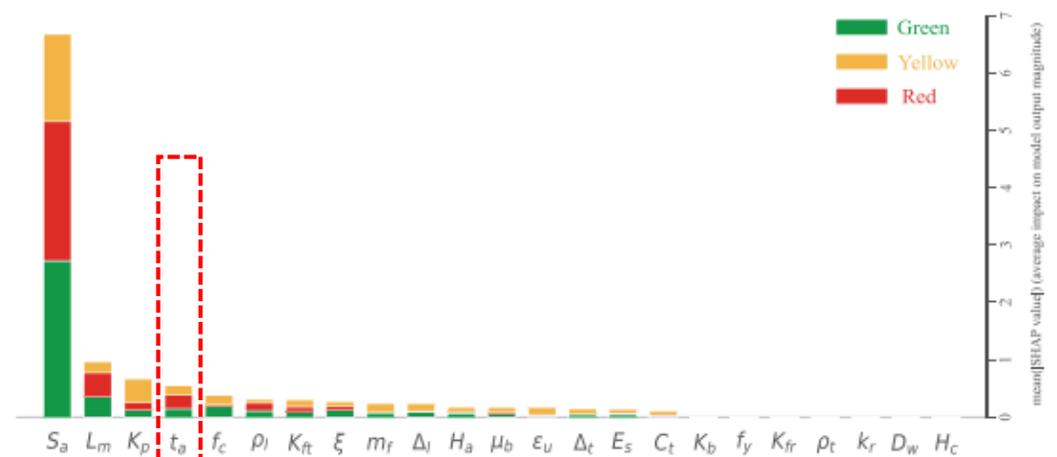
**XGB** Predicted class

		G	Y	R	Recall
Actual class	Precision	51 (35%)	5 (3%)	0 (0%)	91%
	G	5 (3%)	44 (31%)	7 (5%)	79%
	Y	0 (0%)	11 (8%)	21 (15%)	66%
Accuracy		91%	73%	75%	81%

(F)

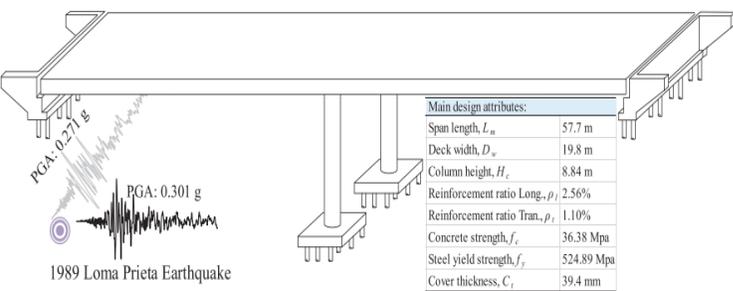
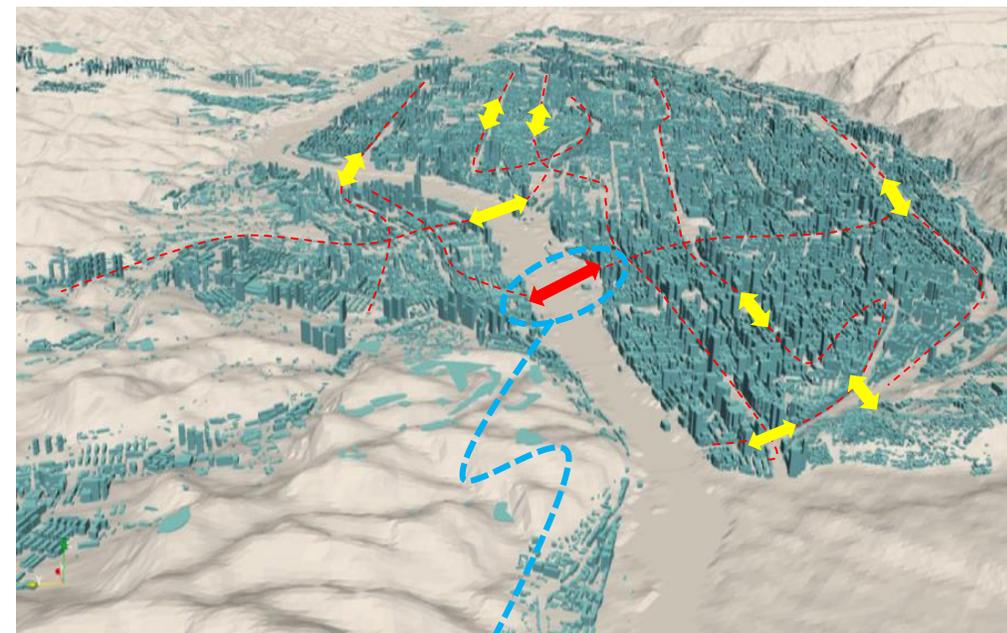
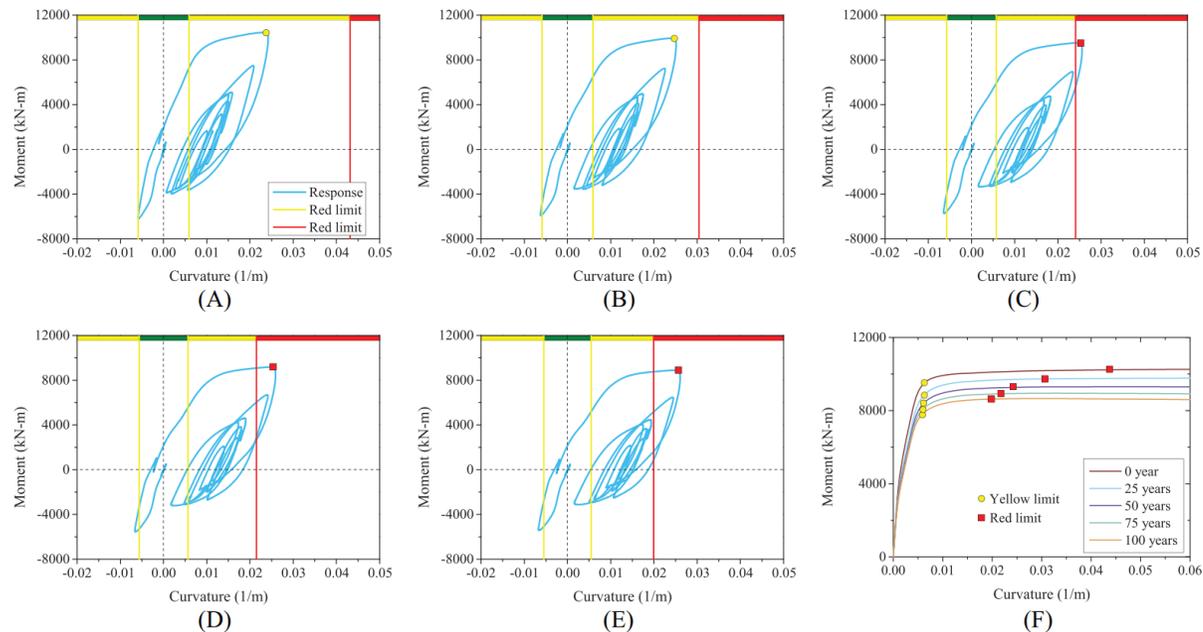
影响因素排序

影响程度排序

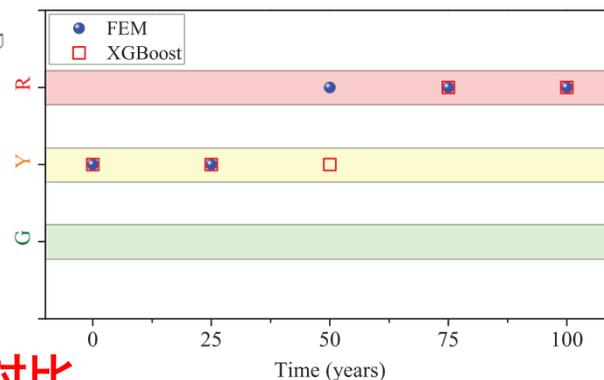


# 3 物-数融合的新方法

## 单桥应用-寻找网络中最不利桥梁



Main design attributes:	
Span length, $L_s$	57.7 m
Deck width, $D_w$	19.8 m
Column height, $H_c$	8.84 m
Reinforcement ratio Long., $\rho_l$	2.56%
Reinforcement ratio Tran., $\rho_t$	1.10%
Concrete strength, $f_c$	36.38 Mpa
Steel yield strength, $f_y$	524.89 Mpa
Cover thickness, $C_t$	39.4 mm



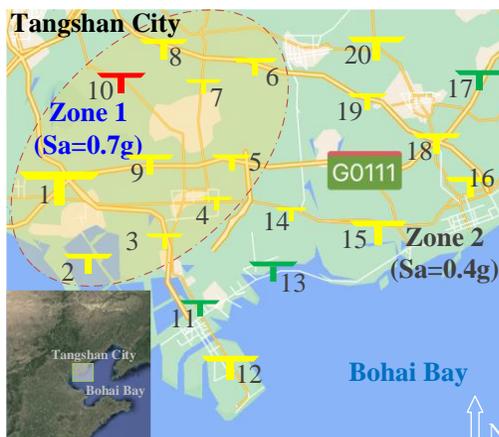
与数值仿真对比

识别出桥梁群网中最不利桥梁，  
及时加固干预，保证桥梁网络可  
靠性。

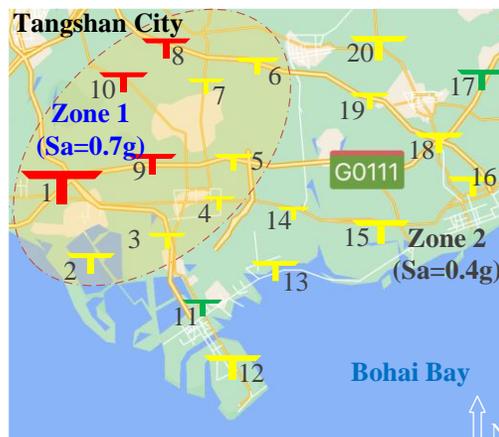


# 3 物-数融合的新方法

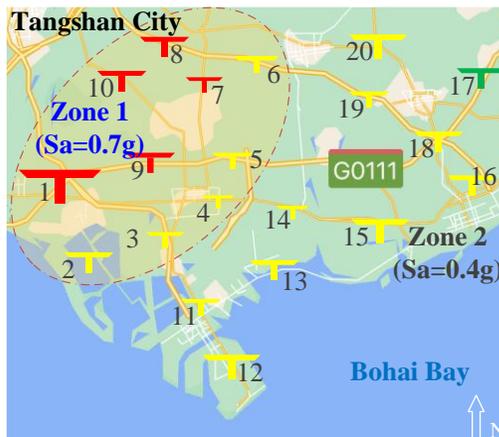
## 群体应用-整体抗震可靠性有效评估



0年



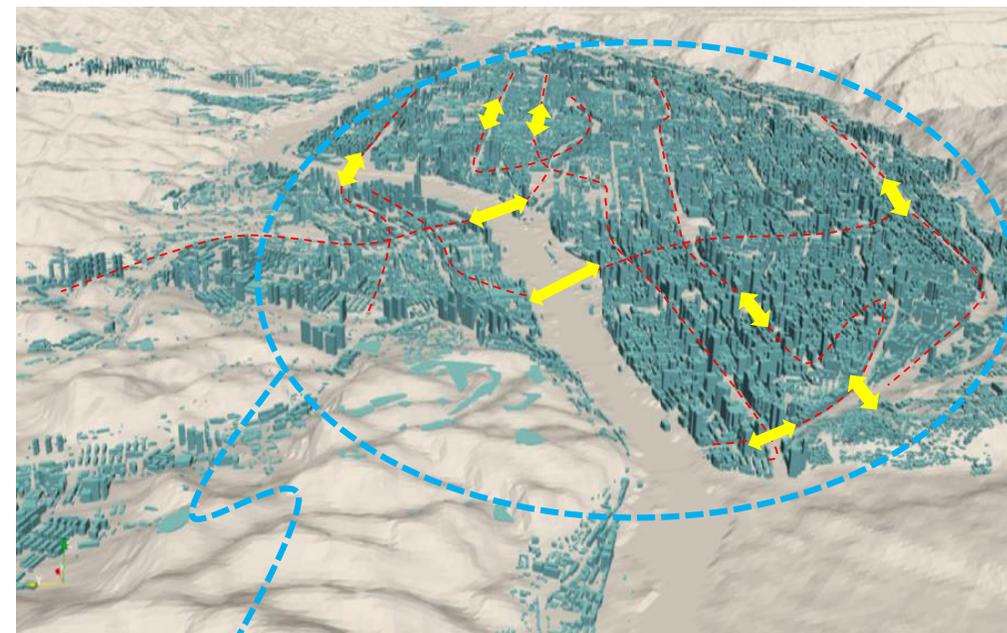
50年



100年

大尺度、全寿期

30%桥梁发生Tag转变



对桥梁网络震后损伤状态进行评估，方便震后及时赈灾救援决策。



## 总结

- 物-数融合方法能够具有突出的优势：物理机理为基础，解决大规模计算问题
- 区域桥梁群网震后损伤状态受到地震动强度、服役时间的影响

## 展望

- 更多桥型纳入到桥梁群网损伤评估当中
- 桥梁其他部件纳入到损伤评估当中

**衷心感谢各位专家老师  
恳请批评指正!**

徐积刚  
南京工业大学 土木工程学院  
邮箱: [jgxu@njtech.edu.cn](mailto:jgxu@njtech.edu.cn)