

## 建筑结构可靠性与建筑结构缺陷的相关性探讨

To Insure the Mutual Functions of Unneglectable Factors of Defects in Building Construction Stability

于广明<sup>1</sup> 郑庆功<sup>2</sup>

(青岛建筑工程学院, 博士、教授<sup>1</sup>; 讲师<sup>2</sup> 青岛 266033)

赵建锋

(北京工业大学, 博士 北京 100022)

于英年 周革强

(青岛市建委, 高级工程师 青岛 266033)

经过众多科学家的不懈努力, 我国的建筑业在材料、设计和建造等方面已经接近国际水平, 并在个别领域内达到国际先进水平, 为国民经济发展做出了极大贡献。但当我国的建筑业发展到一定规模、并已能够满足社会经济发展的需求后, 建筑业便应把重心转移到已有建筑物的可靠性和城市建设的可持续发展问题上, 来适应我国经济大飞跃的环境, 继续发挥建筑业在国民经济发展中的支柱作用。土木工程学科在时间域上应主要把课题沿着工程及其耦连系统的整个“生命周期”的维护上, 以可靠性(包括安全、适用和耐久性)为研究的主线。

### 一、从建筑结构失稳了解其结构缺陷对功能的损害

近些年来, 国外如巴基斯坦、印度、韩国及我国的四川、福建、浙江、江西、安徽等地多次发生建筑物突然倒塌事件。一栋建筑物在极短的时间之内就自行坍塌, 仅在地面存留几根断柱, 其毁坏程度与经受强烈地震或爆破拆除相仿。

建筑结构失稳是在所处环境变化和结构本身演变过程中失去固有平衡而造成的功能失效或破坏的突发性灾害。一般而言, 建筑结构的使用期可达几十年, 甚至上百年, 而建筑结构缺陷, 如构建材料的初始损伤和老化、环境腐蚀等, 载荷的疲劳效应以及所处环境的应力变化等, 均可影响建筑结构的正常使用, 制约建筑结构的耐久性、安全性、适用性。这些致灾因素的耦合作用将不可避免地导致建筑结构的损伤(缺陷)积累和抗力衰减, 从而使其抵抗自然灾害的能力下降, 进而失去原有的平衡性。我国经过近些年大规模建设, 落成了大量的各类建

筑结构。建筑结构落成后面临的是各种因素作用下的灾变危险。例如: 我国城镇现有建筑已超过 70 亿平方米, 有近 35 亿平方米的建筑物面临灾变的危险, 近 10 亿平方米急需维修加固才能正常使用; 我国现有公路桥 5 000 余座, 总长 130 公里, 有 2 000 余座的桥梁都存在结构性的缺陷、不同程度的损伤和功能失效的隐患; 我国已建成高百米以上的大坝 32 座, 但由于原材料内部缺陷、施工工艺、地基变形和温度变化等原因, 已造成某些坝体中的原生裂缝扩展、新生裂缝增加和岩体滑坡等灾变现象。

从上述情况的分析表明, 建筑材料内部损伤、建筑结构内部缺陷及其演变规律是建筑结构失稳破坏的内因。建筑结构缺陷对其功能造成以下重大影响。

1. 对建筑结构安全性的影响。结构在预定的使用期限内, 应能承受正常施工、正常使用时可能出现的各种荷载、外加变形、约束变形等的作用, 在偶然荷载作用下或偶然事件发生时和发生后仍应能保持结构的整体稳定性, 不发生倒塌或连续破坏; 而缺陷的存在, 却可能动摇其整体稳定性。

2. 对建筑结构适用性的影响。结构在正常使用荷载作用下具有良好的工作性能, 如, 不发生影响正常使用的过大挠度、永久变形和动力效应, 不产生使用者感到不适的裂缝宽度; 而缺陷的存在, 必然吸收外载, 进而造成大量隐含后患的裂缝。

3. 对建筑结构耐久性的影响。结构在正常使用、正常维护下和在足够的使用期内, 应有足够的耐久性; 然而缺陷会使混凝土保护层炭化、裂缝宽度增大、钢筋锈蚀等, 最终将影响结构的使用寿命。

因此, 研究建筑结构自身的损伤(缺陷)及其演化规律, 掌握建筑结构系统失稳机理和规律, 为建

筑结构防灾设计和防护研究提供新的研究方向,从而为建筑结构失稳破坏预测、评估和加固提供理论指导,其意义十分重大。该研究方向已是建筑行业经过大规模扩展后,尤应考虑、重视的问题和应予以实施的最主要工作。

## 二、建筑结构失稳的复杂性分析

1. 建筑结构失稳根源的复杂性。建筑结构失稳的诱导因素众多,自然因素如地震、风雨等;人为因素如施工、碰撞等;建筑结构自身因素如内部缺陷、空间尺寸、空间形状、自重载荷演化等,外载如震动、冲击等,且这些因素耦合作用于建筑结构上,表现出极其复杂的多点输入、多点响应及非线性相互作用特征。

2. 建筑结构自身的非连续性。前已叙述,缺陷广泛存在于建筑结构中。就以目前建筑行业中广泛应用的混凝土来讲,通过显微镜对混凝土内微观结构进行的研究表明,即使在加载以前,混凝土内部已有微观裂缝存在。这种微观裂缝一般首先在较大骨料颗粒与砂浆接触面上形成,即所谓的粘结裂缝。这是由于水泥砂浆在混凝土硬化过程中干缩而引起的,说明砂浆与粗骨料接触面处是混凝土内部的薄弱环节,从而导致混凝土具有较低的抗拉强度。由于骨料与砂浆的刚度不同,在加载过程中,这种裂缝还将进一步发展,以至使混凝土应力应变曲线呈现非线性。

3. 建筑结构失稳演变与其所处地质环境的相关性。大规模工程活动在不同程度地改变和重塑地质环境,地质环境对工程活动的影响与制约作用也愈加广泛与深刻。大规模工程活动破坏了初始地应力平衡状态,改变了岩土性质及绕动水文地质条件,从而可能诱发各种地质灾害。例如我国上海、北京、天津、西安、沈阳等 46 个城市,由于大规模的市政建设而出现了地面沉降问题,总沉降面积 4.87 万平方公里,最大沉陷量已达 3 米。地面沉降使建筑本身固有缺陷进一步发展,导致建筑物变形开裂和基础设施损毁。国内外均已认识到岩土环境给基础设施和建筑结构带来潜在灾害的巨大隐患。

4. 附加应力作用的多态性。外载来源于地震、振动、风雨、地下开挖等,并以多种形式作用于建筑结构上,有静力,也有动力,由一维到多维乃至整个时空范围,从单个作用点到多个作用点乃至到各个面、体,最终导致建筑结构发生极其复杂的附加应力分布,并发生非线性的力学响应。

5. 自身载荷演化的动态性。自身载荷随着外力的作用形式和建筑结构的变形和倾斜方式而发生一系列的变化,由静态转变为动态。

6. 建筑结构失稳的非线性。建筑结构在复杂的

应力场中,将遭受复杂的失稳破坏。因其材料非线性、几何非线性及受力多态性和作用多点输入性等原因,导致建筑结构失稳表现出强烈的非线性屈曲形式(分叉点屈曲、极值点屈曲);同时其失稳又是经过一定的孕育过程而演化到突变的,该过程中表现出众构件受力、开裂折断和坠落的连锁反应和多米诺效应。

## 三、建筑结构缺陷协同演化的特征及其导致突变失稳的防治对策

建筑结构的损伤(缺陷)演化伴随着建筑物失稳从孕育到倒塌的始终。然而,建筑结构最终破坏是从建筑构件、结构缺陷开始的,是众多结构缺陷扩展、集聚的总和。而实际上单独缺陷由最初的随机分布向破裂面集中演化的现象是耗散系统从无序向有序演化所表现出的特有特征,而建筑物失稳破坏恰是众多缺陷扩张演化的群体行为。该行为符合一般非线性系统演化规律,即具有明显的自组织临界特征, H. Haken 为描述这种特征提供了有力的工具——协同学。

根据十几年对采动引起建筑物失稳现象的研究经验,我们清楚地认识到,建筑结构不断与外界有着能量和物质的交换,是一个开放系统,在内、外力共同作用下,建筑结构内部的各级结构单元(可视为子系统)自身分岔、互相影响、协同扩展,表现出明显的非线性相互作用;同时,结构缺陷应力响应是随机的,即随机涨落导致建筑物失稳。若将建筑结构作为整体系统,并以其内部缺陷分布的空间位置为中心,将其划分为众多子系统,则各子系统将发生非线性相互作用,以致使建筑结构系统进入新的平衡态,从而使最薄弱的子系统首先破坏;该子系统的破坏将释放一定的表面能和引起整个建筑结构内部应力在各子系统之间的再次重新分布,又致使相邻薄弱系统吸收前一个子系统释放的能量而发生破坏。这样依次下去,建筑结构内各子系统的变形破坏表现出明显的“相干效应”和“协同效应”。这种连锁反应最终导致一个新的在宏观尺度上的具有时间、空间和功能结构的再生(即破坏了)的结构系统。可见,建筑结构失稳的孕育和发展中表现出开放性、非平衡性、非线性作用及随机涨落导致突变失稳等特征。而在以往的研究中,人们往往只认识建筑结构失稳的最终结果,对其失稳孕育的中间过程认识不够,所以,有时造成严重的预计偏差或错误。因此,应用协同学从根基上来认识和研究建筑结构失稳孕育和发展过程,对建筑结构失稳机理的深入研究、建筑结构失稳的正确预测无疑是极其有益的。为了实现这一目标,必须对建筑结构内部的缺陷(子系统)的开裂和演化机制、协同扩

## 整治长江口, 开发长江新三角洲

Realignment of the Changjiang River Mouth and Development of the New Changjiang River Delta

张 引

(上海市八中 上海浦东博山东路 20 弄 22 号 203 室 200135)

### 一、整治长江口有史可鉴

长江口与重迭的古今水下三角洲并存。今自仪征迤东两岸, 多取“圩”为地名, 实乃是一部活生生的历尽沧桑开拓 5 万  $\text{km}^2$ 、并束窄加深长江河道的长江三角洲围垦圩田史。

我国最早历史文献《尚书·禹贡》载有: “三江既入、震泽底定。”指的是夏禹凿通三江排涝泄洪入海之事。“震泽”今称太湖, “底定”后渐有“三江五湖”、苏杭“天堂”之盛。

溯自公元七世纪盛唐迄今, 禹贡三江先后成为我国涉外海港。此期间, 自然变迁、盛衰兴废、成败治迹, 史不绝书, 于浩繁卷帙中。当年曾为滨海渔村之上海, 藉海港之利, 终于发展为近代世界大都市、成为我国经济中心。这段历史资料, 近期已在《上海

港史》、《上海水利志》、《长江航道史》等地方史志上整编刊出, 可供借鉴。

今上海西部北起嘉定娄塘、南尽奉贤柘林有三道冈, 形成宽 2~ 8km 的冈身地带遗迹。据同位素年龄测定推断: 长江三角洲以年均 40m 东进, 长江与钱塘江江岸沙嘴间, 由上纳百川之水的洼地渐成泻湖, 其海岸缺口为江海泥沙葑淤, 冈身遗迹乃是距今 4 000~ 6 000 年前远古上海的 3 道海岸线。无独有偶, 现已为三角洲的苏北平原黄河故道口, 也有 4 道冈及冈身地带遗迹。这显示出海洋对于长江三角洲的海岸河口, 有以长江流失水土为物质来源、葑淤成岸的自然本能。

长江口内深外浅, 陆标口门内- 10m 等深线与口外- 10m 下边界间隆起的拦门沙系海岸带, 正处于局部、持续葑淤过程中, 因百倍于太湖水源的长江挟沙径流外泄而形成现有的三汊四槽五滩相间

展, 以及建筑结构内的无序因素如何协同影响其力学性能等问题进行深入细致的研究, 以便建立建筑结构失稳的缺陷协同演化方程, 并在此基础上从以下 3 方面拟制缺陷协同演化导致建筑结构突变失稳的防治对策。

1. 必须澄清建筑结构中缺陷的损伤演化规律, 进而研究建筑结构的协同失稳机理, 即: 研究地震、地下开挖等外力对建筑结构的影响及其传播机理; 分析建筑结构自身的缺陷分布特征及其在外力作用下的协同演化机理; 采用先进的损伤力学、分形几何、协同学和突变理论对建筑结构进行应力分析及数值模拟, 以求为建筑结构失稳破坏预测和评估提供新的理论指导。

2. 以上述研究方向、成果为指导, 将建筑结构缺陷相互作用因素考虑到抗震设计中, 在抗震概念设计的基础上, 进行抗震计算设计, 即在抗震定性设计的基础上进行定量设计, 并采取相应措施。

3. 检测建筑结构缺陷分布规律, 对建筑物进行安全性评价, 进而采取加固措施。

### 参 考 文 献

- [1] Alavi, B. and Hehnt, K. . Consideration of Near- Fault Ground Motion Effects in Seismic Design. Proceeding of 12WCEE, 2000
- [2] Yu Guangming, Zhao Jianfeng, Xie Heping. Numerical Simulation of Fractal Interface Effect of Mining- Caused Activation of Fault. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2002, 7(3): 151~ 155
- [3] Haken. H. Advanced Synergetics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1983
- [4] 国家自然科学基金委员会. “十五”优先资助领域论证报告集. 北京: 原子能出版社, 2002
- [5] 中华人民共和国科学技术部, 国家自然科学基金委员会. 中国基础学科发展报告. 北京, 2001
- [6] 赵国藩著. 工程结构可靠性理论与应用. 大连: 大连理工大学出版社, 1996
- [7] 李田, 刘西拉著. 混凝土结构耐久性分析与设计. 北京: 科学出版社, 1999
- [8] 于广明, 杨伦. 采动建筑物调平试验研究, 岩土工程学报, 1997, 19(1): 79~ 81

(责任编辑 王宏章)