

建筑工程事故分析及方案论证

谢征勋

地震出版社

1996

建筑工程事故分析及方案论证

谢征勋

地震出版社

1996

建筑工程事故分析及方案论证

谢征勋

责任编辑:张崇山

责任校对:王花芝

地质出版社出版

北京民族学院南路9号 邮编:100081

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 14.25印张 364千字
1996年4月第一版 1996年4月第一次印刷

印数 0001—3000

ISBN 7-5028-1259-8/TU·114

(1690) 定价:16.00元

前 言

本书收集的关于工程事故分析与技术方案论证方面的 46 篇文章(含译文 6 篇),是笔者 40 余年从事工程建设实践过程中工作总结的片断。虽然没有多少理论性的东西,但却是实实在在的经验,为此曾付出血与汗的代价。自然,这份代价并非由某一部分人所能支付,更非笔者个人所能支付,而是由我们国家、社会与人民共同支付的。只要回顾一下建国以来的工程事故记录,就不难掂量这份代价的分量了。编撰本书的目的就是为了把这些片断的经验总结整理出来,提供给工程界广大读者借鉴,使我们在今后的建设工作中少走弯路,少犯错误,少付代价。

全书共分上、下两篇。上篇收集了工程事故分析专论 30 篇。这些文章均先后在《工业建筑》、《建筑结构》、《特种结构》、《建筑技术》等期刊上发表过,其中 7 篇已收进《建筑工程事故分析及处理实例应用手册》。其中有的文章,如《大楼坍毁事故》、《多层大模板住宅墙体裂缝事故》等在发表后曾收到有关读者来信,对理论分析方面的论点提出过一些不同见解,由于笔者理论根底不深,不能作进一步的探讨,所以这里还是照原稿刊出,希望得到更多读者的指正。另外,书中有些文章在发表时,由于时间关系,应用的是旧规范,在此不再按新规范一一改正,见谅。

任何一个工程,从规划设计到施工,都是由工程师们精心策划培育出来的。任何一个小环节上的粗心大意,均能酿成工程事故,危及工程安全,造成千古遗憾。正像人的成长过程,从母体的胚胎,到出生后的哺养教育,直到成人后的生活调理,每一个环节均不可马虎大意,否则就要生病、遭灾,甚至断送生命。诊断疾病要从量体温、摸脉搏着手;进行工程事故分析,则要从裂缝分析、沉降(变形)观测入手,去寻找事故原因,判断事故的严重性,然后采取果断的相应对策,以拯救工程于危急状态之中。因此,有造诣的工程师,不仅要懂得如何进行工程的设计与施工,也应该对工程事故分析的理论与实践有深入的研究。这里提供的事故分析专论 30 篇,希望对工程界开展工程事故分析研究工作起到抛砖引玉的作用。

下篇收集了技术方案论证 16 篇,大多是笔者近年来在海南从事技术咨询工作的案卷。海南自 1988 年建省成为特区以来,百业俱兴,经济蓬勃发展,建设规模更是空前。人们说海口像个大工地,其实整个海南也像个大地,高潮时期,尤其如此。由于海南底子薄,技术力量来自四面八方,数以千计的房地产开发公司、设计院和建筑公司,汇集了全国不少设计与施工技术力量,不乏精华,但也难免鱼龙混杂。反应在工程建设中是作品良莠不一,没有统一标准。一些重大建设项目的技术方案也往往草率从事。从这里收集的几个方案论证中就可以看出这些问题。自然,方案论证本来就是有争议的,是不同流派、不同技术观点的较量,孰是孰非,虽然可以用实践去检验,但是条条道路通罗马,究竟何者才是最佳方案,很难作出定论。然而,对重大工程的技术方案多作一些论证工作,慎重从事,终是有益的。这就是本书将这些工作记录公诸读者的目的。希望广大读者多予指正,也希望得到有关人士的谅解。

目 录

上篇 工程事故分析

已有建筑物可靠性评价.....	(3)
近年来的结构事故分析.....	(9)
砖混结构温差裂缝分析	(18)
砖混结构温度应力实用计算方法	(23)
多层大模板住宅墙体裂缝事故	(31)
现浇钢筋混凝土框架裂缝事故	(36)
钢筋混凝土柱身裂缝事故	(42)
厂房滑坡事故和螺孔串水事故	(46)
大楼坍塌事故	(51)
台湾省某中学礼堂坍塌事故	(56)
火灾损害事故	(62)
水池及管道浮起事故	(67)
遗漏钢筋事故	(71)
乱掺毛石事故	(75)
工程地质勘探事故	(78)
膨胀土地基破坏事故	(83)
软土地基沉降不均事故	(88)
岩土地基上的建筑物裂缝事故	(93)
黄土地基湿陷事故	(96)
软土地基上的谷仓下沉事故.....	(101)
液氮贮藏塔倾斜事故.....	(106)
海口某大楼倾斜事故.....	(113)
桩基事故分析.....	(116)
打桩事故.....	(122)
软土基坑开挖中的临时钢板桩挡土墙坍塌事故.....	(126)
灌注桩的容许沉降量和极限承载力问题初探.....	(130)
试论沉管灌注桩的抗水平荷载能力.....	(136)
试论海南地区大面积现浇钢筋混凝土屋盖性能.....	(141)
预应力混凝土反应堆安全壳的初应力浅析.....	(146)
因刚度不够而影响使用的特种结构事故二例.....	(152)

下篇 技术方案论证

论桩基础的可靠度·····	(159)
论海口市工程地质条件和补偿式基础的安全度·····	(164)
宁海大厦的设计与施工·····	(170)
预应力混凝土反应堆安全壳(PCRC)的安全度论证·····	(173)
核电站的安全屏障——预应力混凝土反应堆压力壳(PCRV)设计·····	(180)
对“高标准、短寿命”建筑物结构设计方案的探讨·····	(183)
金贸区某地下停车场工程设计方案论证·····	(188)
海口国际大厦基础工程坑壁支挡方案论证·····	(190)
对海口某大厦工程基础锚杆设计与施工方法问题的论证·····	(194)
某商业大厦工程基础设计方案论证·····	(196)
某文化城地下工程施工方案论证·····	(198)
SK 大厦工程基坑支挡与降水方案论证·····	(201)
海口某大楼纠倾方案论证·····	(203)
论整浇钢筋混凝土结构中的施工缝·····	(207)
漫谈海南房地产业中的质量监控和物业管理·····	(213)
从工程实践的全过程中切实把握工程结构的可靠性·····	(217)

上 篇

工程事故分析

已有建筑物可靠性评价^①

——兼谈虎丘塔的加固经验和工程事故中的教训

一、从虎丘塔的加固得到的启示

《建筑结构学报》1987年6月发表了陶逸钟“苏州虎丘塔——中国斜塔的加固修缮工程”^[1]一文,报道一个历经千年,危在旦夕的砖木结构古塔,得到了加固。据报道,该塔建于公元959年,主体结构采用黄泥砌砖,浅埋式独立砖墩基础,坐落在人工夯实的土夹石覆盖层上,覆盖层南薄北厚,从0.9m变化到3.6m,基岩弱风化。由于墩基底面上的计算压力高达 $84.7\text{N}/\text{cm}^2$,土夹石压实后引起不均匀沉降。实际的墩脚标高相差40cm,因不均匀沉降造成塔身倾斜,实测塔顶偏中2.34m,根据塔顶偏中计算的不均匀沉降量应为66.9cm(按八边形塔基的对角线13.64m及13.81m推算)。过大的沉降差引起塔楼从底层到第2层产生了宽达17cm的竖向劈裂。北侧壶门拱顶两侧裂缝发展到了第3层。砖墩压疏、碎裂、崩落。似此情况,堪称危如垒卵。经过精心治理,将危塔进行了彻底加固。以后如注意及时维修,像这样的一个砖木结构古塔,也许还会有几百甚至上千年的寿命。著名的意大利比萨斜塔堪称虎丘塔的姊妹塔,该塔建于公元1174年,晚虎丘215年。塔底圆径36m,高54.15m(虎丘塔高47.68m),为白云石砌筑,建于软土地基上,不均匀沉降量达3m,塔顶偏离中心4.4m,至今巍然矗立于比萨海港之滨,成为世界奇迹。据报道,有关方面也正在寻求加固方案。如果加固措施得力,则更有可能延寿千古。类似的古建筑,不胜枚举。

从虎丘塔、比萨斜塔等古建筑物的历史中能得到什么样的启示呢?多数纪念性建筑,如金字塔等,固然由于其重要性,保险系数大些,寿命理当长些。但虎丘塔之类的砖木结构,即使用现代结构力学的观点进行衡量,也不是特别坚固的,何况还存在地基处理不当的先天性缺陷,却能延寿千古。我国现存的寿命达数百年以上的民居也不少,景德镇保持完好的明代街坊就是一例。因此认为,充分延长建筑物的寿命,是一个值得探讨的很有经济效益和社会文化价值的问题。设想世界上所有较大的工业与民用建筑物都能保持千年以上的寿命,一般民居保持500年以上的寿命,则象征着人类文化遗产的历代建筑物将百花争妍,一齐出现于广大城乡,使整个世界成为一个灿烂多彩的博物馆,对促进世界文明,美化社会环境,将是一大贡献,带来的经济效益更是惊人。可以算这样一笔帐:目前我国城镇人均居住面积为 6.1m^2 ,约合建筑面积 10m^2 ,显然是极低的居住水平。北京、上海郊区人均面积已分别达到 21.6m^2 和 27.9m^2 ,也不能算是高标准。照目前发展速度,展望未来的30年(一代人),全国人均居住建筑面积可望达到 40m^2 。居住以外的其他建筑面积随生活水平的提高、社会文化的发达和工业的发展会有所提高。但随着社会信息化、微型电子化的进展,纯工业用建筑面积所占比重又将有所下降,所以居住用以外的建筑面积可按人均总建筑面积的40%考虑,也就是相当于目前小市镇的水平,则

① 本文原载《工业建筑》1989年第12期。

人均总建筑面积将达 70m^2 左右。如果全国人口稳定在 10 亿左右,则全国总建筑面积将达 700 亿 m^2 。照近年的建设速度,每年城乡竣工面积约 10 亿 m^2 (其中农村建筑 8.8 亿 m^2)^[2],则 70 年之内就可进行一次全面更新,并且达到人均面积 70m^2 的较高水平。不妨放慢点速度,讲究点质量,用 100 年左右的时间去实现全面更新,并且达到人均 70m^2 建筑面积的水平,则可腾出力量来,提高建筑物的质量,使之延长寿命至 500 年甚至 1000 年以上,那么下一代人就基本在居住问题上可以安守祖业,不必操劳了。将这些人力、物力用在其他经济发展方面去,将是受益无穷的。

怎样延长建筑物寿命,实际上目前需要探讨的只是一个建筑材料的耐久性问题。在钢筋混凝土占统治地位的今天,适当增强混凝土保护层厚度,从理论上探讨和解决混凝土的碳化问题,大力发展化学稳定性良好的陶瓷和天然石饰面材料,都是很有必要的,限于篇幅,本文不多涉及。

二、从已有工程事故分析中吸取的教训

与苏州古塔情况完全相反,有为数不少的现代建筑工程使用不久,甚至尚在建设中就坍塌。据不完全统计,我国“六五”期间,仅建工系统就发生过 400 余起坍塌事故。如果占全民建筑企业职工总数 36% 的其他中央部属施工企业所发生的坍塌事故率也保持同等水平,则全民施工企业发生的坍塌事故总数在 600 起以上,而集体施工企业施工以及农村个体自建工程的坍塌事故量还未统计在内。近年来的事故仍是有增无减,1986 年建工系统所发生的坍塌事故为 86 起。1987 年的恶性事故更多,仅这一年 9 月 14 日湖南沅江的一起办公楼倒塌事故就有 39 名工人死亡。此外,还有多起大会堂、影剧院等人员密集的重要工程倒塌事故发生。其中固然存在大量的管理问题和制度问题,有待各级政府机关研究解决,但也应在技术上吸取宝贵的经验和教训。长期以来,由于受到闭关自守、家丑不外扬的错误指导思想的影响,人们习惯于对一切事故实行保密,封锁情报,掩盖真相,甚至混淆是非,将一些典型的技术事故统统归之于管理,使技术经验得不到总结,技术水平得不到提高,实在可惜。据笔者对近百起已有工程的坍塌事故,或虽不构成坍塌事实,但因结构变形过大,出现严重裂缝,存在坍塌可能的危险事故进行分析研究,感到有一些经验和教训是应该记取的。

1. 认真分析裂缝

工程师分析事故,应该像医生诊断疾病一样,充分运用自己的经验和智慧,认真观察。看病离不开诊察体温和脉搏,分析工程事故则必须从分析裂缝下手。常见的工程裂缝大致有以下几种:

1) 干缩裂缝

干缩裂缝系因混凝土或砂浆脱水干缩引起,一般只是影响结构物的外表瞻观,但有些干缩裂缝却会导致严重的工程事故。如本书《钢筋混凝土柱身裂缝事故》一文所列举的钢筋混凝土预制柱身纵向裂缝,系柱身在预制过程中,由于混凝土沉落与干缩引起的。这种裂缝导致了钢筋的锈蚀,最后形成事故。干缩裂缝还经常与其他性质的裂缝同时出现,谓之伴生现象。比如钢筋混凝土结构或砖混结构的温差裂缝(见本书《砖混结构温差裂缝分析》一文),就是与干缩裂缝伴生的,两种裂缝容易混淆,很难分辨。但是不论干缩裂缝或温差裂缝,在裂缝出现以后,内能释放,应力松弛,就不再发展,对结构不会造成很大的威胁。只有在特

定条件下出现的干缩裂缝与超载变形裂缝伴生时，才存在危险。例如，一平台楼面、梁、板混凝土浇筑时，由于采用的是矿渣水泥，又逢干旱多风季节，干缩现象严重，加上覆盖养护不及时，板面出现一些干缩裂缝，并以阳台板面为最。这种现象在施工现场司空见惯，无人介意。而这些阳台施工时，又同时存在悬挑钢筋配筋不足，并被踩下的问题，故拆模以后板面随之出现荷载变形裂缝，情况极为严重。但由于干缩裂缝的掩饰而未被重视，直至阳台坍塌，构成严重事故。

2) 温差裂缝

温差裂缝是钢筋混凝土结构和砖混结构中裂缝出现率最高、最为普遍的一种裂缝，也是最规则的一种裂缝现象，分析、辨认都较容易，理论计算方法也较简便，在本书《砖混结构温度应力实用计算方法》等文章中已有了较多的论述，这里不再重复。但在建国初期人们对砖混结构温差裂缝还比较生疏的时候，也曾引起过恐慌。目前，砖混结构已由城镇普及到广大农村。据了解，建筑物裂缝问题正是农村建筑中普遍存在的一个较突出的问题，或则引起工程纠纷，或则造成浪费现象，或则构成重大事故。因此笔者呼吁：工程界宜从砖混结构温差裂缝的特性着手，对负责农村建筑的广大施工人员以及用户，作些科普宣传工作将是有益的。

应该指出，在特定条件下，小小的几条温差裂缝也会构成大楼坍塌事故。本书《大楼坍塌事故》一文介绍的事故就是一例。

3) 混凝土沉落裂缝

混凝土除了在长期的硬化过程中会出现干缩现象，产生干缩裂缝之外，塑性混凝土在浇灌以后、硬化以前，还会有显著的沉落现象。如果沉落现象受到较粗且密的水平钢筋网或预埋件等阻滞，使沉落现象不连续，则将在钢筋网或预埋件的下面出现水平皱纹式裂缝，本书《钢筋混凝土柱身裂缝事故》和《论整浇钢筋混凝土结构中的施工缝》文章中对这种裂缝进行过论述。现浇钢筋混凝土柱的竖向沉落量是很可观的，牛腿顶面或小柱顶面的预埋支座钢板下往往出现空缝，就是这种沉落裂缝的特殊情况。由于空缝出现在集中受压的吊车梁和屋架支座下面，危害性很大。支座下沉，引起屋架失稳，甚至构成坍塌事故，在事故分析中往往不为人们所注意。施工规范（GBJ204-83）第4.4.16条和第4.4.17条规定：“梁和板应同时浇筑混凝土”，旨在保持梁板的整体性。但还规定：“较大尺寸的梁（梁的高度大于1m）……可单独浇灌”。规范第4.4.15条更明确地指出：“在浇灌与柱和墙连成整体的梁和板时，应在柱和墙浇灌完毕后停歇1~1.5小时，使其获得初步沉实再继续浇灌”，就是为了防止沉落裂缝的出现。这一点往往不为设计人员所理解，在梁板施工中，追求一气呵成，结果走向反面，造成事故。

4) 地基沉降裂缝

在附加荷载作用下软土地基中孔隙水被挤压排出，孔隙率降低，土层下降，这是一种极普遍的正常现象。由于土层构造、含水情况以及上部结构的复杂性，所出现的沉降往往是不均匀沉降。不均匀沉降必然使建筑物出现裂缝。由于土层受压固结是一个缓慢持久的过程，所以地基沉降引起的建筑物裂缝一般随时间而发展，最后导致建筑物的破坏、坍塌。因此，人们对地基沉降不均引起的裂缝一般警惕性较高。本书《厂房滑移事故和螺孔串水事故》、《软土地基沉降不均事故》、《膨胀土地基破坏事故》等文章对地基沉降引起的裂缝分析认为，尽管情况极其复杂，但仍有一定规律，主要表现在任何上部结构都是与地基基础共同工作的。对刚度较大的钢筋混凝土框架或框剪等多层和高层建筑，共同工作效用就更显著。沉降裂缝与

建筑物的整体变形和受力情况息息相关，可以将整个建筑物视为一弹性地基梁，哪一点变形（即沉降量）最大，裂缝必然倾向哪里。沉降曲线如果是锅底形的凹曲线，则建筑物上的裂缝必然呈八字形分布；沉降曲线如果是向上凸起的曲线，则建筑物上的裂缝必然呈倒八字形分布；假如建筑物仅某一个角点沉降量大，则该角点处两面正交的墙体上必然有倾向角点的裂缝。这些裂缝的分布规律与弹性梁的主拉应力图完全吻合。当然，由于上部结构各个部件，比如剪力墙、砖墙或框架等的抗力不等，在变形和受力过程中，也许会出现一些局部调整，但离不开这一主体趋势。此外，地基不均匀沉降引起的建筑物裂缝一般均从底层开始逐渐扩展到上层（这是与温差裂缝截然不同的一种特性，后者仅从顶层开始，而且只是偶尔向下层扩展），一般经过一个冬夏以后即告稳定，不再扩展。掌握了这些特性，就不难从复杂的情况中理出头绪。本书《厂房滑移事故和螺孔串水事故》一文中所分析的厂房滑移事故，就是运用了以上经验，将温差裂缝和沉降裂缝区分开来，分别对待，然后由沉降裂缝的倾角判定地基沉降点，并查明岩层剪切破坏是引起沉降的原因。只有查明原因，才能采取果断措施，拯救正在局部滑移，行将坍毁的建筑物。

膨胀土地基上的建筑物裂缝和岩土地基上的建筑物裂缝则更复杂一些，地裂现象尤为严重。

5) 过载变形裂缝

材料变形有一个允许极限，变形超过极限就将出现裂缝。砖石、混凝土等脆性材料的允许变形极限甚小，设计都由应力控制，荷载超过允许值时，应力偏大，即出现裂缝，迅速发展成事故。允许变形值较大的钢筋混凝土结构、钢结构，其允许强度也较高，由于强度超过极限而招致破坏或坍毁的工程较少见。而由于结构刚度不足，变形过大，最后导致局部应力集中或整体失稳而引起结构坍毁的事例则较多，如本书《台湾省某中学礼堂坍毁事故》一文所述。这类事故发生之前，很少有裂缝迹象发生，也是容易引起人们思想麻痹的原因。如果确因荷载超限而引起建筑物裂缝，则说明工程已经危在旦夕，宜迅速采取卸荷或加固措施。

2. 认真对待规范

工程设计规范和施工规范是理论与实践的高度结合，也是长期以来人们用血汗换来的宝贵经验的结晶。在设计和施工的全过程中必须严肃对待规范，分析工程事故也必须以规范为准绳。事实说明，多数恶性工程事故都是违反设计或施工规范的结果，应该引起人们高度的注意。但也应该承认，规范毕竟是人订的，决非永恒不变的真理，随着条件的变迁，技术的进步，规范也将随之修订，因此不能将它看成金科玉律，一成不变。所谓在事故分析中严肃对待规范，应该理解为用科学的态度，实事求是的精神对待规范。比如前面提到的关于墙柱和梁板混凝土施工缝的规范，就是为了避免混凝土沉落引起裂缝而制定的，历次规范均有类似规定，各国规范雷同，说明它是合理的，应该认真对待。而本书《乱掺毛石事故》一文谈到的在钢筋混凝土中乱掺毛石的故事，则显然是规范条文用语有不当之处。在事故分析中，不宜据此为理，为错误作辩护。

3. 沉着应付险情

在工程事故分析现场，很可能面临山雨欲来风满楼的险情。盲目行动，有可能在房倒屋塌的灾难中受到惩罚。裹足不前，又可能坐失良机。如何应付险情，的确是对工程师们的严峻考验。只要事先认真分析资料，察看现场，对建筑物的变形和裂缝现状有所掌握，就应该能对建筑物的命运作出基本可靠的判断。比如本书《厂房滑移事故和螺孔串水事故》一文中

所提到的厂房滑移、裂缝事故的处理，就是一例。只有沉着、冷静地分析情况，才能正确地作出判断。稍一疏忽，就有可能在事故处理时葬身于废墟之中。

4. 切实采取措施

所谓切实采取措施进行事故处理，核心是强调处理措施的针对性，也就是必须对症下药。只要摸清事故原因，就不难找到合适的处理措施。切忌头痛医头，脚痛医脚；尤忌华而不实，作表面功夫，哄骗用户；也反对小题大作，造成浪费。文献 [1] 对苏州虎丘塔加固所采取的“围”、“灌”、“盖”、“换”四步措施是一成功的典范，值得借鉴。本书《软土地基沉降不均事故》一文提到的对某市高教办公楼采取的压重纠偏措施有考虑不周之处。本书《火灾损害事故》一文提到的对某巨型煤仓火灾损害后的处理措施则有草率不慎之嫌。至于某多层住宅阳台由于配筋不足，板面出现裂缝而采取在阳台两侧增加半砖厚填充式支承隔墙的措施，则因填充砌砌筑后的砂浆干缩下沉、充填不实、层层错位、不能对中等弊病，结果不但没有起到支承作用，反而给阳台增加了负荷，促进了阳台的崩塌，更是一个处理措施不切实的例子。

总之，可以从已有工程的事故分析和处理中吸取很多的经验和教训，这些教训是极宝贵的。

三、建筑结构学的边缘学科——已有建筑物可靠性评价

已有建筑物可靠性评价正成为建筑结构学的边缘学科，有待发展。因为这一学科的综合性很强，不仅涉及结构力学、断裂力学、建筑材料学、工程地质学等基础理论，而且与施工技术、检验手段、生产工艺也有密切关系。虎丘塔和比萨斜塔的可靠性评价及其加固的探讨，已给人们提出了课题，并且迈开了第一步。美国 T. V. A. 的 Fontana^[3] 大坝裂缝事故后的可靠性评价和加固方案的实现，是有限元分析方法和电子计算机技术运用于这一方面的初次尝试。

对核电站预应力混凝土反应堆安全壳来说，不仅在强度方面有很高的耐高温高压要求，而且对气密性要求甚严。因此，对于混凝土裂缝很忌讳。但是近年来不断发生一些混凝土反应堆安全壳裂缝现象，大亚湾反应堆安全壳仅在施工筏基阶段，就出现了比较严重的温差干缩裂缝。秦山核电站反应堆安全壳混凝土浇筑过程中时有疏忽，出现局部缺憾，也曾引起人们对整个工程混凝土浇筑质量的种种猜疑，震动很大。面对如此重大的问题，应如何进行评价？该采取什么样的措施？确是一个极为严肃的技术问题，决不可凭感性、凭经验妄自评论，必须寻求科学的方法，从检测下手，靠数据说话，以有限元分析方法和电子计算机技术为手段，对整体进行全面的分析与评价。

全面分析应包括微观分析和宏观分析两个方面。比如 T. V. A. 的 Fontana 大坝，偌大的坝体，只是一道裂缝问题。通过一道裂缝对大坝进行宏观分析，很可能无法下手，分析结果也可能隐蔽危险因素。实际上，对于素混凝土筑成的大坝，一道裂缝可能就是致命伤，它决定着整个工程的工作状态。采用有限元分析法，用离散模型或片状模型对裂缝区进行微观分析，分析计算工作量有限，可以预测裂缝附近的应力情况，包括裂缝面粘着力、咬合力和销钉效应，还包括裂缝前沿的应力集中情况，因而可以掌握裂缝开展的趋势。这不仅是比较简易可行的方法，而且有很高的可靠性。但是，微观分析方法用于裂缝多而密的钢筋混凝土或预应力混凝土结构，比如反应堆和剪力墙结构，就显得烦琐。对一条一条裂缝进行分析，不仅不可能，而且也没有必要。这时可以采用宏观分析方法，取片状模型进行有限元分析后，可以从宏观角度得到载荷变

形曲线和裂缝开展图象。全部分析工作可以依靠计算机完成。关于这方面的研究工作,国外正方兴未艾^[1,5],有待我们迎头赶上。

总之,从虎丘塔加固成功中获得的经验和大量工程事故分析工作中得到的教训都证明,对已有建筑物的可靠性进行评价是一件极有意义的工作,有着广阔的发展前景。

参 考 文 献

- [1] 陶逸钟, 苏州虎丘塔——中国斜塔的加固修缮工程, 建筑结构学报, 6, 1987。
- [2] 金瓯卜, 当前城市郊区农村建房问题初探, 建筑学报, 12, 1986。
- [3] Chappell. J. F. and Ingraffea A. R. , A Fracture Mechanics Investigation of the Cracking of Fontana Dam, Depatment of Structural Engineering Ropart 1981. 7 School of Civil and Envicrnment Engineering. Cornell university, Ithaca. NY (1981).
- [4] Linda Leibengood, Darid Daiwin, Ro bert H. Dodds, Finite Element Analysis of Concrete fracture Specimens, Structural Engineering Materials. SM Report, №11, May 1984.
- [5] Bazant, Z. P. and Cedolin, L. , Blunt Crack Band propagation in Finite Element Analysis, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, № EM2 A r. 1979, pp. 297~315.

近年来的结构事故分析^①

近年来发生的大量结构事故，造成了众多的人身伤亡，并使工程造价超支，工期拖延，有的甚至使承包商破产，设计师被吊销设计许可证。如最近发生在康涅狄克州跨越格林威治河的 Turnpike 桥梁坠毁事故及发生在泽西城的天花板坠落事故，就有 5 人死亡，多人受伤。而在密什根 Zilwaukee 桥施工过程中出现的混凝土箱形梁挠度超限，虽无人伤亡，但使工期拖延 5 个月，损失也很大。

本文拟对最近发生在美国及其他国家的一些建筑工程和桥梁工程方面的大事故的主要原因和发展趋势进行分析。

一、结构事故的分类

本文所指的结构事故包括坍塌事故和危险事故两个方面。定义是，结构或其部件已不能承受设计说明中所要求的荷载或已不能满足使用要求。坍塌指的是整个结构或结构的主要部分遭到破坏，全部或部分需要修复的事故。危险事故是指结构的全部或部分已不能使用，但尚不一定造成坍塌，只是有了坍塌的可能。在本文中危险事故代表结构损伤，比如结构部件发生了过大的挠度和过大的裂缝，有可能导致顷刻间的坍塌现象。一个事故到来之前，往往有其必然的内在原因和偶然的导火线，必然的内在原因是由于结构在设计、施工、维修与使用过程中存在着内在的缺点，这些缺点将随着时间的推进而爆发。偶然的导火线是指外来事件的干扰，比如车辆的撞击，爆炸事故等，均会起到导火线的作用。

本文主要根据 1977~1981 年发表的《工程新闻》、《新土木工程师》和《新国际土木工程师》等有关资料进行研究，并从国家标准局方面得到的研究报告和笔者的实践经验用来作一些论证工作，对发生在桥梁工程和房屋建筑方面，包括低层、多层建筑、工厂建筑、大跨度建筑方面，总数达 147 项的工程事故实例进行研究。表 1 所示的就是前述结构事故实例的分类。

造成事故的原因归纳为六个方面存在缺点：即结构设计、详图设计、施工、维修、材料以及对外因的考虑不周等。本文特将以上六个方面的问题称为主要事故原因。由于所占有的材料中真正有价值的详细数据并不多，仅就每种情况中最可能出现的主要原因进行讨论。尤其是前四种原因，在结构事故中起着主要作用。关于使用材料方面存在的问题，这里指的仅限于材料本身存在的问题，不包括由于其他原因所引起的材料质量问题。结构设计、构造详图、施工、维修、材料等五种事故原因统称为内因，后一种原因则视为外因。其他如自然灾害、战争破坏、人工拆毁、火灾损害、年久老化等事故原因，均不在本文讨论范围内。

① 本文原载《工业建筑》1988 年第 3 期。译自 ASCE, Journal of Structural Engineering, 1985. 7, pp. 1468~1481。

表 1 结构事故分类

工程类别	结构形式	事故次数 (1977~1981 年)	事故总数 (每一类占总数的百分比)
桥梁	钢结构桁架桥	13	57 (39%)
	钢板梁桥	14	
	钢箱形梁桥	2	
	混凝土梁桥	2	
	混凝土箱梁桥	8	
	悬索桥	3	
	浮桥	1	
	拉杆搭桥/钢搭桥	4	
	步行桥	8	
四层以下 低层建筑	办公楼	6	42 (28%)
	汽车库	7	
	教室	1	
	飞机场建筑	2	
	医院	2	
	邮政设施	1	
	学校体育馆	12	
	修理间、工厂作坊	5	
	储藏间	1	
	会议厅、剧场	2	
	敞棚、屋盖	3	
多层建筑	公寓	4	13 (9%)
	旅馆	3	
	写字楼	6	
工业建筑	谷物提升机房	9	21 (14%)
	泵站	1	
	水池	1	
	核反应堆安全壳	2	
	火力发电厂	2	
	污水处理站	2	
	烟囱	1	
	冷却塔	3	
大跨度建筑	平顶建筑	10	14 (10%)
	壳体屋面	3	
	悬吊结构	1	
总 计			147 (100%)

二、事故评述

1. 事故发生率

一般说来，使用期间发生的事故率要高于施工期出现的事故率（表 2、表 3），这可能是由于研究的事故对象，只限于几种主要情况的主要原因之故；也可能是由于发生在施工期间的事故，出于信誉上的压力，一般均随时进行了处理，不敢声张。但是除了前面谈到过的混凝土箱形梁桥坍塌事故、美国以外发生的多层建筑及大跨度建筑坍塌事故以及美国国内发生的工业建筑危险事故等多发生在使用期以外，其他事故还是发生在施工期的几率较高。

表 2 美国 1977~1981 年间随出现期而划分事故分布情况

建筑物类型	坍塌事故 总数	施工期间出 现的坍塌数 (所占百分比)	使用期间 坍塌数 (所占百分比)	危险事故 总数	施工期间 危险事故数 (所占百分比)	使用期间 危险事故数 (所占百分比)
桥梁	14	3 (21%)	11 (79%)	19	3 (16%)	16 (84%)
建筑物总计	35	9 (26%)	26 (74%)	30	9 (30%)	21 (70%)
低层建筑	13	5 (38%)	8 (62%)	17	3 (18%)	14 (82%)
多层建筑	3	1 (33%)	2 (67%)	3	—	3 (100%)
工业建筑	15	2 (13%)	13 (87%)	5	5 (100%)	—
大跨度建筑	4	1 (25%)	3 (75%)	5	1 (20%)	4 (80%)

表 3 美国之外 1977~1981 年间随出现期而划分的坍塌事故分布情况

结构类型	坍塌结构总数	施工期间发生事故数 (所占百分比)	使用期间发生事故数 (所占百分比)
桥梁	24	4 (17%)	20 (83%)
建筑物总数	25	12 (48%)	13 (52%)
低层建筑	12	3 (25%)	9 (75%)
多层建筑	7	5 (71%)	2 (29%)
工业建筑	1	1 (100%)	—
大跨度建筑	5	3 (60%)	2 (40%)

在考察期间的最后几年，事故率有下降趋势。但工业建筑的坍塌事故发生率仍保持稳定。尤其是在 1980 年，低层建筑事故还在直线上升。工业建筑事故率持平与筒仓发生爆炸事故较多有关，在考察期间的五年中，每年均出现爆炸事故。低层建筑事故率上升则与预应力钢筋混凝土构件出现严重裂缝现象较多有关，正像出现在加利福尼亚州的爱托奇（Antioch）高