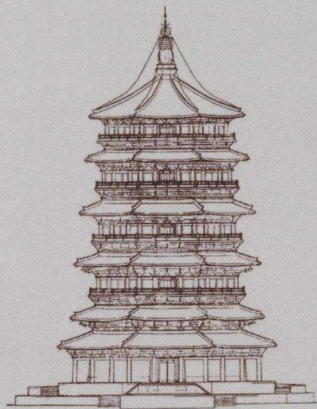
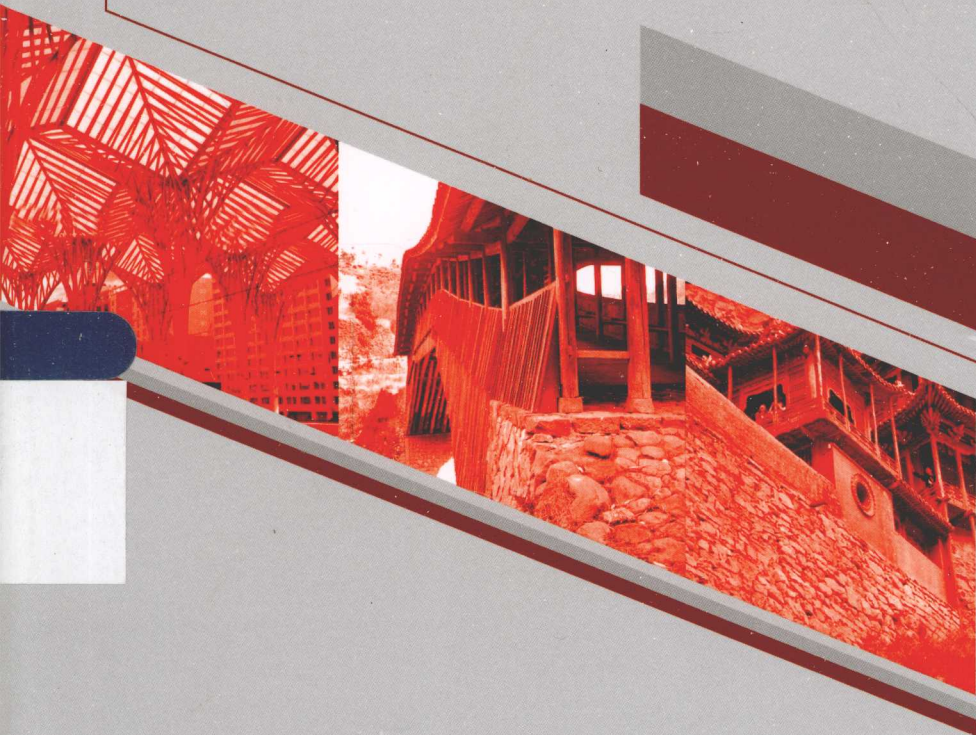


土木工程结构



变形协调与受力安全

朱汉华 周智辉 范立峰 文颖 等著



人民交通出版社
China Communications Press

014037720

TU311
145

**Deformation Compatibility
in Safety Analysis of Civil Engineering**
**土木工程结构
变形协调与受力安全**

朱汉华 周智辉 范立峰 文颖 等著



TU311/145

人民交通出版社



北航

C1725839

内 容 提 要

针对土木工程结构安全问题,作者根据30余年亲身主持工程建设的实践,以问题为导向,参考同类著作,结合对古今中外土木工程4万多个案例的分析,阐述了合理工程结构体系及其力学分析的基本要求——“稳定平衡与变形协调”。其核心是:①如何设计合理的工程结构体系;②如何系统地应用牛顿力学分析解决实际工程中的结构安全问题。

本书在思考力学理论与转变思维方式的基础上,系统地梳理了对土木工程现象统计“相关性”和物理规律“因果性”的认识,对解决“苹果与树叶落地点预测”两类问题思维和方法的认识,对稳定状态与非稳定状态结构工程力学分析方法的认识。同时,结合具体的土木工程案例进行受力安全分析,具有较大的理论意义和工程应用价值。

本书适合从事土木工程结构科研、设计、施工、监理、监督及管理的技术人员和相近专业的研究人员使用,也可供其他关注土木工程安全的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构变形协调与受力安全 / 朱汉华等著

· 一北京:人民交通出版社,2013.8

ISBN 978-7-114-10820-4

I. ①土… II. ①朱… III. ①土木工程-工程结构-变形协调-研究②土木工程-工程结构-受力性能-研究
IV. ①TU311

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第177285号

书 名:土木工程结构变形协调与受力安全

著 作 者:朱汉华 周智辉 范立峰 文 颖 等

责任编辑:曲 乐 周 宇

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:中国电影出版社印刷厂

开 本:720×960 1/16

印 张:13.5

字 数:235千

版 次:2014年4月 第1版

印 次:2014年4月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10820-4

定 价:49.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

随着社会生产力进步,人类社会发展要求统筹区域协调发展和资源的有效配置,需要大力发展山区和跨江及跨海交通,修建大量山岭隧道和跨江海桥梁或隧道。随着城市规模迅速膨胀,需要大力建设城市地下交通网络、地下车库、人防工程、地下商城等,以保障城市的可持续发展。当前,工程结构的规模不断增大,功能要求多样化,新结构形式不断出现,工程建设更多地涉及破碎和软弱围岩、地下水富集区、偏压、环境稳定等问题。伴随复杂的地质问题和复杂的工程环境,确保工程建设安全的难度越来越高,合理把握地下工程设计与施工工法的复杂性和重要性日益增加。据建设运输质量安全事故统计,①各类坍塌事故中死亡人数比例:临时设施与支架坍塌占 32.6%;地下工程坍塌占 32.6%;基坑开挖与挡墙坍塌占 23.9%;道路桥梁等结构坍塌占 10.9%。其中,管理不到位、人员违规操作、施工工艺缺陷、恶劣施工环境和设备故障是诱发事故发生的主要原因。②道路病危桥比例:10 年内的桥梁占 20%;10~20 年的桥梁占 24%;20~30 年的桥梁占 20%,与百年大计要求相差较大,使用不当或结构性缺陷或损伤是主要原因。同样,欧美发达国家道路桥梁等结构的结构性缺陷也高达 11%,导致许多质量安全事故。例如,建于 1173 年的意大利比萨斜塔,就是由于地基处理不到位造成的。按照质量安全事故的“冰山理论”,质量安全事故只是冰山一角,质量安全事故背后依然有大量隐患及设计理论问题。我们统计分析了古今中外 4 万多个土木工程案例,对这些案例做整体考察和集中比较研究后发现:凡是满足变形协调和能量合理转换等条件的工程结构都是安全的;反之都不同程度地存在一些安全风险甚至出现灾害。解决存在的设计理论问题,把土木工程结构受力状态分析提升为土木工程结构受力与变形状态分析,就为解决结构受力安全问题提供了易于使用的有效途径。针对未来发展需求、存在问题,使用有效途径,探索易于应用的工程建设理论和方法,是当前工程建设的现实要求和迫切任务。本书从两方面进行了探索:①在技术层面,提出了“变形协调”和“能量合理转换”作为合理结构体系和工程结构分析的基本要求,用来满足土木工程结构设计的需求,既方便地解决了工程结构受力与变形在保障安全的前提下最大

限度发挥“合理边界值”的确定,又可作为“镜子”检验结构体系设计施工的合理性;②在管理和应用层面,强调可操作性和易用性。为了更好地解决科学性和应用性及其结合的问题,既要把握工程结构的安全实质,又要便于基层人员掌握与灵活运用。

通过思考力学理论与转变思维方式,将本书归纳为三个主要方面:①对土木工程现象统计“相关性”和物理规律“因果性”的认识,即把土木工程案例物理现象统计相关性提升为土木工程结构变形协调规律的因果性;②对解决“苹果与树叶落地点预测”两类问题思维和方法的认识,“苹果落地点预测”可用精确分析法,而“树叶落地点预测”方法要采用整体控制与细节把握的方法;③对稳定状态与非稳定状态结构工程力学分析方法的认识,即工程结构力学平衡方程是建立在结构稳定状态基础之上,在工程结构状态欠稳定时,采用辅助措施加以处理。

工程结构安全的关键是把握物理概念与全过程力学状态正确性和措施有效到位,而数值分析和模型试验等是技术分析的支撑。越是复杂的问题,把握物理概念与全过程力学状态正确性和措施有效到位就越重要。由于工程结构有疲劳积累损伤、变形协调、环境条件等影响因素,所以存在稳定平衡、亚稳定平衡和不稳定平衡三种状态。“变形协调”和“能量合理转换”提出了确保土木工程结构安全的控制要求,正确把握“变形协调”和“能量合理转换”可实现结构处于稳定平衡状态。也就是说,为结构安全控制提供了确定“合理边界值”的理论基础,解决了已有设计计算理论中存在的 uncertainty 问题。同时,“变形协调”和“能量合理转换”也是判断合理结构体系和工程结构分析的一面“镜子”,通过比照平衡稳定的理论要求,即“照镜子”,就能客观地判断各施工步的工作合理性,从而明晰工程结构全过程的稳定平衡和不稳定平衡状态。只有工程结构满足了“变形协调”和“能量合理转换”,才能得到工程问题的“较优解”,而不是传统意义上的“可用解”。

把握工程结构安全的关键三要素为:①稳定平衡;②“理论计算与试验分析”相结合;③合理的结构构造措施和施工工艺。把握工程结构基本特性与力学规律是基础,采用合理结构构造措施和施工工艺及完善的施工方案是技术保障,做到整体结构设计分析与结构构造措施及设计工法和实际施工工艺控制等相匹配是基本要求。应真正达到工程结构稳定平衡与变形协调,避免仅基于平衡与破坏理念设计的部分工程结构存在潜在风险。

实现工程结构安全,首先要确保整体周边环境(如地基、围岩、水等)的稳定平衡,其次要确保局部环境与结构的相互作用,不仅满足艺术上的形似平衡,更要从“力、变形、能量”等方面确保系统始终处于稳定平衡状态。“力和能量要有相应物质载体,并具有相应传递或转换途径”,结构“稳定平衡与变形协调”和“能量合理转换”是统一的,变形协调又是力法、位移法与能量法结构分析的必要条件。确保“力、变形、能量”按设计路径传递及方式转化是结构稳定、安全、合理的基本要求,也是保证设计形式不产生安全事故的基础。确保结构的“稳定平衡与变形协调”,不仅需要目标控制,更需要围绕目标实现结构安全合理的过程控制,否则,结构就会不稳定或破坏。随着材料性能、设备性能、分析方法、计算手段、工艺工法等进步和结构大型化与外部条件复杂化等情况的出现,虽然结构“力、变形、能量”三要素的内涵、属性、过程是不变的,但把握物理概念与过程力学状态的复杂性与难度增加。因此,任何工程结构体系“力、变形、能量”三要素必须同时满足要求,犹如接骨手术中的夹板或石膏固定技术就是保障骨头内生过程中“力、变形”均满足要求,同时耗能最小。根据实际情况,可以选择力法、位移法与能量法来计算结构受力特征;或分别运用“力、变形、能量”中的一个或几个要素更好地控制工程结构行为。一般用“力、能量”定性或定量分析结构行为,用“变形”控制结构行为。需要特别指出的是,结构“力、变形、能量”三要素同时满足要求与计算手段或实现路径之间既有联系,又有区别。在工程实践中,科技人员必须经过反复模拟与试验,做到理念和手段先进、到位,保证结构全过程稳定平衡和安全合理,才能推进大型复杂结构建设进程。

系统地研究变形协调、能量合理转换、环境条件等影响因素是对结构体系力学应用问题的必要补充,它能确保力的合理传递或转移,把结构体系受力安全由单纯的荷载控制转变为荷载与变形协调、能量合理转换、环境条件等影响因素共同控制。研究揭示了复杂工程结构多因素相互耦合的深层次工程力学问题,如变形协调、亚稳定平衡等可能影响结构体系的整体稳定平衡或局部稳定平衡,将便于设计、施工与技术管理人员认知规范尚未涵盖的特殊工程力学问题,清醒地认识复杂工程结构可能存在的质量隐患或安全风险,从而避免工程结构的特殊质量隐患或安全风险,确保工程结构的质量和安。

本书是在《土木工程结构受力安全问题的思考》的基础上,凝练土木工程结构设计施工经验和教训,总结作者多年的思考而形成,适合研究、设计、施工、管理人员参考使用。部分图片选自网络或其他媒体,特此申明,并致谢意!

除作者外,陈孟冲、姚志坤、金伯军、蒋锦毅等,也为本书的编写和研究作出了重要的贡献,在此一并致谢!

由于作者水平所限,不妥与错谬之处,敬请读者批评指正。

作者

2013年5月

目 录

1	合理结构体系和工程结构分析的基本要求	1
1.1	工程结构“变形协调”和“能量合理转换”理念	1
1.2	工程结构安全状态的三个理论问题	3
1.3	控制工程结构受力安全的两个层次力学关系	9
1.4	工程结构稳定平衡的实现方式	10
2	基于自然法则与最小耗能原理研判工程结构的平衡稳定性	12
2.1	自然法则在工程结构受力行为中的表现形式	12
2.2	基于最小耗能原理的工程结构稳定性实例分析	14
2.3	用最小耗能原理分析桥梁倾覆破坏形态	17
2.4	用最小耗能原理方便确定隧道施工工法	19
3	改进变形协调, 改善桥梁结构受力状态	21
3.1	对结构变形协调的基本认识	21
3.2	变形协调对结构体系中力的合理传递或转移的影响	24
3.3	改进变形协调, 解决结构累积损伤问题	26
3.4	改进变形协调, 解决结构变形突变问题	32
3.5	变形协调概念在桥梁结构伸缩装置中的应用	34
3.6	运用变形协调概念, 采用刚柔结合体模型处理桥头跳车问题	37
3.7	改进变形协调, 解决桥面铺装容易损坏问题	41
4	强化平衡稳定, 提升地下工程安全性	45
4.1	地下工程平衡稳定理念	45
4.2	确保地下工程平衡稳定的工法选择	48

4.3	地下工程设计思路与工法选择·····	51
4.4	地下工程施工典型破坏案例分析·····	55
4.5	隧道塌方空洞处置的平衡稳定理论应用案例·····	59
5	平衡稳定理论在盾构法隧道中的应用 ·····	61
5.1	盾构法隧道工程技术难题·····	61
5.2	盾构机选型·····	62
5.3	盾构隧道的稳定平衡与环境协调性·····	64
5.4	盾尾注浆控制地层变形·····	74
5.5	盾构进出洞工程措施·····	77
5.6	基于平衡稳定机理的典型盾构隧道案例分析·····	80
6	公路桥梁抗倾覆稳定性问题的一些认识 ·····	89
6.1	公路桥梁抗倾覆稳定性的现状·····	89
6.2	现有规范文件关于桥梁倾覆稳定性的规定·····	93
6.3	对桥梁抗倾覆稳定性的两种理解·····	96
6.4	某6×20m连续梁桥倾覆稳定性分析·····	98
6.5	桥梁倾覆与支座脱空之间的关系·····	106
6.6	《公路桥规》(征求意见稿)与英国规范抗倾覆稳定性 安全系数的比较·····	108
6.7	《公路桥规》(征求意见稿)桥梁抗倾覆稳定性安全系数 取值的讨论·····	110
7	结构构造措施、设计工法及施工工艺对工程结构安全的影响 ·····	113
7.1	合理结构构造措施、设计工法及施工工艺是结构变形 协调的必要条件·····	113
7.2	组合体系桥梁受力安全分析·····	115
7.3	盾构设计施工目标与保障措施·····	124
7.4	不良地质环境地下工程的合理开挖支护措施·····	137
8	典型工程结构受力安全的启示 ·····	139
8.1	钱塘江大桥结构受力安全的一些启示·····	139

8.2	某市房屋倒塌事故的一些启示	141
8.3	海地、智利、日本、中国地震工程结构比较的启示	143
8.4	斜拉索风雨振减振措施的一些启示	148
8.5	日本山梨县笹子隧道天花板坍塌事故分析	150
8.6	预应力混凝土变截面连续箱梁实例	152
9	路基路面工程受力性能分析	159
9.1	路面、路床受力影响分析	159
9.2	路基不均匀沉降引起的路面结构附加应力理论分析	162
9.3	路基水文状况对路面的影响	166
9.4	对路基及基层病害的有效处理将提升路面使用质量	169
9.5	软土路基路面设计施工管理成功经验与启示	172
9.6	“软土路基下隔上封措施”的力学要求及其相关工程 实践	174
10	解决工程结构问题的哲学思考	186
10.1	隧道工程实践中的理论创新和哲学认识	186
10.2	工程问题的力学思考——复杂问题简单化	192
	参考文献	201

合理结构体系和工程结构分析的基本要求

工程结构安全事故频发的深层次原因是:目前工程结构建设规范只规定了力的关系、力与变形的关系,而没有结构体系变形协调的理念。为满足工程实践要求,应修改现有变形控制不完善的规定,做到“力、变形、能量”三要素同时满足稳定平衡与变形协调、能量合理转换、力合理传递或转移等要求,以确保工程结构安全。要真正充分发挥结构承载力,必须控制结构使其不产生有害变形,保证力与能量的合理传递,形成结构受力平衡与变形协调的承载体系。对于复杂环境与复杂结构,应采用整体控制与细节把握,围绕目标(稳定平衡与变形协调)的过程控制方法来解决结构变形协调和结构设计传力路径与实际传力路径相同问题,确保柔性结构、刚柔组合结构、不良地质环境地下结构等全过程安全。

1.1 工程结构“变形协调”和“能量合理转换”理念

土木工程是设计理念和建造技术的综合体现,受功能、艺术、科学、设备、材料和环境等因素的共同影响。当今土木工程无论是功能、规模,还是结构复杂程度,较传统的土木工程均有大幅度提高。因此,基于传统牛顿力学研究连续介质运动规律的分析计算方法也需要进行创新。

从牛顿质点力学到连续介质力学的传统分析方法建立各种介质的力学模型,把各种介质的本构关系用数学形式确定下来,并在给定的初始条件和边界条件下求解问题。这种分析方法的最基本假设是“连续介质假设”,即认为真实的物体可以近似看做是连续的,由充满全空间的质点组成,物质的宏观力学行为依然符合牛顿力学理论。这一假设只能在一定程度上反映现实结构的复杂性。特别是当代土木工程中,系统或各个子系统之间的变形并不一定能满足变形协调和能量合理转换的要求。作者统计分析了4万多个古今中外土木工程案例,对比了日本和美国洛杉矶地震中土木工程破坏状况的历史差别,以及2010年智利

和海地地震中土木工程的破坏状况。与以前建立在逐级考察和不断改进基础上的研究方法不同,作者把这些数据作整体考察,集中比较研究,发现凡是满足变形协调和能量合理转换等条件的土木工程,都是安全的;相反,凡是不满足变形协调和能量合理转换等条件的土木工程,都不同程度地存在一些问题甚至安全风险。

传统力学意义上的“变形协调”通常是指变形连续。而工程结构“变形协调”是指系统和周边环境以及系统内部各个子系统之间的变形必须是协调的,以确保力按合理路径传递或转移,以及系统的能量合理转换。

“能量合理转换”是指通过合理的结构设计,使系统及其子系统内的应变能可以顺利转换,实现自我调节,提高系统及其子系统抵抗损伤积累的能力。

调查统计显示:复合材料结构内部不同材料之间变形不协调,不同材料层之间错动,例如钢筋混凝土内部钢筋与混凝土之间错动等,现已有专门力学方面的研究和结构构造保障措施(如梯度材料)来解决此类问题。而土木工程结构变形协调问题是指结构构造本身与外部荷载适应性是否合理(如路基与软土地基共同作用变形适应性不合理或地下工程围岩与开挖支护共同作用变形适应性不合理等),能否达到结构体系稳定平衡与变形协调的要求。这些结构体系各部件刚度不匹配和结构变形不协调会引起力的不合理传递或转移,从而导致结构体系受力与变形状态不稳定等。目前,学界对这类现象认识还不统一,并且工程结构逐渐损坏或破坏现象较多,又不能有效采用传统力学方法进行分析,只能采用辅助结构构造措施和整体控制与细节把握相结合的办法解决。因此,保障“变形协调”和“能量合理转换”是合理结构体系和工程结构力学分析的基本要求。

通过吸取失败案例的教训和总结成功案例的经验,在土木工程设计过程中,无论是构建合理结构体系,还是工程结构分析,都应该引入整体分析的思路,即在应用传统力学计算时,引入“变形协调”和“能量合理转换”理念,这是确保土木工程稳定平衡和受力安全的一种行之有效的办法。工程结构设计中的“变形协调”与“能量合理转换”是系统联系思维,先用理论力学或材料力学或结构力学等经典力学进行初步估算,宏观把握工程结构内力与变形合理状态,再用有限元等现代力学工具进行精确分析,做到整体控制与细节把握,使得工程结构构造合理。

当今土木工程所面对的问题极其复杂,传统构建合理结构体系和工程结构的分析方法着重于研究子系统内部协调统一,利用“变形协调”和“能量合理转换”理念能够重新梳理和认识传统工程结构分析方法和工法措施的合理性、优点或不足,修正传统或已有工法措施,开发或研究新的合理工法与措施。不同于西医的“细胞解剖”观念,“变形协调”和“能量合理转换”观点着重于从整体上

把握,分析整个系统以及子系统之间的力学关系。正如中医的“系统联系”观念,只有在传统的构建合理结构体系和工程结构分析方法的基础上,引入“变形协调”和“能量合理转换”的理念,才能“中西医合并”,解决当今土木工程问题中的各种“疑难杂症”。

1.2 工程结构安全状态的三个理论问题

工程结构稳定平衡能够确保结构实际受力与变形状态、结构设计受力、变形状态一致,否则,就会改变结构实际状态力的传递或转移路径,逐渐恶化结构平衡状态稳定性。因此,工程结构安全分析必须面对三个问题:①结构平衡状态转化问题;②分支点稳定问题;③结构变形协调问题。

1.2.1 结构平衡状态转化问题

应该明晰“平衡”与“稳定平衡”概念的区别,可以用如图 1.1 所示的简单情

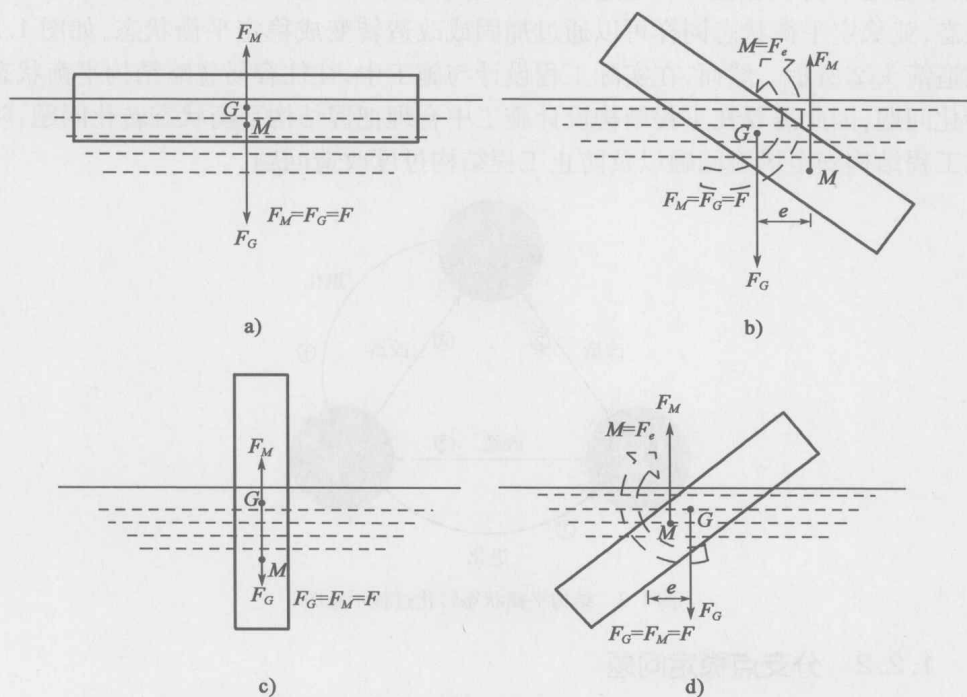


图 1.1 水中木板平衡状态稳定性示意图(状态 1 与状态 3)

a) 木板平放初始平衡状态; b) 木板平放扰动状态; c) 木板侧立初始平衡状态; d) 木板侧立扰动状态

况说明:平放的木板处于稳定平衡状态;竖放的木板则处于不稳定平衡状态。任何一个力学系统都存在平衡状态问题。不稳定平衡不能长期实现或存在。通俗地说,经得起扰动的平衡状态是稳定平衡,经不起扰动的平衡状态就是不稳定平衡。

对于图 1.1a) 扁平木板平放于水中,在重力 F_G 与浮力 F_M 的作用下处于平衡,受到扰动后,如图 1.1b) 所示发生偏转,此时木板在重力与浮力形成的抵抗合力矩 M 的作用下,立即恢复到图 1.1a) 的初始平衡状态(称为状态 1);对于图 1.1c) 所示木板侧立于水中的平衡状态,该状态理论上是可以实现的(木板在重力 F_G 与浮力 F_M 的作用下处于平衡),一旦受到扰动,木板在重力与浮力形成的倾覆合力矩 M 的作用下,随即发生如图 1.1d) 所示的倾覆,木板侧立状态无法稳定地实现或存在(称为状态 3)。以上分析的是刚体平衡体系,其稳定平衡状态(状态 1)与不稳定平衡状态(状态 3)存在明确的分界线。

实际工程结构施工和使用过程中,往往存在从稳定平衡状态逐渐退化为亚稳定平衡状态(称为状态 2)甚至不稳定平衡状态,如图 1.2 退化箭头①所示;反之,不稳定平衡状态也可以通过加固或改造转变成亚稳定平衡状态或稳定平衡状态,亚稳定平衡状态同样可以通过加固或改造转变成稳定平衡状态,如图 1.2 改造箭头②所示。然而,在实际工程设计与施工中,往往容易忽略结构平衡状态转化问题,因此需要在工程结构设计施工中合理把握结构平衡状态转化问题,防范工程结构安全风险问题以及防止工程结构过度改造问题。

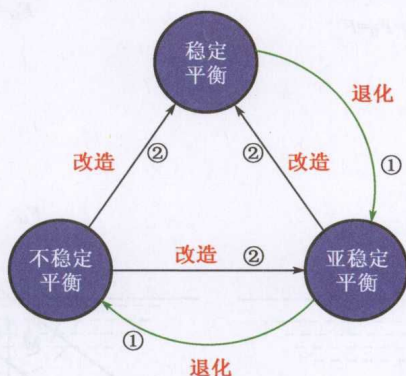


图 1.2 结构平衡状态转化过程示意图

1.2.2 分支点稳定问题

实际工程结构考虑积累损伤、变形协调、环境影响等平衡状态稳定性,其稳定平衡状态与不稳定平衡状态的分界线往往比较模糊。在结构施工和使用过程

中,往往存在从稳定平衡状态到不稳定平衡状态的亚稳定平衡状态(称为状态2),如图1.3所示。其中,分支点稳定问题在工程设计与施工中往往容易被忽略。例如有些桥梁,积累损伤可能致使桥梁稳定性的极值点稳定问题转变为分支点稳定问题;再如有些地下工程,从地层结构看好像是个极值点稳定问题,但有些支护结构具有明显的脆性破坏特性,可能出现雪崩式连锁破坏,属于明显分支点稳定问题。针对此类问题,即使采用监控量测也很难控制地层一支护结构的整体稳定性,因此,必须引起高度关注。只有改进支护结构措施,把分支点稳定问题转换为极值点稳定问题,才能有效地进行监控量测,并控制地层一支护结构的整体稳定性。

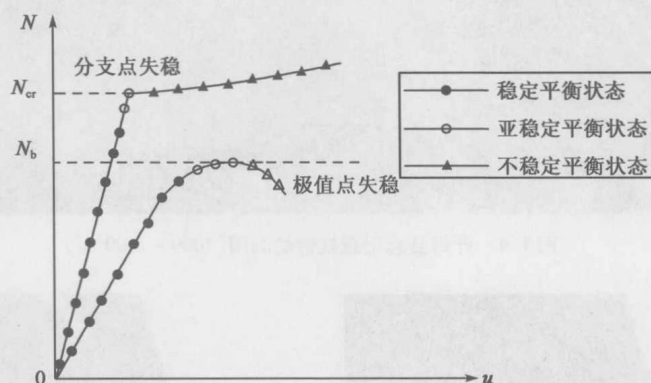


图 1.3 工程结构平衡状态稳定性类型图

下面以历史桥梁工程实例说明结构不稳定平衡、亚稳定平衡和稳定平衡的差别。开封县志记载虹桥是用木片做成(图1.4),横向连接较弱。仿清明上河图造的虹桥(无剪刀叉构造)容易晃动,稳定性不足,容易产生积累损伤而慢慢损坏(状态2)。因此,桥梁刚度稍微不足,影响桥梁正常使用(状态2)。而桥梁横向刚度不够,不但影响桥梁正常使用,而且影响结构变形协调,容易引起平衡状态逐渐损失甚至失去稳定,导致桥梁发生失稳破坏(状态3)。

浙江省泰顺仙居桥(图1.5)经过长期台风和山洪考验证明:传统编梁木拱廊桥通过顶与压工艺和榫结构使木结构产生预压应力,现代编梁木拱廊桥应该增加廊桥面内预拉钢筋而产生预压应力,达到结点或面紧密连接(泰顺廊桥传承人董直机先生建议)。通过撑与编工艺使木结构形成竖向、斜向、水平向全方位稳定,多重三角形连接使木结构整体达到三向稳定平衡与变形协调和外力做功能够有效转换为结构弹性应变能,使得编梁木拱廊桥组合结构系统由组合或单件部分受力体转变为整体共同受力体,这样编梁木拱廊桥骨架受力结构与

构造形成紧密连接的稳定体系,始终维持稳定平衡与变形协调和外力做功能够有效转换为结构弹性应变能以及保持原始内力变形状态,从而使木结构承受压弯性的能力达到极致(状态1),在力学原理、施工工艺、结构与构造体系、材料选择等几个方面值得现代土木工程学习与借鉴。

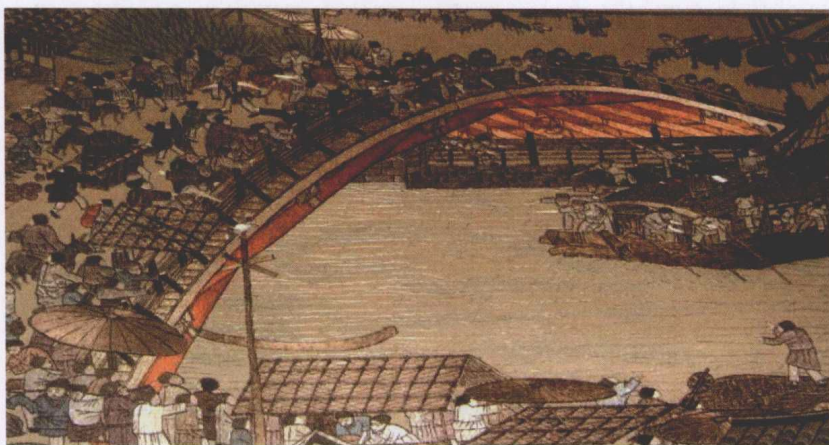


图 1.4 开封县志记载虹桥绘画图(1000 ~ 1100 年)



a)



b)

图 1.5 浙江省泰顺仙居桥(竣工于 1673 年)

1.2.3 结构变形协调问题

通过图 1.6 所示实例,可以直观地理解变形协调对结构平衡状态稳定性的影响。图 1.6 中的重物 W 由 n 根绳子悬挂,绳子作用力 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 与自重 W 共同作用处于平衡状态。该平衡状态因为绳索作用力 P_i 和重物 W 共同作用的变形协调关系不同,其平衡稳定状态也不相同,具体表现为:

(1) 当 W 受静载荷作用时, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 与 W 共同作用处于平衡状态; 当 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 都在各自强度允许范围内时, 系统处于稳定平衡。当出现某个 P_i 超过极限而破坏时, 剩余 $n-1$ 根绳索的受力状态会重新分配。在内力重分布过程中, 可能出现两种情况: 若内力能够合理转移, 剩余 $n-1$ 根绳索受力仍处于强度范围内, 系统将再次平衡; 若系统结构设计不当, 系统内力不能合理转移, 将导致剩余 $n-1$ 根绳索内力再次超过强度范围而引起断裂。该过程重复出现将引起连锁反应而使系统整体失稳。从能量传递角度看, 上述现象可以解释为: 由于重物 W 的作用, 每根绳子内积聚的应变能为 U_i ($i=1, 2, \dots, n$), 此时结构处于稳定平衡。如某个绳子内部储存能量 U_i 已达到其吸能极限而出现断裂, 则 U_i 完全释放。由于系统总体能量不变, 则结构变形能将重新分配, 可能出现两种情况: 若能量能够合理传递, 剩余 $n-1$ 根绳索能有效吸收所有变形能, 系统将再次平衡; 若结构设计不当, 外力做功将再次突破结构储能极限, 导致剩余 $n-1$ 根绳索断裂, 引起连锁反应而使系统整体失稳。

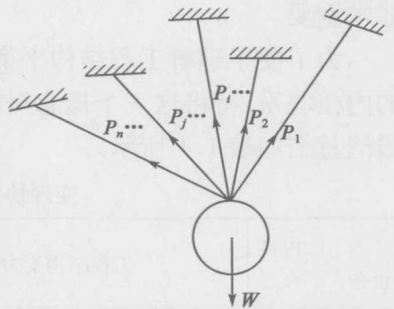


图 1.6 多根绳子悬挂下的稳定平衡与变形协调关系示意图

(2) 当 W 受到扰动时, W 将偏离原始位置, 因而 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 的大小将重新分布, 只有当 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 变形协调 (即 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 之间的内力能够合理转移), 且都在强度允许范围内时, 就处于稳定平衡与变形协调, 系统才能恢复到原始的位置; 否则, 当结构设计不合理时, 系统内部受力不能合理转移, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 的重新分布可能会造成某根绳子作用力 P_i 超过极限而破坏, 甚至引起连锁反应而出现系统整体失稳。从能量分析角度则更好理解: 外界对重物 W 的扰动将给结构输入一定的能量, 只有当结构变形协调 (即总体变形能在每根绳子之间能够合理传递), 且考虑空气和结构内部耗能机制 (如阻尼、摩擦等), 系统才能恢复到原始的位置; 否则, 当结构设计不合理时, 系统内部能量不能合理传递, $U_1, U_2, \dots, U_n$ 的重新分布可能会造成某个绳子无法吸收应有的能量而破坏, 甚至引起连锁反应而出现系统整体失稳。

(3) 当 W 受动荷载作用时, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 与 W 共同作用的稳定平衡与变形协调状态更加复杂, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 受力不均匀性更加明显, 此时问题变得更加复杂, 因为结构输入能量的大小随着外部动荷载作用形式的变化而变化, 考虑空气和结构内部耗能机制 (如阻尼、摩擦等), 结构体系在振动过程中也会消耗一部分能量。当结构变形协调, 通过外力做功输入到结构体系的能量与系统耗散的