

隧道及地下工程建设丛书

朱汉华 赵宇 孙红月 等 著



地下工程平衡稳定 理论与应用

Dixia Gongcheng Pingheng Wending Lilun yu Yingyong



人民交通出版社
China Communications Press

地下工程平衡稳定理论与应用

朱汉华 赵 宇 孙红月 等 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书阐述了地下工程平衡稳定理论与应用,主要介绍了地下工程平衡稳定性概论、地下工程平衡稳定性的能量分析方法、地下工程围岩稳定理论、地下工程平衡稳定理论、地下工程开挖能量最小原理、强预支护原理、连拱隧道与小净距隧道受力独立性、地下工程建设的环境稳定性、盾构隧道的稳定平衡、基坑工程的稳定平衡以及特殊环境隧道施工过程稳定平衡实例分析等内容。

本书可作为隧道与地下工程领域的设计、施工等人员的参考书,也可供相关院校的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程平衡稳定理论与应用/朱汉华等著. —北京:人民交通出版社,2012.8

ISBN 978-7-114-09986-1

I. ①地… II. ①朱… III. ①地下工程—稳定性
IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 179511 号

书 名:地下工程平衡稳定理论与应用

著 者:朱汉华 赵 宇 孙红月 等

责任编辑:曲 乐 李 喆

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.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京交通印务实业公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.5

字 数:390 千

版 次:2012 年 8 月 第 1 版

印 次:2012 年 8 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09986-1

定 价:36.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

我国是一个多山的国家,丘陵山地面积约占国土面积的三分之二,而且人口众多,土地资源条件决定了势必充分开发城市地下空间。对于不良地质条件和复杂工程环境条件的地下工程建设,会遇到许多不确定性的问题,现有理论已无法满足现代地下工程建设的需要。传统“松弛荷载理论”,如普氏理论和太沙基理论在没有采用变形协调控制手段修正时,对于围岩偏差和偏好的情况存在工程风险和支护过度的情况;依据“岩承理论”的新奥法源于硬岩,在不良地质条件下,对于分支点失稳的工程问题,很难把握围岩与支护共同受力平衡状态的稳定性,地下工程施工安全与衬砌开裂现象就说明了其存在的工程风险。因此,弥补已有理论的不足、探索易于应用的地下工程建设理论和方法,具有重大的理论价值和现实意义。

对于条件好的简单地质环境,地下工程的平衡稳定容易实现,只要把握正确的预测理念,选用什么理论和工法不重要;对于不良地质条件和复杂工程环境条件的地下工程建设,需要更清晰的思路和正确的工程保障措施,做到整体控制和细节把握并重,使施工全过程达到平衡稳定。本书围绕地下工程结构设计、施工及养护全过程与环境共同作用符合力学规律,通过对已有案例的总结归纳、理论分析、数值模拟等方面的研究,提出地下工程建设的平衡稳定理论——围岩与支护共同作用在任何状态或过程都要达到平衡状态、并且要确保该平衡状态的稳定性。以该理论为核心,进一步提出了平衡稳定理论体系,即以减小对围岩原始结构扰动的地下工程开挖能量最小原理、对具有稳定性缺陷围岩及时支护的强预支护理论、减小连拱隧道与小净距隧道开挖相互影响的隧道受力独立性、确保环境稳定和实现协调平衡的地下工程建设环境稳定与协调平衡理论等四项关键技术为支撑。该体系指导思想明确、技术措施完整,对当前地下工程建设有很好的适用性,可为地下工程安全、快速、经济地建设提供技术指导。

《地下工程平衡稳定理论与应用》是朱汉华与尚岳全科研团队在总结二十几年的系列工程实践和研究成果的基础上,经过重新提炼而成的。地下工程建设实

实践经验的理论凝练,是实践经验的归纳抽象、逻辑推理演绎、再实践应用验证、再理论提升的互动过程。研究成果的总结与发表,希望对我国蓬勃发展的地下工程建设有所帮助,并在新的实践中不断提高。其中研究团队主要成员有:朱汉华²、尚岳全¹、杨建辉³、孙红月¹、赵宇¹、周智辉⁵、文颖⁵、金小平⁴、王迎超¹、张迪⁶、石文广⁷、范秀江⁷、刘宽⁸等(1 浙江大学、2 浙江省公路管理局、3 浙江科技学院、4 浙江省交通科学研究所、5 高速铁路建造技术国家工程实验室、6 中铁第四勘察设计院集团有限公司、7 浙江省大成建设集团有限公司、8 钱江通道项目部)。

衷心感谢孙钧院士、王梦恕院士、刘宝琛院士、曾庆元院士四位恩师的热情关怀和指导!我们每一点进步都凝聚着四位恩师的心血!

编 者

二〇一一年十二月

目 录

第一部分 平衡稳定分析理论

1 地下工程平衡稳定性概论	3
1.1 地下工程结构的基本力学问题和研究方法	7
1.2 平衡稳定的物理概念	12
1.3 平衡状态失稳基本类型与失稳特征分析	14
1.4 经典木结构工程处于稳定平衡与变形协调状态的现实意义	17
1.5 经典地下工程围岩稳定平衡案例	22
1.6 工程结构的稳健性(鲁棒性)	24
1.7 地下工程平衡稳定性问题	27
2 地下工程平衡稳定性的能量分析方法	36
2.1 系统平衡稳定性分析的力素增量法	36
2.2 系统平衡稳定性分析的能量增量法	37
2.3 能量增量法在复杂环境地下工程稳定性控制中的应用	39
2.4 能量增量法在地下工程稳定性分析中的应用	42
3 地下工程围岩稳定理论的形成与发展	46
3.1 松弛荷载理论	46
3.2 岩承理论	49
4 地下工程平衡稳定理论	51
4.1 地下工程施工工法的适用性与统一性	51
4.2 地下工程平衡稳定理论	54
4.3 地下工程平衡稳定理论的拓展及表现形式	58
4.4 基本维持围岩原始状态	59
4.5 地下工程平衡稳定理论体系	60
4.6 地下工程建设理论的前置条件与实践要求	61
4.7 地下工程过程控制	62
4.8 细颗粒土质类围岩施工控制	68

第二部分 平衡稳定控制实施技术

5 地下工程开挖能量最小原理	71
5.1 围岩自承能力的力学机制.....	71
5.2 开挖能量最小原理.....	72
5.3 开挖能量最小原理的应用.....	73
5.4 围岩稳定爆破工序选择案例.....	75
6 强预支护原理	77
6.1 强预支护原理的基本思想.....	77
6.2 强预支护原理的表现形式.....	78
6.3 强预支护原理在自稳性好围岩中的应用.....	82
6.4 强预支护原理在浅埋自稳差围岩中的应用.....	88
6.5 强预支护原理在深埋自稳差围岩中的应用.....	99
6.6 强预支护原理在深埋大变形围岩中的应用	107
7 连拱隧道与小净距隧道受力独立性	118
7.1 隧道结构受力独立性概念及案例分析	118
7.2 连拱隧道结构受力独立性的设计与施工	119
7.3 小净距隧道受力独立性设计与施工	123
8 地下工程建设的环境稳定性	127
8.1 渗流场与围岩稳定的关系	127
8.2 应力场与地下洞室开挖的关系	132
8.3 山岭隧道在复杂应力环境下的稳定性问题	134
8.4 山岭隧道施工对高地应力环境的扰动	137
8.5 山岭隧道施工对边坡环境稳定性的影响	143
8.6 浅埋暗挖法施工城市隧道的环境稳定	153
9 盾构隧道的稳定平衡	165
9.1 盾构机选型	165
9.2 盾构隧道的稳定平衡与环境协调性	166
9.3 盾构隧道稳定平衡案例分析 1	195
9.4 盾构隧道稳定平衡案例分析 2	197
9.5 盾构隧道稳定平衡案例分析 3	200
9.6 盾构隧道稳定平衡案例分析 4	207

9.7 盾构隧道稳定平衡案例分析 5	210
9.8 盾构隧道平衡稳定案例分析 6	214
10 基坑工程的稳定平衡	222
10.1 基坑工程的稳定平衡与环境协调性.....	222
10.2 基坑工程失稳典型案例分析.....	223
10.3 平衡稳定理论在基坑工程中的应用.....	226
11 特殊环境隧道施工过程稳定平衡实例分析	239
11.1 隧道洞口工程施工实例分析.....	239
11.2 穿越河流与海底隧道设计与施工实例.....	240
参考文献	248

平衡稳定分析理论

第一部分



1 地下工程平衡稳定性概论

在人类实践活动中,需要利用大量自然形成的以及人工砌筑的土工结构来满足生产、生活需要。这类结构一般由沙石、土等非匀质材料构成,在外部作用下(外加荷载、外界干扰),极易在原始非连续界面形成逐步向周边扩展的裂缝以及在局部产生与外部作用不成比例增加的塑性变形,这些裂缝和变形将快速发展直至使部分或者整个结构丧失承载能力而发生失稳破坏。例如,隧道围岩在顶部土层压力以及侧向土压力作用下发生崩塌;深基坑在开挖过程中出现“踢脚”而引发倾覆破坏;土质边坡在强降雨以及地震作用下发生滑坡。结构由于丧失稳定而发生的破坏属于脆性破坏,其破坏过程在非常短暂的时间内完成,能量在瞬间得以释放,故破坏力巨大,往往造成生命财产的重大损失。为了避免破坏性事故的发生,人们在实践中总结出合适的施工方法和必要的支护措施,以提高地下工程安全度。为了检验这些方法和措施的有效性和适用性,需要探寻地下工程结构失稳破坏机理,探讨考虑不同工法及支护手段与结构相互作用的系统平衡稳定性分析方法,为地下工程设计与建造提供行之有效的理论分析手段。

哲家用不同的方式解释复杂世界中的各种事物及其相互关系,工程师则善于针对具体问题,通过不断地改变某些事物及其关系而达到改变世界的目的。对于复杂的地下工程问题,科技工作人员既要有哲学家的思维方式,能够合理思考和解释地下工程和各种物质作用及其相互关系,更要有工程师的技术把握能力,科学地通过连续不断地改变某些物质作用及关系而达到地下工程全过程稳定平衡的目的。

新的科学理论创立或新的技术方法提出,应该回答两个问题:

(1)研究获得的新理论、新方法和新技术,其价值是什么?

(2)同等条件下与其他研究结果比较,其效果或优势在哪里?

【总体思路】地下工程结构存在三个关系:①力学稳定平衡;②力与变形关系;③变形协调。在工程实践过程中具体表现为如下四个层面。

第一层面:关系①由牛顿力学、有限元等理论解决;关系②由虎克定律、本构关系等理论解决;对于简单问题,关系③认定解决或自然满足(对应类似“苹果落地点预测”等相对简单成熟工程问题)。

第二层面:关系①由牛顿力学、有限元等理论解决;关系②由虎克定律、本构关系等理论解决;对于复杂问题,关系③不满足或难于解决(对应类似“树叶落地点预测”等相对复杂新型工程问题)。

第三层面:构件之间或组合变形不协调问题可能会产生“力不能有效传递”的现象,从而出现在软弱不良地质环境下,地下工程全过程存在安全隐患甚至引起地下工程结构或构件破坏等结果。

第四层面:(1)传统解决办法:关系①+关系②(认定关系③自然满足,只适用于类似“苹果

落地点预测”等相对简单成熟工程问题)；(2)简单有效利用传统解决办法：关系①+关系②+关系③(采用整体控制与细节把握和围绕目标的过程控制方法解决结构变形协调问题后，把类似“树叶落地点预测”等相对复杂的新型工程问题转变为类似“苹果落地点预测”的相对简单的成熟工程问题，才能简单有效地利用传统解决方法，解决复杂新型工程问题)；犹如小孩和老人走路容易摔跤一样，但采用大人牵或扶着小孩和老人走路就能控制身体变形，预防小孩和老人走路摔跤。因此在把握整体规律基础上，分析已有或存在条件，面对需要解决具体问题，寻找合适有效的解决方法处理到位(“对症下药”代替“对症下药”，两者简单情况有时相同，但大部分情况不同，方法不对可能会导致坏结果)，再评价效果或改进方法，才是解决土木工程安全问题的总体思路。

【理论继承与借鉴改进】马克思主义理论核心是人的解放，通过研究生产力与生产关系、经济基础与上层建筑之间关系，揭示社会发展的一般规律，而阶级斗争、唯物主义等是其理论的组成部分。在俄国和中国等国家都是结合本国的社会发展实际，才取得了革命的成功，发展成列宁主义和毛泽东思想。而西方发达国家则结合社会发展实际，进行社会改良缓和矛盾，推动经济社会发展，也发展成许多新理论。正确的理论需要结合社会发展阶段的实际，究竟是采用革命手段还是采用改革手段，关键是要符合绝大多数人的利益和推动社会进步，因此马克思主义的生命力在于时代化、具体化、大众化。在地下工程建设中，传统“松弛荷载理论”和现代“岩承理论”也是在解决特定地下工程建设问题过程中提出的一般理论，实际应用中有成功也有不确定的情况。

牛顿力学、能量法、有限元等理论能够解决结构稳定平衡问题。虎克定律、本构关系等理论建立了材料受力与变形之间的关系。而结构的变形协调问题(构件内部或构件与构件之间力的有效传递问题)并未凸显出来，也缺乏明确的分析标准。对于简单结构，基于成熟的构造措施以及经实践验证合理的变形假定一般能够解决变形协调问题。对于复杂结构而言，工法与构造创新虽然克服了大部分连接可靠性问题，但是构件之间或非均匀构件内部是否满足变形协调的问题就不易把握，以往没有得到足够的重视，有时导致结构开裂或不利变形甚至破坏。可以基于传统“松弛荷载理论”和现代“岩承理论”等已有地下工程建设的一些基本理念，结合施工技术发展水平，工程环境变化情况，创造性地提出适应地下工程建设需要的新理论和新方法。“地下工程平衡稳定理论”正是基于这种需要而提出的，以一般性力学模型研究地下工程建设全过程稳定平衡与变形协调的问题，以期达到高效、安全地进行地下工程建设的目的。

地下工程建设理论的共同价值是“充分发挥围岩的自承能力”、“基本维持围岩原始状态”、“稳定平衡与变形协调”，解决问题时既要思路正确，更要手段有效到位，真正做到“具体问题具体分析”，好的理念若无有效的措施保障也是无法达到目标。正如国家安全的关键是战略和军事实力，而经济和科技实力等是支撑。工程结构安全的关键是把握物理概念与过程力学状态正确性和手段有效到位，而数值分析和模型试验等是支撑。越是复杂问题，正确把握物理概念与过程力学状态和手段有效到位的重要性也就越大。地下工程研究与实践属于半理论半经验方法，犹如灰箱模型，面对问题，坚持基本物理概念与力学方法及整体和联系的哲学思维，尽可能研究灰箱模型内涵，着重研究物质特性、手段效果，采用有效手段控制周边环境与结构共同作用行为更为关键。

【需求发展与研究转型】统筹区域协调发展,需要建设大量地下工程。丘陵山区隧道、城市地下车库、人防工程、地下商场等建设,由以根据地质选址为主转变为以根据规划选址为主,对应的建设环境也日趋复杂,更多地涉及破碎围岩和软弱围岩、地下水富集区、偏压、环境稳定等问题,地下工程构筑物的跨度和长度逐渐增大、新的结构形式不断出现,从而引发的新问题越来越多。伴随复杂工程环境、复杂地质条件和复杂的结构形式,确保地下工程建设安全的难度越来越高,合理把握地下工程施工工法的复杂性和重要性日益增加。探索易于应用的地下工程建设理论和方法,具有重大的理论价值和现实意义。

【研究目标与平衡稳定理念拓展】地下工程建设已经完成了从实践到理论的发展,形成许多理论体系,提高、完善和简化地下工程建设理论是当前的发展要求。工程结构既是人类创造的艺术品,也要承载着使用功能。因此,工程结构首先要把握整体周边环境(物质、水)的稳定平衡,然后要把握局部环境与结构相互作用。不但要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路径,结构“稳定平衡与变形协调”和“外力做功有效转换为结构弹性应变能”是统一的,变形协调又是能量法和力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、安全的基本要求,也是维持设计形式不产生有害过程的基础。根据实际情况,分别从“力、变形、能量”三要素中选取一个或几个要素可更好地控制地下工程结构行为,一般来说用“力、能量”进行定性或定量分析结构行为,而用“变形”进行控制结构行为。而确保结构的“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的过程控制,否则结构就会失稳或破坏。

通过对大量国内外经典工程坚持用心观摩与领悟、对现代力学知识进行逻辑分析与判断,可以得出结论:在整体周边环境(物质、水)稳定平衡的基础上,应通过整体力学分析,研究地层与支护结构组合系统力学状态与变化过程,必要时采用有效措施加固维持平衡稳定,使全过程满足围岩与支护结构体系的承载力始终保持大于隧道施工前保持原始岩体稳定平衡的原始内力,地下工程始终保持稳定平衡状态与变形协调,达到地下工程“基本维持围岩原始状态”,实现在保持围岩承载能力的条件下“充分发挥围岩的自承能力”的目的。

地下工程系统建设使用全过程都必须满足力学稳定平衡、力与变形关系、变形协调,以使独立受力的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,否则会改变原始三维力学平衡形式或达到新的三维力学平衡形式,甚至丧失稳定性。对于无法实现变形协调的多个独立受力单元的地下工程组合结构系统,避免连接部分开裂是重点。例如,连拱隧道与小净距隧道及多个独立平行斜交连续梁桥,要提高它们的受力独立性。因此平衡稳定理念就由稳定平衡拓展到稳定平衡与变形协调,包括“充分发挥围岩的自承能力”、 $F > P_0$ 或 $\Delta U > \Delta T$,以及延伸拓展“基本维持围岩原始状态”、围岩极限承载能力、监测只适用于极值点稳定问题而不适用于分支点失稳问题、开挖能量最小原理、强预支护理论、受力独立性、环境稳定与协调平衡理论等,便于更加全面研究地下工程建设安全等问题。

【目标与过程控制两大类研究方法】简单问题的目标控制容易把握,而复杂问题的目标控制则具有极大的难度,就像分析树叶落地和苹果落地的差别,容易预测从高处落下的一个苹果的落点,但很难预测从高处落下的一片树叶的落点。对于简单问题,可以采用精确分析和目标控制方法;对于复杂问题,应采用整体控制与细节把握和围绕目标的过程控制方法。对于条件

好的简单地质环境,地下工程的稳定平衡容易实现,选用什么理论和工法不重要,自然达到目标整体控制;而对于不良地质条件和复杂工程环境条件的地下工程建设,会遇到许多不确定性的问题,需要更清晰的整体思路和正确的工程保障措施,做到整体控制与细节把握和围绕目标的过程控制,使得全过程达到稳定平衡。因此,需要突破“确定分析与非确定分析”和“目标控制与围绕目标的过程控制”方法上的对立,实现“具体问题具体分析”思路上的统一。

【理念与工法的关联性,应用范围的拓展】地下工程本质效果、表现形式、研究方法、手段措施彼此息息相关,其中表现形式、研究方法、手段措施与环境 and 条件相耦合,也随着条件变化而变化,关键是把握本质与区分形式,方法要正确,措施要到位。实践发展要求理论创新,犹如计算机系统主板把许多不同功能硬件有机组合起来一样,地下工程平衡稳定理论在整体周边环境(物质、水)稳定平衡的基础上,应通过整体力学分析研究地层及支护结构组合系统力学状态与过程,用地下工程平衡稳定理论把传统“松弛荷载理论”和现代“岩承理论”的基本内容有机地组合起来,同时拓宽了四个方面内容:①尽可能减小对围岩原始结构扰动的隧道开挖能量最小原理;②对具有稳定性缺陷围岩及时支护的强预支护理论;③减小连拱隧道与小净距隧道开挖相互影响的隧道受力独立性;④确保环境稳定和实现协调平衡的地下工程建设环境稳定与协调平衡理论。以丰富地下工程平衡稳定理论体系,更加全面体现地下工程平衡稳定性的根本内涵。

【平衡稳定理论是“松散荷载理论”和“岩承理论”的继承和发展】任何事物演变都遵循“简单(初步认识或研究)—复杂(抓住本质但方法复杂)—简单(抓住本质且方法简单有效)”的发展规律,依据“松散荷载理论”统计地下工程围岩塌方规律的规范值,对大部分地下工程预测评价是可行的,但对于围岩偏差和偏好的情况存在工程风险和支护过度。依据“岩承理论”的新奥法源于硬岩,虽然强调了硬岩与软岩应用有区别,但在不良地质条件下,很难把握围岩与支护共同受力平衡状态的稳定性,地下工程施工安全与衬砌开裂现象就说明了其存在的工程风险。本项目研究成果基于规范但又宽于规范,在已有地下工程建设理论分析的基础上,以平衡稳定理论的本质把握地下工程建设全过程,建立了更加全面的地下工程平衡稳定理论体系,同时可以较好地解释许多工法和理念的合理性,如取消系统锚杆的措施、合理开挖与支护技术等,以便更好地指导地下工程设计与施工。

【研究总结】适应自然环境和生产力发展水平的简单经济方法就是好方法,理论体系和技术方法需要继承、借鉴、发展和简化,才能更好地服务于工程建设。本项目研究成果具有四大特点:①从结构“力、变形、能量”三要素和过程控制均应满足变形协调角度,重点阐述地下工程结构全过程稳定平衡的内涵,工程建设过程中应根据实际情况,分别从“力、变形、能量”三要素中选取一个或几个要素,合理控制地下工程结构行为,真正达到全过程稳定平衡;②提炼和发展了许多地下工程理论体系的共性(本质要求),即平衡稳定与变形协调以及延伸理念,形成了较系统的新理论体系,即地下工程平衡稳定理论,并提出“精确分析”和“整体控制与细节把握”两大类研究方法,以及提出“目标控制”与“围绕目标的过程控制”两类地下工程安全保障措施;③将地下工程建设理论与已有工法和实际地质环境等相结合(手段措施),实现解释和完善已有工法,开发新工法,并形成与已有工法和实际地质环境等相适应的个体化设计施工方案,做到具体问题具体分析,防范事故,确保安全;④总结了地下工程本质效果、表现形式、研究方法、手段措施的相互关系,它们都与环境和条件相耦合,随着条件变化而变化,关键是以不变应

万变,把握并区分本质与形式,方法要正确,措施要到位。

1.1 地下工程结构的基本力学问题和研究方法

1.1.1 地下工程结构的基本力学问题

结构必须在能够满足各项预定功能的条件下,再考虑经济性。结构的功能要求主要表现在以下三个方面:

(1)结构能够承受在正常施工和使用过程中可能出现的各种作用,如外加荷载、基础沉降、温度变化等;并在地震、强风等偶然事件发生时,仍能保持必要的整体稳定性,不发生倒塌。

(2)在正常使用条件下,结构具有良好的工作性能,满足正常使用要求。如不发生影响正常使用的过大变形或局部损坏。

(3)结构在正常使用和正常维护的条件下,在设计基准期内,具有足够的耐久性,不发生对结构使用寿命有危害性的改变。

以上三项功能可归纳为安全性、适用性和耐久性。其中第(1)项是指结构的承载能力和整体稳定性,关系到人身安全,称为结构的安全性要求;第(2)项关系到结构能否正常使用,称为结构的适用性要求;第(3)项关系到结构能否长久使用,称为结构的耐久性要求。

为了保证结构的功能要求,在结构设计时通常将结构的工作状态分为承载能力状态与正常使用状态分别加以考虑。当整个结构或结构的一部分超过某一特定状态而不能满足设计规定的某一功能要求时,则称此特定状态为该功能的极限状态。结构设计就是控制结构的工作状态始终处于承载能力与正常使用的极限状态范围之内。

1) 承载能力极限状态

承载能力极限状态是指结构或结构构件达到最大承载能力或不适合继续承载变形时的极限状态。常见的承载能力极限状态如下。

(1)结构或连接处因超过材料强度而破坏(包括疲劳破坏)。

(2)整个结构或结构的一部分失去稳定。如隧道主拱圈在围岩压力作用下失稳,挡土墙在土压力作用下整体发生滑移或倾覆。

(3)因过大的塑性变形等原因导致结构由原来的不可变体系变成可变体系。如钢拉杆达到屈服时,将产生很大的变形,以 Q235 钢计算,屈服结束时的应变约为 2.5%,对于 6m 长的拉杆当伸长 15cm 时结构往往因为变形过大导致几何形状发生显著变化,虽未达到最大承载能力,但已彻底丧失对结构体系的支承功能。

2) 正常使用极限状态

正常使用极限状态是指结构或结构构件到达正常使用或耐久性能的某项限值的状态。常见的正常使用极限状态如下。

(1)影响结构正常使用或外观的变形:如结构出现过大大变形或裂缝,容易使用户在心理上产生不安全感。

(2)影响结构正常使用或耐久性的局部损坏:房屋结构的过大变形会造成房屋内部粉刷层

剥落、屋面积水等现象;混凝土结构的过大裂缝宽度会影响结构的耐久性;大桥的桥面板变形过大,桥面板与桥面铺装层变形不协调,会导致桥面铺装层经常破坏;大桥在车辆荷载作用下纵向收缩过大,会导致伸缩缝容易破坏。这些破坏是不影响结构安全的局部损坏,属于正常使用范畴。

(3)影响结构正常使用的振动:列车过桥引起桥梁振动,过大的桥梁振动必然导致车辆振动响应很大,势必影响桥上列车的行驶安全性与乘客的舒适性。为了确保桥上列车安全舒适地运行,桥梁横向与竖向刚度都必须满足一定的限值要求。为此,普速铁路与高速铁路根据各自列车安全舒适运行的要求,对桥梁刚度提出了不同的限值要求。同样跨度的桥梁,普速铁路32m 预应力混凝土梁竖向挠度容许值为 $L/800$,而高速铁路梁竖向挠度容许值为 $L/1600$,其刚度要求要比普速铁路梁高得多。

(4)影响正常使用的其他特定状态。对于采用无砟轨道的桥梁,由于梁端竖向转角使得梁缝两侧的钢轨支点产生上拔或下压现象。当上拔力超过扣件的扣压力时将导致钢轨与下垫板脱开,当垫板所受下压力过大时可能造成垫板破坏。为了保证梁端扣件系统的受力及线路安全,减少维护工作量,对高铁桥梁梁端竖向转角变形提出了相应的限值要求。

对于工程结构建设,受力简单、明确、可靠、经济、地基稳定、结构构造合理、刚度适当、安全度有富余、基本处于弹性工作状态,是工程结构的基本要求。特别是在复杂环境条件下,如复杂地质条件、复杂风载环境、复杂因素耦合作用等,采用受力简单明确的简单结构组合,能简化复杂结构的受力分析,部分复杂节点或构造受力分析可采用类比或试验确定。这样,复杂结构受力就相对容易把握,实际应用中也就不容易出现问題,从而实现复杂问題简单化,提高结构的安全可靠性。

工程建设及养护全过程必须与周围环境相协调,共同作用符合力学规律,合理的结构构造和施工养护工艺是保障工程结构强度、刚度、稳定的基础。施工与养护过程中每个步骤或每个时段,工程结构独立受力系统,含临时结构或隧道围岩与支护系统,都必须满足力学稳定平衡、力与变形关系和变形协调,以使得独立受力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,否则会改变原始三维力学平衡形式或维持新的三维力学平衡形式,甚至可能丧失稳定性;而对于变形不协调的几个独立受力地下工程组合结构系统,还是分开好,避免连接部位开裂。例如,连拱隧道与小净距隧道,应尽可能使它们具有受力独立性。所以工程结构设计要符合物理概念,才能始终保持结构稳定。历史上许多大型(如大跨、高耸等)工程结构、开挖与初期支护阶段的地下工程或边坡工程(因开挖与支护顺序不当)等,都存在丧失结构稳定而破坏的现象。因此,保持工程结构整体或施工过程稳定性至关重要。

综上所述,工程结构建设和使用过程中的基本力学问题包含以下两点:

(1)刚度:结构正常使用极限状态,即结构抵抗变形能力、不同材料或部件组合的变形协调。

(2)强度、稳定:两者同属结构承载力极限状态。一般情况下,强度研究较充分,规范有专门规定,商业分析计算程序较多;稳定则包含结构受力平衡或运动状态、结构形态的稳定性。

浙闽南部古代廊桥、钱塘江大桥、都江堰、古代石窟等结构至今仍保持安全,就是工程结构满足基本力学问题——强度、刚度、稳定的最好诠释。

在地下工程建设以及使用过程中,针对承载能力要求中的强度问題重视得比较多,实际工

程中出现强度破坏的现象也很少,但是地下工程结构受力平衡状态、结构形态的稳定性问题往往被忽视,导致很多工程因为失稳而破坏;对于正常使用极限状态,一般地下工程结构对使用荷载作用下的变形没有特殊要求,也就是说一般不会出现过大变形而影响行车安全平稳性等正常使用要求,但是有一点值得注意,当地下工程围岩与支护系统或支护系统各部件之间的刚度不匹配、变形不协调时,容易出现局部破坏,如类似上述桥梁的铺装层与伸缩缝破坏的现象。根据结构设计基本要求与地下工程目前的实际情况,地下工程结构稳定性与构件之间的变形协调问题,是目前需重视的基本力学问题,为方便研究统称为地下工程稳定平衡问题。

1.1.2 地下工程结构的研究方法

简单系统的稳定问题,可以通过计算手段确定其稳定承载力,达到稳定设计的目标,如压杆与钢梁的稳定问题,这种方法称为确定性分析方法。对于一些复杂系统的稳定问题,如地下结构的稳定性问题,因为结构参数不明确以及边界条件不确定,有时很难计算出稳定承载力,此时可用类比设计的方法进行整体控制,称为非确定分析方法。简单系统与复杂系统的稳定性问题,犹如苹果与树叶落地预测问题。简单系统的稳定性分析,像预测从高处落下的一个苹果的落点,目标控制容易把握;而复杂系统的稳定性分析,更像从高处落下的一片树叶,其落点的目标控制具有极大的难度,这样研究复杂问题就必须在把握基本规律和抓住主要矛盾的基础上,应用逻辑思维做细做实每个环节或过程控制,真正落实整体控制、细节把握,以及围绕目标的过程控制。

工程设计中,究竟采用确定性精确分析方法,还是采用非确定性的整体控制、细节把握,以及围绕目标的过程控制、类比设计、反馈修正方法,要视情况而定,关键要做到对结构分析有效、结构安全有利。例如,钢结构主体构件宜采用计算分析方法,而节点板宜采用类比、试验方法;地下工程结构在均质硬岩、硬土等简单环境的稳定性问题宜采用计算分析方法,而在破碎岩层、软土、沙土并含承压水等复杂环境的稳定性问题宜采用目标整体控制、细节把握或过程控制、类比设计、反馈修正方法。

目标整体控制方法也要根据具体情况,采取不同的控制手段。地下工程结构在均质硬岩、硬土等简单环境的稳定问题中,不利变形空间和不平衡力学对结构安全影响不大,适当延时填充围岩变形空间或平衡围岩外力作用也不会对结构产生较大的不利影响,如盾构尾部空隙适当延时填充。在浅埋盾构围岩能自身基本保持稳定或开挖稳定性好的基坑等情况下,可利用围岩的自稳条件,适当滞后填充和支护,以提高施工效率。

但是在破碎岩层、软土、沙土并含承压水等复杂环境进行地下工程建设时,不利变形空间和不平衡力学问题对稳定性影响显著,应该及时填充围岩变形空间并固化,及时平衡围岩外力作用,否则会对结构产生不利影响。如隧道塌方空洞、盾构盾壳和尾部空隙应该及时填充并固化,或加固浅埋盾构上部地层,或增加平衡荷载,这样才能保持基本稳定,否则可能出现大范围的破坏。在不加维护且不足以保持结构自身稳定的情况下,不及时填充和支护将存在结构与围岩共同作用失稳的风险。如图 1.1.1 和图 1.1.2 所示的基坑破坏,就是不及时跟进支护造成灾难性后果的教训。