

DIXIA GONGCHENG PINGHENG WENDING
LILUN YU GUANJIAN JISHU JI YINGYONG

地下工程平衡稳定 理论与关键技术及应用

王普恩 题

朱汉华 等 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

地下工程平衡稳定 理论与关键技术及应用

王希恩 题

朱汉华 等 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

地下工程平衡稳定理论与关键技术及应用 / 朱汉华等著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016. 9

ISBN 978-7-114-13282-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 194327 号

书 名: 地下工程平衡稳定理论与关键技术及应用

著 作 者: 朱汉华 等

责任编辑: 曲 乐 黎小东

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 8.75

字 数: 130 千

版 次: 2016 年 9 月 第 1 版

印 次: 2016 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13282-7

定 价: 30.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

内 容 简 介

工程力学是建立在材料性质和微观结构确定的基础之上的。但是部分地下工程结构(例如软岩隧道)在受力过程中,材料性质和微观结构会发生变化且变化方式及规律未知,其结构的本构关系、积分和传力路径会发生改变,应用工程力学解决地下工程结构问题时,应要求工程结构设计、施工满足结构合理性与变形协调控制条件。本书在继承松弛荷载理论、岩承理论与相应技术的实质及其指导现代地下工程建设实践的意义和价值的基础上,建立了地下工程平衡稳定理论,并创新了四项关键技术。作者认为,在地下工程结构设计与施工中,应将结构稳定平衡为主的力学控制条件变为结构稳定平衡、结构变形协调控制的力学与变形双重控制条件,这既能解释规律又能应对不确定性。

本书为解决新型地下工程安全问题做了有益尝试,可供地下工程建设相关人员阅读参考。

前 言

据质量安全事故统计,各类坍塌事故中死亡人数比例为:地下工程施工坍塌占 32.6%,基坑开挖与挡墙坍塌占 23.9%,即使一些发达国家交通工程的结构性缺陷也高达 11%。统计表明:结构组织有效度高的工程问题较少,而结构组织有效度低的工程问题较多,其材料性质和微观结构发生改变,不符合工程力学的适用条件,只能选择合理的结构构造满足结构变形协调控制,否则,工程结构会产生计算结果与实际结果相差较大的现象,甚至出现安全隐患。

通过近两个世纪的探索,地下工程建设技术得到了很大的发展。目前,地下工程结构在计算分析方面主要采用传统松弛荷载理论(类似荷载结构法)或数值分析法,在合理结构构造、施工工法工艺等方面主要采用现代岩承理论(类似地层结构法)。这些已有理论或方法虽隐含“变形协调控制”假定,但该假定在实际应用中往往被忽视。强调结构变形协调控制问题,把“变形协调控制”作为显性边界条件,将更有利于地下工程结构与围岩共同作用,从而达到“稳定平衡与变形协调控制”状态。

对于条件好的简单地质环境,地下工程稳定平衡容易实现,只要把握正确物理概念,选用什么理论和工法似乎不那么重要。但是,对于不良地质条件或复杂工程环境条件的地下工程建设,则需要有效的工程措施来保障结构变形协调控制,否则会影响结构体系中力的合理传递或转移路径,进而改变结构平衡稳定状态甚至形成新的有害平衡状态。地下工程平衡稳定理论和开挖能量控制技术、强预支护技术、受力独立性综合技术、变形协调控制技术等关键技术就能有效解决此类问题。

参与本书编写的人员还有陈孟冲、牛富生、孙富学、虞兴福、陈华、林天干、赵文琴、赵永利、张志宏等。

许多好友也为本书的编写做出了重要的贡献,在此一并致谢!特别得到孙钧先生、王梦恕先生、石根华先生、刘宝琛先生、曾庆元先生五位大家的悉

心指导,特此敬意!

由于水平所限,书中难免存在不妥与错谬之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 8 月

目 录

绪论	1
----	---

第一部分 地下工程平衡稳定理论与关键技术

1 地下工程平衡稳定理论的形成与发展	5
1.1 工程结构稳定平衡与变形协调控制的物理意义	5
1.2 传统荷载理论与认识	8
1.2.1 松弛荷载理论	8
1.2.2 岩承理论	11
1.3 地下工程平衡稳定理论	14
1.3.1 地下工程平衡稳定理论的建立	14
1.3.2 地下工程平衡稳定理论的拓展及形式	21
1.3.3 地下工程平衡稳定理论的应用	23
2 地下工程平衡稳定理论的关键技术	26
2.1 开挖能量控制技术	26
2.1.1 开挖能量控制技术的基本思想	26
2.1.2 开挖能量控制技术的应用	27
2.2 强预支护技术	30
2.2.1 强预支护技术的基本思想及表现形式	30
2.2.2 强预支护技术在自稳性好围岩中的应用	34
2.2.3 强预支护技术在深埋自稳差围岩中的应用	37
2.2.4 强预支护技术在深埋大变形围岩中的应用	42
2.2.5 强预支护技术在浅埋自稳差地层中的应用	49
2.3 受力独立性综合技术	57
2.3.1 隧道结构受力独立性概念及案例分析	57
2.3.2 连拱隧道结构受力独立性的设计与施工	59

2.3.3 小净距隧道受力独立性设计与施工·····	64
2.4 变形协调控制技术·····	67
2.4.1 结构变形协调控制的必要条件·····	67
2.4.2 山体隧道变形协调控制措施·····	69
2.4.3 盾构变形协调控制措施·····	71
2.4.4 双液浆二次补注工法·····	73

第二部分 山岭隧道建设中平衡稳定理论应用

3 土石混合松散地层隧道施工变形协调控制技术·····	79
4 隧道穿越运营公路合理工法分析·····	87

第三部分 城市地下工程建设中平衡稳定理论应用

5 盾构法施工过江隧道中平衡稳定理论应用 ·····	105
5.1 地铁盾构隧道变形协调控制技术 ·····	105
5.2 钱江隧道施工穿越两岸堤防变形协调控制技术 ·····	111
6 基坑工程变形协调控制技术 ·····	119
6.1 基坑工程失稳典型案例分析 ·····	119
6.2 钱江隧道超深基坑施工变形协调控制技术 ·····	123
参考文献·····	131

绪 论

地下工程有“三怕”:怕水,怕软,怕变形。其对应的整治措施分别为:治水、防渗;防塌、防失稳;预测和控制施工变形。三个问题的核心还是结构变形协调控制问题,因此,地下工程设计与施工的关键问题是:①尽可能多利用围岩自承和自稳能力;②施工中尽可能少扰动围岩,不使其自承和自稳能力下降甚至受到破坏;③设法提升和增强围岩自承和自稳能力。

为什么地下工程施工过程中容易发生坍塌事件甚至安全事故呢?作者通过大量地下工程施工实践和坍塌事件或安全事故调查分析,得出如下结论:

(1)地下工程“基本维持地层(围岩)原始状态”比“合理发挥地层(围岩)自承能力”更容易判断地下工程结构体系是否满足结构变形协调控制。若满足结构变形协调控制,则结构实际受力变形状态与设计受力变形状态基本一致;反之,结构实际受力变形状态与设计受力变形状态有差别,容易产生各种问题甚至是意想不到的质量问题或安全问题。

(2)在地下工程设计过程中,工程师们往往忽视了施工过程的结构力学平衡稳定性。假如隧道结构力学平衡稳定性都不满足,怎么还会满足新奥法呢?实际上,隧道设计中不但要研究结构整体稳定性,还要研究施工过程中分部结构稳定性。

(3)有的工程师往往缺乏类似施工经验,虽然熟记新奥法理念,却忽视了隧道结构力学稳定平衡问题,方法应用不到位,实际还是不满足新奥法。切记新奥法是理念、结构力学是基石。

本质上,新奥法是一种地下工程建设过程中“合理发挥地层(围岩)自承能力”的设计、施工理念与方法。如果结构构造欠合理,虽然有监控量测或预测控制,还可能发生特殊风险甚至安全事故;而地下工程建设全过程必须满足结构稳定平衡与变形协调控制,才能真正“合理发挥地层(围岩)自承能力”和满足建设运营全过程质量安全要求。例如:①当地下工程施工过程中,地层(围岩)自承能力足以支撑结构稳定平衡时,采用新奥法与矿山法施工没有差异优

势;②地下工程施工过程中,当地层(围岩)自承能力不足以支撑结构稳定平衡时,特别是地层(围岩)很差时,新奥法施工理念的“先支后挖”或“即挖即支”方法就能使得地下工程结构施工过程中满足结构稳定平衡与变形协调控制,而矿山法的“先挖后支”方法就容易导致地层(围岩)坍塌。

作者认为,现有隧道理论和方法是对的,但似乎不够全面。如何应对地下工程变形突变问题的不确定性,则要求地下工程结构设计、施工满足结构合理性与变形协调控制条件。因此,地下工程结构变形协调控制方法解决地下工程结构安全问题的原则为:

(1)确定态势——确定物体运动状态与趋势,转化不确定性因素为确定性问题;

(2)控制危害——采用最小耗能原理、传力介质合理性、变形协调控制等方法判断结构危害,并采取有效措施控制结构危害;

(3)计算平衡——自然或经典工程结构借鉴是前提,结构稳定平衡与变形协调控制是关键,工程结构设计与施工中的力学平衡计算问题是手段。

牛顿力学($F=ma$,结构重心是不变的)是工程力学的源头,应用工程力学($F=P+T=P_0$)解决工程结构力学与变形问题时,其求和过程 $\sum F_i = \sum P_{0j}$ 应满足以下两个条件:①受力结构质量(构造) m 、运动(变形) a 的稳定性和环境适应性;②受力结构传力 F 的合理性;否则,要求采用工程结构构造控制措施。工程力学是建立在材料性质和微观结构确定的基础之上,应用工程力学解决工程结构问题则要求工程结构设计、施工满足结构变形协调控制条件。但是部分工程结构在受力过程中,材料性质和微观结构会发生变化且变化方式及规律未知,其结构本构关系、积分和传力路径会发生改变。

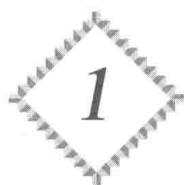
土木工程设计、施工的分析方法表述为:①工程结构稳定平衡理论解决相对成熟工程问题可用精确分析法;②工程结构稳定平衡与变形协调控制方法解决相对复杂工程问题先用有效工程措施基本维持地层原始受力变形状态,再用精确分析法解决工程问题。

因此,在地下工程建设过程中,按照结构变形协调控制方法改进设计与施工,在设计及施工规范的基础上,预先、及时或固有形成有效的承载结构层、施工过程控制及空间稳定性,即“时空效应”,特别是施工过程的空间稳定性和变形协调控制问题,有利于确保力按设计路径传递,控制力的不合理甚至有害转移,从而避免围岩突变甚至坍塌问题,保障地下工程结构质量和安全。

第一部分

地下工程平衡稳定 理论与关键技术





地下工程平衡稳定理论的形成与发展

地下工程围岩赋存于一定的地质环境中,受构造、风化等作用影响,围岩内部形成的各种结构面,把完整岩体切割成形状和大小不同的岩块。地下工程开挖前,岩体处于平衡稳定状态,开挖使围岩产生卸荷回弹变形和应力重分布。若围岩强度高于开挖后的重分布应力作用,围岩不会发生显著的变形和破坏,无需支护或仅需局部支护即可维持围岩稳定;若围岩强度低于重分布应力作用,围岩将产生较大的变形并可能引起失稳破坏,这时必须采用强预支护结构才能确保围岩与支护结构共同作用达到稳定平衡与变形协调控制,真正“合理发挥围岩自撑能力”。

1.1 工程结构稳定平衡与变形协调控制的物理意义

为了说明工程结构稳定平衡与变形协调控制关系的物理意义,可以通过如图 1.1 所示重物稳定平衡与变形协调控制关系示意图,直观地理解变形协调控制对结构平衡状态稳定性的影响。图 1.1 中的重物 W 由 n 股绳子悬挂,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控制关系不同,其平衡稳定状态也不相同,具体表现为:

(1)当重物 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,此时,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,可能会出现两种情况: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 $U_i (i=1,2,\cdots,n)$,此时结构处于稳定平衡。倘若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,将出现两种情况: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。

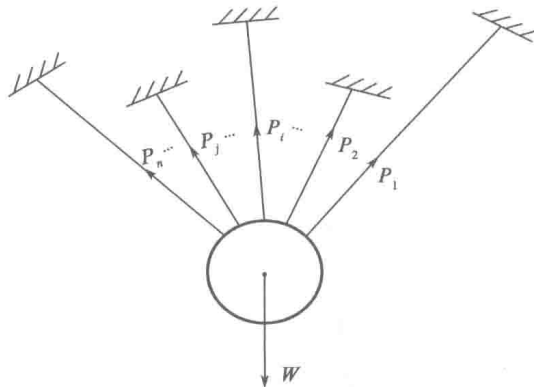


图 1.1 多股绳子悬挂下的重物稳定平衡与变形协调控制关系图

(2)当重物 W 受到扰动时,重物 W 将偏离原始的位置,因而 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 的大小将重新分布,只有当 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 变形协调(即 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 之间的内力能够合理转移)时,且都在强度允许范围内时就处于稳定平衡与变形协调控制,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, $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 的重新分布可能会造成某个绳子作用力 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)时,且考虑到空气和结构内部耗能机制(例如阻尼、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, $U_1, U_2, \cdots, U_n$ 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)当重物 W 受动荷载作用时,各 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 受力不均匀性更加明显, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 与 W 共同作用的稳定平衡与变形协调控制更加复杂,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,考虑到空气和结构内部耗能机制(例如阻尼、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能量处于动态平衡过程,系统不会出现能量不断积聚过程。当结构设计不合理、变形不协调时,通过外力做功输入到结构体系的能量总体上大于系统耗散的能量,系统能量不断积聚,导致发散的系统振动,最终出现能量在结构薄弱环节积聚而导致局部破坏甚至引起连锁反应而出现系统整体动力失稳。

一般工程结构力学分析中隐含荷载、变形适应性;其实工程结构首先要稳定平衡,再者结构措施要保障结构变形协调控制,往往实际工作中容易忽视!

为了便于理解工程结构稳定平衡、稳定平衡与变形协调控制两个概念的内在联系,特将这两个概念对应的工程结构受力分析问题以及理论适用条件进行了归纳总结,如表 1.1 所示。

表 1.1 变形协调控制与结构平衡状态的关系

内容 \ 状态	工程结构受力分析	适用条件
稳定平衡	采用精确分析法解决工程结构问题	隐含或自然满足变形协调控制
稳定平衡与变形协调控制	先整体控制与细节把握,再用精确分析法解决工程结构问题	构建合理结构体系和合理工法或工艺以及有效过程控制措施等,确保力的合理传递或转移路径等

因此,工程结构只有处于稳定平衡与变形协调控制状态才能存在。

对于地下工程结构而言,“基本维持地层(围岩)的原始状态”和“施工过程控制”至关重要。

以新奥法等为代表的现代施工技术的核心是“充分发挥围岩的自承能力”,这一提法从力学角度提出了保持围岩稳定的思路,决定围岩稳定性的关键是围岩与支护系统共同作用达到“稳定平衡与变形协调控制”。在实际工程中,地下工程开挖后围岩应力会重分布,特别是存在塑性区时围岩的应力还会

产生转移。因此,围岩应力的集中区分布、围岩稳定性可能出现突变点位置的把握是十分困难的,也难以用应力控制手段实现围岩的稳定性判断。在围岩稳定性评价中,关键是要控制异常变形,对Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级偏好围岩主要控制块体掉落和块体的稳定平衡,而Ⅲ级偏差围岩及Ⅳ级、Ⅴ级和Ⅵ级围岩主要控制变形协调、不产生有害变形导致坍塌和丧失稳定平衡。

“基本维持地层(围岩)原始状态”的理念,直接面对围岩的“稳定平衡与变形协调控制”,从整体稳定的视角出发,既是保持原有围岩与支护系统共同作用达到稳定平衡和控制变形异常,又是“合理发挥地层(围岩)自承能力”的充分必要条件。因此,工程实践中“合理发挥地层(围岩)自承能力”和“基本维持地层(围岩)原始状态”两者理念相同,而“基本维持地层(围岩)原始状态”理念便于实践应用并控制围岩稳定。

地下工程不同的施工工序通常会给岩土体带来不同的受力变形状态。然而,地下工程设计中通常只考虑工程结构完成时的受力状态,而忽视施工过程中的受力变形状态。自承能力好的围岩,在应力重分布后可以重新调节达到稳定平衡,开挖方式对围岩和支护结构的影响不大;但在自承能力较差的岩土体中,施工过程中必须合理把握施工工序,注重过程控制,把握施工过程中岩土体与支护结构的受力变形状态,才能确保其受力变形状态符合设计要求,从而实现地下工程岩土体“基本维持地层(围岩)原始状态”及结构“稳定平衡与变形协调控制”。因此,围绕岩土体的受力变形状态进行研究,则地下工程过程控制和时空效应的研究与实践是等效的。要切实落实过程控制,必须注重地下工程建设的时空效应,做到四个及时:“及时支护,及时封闭,及时量测,及时反馈”。

1.2 传统荷载理论与认识

1.2.1 松弛荷载理论

20世纪20年代,Haim、Rankine、ИИик等提出传统“松弛荷载理论”,其核心内容是:稳定的岩体有自稳能力,不产生荷载;不稳定的岩体则可能产生坍塌,需要用支护结构予以支承。这样,作用在支护结构上的竖向荷载就是围

岩在一定范围内由于松弛并可能坍落的上覆岩土层的重量 γH 。三人理论的不同之处在于, Haim 根据散体理论认为侧压力系数等于 1, Rankine 认为等于 $\tan^2(45^\circ - \varphi/2)$, ИНИК 则根据弹性力学理论认为是 $\mu/(1-\mu)$ 。松弛荷载理论适用于浅埋隧道, 但是随着隧道埋深的不断增大, 人们发现该理论存在许多不合理之处, 对埋深较大的隧道, 计算得到的压力偏大。根据对工程中围岩坍塌的观察和室内模型试验, 普氏 (М. Л. Промобьяконов) 和太沙基 (K. Terzaghi) 改善了这一理论。

松弛荷载理论曾经产生过重要的影响, 作为围岩压力的近似计算方法, 应用比较简便, 在岩体破碎或浅埋隧道情况下, 其计算结果仍具有重要的价值, 至今仍在一些国家广泛应用。而依据松弛荷载理论统计地下工程围岩塌方规律的规范值大部分可行, 但在没有采用变形协调控制手段修正其开挖和支护工法时, 对于围岩偏差和偏好的情况存在工程风险和支护过度。

1) 围岩破坏的有限区域理念——普氏理论

普氏理论是早期的围岩压力计算理论, 虽然在许多情况下其计算结果可能与实际情况有较大的误差, 但其围岩破坏的有限区域理念仍然具有重要意义。

普氏理论又称为自然平衡拱理论, 这个理论的基本要点是:

(1) 由于岩层中存在很多节理裂隙以及各种软弱夹层, 破坏了岩体的整体性, 裂隙切割而形成的岩块的几何尺寸相对很小, 可将岩层视为像砂子那样的松散体, 但由于岩块间还存在黏结力, 故将岩体看成具有一定黏结力的松散体。

(2) 洞室开挖以后, 在其顶部形成压力拱, 作用于衬砌上的围岩压力, 仅为压力拱与衬砌间破碎岩体的重量, 而与拱外岩层及洞室埋深无关。

根据普氏理论得到矩形洞室荷载计算图如图 1.2 所示。图中, φ 为岩体的内摩擦角, q 为压力拱上的垂直均布荷载, e_i 为水平荷载, b 为自然平衡拱的最大高度, a_1 为自然平衡拱的最大跨度。

2) 围岩破坏的稳定平衡理念——太沙基理论

太沙基理论将地层看作松散体, 但它是基于应力传递概念而推导出作用于衬砌上的垂直压力, 其核心思想是力的平衡。

假定在深度为 H 的岩体内开挖一跨度为 $2b$ 的矩形洞室。开挖后侧壁稳定, 拱顶不稳定, 可能沿如图 1.3 所示的面 AB 和 CD 发生滑移, 此时洞顶围岩压力就等于上覆岩柱的重力减去侧壁抗剪力。