

DOI: 10.11779/CJGE201409005

现今斜坡工程安全设计理论的根本缺陷与灾难后果

岳中琦¹, 徐 前²

(1. 香港大学土木工程系, 香港; 2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 滑坡及其灾难在世界各地、经现代岩土工程设计施工的斜坡中不断地发生。论文提出、分析和论证了造成工程斜坡滑坡的一个本质原因。它就是现代斜坡工程安全设计理论存在根本缺陷。这个缺陷表现在3个方面。第一, 土体抗剪强度参数(有效黏聚力和有效内摩擦角)在斜坡安全设计中假定为常数, 不随土体孔隙和含水率的增大而减低到零, 孔隙水对土体剪切强度的影响仅体现在孔隙水压强对有效应力的影响。第二, 经典岩土力学理论(特别是有效应力原理和排水固结理论)仅能预测外部加载产生土体压剪、孔隙率减小、土体强度增大的岩土稳定工况过程。它们不适用于外部卸载造成土体拉张、孔隙率增大、土体强度减少的岩土破垮工况过程。第三, 斜坡安全系数是土体抗剪强度与施加剪切应力的比值。由于土体强度本值(品质)很低, 加固工程增加这个比值安全系数达到设计最小值时所能够提供的强度本值(品质)增加量也就不高。斜坡工程岩土体的强度和品质没有得到能够防治岩土体拉张变形和滑垮的根本改善和增强。从而, 工程人员必须精心全力地确保低品质斜坡工程岩土不破垮和滑塌。可是, 又由于工程斜坡众多和它们的降雨、场地和环境变化较大, 上述3个方面现代斜坡工程安全设计理论的根本缺陷可以导致: 达到安全设计标准的工程斜坡, 在施工和营运过程中, 能够发生滑垮、产生灾难后果。本论文特别认为, 经典岩土力学理论是仅适用于完全压剪的, 应称为压剪岩土力学理论。提出了应该建立既适用压剪又适用拉剪的、新的土力学理论和防抗岩土灾害设计方法。

关键词: 有效应力原理; 含水率; 孔隙; 斜坡工程; 安全系数; 滑坡; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)09-1601-06

作者简介: 岳中琦(1962-), 男, 副教授, 从事地球科学、岩土力学与工程等方面的教学和科研。E-mail: yueqzq@hku.hk。

Fundamental drawbacks and disastrous consequences of current geotechnical safety design theories for slopes

YUE Zhong-qi¹, XU Qian²

(1. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China; 2. CIGIS (China) Limited, Beijing 100007, China)

Abstract: The fundamental drawbacks and their disastrous consequences of the current geotechnical safety design theories for slopes are pointed out, analyzed and evaluated. The drawbacks are as follows: (1) The shear strength parameters of soils (effective cohesion and angle of internal friction) are assumed to have constant values in the design theories. However, they are changeable and can be reduced to zero due to the progressive tensile deformation and increase in void ratios and pore-water contents in the slope soils. (2) The classical theories of soils (such as the effective stress principle and soil consolidation theory) are valid only under the condition of compressive-shearing loading with reduction of soil voids and pore-water contents. They are not suitable to the condition of tensile-shearing loading with increase of soil voids and pore-water contents. This condition is actually what happened during the process of slope failure and landslide. (3) The factor of safety is a ratio of the soil shear strength to the downward sliding shear stress. As the shear strength of soils is small, its increase according to the ratio is very small, which cannot make substantial improvements to the soil quality and resistance to failure. Accordingly, failures and landslides in engineered slopes can commonly occur around the world although geotechnical engineers put tremendous efforts in preventing and controlling their occurrences. The classical soil mechanics is only applicable to the soils subjected to complete compression and shear loading condition, and is a completely compression-shear soil mechanics theory. A new soil mechanics and new geotechnical design methods applicable to soils subjected to either the compression-shear or tension-shear loading conditions shall be developed.

Key words: effective stress principle; water content; void; slope engineering; factor of safety; landslide; cohesion; angle of internal friction

0 引言

2005年6月, 美国 Los Angeles 南部发生了滑坡,

收稿日期: 2013-12-16

破坏了 17 栋洋房 (图 1 (a))。2010 年 4 月 25 下午, 台湾高雄高速公路削土石边坡快速垮滑, 28 日早晨, 找到被埋的 3 辆车和 4 具尸体 (图 1 (b))。在 2010 年 5 月 23 日, 新建的江西高速铁路上方人造削土山坡发生滑坡, 滑坡土石堵垮了运行动车, 造成 19 人死亡, 71 人受伤 (图 1 (c))。2008 年汶川地震后, 新建通往银场沟的公路, 在 2012 年一场大雨后, 突然垮滑 (图 1 (d))。

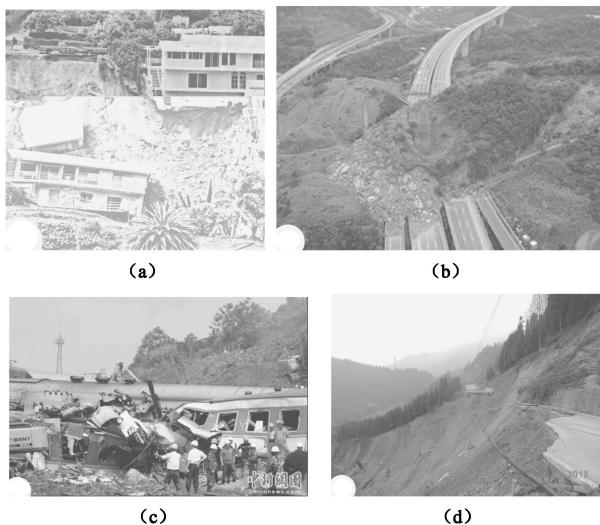


图 1 2005 年后美国与中国工程合格斜坡的滑坡灾难事件案例

Fig. 1 Four examples of landslide disasters in engineered slopes after 2005

特别地, 自 1977 年以来, 香港政府在滑坡灾害防治上做了大量的工作, 取得了世界瞩目成就^[1-2]。Morgenstern 教授^[3]明确指出, 香港是世界滑坡灾害防治的卓越中心。但是, 香港按照设计规范建造或审查的斜坡有时还是会滑坡灾难。图 2 是 3 处经过工程人员的斜坡安全检验合格的人造斜坡滑坡, 并形成灾难的事件。其中, 图 2 (a)、2 (b) 和 2 (c) 分别是 1994 年观龙楼百年挡土墙倒塌、1995 年斐翠道人造岩体斜坡大型滑坡和 1997 年龙翔道人造斜坡大型滑坡; 根据主管斜坡安全的政府土力工程处的统计, 香港设计加固合格的斜坡发生滑垮年概率可能是千分之一, 是 1977 年前旧人造斜坡滑垮概率的三分之一。

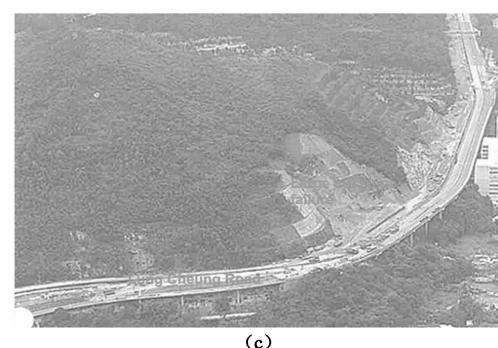
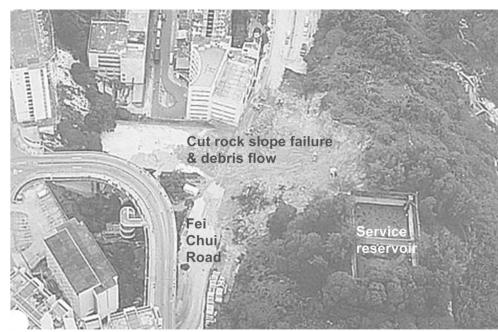
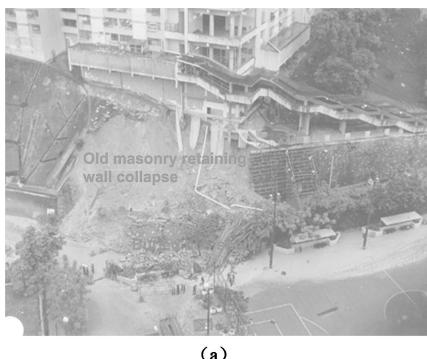


图 2 1990 年代香港工程合格斜坡的滑坡灾难事件案例

Fig. 2 Three examples of landslide disasters in engineered slopes in Hong Kong in the 1990s

多年来, 一旦工程斜坡发生滑坡、产生灾难, 岩土工程人员都要找滑坡原因。结果大多为不可预见的地质和自然条件。例如, 地下地质条件的变化超出了勘察要求和预期结果, 或发生了百年或千年不遇的强降雨或大地震。或者, 它们是由各种地质、气候、环境、建设等因数综合造成的。人为原因造成工程斜坡失稳的事例也时有发生, 例如, 隐蔽工程施工的偷工减料或豆腐渣工程。调查属实后, 又有岩土工程人员要犯法。

笔者不得不问, 工程斜坡滑坡或灾难存在其它根本性原因吗?

通过深入学习、研究和实践, 笔者认识到, 一个根本原因就是斜坡工程安全设计理论的根本缺陷。这个根本缺陷造成了工程斜坡时常垮滑, 及其灾难后果。这个根本缺陷表现在以下 3 个方面: ①常参数土体抗剪强度理论的缺陷性; ②经典土力学理论适用范围的局限性; ③比值安全系数增加小量强度的不足性。

1 常参数土体抗剪强度理论的缺陷性

根据经典斜坡工程安全设计理论, 斜坡安全系数 (FOS) 定义为

$$FOS = \frac{S}{\tau} \quad , \quad (1)$$

式中, S 为土体抗剪强度, τ 为土体所受剪切应力。

根据 Mohr-Coulomb 剪切强度理论和 Terzaghi 有效应力原理, 土体每小块(或每点)土体抗剪强度 S 可用下列公式计算。

$$S = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' , \quad (2)$$

式中, c' 为有效黏聚力, φ' 为有效内摩擦角, σ 为破坏面上的总正应力, u 为破坏面上的孔隙水压强。土体的 c' 和 φ' 值是利用原状土和它的场地重力应力条件, 通过土样三轴压剪(固结排水或固结不排水)或直接压载剪切试验等所确定的。按照斜坡工程安全设计理论, 它们被假定是每种场地土体强度常量、不随时间变化的。地下水(或土体孔隙含水)的影响, 通过有效应力原理, 被单一地归化为孔隙水压强 u 的作用。

或许有人要问, 这个土体抗剪强度理论已被研究和应用了近百年, 它有本质性缺陷? 缺陷在哪里呢? 这个缺陷就是, 被假定为常数的有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' , 在实际斜坡土体中, 能够完全同时减低变化到零的缺陷。

砂土有液限含水率指数, 黏土有液限和塑限含水率指数。在土体含水率达到这两个指数值前后, 土体的物理和力学性能有根本性的变化。在塑限含水率时, 土体可以发生塑性变形。在液限含水率时, 土体可以变为液体流动, 抗剪切强度值和抗变形模量值快速变为零。因此, 土体的 c' 值、 φ' 值、抗拉强度 σ_t 和变形模量 E 是随土的含水率的单调增大或减少函数, 它们随含水率的增大而快速减小, 直到 0(见图 3)。

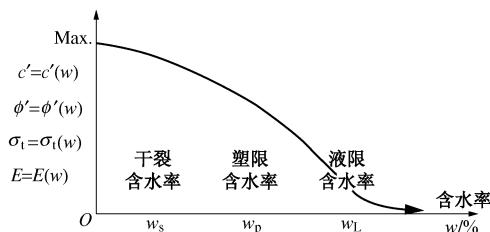


图 3 土体 c' 值、 φ' 值、抗拉强度 σ_t 和变形模量 E 随土含水率的增大而快速减小到零

Fig. 3 Rapid decrease of effective cohesion, effective angle of internal friction, tensile strength and deformation modulus to zero with increase of void ratio and water content of soils

事实上, 任何斜坡和开挖工程都会在原来长期平衡稳定的岩土体中产生新的应力自由表面。它使得新的表层土体受到的压应力变小, 进入拉张或开裂变形状态, 且不断向这个方向变化移动。岩土体的局部拉张变形破坏一定是发生在形成灾害的整体(剪切变形)破坏之前。图 4 表示了含水率和土体变形之间的关系。

实际土体因拉张变形、局部破坏和开裂, 造成土体孔隙增大。因土体有增大了的孔隙, 土体渗透和蓄

水能力增大。从而, 在强降雨时, 土体含水率能够加速增大, 土体总体积增大。这进一步可造成土体各项强度参数的降低, 压应力降低、拉应力增大。式(1)的每小块(每点)土体抗剪强度 S 应改写成下列公式计算。

$$S = c'(w) + (\sigma - u) \tan \varphi'(w) , \quad (3)$$

式中, 有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' 是土体含水率的函数(如图 3)。

因此, 随着时间的增长和降雨次数的增加, 斜坡土体的强度发生恶性循环, 土体强度降低至破坏极限点或直到零点。但是, 造成土体破坏的重力等下滑力却不会减小、且可随含水率增多而增大。最终, 如式(4)所示, 工程土体可形成、发生整体(拉张剪切)破坏, 从而滑坡灾害发生。

$$FOS = \frac{S \rightarrow 0}{\tau \geqslant \text{重量下滑应力}} \rightarrow 0 , \quad (4)$$

这也就是斜坡工程安全设计理论的土体抗剪强度理论的参数变零缺陷性。它是个岩土体本质性的弱点和品质, 是一个按照岩土工程理论设计与施工的工程斜坡破坏的陷阱与原因。

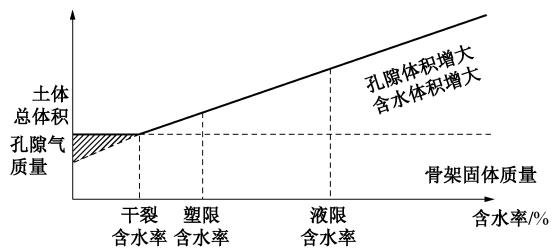


图 4 土体含水率随着土体孔隙的增大而增大

Fig. 4 Increase of water content of soils with increase of voids

2 经典土力学理论适用范围的局限性

或许有人还要问, 土体含水率有塑限和液限, 土体的抗拉抗剪强度参数能够同时非常小或等于零是土的本质。土的工程定义是能够被人手或水体的力量完全分解成其最细小、独立组成颗粒的自然地质材料或人工填料。因此, 上述土体抗剪强度理论的缺陷是显而易见的。但是, 为什么它已被应用了近百年, 至今还在被广泛使用呢? 要回答上述问题的成因, 还得看看经典土力学理论适用性的局限性。

1925 年, Terzaghi 教授发表了, 世界上第一本土力学专著《建立在土的物理学基础的土力学》^[4]。在这本专著中, 他建立了有效应力原理和饱和土固结理论来预测地基软土的时间沉降量, 被公认为是进入现代土力学时代的标志。后来, 人们就确认了他建立了现代土力学理论, 公认为现代土力学之父 (the father of soil mechanics) ^[5-6]。1936 年他当选上了首届

ISSMGE 主席。Terzaghi 教授等在哈佛大学将这些土力学理论广泛应用到基础工程、滑坡防治工程、大坝、机场和公路工程。从 1938 年到 1960 年, 斜坡稳定性和土体破坏等方面发表了两本专著和 100 多篇论文。

从而, 人们也就广泛地跟随这些土力学理论和方法来从事岩土工程研究和实践。例如, Morgenstern 等^[7] 1965 年用 Mohr-Coulomb 剪切强度理论和 Terzaghi 有效应力原理建立了 Morgenstern-Price 边坡安全系数极限平衡条分法, 至今已在全球广泛应用。陈祖煜院士^[8] 在 2003 年发表的专著中写道, “土的抗剪强度理论是土力学的基石, 也是边坡稳定性分析的理论基础。”

岩土工程行业人员或许没有意识到或者没有强调, Terzaghi 饱和土固结理论和有效应力原理的正确性是有条件的。这个条件就是, 土体在受到加载时候, 孔隙水被排出土体, 孔隙减少和含水率减少, 或者孔隙水不被排出, 孔隙不增大和含水率不变。因此, 在三轴压剪应力作用下, 土体孔隙减少, 土体抗剪强度 c' 和 φ' 值和变形模量能够增加或保持常数, 这使得工程岩土体变得更加稳定, 能够最终到达最大压剪破坏强度。这种加压性载荷与应力工况在基础工程中常见。

在这种压缩或孔隙减小(或不变)的土体应力工况下, 3 大经典土力学理论(太沙基有效应力原理与固结理论, 土压力与土坡稳定分析理论, 渗透理论)是保守成立的。在使用试验得到的土体抗剪强度 c' 和 φ' 值和变形模量等参数值(恒定数), 它们是能够较为安全地定量分析和预测工程土体的稳定变形行为。这是因为, 这种压缩或孔隙减小(或不变)的土体应力工况能够使得土体抗剪强度 c' 和 φ' 值和变形模量等参数值增大或渗透系数减少。从而, 使用设计时的土体参数值作为恒量(或常数)进行计算和预测, 得到的理论变形结果可能偏大于实际行为的变形, 得到的理论安全系数可能偏小于实际行为的安全系数。

但是, 相反地, 在第二种减压拉张或孔隙增大的土体应力工况下, 岩土工程的经典土力学理论存在本性缺陷。使用试验得到的土体抗剪强度 c' 和 φ' 值和变形模量等参数值(恒定数)不能安全地定量分析和预测斜坡工程土体的稳定、变形行为。

这是因为, 这种减压拉张或孔隙增大的土体应力工况能够使得土体抗剪强度 c' 和 φ' 值和变形模量等参数值减小或渗透系数增大。从而, 使用设计时的土体参数值作为恒量(或常数)进行计算和预测, 得到的理论变形结果可能偏小于实际行为的变形, 得到的理论安全系数可能偏大于实际行为的安全系数。从而, 随着时间、降雨或地下水的变化, 土体孔隙和渗透系数越来越大, 这导致斜坡土体含水率也越来越大、土体抗剪强度 c' 和 φ' 值和变形模量等参数值变得越来

越小。从而, 土体强度恶性循环, 最终整体破垮。

因此, 实际土体破垮与滑坡是拉张形变、孔隙率增大、进水含水率增大导致整体破垮的过程。它恰恰是与经典土力学理论所适用的、所能够预测的压剪形变、孔隙率减小、排水含水率降低导致土体稳定的过过程相反。因此, 经典土力学理论应该仅仅是压剪土力学理论。

3 比值安全系数小量强度增加不足性

第三方面, 根据斜坡工程安全设计理论, 斜坡安全系数(FOS)是个比值(式(1))。例如, 根据一幅斜坡可能因滑坡造成的人员伤亡和经济损失风险结果高低, 香港人造斜坡设计最小安全系数分别为 1.4 和 1.2。但是, 比值斜坡安全系数不能体现斜坡土体强度与品质本值。在数学上, 两个大数或两个小数的比值是可以相同的, 例如,

$$\frac{0.0014}{0.0010} = \frac{1.4}{1.0} = \frac{1400}{1000} = 1.4 \quad (5)$$

土体的抗剪强度值 S 、抗拉强度和抗变型模量很小, 通常分别是数百 kPa、数个 kPa 和数百 MPa。因此, 通过安全系数所增加的强度量也就很小。因此, 根据比值安全系数所得到这个小量土体强度的增加量也就难以根本性地提高和改变土体的抗拉强度与抗剪强度的本质和品质。在另一方面, 土体被破坏时所需的剪切应力很小、同重量下滑分量成正比、易达到。因此, 工程斜坡岩土体也就容易发生细微裂隙破坏, 最终导致整体破垮。

这个斜坡岩土工程设计比值安全系数方法是向钢筋混凝土结构工程安全系数方法学习和模仿得到的。混凝土的抗剪强度值、抗拉强度、抗压强度和抗变型模量较大, 通常分别是数十 MPa、数个 MPa、数百 MPa 和数十 GPa。钢筋的抗剪强度值、抗拉强度和抗变型模量更大, 通常分别是数百 MPa、数百 MPa 和数百 GPa。一个 20% 到 40% 的强度增加, 本质就很大的钢筋混凝土结构的强度也就可增大很多。由于钢筋混凝土的强度极其难以减低到零, 钢筋混凝土结构也就难以发生微细拉张、剪切破裂, 结构整体变形量也就很小、可控制在这个比值安全系数设计容许范围内。一般而言, 材料的强度和品质与其价格是成正比的。强度和品质高的材料(如钢筋或混凝土)的价格比强度和品质低的材料(如土体)的价格要高很多。土体的抗剪强度值很小、且可变得更小。同时, 土被破坏时所需的剪切应力很小、且易达到和超过, 安全系数所增加的强度量也就很小。增加这个小量强度所需材料和施工费用就很小。这也就造成了大面积海量斜坡岩土工程施工费用很低的后果。同时, 斜坡岩土工程

低造价是在可发生滑坡灾难风险和岩土人员辛勤劳动的基础上形成。

滑坡是香港最严重、最普遍的一种地质灾害。崎岖不平的风化岩土山地、强暴雨和密集城市建设,造成香港滑坡灾害发生频繁。20世纪70年代,香港发生了3起特大灾难性的滑坡,当场造成156人死亡。自1977年以来,香港政府在滑坡灾害防治上做了大量的工作,取得了世界瞩目成就。但是,用于加固4500幅、占广大地域的旧斜坡的勘察、设计、施工等直接费用仅是140亿元港币^[2]。由于其中包含大量勘察、设计和施工人员的工资,直接用于加固这些斜坡的费用可能仅有50% (即70亿元港币)。每幅斜坡加固工程费用仅有一百多万港币。同其它建筑工程(如结构工程、桥梁工程、道路工程等)用于材料和施工费相比,直接用于加固斜坡的材料和施工费是很低的。

4 传统防治工程斜坡岩土滑坡与破坏的途径与方法

为了合理正确地应用土力学理论和确保工程岩土安全, K. Terzaghi 教授在1940年到1950年间不断强调的精辟论断: 岩土工程是门应用科学,更是一门艺术^[9]。1957年在英国了伦敦召开的第四届国际土力学学术会议上,当了21年ISSMGE主席的K. Terzaghi教授在把主席位置交给A. W. Skempton教授时,对土力学历史和他在其中地位做了一个综述: “Soil mechanics, he observed, had ‘arrived at the borderline between science and art’, explained ‘I use the term ‘art’ to indicate mental processes leading to satisfactory results without the assistance of step-for-step logical reasoning’”^[6]。或“土力学是在科学与艺术的分界线上创建的,‘艺术’是指没有借助一步一步逻辑推理而能导致合格结果的大脑思考过程。”

K. Terzaghi 教授进一步解释道: “To acquire competence in the field of earthwork engineering one must live with the soil. One must love it and observe its performance not only in the laboratory but also in the field, to become familiar with those of its manifold properties that are not disclosed by boring records.”^[6]。或“要想在岩土工程中获得胜任,一位工程人员必须爱土,必须不仅在实验室更要在施工现场细心观察土体的行为,以熟悉土体的多种多重性能。”

在1962年,Peck教授^[10]论述了“Subsurface engineering is an art; soil mechanics is an engineering science.”或“地下工程是一门艺术,土力学是一门工程科学”。他认为,岩土工程师进行地下工程工作,

就如同医生给病人诊断和治病。

一直到今天,岩土工程行业人员相信和强调,岩土工程具有特殊价值,它是一门应用科学,更是一门艺术。“它的艺术价值在于面对千变万化的地质、土质岩性条件,创造性的酌情制宜”^[9]。1999年,美国土木工程师学会出版了 Goodman 教授撰写的“Karl Terzaghi: The Engineer as Artist”(Karl Terzaghi: 像艺术家的工程大师)的传记^[6]。这种“艺术”论断和高评在本质上是强调和重视岩土工程技术人员的经验、各人因素和岩土工程观察法(observational method)^[3, 11]。

特别地,斜坡工程和滑坡防治要防范地表水进入岩土坡体,要降低地下水位、减低孔隙水压力。岩土工程人员已经给出了大量有效的斜坡工程加固和滑坡防治方法和手段^[1, 2, 12]。

但是,由于上述3方面斜坡工程安全设计理论的根本缺陷,灾难性岩土体的破坏或滑垮,还是在世界各地、经过现代岩土力学理论设计、达到设计安全标准的工程斜坡中不断发生。

5 结论与建议

本文给出和论证了一种斜坡工程安全设计理论的根本缺陷与原因。这个现有岩土理论的根本缺陷表现在以下3个方面:①常参数土体抗剪强度理论的缺陷性;②经典土力学理论适用范围的局限性;③比值安全系数增加小量强度的不足性。

尽管已经建立和使用了很多防治工程斜坡岩土滑坡与破坏的有效方法和措施,尽心勤劳、努力学习、积累经验,但是,大量的斜坡和变化多的地形、地质和降雨条件能够使得这些方法和努力有时失效。这主要是因为,经典岩土力学理论(如有效应力原理、固结理论)存在本质性缺陷与局限性。它们是在压缩剪切加载、土体孔隙减小工况条件下成立的。它们仅能适用于,土体压缩形变,孔隙减小排水,导致稳定土体变形过程。因此,经典岩土力学理论仅适用于完全压剪,应该称为压剪岩土力学理论。

这个过程却恰恰同实际斜坡岩土体拉张形变、孔隙增大进水,导致土体破坏与滑垮的过程相反。同时,比值安全系数使得斜坡工程岩土的品质在不少情况下没有得到真正的、本质性的改良。从而,工程岩土依然能够向自然岩土那样,土体孔隙和渗透系数越来越大,土体含水能力也就越来越大,土体抗剪强度和值和变形模量等参数值变得越来越小。随着时间降雨等变化,斜坡岩土本身抗剪抗拉强度变的越来越低,恶性循环,最终斜坡岩土体整体破坏。由于它们就在市区、居民区、基础设施和道路内部或边上,因

此, 工程斜坡岩土体的滑垮时常可造成灾难性的后果。

混凝土能够抗压, 不能抗拉。钢筋能够抗拉, 不能抗压。因此, 钢筋混凝土结构工程安全系数方法使用了两种防范破坏的设计准则: 用厚实混凝土抵抗外载压应力, 用细长钢筋抵抗外载拉应力。这样, 钢筋混凝土结构工程的安全性能有了全面的保障, 它们极少破坏和垮塌。同混凝土一样, 岩土体能够抗压, 不能抗拉。因此, 相同地, 新的斜坡岩土工程设计方法需要优先考虑岩土体所受到的拉张应力和破坏。

应该、惟有扬弃这个强度与剪应力比值、而不照顾土体的强度本值的安全系数设计方法。在斜坡工程设计与施工中, 努力将实际斜坡岩土工况, 保持为土体孔隙不变或减少的工况。更进一步地, 在经典压剪岩土力学理论基础上, 再创建一套土体含水率增加、压应力降低、拉应力增加、土体强度和模量逐渐减少到零的、朝着岩土体破坏不稳定应力应变发展方向的拉张应力应变岩土力学理论体系。在杜绝岩土破坏灾害的以人为本设计理念基础上, 建立一套基于岩土拉剪强度与模量本值的、斜坡岩土工程安全设计理论体系。

致 谢: 感谢第四届全国岩土与工程学术大会、中国建筑学会工程勘察分会 2013 年学术大会、第六届全国地质灾害与防治学术会议、南方岩土论坛和 2012 城市地质环境与可持续发展论坛主办单位的邀请, 分别在 2013 年 11 月 4 日、2013 年 4 月 22 日、2013 年 4 月 11 日、2012 年 12 月 8 日、2012 年 12 月 5 日作了与本文内容相关的大会报告。感谢国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目编号 2011CB710606 和国家自然科学基金面上项目编号 41372336 的部分资助。感谢王思敬院士、钱七虎院士、王仲琦勘察大师、郑宏教授、李天斌教授、丘建金总工、兰恒星教授等朋友对本文的批评与指正。

参考文献:

- [1] YUE Z Q. Social benefits of landslide prevention and mitigation in Hong Kong, China[M]// Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia, Environmental Science and Engineering. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 55 - 75.
- [2] CHOI K Y, CHEUNG R W M. Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 354 - 365.
- [3] MORGESTERN N R. Common ground (keynote address) [C]// Proceedings of International Conference on Geo Eng. Melbourne, 2000: 1 - 30.
- [4] TERZAGHI K. Erdbau mechanik auf bodenphysikalisher grundlage (Earthwork Mechanics based on the physics of soils)[M]. Leipzig and/or Wien (Vienna): Franz Deuticke, 1925. (in German)
- [5] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1948.
- [6] GOODMAN R E. Karl Terzaghi: the engineer as artist[M]. Reston, Va: American Society of Civil Engineers (ASCE) Publications, 1999.
- [7] MORGESTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of generalized slip surfaces[J]. Géotechnique, 1965, 15(1): 79 - 93.
- [8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis: theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese))
- [9] 王钟琦. 岩土工程价值观[C]// 全国岩土与工程学术大会论文集 (上册). 北京: 人民交通出版社, 2003. (WANG Zhong-qi. Viewpoint on values of geotechnical engineering[C]// Proceedings of China Congress of Geo-engineering. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [10] PECK R B. Art and science in subsurface engineering[J]. Géotechnique, 1962, 12(1): 60 - 66.
- [11] PECK R B. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics[J]. Géotechnique, 1969, 19(2): 171 - 187.
- [12] Geotechnical Engineering Office. Geotechnical manual for slope engineering[M]. Government of HKSAR: Civil Engineering Department, 1998.