

# 工程地质学的大成综合理论<sup>\*</sup>

王思敬

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

**摘 要** 工程地质学工作大多涉及系统工程问题,综合集成应是必需的技术路线。多元知识,即多学科,的综合集成道路已得到普遍共识。作者提出,工程地质学需要发展大成综合理论,即多源知识的综合集成。钱学森在研究复杂巨系统中考虑到推理、经验和实测信息的集成,并称之为大成综合(Meta-Synthesis)。本文从工程地质实践出发,指出大成综合理论在各工程建设阶段有不同的用法,但本质上是三种来源知识的相互制约和融合,以期达到结论的一致性,做出合理而可靠的决策。某大型抽水泵站高边坡的工程决策过程表明,大成综合理论可能支持超越常规的认识,做出突破性决策。

**关键词** 工程地质学系统 综合集成 大成综合 多源知识 突破性决策

**中图分类号:**P      **文献标识码:**A

## META—SYNTHESIS IN THE ENGINEERING GEOLOGY

WANG Sijing

(Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029)

**Abstract** The meta-synthesis approach, initiated by Prof. Qian Xuesen, is suggested to be accepted for solution making in the engineering geology system. An integration of multiple source knowledge, including experience, deduction and measurement evidence, constitutes the essential core of the proposed approach. Its basic principle is to integrate and merge the conclusions obtained in the different sources of knowledge or information. The integral agreement may support a rational solution, surmounted normal knowledge and standard. A practical example of slope stability evaluation is given in this paper for site selection of water pumping station. The decision was reached making a breakthrough over the conventional engineering solution.

**Key words** Engineering geology system, Knowledge merging, Meta-synthesis, Knowledge merging, Multiple source knowledge, Surmounted solution

### 1 引 言

工程地质学要解决大量工程建设问题,从工程的规划、设计、施工到建成运行,涉及到工程质量、环境影响、结构安全、长期稳定和 risk 对策等多方面因素的相互作用和制约。工程的兴建又和周边的自然

和社会环境有所关联。就工程地质学而言,至少是地质和工程两个一级学科的结合,各自涵盖着大量的二级学科和学科领域。因此,工程地质学所要解决的是系统工程问题,工程地质系统无疑是多层、多元的、开放的、复杂巨系统。在工程地质学科中必须应用和发展系统工程学理论和方法数十年来已成为普遍的共识。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011-02-13; 收到修改稿日期: 2011-02-15.

作者简介:王思敬,主要从事      工作. Email:

在系统工程研究中,首先人们注意到多学科的综合,例如,固体力学、水力学的应用、水文、气象学,以及地理地貌学等的应用和结合,建立系统的工作原理和方法。在地质工程技术方面,人们也注意到各种物理构造、化学材料及信息技术的集成,形成配套的技术系统。现代工程地质学采取系统工程学作为其基本的技术路线,应是正确的选择。

钱学森先生[1]在研究复杂巨系统中考虑到推理、经验和实测信息的集成,并称之为大成综合(Meta-Synthesis)。这一提法应是系统工程学理论的一次飞跃,它超越了多学科或多种技术的综合集成,把多源知识的综合提到日程上来,从而提升系统工程学的理论层次。

作者注意到,工程地质学工作的经验性很强,大成综合理论可能会对工程地质学的发展及其解决实际工作能力的提高起积极的推动作用。同时,在作者的工作中也体会到,凭经验、一味推理和唯技术论均有不足之处,而三者的综合才会取得工程问题可靠的决策。在有些情况下,它甚至有助于复杂疑难问题的解决,有时可取得超过一般的认识,做出超出常规的、突破性决策。

作者还注意到,尽管工程地质学界和岩石力学学界已有一些专家开展了大成综合理论的应用和研究,但是多年来进展较慢,尚未受到足够的重视。作者撰著本文,希望引起学界的关注,在工程地质学实践中加以研究和发展,以期得到更为广泛的应用。

## 2 大成综合理论概述

大成综合理论(Meta-Synthesis)主张在复杂的系统工程问题的评价和决策中应将人类对某一问题的多源知识,包括推理、经验和测量依据,综合运用,以便取得比较客观的评价,做出比较可靠的预测和比较合理的决策。

在现代工程实践中,虽然综合集成理念和技术得到广泛的重视和应用,但大成综合的提法应是系统工程学理论的一次飞跃,它超越了多学科或多种技术的综合集成,从源头上把专家所具有的多源知识的综合提到日程上来,从而提升系统工程学的理论层次。

工程地质学的研究对象的地质体是一类自然造物形成的物体,具有突出的随机性、模糊性和复杂性,因而在工程决策中面临着很强的不确定性。这就导致推理甚难,常求助于经验判断。所以,工程地

质学被认为是一门经验性很强的学科,这是很自然的。

经验指工程专家或专家群体从经历过的工程实践和工程问题的解决过程中所学习到或领悟到的知识或解决问题的依据。基本的经验的运用就是工程类比法。专家们从回忆中或文献记载中搜寻到与问题工程比较相近的对比工程,以当时问题所在和问题解决结果为比较,进行本工程问题的判断和决策。工程地质学家很重视工程问题的实录。工程地质学杂志上刊登了大量以某些工程地质问题实例描述和讨论的文章,使工程地质专家的经验库得到充实,专家们在工程地质咨询或讨论时往往因能援引实例而雄辩。

工程地质经验的总结和系统化则为大量工程所遇到的一些共性问题获得经验性解答,许多结果纳入了相应的规范和标准。岩石的工程地质分级及其广泛应用把个别的、局部的经验变成了专家的群体经验。

然而,应用经验常会遇到经验不足的苦楚,在不同的工程地质条件或更大工程规模的情况下工程类比的准确性就受到关键的质疑。成功的经验并不能表示其决策已达到问题的上限,而无需进一步优化。相反,失败的经验也并不意味着决策达到问题的下限,遵从它也未必安全。

工程地质地质问题推理有很大的不确定性和难度,但是工程地质学家也不断试图通过地质规律的分析 and 现代数理学科的应用来建立一些分类、分级、模式、模型和本构关系,以求定性、半定量或定量地评价地质体的特性,描述工程地质作用机理和动力过程,预测它的发展趋势。在理论上对考虑甚多因素尚无能为力的条件下理论模型,常被经验加以补充,以求得其尽可能的完整和完善,或者必须通过实测数据对理论模型进行调整。

在地质不确定性和复杂性的制约下,专家们企求通过更多的探测手段取得更真实的参数,并采用更先进的测量技术去监测工程地质体的表现和行为,依此来验证经验和推理的结论,发觉其不足之处,加以补救。但是,探测和测试也是有限的,不可能很准确的描述地质体的非均质性。监测和检测工作一般只能到开始施工或完工后才能进行,并取得数据。

从上述简要的表述不难看到,三种来源的知识中没有一种可以包打天下,而可靠地取得成功。而三者的融合确实可以得到互补,使我们所做出的决

策安全可靠,风险相对最小。

### 3 大成综合理论的应用

我们注意考察一下专家们在进行工程地质评价、预测和决策过程中的表现,就可以发现他们事实上是在综合运用上述三种来源的知识解决工程问题的,但常不够自觉,步骤不够完善。例如,当经验不够或缺乏足够工程实例时,就会用理论来外推。在进行理论分析时,有可能运用经验来选定一些必要的分析参数。甚至测得的数据也有必要通过经验对比或理论分析来判定其可靠性。

国际岩石力学的创始人 Leopold Muller 1978 年来我国访问时谈过一段他接受瓦尔德克 II 号水电站地下厂房咨询顾问的经历。该地下厂房围岩为软质的泥质灰岩,裂隙比较发育,建大跨度地下洞室难度较大。为此,他首先对岩石探洞进行了 4h 的考察。然后,他索取了洞室结构计算分析成果。又经过一番研究后,他决定接受聘任,同时建议,将洞室周边及边角设计成弧形,以避免应力集中。他还建议在开挖洞顶的上方沿洞室主方向打一水平孔,设置一根 100m 长的水平测斜仪,监测在施工过程中的洞顶变形。虽然,从此过程我们可以体会到他实际上实行了大成综合的技术路线,但当时未请他细说决策的思维和依据。我们可以看到,整个隧道施工新奥法的原理也正在于此。

我国一些学者也就工程地质中大成综合理论及其运用,开展了认真的研究。李世辉[2]通过已有隧道围岩收敛变形分析(经验数据),对隧道实测的收敛值进行边界元法反演,以确定围岩的分级质量,提出了隧道工程的围岩参数评价方法。杨志法[3][4]则按大成综合理论思路,对湖南沅水五强溪水电站左坝肩高边坡进行了逐步评价,每步都考虑了经验判断、计算分析、测量数据及其反分析的结果。

作者注意到,到目前为止大成综合理论仍未受到足够的关注,对它的运用方法尚未得到系统的阐述,有待进一步研究和实际应用。

作者认为,大成综合理论首先承认工程决策的三大支柱是经验、推理和实测,缺一不可。但在实质上是认为,这三者在工程决策中不仅是叠加,而是融合,起到互相补充、互相制约的作用。

三源知识(信息、数据)对某工程问题的结论可能相同,或者某种程度上不同,抑或根本反向不同。若三者相同,则按共同结论做出决策应是可靠的。

若是不同,则不可叠加求和平均或取其多数,而必须实施三者的实质性综合。

作者提出一种螺旋式渐进融合法,来解决三元知识的不一致性。在三源数据不一致时,结论正确性是不确定的,不能武断哪一种是否正确,抑不正确。通过权重法,排除某些结论也是不可取的。

第 1 步,初始结论及对比。提出相应的经验、推理和实测资料和结论,进行初始对比。结论不一致或偏离很大,影响工程决策时,就应转入下步工作。

第 2 步,自检与自行改善。对经验结论要检查对比工程的适宜性,找出其不适宜的问题。对推理结论则要检查其计算参数、边界条件和计算方法的合理性,找出不合理的疹及疖所在。而对实测资料和结论,则需检查其测量结果的可靠性,其布局及测量数据的合理性。

在此基础上进行自行改善。根据自检出的问题,进行修改,例如,搜索更适宜的对比工程和资料或请教更有关的内行专家,修改结论。对计算模型和参数进行调整,再计算,并将结果同原有结果对比,评估修改的合理性。通过第二步工作,仍不能取得三者一致结论时,则必须转入第三步,进行大成综合的实质性融合。

第 3 步,交叉检验和互补优化。这时应考虑另二种素获得的资料和结论,对本工作方法、判断和结论进行检验和评估,进一步探求其不合理性和存在的问题。

据此进行互补优化。利用其它二种工作所取得的重要资料和结果,补充和修改本工作的基本条件和参数及工作方法,求取新的结果和结论。

第 4 步,反复对比,求得一致。上述三步工作经过必要的重复后可望获得比较一致的结论,也可以说是比较可靠的结论和决策。这种决策的有可能超过专家的平均水平,甚至突破常规性决策。

综上所述,大成综合理论所追求的是三源知识(资料、数据,或信息)的融合和结论的一致性。如何做到,尚有待更多的研究与探索。

### 4 突破性决策的实例

作者在这里介绍一次自身的经历,试图通过事实说明大成综合的内涵和实质,以及它对工程地质决策的重要支持力。

乌江下游某大型地下工程,由于大量水源需求,设计在江水面以下岸坡修建大型地下取水泵站。泵

站为圆形竖井,直径 30m,深 50m。泵站地面连接高边坡,高 50~60m,初始边坡约  $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,人工开挖边坡的总坡角达  $35^{\circ}$ 。

在泵站开挖过程中,岩石破碎,地下水发育,井壁稳定性差。边坡开挖开始便发现岩石极为破碎、软弱,含大量夹泥,稳定性差。土样测得内摩擦角  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,凝聚力 10~20kPa。采用极限平衡推力法分析得安全系数 0.8 左右。计算所得设计边坡的稳定性很差。

设计单位认为需要更换场址,或者应进行大规模边坡加固工程。问题在于更换场址经济损失过大,而加固处理则影响工期,可能贻误大局。业主单位邀请了约 10 来位有关行业专家,涵盖了大学、科研机构和生产部门的工程地质、水文地质和岩土工程专业,进行技术研讨,以期取得可靠的结论和合理的决策。

第 1 天讨论,大家一筹莫展。多数专家认为既然稳定性不够,更换场址最为可行。但是,有较合适地形,可作为大型水源场址距主要设施过远,技术和经济皆不甚合理。有些专家把注意力转到边坡处理上,但能否既保证工期,又对边坡进行处理呢?工程施工安全能否得到保证呢?专家们又有诸多的顾虑。结论难下,只能期待明天。

作者时任专家组组长,有责任分析和综合专家们的意见,取得有共识的结论,为此需要将所有资料进行综合分析研究。

从专家经验的角度看,人工开挖边坡坡角与相对稳定的自然边坡接近时,在一般情况下稳定性不会太差,场址在适当处理的基础上应该基本可用。

从理论计算的结论来看,边坡稳定性很差,稳定系数只有 0.8。

工程勘测过程中唯一的测试数据是取样土的强度试验参数,那是相当低的。

第 1 天的现场考察,专家们见到的边坡岩石露头表明,沿边坡走向有一条大型破碎带通过,其宽度达 100~200m。作者观察到,这是一条大型薄层泥质灰岩的层内强烈挤压褶皱型破碎带,具有层状碎裂结构。它保留一定的岩层形象,但受大量顺层错动而破碎。泥质物含量不算太多,应在 5% 上下。

第 2 天早晨再次考察现场,对地质构造进一步判断,支持了部分专家的经验性看法。会议上较多专家认为土样只代表最薄弱部分,并不能代表整体性能。事实上,岩体中土一般呈断续状分布在错动层之间,而其大多具有比边坡陡的倾角。因而,取样

土并非可能的滑动面土。虽然土样有实测数据,但无代表性。采用这种数据进行的计算,自然也不能表达真实的边坡稳定性。但是,推理结论和经验结论的背离得不到统一,仍无法取得专家共识。作者按照层状碎裂结构,推断岩体质量达到 5 级上的条件,粗略估算稳定系数可能达到 1.0~1.1。新的推理并没有使作者轻松,风险压力却有所增大。

第 2 天中午,作者放弃了午休,第 3 次来到现场,注重看可能滑动面的构成。突然看到有几层灰岩在边坡不同高程上排列着,虽然受断裂切割拉开,但仍似陡立的不规则柱状体插入边坡。在作者的眼中它们就像几排抗滑桩,尽管强度不高但无疑会在相当程度上增加了边坡的稳定性,从而支持了边坡基本稳定的看法。

下午,在讨论会上系统地总结分析了对边稳定性有利与不利的条件。

有利的条件为,边坡岩体属层状碎裂体,边坡稳定性差,但岩层陡倾,夹泥沿层面分布,可能滑动面将切割岩层,而非沿夹泥层发育,坡角  $35^{\circ}$ ,高 50m 的边坡基本稳定。

边坡的在水平面上为环绕泵站竖井的弧形坡,滑动时有一定侧测向阻力,有利于稳定。

边坡属于临时边坡,在一个枯水季节内完成泵站建设,之后将进行地面回填,形成约  $15^{\circ}$  的坡面,因此在采取适当或局部措施的条件下,基本稳定边坡是可以接受的。

在会议取得了基本共识后,尽管不是专家一致认识,但也可以做出结论了。

考虑到工程的测试研究不够,专家组建议加强安全监测;加强地面排水;对实际开挖中发现的不稳部位采取局部抗滑支护,以免产生突破破坏。指出了边坡破坏的突破口可能是井口与边坡连接的部位,而井口壁的变形职位关键。为此,建议加宽井口平台,加强井口的锁口支护。

做出结论后,专家们仍捏一把汗,再三叮嘱施工单位注意边坡的安全巡视。

1975 年秋作者从五七干校回京后,急忙电询业主单位关于该工程情况,得到的回答是没有问题,工程顺利。作者才放下心来。

## 5 结 语

这应该是一次突破性的决策,它超出了常规的认识。当然,这是一次咨询工作,而非系统的工程研

究,无法做得完善,只算是应急行为,仅有一点大成综合的意味。作者期望年轻的工程地质学家能关注这一方向的研究,更快地将经验、推理、实测知识融合起来,使工程地质工作能力提高,更好地服务于祖国的大规模工程建设。

参 考 文 献

[1] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990, **13**(1): 3~5.  
Qian Xuesen, Yu Jingyuan, Dai Ruwei. A new science field——Open complex giant system and its theory. Nature Magazine, 1990, **13**(1): 3~5.

[2] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析. 北京: 中国铁道出版社, 1991.

Li Shihui. Stability analysis of tunnel surrounding rock. Beijing: China Railway Press, 1991.

[3] 杨志法. 系统科学在工程地质力学中的应用. 中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室 1992 年年报. 北京: 地震出版社, 1993, 127~136.  
Yang Zhifa. Practice of the system science in the engineering geology mechanics. Annual Report of Engineering Geology Mechanics Laboratory, Geology Institute, Chinese Academy of Science, 1992. Beijing: Seismology Publishing House, 1993, 127~136.

[4] 杨志法,柯天河,王常敏,等。五强溪水电站左岸船闸边坡开挖监控设计的理论与实践. 工程地质学报, 1995, **3**(2): 1~11.  
Yang Zhifa, Ke Tianhe, Wang Changming, et al. Theory and practice on monitoring design for excavation of shiplock at left of Wuqianxi hydroelectric power station. Journal of Engineering Geology, 1995, **3**(2): 1~11.