

全国岩土工程反分析学术研讨会  
暨黄岩石窟(锦绣黄岩)岩石力学问题讨论会

文集

杨志法 张路青 编  
吕爱钟 王芝银

地震出版社

全国岩土工程反分析学术研讨会  
暨黄岩石窟（锦绣黄岩）岩石力学问题讨论会 文集

杨志法 张路青 吕爱钟 王芝银 编

地震出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

全国岩土工程反分析学术研讨会暨黄岩石窟 (锦绣黄岩) 岩石力学问题讨论会文集/  
杨志法等编. —北京: 地震出版社, 2007. 12  
ISBN 978 - 7 - 5028 - 3277 - 3

I. 全… II. 杨… III. 区 (城市) — 岩土工程 — 岩石力学 — 台州市 — 学术会议 — 文集 IV. TU45 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 206089 号

地震版 XT200800127

**全国岩土工程反分析学术研讨会暨黄岩石窟 (锦绣黄岩) 岩石力学问题讨论会文集**

杨志法 张路青 吕爱钟 王芝银 编

责任编辑: 樊 钰

责任校对: 李 珺

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

---

版 (印) 次: 2007 年 12 月第一版 2007 年 12 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 336 千字

印张: 13.25

印数: 001 ~ 300

书号: ISBN 978 - 7 - 5028 - 3277 - 3/P · 1357 (3978)

定价: 42.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 前 言

随着我国经济建设的迅速发展,岩土工程建设(包括大型水利水电工程、交通工程、矿山开采工程、国防工程等)一直在大规模进行当中,并且不可避免地涉及到地质体的开挖、支护或改良等工程活动。对于设计者来说,要使岩土体及支护结构的稳定性分析能成功地用于指导设计与施工,就应该保证岩土体的力学参数、地应力分量、支护结构上的荷载等参数与实际情况足够的接近。为此,重要岩土工程的设计往往需要工程地质与水文地质工作和现场力学试验,以了解岩土体的变形破坏规律,确定其力学参数。一方面,工程岩土体(特别是岩体)通常都具有复杂的自然结构和力学特性,需要有较多的试验点才能满足设计要求;另一方面,传统的力学试验往往需要较多和较长的试验周期,且不能大量布置试验点。这一矛盾迫使人们寻找新的途径,并导致了岩土工程反分析的问世。从某种程度上看,针对具体岩土体的反分析可以弥补现场试验或测试的某些不足,并可通过开挖过程中反演-正算的循环来服务于可变更设计和信息化施工。在经济建设需求的推动下,我国的岩土工程反分析研究自20世纪70年代末得以萌芽和发展,并成为世界上少数几个最早开展位移反分析的国家之一。

通过研究人员和有关工程师们30年的不懈努力,我国岩土工程反分析研究的进展很快。就整体研究水平而言,我国不仅可以与国外相媲美,而且在若干方面已经处于国际领先地位。例如,在理论与方法方面有所创新的图谱法反分析研究、反演唯一性研究、粘弹性反分析研究、随机反分析研究等都是由我国学者首先提出,并进行了较系统的深入研究。在实际工程应用方面,无论是从工程的数量,还是单个工程的规模(如长江三峡水利水电枢纽工程),我国学者所获得的成果也是独具特色的。然而,如何拓展岩土工程反分析的研究领域、应用范围和实践效果,显然是摆在反分析研究者和工程师面前的重要问题。为了深入探讨这些问题,50余位从事岩土工程反分析研究的院士、教授、专家和研究生们在浙江台州黄岩召开了全国岩土工程反分析学术研讨会暨锦绣黄岩蟠龙洞古地下工程岩石力学问题讨论会。本次会议之所以定在黄岩召开,不仅是因为这里有一座根据目前资料被认为是世界上最高的大型古地下工程——锦绣黄岩蟠龙洞古地下洞室群,而且还因为洞内岩壁上出现了近百幅十分罕见的天然“壁画”。所以,蕴藏于该古地下工程中的古工程科学技术亮点、古洞室群长期保护对策及天然

“壁画”的成因也成为本次会议的议题之一。

应该说，这次研讨会和会议论文集是我国工程反分析发展过程中的一个重要阶段性总结。这次会议论文集共有 23 篇论文发表，从中可以看到有关反分析理论、方法和技术研究的最新进展，同时也可看到我国岩土工程反分析的应用领域在不断扩大。近年来，反分析的实际工程应用不仅涉及到以往已经得到广泛应用的水利水电、铁道、交通、矿山、土木工程和军事工程，而且已扩大到文化领域和旅游行业有关的新领域。

对于我国在岩土工程反分析方面所取得的这些重要研究成果，孙钧院士在他的两次发言中都给予了充分肯定，并指出今后的发展方向。实际上，在工程建设巨大需要的推动下，我国的岩土工程反分析已走上快速发展的轨道。据统计，国内已有百余个重要工程应用了岩土工程反分析方法和技术，其中包括长江三峡水利水电枢纽工程、葛洲坝水电站、军都山铁路隧道等。毫无疑问，岩土工程反分析的持续发展也依赖于在实际工程中的积极应用。

从与会者的热烈讨论中，可以得出这样的结论：以深入的地质研究和可靠的监测数据为基础，以先进的计算机技术为手段，深入地开展理论、方法和技术的研究，并不断地扩大反分析的应用范围，是推进岩土工程反分析持续快速发展的关键。因此，以下 4 点是至关重要的。

#### 1. 深入的地质研究是岩土工程反分析取得成功的基础

无论是具体方法的选择、力学参数的采用，还是反演结果的解释，岩土工程反分析都离不开有关地质条件的深入研究。王思敬院士就岩土工程反分析地质基础的有关发言，为我们指明了重要方向。

#### 2. 可靠的监测数据是岩土工程反分析取得成功的前提

可靠的现场监测数据是反分析的依据。实际上，所监测到的数据是地质体在工程力作用下的一种反应。或者说，这些数据也是地质深入研究的一部分。因此，如果反演所用的假定与监测条件不符合或监测数据的误差超过允许的程度，那么所进行的反分析就将因失去依据而变得不可靠。另外，将现场监控量测与反分析工作结合起来是反分析发展的重要方向之一。蒋树屏等的论文“基于现场监控量测与反分析的隧道围岩分级方法”和吴祥松等的“高速公路连拱隧道动态反馈施工”就很好地反映了这方面的研究动态。

#### 3. 反分析理论、方法和技术的深入研究是推进岩土工程反分析继续发展的关键

为了更好地为岩土工程设计和施工服务，深入地开展岩土工程反分析理论和方法的研究是关键的一环。从这次会议和论文集中就可以看到这一点。例如，吕

爱钟等人的“岩石非定常蠕变模型辨识”、李金兰等的“岩体非定常粘弹塑性位移反分析”、蒋斌松等的“地下结构荷载反算方法”、薛琳的“位移反分析的蠕变柔量有限单元法”等在理论研究上有所进展；李云鹏等的“小间距隧道围岩力学参数正交设计反演”、高玮的“仿生算法与岩土工程反分析研究”、王怡等“基于均匀设计的隧道围岩参数反演分析”在反演方法上取得了很好的研究成果。另外，刘先珊等、李波等、戚玉亮等在他们的论文中从不同角度对人工神经元的反分析应用进行了研究，也有所进展。从中可以看出，不断发展的计算机技术将是推进反分析继续进步的动力。

#### 4. 不断扩大应用领域是岩土工程反分析持续发展的重要动力之一

例如，利用古地下工程开展反分析课题的研究是近年来的一个新领域（即文化领域和旅游行业）。王学良等人的“锦绣黄岩蟠龙洞大型古地下工程洞室群 21 号洞东侧边坡岩块滑动面抗剪强度  $c$ 、 $\varphi$  值的反演”一文就是一次在新领域开展应用研究的积极尝试。又如，韩冰等人的“分级加卸载条件下岩石流变参数估计研究”所涉及的实验室岩石流变参数估计的研究，从广义上看也是一种反分析。

总体来看，我国具有良好的反分析发展环境。因此有理由相信，在岩土工程反分析的研究者和应用者的共同努力下，我国的反分析将会得到更好的发展，并且为国家建设做出更大的贡献。

编者

2007 年 6 月

# 目 录

|  |                     |       |
|--|---------------------|-------|
| 岩土工程反分析的发展及展望                          | 杨志法                 | (1)   |
| 岩土工程反分析方法研究的发展方向                       | 杨林德                 | (12)  |
| 基于现场监控量测与反分析的隧道围岩分级方法                  | 蒋树屏 张长亮 蔡志伟         | (21)  |
| 岩石非定常蠕变模型辨识                            | 吕爱钟 丁志坤 焦春茂 李金兰     | (32)  |
| 岩体非定常粘弹塑性位移反分析                         | 李金兰 吕爱钟             | (44)  |
| 地下结构荷载反算方法                             | 蒋斌松 王 涛             | (51)  |
| 位移反分析的蠕变柔量有限单元法                        | 薛 琳                 | (58)  |
| 小间距隧道围岩力学参数正交设计反演                      | 李云鹏 韩常领 唐明明 杨腾骏 司振民 | (67)  |
| 地下工程弹性位移反分析的反演唯一性讨论                    | 张路青 吕爱钟             | (75)  |
| 仿生算法与岩土工程反分析研究                         | 高 玮                 | (89)  |
| 高速公路连拱隧道动态反馈施工                         | 吴祥松 朱合华 丁文其         | (101) |
| 地铁隧道下穿既有线结构沉降反分析研究                     | 艾传志 王芝银 李云鹏         | (108) |
| 软岩巷道锚注支护岩体参数位移反分析研究                    | 张乐文 蒋斌松             | (115) |
| 基于均匀设计的隧道围岩参数反演分析                      | 王 怡 王芝银 唐明明 杨腾骏 司振明 | (125) |
| 围岩力学参数粘弹性位移反分析及其工程应用                   | 朱 伟 高延法 王 波         | (132) |
| 岩体力学参数反演的新方法及其工程应用                     | 刘先珊 余永康 刘少炜         | (137) |
| 位移反分析的 Levenberg-Marquardt BP 神经网络方法研究 |                     |       |
| .....                                  | 戚玉亮 王同旭 张振宇 王荣超     | (146) |
| 人工神经网络方法在岩石力学反问题研究中的应用                 | 李 波 肖洪天             | (151) |
| 基于回归反分析的软岩粘弹性模型识别                      | 许宝田 阎长虹 庄乾城         | (158) |
| 锦绣黄岩蟠龙洞大型古地下工程洞室群 21 号洞东侧边坡岩块滑动面       |                     |       |
| 抗剪强度 $c$ 、 $\varphi$ 值的反演              | 王学良 张路青 胡维东         | (166) |
| 分级加卸载条件下岩石流变参数估计研究                     | 韩 冰 王芝银             | (173) |
| 曙光反分析程序及其在工程中的应用                       | 王士民 朱合华 蔡永昌 李晓军     | (182) |
| 关于黄岩蟠龙洞和富山大裂谷景区科普旅游的若干考虑               |                     |       |
| .....                                  | 翁维国 胡维东 余新波 杨志法 张路青 | (189) |
| 附录                                     |                     | (197) |

# 岩土工程反分析的发展及展望

杨志法

中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029

**摘要:** 通过对我国反分析发展的回顾及与国外研究的比较, 笔者认为, 我国反分析的研究成果不仅可以与国外研究相媲美, 而且在反分析唯一性研究、粘弹性问题反分析、随机性问题反分析等多个方面处于领先地位。应当说, 在我国岩石力学界和工程地质学界, 岩土工程反分析是为数不多的可以在总体论文水平上与国外同行媲美的方法和技术之一, 这显然得益于国内工程建设需求的有力推动。为了进一步提高我国岩土工程反分析的研究水平, 笔者还提出了坚持实际工程应用等7项主张。相信只要通过坚持不懈的努力, 我国岩土工程反分析一定会得到可持续发展。

**关键词:** 岩土工程反分析; 发展; 展望

## Development and future expectation of geotechnical engineering back-analysis

Yang Zhifa

Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029

**Abstract:** As seen from comparisons with geotechnical engineering back-analyses in other countries, the China is characterized by a number of advanced research fruits, especially in inversion uniqueness, visco-elastic back-analysis, random back-analysis, and so on. In general, the geotechnical engineering back-analysis in China is one of advanced methods or techniques, which can be compared with the developed countries, in the fields of engineering geology and rock mechanics. In order to further improve the level of relevant researches in China, the authors bring forward 7 opinions, including the persistence of practical applications, and believe a standing development of geotechnical back-analyses in China.

**Keywords:** Geotechnical engineering back-analysis; development; expectation



# 1 前言

岩土工程建设(包括水利水电、交通运输、矿山开采、国防建设等工程)往往涉及到地质体的开挖、支护或改良等工程活动。对于设计者来说,多数都十分关注工程岩土体的力学参数、地应力分量、支护结构上的荷载等参数是否与实际情况较为接近。为此,重要岩土工程的传统设计往往需要进行充分的工程地质和水文地质工作与现场力学试验,以便了解工程区的地质条件和岩土体的变形破坏规律。但工程岩土体(特别是岩体)通常都具有复杂的自然结构和力学特性,需要有较多的试验点才能满足设计要求。另一方面,传统的力学试验往往需要较多的经费和较长的试验周期,因此不能大量布置试验点。这一矛盾迫使人们致力于寻找新途径,并导致了岩土工程反分析的问世。由于工程实践的有力推动,反分析自20世纪70年代初问世以来,迅速成为了岩土工程界和工程地质界中的一个重要研究方向。我国的反分析研究与国外基本同步,时至今日也有近30年的历史。然而,以下两个问题值得我们深入思考:

(1) 虽然我国反分析研究的起步比发表于1971年世界上第一篇反分析论文晚了8年<sup>[1]</sup>,但如今我国岩土工程反分析的研究水平已达到世界先进水平,其中有些已经领先于其他国家。究其原因,笔者认为主要有两点:第一,我国经济建设巨大需要的推动;第二,我国研究者的创新能力。

(2) 在我国经济发展势头日益强健的情形下,具有很好创新能力的青年学者不断参与到反分析的研究队伍,这是否也预示我国岩土工程反分析的未来更加辉煌呢?

笔者将围绕上述两个值得思考的问题进行讨论,所提出的一孔之见也许对我国岩土工程反分析的研究有一定的参考价值。

## 2 岩土工程反分析发展轨迹的简述

### 2.1 国际上有关岩土工程反分析的起步

如上所述,关于位移反分析(属于岩土工程反分析的一种)的第一篇论文由K. T. Kavanagh和R. W. Clough在Int. J. Solids and Structures上发表<sup>[1]</sup>。应该说,这是一篇为岩土工程反分析做理论准备的创新性文章。正因为它是在弹性固体性质研究中从有限元应用角度论述的,因此认为它仅仅是岩土工程反分析的一种理论准备。进而还可以说明为什么在它以后长达5年内没有人再发表有关岩土工程反分析的论文,更谈不上实际工程应用了。至1976年,H. A. D. Kirsten在论文中明确提出了用变形测值进行反分析的方法来确定岩体弹性模量<sup>[2]</sup>。1977年,L. Jurina, G. Maier和K. Podalak将反分析的研究从弹性问题推进到弹塑性问题<sup>[3]</sup>。同年,K. Kovari, Ch Amstand和P. Fritz首次提出了一种利用综合测量技术确定作用于钢拱架上山岩压力的方法<sup>[4]</sup>。该文提出的所谓综合测量技术(Integrated measuring technique)实际上是指由两种可分别量测钢拱内侧两点弦长变化和弦高变化的仪器,相应的方法应当是一种山岩压力位移反分析的方法。到1979年,另外两位著名的反分析研究者(即奥地利的Gioda和日本神户大学的樱井春辅)发表了他们的位移反分析论文<sup>[5, 6]</sup>。

## 2.2 我国岩土工程反分析的起步和快速发展

### 2.2.1 起步阶段

我国的位移反分析研究也始于1979年。笔者等人在1979年6月完成的我国第一份研究报告<sup>①</sup>，提出了有限元图谱图解位移反分析法，并于次年分别与水电部东北勘测设计研究院科研所和河南水利厅合作将有关成果成功地应用于“引大入秦”工程<sup>②</sup>和河南南湾水库新泄水洞<sup>③</sup>的设计中。当时在现场考察的国际岩石力学学会创始人米勒教授指出：与传统的千斤顶压板试验相比，位移反分析法的工作状态与洞室的实际开挖状态更接近。这一看法，为位移反分析法在地下工程中的应用指出了理论依据。据笔者所查，上述“引大入秦”水利工程是世界各国<sup>[1]</sup>到1980年为止应用反分析的最大工程。

1981~1985年期间，应当是我国岩土工程反分析研究成果在工程地质和岩石力学舞台上崭露头角的阶段。尽管在这一阶段中所发表的论文（包括出现在某些专著中的有关章节）较少，但很有代表性<sup>[7~15]</sup>。这些属于我国位移反分析早期研究成果的论文不仅涉及弹性问题反分析<sup>[7, 9]</sup>，而且还论及粘弹性问题反分析<sup>[8]</sup>、弹塑性问题反分析<sup>[14]</sup>。另外，某些研究成果还在一些实际工程中得到了成功的应用。例如，除上述“引大入秦”工程和南湾水库外，笔者还把所提出的位移直接分析法成功地应用于鲁布革水电站<sup>[16, 17]</sup>。应特别指出，在这些研究中，以王思敬为代表的我国研究者比国外更加关注反分析研究的地质基础问题<sup>[11]</sup>。如今看来，重视反分析的地质基础研究的思想显然是正确的。如上所述，我国在1985年之前发表的这些论文和研究报告<sup>[7~14]</sup><sup>④</sup>，奠定了我国岩土工程反分析发展的基础。另外，因我国当时正处于改革开放的前夕，对外学术交流极少，致使我国的反分析方法处于相对独立的研究状态。换句话说，我国学者所提出的反分析研究成果往往带有独特的中国印记。正因如此，我国学者及其有关岩土工程反分析的研究成果对世界反分析的发展起到了一定的推动作用。

现在看起来，1979~1985年是我国岩土工程反分析的起步阶段，它为随后而来的快速发展准备了条件。

### 2.2.2 快速发展阶段

1986年后，我国岩土工程反分析如同其他事业一样在改革开放中得到了迅速发展，有关的研究者遇到了前所未有的机遇：一方面，因国家经济建设的起飞而出现了巨大需要；另一方面，对外的学术交流之门已经逐步开放。

郑颖人、王建宇、薛琳、郗玉亭、杨志法、王芝银等及他们的合作者，对各种岩土工程反分析问题开展了较深入的研究，仅在1986年就发表了一系列研究成果。据不完全统计，仅1986年发表的论文就有9篇之多<sup>[18~26]</sup>。根据维普资讯——中文科技期刊数据库（<http://159.226.100.28>）和中国知网（<http://www.cnki.net>）上的不完全统计，国内从

① 杨志法、刘竹华，关于位移反分析问题的初步研究。中国科学院地质研究所资料，1979.6。

② 中国科学院地质研究所，电力部东勘院科研所。“引大入秦工程”有限元图谱分析及位移反分析的初步报告，1980。

③ 资料。

④ 中国科学院地质研究所，水电部成都院科研所。关于鲁布革电站地下厂房应用位移直接分析法由试验洞实测位移估算原型洞位移的研究报告，1985.12。

1989 年至今发表的反分析论文有 458 篇之多, 可见岩土工程反分析的发展之快。另外, 还出版了 5 本反分析专著<sup>[27~31]</sup> (表 1)。这里还要特别指出, 我国岩土工程反分析除上述弹性问题反分析、弹塑性问题反分析和粘弹性问题反分析<sup>[7~26, 32~62]</sup>之外, 还有以下 4 个引人注目的发展:

表 1 我国学者出版的岩土工程反分析专著信息表

| 作者                     | 出版时间 | 书名                               | 出版社       | 资助单位                             |
|------------------------|------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 王芝银、李云鹏                | 1993 | 地下工程位移反分析及程序 <sup>[27]</sup>     | 陕西科学技术出版社 | 中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室          |
| 孙均、蒋树屏、袁勇、黄宏伟          | 1996 | 岩土力学反演问题的随机理论与方法 <sup>[28]</sup> | 汕头大学出版社   | 国家自然科学基金委员会                      |
| 杨林德等                   | 1996 | 岩土工程问题的反演理论与工程实践 <sup>[29]</sup> | 科学出版社     | 中国科学院科学出版基金                      |
| 吕爱钟、蒋斌松                | 1998 | 岩石力学反问题 <sup>[30]</sup>          | 煤炭工业出版社   | 国家自然科学基金、山东省和煤炭部自然科学基金           |
| 杨志法、王思敬、冯紫良、刘怀恒、薛琳、王芝银 | 2002 | 岩土工程反分析原理及应用 <sup>[31]</sup>     | 地震出版社     | 中国科学院资源环境科学与技术局、中国科学院工程地质力学重点实验室 |

(1) 反分析唯一性的论证。

该项研究既涉及弹性问题反演唯一性 (包括从参数可辨识条件出发的数学证明<sup>[63, 64]</sup>和几何学证明<sup>[65]</sup>), 也涉及基于目标函数分布图的弹塑性问题试算法证明<sup>[31]</sup>。

(2) 随机反分析。

我国的随机反分析研究以孙均、蒋树屏、袁勇和黄宏伟等人的著作和论文为代表<sup>[28, 66~68]</sup>。

(3) 智能反分析。

近年来, 被称为智能反分析的神经网络分析法取得了很好的进展。李立新、冯夏庭等人在 1997 和 1999 年发表了有关成果<sup>[69~71]</sup>。进入 21 世纪后又有多位研究者发表论文, 使智能反分析成为一个受到关注的研究课题<sup>[72~74]</sup>。

(4) 利用古代岩体工程变形破坏的反分析。

对于古工程这一“1:1 长期试验”, 可以通过在确定“试验”持续时间下的某些变形破坏来反演相关岩体的长期强度等重要参数<sup>[75~78]</sup>。

至此可以指出, 我国岩土工程反分析的快速发展阶段与我国的改革开放时代几乎是同步的。这又一次证明, 只有国家繁荣昌盛才能带动科学的快速发展。

### 2.3 我国岩土工程反分析研究的总体水平与国外同类研究的比较

尽管我国岩土工程反分析与国外最早论文相比起步略晚<sup>[1, 2]</sup>, 但与樱井春辅、G. Gioda 等国际岩土工程反分析的代表人物相比基本上同步<sup>[65, 31]</sup>。经近 30 年的努力, 我国岩土工程反分析的研究水平足可与国外同类研究相媲美。其理由如下:

### 2.3.1 理论方法上的创新性成果

从国内反分析理论方法的研究看,有诸多有别于国外的创新性成果,例如:

- (1) 关于岩土工程反分析唯一性的研究,国外未见报道;
- (2) 关于粘弹性和粘弹塑性位移反分析(包括三维问题)<sup>[8, 13, 19~26, 32~42]</sup>,国外很少进行;
- (3) 在随机反分析<sup>[28, 66~68]</sup>和智能反分析<sup>[69~74]</sup>方向,我国的研究更系统,所取得的研究成果也不是国外所能比的;

- (4) 比国外研究更强调与地质研究的结合<sup>[11, 31]</sup>;

- (5) 对于我国的弹性位移反分析研究,由于在研究之初处于一种相对封闭状态而导致相应的方法与国外有很大不同,如 TBA 方法<sup>[34, 35]</sup>。相比之下,由于利用地质探洞掌子面开挖的过程进行三维反分析并引用三维有限元图谱以提高分析速度,致使 TBA 方法具有更大的实用价值:利用掌子面开挖进行的三维反分析更符合实际情况,并具有较快的分析速度,所需要的反演经费也较少。

### 2.3.2 大量的实际工程应用

由于我国建设的巨大需要,反分析研究在实际工程应用方面(无论在应用工程数量上,还是在单个工程规模上)远远超过国外。下列资料支持上述观点:

- (1) 在实际工程成功应用的数量方面,目前虽然尚未统计出国内外的具体数据,但有关文献给出的截至 2002 年的不完全统计<sup>[31]</sup>,有 75 个岩土工程反分析实例。估计到目前为止实际工程成功应用的数量可超过 100 项。从国外同行所发表的论文看,他们的实际工程应用的数量远低于这一数字。

- (2) 在应用工程类型上,我国也远多于国外。从有关国外同行的论文中可以看出,他们的主要应用对象集中在各种地下工程(个别论文涉及到边坡工程<sup>[79]</sup>)。我国研究者的反分析论文不仅论及地下工程(包括井工程),而且还涉及边坡工程<sup>[31, 40, 46~49, 51]</sup>、大坝工程<sup>[50~53, 58]</sup><sup>①</sup>,甚至把研究对象扩大到古地下工程<sup>[75~78]</sup>。

- (3) 在单个应用工程的规模方面,由于世界上最大的水利水电工程——长江三峡水电工程(船闸工程<sup>[31, 51, 80]</sup>)也在成功应用之列,所以国外应用成功的单个工程规模也难与我国相比。实际上,早在反分析起步阶段的应用情况也是如此。

恩格斯曾经指出,社会上一旦有某种技术上的需要,那么这会比 100 所大学更能推动该技术的发展。目前所发生的事情,正是这一英明论断的写照:我国建设事业的巨大需要推动我国岩土工程反分析的总体研究水平走在世界前列。

### 2.3.3 有关位移反分析论著数目的比较

有关理论方法的大量研究成果和为数众多的实际工程应用成果通常会以论著的形式表现出来。或者说,有关岩土工程反分析论著的多少也许可以成为衡量总体研究水平高低的一个重要标准。

- (1) 如前所述,1989 年至今我国有关岩土工程反分析的论文在 458 篇以上,而同期世界各国在国际杂志上发表的论文(包括中国学者在国际杂志上发表的为数不很多的论文在内)

---

<sup>①</sup> 杨志法、熊顺成,大坝位移应力快速预测法原理及方法,1991。

仅 100 篇左右。

(2) 我国出版了岩土工程反分析专著共有 5 本(表 1), 而国外同行至今尚未出版有关专著。

综上所述, 我国岩土工程反分析研究的总体水平不仅可以与国外同行研究相媲美, 而且在很多方面还是领先的。

### 3 岩土工程反分析的展望

#### 3.1 大规模经济建设的有力推动将使我国岩土工程反分析得到可持续发展

从人类社会科学技术发展史可以看出, 任何学科的发展和技术进步都是社会巨大需求推动的结果。与此类似, 岩土工程反分析的理论、方法和技术的进步也将得益于大规模经济建设的推动。我国岩土工程反分析从起步较晚到基本上领先于其他国家, 近 30 年的发展史就证实了这一点。

纵观我国 20 多年来改革开放和国民经济的飞速发展, 特别是近年来党中央提出的科学发展观, 我国的国民经济将继续沿着可持续发展的轨道发展。在基础设施建设得到可持续发展的同时, 环境保护和防灾减灾工作也受到前所未有的重视和大力发展, 而这些发展将直接或间接地构成对岩土工程反分析的需要。有理由相信, 岩土工程反分析的明天仍在中国。在可预见的一段时间内, 我国岩土工程反分析研究将继续受到国家大规模经济建设需求的推动, 并将得到可持续发展, 甚至在很多方面仍将领先于国外。

#### 3.2 关于进一步提升我国岩土工程反分析水平的思考

我国岩土工程反分析是在大规模工程建设需求的推动下取得快速发展的, 以前是这样, 今后也将如此。但也不得不指出, 仅有岩土工程建设的巨大需求是不够的, 还需要深入思考如何让我国岩土工程反分析得到可持续发展。为此, 笔者提出以下主张, 供读者参考。

##### 3.2.1 坚持实际工程应用并在应用中发展的原则

进一步提高我国岩土工程反分析研究的水平, 首先需要坚持实际工程应用, 并要坚持在应用中发展的原则。让岩土工程反分析在国家建设中尽可能发挥作用的同时, 还应努力扩大应用的范围。还应指出, 与确定岩土体力学参数的传统试验方法相比, 岩土工程反分析具有不少优点。以位移反分析为例, 它所依据的位移信息更可靠, 其工作状态也更符合工程开挖所产生的条件。这两个优点正是岩土工程反分析在诸多实际工程中得到成功应用并受到关注的原因。

还应特别指出, 岩土工程位移反分析应尽量与可变更设计和信息化施工相结合。对于岩土工程可变更设计和信息化施工来说, 我们可以在系统科学、工程地质学和岩石力学方面找到相应的理论依据, 它们是工程设计者和施工者所依据的技术手段<sup>[81]</sup>, 而岩土工程反分析则是它们可以利用的另一种技术手段。另外, 基于信息反馈的可变更设计和信息化施工的基本信息是位移, 而位移反分析的基础也是位移, 所以两者在这一方面是相通的。显然, 如何使岩土工程反分析与可变更设计、信息化施工结合起来将是今后的一个努力方向。

##### 3.2.2 重视发挥研究生和博士后的重要作用

从我国岩土工程反分析起步的 1979 年至今已有 28 年了。笔者发现我国研究生(包括博

士和硕士)和博士后为我国岩土工程反分析的发展做了很大贡献。这里仅在参考文献中列出其中的5篇博士学位论文<sup>[53, 54, 55, 66, 67]</sup>和10篇硕士学位论文<sup>[15, 41~43, 56, 57, 59~61]</sup>作为代表,就足以证明这一观点。

不难得出这样的结论,要在今后进一步提升我国岩土工程反分析水平就应当继续重视研究生和博士后的工作,让他们的创造力不断地推动我国岩土工程反分析向前发展。

### 3.2.3 继续岩土工程反分析的反演唯一性研究

我国在岩土工程反分析唯一性研究方面处于世界领先地位,但为了进一步提升研究水平,必须针对诸多尚未解决的唯一性理论问题开展研究。事实上,反演唯一性研究是岩土工程反分析应用的前提。

### 3.2.4 注重岩土工程反分析地质基础的研究

由于岩土工程是构筑在地质体中的地质工程,所以在进行岩土工程反分析时要继续研究相应的地质基础。对于具体问题,则要深入考虑具体的地质条件和工程条件,以便确定以下4个问题。第一,其中是否存在利用地质探洞进行反分析的条件;第二,是否存在更符合反分析基本假设的试验段;第三,是否存在可帮助我们预先确定待分析的参数,以达到减少待分析参数个数的目的;第四,可否对反演结果进行令人信服的地质解释。笔者相信,我国岩土工程的广泛性和地质条件的多样性将有利于反分析方法的发展。

### 3.2.5 重视岩土工程反分析各个环节及其关联问题的精心研究

按照系统论观点,岩土工程反分析是一个由多个子系统(或工作环节)组成的方法系统。它涉及到有关反演目的确定(包括工程条件分析)、地质选点(包括地质条件分析)、待分析参数的选择(包括唯一性分析)、量测仪器的安装、必要的光面爆破、量测、反分析的实施、反演结果的地质解释等环节的工作方法。显然,要进一步提升岩土工程反分析研究的水平,就必须精心研究这一方法系统的每一个环节以及各环节之间的联系。

### 3.2.6 利用古代岩石工程的变形破坏遗迹开展有关岩石长期强度的研究

只要深入考察岩石力学,就可以发现在有些问题上存在着概念及支持该概念的试验和应用对象之间在时间上的脱节。例如,岩石长期抗剪强度是岩石力学的一个重要概念,但现行规范所规定的长期抗剪强度试验所持续的时间却很短(长的也不会超过数月,短的往往仅几个小时而已)。显然,这与岩石长期抗剪强度概念中的时间(即“长期”一词)和工程有效使用期之间有很大的矛盾。为了解决因时间上的脱节而引起的矛盾,笔者提出把古代岩石工程看作为一处1:1现场试验,开展有关真正长期抗剪强度反演的研究思路,显然是很有意义的。基于这一思路,长期抗拉强度、长期抗压强度、岩体粘滞系数等都有可能通过古工程反分析的研究来获得。

## 4 结论

通过上述分析,作者得到了以下3点结论:

(1) 以位移反分析为主的岩土工程反分析,在岩土工程实际应用中显示出比传统测试方

法更可靠、更快捷和更经济的优势,这是它们得到较广泛应用并具有广阔应用前景的主要原因之一。

(2) 我国岩土工程反分析的起步略晚于国外,但由于适逢我国经济建设飞速发展时期而得到快速发展。从各种角度来看,我国的岩土工程反分析研究不仅可与国外研究相媲美,而且根据目前所掌握的资料,在许多方面已领先于国外。

(3) 为了进一步提升我国岩土工程反分析的研究水平,本文提出了坚持实际工程应用并在应用中发展的6项主张。笔者相信,只要我们坚持不懈的努力,我国岩土工程反分析一定会得到可持续发展。

## 参考文献

- [1] K. T. Kavanagh, R. W. Clough. Finite element application in the characterization of elastic solids. *Int. J. Solids and Structures*, 1971, 7 (1): 11~23
- [2] H. A. D. Kirsten. Determination of rock mass elastic modulus by back analysis of deformation measurement. *Proceedings of Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesbuerg*, 1976: 165~172
- [3] L. Jurina, G. Maier and K. Podolak. On model identification problems in rock mechanics. *Proceedings of Symposium on the Geomechanics of Structurally Complex Formations, Capri*, 1977: 287~295
- [4] K. Kovari, Ch Amstand and P. Fritz. Integrated measuring technique for rock pressure determination. *Proc. of International Symposium on Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich*, 1977
- [5] S. Sakuri and S. Abe. A design approach to dimensioning underground opening. *Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen*, 1979: 649~661
- [6] G. Gioda. A numerical procedure for defining the values of soil parameters affecting consolidation. *Proc. 7th E. C. S. M. F. E., Brighton*, 1979: 169~172
- [7] 杨志法, 刘竹华. 位移反分析法在地下工程设计中的初步应用. *地下工程*, 科学技术文献出版社重庆分社, 1981, (2): 9~14
- [8] 陈子荫. 由位移测定值反算流变岩体变形性质参数及地应力. *煤炭学报*, 1982, (4): 45~51
- [9] Yang Zhifa, Liu Zhuhua and Wang Sijing. A practical back analysis method from displacements to estimate some parameters of a rock mass for design of an underground opening. *Proceedings of International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich*, 1983, (2): 1267~1276
- [10] 冯紫良, 杨林德, 李成江. 初始地应力的反推原理. *隧道工程*, 1983, 第3期, 第4期
- [11] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析. 北京: 科学出版社, 1984
- [12] 杨林德, 黄伟, 王来. 初始地应力位移反分析计算的有限单元法. *同济大学学报*, 1985, (4)
- [13] 王芝银, 刘怀恒. 粘弹塑性有限元分析及其在岩石力学与工程中的应用. *西安矿业学院学报*, 1985, (1): 86~105
- [14] 杨志法, 张连弟. 用优选法进行非线性问题位移反分析的原理和方法. 见: 中国科学院地质研究所, 工程地质力学研究. 北京: 地质出版社, 1985: 230~235
- [15] 李争鸣. 位移反分析法及其在深部软岩巷道支护中的应用, 煤炭科学研究院硕士学位论文, 1985
- [16] 杨志法, 张三旗, 季良杰. 位移直接反分析法原理及其在实际工程中的应用. *工程地质科学新进展*. 成都: 成都科技大学出版社, 1989: 334~340

- [17] Yang Zhifa, Zhang Sanqi and Ji Lingjie. A New Method Predicting Displacements of an Underground Opening from Displacements of its Model opening. Proc. of International [19] Symposium on Advances in Geological Engineering. Beijing, 1990: 249~256
- [18] 郑颖人, 等. 弹塑性问题反演计算的边界元法, 地下工程技术, 1986, (2)
- [19] 王建宇. 隧道开挖引起的围岩变形过程及岩体模量的分析. 土木工程学报, 1986, 19(2): 70~80
- [20] 薛琳, 郗玉亭, 杨志法. 确定流变岩体的参数及地应力的位移反分析法. 地质科学, 1986, (4): 371~380
- [21] 郗玉亭, 薛琳, 杨志法. 伯格模型的位移反分析. 中国科学院地质研究所工程地质力学开放实验室, 工程地质力学开放研究室 1986 年年报. 1986: 93~94
- [22] Wang Sijing, Yang Zhifa, Xue Lin. The back-analysis method from displacements for visco-elastic rock mass. Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Kobe. 1987, 2: 1059~1068
- [23] Xue Lin, Yang Zhifa. The Principle of back-analysis from Displacements for Viscoelastic Rock Mass Represented by Maxwell, Poyting-Thomson and H-K Body, Proceedings of International Symposium on Engineering Geological Environment in Mountainous Areas, Beijing. 1987, (1): 859~870
- [24] Wang Zhiyin, Li Yunpeng. Back Analysis of Visco-parameters and Strata Stress in Underground Openings, Proc. of Int. Sym. on Under. Eng. New Delhi, April, 1988, (1): 181~186
- [25] 杨志法, 王启鸣, 冯静. 有限元图谱法在掌子面粘弹性位移反分析中的应用. 现代采矿技术国际学术讨论会 (ISMT) 论文集 (岩石力学部分). 山东矿业学院, 1988: 174~179
- [26] 杨志法. 地下工程粘弹性问题的两步位移反分析法. 中国科学院地质研究所工程地质力学开放实验室, 工程地质力学开放研究室 1986 年年报, 1986: 95~96
- [27] 王芝银, 李云鹏. 地下工程位移反分析及程序. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993: 78~79
- [28] 孙均, 蒋树屏, 袁勇等. 岩土力学反演问题的随机理论与方法. 汕头大学出版社, 1996
- [29] 杨林德, 等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践, 北京: 科学出版社, 1996
- [30] 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反问题. 北京: 煤炭工业出版社, 1998
- [31] 杨志法, 王思敬, 冯紫良, 等. 岩土工程反分析原理及应用. 北京: 地震出版社, 2002
- [32] 杨志法, 王启鸣. Maxwell 体围岩中空间问题的粘弹性位移反分析. 中国科学院地质研究所工程地质力学开放实验室, 工程地质力学开放研究室 1986 年年报, 1986: 97
- [33] 薛琳, 杨志法. 三参数粘弹性模型两步反分析法的原理和方法. 中国科学院地质研究所工程地质力学开放实验室, 工程地质力学开放研究室 1986 年年报, 1986: 98~99
- [34] Wang Zhiyin, Li Yunpeng. Back Analysis of visco-parameters and strata stress in underground openings, Proc. of Int. Sym. on Under. Eng. New Delhi, April, 1988, (1): 181~186
- [35] Wang Zhiyin, Liu Huaiheng. Back analysis of measured rheologic displacement of underground openings. 6th Int. Con. on Num. Meth. in Geomech. Innsbruck, Austria, 1988, (4): 2291~2297
- [36] 王芝银, 杨志法, 李云鹏, 等. 岩窟顶板流变断裂过程的数值模拟与反演分析. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (1): 9~14
- [37] Yang Zhifa. The Principles and Methods of Back-Analysis from Displacements for Visco-Elastic Rock Mass. Advances in Geoscience ( I ). Institnte of Geology, Academia Sinica. 1989: 377~386
- [38] 杨林德, 张开俊. 洞室围岩二维粘弹性反演计算的边界元法. 同济大学学报, 1990, 3



- [39] 杨林德, 朱合华. 地层三维粘弹性反分析计算. 岩土工程学报, 1991, 6
- [40] 杨志法, 王芝银, 刘英, 等. 五强溪水电站船闸边坡的粘弹性位移反分析及变形预测. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 66~71
- [41] 焦春茂. 岩体非定常流变模型的有限元计算及位移反分析. 山东科技大学硕士学位论文, 2005.5
- [42] 丁志坤. 岩石粘弹性非定常蠕变方程的参数辨识. 山东科技大学硕士学位论文, 2003.6
- [43] 张开俊. 线性分布初始地应力场和围岩参数的粘弹性反演计算, 同济大学硕士学位论文, 1989
- [44] 冯紫良, 杨志法. 关于弹塑性位移反分析的若干研究. 中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室, 工程地质力学开放研究室 1989 年年报. 北京: 地震出版社, 1990: 86~102
- [45] Feng Ziliang, Yang Zhifa and Sun Jingyu. Back analysis technique of parameters of ground media and its convergence speed up. Proceedings of International Symposium on Advances in Geological Engineering, Beijing, 1990: 249~256
- [46] 邓建辉, 丰定祥, 葛修润, 等. 多介质边坡弹性模量位移反分析模型与优化算法. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 22~27
- [47] 唐辉明. 用反算法确定岩体抗剪强度参数. 第四届全国工程地质大会论文集 (三). 北京: 海洋出版社, 1992: 1486~1489
- [48] 王建同, 陈天敏. 复杂结构边坡破坏的多元强度反算方法. 地面岩体处理及加固研究新进展. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 159~162
- [49] 董厚晟, 李迪, 叶查贵. 新滩滑坡位移反分析. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(1): 44~52
- [50] 朱岳明, 戴妙林. 大坝观测资料的优化反分析. 第四届全国岩土力学数值方法与解析方法讨论会论文集. 武汉测绘科技大学出版社, 1991
- [51] 盛谦, 丁秀丽, 冯夏庭. 三峡船闸高边坡考虑开挖效应的位移反分析. 岩石力学与工程学报, 岩石物理数学模拟与深层岩石力学专辑, 2000, 19 (增刊): 987~993
- [52] 张天驰, 周维垣, 杨若琼. 拱坝多参数优化反演分析法及其应用. 岩石力学与工程学报, 岩石物理数学模拟与深层岩石力学专辑, 2000, 19 (增刊): 997~1000
- [53] 熊顺成. 拱坝监测分析系统理论及应用研究. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1992
- [54] 杨志法. 关于位移反分析法原理和方法的研究. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1987
- [55] 仇圣华. 成层正交各项异性围岩反分析方法的研究. 同济大学博士学位论文, 2002
- [56] 黄佳胜. 地下工程围岩稳定性的位移法评价. 中国科学院地质研究所硕士学位论文, 1987
- [57] 杨涛. 位移反分析的有限元——无界元耦合法及其在工程上的应用. 华北水电学院硕士学位论文, 1987
- [58] 张兴武. 白山拱坝坝基分区弹模的灵敏度反分析方法. 岩土力学数值方法的工程应用. 上海: 同济大学出版社, 1990: 786~796
- [59] 李素华. 优化方法在弹性、横观各向同性以及弹塑性围岩变形观测反分析中的应用. 中国科学院武汉岩土力学研究所硕士学位论文, 1990
- [60] 聂晓燕. 隧道衬砌荷载的位移反分析. 北方交通大学硕士学位论文, 1990
- [61] 王东松. 地下工程位移反分析参数的可信性研究. 北方交通大学硕士学位论文, 1992
- [62] Yang Zhifa, Wang Sijing. Application of back-analysis from displacements to rock engineering and its problems meriting attention. Proceedings of the 3rd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 1991, (1): 367~375
- [63] 吕爱钟. 巷道围岩参数及地应力可辨识性的探讨. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(2): 155~164