

DOI: 10.11779/CJGE201509015

# 有效应力原理在中国的应用实例

陈愈炯

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘 要:** 简单叙述黄文熙教授和他指导下的一些岩土工程师, 从 1954 年起就开始为有效应力原理应用于实际工程做准备工作并在 1959 年正式投入应用的情况。以及他们在研究土的工程性质的过程中, 依靠有效应力原理提高洞察力, 提出新想法和取得新成果的若干实例。这些实例说明, 有效应力原理的重要性往往是在实际工程中得到应用后才逐渐为工程师所认识, 因此, 多接触实际, 时时处处想到利用该原理, 才可能取得有价值的结果。

**关键词:** 有效应力原理; 工程中的应用; 研究工作中的应用

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)09-1674-04

**作者简介:** 陈愈炯(1930- ), 男, 上海人, 教授级高级工程师, 主要从事土工试验, 土的工程性质的研究及土坝工程有关的土力学问题的研究和实践工作。E-mail: joelchen2003@aliyun.com。

## Examples of application of effective stress principle in China

CHEN Yu-jiong

(State key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The application of the effective stress principle in engineering projects starting in the early 1950's carried out by Professor Huang Wen-xi and his fellow engineers is concisely described. Their achievements in exploring mechanical properties of soils with the help of effective stress principle are also introduced. These examples are by no means the only modes of application of this principle, but show that the constant use of the principle in practice is the important way to recognize its powerfulness. Therefore, doing much in engineering practice and using the effective stress principle more frequently may result in fruitful effects.

**Key words:** effective stress principle; engineering application; research application

## 0 引 言

有效应力原理包括两部分一是有有效应力公式, 是 Terzaghi 早在 1923 年就提出来的; 二是土的力学性质主要取决于有效应力, 也是他在早年工作期间认识到并告诸于众的。两者都很简单, 而且问世都很早。可是在学生时代的笔者在学习土力学时, 只把注意力集中在土压力, 地基承载力和土的固结等偏于理论方面的章节, 并不了解教科书中另外一些重要内容细节。虽然, 有效应力的定义是了解的, 但不知如何加以确定, 也没有认识到有效应力与土的工程性质有如此密切的关系。更没有把两部分内容联系起来, 从而提高到“有效应力原理”的高度。现今重新翻阅当时仅有的几本土力学名著<sup>[1-2]</sup>可以在其索引中找到“有效应力”一词, 却没有“有效应力原理”一词。直到 1957 年 Bishop<sup>[3]</sup>一书的索引中才首次找到有效应力原理这一名词。到现在为止, 有效应力原理的重要性几乎为所有的岩土工程师所认同。

由此可见, 中外岩土工程师往往需经历较长的时间才逐渐认识有效应力原理的重要性。近年来中国岩土工程师对有效应力原理进行了热烈的讨论后, 大家已或多或少认识到该原理的重要性。可是, 在国内的岩土工程刊物中却很少见到应用此原理而取得好效果的报道。其原因或许是, 中国的工程师习惯于按照规范办事, 认为规范已充分贯彻了该原理的精神。其实, 该原理在每一个工程的各个环节中都可能有所作为。如果能自觉地经常使用该原理, 才能体会到有效应力原理确实能帮助工程师提高洞察力, 和处理工程问题的能力, 从而取得意想不到的正面效果。本文简要叙述黄文熙教授和他指导下的一些岩土工程师, 在工作中应用有效应力原理的例子, 和认识其重要性的过程。目的是鼓励同行们在工程实践中尽量多利用有效应力

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目  
(2014CB047002)

收稿日期: 2014-12-26

原理这一得力工具。

## 1 始于南京水利实验处

南京水利实验处土工室规定,新来的职工先在实验室参加各项土工试验工作约一年。当时,1952年,该室不但已建置了比较完善的土工实验室,而且拥有自己的勘探队,到了1955年就能在现场使用薄壁活塞取土器采取原状黏土土样;进行十字板剪力试验和标准贯入试验等,有关的室内和现场试验设备都是前辈们在参考国外图纸的基础上,在短短3年左右复制而成的。

凡是处理土工问题,土工室首先派自己的勘探队去现场取土和进行现场试验,并把土样带回自己的实验室。每天早上进行试验前开启土样时,负责分析计算的工程师要了解开启的土样情况。编写的报告,先在土工室内部讨论修改后,才提交所长黄文熙先生审查,根据他批示的意见进行修改后才允许外送。总之,当时的南京水利实验处是把勘探,试验和计算分析等环节紧密地结合起来的。如此工作了约两、三年,笔者才慢慢地了解各种土工试验的原理,影响试验成果的主要因素,测得的土性质指标的用处以及各项指标之间的相互关系等。然后,才试着判定各类土的定性和定量性质指标。这些技能对日后工作很有帮助。那时候,土工室除了要完成治淮等实际工程外,还为国内同行开办土工试验学习班和进行一些研究工作。主要是研究土的变形,黏土抗剪强度和砂土液化等力学性质。

值得提到的是,指导工作的黄文熙先生在1954年就要求南京水利实验处土工室掌握室内和现场测定孔隙压力的技术。当时南京水利实验处已经仿制了4台哈佛式三轴仪,遗憾无法量测试样的孔隙压力,因为国内买不到若干种关键原件和材料。不过成功试制了现场薄膜式孔隙压力测头,并在室内得到率定<sup>[4]</sup>。与此同时,黄先生除了自己撰文估算水库水位降落期砂质坝壳中的孔隙压力外<sup>[5]</sup>,还指导笔者用压缩试验成果结合理论计算的办法来估算黏性填土在施工期的孔隙压力<sup>[6]</sup>。回想当年,包括笔者在内的同事们还不知道这样做的全部意义,后来才意识到黄先生早在1954年就已经为利用有效应力法确定土坝填土抗剪强度开始做准备工作。

## 2 持续于北京水利科学研究院

1956从南京水利实验处转移到北京水利科学研究院后,买到了一些测定孔隙压力的关键器材。继而,在1957年从英国进口了一台三轴仪后,就能在室内顺

利地量测孔隙压力。最早是用自制的孔隙压力消散仪,测定软黏土的残余孔隙压力,目的是推算出软黏土的起始比降值。从而估算起始比降值对沉降量的影响。

到了20世纪50年代末,国内曾流行修建水中填土坝,其特征是:填土初期干密度很低,含水率很高,相应的初期抗剪强度很低。但是填土的干密度和抗剪强度在施工期间有明显的增长。如果采用初期抗剪强度(不排水强度)作为水中填土坝在施工期的抗剪强度,则设计的坝坡需非常平缓,才能满足安全因数要求。也就是说,设计的坝坡比实际建成的稳定坝坡平缓得多。这说明对于水中填土坝而言,所采用的设计方法过分保守,其根本原因是该设计方法没有计及抗剪强度在施工期间的增长部分。为此,黄先生于1959年首先建议采用有效应力法确定填土在施工期的抗剪强度增长,以期节约投资。有关的研究成果发表于1962年<sup>[7]</sup>。

有效应力原理表明,强度增长值主要取决于填土内孔隙压力消散值,因此黄先生还要求在现场量测孔隙压力,据此校核孔隙压力估算值的可靠程度。可是,同事们在1958年试制的少量电阻式孔隙压力测头很不稳定,没有在水中倒黄土坝现场取得观测资料。直到1965年才因地制宜地仿制了Penman型的水管式现场孔隙压力观测设备,首次在广东茂墩的水中填土坝中使用<sup>[8]</sup>。

到了1960年笔者根据Bishop等<sup>[3]</sup>的研究成果和自己的工作经验,编写了篇名为“土坝填土抗剪强度的确定”一文,投寄学报的编辑部。该文的内容其实就是:用有效应力法确定土坝在各个工况下的抗剪强度。由于当时笔者还不能预期文中介绍的方法就是日后有名的有效应力法,因此,曾一度为篇名之后没有加上副题——“有效应力法”字样而感到遗憾。然而更遗憾的是,该编辑部出于好意,最终把文章的篇名改为“土料剪力试验和孔隙水压力的估算”<sup>[9]</sup>。该文的主要内容在1962年被纳入中国碾压式土坝设计规范的初稿,可是,直到1984年才正式得到出版<sup>[10]</sup>。

## 3 研究土的力学性质

回顾世界上一些著名土工研究单位的研究重点大都是土的工程性质。类似的情况是,中国黄文熙先生领导下的前南京水利实验处,北京水利科学研究院和清华大学等研究单位,也是主要研究土的工程性质。例如南京水利实验处早于1955年就开始研究砂土的液化。先是模仿外国的方法,将饱和砂土放在震动台上的圆柱筒内测定砂土发生液化时的震动频率和次数。这种试验不能给出震动过程中土中的有效应力和

孔隙压力变化,因此难以揭示其内在液化机理。然而黄先生从有效应力原理得到启示,认为饱和土的震动孔隙压力升高到导致有效应力接近零时,应该是砂土液化之时。于是他在1959年首创震动三轴仪来量测砂土在震动过程的孔隙压力和有效应力变化过程,据此探索液化机理,初步研究成果<sup>[11]</sup>发表于1961年,该仪器被继后的各国研究者所采用,并取得有价值的研究成果。

自从人们怀疑土坝心墙的水力劈裂是导致某些土坝失事的原因以后,美国学者在20世纪80年代首先在圆柱形试样的中心的圆孔中施加水压力,揭示了影响试样发生水力劈裂的一些因素。不过,在他们的试验中,试样发生水力劈裂时的有效应力分布并不清楚。而黄先生根据有效应力原理推测,当土体中的渗流导致土中的有效应力接近零时,应该是开始发生水力劈裂之时。清华大学的教授们在他的指导下创建了专用的试验装置,能了解试样内的有效应力分布对水力劈裂的影响,从而对土的水力劈裂特性有了深入的了解<sup>[12]</sup>。此外,笔者<sup>[13]</sup>认为挖方渠道黏性土边坡在运用期间的失稳原因之一,是开挖引起的负孔隙压力在运用期间消失的结果,其理论依据也就是有效应力原理。

## 4 广阔的应用范围

有效应力原理除了对上述水利工程和土性质的研究工作产生了关键作用外,对岩土工程中的其它环节也能有所作为。例如,帮助人们了解渗透试验中试样中的有效应力会随着水力比降的提高而增长,而且试样各处的有效应力增长是不均匀的,从而影响软土的渗透系数值;它还能帮助解释直接快剪和三轴不排水试验成果对渗透系数大约大于 $10^{-7}$  cm/s的土来说给出不一致强度指标的原因等。如果在水利以外的其他行业,如房建,道路等工程,应用有效应力原理,或许同样会得到良好效果。例如,笔者在3年前注意到许多同行正在努力研究后注浆灌注桩的承载力,通过大量现场观测工作测定了试桩在灌浆前后的承载力,以及桩壁摩擦力分布,取得了十分有价值的成果<sup>[13]</sup>。但是还没有人研究这种桩在建成后的承载力发生变化的情况。笔者根据有效应力原理推测,如果桩壁周围是饱和的黏性土,则其承载力或许会随时间而变化,黏土的压缩性愈高,注入的浆液愈多,则其承载力或许会随着时间的进展而降低得愈多。由于笔者没有桩基础的实践经验,所以上述猜想的可信程度不足以为此疑问专门进行昂贵的试桩工作,不过,只需在类似的后注浆灌注桩中,在桩壁增加若干个土压力盒,并

在桩身附近的黏土中埋设若干个孔隙压力侧头,量测成桩过程,加载过程及继后时间的土压力和孔隙压力变化,就有可能初步回答笔者提出的疑问。一旦证明确有其事,就需引起注意和深入研究。

## 5 结 语

土的有效应力原理本身并不复杂,其内容早就为世人所知道。但是其重要性在经历了较长时间后才逐渐为岩土工程师所认可。其原因之一或许是,人们认为该原理的简单内容早已被纳入规范之中。没有意识到该原理在每一个工程的各个环节中都可能有所作为。即使有机会亲手应用该原理,则往往需经历较长时间的使用和验证过程,从而尝到甜头后,才能真正理解其重要性。本文介绍黄文熙先生本人及其指导下的南京水利实验处,水科院和清华大学的同仁们借助了有效应力原理所取得的一些有实用价值的成果实例,用以鼓励同仁们重视该原理的应用,在应用过程中提高自己的洞察力,和处理工程问题的能力,从而取得意想不到的好效果。

### 参考文献:

- [1] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1948.
- [2] TERZAGHI K. Soil Mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1948.
- [3] BISHOP A W. The measurement of soil properties in triaxial tests[M]. London: Arnold, 1957.
- [4] 盛崇文, 苏乙波. 薄膜式孔隙压力仪的设计和试制[R]. 南京: 南京水利实验处, 1954. (SHENG Chong-wen, SU Yi-bo. Design and manufacture of membrane style pore pressure tips[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1954. (in Chinese))
- [5] 黄文熙. 水库水位降落对砂质坝壳稳定性影响的研究[R]. 南京: 南京水利实验处, 1954. (HUANG Wen-xi. Effect of drawdown on the stability of the sandy slope of dams[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1954. (in Chinese))
- [6] 陈愈炯. 土坝施工期间填土中孔隙压力的估算[R]. 南京: 南京水利实验处, 1954. (CHEN Yu-jiong. Estimation of pore pressure in the fill of dam during construction[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1954. (in Chinese))
- [7] 黄文熙, 蒋彭年. 水中填土坝土料特性研究[J]. 水利学报, 1962(1): 16 - 32. (HUANG Wen-xi, JIANG Peng-nian. Research on characteristics of material of dams constructed

- by dumping soils into ponded water[J]. Journal of Hydraulics Engineering, 1962(1): 16 - 32. (in Chinese))
- [8] CHEN Yu-jiong, LI Zhong-hua. Slope stability of Maodun dam during construction[C]// Proc 10th Southeast Asian Geotechnical Conference. Taipei, 1990: 153 - 156.
- [9] 陈愈炯. 土料剪力试验和孔隙水压力的估算[J]. 水利水电建设, 1960(7): 26 - 32. (CHEN Yu-jiong. Shear test and pore pressure estimation of the fill of dam[J]. Shuili Shuidian Jianshe, 1960(7): 26 - 32. (in Chinese))
- [10] SDJ—84 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (SDJ—84 Design code of rolled fill earth-rock dam[S]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese))
- [11] HUANG Wen-xi. Investigations on stability of saturated sand foundations and slopes against liquefaction[C]// Proc 5th ICSMFE. Paris, 1961: 629 - 631.
- [12] 丁金粟, 孙亚平. 土体水力劈裂学机理判析[C]// 第五届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 534 - 542. (TING Jin-su, SUN Ya-ping. Mechanism of hydraulic fracturing of soil[C]// Selected Papers of the 5th Chinese Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990: 534 - 542. (in Chinese))
- [13] 陈愈炯, 边京红. 黏性土渠道边坡的形成方式对滑坡的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 988 - 990. (CHEN Yu-jiong, BIAN Jing-hong. Effect of bank forming way on the stability of cohesive canal slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 988 - 990. (in Chinese))
- [14] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1817 - 1826. (WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. Field loading tests on long diameter and super-long bored piles of Shanghai center tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1817 - 1826. (in Chinese))

### 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)