

黄文熙先生的主要学术成就 ——纪念黄文熙先生诞生 100 周年

李广信

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 黄文熙先生在结构工程和岩土工程方面都有创新性的研究成果。他提出的拱坝计算的格栅法, 是在电子计算机出现以前的结构离散计算方法, 也是有限元法计算的前驱; 他提出了可以反映土的应力路径的三维地基沉降计算方法; 他也是国内外公认的动三轴试验的首创者; 他提出了具有突出特色的清华弹塑性模型, 大大推动了我国土的本构模型研究的发展。

关键词: 黄文熙; 格栅法; 三维地基沉降计算; 动三轴试验; 清华弹塑性模型

中图分类号: TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)01-0149-04

作者简介: 李广信(1941-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学和土的本构关系、土工合成材料和基础工程方面的研究工作。E-mail: ligx@tsinghua.edu.cn。

Prof. HUANG Wen-xi's important academic achievements ——for the 100th anniversary of Prof. HUANG Wen-xi's birth

LI Guang-xin

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Prof. HUANG Wen-xi gained excellent research achievements with creativity in both structural engineering and geotechnical engineering. He, pioneer of FEM, developed the method of fictitious grillage in the analysis of arch dams. He was the first to put forward a 3-D settlement analysis method of soil foundation in which the influence of the stress path was included. He was also the founder of the dynamic triaxial test, which has been well accepted by the geotechnical engineers all over the world. The Tsinghua elastoplastic model of soil founded by him is an original model of soil and has pushed forward the research of constitutive relationship of soil in China.

Key words: HUANG Wen-xi; method of fictitious grillage; 3-D settlement analysis of soil foundation; dynamic triaxial test; Tsinghua elastoplastic model of soil

0 前 言

黄文熙(1909-2001), 水工结构和岩土工程专家, 我国土力学学科奠基者之一, 新中国水利水电科学研究事业的开拓者。在水利水电工程、结构工程和岩土工程几个领域都取得了杰出的成就^[1]。他致力于岩土工程教育事业 60 多年, 培养了大批工程技术人才, 被推崇为土力学界的一代宗师。在他诞生 100 周年之际, 回顾他的杰出学术成就, 学习和继承他的创新精神和严谨务实的学风有很大现实意义。

1 拱坝结构分析的新方法——格栅法

1931 年~1933 年期间, 黄文熙在上海慎昌洋行建筑部进行结构设计时, 对于一座 17 层的刚架结构, 他

创造性地提出了设计这种框架结构的“框架力矩直接分配法”。用这种方法进行力矩分配, 比克劳斯的力矩分配法计算工作量少。论文发表于 1934 年 10 月的《工程》期刊第 9 卷的第 5 期上, 这比其他学者就同一课题发表的论文早两个月。

1935 年他着手研究拱坝结构分析的新方法——格栅法。此法是将拱坝(或壳体)当成由许多水平拱段和垂直梁段所组成的格栅, 它们刚性地连接在格栅的结点上。假定每个分段都能抵抗挠曲、横向剪切、轴向压缩、扭转和切向剪切。每个结点可以归纳为 5 个位移分量: 径向位移 w , 切向位移 u , 垂直位移 v ,

绕垂直轴的转角 θ , 绕水平轴的转角 φ 。对于每个结点可以列出5个平衡方程: ①垂直力平衡方程 $\sum F_{ya}=0$; ②绕水平轴力矩平衡 $\sum M_{xa}=0$; ③水平切向力平衡 $\sum F_{xa}=0$; ④绕垂直轴力矩平衡 $\sum M_{ya}=0$; ⑤径向力的平衡 $\sum F_{za}=0$ 。利用材料的本构方程, 该结点的5个平衡方程可以用5个位移分量表示。这样5个位移分量就可以通过5个平衡方程确定。最后结合边界条件计算拱坝的坝体变形和应力^[2]。

这种将结构离散的计算方法, 实际上是目前广泛应用的有限单元法的先驱。与三维弹性理论解、薄壳理论解和试荷载法比较, 它能考虑各种主要影响因素和不同的边界条件; 适用于数值法求解; 也可用于研究各向异性板壳结构和对其进行动力反应分析。1937年在密执安大学, 他仅用一年半时间就完成了题为“格栅法在拱坝、壳体和平板分析中的应用”的博士论文, 论文受到导师和答辩委员会的一致赞誉。为表彰他的优异的成绩, 密执安大学又授予他“雪格麦赛艾”荣誉奖章。当时的密执安日报和底特律日报发表“最杰出的学生赢得了老师和朋友们的赞誉”一文。文中写到“一个谦和的中国学生在密执安大学赢得了盛名。”“他在两个不同的领域: 结构工程和水利工程, 都作出了不寻常的贡献。”文章介绍了金教授对他的赞誉: “黄表现出的原创性和杰出的逻辑思维能力超出了同期的学生。他是我所指导过的学生中最优秀的; 他是密执安大学工学院很多年来授予学位者中杰出的一个。”

直到他的晚年, 黄文熙对于结构分析仍十分关心, 1995年, 当 he 已 86 岁高龄时, 仍撰写了“拱坝抗屈折稳定初探”一文, 发表于当年的《水利学报》上^[3]。

2 地基沉降三维应力计算方法

在抗战期间他发表了题为“水工建筑物的土壤地基沉降与地基中应力分布”的论文, 提出了被称为“黄文熙法”的地基沉降计算方法。

在地基沉降计算方面, 通常是假设地基土在受载时不发生侧向变形, 用侧限压缩试验确定参数, 这种假设不符合地基土的实际应力状态。当时前苏联的地基规范(TY-24-103-40)中建议, 在重要的建筑物的设计时, 应考虑地基土的侧向变形, 并推荐弗洛林公式计算沉降量。但是这个公式除需要计算土的竖向应力 σ_z 以外, 还需要计算两个水平应力 σ_x 和 σ_y 以及需要确定泊松比 μ , 计算十分繁复。

黄文熙早就开始致力于这一课题的研究。在1942年的《工程》上他撰文“水工建筑物土壤地基的沉降量与地基中应力分布”^[4]。修正稿发表在1957年《水

利学报》第5期^[5]。英文稿发表在1959年 Science in China《中国科学》。

在这些文章中, 他提出了考虑地基土侧向变形的沉降计算方法。

在地基中某一点 $M(x, y, z)$ 处的应力状态是 σ_z 、 σ_x 和 σ_y , 令

$$\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \quad (1)$$

它代表三个正应力之和。根据弹性理论, 该点的竖向应变为

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] / E, \quad (2)$$

从式(1)和式(2)得到

$$\varepsilon_z = [(1 - \mu)\sigma_z - \mu\Theta] / E, \quad (3)$$

根据压缩试验以及虎克定律:

$$\varepsilon_v = -\Delta e / (1 + e_1), \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = (1 - 2\mu)\Theta / E, \quad (5)$$

所以从式(4), (5)得

$$E = (1 - 2\mu) \frac{1 + e_1}{-\Delta e} \Theta. \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)得

$$\varepsilon_z = \frac{1}{1 - 2\mu} \left[(1 + \mu) \frac{\sigma_z}{\Theta} - \mu \right] \frac{-\Delta e}{1 + e_1}. \quad (7)$$

式(7)就是计算一般情况下地基沉降量的基本公式。如果设

$$j = (1 + \mu) \frac{\sigma_z}{\Theta}, \quad (8)$$

$$K = \frac{j - \mu}{1 - 2\mu}, \quad (9)$$

则式(7)就可以表示为

$$\varepsilon_z = K \frac{-\Delta e}{1 + e_1}. \quad (10)$$

式(10)就是沉降计算的普遍公式, 可以用于分层总和法计算地基沉降。与不考虑地基侧向变形的计算方法比较, 增加了一个修正系数 K 。

在以上的计算中, 地基中每点的附加应力 σ_z 和 Θ 可以用布辛尼斯克的半无限地基的弹性解答得到。由于在地基土中弹性参数 E 是随深度变化的; μ 也是不同的。所以黄文熙推导了一个应力集中系数 ν 。他也指出地基土的泊松比 μ 和弹性常数 E 是它所受的3个主应力大小及其比例关系的函数, 应当用适当的三轴试验来确定。这一观点在当时是非常先进的, 是20世纪60年代国外学者所提出的“应力路径法”的先驱。

黄文熙编制了各种不同荷载条件下的计算图表。使这个计算方法更接近实用。成为了地基沉降计算的一种重要的方法^[5]。具有更广泛的适用性。尤其是适用于受水平荷载和偏心竖向荷载的水工建筑物的沉降计算。

3 动三轴试验与砂土振动液化的研究

黄文熙在四五十年代提出了砂土振动液化的机理及试验方法, 对现代土力学作出了贡献, 得到国际同行们的认同。

饱和松砂土在地震、爆破和其他动力作用下引起的液化对建筑物危害极大, 因此, 饱和砂土振动液化的机理、影响因素、判别和防治措施多年来一直是土力学学者们致力研究的课题。人们已经注意到饱和砂土振动变密实时经历两个阶段: 首先砂土颗粒脱离接触, 悬浮在水中; 然后浮起的颗粒重新沉积, 并形成比原来更紧密的状态。但对其理论解释并不明确。在 50 年代通常是将砂土装在筒中进行液化试验。

1962 年, 黄文熙在《水利水电技术》上发表论文“砂基和砂坡的液化研究”^[6]。此文的英文稿载于 1960 年 *Science in China*^[7]。英文的修正稿载于 1961 年在巴黎召开的第五届国际土力学及基础工程学术会议论文集中^[8]。在这篇文章中, 黄文熙最先用有效应力原理阐明饱和砂土振动液化的机理。他指出当砂土颗粒脱离接触处于悬浮状态时, 砂土原来所受的压力逐步由土的骨架转移到水上, 使孔隙水压力增高并达到一个最大值。同时砂土骨架上的有效应力急剧减少, 砂土的抗剪强度随之降低。如果原来的全部压力 σ 都变成孔隙水压 u , 根据有效应力原理 $\sigma = \sigma' + u$ 。砂土上的有效应力 σ' 为零, 砂土的抗剪强度丧失殆尽, 砂土颗粒随水一起流动, 发生了宏观的液化现象。在随后的第二个阶段, 由于超静孔隙水压力的产生, 部分孔隙水将被陆续排走; 浮起的颗粒重新沉积, 排列成更紧密的状态。这时压力又从水上重新转移到砂土骨架上, 孔隙水压力为零, 孔隙水压力转变成有效应力。 $\sigma = \sigma'$, 使砂土复归稳定。

以上的论述, 从有效应力原理出发, 清楚地解释了饱和砂土振动液化的机理。对于我们进一步研究砂土液化的影响因素有很大的指导意义。

黄文熙针对过去的液化试验是将筒中的饱和砂土振动, 指出在这种试验设备中, 砂土的应力状态是静止应力状态, 如果竖向应力是 σ_1 , 侧向应力 $\sigma_3 = k_0 \sigma_1$ 。其中 k_0 是静止土压力系数。这种应力状态与受附加荷载的砂土地基和砂土坡相差很大。他建议了三轴振动试验方法。该方法是利用三轴仪, 首先对饱和砂土施加不同的围压和轴压 σ_3 和 σ_1 , 随后施加 $\pm \Delta \sigma_1$ 和 $\pm \Delta \sigma_3$ 它们等于动荷载引起的大、小主应力的变值。为了找到在动荷载作用下某一点发生的最大孔隙水压力, 试验中两个主应力分别在 $\sigma_1 \pm \Delta \sigma_1$ 和 $\sigma_3 \pm \Delta \sigma_3$ 范围内变化。在这种思想的指导下, 水利水电科学研究院在 1959 年将三轴仪放置在竖直振动台上, 进行了砂土液

化试验。试验中采用了不同的围压 σ_3 、不同的应力比 σ_1/σ_3 和使用不同密度的砂土, 分别量测振动产生的孔隙水压力。结果表明, 初始应力状态、砂土密度和振动加速度对于孔隙水压力的生成有很大影响。孔压力比 $\Delta u/\Delta \sigma_3$ 随着围压 σ_3 、应力比 σ_1/σ_3 和砂土密度的增加而减小^[6-8]。

这一论文以及随后我国在这个方面所发表的一系列成果受到国际同行的很大重视。所研制的振动三轴仪及其试验方法为国内外广泛采用, 动三轴仪成为国内外土工实验室所必备的设备, 推动了土动力学的发展。

受黄文熙这一思想的引导, 汪闻韶等进行了系统的研制和试验工作, 陆续发表了一批研究成果。同时结合我国的水利水电工程和土工抗震工作, 对于 1975 年的海城地震、1976 年的林格尔和唐山大地震进行了震害调查和分析。得到一些有意义的结论和经验。

4 土的清华弹塑性模型

六七十年代, 随着大型土工建筑物的兴建和计算机技术的蓬勃发展, 可以反映土的非线性、弹塑性的应力应变关系的各种本构关系的数学模型得到迅速发展。而当时我国正值“文革”期间, 国内学者对于国际上这一学术动向了解极少。黄文熙在重新工作以后, 敏感地注意到这一研究的巨大学术意义和应用前景, 他一方面著文介绍当时国际上代表性的本构关系模型。另一方面, 带领清华大学土力学教研组开展研究, 建立了土的弹塑性本构模型, 被称为清华弹塑性模型。该模型的主要建模特点是: 在三轴试验的结果中, 计算各应力状态下的塑性应变 ϵ_v^p 与 $\bar{\epsilon}^p$, 绘制不同围压下三轴试验的 $\epsilon_v^p - \bar{\epsilon}^p$ 关系曲线; 然后在 $p - q$ 平面上对应的应力点处绘制其塑性应变增量方向, 用图 1 所示的小箭头表示 (它实际就是 $\epsilon_v^p - \bar{\epsilon}^p$ 曲线对应于该应力点的切线方向)。图 1 表示的是承德中密砂的试验结果, 将该图中的小箭头方向连线就如同“流线”; 对应的与其正交的“等势线”即为塑性势轨迹。按照德鲁克假说, 采用相适应的流动准则 $f=g$, 则塑性势轨迹即为其屈服轨迹。用适当的函数表示, 即为屈服函数。

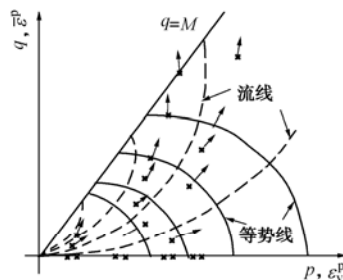


图 1 承德中密砂的屈服轨迹

Fig. 1 Yield locus of Chengde sand

他深入研究了在弹塑性模型中硬化参数对土的应力应变关系的影响^[9],在该模型中提出了式(11)形式的硬化参数,合理地反映了土的应力应变关系。

$$h = f(\varepsilon_v^p, \bar{\varepsilon}^p) \quad (11)$$

其主要成果发表在第十届国际土力学及基础工程学术会议论文集中^[9]。

他在土的本构关系模型研究方面的工作大大推动了我国在这个领域的研究工作,缩小了与国际先进水平间的差距。在八九十年代我国也提出了几个有代表性的土的本构关系模型,促进了岩土数值计算工作。这给我国在七五和八五期间兴建的一些高土石坝和大型土木工程,包括小浪底水库大坝、三峡二期围堰的设计,提供了多方面的数值计算结果,大大丰富和加强了我们在岩土工程方面的分析计算能力。

5 结 语

黄文熙先生作为土力学学科的带头人,十分重视土工试验,他提出“土工试验资料是永存的”,要求试验工作严格认真,一丝不苟,要全面、准确地记录试验成果并保存。他的许多研究成果也是在试验的基础上取得的。他先后在南京水科院(原南京水利试验处)、北京水科院(现中国水科院)、清华大学土力学教研室担任领导职务,他任职后首要工作就是抓实验室,着手建设现代化的土工试验室。80年代以来,他看到土工模型试验对于验证理论和计算及模拟实际工程的重要作用,看到我国与世界先进国家间在土工模型试验方面的巨大差距,于1984年亲自率团到西欧、日本、美国考察。归国后他又多方奔走呼吁,终于在我国建立了不同规模的土工离心模型试验装置,这对我国岩土工程的发展起到巨大的推动作用。

另外,他还组织专人开发了和进行了渗水力模型试验;支持对旁压仪试验的理论研究;大力开展水力劈裂试验和机理研究;对土工合成材料的应用和研究工作寄以极大的热忱,力促土工合成材料在水利工程中的应用。这些项目有的当时在国外尚处于摸索阶段,有的具有巨大的工程意义和潜力。

参考文献:

- [1] 黄文熙. 水工结构中的结构力学和岩土力学问题(黄文熙论文选集)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (HUANG Wen-xi. Some structural and geotechnical problems in hydraulic constructions (Selected works of HUANG Wen-xi)[M]. Beijing: Water Power Press, 1984. (in Chinese))
- [2] 黄文熙. 格栅法在拱坝、壳体和平板分析中的应用[J]. 水利学报, 1962(5): 68 - 80. (HUANG Wen-xi. Structural analysis of arch dams, shells and plates by method of fictitious grillage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1962(5): 68 - 80. (in Chinese))
- [3] 黄文熙. 拱坝抗屈折稳定初探[J]. 水利学报, 1995(9): 1 - 4, 31. (HUANG Wen-xi. Preliminary studies on the stability of arch dam against elastic buckling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(5): 1 - 4, 31. (in Chinese))
- [4] 黄文熙. 水工建筑物土壤地基的沉降量与地基中应力分布[J]. 工程, 1942, 15(5). (HUANG Wen-xi. Settlement analysis of soil foundation of hydraulic structures and stress distribution in foundations[J]. Engineering, 1942, 15(5). (in Chinese))
- [5] 黄文熙, 张文正, 俞仲泉. 水工建筑物土壤地基的沉降量与地基中应力分布[J]. 水利学报, 1957(3): 1 - 60. (HUANG Wen-xi, ZHANG Wen-zheng, YU Zhong-quan. Settlement analysis of soil foundation of hydraulic structures and stress distribution in foundations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1957(3): 1 - 60. (in Chinese))
- [6] 黄文熙. 砂基和砂坡的液化研究[J]. 水利水电技术, 1962(1): 38 - 39. (HUANG Wen-xi. Investigations on stability of sand foundation and slopes against liquefaction[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 1962(1): 38 - 39. (in Chinese))
- [7] HUANG Wen-xi. Criterion for the stability of saturated sand foundations and slopes against liquefaction[J]. Science in China, 1960, 9(1): 62 - 67.
- [8] HUANG Wen-xi. Investigations on stability of saturated sand foundation and slopes against liquefaction[C]// Proc of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961.
- [9] HUANG Wen-xi, PU Jia-liu, CHEN Yu-jiong. Hardening rule and yield function for soils[C]// Proc of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981.