

黄文熙

(Huang Wenxi)

砂土振动液化与地基三维沉降计算

(Vibro-liquefaction of saturated sand and 3-dimensional settlement analysis)

黄文熙在 30 年代末首先在国内创设了当时的新兴学科—土力学。40-50 年代他提出了砂土振动液化的机理及试验方法和考虑土侧向变形的地基沉降计算方法,对现代土力学作出了贡献,得到国际同行们的认同。他在国内率先开展土的本构模型的研究,提出了一个有特色的土的弹塑性本构模型,并被用于许多工程问题的数值计算。

饱和砂土振动液化的机理、影响因素和防治措施多年来一直是土力学的学者们致力研究的课题。人们已经注意到液化的现象,饱和砂土振动变密时经历两个阶段:首先砂土颗粒脱离接触,悬浮在水中;然后浮起的颗粒重新堆积,并形成比原来更紧密的状态。但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。

黄文熙于 1959 年在国内《水利水电技术》第 15 期上发表论文“砂基和砂坡的液化研究”。此文的英文稿载于 1960 年 *Scientia sinica* (《中国科学》) Vol. 9, No. 1. (中国科学)。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。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 都变成孔隙水压力 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,砂土颗粒随土一起流动,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;浮起的颗粒重新堆积,排列成更紧密的状态。这时压力又从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。该方法是利用三轴试验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 $\pm \Delta \sigma_3$ 它们表示动荷载引起的大、小主应力的变化。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 年将三轴仪放在整直振动台上,进行了砂土液化试验。试验中采用了不同的围压 σ_3 和不同的应力比 σ_1/σ_3 和不同密度的砂土,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($\Delta \sigma_1$)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。

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开导,汪闻韶等人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。

在地基沉降计算方面，一直是利用侧限压缩试验确定参数，同时假设地基土在受载时不发生侧向变形。这种假设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 ，计算繁复。

黄文熙很早就致力于这一课题的研究。他在1942年的《工程》期刊15卷，5期上他撰文“水工建筑物土壤地基的沉降量与地基中应力分布”。该文英文修正稿发表在1959年Scientia sinica(《中国科学》)Vol. 8, No. 11。在文章中，他提出了考虑地基土侧向变形的沉降计算方法。其具体原理和步骤如下：

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

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

它代表正应力之和。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：

$$\varepsilon_x = \Delta e / (1 + e_1) \quad (4)$$

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

所以从式(4)和式(5)得到：

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

将式(6)代入(3)

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

上式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 (Boussinesq) 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建议 μ 和弹性常数 E 是它所受的三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 70 年代所提出的“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。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。

60-70 年代, 随着大型土木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, 对于国际上这一学术动向了解极少。黄文熙在从心重新工作以后, 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。他建议用常规三轴试验在应力平面上确定各点的塑性应变增量的方向, 根据正交流动准则确定塑性势函数的轨迹。根据 Drucker 假说, 选择适当的硬化参数使屈服面与塑性势面重合。建立了无须人为地假设屈服面函数和硬化参数的弹塑性模型。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。他在土的本构模型方面的工作大大推动了我国在这个领域的研究工作, 很快缩小了与国际先进水平间的差距。在 80-90 年代我国也提出了几个有代表性的土的本构模型, 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。

参考文献

- [1] 黄文熙 砂基和砂坡的液化研究, 水利水电技术, 1957 (15);
- [2] Huang Wen-xi. Investigations on stability of saturated sand foundation and slopes against liquefaction. Proc. Of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961:
- [3] 黄文熙 水工建筑物土地基的沉降量与地基中应力分布, 工程, 1942 15 (5);
- [4] 黄文熙 硬化规律对土的弹塑性应力应变模型影响的研究, 岩土工程学报, 2 (1) 277-283
- [5] Wen-xi Huang, Jia-liu Pu and Yu-jiong Chin, Hardening rule and yield function for soils, Proc. Of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981: