

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2115-03

爆炸法处理软土地基的回弹模量研究

舒阳¹, 闫澍旺¹, 杨兵², 刘润¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国科学院 力学所, 北京 100080)

摘要: 简要介绍了自洽方法和爆炸法处理软土地基的工作原理, 并用自洽方法计算爆炸法处理的软土地基的回弹模量, 计算结果和试验结果符合较好。试验证明了用自洽方法计算爆炸法处理软土地基的回弹模量是可行的。

关键词: 软土地基; 爆炸压入法; 自洽方法; 回弹模量

中图分类号: TU 472.9

文献标识码: A

Research on resilient modulus of soft foundation dealt with blasting

SHU Yang¹, YAN Shu-wang¹, YANG Bing², LIU Run¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Based on a brief introduction of the self-consistent method and the theory of soft foundation dealt with blasting method, this paper calculates some resilient modulus, which are largely in accordance with the data in the experiments. The results justify the practicability of calculating the resilient modulus of the soft foundation with self-consistent method.

Key words: soft foundation; blasting; self-consistent method; resilient modulus

1 引言

随着近几年来我国高速公路建设事业的迅猛发展, 路线进山、过海常遇到了沼泽淤泥、软土等软基问题。软土在我国滨海平原、河口三角洲、湖盆地周围及山涧谷地均有广泛分布。在软土地基上修筑高速公路, 特别是修筑高路堤时, 若对软土不加以处治或处理不当, 往往会导致路堤失稳或过量沉降, 造成公路不能正常使用。我国软土按其成因可分为: 滨海沉积、湖泊沉积、河滩沉积和谷地沉积 4 大类。软土地基指以软土为主, 与粉砂、泥炭等一些其他土层相间组成的地基。软土具有含水量大、孔隙比大、压缩性高、渗透性差、承载力低的工程性质, 呈软塑~流塑。所以这类地基具有抗剪强度低、压缩性大的特征。软土地基的处理是个工程难题, 人类已积累多种方法对软土地基进行处理以加固地基, 如: 砂垫层法、轻质路堤及加筋路堤、浅层处治、竖向排水体、反压护道、预压、粒料桩、加固土桩、强夯等方法。爆炸法处理软土地基是近些年来刚发展的一种处理软土地基的方法。国外

在上世纪 50 年代即发展了水下爆破挤淤的施工工艺。国内在连云港防波堤的建设中曾采用该项技术成功地解决了 6.7 m 长的软土地基处理问题; 并创造性地应用于赣定高速公路沟谷软基加固工程。对软土地基进行处理并计算处理后软土地基的宏观力学性能是当今岩土工程的重要任务之一。在公路设计中, 土基回弹模量的取值直接影响了整个路面结构层的设计, 同时也会给工程造价带来影响。因此, 土基回弹模量合理的设计取值在整个公路设计中是非常重要的。现行常用的取值方法有查表法、现场实测法、室内试验法、换算法等。本文将简要介绍爆炸法处理软土地基的基本原理和自洽方法, 并用自洽方法计算爆炸法处理后的软土地基的回弹模量。

2 自洽方法

自洽方法最早由 Hershey 和 Kroner 提出。Budiansky, Wu, Hill 等学者进一步发展了自洽方法^[1,2], 并得到各种不同的近似方法, 如稀疏解方法、自洽方法、广义自洽方法和 Mori-Tanaka 方法。自

收稿日期: 2005-10-11

作者简介: 舒阳, 男, 1965 年生, 高工, 博士, 主要从事岩土工程和建筑施工技术研究。

治方法强调其它物质点对某一特定物质点的作用可用 1 个平均场来代替, 不计较物质点之间的相互作用, 其结果是形成场方程迭代式。当相邻两次迭代的场量变比在给定的精度范围内, 则说引起场的源与场是自治的。自治理论常被用来研究复合材料的弹性常数。研究中, 复合材料常被简化为均质的连续介质。

本文将介绍自洽方法的 KBW(Kroner-Budiansky-Wu) 模型。设材料由 n 种成分的颗粒分布于基体中而组成, 如图 1 所示, 图中 1, 2, 3, n 表示各种成分的粒子。若已知各成分所占据的空间体积为 $V_i(i=1, 2, \dots, n)$, 其体积分数可表示为 $C_i = V_i/V$, 各成分的剪切模量为 μ_i , 体积模量为 K_i , 泊松比为 ν_i 。基体材料的剪切模量、体积模量和泊松比可分别表示为 μ_0, K_0 和 ν_0 。近似均质化后材料的平均弹性剪切模量、平均体积模量、平均泊松比分别为 $\bar{\mu}, \bar{K}, \bar{\nu}$ 。夹杂材料的本征应变可表示为 $\hat{\epsilon}_{i2}$ 。

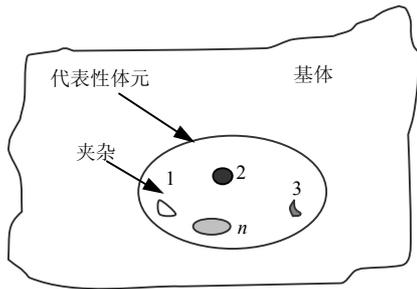


图 1 复合材料组成示意图

Fig.1 Schematics of organization of the composite

作用在材料上的外力产生的应力应变关系^[3]为

$$\sigma_{12} = 2\bar{\mu}\epsilon_{12} \quad (1)$$

夹杂材料内部应力-应变关系为

$$\sigma_{12} + \sigma'_{12} = 2\mu_i(\epsilon_{12} + \epsilon'_{12}) = 2\bar{\mu}(\epsilon_{12} + \epsilon'_{12} - \hat{\epsilon}_{i2}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{12} = 2S_{1212}\hat{\epsilon}_{i2} \quad (3)$$

均质化材料的应力应变的平均值可表示为

$$\bar{\epsilon} = 2\int_V (\epsilon_{12} + \epsilon'_{12}) dx \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \int_V (\sigma_{12} + \sigma'_{12}) dx \quad (5)$$

根据上述公式可得均质化材料的平均剪切模量为

$$\bar{\mu} = \mu_0 + \sum_{i=1}^n \frac{c_i(\mu_i - \mu_0)\bar{\mu}}{\mu + 2S_{1212}(\mu_i - \bar{\mu})} \quad (6)$$

同理, 可推出静水压力下, 均质化材料的平均体积模量的表达式:

$$\bar{K} = K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i(K_i - K_0)\bar{K}}{\bar{K} + \frac{1}{3}S_{llmm}(K_i - \bar{K})} \quad (7)$$

对于球形夹杂, 有如下关系式:

$$S_{1212} = \frac{4 - 5\bar{\nu}}{15(1 - \bar{\nu})} \quad (8)$$

$$S_{ijj} = \frac{1 + \bar{\nu}}{1 - \bar{\nu}} \quad (9)$$

$$\bar{\nu} = \frac{3\bar{K} - 2\bar{\mu}}{2(3\bar{K} + \bar{\mu})} \quad (10)$$

已知基体和夹杂的剪切模量、泊松比和体积模量, 并利用式 (6) ~ (10) 可得均质化材料的剪切模量、泊松比和体积模量。

3 用自洽法计算爆炸处理软基的弹性模量

20 世纪 50 年代, 苏联和欧美一些国家用爆炸法处理公路、铁路等工程的淤泥、软土地基取得了成功。国内对爆破挤淤法进行较系统研究开始于 20 世纪 80 年代, 中国科学院力学研究所和连云港建港指挥部等单位结合连云港防波堤等港口工程基础处理进行攻关, 成功地解决了长 6.7 km 的西大堤防等工程的基础处理, 取得了以水下爆破挤淤填石法为代表的多项技术和理论成果^[4]。近些年来爆炸法也被用来处理陆上软基, 如铁道部科学研究院用爆炸排水法处理软土地基并收到明显成效^[5], 天津大学闫澍旺等把爆炸挤淤法用于陆上软基的处理也取得了成功^[6]。由于爆炸法处理软土地基具有高效率、高质量的特点, 并能收到较大的经济效益, 日益受软基处理工程界的欢迎。

本文介绍新的爆炸处理陆上软土地基的方法——爆炸压入法。该方法区别于传统的爆炸挤淤法和爆炸排水法。爆炸压入法处理软土地基即利用炸药爆炸时产生冲击波和气团脉动的能量把砂、石子等骨料压入到软土地基内部, 爆炸结束后形成了砂、石料和软土的混合物, 以达到加固软土地基, 提高软基的承载能力, 如图 2 所示。

在土的侧限压缩试验中, 竖向变形包括残余变形和弹性变形两部分, 其中残余变形为加载后再卸载为 0, 其变形不能恢复到 0 而永久存在的部分。土力学中, 把卸载过程中载荷与应变的比值叫做回弹模量。回弹模量是表征土力学性能的重要指标。

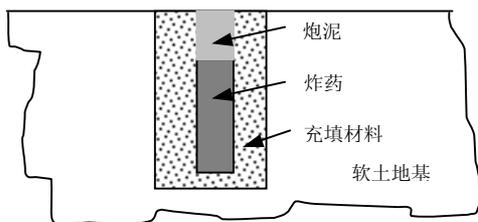


图 2 爆炸处理软土地基示意图

Fig.2 Schematics of the soft foundation dealt with blasting

弹性模量和有侧限回弹模量存在下述关系^[7]:

$$E = \beta E_s \tag{11}$$

式中： E 为弹性模量； E_s 为侧限回弹模量； β 为两者之间的转换系数。

本研究中用河砂加固软土地基，处理后的软土地基主要有软土和河砂组成，其弹性模量分别为 E_0, E_1 ；体积模量分别为 K_0, K_1 ；泊松比为 ν_0, ν_1 。细砂的体积百分含量为 c_1 。根据自洽理论，处理后的软土地基的弹性常数之间关系如下：

$$\bar{E} = E_0 + \frac{c_1(E_1 - E_0)\bar{E}}{\bar{E} + 2S_{1212}(E_1 - \bar{E})} \tag{12}$$

$$\bar{K} = K_0 + \frac{c_1(K_1 - K_0)\bar{K}}{\bar{K} + \frac{1}{3}S_{1111}(K_1 - \bar{K})} \tag{13}$$

利用弹性模量和体积模量间关系式：

$$E = 3(1 - 2\nu)K \tag{14}$$

可计算出处理后软土地基的体积模量、弹性模量和泊松比。

4 工程实例

试验场地位于江苏省连云港市东海县，连徐高速公路路段。试验场区地貌属丘陵山区冲洪淤积谷地，地形较平坦。地层构造如下：

粉质黏土层：褐黄色，潮湿，可塑，土质均匀，本层厚 2~3 m，本层顶面 0.8 m 处可见地下水。

含淤泥质粉质黏土层：暗灰色，软塑，水饱和，中间夹薄层粉土，本层厚 8~10 m。

土层：暗灰色，中砂粒，属泥砂岩强风化产物，密实，饱和。本层在 9~10 m 以下。

试验中分别在地下深 1.9 m 和 5.9 m 处取土进行试验，软土的泊松比分别为 0.2 和 0.22。试验中所用细砂的杨氏模量和泊松比分别为 38 GPa 和 0.25。软基处理后细砂体积百分含量为 10%。根据试验土的力学性能，弹性模量与无侧限回弹模量间的转换系数 β 取 0.75。计算结果和试验结果如表 1 所示。

表 1 爆破处理前后软土地基的弹性常数

Table 1 A contrast of the elastic constants of the soft foundation pre-and post-blasting

土样 编号	取土深度 /m	回弹模量 K_{S1-2} / MPa		
		原样土 试验结果	爆破后土 实验结果	爆破后土 计算结果
I	1.9	5.13	6.87	6.4
II	5.9	7.05	9.65	8.8

由表 1 可见，用爆炸法处理软土地基可提高软土地基的力学性能；用自洽方法计算的软土地基回弹模量值和实验结果较为符合。所以用自洽方法可以较好地估算爆炸处理软土地基的回弹模量。

5 结 语

文中介绍了爆炸法处理软土地基的方法。并基于自洽法得到了处理后软土地基的弹性常数的计算公式。用该公式对爆炸处理软土地基进行计算，计算结果和实验结果符合较好。文中仅对软土地基的弹性性能进行研究，而软土具有复杂的塑性力学特征，所以对其还需进一步进行深入研究。本研究通过研究爆炸处理软土地基的细观结构而得到了软土地基的宏观力学性能，该方法为我们今后对软土地基的研究提供了一个新途径。

参 考 文 献

- [1] Hershey A V. The elasticity of an isotropic aggregate of anisotropic cubic crystals[J]. *J. Appl. Mech.*, 1954, 21(3): 226 - 240.
- [2] Mura T. *Micromechanics of Defects in Solids*[M]. 2nd ed., Leiden: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- [3] 黄克智, 黄永刚. 固体本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [4] 郑哲敏, 杨振声. 爆炸处理水下海淤软基. 郑哲敏文集[M]. [s. l.]: [s. n.], 2004. 605—642.
- [5] 张志毅, 杨年华, 杨兵, 等. 爆炸处理深层软弱地基试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2002, 23(4): 34—37. ZHANG Zhi-yi, YANG Nian-hua, YANG Bing, et al. Test and research of blasting in deep soft subgrade[J]. *China Railway Science*, 2002, 26(4): 34—37.
- [6] 崔激, 闫澍旺, 周宏杰, 等. 用爆破挤淤法处理陆上软地基[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 64—69. CUI Wei, YAN Shu-wang, ZHOU Hong-jie, et al. Soft foundation treatment by blasting toe-shooting method[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 64—69.
- [7] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.