

河南省科技厅鉴定项目：

基于流变理论对应力解除法 纠偏建筑物的数值模拟

鉴定材料

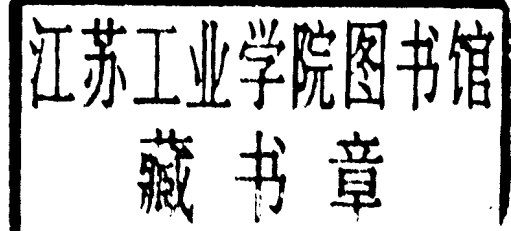
南阳理工学院

2003 年 6 月 10 日

河南省科技厅鉴定项目:

基于流变理论对应力解除法纠偏建筑物
的数值模拟

鉴定材料



南阳理工学院

2003年6月10日

基于流变理论对应力解除法纠偏建筑物的数值模拟

鉴定材料目录

一、 开题报告

二、 技术资料

1 引 言

1.1 概述

1.2 土体流变学的发展

1.3 问题的提出

1.4 本文研究的内容及工作意义

2 建筑物纠偏技术概述

2.1 建筑物倾斜及其危害

2.2 纠偏方法概述与评价

2.3 地基应力解除法纠偏

3 土体的流变理论

3.1 土的流变性质

3.2 土的流变模型及本构方程

3.3 土的线性流变和非线性流变问题

3.4 非线性弹-粘性模型

4 软土流变试验

4.1 软土的室内流变试验概述

4.2 软土蠕变试验原理及方法

4.3 直接剪切蠕变试验

4.4 试验成果及其分析

5 建筑物倾斜扶正的有限元分析

5.1 有限元理法简介

5.2 土体非线性流变有限元分析

5.3 有限元程序

6 基于流变理论的纠偏全过程模拟

6.1 数值分析中的技术处理

6.2 工程实例

7 结论与展望

三、 参考文献

四、 发表的论文

五、 查新报告

项目开题报告

一、项目名称

基于流变理论对地基应力解除法进行建筑物纠偏的数值模拟。

二、土的流变问题和研究现状

1. 土的流变问题的提出

在最早的土力学研究中，土被假定为弹性体，后来逐步发展到把土作为一种弹塑性体来研究。但无论是弹性体，还是弹塑性体，其本构关系都仅仅是应力与应变之间的关系，时间因素是不考虑在内的。工程实践证明，在岩土工程中时间因素是很重要的。如挡土墙的位移随时间的发展，斜坡和边坡随时间的稳定性破坏，地基的长期沉降和倾斜，隧道施工时的地表沉降和变形等这些都说明土不仅具有弹性、塑性，而且还具有一定的粘滞性即流变性，是一种粘弹塑性体。这样在土的本构关系中，就不再仅仅是应力和应变两者之间的关系，而成为应力、应变和时间三者之间的关系。研究土的流变就是研究土中的应力应变状态的形成及其随时间的变化，它是流变学在土力学中的应用，是土力学和流变学的交叉学科，能解决岩土工程中随时间变化的问题，从而保证岩土工程的长期安全。

2. 流变问题的研究现状

土流变研究是 1948 年首先从荷兰的 Geuze 和我国的陈宗基开始的，当时荷兰的 Vlagge 大桥、Zuiderzee 海堤及软土铁路路基因流变而破坏，引起了荷兰科学家的重视，开始了对土流变的系统研究。而后在 1953 年第三届国际土力学和基础工程会议上开始了许多关于土流变问题的报告。此后，各国的学者开始对土流变进行了大量的研究工作并取得了诸多成果，使土的流变研究成为一个新的方向。在以后的各届国际土力学和基础工程会议上，有关土流变的研究报告越来越多。以至于在 1969 年第七届会议上成为综合报告的主要部分。1964 年在法国召开了第一届“土的流变学”讨论会；苏联也在 1966 年、1973 年、1976 年举行了关于土流变的专门讨论会；日本 1976 年在土质工学会内设立了土本构方程研究委员会，委员长是日本流变学专家 村山朔郎；许多国家如荷兰、苏联、葡萄牙、日本等已把土流变列为重点的研究方向。

我国对土流变的研究开展的较早。1959 年陈宗基教授从宏观和微观两个方面提出了粘土的流变本构方程，二次时间效应即片架结构理论。以后土体

流变研究发展很快，武汉岩土力学研究所、河海大学、清华大学、南京水利科学研究所、同济大学等在土流变方面作了许多工作，并取得了相当成果。

为了定性和定量的认识土的流变特性，也为了建立土体流变本构模型及确定模型参数，需要进行流变试验。目前土的流变试验包括宏观和细观两个方面。

土流变本构关系的建立主要从以下两个方面入手：

1. 从土体的流变的微细观表现出发建立流变本构关系
2. 从土体的流变的宏观出发建立流变本构方程

利用现有的流变理论—粘弹塑性理论来建立土流变本构模型是采用一些基本流变元件的组合，来描述土的流变特性，概念明确，被广大学者所采用，但它也有一些诸多的缺点，诸如无法用来描述土的非线性流变等。

经验流变本构关系与流变理论相比，较缺乏理论指导，物理意义不明确，通用性不强，对不同的土要总结出不同的经验本构关系。但它的优点是直观明显，容易直接使用。

在土的流变问题的研究中，时间因素被考虑了进去，致使流变问题的求解比一般的弹塑性问题更加复杂，土的流变问题的解析有解析解和数值解两个方面。解析法的运算比较简单，但仅适用简单的问题和简单的流变模型，而不适用粘塑性和非线性粘弹性问题，加上土的流变问题一般比较复杂，所以解析解有很大的局限性；大多数的流变问题只能通过数值解来解决，随着计算机的发展，土体流变问题的数值解也发展很快。土流变问题的数值解所运用的技术主要有有限元法、边界元法、无限元法等。

土的流变是一个复杂的问题，某些特征目前还认识得不是十分清楚，对土体的流变进行定量的分析比较少，因此有许多方面的工作有待进一步的继续和发展。

目前在土流变的细观方面，无论是试验还是理论的研究都很少，另一方面，在土体非线性流变方面有待作更深入的研究。

三、地基应力解除法

地基应力解除法纠偏是指在倾斜建筑物沉降小的一侧设置密集的钻孔排，在钻孔适当深度掏出适当的软弱地基土，使地基应力在局部范围内得到解除或转移，促使软土向该侧移动，增大该侧的沉降量。与此同时，另一侧的地基土

受到严格保护, 没有扰动, 最终达到纠偏的目标, 并兼收限沉的效果。地基应力解除法的概念最早是由刘祖德教授于 1983 年提出的, 1989 年付之实践, 工程实践已经证明这种纠偏方法是可行的。

土体均具有一定的流变性, 其变形和强度与时间有关。软土的流变特性显著。目前, 在纠偏技术中, 采用的土体本构模型多为邓肯一张或者剑桥模型, 与时间因数无关, 造成了在纠偏技术中无法考虑时间效应, 无法对地基土中应力、地基土工程性质的变化进行定量的认识。在地基应力解除法纠偏设计和施工中不考虑软土的流变特性是不合适的。虽然采用了沉降观测的办法来弥补这一缺陷, 但由于这使得经验因数在纠偏施工中至关重要, 因此很难推广应用。

流变理论能反映应力、应变与时间之间的关系, 将其运用于纠偏技术中, 能较好解决纠偏效果和时间之间的关系, 为下一阶段纠偏提供可靠的设计依据。

四、本项目研究的内容及意义

采用地基应力解除法纠偏基本上时在软土地区进行的, 在地基应力解除法进行建筑物纠偏中不考虑软土的流变特性是不合适的。目前的地基应力解除法纠偏设计和施工中没有考虑土的粘滞性即流变性。在研究前人所做工作的基础上, 本项目拟从土体流变学的角度出发, 对地基应力解除法进行建筑物纠偏的过程进行数值分析和数值模拟, 以期得到一些有益的结论, 来指导工程实际。

本项目的研究内容主要包括四个部分: 拟提出一种非线性弹-粘性本构模型, 将模型运用于软粘土的地基应力解除法纠偏中; 进行土体的室内直接剪切流变试验, 并根据试验结果和本构模型参数的确定方法, 对本构模型中的有关计算参数进行了确定; 在 Biot 固结理论的基础上, 进行考虑土体流变特性的有限元分析; 根据有限单元法的基本原理, 运用 Visual Fortran 语言编制可进行土体非线性弹-粘性分析的有限元程序; 运用非线性弹-粘性有限元程序对地基应力解除法纠偏建筑物的全过程进行数值模拟, 找出纠偏施工过程中地基应力水平场和位移场的变化转移、沉降速率随时间的变化规律及计算范围内地面的沉降量等随时间的变化规律, 指导实际工程中的纠偏实践。

五、时间安排

- | | |
|---------------------|---------------|
| (一) 资料收集等准备工作 | ~2001 年 9 月中旬 |
| (二) 试验 | ~2002 年 3 月中旬 |
| (三) 进行相关的理论推导 | ~2002 年 5 月底 |
| (四) 有限元程序的编制 | ~2002 年 11 月底 |
| (五) 进行计算 | ~2003 年 2 月底 |
| (六) 项目报告的撰写及其它方面的完善 | ~2003 年 3 月底 |

六、参考文献

1. 陈宗基. Structure Mechanics of Clay. 中国科学, 1959, 8 (1): 41~45
2. Dafalias Y.F. On Rate Dependence and Anisotropy in Soil Constitutive Modeling. Paris: Results of the Int. Workshop on Constitutive Relations for Soil, 1982, 79~83
3. 陈冬元. 上海地区饱和软粘土蠕变微观机理及其流变模型与工程计算研究. 上海同济大学, 1993

4. [俄]C.C. 维亚洛夫.土力学的流变原理(杜余培译).科学出版社, 1987
5. 赵维炳, 施健勇.软土固结与流变.河海大学出版社, 1996
6. 孙钧.岩土材料流变及其工程应用.中国建筑工程工业出版社, 1999
7. 孙钧.地下结构有限元分析.同济大学出版社, 1988
8. 范广勤.岩土工程流变力学.煤炭工业出版社, 1992
9. 刘祖德.高等土力学.武汉大学讲义, 1997
10. 雷晓燕.岩土工程数值计算.中国铁道出版社, 1999
11. 雷晓燕.有限元法.中国铁道出版社, 2000
12. 王勖成, 邵敏.有限单元法基本原理和数值方法.清华大学出版社, 1998
13. 刘尔烈.有限单元法及程序设计.天津大学出版社, 1999
14. 土工试验规程(SD128-84).水利电力出版社, 1987
15. 姜弘道.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序.河海大学出版社, 1992
16. 谭浩强, 田淑清.Fortran 语言程序设计.高等教育出版社, 1995
17. 俞帆, 王铁儒.非线性弹性模型的改进.岩土力学, 1993, 14(3): 18.
- 刘祖德, 俞季明.地基应力解除法纠偏处理的基本原理和工程实践效果.第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集, 1991 中国建筑工程工业出版社, 1991
19. 詹美礼, 钱家欢, 陈绪禄.软土流变特性试验及流变模型.岩土工程学报, 1993, 15(3): 54~62
20. 赵维炳, 詹美礼, 顾吉.软粘土粘弹-粘塑性模型及参数确定[A].中国青年学者岩土工程力学及其应用讨论会论文集[C].科学出版社, 1994.104~109
21. 郑榕明, 陆浩亮, 孙钧.软土工程中的非线性流变分析.岩土工程学报, 1996, 18(5): 1~13
22. 郑宏, 葛修润, 谷先荣, 丰定祥.关于岩土工程有限元分析中的若干问题.岩土力学, 1995, 16(3): 7~12
23. 陈晓平, 白世伟.软粘土地基粘弹塑性比奥固结的数值分析.岩土工程学报, 2001, 23(4): 481~484
24. 廖红建, 俞茂宏.粘性土的弹粘塑性本构方程及其应用.岩土工程学报, 1998, 20(3): 41~44
25. 李希元, 陆浩亮.地下工程土体三维非线性流变有限元分析.同济大学学报, 1998, 26(2): 144~148
26. 陈峰, 刘祖德.建筑物纠偏地基应力解除法的有限元分析.土工基础, 2000, 14(3): 4~7
27. 张俊瑞, 张冬梅, 雷美清.某住宅楼深层地基应力解除纠偏及加固.土工基础, 2001, 15(4): 46~48
28. Duncan J.M.and Chang C.Y.Non-linear analysis of stresses and strain in soil, ASCE.Jou.Soil Mech.and Found.Div., 1970, 96(SM5):1629~1653
29. 魏汝龙.软粘土的工程性状.土木工程学报, 1986, 20(4): 98~110
30. Gueze E.C.&Tan Tjong-Kie.The mechanical behavior of clays proc.2nd International congress on rheology,1953
31. Graham,J.,Crooks,J.H.A.,etc.Time effects on the stress-stain behaviour of natural soft clays.Geotechnique.1983,33(3):327~340

1. 引言

1.1 概述

目前,全社会都在大力开展基础设施建设,各种各样的建筑物正拔地而起。与此同时,已经建成的一些建筑物在建成初期或投入使用若干年后,建筑结构出现不同程度的损坏。探寻这些上部结构遭到损坏的原因,有许多是由于基础的不均匀沉降引起。基础的不均匀沉降同时也能造成建筑物整体出现倾斜。当倾斜超过允许限度时,建筑物就无法正常使用,甚至有整体倒塌的危险,给人民的生命财产造成损失。

举世闻名的意大利比萨斜塔(the Leaning Tower of Pisa)是建筑物倾斜的典型实例。工程总共分三期完工,时间跨度近 200 年。1370 年比萨斜塔建造完成。比萨斜塔从建造的初期就出现倾斜情况,至 1991 年,塔北侧沉降量约 90cm,南侧沉降量约 270cm,塔身倾斜约 5.5° ,相当危险。为了防止比萨斜塔的安全,意大利政府于 1990 年成立比萨斜塔委员会,采取了包括理论论证、数值模拟、物理模型试验等一系列的措施,进行纠偏施工。

苏州虎丘塔位于苏州市西北虎丘公园内,距今已有 1000 多年的悠久历史,由于各方面的原因,发生倾斜。至 1980 年 6 月,塔身向东北方向严重倾斜,不仅塔顶偏离中心轴线已达 2.31m,而且底层塔身出现不少裂缝,成为危险建筑。近年来,有关方面采取钻孔注浆和树根桩的方法加固塔基,使塔基的倾斜基本停止,效果良好。

随着房地产市场的发展,由于地基基础等因素造成的建筑物的倾斜事故越来越多,建筑物的倾斜,会造成建筑物功能使用障碍,结构构件损坏,墙体开裂等不同程度的破坏,影响建筑物的正常使用。必须采用合理的纠偏方法,配以正确的施工,将倾斜建筑物“纠偏扶正”。

汉口某住宅楼为六层框架结构,采用天然地基整板基础。1999 年底竣工后即发现向北倾斜,同时,随着其西侧相邻楼房的兴建,又开始向西倾斜,且以每天 1mm 的沉降差速率继续恶化,整体向西北方向倾斜率达 20%,超过国家标准 ($\leq 3\%$) 近 7 倍。采用应力解除法纠偏取得成功。目前,该楼已安全回倾。



该楼外观



纠偏施工前的情况



纠偏施工后的情况

建筑物纠偏技术是在人们对实际工程的具体纠偏实践中发展起来的;包括:顶升纠偏、堆载加压纠偏、浸水纠偏、降水纠偏和地基应力解除法纠偏等。其中地基应力解除法纠偏是指在倾斜建筑物沉降小的一侧设置密集的钻孔排,在钻孔适当深度掏出适当的软弱地基土,使地基应力在局部范围内得到解除或转移,促使软土向该侧移动,增大该侧的沉降量。与此同时,另一侧的地基土受到严格保护,没有扰动,最终达到纠偏的目标,并兼收限沉的效果。地基应力解除法的概念最早是由刘祖德教授于1983年提出的,1989年付之实践,工程实践已经证明这种纠偏方法是可行的。

1.2 土体流变学的发展

1. 土体流变学研究发展概况

流变学是由化学、分子物理、固体力学的边缘学科发展起来的一门新兴学科。1922年Bingham的《流动和塑性》出版,1928年由Bingham建议,1929年成立美国流变学会,被公认为流变学历史的新纪元。随着现代工程技术的发展,流变学在各工程和生产领域中得到广泛的研究和应用。

50年代以前,国内外研究学者很少注意土体的流变现象。后来是由于某些岩土工程因流变问题而引起事故(如坝、桥、建筑物地基基础、海堤、边坡、地下工程围岩变形),而引起了科技界的重视。1948年荷兰Geuze E. C. W. A和我国学者陈宗基首先开始对土体流变学进行系统的科学研究,他们应用实心圆柱样的扭转试验,提出Bingham粘滞塑性流动定律对土体的适用性。而后,在1953年第三届国际土力学和基础工程会议(ICSMFE)上开始有了许多关于土体的流变问题的报告和发言。这次会议在关于土、雪和冰的蠕变问题的综合报告中提出,由于蠕变变形直接或间接的对土力学所有过程起作用,因此蠕变问题的研究将影响土力学将来的发展。此后,各国学者开始对土体的流变问题进行系统的研究,并取得了大量的成果,使土体的流变学研究成为一个新的方向。在以后的第四~十二届国际土力学和基础工程会议上,有关流变的研究报告越来越多,以至在1969年的第七届会议上成为综合报告的主要部分。1964年在法国召开了第一届国际“土的流变学”讨论会,苏联也在1966年、1973年、1976年举行了关于土体的流变的专门讨论会,日本1976年在土质工学会内设立了土体本构方程研究委员会,委员长是日本流变学专家村山朔郎,许多国家如荷兰、苏联、葡萄牙、日本等已把土体的流变学研究列为一个重要的方向。

我国对土体的流变学研究开展得较早。1959年,陈宗基教授从宏观和微观两个方面先后提出粘土的流变本构方程,二次时间效应即片架结构理论。此后,土体的流变研究发展很快,武汉岩土力学研究所、河海大学、清华大学、南京水利科学研究院、同济大学等高校和科研院所都在土体的流变研究方面作了许多工作,并取得了相当的成果。

2. 土体流变试验

为了定性和定量的认识土的流变特性,也为了建立土体流变本构模型和确定模型参数等需要,

必须对土体进行流变试验。目前,土的流变试验包括宏观和微观两方面。

(1). 土体微观流变试验

一般的微观流变试验研究仅限于借助于光学显微镜或电子扫描显微镜观察土体的微观结构,然后通过分析,提出土体流变产生的微细观机理,确定土中导致流变的主要微细观结构形式。目前,土体的微观流变试验的研究比较少。

(2). 土体宏观流变试验

由于土体的微细观流变试验受室内仪器设备和其它各方面条件的限制,因此,很多学者大都采用室内宏观流变试验。通过宏观流变试验中土体所表现出的流变特征,推求其流变方程式。但是,这种试验方法没有很好的解释土体流变的机理。土体的宏观流变试验分为现场试验和室内流变试验。室内试验是在实验室的流变仪上对现场取来的土样,按研究的需要进行流变试验,如三轴或单轴蠕变试验、应力松弛试验等。

3. 土体的流变本构模型的发展

建立土体的流变本构模型在流变研究中是至关重要的。只有建立正确的流变本构关系,即应力、应变和时间三者之间的关系,才能准确的描述土体的流变特性。土体的流变本构关系可以分别从土体的流变的微细观和宏观表现出发来建立,或者把两者结合起来建立本构关系。

(1). 从土体的流变微细观表现出发建立流变本构关系

对于从土体的流变微细观表现出发建立流变本构关系,一般是从土的微观角度来研究的,根据土微观构造的变化机理,运用连续统力学理论,或者,借用金属晶体的微观理论(如位错理论),来建立土体的流变的本构关系。

从微细观结构出发建立的流变本构模型具有深远的意义,它不仅能反映土体的流变宏观特征,还能揭示土体的流变的内部机理,使对土体的流变有更深入的认识。

(2). 从土体的流变宏观表现出发建立流变本构关系

从土体的流变的宏观表现出发建立流变本构关系,主要可分为三个方面,一是从土体的流变特征(从实际工程及室内流变试验中得到)出发,运用现有的流变理论—粘弹塑性理论,建立流变本构模型;二是从土体的流变特性出发,直接总结出土体的经验流变本构关系。

经验流变本构关系缺乏一定的理论指导,物理意义不明确,通用性不强,对不同的土体需要总结出不同的经验本构关系。但它的优点是直观、容易直接使用。

利用现有的流变理论—粘弹塑性理论建立的流变本构模型,是采用一些基本流变元件的组合来描述土体的流变特性,概念明确,被广大学者所采用。但它存在一些缺点,例如无法用来描述土体的非线性流变等。

4. 土体的流变问题解析

在土体的流变研究中,时间因数被考虑进去,因此流变问题的求解比一般的弹塑性问题更加复杂,应力应变关系也更加复杂。土体的流变问题的解有解析解和数值解两方面。

(1). 解析解

解析解的方法是运用对应性原理,积分变换技术。具体的做法是先求得弹性解,然后,进行拉普拉斯变换,其中的弹性常数必须用从粘弹性本构关系经过拉普拉斯变换得到的粘弹性常数代替,从而得到拉普拉斯变换后的粘弹性解,最后通过拉普拉斯逆变换得到最终的粘弹性解。

由于只有一些简单和特殊的函数才能得到拉普拉斯变换的解析解,由于土体的流变问题一般比较复杂,真正能得到解析解的很少,只有那些简单的问题及流变模型,才能通过通过以上方法得到解析解。另外,对应性原理只对线性粘弹性问题有效,而不是用于粘塑性及非线性流变问题,因此解析解有很大的局限性。

(2). 数值解

由于解析解只能解决为数不多的一些简单流变问题,因此,大多数土体的流变问题只能通过数值解解决,随着电子计算机的高速发展,土体的流变问题的数值解发展得也较快。数值解的采用,给数值解给土体流变研究的实际应用带来了生机。数值解采用基本方法主要是时步-粘性初应变法,把粘性应变作为初应变,计算每一时步粘性初应变所引起的粘性附加荷载,加入到该时步的平衡方程中加以修正,并求解,逐步进行,最终得到土体的流变问题的数值解。

至于非线性流变问题,只能应用数值解法,一般是采用时步增量非线性迭代法,对每一个荷载增量,把非线性流变问题简化为线性流变问题进行求解,通过不断的迭代,即用一系列的线性流变来逼近非线性流变,最终得到非线性流变问题的解。

土体的流变问题的数值解所运用的基本技术,主要有有限元法、边界元法、无限元法等。

1.3 问题的提出

土体的流变是一个复杂的问题,目前,在土体流变的理论和应用研究方面,还有许多工作有待进一步继续和开展。

土体的流变特性正是由其内部组构所决定的,然而在土体的流变的微细观研究方面,无论是试验还是理论研究都做得很少,另一方面,在土体的非线性流变方面需要进行深入的研究。

此外,目前在国内外,对于土体流变的研究很多还只是停留在理论研究方面,在实际工程中应用并不多见,因此如何将理论研究的成果成功地运用到具体工程实践中去,显得尤为重要。

在纠偏技术中,所采用的本构模型大多与时间无关,因而在数值模拟过程中,无法考虑时间效应,所以纠偏技术的实施是定性多于定量,实践先于理论。

由于土体的流变理论能比较好的反映土体的应力、应变与时间三者之间的关系,因此,尝试将土体的流变理论运用于具有明显流变特性的软粘土纠偏技术中,能较好的解决纠偏效果和时间之间的关系,为纠偏技术的实施提供可靠的设计依据。

1.4 本项目研究的内容及意义

采用地基应力解除法纠偏基本上时在软土地区进行的,正如前面所提到的,软土具有显著的流变特性,如果在地基应力解除法纠偏设计和施工中不考虑软土的流变特性是不合适的。目前的地基应力解除法纠偏设计和施工中很大程度上把软土看作一种弹塑性材料,没有考虑土的粘滞性即流变性,尤其是土体非线性流变特性,本项目从这个角度出发,在研究前人所做工作的基础上,进行了室内的直接剪切流变试验,采用非线性流变模型—非线性弹粘性模型对地基应力解除法进行建筑物纠偏的过程进行了数值分析和数值模拟,得到一些有价值的成果。

所做的主要工作如下:

- (1) 比较系统阐述了建筑物的纠偏的原理和方法。
- (2) 提出一种非线性弹-粘性本构模型,并将模型成功运用于软粘土的地基应力解除法纠偏中。
- (3) 进行了室内直剪蠕变试验,并根据试验结果和本构模型参数的确定方法,对本构模型中的有关计算参数进行了确定。
- (4) 在Biot固结理论的基础上,进行了考虑土体流变特性的有限元分析。
- (5) 根据有限单元法的基本原理,运用Visual Fortran语言编制了可进行土体非线性弹-粘性分析的有限元程序。
- (6) 运用非线性弹-粘性有限元程序对地基应力解除法纠偏建筑物的全过程进行了数值模拟,并对施工过程中地基应力水平场和位移场的变化转移、沉降速率随时间的变化规律及计算范围内地面的沉降量等进行了分析;结果表明:软土的流变特性对纠偏的影响不可忽略;考虑土体的流变能够较好地指导建筑物的纠偏实践。

2. 建筑物纠偏技术概述

2.1 建筑物倾斜及其危害

1. 软土的基本工程特性

土木建筑工程基础沉降过大或部分土层承载力不足的地基均可称为软弱地基,其中承载力不足要求,压缩性高的土层称为软土层。在我国的东南沿海和某些内陆地区,广泛分布着软土层。

软土一般不宜作为天然地基采用,其主要特征是:

- (1) 塑性指数较大,一般在 10 以上;
- (2) 含有很多细颗粒,有机质含量高;
- (3) 含水量和孔隙比大,重度小。天然含水量在 30%以上,广东有的地区高达 70%以上,甚至超过 100%;
- (4) 孔隙比大于 1.0,天然重度 $\gamma = 15 \sim 19 \text{ kN/m}^3$;
- (5) 强度低,承载力小,且灵敏度高;
- (6) 高压缩性,压缩系数 $\alpha_p = 0.5 \text{ MPa}^{-1}$,基础沉降量大
- (7) 渗透性小,一般在 10^{-7} cm/s 和 10^{-8} cm/s 数量级,沉降速度慢,固结完成需要很长时间;
- (8) 往往具有较显著的流变特性,片架结构软粘土更是如此。

2. 建筑物倾斜原因及其危害

建筑物倾斜事故近年来有增多的趋势,这一方面是由于人们对于不熟悉地区土的微观机理、宏观特性缺乏了解,另一方面是进入 90 年代以来,房地产业的兴起,开发商和承包商在房屋选址上回旋的余地很小,其中也包括承载力低、压缩性高的饱和软土地基上,与此同时,对地质勘察、分析设计、监测、施工等环节又重视不够,从而留下隐患,酿成事故。几年前,武汉市一幢 18 层的建筑物刚刚建成,还未投入使用,就是由于建筑物的倾斜太大,最终不得不炸掉。残酷的事实提醒人们,对于不良场地的地基进行建筑物设计、施工时,一定要慎重、仔细。

分析引起建筑物倾斜的原因,需要从上部结构、地基基础以及外部干扰三个方面来研究,其中地基基础是主要因数。具体来讲是以下几点:

上部结构方面:

- (1) 荷载偏心(设计荷载偏心或实际使用荷载偏心);
- (2) 建筑平面多变,立面高低悬殊,荷载分布不均匀,沉降缝处理不当;
- (3) 施工误差或施工工序不当,加载不均;

地基基础方面:

- (1) 土质变化不均,压缩性差异大,如建筑物跨越不同的地貌单元、压缩层厚度变化、有暗浜

分布、有掩埋老基础块等硬物顶托；

(2) 土质软弱，承载力不足，在荷载作用下不仅产生压缩变形，而且有塑性挤出或长期蠕变变形；

(3) 地基土具有膨胀、湿陷等不良的工程性质，在一定条件下，产生不均匀沉降；

(4) 岩溶、塌陷、滑坡、潜蚀、振动液化等原因引起地基失稳；

外部干扰方面：

(1) 邻近新增建筑物或堆载引起附加沉降；

(2) 邻近基坑开挖或挡土结构破坏，改变原有的平衡状态，引起地基土的侧移；

(3) 附近抽降地下水（如基坑排水、管井抽水等）引起附加沉降；

(4) 邻近施工扰动（如打桩、注浆等）使地基土触变，强度下降，引起附加沉降；

建筑物会因为以上各方面的原因导致产生不均匀沉降，而出现倾斜。当倾斜量超过一定的范围会造成危害。因此必须对建筑物进行纠偏。据统计，当房屋的倾斜率达到 4‰ 时，房屋内的住户便会有居住不适，使用不便的感觉；如果倾斜率达到 7‰，房屋就会有严重损坏的危险。建筑物产生过大的偏心力矩，引起基础一侧的应力剧增，严重时会导致建筑物受力构件破坏甚至整体倾覆。因此，建筑物的容许倾斜值是纠偏控制的重要依据。表 2-1 给出了我国现有的建筑物容许倾斜值的标准。

表 2-1 房屋倾斜控制标准（《建筑地基基础设计规范》GBJ7-89）

结构类型	结构特征及变形控制项目		允许值
砌体承重结构	基础局部倾斜	低压缩性土	0.002
多高层或高层建筑	基础倾斜	高压缩性土	0.003
		$H_g \leq 24\text{m}$	0.004
		$24\text{m} < H_g \leq 60\text{m}$	0.003
		$60\text{m} < H_g \leq 100\text{m}$	0.002
		$H_g > 100\text{m}$	0.0015
单层排架	桥式吊车轨道面的倾斜 (按不调整轨道考虑)		纵向 0.004 横向 0.003
高耸构筑物	基础倾斜	$H_g \leq 20\text{m}$	0.008
		$20\text{m} < H_g \leq 50\text{m}$	0.006

		$100\text{m} < H_g \leq 100\text{m}$	0.005
		$150\text{m} < H_g \leq 150\text{m}$	0.004
		$200\text{m} < H_g \leq 200\text{m}$	0.003
		$150\text{m} < H_g \leq 250\text{m}$	0.002

备注: H_g 为建筑物高度

建筑物产生倾斜后,如果不及时处理会导致上部结构附加应力增加,并可能进一步加大不均匀沉降,这种恶性循环的后果往往是严重的。对待倾斜的建筑物,首先应该按照国家或地方政府颁布的有关规范标准鉴定其危险程度,决定是否进行纠偏以及纠到何种程度,然后再根据实际工程的情况组织相应的人员进行纠偏工作的设计与施工。

2.2 纠偏方法概述与评价

1. 建筑物纠偏的概化模型----木楔模型

造成建筑物倾斜的主要因素是地基的差异性沉降这个主要矛盾,而纠偏是利用建筑物新的差异性沉降来调整建筑物,用以达到新的平衡而矫正建筑物原来存在的倾斜,达到纠偏的目的。

房屋建筑物由于各种原因发生倾斜,要是其“扶正”,归纳下来有以下三种方法:

(1) 顶升法—塞楔。如图 2-1 所示。它是在沉降大的一侧采取加固措施,例如采用静压桩、树根桩等在软侧基底形成复合地基,阻止沉降差进一步扩大,再利用千斤顶等各种方式顶升建筑物基础,在另一侧,由于基底反力加大,加速固结下沉,减小了沉降差,使建筑物“扶正”,可以抽象为在建筑物底板下塞入一个三角形的楔子。

(2) 促沉法—抽楔。如图 2-2 所示。它是采用掏土等措施,使原沉降较小的一侧加速下沉。另一侧虽也有下沉,但沉降差减小,达到纠偏的目的。这就犹如在底板下抽出楔子。另外,有些文献提到的加载法,即在沉降较小的一侧外的附近地表进行堆载加压纠偏也可归入此类。

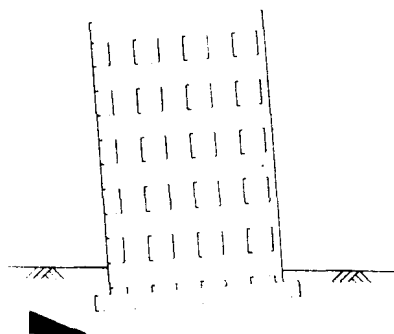


图 2-1 塞楔顶升法

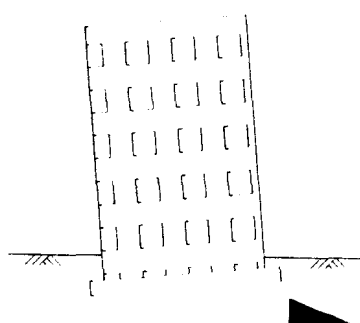


图 2-2 抽楔促沉法

(3) 混合法—在建筑物两侧同时运用以上的两种方法,纠偏效率提高,速度加快的同时成本也会增加,施工场地也未必不受限制。

2. 通常的纠偏方法

一般地, 根据纠偏工程的具体实施方式, 按习惯提法, 有以下几种纠偏方法:

(1). 顶升纠偏

顶升纠偏是在倾斜建筑物基础沉降量大的部位(基础或墙、柱体上)设置若干千斤顶, 将倾斜一侧整体顶升, 通过调整建筑物各部分的顶升量, 使建筑物沿某一点或某一直线做整体平面转动, 恢复其原位。这种方法的关键在于各项升支点顶托变位的同步和协调性。

按纠偏建筑物顶升部位和方法, 顶升纠偏可分为: 基础下部顶升纠偏和基础上部顶升纠偏; 根据纠偏建筑物对象可分为: 在建筑物上预先设置顶升措施的顶升纠偏, 对既有建筑物的顶升纠偏和对既有住宅建筑物的整体顶升纠偏。

1) 基础下部顶升纠偏法

基础下部顶升纠偏是在基础倾斜一侧的基础底部掏土, 设置千斤顶, 将基础顶升复位。本法比较合理, 但要在基础底部挖土, 需要一定场地, 施工费用较高。适用于建造在深、厚软土地基上基础整体性和刚度较好的建筑物纠偏。

2) 基础上部顶升纠偏法

基础上部顶升纠偏法系在基础稳定后, 在地面将倾斜侧轴线柱切断, 顶升复位后, 连接钢筋, 浇筑混凝土。本法施工简单, 方便, 不需开挖土方, 费用低廉, 但要有可靠的支顶系统, 安全度要求高。适用于下部为独立基础, 上部结构整体性和刚度较好的建筑物纠偏。

3) 压桩(顶桩)纠偏

压桩(顶桩, 下同)掏土纠偏法, 是在建筑物沉降较大的一侧用锚杆静压桩先压桩, 并立即将桩与基础锚固在一起, 制止建筑物继续下沉, 然后再沉降量小的基础一侧进行掏土, 减少基础底面下地基土的承压面积, 增大掏土侧地基中的应力, 使地基土达到塑性, 产生变形, 建筑物缓慢而均匀的下沉、回倾。必要时可在掏土一侧再设置少量的保护桩, 以提高回倾后建筑物的永久稳定性, 最后达到纠偏矫正的目的。

这种方法的特点是: 施工机具体积小, 重量轻, 移动方便, 并可在室内和场地狭窄条件下施工; 施工无振动、无噪音、无污染; 纠偏后, 建筑物的沉降和倾斜度能很快趋于稳定, 大大提高了建筑物的安全度, 在纠偏过程中, 居民不需要搬迁, 采用桩阻止建筑物继续下沉, 施工安全可靠。适用于基础刚度好, 强度高, 整体性好的建筑物, 地基土层软弱, 不含孤石、树根以及持力层埋藏较浅的情况。在设计锚杆静压桩前应应对纠偏建筑物地基进行静力触探, 比贯入阻力值 P_s 应小于 8MPa, 同时应查明地层分布情况, 确定桩端持力层的可靠位置。

(2). 堆载加压纠偏