

接触元初始刚度系数对软土深基坑变形的影响分析

刘学增 丁文其

(同济大学地下建筑与工程系 上海 200092)

摘要 用 Goodman 单元模拟土与结构的相互作用, 并结合上海黄浦江行人隧道浦西竖井深基坑工程, 利用有限元方法分析了 Goodman 单元的刚度系数对地下连续墙的位移、墙后的地表沉降的影响, 对软土深基坑的数值计算和信息化施工时接触元刚度系数的选取具有重要意义。

关键词 接触元, 刚度系数, 深基坑, 变形

分类号 O 242 21, TU 433 2

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)01-0118-05

1 前言

有限元数值技术在基坑工程设计与施工分析中已得到越来越广泛的应用, 但如何合理地模拟土体与围护结构之间的相互作用仍然是一个非常棘手的问题。目前一般采用无厚度的 Goodman 单元^[1]或薄层厚度^[2]的接触元来模拟土体与结构的相互作用, 在室内试验^[3~5]的基础上, 其相互作用的本构关系通常用双曲线型方程描述, 但在实际应用过程中, 接触元参数的取值问题给模拟计算结果带来了许多不确定性, 仅仅根据实验室得到的参数又无法反映工程现场的实际情况。本文结合上海地区软土深基坑工程, 在反演分析的基础上, 详细探讨了双曲线型接触元本构关系的初始切向、法向刚度系数对墙体水平位移、墙顶竖向位移及地表沉降的影响, 从而为有限元技术在软土地下工程中的广泛应用提供依据。

2 接触面本构关系

大量的实验室试验^[3~5]表明, 接触元的法向和切向本构关系都服从双曲线型本构关系, 因此在进行模拟计算的过程中, 接触面上的本构关系采用双曲线, 方程如下:

$$\{\sigma\} = [k]\{w\} \quad (1)$$

式中: $\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix}$; $[k] = \begin{Bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{Bmatrix}$; $\{w\} = \begin{Bmatrix} \Delta s \\ \Delta v_j \end{Bmatrix}$;
 τ , σ_n 分别为接触面上的剪应力和法向应力; k_s , k_n

分别为接触面的切向和法向刚度系数; Δs , Δv_j 分别为两片接触面间产生相对的法向位移和切向位移。

法向应力^[4, 5]:

$$\sigma_n = \frac{\Delta v_j}{a - b\Delta v_j} \quad (2)$$

式中: $k_{ni} = \frac{1}{a}$, 为初始法向刚度; $\frac{a}{b} = V_m$, 为法向最大压缩量。

由此可得

$$k_n = k_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m k_{ni} + \sigma_n} \right]^2 \quad (3)$$

切向应力^[3]:

$$\tau = \frac{\Delta s}{m + n\Delta s} \quad (4)$$

式中: k_{si} 为初始切向刚度, $k_{si} = \frac{1}{m}$; $n = \frac{R_f \tau}{\sigma_n \tan \delta}$, R_f , σ 分别为破坏比, 摩擦因数。

由此可得

$$k_s = k_{si} \left(1 - \frac{R_f \tau}{\sigma_n \tan \delta} \right)^2 \quad (5)$$

由上面接触元的法向和切向本构关系, 在计算的过程中, 初始法向刚度和初始切向刚度取为不同的值, 结合工程实例, 分析初始刚度对软土深基坑变形的影响。

3 工程实例

下面结合黄浦江行人隧道浦西竖井深基坑工程分析接触元的初始刚度系数对基坑变形的影响。

1999年8月18日收到初稿, 1999年11月1日收到修改稿。

作者 刘学增 简介: 男, 1973年生, 1995年毕业于山东科技大学采矿工程系, 现在同济大学攻读结构工程博士学位, 主要从事岩土工程数值计算方面的研究工作。

黄浦江行人隧道浦西竖井基坑工程, 平面呈组合矩形如图 1, 尺寸为 86 × 16m, 深 20.43m。

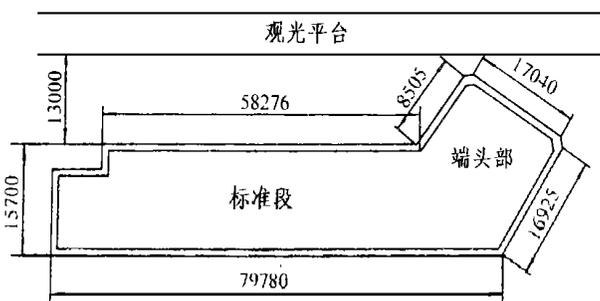


图 1 基坑平面图

Fig 1 The plane of foundation pit

端头井部分深达 24.46m。支撑采用钢支撑与钢筋混凝土支撑相结合的形式: 共设 8 道支撑, 第 1, 3, 5 道为钢支撑, 2, 4, 6 道为 C40 早强混凝土支撑, 第 7, 8 道为双管 609mm 钢支撑; 采用地下连续墙作为围护结构, 共分 9 个开挖步, 采用有限元方法进行动态施工模拟, 土层与地下连续墙的相互作用用接触元模拟, 计算断面在基坑长度方向的中间位置。

综合考虑基坑开挖动态施工过程, 首先采用二维平面应变有限元优化反演方法^[6, 7]进行反演分析。接触元初始切向刚度系数^[3]为 500 kN/m³, 初始法向刚度为 5 × 10⁶ kN/m³; 以第二步开挖结束时墙体实测水平位移作反演计算得到各土层等效弹性模量(如表 1), 利用得到的土层等效弹性模量计算第五步开挖结束时墙体水平位移、竖向位移和地表沉降。

表 1 土层弹性模量的初始值和反演值

Table 1 The initial and back-calculated values of elastic modulus of different soil layers kPa

来源	土层						
	1	2	3	4	5	6	7
初始	19 040	0 18 990	0 12 900	0 20 450	0 49 500	0 174 340	0 118 400
反演	61 859	0 34 951	1 5 196	7 14 278	6 30 779	2 203 360	5 129 506

3.1 接触元切向刚度系数对基坑变形的影响分析

3.1.1 初始切向刚度对墙体最大水平位移的影响

不同初始法向刚度下, 切向刚度与墙体水平位移如图 2, 3。

分析上面不同初始法向刚度情况下初始切向刚度与墙体水平位移(基坑开挖到第五步结束时墙体位移)的关系可知: 接触面单元的初始切向刚度对地下连续墙的水平位移有较大影响, 随初始切向刚度的增大, 墙体的水平位移逐渐减少, 初始切向刚度在 0 ~ 10⁴ kN/m³ 之间变化时对墙体的水平位移影响较

明显; 随初始切向刚度的继续增加墙体位移趋向一极限值; 随初始法向刚度的减小, 极限值有增大的趋势, 但不明显。图 4 则说明, 接触元的两接触面之

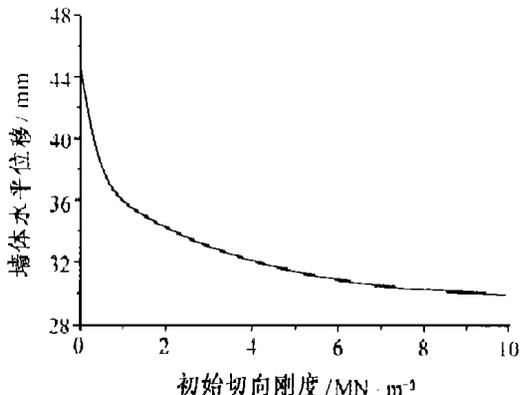


图 2 初始切向刚度与墙体水平位移的关系(1)
($k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$)

Fig 2 Relation of initial tangent stiffness and horizontal displacement of wall with $k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$ (1)

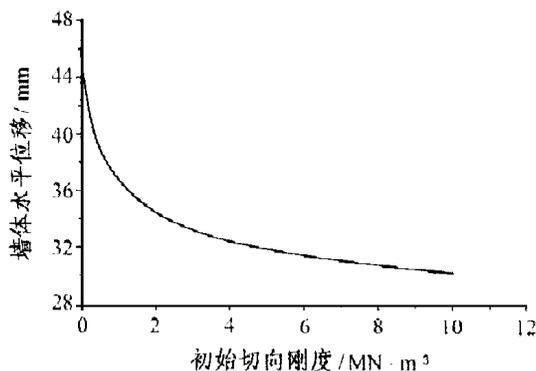


图 3 初始切向刚度与墙体水平位移的关系(2)
($k_{ni} = 5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$)

Fig 3 Relation of initial tangent stiffness and horizontal displacement of wall with $k_{ni} = 5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ (2)

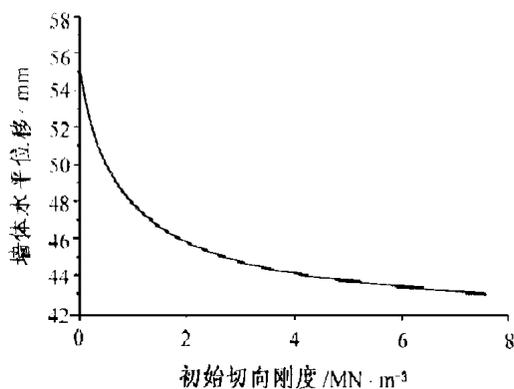


图 4 初始切向刚度与墙体水平位移的关系(3)
($k_{ni} = 5 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$)

Fig 4 Relation of initial tangent stiffness and horizontal displacement of wall with $k_{ni} = 5 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ (3)

间有较大相互嵌入现象, 表现在墙体位移出现突跃 (与前两种情况相比), 主要是由于初始法向刚度较小的缘故, 因此, 在利用接触元进行计算时初始法向刚度系数不能太小。

通过上面 3 种情况的计算发现: 随初始切向刚度的变化, 墙体水平位移最大值发生变化, 但位置不变, 都发生在 17.72 m 处。从而说明初始切向刚度的变化不影响墙体位移的形状, 而只影响墙体位移的大小。

3.1.2 初始切向刚度对墙顶竖向位移的影响

从图 5 可知, 初始切向刚度在 $0 \sim 10^4 \text{ kN/m}^3$ 之间变化时, 对墙顶竖向位移的影响较明显, 随初始切向刚度增大, 墙顶位移趋向一极限值。在不同的初始初始法向刚度下, 墙顶位移与初始切向刚度曲线的变化趋势是相同的, 只是墙顶竖向位移的极限值不同如表 2, 极限值随初始法向刚度的减少而减少。

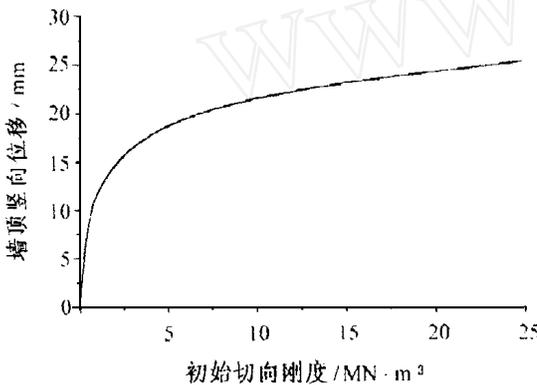


图 5 墙顶位移与初始切向刚度的关系
($k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$)

Fig 5 Relation of initial tangent stiffness and displacement of wall top with $k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$

表 2 不同初始法向刚度情况下墙顶竖向位移极限值

Table 2 The limit value of vertical displacement of wall top under different initial normal stiffness

初始法向刚度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	5×10^6	5×10^5	5×10^4	5×10^3
墙顶竖向位移极限值/mm	27.18	27.08	26.24	24.71

3.1.3 初始切向刚度对地表沉降的影响

在一定初始法向刚度下 ($k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$), 墙后地表沉降随初始切向刚度的增加而逐渐减少, 在 $0 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 之间变化时, 对地表沉降的影响较明显; 随初始切向刚度的增加, 地表沉降将趋向一极限值如表 3 与图 6。不同初始法向刚度情况下, 墙后地表沉降随初始切向刚度的变化曲线相同, 极限值也基本相同。但在不同初始切向刚度作用下,

地表沉降的最大值发生位置随初始切向刚度的增加, 逐渐向远处转移。

表 3 不同初始法向刚度情况下地表沉降极限值

Table 3 The limit values of surface settlement under different initial normal stiffness

初始法向刚度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	5×10^6	5×10^5	5×10^4
地表沉降极限值/mm	-8.028	-7.996	-8.029

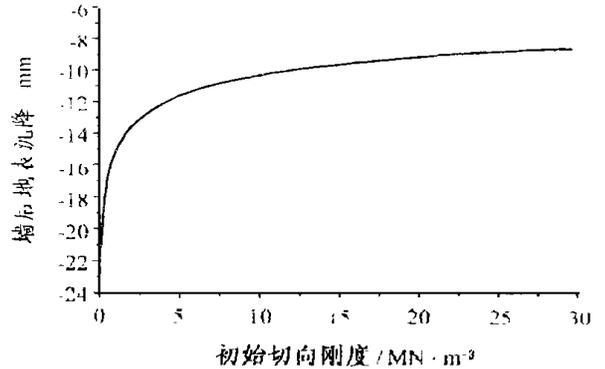


图 6 初始切向刚度与地表沉降的关系
($k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$)

Fig 6 Relation of initial tangent stiffness and surface settlement with $k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$

3.1.4 初始切向刚度与土层等效弹性模量的关系

计算所用土层的弹性模量是以第二步开挖结束时墙体的实测水平位移作优化反演计算得到的等效弹性模量, 在初始法向刚度系数相同的情况下, 采用不同的初始切向刚度系数作反演将得到不同的土层等效弹性模量, 如把初始切向刚度为 500 kN/m 时得到的各土层等效弹性模量看作 1, 然后分别取不同的初始切向刚度系数作反演, 得到各土层的等效弹性模量如表 4, 初始切向刚度与等效弹性模量的关系如图 7。

表 4 不同初始切向刚度情况下土层等效弹性模量

Table 4 Equivalent elastic modulus of soil layers under different initial tangent stiffness

切向刚度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	50	200	500	1000	5000	10000
土层等效弹性模量	1.2	1.12	1	0.93	0.75	0.71

等效弹性模量随初始切向刚度的增加而减少; 在不同的初始法向刚度下, 等效弹性模量随初始切向刚度的变化规律是相同的。因此对上面的曲线作如下回归:

$$E = m E_c [0.70166 + 0.2308e^{(-k_{si}/321.9)} + 0.3091e^{(-k_{si}/2724)}] \quad (6)$$

式中: E , E_c 分别为土层等效弹性模量、地下连续墙的弹性模量; $m = E_0/E_c$, 为初始切向刚度为 500 kN/m 时土层等效弹性模量与地下连续墙弹性模量的比值; k_{si} 为初始切向刚度。

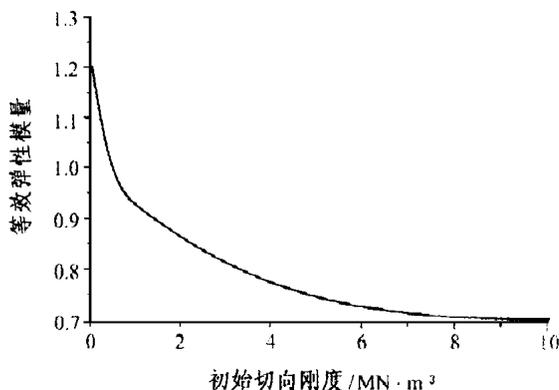


图 7 初始切向刚度与弹性模量的关系
($k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$)

Fig 7 Relation of initial tangent stiffness and elastic modulus with $k_{ni} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^3$

3.2 接触元初始法向刚度系数对基坑变形的影响分析

3.2.1 初始法向刚度对墙体水平变形的影响

墙体水平位移随初始法向刚度的增加而减少, 初始法向刚度在 $0 \sim 2 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 之间变化时对墙体水平位移影响较大, 但是墙体水平位移最大值位置基本相同, 都发生在 15 m 左右, 因此墙体位移变形形状基本不变; 大于 $2 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 时对墙体位移基本没有影响, 因此数值计算时初始法向刚度的取值一般应大于 $2 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$, 如图 8。

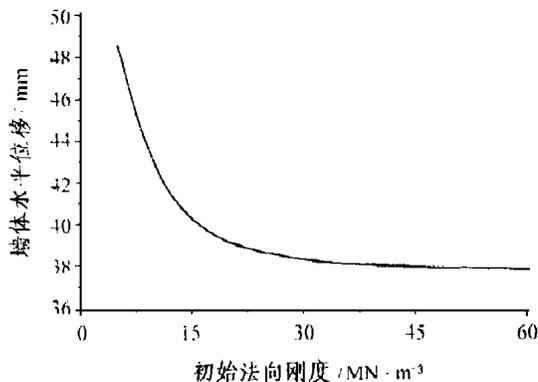


图 8 初始切向刚度与墙体水平位移的关系
($k_{si} = 500 \text{ kN/m}^3$)

Fig 8 Relation of initial tangent stiffness and horizontal displacement of wall with $k_{si} = 500 \text{ kN/m}^3$

3.2.2 法向刚度与地表沉降的关系

由图 9 可知: 地表沉降随初始法向刚度的增加

而增大, 在 $0 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 较明显; 大于 $2.5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 时, 对地表沉降基本没有影响; 地表最大沉降点都发生在墙后 18 m 处, 因此, 初始法向刚度的变化, 并不影响沉降槽的形状。

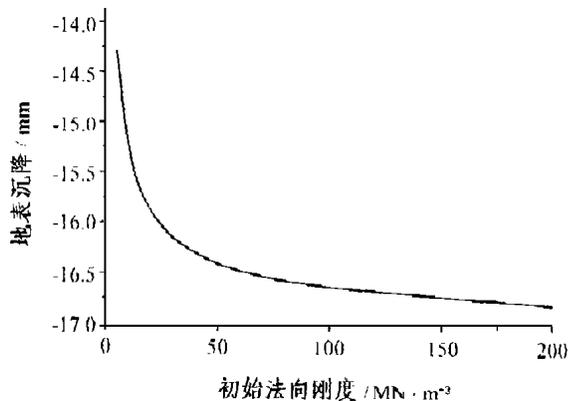


图 9 地表沉降与初始法向刚度的关系 ($k_{si} = 500 \text{ kN/m}^3$)

Fig 9 Relation of initial normal stiffness and surface settlement with $k_{si} = 500 \text{ kN/m}^3$

4 结 论

从上面的计算分析, 并结合具体工程实例, 可得以下主要结论:

(1) 在软土深基坑开挖时, 模拟土体与结构相互作用的接触面单元的初始刚度系数对基坑的变形影响很大。墙体水平位移、地表沉降随初始切向刚度系数的增加而减少; 墙顶竖向位移随初始切向刚度系数的增加而增加; 但是初始切向刚度系数有一个极限值, 大于极限值时, 将对基坑的变形没有影响。

(2) 初始法向刚度系数对墙体的水平位移有明显影响, 对地表沉降有一定影响, 但不如初始切向刚度明显。初始法向刚度系数也有一个极限值, 当刚度系数大于极限值时, 将对墙体位移及地表沉降没有影响。

(3) 土层等效弹性模量随初始切向刚度系数的增加而减少, 并回归得到了等效弹性模量随初始切向刚度系数变化的公式, 对弹性模量的反演分析具有一定的意义。

(4) 计算表明: 初始法向刚度对墙体水平位移的影响大于初始切向刚度。

(5) 本文通过数值模拟的手段分析接触元初始刚度系数对软土深基坑变形的影响, 还需要从理论上进一步分析。

参 考 文 献

1 Goodman R F, Taylor R L, Brekke T L. A model for the

mechanics of jointed rock [J]. Journal Soil Mech & Found Div ASCE, 1968, 94(SM 3): 637~ 660

2 Desai C S, Zaman M M. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical And Analytical Methpos in Geomechanics, 1984, 8: 19~ 43

3 Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal SoilMech & Found Div. ASCE, 1971, 97(SM 12): 1657~ 1674

4 Bandis S C Lum sden A C, Barton N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. Int J. RockMech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1983, 20(6): 249~ 268

5 Barton N R, Bandis S C, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. Int J. RockMech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1985, 22(3): 249~ 268

6 朱合华, 杨林德, 桥本正. 深基坑工程动态施工反演分析与变形预报[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 30~ 35

7 朱合华, 丁文其. 地下结构施工过程的动态仿真模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 538~ 562

INFLUENCE OF INITIAL STIFFNESS OF CONTACT ELEMENT ON DEFORMATION OF DEEP FOUNDATION PIT IN SOFT SOIL

Liu Xuezheng, Ding Wenqi

(Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The Goodman element is used to simulate the interaction between soil and structure. Taking the deep foundation pit of Huangpu river walking tunnel as an example, the influence of stiffness of Goodman element on displacement of wall and surface settlement is analyzed with finite element method. This provides a basis for the choice of stiffness coefficients on numerical calculation of soft soil foundation pit and informationalized construction.

Key words contact element, stiffness coefficient, deep foundation pit, deformation

新书简介

《材料损伤断裂机理与宏微观力学理论》一书由黄克智、肖纪美主编，清华大学出版社 1999 年 12 月出版，16 开本，234 页，36.4 万字，定价 38 元。

该书系国家自然科学基金支持的重大项目(项目批准号为 19392300)，经专家组验收，一致认为本项目取得了一批重要成果，并达到了国际先进水平，具有较大的国际影响。该书系统地整理并集中反映了项目的部分成果，主要包括裂端位错发射和断裂位错理论、脆性材料的微裂纹扩展区损伤模型、变形与损伤的局部化理论、面心立方晶体疲劳损伤的取向和晶界效应、材料与薄膜结构的强韧化力学原理以及环境断裂等内容。

该书供从事力学和材料科学的研究人员、教师及研究生学习参考。

《计算机数学初步》一书由黄纪麟、徐一冰编者，科学出版社 2000 年 1 月出版，16 开本，138 页，21.3 万字，定价 15 元。

计算机数学又称离散数学，它的概念、方法和理论是计算机科学与其它工程技术的基础。该书的主要内容包括数制、矩阵、集合代数、关系、函数、图论、数理逻辑等，并重点介绍数、数据、命题的表示等基本知识，以及数学建模、问题求解的基本方法。

该书主要面向中等专业学校作为计算机系列课程的教材，也可作为广大电脑爱好者学习计算机数学的参考书。

《土壤动力特性·液化势及危害性评价》一书由石兆吉、王兰民著，地震出版社 1999 年 11 月出版，16 开本，120 页，20.2 万字，定价 13 元。

该书分两篇。上篇为黄土，研究随机地震波荷载下黄土的本构关系、震陷、强度等动力特性，以及黄土液化机理和液化势评价。下篇为砂土，研究液化判别可靠性及其综合评价，以及考虑液化土层双重作用的液化危害性评价原理和方法。

该书可供从事地震工程的设计、科研、勘察、施工、管理等工程技术人员及有关大专院校师生参考。