

深基坑锚拉支护体系变形控制设计理论与应用*

Principle and application of deformation control design for retaining structure in deep excavation

张钦喜 孙家乐 刘 柯
(北京工业大学土木系, 北京, 100022)

文 摘 提出了深基坑锚拉支护体系变形控制设计的概念, 阐述了变形控制设计的基本内容和设计原理, 并运用工程控制理论对变形控制设计这一过程给出了统一的数学表达形式, 从而使变形控制设计与工程控制最优化有机地结合起来。最后结合工程实例介绍了变形控制设计理论的应用。

关键词 深基坑支护, 变形控制设计, 信息化施工

中图法分类号 TU 413.62

作者简介 张钦喜, 男, 1964年生, 1988年在北京工业大学获岩土工程硕士学位, 现任教于北京工业大学土木系, 副教授, 主要从事地基基础工程教学与科研工作。

Zhang Qinxī Sun Jiālè Liu Kē

Department of Civil Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022

Abstract This paper proposed the concept of deformation control design for retaining structure in deep excavation, and dealt with the basic content and design principle. Based on the theory of engineering control, the formula describing the process of deformation control design has been put forward. At last, the application of deformation control design has been shown by a practical project.

Key words retaining in deep excavation, deformation control design, information construction

1 前 言

传统的深基坑支护结构通常采用强度和稳定性控制的设计方法, 以保证支护结构的安全和稳定为控制目标。随基坑深度的加大及环境条件的复杂化, 对深基坑支护结构设计的要求愈加严格, 特别是对支护结构的变形提出了更高的要求, 迫切需提高支护结构的设计水平, 从维护本工程自身安全稳定的单一目标, 进一步提高到按变形控制设计的新水平。本文结合笔者所做的研究和工程实践, 提出变形控制设计的概念、内容和基本设计原理。

2 变形控制设计的概念

通常认为, 变形控制设计即应对支护结构进行变形验算, 以使变形控制在允许的范围之内。但根据笔者的研究认为, 变形控制设计应包括更广泛的内涵^[1]:

①) 变形控制设计首先应是变形预测分析, 即对支护结构在设计使用条件下的变形规律及趋势作出预测分析。

②) 动态设计是变形控制设计的核心。所谓动态设计即将设计置于时间和空间的动态过程中, 随施工过程中信息的采集与反馈, 对原设计做必要的调整。动态设计的实质是伴随信息的丰富和完备, 不断地进

行更高层次的方案优化过程。

③) 控制目标所涉及的范围除支护系统自身外, 还应包括开挖影响域内的其它有关物体, 如邻近的管线、建筑物等。

④) 变形控制设计是与支护结构服务有效期这一特定域相关联的, 即具有时效性。

综上所述, 深基坑支护体系变形控制设计系指满足自身和环境安全与正常使用限定条件, 与一定域内变形控制目标相适应的支护体系设计, 以及对变形实施控制的技术措施。

3 支护结构变形控制标准

3.1 变形控制指标

支护结构变形控制指标一般包括: ①支护结构主体水平位移及水平位移速率; ②支护结构主体的倾斜; ③支撑构件或锚头位移量及位移速率; ④基坑隆起量与隆起速率; ⑤地表下沉量及下沉速率; ⑥邻近建筑的沉降、倾斜等。

通常以①、⑤、⑥作为重点控制指标。

3.2 变形控制标准

由于工程对象的具体条件不同, 加之资料积累不

* 北京市科干局资助项目 (No. 960409).
到稿日期: 1997-11-07

充分,目前还难以给出具有时域限定的统一标准,需要结合地区经验及具体问题予以确定。下面给出笔者在应用中一般情况下的控制标准(主要参照北京地区经验),供参考。

1)水平位移及水平位移速率

水平位移及水平位移速率的控制标准如表 1。

表 1 水平位移及水平位移速率与安全度的关系

Table 1 Effect of horizontal displacement and horizontal displacement rate on the factor of safety

控制量	安 全 度		
	安全域	警戒域	危险域
水平位移/mm	≤30	30~50	>50
水平位移速率/(mm/d)	≤1	1~5	>5

2)支护结构主体倾斜

对于桩墙合一情况,为满足支护结构兼作主体结构的要求,一般须控制倾斜,要求 $\theta = \delta/H \leq 2‰ \sim 3‰$, 且 $\delta_{\max} \leq 30 \text{ mm}$ 。其中 δ 为桩(墙)顶位移; $\delta_{\max}$ 为桩(墙)身最大位移。

3)邻近建筑变形

邻近建筑变形依据其基础形式、基础埋深、结构类型、建成使用时间、平面布置方式、距坑边的距离等具体条件而定。据笔者经验,对一般民用建筑,当相对倾斜 $\theta \geq 1/150$ 时,会出现结构性破坏,相对倾斜 $\theta \leq 2‰ \sim 3‰$ 则不至于出现结构性破坏。

4 变形控制设计的基本内容

变形控制设计包括变形预测分析、动态设计及变形控制技术 3 个核心内容。

4.1 变形预测分析

变形预测分析是变形控制设计的基础,关键在于选择合理的计算方法和计算模型。另外,计算模型只是一种逼近实际的拟合,而且是主要方面和主要因素的拟合,因此,模型输出的只是一种趋势预测,其真实性和可靠性需通过另一过程——动态设计予以改善和提高,特别是从监测信息中获取更加准确的计算参数。

4.2 动态设计

动态设计是变形控制设计的核心,即将设计置于动态过程中,允许并提倡支护设计在施工、运营过程中进行补充和完善,尤其随监测信息的采集与反馈对原设计作出及时必要的修正,以实现目标的有效控制。

4.3 变形控制技术

变形控制必须通过具体的技术措施予以实现。常用的变形控制技术包括 2 大类,详见文献 [1]。

变形控制设计的基本内容如图 1 所示。

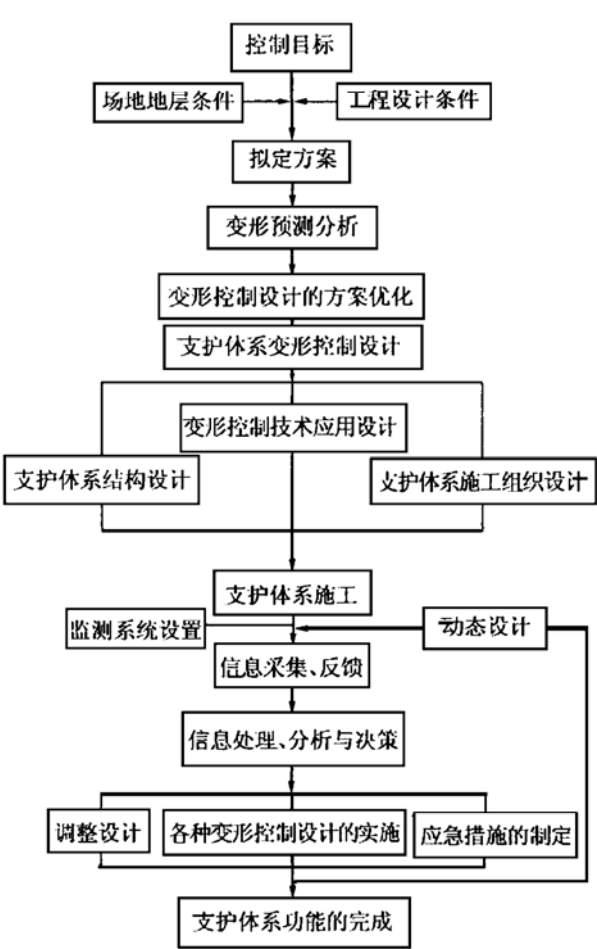


图 1 变形控制设计框图

Fig.1 Scheme of deformation control design

5 变形控制设计的数学表达形式

建立变形控制设计的数学模型,有利于实现变形控制设计的科学化、规范化。为此,作如下定义 [1]:

锚护结构体系: $W = \{ \text{挡土结构, 锚杆及开挖影响域内土体} \}$

设计作用: $Q = \{ \text{开挖轮廓及开挖方式, 开挖面锚护体系设置, 土层加固状态} \}$

环境作用: $J = \{ \text{土体侧压力, 地面荷载, 地下水影响} \}$

系统状态空间: $X = \{ W \text{ 内任意点在离散时刻 } K \text{ 时的物理位置} \}$, 记为:

$$X = \{ X_i(K) \mid i = 1, 2, \dots, n; K = 1, 2, \dots, N \} \quad (1)$$

其中 i 为理论离散点数; K 为施工进度时间。

$$\text{令 } X(K) = \{ X_1(K), X_2(K), \dots, X_n(K) \}^T$$

则状态空间以矩阵表示为

$$X = \{ X(K) \mid K = 1, 2, \dots, N \} \quad (1')$$

系统输入空间: $K = JUQ$

系统输出空间: $Y = \{ W \text{ 内各观测点在离散时刻 } K \text{ 时的物理位置} \}$, 记为

$$Y = \{Y_j(K)\} \quad j=1,2,\dots,m; K=1,2,\dots,N \quad (2)$$

同样可用矩阵表示为

$$Y = \{Y(K)\} \quad K=1,2,\dots,N \quad (2')$$

系统的能量流:各子系统间土体应力、应变场的交流。

物料流:施工出入材料。

信息流:各种观测信息和施工指令。

5.1 系统的状态方程

系统的状态空间 X 由其能量流,即应变能所决定,即

$$\Pi(K) = \frac{1}{2} \int [\sigma(K)]^T \epsilon(K) dV - \int [\delta(K)]^T Q dS - \int [\delta(K)]^T P dV \quad (3)$$

其中 $\sigma(K)$ 和 $\epsilon(K)$ 分别为地层内任意点的应力和应变向量; $\delta(K)$ 为位移向量, $\delta(K) = X(K) - X(K-1)$; P 为单位体积的体积力; Q 为作用的面力,积分取在结构的体积 V 和承载面 S 上。

在这里,方程 (3) 作为一种概念性的表述,在可描述范围内并不存在解析结果。作为近似逼近,可以在空间上将其离散,以表达为某种数值形式。当采用有限元素法时,通过极小化系统的总位能得

$$K(K) \cdot \delta(K) = \Delta F(K) \quad (4)$$

进一步整理得

$$X(K) = X(K-1) + [K(K)]^{-1} \times \Delta F(K) \quad (4')$$

式中 $K(K) = \sum_{j=1}^{N(K)} \int B^T D B dV$, 对应有限元的总刚度; $\Delta F(K) = \sum_{j=1}^{N(K)} \int N^T \Delta P dv + \sum_{j=1}^{N(K)} \int N^T \Delta Q dS$, 对应有限元中的荷载向量; $N(K)$ 为施工进度时刻 K 时除去开挖部分所剩余的土单元数。

令 $G(K) = [K(K)]^{-1}$, 显然, $G(K) \times \Delta F(K) \in K$ 。

其中 $G(K) \in Q$, 扩展为施工 K 时的设计作用, 或称 $G(K)$ 为时刻 K 时的施工方案; $\Delta F(K) \in J$, 扩展为施工 K 时的环境作用。

作为系统的输入, 施工方案 $G(K)$ 反应着施工设计的总体思想。对于一个具体工程, 各施工阶段 K ($K=1,2,\dots,N$) 时的设计作用 $G(K)$ 及 $\Delta F(K)$ 可以用有限元程序模拟, 求解可得在任意时刻 K 时系统的输出。

$$Y(K) = CY(K) \quad (5)$$

CY 为 $M \times N$ 阶矩阵, $Y(K)$ 已在前面作过定义, 这里可具体化为施工进度 K 时各离散点的位移值。这样, 可得到系统的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} Y(K) &= CY(K) \\ X(K) &= X(K-1) + G(K) \times \Delta F(K) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

如果考虑系统的随机性 $\Delta W(K)$, 则系统的一般

方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} Y(K) &= CY(K) \\ X(K) &= X(K-1) + G(K) \times \Delta F(K) + \Delta W(K) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

5.2 变形控制设计的数学模型

在一个工程实施之前, 常可以制定出 1 个以上的设计方案, 从而形成一个可实施的方案序列, 即方案选择集 $\{G^1, G^2, \dots, G^m\}$ 。对每个方案, 对应应有 N 个施工工序, 即形成施工方案 $\{G^i(1), G^i(2), \dots, G^i(N)\}$, $i=1,2,\dots,m$ 。设 $Y^*(K)$ ($K=1,2,\dots,N$) 为系统在时刻 K 时的变形控制目标值, 而 $Y_i(K)$ 是系统在实施设计方案 G^i 后在时刻 K 时的实现值。

设 $\xi = Y^*(K) - Y_i(K)$

定义 $V = \sum_{i=1}^N V(K) = \sum_{i=1}^N \{[\xi_i(K)]^T Q \xi_i(K)\}$ 为系统的目标函数, 其中 Q 为正定加权矩阵, 则变形控制设计的最优化控制问题可表达为

选择方案 $\{G^i(1), G^i(2), \dots, G^i(N)\}$,

使期望 $E(V) = E \left\{ \sum_{K=1}^N [\xi_i(K)]^T Q \xi_i(K) \right\}$ 为最小, 并满足如下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} Y_i(K) &= CY_i(K) \\ X_i(K) &= X_i(K-1) + G_i(K) \times \Delta F_i(K) + \Delta W(K) \\ X_i(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 $i=1,2,\dots,m; K=1,2,\dots,N$ 。

5.3 锚护体系变形控制设计动态最优化过程

在设计阶段, 对变形进行预测分析, 对每种方案 G^i ($i=1,2,\dots,m$), 制定出变形控制策略, 即根据实际系统, 模拟输入 G^i 与 ΔF^i , 得到模拟输出 $Y_i(K)$, 来求解一组局部最优的理论控制策略, 然后根据各方案的变形控制效果, 以及经济效益比较, 确定一种最优设计施工方案及其相应的变形控制策略。这一过程为变形控制设计方案最优化过程。

在确定设计方案 G 后, 进入施工阶段, 给出初步施工方案 $G(K)$ ($K=1,2,\dots,N$)。在施工中经常遇到的情况是, 在时刻 K 时即施工进行到第 K 步工序时, 修正方案 $G(K)$, 也就是说利用 $K-1$ 时刻的系统输出 $Y(K-1)$ 修正 $G(K)$, 使之达到预定的变形控制目标。因此, 变形控制系统的表述可修正为

$$\left. \begin{aligned} V^* &= \text{Min} \{E(V)\} \\ Y_i(K) &= CY_i(K) \\ X_i(K) &= X_i(K-1) + G_i(K) \times \Delta F(K) + \Delta W(K) \\ X_i(0) &= 0 \\ G(K) &= U_k [Y(K-1), G(K)] \end{aligned} \right\}$$

对式 9) 的解答, 就可得到下列变形设计的一个控制方案:

$$\eta = \{u_1, u_2, \dots, u_N\} \quad (10)$$

其中控制方案 η 可具体化为前面提及的设计和施工过程中采用的变形控制技术。上述过程为变形控制设计方案的再优化过程, 即动态设计过程。

在变形控制设计的动态最优化过程中, 可得到一系列阶段性控制策略 $\{u_1, u_2, \dots, u_N\}$, 一系列最优施工方案 $\{G^*(1), G^*(2), \dots, G^*(N)\}$ 。根据以上方案, 在实际施工中, 通过监测可以得到系统目标各阶段的实际观测值 $Y(K)$, 并将其与设定变形控制目标比较:

$$\xi = Y^*(K) - Y(K)$$

则可以得到如下各阶段的实际目标函数值:

$$V(K) = [Y^*(K) - Y(K)]^T Q [Y^*(K) - Y(K)] \quad (11)$$

当 $V(K) > \zeta(K)$, 与设计控制目标产生偏差时, 可根据控制策略 $U_k [Y(K-1)]$ 来进行有目的有方向的调整, 以达到变形控制的目的。

6 工程应用实例

6.1 工程概况

天津天星工程位于天津市中心的大光明桥边, 基坑开挖深度 8.25 m, 基坑东侧 5 m 为单层货运库房 (图 2), 西北角相距 6 m 为一栋 6 层砖混结构住宅楼, 南侧不足 50 m 为海河。基础工程施工期间必须保证住宅楼及库房的正常使用, 对变形要求严格。场地工程地质条件较差, 土层主要为海相饱和软土, $c = 15 \text{ kPa}$, $\varphi = 15^\circ$, 地下水埋深 1.5 ~ 2.0 m。

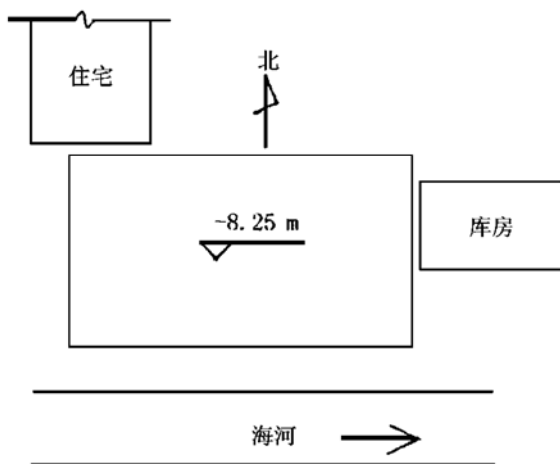


图 2 基坑周围环境图

Fig.2 Sketch of excavation of a project

6.2 支护方案的拟定

根据本工程特点并结合以往的经验, 拟定降水、护

坡方案如下:

① 基坑外 4 m 采用 700 mm 厚隔水帷幕, 坑内设置降水井, 以保证坑外水位不致发生明显变化。

② 基坑侧壁采用 2 种方式支护。紧邻 6 层楼段采用 $\phi 800$ 混凝土灌注桩支护, 桩距 1.4 m。

其它地段采用 SM50b 钢桩支护, 桩距 1.0 m。2 种桩型均在 -3.0 m 及 -6.0 m 左右设置 2 层锚杆。见图 3 所示。

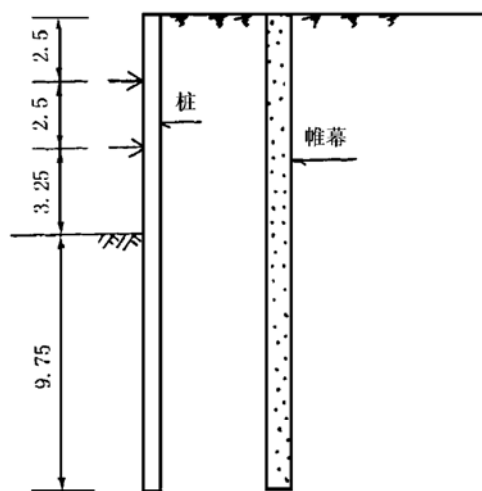


图 3 支护方案示意图

Fig.3 Sketch of retaining structure

6.3 支护方案的优化

上述支护方案拟定后, 根据本工程重点在于控制坑壁变形的要求, 对方案进行了变形预测分析和方案优化, 重点放在锚位不同及锚杆预应力水平不同时的变形情况预测。变形分析采用考虑土体非线性的有限元分析程序, 并模拟实际施工工序。经过分析比较, 将锚位确定在 -2.5 m 及 -5.0 m, 锚杆预应力水平定为 90%, 变形控制目标为 30 mm。

6.4 动态设计与信息施工

根据设计方案, 除沿基坑周围布置水平位移观测点外, 重点在 6 层楼侧及东边库房地侧做了位移及沉降观测, 以便及时调整设计和为采取应急措施提供依据。

在靠近居民楼段开挖至 -3.0 m 施工第 1 道锚杆时, 据监测发现楼在邻坑端有 20 ~ 25 mm 的下沉。据有关资料, 此居民楼为 300 mm 厚筏板基础, 砖混结构, 在软土地基上, 对不均匀沉降和外界扰动十分敏感, 自 1985 年建成以来已因不均匀下沉产生了结构开裂。经全面分析, 为确保其安全, 决定在邻近 6 层楼段进行加固处理, 见图 4。并对原设计方案作出部分修改:

① 将原设计 2 层锚杆改为 3 层锚杆。

② 在桩顶帽梁上设置 3 道斜撑, 距基坑西边分别为 2.0 m, 4.0 m 及 6.0 m。

- 3)在对不均匀沉降和侧移最敏感的部位采用抗滑栅栏做法,即在建筑物转角处加4根 $\phi 800$ 灌注桩,长16 m,间距2 m,在桩顶设置帽梁。
- 4)放慢土方开挖速度。
- 5)注意降水引起的影响和帷幕的隔水效果。

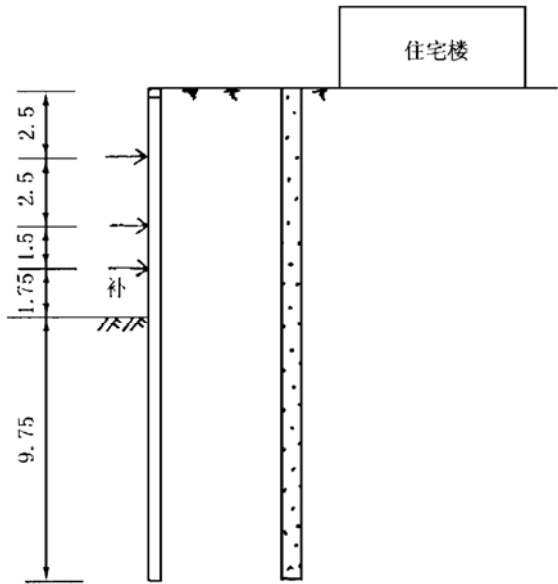


图4 支护方案修正图
Fig.4 Revision of the retaining structure

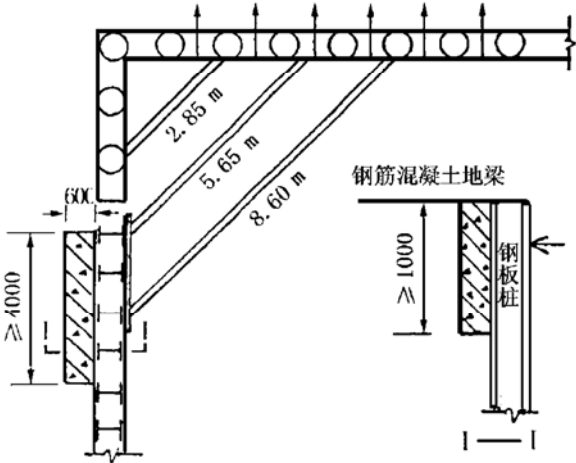


图5 斜撑平面布置图
Fig.5 Plan of the supporting system

由于对施工全程进行监测与信息反馈,随时提供支护体系安全信息及应急处理的建议,并根据反馈的信息,在允许条件下对尚未实施的方案进行补充和修

改,使护坡桩的变形得到有效控制,大部分地段(包括按原设计方案实施的非邻近住宅楼段)的桩顶变形控制在30 mm以内,仅个别测点位移最大值达38 mm,满足了变形控制量的要求,收到满意效果。

图5为本工程(天星工程)与另一未按变形控制设计工程(永基工程)的变形比较,两工程开挖深度、支护方案及土质条件基本相同,而永基工程最大位移为10 cm,邻近马路的人行道旁出现裂缝;天星工程最大位移为3.8 cm,邻近设施正常。可见,通过变形控制设计后,效果是令人满意的。

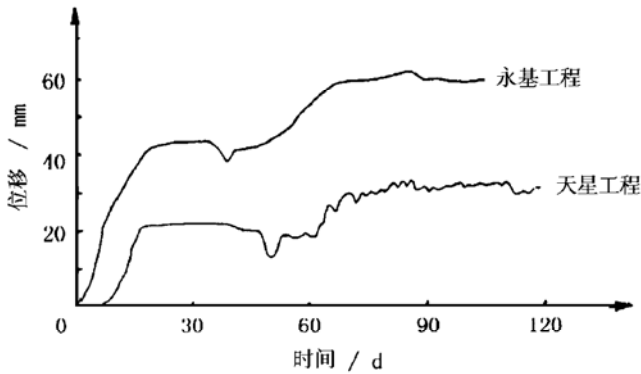


图6 天津永基工程与天星工程变形比较
Fig.6 Comparison of deformation curve of two projects

7 结 语

从强度控制设计到变形控制设计是观念上和理论上的一次飞跃,它深化了支护结构设计的内容,拓展了其设计内涵,提高了设计水平。本文根据笔者的研究与实践,提出了变形控制设计的概念与理论。由于变形控制设计问题的难度与复杂性,真正做好变形控制设计还要做许多艰巨的工作,因此任重而道远。

参 考 文 献

1 孙家乐,张钦喜.深基坑支护结构体系变形控制设计.见:候学渊,杨敏编.软土地基变形控制设计理论和工程实践.上海:同济大学出版社,1996.138~145

2 刘柯.深基坑锚护结构体系变形控制设计方法的研究: [硕士学位论文].北京:北京工业大学土木系,1996