

# 开挖作用对基坑周围地层工程性质的影响\*

刘维宁 张 弥 华 成

(北方交通大学土木建筑学院 北京 100044)

**摘要** 针对基坑工程中地层的应力-应变关系和抗剪强度指标等工程物理特性,由于开挖施工作用而发生不同程度的变化这一现象,提出了开挖作用分区的新概念,并用新的应力路径分类方法来表达这种分区。由此,研究了开挖作用对基坑周围地层的影响规律,为深入研究基坑工程的设计理论和施工稳定性开辟了一条新途径。

**关键词** 基坑工程, 开挖作用, 应力路径

**分类号** TU 457

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)01-0060-05

## 1 前 言

关于基坑工程的施工稳定性研究已有许多<sup>[1, 2]</sup>。但是,对于一些更为深入的设计理论问题,目前尚未完全弄清楚。这不能不是频频发生基坑工程事故的重要原因之一。例如,按现行规程设计的基坑开挖方式和维护结构,其安全度究竟有多大?从设计角度来说,就是计算所采取的计算模型和计算指标的可靠性究竟有多大?除去地层参数取值离散性这个误差因素以外,在施工过程中,基坑周围地层不同区域的力学状态,因开挖作用而发生的差异和变化,可能是造成计算模型及指标误差甚至错误的主要原因。例如,简单地将地层介质按工程性质分类,定义同类工程性质地层的抗剪强度指标一致,并一律取值为未经开挖卸载和变形作用之前的统计值,如此计算的结果往往是,要么过小地估计了基坑边部和基底区域的变形,要么过大地估计了地层对维护结构的压力。因此,对整个工程而言,仅在设计阶段,就包含了相当大的盲目性,这就对基坑的稳定造成隐患。

上述问题,不仅出现在基坑施工的过程中,而是对于所有的地下工程或岩土工程开挖问题,都有类似的现象存在。实际上,开挖作用对其周围地层的力学性质或状态所产生的影响是不应忽视的。虽

然不可能在设计中完全考虑这种影响,但是,对于开挖作用所产生的影响作出正确的估计是非常必要的。如果仅满足于用现在的信息反馈方法来弥补前期的设计不足,是危险的,而且目前所谓的“反馈设计”已令人不安地被作为不重视前期设计过程的一个“科学”的理由。

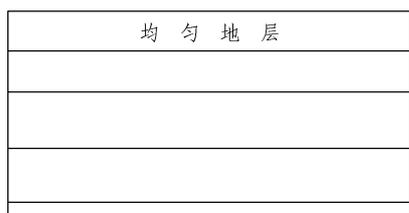
理论上严格地讲,开挖作用对于周围地层的影响,实际上造成了另一种不同于工程性质划分的分区现象(图1),可暂且称这种分区为开挖作用分区。开挖作用分区取决于开挖作用的范围和强度。例如由于开挖卸载,周围地层的有些部分应力松弛,出现回弹变形,而同时另有一些部分产生应力集中,出现压缩或剪切变形,从而改变了部分土体的孔隙密度或岩体的裂隙密度,如此之类,都将影响到地层的“表观”工程性质,而且这种影响随开挖作用强度的不同而不同。如果施工过程中伴随有地下水的流失(这几乎是不可避免的),则开挖对于地层工程性质的影响将更加显著。换句话说,开挖作用分区对于工程设计的可靠性影响可能会超过工程性质分类本身的影响。在这种情况下,如果无视开挖作用对周围地层工程性质的改变,将导致什么结果应在理论上予以澄清。

综上所述,研究开挖作用对周围地层工程性质的影响具有很重要的理论和实践意义。作为这项研究的基础,有两个问题是最为基本的:一个是开挖

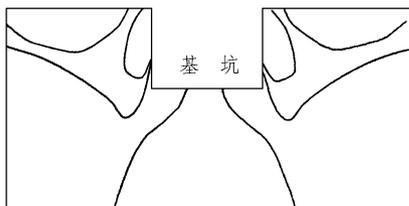
1999年12月15日收到初稿,2000年3月20日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金重点资助项目(59738160)。

作者 刘维宁 简介:男,42岁,1991年于西南交通大学获博士学位,现任北方交通大学教授、博士生导师,主要从事地下工程理论与实践方面的研究和教学工作。



(a) 地层按工程性质分区



(b) 地层按开挖作用分区

图1 工程性质分区与开挖作用分区

Fig.1 Engineering character zone and excavation effect zone in soil stratum

作用影响的特征范围及其随施工进程的变化规律，另一个是开挖作用的强度及其评价指标。

本文认为，本项研究宜分两步走：首先，通过数值模拟，研究开挖作用分区的理论特征和实验方法，然后通过室内及典型现场实验，进一步研究开挖作用分区的规律。本文首先尝试了用应力路径特征及其变化规律来研究基坑开挖过程中，开挖作用分区的理论规律，并以此提出进一步试验的方案。

用开挖时应力路径特征和变化规律来研究开挖作用分区的理论特征，有以下理由：(1) 开挖作用对于周围地层影响的一种直接反映，就是地层中各个点的应力路径在施工过程中发生变化。而这种变化与各个点所代表的地层介质的工程物理性质是直接相关的。(2) 只要将相同应力路径特征的区域识别出来，即可以进一步找出开挖作用分区的特征范围。(3) 如果明确了开挖作用分区的特征范围，即可通过相同特征范围内取样点的物理力学性质实验，发现并评价开挖作用的强弱。

关于土中应力路径的变化与土的工程性质的相关关系研究早在1975年就已受到重视<sup>[3~8]</sup>。目前，对于土的应力路径研究多集中于不同应力路径对砂土和粘性土的应力-应变关系及抗剪强度指标的影响方面，而对于基坑开挖过程中周围地层的应力路径的形式及其演化规律研究，在我国还极少见到。

## 2 基坑中特征应力路径规律的分类

对基坑周围地层的应力路径规律进行研究，分析地层中各点应力状态的演化，采用以有限元法为代表的数值分析方法是一种有效的途径。数值模拟目的是：(1) 找出基坑周围土体的特征应力路径(主要的几种应力路径)；(2) 划分出特征应力路径分区(该区域内所有特征应力路径都相同)从而得到开挖作用分区；(3) 分析开挖作用分区的演化规律。为达到以上目的，在数值模拟的基础之上，建立了一种新的应力路径分类的表示方法，在该方法中，引入一个变量  $f$ ，定义为应力增量比 ( $f = \Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1$ )，利用该变量区分应力路径变化的趋势。再将开挖过程中，应力路径变化的趋势分为若干种类型，并确定每种类型所在的区域，考虑到这些区域在开挖施工过程中的不断演化，就可得出特征应力路径及其对应的开挖作用分区。

### 2.1 应力状态变化趋势划分

设基坑开挖过程分  $n$  步完成， $\sigma_1^n, \sigma_3^n$  分别为基坑周围地层在开挖过程中第  $n$  步时的大主应力和小主应力。

令

$$f = \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \tag{1}$$

式中：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \sigma_1^n - \sigma_1^{n-1} \\ \Delta\sigma_3 &= \sigma_3^n - \sigma_3^{n-1} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

则平面剪应力与平均应力为

$$\begin{aligned} q^n &= \frac{1}{2}(\sigma_1^n - \sigma_3^n) = \frac{1}{2}(\sigma_1^{n-1} - \sigma_3^{n-1}) + \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) = \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_1^{n-1} - \sigma_3^{n-1}) + \frac{1}{2}(1-f)\Delta\sigma_1 = q^{n-1} + \frac{1}{2}(1-f)\Delta\sigma_1 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} p^n &= \frac{1}{2}(\sigma_1^n + \sigma_3^n) = \frac{1}{2}(\sigma_1^{n-1} + \sigma_3^{n-1}) + \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) = \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_1^{n-1} + \sigma_3^{n-1}) + \frac{1}{2}(1+f)\Delta\sigma_1 = p^{n-1} + \frac{1}{2}(1+f)\Delta\sigma_1 \end{aligned} \tag{4}$$

由此得

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \frac{1}{1-f} [(\sigma_1^n - \sigma_3^n) - (\sigma_1^{n-1} - \sigma_3^{n-1})] = \\ &= \frac{1}{1+f} [(\sigma_1^n + \sigma_3^n) - (\sigma_1^{n-1} + \sigma_3^{n-1})] \end{aligned} \tag{5}$$

因此：

$$\begin{aligned} (\sigma_1^n - \sigma_3^n) &= \frac{1-f}{1+f} (\sigma_1^n + \sigma_3^n) - \\ &= \frac{1-f}{1+f} (\sigma_1^{n-1} + \sigma_3^{n-1}) + (\sigma_1^{n-1} - \sigma_3^{n-1}) \end{aligned} \tag{6}$$

所以:

$$q^n = \frac{1}{2}(\sigma_1^n - \sigma_3^n) = \frac{1-f}{2(1+f)}(\sigma_1^n + \sigma_3^n) - \frac{1-f}{2(1+f)}(\sigma_1^{n-1} + \sigma_3^{n-1}) + \frac{1}{2}(\sigma_1^{n-1} - \sigma_3^{n-1}) = \frac{1-f}{1+f} p^n - \frac{1-f}{1+f} p^{n-1} + q^{n-1} \quad (7)$$

令

$$k = \frac{1-f}{1+f} \quad (8)$$

得

$$q^n = kp^n - kp^{n-1} + q^{n-1} \quad (9)$$

上式表示了基坑周围地层在开挖过程  $n$  和  $n-1$  时刻应力状态之间的关系。

由式(9), 根据  $f$  和  $\Delta\sigma_1$  的取值, 将基坑开挖过程中周围地层某点应力路径从  $n-1$  到  $n$  时刻的变化趋势分为以下 4 种情况:

(1) 当  $(f \in [-1, 0), \Delta\sigma_1 > 0) \cup (f \in [0, 1), \Delta\sigma_1 > 0)$  时, 对应:

$$q^n = q^{n-1} + \frac{1}{2}(1-f)\Delta\sigma_1 > q^{n-1}$$

$$p^n = p^{n-1} + \frac{1}{2}(1+f)\Delta\sigma_1 > p^{n-1}$$

(2) 当  $(f \in [1, +\infty), \Delta\sigma_1 < 0) \cup (f \in (-\infty, -1), \Delta\sigma_1 > 0)$  时, 对应:

$$q^n = q^{n-1} + \frac{1}{2}(1-f)\Delta\sigma_1 > q^{n-1}$$

$$p^n = p^{n-1} + \frac{1}{2}(1+f)\Delta\sigma_1 < p^{n-1}$$

(3) 当  $(f \in [0, 1), \Delta\sigma_1 < 0) \cup (f \in [-1, 0), \Delta\sigma_1 < 0)$  时, 对应:

$$q^n = q^{n-1} + \frac{1}{2}(1-f)\Delta\sigma_1 < q^{n-1}$$

$$p^n = p^{n-1} + \frac{1}{2}(1+f)\Delta\sigma_1 < p^{n-1}$$

(4) 当  $(f \in [1, +\infty), \Delta\sigma_1 > 0) \cup (f \in (-\infty, -1), \Delta\sigma_1 < 0)$  时, 对应:

$$q^n = q^{n-1} + \frac{1}{2}(1-f)\Delta\sigma_1 < q^{n-1}$$

$$p^n = p^{n-1} + \frac{1}{2}(1+f)\Delta\sigma_1 > p^{n-1}$$

上述 4 种应力状态变化趋势的分类可用图 2(即从  $n-1$  到  $n$  时刻应力变化趋势分类象限图)来表示。其中:  $\tan\theta = |K|$ 。箭头的指向要根据  $q^n, q^{n-1}$  和  $p^n, p^{n-1}$  之间相互关系确定, 其方向表

示  $n-1$  时刻应力状态向  $n$  时刻应力状态的变化趋势。

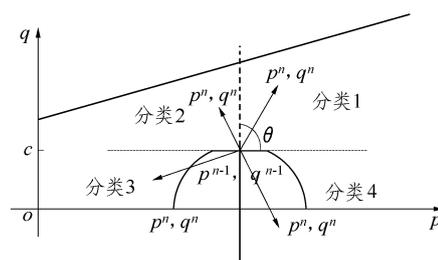


图 2 4 种应力状态的变化趋势

Fig.2 Four characteristic quadrants of stress state in soil stratum

### 2.2 特征应力路径和开挖作用分区

基坑开挖工程是一个动态的过程, 地层中各点的应力状态, 随着开挖的进程, 按上述 4 种趋势进行变化。通过对每一步开挖过程地层中各点的应力状态变化进行跟踪分析, 即可将整个地层内具有相同变化趋势的应力路径进行分类, 可称之为特征应力路径, 如图 3 所示。

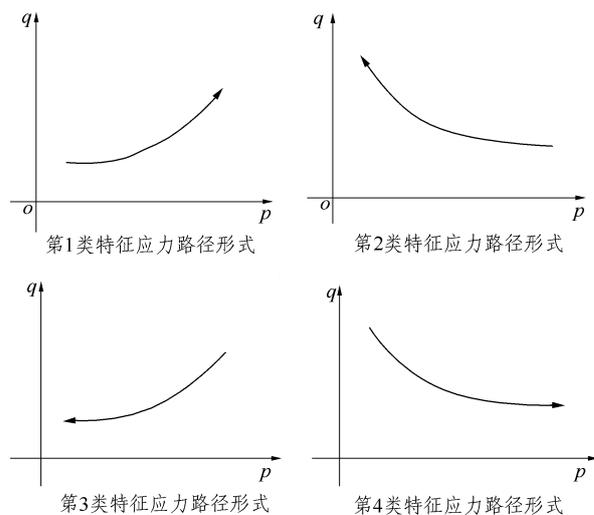


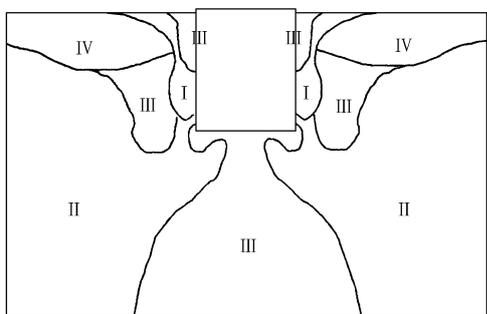
图 3 特征应力路径

Fig.3 Four characteristic stress paths

根据上述应力路径分类, 从开挖第 1 步至第  $n$  步, 将地层中具有相同特征应力路径的区域标记出来, 整个基坑周围的地层就分化为若干应力路径分区。在每个分区内, 各点具有同一种特征应力路径。由此就得到了基坑周围地层的开挖作用分区。

经过十几种不同类型的基坑计算分析, 得到了如图 4 所示的一般开挖作用分区特征。图 5 是其中一个基坑开挖作用分区的数值算例。在计算分析中发现, 图 4 所示的开挖作用分区与计算所采用的本

构模型没有明显的联系,也不随基坑的尺寸和地层条件的变化而发生明显的变化。因此,可以认为,应力路径的分区特征主要是由加载和卸载的方式所决定的。



- I 第1类应力路径, 压缩剪切
- II 第2类应力路径, 剪切
- III 第3类应力路径, 卸载
- IV 第4类应力路径, 压缩

图4 基坑开挖作用分区的一般特征

Fig.4 General properties of effect zone in deep excavations

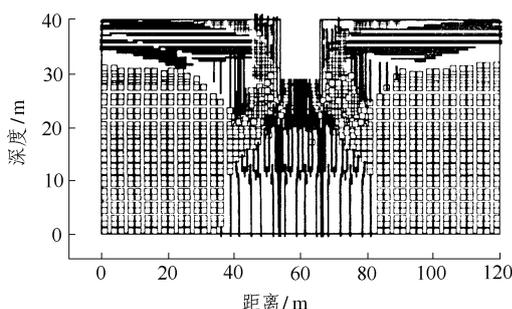


图5 基坑开挖作用分区的数值算例之一

Fig.5 A numerical result of effect zone for a deep excavation

### 2.3 开挖作用分区的分布规律

显而易见,在同一个开挖作用分区内,地层介质大致经历了相同形式的开挖作用。第I类分区内开挖作用主要是“压缩剪切”,主要分布在基坑下侧壁,是剪切破坏的主要区域。第II类分区内开挖作用主要是“剪切”,是地层中分布面积最大的,对基坑变形不发生直接影响。第III类分区内开挖作用主要是“卸载”,分布在基坑上侧壁和坑底,是回弹变形的主要区域。第IV类分区内开挖作用主要是“压缩”,主要分布在基坑地表两侧沉降区范围内。因此,图4所反映的开挖作用分区的一般规律,清楚地解释了基坑开挖过程中,什么部位以剪切变形为主,什么部位以隆起膨胀为主,什么部位以沉降压缩为主。这完全符合在基坑工程的实践中所取得的一般经验。但是图4揭示了各种开挖作用之间的

更深刻的内在规律。

根据图4所反映的开挖作用分区的一般规律,一方面,可以有针对性地研究各分区内特征应力路径与地层工程性质的对应关系,另一方面,可以研究相应的基坑支护及加固措施。本文只讨论第一方面的问题。

以往关于各种不同应力路径,对于砂土和粘性土的应力-应变关系的影响、对于其抗剪强度的影响,已有相当的研究。研究表明:应力路径对砂土和粘性土的应力-应变关系影响显著,对变形模量的影响也是显著的。这就是说,不同的开挖作用分区,即使是同一地层,其应力-应变关系和变形模量可能存在显著差异。需要指出的是,这种差异是由于开挖作用而产生的,而且与原地层的性质密切相关。这种差异的大小与开挖方法的关系还在进一步的研究之中。

以往的研究还表明,应力路径对砂土和粘性土的抗剪强度的影响是有区别的,一般认为,应力路径对抗剪强度指标 $\varphi$ 的影响不大,对抗剪强度指标 $c$ 的影响较大。这一问题十分复杂,它与土层的含水状态密切相关。所以,不同的开挖作用分区,其抗剪强度指标也是不同的,尤其是受到开挖时地下水流失的影响。同样地,开挖作用分区之间,地层抗剪强度指标的变化差异的程度,也在进一步的研究之中。

图4所揭示的开挖作用分区还指出了进一步进行试验研究的方法,作者正在从实验模型的不同分区内取样,比较各分区之间以及各开挖进程中,开挖作用影响的强度及评价。显然,根据这个分区特征,取样的范围是非常明确的。

### 3 结 论

开挖作用对于周围地层工程性质的影响是明显存在的,这实际上造成了另一种不同于工程性质划分的分区现象,作者在此称这种分区为开挖作用分区。开挖作用分区取决于开挖作用的特征范围和强度。在基坑工程中,可分为4类开挖作用分区。这四个分区分别反映了开挖的“压缩剪切”、“剪切”、“卸载”和“压缩”作用。其中,地层的工程性质,包括应力-应变关系和抗剪强度指标,都或多或少地发生了变化。如果施工过程中伴随有地下水的流失,则这种改变将更加显著。因此,如果这种作用超过了原有的工程性质分类对计算模型和计算指标

的影响,在设计过程则不能忽略开挖作用分区的存在。

通过建立新的应力路径特征和变化规律的数值模拟,本文研究了开挖作用分区的理论特征和实验方法,得出了基坑开挖作用分区的基本规律。确定了进一步通过试验,研究开挖作用的强度及其评价指标的方法。

### 参 考 文 献

- 1 曾国熙,潘秋元,胡一峰. 软粘土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(3): 13~22
- 2 曾宪明. 软土基坑边壁(坡)破坏形态与机理有限元分析[J]. 防护工程, 1998, (1): 6~8
- 3 Nagaraj T S, Murthy M K, Sridharan A. Incremental loading device for stress path and strength testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, 4(2): 345~347
- 4 Yudhbir Varadarajan A, Mathur S K. Evaluation of stress-strain modulus of saturated clays[A]. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> Southeast Asian Conference on Soil Engineering[C]. [s. l.]: [s. n.], 1975, 136~140
- 5 Sture S, Desai C S, Janardhanam R. Development of a constitutive law for an artificial soil[J]. Numerical Methods in Geotechnics, 1979, 1: 76~79
- 6 张锦军, 向大润. 不同应力路径下粘土的本构关系验证[J]. 河海大学学报, 1991, 19(6): 23~26
- 7 孙岳崧, 濮家骝, 李广信. 不同应力路径对砂土应力-应变关系的影响[J]. 岩土力学与工程学报, 1987, 9(6): 78~88
- 8 刘国彬, 刘金元, 徐全庆. 基坑开挖引起土体力学特性变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 112~116

## EFFECTS OF EXCAVATION ON ENGINEERING PROPERTIES OF THE SURROUNDING STRATUM

Liu Weining, Zhang Mi, Hua Cheng

(Northern Jiaotong University, Beijing 100044 China)

**Abstract** A new concept of deep excavation for underground structures or foundation of building is set up in order to study the effects of excavation on the surrounding stratum. Many of the deep excavations have proved that the mechanical properties of surrounding stratum, such as relationship of strain and stress, or shear strength of soil, will change in different level at different parts of surrounding stratum, especially when ground water loses during cutting work going on. This will affect the reliability of original design based on the parameters of unexcavated ground. Up to now, how much it will influence the reliability of design due to the property variation of the surrounding stratum is unknown. So a new concept of effect zone of excavation is set up to study the excavation effect on the design. Based on this, the pattern and regulation of the effect zone are studied comparing to the initial ground structure.

**Key words** deep excavation engineering, excavation effect, stress path

### Calendar of Academic Events(Continuing)

#### 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability & the Safety of Infra-Structures

11-12 July 2002, Singapore

Contact: CI-PREMIER PTE LTD, 150 Orchard Road #07-14, Orchard Plaza, Singapore 238841; Tel: (065)332922, Fax: (065)2353530; E-mail: cipremie@singnet.com.sg; Web: <http://www.clpremier.com>

(go to p69)