

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.11.048

# 土体中应力分布基本规律的探讨

华国强

(上海市建设工程管理有限公司, 上海市 200031)

**摘要:** 基于土体的颗粒结构和只有颗粒接触传递应力的特性, 对不同姿态颗粒接触中应力传递的机理分析, 揭示了土体在相对静态下存在主动力的应力扩散效应和强被动力的应力集中效应, 及其形成的土体中应力分布基本规律。主动力的应力场是以其所在土层的应力扩散角  $\theta$  向外扩散的圆锥形应力范围, 在应力场内应力扩散分布, 主应力方向不变, 且伴有与之垂直的法向应力, 应力分布均衡了应力场内颗粒和支承面的位移趋势。强被动力的支承面上存在以  $\theta$  角向外扩散倒锥台形的应力平衡范围, 在此范围内反向应力集中作用到强支承面, 强支承面主导了其所在应力场的应力分布。土拱效应是应力集中效应的衍生效应, 是相邻的同向强支承反力的应力平衡范围发生重叠时产生的现象。

**关键词:** 静摩擦; 应力链; 应力场; 扩散角; 应力扩散效应; 强支承面; 平衡范围; 应力集中效应

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)11-0176-06

## 0 引言

本文是“土拱效应、应力扩散效应、应力集中效应和桩承式路堤”<sup>[1]</sup>一文的续篇, 上文质疑土拱效应中现行的土拱理论, 提出了应力扩散效应是土体中应力分布基本特性的新理念, 重点分析了桩承式路堤中土拱效应的形成, 和推导了简捷实用的桩承式路堤中等沉面高度的计算公式。本文旨在通过土体中颗粒间应力传递的机理分析, 探索土体中应力分布的基本规律。

## 1 土体中的应力分布是由其结构特点决定的

土体是由颗粒堆积而成的颗粒结构, 是土颗粒与孔隙中水和气体三相混合的离散物质。其具有与连续介质固体不同的物理性质和力学特性, 土体中的应力分布就有其鲜明的自身特征。首先, 土的自重不仅能产生竖向自重应力, 还能产生水平向的自重应力; 其次, 地基附加应力在土体中以所在土层的应力扩散角  $\theta$  扩散分布(见图1); 第三, 存在土拱效应现象。

土体受力只是部分土颗粒受力, 只有颗粒接触才有力的关系, 故其应力应变具有局限性。土力学中“只有通过土粒接触点传递粒间应力”是土体中应力分布的基本点, 应力只有通过土粒接触连续传递才能实现应力分布。探索土体中应力分布

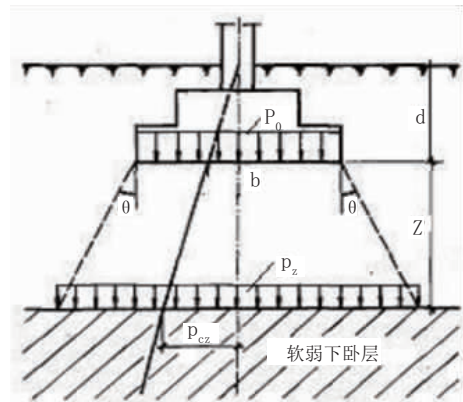


图1 地基附加应力计算示意图

规律就须从基本的颗粒接触及其应力传递的变化入手, 进行微观的机理分析, 不应套用结构力学理论在宏观层面研究土颗粒集合体的受力问题。

颗粒学已成为一门新兴学科, 应用颗粒物质的物理性质与力学特性研究土体中应力分布规律是必然的趋势。本文从土力学范畴对土体中应力分布的内在规律进行初步探讨。

## 2 静态下土体中颗粒接触传递应力的机理分析

地基附加应力扩散分布规律中应力扩散角  $\theta$  起了决定性作用, 其必然存在于土体其他的应力分布中, 其机理也必然与颗粒接触传递应力有关。

(1) 土体常态是一种随遇平衡的静止状态, 土颗粒相对静止时的应力分布是土的静力学问题。若颗粒间相对位移改变了接触点, 则该处土体已受剪切破坏, 静态的应力传递关系也已破坏。

(2) 土体中土颗粒无序堆积, 受力颗粒会有多

收稿日期: 2020-04-14

作者简介: 华国强(1945—), 男, 高级工程师, 从事路桥、土建施工技术管理工作。

个不同方位的颗粒接触点,被动颗粒又会有更多不同方位的接触点,应力就通过不断增加的前方接触点连续向下扩散。

(3)颗粒间的前方接触有三种姿态:其一,极少量的正面接触,直接传递正应力,与主动力在同一条直线上;其二,大量的斜面接触,主动颗粒斜向作用于被动颗粒,主应力发生偏转,既传递转移了正应力,还伴生了与主动力方向垂直的法向应力(见图2)。传递的正应力与主动力同向但不在同一条直线上;其三,更多的是侧面接触,由静摩擦理论,颗粒间摩阻力与剪力的平衡,使相邻颗粒接受了以剪应力形式传递的正应力(见图3)。主动颗粒侧向传递的正应力与主动力同向,但已不在同一条直线上,即正应力也已发生转移。

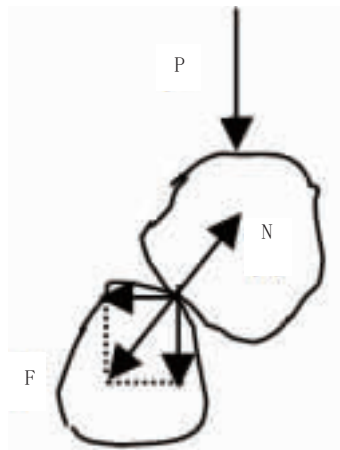


图2 颗粒斜面接触

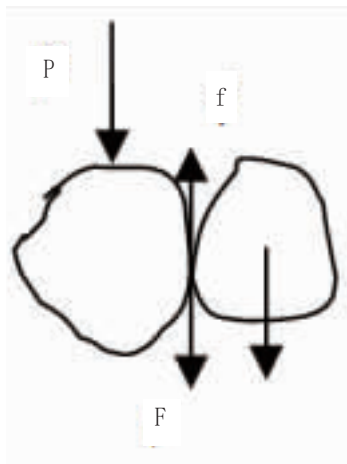


图3 颗粒侧面接触

(4)主动力的应力传递范围即主动力的应力场。外侧颗粒侧向传递正应力扩大了应力场,逐层侧向传递正应力,主动力的应力场就不断扩大。应力场的扩大与地基附加应力的扩散分布规律相互印证,应力场的扩散角就是地基附加应力的扩散角 $\theta$ 。应力扩散角随土层的抗剪强度变化,因此应力场的外围在土层界面处会有波折(见

图4、图5)。

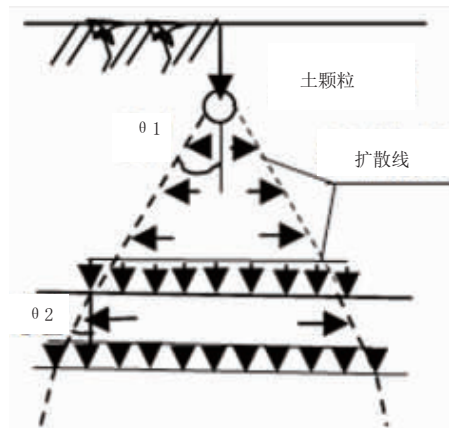


图4 土颗粒自重的应力场

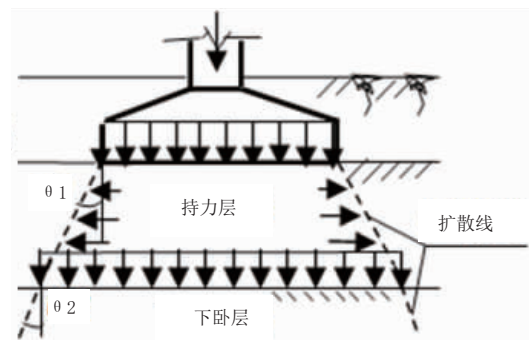


图5 地基附加应力的应力场

(5)静态下,力的作用和位移趋势(如不均匀沉降趋势)都可使颗粒产生运动趋势,成为主动颗粒。主动颗粒通过颗粒接触向被动的平衡颗粒转移应力,接受平衡颗粒传递的平衡,消除了相对位移趋势,维持了主动颗粒的静止状态。

### 3 土体中主动力的应力场和应力扩散效应

由上,土颗粒无序接触传递应力决定了土体内应力扩散的基本特点,外侧颗粒侧面传递正应力,逐层扩大了主动力的应力场。主动力的应力场具有颗粒结构特有的应力扩散效应的基本特征。

(1)颗粒间接触力链即传递应力的应力链,主动力应力场是与其所在土层的应力扩散角 $\theta$ 向外扩散的圆锥形应力链网络,应力场内的土颗粒皆为传递应力的介质,每个粒间接触点都对应对应时的应力状态。

(2)主动力在应力场内扩散分布正应力和法向应力。所以土的自重及外加荷载不仅产生竖向土压力,还产生水平向的侧向土压力。

(3)土体中所有应力场,都与相邻的应力场交叉重叠,并在重叠区内应力迭加共同作用。

(4)在均匀土层中,同一个应力场重叠区内的迭加应力均匀分布,应力在扩散传递过程中弱化,最终与土体的承载力达到自然平衡,该重叠区内

所有颗粒和原始受力颗粒即时得到平衡。

(5)应力场内若存在强支承面,连接此强支承面的应力链上颗粒和原始受力颗粒的对应应力率先得到平衡,其他应力链上对应应力即弱化为零。若此强支承面存在于多个主动力应力场内,则其中对应的应力都会通过应力链在此强支承面上获得平衡,形成主动力应力场内的应力集中现象。

(6)应力自动集中至应力场对应的刚性相对强的支承面,均衡了相关应力场内颗粒的位移趋势,与相邻应力场之间就会存在不同的位移趋势,所以不均匀沉降通常出现在二者的界面上。

(7)应力与平衡都有方向,应力场内正应力与法向应力各自遵循应力转移和平衡规则,所有应力与平衡的转移交换都在即时完成。

### 4 强被动力的应力平衡范围和应力集中效应

主动力应力场中存在应力向强支承面集中转移现象,强支承面改变了应力场中应力的均匀分布。那末,强支承面的影响范围有多大呢?

#### 4.1 桩承式路堤填土初期的荷载转移

监测数据表明,桩承式路堤开始填土就有荷载向桩顶转移,费康的三维模型试验<sup>[2]</sup>也有印证。庄妍等人在“桩承式路堤中的土拱效应产生机理研究”<sup>[3]</sup>一文中,考虑了软土的承载力对土拱效应的影响,提出填土在  $h/s \leq 0.5$  (路堤高度  $h$ 、桩间距  $s$ ) 时,没有土拱效应产生。文中例证,填土高度 1.0 m 内没有土拱效应,即不存在应力转移,但荷载向桩顶的转移实际已发生了。费康和曹卫平等则把桩承式路堤中的土拱效应划分为“完整土拱、完全的土拱效应”和“不完整土拱、不完全土拱效应”<sup>[2,4]</sup>二个阶段,图 6 为文献[4]中“不完整土拱”附图,但文献中缺失半截土拱的成因和具有转移荷载功能的任何说明。

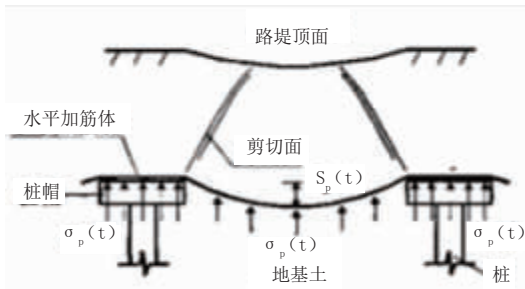


图 6 不完整土拱

#### 4.2 强被动力应力集中的机理分析

图 7 中,孤立的刚性桩顶面上的土颗粒处于平衡状态,而紧挨桩顶的外侧颗粒 A 因坐落在土

层上而有向下位移趋势,其与桩顶外缘颗粒 B 的摩阻力平衡了颗粒间的剪应力。颗粒 B 接受了剪应力并传递到了桩顶,同时将平衡扩大到颗粒 A。桩顶边缘颗粒间的应力、平衡的相互传递,逐层向上向外扩大,桩顶的应力平衡范围就扩大成倒锥台。随填土增高,桩顶平衡范围也逐层扩大,桩顶反力亦愈来愈大。此处桩顶应力平衡范围的扩大与主动力应力场的扩大是同一原理,图 7 中桩顶应力平衡范围边缘线与桩顶反力方向的夹角即为所在土层的应力扩散角  $\theta$ ,桩顶应力平衡范围内所有荷载都集中作用到强被动力的桩顶,不再作用到弱被动力的桩外土体上,这就是强被动力的应力集中效应。强被动力的应力集中效应很容易解释刚开始填土就有荷载向桩顶转移现象。

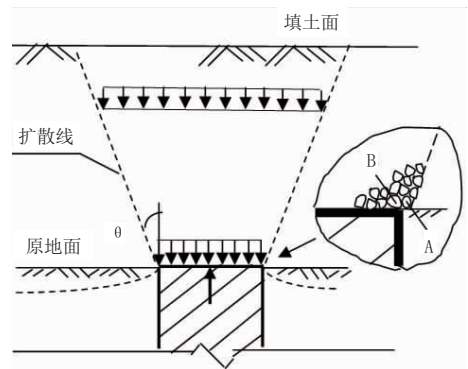


图 7 孤立的刚性桩桩顶的应力平衡范围

土体中相对强的被动力都能产生应力集中效应,如承载桩的桩顶反力,护壁桩、抗滑桩的抗力,坑壁、桩周的静摩擦力等。

#### 4.3 强被动力应力集中效应的基本特征

(1)被动力都有应力平衡范围,其是一个倒锥台形向内收敛的的应力链网络,其应力收敛角与主动力应力场的应力扩散角的本质相同,可并称为应力扩散角  $\theta$ ,区别在于主动力应力场的应力传递是由原始主动颗粒向外扩散,而被动力的应力平衡范围内应力传递是向支承面收敛。

(2)只有在相对强的被动力的应力平衡范围内才会发生应力集中效应。在强被动力的应力平衡范围内,与强被动力对应的全部应力都会向强支承面集中中获得平衡,不再向别处扩散。强被动力的应力集中与主动力应力场的应力扩散一样,都是通过应力链上应力传递实现的。

(3)支承面的位移趋势反映了支承面的强弱,在主动力应力场内,应力集中效应均衡了支承面的位移趋势。强被动力的应力集中效应主导了主动力应力场内的应力分布。



## 5 “土拱效应”是应力集中效应的衍生效应

### 5.1 现行“土拱理论”的假说不成立

#### (1) “土拱理论”假说中的土拱不存在

土拱的假设已有 100 多 a,1943 年 Terzaghi 的“活动门试验”<sup>[6]</sup>和相关论断是现行土拱理论的经典,其证明了土拱效应的存在,但未证明土拱的存在。其推测土拱效应存在的两个条件,并无因果分析和科学论据。“土拱理论”是根据当时已知科学知识的一种假说,基本观点是在土拱效应中存在土拱,通过土拱的承压力学特性把屈服区的土压力转移到拱脚。其前提是结构力学中连续介质的结构拱,但无土体颗粒发生相对位移时产生此类拱体的事实依据。

首先,从未发现任何形态的土拱存在,故此假说从未得到事实检验。其次,该假说缺失必须的逻辑论证,即离散的土颗粒变成具有承压力学特性土拱的可能性。甚至缺失“目前无法实测或用试验手段真实探测到拱体的存在”<sup>[5]</sup>只是技术问题的解释说明。土拱理论中土拱的存在、形成、形态、功能等都是无法验证的想象和推测。

假说中的土拱不存在,所以不具有可检验性。

#### (2) “土拱理论”假说不能全面解释土拱效应

土拱效应的应力转移有全部和部分转移二种,土拱理论中有二种不同假定性解释都当作原理。

土拱效应的经典“粮仓效应”和活动门试验,形成了土拱理论的基本观点:具有承压力学特性的土拱把拱上压力全部转移到了拱脚,拱下不再受压,土拱即应力转移的路径。但此原理无法解释土拱效应中部分应力转移现象,“不完整土拱”的假想,显然有悖于公认的力学原理。

Terzaghi 论断中还把屈服区域的部分土压力向邻近静止区域的转移称之为土拱效应(见图 8),也常被学者当作土拱效应的原始定义直接引用(见图 9)。该定义是在宏观层面假设大块的屈服土体和相邻的大块静止土体之间存在剪应力,把应力转移路径设想在假设的二大块土体之间,此与土拱无关的原理显然不能诠释土压力全部转移现象。

#### (3) “土拱理论”不能解决土拱效应中关键变化点的临界高度问题

土拱效应中部分应力转移变成全部应力转移的界面是关键变化点,是土拱理论无法辨析的。

活动门试验首要的必需条件,是箱内填土必须超过一定高度  $h_0$ ,否则打开活动门,填土就会坍塌(见图 10),此高度就是关键变化点的临界高度。

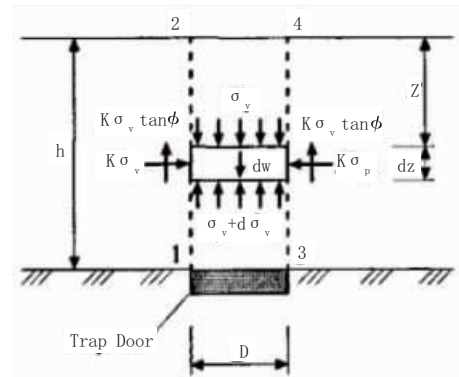


图 8 Terzaghi 的土拱效应计算模型

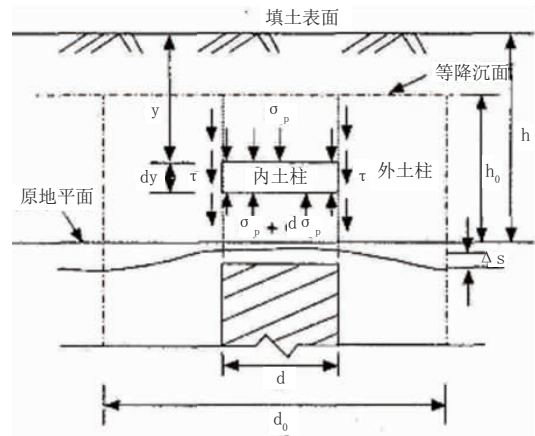


图 9 路堤填土荷载传递模型

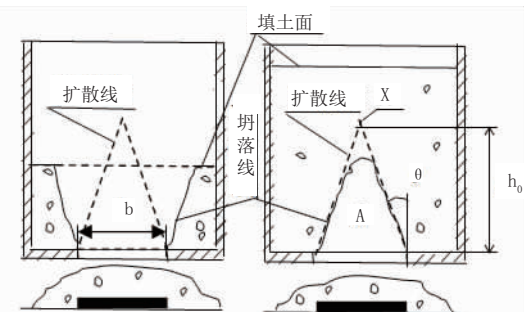


图 10 活动门试验示意图

在 Roberts 发现的“粮仓效应”中,仓内粮食必须超过临界高度  $h_0$ ,仓底压力才不会增加。

桩承式路堤中等沉面高度是设计的重要内容,也是土拱效应的临界高度。按土拱理论此高度是由土拱形态决定的,在土拱效应研究中,只有桩承式路堤(含复合地基)中的土拱形态有充分发掘。国内外学者络绎推衍出众多的土拱模型,有半圆形、半椭圆形、锥形、楔形等,且有单层、双层、多层之分,而各种修正、改良的模型还在层出不穷。虽然随模型出现了更多的计算方法,但都无法验证、无法通用、无法定论。等沉面高度的计算设定范围,竟然宽泛到 1.02 倍桩净距至 3.5 倍桩净距(详见参考文献[1])。

土拱理论中有实体土拱、虚拟土拱及只是概

念的多种说法,但都无法释明土拱效应中的关键变化点,无法提供临界高度明确、通用的计算方法。

### 5.2 “土拱效应”就是应力集中效应的衍生效应

前已阐明,在强被动力的应力平衡范围内,对应的应力会向强支承面集中,在其平衡范围外的应力则不受影响。但当二个以上同方向强被动力的应力平衡范围发生交叉重叠时,在强支承面之间就会出现典型的土拱效应。此时交叉点以上区域就全部在强被动力的应力平衡范围内,该区域对应应力就会全部转移至相近的强支承面。以桩承式路堤为例,图11中,X是桩顶反力应力平衡范围的交叉点,所在平面即为等沉面。其上填土和地面荷载都在桩顶反力的应力平衡范围内,全部集中转移到相近的桩顶上。图11中A的体积不再变化,桩间土也不再增加沉降。在图12中,桩顶填土低于等沉面高度 $h_0$ ,在桩顶反力的应力平衡范围外的荷载就作用在桩间土上。由图可知,随填土增高,桩间土承压增速在减小,填土高度至 $h_0$ ,增速已减至0。所谓桩土应力比、桩土分担比、荷载分担比、应力折减比的变化皆缘于此。

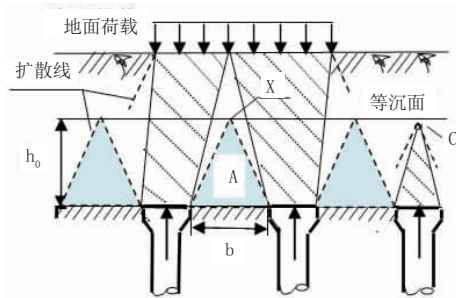


图11 桩承式路堤的土拱效应

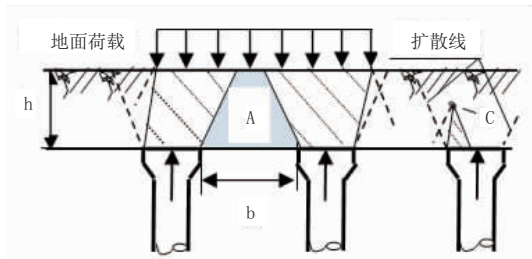


图12 桩承式路堤的土拱效应

同方向强被动力的应力平衡范围发生交叉重叠,是产生土拱效应中应力全部转移的必要条件。以下解析几个有代表性的土拱效应现象。

#### (1)“粮仓效应”中的“土拱效应”

粮仓壁的静摩擦力是强被动力,仓底扩散线与仓壁之间即为其应力平衡范围,范围内粮食重力集中作用到了仓壁。图13(a)中,粮高 $h < h_0$ ,仓壁静摩擦力的应力平衡范围外的粮食重力作用到仓底,粮食增高,仓底压力增速在减小。粮高至 $h_0$

后,仓底扩散线在X点交会,其上的粮食重力全部由仓壁摩擦力承担,仓底压力固定为A区粮食的重力,即出现了Roberts发现的“粮仓效应”。

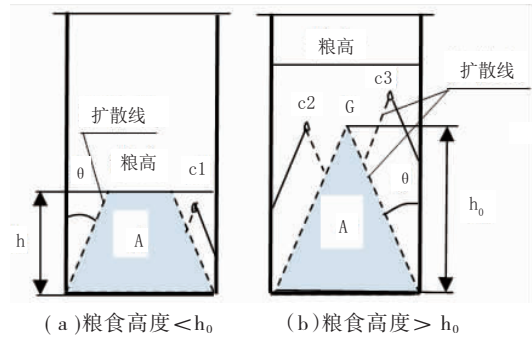


图13 粮仓效应示意图

#### (2)基坑围护工程中的“土拱效应”

如图14所示,桩后扩散线交会于X,X所在立面后侧的土压力就全部集中作用到了桩体上。在桩的反力扩散范围外有一块竖向土体(图中A),虽不受后侧土压力,但仍存在自身的稳定问题。在软土中,桩间需设置一定强度的隔水帷幕,防止A区土体泄漏继而引起地面沉降。

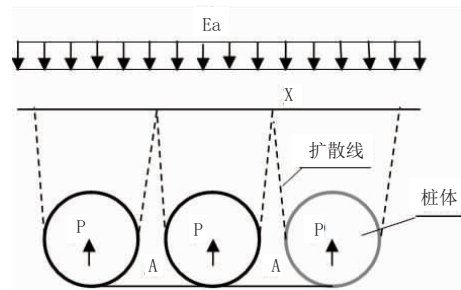


图14 基坑围护桩土压力平衡示意图

#### (3)深埋管的“土拱效应”

地下深埋管上的土压力并非管上覆土的重力,土拱理论的解释是抽象的想象。图15中,管上压力应为A区的土重,管上大部分重力已转移到管道二侧土体上。深埋管常规施工采用软垫层,在管顶所在土层,管顶相对二侧原状土有下沉的趋势,管道二侧土体则呈现为相对强的支承面。深埋管工程须注意勿使管顶成为强支承面。

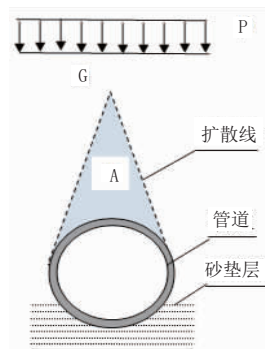


图15 地下埋管上土压力示意图

应力集中效应可以全面合理的解释土拱效应,能提供简捷通用的计算方法,如关键变化点的临界高度。计算中土层的应力扩散角 $\theta$ 是关键参数,在桩承式路堤中尤为重要。应力扩散角 $\theta$ 标志了土体中应力扩散的强弱,其与土的内摩擦角 $\varphi$ 相似,能衬出土体强度,也需通过土工试验获得。

## 6 结 语

(1)土体常态是一种随遇平衡的静止状态,土体在平衡状态下的应力分布是土的静力学问题。

(2)颗粒结构的土体只有通过颗粒接触传递应力。土颗粒无序接触传递应力决定了土体中应力扩散的基本特点;颗粒间侧面接触侧向传递应力,逐层扩大了主动力的应力场范围;颗粒间不同姿态接触形成了土体中应力分布的最基本特性—主动力的应力扩散效应;颗粒接触中主动颗粒向平衡颗粒转移应力,消除位移趋势,维持平衡状态,产生了应力场内应力向强支撑面转移的特性,进而衍生出强被动力的应力集中效应。

(3)主动力的应力扩散效应:主动力的应力场是以所在土层的应力扩散角 $\theta$ 向外扩散的园锥形应力链网络。应力场内扩散分布着正应力及与之垂直的法向应力,所以土层中存在侧向土压力。相邻的应力场交叉重叠,应力相互迭加。同一个应力场重叠区内,迭加应力在均匀土层中均匀分布,在不均匀土层中,应力则会转移到相对强的支撑面,以均衡该重叠区内颗粒的位移趋势。

(4)强被动力的应力集中效应:在强支撑面上以土层 $\theta$ 角扩散的倒锥台形的应力平衡范围内,全部反向应力都向强支撑面集中获得强被动力的平衡,在平衡范围外的应力则不受影响。强被动力的应力集中效应主导了应力场内的应力分布。

(5)当二个以上同方向的应力集中效应发生重叠,强支撑面之间就会出现典型的土拱效应,在应力平衡扩散线交叉点X以上区域就全部在强被动力的应力平衡范围内,该区域对应应力就会全部转移至相近的强支撑面,如粮仓效应、活动门试验和桩承式路堤中等沉面以上的填土等。

(6)主动力的应力扩散效应及其衍生的强被动力的应力集中效应构成了静态下土体中应力分布的基本规律,可以全面解释土拱效应,且计算方法简捷通用。土拱效应是应力集中效应的衍生效应,现行土拱理论是一个不具有可检验性的假说,其不能全面解释土拱效应,也不能解决土拱效应中关键变化的临界高度问题。

(7)应力扩散角 $\theta$ 是土体应力扩散能力的标志,应力扩散角 $\theta$ 在地基附加应力扩散分布规律中早有应用,且已列入相应的设计规范,但其机理及对土体中应力分布的影响未得到进一步研究。应力扩散角 $\theta$ 随土层抗剪强度变化,需通过土工试验分别获得。其与土体粘聚力和颗粒间摩擦力的关系,是否受其他因素影响,还需深入研究。

### 参考文献:

- [1] 华国强.土拱效应、应力扩散效应、应力集中效应和桩承式路堤[J].城市道桥与防洪,2017(5):263-268.
- [2] 费康,王军军,陈毅.桩承式路堤土拱效应的试验和数值研究[J].岩土力学,2011(7):1975-1983.
- [3] 庄妍,崔晓艳,刘汉龙.桩承式路堤中土拱效应产生机理研究[J].岩土工程学报,2013,35(s1):116-123.
- [4] 曹卫平.桩承式路堤土拱效应及基于性能的设计方法研究[D].浙江杭州:浙江大学,2007.
- [5] 贾海莉,王成华,李江洪.关于土拱效应的几个问题[J].西南交通大学学报,2003,38(4):398-402.
- [6] TERZAGHI K.Theoretical soil mechanics[M].New York:John Wiley and Son,1943.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

电话:021-55008118 传真:021-55008850 投稿及联系邮箱:cdq@smedi.com