

建筑机械开挖沟槽的稳定性研究

房明¹, 杨俊杰^{1, 2}, 许国辉^{1, 2}, 丰泽康男³, 堀井宣幸³

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

3. 日本独立行政法人产业安全研究所, 东京 1138656)

摘要: 在建筑机械开挖市政管线的沟槽过程中, 由于槽壁坍塌、挖掘机倾倒, 造成人员伤亡和经济损失的工程事故日益增多。基于模拟挖掘机开挖沟槽的离心模型试验结果, 建立沟槽槽壁许可破坏模式及速度场, 利用极限分析上限法求解开挖深度上限解。根据槽壁破坏特点对开挖深度上限解表达式进行简化, 并利用离心模型试验结果对开挖深度简化式进行了验证。利用沟槽坍塌时滑动土体的宽度表达式得到的挖掘机荷载影响区划分图, 直观地给出挖掘机荷载的影响区和非影响区。当挖掘机荷载作用在非影响区时, 挖掘机荷载对开挖深度不产生影响, 利用开挖深度简化式计算的开挖深度等于无挖掘机荷载时的开挖深度; 当挖掘机荷载作用在影响区时, 挖掘机荷载对开挖深度产生影响, 可利用开挖深度简化式计算开挖深度与无挖掘机荷载时的开挖深度之比。

关键词: 建筑机械荷载; 开挖; 沟槽; 稳定性; 离心模型试验; 上限解

中图分类号: TU62 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)10-1506-11

作者简介: 房明(1981-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为岩土力学与工程。E-mail: paopao8179pao@tom.com。

Stability of trench excavation by construction machinery

FANG Ming¹, YANG Jun-jie^{1, 2}, XU Guo-hui^{1, 2}, TOYOSAWA Y³, HORII N³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Lab of Marine

Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. The National Institute of Industrial Safety, Tokyo 1138656, Japan)

Abstract: There were many accidents in which the workers were killed and buried under collapsed trench when the construction machinery such as a drag shovel fell or toppled over the edge of the trench during excavation. According to the results of centrifuge model tests simulating the process of trench excavation, the failure mode of trench wall and its velocity field were established. Upper-bound solution of the excavation depth could be given by the upper-bound theory. According to the characteristics of failure shape of trench walls, the expression for the upper-bound excavation depth was simplified. The simplified expression for the upper-bound excavation depth was verified by the results of centrifuge model tests. The division of influence area of machinery load was given by the expression width of for sliding soil body, and the influence area and non-influence area were visually represented. When the machinery load acted on the non-influence area, there was no influence on excavation depth, and the excavation depth given by the simplified expression for the upper-bound solution equals to that of without machinery load. When the machinery load acted on the influence area, the excavation depth was affected by machinery load, and the ratio of the excavation depth to that of without machinery load could be given by the simplified expression for the upper-bound solution.

Key words: construction machinery load; excavation; trench; stability; centrifuge model test; upper-bound solution

0 引言

近年来, 随着我国城市基础设施的不断完善与建设、旧城改造和住宅小区的持续开发, 给排水、供热、供气、光缆、电缆及输油等市政管线工程日益增多。与此同时, 随着建筑机械在我国土木建筑工程施工中的不断应用, 在市政管线的沟槽开挖工程中, 挖掘机

的应用越来越普遍。挖掘机在开挖沟槽过程中, 由于沟槽壁坍塌、挖掘机倾倒, 造成人员伤亡和经济损失的事故时有发生(见图1)。

一般来说, 挖掘机等建筑机械通过履带板传递到

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779062)

收稿日期: 2006-09-12

地面的压力(本文称为挖掘机接触压力或简称接触压力)相对开挖岩土体本身的强度很小,所以,挖掘机开挖沟槽过程中的槽壁坍塌问题属于以岩土体自重为主要荷载的稳定性问题。

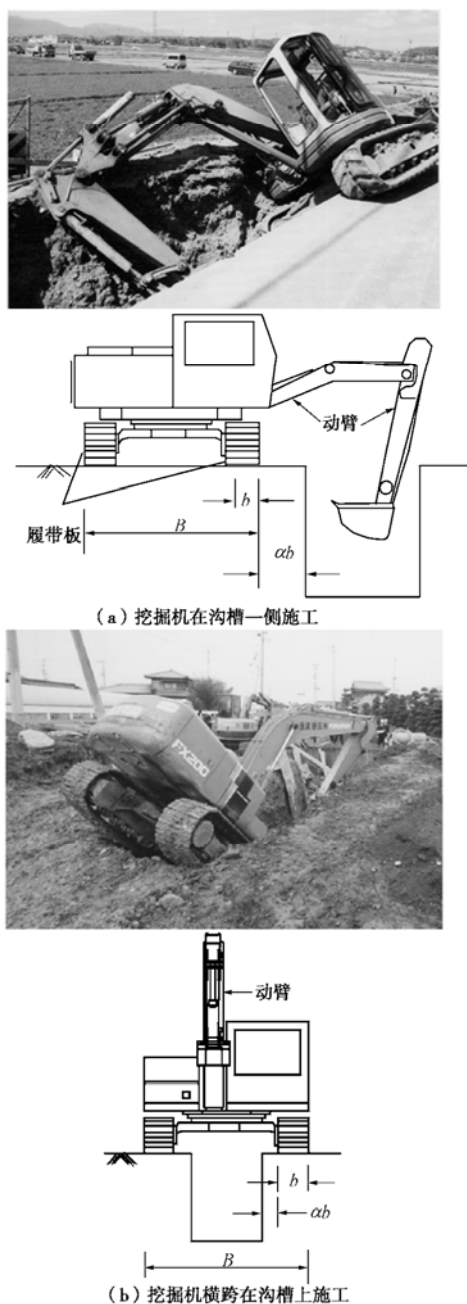


图 1 建筑机械开挖沟槽的开挖方式及倾侧事故照片

Fig. 1 Excavation of trench and trench collapse during excavation

开挖沟槽与开挖基坑、边坡一样,随着开挖的进行,沟槽的形状和深度在不断的变化。形状和深度的变化以及由于卸荷导致岩土体内应力及应变状态的变化均导致岩土体的稳定性不断降低。同时,开挖行为将扰动一定范围内的岩土体,降低了岩土体的强度参数^[1]。如果在地下水位以下施工,开挖还可能使渗流场发生变化^[2]。开挖沟槽过程中的槽壁坍塌问题与开挖过程中的稳定性问题一样,属于动态稳定性问题。

另一方面,使用挖掘机开挖沟槽时,挖掘机在槽边作业,挖掘机将对岩土体产生近距扰动。产生近距扰动的荷载包括挖掘机在槽边工作时的行走、转向、制动产生的动荷载^[3],也包括静荷载,即挖掘机重量以及在开挖过程中,挖掘机动臂循环往复的提升和下降产生的偏心荷载。挖掘机的动荷载不仅作为槽边荷载直接影响槽壁的稳定性,还可导致岩土体疏松^[3],降低岩土强度参数;在饱和土中的施工,挖掘机的动荷载也可能使地基土体的孔隙水应力上升^[4]。

综上所述,研究挖掘机开挖沟槽的稳定性问题,一方面必须考虑开挖行为导致①沟槽形状和深度以及岩土体内应力及应变状态的不断变化,及②岩土强度参数降低,即岩土体自重占支配地位的开挖(动态)稳定性问题,另一方面必须考虑③挖掘机动荷载导致一定范围岩土强度参数的降低,及④挖掘机动荷载和静荷载对沟槽壁稳定性的影响问题。

在离心场中模拟开挖的模型试验结果,是上述 4 点同时作用产生的结果。

有关挖掘机静荷载对槽壁稳定性的影响问题,在《建筑工程预防坍塌事故若干规定》^[5]中规定,各类施工机械距基坑(槽)、边坡和基础桩孔边的距离不得小于 1.5 m。挖掘机挖土往往在槽边作业,很难满足这一要求。挖掘机开挖沟槽的方式通常有两种(图 1(a)、(b))。图 1(a)是挖掘机在沟槽一侧作业的情况,在开挖过程中随着开挖深度的增大,受挖掘机动臂长度的限制很难保证挖掘机与槽壁的距离大于 1.5 m,并且大于 1.5 m 的距离限制了挖掘机操作人员的视角。图 1(b)是挖掘机横跨在沟槽上方的施工方法。两条履带板之间的净间距以 1.8 m 居多(参看图 2, 3),如果沟槽宽度为 0.8 m,则履带板距槽壁的距离为 0.5 m,同样这种施工方法也很难满足距离槽边 1.5 m 的规定。《给水排水管道工程施工及验收规范》^[6](GB 50268—97)规定在软土沟槽坡顶不宜设置静载或动载;需要设置时,应对土的承载力和边坡的稳定性进行验算。但是没有明确如何进行验算。

《建筑边坡工程技术规范》^[7](GB50330—2002)和《现场施工安全防护管理规则》中仅对在槽、坑、沟边堆载对边坡稳定性的影响进行了相关规定。鉴于以上原因,有必要对挖掘机荷载对沟槽开挖稳定性的影响进行深入研究。

本文首先在离心场中实现了模拟沟槽开挖过程的模型试验,并根据观察到的槽壁破坏形态,建立槽壁许可破坏模式及速度场。其次,利用极限分析上限法求解开挖深度的上限解,并根据槽壁破坏特点对开挖深度上限解进行简化。最后,利用离心模型试验结果对开挖深度简化式进行了验证,并且通过讨论得到了

挖掘机荷载影响区划分图，直观地给出挖掘机荷载的影响区和非影响区。

1 开挖沟槽的离心模型试验

1.1 试验概况

(1) 建筑机械荷载的模型

为了进行挖掘机荷载对槽壁稳定性影响的试验，首先应该掌握挖掘机荷载的特点，进而对荷载进行简化。为此，对日本各厂家生产的 287 种履带式挖掘机相关参数进行了整理^[8]。如图 2 所示，履带板宽（见图 1，用 b 表示）在 0.4~1.27 m 之间，且有近 50% 的履带板宽为 0.6 m；如图 3 所示，82.6% 的挖掘机的履带全宽（见图 1，用 B 表示）为履带板宽的 5 倍。因此，设履带板宽为 b ，则本实验取履带全宽 $B=5b$ 。如图 4 所示，96.5% 的挖掘机的履带长 L 是履带板宽 b 的 6 倍以上，本试验将挖掘机作用在地基上的荷载近似为两个相连的条形荷载。设定的挖掘机荷载模型，如图 5 所示。另外，挖掘机接触压力在 9.8~118 kPa 之间。

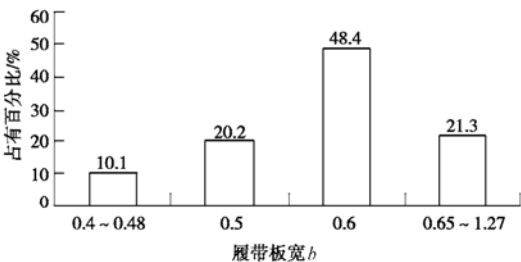


图 2 履带板宽 b 的分布
Fig. 2 Distribution of pedrail width b

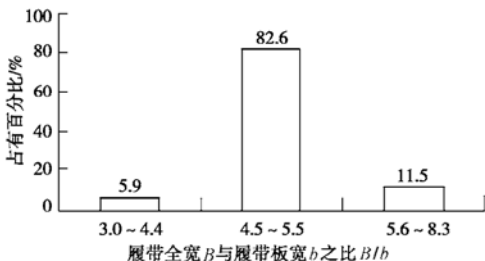


图 3 履带全宽 B 与履带板宽 b 的关系
Fig. 3 Relationship between pedrail span B and pedrail width b

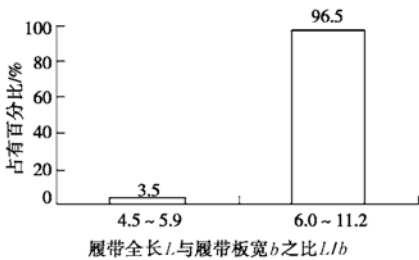


图 4 履带全长 L 与履带板宽 b 的关系
Fig. 4 Relationship between pedrail length L and pedrail width b

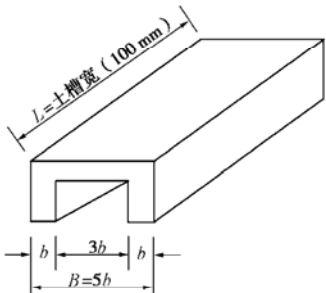


图 5 挖掘机荷载模型
Fig. 5 The load model of construction machinery

(2) 试验装置

本试验使用土工离心机是日本独立行政法人产业安全研究所的第一代装置（NIIS Mark-I Centrifuge）。离心机主要参数见文献^[9]。在离心场中所用的开挖装置规格及示意图见表 1 和图 6。制作模型地基的土槽的内部尺寸为 450 mm×100 mm×272 mm。

表 1 开挖装置规格

Table 1 Specifications of excavation equipment				
尺寸/mm	质量/kg	控制方式	开挖刀水平移动速度/(mm·s ⁻¹)	开挖刀垂直移动速度/(mm·s ⁻¹)
770×545×1126	200	计算机半自动化控制	0~5	0~5

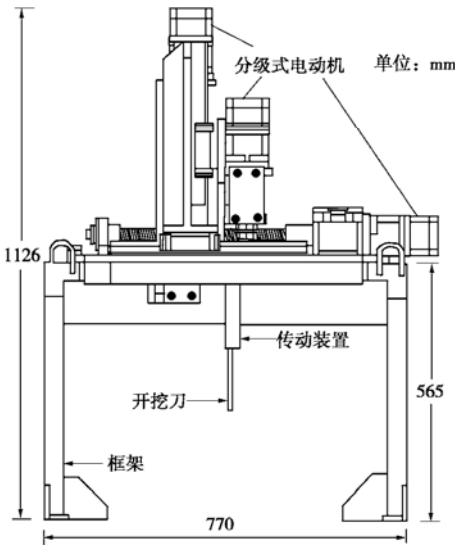


图 6 开挖装置示意图
Fig. 6 The excavation equipment

(3) 模型地基

模型地基共 3 种，即 A：砂土地基；B：内铺黑色砂层的砂土地基；C：关东火山灰地基。

A 地基土为干燥的日本丰浦砂，其物理性质如表 2 所示。丰浦砂中粒径大于 0.075 mm 颗粒占总质量的 99%，根据《建筑地基基础设计规范》^[10]（GB50007—2002），丰浦砂为细砂。在制作模型地基之前，在土槽的 4 个内侧壁均涂上润滑剂并贴上厚 0.25 mm 的薄

膜以最大限度地减少土槽的侧壁与砂土地基的摩擦。模型地基采用砂雨法制作, 地基相对密度为 78%。将制作的地基放入水槽中, 利用毛细水作用从地基下部使地基缓慢饱和, 然后在离心场中 (30g) 脱水 15 min。饱和丰浦砂地基在离心场中脱水实验结果, 如图 7 所示, 在离心加速度达 30g 后脱水 15 min, 含水率和饱和度均趋于稳定, 含水率从 21.6% 降到 3.2%, 饱和度从 100% 降到 15.2%。此时地基的密度为 1.62 g/cm³。

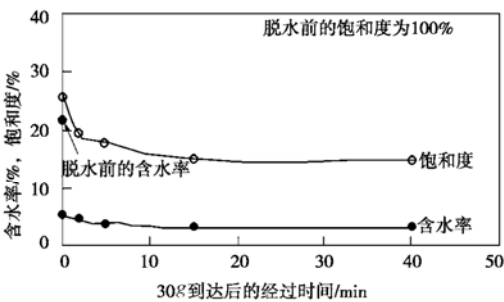


图 7 浸水丰浦砂地基在离心场中脱水实验结果
Fig. 7 The result of dehydration experimentation in centrifugal field

B 地基同样使用丰浦砂, 为了清晰观察槽壁的破坏情况, 制作地基时, 沿深度方向上每隔 10 mm 铺设一层 5 mm 厚的黑色砂。黑色砂是将丰浦砂放入用水稀释的墨汁中浸泡 24 h 后烘干制成。B 地基的密度为 1.605 g/cm³。

C 地基用关东火山灰制成, 关东火山灰的物理性质见表 3。利用压缩装置, 以 49.1 kPa 的压力对关东火山灰进行分层压缩, 制成深度方向具有相同强度的地基^[11-12]。为了清晰观察槽壁的破坏情况, 每隔 10 mm 厚均匀撒上干燥的高龄土粉。表 4 为重力场中制作的 C 地基的性质。

另外, 在 30g 离心场中模型地基承载力实验结果表明 A、B 和 C 地基的承载力分别为 1230 kPa、700 kPa 和 91 kPa。

表 2 丰浦砂的物理性质

Table 2 The physical property of Toyoura sand				
平均粒径 /cm	土粒密度 /(g·cm ⁻³)	最大干 密度 /(g·cm ⁻³)	最小干 密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%
0.0172	2.64	1.645	1.335	11

表 3 关东火山灰的物理性质

Table 3 The physical property of Kanto loam						
土粒密 度 /(g·cm ⁻³)	含水 率/%	液限 /%	塑 限 /%	塑性 指数	最优 含水 率/%	最大干 密度 /(g·cm ⁻³)
2.660	118.6	145.1	76.1	69.0	88.8	0.681

表 4 重力场中关东火山灰地基的性质

Table 4 The property of Kanto loam ground in gravity field					
含水 率/%	密度 /(g·cm ⁻³)	干密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙 比 <i>e</i>	饱和度 /%	相对 密实度
106.7	0.928	0.449	4.92	76.1	0.69

(4) 试验方案及方法

试验方案如表 5 所示, 模型履带板宽 *b* 为 20 mm 和 10 mm 两种, 离心加速度均为 30g, 则对应的挖掘机履带板换算宽分别为 0.6 m 和 0.3 m。对于砂土地基, 挖掘机接触压力分别为地基的极限承载力的 3% (A 地基)、5% (B-1、B-3 地基)、13% (B-2 地基)。对于关东火山灰地基, C-1 试验的接触压力 (35.4 kPa) 为地基极限承载力 (91 kPa) 的 40%, 而 C-2 试验的接触压力 (91.7 kPa) 与地基极限承载力 (91 kPa) 大致相同。对各种地基均进行了无荷载情况下的开挖试验。

试验方法如图 8 所示, 首先在土槽中制作水平地基模型, 再制作出用于排开开挖弃土的斜坡, 开挖弃土最终通过排土口排出土槽。将土槽和开挖装置固定于离心机吊篮的平台上, 并调整好开挖刀位置, 在地基表面放置挖掘机荷载的模型。最后运转离心机达到预定的离心加速度 (30g) 后进行开挖试验, 每次挖除土层厚度约 5 mm, 直至槽壁坍塌。试验结束后, 沿 1/2 土槽厚度处纵向切开地基, 观察槽壁破坏情况并拍照。

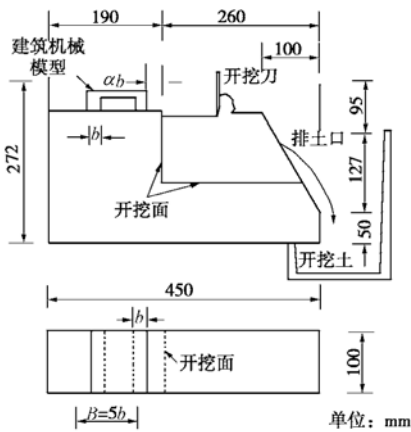


图 8 离心场中开挖试验模式图

Fig. 8 The excavation experiment in centrifugal field

1.2 槽壁破坏形态

(1) 砂土地基的槽壁破坏形态

图 9 为 B-1、B-2 和 B-3 试验的槽壁破坏形态。在本试验条件 (接触压力为地基极限承载力的 5% (B-1、B-3 试验) 和 13% (B-2 试验)) 下, 沟槽的破坏形态如图 9 所示, 与无荷载时极其相似, 均由开挖失稳所决定, 而且破坏形态不受挖掘机荷载的大小及与槽壁的距离的影响。另外, 沟槽的破坏面均位于离槽壁较

表 5 开挖试验方案 (离心加速度: 30g)
Table 5 The excavation tests (centrifugal acceleration: 30g)

地 基	试验 代号	挖掘机荷载							
		质量/g	b/mm	履带板 换算宽/m	接触压力 p /kPa	挖掘机荷载与槽壁的距离 ab/mm (换算距离/m)			
A 地基	A-1	481.71	20	0.6	35.4	8 (0.24)	12 (0.36)	25 (0.75)	35 (1.05)
	B-1	481.71	20	0.6	35.4	8 (0.24)	12 (0.36)	25 (0.75)	35 (1.05)
B 地基	B-2	1246.10	20	0.6	91.7	8 (0.24)	12 (0.36)	25 (0.75)	35 (1.05)
	B-3	239.21	10	0.3	35.2	4 (0.12)	6 (0.18)	12.5 (0.375)	17.5 (0.525)
C 地基	C-1	481.71	20	0.6	35.4			25 (0.75)	
	C-2	1246.10	20	0.6	91.7	10 (0.30)	15 (0.46)	25 (0.75)	35 (1.05)

近的条形荷载附近,而在离槽壁较远的条形荷载附近土体未发生破坏,表明离槽壁较远的条形荷载对开挖沟槽的稳定性没有影响。

为无挖掘机荷载情况的破坏面,破坏面从地表面开始向下的前半部分为近于铅直的直线,滑动面的后半部分为曲线,与前面的直线段光滑相接。有挖掘机荷载的情况,如图10 (b)、(c)、(d) 所示,C-1和C-2试验的沟槽破坏形态有较大不同。在C-1试验条件(接触压力为C地基极限承载力的40%)下,沟槽的破坏形态如图10 (b) 所示,与无荷载时极其相似,是由开挖失稳所支配的。在C-2试验条件(接触压力与C地基极限承载力相近)下,沟槽的破坏形态如图10 (c)、(d) 所示,地基的破坏面是由破坏面为边界的2至3个土楔组成,此破坏形态和边坡上承载力支配的破坏形态^[13-14]相似,即地基被向前方(开挖侧)挤出而破坏。

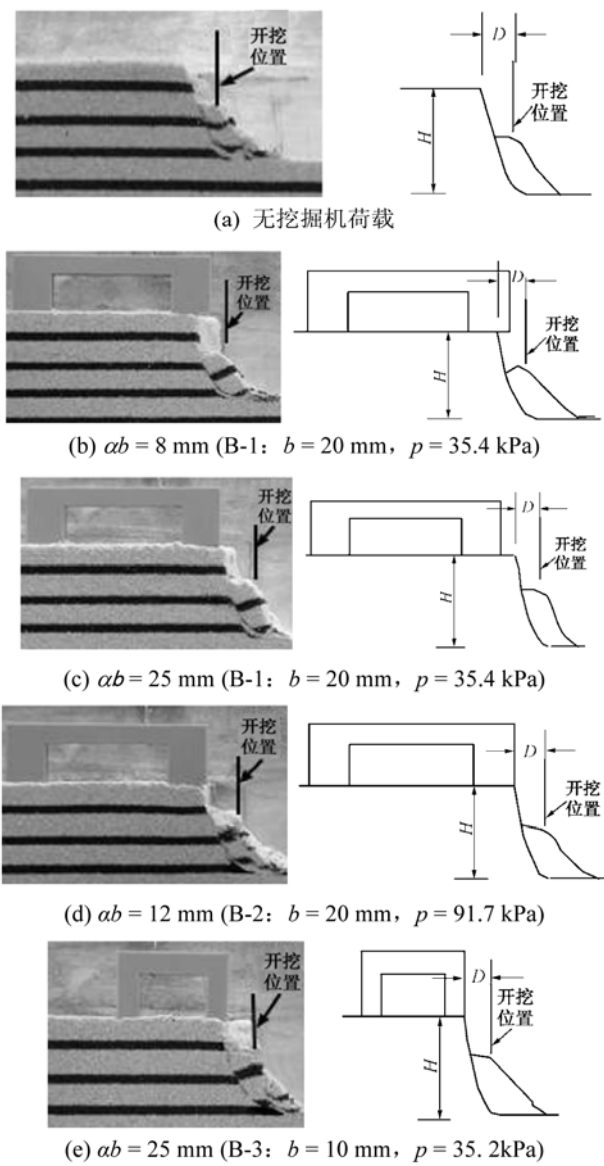
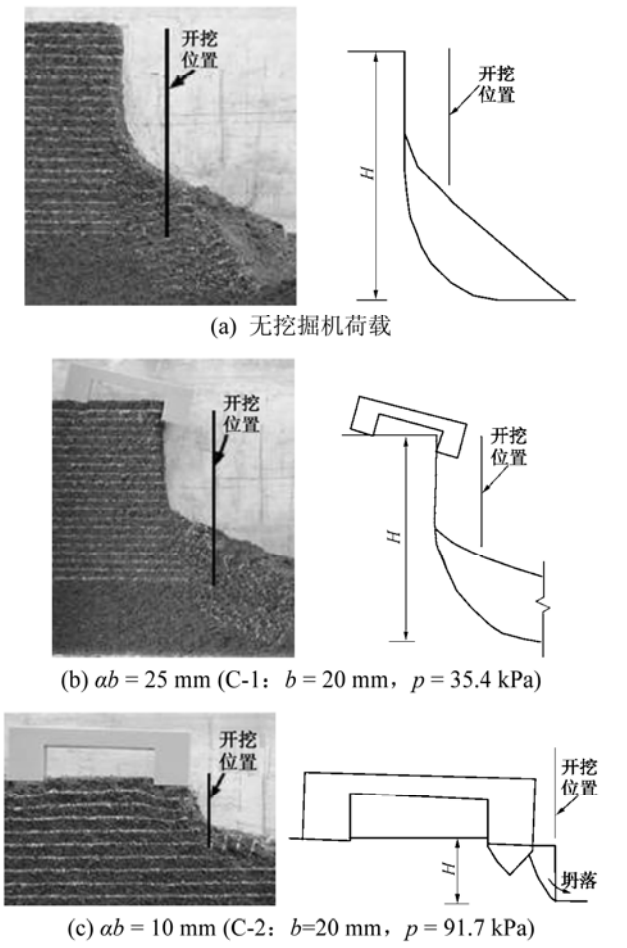


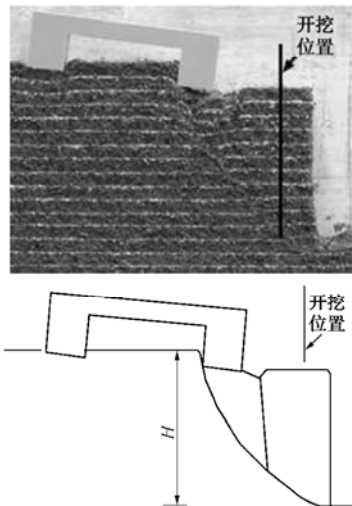
图 9 沟槽的破坏形态 (B 地基: $q = 700 \text{ kPa}$)
Fig. 9 The failure of trench (ground B: $q = 700 \text{ kPa}$)

(2) 关东火山灰地基的槽壁破坏形态

图10为C-1、C-2试验的槽壁破坏形态。图10 (a)



(c) $ab = 10 \text{ mm}$ (C-2: $b = 20 \text{ mm}$, $p = 91.7 \text{ kPa}$)



(d) $ab = 35$ mm (C-2: $b = 20$ mm, $p = 91.7$ kPa)

图 10 沟槽的破坏形态 (C 地基: $q = 91$ kPa)

Fig. 10 The failure of trench (ground C: $q = 91$ kPa)

对于 C-2 试验, 无挖掘机荷载时的开挖深度为 220 mm; 当 ab 分别为 10, 15, 25 mm 和 35 mm 时, 开挖深度依次为 38, 70, 72 mm 和 98 mm。与无荷载时的开挖深度相比, 挖掘机荷载与槽壁的距离对开挖深度的影响较大。即使 $ab = 35$ mm 的情况, 开挖深度不到无荷载情况的一半。

第二节将利用极限分析上限解理论对岩土体自重占支配地位的开挖稳定性问题进行分析。

2 开挖深度上限解及简化式

极限分析方法的优势在于以塑性力学上、下限定理为理论基础, 可绕过土体复杂的本构关系, 获得理论上严格的计算结果^[15-16]。上限解法与极限平衡法一样应用简便, 并且所得解与严密解的关系明确, 即所得解必然不小于严密解。利用上限法的关键问题是假定的许可破坏模式与实际情况的符合程度, 二者的符合程度直接影响上限解的精度。本文根据在离心场中模拟沟槽开挖的模型试验得到的破坏形态, 建立槽壁的许可破坏模式及速度场, 利用上限解法求解沟槽开挖深度。

2.1 槽壁的许可破坏模式及速度场

一般情况下, 挖掘机等建筑机械荷载相对开挖岩土体本身的强度很小, 所以, 本文根据岩土体的自重荷载占支配地位的开挖试验结果, 建立如图 11 所示的许可破坏模式及速度场。根据试验结果可知, 始于地基表面的滑动面至一定深度处是铅直的, 所以, 与 Kusakabe^[17]一样将滑动面 BC 段设为铅直的直线段, 这一点与 Chen^[18]假定的破坏模式不同。为了计算简便, 将 CD 段视为对数螺线并将其极点设在开挖面上。为了使 CD 段在 C 点与 BC 段光滑连接, 设初始半径 OC 与水平线夹角为地基土的内摩擦角 φ 。如图 11 所

示, 设沟槽开挖深度为 H , 槽壁坍塌时滑动土体的宽度为 D , 对数螺线的初始半径为 r_0 , 地基土的黏聚力为 c , 重度为 γ 。

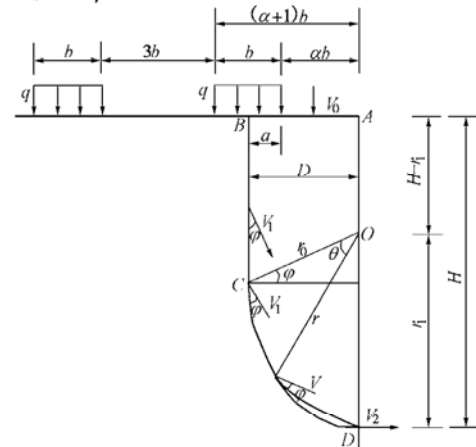
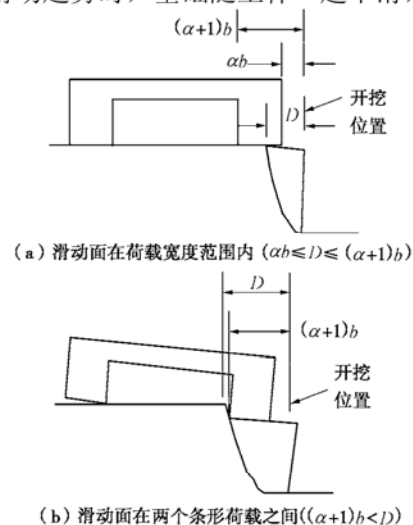


图 11 许可破坏模式及速度场

Fig. 11 Failure mode and velocity field

设挖掘机接触压力为 q , 挖掘机荷载与槽壁的距离为 ab 。挖掘机荷载在滑动面内的宽度为 a , 则作用在滑动面内的压力为 qa 。但是根据试验结果(图 12), 对于滑动面在荷载宽度范围内的情况 ($ab \leq D \leq (\alpha+1)b$), 如图 12 (a) 所示, 当地基土体出现滑动趋势时, 滑动土体与荷载底面(基础底面)分开, 因为使用的模型基础是刚性的, 基础与滑动土体变形不协调, 基础没有随土体一起下滑, 实际作用在滑动土体表面上的压力小于 qa 。若挖掘机荷载模型是柔性的, 则基础与滑动土体变形相协调, 基础将随土体一起下滑。在此, 引入柔度系数 λ , 考虑基础与滑动土体的变形协调问题, 即实际的接触压力为 λq , λ 取值范围为 $0 \sim 1.0$ 。对于完全柔性的基础(挖掘机荷载), λ 取 1.0。对于滑动面在两个条形荷载之间的情况 ($(\alpha+1)b < D$), 如图 12 (b) 所示, 当地基土体出现滑动趋势时, 基础随土体一起下滑, 即挖掘机



(b) 滑动面在两个条形荷载之间 ($(\alpha+1)b < D$)

图 12 挖掘机荷载与滑动土体的变形协调关系

Fig. 12 Relationship of deformation compatibility between drag shovel load and sliding soil body

2.3 上限解简化式

上限解式 (9)、(10)、(11) 中, r_0 不仅取决于地基土的重度 γ 、强度指标 c 和 φ , 而且随荷载条件 (履带板宽度、挖掘机荷载大小及与槽壁的距离) 变化, 由上限解计算确定 r_0 后, 还需验算 r_0 是否满足相应的适用条件, 因此, 利用上限解式 (9)、(10)、(11) 计算开挖深度时比较繁琐。试验结果表明, 荷载条件 (履带板宽度、挖掘机荷载大小及与槽壁的距离) 对滑动土体宽度 D 的影响较小, 滑动土体宽度 D ($D=r_0\cos\varphi$) 在 11 mm 到 13 mm 之间, 与无荷载时的宽度 12 mm 基本相同 (如图 13)。即可假设 r_0 为无荷载时计算值, 从而可对开挖深度上限解进行如下简化。

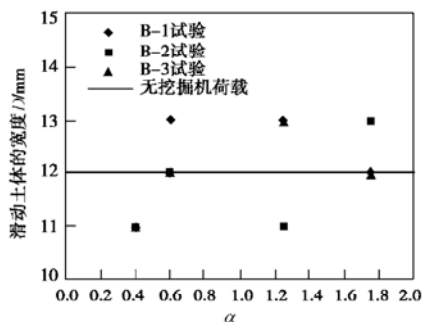


图 13 挖掘机荷载对滑动土体宽度的影响 (B 地基)
Fig. 13 Relationship between D and α (ground B)

设 H_0 为无荷载情况下的开挖深度, r_0 , H_0 表达式即为式 (9a)、(9b)。

根据滑动土体的宽度 D ($D=r_0\cos\varphi$) 与挖掘机荷载距槽壁的距离 ab 的相对关系, 由式 (9)、(10)、(11) 可得 H/H_0 的表达式如下:

(1) 当 $D < ab$ 或无荷载时
$$H = H_0, \text{ 故 } \frac{H}{H_0} = 1. \quad (12)$$

(2) 当 $ab \leq D \leq (\alpha + 1)b$ 时
$$\frac{H}{H_0} = 1 - \frac{\lambda q(ab - r_0 \cos \varphi)}{\frac{1}{2} r_0^2 \gamma X + cr_0 Y}, \quad \lambda \in [0, 1]. \quad (13)$$

(3) 当 $(\alpha + 1)b < D$ 时
$$\frac{H}{H_0} = 1 - \frac{-qb}{\frac{1}{2} r_0^2 \gamma X + cr_0 Y}, \quad (14)$$

即

$$\frac{H}{H_0} = \begin{cases} 1, & D < ab, \\ 1 - \frac{\lambda q(ab - r_0 \cos \varphi)}{\frac{1}{2} r_0^2 \gamma X + cr_0 Y}, & ab \leq D \leq (\alpha + 1)b, \\ 1 - \frac{-qb}{\frac{1}{2} r_0^2 \gamma X + cr_0 Y}, & (\alpha + 1)b < D. \end{cases} \quad (15)$$

3 上限解简化式计算结果及讨论

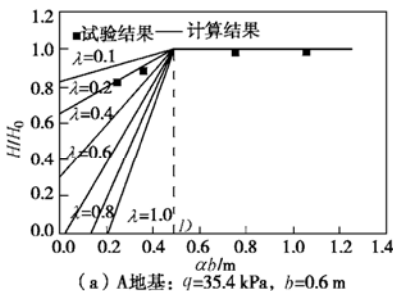
3.1 计算结果与试验结果比较

表 6 为计算上限值时使用的土体参数。试验前由于没有进行开挖地基土体未受到扰动, 此时地基土体参数并非实际土体参数; 试验结束后由于槽壁已被破坏已无法测得土体参数。土体参数 c , φ 由无荷载情况下离心模型试验的开挖深度代入上限解式 (9) 反算得到。

表 6 计算上限解所用参数

Table 6 Parameters in calculation of upper-bound solution			
地 基	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	土的重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
A 地基 (丰浦砂)	2.5	37	15.89
B 地基 (铺有黑色砂的 丰浦砂)	2.0	36	15.73
C 地基 (关东火山灰)	9.0	10	9.09

图 14 为上限解简化式计算结果与试验结果比较图, 其中 H/H_0 为开挖深度与无荷载时的开挖深度的比值。 ab 为挖掘机荷载与槽壁的距离。 D 表示滑动土体的宽度, 影响 D 的因素有土体的重度 γ 、强度指标 c 和 φ , 利用表 1 所给参数算得 A 地基 $D=0.49$ m, B 地基 $D=0.40$ m。关于 D 将在 3.2 中详细讨论。当 $ab > D$ 时, $H/H_0=1$, 即当挖掘机荷载作用在滑动土体以外时, 挖掘机荷载对开挖深度不产生影响, 计算结果基本反映了试验结果。当 $ab < D$ 时, 试验结果表明, 挖掘机荷载对开挖深度产生影响, 挖掘机荷载距槽壁越近, H/H_0 越小, 表示挖掘机荷载对开挖深度影响越大。另一方面, 计算结果显示, 柔度系数 λ 越大 (基础与滑动土体的变形越协调), 开挖深度越小, 表示挖掘机荷载对开挖深度影响越大。反之, λ 越小 (基础与滑动土体的变形越不协调), 开挖深度越大, 表示挖掘机荷载对开挖深度影响越小。本试验中的模型基础是刚性的, λ 取 0.2 时计算结果与试验结果比较吻合。另外, 对于关东火山灰地基 (C 地基: $q=35.4$ kPa, $b=0.6$ m, $ab=0.75$ m), 属于 $(\alpha + 1)b < D$ 的情况 ($\lambda=1.0$), 将相关参数代入式 (15c) 算得 H/H_0 为 0.841, 与试验结果 (0.815) 基本吻合。



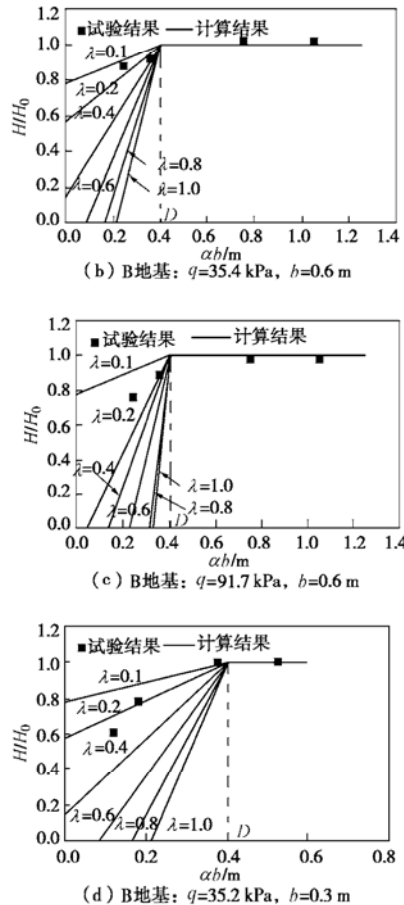


图 14 上限解简化式计算结果与试验结果的比较

Fig. 14 Comparison between results of simplified expression for upper-bound solution and test results

图 15 为柔度系数 $\lambda=0.2$ 时上限解简化式计算的槽壁破坏形态与试验结果的比较, 计算结果与试验结果基本吻合。

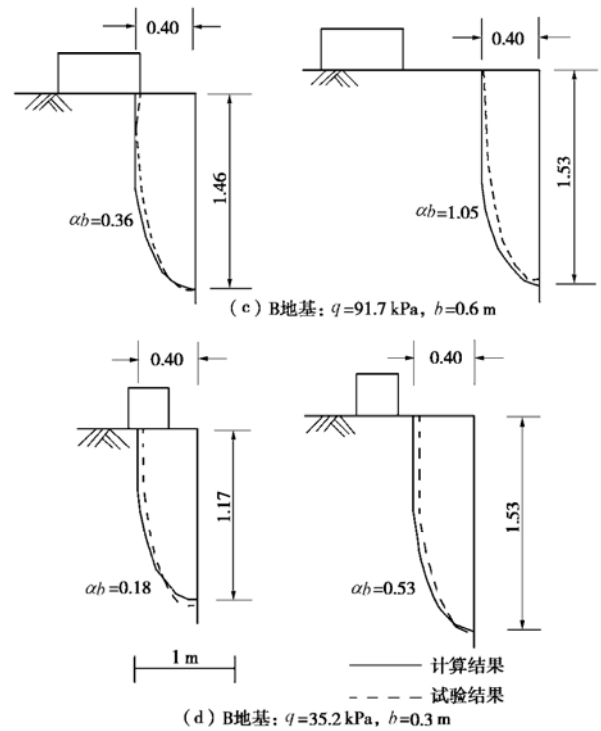
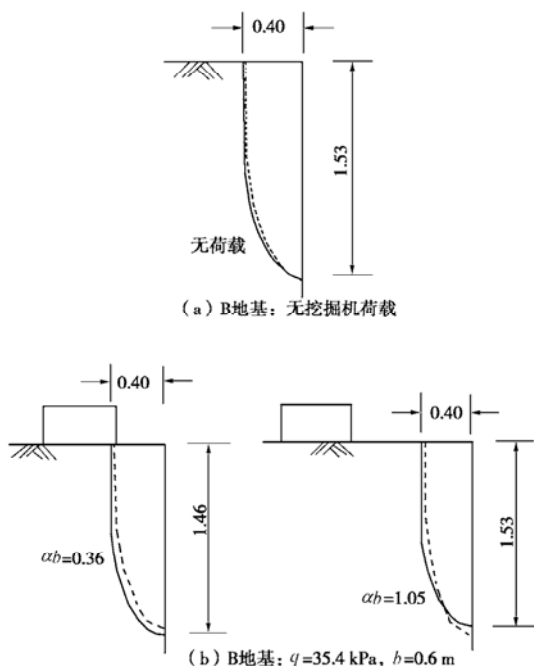
图 15 B 地基上限解简化式计算的槽壁破坏形态与试验结果的比较 ($\lambda=0.2$, 单位: m)

Fig. 15 Comparison between failure shape of trench wall given by the simplified expression for upper-bound solution and the test results

3.2 挖掘机荷载影响区的讨论

由图 14 可知, 挖掘机荷载是否影响开挖深度, 与挖掘机荷载距槽壁的距离和滑动土体宽度 D 的相对位置有关。滑动土体宽度 D 由无荷载时的初始半径 r_0 表达式 (9a) 得到, 即

$$D = r_0 \cos \varphi = \frac{c}{\gamma} \left(1 + \sqrt{1 + 2 \frac{Y}{X} \cos \varphi} \right), \quad (16)$$

式中, X 、 Y 为地基土体内摩擦角 φ 的函数, 由式 (7) 给出。

式 (16) 表示 D 是 c 、 φ 和 γ 的函数, 由此可得 D 与 c/γ 的关系, 如图 16 所示。槽壁坍塌时滑动土体的宽度 D 与 c/γ 成正比, 几乎不受地基土体内摩擦角 φ 的影响。如果取式 (16) 等式右端 c/γ 的系数 $1 + \sqrt{1 + 2 \frac{Y}{X} \cos \varphi}$ 在 φ 为 0° 、 20° 和 40° 时的平均值, 则式 (16) 可简化为

$$D \approx \frac{c}{\gamma} \tan 72.8^\circ = 3.2 \frac{c}{\gamma}. \quad (17)$$

利用式 (17) 可简单地计算出滑动土体宽度 D 。因为重度 γ 的取值范围变化不大, 所以, 影响 D 的主要因素是黏聚力 c 。

由图 16 可知, 当挖掘机荷载与开挖面的距离 ab 大于滑动土体的宽度 D 时, 即当挖掘机荷载作用在滑

动土体以外时, 挖掘机荷载对开挖深度不产生影响。设 $ab > D$ 的工作区为挖掘机荷载非影响区, 挖掘机在此区工作时可不考虑挖掘机荷载的影响, 即由式(15a)得 $H = H_0$ 。同样, 当 ab 小于 D 时, 即当挖掘机荷载作用在滑动土体以内时, 挖掘机荷载对开挖深度产生影响。设 $ab < D$ 的工作区为挖掘机荷载影响区, 挖掘机在此区工作时应考虑挖掘机荷载的影响, 开挖深度 H 由式(15b)、(15c)计算。

在《建筑工程预防坍塌事故若干规定》^[6]中规定, 各类施工机械距基坑(槽)、边坡和基础桩孔边的距离不得小于 1.5 m。图 1(b) 为挖掘机横跨在沟槽上方的施工方法, 挖掘机两条履带板之间的净间距以 1.8 m 居多(参考图 2, 3), 如果沟槽宽度为 0.8 m, 则履带板与槽壁的距离为 $ab = 0.5$ m, 很难满足大于 1.5 m 的要求。而在图 16 中, 滑动土体宽度 $D = 0.5$ m 时所对应的 c/γ 约为 0.16 m, 如果取 $\gamma = 18$ kN/m³, 则 $c = 2.9$ kPa。即, 只有当 $c < 2.9$ kPa 时, 才可以不考虑挖掘机荷载的影响, 显然满足 $c < 2.9$ kPa 的土体范围很小。对于当 $c > 2.9$ kPa 的土体, 则应考虑挖掘机荷载对沟槽稳定性的影响。

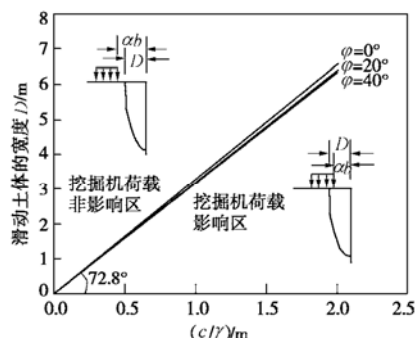


图 16 挖掘机荷载对开挖深度的影响区划分

Fig. 16 Division of influence area of machinery load

4 结 论

基于模拟挖掘机开挖沟槽的离心模型试验结果及极限分析上限法求解了开挖深度上限解问题。

(1) 可将挖掘机简化为荷载宽度为履带板宽的两个相连的条形荷载, 两个条形荷载间距为三倍履带板宽, 即三倍荷载宽度。两个条形荷载中离槽壁较近的条形荷载对开挖沟槽的稳定性产生影响。

(2) 当接触压力与地基强度相比较小时, 沟槽的破坏形态与相应地基的无荷载情况下的破坏形态极其相似, 即开挖占支配地位的破坏形式, 而且破坏形态不受建筑机械与槽壁的距离的影响。当接触压力与地基强度比较接近时, 破坏形态呈现出边坡上承载力占支配地位的破坏形式。

(3) 当挖掘机接触压力与地基强度相比较小时,

开挖深度受履带板宽度、挖掘机荷载大小及与槽壁的距离(ab)的影响。履带板宽度越小, 开挖深度越大; 接触压力越大, 开挖深度越小; 挖掘机荷载与槽壁的距离(ab)越大, 开挖深度越大, 当接触压力与槽壁的距离(ab)达到一定距离以上时, 开挖深度趋于稳定, 分别接近或等于相应的无荷载情况下的开挖深度。当接触压力与地基强度比较接近时, 挖掘机荷载与槽壁的距离(ab)对开挖深度的影响较大。

(4) 履带板宽度、挖掘机荷载大小及与槽壁的距离对开挖沟槽稳定性的影响, 主要表现在对开挖深度的影响, 对滑动土体宽度的影响较小。

(5) 根据离心模型试验结果, 将沟槽槽壁破坏模式设定为始于地基表面的铅直直线段与对数螺线的组合滑动面。根据槽壁破坏特点对开挖深度上限解表达式进行简化。开挖深度简化式计算结果与试验结果基本吻合。

(6) 地基土体内摩擦角 φ 对槽壁坍塌时滑动土体的宽度影响甚小。滑动土体的宽度 D 与地基土体黏聚力 c 与重度 γ 的比值(c/γ)成正比, 可近似取斜率为 3.2。

(7) 利用滑动土体的宽度表达式得到的 $D \sim (c/\gamma)$ 挖掘机荷载影响区划分图, 直观地给出挖掘机荷载的影响区和非影响区, 具有较高的工程实用价值。

(8) 当挖掘机荷载作用在非影响区, 即挖掘机与槽壁的距离大于滑动土体的宽度时, 挖掘机荷载对开挖深度不产生影响, 利用开挖深度简化式计算的开挖深度等于无挖掘机荷载时的开挖深度; 当挖掘机荷载作用在影响区, 即挖掘机与槽壁的距离小于滑动土体宽度时, 挖掘机荷载对开挖深度产生影响, 可利用开挖深度简化式计算开挖深度与无挖掘机荷载时的开挖深度之比。

由于试验技术的限制等原因, 本文无法模拟三维及具有两个侧壁的沟槽开挖问题。在今后的研究中需进一步探讨建筑机械产生的动荷载和偏心荷载以及柔性荷载对开挖沟槽稳定性的影响。

参考文献:

- [1] 姚裕春. 边坡开挖工程活动对环境影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (YAO Yu-chun. Study on influence of slope cutting to environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. 2005. (in Chinese))
- [2] 水伟厚. 黄土场地深基坑开挖变形性状研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001. (SHUI Wei-hou. The behavior of deep excavation in loess foundation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001. (in Chinese))

- Chinese))
- [3] 赵 荒. 谨防沟槽施工中的土方坍塌[J]. 建筑安全, 1996, 11(2): 43. (ZHAO Huang. Beware of earthwork collapsing in the trench excavation[J]. Construction Safety, 1996, 11(2): 43. (in Chinese))
- [4] HOSOI T. Increase in pore water pressure during excavation[C]//Proceedings of Geotech-Year 2000, Developments in Geotechnical Engineering Bangkok, Thailand, 2000, 1: 243 - 252.
- [5] 建质[2003]82号 建筑工程预防坍塌事故若干规定[S]. 2003. (Constuction Quality No. 82 Provisions for prevent collapsing accident during the construction engineering[S]. 2003. (in Chinese))
- [6] GB50268—97 给水排水管道工程施工及验收规范[S]. (GB50268—97 Code for construction and acceptance of water supply and sewerage pipelines[S]. (in Chinese))
- [7] GB50330—2002 边坡工程技术规范[S]. (GB50330—2002 Technical code for building slope engineering[S]. (in Chinese))
- [8] 社团法人日本建设机械化协会. 日本建设机械要览[M]. 日本, 1998. (Construction Mechanisation Association of Japan. Construction machinery enchiridion of Japan[M]. Japan, 1998. (in Chinese))
- [9] TOYOSAWA Y, HORII N, TAMATE S, et al. Deformation and failure characteristics of vertical cuts and excavations in clay[C]//Proc of International Conference on Centrifuge 1994, Singapore, 1994: 663 - 668.
- [10] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. (GB50007—2002 Specifications for foundation design of construction ground[S]. (in Chinese))
- [11] 玉手聡, 堀井宣幸, 豊澤康男, 末政直晃, 片田敏行, 高野裕亮. 支持地盤の不安定性が移動式クレーンの転倒に及ぼす影響[J]. 土木学会論文集, 1998, 596/III(43): 163 - 174. (TAMATE S, HORII N, TOYOSAWA Y, et al. Effect of instability of ground foundation upon mobile crane toppling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 1998, 596/III(43):163 - 174. (in Japanese))
- [12] 豊澤康男, 楊俊傑, 三浦清一, 末政直晃. 遠心力载荷装置を用いた補強基礎地盤の支持力実験[J]. 土木学会論文集, 2004, 757/III(66): 247 - 257. (TOYOSAWA Y, YANG Jun-jie, MIURA S, SUEMADA N. Bearing capacity of reinforced ground using centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 2004, 757/III(66): 247 - 257. (in Japanese))
- [13] 日下部治: Studies on the stability analysis of slopes under strip loads on the top surface[D]. 东京: 东京工业大学, 1975. (KUSAKABE O. Studies on the stability analysis of slopes under strip loads on the top surface[D] Tokyo: Industry University of Tokyo. 1975. (in Japanese))
- [14] 日下部治. 斜面上直接基の支持力にする算[J]. 土と基, 1985, 33(2): 7 - 12. (KUSAKABE O. Calculation of shallow foundation bearing capacity on the slope top[J]. Journal of Tsuchi-To-Kiso, 1985, 33(2): 7 - 12. (in Japanese))
- [15] 王红雨, 杨 敏. 临近基坑矩形浅基础地基承载力上限估算[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1116 - 1122. (WANG Hong-yu, YANG Min. Approximate upper-bound solution for bearing capacity of rectangular footings near excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1116 - 1122. (in Chinese))
- [16] DE BUHAN P, GARNIER D. Three dimensional bearing capacity analysis of a foundation near a slope[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(3):153 - 163.
- [17] KUSAKABE O. Stability of excavations in soft clay[D]. England: Cambridge University, 1982.
- [18] 陈惠发. 极限分析与土体塑性[M]. 詹世斌, 译. 北京: 人民交通出版社, 1995. (CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. ZHAN Shi-bin, translator. Beijing: China Communications Press, 1995. (in Chinese))
- [19] TAYLOR R N. Ground movements associated with tunnels and trenches[D]. England: Cambridge University, 1984.