

考虑基桩影响的粉砂地基深基坑 流砂模型试验研究

胡琦, 凌道盛, 詹良通, 陈云敏, 贾官伟, 罗耀武
(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用自制的基坑工程渗流、渗透破坏模型试验装置, 通过对水头与土体变形的观测, 研究均质砂土与粉土地基基坑工程中考虑基桩影响的渗透破坏问题, 揭示基坑工程土体渗透破坏模式。结合有限元数值模拟分析, 从土体应力状态改变的角度研究基坑工程的渗透破坏机制, 并分析基桩对土体渗透破坏的影响以及渗流对基桩受力变形的影响。研究成果表明, 受渗透力的作用, 围护结构底部土体首先进入塑性状态, 当坑内土体形成贯通的塑性区时, 即发生渗透破坏。在均质地基中, 其模式为楔形体破坏。受黏聚力的影响, 粉土破坏时的水头差较砂土大, 同时基桩的影响也会增大破坏时的水头差。

关键词: 基础工程; 模型试验; 有限元; 渗透破坏; 临界水力坡降; 深基坑; 侧摩阻力

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)10 - 2153 - 08

MODEL EXPERIMENTS ON SEEPAGE FAILURE OF DEEP FOUNDATION PIT CONSIDERING INFLUENCE OF FOUNDATION PILES IN SANDY SOIL

HU Qi, LING Daosheng, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, JIA Guanwei, LUO Yaowu
(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Using home-made seepage and seepage failure test apparatus, model experiments in different conditions were carried out. Based on the analysis of water head and soil deformation results, the seepage failure problem of deep foundation pit in uniform sandy and silty soil is investigated. The results demonstrate the seepage failure modes in deep foundation pit in uniform sandy and silty soil. Combined with numerical simulation and model experiments, the mechanism of seepage failure is analyzed based on the change of soil stress. Moreover, the effect of foundation pile on seepage failure and the effect of seepage on the deformation and stress of foundation pile are studied. According to the research, the plastic strains firstly appear on the foot of the supporting structure. Seepage failure takes place when the plastic zone joints together; and the failure model is wedge type in uniform soil. Influenced by cohesion, the water head difference in silt is more than that in sand when seepage failure takes place. Influenced by piles, the water head difference of seepage failure also increases.

Key words: foundation engineering; model experiment; finite elements; seepage failure; critical hydraulic gradient; deep foundation pit; skin friction

1 引言

深基坑工程问题的分析多侧重于对围护结构的

受力变形进行分析, 对于深基坑工程中的渗流问题也重点在于讨论渗流对土压力、墙体位移、坑底隆起以及地面沉降的影响。J. P. His^[1]、R. J. Finno^[2]、R. I. Borja^[3]、李广信等^[4]采用有限元方法, 对

收稿日期: 2007 - 03 - 18; **修回日期:** 2007 - 06 - 11

作者简介: 胡琦(1978 -), 男, 2001年毕业于浙江大学建筑工程学院结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事桩基与深基坑工程方面的研究工作。
E-mail: huqi@zju.edu.cn

基坑工程进行了渗流与土体变形的耦合分析，这些研究对揭示非破坏状态下渗流对基坑工程的影响具有重要意义。在砂土或砂质粉土地基中进行深基坑开挖，由于土体渗透性好、坑内外的水头差大，在渗流的作用下，坑内土体可能发生渗透破坏，从而严重威胁到基坑工程的稳定性。目前土体渗透破坏研究的服务对象大多是大坝以及河堤等水利工程，因此重点在于管涌理论的研究：刘杰^[5]、陶同康^[6]、吴良骥^[7]、沙金焯^[8]基于可移动土颗粒在水中的自重和渗流力平衡原理研究了管涌临界水头梯度的确定；刘忠玉等^[9]从土颗粒的受力角度分析，通过建立细颗粒在土骨架中运动的毛管模型，研究了临界水力梯度与土颗粒级配、密实度之间的关系。深基坑工程的土体渗透破坏发生在天然地基中，土性较为均质，地基土多为非管涌土，渗透破坏类型为流土型破坏，其破坏机制与管涌破坏不同。管涌破坏在于细颗粒受渗透力的作用而流失，导致土骨架结构发生改变；流土破坏机制在于渗流场对土体应力场的影响，土体破坏属于塑性破坏，因此研究基坑工程渗透破坏需要从土体应力状态改变的角度出发。K. Terzaghi^[10]在1936年定义了两种基坑工程的渗透破坏模式：(1)坑底土表面发生砂沸破坏；(2)土体整体顶升破坏。1953年A. M. S. Marsland^[11]通过模型试验揭示了砂土地基中土体渗透破坏现象。2005年N. Benmebarek等^[12]利用有限差分法对这两种破坏现象进行了数值模拟分析，从土体发生塑性破坏的角度研究了基坑工程的渗透破坏问题。这些研究尚未完全揭示发生渗透破坏时土体应力状态的变化情况，对土体渗透破坏机制没有给出合理解释。

同时，基坑工程不仅指基坑本身，坑内地下结构的基桩也包含在基坑工程中，特别是采用逆作法或采用水平支撑的深基坑工程，在开挖过程中，部分基桩作为立柱已经参与到整个工程中。深基坑工程的渗透破坏问题不仅包含水土相互作用，还涵盖了桩土相互作用。基桩的存在，对坑内土体存在一个加固作用，将坑内不同深度处的土体联系成一个整体，共同抵抗渗透力的作用，这对于减小坑底隆起与防止坑内土体渗透破坏是有利的。受渗透力的作用，坑内土体回弹，带动桩上移，桩身上部承受向上的正摩阻力作用，即上拔荷载，桩被抬升；桩身下部土体阻止桩的上移，对桩产生向下的负摩阻力

力。桩在正、负摩阻力的作用下承受拉伸轴力。基坑开挖对坑内基桩的这种影响如图1所示。

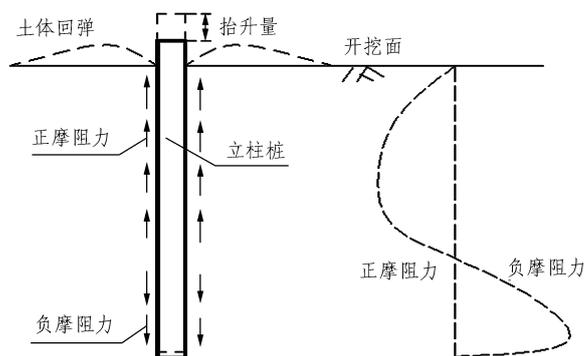


图1 受回弹影响的基桩受力情况

Fig.1 Forces on foundation pile influence by rebound

通过基坑开挖渗流模型试验结合有限元数值模拟，从渗流对土体应力场的影响着手，研究砂土和砂质粉土地基中深基坑工程渗透破坏机制，以及在土体变形和渗透破坏对基桩受力变形的影响。

2 基坑工程渗流模型试验概况

2.1 模型试验装置

本试验模拟的是二维渗流情况，模型试验装置如图2~4所示，包括：

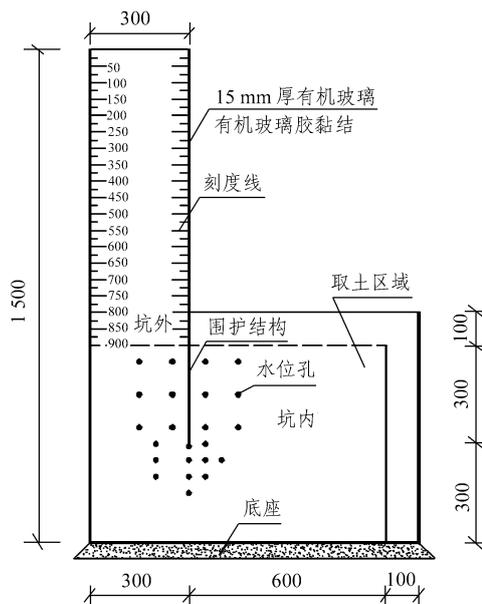


图2 试验装置(单位: mm)

Fig.2 Test apparatus(unit: mm)

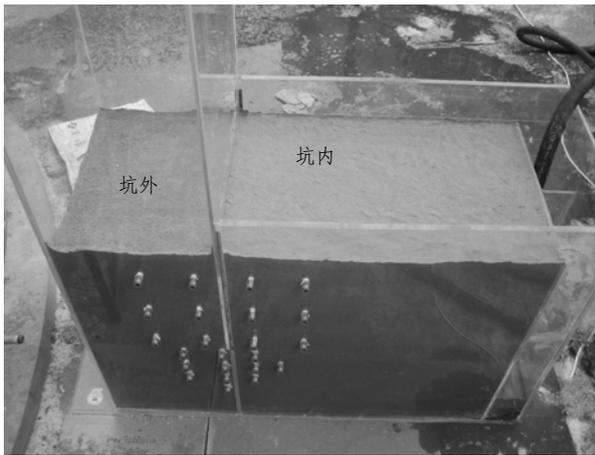


图 3 填土后试验装置照片(无桩)
Fig.3 Test apparatus after filling without pile

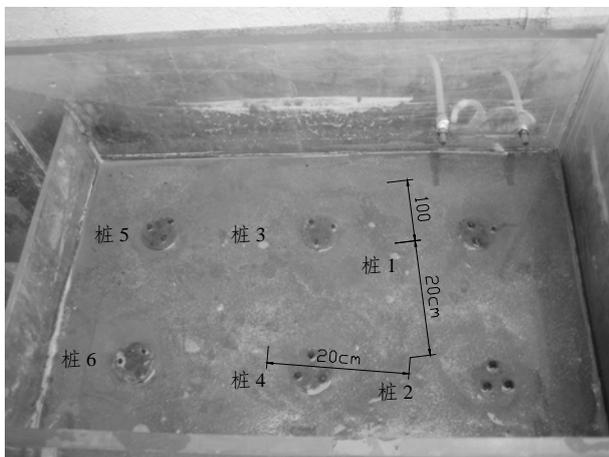


图 4 填土后试验装置照片(有桩)
Fig.4 Test apparatus after filling with piles

- (1) 主体为 L 形有机玻璃槽: 高度为 70 与 150 cm, 槽宽 40 cm, 长 90 cm。
- (2) 23 根带刻度的玻璃管(长 1.5 m, 内径 8 mm) 与软管、滤头组成的水头量测系统。
- (3) 用于量测桩、土位移的百分表。
- (4) 6 根预制混凝土桩, 桩径 5 cm, 间距 20 cm, 桩长 40 cm, 置换率为 4.9%, 桩周较为光滑。

2.2 试验用土

试验用土取自钱塘江边的砂质粉土和细砂土, 原状土土体参数如表 1 所示, 土的颗粒级配曲线如图 5, 6 所示。填土完毕后: 细砂土的孔隙比为 0.84, 饱和重度为 19.1 kN/m³。砂质粉土的孔隙比为 0.79, 平均饱和重度为 19.3 kN/m³。

表 1 原状土土体参数
Table 1 Parameters of undisturbed soils

层号	土层名称	饱和重度 (kN·m ⁻³)	孔隙比 <i>e</i>	颗粒组成百分比/%				固结快剪	
				0.25 ~ 0.50 mm	0.075 ~ 0.250 mm	0.005 ~ 0.075 mm	< 0.005 mm	<i>c</i> /kPa	ϕ /(°)
2b	砂质粉土	19.4	0.79	13	82	5	3.5	27.0	
2c	砂质粉土	19.2	0.85	4	24	66	6	26.0	
3a	细砂土	19.4	0.76	7	36	50	7	28.0	

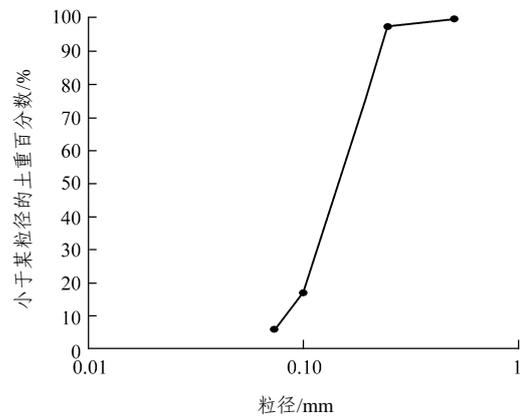


图 5 细砂土颗粒级配曲线

Fig.5 Particle-size distribution of fine sand

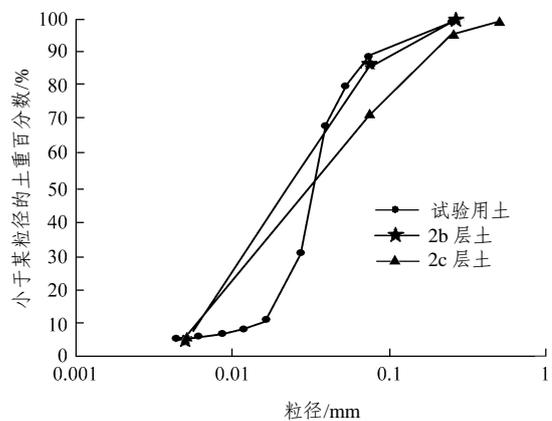


图 6 砂质粉土颗粒级配曲线

Fig.6 Particle-size distribution of sandy silt

2.3 试验过程

- (1) 填土(坑内外均为 0.5 m, 下卧土层 0.3 m, 围护结构插入深度为 0.2 m, 桩头与土面平齐);
- (2) 加水至土面, 记录初始水头;
- (3) 坑外逐步施加水头差(每次 5 或 10 cm), 待水头稳定后测定水头、土体与桩顶位移;
- (4) 观察流砂现象, 并随时记录水头变化。

3 有限元数值分析模型

土体材料采用莫尔-库仑弹塑性模型，砂土强度指标取 $c = 0 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 30^\circ$ 。砂质粉土强度参数按原状 2b 层土取值。有限元数值分析模型为平面应变问题，按照竖向刚度与桩周面积相同将桩等效为桩墙。试验桩径为 5 cm，桩间距为 20 cm，混凝土等级为 C30，等效后桩墙的竖向刚度 $EA = 294 \text{ MN/m}$ 。

4 流砂破坏分析

流砂破坏试验分析可分为：

- (1) 无桩时砂土的渗透破坏试验分析；
- (2) 有桩时砂土的渗透破坏试验分析；
- (3) 无桩时粉土的渗透破坏试验分析；
- (4) 有桩时粉土的渗透破坏数值模拟分析。

4.1 渗流场试验结果分析

无桩、有桩分析模型分别见图 7，8，模型试验水头测试点的布置图如图 9 所示，围护结构周围一圈各点对应的渗流路径如表 2 所示。无基桩影响时砂土模型各点水头试验结果如图 10 所示，有基桩影响时砂土模型各点水头试验结果见图 11。

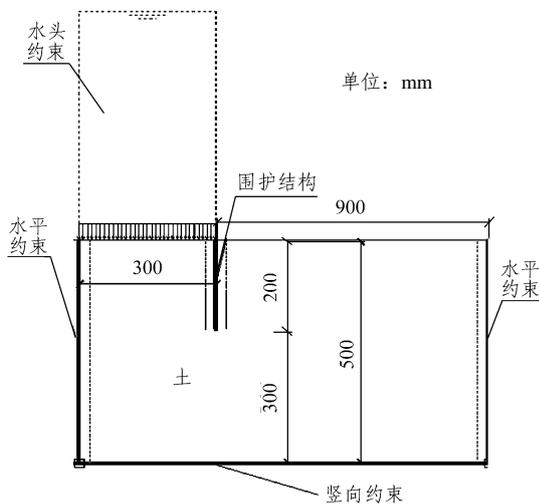


图 7 无桩分析模型

Fig.7 Analytical model without pile

水力坡降分析如表 3 所示，要搞清楚上述问题，需要对相邻两点间的水力坡降进行分析。图 12 所示为无基桩影响时砂土模型各点间水力坡降结果，图 13 所示为有基桩影响时砂土模型各点间水力坡降结果。

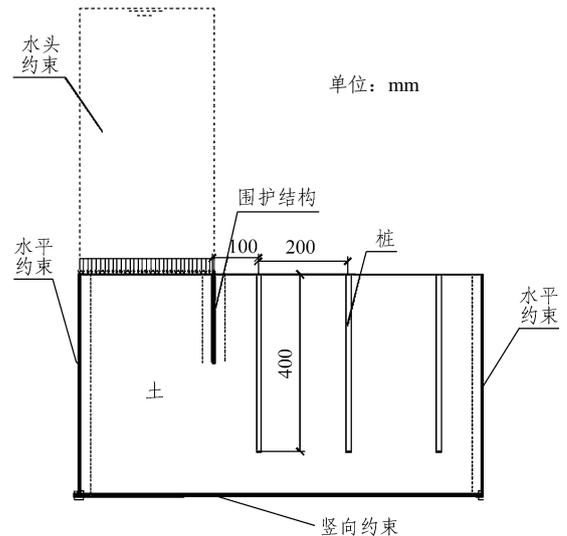


图 8 有桩分析模型

Fig.8 Analytical model with piles

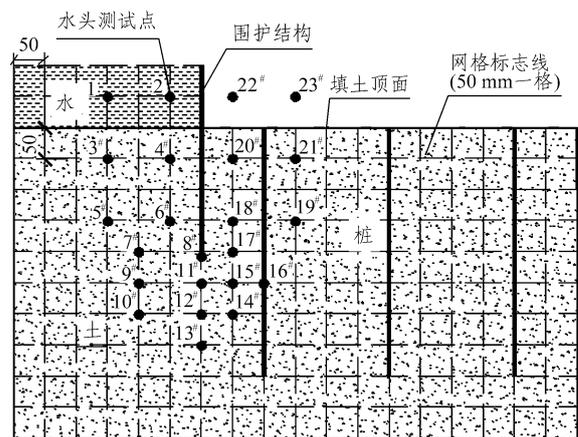


图 9 水头测试点布置图(单位: mm)

Fig.9 Testing points of water head(unit: mm)

表 2 渗流路径

Table 2 Routing of seepage flow

点号	路径/mm
2#	0
4#	50
6#	150
8#	220
18#	290
20#	390
22#	440

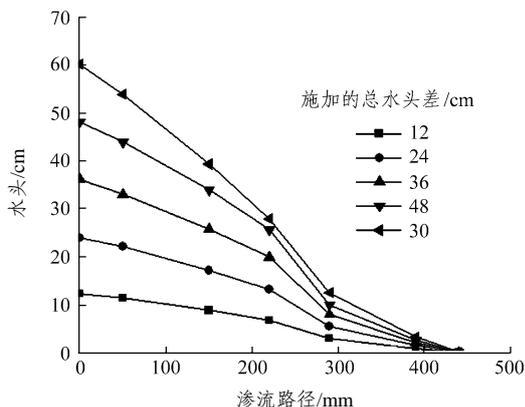


图 10 无基桩影响时砂土模型各点水头试验结果

Fig.10 Water head testing results without pile

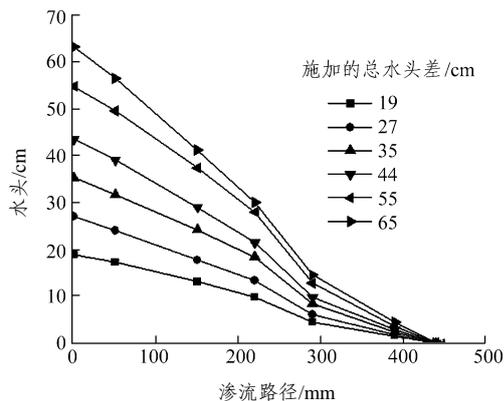


图 11 有基桩影响时砂土模型各点水头试验结果

Fig.11 Water head testing results of various points with piles

表 3 水力坡降分析区域

Table 3 Analysis region of hydraulic gradient

区域位置	流程/mm
2 [#] ~4 [#]	50
4 [#] ~6 [#]	100
6 [#] ~8 [#]	70
8 [#] ~18 [#]	70
18 [#] ~20 [#]	100
20 [#] ~22 [#]	50

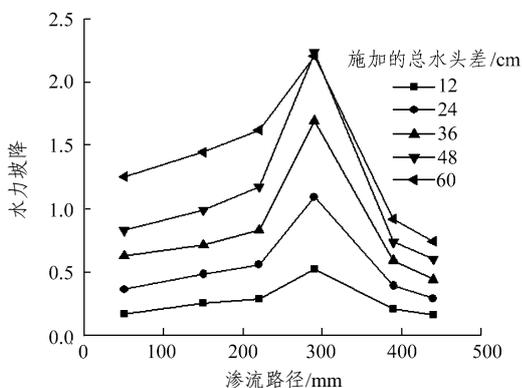


图 12 无基桩影响时砂土模型各点间水力坡降结果

Fig.12 Hydraulic gradient testing results without pile

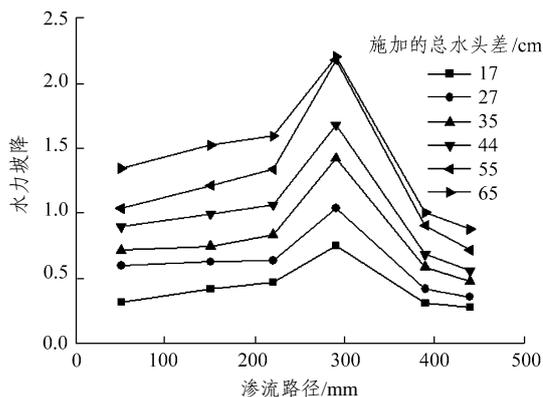


图 13 有基桩影响时砂土模型各点间水力坡降结果

Fig.13 Hydraulic gradient testing results with piles

从图 12, 13 中可以看出一些很有意义的规律:

(1) 土体破坏之前随着水头差的增大, 相邻点的水力坡降逐渐增大, 最大水力坡降位置发生在 8[#]~18[#]点之间, 说明该区域的流速最大。

(2) 当水头差增大至 60 cm(无桩)与 65 cm(有桩)时, 8[#]~18[#]点之间的水力坡降不再增加, 与之对应的试验现象是土体迅速隆起, 说明坑内土体从该区域开始破坏。此时坑内土体的平均水力坡降(8[#]~22[#]点之间的平均值)为 1.2(无桩)与 1.3(有桩), 大于太沙基理论的临界水力梯度 0.9(自重平衡式)。

4.2 渗透破坏模式

模型试验得到的渗透破坏模式如图 14, 15 所示。

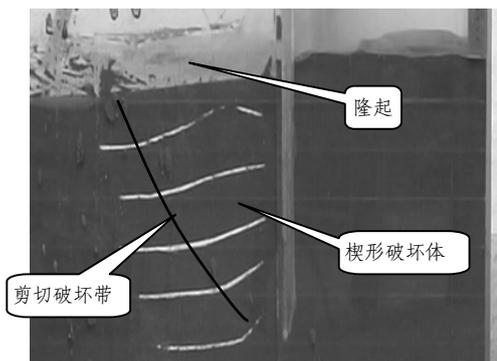


图 14 实测无桩时砂土破坏情况

Fig.14 Failure modes testing results without pile

由图 14, 15 可知:

(1) 随着水头的增大, 坑内土体急剧隆起直至破坏, 其破坏模式与 A. M. S. Marsland 所描述的试验结果一致: 楔形体整体顶升破坏。坑内土体塑性破坏区域与 N. Benmebarek 等分析结果也比较一致, 土体破坏时, 形成了一条明显的贯穿剪切破坏带。

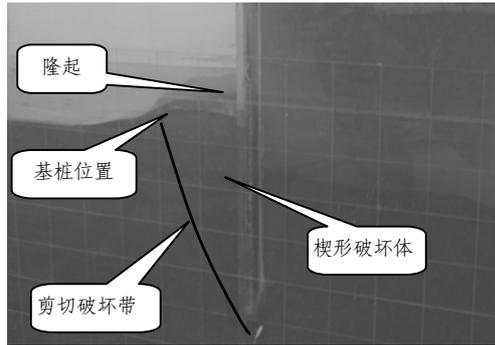


图 15 实测有桩时砂土破坏情况

Fig.15 Failure modes testing results with piles

(2) 没有基桩时，坑内土体隆起较均匀，土体破坏范围更大；受基桩的影响，只有围护结构与桩之间的土体明显隆起，土体破坏范围也局限于围护结构与桩之间。

(3) 从图 14 中可以很明显地看出，当坑内土体破坏时，底部的隆起情况最为剧烈，这与节 4.1 水力坡降的分析结果相一致。

4.3 渗透破坏机制分析

要真正揭示土体破坏机制还需研究渗流对土体应力状态的影响。当土单元塑性应力状态如图 16 所示，即当土体应力状态满足下式，该点土体进入塑性：

$$k = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2} = \sin \varphi' \quad (1)$$

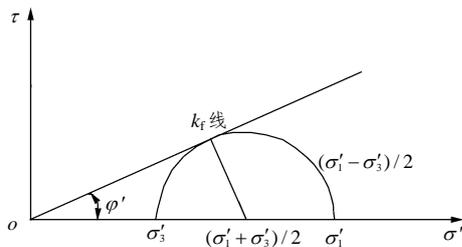


图 16 土单元塑性应力状态

Fig.16 Plastic stress state of soil element

以砂土为例， $c=0$ kPa， $\varphi'=30^\circ$ ，饱和重度取 19.0 kN/m³，泊松比 $\mu=0.33$ ，对应的侧压力系数 $K=0.5$ ， $k_f = \sin 30^\circ = 0.5$ ，初始状态的 $k_0 = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/(\sigma'_1 + \sigma'_3) = 0.33$ 。

首先分析一维渗流条件下土体应力状态的变化情况，建立如图 17 所示的一维渗流分析模型。

不同水头差作用下不同深度处土体的应力状态分析结果如图 18 所示。

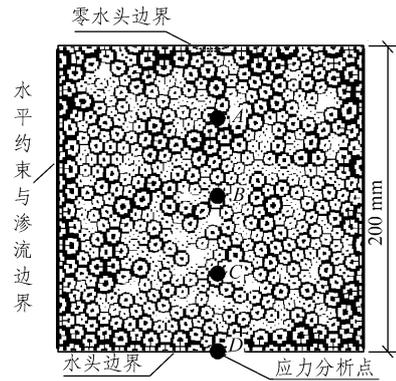


图 17 一维渗流分析模型

Fig.17 Analytical model of 1D seepage

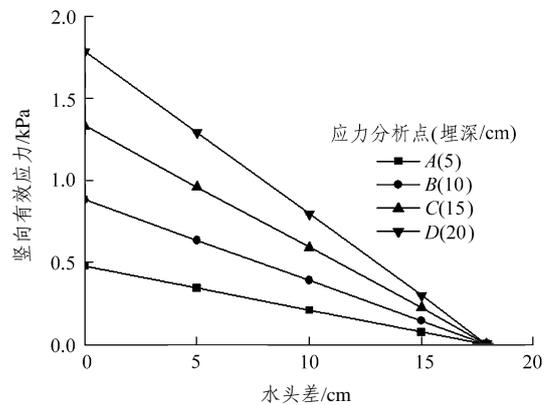


图 18 竖向有效应力与水头差的关系

Fig.18 Relationship between vertical effective stress and water head difference

由图 18 可知，对于一维渗流情况，不同深度处各点的竖向有效应力按恒定的速率减小至 0，这说明：由于水平方向不存在渗透力的作用，且不存在土与土之间的相互影响，只有当不同深度处土体的竖向有效应力同时达到 0 时才破坏(液化)。因此对于一维渗流情况，采用自重平衡式的分析方法是可解释土体的渗透破坏情况。

二维渗流及渗透破坏分析模型如图 19 所示，土体应力状态变化的分析结果如图 20，21 所示。

图 20 给出的是二维渗流竖向有效应力计算值。可以看出：随着水头差的增大，不同深度处土体竖向有效应力降低，但受土与土之间相互作用的影响，应力重分布，有效应力变化速率不断改变。说明二维条件下的土体应力状态改变非常复杂，不能再采用自重平衡式的方法来判断土体渗透破坏。

图 21 给出的是不同深度处土体 k 值的变化情况，从中可以看出，底部点 D 首先进入塑性状态，当水头差增大，浅层土体逐渐进入塑性状态，直至

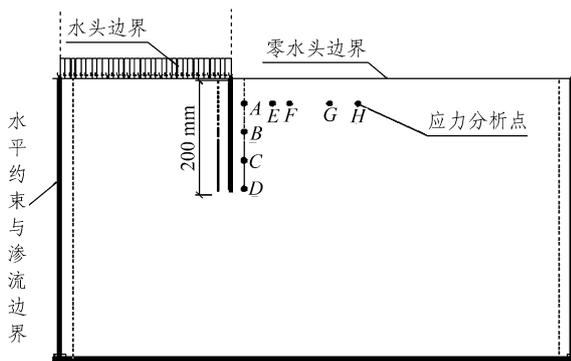


图 19 二维渗流及渗透破坏分析模型

Fig.19 2D seepage and its analytical model

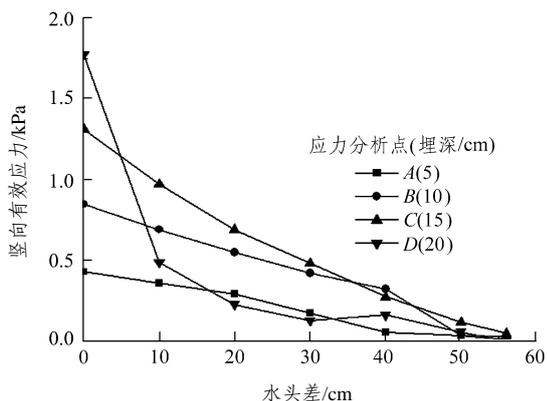


图 20 土体竖向有效应力与水头差的关系

Fig.20 Relationship between vertical effective stress and water head difference

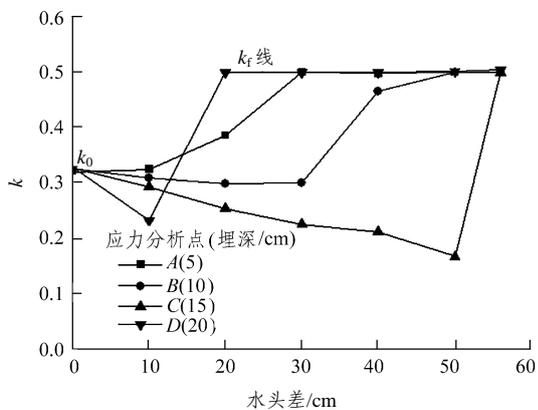


图 21 土体 k 值与水头差的关系

Fig.21 Relationship between k and water head difference

塑性区贯通。这与模型试验得到的水力坡降变化以及渗透破坏模式所揭示的规律一致。

4.4 基坑工程渗透破坏水力坡降分析

不同土性以及基桩对破坏时的水头差影响结果如表 4 所示, 从表 4 中可以看出:

(1) 土体破坏时的平均水力梯度要大于太沙基理论^[13]的结果, 且粉土的差异比砂土的更显著。

(2) 在相同填土高度与土体密实度相近的条件下, 粉土破坏时的水头差要大于砂土, 这是由于粉土具有一定的黏聚力 c 的影响。粉土中土与土之间的抗剪强度较大, 需要更大的渗透力才能使土体进入塑性状态。黏聚力的影响与胡展飞^[14]对黏性土抗突涌模型试验结论相一致。

(3) 受坑内基桩的影响, 砂土破坏时的水头差增加很少, 而粉土却有非常显著的增加。这也可以解释为粉土具有一定的黏聚力的影响, 砂土在渗透力的作用下, 桩周土液化, 因此桩对土的约束作用不大; 而对于粉土, 虽然由于渗透力的作用桩周的正应力降低, 但由于存在黏聚力的影响, 桩土之间仍然具有一定的摩擦力, 桩对土的约束能力可以充分体现出来。基桩与黏聚力 c 的影响程度与应力水平有关。

5 渗流与流砂破坏对基桩的影响

在渗透力的作用下, 坑内土体隆起, 同时带动基桩也具有一定的向上位移, 砂土地基中的桩顶位移实测结果与分析结果如图 22 所示。

图 22 给出的是围护结构附近桩的桩顶位移, 即图 4 中的 2[#] 桩。由渗流作用产生的桩侧摩阻力分析结果如图 23, 24 所示。

对于砂土地基, 在渗透力的作用下, 上段桩侧摩阻力很快达到极限摩阻力, 随着桩侧土体有效应力降低, 上段桩侧摩阻力逐步减小。粉土由于存在黏聚力的作用, 桩侧摩阻力可以保持增长趋势。

表 4 土性与基桩对渗透破坏的影响

Table 4 Influences of soil properties and foundation piles on seepage failure in different soils

试验次数	土性	有无桩情况	γ_{sat} ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	破坏时的水头差/cm		8 [#] ~22 [#] 点之间的平均水力坡降		太沙基临界水力梯度 ^[13]
				模型试验	数值模拟	模型试验	数值模拟	
第 1 次	砂土	无	19.0	60	56	1.27	1.19	0.90
第 2 次	砂土	有	19.1	65	61	1.40	1.31	0.91
第 3 次	粉土	无	19.3	85	80	1.80	1.69	0.93
第 4 次	粉土	有	19.3		130		2.75	0.93

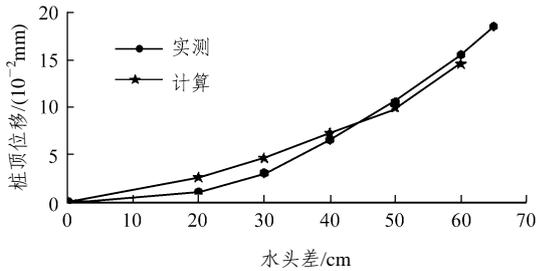


图 22 桩顶位移与水头差的关系

Fig.22 Relationship between vertical displacements at pile top and water head difference

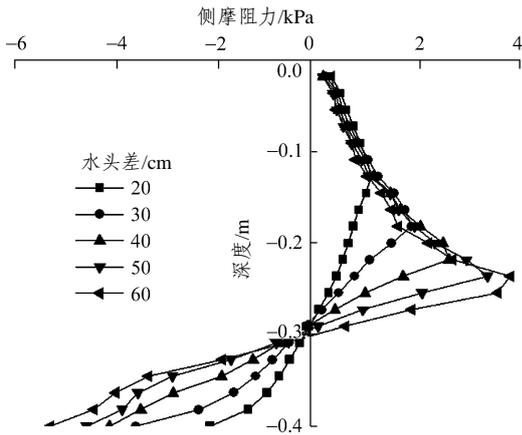


图 23 砂土中桩侧摩阻力与水头差的关系

Fig.23 Relationship between skin friction and water head difference in sand

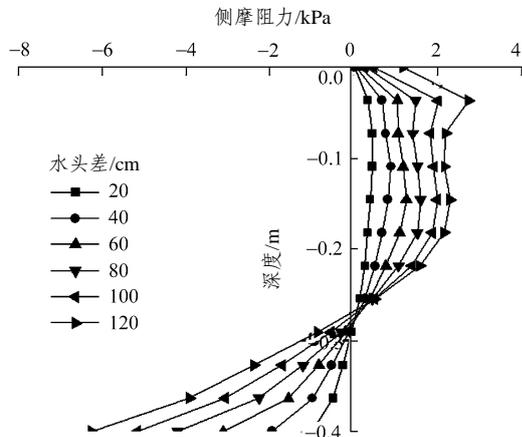


图 24 粉土中桩侧摩阻力与水头差的关系

Fig.24 Relationship between skin friction and water head difference in sandy silt

6 结论

本文研究表明,受渗透力的作用,围护结构底部土体首先进入塑性状态,当坑内土体形成贯通的塑性区时,即发生渗透破坏。在均质地基中,其模式为楔形体破坏。受黏聚力的影响,粉土破坏时的水头差较砂土大,同时基桩的影响也会增大破

坏时的水头差。

参考文献(References):

[1] HIS J P, CARTER J P, SMALL J C. Surface subsidence and drawdown of the water table due to pumping[J]. Geotechnique, 1994, 44(3): 381 - 396.

[2] FINNO R J, ATMATZIDIS D K, PERKINS S B. Observed performance of a deep excavation in clay[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1989, 115(8): 1 045 - 1 064.

[3] BORJA R I. Free boundary, fluid flow, and seepage forces in excavations[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1992, 118(1): 125 - 145.

[4] 李广信, 刘早云, 温庆博. 渗透对基坑水土压力的影响[J]. 水利学报, 2002, (5): 75 - 80.(LI Guangxin, LIU Zaoyun, WEN Qingbo. Influence of seepage on water and earth pressure in foundation pit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (5): 75 - 80.(in Chinese))

[5] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992.(LIU Jie. Soil infiltration stability and seepage control[M]. Beijing: China Water Power Press, 1992.(in Chinese))

[6] 陶同康. 土工合成材料与堤坝渗流控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(TAO Tongkang. Geosynthetics and dam seepage control[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))

[7] 吴良骥. 无黏性土管涌临界坡降的计算[J]. 水利水运科学研究, 1980, (4): 90 - 95.(WU Liangji. Piping critical gradient calculation in noncohesive soils[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1980, (4): 90 - 95.(in Chinese))

[8] 沙金焯. 多孔介质中的管涌研究[J]. 水利水运科学研究, 1981, (3): 89 - 93.(SHA Jinxuan. Piping analysis in porous medium[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1981, (3): 89 - 93.(in Chinese))

[9] 刘忠玉, 乐金朝, 苗天德. 无黏性土中管涌的毛管模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3 871 - 3 876.(LIU Zhongyu, YUE Jinchao, MIAO Tiande. Capillary-tube model for piping in noncohesive soils and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3 871 - 3 876.(in Chinese))

[10] TERZAGHI K. Simple tests determine hydrostatic uplift[J]. Eng. News Rec., 1936, 116(6): 872 - 875.

[11] MARSLAND A M S. Model experiments to study the influence of seepage on the stability of a sheeted excavation sand[J]. Geotechnique, 1953, 6(3): 223 - 241.

[12] BENMEBAREK N, BENMEBAREK S, KASTNER R. Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(2): 264 - 273.

[13] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.

[14] 胡展飞. 地下水对软土深基坑影响效应试验研究与工程应用[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2002.(HU Zhanfei. Test research on the mechanic character of soft soil during deep excavations considering the effect of underground water and engineering practice[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2002.(in Chinese))