

文章编号: 1000-5889(2005)01-0111-04

# 碎石桩内部的拱效应分析

蒋红英<sup>1</sup>, 鲁进步<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 技术工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 基于颗粒介质堆中应力传递的试验研究, 模拟碎石材料桩的压缩变形过程, 分析了在轴向静力荷载作用下, 碎石桩内部材料中的应力分布、位移形式、颗粒介质微观变化对宏观力学响应的影响、桩周土对桩体材料的作用及桩体材料拱效应的影响范围, 进而研究抑制拱效应、提高桩体承载力的问题. 研究表明, 利用微结构可以解释散体介质的许多特性, 解释散体材料桩破坏的内在机理.

**关键词:** 碎石桩; 拱效应; 应力分布; 承载力

**中图分类号:** TH 444 **文献标识码:** A

## Analysis of arch effect in gravel pile

JIAN G Hong ying<sup>1</sup>, LU Jin bu<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Technology and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** On the basis of experiment on force transfer in a disorder granular medium the compressional distortion of pile material is simulated the problems such as stress distribution, displacement manner in the pile material influence of microscopic change of the particle medium on microscopic mechanical response, action of the soil around the pile on the pile material and the area of influence of pile soil on the arch effect in pile material are analyzed when pile is subjected to an axial static load. Further the problems of restraint of arch effect and improvement of pile bearing capacity is investigated. Research result shows that the properties of granular medium can be well explained using micro structure and the interned mechanism for the change of pile can be understood.

**Key words:** gravel pile; pile surrounding soil; stress distribution; bearing capacity

## 1 碎石桩的拱效应

### 1.1 桩体材料的变形过程

散体材料桩在轴向静力荷载作用下的变形过程为: 1) 初始阶段. 桩中石块排列的重新定向与密实过程. 2) 峰值阶段. 桩体石块材料由剪缩迅即转为剪胀, 应力-应变曲线出现峰值, 峰值的大小与桩体材料的密度、摩擦及咬合作用有关. 3) 应变增大阶段. 随着轴向应力进一步增加, 桩体材料继续剪胀, 摩擦及咬合作用逐渐减小, 使桩边石块冲破围压的阻力, 离开桩体, 进入桩周土. 随着径向应变的增大, 咬合作用和剪胀现象——桩体破坏减少. 模拟压缩

实验结果见图 1、2<sup>[1]</sup>. 桩体材料受到的压力有  $F_z$ 、 $F_x$ 、 $F_y = F_x$ , 应力有  $\sigma_1 = \frac{4F_z}{\pi D}$ 、 $\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{4F_x}{\pi D}$  ( $D$  为桩直径). 图中:  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ,  $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ . 因此桩体材料受到静水压力及偏应力的作用.

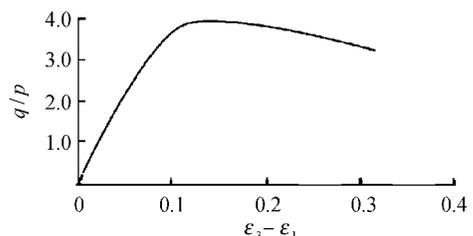


图 1 桩体材料的模拟压缩实验结果

Fig. 1 Experimental result of simulated compression of pile material

收稿日期: 2004-03-05

基金项目: 甘肃省自然科学基金(ZS 022-A 25-15)

作者简介: 蒋红英(1959-), 女, 浙江平湖, 副教授, 博士生.

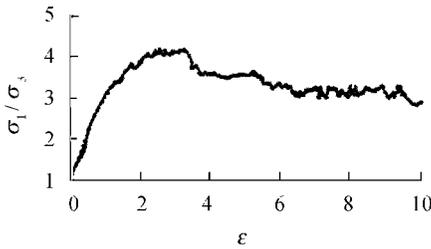


图 2 ANTONY S J<sup>[1]</sup> 三维颗粒系统模拟压缩实验结果

Fig. 2 Experimental result of simulated compression of 3D granule system by ANTONY S J<sup>[1]</sup>

### 1.2 桩体材料的位移

单个散体碎石桩可视为形状不均匀的碎石块颗粒集合. 散体桩中碎石块材料的应力是通过接触点传递的, 由于材料本身的形状、随机的位置等众多因素, 使它们之间存在着无规律的接触. 因此在轴向静力荷载作用下, 应力的传递是不均匀的, 应力分布也是无规律的<sup>[2]</sup>. 桩体材料颗粒堆应力传递模拟试验见图 3. 图中黑线是按比例描述的压力传递线, 灰色线是无力传递的接触线. 该试验满足散体颗粒本构模型的基本假设<sup>[3]</sup>. 试验结果表明, 由于颗粒之间的不规则接触, 当偏应力较小时, 一些颗粒受到的应力相对于其他颗粒受到的平均应力偏大, 而另一些颗粒接触不到应力; 当偏应力增加到一定程度时, 部分颗粒就会克服周围的约束力, 沿着滑移面的最不利位置开始滑移, 离开它附近的颗粒, 丧失了接触, 且“自组织”而形成 1 种新的稳定平衡状态, 从而使受到大应力颗粒的个数按负指数规律衰减<sup>[4]</sup>. 而接触不到应力的颗粒逐渐开始受力, 使石块中应力值都逐渐趋向 1 个平均值  $\bar{\sigma}$ . 颗粒的重新排列, 正是散体碎石桩早期易于发生的破坏现象(鼓胀)的原因. 根据颗粒滑动与转动的理论<sup>[5]</sup>可知, 若石块自身变形的比例可以忽略不计, 即认为石块是不可压缩的, 在外力作用下, 石块之间位置错动的形式见图 4.

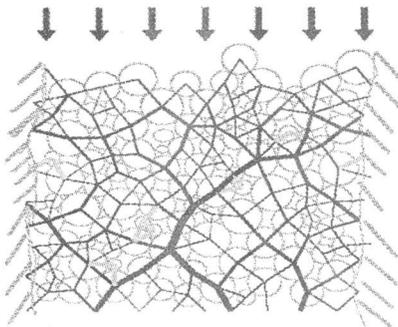


图 3 桩体材料颗粒堆中应力传递模拟试验

Fig. 3 Simulation experiment on stress transfer in pile material

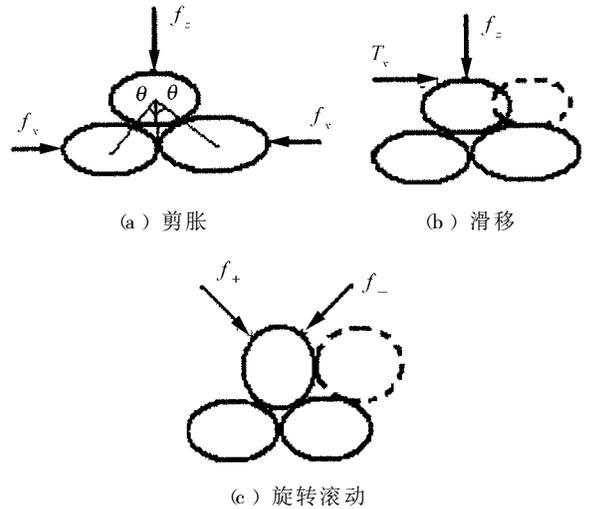


图 4 石块位置的错动形式

Fig. 4 Staggering pattern of rock's position

当  $f_z \geq f_{xc} \tan(\theta - \phi)$  时 ( $\theta$  为应力扩散角,  $\phi$  为石块表面摩擦角), 位于上面的石块在  $f_z$  的作用下, 被挤入下面的石块堆中. 应力扩散中, 剪切力的作用使上面的石块脱离了与下面石块的接触, 滑离了原来的位置. 当  $f_+ > f_-$  时, 上面的石块发生滚动. 这些微观上由拱效应引起的石块位移, 导致了宏观上破坏表现形式——鼓胀.

### 1.3 桩体材料径向力的传递

桩受到的平均垂直荷载力为对称的应力张量

$$\bar{\sigma}_i = \int_{-D/2}^{D/2} \bar{\sigma}_z(z, x) dx \quad (1)$$

式中:  $D$  是桩体直径. 离散的桩体材料决定了桩体必然产生拱效应. 拱效应引起桩体内石块之间剪胀和滑移. 在挤压力的作用下, 石块向有空隙的地方滑移, 向下一层挤入. 设某层中, 某 1 个离开桩的射线  $x$  方向上的挤压力是  $\max(\sum_{i=1}^n q_{ixk} f_{ix1}, \sum_{i=1}^n q_{ixk} f_{ix2}, \dots)$ , 则这个方向易于挤出. 式中:  $f_{ixk}$  是  $x$  方向上第  $k$  个石块受到第  $i$  个石块传过来的力;  $q_{ixk}$  是权重值. 设每 1 块石块具有相同的动、静摩擦系数 ( $\mu, \mu'$ ), 在深度  $h$  处桩壁上受到的挤压力为

$$f_x(h, n) = \sum_{i=1}^n f_x(h, i) - \sum_{i=1}^n \mu' f_z(h, i) \quad (2)$$

式中:  $f_z(h, i)$  是第  $h$  层中第  $i$  个石块位置上承受的正压力, 满足随机方程

$$f_z(h, i) = w_i + \sum_{j=1}^n f_z(h-1, j) \quad (3)$$

式中:  $w_i$  是第  $i$  个石块自身的质量;  $n$  为石块上部的接触点数;  $f_z(h-1, j)$  为在  $h-1$  深度处第  $j$  个石块位置传递到第  $h$  层中第  $i$  个石块位置上的轴向力.

被挤出的颗粒为<sup>[6]</sup>

$$n_{nu} = \frac{\pi d}{s_d} n_{section}$$

$$n_{section} = \sum_{i=1}^{mh} \sum_{j=i+1}^{nh} \delta(x_{ij} - D/2)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & (x_{ij} - D/2) > 0 \\ 0 & (x_{ij} - D/2) \leq 0 \end{cases}$$

$s_d$  为单位长度上的石块个数;  $m_h$  为深度范围  $h$  内石块的层数;  $n_h$  为  $h$  范围内石块的列数. 但在三维的桩体中,  $x$  方向上应力传递也为扩散加传导效应的抛物型或双曲型规律, 也具有拱效应, 因此横向传递的应力张量是不均匀的, 是 1 个随机变量(见图 3).

当桩边某 1 个石块所受到的偏应力  $\sum_{i=1}^m \alpha_x(h, i) > \bar{q}$  时, 石块就被挤入土中. 为满足桩体稳定性的要求, 桩壁上的应力值应该满足条件式

$$\sum_{i=1}^m \alpha_x(h, i) \approx \bar{q} \quad (4)$$

式中:  $\bar{q}$  为桩周土的平均围压应力.

## 2 桩壁的作用

桩周土对桩体材料的作用力有 2 个: 围压力和摩擦力(见图 5). 处于桩体边界上与桩体材料表面接触的, 受到侧向挤压后的桩周土, 可视为重塑土的本构模型(弹簧)<sup>[3]</sup>.

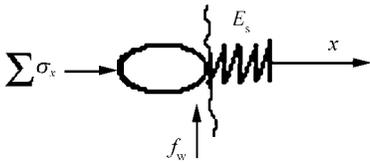


图 5 散体桩中石块材料与桩周土模型

Fig. 5 Model of rock material in pile with scattered bodies and soil around pile

土的压缩模量为  $E_s = \frac{d\bar{q}}{dx}$ , 而桩周土的围压应力  $\bar{q}$  应为平均围压应力  $\bar{q}$ <sup>[7]</sup>

$$\bar{q} = K_p(\bar{q}_0 + rh/2) \quad (5)$$

式中:  $\gamma$ 、 $\bar{q}_0$  分别为桩周土的重度与其顶面平均压力;  $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ ;  $\varphi$  为土体内摩擦角.

桩壁上的摩擦力为

$$f_w = \sum_{i=1}^m \alpha_x(h, i) \delta \quad (6)$$

式中:  $\delta = \tan(\varphi_p)$ ,  $\varphi_p$  是桩壁表面的摩擦角. 由于桩壁表面的形成与桩周土的软硬程度、桩体材料、施工手段等众多随机因素有关, 桩壁表面是粗糙的、凹凸不平的, 延深度方向呈波浪形或锯齿形, 曲面形态各异, 对于不均匀表面起伏高度的随机变量  $h$  的分布,

可近似地认为服从于正态分布<sup>[8]</sup>  $h = [1 \pm \alpha] \bar{h}$ . 式中:  $\bar{h}$  是表面起伏程度的平均值,  $\alpha$  是表示  $h$  在平均值  $\bar{h}$  附近凹凸波动的随机变量. 桩壁表面与桩体材料具有互嵌作用, 因此, 只有当桩体材料颗粒或桩周土体内产生位移时, 桩壁处才产生相对位移. 若桩壁上具有较大的摩擦力, 桩周土对桩体材料就有显著的谷仓效应<sup>[9]</sup>.

桩体材料颗粒的拱效应, 使偏应力张量不断传递到桩壁上, 而桩壁上的摩擦力又不断将部分竖向偏应力抵消. 因此桩体受到的轴向静力荷载是随桩深衰减的. 从颗粒堆加载试验得知, 受到集中力的颗粒堆, 上部是抛物型的应力扩散, 中部是圆柱型的应力下传, 下部应力范围逐渐缩小. 桩壁上受到桩周土的平均挤压力  $f_x$ , 沿桩体深度方向变化为: 当围压趋近于零时, 压力值约等于常数<sup>[10]</sup>; 当围压约等于  $const$  时, 其变化率可近似描述为

$$\frac{df_x}{dz} = \begin{cases} -\alpha^{-\alpha+1} & Z > 0 \\ -\lambda f_x & Z < Z_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\lambda$  均为  $E_s$  的函数;  $Z_0$  是  $f_x$  峰值所对应的深度值.

因此, 拱效应的发生区随着桩壁强度的增大而缩小. 若桩周土对桩体有比较高的围压, 可削弱桩体材料颗粒之间的剪胀性. 加强围压, 可提高桩体的承载能力. 围压和峰值强度关系曲线见图 6.

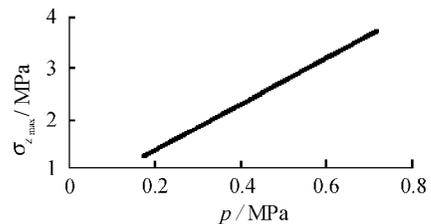


图 6 围压  $p$  和峰值强度关系曲线

Fig. 6 Relationship of surrounding pressure,  $p$ , to peak strength

偏应力作用下, 散体桩产生拱效应的主要影响因素是偏应力值和桩身材料的密实程度. 因此拱效应区的深度及拱效应的量同样也为随机变量. 根据单桩载荷试验测得的数据可知: 1) 轴向荷载影响下桩身径向应力随深度变化的曲线见图 8<sup>[11]</sup>; 2) 桩身材料密实程度影响下桩身径向应变随深度变化的曲线见图 9.

图 8 中, 每 1 级荷载可近似地认为是桩上径向应力的最大平均值  $\bar{\sigma}_{r,max}$  随桩上应力的初始平均值  $\bar{\sigma}_0$  线性增长的. 桩体径向应力的拟合式为

$$\bar{\sigma}_r = (ah + \bar{\sigma}_0) \exp\left[-\frac{h}{h^*}\right] \quad (8)$$

式中： $\bar{\alpha}_{x0} = \sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_i \tan \theta$ ， $\theta$  是应力分布角； $h^*$  为  $\bar{\alpha}_{x\max}$  所对应的深度； $a = a(\bar{\alpha}_{x0})$ ， $a$  随  $\bar{\alpha}_{x0}$  的增长呈线性增长。由图 8、9 可知，桩体径向位移高发区发生在近桩顶处。

取  $\bar{\alpha}_x = 0.001 \bar{\alpha}_{x\max}$ ，则拱效应区的平均深度为

$$h = \frac{1}{a} \left( \frac{0.001 \bar{\alpha}_{x\max}}{e^{-1}} - \bar{\alpha}_{x0} \right) \quad (9)$$

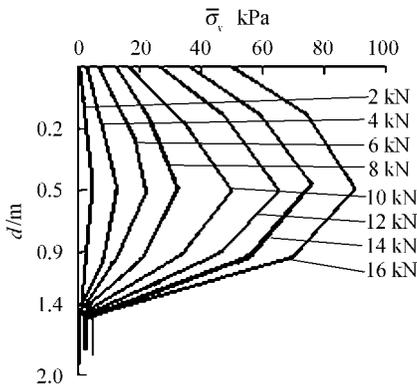


图 7 单桩载荷试验的桩身水平应力随深度  $d$  的变化曲线  
Fig. 7 Variation of horizontal strain in pile with its depth

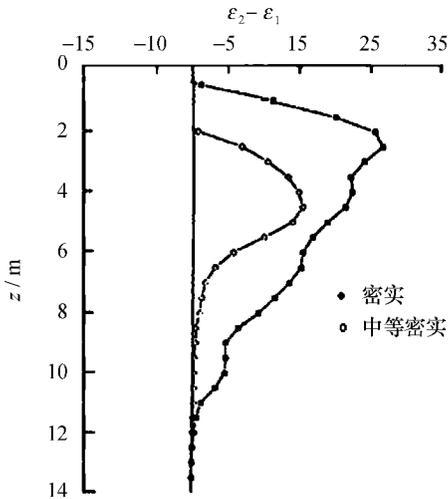


图 8 单桩载荷试验的桩身水平应变随深度  $d$  的变化曲线  
Fig. 8 Variation of horizontal strain in pile with its depth

### 3 结论

- 1) 加强桩周土对桩体的径向围压，降低桩土应力比，迫使桩周土承担较大的压力，可以削弱石块之间的剪胀性，抑制拱效应。
- 2) 提高桩体材料之间的咬合作用力、加大滑动摩擦角，可以增加桩内材料位移时的爬越难度及增加剪胀障碍。石块的摩擦系数与滑动面的粗糙程度

成正比，根据 BLAIR D L 等人<sup>[12]</sup>的理论，若颗粒之间形成了粗糙表面接触，颗粒之间的滑动可以减少 2/3。因此提高桩体材料的内聚力、内摩擦角可以提高散体碎石桩单桩极限承载能力。

3) 散体碎石材料桩是利用桩体的置换作用、良好的排水固结作用和桩间土的挤密作用形成复合地基的，所以桩体材料因排列密实、重新定向而引起的部分自组织和轻微体积膨胀，很快趋于稳定，这有利于挤密桩周土体，提高桩周土的变形模量，但桩体材料之间发生连续滑移，桩体就要发生流动变形。此外，还要考虑水的作用。从桩周土中排出的水流入了散体材料，产生石块间的孔隙压力；或者渗透了滑动界面，改变了滑动面的性质，降低了界面上正应力。因此有效正应力  $\sigma_t = \sigma - \sigma_w$  ( $\sigma_w$  是水对正应力削弱)。

### 参考文献:

- [1] ANTONY S J. Evolution of force distribution in three dimensional granular media [J]. Phys Rev E, 2000, 63(1): 011302-1-011302-12.
- [2] CLAUDIN P, BONCHONED J P. Static avalanches and Giant stress fluctuation in silos [J]. Phys Rev Letters, 1997, 78(2): 231-234.
- [3] 沈珠江. 理论土力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [4] SILVA M D, RAJCHENBACH J. Stress transmission through a model system of cohesionless elastic grains [J]. Letters to nature, 2000(8): 708-710.
- [5] ZHU H P, YU A B. Averaging method of granular materials [J]. APS Phys Rev E, 2002, 66(2): 021302-1-021302-10.
- [6] MUETH D M, JAEGER H M, NAGEL S R. Force distribution in a granular medium [J]. Phys Rev E, 1997, 57(3): 3 164-3 169.
- [7] 刘杰, 张可能. 散体材料桩复合地基极限承载力计算 [J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 204-207.
- [8] 张湘伟. 结构分析中的概率方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 170-174.
- [9] GENNES P G. Granular matter: A tentative view [J]. Review of Modew Phys, 1999, 71(2): 374-382.
- [10] DANIEL M M, HEINRICH M J, SIDNEY R N. Force distribution in a granular medium [J]. Phys Rev E, 1998, 57(3): 3 164-3 169.
- [11] 牛志荣. 复合地基处理及其工程实例 [M]. 北京: 中国建材出版社, 2000.
- [12] BLAIR D L, MUEGGENBURG N W, MARSHALL A H. et al. Force distribution in three dimensional granular assemblies: Effects of packing order and interparticle friction [J]. APS Phys Rev E, 2000, 63(4): 041304-1-041304-8.