

复合加载模式下条形浅基础地基承载力上限分析

张其一^{1,2}, 栾茂田^{*1,2}, 杨庆^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 土木水利学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对竖向荷载、水平荷载与力矩荷载共同作用下的条形基础,在塑性极限分析理论与 Meyerhof “等效宽度”概念的基础上,构造可变的运动许可速度场,推导了复合加载模式下条形基础承载力的上限解.为了证实上限解的合理性与适用性,采用了通用有限元软件 ABAQUS 进行了数值计算.结果表明,推导的条形基础上限解能够很好地求解复合加载模式下地基的极限承载力.

关键词: 复合加载; 等效宽度; 极限承载力; 条形基础; 上限分析

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A

0 引言

水利、港口、海洋工程结构物不仅受到结构物自身所引起的竖向荷载的长期作用,而且遭受到波浪、水流、暴风等引起的水平荷载和力矩荷载的作用.这些荷载通过基础传到地基上,从而使地基受到水平荷载、竖向荷载和力矩荷载的共同作用,这种加载模式一般定义为复合加载模式.复合加载模式下,地基极限承载力不仅与基础型式、地基土的强度有关,而且与荷载组合方式密切相关,承载力公式也往往在经典竖向极限承载力基础上进行修正.1954年 Green 给出了考虑竖向荷载与水平荷载共同作用的理论计算公式,该计算公式没有考虑力矩荷载的作用^[1].

1953年 Meyerhof 通过采用“等效宽度”的概念,提出了考虑竖向荷载和力矩荷载共同作用的理论计算公式,但没有考虑水平荷载的作用^[2].栾茂田等在极限平衡理论基础上,利用变分原理求解了条形基础在水平荷载与竖向荷载共同作用下的地基极限承载力^[3],该方法具有严密的理论基础,能够精确求解地基极限承载力,但是没有提供简单而实用的计算公式.

为了精确求解复合加载情况下地基的极限承载力,必须考虑土体的应力-应变本构关系,以及实际工程的初值条件或边值条件、加载路径与加载历史等情况^[4],一般情况下该方法很难找到问题的解析解,故针对该问题大都采用有限元方法进行数值求解.本文在国内外学者研究基础上,利用土体塑性极限分析原理^[5],采用各向同性的 Mohr-Coulomb 屈服准则与相关联的流动法则,在比例加载的条件下构造运动许可的速度场,推导条形基础在复合加载模式下承载力的上限解;并利用通用有限元软件 ABAQUS 对本文上限解的合理性与适用性进行数值验证.

1 复合加载模式下承载力上限分析

虚功率原理指出^[6,7]:对于任意一组静力容许的应力场和任意一组机动容许的速度场,外力虚功率等于物体内能耗散率.而且上限定理指出:在所有运动许可变形场(速度场)所对应的极限荷载中,真实的极限荷载最小.

根据土体塑性极限分析上限定理,针对宽度为 B 的条形基础,本文做出如下假定:(1) 条形基础

收稿日期: 2007-03-04; 修回日期: 2009-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579006, 50179006); 教育部跨世纪优秀人才培养计划研究基金资助项目(教技函[1998]2号).

作者简介: 张其一(1977-),男,博士生, E-mail: zhangqiyi@163.com; 栾茂田*(1962-),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: mtluan@dlut.edu.cn.

为完全刚性体,基础与地基间法向可以分离、切向完全粘结,基础宽度采用“等效宽度”;(2)地基材料为刚塑性体,满足相关联流动法则,且服从 Mohr-Coulomb 屈服准则与简单加载条件;(3)黏性土地基在复合加载情况下发生整体剪切破坏;(4)地基破坏区分为 3 部分:基础底部的主动破坏区、基础端部的塑性变形破坏区与基础外部的被动破坏区;(5)基础底部主动破坏区的破坏角度 α 按照 Mohr 破坏圆确定;(6)基础竖向初始速度为 v_0 。

复合加载模式下,按照 Meyerhof“等效宽度”的概念来考虑力矩荷载。由水平荷载、竖向荷载产生的力矩分别为 M_h 和 M_v ,作用在条形基础上的总力矩荷载为

$$M = M_v + M_h = (e_v + e_h \tan \delta) P_v B = e' P_v B \quad (1)$$

式中: $M_v = e_v B P_v$, $M_h = e_h B P_h$, $P_h/P_v = \tan \delta$, 其中 P_v 、 P_h 分别为基础上的竖向荷载与水平荷载, e_v 、 e_h 分别为竖向偏心距和水平偏心距, $e' = (e_v + e_h \tan \delta)$ 为等效偏心距, δ 为水平荷载与竖向荷载间夹角, B 为基础宽度,条形基础受力模型如图 1 所示。

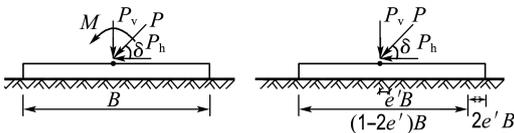


图 1 复合加载情况下条形基础受力模式
Fig. 1 The pattern of strip footing under combined loading

1.1 不排水情况下饱和软黏土地基

1.1.1 运动许可速度场的建立 针对复合加载情况下饱和黏性土地基上的条形基础,根据土体塑性极限分析理论,建立如图 2 所示的运动许可速度场。

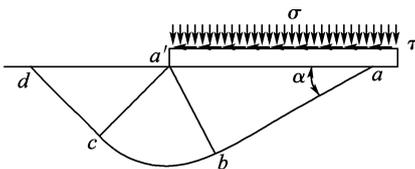


图 2 饱和软黏土地基复合加载情况下地基破坏模式

Fig. 2 The failure mode of saturated soft soil foundation under combined loading

通过 Mohr-Coulomb 破坏准则 ($\tau = c + \sigma \tan \phi$) 所对应的 Mohr 圆,可求得主动破坏区的滑裂角度 α ^[8],其中 Mohr 破坏圆如图 3 所示。

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{P_h}{B'c} \right) \quad (2)$$

式中: α 为地基破坏时的滑裂角度; $B' = (1 - 2e')B$, 为条形基础的等效宽度。

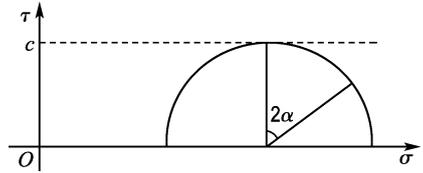


图 3 饱和软黏土地基 P_v 与 P_h 共同作用下的 Mohr 破坏圆

Fig. 3 The Mohr failure circle under P_v and P_h of saturated soft soil foundation

1.1.2 内能耗散率

(1) 速度间断面上内能耗散率为

$$W_{ab} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} B' c v_0 \quad (3)$$

$$W_{bc} = \left(\frac{\pi}{4} + \alpha \right) B' c v_0 \quad (4)$$

$$W_{cd} = B' c v_0 \quad (5)$$

(2) 扇形变形区内能耗散率为

$$W_{a'bc} = \left(\frac{\pi}{4} + \alpha \right) B' c v_0 \quad (6)$$

所以内能耗散率为

$$W_{in} = \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\pi}{2} + 2\alpha + 1 \right) B' c v_0 \quad (7)$$

1.1.3 外力功率 针对条形基础下地基破坏角度为 α 的情况,竖向荷载 P_v 与水平荷载 P_h 共同作用下的外力功率为

$$W_{ext} = P_v v_0 + P_h \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} v_0 \quad (8)$$

1.1.4 条形基础承载力上限解 根据上限分析定理中的虚功率原理,得条形基础承载力上限解为

$$P_v + P_h \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = B' c \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\pi}{2} + 2\alpha + 1 \right) \quad (9)$$

化简并进行整理得

$$\begin{cases} \frac{P_v}{B'c} = 1 + \frac{\pi}{2} + \arccos \left(\frac{P_h}{B'c} \right) + \\ \sqrt{1 - \left(\frac{P_h}{B'c} \right)^2}; & \frac{P_v}{B'c} \geq 1 + \frac{\pi}{2} \\ \frac{P_h}{B'c} = \pm 1; & 1 + \frac{\pi}{2} \geq \frac{P_v}{B'c} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

力矩方程为

$$\begin{cases} \frac{M}{B'^2c} = \frac{P_v}{B'c} \frac{(e_v + e_h \tan \delta)}{1 - 2(e_v + e_h \tan \delta)}; & e' \leq 0.25 \\ M = 0.65B^2c; & 0.50 \geq e' \geq 0.25 \end{cases} \quad (11)$$

由方程(11)可求得 P_v - P_h 平面内如图4所示的破坏包络图。由方程(11)、(12)可以做出 M - P_h - P_v 空间内如图5所示的破坏包络面。

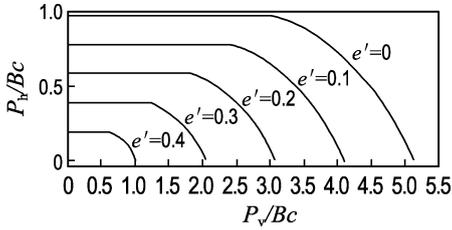


图4 饱和软黏土地基 P_v - P_h 平面内破坏包络图
Fig. 4 The failure envelope of saturated soft soil foundation in P_v - P_h plane

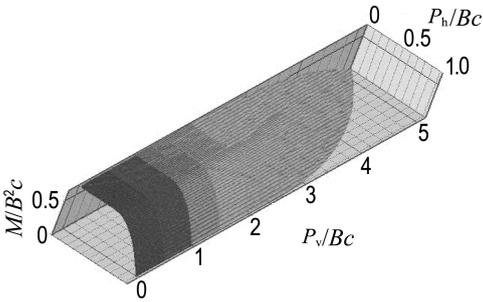


图5 饱和软黏土地基 M - P_h - P_v 空间内破坏包络面
Fig. 5 The failure envelope surface of saturated soft soil foundation in M - P_h - P_v space

当等效偏心距 $e' = 0$ 时,复合加载模式简化为只有水平荷载与竖向荷载的情况,极限承载力式(11)简化为式(1)所示的 Green 解析解。由式(2)与式(11)可知,当 $e' \neq 0$ 时,基础将受到竖向荷载、水平荷载与力矩荷载的共同作用,随着力矩荷载的逐渐增大,水平荷载与竖向荷载将逐渐减小, P_v - P_h 平面内水平荷载与竖向荷载随等效偏心距 e' 的变化曲线如图4所示,当力矩荷载一定时,竖向荷载随着水平荷载的增大而减小, M - P_h - P_v 空间内水平荷载、竖向荷载与力矩荷载共同构成的外凸破坏包络面如图5所示。

1.2 一般黏性土地基

1.2.1 运动许可速度场的建立 针对复合加载情况下黏性土地基上的条形基础,建立如图6所示的运动许可速度场。通过 Mohr-Coulomb 破坏准

则 ($\tau = c + \sigma \tan \phi$) 所对应的 Mohr 圆可求得主动破坏区的滑裂角度 α ,其中 Mohr 圆如图7所示。

$$R = \left(c + \frac{P_{vmax}}{B'} \tan \phi \right) \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\phi}{2} + \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{P_h}{RB'} \right); & P_h \in [0, R] \\ \alpha = \frac{\phi}{2} - \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{P_h}{RB'} \right); & P_h \in [R \cos \phi, R] \end{cases} \quad (13)$$

式中: $B' = (1 - 2e')B$ 为条形基础的等效宽度, P_{vmax} 为单一竖向荷载作用下的地基极限承载力, R 为 Mohr 圆半径, ϕ 为地基土体内摩擦角。

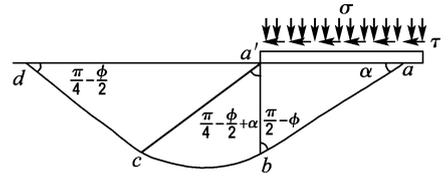


图6 一般黏土地基复合加载情况下地基破坏模式
Fig. 6 The failure mode of general soil foundation under combined loading

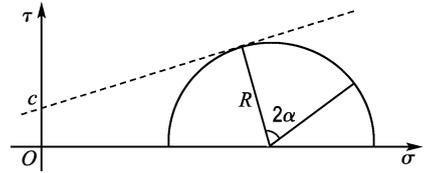


图7 一般黏土地基 P_v 与 P_h 共同作用下的 Mohr 破坏圆
Fig. 7 The Mohr failure circle under P_v and P_h of general soil foundation

1.2.2 内能耗散率

(1)速度间断面上内能耗散率为

$$W_{ab} = \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} + \phi - \alpha \right) \cos \phi}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right)} B' c v_0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} W_{bc} &= \frac{\sin \alpha}{2 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi} \\ &\times \left(\exp \left[\tan \phi \left(\frac{\pi}{2} - \phi + 2\alpha \right) \right] - 1 \right) B' c v_0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$W_{cd} = \frac{\sin \alpha}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right)} \exp \left[\tan \phi \left(\frac{\pi}{2} - \right.$$

$$\phi + 2\alpha) \Big] B'c v_0 \quad (16)$$

(2) 扇形变形区内能耗散率为

$$W_{a'bc} = \frac{\sin \alpha}{2 \tan \phi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right) \cos \phi} \times \left\{ \exp \left[\tan \phi \left(\frac{\pi}{2} - \phi + 2\alpha \right) \right] - 1 \right\} B'c v_0 \quad (17)$$

(3) 重力功率为

$$W_{\text{grav}} = \frac{B^2 \gamma v_0 \sin \alpha}{2 \cos \phi} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \phi - \alpha \right) + \frac{B^2 \gamma v_0 \sin^2 \alpha \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}{2 \cos \phi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right)} \times \exp \left[3 \tan \phi \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) \right] + v_0 \frac{\cos \left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4} \right)}{1 + 9 \tan^2 \phi} f_1(\alpha) + v_0 \frac{\sin \left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4} \right)}{1 + 9 \tan^2 \phi} f_2(\alpha) \quad (18)$$

式中

$$f_1(\alpha) = \exp \left[3 \tan \phi \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) \right] \times \left[3 \tan \phi \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) - \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) \right] + 1 \quad (19)$$

$$f_2(\alpha) = \exp \left[3 \tan \phi \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) \right] \times \left[\sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) + 3 \tan \phi \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) \right] - 3 \tan \phi \quad (20)$$

所以内能耗散率为

$$W_{\text{in}} = W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{a'bc} - W_{\text{grav}} \quad (21)$$

1.2.3 外力功率 针对条形基础下地基破坏角度为 α 的情况,计算竖向荷载 P_v 与水平荷载 P_h 作用下的外力功率为

$$W_{\text{ext}} = P_v v_0 + P_h v_0 \tan \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right) \quad (22)$$

1.2.4 条形基础承载力上限解 根据上限分析

定理可知外力总功率等于内能耗散率,因此条形基础承载力上限解为

$$P_v + P_h \tan \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right) = B'c \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} + \phi - \alpha \right) \cos \phi}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right)} + B'c \frac{\sin \alpha}{2 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi} \times \left(\exp \left[\tan \phi \left(\frac{\pi}{2} - \phi + 2\alpha \right) \right] - 1 \right) + B'c \frac{\sin \alpha}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right)} \exp \left[\tan \phi \left(\frac{\pi}{2} - \phi + 2\alpha \right) \right] + B'c \frac{\sin \alpha}{2 \tan \phi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right) \cos \phi} \times \left\{ \exp \left[\tan \phi \left(\frac{\pi}{2} - \phi + 2\alpha \right) \right] - 1 \right\} + \frac{B^2 \gamma \sin \alpha}{2 \cos \phi} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \phi - \alpha \right) + \frac{B^2 \gamma \sin^2 \alpha \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}{2 \cos \phi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi \right)} \times \exp \left[3 \tan \phi \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} + \alpha \right) \right] + \frac{\cos \left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4} \right)}{1 + 9 \tan^2 \phi} f_1(\alpha) + \frac{\sin \left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4} \right)}{1 + 9 \tan^2 \phi} f_2(\alpha) \quad (23)$$

式中: $f_1(\alpha)$ 、 $f_2(\alpha)$ 见式(19)、(20)。由式(23)可以求得水平荷载 P_h 与竖向荷载 P_v 在 P_v - P_h 平面内的破坏包络图。按照式(1)可以求得力矩荷载 M ,并能绘制 M - P_h - P_v 空间内的破坏包络面。针对 $c = 12 \text{ kPa}$, $\phi = 24^\circ$ 的情况,利用式(23)可以做出 P_v - P_h 平面内的破坏包络图如图8所示,以及图9所示的 M - P_h - P_v 空间内的破坏包络面。

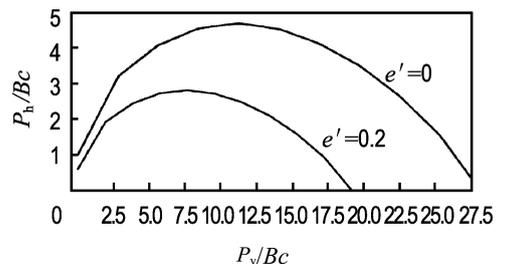


图8 一般黏性土地基 P_v - P_h 平面内破坏包络图

Fig. 8 The failure envelope of general soil foundation in P_v - P_h plane

复合加载模式下, P_v - P_h 平面内竖向荷载、水平荷载随着等效偏心距 e' 的增大而逐渐减小, 当偏心距一定时, 水平荷载首先随着竖向荷载的减小而增大, 然后随着竖向荷载的减小而减小, 变化曲线如图 8 所示. M - P_h - P_v 空间内水平荷载、竖向荷载与力矩荷载共同构成的外凸破坏包络面如图 9 所示.

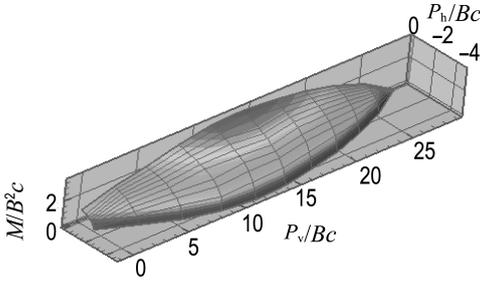


图 9 一般黏性土地基 M - P_h - P_v 空间内破坏包络图

Fig. 9 The failure envelope surface of general soil foundation in M - P_h - P_v space

2 复合加载模式下承载力数值分析

2.1 ABAQUS 数值模型

为了进一步验证上限解的合理性与适用性, 本文采用了通用有限元软件 ABAQUS 对复合加载模式下条形基础极限承载力进行了数值计算. 有限元模型包括: 条形基础与黏性土地基, 如图 10 所示. 基础宽度取为 B , 采用刚性单元 (R2D2); 黏性土地基长度取为 $20B$, 深度取为 $10B$, 采用八节点矩形平面单元 (CPE8R), 刚性基础与黏性土地基间为完全粘结. 饱和软黏土地基力学参数: 弹性模量 $E = 5.8 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.49$, 内聚力 $c = 12 \text{ kPa}$, 摩擦角 $\phi = 0^\circ$. 黏性土地基力学参数: 弹性模量 $E = 5.8 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.4$, 内聚力 $c = 12 \text{ kPa}$, 摩擦角 $\phi = 24^\circ$.

采用荷载-位移控制法来求解地基的破坏包

络面. 具体的求解过程包括以下 3 个步骤:

- (1) 在条形基础中心点施加力矩荷载 M_i ;
- (2) 在力矩荷载 M_i 的基础上, 在条形基础中心点施加竖向荷载分量 P_{vi} ;
- (3) 在(1)、(2)的基础上, 在基础中心点施加水平位移 U_h , 直到相应的水平荷载不再随位移的增加而变化, 此时求得水平荷载即为极限荷载.

通过上述加载过程可以求得破坏包络面上一个破坏点 (M_i, P_{vi}, P_{hi}) . 按照该荷载-位移控制法, 逐渐改变基础中心点处的荷载分量, 最终可以求得破坏包络面上所有的破坏点.

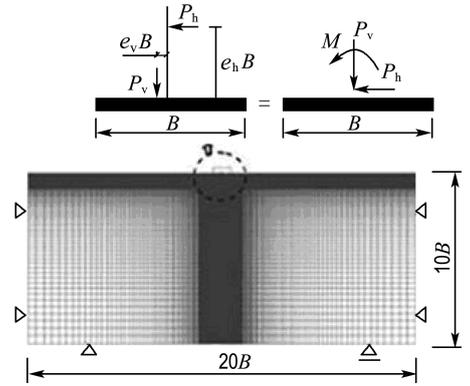
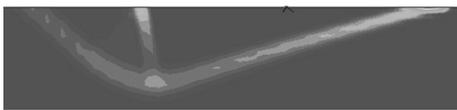


图 10 有限元计算模型

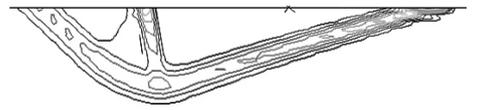
Fig. 10 The numerical model of finite-element method

2.2 不排水情况下饱和软黏土地基

2.2.1 地基破坏模式 针对等效偏心距 $e' = 0.2$, $P_v/P_h = 5$ 的情况进行数值计算, 求得破坏模式如图 11 所示. 图 11 表明: 复合加载情况下, 地基破坏模式呈现非对称性, 不再是 Prandtl 对称性破坏模式. 破坏区域包括三部分: 基础下方的三角形主动区、基础端部的扇形变形区和基础外部的三角形 Rankine 被动区. 将该破坏模式与图 2 所示速度场进行对比, 结果发现: 按照滑移线场理论所假定的破坏模式和有限元数值计算所得到的破坏模式一致.



(a) 等效塑性应变 ϵ_p 分布云图



(b) 等效塑性应变 ϵ_p 等值线图

图 11 ABAQUS 计算所得饱和软黏土地基内等效塑性应变 ϵ_p 分布图

Fig. 11 The distribution of ϵ_p in saturated soil foundation under combined loading calculated by ABAQUS

2.2.2 结果分析 针对 $e' = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 等 5 种不同的等效偏心距, 对复合加载情况下地基的极限承载力及其破坏模式进行了数值计算, 计算所得到的水平荷载与竖向荷载平面内的极限荷载包络图如图 12 所示. 通过对本文上限解与 ABAQUS 数值解的对比与分析, 可以发现: (1) 地基承载力上限解所形成的破坏包络图同有限元数值计算结果十分吻合; (2) 当作用在条形基础上的力矩荷载恒定时, 随着基础上水平荷载的逐渐增大, 竖向荷载呈逐渐减小趋势.

ABAQUS 有限元数值模拟的饱和软黏土地基破坏模式, 可以归结为如下 3 种情况: (1) 水平偏心距 e_h 较大时的倾覆破坏; (2) 基础与地基间的表层滑动破坏; (3) 地基深层滑动破坏, 如图 13 所示. 由图 13 可知: (1) 当地基与基础接触面间水平剪应力大于最大抗剪强度 τ_f 时, 地基发生表层

滑动破坏, 破坏角度 $\alpha = 0^\circ$, 如图 13(2) 所示. (2) 当竖向荷载 $P_v > (1 + \pi/2)B'c$ 时, 地基发生深层滑动破坏, 如图 13(3) 所示. 可按式(3) 计算滑裂面角度 α . (3) 当水平偏心距 e_h 较大时, 条形基础发生倾覆破坏, 如图 13(1) 所示.

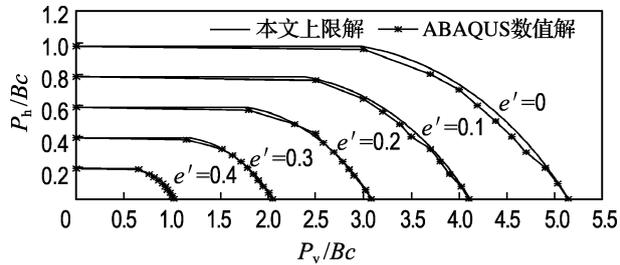


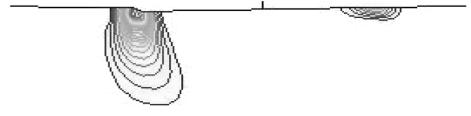
图 12 饱和软黏土地基本文理论解与数值解计算结果对比图

Fig. 12 The comparison of results of saturated soil foundation between upper-bound solution and the solution of ABAQUS

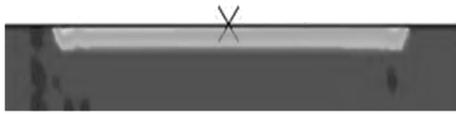


(a) 倾覆破坏云图

(1) 基础倾覆破坏

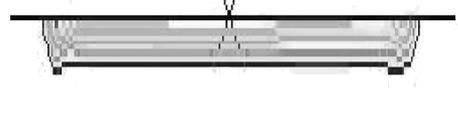


(b) 倾覆破坏等值线图

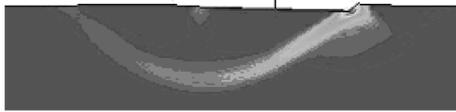


(a) 表层滑动破坏云图

(2) 地基表层滑动破坏

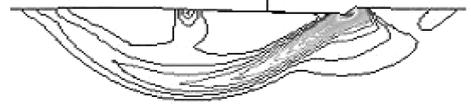


(b) 表层滑动破坏等值线图



(a) 深层滑动破坏云图

(3) 地基深层滑动



(b) 深层滑动破坏等值线图

图 13 复合加载情况下饱和软黏土地基 3 种不同的破坏模式

Fig. 13 The three failure modes of saturated soil foundation under combined loading

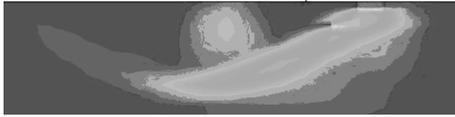
2.3 一般黏性土地基

2.3.1 地基破坏模式 针对等效偏心距 $e' = 0.2$ 、 $P_v/P_h = 5$ 的情况进行数值计算, 求得破坏模式如图 14 所示. 破坏区域包括三部分: 基础下方的三角形主动区、基础端部的螺旋变形区和基础外部的三角形 Rankine 被动区. 将该破坏模式

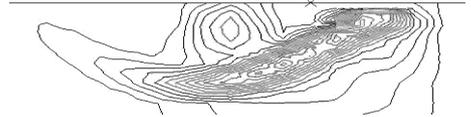
与图 6 所示速度场进行对比, 结果发现: 按照滑移线场理论所假定的破坏模式和有限元数值计算所得到的破坏模式一致.

2.3.2 结果分析 针对 $e' = 0$ 与 $e' = 0.2$ 两种情况, 对复合加载情况下地基的极限承载力及其破坏模式进行了数值计算, 计算结果如图 15 所

示.由图 15 可知:(1)复合加载模式下,条形基础 承载力上限解所形成的包围图同有限元数值计算



(a) 等效塑性应变 ϵ_p 分布云图



(b) 等效塑性应变 ϵ_p 等值线图

图 14 ABAQUS 计算所得到的黏性土地基内等效塑性应变 ϵ_p 分布图

Fig. 14 The distribution of ϵ_p in soil foundation under combined loading calculated by ABAQUS

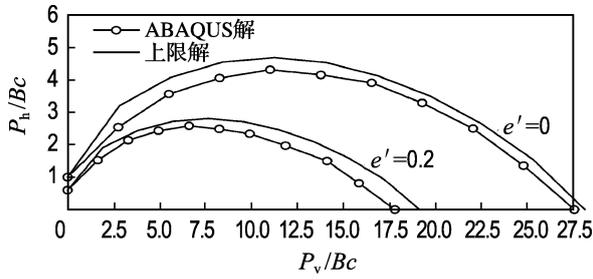
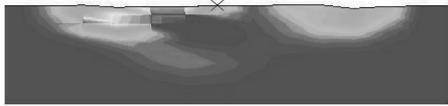


图 15 黏性土地基本文理论解与数值解计算结果的对比

Fig. 15 The comparison of soil foundation of results between upper-bound solution and the solution of ABAQUS

结果十分吻合;(2)当条形基础上力矩荷载恒定时,基础上的水平荷载首先随着竖向荷载的减小而增大,然后随着竖向荷载的减小而减小.

将图 16 与图 13 进行对比分析可知,复合加载情况下,黏性土地基破坏模式同饱和软黏土地基破坏模式一致.包括:(1)水平偏心距 e_h 较大时的倾覆破坏;(2)条形基础与地基间的表层滑动破坏;(3)地基深层滑动破坏.

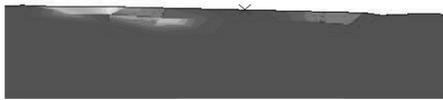


(a) 基础倾覆破坏云图

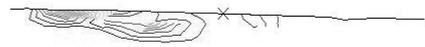


(b) 基础倾覆破坏等值线图

(1) 倾覆破坏

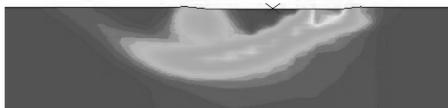


(a) 地基表层滑动破坏云图

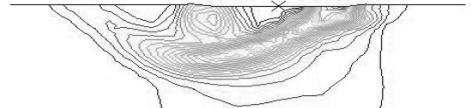


(b) 地基表层滑动破坏等值线图

(2) 地基表层滑动破坏



(a) 地基深层滑动破坏云图



(b) 地基深层滑动破坏等值线图

(3) 地基深层滑动破坏

图 16 复合加载情况下黏性土地基 3 种不同的破坏模式

Fig. 16 The three failure modes of soil foundation under combined loading

3 结 论

(1)文中提出的承载力上限解,考虑了水平荷载、竖向荷载与力矩荷载的共同作用,能够很好地

求解复合加载情况下地基的极限承载力,同时表明文中提出的运动许可速度场是一个真实的速度场.

(2)水平荷载偏心距 e_h 对地基的深层滑动破

坏模式影响较小;而对地基的浅层滑动破坏模式影响较大,容易造成建筑物发生倾覆破坏.

参考文献:

- [1] GREEN A P. The plastic yielding of metal junctions due to combined shear and pressure [J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1954, **2**:197-211
- [2] 郑大同. 地基极限承载力的计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979
- [3] 栾茂田, 金崇磐, 林 皋. 水平与竖直荷载共同作用下非均质地基的稳定性[M]// 中国土木工程学会第五届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990:212-219
- [4] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [5] 张学言, 闫澍旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004
- [6] 王 仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982
- [7] SOUBRA A H. Upper-bound solutions for bearing capacity of foundations [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1999, **125**(1):59-68
- [8] 武汉水利水电学院. 土力学及岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1979
- [9] MERIFIELD R S, NGUYEN V Q. Two- and three-dimensional bearing-capacity solutions for footings on two-layered clays [J]. **Journal of Geomechanics and Geoengineering**, 2006, **1**(2): 151-162

Upper-bound limit analysis of bearing capacity of strip footing due to combined loading

ZHANG Qi-yi^{1,2}, LUAN Mao-tian^{*1,2}, YANG Qing^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the Meyerhof's effective width of strip footing and the plastic limit analysis theory, an upper-bound solution of strip footing under vertical, horizontal and moment loads due to combined loading is presented by constructing variable permissive moving field. In order to verify the rationality and applicability of this theoretical solution, numerical solution is achieved by using the general-purpose FEM analysis package ABAQUS. The results indicate that the upper-bound solution of strip footing due to combined loading is accurate to calculate the bearing capacity of foundation perfectly.

Key words: combined loading; effective width; bearing capacity; strip footing; upper-bound limit analysis