

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0249-05

载荷试验有限元数值模拟

邓楚键¹, 唐晓松¹, 郑颖人¹, 吴相超²

(1 后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 长江科学院重庆岩基研究中心, 重庆 400014)

摘 要: 载荷试验是目前世界各国用以确定地基承载力的最主要方法, 在地基处理效果检验中被广泛采用, 然而载荷试验在实际操作过程中也存在不少问题, 如尺寸效应、费用高、工期长等。新兴的有限元等数值方法克服了以往耗时量大、操作复杂、精度不足等缺点, 已逐渐成为岩土工程领域有效的实用计算方法。鉴于上述原因, 尝试用增量加载有限元法对载荷试验进行数值模拟。算例结果表明, 只要强度参数与实际情况相符, 载荷试验的结果可以通过有限元模拟获取。

关 键 词: 载荷试验; 增量加载; 有限元; 极限承载力

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Numerical analysis of the plate loading test

DENG Chu-jian¹, TANG Xiao-song¹, ZHENG Ying-ren¹, WU Xiang-chao²

(1. Logistical Engineering University, Chongqing, 400041, China;

2. Chongqing Rock Center of Yangtze River Scientific Research Institute, ChongQing, 400014, China)

Abstract: The Plate Loading Test is the most used way to acquired the bearing capacity of foundation in the world and it's widely used in checking the results of the treatment foundation, but it also has some shortcomings, including size effects, high expense, time cost and so on. In this paper the FEM by step-loading was used to analyze the process of the Plate Loading Test and to obtain the bearing capacity of foundation. A lot of valuable results was got.

Key words: the plate loading test; step-loading; FEM; bearing capacity

1 引 言

地基承载力的确定是经典的课题, 它直接关系到建筑物的安全性及经济性, 备受建设单位、结构工程师、施工企业等多方面的关注, 也是众多学者研究的问题所在。岩土工程是一个实践性很强的学科, 岩土材料的时空变异性及地域性使得对地基承载力的评价尚停留在经验阶段, 因此, 如何评价地基承载力是当前急需解决的问题。一般认为, 地基的原位载荷试验在各类地基承载力测试中因能较真实地模拟岩土体的原始受力状态, 所提供的承载力参数比较可靠, 也较能挖掘地基的承载潜力, 因此, 载荷试验常作为其他承载力测试的对比依据, 在实际工作中, 当地基承载力数据不易获得或不可靠时, 载荷试验往往是最权威的解决方法。它是目前世界各国用以确定地基承载力的最主要方法, 同时在地基处理效果检验中被广泛采用。然而载荷试验费用

高、工期长, 不易推广; 另外, 载荷试验相当于地基受力状态的模型试验, 存在不少问题^[1]。随着岩土理论、现代计算技术及计算机软、硬件的飞速发展, 有限元等数值方法克服了以往耗时量大、操作复杂、精度不足等缺点, 已逐渐成为岩土工程领域有效的实用计算方法^[2-5], 文献[4]详细探讨了有限元法在地基极限承载力求解中的应用, 通过与理论解的比较, 已达到相当高的精度。基于此, 本文尝试用增量加载有限元法对载荷试验进行数值模拟。

2 平板载荷试验

平板载荷试验是模拟建筑物基础工作条件的一种测试方法, 起源于 20 世纪 30 年代的苏、美等国^[6]。该方法是在保持地基土的天然状态下, 在一定面积的承压板上逐级向地基土施加静力荷载, 观测各级荷载作用下的沉降, 根据荷载-沉降关系曲线确定地基承载力, 计算地基土的变形模量。分析载

荷-沉降曲线,一般可分为 3 个阶段:

(1) 直线变形阶段,此阶段荷载小于比例界限,土被压密,荷载与变形的关系接近直线关系。

(2) 局部剪裂阶段,此阶段荷载与变形不再保持直线关系,曲线上各点的斜率逐渐增大。此时,土在压密的同时在局部范围发生剪裂,荷载板下出现塑性变形区。随着荷载的增加,塑性变形区逐渐扩大,沉降显著增加。

(3) 完全破坏阶段,此阶段随着荷载增加,沉降连续急剧下沉。地基土中的塑性区连成连续的滑动面,土从荷载板下挤出来,形成隆起的土堆,地基完全破坏,丧失稳定。

3 荷载试验有限元数值模拟

3.1 增量加载

在工程实际中土的破坏往往是一个渐进性的过程,土体是由初始的线性弹性状态逐渐过渡到塑性流动的极限破坏状态的。本文采用增量加载的方式模拟荷载试验的加载过程就是这一思路下的产物。随着荷载的逐步增加,土体由线弹性逐渐过渡到塑性(过渡点为弹性临界点),最后达到极限状态,这时对应的荷载就为极限荷载。在增量加载的过程中可以追踪分析每一步加载后地基沉降的状况。本文采用的 ANSYS 有限元软件能够极为方便地实现这一加载求解过程。在求解的过程中根据荷载试验的加载过程定义各个荷载步大小,而后再定义一个荷载值及最大荷载步长与最小荷载步长。当所采用的荷载步长计算不收敛时,程序本身便会自动采用二分法对步长进行折减直至这一步计算收敛为止。若荷载步长折减到最小步长时计算不收敛,而此时随着计算的迭代次数的增加,计算越来越趋近于收敛标准,则此时所对应的施加的荷载值便为极限荷载值。

在增量加载的过程中,每一个荷载增量步中纯粹的增量近似不可避免地要随着每一个荷载增量积累误差,运用牛顿-拉斐逊(Newton-Raphson)迭代算法可克服这一困难,它可迫使荷载增量的末端解达到平衡收敛(在某个容限范围内)。牛顿-拉斐逊迭代法在固体力学中是求解非线性问题时应用最广的方法,它具有较高的计算精度及较快的收敛速度。图 1 为一次牛顿-拉普森迭代过程示意图。计算过程中需要反复迭代,重复这个过程直到前后两次计算结果充分接近为止,然后进行下一步的计算。图 2 为增量加载时对应的牛顿-拉斐逊迭代过程。

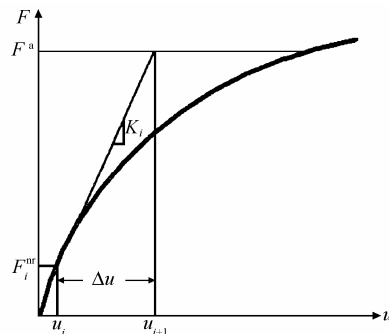


图 1 牛顿-拉斐逊迭代示意图

Fig.1 Newton-Raphson iteration

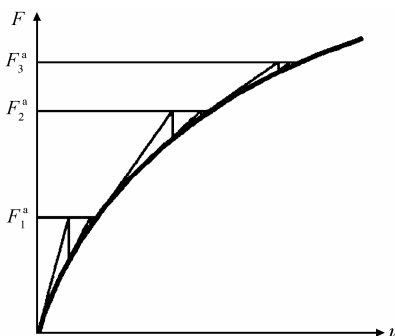


图 2 增量牛顿-拉斐逊迭代法

Fig.2 Increment Newton-Raphson iteration

3.2 本构模型

本构模型的选用是整个有限元计算的核心问题,它对结果的影响很大。现有的地基极限承载力的计算是建立在莫尔-库仑屈服准则之上的,诸多计算结果表明,运用理想弹塑性模型和莫尔-库仑屈服准则即可获得比较精确的极限荷载值,然而由于莫尔-库仑屈服准则在三维空间的屈服面为不规则的六角形截面的角锥体表面,在 π 平面上的图形为不等角六边形,存在尖顶和菱角(图 3),给数值计算带来困难。本文采用在 π 平面上为圆形,在主应力空间的屈服面为光滑圆锥的广义 Mises 系列屈服准则(图 3)来匹配各种情况下的莫尔-库仑屈服准则。广义 Mises 准则是在 Mises 强度准则的基础上,考虑平均应力 p 或 I_1 ,而将 Mises 强度准则推广成为以下形式:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式中: I_1 为应力张量的第一不变量, J_2 为应力偏量的第二不变量, α , k 均为有关材料参数,不同的 α , k 对应不同的准则(表 1)。

对于地基的强度计算,应用相应的 M-C 匹配屈服准则就可取得很好的精度^[4],而对地基的位移进行求解,笔者则是首次尝试。

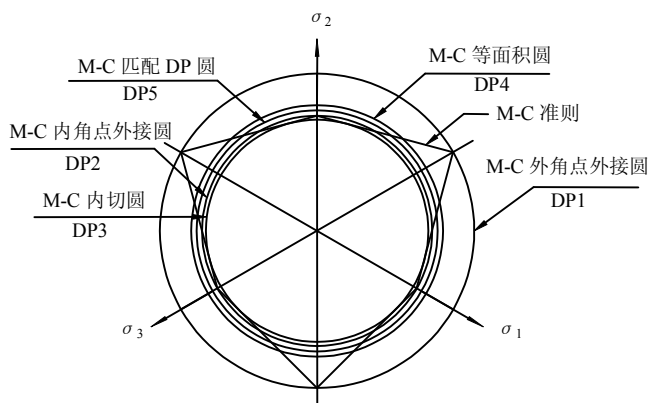


图3 各屈服准则在 π 平面上的曲线
Fig.3 The yield surface on the deviator plane

表1 各准则参数换算表
Table 1 The relationship of different yield criteria

编号	准则种类	α	k
DP1	M-C 外角点 外接圆	$\frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$	$\frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$
DP2	M-C 内角点 外接圆	$\frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}$	$\frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}$
DP3	M-C 内切圆	$\frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$	$\frac{3c \cos \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$
DP4	M-C 等面积圆	$\frac{2\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \varphi)}}$	$\frac{6\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \varphi)}}$
DP5	M-C 匹配 DP 圆 (非关联流动法则)	$\frac{\sin \varphi}{3}$	$c \cos \varphi$

在载荷试验中，一般采用方形或圆形刚性承压板，在这两种情况下，地基受力属于三维问题，应力状态比较复杂，由于数学上的困难，至今还没有从理论上推导出极限荷载计算公式，一些经验公式^[7]则表明，它们和条形地基相差不大。在有限元中，若采用 DP1(M-C 外角点外接圆屈服准则)，则计算结果偏大，而 DP3(M-C 内切圆屈服准则)在平面应变条件下与 M-C 精确匹配的屈服准则。综合考虑其受力状态及安全因素，屈服准则选择 DP3，应用理想弹塑性本构模型进行求解。

4 算例

4.1 计算参数

土体的抗剪强度参数 c ， φ 值是数值模拟中的关键参数，可通过现场直接剪切试验、室内直接剪切试验或室内三轴剪切试验来确定。

图4及表2为某工程地基某一载荷试验点 试验结果。在压力 380 kPa 前，曲线近于直线；曲线出现第 1 拐点之后，荷载逐渐增加到 960 kPa。在压力加到 1 060 kPa 时，承压板周边土体出现明显隆起，

表明地基土体已达到破坏，终止试验，此时曲线呈下凹型。因此，该点地基土的极限承载力按规范取为 960 kPa，对应的沉降为 29.16 mm，比例界限取为 380 kPa。由于比例界限小于 1/2 倍的极限承载力，故取承载力特征值为 380 kPa。

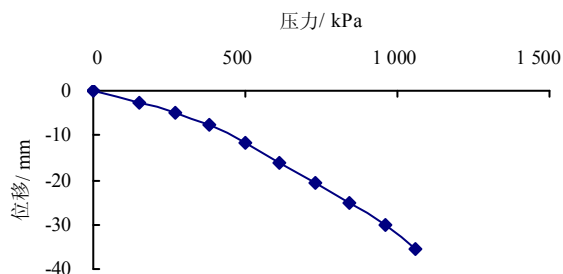


图4 试点 $p-s$ 曲线
Fig.4 $p-s$ relation

表2 试点压力-位移关系
Table 2 The relation of $p-s$

压力/kPa	150	270	380	500	610	730	840	960	1 060
位移/mm	2.69	5.14	8.12	12.41	16.38	20.74	24.98	29.16	33.20

该试点的相关参数： $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 32.5 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 30.2^\circ$ 。泊松比 $\mu = 0.27$ ，土体的变形模量 E 可根据 $p-s$ 曲线的初始直线段按下式计算：

$$E = I_0(1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (2)$$

式中： I_0 为刚性承压板的形状系数，圆形承压板取 0.785； μ 为土的泊松比； d 为承压板直径(m)； p 为 $p-s$ 曲线线性段的压力(kPa)； s 为与 p 对应的沉降(mm)。经过计算得 $E = 17 \text{ MPa}$ 。另外， E 也可通过室内压缩试验^[7]确定，泊松比 μ 也可通过侧压力系数试验^[7]按下式确定：

$$\mu = \frac{k_0}{1 + k_0} \quad (3)$$

式中： k_0 为静止侧压力系数。

4.2 有限元模型

试验中由于采取圆形刚性承压板，故这是一个轴对称模型，有限元模型及网格剖分如图5所示，屈服准则选择 DP3，应用理想弹塑性本构模型进行求解。

4.3 有限元计算结果

应用增量加载模拟载荷试验过程，共分 12 个载荷步，具体情况见表3。通过有限元求得其极限荷载值为 1 140 kPa。表4及图6分别为载荷试验和有限元模拟结果的 $p-s$ ，从中可以看出，其结果与试

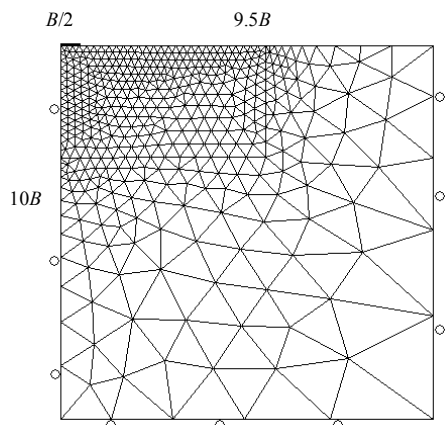


图5 有限元模型及网格剖分
Fig.5 FEM model and meshing

验结果基本一致, 在压力 380 kPa 前两曲线吻合的很好, 此后至 960 kPa 这一段两曲线稍微有点出入, 而 960 kPa 后两曲线又吻合得很好, 这说明只要 E , μ , c , φ 等强度参数只要比较接近实际情况, 载荷试验中沉降的有限元计算也是比较接近实际情况的。

表3 增量加载过程
Table 3 The step-loading process

载荷步数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
荷载增量/MPa	0.15	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.10	0.07	0.01	0.01

表4 试点压力一位移有限元计算结果
Table 4 The FEM results of p - s

压力/kPa	150	270	380	500	610	730	840	960	1 060	1 130	1 140	1 150
位移/mm	2.68	5.02	7.82	11.23	14.80	18.86	23.30	28.71	34.11	40.52	44.24	80.64

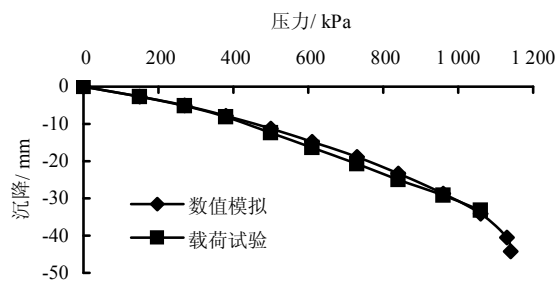
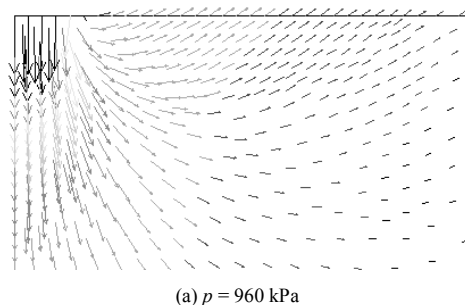


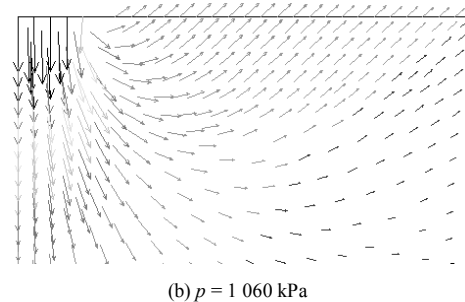
图6 有限元模拟的 p - s 曲线与载荷试验的对比
Fig.6 The p - s relation got by FEM contrast to plate loading test

经过增量加载, 地基在第 12 载荷步时发生破坏, 对应的极限荷载值为 1 140 kPa, 比载荷试验大

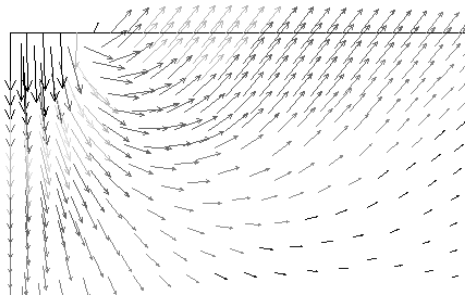
20 %左右, 但从位移矢量图(图 7)可以看出, 当地基荷载为 960 kPa 时, 地基旁侧的土已有一定的隆起, 之后随着荷载的增加, 隆起程度也越来越大, 直到压力为 1 140 kPa, 地基才达到极限状态, 这时地基的隆起程度较大。所以在载荷试验中, 当地基旁侧出现了隆起就取前一级荷载为相应的极限荷载, 认为地基已达极限状态, 这与地基极限状态的实际情况有一定的出入。实际上, 地基极限状态的承载力要比载荷试验的极限荷载结果要大些, 这从数值模拟的结果中也可以看出。



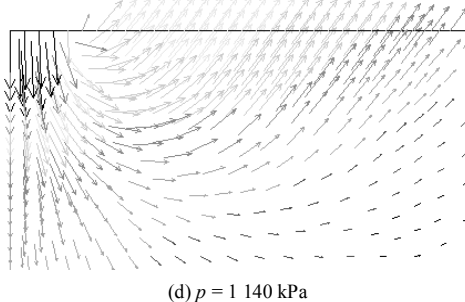
(a) $p = 960$ kPa



(b) $p = 1 060$ kPa



(c) $p = 1 130$ kPa



(d) $p = 1 140$ kPa

图7 不同压力时地基位移矢量示意图
Fig.7 The displacement vector of foundation

图 8 为离地基中心点 $1.0B \sim 4.0B$ 处的 p - s 曲线, 从图中可以看出, 随着荷载的增加, 各点开始

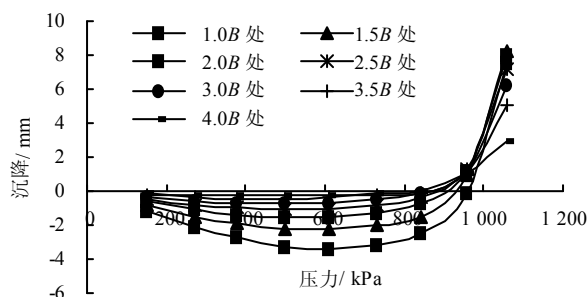


图8 地基中心点不同距离处的 $p-s$ 曲线
Fig.8 The $p-s$ relations of different distance

逐渐下沉, 大约在 600 kPa 后开始回升; 当荷载大于 900 kPa 后各点相继隆出地面, 当荷载达到 960 kPa 左右时, 各点隆起 0~1 mm; 当荷载达到 1 060 kPa 左右时, 各点隆起 2~8 mm; 另外, 荷载对各点的影响程度是不一致的, 在下沉阶段时距离越近, 则影响越大, 而在上升阶段时影响程度差不多。

5 结 语

随着岩土理论、现代计算技术及计算机软、硬件的飞速发展, 有限元等数值方法克服了以往耗时长、操作复杂、精度不足等缺点, 已逐渐成为岩土工程领域有效的实用计算方法。应用增量加载有限元法能够有效地模拟载荷试验的整个过程, 其载荷-位移曲线吻合得比较好; 极限荷载有一些出入, 但相差也不大, 这是因为两者在确定极限荷载时的标准不一致, 若把地面开始隆起作为标准, 则结果比较吻合。

参 考 文 献

- [1] 王国强, 孙立杨. 浅谈平板载荷试验[J]. 科技创业月刊, 2003, 8: 69—70.
- [2] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 343—346.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅, 孔位学, 等. 岩土工程极限分析有限元法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 163—168.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, KONG Wei-xue, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 163—168.
- [4] 邓楚键, 孔位学, 郑颖人. 地基极限承载力增量加载有限元求解[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 500—504.
DENG Chu-jian, KONG Wei-xue, ZHENG Ying-ren. Analysis of ultimate bearing capacity of foundations by elastoplastic FEM through step loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(3): 500—504.
- [5] 孔位学, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 地基承载力的有限元计算及其在桥基中的应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 97—102.
KONG Wei-xue, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. Finite element analysis for the bearing capacity of foundations and its application in bridge engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(4): 97—102.
- [6] 肖兵, 张敏勇. 平板载荷试验应思考的几个问题[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 1): 72—73.
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.