

一般均质地面承载力现场试验

薛 娴^{1,2}, 杜金名², 耿 锋², 谢 建¹, 姜 澎³

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025, salt_snow1975@yahoo.com.cn; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085;
3. 哈尔滨工业大学 能源学院, 哈尔滨 150086)

摘 要: 为了评判施力盘作用下地面的承载安全, 进行了一般均质地面承载力静态与动态荷载现场试验. 采用平板荷载静态加载方法进行了模拟施力盘静态荷载的平板荷载试验, 根据相似准则 π 定理进行了缩比施力盘动载试验. 在现场试验的基础上研究了静载条件下沉降量随时间变化的 $S-t$ 曲线, 不同尺寸承载板在相应荷载作用下的地面土体沉降量之间关联关系的 $P-S/D$ 曲线及动、静荷载下载荷与沉降量关系的 $P-S$ 曲线以及动静荷载对比的 $P-S$ 曲线. 分析结果表明: 对于进行现场试验的均质地面, $S-t$ 曲线表明静态加载方法合理; $P-S/D$ 曲线在极限荷载内呈线性比例关系; 动载下的沉降量 S 远远小于静载条件下的沉降量 S , 动载下的土体变形刚度较静载下的变形刚度高, 瞬间动态荷载造成的地面沉降可忽略.

关键词: 均质地面; 静载; 相似准则; 气动冲击; 沉降量; $P-S$ 曲线

中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1341-04

Outfield tests on bearing capacity of general homogeneous soil ground

XUE Xian^{1,2}, DU Jin-ming², GENG Feng², XIE Jian¹, JIANG Peng³

(1. The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China, salt_snow1975@yahoo.com.cn; 2. The Second Artillery Equipment Institute, Beijing 100085, China; 3 Energy Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to judge the bearing safety of homogeneous ground that the heavy forcing plates acted on, static and dynamic outfield tests were carried out. According the static plate loading method, the outfield test that bearing plates simulating the static procedure of heavy forcing plates was performed. By the similarity criterion π theorem, the pneumatic impact test of reduced proportional plate simulating the dynamic procedure of forcing plate was completed. Based on the outfield tests, the paper studied the $S-t$ curves that express the variety of settlement with time, the $P-S/D$ curves that express the soil settlement correlative relation among bearing plates with different sizes under the corresponding load, the $P-S$ curves under static and dynamic loads as well as the contrast between them. To the homogeneous soil ground in outfield tests, $S-t$ curves indicate that the static load method is reasonable, and $P-S/D$ curves appear a linear proportional relation in the limit load range. The settlement under dynamic load is much less than that under static load. The deformation stiffness under dynamic load is higher than that under static load. The settlement caused by instant dynamic impact can be ignored.

Key words: homogeneous ground; static load; similarity criterion; pneumatic impact; settlement; $P-S$ curves

一般土质地面的土体承载力分散性大呈区域性变化, 必须对其承载力进行预先测试以确保地

面的承载过程无剪切破坏. 不同尺寸施力盘对地面施加静、动荷载作用下, 要求一般地面的沉降量不大于规定值. 现场对直径 $\Phi 300$ mm、 $\Phi 500$ mm 和 $\Phi 700$ mm 3 种模拟施力盘尺寸的承载板进行了静态荷载下的平板荷载试验, 对直径 $\Phi 200$ mm 缩比施力盘的承载板进行了动载冲击试验, 国内

收稿日期: 2009-02-15.

作者简介: 薛 娴(1975—), 女, 博士研究生;

谢 建(1967—), 男, 教授, 博士生导师.

外尚无一般地面承载力的试验数据可以借鉴^[1], 本文现场的静载试验依据了建筑行业的平板载荷方法, 动载试验依据相似准则, 采用气动冲击加载方法.

1 现场试验依据

1.1 静态荷载试验依据

平板载荷试验被公认为是静载条件下确定地基承载力的可靠方法, 是理论计算和数值模拟方法的基本对比依据^[2]. 依据国家建筑规范 GB50007-2002 规定平板载荷试验每级载荷加载需要稳定 2 h, 并且只有当连续两次测量的地基沉降量 < 0.1 mm/h 时, 才认为沉降已趋稳定, 再施加下一级的载荷, 以保证地基土的充分固结^[3]. 施力盘对地面的沉降量要求较建筑行业地基宽松很多, 现场试验确定加载稳定时间可酌情缩短. 实施平板载荷加载的载荷压力稳定期间, 每隔 1 min 记录一次载荷压力和土体沉降量, 如果连续两次记录的地面沉降量相同时, 则认为地面沉降量已经达到稳定, 继续加载下一级载荷.

1.2 相似准则第二定理

1911 年俄国学者费德尔曼提出了相似准则第二定理, 简称 π 定理, 3 年后美国学者伯金汉证明了量纲分析的 π 定理^[4]. 相似准则被广泛地应用于风洞试验^[5]、模爆试验^[6] 等领域, 并一直在数学研究领域得以深入研究^[7-8].

假定联系于某一具体问题的特征量 $a, a_1, a_2, a_r, a_{r+1} \dots a_n$ 间有如下函数关系^[9]

$$a = f(a_1, a_2, a_r, a_{r+1} \dots a_n). \quad (1)$$

式中: 量 a_1, a_2, \dots, a_r 是 r 个量纲不同的参数, 而 $a_{r+1}, a_{r+2} \dots a_n$ 和 a_1, a_2, \dots, a_r 是量纲相关的.

如果不存在这样的数 $m_1, m_2, m_r, m_{r+1} \dots m_n$, 使得表达式 $a_1^{m_1}, a_2^{m_2}, \dots, a_n^{m_n}$ 具有量 a 的量纲, 也就是说式(2)是无量纲的.

$$\pi = \frac{a}{a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_n^{m_n}}. \quad (2)$$

表达式(3)是无量纲的.

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{a_{r+1}}{a_1^{m_{11}} a_2^{m_{12}} \dots a_r^{m_{1r}}}, \\ \pi_2 = \frac{a_{r+2}}{a_1^{m_{21}} a_2^{m_{22}} \dots a_r^{m_{2r}}}, \\ \vdots \\ \pi_{n-r} = \frac{a_n}{a_1^{m_{(n-r)1}} a_2^{m_{(n-r)2}} \dots a_r^{m_{(n-r)r}}}. \end{cases} \quad (3)$$

记 $\pi = \Phi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}). \quad (4)$

式(2)、(3)代入式(4)得式(5), 式(5)无量纲.

$$\frac{f(a_1, a_2, a_r, a_{r+1}, \dots, a_n)}{a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_r^{m_r}} = \Phi\left(\frac{a_{r+1}}{a_1^{m_{11}} a_2^{m_{12}} \dots a_r^{m_{1r}}}, \dots, \frac{a_n}{a_1^{m_{n1}} a_2^{m_{n2}} \dots a_r^{m_{nr}}}\right). \quad (5)$$

假设地面沉降量 S 与作用在承载板上载荷压力 P , 载荷作用时间 τ , 承载板的直径 D 和质量 M , 土的变形模量 E_i , 土分层厚度 $h_i, i = 1, 2, \dots, n$ 有关.

$$S = f(P, \tau, D, M, E_1, E_2, \dots, E_n, h_1, h_2, \dots, h_n). \quad (6)$$

式中: S 为地面沉降量(mm), $\dim S = L$; P 为载荷(MPa), $\dim P = ML^{-1}T^{-1}$; τ 为载荷作用时间(s), $\dim \tau = T$; D 为承载板直径(mm), $\dim S = L$; M 为质量(kg), $\dim M = M$; E_i 为地面土的变形模量(MPa), $\dim E_i = ML^{-1}T^{-1}$; h_i 为地面土分层厚度(mm), $\dim h_i = L$.

其中 L, M, T 为 3 个基本量纲, 式(6)的量纲表达式为

$$M^0 L^1 T^0 = (ML^{-1}T^{-1})^\alpha \cdot (T)^\beta \cdot (L)^\gamma \cdot (M)^\lambda \cdot (ML^{-1}T^{-1})^\mu \cdot (L)^\theta. \quad (7)$$

$$M: 0 = \alpha + \lambda + \mu;$$

$$L: 1 = -\alpha + \gamma - \mu + \theta;$$

$$T: 0 = -\alpha + \beta - \mu.$$

经计算整理可得

$$S/D = \Phi\left(\tau \sqrt{\frac{g}{D}}, \frac{M}{PgD^2}, \frac{h_1}{D}, \frac{h_2}{D}, \dots, \frac{h_n}{D}, \frac{P}{E_1}, \frac{P}{E_2}, \dots, \frac{P}{E_n}\right). \quad (8)$$

由式(5)的 π 定理, 知式(8)是无量纲的, g 为重力加速度. 式(8)说明对于均质地面, 在相同的载荷压力下, 土体沉降量与承载板的直径成正比, 承载板的直径越大, 地面沉降量越大. 但是对分层土, 只有当土层的厚度也进行相应的缩比之后, 大小承载板在相同的载荷作用下的地面沉降量才成比例关系, 因此本次试验选择比较均质的地面区域进行. 对于无分层的均质土, 土沉降量的相似准则为

$$\frac{S}{D} = \Phi\left(\tau \sqrt{\frac{g}{D}}, \frac{M}{PgD^2}, \frac{P}{E}\right). \quad (9)$$

对于同一试验场地, 地面的变形模量 E 是相同的. 在相同的载荷压力 P 作用下, 采用缩比的承载板进行试验时, 缩比承载板与实际施力盘之间应同时满足以下相似关系:

$$S_1/D_1 = S_2/D_2, \quad (10)$$

$$\tau_1 \sqrt{\frac{g}{D_1}} = \tau_2 \sqrt{\frac{g}{D_2}}, \quad (11)$$

$$\frac{M_1}{P_1 g D_1^2} = \frac{M_2}{P_2 g D_2^2}. \quad (12)$$

下标 1、2 表示缩比承载板和实际施力盘。

气动冲击载荷加载试验,采用 $\Phi 200$ mm 尺寸缩比板,根据式(11)~(12),可得到缩比盘冲击载荷作用时间 τ ,及缩比板质量、冲击压力等参数,计算从略。

2 均质地面承载力现场试验

均质地面现场进行了静态加载平板载荷试验、气动冲击试验。平板载荷试验分别对直径 $\Phi 300$ mm、 $\Phi 500$ mm 和 $\Phi 700$ mm 的承载板进行静态加载,测试土质地面的承载力和沉降量。对 $\Phi 200$ mm 的缩比承载板进行气动冲击载荷试验,气缸加载得出额定冲击载荷下的地面沉降量。

2.1 静态荷载平板载荷试验

平板载荷试验为静态分级加载并测量对应载荷下的地面沉降量 S ,以获得载荷压力和沉降量的关系曲线 $P-S$ 。试验用液压千斤顶对 $\Phi 300$ mm、 $\Phi 500$ mm 和 $\Phi 700$ mm 承载板进行加载,千斤顶反力通过由工字钢制作的主梁传递到堆载平台上。堆载平台由支架和横梁组成,平台堆垛沙袋提供了加载过程中的支反力。采用测力传感器监测并记录加载载荷的大小,用对称安装的 3 个位移传感器测试地面的沉降量,取 3 个位移传感器输出的平均值作为地面的沉降量,以消除地面沉降过程中承载板发生倾斜的影响。

2.2 气动冲击缩比试验

气动冲击试验利用支架本身的重量和堆载的沙袋提供支反力,采用并联高速气缸,对加载板进行冲击加载。试验首先利用吊钩通过拉杆将气缸活塞杆、测力传感器和加载板组成冲击组合体悬挂在支架上,限制气缸活塞杆在充气的过程中向下伸出。受拉杆的限制,气缸活塞杆无法伸出冲击组合体依然保持静止,当气缸充气气压达到稳定压力释放吊钩,冲击组合体在高压气体的作用下快速运动,撞击承载板形成冲击载荷。

3 现场试验结果分析

3.1 静态加载平板载荷试验结果

如图 1 所示的平板载荷试验的沉降量随时间变化曲线可以看出,当载荷压力小于地面承载极限载荷时($P_u = 473$ kPa, P_u 为极限载荷),在很短的时间内地面沉降量就能达到稳定。当载荷压

力超过地面承载极限载荷时,地面土体的沉降量在 8 min 后无法达到稳定,由此可知试验中确定加载稳定时间可适当缩短是合理的。

由 1.2 节式(9)可知,对于同一试验场地,变形模量相同,且同一承载板的质量一定,在加载时间间隔 τ 恒定的前提下, S/D 是关于加载载荷 P 的函数,曲线 $P-S/D$ 可以反映出不同承载板在相应载荷下的沉降量关联关系。图 2 为静态加载的 $P-S/D$ 曲线试验结果,图中 J 表示静载,A1~A3 代表外场试验 3 个不同试验区域,由试验结果可知,当载荷压力小于地面承载极限载荷时, $\Phi 300$ mm、 $\Phi 500$ mm、 $\Phi 700$ mm 3 种不同直径的承载板在相同的压力下,地面的沉降量满足线性比例关系。当载荷压力超过地面承载极限载荷($P_u = 473$ kPa)时,地面沉降量分散性很大,不再满足线性关系。

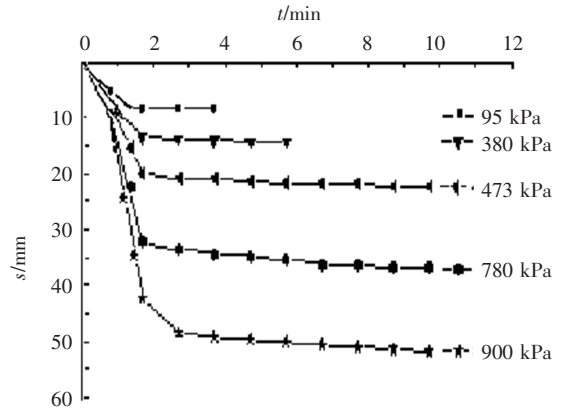


图 1 沉降量随时间的变化曲线

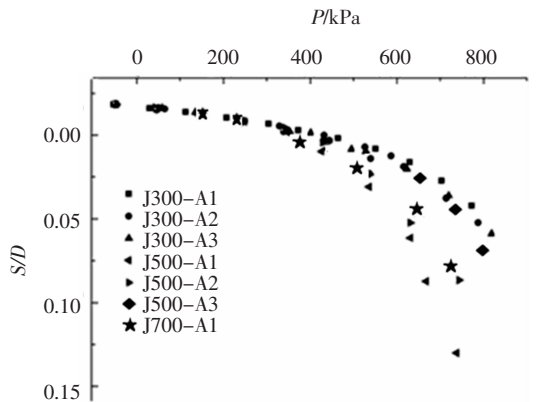


图 2 静态加载不同尺寸承载板曲线

由试验可知,当载荷压力小于地面承载极限载荷,相应载荷作用下用线性比例关系由小尺寸承载板的沉降量试验结果可推导出大尺寸承载板的沉降量,也可由大尺寸承载板的沉降量推导出小尺寸承载板的沉降量。

3.2 气动冲击缩比试验结果分析

均质地面在冲击载荷作用下的沉降量非常

小,且 $P - S$ 曲线没有明显的拐点,沉降 $< 5 \text{ mm}$,说明在动态冲击加载情况下土中的水来不及排出,地面变形刚度大.图 3 给出了 $\Phi 200 \text{ mm}$ 承载板在冲击载荷作用下 A1 ~ A3 不同区域的 $P - S$ 曲线,图中 D200 表示 $\Phi 200 \text{ mm}$ 承载板动态冲击加载.

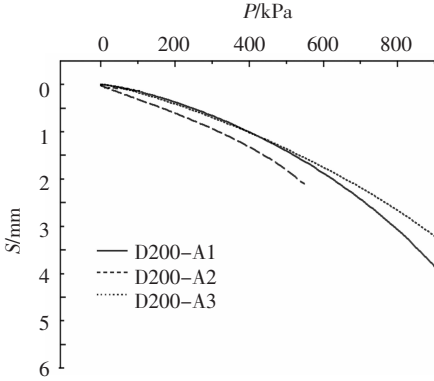


图 3 冲击载荷作用下 $\Phi 200 \text{ mm}$ 承载板 $P - S$ 曲线

3.3 静态加载和气动冲击试验结果对比

在相同的载荷压力下,静态分级加载引起的地面沉降量比动态冲击加载造成的地面沉降量大很多,图 4 中 J200 为静载条件下由其他大尺寸承载板推得的 $\Phi 200 \text{ mm}$ A1 ~ A3 不同区域静载数值,D200 为冲击加载 A1 ~ A3 不同区域的试验数值.

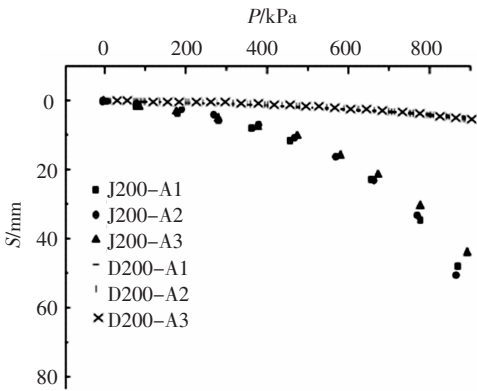


图 4 静态加载与动态冲击加载 $\Phi 200 \text{ mm}$ 承载板 $P - S$ 曲线
由图 4 可知瞬间作用下的动态加载地面沉降量远远小于静态加载下的地面沉降量,表征为冲击加载情况下均质土的变形刚度比静态加载下均质土的变形刚度大.

4 结 论

- 1) 总结的平板载荷试验静态加载方法及动态冲击缩比试验可用于由于支反力制约,无法实施大尺寸大荷载的试验现场.
- 2) 由于小尺寸承载板影响深度小,若地面承载力测试装置的小尺寸承载板比施力盘尺寸小很多,就需要其他辅助测试手段确定地面均质性.
- 3) 冲击载荷的承载板地面沉降量很小,其对地面动态荷载的影响可忽略.
- 4) 在后续的研究中需要采用有限元数值模拟方法进一步对现场试验深入研究,并建立反映地面土体的应力应变关系对现场试验结果进行数值计算验证.

参考文献:

- [1] 杜金名,耿锋,薛娴.地面强度现场试验方法研究[C]//中国航天学会.中国航天 2008 年度学术交流会.北京:中国航天科技出版社,2008:2-4.
- [2] MERIFIELD R S,LYMIN A V,SLOAN S W. Limity analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalized Hoek - Brown criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Minig Science,2006,43 (6):920-937.
- [3] 中华人民共和国建设部.GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [4] 范洁川,于涛.飞机结冰风洞试验模拟研究[J].实验流体力学,2007,21(1):69-72.
- [5] HARRIS P G,FARINACCIO R,STOWE R A, et al. The effect of DDT distance on impulse in a detonation tube [C]//37th AIAA/ASMW/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City:AIAA,2001: 2001-3467.
- [6] GELFAND B E,TAKMAYAA K. Similary criteria for under water explosions[J]. Combustion Explosion and Shock Waves,2004,40(2):214-218.
- [7] HOUNIE J,SILVA E U. A similarity principle for locally solvable vector fields[J]. Journal de Mathematiques pures et Appliqueos,2002,81(8):715-746.
- [8] 郭文敏,秦积舜,吕爱华.应用相似第二定理研究聚驱采出程度数学模型[J].西南石油大学学报 2008,30(4):81-85.
- [9] 盖秉政.实验力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006:13-15.

(编辑 赵丽莹)