

[文章编号] 1002-8528 (2003) 01-0033-04

对湿陷性黄土在强夯作用下冲击应力的分析

水伟厚¹,王铁宏²,王亚凌³

(1 同济大学 地下系,上海 200092 ; 2 中国建筑科学研究院,北京 100013 ; 3 中化岩土工程有限公司,北京 102600)

[摘 要] 从动力平衡方程式出发,对土体的屈服滞后现象运用碰撞理论,并考虑参振土体对夯锤速度的影响进行了研究。提出了其边界条件中的初速度应为形变过程初速度,导出了强夯冲击应力时程关系的解析式,明确了恢复系数及速度效应在强夯冲击应力中的显著作用。并与某湿陷性黄土强夯加固工程的实测冲击应力结果对比,所得结论对强夯工程设计具有重要的参考价值。

[关键词] 强夯法;碰撞理论;冲击应力;恢复系数

[中图分类号] TU475+.3 ; TU472.3+1 [文献标识码] B

Analysis of the Impact Stress during Dynamic Compaction on Collapsible Loess

SHUI Wei-hou¹, WANG Tie-hong², WANG Ya-ling³

(1 Tongji University Shanghai 200092 ; 2 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China ;

3 China Zhonghua Geotechnical Engineering Co.Ltd. Beijing 102600, China)

[Abstract] In this paper, based on the kinetic balanced equation, the phenomenon of Delayed Yield on soil in dynamic compaction is studied by impaction theory considering the influence of soil of vibration. It is presented that the initial speed of boundary condition should be the initial velocity of the course of deformation. The solutions of the relation between impact stress and time have been presented and the key role of restitution coefficient and velocity effect in the impact stress has been defined. Moreover, comparing calculated value with experimental data proves the reliability of the proposal method, and the results in this paper would be a valuable reference to the geotechnical design in dynamic compaction.

[Key words] dynamic compaction; impaction theory; impact stress; coefficient of restitution

1 前 言

强夯法加固湿陷性黄土地基能大幅度提高地基强度、降低压缩性,还能改善土体力学性质,消除黄土一定深度范围的湿陷性,其显著效果已得到“八五”、“九五”期间很多重大工程项目的验证,实践方面已积累了十分宝贵的经验^[1]。

相比之下,强夯的加固机理、冲击动应力等的理论研究还处于不成熟阶段。对湿陷性黄土等非饱和土,强夯产生的动应力越大,夯锤下土体的变形就越大,加固效果就越好,承载力或压缩性的改善就越显著。

有关强夯冲击产生的地基动力反应,一方面在大量工程实践中实测与总结了一些经验规律:裘以惠等(1984)测定了黄土中强夯时的锤底动应力和深层土中的动应力^[2]。H.

Brandl等(1980)实测了强夯时土内的动应力波形,拟合了不同深度处的动应力峰值沿水平方向的变化规律^[3]。P.W. Mayne等(1984)将10余次工程中实测的地面峰值速度 v_{max} 与归一化的距离 d/\sqrt{WH} 于双对数坐标下,从他们的成果来看,地面振动峰值速度与归一化距离在双对数下有良好的线性关系^[4]。Rollin(1998)给出了湿陷性土中强夯时的最大峰值速度与夯击能和距离的经验关系^[5]。

另一方面建立了一些计算模式,从理论上对强夯产生的地基动力反应进行了探讨,并由此对强夯的加固机理和加固效果作了一些探讨。许多研究者基于简化假设建立了锤-土接触面应力的求解公式。Scott等(1975)利用集总参数法求解了弹性介质的土-锤接触面应力公式^[6]。H.L.Jessberger等(1981)^[7]根据牛顿第二定律和室内动力固结试验成果提出接触面应力 $\sigma_{od} = \alpha \frac{M}{A} \sqrt{2gH}$ (α 为系数)。国内学者钱家欢等用室内动力固结仪和数值法求解了强夯后土中的应力、变形等^[8]。郭见扬从室内小模型试验中定性分析了影响冲

[收稿日期] 2002-12-02

[作者简介] 水伟厚(1976-),男,同济大学地下系博士研究生

击力大小的因素^[9];方永凯等用动力平衡方程式来推求加固深度^[10],但速度边界条件取的是夯锤与土接触前的速度,不符合实际情况,也没有考虑参振土体对夯锤速度的影响。

强夯夯锤对地面的冲击力究竟有多大?了解决定冲击力大小的诸因素以后,对正确认识夯能,进行合理设计强夯工程都有重要意义。本文以某湿陷性黄土地基加固工程为例,研究了强夯作用下的冲击应力。

2 动力平衡方程式的建立

离地面高度 H 的质量块 m_1 ,以零初速度向下做自由落体运动,在地表与地基半空间碰撞,然后在半空间表面做自由振动,如图 1 所示。半空间与其表面及其上的质量块所组成的体系具有无限多个自由度,从自由振动的角度来说,它具有无限多个“振型”。Gutzwiller 用数学方法严密的表达了这种瞬态混合边值问题,然后用正交多项式方法进行了求解^[11],所得解答说明除了极复杂、极短促的初始阶段外,此种瞬态振动可近似用一个最基本的“振型”(相应于主频的振型)来描述。这就从理论上提供了用等效集总的单自由度模型来分析这个问题的可能性。

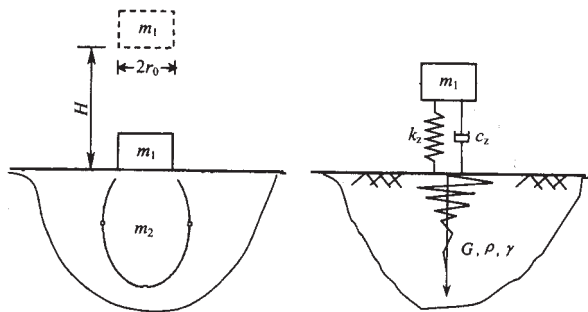


图 1 强夯夯锤作用模型

将地基简化成阻尼—弹簧体系,图 1 中的 c_z 为地基竖向阻尼系数, k_z 为地基竖向弹簧系数,则夯锤的动力平衡方程式为:

$$m_1 \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = -c_z \frac{dz(t)}{dt} - k_z z(t) \quad (1)$$

式中右边两项为地基对夯锤的运动阻力和变形阻力。这两种阻力都与夯锤运动方向相反,所以均取负号,左边为夯锤与地面接触后瞬间所具有的动力。将式(1)整理后得:

$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \frac{c_z}{m_1} \frac{dz(t)}{dt} + \frac{k_z}{m_1} z(t) = 0 \quad (2)$$

令无阻尼自振圆频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k_z}{m_1}}$, 阻尼 $\xi = \frac{c_z}{\sqrt{k_z m_1}}$, 则

方程(2)的通解为:

$$z(t) = e^{-\xi \omega_n t} [A \sin(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t) + B \cos(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t)] \quad (3)$$

再令 $\lambda = \frac{c_z}{2m_1}$, 有阻尼自振圆频率

$\omega_d = \sqrt{1-\xi^2} \omega_n$, 则上式可表达为:

$$z(t) = e^{-\lambda t} (A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) \quad (4)$$

式中 A, B 为待定系数,由边界条件确定。

3 动力平衡方程式的求解

3.1 初始边界条件

夯锤与半空间土体接触瞬间,其初始位移条件为 $z(t)_{t=0} = 0$, 初速度条件为 $\dot{z}(t)_{t=0} = v_{12}$ 。 v_{12} 为形变过程初速度,其物理意义说明如下。

强夯夯锤从高处落下,以高速冲击地面,要产生两个过程。第一为形变过程,即夯锤与地面接触后,原来静止的锤下土体的表面区域获得了很大的冲击加速度和速度,开始向下运动(当然土体的运动是一个下陷和压缩的过程)。夯锤速度由 $v_{11} = \sqrt{2gH}$ 迅速减小到 v_{12} ,此时夯锤的运动才符合质—阻—弹体系中质量块的力学模型。若用式(3)求解,其初速度应当为 v_{12} (见图 2,如 150kN 夯锤落距 13m,在恢复系数 $k=0.05$ 时,其速度瞬间降低幅度达 60%左右)。由于锤土接触,表面区域土体先加速到与夯锤具有相同的速度,然后与夯锤一起做减速运动,直至与夯锤一起都减速到零。伴随着冲击的是很高的动应力集中,结果冲击波以固定的速度将局部化的动应力传播到土体和夯锤中,这个过程遵循动量守恒。第二个过程为形变恢复过程,土体受压缩后的弹性会使夯锤和土体都要产生向上的回弹(见图 2,锤有反跳),虽然这个过程的量值很小。所以强夯是一个夯锤与受影响土体的能量转换和传递的过程,阻尼粘滞力使应力滞后于应变与位移, v_{12} 不应是接触前的速度 $\dot{z}(t)_{t=0}$,而应该为夯锤与半空间表面土体接触后(瞬间)夯锤的速度,即形变过程初速度。

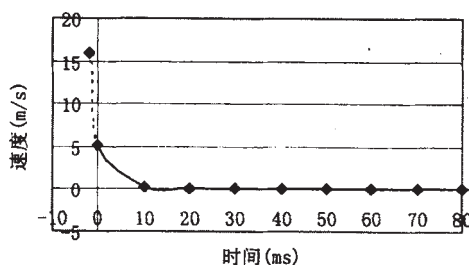


图 2 强夯夯锤速度衰减曲线 (150kN×13m)

3.2 由碰撞理论求解

质量为 m_1 的物体向质量为 m_2 的物体碰撞(见图 1),两物体的运动轨迹在同一条直线上。 m_1 和 m_2 两物体接触前(瞬间)两质心的速度分别为 v_{11} 和 v_{21} ,碰撞接触后(瞬间)速度分别为 v_{12} 和 v_{22} 。按物理学中碰撞课题^[12],对 m_1, m_2 这个系统由动量守恒有

$$m_1 v_{11} + m_2 v_{21} = m_1 v_{12} + m_2 v_{22} \quad (5)$$

其速度变化关系式为:

$$k = \frac{v_{22} - v_{12}}{v_{11} - v_{21}} \quad (6)$$

式中, k 为恢复系数。

$k=1$ 时为理想情况,物体在碰撞结束时,变形完全恢复,动能没有损失,这种碰撞称为完全弹性碰撞;

$k=0$ 时是极限情况,在碰撞结束时,物体的变形丝毫没有恢复,这种碰撞称为完全非弹性碰撞或塑性碰撞;

$0 < k < 1$ 为非完全弹性碰撞,情况界于上述二者之间;

$k < 0$ 或 $k > 1$ 时有其它作用引起的能量转化。

联立 (5)、(6) 式解得

$$v_{12} = v_{11} - (1+k) \frac{m_2}{m_1+m_2} (v_{11} - v_{21}) \quad (7)$$

由夯锤振动系统的 $v_{11} = \sqrt{2gH}$, $v_{21} = 0$, 得:

$$v_{12} = \frac{m_1 + km_2}{m_1 + m_2} \cdot v_{11} \quad (8)$$

夯锤对土体的恢复系数 k 介于 0 和 1 之间,且与土的类型、刚度、含水量等因素有关。图 3 给出了其它因素相同时恢复系数对强夯冲击力的影响。可以看出,恢复系数越小,形变过程初速度 v_{12} 越大,冲击应力也就越大,反之亦然。

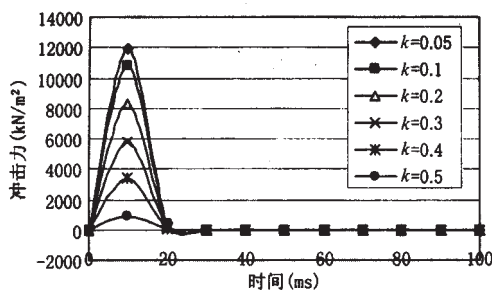


图 3 不同恢复系数 k 下的加速度时程曲线

恢复系数随土体刚度(硬度)的增大而增大,但有一定的极限(小于 1),这个极限决定于夯锤与土体中弹性波所消耗的能量^[13]。随土体硬度的增加,冲击力的持续时间将减少,而作用于土体中的冲量则增大,所以最大压力也增大。

3.3 动力平衡方程式的求解

将初始位移条件为 $z(t=0)=0$, 初速度条件为 $\dot{z}(t=0)=v_{12}$ 代入式(4)求解待定系数后得

$$z(t) = \frac{v_{12}}{\omega_d} e^{-\lambda t} \sin \omega_d t \quad (9)$$

此式即为夯锤的运动方程。

式中 v_{12} , λ , ω_d , 由前文公式算定,其中 k_z, c_z 根据半空间理论^[14],等效集总体系的弹簧和阻尼系数分别为:

$$k_z = \frac{4Gr_0}{1-\mu}, \quad c_z = \frac{3.4r_0^2 \sqrt{G\rho}}{1-\mu}$$

式中 r_0 为夯锤的半径, G 、 ρ 、 μ 分别为半空间的剪切模量、质量密度和泊松比。

4 夯锤作用下的冲击应力

落距为 H 的夯锤 m_1 自由落体在地表与地基半空间碰撞,然后在半空间表面做自由振动,简化成质量-阻尼-弹簧体系后夯锤的加速度为:

$$\ddot{z}(t) = -\frac{v_{12}}{\omega_d} e^{-\lambda t} [2\lambda\omega_d \cos \omega_d t + (\omega_d^2 - \lambda^2) \sin \omega_d t] \quad (10)$$

若从实用出发,将基底压力简化为均匀分布,则强夯夯锤对半空间地基的冲击应力 σ_d 为:

$$\sigma_d = \frac{m_1 v_{12} (\omega_d^2 + \lambda^2)}{\pi \omega_d r_0} e^{-\lambda t} \cos(\omega_d t - \varphi_0) \quad (11)$$

$$\text{式中, } \varphi_0 = \arctan \frac{\omega_d^2 + \lambda^2}{2\lambda\omega_d} \quad (12)$$

由式(11)可以看出,强夯作用下的冲击应力主要有以下几个特性:

(1) 与夯锤与土体接触后的瞬时速度 v_{12} 有关。显然在其它条件相同时,冲击应力与接触后速度 v_{12} 成正比, v_{12} 越大,冲击应力越大。由式(8)可知 v_{12} 与影响区域振土体质量 m_2 、恢复系数 k 和接触前速度 v_{11} 有关。其它因素相同条件下, m_2 越大, v_{12} 越小,恢复系数 k 越大 v_{12} 越小。这就是在相同的单击夯击能条件下,为何对砂土地面的实测冲击力均大于粘性土,前者约为后者的 3 倍^[9]。接触前速度 v_{11} 仅与夯锤提升高度有关,与 \sqrt{H} 成正比。

(2) 与土体特性参数 λ 和 ω_d 有关。冲击应力与土体特性参数 λ 和 ω_d 有关, λ 和 ω_d 由弹簧系数 k_z 、阻尼系数 c_z 、阻尼比 ξ 、无阻尼自振圆频率 ω_n 等决定,仅取决于体系之性质(参数)与夯锤质量。

表 1 计算与实测锤底动应力最大值

夯击点	单 17	单 4	单 3	单 9	7 群 A2-1
$M \times H(t-m)$	15×13=195	20×15=300	20×20=400	20×25=500	25×25=625
锤底面积 (m ²)	4	5	5	5	7
实测 P_{dmax} (kN/m ²)	2430	3103	3136	3211	8988
计算 a_{dmax} (m/s ²)	860	716	832	926	1986
计算 P_{dmax} (kN/m ²)	3225	2865	3327	3701	7092

5 工程算例与结果分析

以山西潞城强夯加固湿陷性黄土地基为例^[2],试验场地主要是 II 级自重湿陷性黄土区(部分为 II 级非自重湿陷区)。

土层含水量较高,为 19.1%~26%,干容重 $\gamma_d=12.4\sim 15.5\text{kN/m}^3$,湿陷性系数 $\delta_s=0.019\sim 0.064$,压缩系数 $a=0.1\sim 1.04(\text{MPa})^{-1}$,旁压屈服值 $p_0=0.151\sim 0.48\text{MPa}$,地下水位 16.9~24.7m。测试仪表和动应力传感器埋设方法见文献[1]。

图 4 为各级能量强夯作用下,夯锤产生的冲击加速度时程曲线。为便于对各级夯能所产生的动应力做比较,计算时对各夯点采用相同的参数,统一取土体重度为 17.15kN/m^3 ,剪切波速为 260m/s ,泊松比为 0.3 ,恢复系数为 0.20 (7 群 A2-1 夯点动应力为复打时测得,恢复系数取 0.42),参振土体质量 m_2 由实测资料近似取夯锤下以 $3r_0$ 为直径, $1.5r_0$ 为高度的圆柱土体的质量。表 1 给出了各夯点锤底动应力最大值的计算结果和实测值。

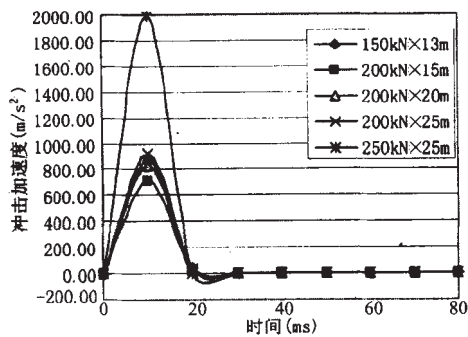


图 4 不同夯击能量作用下加速度时程曲线

由图 4 可见,强夯夯锤产生的应力波为一尖峰,衰减很快,没有明显的第二应力波。夯能为 $5000\text{kN}\cdot\text{m}$ 的夯锤的冲击加速度达到 926m/s^2 ,冲击应力达到 3701kN/m^2 ,最大夯能 $6250\text{kN}\cdot\text{m}$,产生的加速度为 1986m/s^2 ,冲击应力为 7092kN/m^2 。

冲击力作用时间很短,按本文所示的土性条件,仅 40ms 左右,与实测值^[1]较为接近。显然,当土体较硬时,作用时间短,冲击应力大;当含水量较大土体较软时,作用时间长。在 40ms 后加速度急剧衰减到零附近。

单 4 夯点比单 17 夯点夯锤重量增加 50kN ,夯击能增加 $105\text{kN}\cdot\text{m}$,强夯产生的冲击应力反而降低了 11% (见图 5);而单 3 比单 4 夯点夯锤落距增加了 5m ,速度 v_{12} 增加了 0.21m/s ,锤重不变,夯击能增加 $100\text{kN}\cdot\text{m}$,冲击应力增加了 462kN/m^2 ,增幅达 16% 。从单 9 与单 3 夯点也能得到相同的结论。所以速度对冲击应力的影响非常显著。

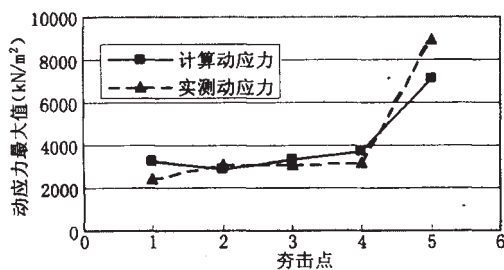


图 5 计算与实测动应力最大值

6 结论

准确估计强夯夯锤接触区附近土介质的塑性和非弹性性质对冲击力-时间关系的影响的确是困难的,但这个问题的某些特性是明显的^[13]。本文以某湿陷性黄土地基加固工程为例,研究了强夯作用下的冲击应力,结论如下:

(1) 从动力平衡方程式出发,导出了强夯冲击应力时程

关系的解析式。强夯夯锤的冲击应力可以按式(11)计算,其中 v_{12} 应为夯锤与土体接触后的瞬时速度,按式(8)计算。

(2) 强夯夯锤产生的应力波为一尖峰,衰减很快,没有明显的第二应力波。冲击力作用时间很短,但冲击应力很大。

(3) 恢复系数随土体硬度的增大而增大,但有一定的极限(小于 1),这个极限决定于夯锤与土体中弹性波所消耗的能量。随土体硬度的增加,冲击力的持续时间将减少,而作用于土体中的冲量则增大,所以冲击应力也增大。

(4) 速度对冲击应力的影响非常显著。如单 3 比单 4 夯点接触后速度 v_{12} 增加 0.21m/s ,夯锤冲击力增加了 16% ,增幅之大值得进一步研究。

(5) 所得结论可供湿陷性黄土等非饱和土上强夯施工设计时参考。

参考文献

- [1] 王铁宏主编. 全国重大工程项目地基处理工程实录 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 裴以惠, 郭玉玲. 强夯法加固地基的土体动应力量测 [J]. 太原工学院学报, 1984 (1), pp45-52.
- [3] H.Brandl, W.Sadgorski. Dynamic Stresses in Soil Caused by Falling Weights [A]. In: Proc. 9th. Int. Conf. Soil Mech. Found [C]. Engry. 1977(2), pp187-194.
- [4] Mayne P.W., Jones J.S. Impact Stressed During Dynamic Comaction [J]. ASCE. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, Vol.109 (10), pp1342-1346.
- [5] Kyle M.Rollins, Stan J.Jorgensen, Todd E.Ross. Optimum moisture content for dynamic compactin of collapsible soil [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998, Vol124 (8), pp699-708.
- [6] R.A.Scott, R.W.Pearce. Soil Compaction by Dynamic [J]. Geotechnique, Vol.25, No.1, 1975, pp1-19.
- [7] H.L.Jessberger, R.A.Beire. Heary Tappings: Theoretical and Practical Aspects [A]. In: Proc. of 10th International Conf. on Soil Mech. And Foundation Engineering [C]. Stockholm, 1981, 695-699.
- [8] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践 [J]. 岩土工程学报, 1986, Vol. 8(6), pp1-17.
- [9] 郭见扬. 强夯夯锤的冲击力问题 (强夯加固机理探讨之一) [J]. 土工基础, 1996, Vol. 10(2), pp35-40.
- [10] 方永凯, 周芝英. 强夯法加固地基的若干问题 [B]. 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集 [C]. 1991, 上海, 同济大学出版社. pp573-576.
- [11] Gutzwill, M.C. The impact of a Rigid Circular Cylinder on an Elastic Solid [A]. Proc. R. Soc. Series A [C]. Vol.252, 1962.
- [12] 哈尔滨工业大学理论力学教研组编. 理论力学 (第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [13] K.B.Broberg. Shock Waves in Elastic and Elastic-Plastic Media [J]. Stokholm, 1956.
- [14] F.E.Richart, Jr. R.D.Words, J.R.Hall, Jr. Vibrations of Soil and Foundations [J]. Prentice-Hall. Inc, 1970...