

核爆条件下浅埋结构荷载理论与试验结果的对比研究

钱七虎 王明洋

(南京工程兵工程学院 南京 210007)

摘要 在数据比较完全的中、外各个单位的试验基础上,仔细地对比试验结果与目前确定土中浅埋结构的两种荷载理论计算结果,以确定那个理论与试验实际比较符合,并确定在不太符合的情况下,如何修正。

关键词 波动理论 拱效应法 浅埋结论

目前确定土中浅埋结构荷载的理论大致有两个方面:一是运用弹塑性波动理论,详尽地分析结构及其构件的运动与振动,分析土与结构的动力相互作用。对于二维及三维情况,只能以数值分析的方法(有限元法,边界元法,无限单元法等)就个别的实际工程得出数值计算结果,不能依赖此法得出计算参数变化下结构荷载变化的规律曲线来。而如果忽略二维(及三维)效应,即根据一维弹塑性平面波理论,则可以细微地分析与考虑地表及结构卸载波的影响,得出结构与土壤参数变化下的结构荷载变化的规律曲线^[1,2,3]。这个方向,在理论上基本是完善的,但需要估计忽略二维效应的误差,如误差不大,可以采用,否则,则需修正。另一个方向是考虑二维效应的拱效应法。文献[3]就采用此方法,同时考虑结构顶板底部自由面的反射卸载影响。文献[3]中给出了拱效应系数表达式。拱效应法确定土中浅埋结构荷载是以位移场出发,基本上依照太沙基静载条件下拱效应概念构造出来的,不能反映土中结构在爆炸波作用下与介质产生的动力相互作用现象。所以,用拱效应法确定土中浅埋结构荷载从理论上说似乎不够全面^[4]。本文在数据比较完全的(既有结构压力,又有结构速度与加速度的试验结果)中、外各个单位的试验基础上(既有结构小变形的试验,又有结构大变形的试验),仔细地对比试验结果与前述二个方面的理论计算结果,以确定那个理论与试验实际比较符合,并确定在不太符合的情况下,如何修正。

1 浅埋结构顶板荷载

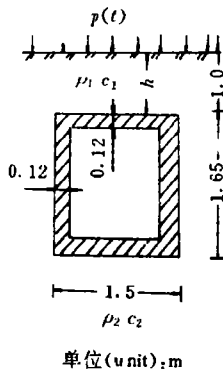
核爆作用下,浅埋箱形结构顶板荷载的机理问题一直为防护工程界所关注。然而由于影响浅埋结构荷载的因素很多,因而荷载的确定有不同的方法。文献[3,5]认为必须考虑横向稀疏波对顶板荷载的影响,文献[3,5,6]认为顶板荷载主要受顶板下表面反射产生的拉伸波的影响。文献[7,8]对浅埋结构在核爆条件下进行了比较全面的试验研究,试验实测及文献[9]有限元计算结果均表明横向稀疏波效应的影响远比文献[3]所述小得多,可

忽略不计。文献[10]理论分析与试验结果对比计算表明,结构顶板内侧临空面的反射影响对抗核爆结构荷载可忽略不计。文献[5,6,7,11]试验均发现,结构在大变形时,结构顶板压力分布呈马鞍形,并且跨中压力波形出现“变窄”的现象。他们引进拱效应的概念,认为这种现象是在跨端产生“负拱效应”,在跨中产生“正拱效应”的结果,这是一个有待探讨的问题。

图 1 是结构的试验模型。图 2a, b 分别是洛阳土中第四炮和第六炮顶板压力的试验时程曲线^[8],前者属于小变形试验,后者属于大变形试验。为了验证一维波动理论的有效性,我们应用一维波理论导出顶板压力公式^[1]:

$$p_j(t) = \begin{cases} 2p_k(t) - \rho_1 c_1 W(t) & t \leq t_{0k} & (1) \\ \text{线性插入} & t_{0k} \leq t \leq t_r & (2) \\ -\Delta p_{地}(t) + \rho_1 h W(t) & t \leq t_r & (3) \end{cases}$$

式中: $p_k(t)$ ——与顶板同深度处自由场压力, ρ_1 ——上复土密度, c_1 ——复土中加载波速, $W(t)$ ——结构运动速度, $\Delta p_{地}(t)$ ——地面超压, h ——复土厚度, t ——取入射波到达顶盖上的时间作为时间 t 的零时。 t_{0k} ——土中压缩波升压时间, t_r ——结构卸载波与地表卸载波相遇时的时间。式(2)表示地面与结构卸载波在复土层中传播阶段,为简单起见,近似用线性插入。 t_{0k}, t_r 根据有关公式可计算求得^[1,2]。



$\rho_1 = 1.8 \text{ kN/m}^3, c_1 = 110 \text{ m/s}$
 $\rho_2 = 1.8 \text{ kN/m}^3, c_2 = 110 \text{ m/s}$

图 1 洛阳土中结构试验模型
 Fig. 1 Test model of structure in "luoyang soil"

图 3a, b 分别是图 2a, b 试验压力波形(图中实线)与根据图 2a, b 的试验结果按式(1),式(3)计算出的压力波形(图中虚线)的对比曲线。有关计算参数见图 1。在图 3a, b 中,加载段(AB 段)是以式(1)算出的,结构卸载波与地表卸载波相遇后段(CD 段)是以式(3)算出的,而对二卸载波尚未相遇的过渡段图中是以连接 BC 段近似给出的。由图 3a, b 可见,试验结果与理论计算结果基本一致,波形基本相符,特别是加载段吻合更好,压力峰值最大误差不超过 5%。

图 4 是文献[11]SY25 试验(复土厚度 90cm)第三次加载复土表面压力,结构属于大变形试验,图 5a, b 是试验压力波形(图中实线)与按一维波理论计算压力波形(图中虚线)

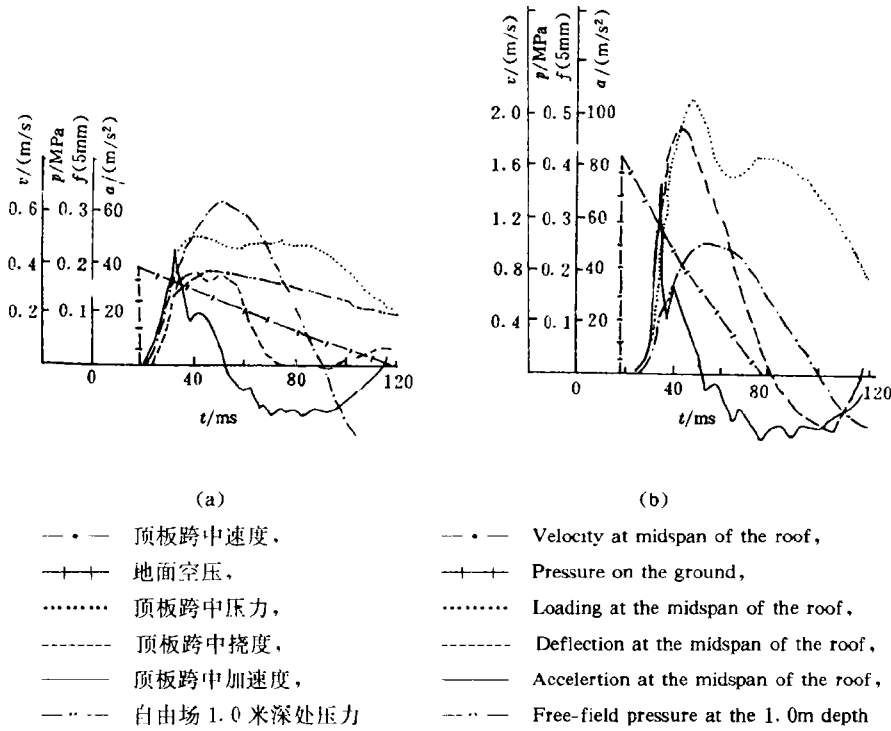


图 2 洛阳土中第四炮(a)、第六炮(b)结构顶板压力波形与同深度自由场压力波形以及结构运动参数波形的对比

Fig. 2 Test results in "luoyang soil test No. 4 (a) and No. 6 (b)

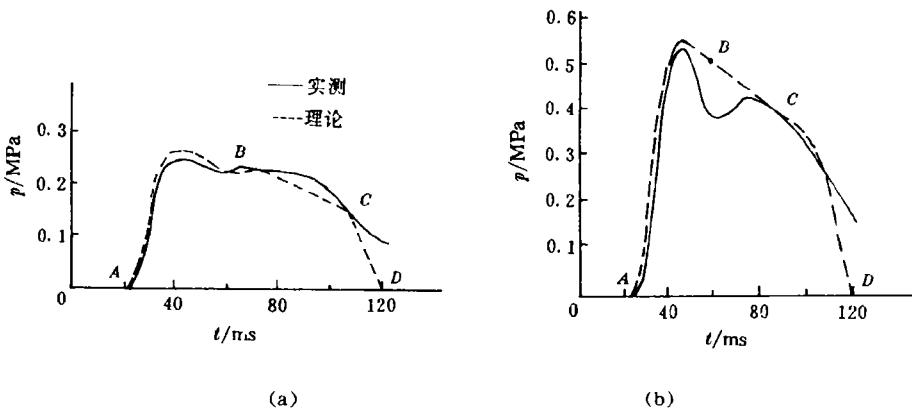


图 3 洛阳土中第四炮(a)、第六炮(b)结构顶板压力波形与理论结果的比较

Fig. 3 Comparison of the measured pressure on the roof with the theoretical solutions in "luoyang soil test No. 4 (a) and No. 6 (b)"

—— Test, ---- Theory

的比较。对跨端的计算结构按刚性考虑;对跨中的计算考虑结构顶板的变形,速度振型分布按顶板均布载下的变形形状相应考虑。图 5a,b 中的 AB 段, BC 段, CD 段与前述处理类似。计算参数根据试验有: $\rho_1=1.5\times 10^3\text{kg/m}^3$, $c_1=150\text{m/s}$,结构容重 $\rho=2.5\times 10^3\text{kg/m}^3$ 。自由场与顶板同深度的入射压力波可根据文献[1,2]有关公式进行计算。由图 5a,b 可见两者符合较好。这也说明一维波理论是能够说明大变形试验现象的。

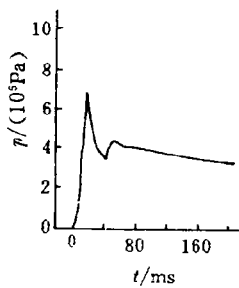
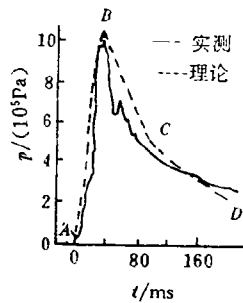
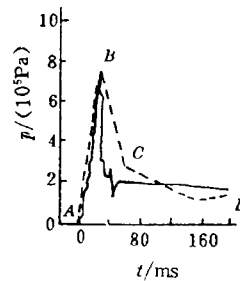


图 4 SY25 第三次加载复土表面压力

Fig. 4 Pressure acted on the ground surface in test "SY25"



(a)



(b)

图 5 SY25 第三次加载跨端、跨中试验与理论计算压力波形的比较

Fig. 5 Comparison of the pressure measured at the ends of the roof (a) and at the midspan of the roof (b) with the theoretical solution in test "ST25"

— Test, - - - Theory

图 6 中的实线是文献[10]应用有限元法计算的在 FORM-HEST1 试验脉冲荷载作用下,浅埋梁的顶压波形曲线,虚线是按一维波理论(式(1))计算的顶压波形曲线。由图可见,两者结果基本一致。计算参数取自文献[6]。由图 6 可知,脉冲荷载作用下在不到 2ms 时间内顶板中点压力迅速下降至零,而 1/4 跨及端处的压力仍保持在 2.5MPa 和 7.0MPa 水平,上述现象与 FOAM-HEST1 试验及文献[6]的有限元分析结果一致。这就进一步证实了一维波理论对顶板荷载确定的有效性。

图 7 是文献[8]中洛阳砂第四炮结构试验顶板压力波形与同深度自由场应力波形的比较。图 8 是根据文献[3]的拱效应法计算出的压力波形(虚线)与图 7 中的顶压波形(实线)的比较。结构计算参数取自图 1,泊松比 $\nu=0.29$,内摩擦角 $\phi=36^\circ$,从图 8 可以看出试验结果与按拱效应法算出的结果相差较大,由此可见,拱效应法不能反映核爆条件下结构荷载形式。

综上所述,中外试验结果、国内各个单位的试验结果与理论分析的对比表明浅埋结构顶板荷载按一维波动理论进行分析,即忽略二维效应,误差不大,可以采用。荷载确定方法由公式(1)、(2)、(3)表示。

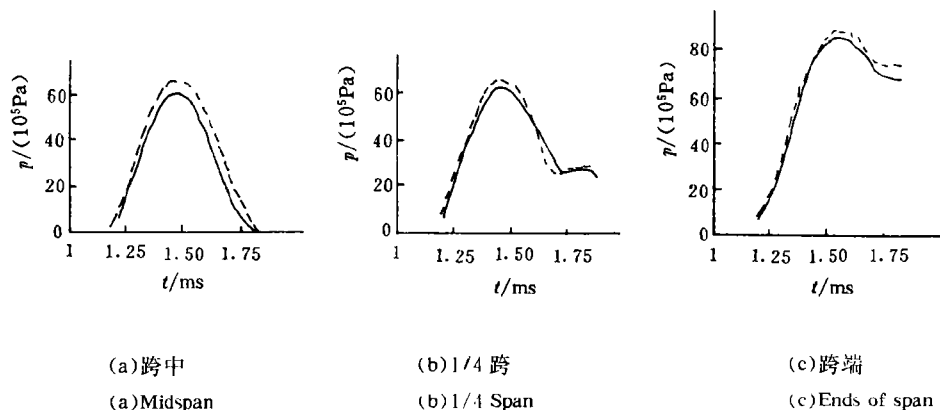


图 6 脉冲荷载下浅埋梁有限元与公式(1)计算的压力对比曲线

——有限元, -----公式(1)

Fig. 6 Comparison of the pressure curves calculated with FEM and Eq. (1)

for a shallow-buried bases under impulse load

——FEM, -----Eq. (1)

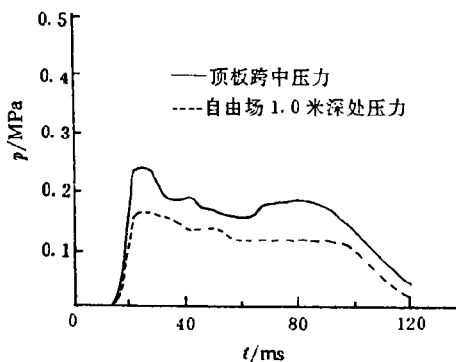


图 7 洛阳砂中第四炮结构试验顶板压力波形与同深度自由场应力波形的比较

Fig. 7 Comparison of the measured pressure on the roof slab and in the free-field at the same depth in "luoyang sand test No. 4"

—— Loading at the midspan of the roof,
----- Free-field pressure at the 1.0m depth

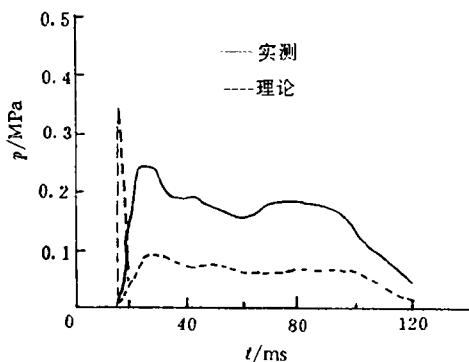


图 8 拱效应法计算压力波形与试验压力波形的比较

Fig. 8 Comparison of the measured waveform with the theoretical solution according to "arching-effect" method

—— Test, ----- Theory

2 结构底部荷载

目前以一维波理论确定底部相互作用荷载是假定结构底部的动反力为^[5]:

$$p_i(t) = \rho_2 c_2 W(t) \tag{4}$$

式中： ρ_2, c_2 分别是底部介质密度和加载波速， $W(t)$ 同前。

现与试验结果进行对比。图9是洛阳土中第六炮底部试验时程曲线^[8]，图10是试验压力波形(实线)。与按式(4)计算压力波形(虚线)的比较，计算参数取自图9。由图10可知，理论计算结果比试验结果小达34%。从试验可以看出(图中实线)，当底部速度下降到零时，位移达到最大值，此时荷载仍有较大值，甚至速度为负值时，荷载仍是正值。而理论计算(图中虚线)可以看出，当速度为零时，荷载为零，这是不符合试验现象的。究其原因底部横向有限尺寸的影响(即二维效应的影响)比顶盖要显著，根据二维弹性波动理论的研究，结构底部的荷载不仅与结构运动速度有关，还与结构位移项及位移积分有关^[13]。

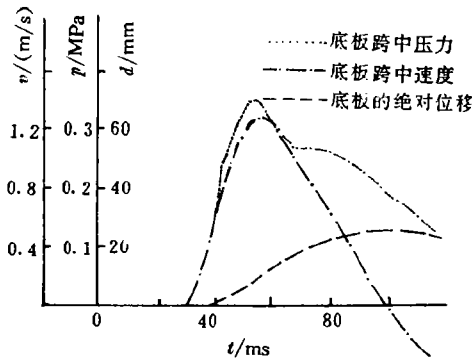


图9 洛阳土中第六炮底部试验时程曲线
Fig. 9 Test results of the floor in
“luovang soil test No. 6”

..... Pressure at the midspan of the floor,
- · - Velocity at the midspan of the floor,
----- Absolute displacement of the floor

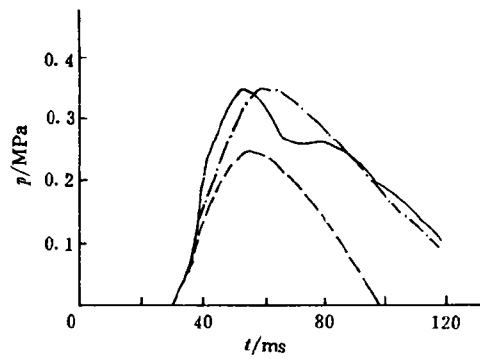


图10 试验压力波形与公式(4)计算压力波形的比较以及公式(11)计算压力波形的比较
—实测, ---式(4), - · -式(11)

Fig. 10 Comparison of the stress waveform obtained from the test, Eq. (4) and Eq. (11)
-----Test, ----Eq. (4), - · -Eq. (11)

如图11考虑纵向较长的齐地表工事，通常将其简化成平面应变模型。 $p(t)$ 是作用于地表的突加线性衰减冲击波荷载，假定 $p_{qd}(t)$ 是结构底部垂直向单位面积的平均反力，忽略侧壁侧力，则齐地表刚性结构的动力平衡方程为：

$$MW(t) = [p(t) - p_{qd}(t)] \cdot F \tag{5}$$

式中： M ——结构总质量， F ——结构顶、底板受载面积： $p(t) \begin{cases} p_m(1 - t/t_r) & t \leq t_r \\ 0 & t > t_r \end{cases}$

对受冲击荷载的地表无限长条刚性基础，其均匀分布的底部反力表达式为^[13]：

$$\begin{aligned} R(t) &= F \cdot p_{qd}(t) \\ &= \rho_2 c_2 F W + \rho_2 c_2^2 L A_1 W + 0.5 \rho_2 c_2^3 (D_0 - A_1) \cdot \\ &\quad \left[\int_0^t \tau^2 W(t - \tau) \exp(-\tau L c_2 / (aF)) d\tau \right] / (aF / (L \cdot c_2))^3 \end{aligned} \tag{6}$$

式中: D_w, A_v, α 为与介质有关的常数, 对平面问题 $L = 2$, 式(6)表明, 结构基底的动反力由一维效应 $\rho_2 c_2 \dot{W}(t)$ 项加上另外二项, 一项是反映地基刚度, 另一项是反映辐射阻尼和地基效应的积分项。

引入如下无量纲:

$$\begin{aligned} \bar{W}(\bar{t}) &= \mu / (\rho_m t_+^2) \cdot W(t), \quad \bar{t} = t / t_+, \\ \bar{p}_m(\bar{t}) &= 1 / p_m \cdot p_m(t), \quad a = (\rho_2 c_2 t_+) / \mu, \\ b &= (C_p t_+) / l, \quad \mu = M / F \end{aligned}$$

这里 a 表示单位受载面上长为 $C_p t_+$ 的土体质量与结构质量之比, b 表示压缩波在 t_+ 时间内在土中走过的距离与结构跨度之比。

把上述无量纲连同式(6)代入式(5)有

$$\bar{W} + a\bar{W} + abA_v\bar{W} + 0.5ab^4(D_w - A_v)/a^3 \cdot \int_0^{\bar{t}} \bar{W}(t - \tau)\tau \exp(-n\tau/a) \cdot d\tau = \bar{p}(\bar{t}) \quad (7)$$

则底部总的动反力为

$$\bar{p}_m(\bar{t}) = \bar{p}(\bar{t}) - \bar{W} \quad (8)$$

底部反力为

$$\bar{p}_g(\bar{t}) = \bar{p}(\bar{t}) - (1 - \mu_g)\bar{W} \quad (9)$$

式中: $\mu_g = \mu_g / \mu$, μ_g ——底部单位受载面积质量。

对式(7)进行离散, 采用直接积分法, 有如下形式:

$$\bar{W}_n + a\bar{W}_n + abA_v\bar{W}_n + 0.5ab^4(D_w - A_v)/a^3 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} [Q]_{n-i} W_i + [Q]_0 W_n \right) = \bar{p}_n(\bar{t}) \quad (10)$$

式中 $[Q]_{n-1} = \int_0^{\Delta} (\tau/\Delta) \cdot \{Q[(n+1-i)K\Delta - \tau]\} + (1 - \tau/\Delta)Q[(n-i)\Delta - \tau]\} \cdot d\tau$

$$[Q]_0 = \int_0^{\Delta} \tau/\Delta \cdot Q(\Delta - \tau) d\tau, \quad Q = (t - \tau)^2 \cdot \exp(-\alpha(t - \tau)/\eta),$$

Δ ——时步。

工程中, a, b 的范围大致在 5.0~15.0, 5.0~10.0。对不同的 a, b 情况, 式(6)中各项对底部的动反力的比较分别绘于图 12。从图 12 中可以看出, 在工程范围内积分项的影响可以忽略不计, 随着 b 的增大, 二维效应越来越显著, 表现为位移项的影响越来越大, 计算出的动反力比一维波理论计算的结果高达 41%。图 13 是在不同 a, b 情况下, 底板动反力的比较。由图 13 可知, 考虑了位移的影响后, 相应的荷载峰值比一维波理论算出的结果提高了 15%~25%, 因此, 底部相互作用荷载形式宜采用:

$$p_m(t) = \rho_2 c_2 \dot{W}(t) + \rho_2 c_2^2 \cdot L \cdot A_v / F \cdot W(t) \quad (11)$$

下面我们仍以图 10 给出位移与速度的试验曲线的结果按式(11)进行计算, 为便于比较, 将计算压力波形(图中点划线)也绘于图 10, 可以看出修正的底板荷载理论(式(11))与试验结果吻合相当好。理论曲线之所以没有出现第二峰值, 是因为底部荷载主要是“地基反力”, 波动效应不明显。而结构试验时, 基坑回填土下有原状土。由于底部荷载的反射使之出现第二峰值。总之, 试验结果与理论分析对比表明, 浅埋结构底板荷载按式(11)进行分析是可以近似代表的。

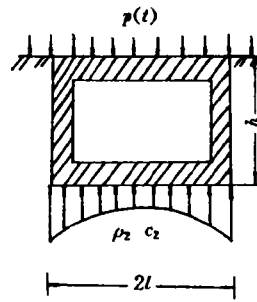
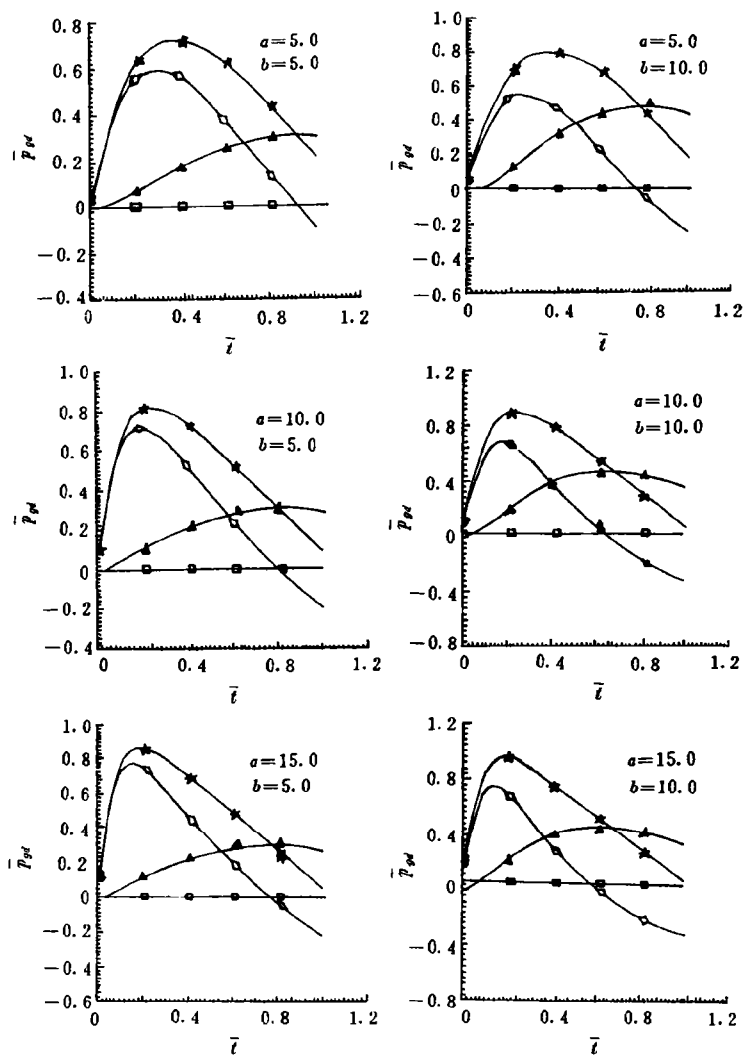


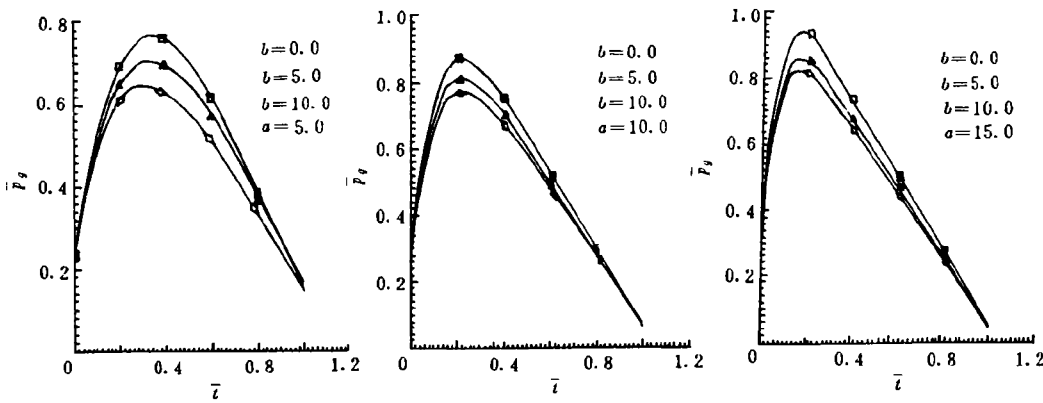
图 11 齐地表刚性结构平面应变模型
Fig. 11 Plane-strain model of the rigid surface-flush structures



- ★ 底部总的反力 ★ Reaction of the bottom for total term
- ◇ 只有速度项的底部反力 ◇ Reaction of the bottom for velocity term
- ▲ 只有位移项的底部反力 ▲ Reaction of the bottom for displacement term
- 只有积分项的底部反力 □ Reaction of the bottom for integral term

图12 公式(6)中各项在不同 a, b 情况下, 对底部动反力影响的比较

Fig. 12 The effects of each term in Eq. (6) on the dynamic reactions on the floor for different a and b

图13 底板动反力在不同 a, b 下的比较Fig. 13 Comparisons of the reactions on the floor for different a and b

3 侧墙荷载

文献[9]试验实测结果表明,侧墙中腰处压力波形与同深度自由场压力波形很相似,且两者的压力存在一比例常数,虽然侧墙上下端压力波形与同深度自由场压力波形不相似,但这是局部的,由于其对称性对结构的运动无影响。故这种局部效应可以忽略不计。因此,侧墙压力近似等于相应深度处自由场压力的 $\nu/(1-\nu)$ 倍,即:

$$p(z, t) = \zeta p_h(z, t)$$

式中: $\zeta = \nu/(1-\nu)$ (侧压系数), $p_h(z, t)$ —— 与侧墙各处相应深度上自由场压力, t —— 以入射波达顶板为零时计。

4 结论

通过以上理论计算及试验结果的对比分析,可以得出如下几点结论:

1. 顶板荷载用一维波动理论是完全可以近似代表的。
2. 底板荷载用一维波动理论误差较大,对一般工程而言,还必须计入位移项的影响,即考虑二维效应修正项。
3. 侧墙压力近似等于同深度处自由场压力的 ζ 倍。

参 考 文 献

- 1 钱七虎,陈震元. 冲击波作用下浅埋结构复土层的中卸荷波. 爆炸与冲击, 1982, 2(1): 24~37
- 2 陈震元,钱七虎. 冲击波作用下土中浅埋刚性结构动力反应分析. 爆炸与冲击, 1985, 5(2): 21~33
- 3 Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects, ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice-No. 42(1985)
- 4 钱七虎,方 秦. 岩土介质中爆炸波与结构相互作用. 相互作用讨论会, 1991
- 5 The Air Force Manual For Design And Analysis of Hardened Structure. AFWL-TR-74102, 1974
- 6 Windham J E. Finite-element Calculations of FOAM-HEST1. AD-A085255, 1980
- 7 王作民. 土中浅埋框架结构荷载的试验研究. 防护工程学会结构与建筑委员会第一次学术交流会议文. 南京.

1989

- 8 总参工程兵防护研究所. 浅埋土中结构荷载模型研究. 1987. 8
- 9 工程兵工程学院. 核爆条件下土中浅埋结构实用计算法. 1986
- 10 Qian Qihu, Fang Qin. Two Important Problems on Defining Loads on and Dynamic Analysis to Shallow-Buried Structures, Proceedings of International Symposium on Unique Underground Structures, Denver, U. S. A. 1990
- 11 江水德, 陈肇元, 等. 黄土中钢筋混凝土板动力反应试验研究. 防护工程, 1992, (1): 15~20
- 12 宗福开, 俞儒一. 核爆冲击波作用下齐地表刚性结构的二维动力设计荷载. 工程兵工程学院学报, 1985, (2): 1~12
- 13 严人觉, 等. 动力基础弹性半空间理论. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- 14 Achenbach J D. Wave Propagation in Elastic Solid. 1980

COMPARISON STUDIES ON THE LOADING THEORY AND TEST RESULTS FOR SHALLOW-BURIED STRUCTURES UNDER NUCLEAR EXPLOSION

Qian Qihu, Wang Mingyang

(*Nanjing Engineering Institute, Nanjing, 210007*)

ABSTRACT Comparisons among the results tested both abroad and in China as well as the theoretical solutions obtained by using two approaches are presented in this paper. Certain modifications are proposed when the theoretical solution and the test data are not compatible.

KEY WORDS wave theory, arch-effect, shallow-buried structure