

DOI: 10.11779/CJGE201602021

饱和砂土中浅埋单药包爆炸液化特性分析

王维国^{1, 2}, 陈育民^{1, 2}, 张意江^{1, 2}, 陈晨伟^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 堰塞坝和挡水堤坝的爆破泄洪均可能涉及饱和土中的浅埋爆炸问题, 然而关于饱和土中浅埋炸药爆炸引起的动态孔隙水压力及液化的研究则鲜有报道。基于饱和砂土中的浅埋单药包爆炸液化现场试验, 分析了浅埋爆炸引起的土中超孔隙水压力变化特征, 研究了药量、埋深和爆距等因素对土中超孔隙水压力上升的影响。在评价饱和砂土中封闭爆炸液化经验预测方法的基础上, 提出了考虑药包埋深和比例距离的修正的液化预测经验模型, 并与金银岛爆炸液化试验数据进行对比验证。研究表明, 修正后的液化预测经验模型可以描述比例埋深对爆后孔隙水压力上升的影响, 可以较为精确地评价和预测浅埋单药包爆炸引起的饱和土中液化的发生程度及范围。研究成果可以作为饱和土中封闭爆炸液化经验预测方法的补充和完善。

关键词: 饱和砂土; 爆炸液化; 浅埋单药包爆炸; 比例埋深; 比例距离; 修正经验模型

中图分类号: TU437

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)02-0355-07

作者简介: 王维国(1986-), 博士研究生, 目前主要从事土体爆炸动力响应及振动液化方面的研究。E-mail: 2008hmily@163.com。

Characteristics of liquefaction induced by single shallow-buried detonation in saturated sand

WANG Wei-guo^{1, 2}, CHEN Yu-min^{1, 2}, ZHANG Yi-jiang^{1, 2}, CHEN Chen-wei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The practical problems of blasting landslide dams or water retaining dams may involve a subject of shallow-buried explosions in saturated soils. However, the studies on dynamic pore water pressure and liquefaction induced by a single shallow-buried detonation are rarely found in open technical literatures. A series of single shallow-buried detonation field tests in saturated sand are conducted to study the characteristics of the excess pore water pressure and the influences of charge mass, buried depth and distance on the generation of pore water pressure. Then the empirical prediction methods based on fully-contained detonations are evaluated. And a modified empirical model with respect to scaled distance and scaled buried depth is proposed to predict the excess pore water pressure or liquefaction based upon the evaluations. A group of experimental data from Treasure Island liquefaction tests are used to validate the modified empirical model. The results show that the modified empirical model can describe the buried depth on the generation of pore water pressure. Meanwhile, it can be utilized to accurately evaluate and predict the liquefaction degree or range. The results can be used as a supplement and improvement to the empirical methods for predicting the liquefaction produced by fully-contained detonations in saturated soils.

Key words: saturated sand; blast-induced liquefaction; single shallow-buried detonation; scaled buried depth; scaled distance; modified empirical model

0 引 言

饱和土体液化通常是指易液化土体受到动力荷载作用时, 土中孔隙水压力上升而有效应力下降, 固体介质逐渐转变为黏性流体的行为^[1]。饱和土体的爆炸液化属于爆炸应力波传播的后效应问题, 同时也是岩土工程防护研究领域的一个引人注目的热点课题^[2]。关于爆炸作用下饱和土液化特性的研究大多针对实际

工程需要而进行, 因此对于爆炸荷载引起的液化研究主要集中于试验及在此基础上形成的经验分析方法。

Charlie 等^[3]、王明洋等^[4]通过研究发现饱和土中的封闭气体对爆炸波传播及液化的发生会产生一定的

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51379067); 长江学者创新团队发展计划资助项目(IRT1125)

收稿日期: 2015-03-16

影响,饱和土体的三相特性大大增加了爆炸液化理论研究的难度。对于爆炸高压状态下的完全饱和土体,其孔隙中占绝对含量的水的可压缩性远小于土骨架的可压缩性,有效应力的增长远小于孔隙水压力的增长,在爆炸压缩作用过后发生土的结构破坏和液化^[5]。爆炸液化使土体的强度严重降低,引发地基失效、土坝溃决等灾害。前苏联境内的Swir-III填土大坝在上游爆破作业影响下,坝体和坝基发生了大面积液化,最终引起严重的滑坡^[2]。由于缺少成熟的爆炸液化相关理论,试验及经验分析方法是目前开展饱和土中爆炸液化研究的最主要的手段。Kummeneie等^[6]、Studer等^[7]、Al-Qasimi等^[8]、Charlie等^[9-10]均曾在单药包爆炸液化试验的基础上提出了关于爆炸液化的经验预测方法,对工程应用产生了一定的指导意义。

然而现阶段关于爆炸液化的判别和分析方法仍不完善,同时几乎所有的爆炸液化预测方法均基于饱和土中的封闭爆炸问题,而针对浅埋单药包引起的液化特性的研究相对缺乏。但不可忽视的是,堰塞湖和挡水堤坝的爆破泄洪、沿海地区地下管线的爆炸均可能涉及饱和土中的浅埋爆炸问题,因此,开展饱和土中的浅埋爆炸液化研究对实际工程具有重要的意义。本文基于饱和砂土中的浅埋单药包爆炸试验,分析药量、药包埋置深度以及爆距对土体液化特性的影响,并试图建立一种适合描述浅埋炸药爆炸的液化预测及判别分析方法,为饱和土中浅埋单药包爆炸引起的液化预测提供依据。

1 单药包爆炸液化判别分析方法

大量爆炸液化现场试验研究表明,饱和土中发生爆炸液化破坏的影响远大于爆炸直接冲击结构引起的破坏效应。研究爆炸液化引起的结构失稳及其相关损毁问题的前提是分析饱和土抗剪强度的丧失,即液化的发生过程^[2]。评价和衡量饱和土动力液化发生程度的最常用的指标为超孔隙水压力比:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}}, \quad (1)$$

式中, Δu 为孔隙水压力非峰值增量, σ'_{v0} 为初始竖向有效应力。当 $r_u=1.0$ 时,表明饱和土体处于完全液化状态;当 $r_u<0.1$ 时,微弱的孔隙水压力上升在实际应用中可以不予考虑^[11]。现阶段对于爆炸液化的判别仍主要通过系统地分析爆炸液化试验数据,建立超孔隙水压力与峰值应力、体积应变、粒子速度和比例距离等因素的经验关系,以此估计爆炸引起的液化的可能性和影响范围^[2]。其中比例距离 Z 考虑了炸药能量及爆距的影响,是衡量不同形式爆源条件下土体振动及

液化判别的主要因子。通过量纲分析获得的适用于集中药包的立方根比例距离无量纲型式为^[12]

$$Z = \rho c^2 R^3 / E, \quad (2)$$

式中, E 和 ρ 分别为炸药的能量和密度, c 为土中地震波速度, R 为测点离开爆源的距离。当所有炸药均以 TNT 当量衡量时,可以用炸药当量 W 代替爆炸能量 E ,最终可以将比例距离的无量纲型式转变成如下所示的使用更为广泛的型式:

$$Z = \frac{R}{(W_{TNT})^{\frac{1}{3}}}. \quad (3)$$

表1和图1给出了部分饱和土中的单药包封闭爆炸液化的经验预测模型。图1所示半对数坐标系中基于比例距离的线性预测模型表现出一致的液化趋势和规律,且各模型给出的完全液化($r_u=1.0$)以及可忽视的孔压上升($r_u<0.1$)所对应的比例距离基本相同。根据图1中所列的爆炸液化线性预测模型,当 $Z \leq 3 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时,极易发生完全液化;而当 $Z > 14 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时,爆炸荷载引起的土中孔隙水压力上升可以不予考虑。考虑初始有效应力的幂律型预测模型^[6]在低孔压比区域与线性模型符合较好,而完全液化对应的比例距离较线性模型要大。

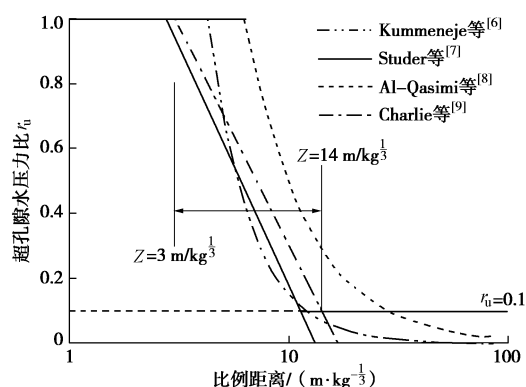


图1 部分单药包封闭爆炸液化的经验预测模型

Fig. 1 Selected empirical prediction model of liquefaction induced by a single fully-contained detonation

表1中所示的单药包爆炸液化经验判别方法均建立在饱和土封闭爆炸液化试验的基础上。饱和土中发生封闭爆炸时,自由面对爆炸波传播的影响几乎可以忽略,且爆炸能量在土中传递衰减过程中并未直接透过地表溢出,可以最大程度地引起土中孔隙水压力的上升。然而当土中炸药埋置深度较小时,部分爆炸能可能溢出地表,爆轰产物作用于药包上覆土体形成喷射物抛掷现象,从而使得作用于土中孔隙水压力上升的爆炸能变小^[13]。因此饱和土中浅埋炸药爆炸时自由面的存在对土中孔隙水压力上升的影响不可再忽视。

式 (4) 所示的比例埋深 (λ) 定义为集中药包的埋置深度 d 与等效 TNT 当量 W_{TNT} 的立方根之比, 作为衡量炸药的相对埋设深度:

$$\lambda = \frac{d}{(W_{\text{TNT}})^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

通常饱和砂土中发生封闭爆炸的条件是药包的比例埋深超过 $2.5 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ [14]。

表 1 部分单药包封闭爆炸液化的经验预测模型

Table 1 Selected empirical prediction model of liquefaction induced by a single fully-contained detonation

经验预测模型	土质	比例距离 $/(m \cdot kg^{-\frac{1}{3}})$		参考文献
		$r_u = 1.0$	$r_u < 0.1$	
$r_u = 65Z^{-2.2} \cdot \sigma'_{v0}^{-0.33}$	松砂	4.2	12.1	Kummeneje 等[6]
$r_u = 1.65 - 0.64 \ln Z$	松砂	2.8	11.3	Studer 等[7]
$r_u = 16.27Z^{-1.52}$	中密砂	6.3	28.5	Al-Qasimi 等[8]
$r_u = 1.645 - 0.585 \ln Z$	松砂	3.0	14.0	Charlie 等[9]

2 单药包浅埋爆炸液化试验

2.1 试验概况

爆炸液化试验在一呈倒置圆台形状的试验坑内进行, 试验坑的尺寸规模如图 2 所示。坑内回填易液化的长江灰细砂, 其基本物理力学性质: $\rho_{\text{sat}}=1835 \text{ kg/m}^3$, $D_{50}=0.18 \text{ mm}$, $C_u=2.11$, $G_s=2.633$, 黏粒含量 $=1\% \sim 2\%$ 。

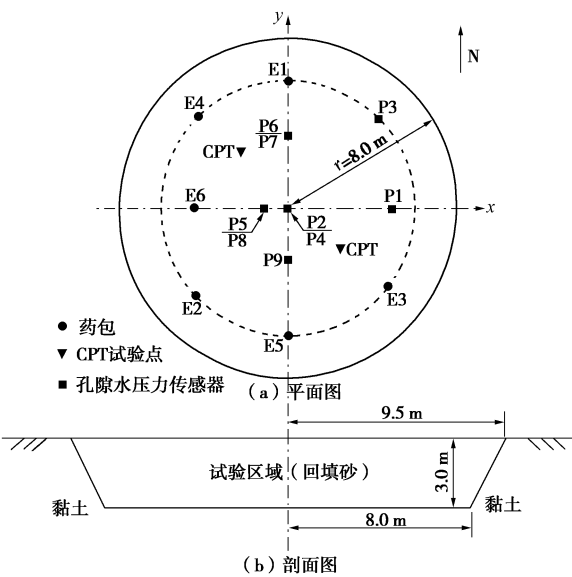


图 2 爆炸液化试验布置示意图
Fig. 2 Layout of blast-induced liquefaction tests
根据 CPT 试验结果以及基础设计土体性质估算

手册 [15] 可以确定该饱和砂土埋药深度处的初始相对密实度为 30%~35%。试验选用#2 岩石乳化炸药, 根据水下爆轰试验可以确定该乳化炸药的近似等效 TNT 当量为 80% 的实际用量 [16]。表 2 所示为根据药包质量及埋深设计的 6 组爆炸试验工况, 每组试验的药孔布置如图 2 所示。

表 2 试验药量及埋药深度

Table 2 Charge masses and buried depths for blasting tests

试验 编号	W_{TNT}/kg	d/m	$\lambda/(m \cdot kg^{-\frac{1}{3}})$
E1	0.24	1.13	1.82
E2	0.32	0.83	1.21
E3	0.24	0.93	1.49
E4	0.32	1.35	1.97
E5	0.32	0.93	1.36
E6	0.16	1.35	2.49

岩土爆破专用 CYY2 型传感器 (图 3 (a)) 的埋设位置如图 2 所示, 埋设深度如表 3 所示。试验前测定各孔隙水压力传感器与药孔之间的相对距离。孔隙水压力的采集采用 XH5861 型高速动态应变采集系统 (图 3 (b)), 其最高采样频率可达到 200 kHz, 试验中每通道数据采集频率为 13 kHz, 以最大可能地获得爆炸瞬间由冲击压缩效应造成的峰值孔隙水压力。土中孔隙水压力传感器的埋设方法按如下步骤进行:

- (1) 场地平整后先将管径为 75 mm 的开槽硬质 PVC 聚合管以旋转取土配合水力冲击法打入指定深度, 钻设深度为设计埋药深度和药包半径之和。
- (2) 场地饱和后校核管内深度, 将孔隙水压力传感器附于带刻度的细木条上插入孔内至设计埋设深度后固定。
- (3) 边拔 PVC 管边往管内回填细砂并捣实后静置 24 h。
- (4) 校核细木条嵌入土层的深度, 记录孔隙水压力传感器的实际埋设深度。

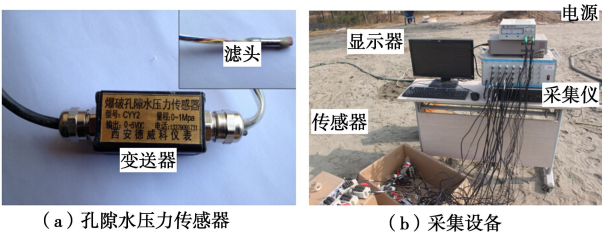


图 3 孔隙水压力监测和采集设备
Fig. 3 Monitoring and acquisition equipments of pore water pressure data

表 3 传感器的埋设深度及其规格

Table 3 Buried depths and measuring ranges of transducers		
传感器编号	埋设深度/m	量程/MPa
P1	1.48	0.2
P2	1.25	0.2
P3	1.38	0.2
P4	1.75	0.5
P5	1.22	0.5
P6	1.02	0.5
P7	1.52	1.0
P8	1.72	1.0
P9	1.60	1.0

2.2 超孔隙水压力分析

图 4 所示为爆点 E1 ($W_{\text{TNT}} = 0.24 \text{ kg}$, $d = 1.13 \text{ m}$) 爆炸过程中实测的超孔隙水压力时程曲线。如图所示, 所有测点处的超孔隙水压力在炸药起爆瞬间均上升至一个远高出后期孔隙水压力累积期的峰值。该孔隙水压力峰值主要由爆炸冲击压缩引起, 且随着测点爆距的增大, 实测的孔隙水压力峰值呈明显下降趋势。由单药包爆炸引起的超孔隙水压力在爆后短时间内即达到稳定, 随后进入长时间的消散过程。由于爆炸波及爆炸能量在土中的衰减, 超孔隙水压力累积值随测点比例距离的增大而快速下降。图中所示离药包 E1 最近的测点 P6 和 P7 记录的超孔隙水压力累积值分别为 5.7 kPa 和 6.3 kPa, 初始竖向有效应力分别为 8.36 kPa 和 12.45 kPa, 因此根据式 (1) 计算得到两测点处的超孔隙水压力比 r_u 仅为 0.68 和 0.51, 均未达到完全液化的状态。

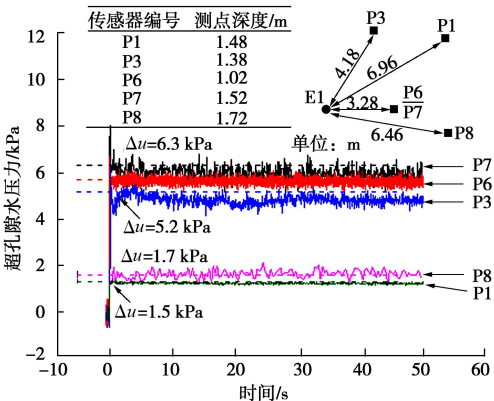


图 4 爆点 E1 爆炸过程中测点处超孔隙水压力时程曲线
Fig. 4 Time histories of excess pore water pressure for Test E1

图 5 为爆点 E5 ($W_{\text{TNT}} = 0.32 \text{ kg}$, $d = 0.93 \text{ m}$) 爆炸过程中实测的超孔隙水压力时程曲线。图中离药包 E5 最近的测点 P9 处实测的超孔隙水压力比仅为 0.412, 同样未达到完全液化点。当比例距离增大时, 测点处实测的超孔隙水压力累积值同样呈明显下降的趋势。

综合分析图 4, 5 可知, 对于比例距离基本接近的测点, 监测点埋深较大时能获得更明显的孔隙水压力上升。对比图 5 中监测点 P4、P5 和 P9 处的超孔隙水

压力时程曲线, 爆后累积超孔隙水压力的持续时间随着测点埋深的增大而增大, 而消散速度则呈相反的规律, 这与 Rollins 等^[17]的试验观测结果一致。引起此现象的可能原因为: 深度较浅的监测点受到自由面的影响更大, 松软砂土中较短的排水渗径距离使得孔压消散速度变快; 且由于药包埋深较小, 部分爆炸能量直接通过自由面耗散, 从药包底部及横向传递的爆炸能量相对减小, 从而使得超孔隙水压力原本从底部向上消散的趋势减弱。因此浅埋爆炸作用下爆炸能的溢出是造成饱和土中超孔隙水压力上升偏小的主要原因。而透过自由面溢出的爆炸能量则主要作用于药包上覆饱和土体, 并以喷射物的形式透过自由面喷出, 爆轰气体会携带上层土体同时高温高压的气态爆轰产物渗入到土体孔隙中而使得气室周围形成干土区, 短时间内仍会形成爆坑现象, 如图 6 所示。

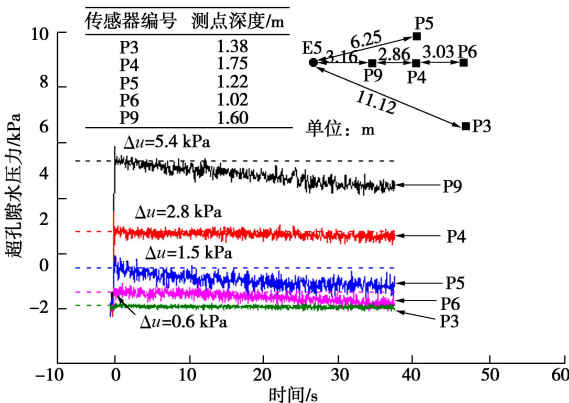


图 5 爆点 E5 爆炸过程中测点处超孔隙水压力时程曲线
Fig. 5 Time histories of excess pore water pressure for Test E5



图 6 饱和砂土中浅埋爆后形成的可见爆坑(E5)
Fig. 6 Apparent crater induced by a shallow-buried detonation in saturated sand (E5)

2.3 超孔隙水压力比分析

图 7 所示为爆点 E5 ($\lambda = 1.36 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$) 爆后各测点处超孔隙水压力比的实测值与基于封闭爆炸试验的 Studer 模型^[7]经验预测值的对比。如图所示, 试验实测的超孔隙水压力比在比例距离的半对数坐标中可以用线性关系描述, 得到拟合公式:

$$r_u = 0.88 - 0.318 \ln Z \quad (5)$$

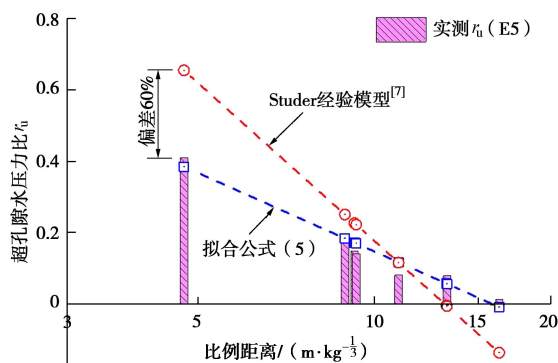


图7 经验模型与实测超孔隙水压力比的偏差分析

Fig. 7 Comparison of values of r_u between measured data and predicted results from Eq. (5) and Studer model^[7]

对比 Studer 经验模型和拟合公式 (5), 浅埋爆炸作用下的液化趋势与封闭爆炸时基本一致, 但浅埋药包爆炸时由于自由面的影响使得超孔隙水压力的上升明显减弱。特别对于靠近爆源的区域, 能量传递路径短, 消耗能量较少, 透过自由面耗散的爆炸能量直接影响产生土体液化的能量占比; 而随着爆距的增大, 用于克服土粒间作用力的能量占比逐渐增大并占绝对比例时, 自由面对液化的影响逐渐减弱。当 $r_u > 0.1$ 时, 对于指定药包及比例距离, 封闭爆炸条件下爆炸液化趋势将变得更为明显。根据图 7 中 Studer 经验模型与爆点 E5 爆后实测超孔隙水压力的偏差分析, 基于封闭爆炸的液化经验预测模型已不再适合描述浅埋单药包爆炸液化的情况。在靠近爆源的区域, 预测偏差甚至达到 60% 以上, 已不能满足实际应用要求。

3 修正的液化预测经验模型

3.1 液化影响因素分析

根据实测超孔隙水压力 (比) 的分析, 浅埋药包条件下除埋药量和爆距之外, 药包埋深对土中孔隙水压力上升的影响同样不可忽视。为分析药包埋深对超孔隙水压力上升的影响, 图 8 给出了药包 E4 和 E5 爆后实测的超孔隙水压力比在比例距离半对数坐标中的分布规律。对比爆点 E4, E5 爆炸液化趋势拟合线和 Studer 经验模型, 当在指定比例距离的测点处, 埋深较大的药包爆后能产生更为激烈的孔隙水压力上升现象, 当药包的比例埋深增大时, 液化趋势将更为明显。

3.2 修正的液化预测经验模型

图 9 所示为试验 E1~E6 爆炸过程中所有测点处记录的超孔隙水压力比随比例距离的分布关系。利用多元回归方法对可能影响土中超孔隙水压力发展的因子或其组合效应进行分析, 以确定各影响因子与超孔隙水压力 (比) 的相关程度。影响因子包括比例距离、初始竖向有效应力以及药包的比例埋深等。根据饱和和砂土中浅埋单药包爆炸液化试验数据得到修正后的液化预测经验模型:

$$r_u = 0.55 - 0.256\lambda \cdot \ln Z + 1.154 \ln \lambda, \quad R^2 = 0.86. \quad (6)$$

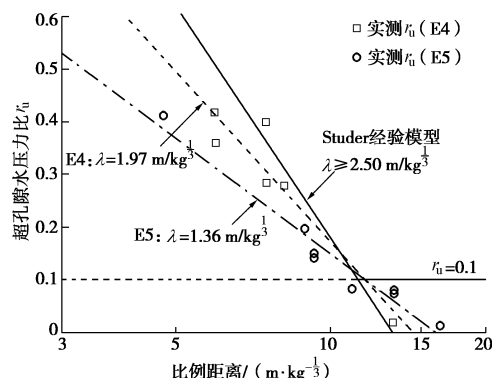


图8 药包埋深对土中超孔隙水压力比的影响

Fig. 8 Influences of buried depth on observed values of r_u

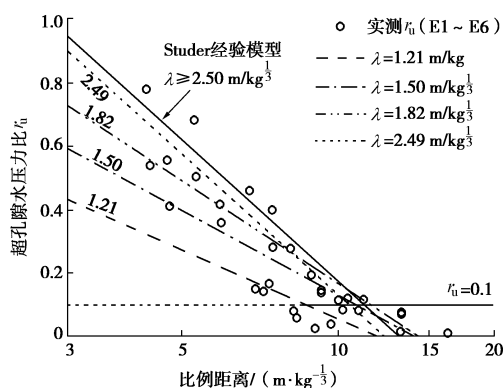


图9 修正经验模型随药包比例距离及比例埋深的变化趋势

Fig. 9 Influences of scaled distance and scaled buried depth on liquefaction tendency by modified empirical model

图 9 中同时给出了修正后的爆炸液化预测经验模型随药包比例埋深及比例距离的变化趋势。如图所示, 药包比例埋深对液化的影响随着比例距离的减小而逐渐增大。同时当比例埋深逐渐增大至 $2.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 基于浅埋爆炸液化的修正经验模型越接近 Studer 经验模型的液化趋势, 表明当饱和和砂土中的药包比例埋深达到或超过该临界值时, 比例埋深对液化的影响可以不予考虑。即当药包的實際比例埋深超过 $2.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 式 (6) 可以简化为

$$r_u = 1.607 - 0.64 \ln Z. \quad (7)$$

因此, 基于饱和土中浅埋单药包爆炸液化试验数据以及上述分析结果, 修正后的爆炸液化预测经验模型的适用条件为: $4 \text{ m/kg}^{1/3} \leq Z \leq 17 \text{ m/kg}^{1/3}$, $\lambda \geq 1.21 \text{ m/kg}^{1/3}$, 而超过此范围的液化预测可以采用外推法进行初步估算, 但仍需要额外的试验进行验证。

3.3 经验模型的偏差分析与验证

图 10 所示为修正后的液化经验模型的预测值分别与 6 组浅埋爆炸液化试验结果的偏差分析情况。根据图 10 (a) ~ (f) 所示, 药包的比例埋深改变时,

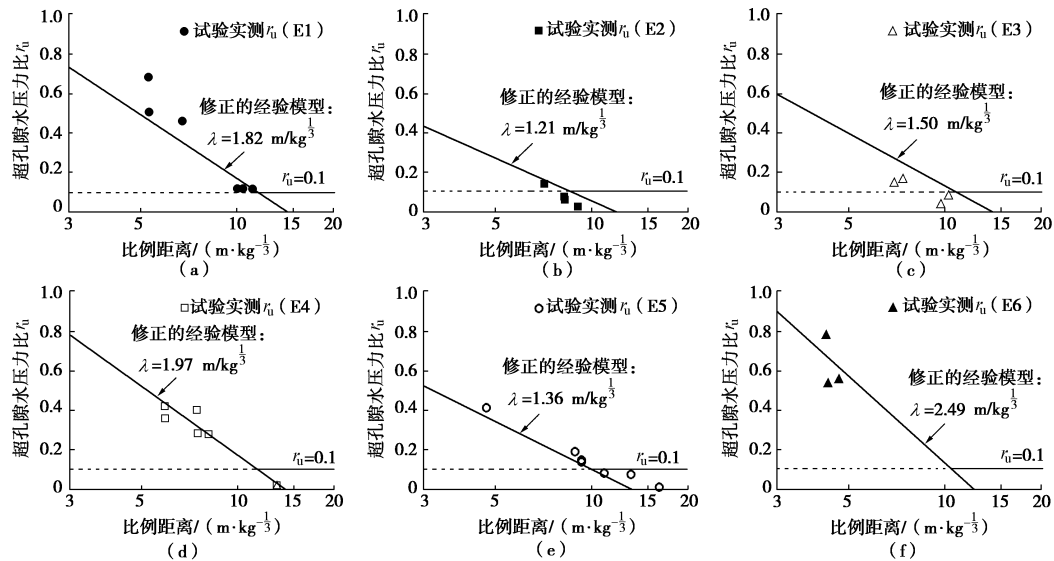


图 10 修正经验模型与各试验工况的实测数据的偏差分析

Fig. 10 Comparison of values of r_u between predictions by modified empirical model and experimental data

经验模型预测结果与试验实测的超孔隙水压力比符合较好, 且经验模型能合理地给出土中液化程度随药包比例距离及比例埋深的变化趋势, 并能近似得到爆炸液化的影响范围。除爆点 E3 实测结果与经验模型的预测值的偏差较大外, 其余试验工况的预测精确度均达到 80% 以上。

此外, 选取金银岛爆炸液化试验 (Treasure Island liquefaction test) 数据对修正的液化预测经验模型进行验证。金银岛爆炸液化试验中药包的比例埋深达到 $4.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ [18]。金银岛爆炸液化试验数据与修正后的经验模型的对比如图 11 所示, 结果显示经验模型预测值与试验结果符合较好。引起试验结果与模型预测值之间的偏差的可能原因包括: 炸药爆炸方式、土体性质等。

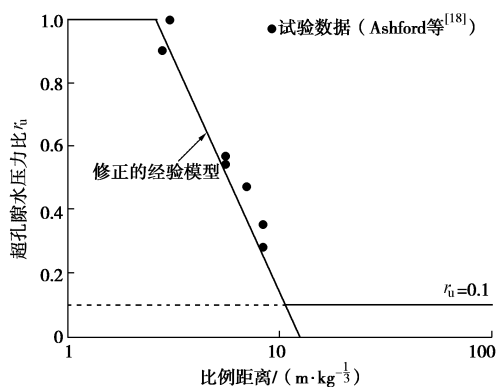


图 11 修正经验模型与金银岛液化试验数据的对比 [18]

Fig. 11 Comparison of values of r_u between predictions by modified empirical model and experimental data from Treasure Island liquefaction tests [18]

4 结 论

现有关于爆炸液化的判别和分析方法几乎都基于饱和土中的封闭爆炸问题, 而堰塞湖和挡水堤坝的爆

破泄洪、沿海地区地下管线的爆炸均可能涉及饱和土中的浅埋爆炸问题, 因此, 开展饱和土中的浅埋爆炸液化问题对实际工程具有重要的意义。本文基于一系列浅埋单药包爆炸液化现场试验, 分析了药量、爆距和埋深等因素对土中超孔隙水压力上升的影响。同时在评价封闭爆炸液化预测经验方法的基础上, 提出了考虑药包埋深和比例距离的修正的超孔隙水压力及液化预测经验模型, 并与试验数据进行了对比验证, 获得了如下主要结论:

(1) 饱和砂土中浅埋药包起爆后形成初始冲击压缩波, 使得测点处的超孔隙水压力瞬间上升至一个远高于后期孔隙水压力累积期的峰值, 而随着爆距的增大, 孔隙水压力峰值及爆后累积超孔隙水压力均快速下降。

(2) 浅埋爆炸条件下自由面对土体液化的影响表现为: 较小的药包埋深使得部分爆炸能量直接通过地表耗散, 从药包底部及横向传递的爆炸能量相对减小, 从而造成超孔隙水压力原本从底部向上消散的趋势减弱, 同时松软砂土中较短的排水渗径距离使得孔压消散速度变快, 使得超孔隙水压力的最大累积值及其持续时间均随着测点埋深的增大而增大。

(3) 浅埋爆炸引起的土体液化趋势与爆炸时基本一致, 在比例距离半对数坐标中可以近似用线性关系描述; 然而埋药深度的减小使得产生土中超孔隙水压力的爆炸能量减小, 表现为液化趋势的明显减弱, 特别对于靠近爆源的区域, 当药包比例埋深为 $1.36 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 试验结果与封闭爆炸经验预测公式的偏差达到 60% 以上。因此基于封闭爆炸的液化预测经验方法不再适合描述浅埋爆炸问题。

(4) 在爆炸液化经验预测公式中引入药包比例埋深以考虑浅埋爆炸时的液化特性, 根据修正后的液化

预测经验模型, 药包比例埋深对液化的影响随着比例距离的增大而逐渐减小, 这是由于在靠近爆源的区域, 能量在传递路径上消耗较少, 透过自由面耗散的爆炸能量直接影响产生土体液化的能量占比, 而用于克服土粒间作用力的能量占比随着爆距的增大逐渐占绝对比例。

(5)修正后的经验模型对试验结果的预测精确度在80%以上, 能较好地描述比例埋深对爆后孔隙水压力上升的影响, 其适用条件为 $4 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}} \leq Z \leq 17 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, $\lambda \geq 1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$, 而当比例埋深逐渐增大至 $2.5 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时, 修正模型的液化趋势与封闭爆炸引起的趋势基本一致, 即药包的比例埋深对液化的影响可以基本不予考虑。

参考文献:

- [1] MARCUSON W F. Definition of terms related to liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1978, **104**(9): 1197 - 1200.
- [2] 钱七虎, 王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang. Impact and explosion effects in rock and soil[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. (in Chinese))
- [3] CHARLIE W A. Review of present practices used in predicting the effects of blasting on pore pressure[R]. Denver Colorado: U. S. Department of the Interior, 1985.
- [4] 王明洋, 钱七虎. 爆炸波作用下准饱和土的动力模型研究[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(6): 103 - 110. (WANG Min-yang, QIAN Qi-hu. Study on dynamic model for quasi-saturated soil under explosive wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(6): 103 - 110. (in Chinese))
- [5] 王明洋, 国胜兵, 赵跃堂, 等. 饱和砂土动力液化研究进展[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, **3**(1): 13 - 18. (WANG Min-yang, GUO Sheng-bing, ZHAO Yue-tang, et al. Progression of liquefaction investigation for saturated sand soil under dynamic loading[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2002, **3**(1): 13 - 18. (in Chinese))
- [6] KUMMENEIE O, EIDE O. Investigation of loose sand deposits by blasting[C]// Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris, 1961: 491 - 497.
- [7] STUDER J, KOK L. Blast-induced excess porewater pressure and liquefaction experience and application[C]// International Symposium on Soil under Cyclic and Transient Loading. Swansea, 1980.
- [8] AL-QASIMI E M A, CHARLIE W A, WOELLER D J. Canadian liquefaction experiment (CANLEX): Blast induced ground motion and pore pressure experiments[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(1): 1 - 13.
- [9] CHARLIE W A, DOEHRING D O. Groundwater table mounding, pore pressure, and liquefaction induced by explosions: Energy-distance relations[J]. Reviews of Geophysics, 2007, **45**(4): 1 - 9.
- [10] CHARLIE W A, BRETZ T E, SCHURE L A, et al. Blast-induced pore pressure and liquefaction of saturated sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(8): 1308 - 1319.
- [11] ELLER J M. Predicting pore pressure response in in-situ liquefaction studies using controlled blasting[D]. Oregon: Oregon State University, 2011.
- [12] LEONG E C, ANAND S, CHEONG H K, et al. Re-examination of peak stress and scaled distance due to ground shock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, **34**: 1487 - 1499.
- [13] PATHIRAJA K S. Critical assessment of the CANLEX blast experiment to facilitate a development of an in-situ liquefaction methodology using explosives[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2000.
- [14] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 变埋深条件下饱和土爆炸能量耦合系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1574 - 1578. (MU Chao-min, REN Hui-qi, LI Yong-chi, et al. Experiment study of explosion energy coupling coefficient with different burial depths in saturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1574 - 1578. (in Chinese))
- [15] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on estimating soil properties for foundation design[R]. California: Electric Power Research Institute, EPRI-EL-6800, 1990.
- [16] WANG P, XEI X A, HE W D. Preparation and performance of a novel water gel explosive containing expired propellant grains[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2013, **10**(4): 495 - 507.
- [17] ROLLINS K M, LANE J D, DIBB E, et al. Pore pressure measurement in blast-induced liquefaction experiments[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2005(1936): 210 - 220.
- [18] ASHFORD S A, ROLLINS K M, LANE J D. Blast-induced liquefaction for full-scale foundation testing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(8): 798 - 806.