

爆炸法加固砂土地基与软黏土地基对比分析

江文豪, 詹良通

(浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 在国外爆炸法加固砂土地基是一种常用的地基处理方式, 而在国内有学者采用爆炸法对深厚软黏土地基进行了加固处理。相比于爆炸法加固砂土地基, 有关爆炸法加固软黏土地基的作用机理和适用范围仍处于探索阶段。本文主要对比分析了爆炸法加固砂土地基和软黏土地基的作用机理、设计参数、施工工艺及效果评价四个方面。对比分析表明, 无论是爆炸法加固砂基还是软基, 挤密作用和排水固结作用均是两种地基加固的重要机理, 但两种地基中超孔隙水压力的产生机理存在差异: 爆炸作用下砂基中超孔压的产生机理包括压密、剪缩作用, 而软基中超孔压的产生机理主要在于压密作用。为精确描述爆炸法加固地基的效果, 本文提出了“单位质量炸药产生沉降体积(简称 *SVPU*)”的概念。爆炸作用下砂基的 *SVPU* 值大多处于 500~1 300 cm³/g, 而软基的 *SVPU* 值则处于 250~700 cm³/g, 根据 *SVPU* 值进行判断, 爆炸作用下软基的加固效果仅为砂基一半。基于对比分析结果, 对爆炸法加固软黏土地基的适用性进行了讨论, 并指出了还需进一步研究的几个方面。

关键词: 爆炸法; 砂土地基; 软黏土地基; 作用机理; 效果评价

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)02-0126-11

Comparative analysis of treatment of sand foundation and soft clay foundation by explosion method

JIANG Wen-hao, ZHAN Liang-tong

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Explosive Compaction (EC) of sand foundation is a common method of foundation treatment abroad, and some scholars in China have adopted explosion method to reinforce deep soft clay foundation as well. However, compared with sand foundation by EC, there are few engineering cases of soft clay foundation treatment by explosion method. At present, the mechanisms and scope of application for explosive treatment of soft clay foundation are still in the exploration stage. This paper compares and analyses the mechanism, design parameters, construction technology, and effect evaluation of explosive treatment for sand and soft clay foundation. The comparative analysis shows that compaction and drainage consolidation are important for both sand foundation and soft clay foundation, but there are differences in the mechanism of excess pore water pressure between the two kinds of foundations. It is concluded that the excess pore water pressure in sand foundation under explosion results in both compaction and shearing action, while primarily causing compaction in soft foundation. To accurately illustrate the effect of explosive reinforcement, this paper proposes the concept of “settling volume produced by explosive per unit mass (*SVPU*)”. The *SVPU* value of sand foundation under explosion is mostly in the range of 500–1 300 cm³/g, while the *SVPU* value of soft foundation is between 250 and 700 cm³/g. According to the *SVPU* values, the reinforcement effect of soft foundation under explosion is only half of that of sand foundation. Based on the results of comparative analysis, the paper discusses the applicability of explosive method to reinforce soft clay foundation, and points out several aspects that need further study.

Keywords: explosive method; sand foundation; soft clay foundation; mechanisms; effect evaluation

收稿日期: 2020-02-21

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (No.2019C03107)

作者简介: 江文豪 (1996—), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要从事地基处理研究。E-mail: 21812025@zju.edu.cn。

0 引 言

爆炸法加固地基是在地基中钻凿成孔, 将炸药置于所需加固处理的深度进行爆炸, 利用炸药爆炸释放的巨大能量提高地基承载力及稳定性^[1]。由于爆炸法具有所需设备简单、施工方便及快速等优点, 爆炸法在地基处理中得到了应用, 尤其在松散砂土地基^[2-10]。

爆炸法加固(也称爆炸法密实)砂土地基最早于上世纪 30 年代成功用于美国 Franklin Falls Dam 的地基处理^[2]。此后, Prough 等^[3-8]研究了爆炸法密实砂土地基时, 砂基中的孔隙水压力、沉降量和静钻阻力值随时间的发展规律。Eslami 等^[9]通过工程案例, 研究了爆炸法密实砂基的适用范围。Finno 等^[10]结合室外实验, 探讨了爆炸法密实砂基的作用机理。在国外, 有关爆炸法密实砂土地基已有不少成功的工程实例^[7-12]。我国最早于 1959 年在安徽等地采用了爆炸法密实水库土坝地基^[13]。石教往等^[14]展开室外试验研究, 将爆炸法密实饱和砂土分为破坏原有砂体结构和重新渗透固结两大过程。燕琳等^[15]通过室内试验, 研究了饱和砂土在爆炸密实过程中表面沉降的时间过程曲线。屈俊童等^[16-18]对条形装药下砂土地基的爆炸密实做了较为系统的研究。

一般认为, 爆炸法适用于加固无黏性粉砂土地基^[3-12]。然而研究表明, 采用爆炸法并结合其他方法加固深厚软黏土地基也具有较好的效果^[19-22]。目前国外几乎尚无采用爆炸法加固深厚软黏土地基的研究, 国内在上世纪 80 年代末对爆炸法加固淤泥软基展开了一些研究^[23-24]。房营光^[19]通过在路基中设置袋装砂井并埋设炸药, 对广珠公路软黏土路基进行了爆炸加固处理。张志毅等^[20-22]结合堆载预压的方式, 对深厚软黏土地基展开了爆炸加固研究。然而, 由于爆炸法加固软黏土地基的工程实例较少, 有关爆炸法加固软黏土地基的作用机理和适用范围还需进一步研究^[21-22, 25]。

本文主要对比分析了爆炸法加固砂土地基和软黏土地基的作用机理、设计参数、施工工艺及效果评价 4 个方面, 并基于对比分析结果和已有的爆炸法加固软黏土地基的工程案例, 对爆炸法加固软黏土地基的适用性进行了讨论, 并指出了爆炸法加固软黏土地基时还需进一步研究的几个方面。

1 作用机理分析

1.1 爆炸法加固地基的荷载及传播特性

土中爆炸的类型主要分为封闭式爆炸和漏斗式爆炸, 爆炸类型主要与炸药量及埋深有关^[26]。爆炸法加固地基属于封闭式爆炸, 同时为避免爆炸时地表出现鼓包、甚至形成爆破漏斗等现象, 爆炸法加固地基时炸药量不应太大, 且应具有一定的埋置深度^[26-27]。

采用爆炸法加固地基时, 其主要以爆炸气体压力及爆炸波压力两种形式向土体中传播能量^[28]。爆炸气体压力主要作用于爆孔附近, 它对土体产生强烈挤密作用, 形成爆炸空腔^[27]。爆炸波则以波的形式向远处传播, 在距离爆点不同区段上依次出现冲击波、应力波和地震波, 如图 1^[29-30]。冲击波是一种强压缩波, 它不仅增大了爆炸空腔半径, 同时也使爆孔周围土体发生压碎压密破坏, 但冲击波的波速、压力和能量均随距离增大迅速衰减, 在距离爆源中心 $10 \sim 15 r_0$ (r_0 为装药半径) 处, 冲击波衰减为应力波。辛凯等^[31-32]研究指出, 爆炸波的传播过程中存在由冲击波向应力波转化的临界压力, 该临界压力约为 2 MPa。应力波的作用范围大致在 $15 \sim 400 r_0$ 处, 相比于冲击波, 除作用压力和能量大大减弱外, 应力波与冲击波的主要区别在于其形态已发生明显改变^[31-32], 冲击波的上升速度快, 作用时间短, 峰值压力大, 而应力波的上升速度慢, 作用时间长, 且峰值压力小。当距离超过 $400 r_0$ 后, 应力波衰减为具有周期性的地震波, 地震波的压力低, 速度慢, 传播能量占爆炸总能量 $2\% \sim 6\%$ ^[29-30]。一般认为, 地震波仅能引起土体介质周期振动, 不会导致土体介质发生破坏^[29-30]。

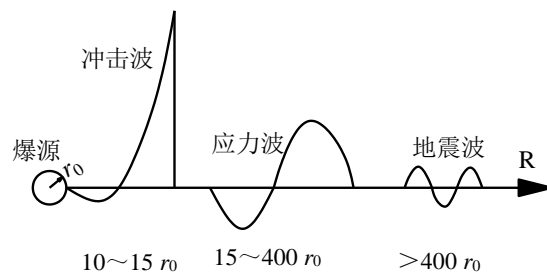


图 1 爆炸波类型随距离的变化

Fig. 1 The type of explosive wave varies with distance

在半无限土介质中, 每一种波均以压缩波(P波)、剪切波(S波)和表面波的波列形式传播^[33]。

波列中 P 波传播速度最快, S 波其次, 2 种波的波速比为 $\sqrt{(\lambda+2\mu)/\mu}$, λ 和 μ 为 Lamé 常数^[34]。在自由面处, 表面波如瑞利波是由 P 波、S 波干涉形成, 其传播速度约为 S 波波速的 0.91 倍^[33-34]。赵跃堂等^[35-37]研究指出, 爆炸波的传播速度与土体的压缩性、含气量及作用压力等因素有关, 土的压缩性越低、含气量越小, 爆炸波的传播速度越快。随着传播距离增大, 爆炸作用压力减小, 爆炸波的传播速度也逐渐减小。穆朝民等^[32]测得爆炸波在饱和土中传播速度为 500~1 600 m/s。爆炸加固地基时, 由于表面波主要沿自由表面或介质分界面传播, 其主要使得表层地基产生振动, 对深层地基的压密作用较小, 因此地基主要受到 P 波和 S 波的作用, 两种波向爆孔周围土体的各个方向传播且随距离的增加迅速衰减^[33-34]。由于液体不产生切应变, 因此理想液体中不传播 S 波, 只传播 P 波^[34]。

根据爆炸波的传播特点可知, 爆炸波的形态随传播距离的增加而发生改变, 土体的破坏程度也随爆源距离的增加而减轻, 往往可根据土体破坏程度的变化进行破坏分区^[33-34]。根据炸药在土体中爆后的破坏情况, 可将爆后土体大致分为空腔区、强烈压缩区、破坏区及振动区 4 个区^[34, 38], 如图 2。采用爆炸法加固地基时, 由于炸药通常呈条形状, 且沿深度方向分层分布^[18-19, 39], 因此可认为爆炸产生的能量主要沿水平向传播, 爆炸破坏分区主要在水平向上进行分区。

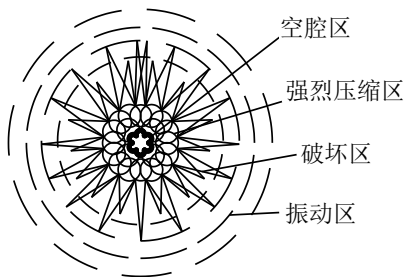


图 2 爆炸法加固地基作用分区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of zoning of foundation treated by explosion method

Leong 等^[40]总结了不同土体类型在封闭式爆炸下产生的峰值应力随比例距离（距集中药包的距离与等量 TNT 立方根之比, 单位: $\text{m/kg}^{1/3}$ ）的变化, 如图 3。可以看出, 同一土体中, 爆炸作用下的峰值应力随含水率及压实度的增加而增大, 且相比于饱和砂土, 同一比例距离下饱和软粘土的峰值应力更大^[40-41]。贾永胜等^[42]通过试验研究表明, 土中的水减小了能量在空气介质中的耗散, 相同药量及埋

深下饱和砂土中的爆坑直径比低含水率砂土中更大。赵跃堂等^[35-36]研究也指出, 饱和度增加使得土体的波阻抗增大, 爆炸波在土中传播时的峰值压力随饱和度的增加而增大。

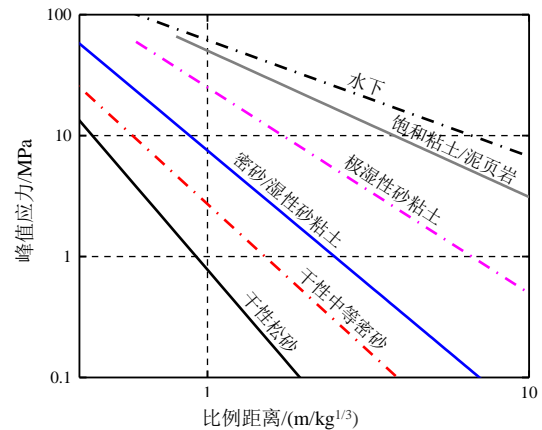


图 3 不同土体类型中爆炸下产生的峰值应力

Fig. 3 Peak stresses from explosions in various soil types

1.2 爆炸法加固砂土地基的作用机理

采用爆炸法加固砂土地基时, 由于砂基中含有气体, 气体的压缩性大, 因此爆孔周围砂土受到爆炸气体和冲击波的作用发生强烈挤密作用而形成空腔, 该部分能量约占爆炸总能量的 60%^[43]。同时, 由于爆炸冲击波压力高达数 MPa^[31, 44], 冲击波作用范围的砂土会发生爆炸液化^[45-47]。当爆炸冲击波衰减为应力波时, 土体则主要受到 P 波和 S 波共同作用。P 波传播速度快, 因此砂土颗粒会首先发生沿波动方向的振动, 随后受到 S 波作用发生垂直波动方向的振动。砂土颗粒在 P 波和 S 波的多个方向振动作用下发生压密、剪缩作用, 从而使得砂基产生了超孔隙水压力。Studer 等^[46]研究指出, 在封闭式爆炸下, 单点药包爆炸产生的超孔隙水压力比（超孔隙水压力与初始竖向有效应力的比值）随对数比例距离线性减小, 且当比例距离小于 $2.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 超孔隙水压力比为 1.0, 即砂土发生液化。在地震波段, 砂土颗粒受到 P 波和 S 波的作用力已大大减弱, 因此可不考虑该段对砂基密实的影响。

参照土中爆炸破坏分区的方法, 根据文献^[47]中砂土地基单孔爆炸的试验结果, 可对砂土地基在爆炸作用下的某一平面进行如图 4 示的破坏分区, 该破坏分区的主要根据是爆炸作用下产生超孔压的大小。在文献^[47]中, 在爆炸作用下砂土地基的液化区半径为 2.15 m（比例距离为 $2.72 \text{ m/kg}^{1/3}$ ）。一般认为, 当超孔隙水压力比低于 0.1 时, 微弱的孔隙水压力上升在实际应用中可不予考虑^[48], 因此可将超孔隙水压力比等于 0.1 作为划分孔压上升区

与振动区的标准。在文献^[47]中, 砂土地基的孔压上升区半径约为 9.6 m (比例距离为 $12.1 \text{ m/kg}^{1/3}$)。而在振动区, 爆炸作用效应可以忽略。

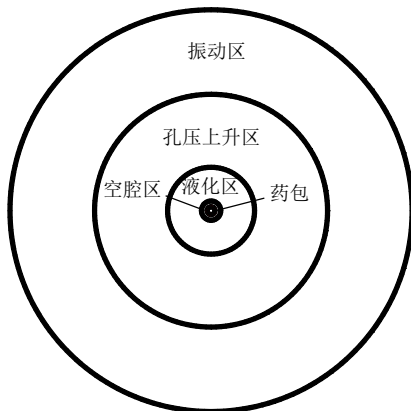


图 4 爆炸法加固砂土地基的破坏平面分区

Fig. 4 Failure plane zoning of sand foundation treated by explosion method

试验研究表明, 采用爆炸法加固砂土地基时, 爆炸作用产生的超孔隙水压力是加固砂土地基重要机理^[7-12], 伴随着超孔压的消散, 沉降逐渐发生^[10-12, 47]。此外, 在爆炸瞬间, 爆炸荷载会使爆孔附近的砂土产生较大挤密作用, 这使得爆炸发生后孔口处出现涌水现象, 孔口涌水使得砂基发生瞬时沉降, 该沉降量一般占最终沉降量的 30%^[10, 49]。从试验现象和分析可以得出, 爆炸作用产生的沉降包括瞬时沉降和固结沉降, 两种沉降均使得砂土地基处于更密实的状态^[10-12]。

1.3 爆炸法加固软黏土地基的作用机理

对于软黏土地基, 采用爆炸法进行加固时, 软基与砂基在爆炸气体压力及冲击波作用下的响应基本相同。但在应力波作用段, 与砂基相比, 考虑到软黏土颗粒较细且具有黏性, 软黏土颗粒无法和砂土颗粒一样在爆炸应力波下发生振动。同时, 软黏土地基中颗粒较细且具有黏性的特点使得软基相比于砂基更易表现出流体特征, 理想液体中不传播 S 波, 因此软基受到 S 波的剪切振动作用较弱^[33], 可认为软基在应力波段主要受到 P 波的压密、拉裂作用。在压密过程中, 软基会产生较大超孔压, 而拉裂作用则会导致孔压出现一定下降^[1], 拉裂作用可能使得软基产生裂缝, 但裂缝的产生也为软基的快速排水固结提供了条件^[50-52]。在地震波段, 同样可不考虑该段对软基加固的影响。

参考文献^[19]中炸药的埋设方式、爆孔及砂井布置等, 在爆炸作用下, 软黏土地基在某一平面的破坏分区示意图如图 5。强烈压缩区的土体结构遭到

破坏, 表现出流态特征^[53], 破坏区则主要受到爆炸应力波的作用, 这一区域是爆炸加固软黏土地基的主要作用区域。林澍等^[54]研究了爆炸加固软基时的作用范围, 并指出破坏分区的半径与药包半径、土体的强度及上覆压力等因素有关。董亮等^[21]通过场地实验及数值模拟指出, 堆载荷载越小时, 爆炸显著作用范围越大, 但堆载高度对爆炸显著作用范围的影响较小。目前有关爆炸作用下软基的破坏分区大小尚不明确。

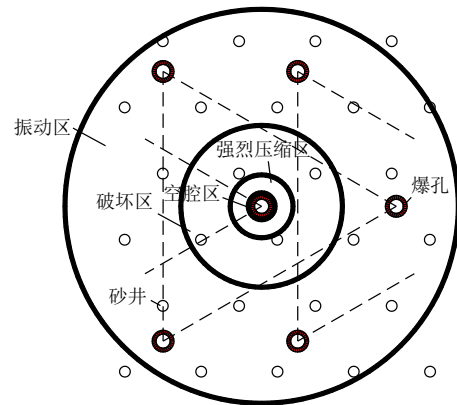


图 5 爆炸法加固软黏土地基的破坏平面分区

Fig. 5 Failure plane zoning of soft clay foundation treated by explosion method

场地试验现象表明, 爆炸加固软黏土地基时在爆后数分钟便出现了孔口涌水现象^[22, 50], 朱红兵等展开的室内试验也证明了这一点^[51]。场地试验观察到, 爆后一周地基的沉降速率极为缓慢, 而孔隙水压力在爆后 1~4 h 内急剧上升至最高点, 随后几天内孔压下降很大, 随后趋于平缓^[21-22]。理论和试验研究表明, 爆炸法加固砂土地基与软黏土地基时, 压密作用和排水固结作用均是两种地基加固的重要机理, 但两种地基中超孔压的产生机理存在差异: 爆炸作用下砂基中超孔压的产生机理包括压密、剪缩作用, 而软基中超孔压的产生机理主要在于压密作用。

2 设计参数

为保证爆炸法加固地基时的施工安全并取得良好的加固效果, 爆炸法加固地基时设计参数的选取十分重要。对于砂土地基, 影响地基爆炸加固效果的主要设计参数包括: (1) 单孔埋设炸药质量; (2) 爆孔水平间距; (3) 炸药埋深与分布; (4) 炸药引爆顺序; (5) 是否存在延爆; (6) 爆炸处理次数。对于软黏土地基, 由于爆炸加固时包括埋设砂井及堆载等步骤^[19-23], 因此除上述因素外, 其

主要设计参数还包括：(7) 砂井间距与深度；(8) 砂垫层厚度；(9) 上覆堆载大小；(10) 爆炸间隔时间。

砂土地基的处理厚度、深度及初始密实度等都会影响设计参数的选取。通常单孔埋设的炸药质量随处理厚度的增加而增大，单孔埋设炸药质量一般在 2~20 kg，爆孔间距为 4~15 m，且爆孔网格通常呈三角形或正方形排列^[8, 55]。一般而言，炸药通常埋设在处理深度的 1/2~3/4 深度处，且对于较为深厚土层，宜将土体分层，并按照分层将炸药间隔分布，同时分层装药质量随深度的增大而增加^[8-9]。为更好的描述能量输入，文献^[28]提出了单位炸药消耗量 (Powder Factor, 简称 PF) 的概念， PF 的定义为炸药质量与爆炸处理土体体积之比，单位为 g/m^3 。Eslami 等^[9]分析得出，爆炸加固后沉降量与处理厚度比值随 PF 的增大而增大，且在 PF 低于 $40 g/m^3$ 时^[9, 56]，沉降量与处理厚度的比值随 PF 增大尤其明显，通常 PF 值为 $20\sim 80 g/m^3$ 。为增加爆炸产生的超孔隙水压力，每个引爆网路在平面上都从周边开始起爆，然后起爆中间药包^[8]。同时，为减小爆炸产生的振动，宜对同一个爆孔处的炸药采用延时爆炸^[8-10]。有试验结果表明，存在延爆时砂基的沉降量较大，产生的超孔隙水压力可提高 18%^[57]。为了增加爆炸处理效果，通常可对砂基进行多次爆炸处理。Narsilio 等^[8-10]研究得出，随着爆炸次数的增加，爆后沉降继续发展，但每次爆后地面沉降增量下降，爆炸次数通常不超过 4 次。此外，爆炸加固砂基时，爆炸时间间隔、增加上覆荷载等也应是设计时需考虑的因素^[8-9]。

软黏土地基与砂土地基共同的设计参数基本相同，但软黏土地基的强度较弱，其单孔装药量一般较小，如邓志勇等^[58]加固软基时的单孔装药量为 2.4~3.2 kg。软黏土地基的爆孔间距为 3~6 m^[19, 21-22]，其 PF 值一般为 $20\sim 30 g/m^3$ 。爆炸法加固软黏土地基中未提及延爆这一点，这可能与爆炸软基的炸药量较小有关。邓志勇等^[58-59]研究也指出，增加爆炸次数可增大软基的沉降量，这与砂基一致。

软黏土地基在爆炸加固时的砂井设计间距一般为爆孔间距 1/2，砂井的深度与爆炸处理土层深度一致^[19, 21-22]，砂垫层的厚度则为 0.5 m^[21-22]。由于这些设计参数基本不变，因此可暂不考虑其对爆炸处理效果的影响。邓志勇等^[58-59]研究指出，上覆荷载越大，软土地基的固结速度越快，但对最终沉

降量影响不大。邓志勇等^[59]根据强夯法的作用原理分析了爆炸的间隔时间，分析指出，应当在第 1 次爆炸产生的超静孔隙水压力消散 80% 后，再进行第 2 次爆炸，实际试验中采用的爆炸间隔时间为 24 h。需要指出的是，在采用爆炸法加固软黏土地基时，当炸药量较大时，应考虑延爆。

3 施工工艺

砂土地基在采用爆炸法加固时，由于其施工工艺简单，根据爆炸处理现场的爆孔布置和炸药埋设剖面图^[8-10]，其施工布置大致如图 6 示，施工工艺总结如下几个步骤，即场地平整、根据设计参数钻孔并埋设炸药、引爆后观测沉降及待地基沉降稳定完成地基处理。需要注意一点是，分层埋设炸药时要用进行回填堵塞。

采用爆炸法加固软黏土地基时，为提高加固效果，一般将爆炸法与堆载法相结合^[20-22]。爆炸法加固软黏土地基的主要施工布置如图 7^[21-22]，其施工工艺主要包括场地平整、打设砂井作为竖向排水通

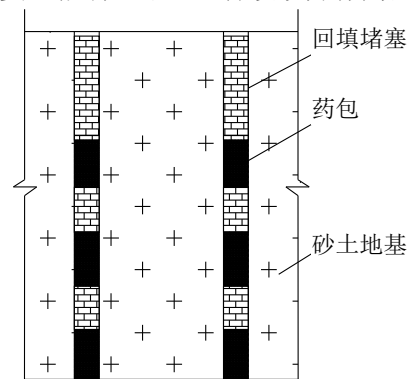


图 6 砂土地基爆炸处理施工布置图

Fig. 6 Construction layout diagram of explosion treatment of sand foundation

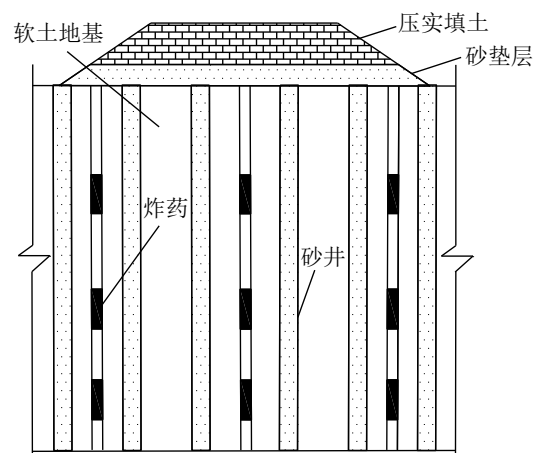


图 7 软黏土地基爆炸处理施工布置图

Fig. 7 Construction layout diagram of explosion treatment of soft clay foundation

道、铺设砂垫层作为水平排水通道、铺设压实填土作为上覆荷载、根据设计参数成孔送药、引爆后观测沉降和待地基沉降稳定完成地基处理。

两种地基爆炸加固的施工工艺中均包括“成孔送药”这一主要步骤,且在地基加固时,一般采用群爆。相比于砂土地基,软黏土地基的施工工艺较为复杂,这主要与软黏土本身的物理力学特性有关。但相比于其他软黏土地基的处理方式,爆炸法加固软黏土地基的施工工艺较为简单^[19-22]。

4 效果评价

沉降测定和 CPT 测试是评价砂土地基加固效果的主要方法^[8-9]。表 1 总结了多个爆炸法密实砂土地基的工程案例,列出了这些砂基的一些基本性质和密实后的沉降值,爆后的沉降值可达到处理厚度的 1.4%~11%。Eslami 等^[56]总结了 14 个爆炸法密实砂基的工程案例得出,爆炸法密实能够使砂基产生占处理厚度 2%~10%的沉降量,相对密实度提高 11%~100%、静力阻力值提高 21%~228%。尽管采用爆炸法密实砂基时,在大多数情况下静钻阻力值随爆后时间的增加而增大,但也有案例发现在爆后的几周内,静钻阻力值没有增大,甚至减小^[5, 8, 10, 60]。对于静钻阻力值没有增大或增大存在延时的原因,已有学者提出了一些理论,包括土颗粒的重新胶结^[61]、爆炸密实过程砂基的结构性受到破坏有关^[62]等。Eslami 等^[9, 56]通过分析爆炸前后与土体液化相关参数得出,爆炸密实能显著降低砂土地基的液化潜力。此外,采用爆炸法密实砂土地基时,沉降值一般在 1~2 d 内基本稳定^[8, 10, 63]。上述研究表明,爆炸法加固是一种有效的砂土地基处理技术,它能够使砂土地基快速发生沉降,增大砂基的密实度,降低砂基的液化潜力。但由于受到溢出流体的向上渗力和爆炸变形作用,靠近表层的土体可能会发生振动松动^[8, 64]。

对于软黏土地基,爆后发生的沉降值是评价爆炸法加固效果的主要指标。此外,爆后软基物理力学性质的变化也是评价加固效果的重要指标。表 2 对爆炸法加固软黏土地基的主要物理力学性质及爆后沉降值进行了总结。从表中可以看出,土体的压缩性均在 0.45 MPa^{-1} 以上,孔隙率大多位于 1~2 之间^[19, 21-22],属于中高压缩性土;土体的含水率处于 23.7%~65%,含水率稍高,一般处于流塑状^[19, 21-22]。

爆炸加固软黏土地基时,无堆载下爆炸加固的

沉降量与处理厚度比值为 2.0%左右,在一定堆载下,爆炸加固的沉降量与处理厚度比值约为 3.0%,如表 2。董亮等^[21-22]研究指出,爆后软黏土地基的含水率降低了 11.9%~16.8%,孔隙率减小了 14.9%~19.4%,干密度增大了 6.3%~8.5%。张志毅等^[20-21]指出,爆后软黏土地基的压缩模量增长了 1.35~7 倍。此外,张志毅等^[20, 53]通过场地和室内试验指出,爆后软基的贯入阻力值提高了 2 倍左右,且随着爆后时间的增大,贯入阻力值有不同程度的增长。综上所述,结合合理设砂井及堆载,爆炸加固软黏土地基可以使地基发生一定的沉降量,从而提高爆后软黏土地基物理力学性质,达到地基加固的目的。此外,相比其他软黏土地基处理方式,在爆炸荷载作用后 1 周,地表沉降趋于稳定^[1, 21],因此爆炸加固还具有快速加固的优势。

考虑到爆炸法加固地基时的爆孔水平间距存在差异,仅以平均沉降量来评价地基加固效果不够准确。为精确描述爆炸加固效果,本文在平均沉降值的基础上提出了“单位质量炸药产生沉降体积(简称 SVPU)”的概念,其定义如下:

$$SVPU = \frac{SV}{W} \quad (1)$$

式中:SV 表示爆炸加固后地基的沉降体积值;W 表示炸药量;SVPU 的单位为 cm^3/g 。

考虑到爆炸法加固地基时,通常采用群爆的方式进行地基加固,且测定的沉降值大多为某一区域的沉降平均值,因此无论爆孔的水平排列方式如何,若取处理区域的炸药量为 W 值,则 SV 值为爆炸处理区域面积与平均沉降值的乘积。

为准确分析爆炸加固的效果,表 3 列出了爆炸法加固砂土地基和软黏土地基的 SVPU 值(前 7 个案例为砂土地基,后 3 个案例为软黏土地基)。从表中可以看出,砂基的 SVPU 值大多在 $500 \sim 1\,300 \text{ cm}^3/\text{g}$ 范围,也有 SVPU 值超过 $2\,000 \text{ cm}^3/\text{g}$,这主要与砂土地基初始的密实状态和炸药用量有关。当炸药用量较大时,砂基的 SVPU 值较小,这与单次爆炸沉降量随爆炸次数的增加而下降的结论一致。当密实度较大时,SVPU 值也较小。尽管案例 9 和案例 10 中包含了堆载沉降值,但案例中软基中的爆炸沉降值与堆载沉降值基本相当^[21-22],因此可近似认为爆炸作用时 SVPU 值为总 SVPU 值的一半,软基爆炸加固时的 SVPU 值处于 $250 \sim 700 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。此外,可以看出,采用爆炸法加固软基时,堆载条件下的 SVPU 值似乎明显大于无堆载条件下的 SVPU 值。尽管软黏土地基的案例样本较小,

表1 爆炸法压实砂土地基的工程性质及沉降量

Tab. 1 Engineering properties and settlement of sand foundation treated by explosive method

项目名称/场地名称	土体类型	细粒土 含量/%	地下水位 埋深/m	相对密实 度/%	处理厚度和 深度范围/m	沉降量/ m	沉降量与处理 厚度之比/%
Jebba Dam-Test Layout ^[5]	细砂土, 沉积层	1.5	2	60	15(25~40)	0.270	1.8
Test Site at South Carolina ^[8]	松细砂土	4	0.8~1.5	30	5.5(8~13.5)	0.495	9
Oakridge Landfill ^[10]	细净砂土	6	1.5~2	15~30	4(8~12)	0.440	11
Chicopee I ^[65]	冲击砂沉积	5	2.4	43	9(6.1~15.1)	0.126	1.4
Ash Pond at Tamil Nadu state ^[66]	松粉砂土	35	2.5	27	12(0~12)	0.288	2.4
St. Petersburg Dike(爆炸 时无延时) ^[67]	中等松细 砂土	<5*	1.2	53	7.5(0~7.5)	0.210	2.8
St. Petersburg Dike(爆炸 时有延时) ^[67]	中等松细 砂土	<5*	1.4	56	7.5(0~7.5)	0.232	3.1
Molikpaq I ^[68]	松细砂土	1.4	4.6	51	13(9~22)	0.832	6.4
Zeebrugge Harbor ^[69]	松散砂土, 有黏土层	10	0	69	14(5.4~19.4)	0.280	2

注:*表示根据地基条件描述的估计值,沉降量为爆炸处理区域范围的平均沉降量。

表2 爆炸法加固软黏土地基的主要物理力学性质及爆后沉降量

Tab. 2 The main physical and mechanical properties and post-explosion settlement of soft clay foundation treated by explosive method

主要成分	有无堆载及 堆载高度/m	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	含水率/ %	孔隙率 e	压缩系数 α_{1-2}/MPa^{-1}	处理厚度与 深度范围/m	沉降量/ m	沉降与处理 厚度比值/%
深灰色 淤泥 ^[19]	无堆载	15.8	65.0	1.62	1.81	16.5(0~16.5)	0.380	2.30
淤泥质粉 质黏土 ^[20]	堆载高度 3.0	1.93	23.7	0.72	0.477	6.5(1.0~7.5)	0.237	3.65
流塑状淤 泥质黏土 ^[21]	堆载高度 1.6	18.0	38.6	1.25	0.75	9.0(0~9.0)	0.240*	2.67
淤泥及淤 泥质土 ^[22]	堆载高度 3.0	18.8	32.8	0.93	—	12.0(0~12.0)	0.364	3.03

注:由于土层性质随深度的变化,这里取土层物理力学性质的平均值,*表示根据沉降曲线的估算值,沉降量为爆炸处理区域范围的平均沉降量。

表3 爆炸法加固砂土地基和软黏土地基时的SVPU值

Tab. 3 The SVPU values of sand foundation and soft clay foundation treated by explosive method

指标	案例 1 ^[5]	案例 2 ^[8]	案例 3 ^[10]	案例 4 ^[65]	案例 5 ^[67]	案例 6 ^[68]	案例 7 ^[69]	案例 8 ^[19]	案例 9 ^[21]	案例 10 ^[22]
R_{D0}/e_0	60	30	15~30	43	56	51	69	1.62	1.25	0.93
PF 值	19.2	168.3	104.1	6	32	48.4	15.24	84.2	19.8	21.8
SVPU 值	937.5	534.8	1 056.7	2 333.3	968.8	1 312.3	1 322.3	273.6	1 350.0*	1 391.4*

注: R_{D0} 代表砂基的初始密实度, e_0 代表软基的初始孔隙比,PF的单位为 g/m^3 ,SVPU的单位为 cm^3/g ,*表示SVPU值中包含堆载沉降,堆载高度见表2。

还需更多实例证实其中的关系,但通过上述分析可初步得到:爆炸法加固砂土地基的效果较好,根据SVPU值进行判断,爆炸作用下软基的加固效果仅为砂基一半。此外,无论是砂基还是软基,随着

炸药量的增大,SVPU值呈降低趋势。

从图3可知,爆炸加固软黏土地基时,相同爆炸荷载下软基的峰值应力更大,然而,软基的SVPU值却只有砂基的一半,这似乎存在一种矛盾。分析

认为主要有以下两点原因: (1) 爆炸加固时, 荷载主要以波的形式作用于地基, 砂土地基粒径大, 黏性小, 砂基在波动荷载作用下易发生振动密实, 而软黏土地基则主要通过压缩作用使得土体压密, 即在相同爆炸(波动)荷载下, 砂基更易发生密实。

(2) 爆炸荷载是一种瞬时荷载, 爆炸作用产生的超孔隙水压力通常仅能持续较短时间^[8-9, 21-22], 与软黏土地基相比, 砂基的渗透性大, 在相同时间作用下, 砂基的超孔压消散速度更快, 沉降量更大。

5 爆炸法加固软黏土地基的适用性评价

从爆炸法加固砂土地基和软黏土地基四个方面的对比分析可以看出, 相比于采用爆炸法密实砂基, 爆炸法加固软基的作用机理、设计参数的选取都不是十分成熟。对于爆炸法加固软黏土地基的适用性, 应对爆炸法加固软基的作用机理展开进一步研究, 以此明确爆炸法加固软基的适用范围, 并指导实际工程中设计参数的选取。

关于爆炸法加固软黏土地基的作用机理, 还应进行以下研究, 包括单孔爆炸加固软基时的破坏分区大小和产生的超孔隙水压力随爆距变化, 单孔爆炸作用下超孔压随时间变化, 软基的强度、饱和度和渗透性对爆炸加固效果的影响等。在机理研究的基础上, 进一步明确爆炸法加固软基的适用范围, 包括软基的渗透系数范围(埋设砂井后的等效渗透系数)、强度值范围、处理深度范围等。

关于爆炸法加固软基的适用范围和设计参数选取, 需要指出的两点是: (1) 对于深厚软黏土地基, 爆炸法与堆载法联合加固具有堆载时表层处理效果较好和爆炸加固时深层处理效果佳的优点, 已有的爆炸加固软基工程案例也多为深层软基^[19-22], 因此爆炸法较为适用于深厚软黏土地基。(2) 尽管爆炸加固软黏土地基前对软基强度进行了测定, 但强度测定方式并未统一, 测定结果难以比较。而爆炸加固砂基时, 一般先要对砂基的静钻阻力值进行测定^[9-11]。建议在采用爆炸法加固软基前后可先展开 CPT 试验, 并结合软基强度来确定设计参数。

从上述研究可以得出, 采用爆炸法加固深层软黏土地基具有一定的适用性, 但有关爆炸法加固软基的作用机理及适用范围等方面还有待结合试验展开进一步研究。

6 结论与建议

(1) 无论是爆炸加固砂基还是软基, 压密作用和排水固结作用均是两种地基加固的重要机理, 但两种地基中超孔隙水压力的产生机理存在差异。分析认为, 爆炸作用下砂基中超孔压的产生机理包括压密、剪缩作用, 而软基中超孔压的产生机理主要在于压密作用。

(2) 爆炸加固两种地基的设计参数基本相同, 但由于爆炸加固软基时包括埋设砂井及堆载等步骤, 其主要设计参数增多了数项, 且相比于砂基, 软基的强度较低, 软基的单位炸药消耗量(PF)较小。爆炸加固软基时由于炸药量较小还尚未考虑延爆, 砂基中则大多采用延爆以减小爆炸产生的振动。

(3) 采用爆炸法加固地基时, 软基的施工工艺相比于砂基较为复杂, 这与软基本身具有的低渗透性、低强度等物理力学性质有关。

(4) 爆炸法加固砂基能够使砂基快速发生沉降, 增大砂基的密实度, 降低砂基的液化潜力。爆炸法加固软基能够提高爆后软基的物理力学性质, 结合堆载法能够产生处理厚度 3%左右的沉降值, 且具有快速加固的优势。爆炸作用下砂基的 SVPU 值大多处于 500~1 300 cm³/g, 而软基的 SVPU 值则处于 250~700 cm³/g。根据 SVPU 值进行判断, 爆炸作用下软基的加固效果仅为砂基一半。此外, 爆炸加固地基的次数不宜过多, 随着爆炸次数的增大, 爆炸加固效果下降。

分析表明, 采用爆炸法加固深厚软黏土地基具有一定的适用性。但有关爆炸法加固软基的作用机理、适用范围及设计参数的选择还有待结合试验展开进一步研究。

致谢 感谢中国水利水电科学研究院陈祖煜院士和浙江大学岩土工程研究所陈云敏院士对本文的指导和帮助

参考文献

- [1] 蔡德钧. 爆炸荷载作用下软土地基的变形特性研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2004: 2-7, 54-60.
- [2] Lyman A K B. Compaction of cohesionless foundation soils by explosive[J]. Transactions, ASCE, 1942(107): 1330-1348.
- [3] Prugh B J. Densification of soils by explosive vibration[J].

- Journal of the Construction Division, 1963, 89(1): 79-102.
- [4] Hall C E. Compacting a dam foundation by blasting[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1962, 88(3): 33-51.
- [5] Solymar Z V. Compaction of alluvial sands by deep blasting[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(2): 305-321.
- [6] Dowding C H, Charlie W A. A laboratory study of blast densification of saturated sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(2):187-199.
- [7] Gohl W B, Jefferies M G, Howies J A, et al. Explosive compaction: design, implementation and effectiveness[J]. Géotechnique, 2000, 50(6): 657-665.
- [8] Narsilio G A, Santamarina J C, Hebler T, et al. Blast densification: multi-Instrumented case history[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(6): 723-734.
- [9] Eslami A, Pirouzi A, Omer J R, et al. CPT-based evaluation of blast densification (BD) performance in loose deposits with settlement and resistance considerations[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(5): 1279-1293.
- [10] Finno R J, Gallant A P, Sabatini P J. Evaluating ground improvement after blast densification: performance at the oakridge landfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 04015054.
- [11] Rollins K M, Anderson J K S. Cone penetration resistance variation with time after blast liquefaction testing[C]//Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress IV. 2008.
- [12] Vega-Posada C A, Zapata-Medina D G, Edwin F Garc á Aristizabal. Ground surface settlement of loose sands densified with explosives[J]. Revista Facultad de Ingeniería, 2014, 70(3): 9-17.
- [13] 杨兵. 软基在爆炸荷载作用下的反应分析[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2002: 3-9.
- [14] 石教往, 佟锦岳, 熊长汉, 等. 爆炸压实饱和砂土的试验研究[J]. 长江科学院院报, 1992, 9(4): 25-32, 39.
- [15] 燕琳, 李世海, 刘以钢. 爆炸引起饱和砂地表沉降的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 50-53.
- [16] 屈俊童, 周健, 李进军. 爆炸法加固饱和和粉细砂地基的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 390-396.
- [17] 屈俊童, 周健, 吴晓峰. 爆炸法密实砂土地基(II)-现场试验[J]. 工程爆破, 2006, 12(4): 4-8.
- [18] 屈俊童, 周健, 吴晓峰. 爆炸法密实砂土地基(IV)-设计方法[J]. 工程爆破, 2007, 13(2): 1-6.
- [19] 房营光. 爆振排水固结法加固软土地基的探索试验研究[J]. 广东工业大学学报, 1998, 15(2): 1-7.
- [20] 张志毅, 杨年华, 杨兵, 等. 爆炸法处理深层软弱地基试验研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(4): 34-37.
- [21] 董亮, 叶阳升, 蔡德钧, 等. 爆炸荷载作用下软土地基的变形特性[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 461-467.
- [22] 连峰, 龚晓南, 徐杰, 等. 爆夯动力固结法加固软基试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 859-864.
- [23] 杨振声, 金镠. 爆炸排水加固淤泥地基的实验、判断与展望[J]. 水运工程, 1997(5): 1-6.
- [24] 武可贵, 高兆福. 淤泥地基爆炸排水加固的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 1998(2): 178-184.
- [25] 蔡德钧, 叶阳升. 爆炸法处理地基技术[J]. 铁道建筑技术, 2005(1): 63-64, 67.
- [26] 施鹏, 邓国强, 杨秀敏, 等. 土中爆炸地冲击能量分布研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 240-244.
- [27] 穆朝民, 任辉启, 辛凯, 等. 变埋深条件下土中爆炸成坑效应[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 112-116.
- [28] Narin Van Court W A. Investigation of the densification mechanisms and predictive methodologies for explosive compaction[D]. University of California at Berkeley, 1997.
- [29] 凌同华. 爆破震动效应及其灾害的主动控制[D]. 长沙: 中南大学, 2004: 2-8.
- [30] 潘强. 爆炸荷载作用下土体压密效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 14-18.
- [31] 辛凯, 姜忻良, 吴祥云. 爆炸荷载作用下两相饱和土中结构响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 4065-4070.
- [32] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆炸波在高饱和度饱和土中传播规律的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 875-880.
- [33] 黄承贤. 土中爆扩及其挤密效应的研究[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 354-360.
- [34] 亨利奇 J. 著. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 江近仁, 陆顺永, 等. 译. 北京: 科学出版社, 1987: 161-231.
- [35] 赵跃堂, 郑守军, 郑大亮, 等. 爆炸波在饱和土介质中传播时压力变化规律的试验研究[J]. 防灾减灾工程学

- 报, 2004, 24(1): 60-65.
- [36] 赵跃堂, 梁晖, 范斌. 饱和土中爆炸波传播问题的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 352-357.
- [37] 俞儒一, 赵洪顺, 黄士兴, 等. 压缩波在饱和软土中的传播试验[J]. 爆炸与冲击, 1982, 10(4): 43-49.
- [38] 陈同军. 炸药埋深及炸药量对土中爆炸效应影响规律的数值模拟研究[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2010: 20-22.
- [39] 魏连雨, 李海超, 刘艳竹. 条形药包爆炸挤密黄土路堤横向影响规律[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 233-240.
- [40] 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(9): 1487-1499.
- [41] Xie X Q, Yao Y K, Yang G, et al. Large-scale field experiments on blast-induced vibration and crater in sand medium[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017: 06017001.
- [42] 贾永胜, 王维国, 谢先启, 等. 低含水率砂土和饱和砂土地基爆炸成坑特性实验[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 799-806.
- [43] 王国斌, 利奕年, 杨文东. 爆炸应力波传播规律与 TSP 基本原理分析[J]. 爆破, 2010, 27(2): 32-35.
- [44] 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.
- [45] Ivanov P L. Compaction of noncohesive soils by explosive[R]. National Technical Information Service Report No .TT 70-57221, U.S. Dept of Commerce, Springfield, VA. 1972.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Eller J M. Predicting pore pressure response in in-situ liquefaction studies using controlled blasting[D]. Oregon: Oregon State University, 2011.
- [49] Gallant A P, Finno R J. Stress redistribution after blast densification[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(11): 04016064.
- [50] 邓志勇, 张志毅. 软土地基爆夯动力排水固结方法[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 17-21.
- [51] 朱红兵, 王昌汉, 张新华, 等. 饱和淤泥爆炸排水固结实验研究[J]. 南华大学学报(理工版), 2001, 15(4): 10-14.
- [52] 董亮, 蔡德钧, 叶阳升, 等. 爆炸固结法和塑料排水板法处理软土地基的对比试验[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 12-16.
- [53] 张志毅, 孟海利, 杨年华, 等. 爆炸加固软土地基机理的试验研究[C]//中国力学学会工程爆破专业委员会全国爆破理论研讨会论文选编. 武汉, 2011.
- [54] 林澍, 闫澍旺, 贾沼霖. 爆振加固法中的水力劈裂及作用范围研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 53-57.
- [55] Eslami A. Investigation of explosive compaction (EC) for liquefaction mitigation using CPT records[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 13(11): 3239-3257.
- [56] Daryaei R, Eslami A. Settlement evaluation of explosive compaction in saturated sands[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017(97): 241-250.
- [57] 姚颖康, 王维国, 贾永胜, 等. 饱和砂土地基微差爆炸液化的试验与数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 215-222.
- [58] 邓志勇, 张志毅. 爆炸法加固软土地基的试验研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(4): 18-21.
- [59] 邓志勇, 张志毅, 汪旭光. 软黏土地基爆夯动力固结法试验研究[J]. 工程爆破, 2006, 12(3): 1-11.
- [60] Gallant A P, Finno R J. Measurement of gas released during blast densification[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, 40(6): 1011-1025.
- [61] Mitchell J K, Solymar Z V. Closure to "Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand" by James K. Mitchell and Zoltan V. Solymar (November, 1984)[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 113(2): 176.
- [62] Camp W M, Mayne P W, Rollins K M. Cone penetration testing before, during, and after blast-induced liquefaction[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2008(181): 1-10.
- [63] Vegaposada C A, Garc ía Aristiz ábal, Edwin F, Zapata Medina D G. Monitoring and groundwater/gas sampling in sands densified with explosives[J]. *Dyna*, 2014, 81(185): 168.
- [64] Narin V C, Culligan W. A. P. J, Einstein H. H, and

- Whittle A. J, et al. "Explosive compaction revisited: New guidance for performing blast densification." [C]//Proc., SARA 2003, 12th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U. S. Rock Mechanics Symp., 2003: 1725-1730.
- [65] Lafosse U, Gelormino T A. Soil improvement by deep blasting—a case study [C]//Proceedings of the 17th annual symposium on explosives and blasting technique, International Society of Explosive Engineers, Las Vegas, 1991, 1: 205-213.
- [66] Gandhi S R, Dey A K, Selvam S. Densification of pond ash by blasting [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(10): 889-899.
- [67] Minaev O P. Effective methods of compaction of water-saturated soils by blasting [J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 1993, 30(2): 53-56.
- [68] Stewart H R, Hodge W E. Molikapaq core densification with explosive at Amauligak F-24 [C]//Proceedings of the 20th Offshore Technology Conference, 1988: 23-34.
- [69] Van Impe W F, Meyus I. Soil compaction by blasting in the Zeebrugge harbor area [C]//1st Iranian International Seminar on SMFE, Tehran, Iran, 1990: 290-305.

【简讯】

第二届土木建筑与城市工程国际学术会议 (ICCAUE 2020)

第二届土木建筑与城市工程国际学术会议 (ICCAUE 2020) 由中交天津港湾工程研究院有限公司主办, AEIC 学术交流中心承办, 将于 2020 年 8 月 14—16 日在中国西安隆重举行。

土木建筑工程是国民经济中基础性、先导性、战略性新兴产业, 会议主要围绕“土木工程”、“建筑工程”、“城市工程”等研究领域展开讨论, 旨在为从事土木建筑与城市工程的专家学者、科学技术人员、工程研发人员提供一个共享科研成果和前沿技术, 了解学术发展趋势, 拓宽研究思路, 加强学术研究和探讨, 促进学术成果产业化合作的平台。期待大家相聚西安, 通过碰撞思想的火花, 携手引领土木建筑与城市工程的未来。欢迎海内外学者投稿和参会。

重要日期:

一轮截稿日期: 2020 年 6 月 14 日

录用通知时间: 投稿后 1 周左右

会议召开时间: 2020 年 8 月 14—16 日

组织单位:

主办单位: 中交天津港湾工程研究院有限公司

承办单位: AEIC 学术交流中心

征稿主题:

- (1) 土木/地质/岩土/结构/水利/隧道/港口工程
- (2) 建筑材料/设计/改造/信息模型化

(3) 城市规划/地下设施工程/环境工程/污染控制

(4) 城市交通管理/智能交通/智能电网

投稿须知:

(1) 论文应具有学术或实用价值, 未在国内学术期刊或会议发表过。发表论文的作者需提交全文进行同行评审, 只做报告不发表论文的作者只需提交摘要。

(2) 作者可通过 CrossCheck, Turnitin 或其他查询系统自费查重, 否则由文章重复率引起的被拒稿将由作者自行承担。涉嫌抄袭的论文将不被出版, 且公布在会议主页。

(3) 论文需按照会议官网的模板排版, 不得少于 4 页。如需中文稿件翻译服务, 可联系会议负责人。

(4) SCI 期刊 (投稿时备注【SCI+ICCAUE 2020】) 额外征集优秀论文, 按 SCI 期刊论文要求审稿。

大会秘书处: 魏老师

中文投稿/咨询邮箱: ICCAUE@163.com

手机/微信: 13902297125

QQ 咨询: 3488185507

联系地址: 广东省广州市越秀区中山一路 57 号南方铁道大厦 27 楼