

DOI: 10.11779/CJGE201711008

爆炸液化场上堤坝变形的模型试验研究

陈育民^{1, 2}, 刘汉龙^{1, 2, 3}, 陈晨伟⁴, 杨 贵^{1, 2}, 王维国⁵

(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; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 同济大学建筑设计院(集团)有限公司, 上海 200092; 5. 宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司, 浙江 宁波 315124)

摘要: 饱和砂土地基在地震、爆炸等振动荷载作用下易发生液化, 从而使堤坝等上部构筑物发生破坏。开展了爆炸液化场上堤坝变形的大型模型试验, 考虑了筑坝材料以及堤坝地基加固措施对堤坝变形和坝身裂缝的影响。试验表明: 堤坝沉降主要发生在场地液化后的1~2 h内, 该段时间内产生的沉降占7 d时沉降量的84%~87%; 掺加了碎石的堤坝比未加碎石的堤坝7 d时沉降量大24%; 地基内采用土工格栅+土工布的加固措施能够有效减少堤坝在液化场地上沉降, 比未加固的堤坝沉降减少了10%。堤坝的裂缝主要出现在细骨料筑成的坝段和不同筑坝材料的交界处, 沿坝身开展。总结了国内外规范中对于液化地基沉降的计算及预测方法, 根据液化地基上浅基础建筑物沉降图表对试验中的堤坝沉降进行了推算, 发现实测沉降与推算沉降比较接近。

关键词: 爆炸液化; 堤坝; 沉降变形; 模型试验; 沉降估算方法

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)11-2009-08

作者简介: 陈育民(1981-), 男, 教授, 主要从事土动力学与土工抗震领域的教学与科研工作。E-mail: ymchenhh@163.com。

Model tests on deformation of embankment in blast-induced liquefied field

CHEN Yu-min^{1, 2}, LIU Han-long^{1, 2, 3}, CHEN Chen-wei⁴, YANG Gui^{1, 2}, WANG Wei-guo⁵

(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; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 5. Ningbo Traffic Construction Project Testing and Inspection Center Co., Ltd., Ningbo 315124, China)

Abstract: A full sandy foundation is prone to be liquefied under an earthquake, explosion or other vibration loadings. As a result, the upper structures such as embankments on the foundation will be damaged. Aiming at the deformation problems of an embankment in a liquefied foundation, the field tests on explosion-induced liquefaction are conducted considering the effects of the embankment materials and reinforcement measures of the embankment foundation on its deformation and cracks. The results show that the subsidence of the embankment mainly occurs within 1~2 hours after the explosions, which accounts for 84%~87% of the total subsidence accumulated in 7 days. The settlement of the embankment with fine aggregate becomes stable after 7 days. The subsidence of the embankment with fine aggregate is 24% more than that without fine aggregate. The settlement of the foundation reinforced by geogrid and geotextile can be effectively reduced by 10% of the dam settlement in the liquefied ground. The cracks on the embankment body mainly appear in the section with fine aggregate and the interface between two different materials, and they extend along the dam body. The domestic and international specifications for the settlement of structures on a liquefied foundation are summarized. The settlement figure of buildings with shallow footings is adopted as the prediction method for the embankment settlement in this test. The results indicate that the predicted values are close to the measured data.

Key words: blast-induced liquefaction; embankment; settlement deformation; model test; prediction method of settlement

0 引言

地震作用下堤防、土坝等岩土工程构筑物可能会因为坝基或坝身的液化产生破坏性后果。20世纪的几次大地震中发生了Sheffield坝^[1]、Lower San Fernando

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_15R17); 国家自然科学基金面上项目(51379067); 重点国际合作研究项目(51420105013); 河海大学中央高校基本科研业务费项目(2015B17314)

收稿日期: 2016-07-26

坝^[2]、Wildlife 坝^[3]的地震溃坝事故, 1976 年唐山大地震中密云水库白河主坝因保护层液化而引起了滑坡灾害^[4]。在 2008 年汶川大地震以后, 强震区的土石坝抗震性能问题引起了广泛关注^[5], 另外中国近期正在规划的几个大型土石坝均涉及深厚覆盖层的问题, 均有坝基液化的风险。

对于地震中堤坝产生的破坏现场调查, 日本地盘工学会研究了 47 例堤坝破坏特征形态, 并把这些破坏形态分为 4 类, 如图 1 所示^[6-7]。具体包括, 类型 1: 表层滑移破坏(5 例), 类型 2: 局部滑移破坏(23 例), 类型 3: 整体滑移破坏(12 例)和类型 4: 沉降破坏(4 例), 并给出了不同破坏类型对应的坝顶沉降与堤坝高度的分布图以及不同筑坝材料对应的沉降/坝高分布图。

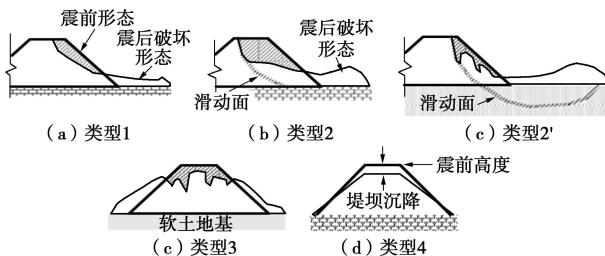


图 1 日本地盘工学会对地震中堤坝变形的分类^[6]

Fig. 1 Types of failure of earth fills during past earthquakes
(JSCE, 2000)^[6]

由于堤坝往往具有较大的尺寸, 因此试验方面主要采用的是土工动力离心机。汪明武等^[8]利用日本京都大学的动态土工离心机开展了液化场地堤坝地震响应试验, 试验中坝基深度 5 m, 坝高 3 m(均为换算成原型后的尺寸), 在峰值加速度为 0.179g 和 0.313g 的 30 s 地震波作用下, 堤坝发生了 1.0 m 和 1.4 m 的沉降。Maharjan 等^[9]对堤坝在非均质土地基上的动力响应进行了离心机动力试验, 结果发现相对于均质砂土地基, 非均质地基上的堤坝破坏更严重。吴俊贤等^[10]采用美国柯罗拉多大学大型动态土工离心机对台湾仁义潭土石坝进行了地震响应试验, 分析了土石坝受震时地基中超孔隙水压力的激增以及土体加速度在坝体不同填土区的变化。相对于堤坝工程, 中国学者更关注液化地基上建筑物的沉降变形特性。孟上九等^[11]开展了可液化地基上建筑物不均匀震陷机制的振动台试验研究, 得到了在不同地震波情况下建筑物的不均匀沉降差异。袁晓铭等^[12]通过振动台模型试验, 对液化土层上建筑物倾斜的计算方法提出了建议, 这些成果为液化场地上的建(构)筑物沉降变形研究也提供了一定的作用。

虽然离心机试验一定程度上能够反映液化地基上

堤坝的变形特性, 但实际模型尺寸仍然有限。而现场开展的爆炸试验为大尺寸液化模型试验提供了可能^[13-15]。本文在大型室外可控爆炸液化试验场上, 修筑了土质堤坝模型, 通过砂土地基中进行的多点微差爆炸使地基达到液化状态, 进而分析液化地基上堤坝的沉降变形和裂缝开展情况。通过与国内外相关规范(文献)的对比, 对液化地基上的沉降变形特性进行了分析讨论。

1 试验设计

1.1 试验场地

大型室外可控爆炸液化试验场地选择在湖北省武汉市东西湖区附近的一个农场内进行。试验场地设计为倒置的标准圆台形, 其开挖尺寸为: 底部圆截面直径 16 m, 地表圆截面直径 19 m, 深度 3 m。试验场地尺寸如 2 所示。选择级配不良的细砂进行回填, 回填方量约 750 m³, 回填后测算砂土地基的初始相对密实度为 30%。回填砂详细参数、炸药材料和现场原位测试结果参见文献[16]。

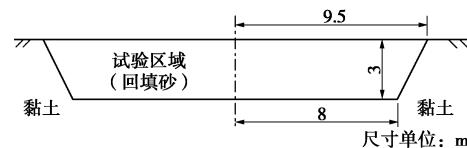
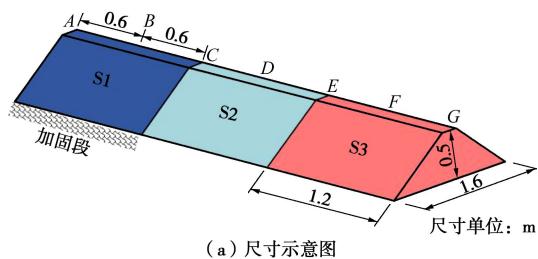


图 2 大型爆炸液化现场试验坑尺寸

Fig. 2 Site dimensions of large-scale tests on blast-induced liquefaction

1.2 堤坝设计

考虑到试验场地的规模及爆炸荷载的大小, 设计土质堤坝的尺寸为: 底宽 1.6 m, 坝体高度 0.5 m, 上底宽 0.2 m, 坡度比为 1:1.4。根据试验研究的对象及目的, 包括坝体材料及坝基加固方式, 将土质堤坝均匀分为 3 段, 每段长度为 1.2 m, 土质堤坝分为 3 段填筑, 其中 S1 段: 黏土和砂土混合材料, 同时坝基以下 0.5, 0.3, 0.1 m 深度处利用格栅+土工布进行加固; S2 段: 碎石、黏土和砂土混合材料, 坡基未加固; S3 段: 黏土和砂土混合材料, 坡基未加固, 堤坝模型图如图 3 所示。





(b) 现场照片

图 3 堤坝模型图

Fig. 3 Embankment in tests

填筑材料主要有: 砂土(图4(a)), 天然密度约为 1440 kg/m^3 ; 黏土(图4(b)), 天然密度约为 1840 kg/m^3 ; 碎石(图4(c)), 粒径 $1\sim2 \text{ cm}$ 。3段坝体材料配合比方案(体积比)如下: ①S1段: 砂土: 黏土=3:1; ②S2段: 砂土: 黏土: 碎石=3:0.5:0.5; ③S3段: 砂土: 黏土=3:1。



(a) 砂土

(b) 黏土

(c) 碎石

图 4 筑坝材料

Fig. 4 Materials in embankment construction

3段坝体同时进行填筑工作, 以避免由于上部荷载差引起的地基土应力不均匀。填筑方法为: 将称好体积的材料按配合比均匀拌制, 然后缓慢均匀的洒向堤坝设计所在位置, 每填筑厚度 0.1 m 后夯实, 具体操作如图5所示。



(a) 拌制筑坝材料

(b) 夯实板夯实

(c) 坝体成型

图 5 筑坝过程示意图

Fig. 5 Construction process of embankment

1.3 加固段地基处理方案

采用土工格栅+土工布的方案来对堤坝S1段进行地基处理。格栅材料采用进口PE材料制成, 网格尺寸为 $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$, 厚度 1.5 mm , 肋宽 2.5 mm 。土工布尺寸略大于土工格栅, 选择的是常规无纺土工布。首先根据S1段堤坝底部尺寸向下开挖 0.5 m , 开挖面尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$, 平面铺设单层土工格栅+单层土

工布(土工布铺设在格栅上部), 回填砂土并用击打器进行夯实, 控制处理坝基段的初始相对密实度与原场地基本相同。待回填至距离地表 0.3 m 和 0.1 m 时进行同样的操作, 完成加固段的地基处理。现场加固照片见图6所示。



(a) 埋设土工格栅 (b) 铺设土工布 (c) 砂土回填

图 6 S1段坝基加固方案操作

Fig. 6 Construction process of foundation reinforcement

1.4 爆炸方案及现场测试

试验中共设置8个药孔装药量均为 0.6 kg 的#2岩石乳化炸药药包, 埋设半径和深度分别为 6 m , 2 m , 相邻药包按逆时针延时 310 ms 起爆, 采用了14个岩土爆破专用动孔隙水压力传感器测试爆炸试验过程中的孔压时程。试验中采用的药包和孔压测试分布见图7所示, 图中的钢筋混凝土结构物也是爆炸液化试验中的分析对象, 已有论文专门进行分析^[17], 本文不再赘述。

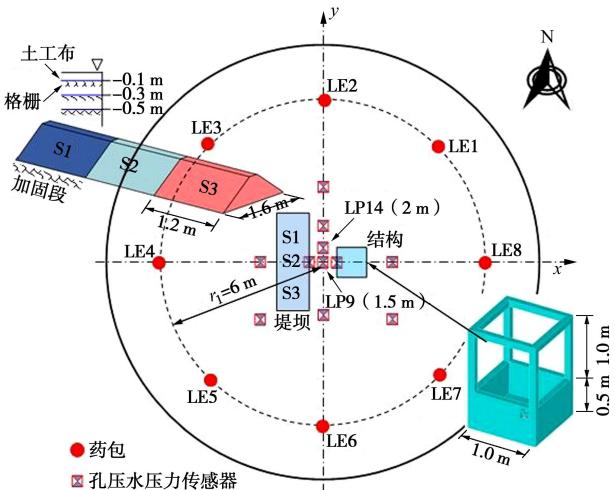
图 7 爆炸液化现场试验药包和孔压测试布置图^[16]

Fig. 7 Layout of embankment in full-scale blast-induced liquefaction tests

为了比较不同筑坝材料以及土工格栅+土工布坝基加固处理的堤坝在液化地基上不同的沉降变形特性, 在3段堤坝的中部及相邻位置均布置了监测点, 编号为A~G, 共7个监测点, 每两个监测点之间的距离为 0.6 m (图3)。爆炸振动造成的液化环境使得堤坝结构在冲击及自重作用下发生不均匀沉降, 由于爆炸试验导致场地大面积液化, 地基承载力极低, 人员禁止入内, 因此堤坝沉降观测从爆后 30 min 开始进

行，并对爆后 1, 2, 15, 7 d 时刻堤坝表面 7 个观测点相对于场地外不动点的沉降进行观测。

2 堤坝沉降及裂缝现场观测结果

通过爆炸试验过程中的动孔隙水压力结果进行分析，发现所有测点的孔压比均达到 0.93 ~ 1.0 之间，表明整个场地达到了完全液化状态。详细的实测数据可参照文献[16, 18]。本文不再对试验过程中的动孔压数据进行分析，仅对堤坝变形特性展开讨论。

2.1 堤坝沉降的宏观现象

药包起爆前后堤坝模型的形态变化见图 8 所示，可观察到爆炸后 30 min 时堤坝即产生了明显的沉降，采用了地基加固的 S1 段（图 8（b）中左侧）沉降明显小于 S2 和 S3 段，且场地内产生了大量的积水（图 8（b）~（e）），总体沉降趋势是堤坝中段（S2 段）沉降量最大，采用地基加固的 S1 段最小。爆炸后 7 d 时，场地内的水位有所下降，是因为爆炸试验后，采取了一定的排水措施，抽出了部分表面积水，使得堤坝露出了水面，但实际上堤坝仍然产生了沉降，后面将进行具体的数据分析。



图 8 堤坝沉降宏观现象

Fig. 8 Photos of embankment before and after explosions

2.2 堤坝沉降特性分析

图 9 所示为实测爆后 7 d 内堤坝坝顶各观测点的沉降曲线，从图中看出，3 段堤坝的沉降的共同点为沉降主要发生在药包起爆后的 1~2 h 内，15 h 后堤坝的沉降基本趋于稳定。下面分别对坝基相同但筑坝材料不同的两段（S2 和 S3）以及筑坝材料相同但地基处理方式不同的两段（S1 和 S3）进行对比分析。

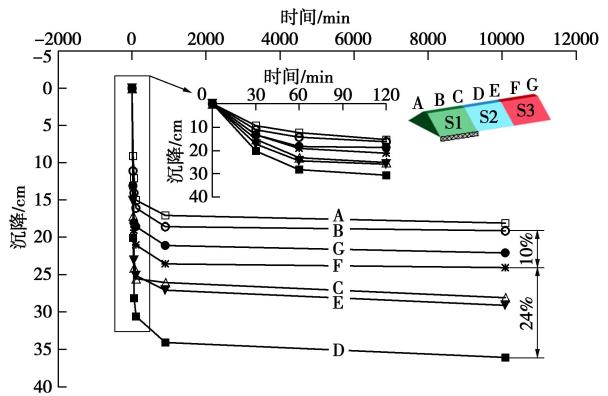


图 9 堤坝沉降曲线图

Fig. 9 Settlement curves of embankment

(1) S2 段 7 d 后的沉降量达到 36 cm，占坝高的 72%，S3 段 7 d 后的沉降量达到 24 cm，占坝高的 48%。由此可见，在同体积的情况下，由砂土+黏土细骨料筑成的坝体 S3 段比由砂土+黏土+碎石粗骨料筑成的坝体 S2 段在液化地基下的沉降小，到 7 d 时，S3 段比 S2 段沉降量相对于坝高减少 24%。同时，S3 段的沉降曲线在 7 d 时仍未达到收敛稳定，可能还会发生沉降。结果表明：粗骨料筑成的堤坝在液化地基上沉降量要大于细骨料筑成的堤坝，本试验筑坝材料的配合比选择的是体积比，因此粗骨料坝段在重度上要大于细骨料坝段，不考虑 S2 段与 S3 段坝基液化程度的差异，S2 段较大的坝体自重导致初始阶段发生较大的沉降量，压密了 S2 段下的地基土，影响后期孔隙水压力的消散，因此在爆后 7 d 时刻仍有沉降发生。

(2) S1 段与 S3 段筑坝材料均是由砂土+黏土按相同体积比筑成，材料重度相同，因此，这两段的沉降差异可以理解为土工格栅+土工布对坝基加固的效果。从图 9 可以看出，S1 段 7 d 后的沉降量为 19 cm，占坝高的 38%（S3 段沉降比为 48%）。因此，土工格栅+土工布坝基加固效果明显。本文试验中，坝基加固深度为 50 cm，与坝高相同，采用 3 层加筋的形式，可将堤坝的沉降减少 10%。相比与粗骨料筑成的坝体，可将堤坝的沉降减少堤坝坝高的 46%。由试验结果可知，土工格栅+土工布联合加固措施可以有效控制堤坝在液化地基上的沉降。

图 10 为堤坝在爆炸结束后的沉降变形形态, 图中横坐标取堤坝中心位置为 0 m, 与图 7 中的坐标取值相统一。图中可以看出, 坝体 S1 段和 S3 段在爆炸结束后沉降收敛明显快于 S2 段, 这两段的 15 h 沉降量和 7 d 沉降量已经十分接近 (A、B、F 和 G 点), 而 S2 段主要由于坝体自重更大, 地基液化后坝体沉降稳定所需的时间更长 (C、D 和 E 点)。

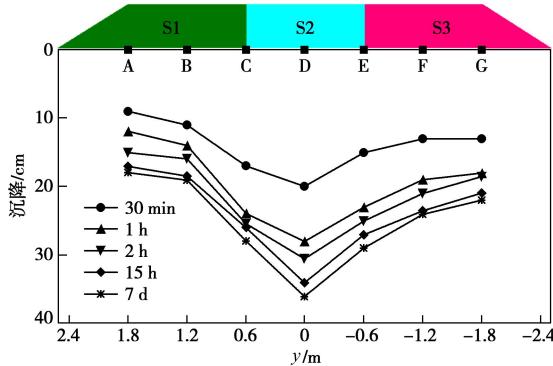
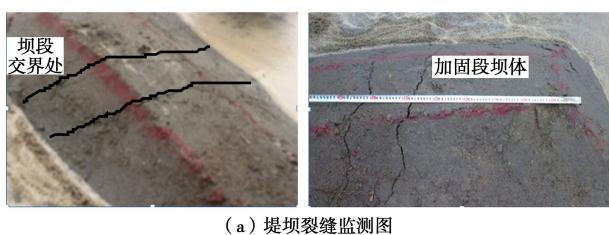


图 10 堤坝沉降形态随时间的变化

Fig. 10 Settlement profile of embankment

2.3 堤坝裂缝的分布情况

裂缝是土质堤坝在液化地基上破坏的另外一种主要形式, 由于土石坝的筑坝材料不同于一般的钢筋混凝土建筑物, 在液化地基上, 堤坝的不均匀沉降可直接导致坝身大规模裂缝的开展。本文试验对 3 段堤坝的裂缝开展进行了测量, 根据试验结果, 在堤坝沉降发生的最主要阶段 (药包起爆后 1~2 h 内), 3 段坝的坝身均出现了不同程度的裂缝, 实测了堤坝裂缝出现的位置及裂缝的宽度如图 11 所示。



(a) 堤坝裂缝监测图

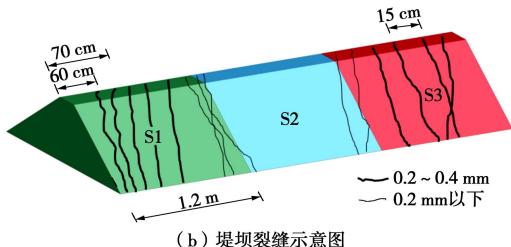


图 11 爆炸液化试验后堤坝表面的裂缝

Fig. 11 Cracks on embankment surface after blast-induced liquefaction

由图 11 可以看出, S1 和 S3 段出现的裂缝多于 S2 段, 并且裂缝出现的宽度较宽, 裂缝出现的数量为

每段 4, 5 条, 宽度为 0.2~0.4 mm 不等。相邻裂缝的间距大约 10~15 cm, 并且, 不同材料筑成的坝体交界处易出现裂缝, 但裂缝的宽度较小 (小于 0.2 mm)。这主要是因为不同材料的交界处黏结强度不高导致的。掺加了碎石的坝段 S2 段的坝体没有出现明显的裂缝, 主要原因是碎石等粗骨料的掺入能够增加坝段的整体性和稳定性。

下面从坝体表面的差异沉降来分析坝体产生裂缝的原因, 图 12 为各测点之间的差异沉降随时间的分布曲线。可以发现, 最大差异沉降发生在 S1 和 S2 段之间, 最大差异沉降达到了 10 cm; 而另一方面与 S1 段相同坝体材料的 S3 段差异沉降并不大, 最大值仅为 4 cm。从图 11 中可以看出, 这两段均产生了明显的裂缝。相对于 S1 和 S3 段, 掺入了碎石的 S2 段发生的差异沉降介于前两者之间, 但从坝身裂缝发展的情况看, S2 段并没有出现明显裂缝分布, 这说明坝体裂缝产生的主要原因仍然是坝体材料的强度, 当坝体强度较低时, 较小的差异沉降足以产生明显的裂缝, 在实际工程中应注重坝体强度的作用, 避免土坝在运行过程中或地震等动荷载作用下产生的裂缝, 导致坝体渗漏, 甚至引起土坝破坏。

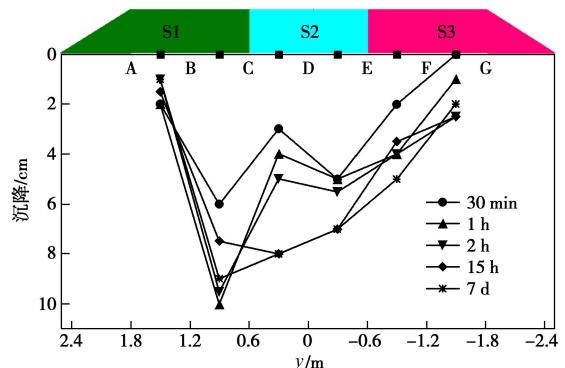


图 12 堤坝顶部各测点的差异沉降

Fig. 12 Differential settlements of embankment

3 液化地基上堤坝沉降变形讨论

目前, 国内外对于液化场地上堤坝的沉降变形仍没有完善的规范或标准。比如, 中国水工建筑物抗震设计规范 (DL5073—2000)^[19] 中提到了高土石坝的震陷问题, 并指出, 根据国内外的实测资料来看, 地震引起的坝顶沉陷并不明显, 一般不超过坝高的 1 %, 但并没有考虑坝基液化导致的土石坝沉降变形问题。中国建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010)^[20] 依据实测震陷、振动台试验以及有限元法的计算结果, 提出了估计砂土液化平均震陷量的经验公式方法。国际抗震设计标准 (ISO23469)^[21] 仅指出, 液化土的变形及

强度特性对于重力结构的基础设计起着至关重要的作用，并未给出具体的液化地基上建（构）筑物的沉降计算公式。除这些规范（标准）以外，日本学者对液化地基上堤坝变形进行了统计整理^[6-7]，且对液化场地上的建筑物沉降开展了一些研究^[22]。本节主要根据已有的液化沉降图表对本文液化试验中的堤坝沉降进行了计算，并对液化地基上堤坝的沉降变形计算方法给出了一定的建议。

3.1 液化地基上堤坝沉降变形的统计结果

日本地盘工学会根据统计分析^[6-7]，提出了堤坝破坏的 4 种特征形态（图 1）。本文爆炸液化试验中，3 段堤坝的破坏均属于第 4 类破坏形态（沉降）。这里将试验中得到的 3 段堤坝的沉降/坝高比值绘制于相关统计结果中（图 13），可以发现其结果均超出了日本地盘工学会所统计的沉降破坏的数据范围，究其原因可能是本次试验的模型尺寸较小，与实际工程的堤坝仍然具有一定差距。但在实际震害中，一旦土坝（堤防）由于地基的液化产生了如图 13 中的沉降，则可能会在水位较高的情况下造成漫顶事故，造成严重后果，因此仍当引起工程师的重视。

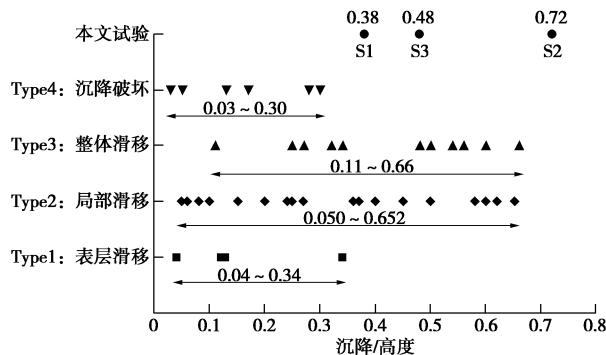


图 13 液化地基建筑物沉降/高度比值统计

Fig. 13 Values of ratio of settlement to height of building on liquefied foundation

另外，筑坝材料的选择以及地基土的类型也是影响堤坝在液化地基上沉降量大小的重要因素，日本地盘工学会通过震害统计，得出了不同筑坝材料的土坝在地震后堤坝沉降/坝高的对应关系。本文将得到的 3 段土坝沉降数据也汇入到了相关图表中，得到的结果见图 14 所示。图 14 表明，完全由砂土填充的堤坝最易发生沉降，且沉降量较大；混合材料填充的坝体沉降量较小。本文试验结果基本符合筑坝材料为砂土的堤坝破坏范围，原因是由于筑坝材料中砂土所占的比例最大。另外，本文试验中的 3 段土坝的填充材料是按同体积比混合拌制，而非同质量，因此，在加了碎石的坝段 S2 段，可以认为坝段的自重大于其余两个坝段，在同一液化地基上可认为较大的自重会导致堤坝在液化地基上的沉降量超过较轻的坝段。

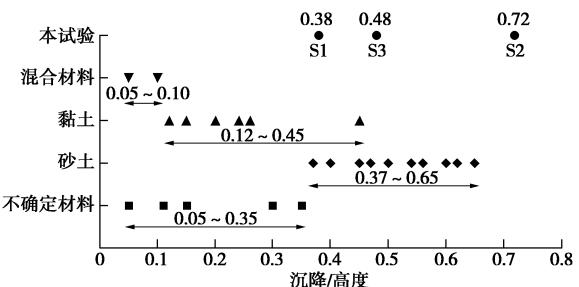


图 14 不同筑坝填充材料在液化地基上沉降/高度的比值统计

Fig. 14 Values of ratio of settlement to height of building of building with different materials on liquefied foundation

3.2 浅基础沉降变形分析方法

Yoshimi 等^[22]通过收集 1964 年日本新泻地震中的数据，统计并研究了建筑物的宽度与层数对建筑物在液化地基沉降量的关系，并在 1977 年开展了关于液化地基上建筑物的沉降规律的室内振动台模型试验。本文将相关数据结果汇总至图 15 中，并将本文的爆炸液化试验结果也绘入其中。从图 15 可以发现，在液化土层厚度相同的情况下，建筑物的宽度越大，其在液化地基上的沉降量越小；本次试验的结果量级基本上与 Yoshimi 的室内振动台试验基本一致，但是与在实际震害中统计的数据相差较大，主要原因是由本次模型试验的尺寸较小，0.5 m 高度的土坝产生的静力荷载仍然比 1 层建筑物荷载小得多。

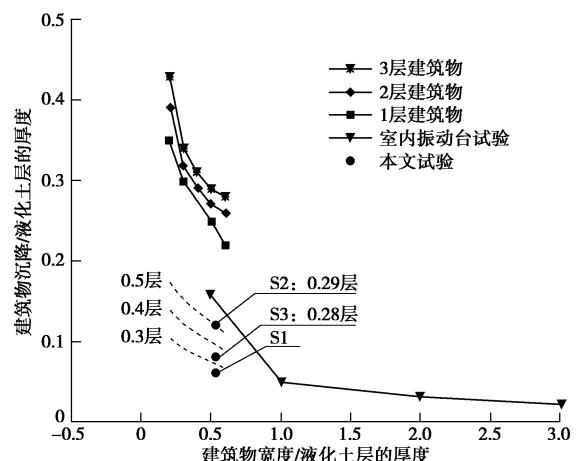


图 15 液化地基上浅基础沉降预测方法

Fig. 15 Settlement prediction of building with a shallow footing on a liquefied foundation

为了估算本文试验中的堤坝沉降，在图 15 中根据 1 层建筑物的沉降曲线进行差值推算，绘出了 0.5 层、0.4 层和 0.3 层建筑物沉降曲线。另外，将未进行地基加固的 S2 段（重度为 25.7 kN/m^3 ）和 S3 段（重度为 24.9 kN/m^3 ）堤坝等效为等底面积 ($0.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$) 的建筑物，并假设 1 层普通建筑物高度为 3 m（建筑物等效实体重度为 5 kN/m^3 ），可以得到两段堤坝可以分别等效为 0.29 和 0.28 层建筑物。由图可知，S3 段的

实测沉降基本与 0.3 层的推算曲线一致, 但 S2 段沉降量与 0.3 层推算沉降差别较大, 主要原因是 S2 段土坝两侧仍然有 S1 和 S3 两段的附加荷载。从边界条件角度, S3 段更符合推算曲线的假定, 因此可以认为本文中液化地基上的堤坝沉降可以通过浅基础沉降变形分析方法进行初步估算。

4 结 论

本文开展了爆炸液化场地上堤坝变形的大型模型试验, 考虑了筑坝材料以及堤坝地基加固措施对液化场地上堤坝变形和坝身裂缝的影响, 汇总并讨论了国内外关于液化地基上构筑物沉降估算方法, 并通过液化地基上浅基础的沉降变形对试验中堤坝沉降量进行了估算, 得出了以下 4 点结论。

(1) 液化场地上堤坝沉降主要发生在 1~2 h, 不同筑坝材料产生的沉降差异较大, 粗骨料(砂土+黏土+碎石)的坝体产生的沉降大于细骨料(砂土+黏土), 沉降差为坝高的 24%左右(爆后 7 d 时)。

(2) 土工格栅+土工布的坝基加固方案能够有效减少液化地基上堤坝的沉降, 采用 3 层土工格栅+土工布的加固方案, 能够减少 10 %的沉降。

(3) 通过观测堤坝坝身裂缝的开展情况可以发现, 筑坝材料中碎石等粗骨料的掺入能够增加堤坝整体稳定性, 使得堤坝在液化地基上坝身不易出现裂缝。对于不同材料建成的堤坝交界处, 由于材料的不连续性, 易出现较细的裂缝, 为整个堤坝的薄弱环节, 实际工程中应考虑不同筑坝材料建成的坝体交界处的非连续性。

(4) 总结了国内外规范中对于液化地基沉降的计算及预测方法, 利用液化地基上浅基础建筑物沉降量对本文试验中的堤坝沉降进行了推算, 发现实测沉降与推算沉降比较接近, 在实际工程中可以利用这种方法对液化地基上构筑物的沉降变形进行初步估算。

致 谢: 感谢武汉市市政建设集团有限公司谢先启教授级高级工程师、贾永胜高级工程师、姚颖康工程师等对本文现场爆炸试验提供的大力支持, 感谢河海大学刘军教授在试验实施过程中予以的帮助。

参考文献:

- [1] SEED H B, LEE K L, IDRISI M. Analysis of Sheffield dam failure[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Divison, 1969, **95**(6): 1453~1490.
- [2] CASTRO G, POULOS S J, LEATHERS F D. Re-examination of slide of lower San Fernando dam[J].

Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(9): 1093~1107.

- [3] ELKATEB T, CHALATURNYK R, ROBERTSON P K. Simplified geostatistical analysis of earthquake-induced ground response at the Wildlife Site, California, USA[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(1): 16~35.
- [4] 凌贤长, 王丽霞, 周宏. 地震触发砂土液化总应力判别法——以北京密云水库白河主坝震害为例[J]. 地震工程与工程振动, 2001, **21**(1): 99~104. (LING Xian-chang, WANG Li-xia, ZHOU Hong. Ascertainment of sand liquefaction arising from earthquake by the method of comprehensive stress: taking seismic damage to Baihe principle dam of Miyun reservoir in Beijing, China, as an example[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, **21**(1): 99~104. (in Chinese))
- [5] 赵剑明, 温彦锋, 刘小生, 等. 深厚覆盖层上高土石坝极限抗震能力分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊1): 41~47. (ZHAO Jian-ming, WEN Yan-feng, LIU Xiao-sheng, et al. Study of maximum aseismic capability of high earth-rock dam on deep riverbed alluviums[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 41~47. (in Chinese))
- [6] Research Committee on Earthquake Engineering, Japanese Society of Civil Engineering. Subcommittee activity on behavior of earth structures undergoing strong earthquake motion[R]. Tokyo: Japanese Society of Civil Engineering, 2000.
- [7] TOWHATA I. Geotechnical earthquake engineering[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [8] 汪明武, IAI S, TOBITA T. 液化场地堤坝地震响应动态土工离心试验及模拟[J]. 水利学报, 2008, **39**(12): 1346~1352. (WANG Ming-wu, IAI S, TOBITA T. Centrifuge test and numerical analysis of seismic responses of dyke on liquefiable soils foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(12): 1346~1352. (in Chinese))
- [9] MAHARJAN M, TAKAHASHI A. Liquefaction-induced deformation of earthen embankments on non-homogeneous soil deposits under sequential ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 2014, **66**: 113~124.
- [10] 吴俊贤, 倪至宽, 高汉棲. 土石坝的动态反应: 离心机模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 1~14. (WU Jun-xian, NI Zhi-kuan, GAO Han-yan. Seismic reaction of earth and rockfill dam: centrifuge modeling test and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 1~14. (in Chinese))

- [11] 孟上九, 刘汉龙, 袁晓铭, 等. 可液化地基上建筑物不均匀震陷机制的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1978 - 1985. (MENG Shang-jiu, LIU Han-long, YUAN Xiao-ming, et al. Experimental study on mechanism of earthquake-induced differential settlement of building on liquefiable subsoil by shaking table[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1978 - 1985. (in Chinese))
- [12] 袁晓铭, 孟凡超, 孟上九, 等. 液化土层上建筑物倾斜计算要点初步分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 687 - 692. (YUAN Xiao-ming, MENG Fan-chao, MENG Shang-jiu, et al. Key points for calculating inclination of buildings on liquefiable soil layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S0): 687 - 692. (in Chinese))
- [13] WANG L, HE K, SHI Y, et al. Study on liquefaction of saturated loess by in-situ explosion test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002(1): 50 - 56.
- [14] ASHFORD S A, ROLLINS K M. The Treasure Island liquefaction test[R]. California: University of California, 2001.
- [15] ROLLINS K M. Liquefaction mitigation using vertical composite drains: full scale testing[R]. Wastington: Transportation Research Board, 2004.
- [16] 刘汉龙, 王维国, 刘军, 等. 饱和砂土场地大型爆炸液化现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016. (LIU Han-long, WANG Wei-guo, LIU Jun, et al. Large-scale field tests of blast-induced liquefaction in saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016. (in Chinese))
- [17] 张意江, 陈育民, 王维国, 等. 爆炸液化场地中浅埋钢筋混凝土结构动力响应的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3506 - 3512. (ZHANG Yi-jiang, CHEN Yu-min, WANG Wei-guo, et al. Experimental investigation on dynamic response of shallow-buried reinforced concrete structure in blast-induced liquefied sandy foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3506 - 3512. (in Chinese))
- [18] 王维国. 砂土场地爆炸效应及液化特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (WANG Wei-guo. Study on explosion effects and blast-induced liquefaction characteristics in sand medium[D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))
- [19] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 2000. (DL 5073—2000 Specifications for seismic design of hydraulic structures[S]. 2000. (in Chinese))
- [20] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [21] International Standard Organization. ISO23469 Bases for design of structures-seismic actions for designing geotechnical works[S]. 2005.
- [22] YOSHIMI Y, TOKIMATSU K. Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes[J]. Soils and Foundations, 1997, 17(1): 23 - 38.