

液化土层上建筑物倾斜计算要点初步分析

袁晓铭¹, 孟凡超¹, 孟上九², 孙锐¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要: 地震中饱和砂土地基液化会引起结构物倾斜并导致其功能丧失, 但目前缺乏相应的数值模拟方法。通过振动台简单模型试验, 寻找输入波-基底竖向动应力-基底孔压-结构震陷之间的关系, 提出发展液化土层上建筑物倾斜数值模拟方法所需要考虑的要点和应满足的条件。结果表明: (1) 分析方法中孔压增长模型应适于不规则波计算, 能准确地计算出孔压增长过程, 准确地计算出峰值一样但不同波形下孔压增长的差别; (2) 孔压增长模型应能反映土的各向异性特性对孔压增长的影响, 能合理地计算出拉、压不同应力作用下孔压增长的差异; (3) 孔压增长模型应能反映非均等固结条件对孔压增长过程的影响, 能合理地计算出结构底部不同固结比土体中孔压增长过程; (4) 分析方法中土体变形的计算应能跟踪液化过程中的变形发展, 且具备大变形计算能力。

关键词: 液化; 建筑物; 倾斜; 计算要点; 过程

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Key points for calculating inclination of buildings on liquefiable soil layers

YUAN Xiao-ming¹, MENG Fan-chao¹, MENG Shang-jiu², SUN Rui¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Heilongjiang Engineering College, Harbin 150050, China)

Abstract: The liquefaction in earthquakes will cause the inclination of the buildings and lead to their loss of functions. No numerical methods, however, can simulate the behavior of the phenomena at present. To search for the key points in the potential numerical method of calculating the building inclination due to soil liquefaction, the simple shaking table test is conducted and the relationship of the inputting waves, the vertical dynamic stresses, the pore water pressures and the building settlements are investigated in the paper. The results indicate: (1) The pore water pressure model used in the potential method must be suitable for simulating the process of water pressure rising during the irregular loads and can exactly calculate the difference of the pore water pressures under the incident loads with same peak amplitude but different forms; (2) The pore water pressure model should be able to describe the pore water pressure variation due to the anisotropic property of soil and can distinguish the difference of the water pressures due to the compression and extension stresses; (3) The pore water pressure model should be able to calculate the effect of the consolidation ratios on the pore water pressure variation and can attain the actual process of water pressure for the soil below the buildings; (4) The potential method should be able to follow the tracks of the deformation process of the soil layers with the increase in the pore water pressure.

Key words: liquefaction; building; inclination; key points of calculation method

1 引言

地震中饱和砂土地基上建筑物不均匀震陷是典型的地震破坏现象。1964年日本新潟地震中有确良2400多幢建筑物由于液化发生了不均匀震陷而遭受巨大损失。但以往对液化引起的建筑物震陷特别是不均匀震陷研究尚少^[1-4], 缺乏相应计算手段。

建筑物不均匀震陷计算模拟方法缺乏的主要原因是对物理过程认识不清, 把握不了要点。通常认为, 土层横向分布不均匀或建筑物荷重分配不平衡是导致建筑物不均匀震陷发生的原因。但仅据此难以解释均匀场地上荷重均衡的建筑物仍发生大量不均匀震陷的现象。同时, 笔者以目前常规方法对可液化地基上建筑物震陷进行了初步分析, 发现即

使对土层横向分布不均匀明显或建筑物荷重分配明显不均衡的情况,也计算不出显著的不均匀震陷和建筑物的明显倾斜。这说明,以现有知识为基础发展起来的常规计算方法存在不适之处。本文力图利用简单模型的振动台试验,在地震波以水平剪切形式输入的条件下,寻找输入波型、建筑物基底动应力、动孔隙水压力和建筑物沉降间内在联系,为发展合理的分析方法提供线索。

2 试验设计

2.1 试验设备

振动台为中国地震局工程力学研究所自行研制,尺寸为 $90\text{ cm} \times 70\text{ cm}$,载重量为 200 kg ,最大加速度为 $1g$,最大位移为 $\pm 5\text{ cm}$,频率范围为 $0 \sim 10\text{ Hz}$ 。系统为开环加载,激振波形为水平等幅正弦波。

2.2 地基与建筑物模型

试验采用砂箱盛砂模拟地基土,砂箱尺寸为 $51\text{ cm} \times 34\text{ cm} \times 32\text{ cm}$ 。为减少砂箱边界反射的影响,试验中使砂箱长边与激振方向平行。地基土为灰白色粉细砂,其最大、最小干密度分别为 1.78 g/cm^3 和 1.54 g/cm^3 ,级配曲线如图 1。

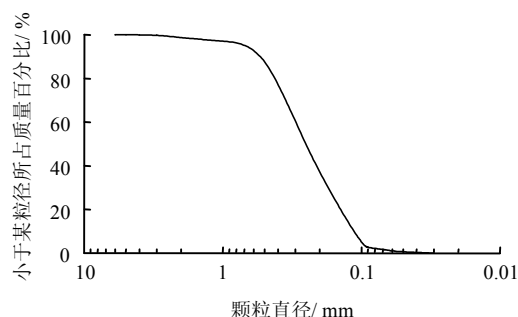


图 1 地基土级配曲线

Fig.1 Gradation curve of the subsoil

砂样经筛选晾干后,用水沉法进行地基成型,在试验中将相对密度控制在 50% 左右。试验一次成型厚度小于 5 cm ,最终厚度为 25 cm ,放入地基后固结 24 h 。试验中直到完全液化时停止。

建筑物模型以两块槽钢对焊在一起,尺寸为 $20\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 40\text{ cm}$,重量为 18 kg ,埋入土中 3 cm 以模拟基础。

这样简单的地基与建筑物模型,可以排除模型自身荷重分配不均衡及土层横向分布不均匀对不均匀震陷的影响,便于给出单纯的荷载作用对不均匀震陷影响效果的认识。

2.3 传感器选型和布置

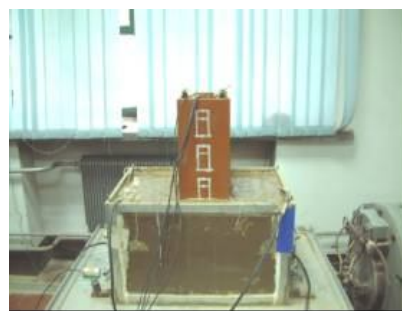
试验中用到的传感器种类及其各种参数及布设

方向如表 1,其中孔压传感器的选型对试验成功与否十分重要,需要选择量程适宜、精度高的传感器。试验模型和传感器布置如图 2 所示。

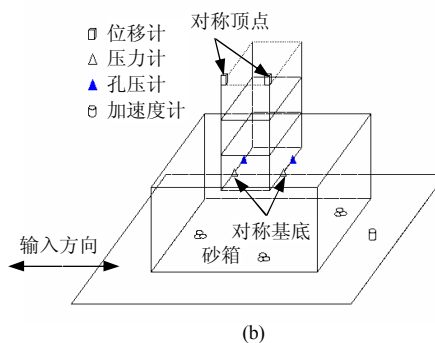
表 1 传感器及指标

Table 1 Sensors and their index

参数	编号	量程	灵敏度	位置	方向
加速度	SA1	$\pm 1g$	$7.194\text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{V}$	台面	水平
土压力	SS1	—	33.8 kPa/V	南侧基底	竖向
	SS2	—	34.27 kPa/V	北侧基底	竖向
孔压	SP1	50 kPa	16.055 kPa/V	南侧基底	—
	SP2	50 kPa	16.496 kPa/V	北侧基底	—
	SP3	50 kPa	16.300 kPa/V	土层中部	—
位移	SD1	$\pm 10\text{ cm}$	0.486 cm/V	南侧顶点	竖向
	SD2	$\pm 10\text{ cm}$	0.5 cm/V	北侧顶点	竖向



(a)



(b)

图 2 试验模型和传感器布置示意图

Fig.2 Sketch of test model and sensor distribution

2.3.1 加速度传感器布置

试验中振动台台面布设了水平加速度传感器,布设方向与激震方向一致。台面加速度传感器用来确定最终输入波形,由于误差输入加速度与反馈加速度会存在一定的差别,在试验中以最终获得的台面加速度记录为准。

2.3.2 孔压传感器布置

本次试验中将 2 个孔压计对称地布置在建筑物模型基底两侧,来获得对称基底孔压的关系。

孔压计在布设之前先饱水 24 h 左右,使其完全

排掉内部空气,减少测量误差。由于孔压计的探头专门为测量液体压力而设计,导液孔比较大,为防止粉细砂进入引起堵塞,试验中在导液孔内部衬以海绵,以保证孔压传递又能有效防止砂粒的进入。

2.3.3 土压力计的布置

将一对土压力传感器粘贴于建筑物模型对称基底。以获取基础与地基土之间的接触动压力,便于与布置在同侧的孔压、震陷信息比较,以了解土体-结构接触动压力、地基土中孔隙水压力及建筑物震陷三者间的联系。

2.3.4 位移计布置

将位移计基座固定在台面上,与对称地布设在建筑物顶点上的悬臂梁相连。这样,位移计测量的是结构相对于台面的竖向的位移时程,即震动中结构的相对台面的绝对震陷。

2.4 试验工况

为得到规律性的认识,本文进行了5次试验,表2给出了这5次试验信息。

表2 试验工况
Table 2 Test cases

序号	工况	输入 加速度	波形	反馈 加速度	采样频率 / Hz	方向
1	A	0.3 g	正弦	0.337 g	200	南北
2	B	0.4 g	正弦	0.411 g	200	南北
3	C	0.5 g	正弦	0.495 g	200	南北
4	D	0.3 g	正弦	0.354 g	200	南北
5	E	0.3 g	正弦	0.322 g	200	南北

3 模型对称点反应比较

3.1 结构对称基底下竖向动应力比较

图3显示了建筑物模型对称基底竖向动应力反应时程(部分)。由图可见,对称基底竖向动应力-时程基本呈反对称形式分布。当建筑物一侧基底出现动压应力时,另一侧的基底则出现几乎等值反向的动拉应力。当砂层进入到液化状态以后,此现象

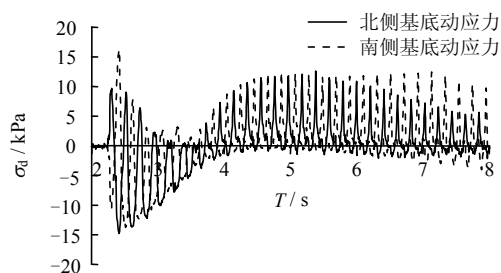


图3 建筑物模型对称基底下竖向动应力比较
Fig.3 Vertical dynamic stresses on two symmetrical bottoms of the building model

仍然存在。需注意到,基底动应力在震动一段时间后,出现了负向动应力为0的现象,这是由于此时孔隙水压力已经有很大升高,土体出现显著永久变形,建筑物出现显著震陷,土体和建筑物间出现脱节。

需注意的是,两侧的动压应力虽然是以等值反向形式出现,但一侧为压应力,另一侧是拉应力。特别是在2.3 s左右,南侧有一个显著超过北侧的压力脉冲,而北侧则为几乎一样大的拉力脉冲。

3.2 结构对称基底下孔隙水压力比较

图4显示了建筑物模型对称基底下土体孔隙水压力反应时程(部分)。模型对称基底孔隙水压力-时程的规律是:震动作用时,孔压处于升高状态,基底下对称点孔隙水压力中动往返孔压部分却呈反向形式分布,当建筑物一侧基底出现孔隙水压力上升时,相应的另一侧基底的孔隙水压力则会有所下降;当砂层进入到液化状态以后此现象仍然存在。

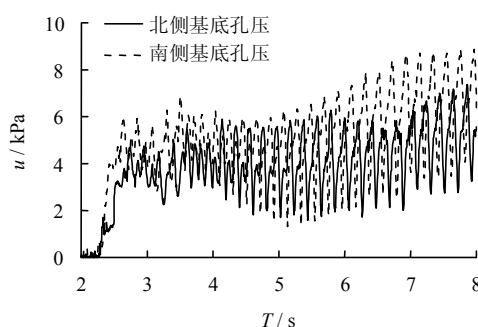


图4 建筑物模型对称基底下孔隙水压力比较
Fig.4 Pore water pressures under two symmetrical bottoms of the building model

特别注意的是,两侧的动往返孔隙水压力以反向形式出现,但在2.3 s左右南侧孔隙水压力有一个显著超过北侧的增长,使得南侧后来残余孔隙水压力总是超过北侧。

3.3 结构对称顶点震陷比较

图5显示了建筑物模型对称顶点震陷时程(部分)。可以看到,对称顶点的震陷动位移-时程是呈反向形式分布。当建筑物一侧顶点出现瞬时震陷时,另一侧顶点的瞬时震陷则略有恢复;当砂层进入到液化状态以后此现象仍然存在。需注意的是,南侧永久震陷开始与北侧差别不大,但逐渐分叉,最后与北侧拉开了距离,出现了较为显著的不均匀震陷。

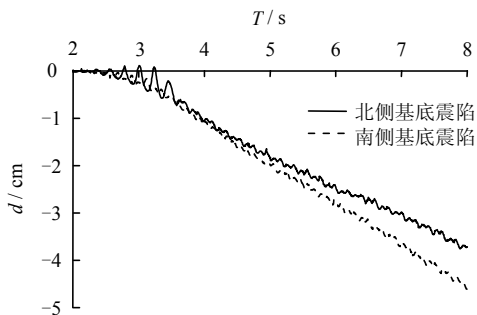


图5 建筑物模型对称顶点震陷比较
Fig.5 Settlements of two symmetrical bottoms of the building model

这样, 建筑物模型对称顶点、对称基底下竖向动应力和对称基底下土层中的孔压时程, 都是同步反向分布, 对称基底下动应力反应几乎是等值反向的反对称形态。这里虽然是以工况 D 为例, 但其他工况都有类似规律。

4 输入加速度、动应力、孔压和震陷关系

仍以工况 D 为例, 研究输入加速度、建筑物模型基底竖向动应力、土层孔压和结构震陷相互关系。

4.1 输入加速度与结构两侧基底竖向动应力关系

图 6 给出了输入加速度波形同结构基底竖向动应力间反应时程。通过对比看出: 结构一侧基底的

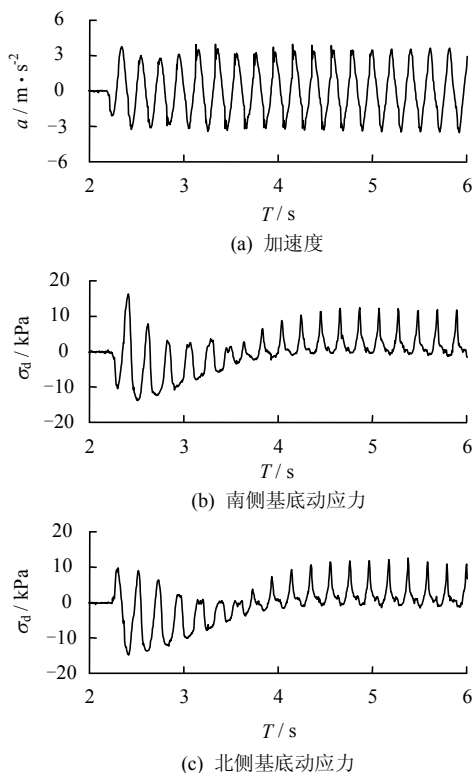


图6 输入加速度与结构两侧基底竖向动应力关系
Fig.6 Relationship of acceleration incidence and vertical dynamic stresses on two bottoms of building model

动应力波形同输入加速度相近, 且基本保持同步, 而基底另一侧动应力波形与输入波反向。

4.2 结构两侧基底竖向动应力与两侧土层孔压关系

图 7 显示了结构两侧基底竖向动应力和孔压时程。将动应力同孔压的增长的若干正向峰峰关系用虚线连接, 可见当土体处于压半周时, 孔压出现增长, 而土体处于拉(减)应力半周时孔压则会有所下降, 并在初始液化时刻的几个压应力脉冲对累积孔压起主要作用, 后面的动应力对累积孔压的增长作用很小。

从图 7 南北两侧孔隙水压力增长过程分析, 在 2.3 s 左右南侧孔隙水压力有一个显著超过北侧的增长, 原因是此时南侧有一个显著超过北侧的压力脉冲, 这一增长对两侧孔压的差别起到了决定性作用, 使得南侧后来残余孔隙水压力总是超过北侧。

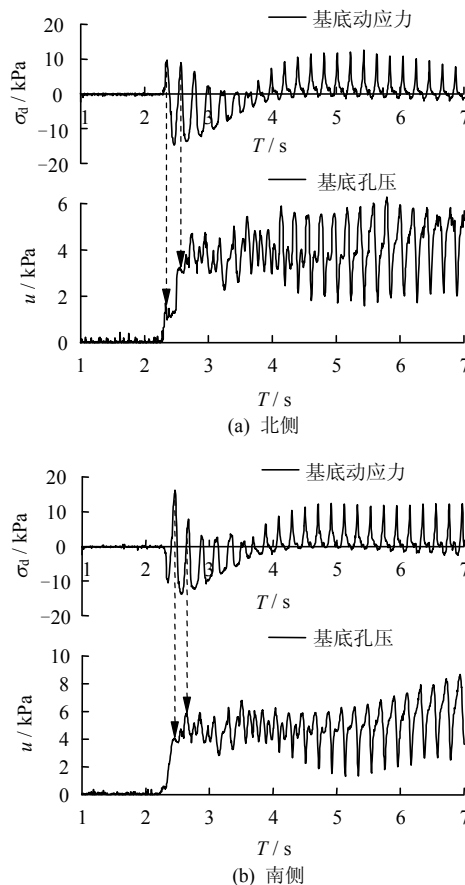


图7 结构两侧基底竖向动应力和两侧土层孔压关系
Fig.7 Relationship of vertical dynamic stresses and pore water pressures on two bottoms

4.3 结构两侧基底动应力和两侧震陷关系

图 8 为结构两侧基底动应力和震陷时程对比。将动应力同震陷正向峰峰增长连接可以看出, 动压应力使震陷增加, 而动拉应力则使震陷略有恢复。随动应力变化, 震陷出现波动性的累积增长。

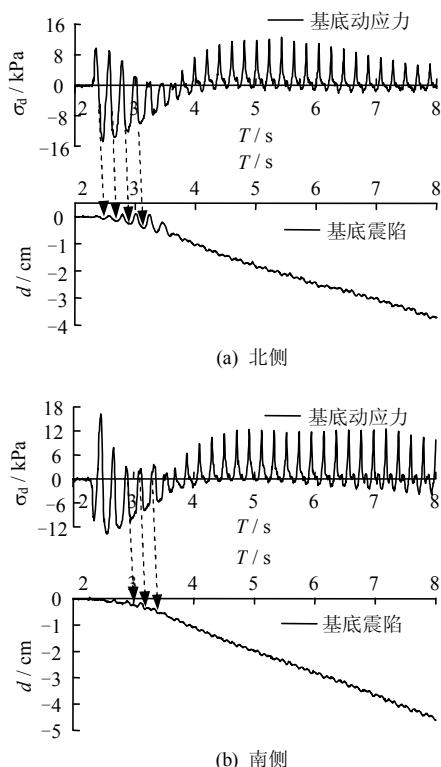


图8 结构两侧基底动应力和两侧震陷关系
Fig.8 Relationship of dynamic stresses and settlements on two bottoms

4.4 两侧土层孔压与结构两侧震陷关系

图9为结构两侧土层孔压和震陷。将孔压同震陷峰值连接可以看出：动孔压增大震陷增长，孔压降低震陷略有恢复。累计孔压对永久震陷发展影响很大，累计孔压大，永久震陷大；累计孔压达到一定程度（孔压比0.7左右）时，永久震陷明显增加。

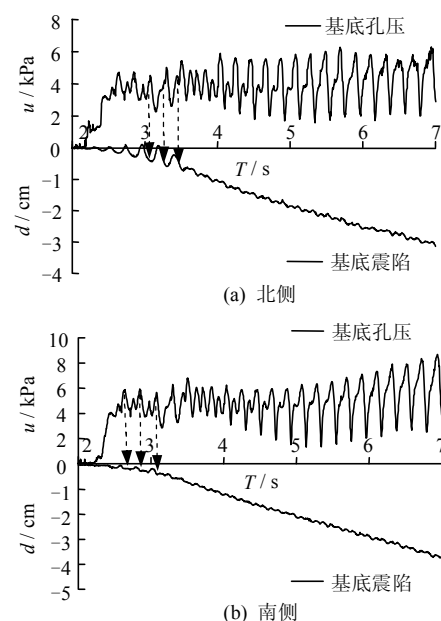


图9 两侧土层孔压和结构两侧震陷关系
Fig.9 Relationship of pore water pressures and settlements on two bottoms

5 不均匀震陷分析

图10给出了工D况中输入加速度与各种反应对比。综合对比可以看到，输入波-基底竖向动应力-基底土层孔压-结构震陷之间有着良好的对应关系。正是由于输入波伊始有一个明显的脉冲作用，导致南侧基底竖向动应力有一个明显的动压力脉冲，进而导致南侧基底孔压有一个显著增长，并对两侧孔压差别起决定作用，使得南侧残余孔隙水压力总是超过北侧，最后南侧震陷更大，结构向南倾斜。

也就是说，输入加速度中正向负向波不对称性造成结构两侧竖向动压力不同，进一步导致两侧孔隙水压力增长的差别，最后使结构两端震陷出现差异。两端震陷差异的主要来源于输入波的不均匀性。除了工况D外，工况A，B，C都有同样规律。

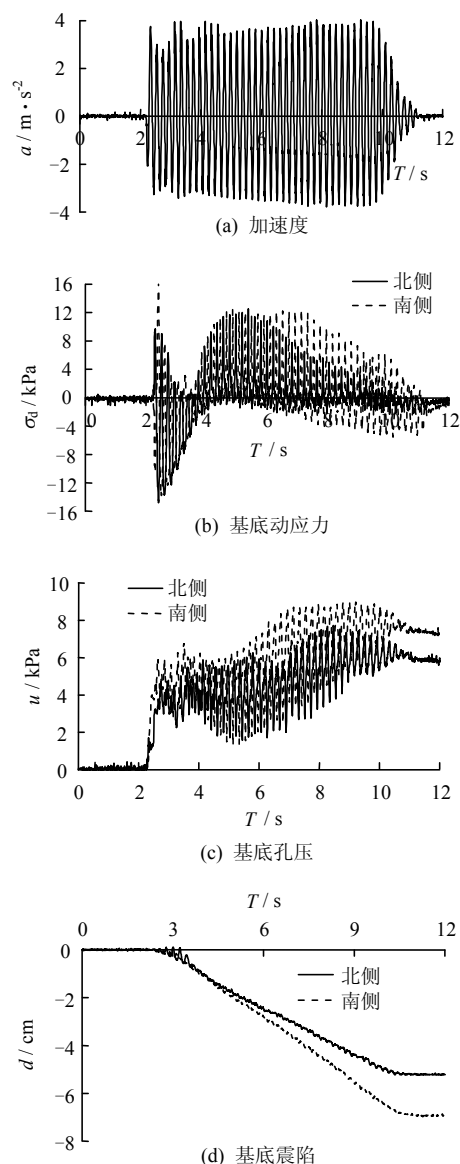


图10 不均匀震陷反应时程
Fig.10 Total response histories for differential settlement

6 均匀震陷分析

分析表明,虽然本文试验设计为等幅正弦输入,但事实上由于振动台的开环,真正输入的波却难以保证均匀,输入波使结构基底的竖向动应力有单方向的不均匀脉冲,最后导致结构出现倾斜。5个工况试验中,只有工况E试验结构震陷是均匀的。

工况E反应时程示于图11。可见输入波基本均匀,虽略有差异但基底两侧竖向动应力相差不大,土层累计孔压过程几乎完全一致,最后结构震陷均匀,建筑物最终没有倾斜。也就是说,累计孔压整个过程都不出现差异是建筑物不出现倾斜的必要条件。

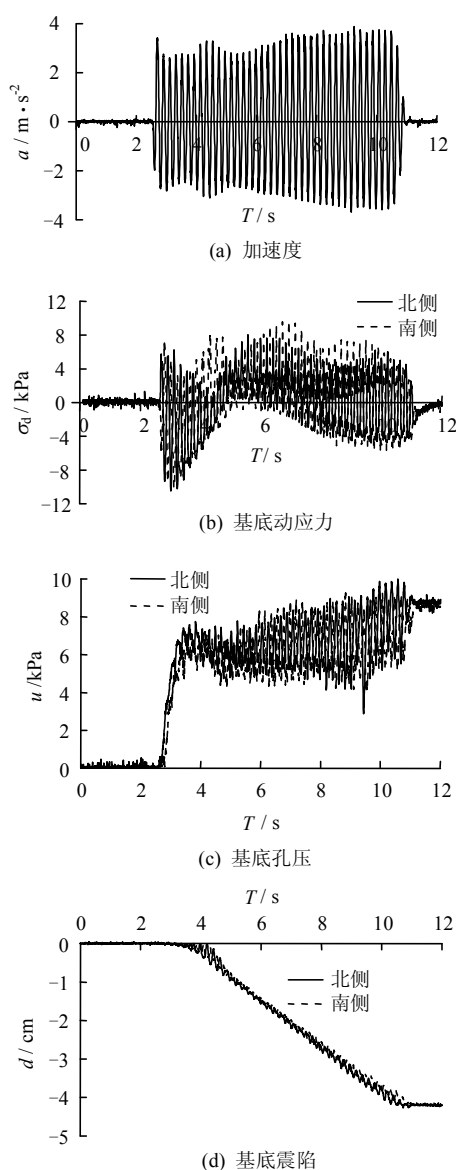


图11 均匀震陷反应时程

Fig.11 Total response histories for uniform settlement

7 结论

通过本文试验可得到如下认识:

(1)地震中建筑物对称基底竖向动应力-时程呈反对称形式分布,对称基底土层孔压-时程中动往返孔压部分、结构对称顶点震陷时程中动往返变形部分呈反向形式分布,液化后此现象仍然存在。

(2)建筑物基底竖向动应力受输入控制,一侧基底的动应力波形同输入加速度相近,且保持同步,而基底另一侧动应力波形与输入呈反对称。

(3)基底土层孔压受竖向动应力控制,累计孔压增长主要受往返竖向动应力中压应力影响。

(4)建筑物倾斜主要取决于结构基底两侧土层中累计孔压差异大小,建筑物倾斜的方向与基底中孔压上升较高者同侧,基底中孔压上升快的一端是建筑物震陷发展较快的一端。

(5)输入波-基底竖向动应力-基底孔压-结构震陷之间存在良好对应关系,在结构均衡和土层均匀条件下,建筑物倾斜主要取决于输入波的不规则和不对称性,如果输入波均匀,结构将出现均匀沉降。

(6)输入波不规则和不对称性是一个敏感参数,决定着结构基底累计孔压的差异,进而决定着结构不均匀震陷的发生和发展。

因此,液化土层上建筑物倾斜数值模拟应满足:

(1)分析方法中的孔压增长模型必须适于不规则波,能准确地计算出孔压增长过程,准确地计算出峰值一样但波形不同的荷载作用下孔压增长的差别,不能使用Seed的转换方法将不规则波转化成等幅波进行计算。

(2)孔压增长模型须能反映土的各向异性特性对孔压增长的影响,能合理地计算出拉、压不同作用下孔压增长的差异,现有的常规计算公式不合适。

(3)孔压增长模型应能反映非均等固结条件对孔压增长的影响,能合理地计算出结构底部不同固结比土体的孔压增长,现有的均等计算公式不合适。

(4)土体变形的模拟方法应能跟踪液化过程中的变形发展,且具备大变形计算能力。

参考文献

- [1] 周键, 蔡宏英, 许朝阳. 软黏土地震震陷分析[J]. 工程抗震, 2000, (1): 39—42.
- [2] 袁晓铭, 孙锐, 孟上九. 软弱地基土上建筑物不均匀震陷机理研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 67—72.
- [3] Yuan X M, Sun R, Meng S J. Effect of asymmetry and irregularity of seismic waves on earthquake-induced differential settlement of buildings on natural subsoil[J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(2): 107—114.
- [4] 熊玉春, 房营光, 徐国辉. 软黏土的动力损伤模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, S1: 3 152—3 155.