

液化土层地震动特征分析

Analysis on feature of surface ground motion for liquefied soil layer

孙 锐, 袁晓铭

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 采用理论计算和实际地震记录分析, 研究液化土层上的地表地震动特征, 讨论液化对地震波波型、加速度反应谱和反应谱特征周期的影响。研究表明, 理论计算与实际记录的分析结果定性上十分相符, 一些重要的定量指标一致。两者的结果都说明: 液化使地表水平地震动的频率成分明显下降; 地表水平加速度反应谱中, 液化使特征周期至少延长 0.1 s 以上, 平均延长 0.3 s; 地表水平加速度反应谱周期 0.8 s 左右是液化减震加震的分界线, 小于此值有一定程度减震, 大于此值则有明显加震, 出现反应显著放大的频段为 1~3 s。

关键词: 液化; 水平加速度; 反应谱; 特征周期; 减震; 加震

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)05-0684-07

作者简介: 孙 锐(1972-), 女, 副研究员, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程研究。

SUN Rui, YUAN Xiao-ming

(Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China)

Abstract: In the paper, the feature of surface ground motion on the liquefied sites is presented by theoretical calculation and analysis with earthquake data. The results of the calculated and the observed data are agreeable qualitatively and some important results are consistent quantitatively. Both indicate that the liquefaction makes the frequency of the surface horizontal quake reduced obviously. Also, the liquefaction makes the characteristic period of the response spectra of the surface horizontal accelerations prolonged by more than 0.1 s at least and 0.3 s on average. The period of 0.8 s in the response spectra of the surface horizontal accelerations is a boundary point, below which the acceleration of liquefied soil layer decreases in the spectra to a certain extent and beyond which the acceleration of the liquefied soil layer significantly amplifies, especially in the range of 1 s~3 s in the spectra.

Key words: Liquefaction; Horizontal acceleration; Response spectra; Characteristic period; Reduction of vibration; Amplification of vibration

0 引 言*

地震下土层的地面运动—地震动的研究, 决定着地基和工程结构反应的输入, 是土动力学的重要内容, 因而有很多研究工作开展^[1,2], 但以往的工作基本上没有考虑到液化对地震动的作用。

砂土液化会引起地基、土工结构失稳和相应的结构破坏, 同时从波动角度, 液化的土层将改变地震动特性, 进而对地基基础、工程结构震动的大小和方式有特殊影响。在唐山大地震中, 所说的“湿震不重于干震”, 表明液化对某类房屋的震动有减轻作用。而在 1995 年日本阪神(Kobe)大地震中, 液化土层上的记录表明, 水平地震动的频率成分有很大的改变, 长周期分量明显增多, 这将对不同类型的结构的振动产生不同的影响。近来, J Yang(2002)比较了液化场地水平和竖向地震动的不同反应^[3], 指出水平向运动会受到液化影响, 而竖向运动则不受液化干扰, 得到了一些定性的结果。另外, 利用场地强震记录来进行地基液化速报开始成为工程上需求很强的问题, 近来国外已有一些研究开展^[4-6], 这方面工作深入的程度取决于强震记录的积累以及液化场地上波传播理论的研究水平, 二者相辅

相成, 但目前的研究主要是以地震记录分析为基础, 液化场地对波动特性的影响研究则很不够。考虑到液化场地地震记录目前还很有限, 液化土层地震动特征的理论研究就显得很重要。

1 理论分析方法

本文采用一维土层来分析计算液化场地对地震动特性的影响。虽然一维土层较简单, 不能模拟复杂和有结构存在的场地, 但从分析一般土层地震动角度考虑还是较适宜的, 且算法也较成熟可靠。

1.1 分析方法

本文采用的一维有效应力分析方法是工程力学所早在七十年代引进等效线性化模型后, 基本原理是根据 Mardin 和 Seed 的方法, 经过三十年来不断改进和完善而发展起来的, 有以下几个特点:

(1) 采用了 Pyke 提出的能自动满足 Massing 准则的修正双曲线模型。

(2) 采用逐步积分求解运动方程, 通过每一 Δt 迭

* 基金项目: 国家科技部和地震学联合基金资助项目(103092)

收稿日期: 2003-10-17

代处理土的非线性,可考虑由于孔压上升造成的土体软化过程,以及对剪切模量进行实时修正,这一点是保证求解的地面加速度时程是真实过程的前提。

(3)所用的孔压增长模型为 Sherif 提出的计算公式,能实时反应孔压增长过程,且以后又进行了修正,考虑了场地真实固结比下孔压增长的影响,同时也考虑了孔压的发生、发展与消散过程。

(4)根据实验室试验和现场液化资料求得液化时的剪切模量,从而使液化后的土层反应计算得以继续进行。

曾根据石原等人给出的现场孔压观察资料和地质剖面图进行了对比计算,结果表明,土层中的孔压值和地表反应结果基本一致,结果有良好的对应关系。这表明,本方法可以给出可靠的结果,可用于分析土层液化对地震动的影响问题。

1.2 研究步骤

①考虑土层为一维水平剪切运动;②选择两个 II

类场地为计算剖面,两个剖面参数一样,但后者有可液化砂层;③从标准反应谱合成三条人造地表地震波;④通过全黏土剖面,采用反演技术将地表地震波反演求得基岩人造地震波;⑤以反演至基岩的人造地震波和三条地震记录作为基岩输入波,计算全黏土剖面的地震动,同时计算含砂层剖面的地震动;⑥通过全黏土和有可液化的砂层剖面上的反应对比,研究液化对地震动和加速度反应谱的影响。

1.3 剖面及输入波

选择 II 类场地为研究对象,按《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)^[7],并取设计地震分组为第一组,其特征周期为 0.35 s,水平地震影响系数最大值 7 度为 0.08,8 度为 0.16,9 度为 0.32。本文分析中取两个剖面(如图 1 所示),一个为全黏土剖面,另一个为含砂层剖面,下面是基岩。两个基本剖面所有的参数都一样但后者有可液化的砂层。剖面厚 30 m,地下水位 2 m,计算中共取 30 层,每层 1 m。波速随深度 z 的变化

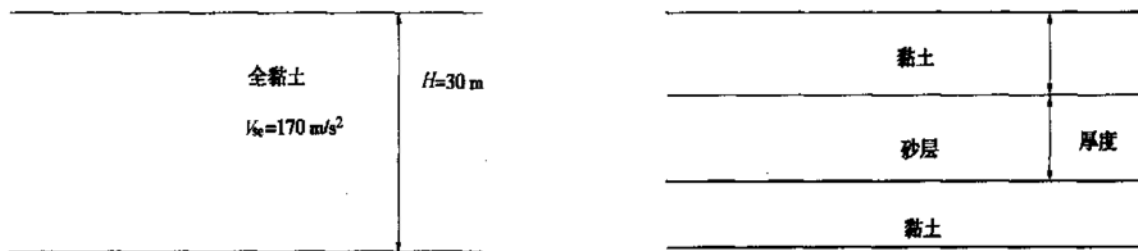


图 1 计算剖面示意图

Fig. 1 Profiles for calculation

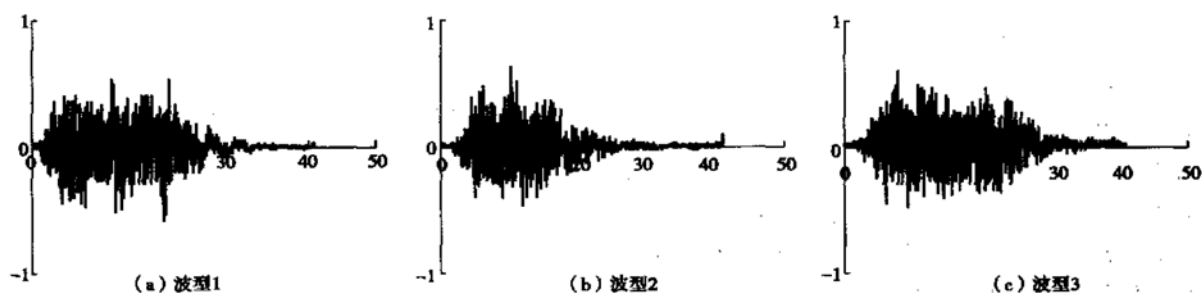


图 2 基岩输入人造加速度时程

Fig. 2 Artificial acceleration histories on rock base

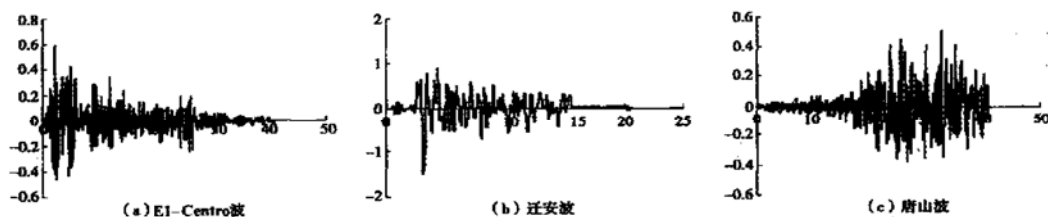


图 3 基岩输入地震加速度时程

Fig. 3 Earthquake acceleration histories on rock base

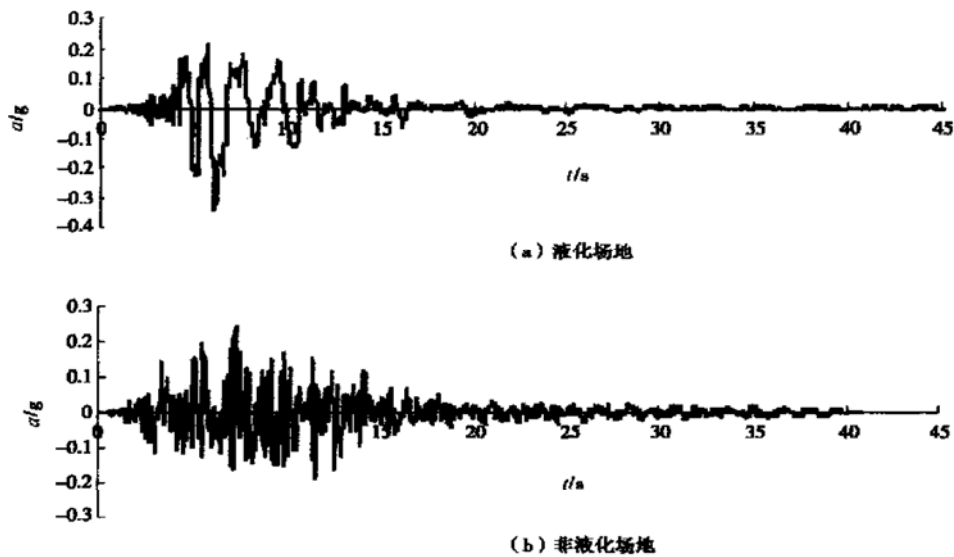


图 4 1995 年阪神地震液化场地和非液化场地上水平加速度时程

Fig. 4 Horizontal acceleration histories on the liquefied and non-liquefied sites during the Kobe Earthquake in 1995

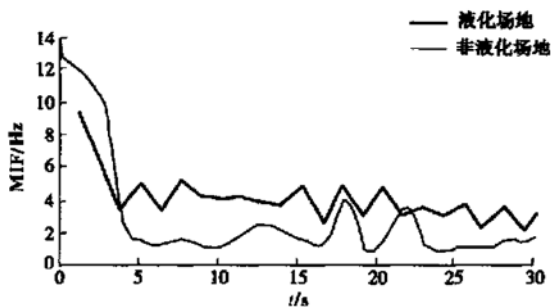


图 5 液化场地和非液化场地水平加速度时程的频率成分随时间进程的变化

Fig. 5 Time-dependent process of the frequency components of horizontal acceleration histories on the liquefied and non-liquefied sites

按一般经验取 $v_s = 122 + 3.7z$, 等效剪切波速为 170 m/s。计算中, 砂层厚度分别为 2, 4, 6 m 和 8 m, 埋深分别为 3, 5, 7 m 和 9 m。

分析中采用了人造波和实际地震记录两种地震波作用为输入波, 其中, 先由二类场地标准反应谱合成三条地表上的人造波, 然后通过上面的全黏土剖面将其反演至基岩后作为基岩输入波, 得到的基岩输入波如图 2 所示。三条地震记录示于图 3, 分别为 EL-Centro 波、迁安波和唐山波, 其中, 唐山波为振动型波, EL-Centro 波和迁安波为冲击型波。

计算中调整全黏土剖面的地表加速度取为 0.08 m/s^2 , 0.16 m/s^2 和 0.32 m/s^2 , 分别代表烈度为 7、8 和 9 度的情况, 以此为输入幅值, 计算含液化层的剖面。

2 地表水平加速度波型特征

2.1 实际地震记录分析

图 4 给出了 1995 年日本阪神大地震主震中, 在一

液化场地 (Port Island) 和另一非液化场地 (Kakogawa) 上记录到的地表水平加速度时程。从图 4 中可以看出, 液化前, 液化场地和非液化场地上的加速度记录的频率成分相差不多, 但液化后, 液化场地上加速度记录的频率成分发生了变化, 其高频成分明显减少, 长周期成分显著增加。但竖向加速度时程基本上没有这样的变化。

为进一步定量说明, 本文采用平均瞬时频率 MIF 来表示地表加速度的频率随时间的变化

$$\text{MIF}(t) = \frac{\int f P(t, f) df}{\int P(t, f) df}, \quad (1)$$

式中 $P(t, f)$ 为加速度时程在任一时间段内的功率谱, t 为时间, f 为频率, MIF 是任一时间段内加速度时程以频率为权的一个加权平均值, 为加速度时程按一定的间隔分成一系列的小段, 得到其每小段的平均瞬时频率, 则 MIF 可表示该时程频率成分随时间的变化关系。

上述液化场地与非液化场地的 MIF 曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 非液化场地加速度的频率在 4 s 以后有所下降, 这是地震动的一个普遍规律, 即地震开始时, 振动频率较高, 一段时间后, 振动频率有所下降。而液化场地上, 液化前加速度时程的频率也较高, 但液化 (5 s) 后, 液化场地加速度的频率出现明显下降。对比来看, 虽然非液化场地频率也出现下降, 但液化场地下降更为明显, 液化比非液化场地平均低 1 Hz 左右。因此, 从水平加速度时程频率成分随时间进程的变化看, 液化确实使得地震动频率显著降低。

2.2 理论计算分析

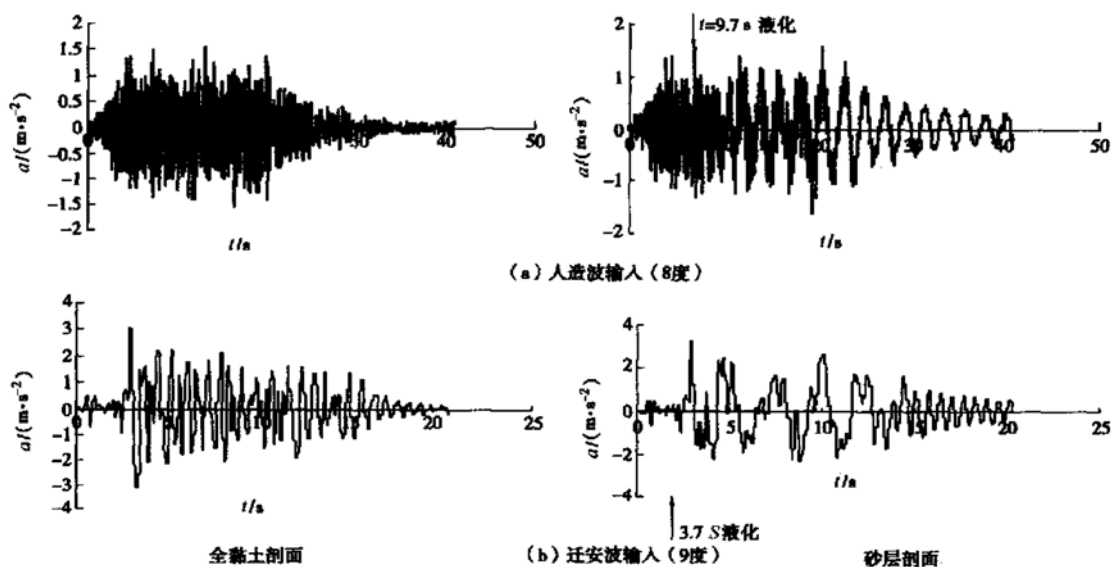


图6 人造波与迁安波输入下含液化层剖面与全黏土剖面地表加速度比较

Fig. 6 Comparison of surface acceleration histories with and without liquefiable profiles under the artificial and Qian waves

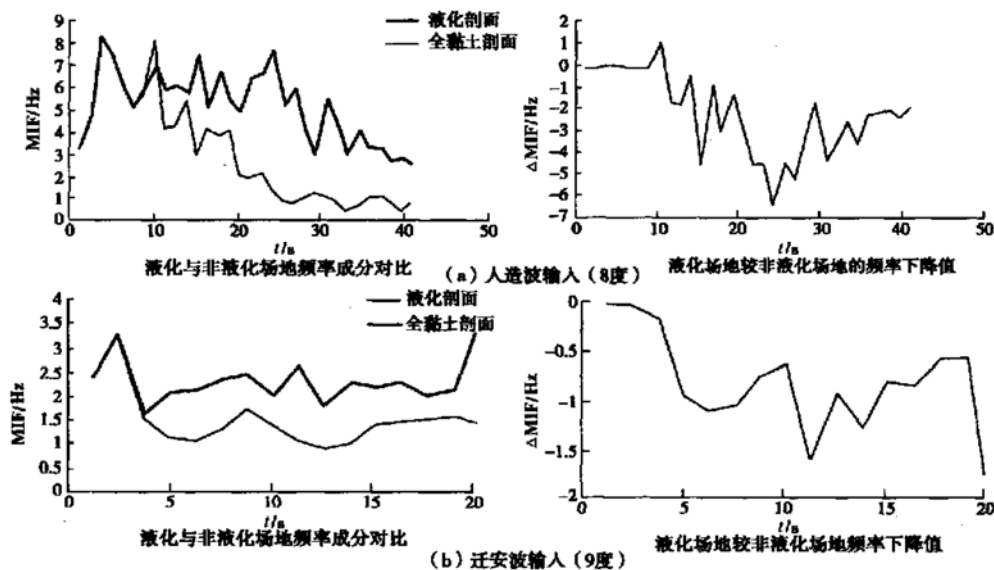


图7 人造波与迁安波输入下含液化层剖面与全黏土剖面地表加速度频率成分及差值随时间的变化

Fig. 7 Time-dependent process of the frequency components and their difference of surface acceleration histories with and without liquefiable profiles under the artificial and Qian waves

图6给出了在第一条人造地震动(烈度8度)和迁安波输入(烈度9度)下,全黏土与含砂层剖面地表水平加速度时程的对比,其中砂层埋深7 m,厚度为6 m。从图中可清楚地看到,液化后长周期分量明显增多,这与前面实际地震记录是相符合的。

图7为与图6对应的地表加速度的MIF随时间的变化曲线。其中,右图为全黏土层剖面频率与液化层剖面频率的差值 ΔMIF ,图中纵坐标零值表示频率没变化,负值则为频率降低,表示了液化场地较非液化场地频率下降的程度。由图中看出,无论人造波和迁安波输入,液化前两个剖面的频率成分几乎完全一致,但液化

(分别为 $t = 9.7\text{ s}$ 和 $t = 3.7\text{ s}$)后,液化剖面频率的下降十分明显,人造波输入时平均下降4 Hz,迁安波输入时平均下降1 Hz。

2.3 对地表加速度峰值的影响

从一般想法来看,液化会削减加速度的峰值。但是,到目前为止,还没有一个完整的可对比的实际地震记录,即液化场地上有加速度记录,同时在邻近的非液化场地上也能有同一次地震的加速度记录,以给出有力的对比证明。因此,液化对地表加速度峰值的影响还不能得到很确切的结论。从本文和以往的分析及试验结果看,中等地震下,液化削减加速度峰值的效果不

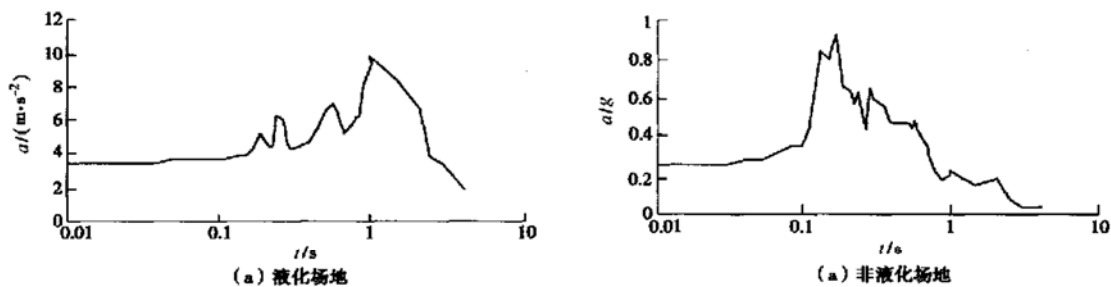


图8 阪神地震液化场地和非液化场地上水平加速度反应谱

Fig. 8 Response spectra of the horizontal accelerations on the liquefied and non-liquefied sites during the Kobe Earthquake

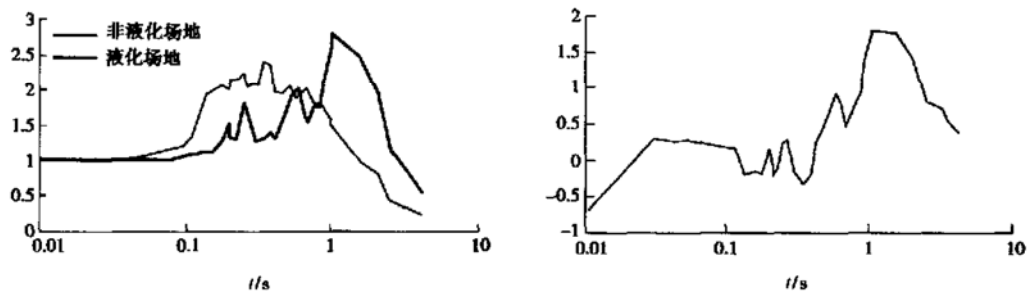


图9 阪神地震液化场地与非液化场地相对反应谱的比较

Fig. 9 Comparison of the relative response spectra on the liquefied and non-liquefied sites during the Kobe Earthquake

太显著,在强地震动下,液化会对加速度峰值体现出减震作用,J Yang 的实验也有类似的结果。另外,液化是否削减加速度峰值似乎与入射波型有很大关系,易对振动型地震波起到减震作用。但这些看法是初步的,因为液化对地震动中不同频段的作用不同,抑制高频但又同时放大低频,最终对加速度峰值的影响是一个很复杂的问题,有待更多的工作开展特别是实际记录的积累。

3 地表加速度反应谱特征

3.1 实际地震记录分析

阪神大地震中液化场地(Port Island)与非液化场地(Kakogawa)的加速度反应谱示于图8。从图8中可以看出,液化场地的卓越周期为1s,而非液化场地的卓越周期为0.18s左右,液化场地的反应谱较非液化场地上反应谱整体向长周期方向显著移动。

进一步,由于无法得到Port Island附近土层类型相似的非液化场地的地震记录,因此本文将震中距50km范围内非液化场地上的七条地震记录加速度相对反应谱做一平均,来减小由于场地条件所带来的误差,以此代表非液化场地相对反应谱。它与液化场地相对反应谱的比较结果示于图9,其中右图为左图中液化场地与非液化场地相对反应谱的差值,正值表示加震,负值表示减震(下同)。从图中可看出,0.8s左右是一个分界线,对于周期小于0.8s的频率成分,液化起到

了减小震动的作用,对于周期大于0.8s的频率成分,液化则起到了显著放大震动的作用。

3.2 理论计算分析

对于人造波输入情况下,图10给出了全黏土剖面与含液化层剖面地表加速度反应谱的比较,其中下图表示由于液化造成的反应谱加速度最大反应的增量 Δa 随周期的变化。需要说明的是,图中表示的是三条人造地震动作用下砂层不同厚度和埋深的一个平均结果。这样可以减少由于某一波型特性和特定砂层所带来的误差。

从图10结果同样看出,液化对于高频成分起到隔震作用,对于低频成分起到加重震害的作用,周期小于0.8s为减震,周期大于0.8s为加震,加震效应总体上大于减震效应。对于反应谱0.1~0.3s频段内,减震效果最明显。8度时,对于反应谱1.2~1.4s频段内加震最大,9度时,对于反应谱2.4~2.6s频段内加震最大。烈度越大,液化层的影响越明显。

同样,对地震波输入情况,为减少由于某一波型特性和特定砂层所带来的离散,将三条地震波作用下砂层不同厚度和埋深反应做一个平均。在8度和9度两种地震水平输入下,土层液化对地表加速度反应谱中纵坐标增量的影响绘于图11,其结果表明:周期0.8s左右仍为减震或加震的分界线,且加震效应仍明显大于减震效应。对于反应谱0.6~0.8s频段内,减震效果最明显,反应谱中1.5~1.7s频段加震最大。

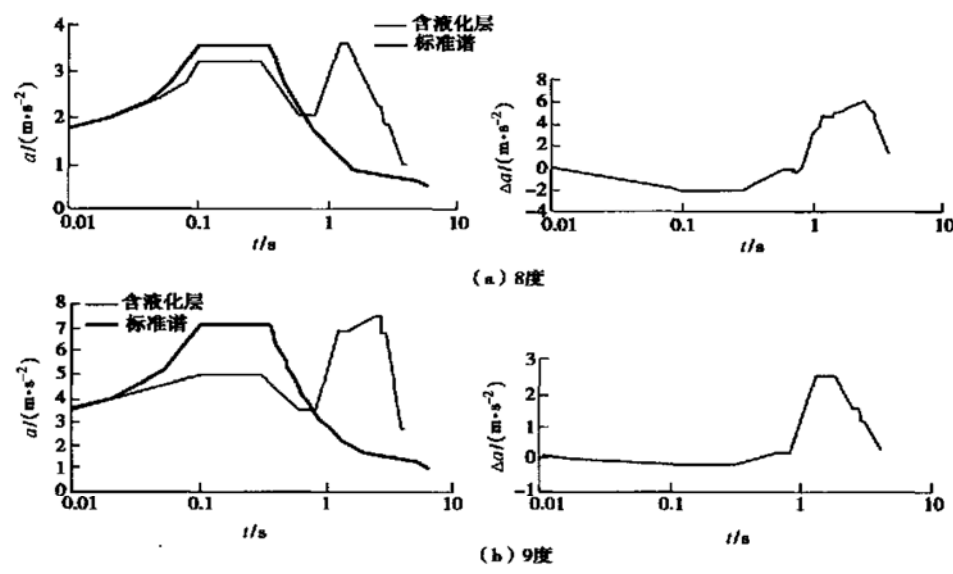


图 10 人造波输入下液化对反应谱的影响

Fig. 10 Effect of liquefaction on response spectra under the artificial waves

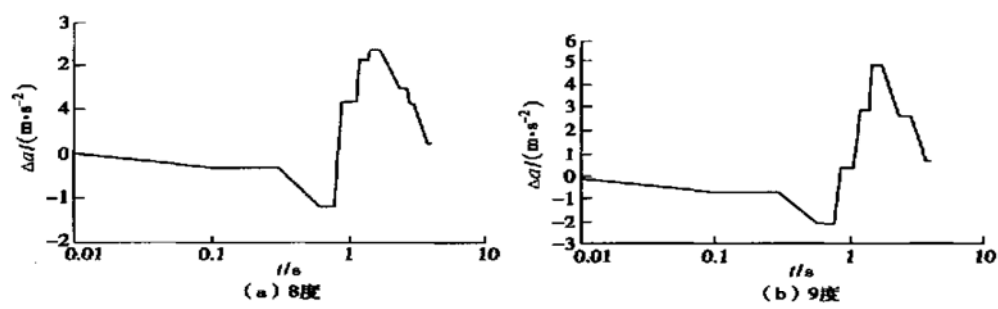


图 11 三种地震波作用下土层液化引起反应谱增量的平均变化

Fig. 11 The average increments of response spectra due to liquefaction under three earthquake waves

表 1 阪神地震中非液化场地加速度反应谱特征周期

Table 1 Characteristic periods of acceleration spectra on non- liquefied sites in Kobe earthquake

地震记录	KAKOGAWA	KJM	NISHIAKASHI	OSA	SHINOSAKA	TAKATORI	TAKARAZU	平均值
T_g (s)	0.339	0.449	0.331	0.499	0.722	0.946	0.45	0.533

表 2 理论计算与实际记录的加速度特征量的对比

Table 2 Comparison between calculated and recorded acceleration characteristics

特征量	ΔMIF (Hz)	加减震分 界线/s	最大减震/%			最大加震/%			$\Delta T_g/s$		
			8 度	9 度	平均	8 度	9 度	平均	8 度	9 度	平均
地震波输入	- 1	0.8	63	63	63	156	153	154	0.26	0.29	0.27
人造波输入	- 4	0.8	19	63	41	156	184	170	0.40	0.61	0.50
地震记录	- 1	0.8			100			150			0.65

4 对反应谱特征周期的影响

本文中, 加速度反应谱第 1 拐点周期按《建筑抗震设计规范》^[4]取常数 0.1 s, 加速度反应谱特征周期 T_g , 即第 2 拐点周期, 按双参数标定法取为^[8]

$$T_g = 4.44 \times (V_{\max}/A_{\max}), \tag{6}$$

式中 $V_{\max}$ 为峰值速度, $A_{\max}$ 为峰值加速度。

4.1 实际地震记录分析

为分析液化对于反应谱特征周期的影响, 将由阪神地震中 7 个非液化场地加速度记录计算出的特征周期见表 1。液化场地 Port Island 上的特征周期为 1.18 s, 则液化场地较非液化场地上特征周期要延长 0.65 s。

4.2 理论计算分析

计算结果表明, 对于人造波输入情况, 砂层的液化

使特征周期较全黏土时延长,大多延长 0.2 s 以上,8 度时平均延长 0.4 s,9 度时平均延长 0.6 s。也就是说,由于砂土液化的发生,使 II 类场地容易变为 IV 类场地。对于地震波输入情况,砂层液化使特征周期延长至少在 0.1 s 以上,8 度时平均延长 0.26 s,9 度时平均延长 0.29 s,即场地由于砂土液化由 II 类至少变为 III 类场地,或变为 IV 类场地。

5 地震记录与理论计算的对比

最理想的对比是对一实际液化场地及附近非液化场地同时进行计算,再同实际地震记录比较,但目前这方面客观条件不具备,只能从一般性的角度出发进行分析。将文中地震波输入、人造波输入下液化引起的地表加速度一些特征量变化与实际记录的分析结果,列于表 2,其中, ΔMIF 代表液化后 MIF 的平均衰减。由表看出:①液化后加速度时程频率成分的衰减,实际记录和计算结果是比较一致的,但人造波输入下要大一些,人造波输入时频率下降多的原因是人造波自身频率较高、频谱较宽、液化对其有更强的滤波作用所致;②加速度反应谱中加震减震的频率分界线是一样的,均为 0.8 s;③最大减震的幅度上,实际记录比理论计算结果要略大;④最大加震幅度相差不大;⑤特征周期的延长,实际记录要大于理论计算结果,地震波输入、人造波输入和实际记录三者的平均为 0.47 s,而实际记录为 0.65 s。

另外,综合对比结果,需要指出的是,对于自振周期小于 0.8 s 的结构,液化区有一定减震作用,但是,从振动角度,对于自振周期为 1~3 s 的高柔结构,液化场地却可能产生明显的加震效果,这一点值得注意。

6 结 论

本文通过理论计算和实际地震记录分析,分别从地震波波型、反应谱形状和特征周期三方面研究了砂土液化对水平地震动特征的影响。在基本的反应特征上,理论计算与实际地震记录分析结果定性上一致,某些定量指标上也相符,两者的结果都表明:

(1) 液化后,水平地震动的频率成分明显下降,但竖向地震动基本上没有变化,这可以作为从地震动时

程中判断液化的一个显著特征。

(2) 液化使水平地表加速度反应谱的特征周期延长至少在 0.1 s 以上,从特征周期角度,液化使 II 类场地至少变为 III 类场地,平均意义上容易变为 IV 类场地。

(3) 水平地表加速度反应谱中,0.8 s 左右是一个临界线,对于周期小于 0.8 s 的高频成分,液化使其反应有所减小,而对于周期大于 0.8 s 的低频成分,液化则使其反应明显增大,周期 1~3 s 是易出现反应显著放大的频段。

虽然文中理论计算取了较多工况,包括不同类型和不同幅值的地震波输入、不同埋深和不同厚度的可液化砂层等,实际地震记录分析结果也与理论计算有较强的一致性,但是毕竟客观情况要复杂得多,文中的结论还有待更多的研究,特别是更多的实际地震记录和土工实验的检验。

参考文献:

- [1] 李小军,彭青,等.不同类别场地地震动参数的计算分析[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):29-36.
- [2] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1988:251-289.
- [3] J Yang, T Sato, etc, Horizontal and vertical components of earthquake ground motion at liquefiable sites[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, (22): 229-240.
- [4] Kostadinov M V, Towhata I. Assessment of liquefaction-inducing peak ground velocity and frequency of horizontal ground shaking at onset of phenomenon[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, (22): 309-322.
- [5] Miyajima M, Kitaura M, etc. Detective method of liquefaction using strong ground motion records[A]. Proceedings of 3rd China-Japan-US trilateral Symposium on Lifeline Earthquake engineering, Kunming[C]. China, 1998. 133-140.
- [6] Nakayama W, Shimizu Y, etc. A new method to detect subsoil liquefaction using seismic records[A]. Proceedings of the 53rd Annual Conference of Japanese Society of Civil Engineers Vol. 1-B, JSCE, 1998. 862-863.
- [7] 建筑抗震设计规范(GB50011-2001). 2001, 北京.
- [8] 廖振鹏,李德华.设计地震反应谱的双参数标定模型,地震小区划(理论与实践)[M].北京:地震出版社,1989. 196-206.